

Istraživanje utjecaja glavnih izmjera i oblika pramčanog dijela broda na ukupni otpor

Tomić, Denis

Master's thesis / Diplomski rad

2015

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:235:771966>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-17**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Denis Tomić

Zagreb, 2015.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

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

Student:

Denis Tomić

Zagreb, 2015.

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

Zahvaljujem se mentorici prof. dr.sc. Nastiji Degiuli na odvojenom vremenu, podršci i ukazanom povjerenju.

Zahvaljujem se i Ivanu Muniću na pomoći pri izradi diplomskog rada.

Posebno se zahvaljujem svojim roditeljima koji su mi omogućili sve što sam dosad postigao te su me uvijek podržavali i bili uz mene.

Denis Tomić



Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Denis Tomić** Mat. br.:0035176813

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **ISTRAŽIVANJE UTJECAJA GLAVNIH IZMJERA I OBLIKA PRAMČANOG DIJELA BRODA NA UKUPNI OTPOR**
Naslov rada na engleskom jeziku: **INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF MAIN PARTICULARS AND FORE PART OF THE SHIP ON THE TOTAL RESISTANCE**
Opis zadatka:

Za vrijeme plovidbe brod izaziva poremećaje u svojem okolišu, vodi i zraku. Prilikom osnivanja novog broda potrebno je postići projektnu brzinu broda s najmanjom snagom porivnog stroja tj. projektirati brod s ciljem što manje potrošnje energije za savladavanje sile otpora. Variranjem glavnih izmjera broda moguće je odabrati optimalnu brodsku formu sa stajališta ukupnog otpora. To se može postići odgovarajućim proračunima i/ili eksperimentalnim ispitivanjima brodske forme. Uz silu otpora broda važno je poznavati i odziv broda na valovima odnosno njegove pomorstvene karakteristike. Obzirom da odziv broda na valovima može uzrokovati značajniji pad brzine, korisno je procijeniti pomorstvenost broda u fazi projektiranja broda.

Cilj ovog rada je istraživanje utjecaja glavnih izmjera i oblika pramčanog dijela broda na ukupni otpor.

U okviru diplomskog rada potrebno je:

1. Proučiti metode prognoze ukupnog otpora broda.
2. U prikladnom programskom paketu izraditi model broda u naravi te usporediti rezultate ukupnog otpora dobivene u odgovarajućem programskom paketu s rezultatima modelskih ispitivanja.
3. Za generirani model ispitati utjecaj glavnih izmjera broda na ukupni otpor u odgovarajućem programskom paketu.
4. Optimizirati formu generiranog modela promjenom oblika pramčanog dijela broda te provjeriti utjecaj na ukupni otpor u odgovarajućem programskom paketu.
5. Proračunati odziv optimalne forme modela na valovima u odgovarajućem programskom paketu.

U radu koristiti dostupne programske pakete.

Zadatak zadan:

7. svibnja 2015.

Rok predaje rada:

9. srpnja 2015.

Predviđeni datumi obrane:

15., 16. i 17. srpnja 2015.

Zadatak zadao:

Nastja Degiuli
Prof. dr. sc. Nastja Degiuli

Predsjednica Povjerenstva:

Nastja Degiuli
Prof. dr. sc. Nastja Degiuli

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA	VII
SAŽETAK.....	X
SUMMARY	XI
1. UVOD.....	1
2. OTPOR I PROPULZIJA BRODA	2
2.1. Općenito	2
2.2. Raščlana otpora	3
2.2.1. Vrste otpora.....	3
2.2.2. Dodatne komponente otpora	7
2.3. Prognoza ukupnog otpora u fazi projektiranja	7
2.3.1. Obrada podataka otpora broda	8
3. MODELSKA ISPITIVANJA	9
3.1. Općenito	9
3.2. Laboratorij za ispitivanje hidrodinamičkih značajki broda.....	10
3.3. Provođenje modelskih ispitivanja u laboratoriju	10
3.3.1. Zakoni sličnosti	10
3.3.2. Sustav brodskih valova	11
3.4. Ispitivanje strujanja oko brodskog trupa	13
3.4.1. Određivanje strujnica bojom	13
3.4.2. Određivanje strujnica nitima	13
4. EKSPERIMENTALNO ODREĐIVANJE UKUPNOG OTPORA	15
4.1. Podatci o postojećoj formi i rezultati ukupnog otpora	17
5. HOLTROP METODA PREDVIĐANJA UKUPNOG OTPORA BRODA.....	25
5.1. Princip proračuna ukupnog otpora prema metodi Holtrop	25
5.2. Izvori pogrešaka u rezultatima ukupnog otpora dobivenih Holtrop metodom	33
5.2.1. Utjecaj brzine broda na određivanje faktora forme k	33
5.2.2. Utjecaj pramčanog bulba na rezultate dobivene metodom predviđanja	35
5.3. Rezultati ukupnog otpora postojeće forme dobiveni metodom Holtrop u programu Excel preko glavnih parametara forme	36
6. ANALIZA UKUPNOG OTPORA POSTOJEĆE FORME U PRIKLADNOM PROGRAMSKOM PAKETU	39
6.1. Generirani model postojeće forme u programskom paketu <i>Rhinoceros 5.0</i>	39
6.2. Analiza ukupnog otpora postojeće forme simulacijom u programskom paketu <i>Maxsurf Resistance</i>	40
6.2.1. Općenito o programskom paketu <i>Maxsurf Resistance</i>	40
6.3. Rezultati ukupnog otpora postojeće forme dobiveni simulacijom u programskom paketu <i>Maxsurf Resistance</i>	42

6.3.1.	Rezultati ukupnog otpora za stanje potpuno nakrcanog broda	42
6.3.2.	Rezultati ukupnog otpora za stanje projektnog gaza	45
7.	ISTRAŽIVANJE UTJECAJA GLAVNIH IZMJERA BRODA NA UKUPNI OTPOR ..	48
7.1.	Princip afine transformacije forme	48
7.2.	Rezultati ukupnog otpora formi dobivenih afinom transformacijom postojeće forme ...	50
8.	PRAMČANI BULB	58
8.1.	Općenito o pramčanom bulbu	58
8.2.	Utjecaj pramčanog bulba na ukupni otpor broda	60
9.	ISTRAŽIVANJE UTJECAJA OBLIKA PRAMČANOG DIJELA BRODA NA UKUPNI OTPOR	62
9.1.	Generirani model forme s eliptičnim bulbom u programskom paketu <i>Rhinoceros</i> ...	62
9.2.	Rezultati ukupnog otpora forme s eliptičnim bulbom za stanje projektnog gaza	63
9.3.	Rezultati ukupnog otpora formi s eliptičnim bulbom dobivenih afinom transformacijom početne forme s eliptičnim bulbom	67
9.4.	Generirani model forme s Δ -tip bulbom u programskom paketu <i>Rhinoceros</i>	75
9.5.	Rezultati ukupnog otpora forme s Δ -tip bulbom za stanje projektnog gaza	77
9.6.	Rezultati ukupnog otpora formi s Δ -tip bulbom dobivenih afinom transformacijom početne forme s Δ -tip bulbom	80
10.	ODZIV I DODATNI OTPOR POSTOJEĆE FORME I OPTIMIZIRANIH FORMI NA VALOVIMA	88
10.1.	Njihanja broda na valovima	88
10.2.	Frekvencija i kut susretanja valova	91
10.3.	Prijenosna funkcija	91
10.4.	Dodatni otpor na valovima	92
10.5.	Teorija potencijalnog strujanja	93
10.6.	Priprema podataka za analizu u programskom paketu <i>HydroSTAR</i>	94
10.7.	Odziv postojeće forme i optimalne forme na pravilnim valovima	96
10.8.	Dodatna sila otpora na valovima	98
11.	ZAKLJUČAK	100
	LITERATURA	102

POPIS SLIKA

Slika 1.	Stupnjevi slobode prilikom gibanja broda.....	9
Slika 2.	Promjena tlaka duž trupa i početna deformacija slobodne površine uslijed gibanja broda.....	11
Slika 3.	Shematski prikaz pramčanog i krmenog sustava valova.....	12
Slika 4.	Model s ucrtanom mrežom kontura teoretskih rebara, vodnih linija i uzdužnica i s nanesenim slojevima boje	13
Slika 5.	Shematski prikaz krmenog dijela broda s pribadačama i nitima za određivanje strujnica	14
Slika 6.	Model broda opremljen za pokus otpora.....	15
Slika 7.	Aproksimacija diskretnih vrijednosti koeficijenta ukupnog otpora	20
Slika 8.	Koeficijent ukupnog otpora modela C_{TM} , koeficijent otpora trenja modela C_{FM} i koeficijent preostalog otpora C_R kao funkcija u ovisnosti o Froudeovom broju... ..	22
Slika 9.	Sila otpora broda i efektivna snaga u ovisnosti o brzini broda u čvorovima	24
Slika 10.	Različiti oblici krme	27
Slika 11.	Usporedba krivulje ukupnog otpora dobivene modelskim ispitivanjima sa krivuljom ukupnog otpora dobivene proračunom	38
Slika 12.	Nacrt rebara postojeće forme	39
Slika 13.	Nacrt rebara postojeće forme u programskom paketu <i>Rhinoceros</i>	39
Slika 14.	3D generirani model postojeće forme	40
Slika 15.	Usporedba krivulja ukupnog otpora modelskih ispitivanja i krivulje ukupnog otpora dobivene simulacijom u programskom paketu <i>Maxsurf Resistance</i> za stanje potpuno nakrcanog broda	44
Slika 16.	Areala rebara postojeće forme za stanje potpuno nakrcanog broda.....	44
Slika 17.	Usporedba krivulje ukupnog otpora dobivene modelskim ispitivanjima i krivulje ukupnog otpora dobivene simulacijom u programskom paketu <i>Maxsurf Resistance</i> za stanje projektnog gaza	47
Slika 18.	Areala rebara postojeće forme za stanje projektnog gaza	47
Slika 19.	Grafički prikaz krivulja ukupnog otpora postojeće forme, forme s povećanim ukupnim otporom i forme sa smanjenim ukupnim otporom.....	57
Slika 20.	Tipovi pramčanim bulbova	59
Slika 21.	Parametri bulba.....	59
Slika 22.	Valni profil - za formu s bulbom i za formu bez bulba pri $Fn = 0,1267$, [7]	60
Slika 23.	Nacrt rebara postojeće forme	62
Slika 24.	Nacrt rebara modela s eliptičnim bulbom u programskom paketu <i>Rhinoceros</i>	62
Slika 25.	3D model trupa s eliptičnim bulbom.....	63
Slika 26.	Usporedba krivulje ukupnog otpora dobivene modelskim ispitivanjem i krivulje ukupnog otpora dobivene simulacijom u programskom paketu <i>Maxsurf Resistance</i> za stanje projektnog gaza	66
Slika 27.	Areala rebara forme s eliptičnim bulbom za stanje projektnog gaza	66
Slika 28.	Krivulje ukupnog otpora postojeće forme, forme s eliptičnim bulbom i optimalnih formi s eliptičnim bulbom	74
Slika 29.	Nacrt rebara postojeće forme	75
Slika 30.	Nacrt rebara modela s Δ -tip bulbom u programskom paketu <i>Rhinoceros</i>	75
Slika 31.	3D model trupa s Δ -tip bulbom	76

Slika 32.	Usporedba krivulje ukupnog otpora forme s Δ -tip bulbom s krivuljom ukupnog otpora postojeće forme dobivene simulacijom u programskom paketu <i>Maxsurf Resistance</i> za stanje projektog gaza	79
Slika 33.	Areala rebara forme s Δ -tip bulbom izmjerena za stanje projektog gaza.....	79
Slika 34.	Krivulje ukupnog otpora postojeće forme, forme sa Δ -tip bulbom i optimalnih formi s Δ -tip bulbom	87
Slika 35.	Kut susretanja valova i položaj broda prema valovima	91
Slika 36.	Mreža panela za trup postojeće forme.....	95
Slika 37.	Prijenosne funkcije pomaka za poniranje.....	96
Slika 38.	Prijenosne funkcije pomaka za posrtanje	97
Slika 39.	Usporedba izračunatih vrijednosti koeficijenata dodatnog otpora na valovima ...	98

POPIS TABLICA

Tablica 1. Model broda M - 1161B – Projektno stanje krcanja [2].....	17
Tablica 2. Stanje modela [2].....	17
Tablica 3. Stanje vode u bazenu [2]	17
Tablica 4. Sile otpora modela i pripadajući koeficijenti otpora [2].....	18
Tablica 5. Točnost mjerenja podataka o koeficijentu otpora trenja [2].....	19
Tablica 6. Koeficijenti otpora modela [2]	21
Tablica 7. Vrijednosti za brod [2].....	23
Tablica 8. Ukupni otpor, efektivna snaga, i Froudeov bezdimenzijski koeficijent otpora za brod u naravi [2]	23
Tablica 9. Karakteristike raspona parametara različitih tipova brodova	26
Tablica 10. Koeficijenti oblika krme.....	27
Tablica 11. Približne vrijednosti koeficijenta $(1 + k_2)$	29
Tablica 12. Ulazni parametri proračuna	36
Tablica 13. Vrijednosti pojedinih komponenata ukupnog otpora broda	37
Tablica 14. Vrijednosti ukupnog otpora broda i efektivne snage za zadani raspon brzina	37
Tablica 15. Rezultati i relativna pogreška parametara forme dobivenih simulacijom u programu <i>Maxsurf Resistance</i> za stanje potpuno nakrcanog broda	42
Tablica 16. Rezultati i relativna pogreška ukupnog otpora za stanje potpuno nakrcanog broda ..	43
Tablica 17. Rezultati i relativna pogreška parametara forme dobivenih simulacijom u programskom paketu <i>Maxsurf Resistance</i> za stanje projektnog gaza	45
Tablica 18. Rezultati i relativna pogreška ukupnog otpora za stanje projektnog gaza	46
Tablica 19. Kombinacije promjene parametara duljine i gaza postojeće forme	49
Tablica 20. Afine transformacije parametara postojeće forme	50
Tablica 21. Parametri novih formi broda dobiveni afinom transformacijom postojeće forme	51
Tablica 22. Relativno odstupanje parametara novih formi dobivenih afinom transformacijom postojeće forme u %	52
Tablica 23. Rezultati ukupnog otpora novih formi (1 do 5) dobivenih afinom transformacijom s pripadajućim relativnim odstupanjem novih formi	53
Tablica 24. Rezultati ukupnog otpora novih formi (6 do 10) dobivenih afinom transformacijom s pripadajućim relativnim odstupanjem novih formi	54
Tablica 25. Rezultati ukupnog otpora novih formi (11 do 15) dobivenih afinom transformacijom s pripadajućim relativnim odstupanjem novih formi	55
Tablica 26. Rezultati ukupnog otpora novih formi (16 do 21) dobivenih afinom transformacijom s pripadajućim relativnim odstupanjem novih formi	56
Tablica 27. Rezultati i relativno odstupanje parametara forme s eliptičnim bulbom dobivenih simulacijom u programskom paketu <i>Maxsurf Resistance</i> za stanje projektnog gaza.	64
Tablica 28. Rezultati i relativno odstupanje ukupnog otpora forme s eliptičnim bulbom za stanje projektnog gaza	65
Tablica 29. Afine transformacije parametara forme s eliptičnim bulbom	67
Tablica 30. Parametri novih formi broda dobiveni afinom transformacijom forme s eliptičnim bulbom.....	68
Tablica 31. Relativno odstupanje parametara novih formi dobivenih afinom transformacijom forme s eliptičnim bulbom u %	69

Tablica 32. Rezultati ukupnog otpora novih formi s eliptičnim bulbom (1 do 5) dobivenih afinom transformacijom sa pripadajućim relativnim odstupanjem od ukupnog otpora postojeće forme	70
Tablica 33. Rezultati ukupnog otpora novih formi s eliptičnim bulbom (6 do 10) dobivenih afinom transformacijom sa pripadajućim relativnim odstupanjem od ukupnog otpora postojeće forme	71
Tablica 34. Rezultati ukupnog otpora novih formi s eliptičnim bulbom (11 do 15) dobivenih afinom transformacijom sa pripadajućim relativnim odstupanjem od ukupnog otpora postojeće forme	72
Tablica 35. Rezultati ukupnog otpora novih formi s eliptičnim bulbom (16 do 21) dobivenih afinom transformacijom sa pripadajućim relativnim odstupanjem od ukupnog otpora postojeće forme	73
Tablica 36. Rezultati i relativno odstupanje parametara forme s Δ -tip bulbom dobiveni simulacijom u programskom paketu <i>Maxsurf Resistance</i> za stanje projektnog gaza. 77	
Tablica 37. Rezultati i relativno odstupanje ukupnog otpora forme s Δ -tip bulbom za stanje projektnog gaza	78
Tablica 38. Afine transformacije parametara forme s Δ -tip bulbom.....	80
Tablica 39. Parametri novih formi broda dobiveni afinom transformacijom forme s Δ -tip bulbom.....	81
Tablica 40. Relativno odstupanje parametara novih formi dobivenih afinom transformacijom forme s Δ -tip bulbom u %.....	82
Tablica 41. Rezultati ukupnog otpora novih formi s Δ -tip bulbom (1 do 5) dobivenih afinom transformacijom sa pripadajućim relativnim odstupanjem od ukupnog otpora postojeće forme	83
Tablica 42. Rezultati ukupnog otpora novih formi s Δ -tip bulbom (6 do 10) dobivenih afinom transformacijom sa pripadajućim relativnim odstupanjem od ukupnog otpora postojeće forme	84
Tablica 43. Rezultati ukupnog otpora novih formi s Δ -tip bulbom (11 do 15) dobivenih afinom transformacijom sa pripadajućim relativnim odstupanjem od ukupnog otpora postojeće forme	85
Tablica 44. Rezultati ukupnog otpora novih formi s Δ -tip bulbom (16 do 21) dobivenih afinom transformacijom sa pripadajućim relativnim odstupanjem od ukupnog otpora postojeće forme	86

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
v	m/s	brzina broda
ρ	kg/m ³	gustoća morske vode
μ	kg/ms	dinamički koeficijent viskoznosti
g	m/s ²	ubrzanje zemljine sile teže
Re	-	Reynoldsov broj
Fr	-	Froudeov broj
S	m ²	oplakana površina
τ_0	N/m ²	tangencijalno naprezanje
p	Pa	hidrodinamički tlak
R_T	N	ukupni otpor broda
R_F	N	otpor trenja
R_P	N	otpor tlaka
R_V	N	viskozni otpor
R_W	N	otpor valova
R_{PV}	N	viskozni otpor tlaka
C_T	-	koeficijent ukupnog otpora
C_F	-	koeficijent otpora trenja
C_V	-	koeficijent viskoznog otpora
C_P	-	koeficijent otpora tlaka
C_{pv}	-	koeficijent viskoznog otpora tlaka
C_W	-	koeficijent otpora valova
C_B	-	koeficijent punoće broda
R_{AP}	N	otpor privjesaka
R_{AR}	N	otpor hrapavosti oplate
R_{AA}	N	otpor zraka i vjetra
L	m	duljina broda
L_M	m	duljina modela broda
λ	-	mjerilo geometrijske sličnosti
C_{TM}	-	koeficijent ukupnog otpora modela
R_{TM}	N	ukupni otpor modela broda
ρ_{FW}	kg/m ³	gustoća slatke vode
v_M	m/s	brzina modela broda
S_M	m ²	oplakana površina modela
C_R	-	koeficijent preostalog otpora
C_{FM}	-	koeficijent otpora trenja modela

ΔC_T	-	ukupni korelacijski dodatak
\odot	-	bezdimenzijski koeficijent otpora
L_{WL}	m	duljina vodne linije
T_F	m	gaz na pramcu broda
T_A	m	gaz na krmi broda
L_{PP}	m	duljina broda između okomica
S_M'	m ²	oplakana površina golog trupa
V	m ³	volumen istisnine
t	°	temperatura vode
ν	Pas	kinematička viskoznost vode
P_E	W	efektivna snaga borda
R_B	N	dodatni otpor zbog pramčanog bulba u blizini slobodne površine
R_{TR}	N	dodatni otpor oblika uronjenog krmenog zrcala
R_A	N	korelacijski otpor
k_1	-	faktor forme
B	m	širina broda
L_R	m	duljina krmenog zaoštrenja
C_P	-	prizmatični koeficijent
lcb	m	uzdužni položaj težišta istisnine
T	m	prosječni projektni gaz
C_{krma}	-	koeficijent oblika krme
C_M	-	koeficijent glavnog rebra
C_{WP}	-	koeficijent površine vodne linije
A_{BT}	m ²	poprečna površina bulba
Fn_T	-	Froudeov broj temeljen na uronjenom zrcalu
S_{AP}	m ²	oplakana površina izdanaka
k_2	-	faktor otpora privjesaka
D	m	promjer tunela
A_T	m ²	uronjena površina krmenog zrcala
i_E	°	upadni kut vodne linije
h_B	m	vertikalni položaj težišta površine a_{bt}
p_B	-	koeficijent izranjanja pramca
Fn_i	-	Froudeov broj temeljen na izranjanju
A_X	m ²	maksimalni presjek broda
Φ_0	m ² s	funkcija potencijala brzine strujanja nailaznog vala
Φ_7	m ² s	funkcija potencijala brzine strujanja difrakcijskog vala
[M]	kg	matrica mase tijela i momenata tromosti mase
[A]	kg, kgm, kgm ²	matrica dodatne mase

[B]	kg/s, kgm/s, kgm ² /s	matrica prigušenja
[C]	kg/s ² , kgm/s ² , kgm ² /s ²	matrica povratnih sila
ζ_a	m	jedinična valna amplituda
F_j	N	uzbudna sila
H_{R_a}	m/m, °/m	prijenosna funkcija
R_a	m	amplituda odziva
k	-	valni broj
ω_e	rad/s	susretna frekvencija
ω	rad/s	frekvencija valova
U	m/s	brzina napredovanja broda
β	°	kut nailaska valova
Φ_w	m ² s	potencijal brzine vala
d	m	dubina vode
η	m	vrijednost amplitude njihanja
F_{ij}'	N	sila zanošenja
λ/L	-	omjer valne duljine i duljine broda
$\overline{R_{AW}}$	N	srednja vrijednost sile dodatnog otpora
$S_\zeta(\omega)$	m ² s	spektar odziva
R_{AW}	N	sila dodatnog otpora

SAŽETAK

Cilj ovog rada je istraživanje utjecaja glavnih izmjera i oblika pramčanog dijela broda na ukupni otpor. Tijekom plovidbe brod izaziva poremećaje u svojem okolišu, vodi i zraku. Prilikom osnivanja novog broda potrebno je postići projektnu brzinu broda s najmanjom snagom porivnog stroja tj. projektirati brod s ciljem što manje potrošnje energije za savladavanje sile otpora. Izmjenom glavnih izmjera broda moguće je odabrati optimalnu brodsku formu sa stajališta ukupnog otpora. To se može postići odgovarajućim proračunima i eksperimentalnim ispitivanjima brodske forme. Budući da su eksperimentalna ispitivanja vrlo skupa potrebno je provesti što kvalitetniju analizu forme u fazi predprojekta.

U radu je prikazan utjecaj glavnih izmjera broda na ukupni otpor. Da bi se istraživanje moglo provesti generiran je model broda u prikladnom programskom paketu, te su rezultati ukupnog otpora dobiveni simulacijom uspoređeni s rezultatima modelskih ispitivanja. Potom je postojeća forma generiranog modela optimizirana promjenom oblika pramčanog dijela broda te je ispitan utjecaj na ukupni otpor. Proračun ukupnog otpora temelji se na metodi Holtrop.

Uz silu otpora broda važno je poznavati i odziv broda na valovima odnosno njegove pomorstvene karakteristike. Obzirom da odziv broda na valovima može uzrokovati značajniji pad brzine, potrebno je procijeniti pomorstvene karakteristike broda u fazi projektiranja broda. U radu je dan odziv optimalne forme modela broda na valovima u prikladnom programskom paketu te uspoređen s odzivom postojeće generirane forme.

Ključne riječi: *ukupni otpor, optimalne forme, pramčani bulb, Holtrop, odziv broda, dodatni otpor*

SUMMARY

The aim of this paper is the investigation of the influence of main ship particulars and fore part of the ship on the total resistance. During the sail ship causes disturbances in water and air. In design process of a new vessel it is necessary to obtain the design speed of the ship while achieving low energy consumption to overcome the total resistance force. By changing the main ship particulars it is possible to select the optimal ship form from the standpoint of the total resistance. This can be achieved by using adequate calculations and experimental trials of different ship forms. Since the experimental trials are very expensive it is necessary to carry out the best possible analysis of the ship forms during the design stage.

The paper deals with the influence of the main ship particulars on the total resistance. In order to perform investigation it was necessary to generate a ship model in a suitable software package. The results of the total resistance are obtained by simulation and are compared with the results of experimental trials. Furthermore the current form of the generated model is optimized by changing the shape of the fore part of the ship and the results of the influence of the fore part on the total resistance are presented. Calculation of the total resistance is based on the Holtrop method.

Beside the total resistance force it is also important to know the ship response to waves, i.e. seakeeping characteristics. Since the ship response to waves can cause a significant reduction in speed it is necessarily to assess the seakeeping characteristics of a ship during the design stage. Response of the optimal ship form to waves is made in appropriate software package and results are compared with the response of the existing generated ship form.

Key words: total resistance, optimal ship form, bulbous bow, Holtrop, ship response, added resistance

1. UVOD

Osim modelskih ispitivanja postoji niz načina za analizu ukupnog otpora broda. Među najkorištenijim načinima su numeričke metode. Cilj ovog rada je proučiti prikladnu metodu proračuna za analizu ukupnog otpora već u fazi predprojekta, te provjeriti utjecaj glavnih izmjera broda i pramčanog oblika broda na ukupni otpor.

Istraživanje utjecaja glavnih izmjera broda i pramčanog oblika broda na rezultat ukupnog otpora temelji se na izradi modela broda te izračunu ukupnog otpora generiranog modela u prikladnim programskim paketima. Zbog rastuće potrebe za očuvanjem okoliša u brodogradnji donesene su zakonske mjere na svjetskoj i državnoj razini. Zakonske mjere se odnose na ograničenje emisije štetnih plinova koje je donijela IMO organizacija (eng. *International Maritime Organization*). Kako bi se doskočilo trenutnim ograničenjima emisije plinova CO₂ donesen je indeks energetske učinkovitosti EEDI (eng. *Energy Efficiency Design Indeks*). EEDI indeks je razvijen kao mjera određivanja korisnosti projekta novog broda u smislu smanjenja emisije štetnih plinova. Bitan aspekt u zadovoljavanju indeksa energetske učinkovitosti temelji se na optimizaciji brodskog trupa kako bi se zadovoljili uvjeti plovidbe na moru. U proteklim godinama projektanti su uložili značajno vrijeme i trud u razradu optimalnog trupa pri plovidbi na mirnom moru. Zbog toga može se zaključiti da nema mnogo prostora za daljnje unaprjeđenje, no iskustva koja su dobivena modelskim ispitivanjima u MARINTEK (eng. *The Norwegian Marine Technology Research Institute*) indiciraju da smanjenje snage reda veličine 20% može donijeti značajnija smanjenja emisije štetnih plinova primjenjujući vrlo male promjene oblika pramca ili krme. To dovodi do zaključka da pravilnim oblikovanjem brodskog trupa možemo smanjiti ukupni otpor broda, a samim time i potrebnu snagu koja je povezana sa emisijom štetnih plinova [1].

Model broda je odabran prema dostupnim podacima o rezultatima otpora [2]. Tip izabranog broda je tanker za prijevoz naftnih derivata. Model broda generiran je u programskom paketu *Rhinoceros* [3], dok je simulacija proračuna ukupnog otpora izvršena u programskom paketu *Maxsurf Resistance* [4]. Usporedba rezultata ukupnog otpora i parametara forme izvršena je prema dostupnim rezultatima modelskih ispitivanja postojeće forme. Proračun ukupnog otpora temelji se na metodi Holtrop [6]. Potom će se ustanoviti i utjecaj glavnih izmjera broda i pramčanog oblika broda na odziv broda na valovima kao i na dodatnu silu otpora valova u programu *HydroSTAR* [5].

2. OTPOR I PROPULZIJA BRODA

2.1. Općenito

Otpor se bavi pojavama u vodi pri jednolikom pravocrtnom gibanju broda, dok se propulzija bavi osiguravanjem potrebnog poriva za zadane uvjete plovidbe.

Za vrijeme plovidbe brod izaziva poremećaje u svojem okolišu, vodi i zraku. Zadatak inženjera brodogradnje prilikom osnivanja novog broda je postizanje tražene brzine broda s najmanjom snagom strojeva tj. projektirati brod i propulzijski sustav u smislu što manje potrošnje energije za savladavanje sile otpora. U konačnici to se svodi na kombinaciju niskog otpora i najvećeg mogućeg stupnja propulzije. To se postiže pravilnim ispitivanjima brodske forme i sustava propulzije. Drugi bitan hidrodinamički faktor su dobra svojstva na mirnom moru kod prosječnih uvjeta plovidbe, dok kod loših i ekstremnih uvjeta plovidbe zahtjeva se da brod ne gubi na brzini više nego što je to neophodno.

Propulzijski sustav (brodski trup, propulzor i pogonski stroj) mora biti uravnotežena cjelina što znači da svaki dio cjeline mora biti podešen jedan prema drugome. U konačnici to daje visok stupanj iskoristivosti, a to vodi prema manjem utrošku energije za savladavanje uvjeta plovidbe i sigurno obavljanje zadaće broda kao proizvoda.

Hidrodinamika broda kao grana brodogradnje pokušava pronaći optimalno rješenje forme broskog trupa i propulzijskog sustava. Temeljne metode za određivanje tih značajki su [7]:

- empiričko/statističke metode (sustavne serije, statistički obrađeni podaci izmjereni u naravi),
- eksperimentalne metode
 - ispitivanje fizičkih (materijalnih modela),
 - mjerenja na brodovima u naravi,
- numeričke metode (eng. CFD – *Computational Fluid Dynamics*) – numerički modeli.

Kombinacija eksperimentalnih i numeričkih metoda te rezultata mjerenja u naravi najbolji je put za osnivanje kvalitetne brodske forme i dobivanje pouzdanih prognoza hidrodinamičkih značajki novog broda.

2.2. Raščlana otpora

Ukupni otpor R_T bilo kojeg tijela koje se giba na površini vode složena je funkcija:

- geometrije tijela,
- brzine gibanja tijela, v ,
- svojstava tekućine: ρ - gustoća vode, μ - dinamički koeficijent viskoznosti,
- ubrzanje zemljine sile teže, g .

Odnosno:

$$R_T = f(\text{geometrija tijela}, v, \rho, \mu, g) \quad (1)$$

Kada je riječ o otporu broda gornja funkcija poprima oblik:

$$R_T = C_T(\text{geometrija broda}, Rn, Fn) \frac{1}{2} \rho v^2 S \quad (2)$$

gdje je :

C_T – koeficijent ukupnog otpora broda ovisan o:

- geometriji broda,
- Reynoldsovom broju $Rn = \frac{vL}{\nu}$ (3)

- Froudeovom broju $Fn = \frac{v}{\sqrt{gL}}$ (4)

S – oplakana površina.

Pretpostavimo li da je geometrija trupa broda poznata jednadžba (2) poprima oblik:

$$R_T = C_T(Rn, Fn) \frac{1}{2} \rho v^2 S \quad (5)$$

Zbog složenosti funkcije R_T potrebno je otpor broda raščlaniti na komponente, odnosno pojedine vrste otpora. To je nužno kako za teorijska tako i za eksperimentalno određivanje otpora broda.

2.2.1. Vrste otpora

Ukupni otpor sastoji se od nekoliko komponenti čiji su uzroci vrlo raznoliki, međutim uzajamno djelovanje pojedinih komponenti ukupnog otpora predstavlja vrlo kompleksan

problem. Zbog toga je potrebno najprije raščlaniti ukupni otpor broda u mirnoj vodi na sljedeći način [8]:

- a) Otpor trenja nastaje zbog gibanja broda kao cjeline kroz viskozni fluid.
- b) Otpor valova nastaje zbog formiranja sustava valova na površini mirne vode koji su posljedica promjene hidrodinamičkog tlaka uzduž brodskog trupa.
- c) Otpor vrtloženja nastaje stvaranjem vrtloga na trupu broda i njegovim privjescima. Lokalno vrtloženje javlja se iza privjesaka kao što su nogavice, osovine i skrokovi. Lokalno vrtloženje također se može pojaviti na krmenom dijelu trupa ili kormilu ako na tim mjestima nije postignuto dobro opstrujavanje trupa tj. dobro poravnanje sa strujanjem. Također, ako je krmeno zaoštrenje premalo, voda neće moći pratiti zakrivljenje na krmenom dijelu broda što će rezultirati stvaranjem vrtloga te povećanjem otpora uslijed odvajanja graničnog sloja.
- d) Otpor zraka nastaje gibanjem nadvodnog dijela broda zrakom. Ovaj otpor može predstavljati vrlo značajan dio ukupnog otpora pogotovo ako se radi o brodovima koji se gibaju većom brzinom i koji imaju veće nadgrađe. Zbog toga je kod brodova za kontejnere o tome potrebno posebno voditi računa budući da je otpor zraka veći što je veći broj redova kontejnera složenih na palubi. Naravno, isto vrijedi i za ro-ro brodove. Kod tankera i brodova za rasute terete otpor zraka svakako znatno manje pridonosi ukupnom otporu. Kada brod ima premalo balasta, zbog povećanja površine trupa iznad vode, otpor zraka obično postaje prevelik što ima za posljedicu smanjenje upravljačkih svojstava broda.

Turbulentni pojas (granični sloj), koji se nalazi oko broda, sastoji se od vrtloga tako da se može jedino zaključiti da je otpor trenja izravna posljedica vrtloga u graničnom sloju. Međutim, izraz za otpor vrtloženja obično se upotrebljava za pojedine otpore koji nastaju zbog nastanka vrtloga, a koji su opet posljedica naglih promjena u obliku trupa na bilo kojem mjestu. Nagle promjene u obliku trupa uključuju privjeske i ramena, a isključuju tangencijalni otpor trenja stjenke trupa [7].

Ukoliko promatramo trup broda koji se giba na površini tekućine pravocrtnom brzinom v na trup će djelovati ukupna hidrodinamička sila F . Horizontalna komponenta ukupne hidrodinamičke sile na trup, suprotnog smjera od smjera gibanja broda, predstavlja silu ukupnog otpora R_T [8].

Uz poznata tangencijalna naprezanja τ_0 i hidrodinamičke tlakove p u smjeru normale za sve točke oplakane površine, ukupni otpor broda može se odrediti izrazom:

$$R_T = \int_S \tau_0 \cos(\tau_0, x_1) dS + \int_S p \cos(p, x_1) dS \quad (6)$$

Prvi član u gornjem izrazu predstavlja otpor trenja:

$$R_F = \int_S \tau_0 \cos(\tau_0, x_1) dS \quad (7)$$

Dok drugi član predstavlja otpor tlaka:

$$R_p = \int_S p \cos(p, x_1) dS \quad (8)$$

Prema prethodno navedenim komponentama ukupni otpor možemo prikazati izrazom:

$$R_T = R_F + R_p \quad (9)$$

gdje je S oplakana površina broda.

Ovakvom podjelom ne ulazimo u samu strukturu strujanja i pojava u tekućini oko brodskog trupa. Ona se temelji na saznanju da tekućina djeluje kontinuirano raspoređenim površinskim silama na trup broda.

Strujanje tekućine oko brodskog trupa podijeljeno je na dva područja:

- područje s dominantnim utjecajem viskoznosti (granični sloj i hidrodinamički trag),
- vanjsko područje sa zanemarivim utjecajem viskoznosti (potencijalno strujanje).

Nakon ovakve podjele strujanja jedini logičan slijed je da ukupni otpor podijelimo na komponentu viskoznog otpora uslijed viskoznih učinaka u graničnom sloju i hidrodinamičkom tragu i na otpor potencijalnog strujanja. Otpor potencijalnog strujanja postoji samo kao posljedica gibanja tijela na slobodnoj površini tekućine, i to na takav način da se uslijed gibanja broda generiraju valovi na slobodnoj površini.

Ukupni otpor potom možemo podijeliti na :

$$R_T = R_V + R_W \quad (10)$$

gdje je:

R_V – viskozni otpor,

R_W – otpor valova.

Uzimajući u obzir da su ove dvije komponente međusobno nezavisne proizlazi da je viskozni otpor funkcija Reynoldsovog broja, a otpor valova funkcija Froudeovog broja.

$$R_V = C_V (Rn) \frac{1}{2} \rho v^2 S \quad (11)$$

$$R_W = C_W (Fn) \frac{1}{2} \rho v^2 S \quad (12)$$

Jedan dio viskoznog otpora posljedica je tangencijalnih naprezanja koji nastaju između tekućine i oplata broda te smo taj dio definirali kao otpor trenja:

$$R_F = \int_S \tau_0 \cos(\tau_0, x_1) dS \quad (13)$$

dok preostali dio viskoznog otpora mora biti posljedica promjene tlaka duž trupa broda uzrokovane viskoznim pojavama u samom graničnom sloju neposredno uz oplatu.

Mjerenjima tlaka duž trupa broda pokazalo se da se u realnoj viskoznoj tekućini ne ostvaruje tlak koji bi postojao u idealnoj tekućini bez stvaranja valova na slobodnoj površini. Stvaranje tih valova na površini odražava se daljnjom promjenom tlaka duž trupa broda. To znači da hidrodinamički tlak možemo raščlaniti na dva dijela, odnosno otpor tlaka može se napisati u obliku:

$$R_T = \int_S p_{pv} \cos(p, x_1) dS + \int_S p_w \cos(p, x_1) dS \quad (14)$$

Odnosno:

$$R_P = R_{PV} + R_W \quad (15)$$

Gdje je:

$$R_P = C_P (Rn, Fn) \frac{1}{2} \rho v^2 S \quad (16)$$

$$R_{PV} = C_{PV} (Rn) \frac{1}{2} \rho v^2 S \quad (17)$$

$$R_W = C_W (Fn) \frac{1}{2} \rho v^2 S \quad (18)$$

To nas dalje vodi do zaključka da je viskozni otpor sastavljen od otpora trenja i viskoznog otpora tlaka tj. otpora forme:

$$R_V = R_F + R_{PV} \quad (19)$$

$$R_V = C_V (Rn) \frac{1}{2} \rho v^2 S \quad (20)$$

Što se tiče otpora valova dominantna komponenta je otpor slike vala. Druga komponenta tj. otpor lomljenja valova javlja se kod brodova s koeficijentom punoće $C_B > 0,8$ [8].

2.2.2. Dodatne komponente otpora

U dodatne komponente otpora R_A ubrajamo:

- otpor privjesaka R_{AP} ,
- otpor hrapavosti oplate R_{AR} ,
- otpor zraka i vjetra R_{AA} ,
- otpor kormilarenja R_{AS} .

Pored nabrojanih komponenata povećanje otpora se može dogoditi i zbog okoline u kojoj brod plovi, a to su:

- plovidba u ograničenoj vodi (utjecaj stijenki),
- plovidba u plitkoj vodi.

Usporedba hidrodinamičkih značajki se odnosi na uvjete neograničene vode po duljini, širini i dubini te na uvjete pokusne plovidbe (svježe obojan trup, poliran vijak i mirna voda bez vjetra).

Konačno možemo ukupni otpor raščlaniti na:

$$R_T = [C_F (Rn) + C_{PV} (Rn) + C_W (Fn)] \frac{1}{2} \rho v^2 S \quad (21)$$

Odnosno uzimajući u obzir korelacijski dodatak:

$$R_T = [C_F (Rn) + C_{PV} (Rn) + C_W (Fn) + C_A] \frac{1}{2} \rho v^2 S \quad (22)$$

2.3. Prognoza ukupnog otpora u fazi projektiranja

Poznavanje ukupnog otpora broda važno je već u fazi projektiranja, odnosno prije izrade i ispitivanja modela, kao jednog od osnovnih podataka za određivanje brzine broda. Potrebno je odabrati formu koja će za traženi tip broda osigurati najmanji mogući otpor i najmanju snagu stroja. Projektant se pri tom koristi objavljenim statističkim podacima otpora sličnih brodova ili ispitanih serija modela.

2.3.1. Obrada podataka otpora broda

Sustavna obrada podataka otpora radi prognoze otpora broda i izbora forme tzv. minimalnog otpora, uglavnom je slijedila dva osnovna pravca.

Prvi se odnosi na obradu izmjerenih podataka otpora modela tzv. sustavnih serija. Forma modela takve serije sustavno se mijenja variranjem omjera glavnih karakteristika neke osnovne forme. Osnovna forma može se u tom slučaju odabrati iskustvom, tj. s obzirom na dokazane dobre kvalitete, ili kao rješenje matematičkog problema optimizacije forme trupa za uvjete minimalnog otpora.

Drugi se odnosi na sustavnu obradu izmjerenih podataka kako modela, tako i brodova u naravnoj veličini istog tipa. Takvi se podatci primjenjuju na proračun otpora brodova iste namjene i vrste. Obrađeni modeli ili brodovi nisu potpuno geometrijski slični, ali imaju iste omjere glavnih izmjera, iste koeficijente trupa i plove pri istim odgovarajućim brzinama.

Statističke su obrade otpora u skladu s drugim spomenutim pravcem relativno bogatije, jer su ih pojedini autori izradili koristeći se postojećom statistikom nekog bazena, ili pak objavljenim podacima gotovih brodova.

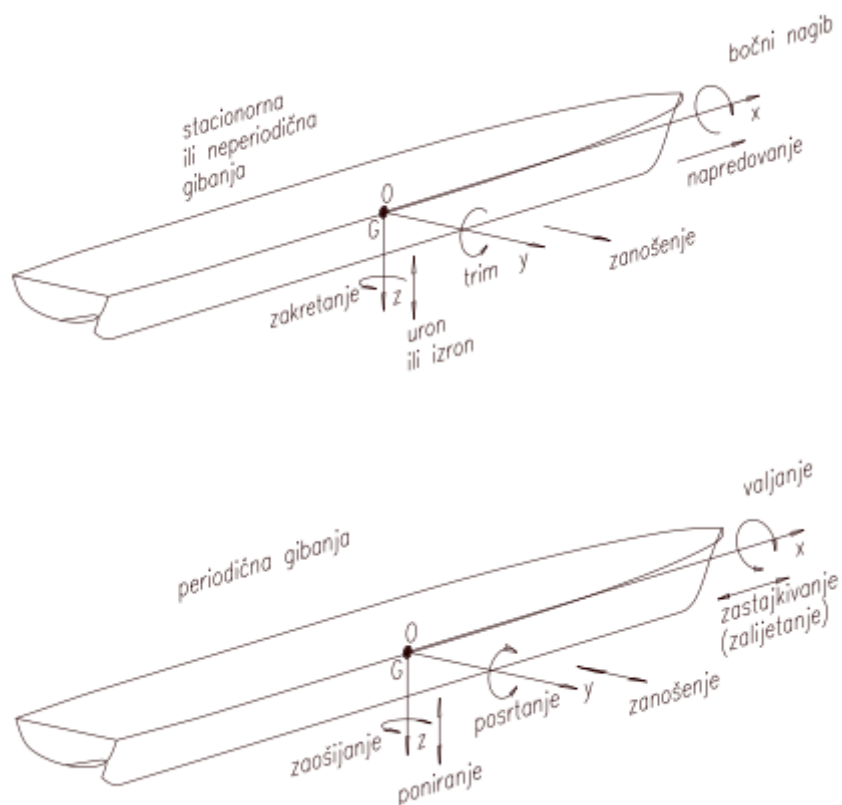
Rezultati serija primjenjuju se u problematici optimizacije otpora i propulzije broda, pri čemu se podatci otpora dopunjuju podacima propulzije izmjerenim pri ispitivanjima autopropulzije modela i brodova.

Autori su svoje rezultate ponajviše objavili u tablicama ili u dijagramima, u kojima su vrijednosti otpora dane u ovisnosti o Froudeovom broju za određena područja omjera dimenzija broda i koeficijenata trupa. Danas se te tablice ili dijagrami obrađuju regresijskom analizom u svrhu dobivanja algebarskih funkcija ili numeričkom analizom za matrične proračune pomoću računala.

3. MODELSKA ISPITIVANJA

3.1. Općenito

Brod u naravi ima šest stupnjeva slobode kao što je prikazano na slici 1 [8].



Slika 1. Stupnjevi slobode prilikom gibanja broda

Prilikom ispitivanja gibanje modela se ograničava na četiri stupnja slobode gibanja:

- zastoškivanje (translacijsko gibanje u smjeru osi x),
- paniranje (translacijsko gibanje u smjeru osi z),
- valjanje (rotacijsko gibanje oko osi x),
- posrtanje (rotacijsko gibanje oko osi y),

Model broda je izgrađen u skladu sa bazenom i mjernim uređajima koji će se koristiti tijekom ispitivanja dok je površina modela glatka. Cilj pokusa, odnosno modelskog ispitivanja je dobivanje krivulje otpora, ovisnosti sile otpora i sile tegljenja o brzini modela. Sva mjerenja se registriraju za potrebno područje brzina.

Kroz izmjerene točke provlači se glatka krivulja otpora odnosno vrši se izgladivanje krivulje vodeći računa o grbama i dolovima na krivulji otpora u ovisnosti o Froudeovom broju. Vrijednosti otpora za model treba preračunati na vrijednosti za brod pri čemu je potrebno učiniti neke pretpostavke. Budući da kod modelskih ispitivanja nije moguće postići potpunu dinamičku sličnost (jednakost Reynoldsovog i Froudeovog broja) ostvarujemo samo geometrijsku i kinematičku sličnost, dok je dinamička sličnost djelomično zadovoljena jednakošću Froudeovog broja.

3.2. Laboratorij za ispitivanje hidrodinamičkih značajki broda

Osnovni pokusi koji se izvode u institutu a provode se na modelima trgovačkih i ratnih brodova su:

- ispitivanje strujanja oko broskog trupa,
- pokus otpora (eng. *resistance test*),
- pokus slobodne vožnje vijka (eng. *open water test*),
- pokus vlastitog pogona (eng. *self propulsion test*),
- pokus mjerenja polja sustrujanja,
- ispitivanja vijaka u kavitacijskim tunelima,
- ispitivanja svojstava upravljivosti,
- ispitivanja svojstava pomorstvenosti.

3.3. Provođenje modelskih ispitivanja u laboratoriju

Modelska ispitivanja u laboratoriju provode se prema vlastitim standardima koji su u skladu s preporukama međunarodne organizacije ITTC (eng. *International Towing Tank Conference*). ITTC predlaže standardne postupke kod ispitivanja modela u bazenima i obrade rezultata s ciljem standardizacije cijelog procesa, od izrade modela do prezentacije rezultata ispitivanja.

3.3.1. Zakoni sličnosti

Da bi se rezultati ispitivanja mogli prenijeti s modela na brod moraju se zadovoljiti uvjeti hidrodinamičke sličnosti modela i broda. To podrazumijeva ostvarenje sličnosti modela i broda u naravi i to:

- geometrijske sličnosti,
- kinematičke sličnosti,
- dinamičke sličnosti.

Geometrijska sličnost se postiže konstantnim odnosom glavnih izmjera broda ili brodskog vijka i modela broda ili brodskog vijka. Odnos je određen mjerilom npr. odnos duljine broda i modela:

$$L_S = \lambda L_M \quad (23)$$

gdje je:

L_S – duljina broda,

L_M – duljina modela broda.

Kinematička sličnost se postiže jednakošću smjera brzina i njihovog konstantnog odnosa u svakom trenutku ispitivanja:

$$\vec{V}_{i,S} = \lambda_v \cdot \vec{V}_{i,M} \quad (24)$$

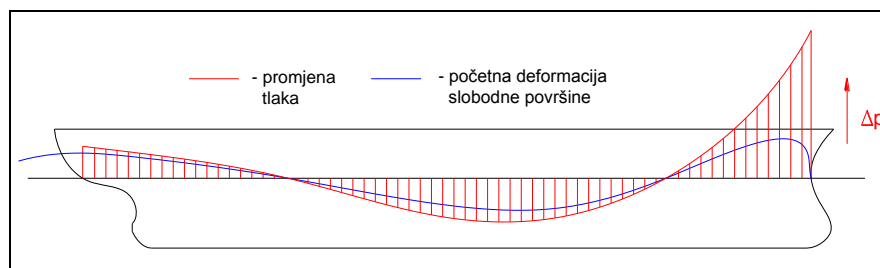
Pri dinamičkoj sličnosti vektori sila, a pri kinematičkoj sličnosti vektori brzina su u odgovarajućim prostorno-vremenskim točkama istog smjera, međusobno paralelni i s konstantnim odnosom iznosa. Dinamička sličnost se postiže jednakošću Froudeovog broja za brod ili brodski vijak i model broda ili brodskog vijka. S obzirom da se bazenska ispitivanja obavljaju u slatkoj vodi jednakost Reynoldsovog broja za brod ili brodski vijak i model broda ili brodskog vijka nije moguće postići. Reynoldsov broj održavamo iznad kritične vrijednosti zato da se izbjegne pojava laminarnog strujanja duž modela:

$$Fn_M = Fn_S \quad (25)$$

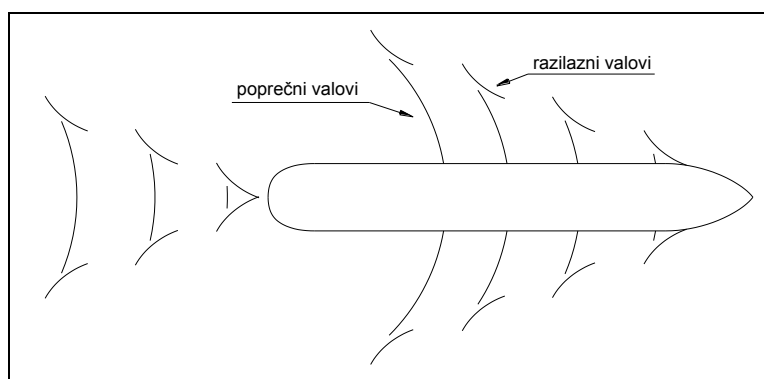
$$Rn \geq 10^5 \quad (26)$$

3.3.2. Sustav brodskih valova

Gibanjem broda kroz tekućinu mijenja se polje tlaka u blizini broda što uzrokuje nabiranje slobodne površine, odnosno valove kao što je vidljivo na slici 2 [7]. Područja visokog tlaka su pramac i krma, a niskog tlaka pramčano i krmeno rame, tj. prijelaz između zakrivljenog i ravnog dijela forme. Osnovni sustavi valova su razilazni i poprečni, slika 3[7].



Slika 2. Promjena tlaka duž trupa i početna deformacija slobodne površine uslijed gibanja broda



Slika 3. Shematski prikaz pramčanog i krmenog sustava valova

Prema mjestu nastanka valni sustav dijelimo na:

- Pramčani sustav – visok tlak na pramcu; valni brijeg,
- Sustav pramčanog ramena – nizak tlak iza ramena; valni dol,
- Sustav krmenog ramena – nizak tlak iza ramena; valni dol,
- Krmeni sustav – visoki tlak na krmi; valni brijeg.

Iz slike valova izvode se pretpostavke o otporu valova odnosno o energiji utrošenoj na stvaranje valova. Kod projektiranja broda teži se tome da se valni sustavi u što većoj mjeri ponište. To se naziva pozitivnom interferencijom valova. Pozitivna interferencija valova se postiže oblikovanjem forme tako da se postigne interferencija unutar pramčanog i krmenog sustava valova.

Prilikom razmatranja slike valova treba uzeti u obzir sljedeće:

- slika valova funkcija je brzine,
- energija valnog sustava proporcionalna je kvadratu njegove amplitude,
- povoljna interferencija je odbijanje tj. poništavanje valnih visina,
- smanjenje visine valnog sustava znači smanjenje otpora valova odnosno ukupnog otpora broda,
- modifikacijom trupa slika valova se mijenja,
- pramčani i krmeni dio broda podjednako utječu na valni sustav,
- forma se optimizira za realno stanje krcanja i brzinu koja odgovara brzini broda u službi,
- otpor valova predstavlja najveću komponentu ukupnog otpora brodova koji plove kod viših Froudeovih brojeva.

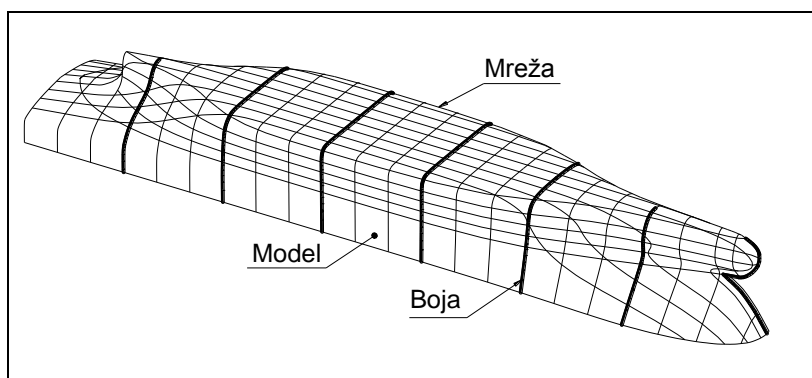
3.4. Ispitivanje strujanja oko broskog trupa

Određivanje strujnica oko broskog trupa provodi se na dva načina:

- određivanje strujnica bojom,
- određivanje strujnica nitima.

3.4.1. *Određivanje strujnica bojom*

Prije ispitivanja boja se nanosi na model u jednakim razmacima uzduž trupa. Na trupu je zbog kasnije analize ucrtana pravokutna mreža, koja odgovara konturama teoretskih rebara, vodnih linija i uzdužnica. Za vrijeme tegljenja modela kroz bazen, boja na nekom mjestu se razlijeva u smjeru strujanja na tom mjestu. Nakon završenog ispitivanja, model se izvlači iz vode, i prema tragovima boje moguće je ucrtati strujnice na trupu, i na nacrtu rebara. Primjer modela s ucrtanom mrežom boje vidi se na Slika 4 [8].

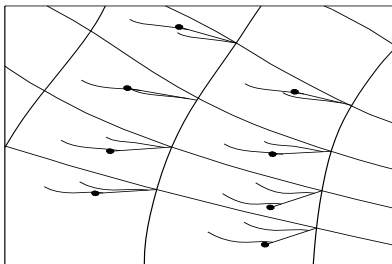


Slika 4. Model s ucrtanom mrežom kontura teoretskih rebara, vodnih linija i uzdužnica i s nanesenim slojevima boje

Kako je model glatke forme, a ne stvarnom brodu imamo još i privjeske, koji stvaraju neki dodatni otpor, nego što bi bilo da je to glatka forma, potrebno je izračunati otpor broda s privjescima. To se radi tako da se stvara turbulencija sa postavljanjem žice na model i to na 19-to teoretsko rebro.

3.4.2. *Određivanje strujnica nitima*

Kod drugog načina određivanja strujnica, na model se prvo ucrtava gušća mreža kontura teoretskih rebara, vodnih linija i uzdužnica. Nakon toga se u čvorove mreže pričvršćuju pribadače, s dvije niti na svakoj, Slika 5 [8]. Jedna nit se postavlja uz površinu modela, a druga na udaljenosti od oko 10 mm od prve. Duljine niti su od 50 do 100 mm.



Slika 5. Shematski prikaz krmenog dijela broda s pribadačama i nitima za određivanje strujnica

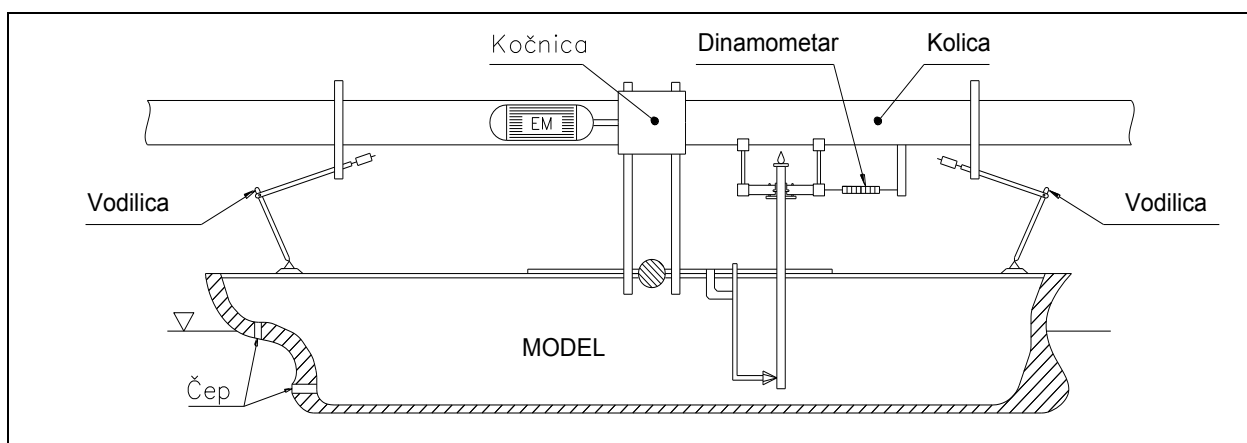
Za vrijeme vožnje kroz bazen, svakih nekoliko sekundi se fotografira model. Ako se na snimkama pokaže da su niti uvijek u istom položaju, strujanje je pravilno. U slučaju nepravilnog strujanja položaj niti je različit na snimkama. U slučaju povratnog strujanja niti su okrenute u suprotnom smjeru. Razlog korištenja dviju niti je da se odredi da li je strujanje nestabilno uz sam trup broda, ili na većoj udaljenosti od trupa.

4. EKSPERIMENTALNO ODREĐIVANJE UKUPNOG OTPORA

Eksperimentalne metode određivanja otpora broda glavni su način predviđanja otpora broda u eksploataciji. Poznavanje otpora broda nužno je za odabir glavnog pogonskog motora, te za provjeru kvalitete brodske forme. Sila otpora broda određuje se tegljenjem geometrijski sličnog modela broda kroz bazen pri određenoj brzini, pomoću kolica za koja je pričvršćen, i mjerenjem rezultante sile, Slika 6 [8].

Prije početka tegljenja potrebno je pripremiti model. Priprema se sastoji od:

- određivanja mase modela, odnosno vaganja modela,
- ucrtavanja oznaka na modelu,
- transporta iz modelarnice, i spuštanja u vodu,
- opremanja modela potrebnim instrumentarijem za provođenje pokusa, i utezima, s ciljem dovođenja na određeni gaz, pri kojem se vrši ispitivanje. Pri tome treba paziti da masu istisnine modela na dotičnom gazu čine sama masa modela, masa instrumenata, i masa utega, te ga treba u skladu s time adekvatno opteretiti,
- učvršćivanja modela za kolica.



Slika 6. Model broda opremljen za pokus otpora

Pri tegljenju model ima četiri stupnja slobode gibanja:

- dva translacijska: zaostajanje i poniranje
- dva rotacijska: valjanje i posrtanje

Tegljenje se obavlja više puta pri različitim konstantnim brzinama. Konstantnost brzine kolica osigurava konstantnost brzine modela.

Sila otpora koja se registrira naziva se ukupna sila otpora modela, a prema Froudeovoj podjeli otpora sastavljena je od otpora trenja i preostalog otpora. Postupak prenošenja rezultata s modelskih na brodske vrijednosti vrši se prema korelacijskoj liniji model-brod ITTC-57. Iz dobivenih podataka iz pokusa otpora računa se Fn broj i koeficijent ukupnog otpora za model:

$$C_{TM} = \frac{R_{TM}}{\frac{1}{2} \rho_{FW} v_M^2 S_M} \quad (27)$$

Izračunate vrijednosti se prikazuju u dijagramu kao skup točaka, i kroz njih se provlači glatka krivulja $C_{TM} = f(Fn_M)$. Iz krivulje se interpoliraju vrijednosti koeficijenata ukupnog otpora, i s njima se nastavlja proračun.

Koeficijent otpora trenja modela prema korelacijskoj liniji model-brod ITTC-57. iznosi:

$$C_{FM} = \frac{0,075}{(\log Rn_M - 2)^2} \quad (28)$$

Koeficijent preostalog otpora isti je za model i za brod, i iznosi:

$$C_R = C_{TM} - C_{FM} \quad (29)$$

Koeficijent ukupnog otpora za brod, iznosi:

$$C_{TS} = C_R + C_{FS} + \Delta C_T \quad (30)$$

gdje je:

C_{FS} - koeficijent otpora trenja za brod:

$$C_{FS} = \frac{0,075}{(\log Rn_M - 2)^2} \quad (31)$$

ΔC_T - ukupni korelacijski dodatak.

Izraz za silu ukupnog otpora broda dobiva se prema izrazu:

$$R_{TS} = \frac{1}{2} \rho v_S^2 S_S C_{TS} \quad (32)$$

Froudeovi bezdimenzijski koeficijenti otpora (C) i (K) računaju se kao:

$$(C) = \frac{125}{\pi} \frac{S}{v^{2/3}} C_{TS} \quad (33)$$

$$(K) = \sqrt{4\pi \frac{L_{WLS}}{v_S^{1/3}} Fn_S} \quad (34)$$

4.1. Podatci o postojećoj formi i rezultati ukupnog otpora

U tablicama 1. i 2. prikazane su geometrijske karakteristike i stanja ispitivanog modela M-1161B. U tablici 3. prikazana je karakteristika okoliša odnosno vode u bazenu za ispitivanje. U tablicama su prikazane vrijednosti za projektni gaz. Forma tankerskog broda izabrana je zbog dostupnosti podataka iz literature [2].

Tablica 1. Model broda M - 1161B – Projektno stanje krcanja [2]

Mjerilo modela	λ	28
Gaz na pramcu	$T_{FM}, \text{ m}$	0,4350
Gaz na krmi	$T_{AM}, \text{ m}$	0,4350
Duljina između okomica	$L_{PPM}, \text{ m}$	6,2429
Duljina na vodnoj liniji	$L_{WLM}, \text{ m}$	6,3714
Oplakana površina (goli trup)	$S_{M'}, \text{ m}^2$	10,7871
Oplakana površina (trup s privjescima)	$S_M, \text{ m}^2$	10,7871
Volumen istisnine (goli trup)	$V_{M'}, \text{ m}^3$	2,530
Volumen istisnine (trup s privjescima)	$V_M, \text{ m}^3$	2,530

Tablica 2. Stanje modela [2]

Gaz na pramcu	$T_{FM}, \text{ m}$	0,4350
Gaz na krmi	$T_{AM}, \text{ m}$	0,4350
Volumen istisnine (goli trup)	$V_{M'}, \text{ m}^3$	2,5300
Masa modela	$D, \text{ t}$	0,8610
Privjesci	NEMA	
Sredstvo turbulencije	ŽICA NA R19	

Tablica 3. Stanje vode u bazenu [2]

Temperatura	$t_{FW}, \text{ K}$	290,25
	$t_{FW}, \text{ }^\circ\text{C}$	17,10
Gustoća	$\rho_{FW}, \text{ kg/m}^3$	998,66
Kinematički viskozitet	$\nu_{FW}, \text{ m}^2/\text{s}$	$1,079 \cdot 10^{-6}$

U tablici 4. nalaze se vrijednosti izmjerene sile ukupnog otpora kao i vrijednosti duljine vodne linije i oplakane površine ispitivanog modela. U tablici 5. prikazani su izgladeni rezultati ukupnog otpora modela s pripadajućim vrijednostima apsolutnih i relativnih pogrešaka.

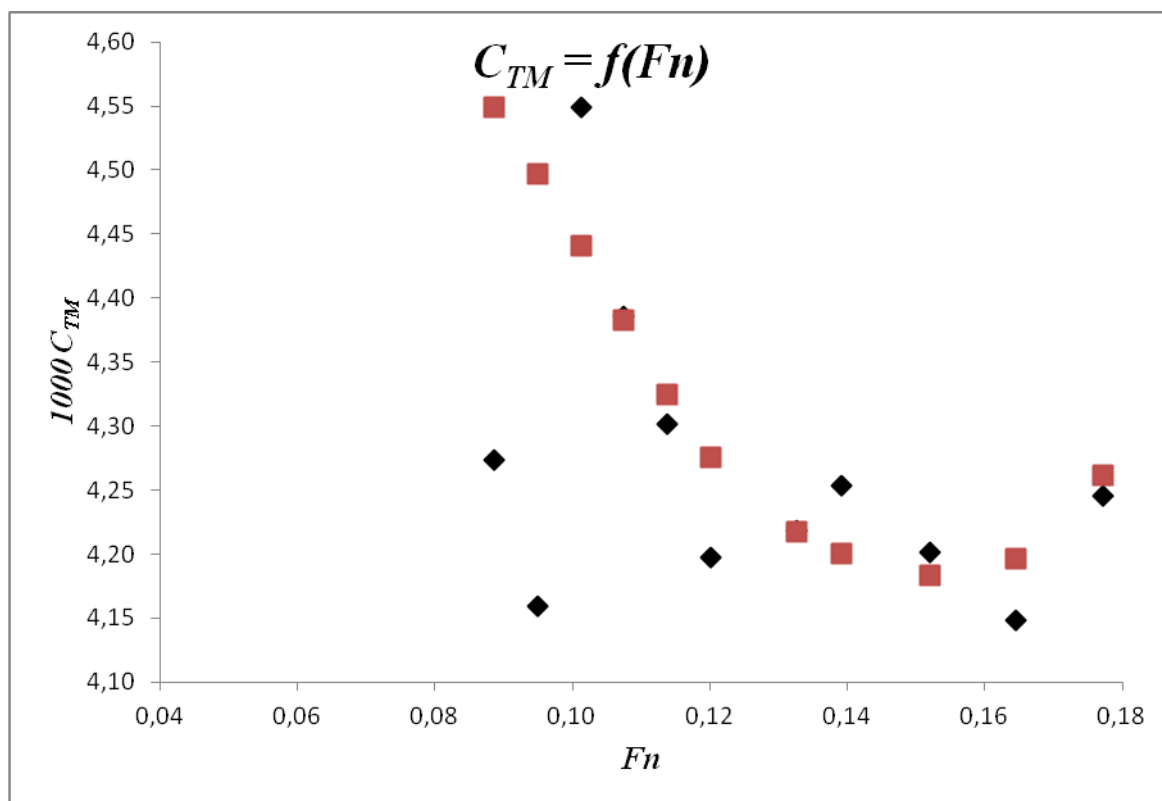
Tablica 4. Sile otpora modela i pripadajući koeficijenti otpora [2]

v_M , m/s	$Fn (L_{WL})$	$Fn (V_M')$	R_{TM} , N	$1000 \cdot C_{TM}$
0,700	0,089	0,191	11,28	4,274
0,750	0,095	0,205	12,60	4,159
0,801	0,101	0,219	15,72	4,549
0,850	0,108	0,233	17,07	4,386
0,900	0,114	0,246	18,77	4,302
0,950	0,120	0,260	20,40	4,197
1,049	0,133	0,287	25,00	4,218
1,100	0,139	0,301	27,72	4,253
1,201	0,152	0,329	32,64	4,201
1,300	0,164	0,356	37,76	4,148
1,400	0,177	0,383	44,81	4,245
1,501	0,190	0,411	53,53	4,411
1,601	0,203	0,438	61,99	4,490
0,700	0,089	0,191	11,28	4,274
0,750	0,095	0,205	12,60	4,159
0,801	0,101	0,219	15,72	4,549
0,850	0,108	0,233	17,07	4,386
0,900	0,114	0,246	18,77	4,302
0,950	0,120	0,260	20,40	4,197

Tablica 5. Točnost mjerenja podataka o koeficijentu otpora trenja [2]

v_M , m/s	$1000 \cdot C_{TM}(\text{izračun})$	$1000 \cdot C_{TM}(\text{izgladeno})$	Apsolutna pogreška	Relativna pogreška, %
0,700	4,274	4,549	-0,275	-6,05
0,750	4,159	4,497	-0,338	-7,53
0,801	4,549	4,441	0,108	2,42
0,850	4,386	4,383	0,003	0,07
0,900	4,302	4,325	-0,023	-0,53
0,950	4,197	4,276	-0,079	-1,87
1,049	4,218	4,217	0,001	0,03
1,100	4,253	4,200	0,053	1,27
1,201	4,201	4,183	0,018	0,44
1,300	4,148	4,196	-0,048	-1,14
1,400	4,245	4,261	-0,016	-0,39
1,501	4,411	4,372	0,039	0,90
1,601	4,490	4,498	-0,008	-0,18
0,700	4,274	4,549	-0,275	-6,05
0,750	4,159	4,497	-0,338	-7,53
0,801	4,549	4,441	0,108	2,42
0,850	4,386	4,383	0,003	0,07
0,900	4,302	4,325	-0,023	-0,53
0,950	4,197	4,276	-0,079	-1,87
Broj gladenja			9	
Ukupni korelacijski koeficijent			0,6937	
Standardna pogreška			$1,55 \cdot 10^{-4}$	

Na slici 7. mogu se vidjeti aproksimacije diskretnih vrijednosti koeficijenta ukupnog otpora.

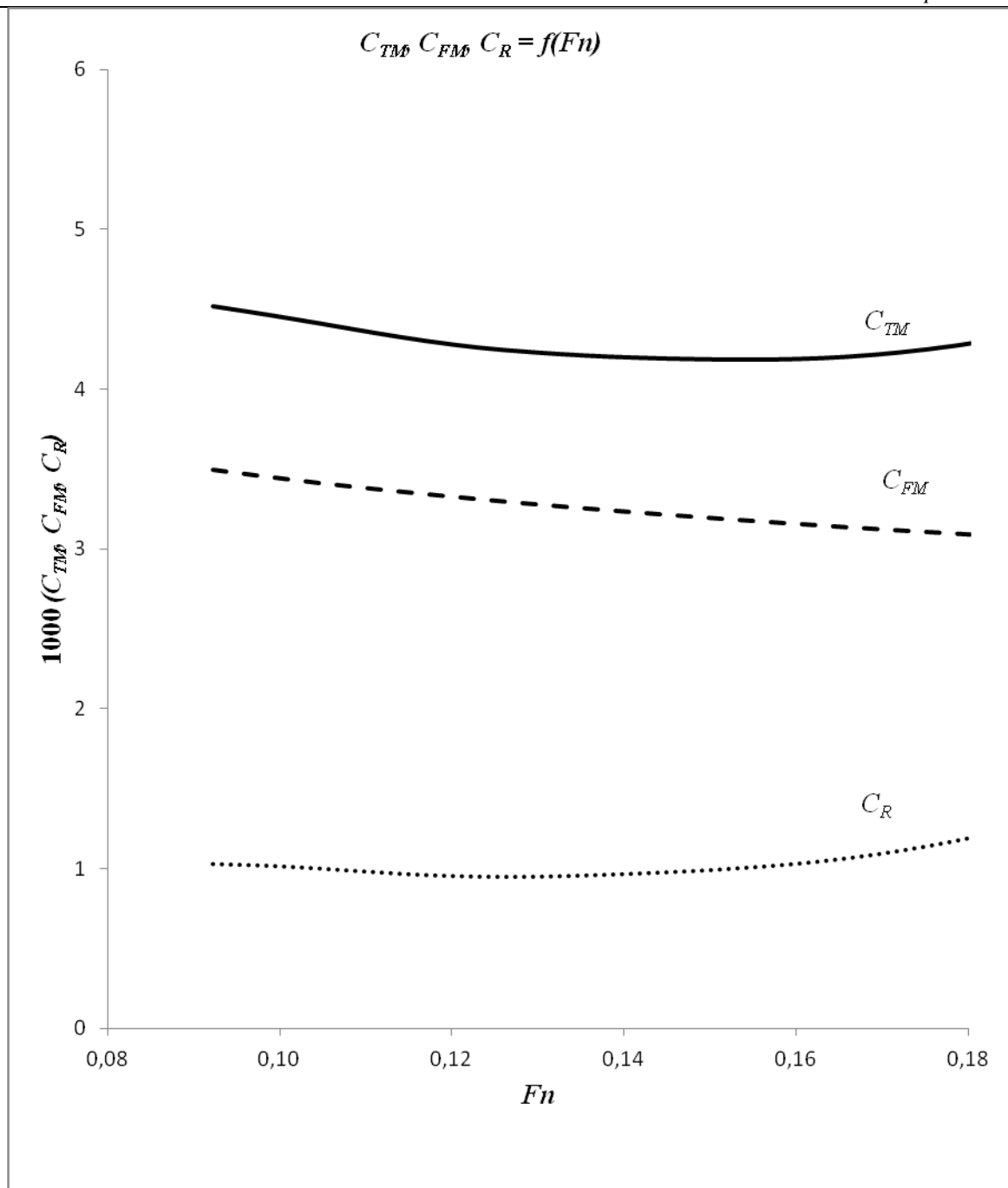


Slika 7. Aproksimacija diskretnih vrijednosti koeficijenta ukupnog otpora

U tablici 6. prikazani su koeficijenti ukupnog otpora modela, koeficijenti otpora trenja modela kao i koeficijenti preostalog otpora modela za ispitivanu brzinu modela. Na slici 8. prikazane su krivulje koeficijenta ukupnog otpora modela C_{TM} , koeficijenta otpora trenja modela C_{FM} , i koeficijent preostalog otpora C_R .

Tablica 6. Koeficijenti otpora modela [2]

$v_M, \text{ m/s}$	$Fn (L_{WL})$	$Fn (V_M')$	$1000 \cdot C_{TM}$	$Rn_M \cdot 10^{-7}$	$1000 \cdot C_{FM}$	$1000 \cdot C_R$
0,729	0,092	0,1994	4,519	0,430	3,493	1,027
0,778	0,098	0,2128	4,467	0,459	3,451	1,017
0,826	0,104	0,2260	4,412	0,488	3,412	0,999
0,875	0,111	0,2394	4,354	0,517	3,376	0,977
0,924	0,117	0,2528	4,301	0,546	3,343	0,958
0,972	0,123	0,2659	4,259	0,574	3,312	0,948
1,021	0,129	0,2793	4,230	0,603	3,282	0,947
1,069	0,135	0,2924	4,209	0,631	3,255	0,955
1,118	0,141	0,3058	4,195	0,660	3,229	0,967
1,167	0,148	0,3192	4,186	0,689	3,204	0,982
1,215	0,154	0,3324	4,182	0,717	3,181	1,002
1,264	0,160	0,3458	4,186	0,746	3,159	1,028
1,312	0,166	0,3589	4,201	0,775	3,137	1,064
1,361	0,172	0,3723	4,229	0,804	3,117	1,112
1,410	0,178	0,3857	4,270	0,833	3,098	1,172
1,458	0,184	0,3989	4,321	0,861	3,079	1,242
1,507	0,191	0,4123	4,379	0,890	3,062	1,317
1,555	0,197	0,4254	4,440	0,918	3,045	1,395



Slika 8. Koeficijent ukupnog otpora modela C_{TM} , koeficijent otpora trenja modela C_{FM} i koeficijent preostalog otpora C_R kao funkcija u ovisnosti o Froudeovom broju

U tablicama 7. i 8. prikazani su vrijednosti za brod u naravi kao i ekstrapolirani rezultati za ukupni otpor broda u naravi.

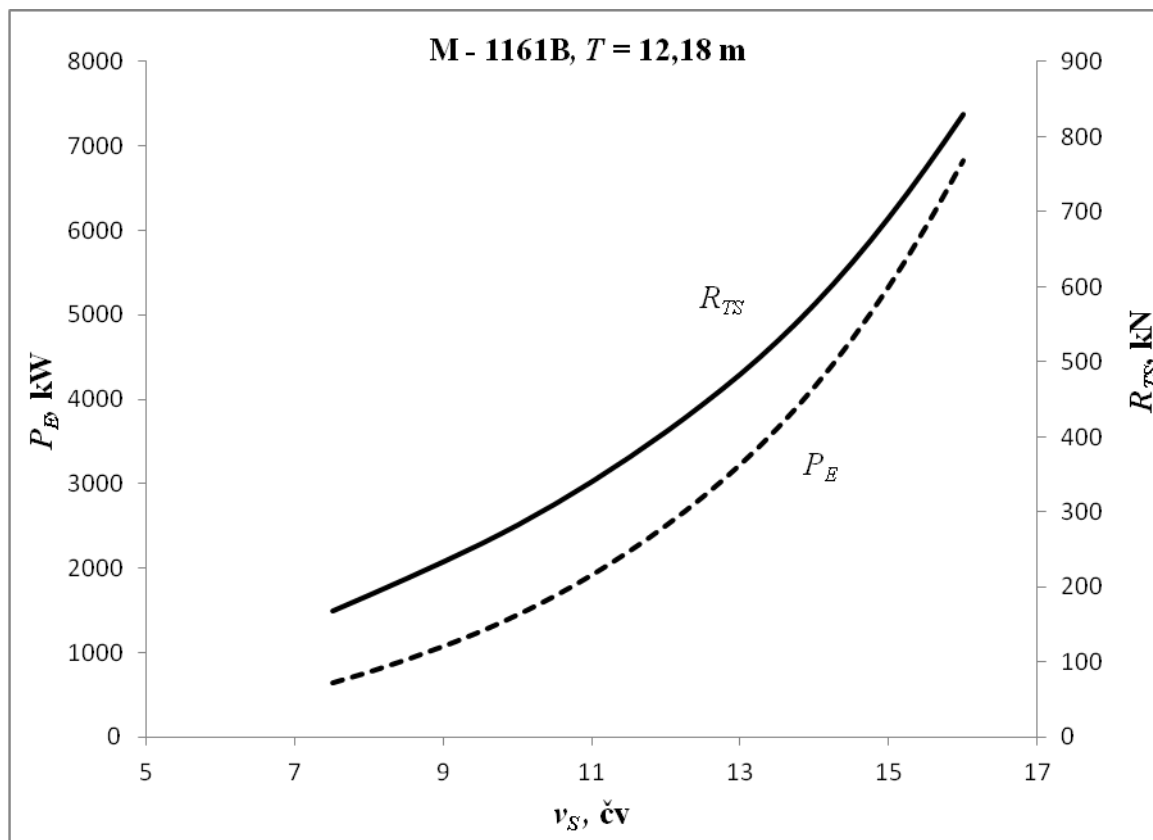
Tablica 7. Vrijednosti za brod [2]

Gaz na pramcu	$T_F, \text{ m}$	12,18
Gaz na sredini broda	$T, \text{ m}$	12,18
Gaz na krmi	$T_A, \text{ m}$	12,18
Istisnina (goli trup)	$V', \text{ t}$	56978

Tablica 8. Ukupni otpor, efektivna snaga, i Froudeov bezdimenzijski koeficijent otpora za brod u naravi [2]

$v_S, \text{ čv}$	$R_{TS}, \text{ kN}$	$P_E, \text{ kW}$	$P_{EF}, \text{ kW}$	$P_{ER}, \text{ kW}$	(C)
7,5	168,3	649	394	256	0,602
8,0	189,8	781	474	307	0,597
8,5	211,8	926	563	362	0,890
9,0	234,3	1085	664	421	0,582
9,5	257,9	1260	775	485	0,575
10,0	283,3	1458	898	559	0,571
10,5	311,1	1681	1033	648	0,568
11,0	341,2	1931	1181	750	0,568
11,5	373,4	2209	1341	868	0,569
12,0	407,8	2517	1515	1002	0,570
12,5	444,8	2859	1704	1155	0,573
13,0	484,5	3240	1907	1333	0,577
13,5	528,6	3670	2125	1545	0,584
14,0	577,8	4161	2359	1802	0,594
14,5	632,7	4719	2609	2110	0,606
15,0	693,4	5350	2876	2475	0,621
15,5	759,6	6056	3160	2896	0,637
16,0	830,5	6835	3461	3374	0,653

Na slici 9. prikazane su krivulje ukupnog otpora R_T i krivulja efektivne snage P_E za brod u naravi za ispitani model M-1161B.



Slika 9. Sila otpora broda i efektivna snaga u ovisnosti o brzini broda u čvorovima

5. HOLTROP METODA PREDVIĐANJA UKUPNOG OTPORA BRODA

Holtrop metoda predviđanja ukupnog otpora slijedi izraze prema ITTC-1978 te se otpor golog trupa sastoji od:

- viskoznog otpora,
- otpora valova.

Otpor valova proizlazi iz ovisnosti o brzini pomoću Havelockove teorije oblika valova. Havelockova teorija ima problema u opisu grba i dolova na krivulji otpora koje obično nastaju pri Froudeovom broju $Fn = 0,4$. Ispravci i dodaci za pramčani bulb i uronjeno krmeno zrcalo dodani su Havelockovoj teoriji vala što je rezultiralo trenutnom obliku Holtropove metode. Otpor golog trupa sastoji se od:

- viskoznog otpora,
- otpora valova,
- otpora uslijed pramačnog bulba,
- otpora uslijed krmenog zrcala.

Bitne napomene prilikom korištenja Holtrop metode je da je razvijena na temelju određenog skupa podataka o otporu. Brodovi čiji su parametri izvan ograničenja ove metode mogu pokazati značajno pogrešne rezultate ukupnog otpora.

5.1. Princip proračuna ukupnog otpora prema metodi Holtrop

Metoda procjene ukupnog otpora Holtrop i Mennen izvorno je prikazana 1978. godine, te je kasnije poboljšana i predložena 1982. i 1984. godine. Metoda se koristi uglavnom u fazi predprojekta u svrhu procjene ukupnog otpora. Mnogi projektanti navode da metoda daje prihvatljive rezultate iako je prisutna nejasnoća fizike problema koji stoje iza pojedinih formula primijenjenih u metodi.

Metoda se temelji na regresijskoj analizi rezultata ispitivanja modela brodova i brodova u naravi objavljenih u institutu MARIN (eng. *Maritime Research Institute Netherlands*) u Nizozemskoj. Ukupno je obrađeno 1707 mjerenja otpora, 1287 mjerenja propulzije obavljenih s 147 modela brodova te 82 mjerenja na pokusnim plovidbama na ukupno 46 brodova u naravi. Pregled tipova brodova kao i raspona parametara prikazani su u tablici 9 [6], [9].

Tablica 9. Karakteristike raspona parametara različitih tipova brodova

Tip broda	F_n maks	C_p		L/B		Broj brodova			
		min	max	min	max	jednovijčani		dvovijčani	
						model	brod	model	brod
Tankeri, brodovi za rasuti teret	0,24	0,73	0,85	5,1	7,1	48	13	3	2
Brodovi za opći teret	0,30	0,58	0,72	5,3	8,0	21	17	3	2
Ribarski brodovi i tegljači	0,38	0,55	0,65	3,9	6,3	35	-	3	2
Kontejnerski brodovi i fregate	0,45	0,55	0,67	6,0	9,5	6	-	18	1
Različiti tipovi	0,30	0,56	0,75	6,0	7,3	7	6	3	3
Ukupno						117	36	30	10

Ukupni otpor raščlanjuje se na sljedeći način:

$$R_T = R_F (1 + k_1) + R_{AP} + R_W + R_B + R_{TR} + R_A \quad (35)$$

gdje je:

R_F - otpor trenja određen prema korelacijskoj liniji model-brod ITTC-1957,

$(1 + k_1)$ - faktor forme koji povezuje viskozni otpor s otporom trenja,

R_{AP} - otpor privjesaka,

R_W - otpor valova,

R_B - dodatni otpor zbog pramčanog bulba u blizini površine tekućine,

R_{TR} - dodatni otpor oblika uronjenog krmenog zrcala,

R_A - korelacijski otpor.

Faktor forme određuje se prema:

$$1 + k_1 = c_{13} \left[0,93 + c_{12} \left(\frac{B}{L_R} \right)^{0,92497} (0,95 - C_p)^{-0,521448} (1 - C_p + 0,0225lcb)^{0,6906} \right] \quad (36)$$

gdje je:

C_p - prizmatični koeficijent temeljen na vodnoj liniji L_{WL} ,

lcb – uzdužni položaj težišta istisnine prema pramcu mjereno od polovice duljine broda izražen kao postotak duljine L ,

L_R – duljina krmenog zaoštrenja prema:

$$\frac{L_R}{L_{WL}} = 1 - C_p + 0,06 \frac{lcb}{(4C_p - 1)} \quad (37)$$

c_{12} – koeficijent određen prema jednadžbi:

$$c_{12} = \left(\frac{T}{L_{WL}} \right)^{0,2228446} \quad \text{za} \quad \frac{T}{L_{WL}} > 0,05 \quad (38)$$

$$c_{12} = 48,20 \left(\frac{T}{L_{WL}} - 0,02 \right)^{2,078} + 0,479948 \quad \text{za} \quad 0,02 < \frac{T}{L_{WL}} < 0,05 \quad (39)$$

$$c_{12} = 0,479948 \quad \text{za} \quad \frac{T}{L_{WL}} < 0,02 \quad (40)$$

T – prosječni projektni gaz,

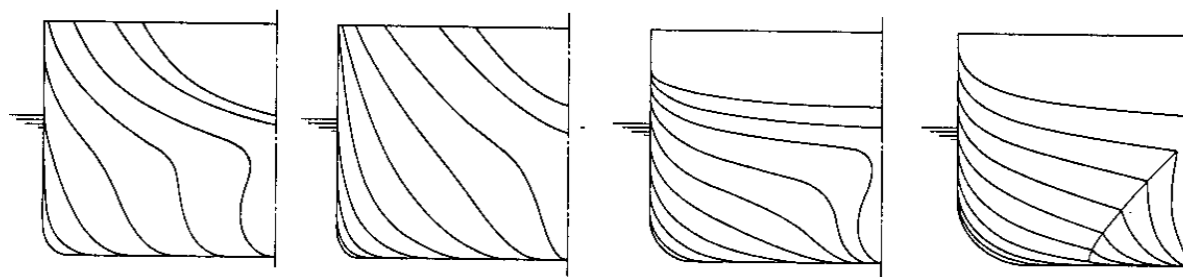
c_{13} – koeficijent određen prema jednadžbi:

$$c_{13} = 1 + 0,003C_{krma} \quad (41)$$

Za koeficijent C_{krma} vrijede slijedeće vrijednosti dane u tablici 10., a prema slici 10 [9].

Tablica 10. Koeficijenti oblika krme

Oblik krmenog dijela	C_{krma}
Rebra V oblika	-10
Uobičajeni oblik rebara	0
Rebra U oblika s Hognerovom krmom	+10



Slika 10. Različiti oblici krme

Oplakana površina trupa može se približno odrediti prema:

$$S = L_{WL} (2T + B) \sqrt{C_M} \left(0,453 + 0,4425C_B - 0,2862C_M - 0,003467 \frac{B}{T} + 0,3696C_{WP} \right) + 2,38 \frac{A_{BT}}{C_B} \quad (42)$$

gdje je:

C_M - koeficijent glavnog rebra,

C_B - koeficijent punoće na temelju duljine vodne linije,

C_{WP} - koeficijent površine vodne linije,

A_{BT} - poprečna površina bulba na poziciji gdje mirna slobodna površina presijeca pramčanu statvu,

Otpor izdanaka može se odrediti kako slijedi:

$$R_{AP} = \frac{1}{2} \rho v^2 S_{AP} (1 + k_2)_{ekv} C_F \quad (43)$$

gdje je:

ρ - gustoća vode,

v – brzina broda,

S_{AP} - oplakana površina izdanaka,

$(1 + k_2)$ - faktor otpora privjesaka,

C_F - koeficijent otpora trenja broda određen prema korelacijskoj liniji model-brod ITTC-1957.

U tablici 11. navedene su približne vrijednosti za dobro hidrodinamički oblikovane privjeske. Vrijednosti su dobivene iz pokusa otpora modela s i bez privjesaka. U pojedinim pokusima na brodovima su postavljeni stimulatori turbulencije radi dobivanja turbulentnog strujanja.

Tablica 11. Približne vrijednosti koeficijenta $(1+k_2)$

Kormilo iza skega	1,5 – 2,5
Kormilo iza statve	1,3 – 1,5
Balansna kormila dvovijčanih brodova	2,8
Osovinski skrokovi	3,0
Skeg	1,5 – 2,0
Skrokovi osovine	3,0
Osovinske nogavice	2,0
Osovine	2,0 – 4,0
Peraje stabilizatora	2,8
Nadsvod brodskog vijka	2,7
Ljuljne kobilice	1,4

Vrijednost $(1+k_2)$ za kombinaciju privjesaka određuje se izrazom:

$$(1+k_2)_{ekv} = \frac{\sum (1+k_2) S_{AP}}{\sum S_{AP}} \quad (44)$$

Otpor izdanaka se može povećati zbog otpora uslijed otvora tunela pramčanih poprečnih propulzora prema izrazu:

$$\rho v^2 \pi D^2 C_{BTO} \quad (45)$$

gdje je D promjer tunela.

Koeficijent C_{BTO} poprima vrijednosti od 0,003 do 0,012. Za otvore koji se nalaze u cilindričnom dijelu pramčanog bulba moraju se uzeti niže vrijednosti.

Otpor valova određuje se prema formuli:

$$R_{W-A} = c_1 c_2 c_3 V \rho g \exp \left[m_1 F n^d + m_2 \cos(\lambda F n^{-2}) \right] \quad (46)$$

U formulu su uključeni koeficijenti koji uzrokuju grbe i dolove u krivulji otpora, a formula se može koristiti do vrijednosti Froudeovih brojeva od 0,4. Koeficijenti u jednadžbi (46) računaju se kako slijedi:

$$c_1 = 2223105 c_7^{3,78613} \left(\frac{T}{B} \right)^{1,07961} (90 - i_E)^{-1,37565} \quad (47)$$

$$c_7 = 0,229577 \left(\frac{B}{L_{WL}} \right)^{0,33333} \quad \text{za} \quad \frac{B}{L_{WL}} < 0,11 \quad (48)$$

$$c_7 = \frac{B}{L_{WL}} \quad \text{za} \quad 0,11 < \frac{B}{L_{WL}} < 0,25 \quad (49)$$

$$c_7 = 0,5 - 0,0625 \frac{B}{L_{WL}} \quad \text{za} \quad \frac{B}{L_{WL}} > 0,25 \quad (50)$$

$$c_2 = \exp(-1,89\sqrt{c_3}) \quad (51)$$

$$c_5 = 1 - 0,8 \frac{A_T}{BTC_M} \quad (52)$$

gdje je:

c_2 - parametar za smanjenje otpora valova uslijed djelovanja pramčanog bulba,

c_5 - parametar utjecaja krmenog zrcala na otpor valova,

A_T - uronjena površina krmenog zrcala pri stanju mirovanja,

Fn – Froudeov broj na temelju vodne linije.

Koeficijenti potrebni za proračun ukupnog otpora prema metodi Holtrop dobivaju se sljedećim izrazima:

$$\lambda = 1,446C_p - 0,03 \frac{L_{WL}}{B} \quad \text{za} \quad \frac{L_{WL}}{B} < 12 \quad (53)$$

$$\lambda = 1,446C_p - 0,36 \quad \text{za} \quad \frac{L_{WL}}{B} > 12 \quad (54)$$

$$m_1 = 0,0140407 \frac{L_{WL}}{T} - 1,75254 \frac{V^{1/3}}{L_{WL}} - 4,79323 \frac{B}{L_{WL}} - c_{16} \quad (55)$$

$$c_{16} = 8,07981C_p - 13,8673C_p^2 + 6,984388C_p^3 \quad \text{za} \quad C_p < 0,80 \quad (56)$$

$$c_{16} = 1,73014 - 0,7067C_p \quad \text{za} \quad C_p > 0,80 \quad (57)$$

$$m_2 = c_{15}C_p^2 \exp(-0,1Fn^{-2}) \quad (58)$$

$$c_{15} = -1,69385 \quad \text{za} \quad \frac{L_{WL}^3}{V} < 512 \quad (59)$$

$$c_{15} = \frac{-1,69385 + \left(\frac{L_{WL}}{V^{1/3}} - 8 \right)}{2,36} \quad \text{za} \quad 512 < \frac{L_{WL}^3}{V} < 1726,91 \quad (60)$$

$$c_{15} = 0 \quad \text{za} \quad \frac{L_{WL}^3}{V} > 1726,91 \quad (61)$$

$$D = -0,9 \quad (62)$$

Upadni kut i_E je kut vodne linije na pramcu u stupnjevima izražen prema središnjoj ravnini zanemarujući oblik statve. Ukoliko upadni kut nije poznat može se izračunati kako slijedi:

$$i_E = 1 + 89 \exp \left[- \left(\frac{L_{WL}}{B} \right)^{0,80856} (1 - C_{WP})^{0,30484} \cdot (1 - C_P - 0,0225 lcb)^{0,6367} \left(\frac{L_R}{B} \right)^{0,34574} \left(\frac{100 \nabla}{L_{WL}^3} \right)^{0,16302} \right] \quad (63)$$

Formula (63) je dobivena regresijskom analizom podataka preko 200 oblika trupova s rasponom kuta $1^\circ < i_E < 90^\circ$. Koeficijent koji određuje utjecaj pramčanog bulba na otpor valova može se izraziti preko:

$$c_3 = \frac{0,56 A_{BT}^{1,5}}{BT (0,31 \sqrt{A_{BT}} + T_F - h_B)} \quad (64)$$

gdje je:

A_{BT} - poprečna površina bulba iznad kobilice,

h_B - položaj težišta površine A_{BT} ,

T_F - visina gaza na pramcu.

Dodatni otpor uslijed prisutnosti pramčanog bulba u blizini površine vode određuje se prema:

$$R_B = \exp(-3P_B^{-2}) \frac{Fn_i^3 A_{BT}^{1,5} \rho g}{1 + Fn_i^2} \quad (65)$$

gdje je:

p_B - koeficijent izranjanja pramca,

Fn_i - Froudeov broj temeljen na izranjanju.

Koeficijent p_B i Froudeov broj Fn_i potrebni za izračun dodatnog otpora uslijed prisutnosti pramčanog bulba određuju se prema izrazima:

$$p_B = 0,56 \frac{\sqrt{A_{BT}}}{T_F - 1,5h_B} \quad (66)$$

$$Fn_i = \frac{v}{\sqrt{g(T_F - h_B - 0,25\sqrt{A_{BT}}) + 0,15v^2}} \quad (67)$$

Na sličan način dodatni otpor oblika uslijed uronjenog zrcala može se odrediti prema:

$$R_{TR} = 0,5 \rho v^2 A_T c_6 \quad (68)$$

gdje je:

c_6 - koeficijent poveza sa Froudeovim brojem temeljen na uronjenom zrcalu koji se određuje prema:

$$c_6 = 0,2(1 - 0,2Fn_T) \quad \text{za} \quad Fn_T < 5 \quad (69)$$

$$c_6 = 0 \quad \text{za} \quad Fn_T \geq 5 \quad (70)$$

Gdje je:

Fn_T - Froudeov broj na temelju uronjenog zracala koji se određuje prema:

$$Fn_T = \frac{v}{\sqrt{\frac{2gA_T}{B + BC_{WP}}}} \quad (71)$$

gdje je:

C_{WP} - koeficijent punoće plovne vodne linije.

Korelacijski otpor R_A obuhvaća utjecaj hrapavosti broskog trupa i otpora zraka bez utjecaja vjetra i određuje se prema:

$$R_A = \frac{1}{2} \rho v^2 S C_A \quad (72)$$

Analizom rezultata probnih vožnji koji su bili ispravljani za idealne uvjete za probnu vožnju dobivena je sljedeća formula za koeficijent korelacijskog otpora C_A :

$$C_A = 0,006(L_{WL} + 100)^{-0,16} - 0,00205 + 0,003 \sqrt{\frac{L_{WL}}{7,5}} C_B^4 c^2 (0,04 - c_4) \quad (73)$$

gdje je:

$$c_4 = \frac{T_F}{L_{WL}} \quad \text{za} \quad \frac{T_F}{L_{WL}} \leq 0,04 \quad (74)$$

$$c_4 = 0,04 \quad \text{za} \quad \frac{T_F}{L_{WL}} > 0,04 \quad (75)$$

Vrijednost C_A se može povećati radi uključivanja utjecaja veće hrapavosti trupa od standardne za koju srednja vrijednost odstupanja profila hrapavosti iznosi $k = 150 \mu\text{m}$. Povećanje C_A za hrapavost veću od standardne određuje se prema sljedećem izrazu:

$$C_A = \frac{0,105k^{1/3} - 0,005579}{L_{WL}^3} \quad (76)$$

U formuli (76) L_{WL} i k izraženi su u metrima [6].

5.2. Izvori pogrešaka u rezultatima ukupnog otpora dobivenih Holtrop metodom

Princip proračuna ukupnog otpora prema Holtropu mogu dati različite rezultate predviđanja ukupnog otpora. Neki razlozi za to su:

- Određivanje faktora forme. Metodologija proračuna ukupnog otpora koristi oplakanu površinu za opis veličine broda. Određivanje stvarne dinamičke oplakane površine kao što se koristi u analizi gliserskih formi bi bio najprecizniji pristup. Budući da analiza mjerenja dinamičke oplakane površine nije jednostavna u praksi se koristi mjerenje oplakane površine u stanju mirovanja. To može dovesti do značajnih pogrešaka u određivanju pojedinih komponenata otpora kao i pogrešaka pri ekstrapolaciji rezultata s modela na brod u naravi, posebice pri većim brzinama plovidbe.
- Procjena parametara koji se ne mogu izmjeriti. Metoda Holtrop koristi parametre za koje ne postoji standardna definicija mjerenja, kao što je kut ulaza i koeficijent krme.
- Ograničenja primjene Holtrop metode. Formule za određivanje koeficijenata i parametara za izračun ukupnog otpora mogu dati značajne pogreške za pojedine kombinacije podataka o trupu, tj. mogu biti vrlo osjetljivi na različite kombinacije parametara trupa.
- Objavljene pogreške pri određivanju ukupnog otpora metodom Holtrop. Postoji 5 različitih objavljenih izvješća u periodu od 11 godina koji predstavljaju različite evaluacije Holtropove metode predviđanja ukupnog otpora. Glavni i najčešći citirani izvor je rad iz 1984., iako se rad objavljen 1982 (Holtrop & Mennen) također često navodi kao provjereni proračun. Formule se razlikuju od rada do rada, pa naravno rezultati predviđanja ukupnog otpora također će biti drugačiji. Reference su također objavljivane u drugim knjigama i časopisima, a utvrđeno je da su neki od njih pogrešni [9].

5.2.1. Utjecaj brzine broda na određivanje faktora forme k

Studije korelacije rezultata s modela na brod u naravi izvršene u periodu od 1972. do 1978. godine prema ITTC-u pokazale su da korištenje faktora forme $(1+k)$ smanjuje disperziju korelacijskih koeficijenata za pretvorbu snage. Faktori forme korišteni u ovim studijama dobiveni su metodom Prohaska i smatrano je da su neovisni o brzini broda. Ovo implicira da Froudeov broj i Reynoldsov broj ne utječe na faktor forme $(1+k)$. Statistička metoda

predviđanja razvijena je preko regresijske analize otpora valova na rasponu Froudeovih brojeva uključujući utjecaj pramčanog bulba.

Pokazalo se na temelju rezultata mjerenja sustrujanja da Froudeov broj i Reynoldsov broj utječu na faktor forme. Također modelska ispitivanja pokazala su da promjenjiva temperatura u bazenu za ispitivanja utječe na faktor forme $(1+k)$ te da se on ne može uzimati kao konstantna vrijednost. Statistička provjera korelacijskih podataka metode s koeficijentom forme ovisnim o brzini nisu pokazala značajna poboljšanja zbog relativno malog raspona Froudeovih brojeva u većini komercijalnih modelskih ispitivanja kao i malog utjecaja forme na Reynoldsov broj. Pored ovoga postoji još razmatranja koji mogu utjecati na odluku o korištenju konstantne vrijednosti faktora forme $(1+k)$. Proračuni, mjerenja geometrijske sličnosti, ispitivanja sustrujanja i utjecaj mjerila na tip sustrujanja pokazuju da faktor forme ovisi o Reynoldsovom broju. Pored ovih dokaza ne postoji općeniti zaključak o vrijednosti utjecaja Reynoldsovog broja na faktor forme $(1+k)$ nego će se mijenjati ovisno o formi broda [9].

Strogo gledajući faktor forme određen ekstrapolacijom podataka za Froudeov broj $Fn = 0$ vrijedi samo za niske Froudeove brojeve. Na većim brzinama viskozni dio otpora bit će pod utjecajem slobodne površine, valova i promjenjivog trima.

- Statistička korelacija ITTC-a na temelju faktora forme neovisnog o mjerilu i brzini pokazala je da krivulja ovisnosti snage o brzini je strmija od onih koje su dobivene mjerenjem na brodovima u naravi. Odstupanja nagiba krivulje dobivene metodom predviđanja od izmjerenih krivulja na pokusnim plovibama bi bila veća ukoliko bi se u prikazu rezultata koristio veći dodatak uslijed hrapavosti trupa koji je funkcija Reynoldsovog broj i ovisi o brzini plovidbe. Može se zaključiti da raspon Froudeovih brojeva bi se trebao nalaziti između $0,12 < Fn < 0,25$, pa se predlaže uvećanje faktora forme $(1+k)$ na ovom rasponu Froudeovih brojeva.
- Utjecaj slobodne površine uzrokuje promjenu brzine na središnjem dijelu broda gdje se u pravilu stvara valni dol kada poprečni valovi poprimaju duljinu jednaku duljini broda. Gradijent tlaka u krmenom dijelu postaje naglašeniji kada se brzine na središnjem dijelu broda povećaju uslijed sustava valova oko broda. To znači da najveće promjene pri utjecaju faktora forme se dešavaju na Froudeovim brojevima nižim od $Fn < 0,5$.

- Podatci o brodovima u naravi, posebice pri nižim Froudeovim brojevima, često su veći od onih dobivenih modelskim ispitivanjima i statističkim metodama predviđanja posebice što se tiče korištenja faktora forme pri ekstrapolaciji rezultata. To znači da se greške mogu pojaviti koje sprječavaju donošenje generalnih zaključaka o korelaciji rezultata s modela na brod.

5.2.2. Utjecaj pramčanog bulba na rezultate dobivene metodom predviđanja

Oblik pramčanog bulba i predviđanje utjecaja na rezultate ukupnog otpora u mnogo slučajeva nije još detaljno istražen. Da bi se poboljšalo shvaćanje ovog problema potrebno je koristiti računalne metode temeljene na metodi panela prema Dawson-u ili sistemske geometrijske opise dobivene ispitivanjima različitih oblika pramčanog bulba. Smatra se da uspješno predviđanje utjecaja bulba na rezultat ukupnog otpora ne može biti obuhvaćeno uslijed ograničenog broja globalnih koeficijenata forme bulba. Rezultati dobiveni metodom predviđanja ne bi se trebali smatrati točnim što se tiče utjecaja pramčanog bulba budući da statistička obrada podataka nije obuhvaćala analizu različitih oblika. Metoda predviđanja trebala bi se koristiti samo kao preliminarna analiza, dok bi se krajnji rezultat trebao potvrditi daljnjim proračunima i modelskim ispitivanjima. Pokušaji da se definiraju optimalni parametri pramčanog bulba na temelju prijašnjih statističkih obrada regresijske analize rezultata pokazali su nezadovoljavajuće rezultate u pojedinim slučajevima. Poboljšanje opisa utjecaja bulba pokušalo se izvesti uključivanjem parametara forme trupa koji se odnose na uron pramčanog dijela broda. Razvijena je empirička formula koja je u pojedinim slučajevima dala neshvatljive rezultate za pojedine koeficijente forme. U metodi predviđanja koja se koristila u ovom radu utjecaj pramčanog bulba temelji se na slijedećem koeficijentu:

$$\frac{\sqrt{A_{BT}}}{T_F - h_B} \quad (77)$$

gdje je:

A_{BT} - poprečna površina bulba na poziciji gdje mirna slobodna površina presijeca pramčanu statvu,

T_F - visina gaza na pramcu,

h_B - položaj težišta površine A_{BT} .

Korištenje ovog koeficijenta implicira da vrlo mali pramčani bulb s površinom presjeka približno $A_{BT} \approx 0\text{m}^2$ koji se nalazi točno ispod slobodne površine vode ima jednaki utjecaj kao i vrlo veliki pramčani bulb duboko uronjen [9]

5.3. Rezultati ukupnog otpora postojeće forme dobiveni metodom Holtrop u programu Excel preko glavnih parametara forme

Proračun je izvršen za brod u naravi koji odgovara ispitanom modelu M-1161B na projektnom gazu. Razlog odabira ovog slučaja opterećenja je duboko uronjeni bulb na zadanom rasponu brzina. Proračun se temelji na osnovnim parametrima trupa danih u tablici 12. U daljnjem tekstu prikazan je princip proračuna za brod u naravi za brzinu broda $v = 15$ čv.

Tablica 12. Ulazni parametri proračuna

$L_{WL}, \text{ m}$	178,4
$B, \text{ m}$	32,2
$T, \text{ m}$	12,18
$V, \text{ m}^3$	55538
C_M	0,9933
C_W	0,8879
$A_{bt}, \text{ m}^2$	32
$h_B, \text{ m}$	6,8
$A_t, \text{ m}^2$	0
$lcb, \%$	1,688
$v, \text{ čv}$	15
C_{krma}	0
C_B	0,8101
C_P	0,8156
Fn	0,1844

Unosom osnovnih parametara računaju se parametri potrebni za provedbu proračuna. Potrebno je provjeriti da li se ulazni parametri nalaze unutar zadanih granica. Granice pojedinih parametara prikazane su u tablici 9. Proračun parametara i koeficijenata za pojedine komponente ukupnog otpora izvršen je na osnovu izraza prikazanih u poglavlju 5.1. U tablici

13. prikazane su vrijednosti pojedinih komponenti otpora te vrijednost ukupnog otpora za brzinu broda od $v = 15$ čv.

Tablica 13. Vrijednosti pojedinih komponenata ukupnog otpora broda

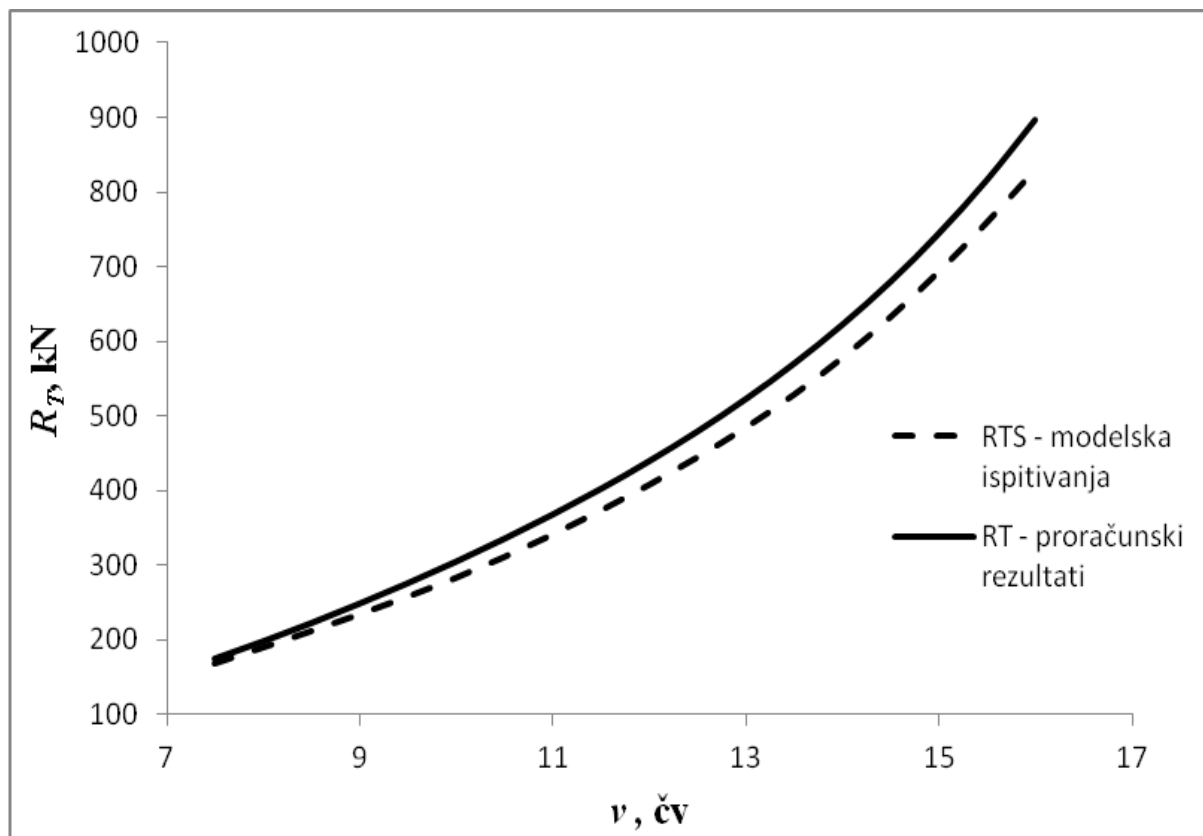
R_F , kN	$(1+k)$	R_W , kN	R_B , kN	R_A , kN	R_{APP} , kN	R_{TR} , kN	R_T , kN	P_E , kW
391,7	1,316	88,9	38,4	101,1	0	0	743,7	5738,2

Za zadani raspon brzina izvršen je proračun ukupnog otpora te je prikazan u tablici 14. U tablici se također mogu vidjeti vrijednosti apsolutne pogreške i relativne pogreške odstupanja rezultata u postocima od rezultata ukupnog otpora dobivenih modelskim ispitivanjima.

Tablica 14. Vrijednosti ukupnog otpora broda i efektivne snage za zadani raspon brzina

v , čv	R_{TS} , kN	R_T , kN	Apsolutna pogreška	Relativna pogreška, %
7,5	168,3	175,76	7,5	4,24
8	189,8	198,90	9,1	4,58
8,5	211,8	223,42	11,6	5,20
9	234,3	249,31	15,0	6,02
9,5	257,9	276,64	18,7	6,77
10	283,3	305,48	22,2	7,26
10,5	311,1	335,97	24,9	7,40
11	341,2	368,30	27,1	7,36
11,5	373,4	402,73	29,3	7,28
12	407,8	439,61	31,8	7,24
12,5	444,8	479,38	34,6	7,21
13	484,5	522,57	38,1	7,29
13,5	528,6	569,81	41,2	7,23
14	577,8	621,83	44,0	7,08
14,5	632,7	679,47	46,8	6,88
15	693,4	743,68	50,3	6,76
15,5	759,6	815,45	55,9	6,85
16	830,5	895,81	65,3	7,29

Iz tablice 14. može se uočiti da rezultati ukupnog otpora dobiveni modelskim ispitivanjima odstupaju od rezultata ukupnog otpora dobivenih proračunom. Usporedba rezultata prikazana grafički je na slici 11.

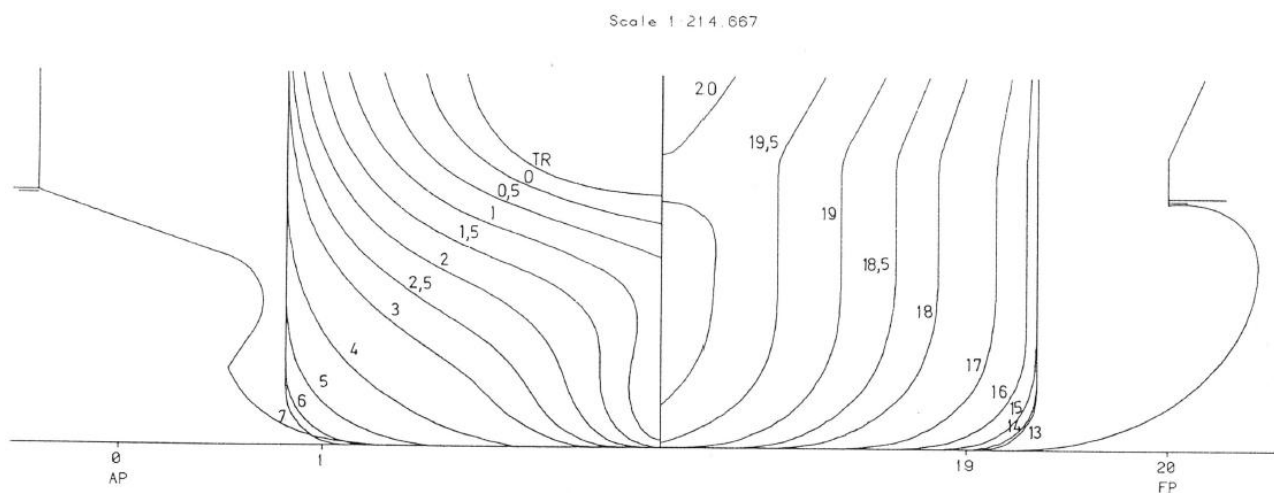


Slika 11. Usporedba krivulje ukupnog otpora dobivene modelskim ispitivanjima sa krivuljom ukupnog otpora dobivene proračunom

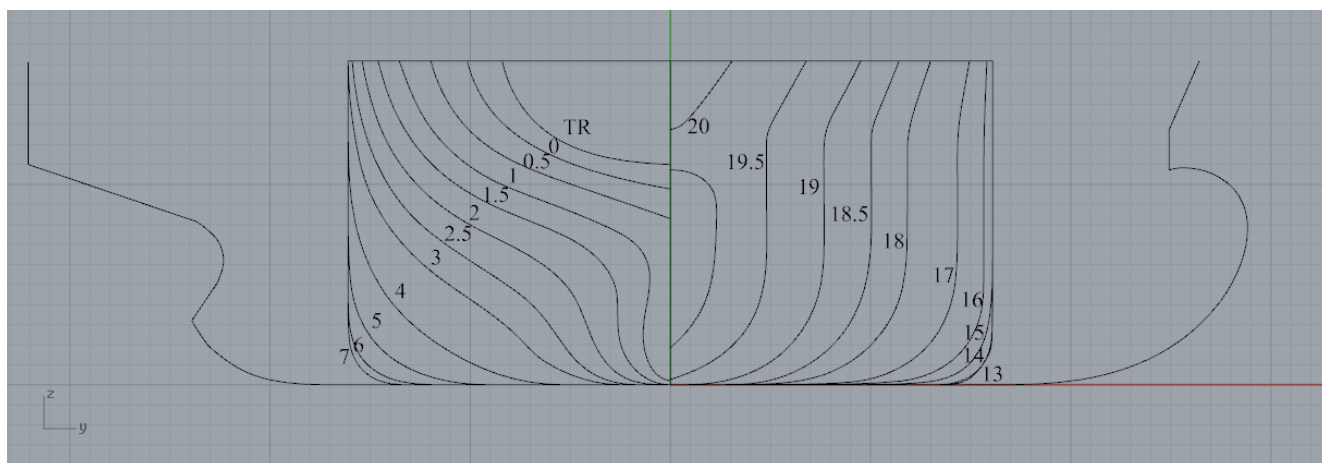
6. ANALIZA UKUPNOG OTPORA POSTOJEĆE FORME U PRIKLADNOM PROGRAMSKOM PAKETU

6.1. Generirani model postojeće forme u programskom paketu *Rhinoceros 5.0*

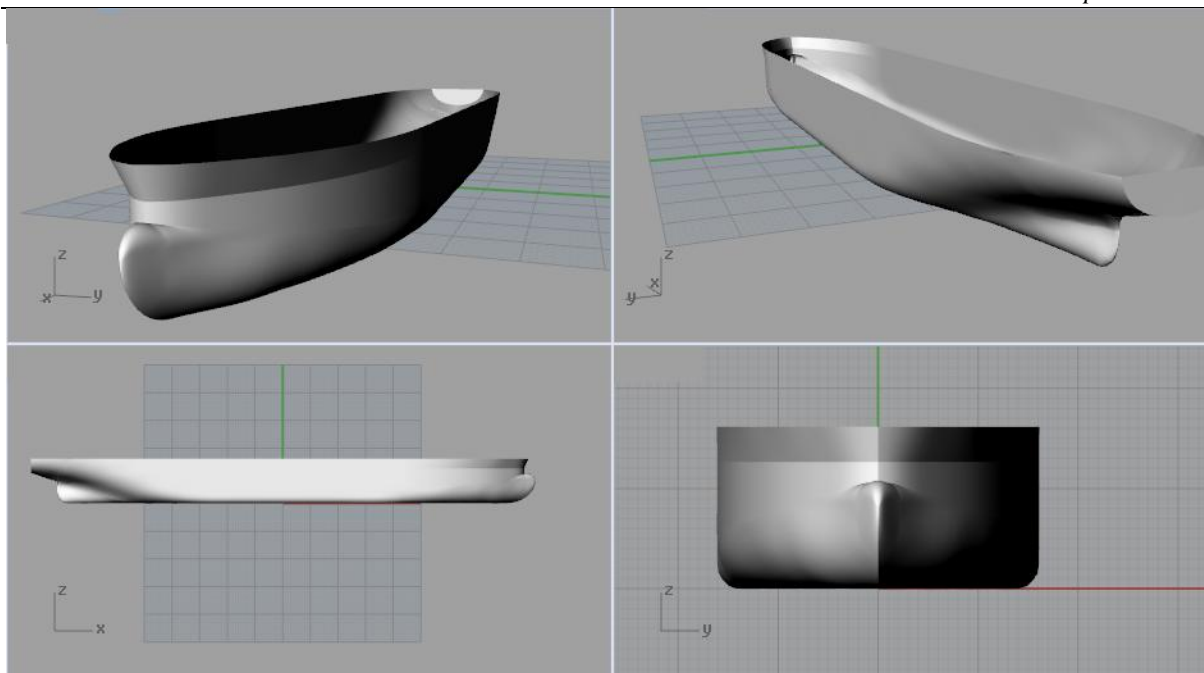
Na temelju nacрта rebara postojeće forme, slika 12., generiran je 3D model pomoću programskog paketa *Rhinoceros 5.0*. Nakon što su u prostoru modelirana sva rebra modela slika 13., generirane su 3D plohe koje ih povezuju, slika 14.



Slika 12. Nacrt rebara postojeće forme



Slika 13. Nacrt rebara postojeće forme u programskom paketu *Rhinoceros*



Slika 14. 3D generirani model postojeće forme

6.2. Analiza ukupnog otpora postojeće forme simulacijom u programskom paketu *Maxsurf Resistance*

6.2.1. Općenito o programskom paketu *Maxsurf Resistance*

Maxsurf Resistance je program koji omogućava predviđanje ukupnog otpora brodskog trupa. Model broda iz programskog paketa *Maxsurf Modeler Advanced* može se učitati i automatski se mogu dobiti parametri broda potrebni za analizu ukupnog otpora. Druga mogućnost je ručno upisivanja parametara bez potrebe za generiranjem modela. U ovom radu koristio se generirani model u *Rhinoceros* programskom paketu.

Maxsurf Resistance se može koristiti kao alat u fazi projektiranja ili u fazi analize postojećeg modela broda. Parametri modela mogu se utvrditi pomoću analize otpora različitih preliminarnih modela trupa ili analizom otpora postojećih modela. *Maxsurf Resistance* primjenjuje nekoliko različitih algoritama predviđanja otpora. Svaki algoritam se primjenjuje za različite oblike trupa i načina ostvarenja uzgona. Na primjer, neki od algoritama su korisni za procjenu otpora gliserskih formi, a drugi su korisni za procjenu otpora deplasmanskih i poludeplasmanskih formi.

Treba naglasiti da predviđanje ukupnog otpora navedenim algoritmima nije u potpunosti sigurno koristiti za procjenu ukupnog otpora trupa, jer ne mogu dati pouzdane rezultate. S obzirom na podatke koji su potrebni za algoritme predviđanja ukupnog otpora odabranih za analizu, *Maxsurf Resistance* će izračunati ukupni otpor trupa u zadanom rasponu brzina te će

se rezultati prikazati u grafičkom i tabličnom formatu. Parametri trupa mogu se upisati izravno u predviđeni *Maxsurf Resistance* prozor ili se model može učitati direktno u program i automatski izmjeriti. *Maxsurf Resistance* će izvući potrebne podatke za procjenu ukupnog otpora za pojedine metode [10].

Maxsurf Resistance pruža različite algoritme za procjenu ukupnog otpora trupa. Oni su podijeljeni u različite skupine ovisno o vrsti trupa:

- metode za gliserske forme,
- metode za deplasmanske brodove,
- metode koje se primjenjuje na jahtama,
- analitičke metode.

Budući da je u ovom radu riječ o analizi ukupnog otpora tankera korištena je metoda procjene ukupnog otpora za deplasmanske brodove. Algoritam Holtrop je dizajniran za predviđanje ukupnog otpora tankera, teretnih brodova, ribarskih brodova, kontejnerskih brodova i fregata.[10]

Budući da su algoritmi izrađeni za specifične vrste trupova, oni će biti najprecizniji kada su ispunjeni određeni uvjeti. Glavni uvjeti su postavljeni na brzinu broda i dimenzije broda. Ograničenje brzine nalazi se u rasponu od $0 \leq Fn_L \leq 0,80$. Ograničenja na dimenzije dani su u rasponima:

- koeficijent prizmatičnosti $0,55 \leq C_p \leq 0,85$,
- omjer duljine i širine $3,9 \leq \frac{L}{B} \leq 15$,
- omjer širine i gaza $3,9 \leq \frac{B}{T} \leq 15$,

gdje je:

$$C_p = \frac{\nabla}{LA_x} \quad (78)$$

∇ - volumen istisnine,

L - duljina broda na vodnoj liniji,

A_x – maksimalni presjek,

B – širina broda na vodnoj liniji,

T – gaz na sredini broda.

6.3. Rezultati ukupnog otpora postojeće forme dobiveni simulacijom u programskom paketu *Maxsurf Resistance*

6.3.1. Rezultati ukupnog otpora za stanje potpuno nakrcanog broda

U tablici 15. prikazane su vrijednosti parametara forme dobiveni izravnim mjerenjem generiranog modela u programskom paketu *Maxsurf Resistance*. U tablici su također vidljive i relativne pogreške parametara generiranog modela od parametara postojeće forme.

Tablica 15. Rezultati i relativna pogreška parametara forme dobivenih simulacijom u programu *Maxsurf Resistance* za stanje potpuno nakrcanog broda

	Rezultati modelskih ispitivanja	Rezultati simulacije u <i>Maxsurf Resistance-u</i>	Relativna pogreška, %
L_{WL} , m	178,4	178,368	0,02
B , m	32,2	32,214	-0,04
T , m	10,98	11,007	-0,25
V , m ³	49466	49453,61	0,03
S , m ²	7996,5	7963,88	0,41
C_p	0,8065	0,805	0,19
C_{wp}	5,9342	0,891	-2,17
A_x , m ²	350,87	351,263	-0,11
A_B , m ²	32	31,943	0,18
h_B , m	6,2	6,788	-6,9
T_{FP} , m	10,98	10,98	0
v , m ² /s	$1,19 \cdot 10^{-06}$	$1,19 \cdot 10^{-06}$	0
ρ_w , t/m ³	1,026	1,026	0

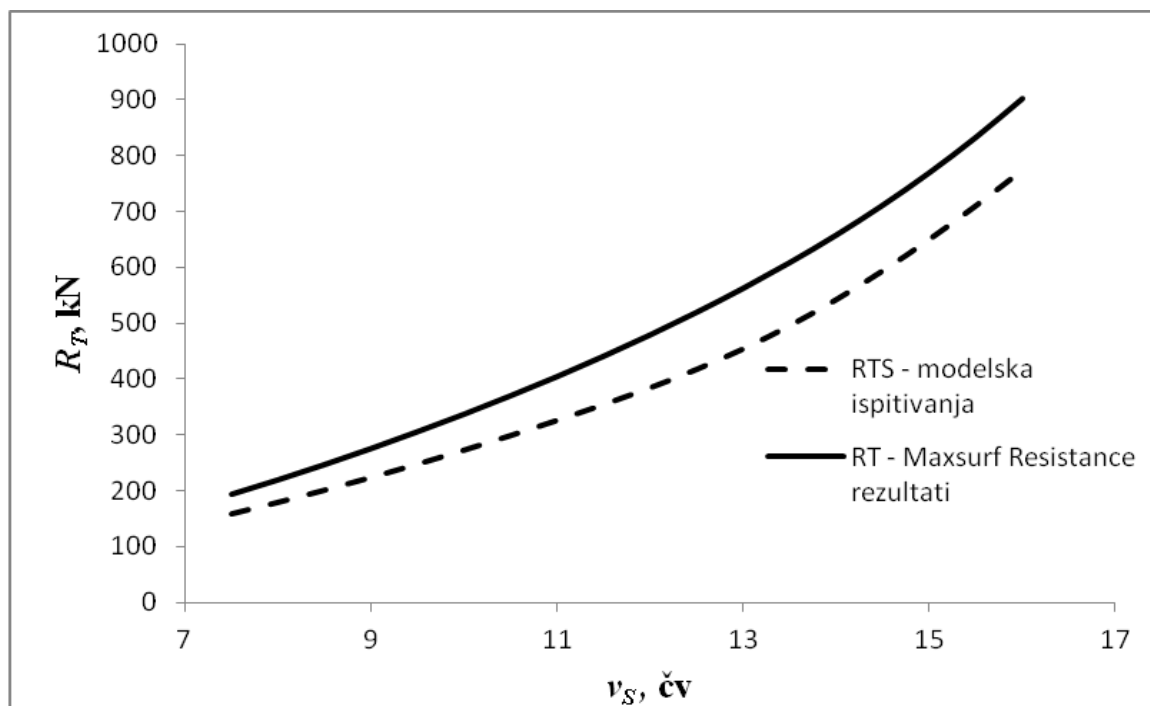
Iz tablice 15. može se vidjeti da prema relativnoj pogrešci generirani model u programskom paketu *Rhinoceros* u odnosu na postojeću formu zadovoljavajuće opisuje sve važne parametre potrebne za proračun ukupnog otpora metodom Holtrop. Relativna pogreška govori o točnosti generiranog modela postojeće forme potrebne za simulaciju ukupnog otpora.

U tablici 16. prikazani su rezultati analize ukupnog otpora u programskom paketu *Maxsurf Resistance* za zadani raspon brzina kao i relativna pogreška ukupnog otpora dobivenog simulacijom u odnosu na ukupni otpor dobiven modelskim ispitivanjima.

Tablica 16. Rezultati i relativna pogreška ukupnog otpora za stanje potpuno nakrcanog broda

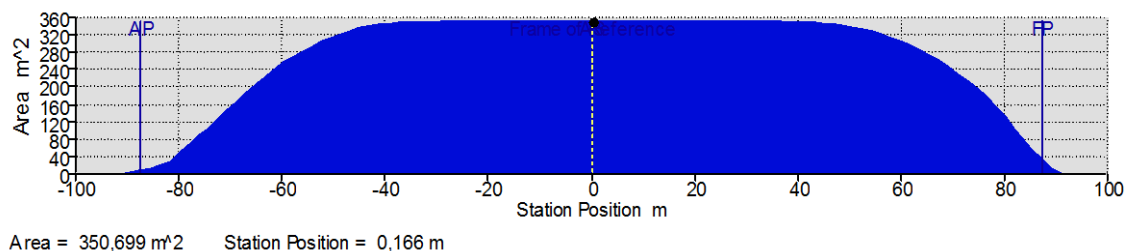
	Rezultati modelskih ispitivanja	Rezultati simulacije u <i>Maxsurf Resistance</i>-u	Apsolutna pogreška	Relativna pogreška, %
v_S, čv	R_{TS}, kN	R_T, kN		
7,5	159	194,7	35,7	18,34
8	179,8	220,7	40,9	18,53
8,5	201,6	248	46,4	18,71
9	224,4	276,7	52,3	18,90
9,5	248,4	306,8	58,4	19,04
10	273,5	338,3	64,8	19,15
10,5	299,6	371,2	71,6	19,29
11	326,8	405,7	78,9	19,45
11,5	355,1	442	86,9	19,66
12	385,3	480,2	94,9	19,76
12,5	418,3	520,7	102,4	19,67
13	455,1	563,7	108,6	19,27
13,5	496,6	609,7	113,1	18,55
14	543,4	659,1	115,7	17,55
14,5	595,1	712,6	117,5	16,49
15	651,4	770,6	119,2	15,47
15,5	711,6	833,9	122,3	14,67
16	775,2	903,1	127,9	14,16

Iz tablice 16. može se vidjeti da rezultati ukupnog otpora za generirani model prema relativnoj pogrešci značajno odstupaju od rezultata ukupnog otpora dobivenih modelskim ispitivanjima. Razlog odstupanja rezultata ukupnog otpora leži u poziciji pramčanog bulba. Za stanje potpuno nakrcanog broda bulb se nalazi u neposrednoj blizini površine vode i prema metodi Holtrop simulacija može dati pogrešne rezultate. Također za zadani raspon brzina koeficijent forme se računa izravnim mjerenjem forme te nije poznat podatak o točnosti izračuna. Na slici 15. prikazana je usporedba krivulje ukupnog otpora za stanje potpuno nakrcanog broda dobivene simulacijom u programskom paketu *Maxsurf Resistance* i krivulje ukupnog otpora dobivene modelskim ispitivanjima. Iz slike se može uočiti da je trend krivulja jednak.



Slika 15. Usporedba krivulja ukupnog otpora modelskih ispitivanja i krivulje ukupnog otpora dobivene simulacijom u programskom paketu *Maxsurf Resistance* za stanje potpuno nakrcanog broda

Na slici 16. prikazana je areala rebara postojeće forme izmjerena u programskom paketu *Maxsurf Resistance*.



Slika 16. Areala rebara postojeće forme za stanje potpuno nakrcanog broda

6.3.2. Rezultati ukupnog otpora za stanje projektnog gaza

U tablici 17. prikazane su vrijednosti parametara forme dobiveni izravnim mjerenjem generiranog modela u programskom paketu *Maxsurf Resistance*.

Tablica 17. Rezultati i relativna pogreška parametara forme dobivenih simulacijom u programskom paketu *Maxsurf Resistance* za stanje projektnog gaza

	Rezultati modelskih ispitivanja	Rezultati simulacije u <i>Maxsurf Resistance</i> -u	Relativna pogreška, %
L_{WL} , m	178,4	178,398	0,0
B , m	32,2	32,217	-0,05
T , m	12,18	12,207	-0,22
V , m ³	55538	55528,24	0,02
S , m ²	8457,1	8435,93	0,25
C_p	0,8156	0,815	0,08
C_{wp}	0,8879	0,906	-2,04
A_x , m ²	389,55	389,90	-0,09
A_B , m ²	32	31,94	0,18
h_B , m	6,2	6,79	-6,9
T_{FP} , m	12,18	12,18	0
v , m ² /s	$1,19 \cdot 10^{-06}$	$1,19 \cdot 10^{-06}$	0
ρ_w , t/m ³	1,026	1,026	0

Iz tablice 17. može se vidjeti da prema relativnoj pogrešci generirani model u programskom paketu *Rhinoceros* u odnosu na postojeću formu zadovoljavajuće opisuje sve važne parametre potrebne za proračun ukupnog otpora.

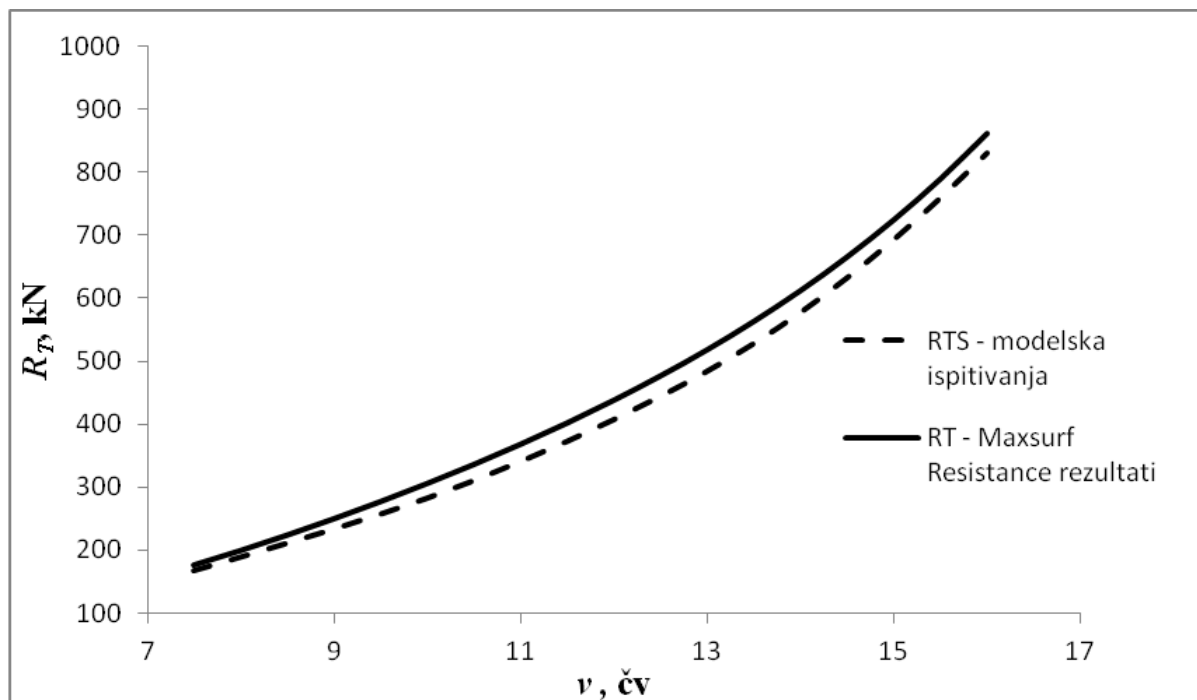
U tablici 18. prikazani su rezultati analize ukupnog otpora u programu Rezultati i relativna pogreška parametara forme dobivenih simulacijom u programskom paketu *Maxsurf Resistance* za zadani raspon brzina.

Tablica 18. Rezultati i relativna pogreška ukupnog otpora za stanje projektnog gaza

	Rezultati modelskih ispitivanja	Rezultati simulacije u <i>Maxsurf</i> <i>Resistance-u</i>	Apsolutna pogreška	Relativna pogreška, %
v_s , čv	R_{TS} , kN	R_T , kN		
7,5	168,3	176,1	7,8	4,43
8	189,8	199,2	9,4	4,72
8,5	211,8	223,8	12,0	5,36
9	234,3	249,7	15,4	6,17
9,5	257,9	277	19,1	6,90
10	283,3	305,8	22,5	7,36
10,5	311,1	336,1	25,0	7,44
11	341,2	368,2	27,0	7,33
11,5	373,4	402,1	28,7	7,14
12	407,8	438,3	30,5	6,96
12,5	444,8	477	32,2	6,75
13	484,5	518,6	34,1	6,58
13,5	528,6	563,7	35,1	6,23
14	577,8	612,7	34,9	5,70
14,5	632,7	666,3	33,6	5,04
15	693,4	725,3	31,9	4,40
15,5	759,6	790,4	30,8	3,90
16	830,5	862,5	32,0	3,71

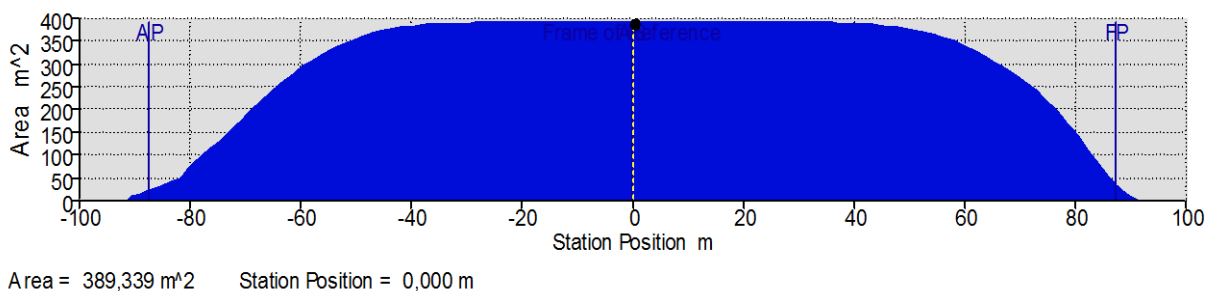
Iz tablice 18. može se vidjeti da rezultati ukupnog otpora za generirani model znatno manje odstupaju od rezultata ukupnog otpora dobivenih modelskim ispitivanjima. Razlog manjeg odstupanja rezultata ukupnog otpora leži u poziciji pramčanog bulba. Za stanje projektnog gaza bulb je dublje uronjen nego kod stanja potpuno nakrcanog. U daljnjoj analizi ukupnog otpora i istraživanju utjecaja glavnih izmjera forme i utjecaja pramčanog dijela broda koristit će se stanje projektnog gaza. Razlog odabira ovog stanja krcanja je u relativno prihvatljivim

rezultatima odstupanja ukupnog otpora od rezultata ukupnog otpora dobivenih modelskim ispitivanjima. Na slici 17. prikazana je usporedba krivulje ukupnog otpora dobivene simulacijom u programskom paketu *Maxsurf Resistance* i krivulje ukupnog otpora dobivene modelskim ispitivanjima za stanje projektog gaza. Iz slike se može uočiti da je trend krivulja jednak.



Slika 17. Usporedba krivulje ukupnog otpora dobivene modelskim ispitivanjima i krivulje ukupnog otpora dobivene simulacijom u programskom paketu *Maxsurf Resistance* za stanje projektog gaza

Na slici 18. prikazana je areala rebara postojeće forme izmjerena u programskom paketu *Maxsurf Resistance* za stanje projektog gaza.



Slika 18. Areala rebara postojeće forme za stanje projektog gaza

7. ISTRAŽIVANJE UTJECAJA GLAVNIH IZMJERA BRODA NA UKUPNI OTPOR

7.1. Princip affine transformacije forme

Projektanti često koriste već postojeće i isprobane forme kao osnovu za razvijanje forme novog projekta. Općenito bi se moglo opsežnim modifikacijama transformirati bilo koja forma u neku drugu. Međutim, potrebna količina rada i poznavanja detalja nove forme bi rezultirala istom ako ne i većom količinom rada nego je potrebna za razvijanje potpuno nove forme. Zbog toga se podrazumijevaju relativno jednostavne transformacije kojima se uz mali utrošak rada može dobiti forma novog projekta polazeći od poznate i izglađene forme prototipa. Moguć je veliki broj modifikacija forme koje se mogu provesti jedna po jedna ili sve odjednom:

- geometrijska sličnost,
- affine transformacije,
- modifikacija oblika rebara (promjena nagiba dna, nagiba bokova, radijusa uzvoja, U ili V oblika),
- modifikacija uzdužnog presjeka broda,
- promjena prizmatičkog koeficijenta C_P i uzdužnog položaja težišta istisnine x_{CB} [11].

Afine transformacije se koriste kad sve dimenzije novog broda nisu u istoj proporciji prema analognim dimenzijama prototipa tako da geometrijska sličnost ne postoji. Potrebno je uvesti različita mjerila u smjeru svake osi. Sve dimenzije u smjeru jedne osi odredit će se množenjem s pripadnim mjerilom:

$$x_N = \lambda_x x_0 \quad (79)$$

$$y_N = \lambda_y y_0 \quad (80)$$

$$z_N = \lambda_z z_0 \quad (81)$$

Mjerila u smjeru svake osi se jednostavno mogu odrediti iz omjera glavnih izmjera projekta i prototipa:

$$\lambda_L = \frac{L_N}{L_0} \quad (82)$$

$$\lambda_B = \frac{B_N}{B_0} \quad (83)$$

$$\lambda_T = \frac{T_N}{T_0} \quad (84)$$

Sve površine (vodne linije ili najvećeg rebra) afine forme bit će promijenjene s umnoškom mjerila odgovarajuće ravnine:

$$(A_{WP})_N = \lambda_L \lambda_B (A_{WP})_0 \quad (85)$$

$$(A_X)_N = \lambda_L \lambda_T (A_X)_0 \quad (86)$$

Važno je napomenuti da se oplakana površina kod afine transformacije ne mijenja kao jednostavna funkcija mjerila, jer je to trodimenzijska ploha [11].

Volumen istisnine novog broda se dobiva iz istisnine prototipa množenjem mjerilima u sva tri smjera:

$$(\nabla)_N = \lambda_L \lambda_B \lambda_T (\nabla)_0 \quad (87)$$

U ovom radu za istraživanje utjecaja glavnih izmjera broda na rezultat ukupnog otpora koristio se princip afine transformacije. Mijenjane su linearne karakteristike forme i to duljina L , širina B i gaz T . Da bi se zadovoljio uvjet afinosti i uvjet nosivosti umnožak mjerila u svim smjerovima morao je biti jednak 1.

$$\lambda_L \lambda_B \lambda_T = 1 \quad (88)$$

Za istraživanje utjecaja glavnih izmjera povećavala se duljina broda za vrijednosti 3%, 6% i 9%. Za ta povećanja izvršena je promjena gaza broda prikazana u tablici 19. dok je širina broda izračunata prema izrazu (80). Ukupno je promatrana 21 forma.

Tablica 19. Kombinacije promjene parametara duljine i gaza postojeće forme

Povećanje duljine L , %	Promjena gaza T , %	Povećanje duljine L , %	Promjena gaza T , %	Povećanje duljine L , %	Promjena gaza T , %
3	3	6	3	9	3
	6		6		6
	9		9		9
	0		0		0
	-3		-3		-3
	-6		-6		-6
	-9		-9		-9

7.2. Rezultati ukupnog otpora formi dobivenih afinom transformacijom postojeće forme

Tijekom analize koeficijent punoće $C_B = 0,81$, koeficijent prizmatičnosti $C_p = 0,82$ i volumen istisnine $V = 55538 \text{ m}^3$ održavani su konstantni kako bi se zadovoljio princip afinosti i sama nosivost broda iznosila je $\Delta_p = 56982 \text{ t}$. Vrijednosti afinih transformacija parametara postojeće forme prikazane su u tablici 20.

Tablica 20. Afine transformacije parametara postojeće forme

	λ_L	λ_B	λ_T	$L_{PP}, \text{ m}$	$L_W, \text{ m}$	$B, \text{ m}$	$T, \text{ m}$	L_{PP}/B	B/T	$A_X, \text{ m}^2$
FORMA	1	1	1	174,8	178,4	32,2	12,18	5,43	2,64	389,55
1	1,03	0,94	1,03	180,04	183,75	30,35	12,55	5,93	2,42	378,20
2	1,03	0,92	1,06	180,04	183,75	29,49	12,91	6,10	2,28	378,20
3	1,03	0,89	1,09	180,04	183,75	28,68	13,28	6,28	2,16	378,20
4	1,03	0,97	1,00	180,04	183,75	31,26	12,18	5,76	2,57	378,20
5	1,03	1,00	0,97	180,04	183,75	32,23	11,81	5,59	2,73	378,20
6	1,03	1,03	0,94	180,04	183,75	33,26	11,45	5,41	2,90	378,20
7	1,03	1,07	0,91	180,04	183,75	34,35	11,08	5,24	3,10	378,20
8	1,06	0,92	1,03	185,29	189,10	29,49	12,55	6,28	2,35	367,50
9	1,06	0,89	1,06	185,29	189,10	28,66	12,91	6,47	2,22	367,50
10	1,06	0,87	1,09	185,29	189,10	27,87	13,28	6,65	2,09	367,50
11	1,06	0,94	1,00	185,29	189,10	30,38	12,18	6,10	2,49	367,50
12	1,06	0,97	0,97	185,29	189,10	31,32	11,81	5,92	2,65	367,50
13	1,06	1,00	0,94	185,29	189,10	32,32	11,45	5,73	2,82	367,50
14	1,06	1,04	0,91	185,29	189,10	33,38	11,08	5,55	3,01	367,50
15	1,09	0,89	1,03	190,53	194,46	28,68	12,55	6,64	2,29	357,39
16	1,09	0,87	1,06	190,53	194,46	27,87	12,91	6,84	2,16	357,39
17	1,09	0,84	1,09	190,53	194,46	27,10	13,28	7,03	2,04	357,39
18	1,09	0,92	1,00	190,53	194,46	29,54	12,18	6,45	2,43	357,39
19	1,09	0,95	0,97	190,53	194,46	30,45	11,81	6,26	2,58	357,39
20	1,09	0,98	0,94	190,53	194,46	31,43	11,45	6,06	2,74	357,39
21	1,09	1,01	0,91	190,53	194,46	32,46	11,08	5,87	2,93	357,39

Iz tablice 20. Vidljivo je da forme 10 i 17 ne zadovoljavaju uvjet B/T zadan metodom Holtrop. U tablici 21. prikazani su parametri novih formi dobiveni afinom transformacijom postojeće forme i simulacijom u programskom paketu *Maxsurf Resistance*.

Tablica 21. Parametri novih formi broda dobiveni afinom transformacijom postojeće forme

Iteracija	L_{WL} , m	B , m	T , m	S , m ²	LCG , %	A_x , m ²	A_{BT} , m ²	h_B , m	T_{FP} , m
Prototip	178,4	32,2	12,2	8435	2,96	389,9	31,94	6,79	12,18
1	183,75	30,38	12,58	8531	3,05	378,85	31,13	6,99	12,55
2	183,75	29,51	12,94	8516	3,06	378,55	31,12	7,19	12,91
3	183,75	28,71	13,31	8515	3,05	378,78	31,12	7,4	13,28
4	183,75	31,28	12,21	8549	3,06	378,6	31,12	6,79	12,18
5	183,75	32,25	11,84	8577	3,06	378,44	31,12	6,58	11,81
6	183,75	33,28	11,48	8621	3,06	378,63	31,12	6,38	11,45
7	183,75	34,38	11,11	8673	3,06	378,45	31,12	6,18	11,08
8	189,1	29,51	12,58	8646	3,15	368	30,24	6,99	12,55
9	189,1	28,67	12,94	8636	3,15	367,81	30,23	7,19	12,91
10	189,1	27,9	13,31	8641	3,15	368,15	30,25	7,4	13,28
11	189,1	30,38	12,2	8638	3,18	366,62	30,1	6,77	12,18
12	189,1	31,35	11,84	8687	3,15	367,85	30,25	6,58	11,81
13	189,1	32,35	11,48	8727	3,15	368	30,24	6,38	11,45
14	189,1	33,41	11,11	8774	3,15	367,81	30,24	6,18	11,08
15	194,45	28,71	12,58	8764	3,23	357,96	29,41	6,99	12,55
16	194,45	27,9	12,94	8759	3,24	357,89	29,42	7,19	12,91
17	194,45	27,13	13,31	8765	3,23	357,95	29,41	7,4	13,28
18	194,45	29,54	12,21	8770	3,38	357,54	31,58	6,89	12,18
19	194,45	30,48	11,84	8795	3,24	357,64	29,41	6,58	11,81
20	194,45	31,44	11,48	8829	3,23	357,74	29,4	6,38	11,45
21	194,45	32,47	11,11	8872	3,24	357,53	29,4	6,18	11,08

U tablici 22. prikazane su vrijednosti relativnih odstupanja parametara novih formi dobivenih afinom transformacijom postojeće forme.

Tablica 22. Relativno odstupanje parametara novih formi dobivenih afinom transformacijom postojeće forme u %

Iteracija	L_{WL} , %	B , %	T , %	V , %	S , %	LCG , %	A_x , %	A_{BT} , %	h_B , %	T_{FP} , %
1	2,91	-6,05	2,95	0,08	1,11	2,92	-2,92	-2,62	2,88	2,95
2	2,91	-9,17	5,66	0,00	0,94	3,01	-3,00	-2,66	5,63	5,65
3	2,91	-12,23	8,29	0,06	0,93	2,95	-2,94	-2,63	8,23	8,28
4	2,91	-2,99	0,00	0,01	1,32	3,01	-2,99	-2,65	-0,03	0,00
5	2,91	0,10	-3,13	-0,03	1,65	3,11	-3,03	-2,66	-3,13	-3,13
6	2,91	3,19	-6,37	0,02	2,15	2,98	-2,98	-2,65	-6,41	-6,38
7	2,91	6,28	-9,92	-0,03	2,73	3,07	-3,03	-2,66	-9,93	-9,93
8	5,66	-9,17	2,95	0,05	2,43	5,76	-5,95	-5,65	2,88	2,95
9	5,66	-12,36	5,66	-0,01	2,31	5,84	-6,01	-5,66	5,63	5,65
10	5,66	-15,47	8,29	0,09	2,37	5,79	-5,91	-5,60	8,23	8,28
11	5,66	-6,06	-0,02	-0,27	2,34	6,70	-6,35	-6,13	-0,21	0,00
12	5,66	-2,78	-3,13	0,00	2,89	5,93	-6,00	-5,61	-3,13	-3,13
13	5,66	0,40	-6,37	0,05	3,33	5,82	-5,95	-5,62	-6,41	-6,38
14	5,66	3,57	-9,92	-0,01	3,85	5,93	-6,01	-5,63	-9,93	-9,93
15	8,26	-12,23	2,95	0,07	3,74	8,29	-8,93	-8,61	2,88	2,95
16	8,26	-15,47	5,66	0,05	3,69	8,38	-8,94	-8,58	5,63	5,65
17	8,26	-18,77	8,29	0,07	3,75	8,32	-8,93	-8,61	8,23	8,28
18	8,26	-9,05	0,00	-0,05	3,81	12,31	-9,05	-1,16	1,52	0,00
19	8,26	-5,71	-3,13	-0,02	4,08	8,46	-9,02	-8,62	-3,13	-3,13
20	8,26	-2,46	-6,37	0,01	4,45	8,35	-8,99	-8,65	-6,41	-6,38
21	8,26	0,79	-9,92	-0,05	4,91	8,46	-9,06	-8,66	-9,93	-9,93

U tablicama 23. do 26. Prikazane su vrijednosti ukupnog otpora novih formi dobivenih afinom transformacijom postojeće forme s pripadajućim relativnim odstupanjem ukupnog otpora.

Tablica 23. Rezultati ukupnog otpora novih formi (1 do 5) dobivenih afinom transformacijom s pripadajućim relativnim odstupanjem novih formi

Rezultati ukupnog otpora, kN						Relativno odstupanje ukupnog otpora, %				
v, čv	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
7,5	172,5	170,6	169,1	174,6	177,2	-2,09	-3,22	-4,14	-0,86	0,62
8	195,2	193,1	191,3	197,6	200,5	-2,05	-3,16	-4,13	-0,81	0,65
8,5	219,2	216,8	214,8	221,9	225,2	-2,10	-3,23	-4,19	-0,86	0,62
9	244,6	241,9	239,7	247,6	251,2	-2,09	-3,22	-4,17	-0,85	0,60
9,5	271,3	268,4	266,0	274,7	278,7	-2,10	-3,20	-4,14	-0,84	0,61
10	299,6	296,3	293,7	303,3	307,6	-2,07	-3,21	-4,12	-0,82	0,59
10,5	329,4	325,9	323	333,4	338,1	-2,03	-3,13	-4,06	-0,81	0,59
11	360,9	357,2	354,1	365,2	370,4	-2,02	-3,08	-3,98	-0,82	0,59
11,5	394,4	390,4	387,1	399	404,5	-1,95	-3,00	-3,87	-0,78	0,59
12	430,1	425,8	422,4	435	440,8	-1,91	-2,94	-3,76	-0,76	0,57
12,5	468,3	463,9	460,2	473,5	479,6	-1,86	-2,82	-3,65	-0,74	0,54
13	509,5	504,8	501	514,9	521,3	-1,79	-2,73	-3,51	-0,72	0,52
13,5	554,1	549,2	545,3	559,7	566,3	-1,73	-2,64	-3,37	-0,71	0,46
14	602,7	597,6	593,6	608,4	615,2	-1,66	-2,53	-3,22	-0,71	0,41
14,5	655,7	650,6	646,5	661,6	668,6	-1,62	-2,41	-3,06	-0,71	0,34
15	714	708,7	704,6	720	727,2	-1,58	-2,34	-2,94	-0,74	0,26
15,5	778,3	772,9	768,6	784,4	791,7	-1,55	-2,26	-2,84	-0,76	0,16
16	849,2	843,6	839,3	855,4	862,8	-1,57	-2,24	-2,76	-0,83	0,03

Tablica 24. Rezultati ukupnog otpora novih formi (6 do 10) dobivenih afinom transformacijom s pripadajućim relativnim odstupanjem novih formi

Rezultati ukupnog otpora, kN						Relativno odstupanje ukupnog otpora, %				
v,čv	6	7	8	9	10	6	7	8	9	10
7,5	180,10	183,50	171,30	169,60	168,30	2,22	4,03	-2,80	-3,83	-4,63
8	203,80	207,60	193,80	191,90	190,40	2,26	4,05	-2,79	-3,80	-4,62
8,5	228,90	233,20	217,60	215,50	213,80	2,23	4,03	-2,85	-3,85	-4,68
9	255,30	260,10	242,80	240,40	238,50	2,19	4,00	-2,84	-3,87	-4,70
9,5	283,20	288,50	269,40	266,80	264,70	2,19	3,99	-2,82	-3,82	-4,65
10	312,6	318,40	297,40	294,50	292,20	2,18	3,96	-2,82	-3,84	-4,65
10,5	343,5	349,80	327,00	323,90	321,40	2,15	3,92	-2,78	-3,77	-4,57
11	376,2	383,00	358,30	354,90	352,20	2,13	3,86	-2,76	-3,75	-4,54
11,5	410,7	418,00	391,50	387,90	385,00	2,09	3,80	-2,71	-3,66	-4,44
12	447,4	455,10	426,90	423,10	420,00	2,03	3,69	-2,67	-3,59	-4,36
12,5	486,5	494,70	464,70	460,70	457,50	1,95	3,58	-2,65	-3,54	-4,26
13	528,6	537,10	505,40	501,10	497,80	1,89	3,44	-2,61	-3,49	-4,18
13,5	573,9	582,80	549,30	544,80	541,40	1,78	3,28	-2,62	-3,47	-4,12
14	623,1	632,20	597,00	592,30	588,70	1,67	3,08	-2,63	-3,44	-4,08
14,5	676,7	686,10	648,90	644,10	640,30	1,54	2,89	-2,68	-3,45	-4,06
15	735,5	745,10	705,70	700,70	696,80	1,39	2,66	-2,78	-3,51	-4,09
15,5	800,1	809,90	768,00	762,80	758,80	1,21	2,41	-2,92	-3,62	-4,16
16	871,4	881,40	836,50	831,10	826,90	1,02	2,14	-3,11	-3,78	-4,31

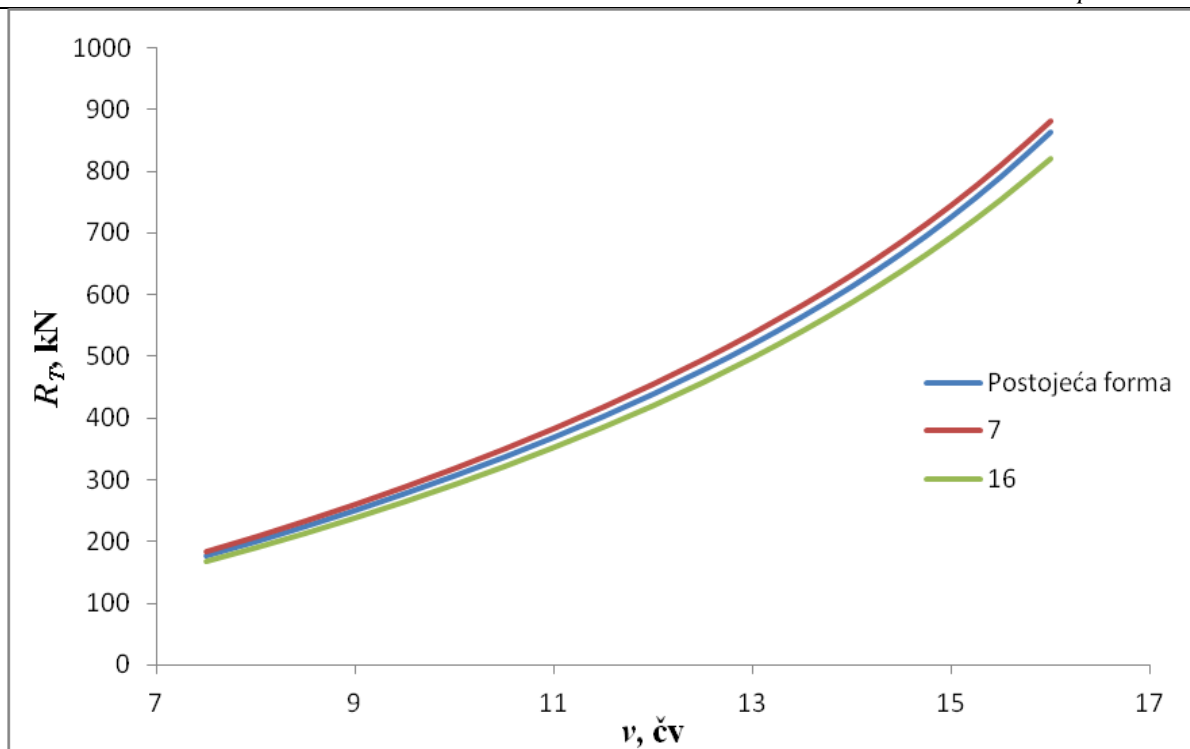
Tablica 25. Rezultati ukupnog otpora novih formi (11 do 15) dobivenih afinom transformacijom s pripadajućim relativnim odstupanjem novih formi

Rezultati ukupnog otpora, kN						Relativno odstupanje ukupnog otpora, %				
v, čv	11	12	13	14	15	11	12	13	14	15
7,5	172,60	175,70	178,4	181,5	170,4	-2,03	-0,23	1,29	2,98	-3,35
8	195,30	198,80	201,9	205,4	192,7	-2,00	-0,20	1,34	3,02	-3,37
8,5	219,40	223,30	226,7	230,7	216,4	-2,01	-0,22	1,28	2,99	-3,42
9	244,70	249,10	252,9	257,4	241,4	-2,04	-0,24	1,27	2,99	-3,44
9,5	271,50	276,30	280,5	285,5	267,8	-2,03	-0,25	1,25	2,98	-3,44
10	299,70	305,00	309,6	315,1	295,7	-2,04	-0,26	1,23	2,95	-3,42
10,5	329,50	335,30	340,3	346,2	325,1	-2,00	-0,24	1,23	2,92	-3,38
11	361,00	367,20	372,6	379	356,2	-1,99	-0,27	1,18	2,85	-3,37
11,5	394,40	401,10	406,9	413,7	389,1	-1,95	-0,25	1,18	2,80	-3,34
12	429,90	437,10	443,2	450,4	424,1	-1,95	-0,27	1,11	2,69	-3,35
12,5	467,90	475,50	482	489,6	461,5	-1,94	-0,32	1,04	2,57	-3,36
13	508,70	516,60	523,5	531,5	501,6	-1,95	-0,39	0,94	2,43	-3,39
13,5	552,70	561,10	568,2	576,6	544,7	-1,99	-0,46	0,79	2,24	-3,49
14	600,50	609,20	616,6	625,4	591,3	-2,03	-0,57	0,63	2,03	-3,62
14,5	652,50	661,60	669,3	678,3	641,9	-2,11	-0,71	0,45	1,77	-3,80
15	709,40	718,80	726,8	736,1	697	-2,24	-0,90	0,21	1,47	-4,06
15,5	771,90	781,50	789,8	799,4	757,1	-2,40	-1,14	-0,08	1,13	-4,40
16	840,50	850,50	859,1	868,9	822,9	-2,62	-1,41	-0,40	0,74	-4,81

Tablica 26. Rezultati ukupnog otpora novih formi (16 do 21) dobivenih afinom transformacijom s pripadajućim relativnim odstupanjem novih formi

Rezultati ukupnog otpora, kN							Relativno odstupanje ukupnog otpora, %					
<i>v</i> , čv	16	17	18	19	20	21	16	17	18	19	20	21
7,5	168,9	167,6	176,1	174,3	176,8	179,7	-4,26	-5,07	0,00	-1,03	0,40	2,00
8	191	189,6	199,3	197,2	200	203,4	-4,29	-5,06	0,05	-1,01	0,40	2,06
8,5	214,5	212,9	223,9	221,5	224,7	228,4	-4,34	-5,12	0,04	-1,04	0,40	2,01
9	239,3	237,5	249,9	247,1	250,6	254,8	-4,35	-5,14	0,08	-1,05	0,36	2,00
9,5	265,5	263,5	277,2	274,1	278	282,6	-4,33	-5,12	0,07	-1,06	0,36	1,98
10	293,1	290,9	306,1	302,6	306,8	311,9	-4,33	-5,12	0,10	-1,06	0,33	1,96
10,5	322,3	319,9	336,5	332,6	337,2	342,7	-4,28	-5,06	0,12	-1,05	0,33	1,93
11	353,2	350,6	368,6	364,3	369,3	375,2	-4,25	-5,02	0,11	-1,07	0,30	1,87
11,5	386	383,2	402,7	397,9	403,2	409,6	-4,17	-4,93	0,15	-1,06	0,27	1,83
12	420,8	417,9	438,8	433,5	439,2	446	-4,16	-4,88	0,11	-1,11	0,20	1,73
12,5	458,1	454,9	477,3	471,5	477,6	484,8	-4,13	-4,86	0,06	-1,17	0,13	1,61
13	498,1	494,7	518,6	512,2	518,6	526,2	-4,12	-4,83	0,00	-1,25	0,00	1,44
13,5	541,1	537,7	563	556	562,7	570,7	-4,18	-4,84	-0,12	-1,38	-0,18	1,23
14	587,8	584,1	611	603,4	610,4	618,7	-4,24	-4,90	-0,28	-1,54	-0,38	0,97
14,5	638,4	634,6	663,1	654,7	662,1	670,7	-4,37	-5,00	-0,48	-1,77	-0,63	0,66
15	693,6	689,6	719,9	710,7	718,3	727,3	-4,57	-5,18	-0,75	-2,05	-0,97	0,27
15,5	753,9	749,6	781,8	771,7	779,8	789,1	-4,84	-5,44	-1,10	-2,42	-1,36	-0,16
16	819,8	815,3	849,6	838,6	847	856,7	-5,21	-5,79	-1,52	-2,85	-1,83	-0,68

Na slici 19. Prikazane su krivulje ukupnog otpora R_T u ovisnosti o brzini broda v postojeće forme, forme 7 s većim ukupnim otporom od postojeće forme i optimalne forme 16.



Slika 19. Grafički prikaz krivulja ukupnog otpora postojeće forme, forme s povećanim ukupnim otporom i forme sa smanjenim ukupnim otporom

8. PRAMČANI BULB

8.1. Općenito o pramčanom bulbu

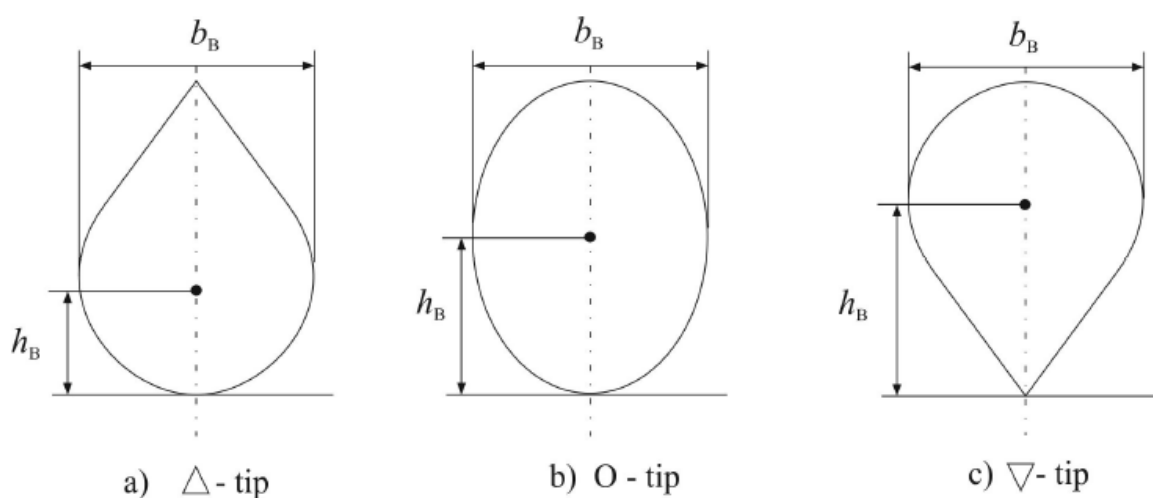
Pramčani bulb je izbačeni dio pramčanog dijela broda koji se nalazi ispred pramčane okomice broda i ispod vodne linije, a pri plovidbi utječe na strujanje tekućine oko trupa. Djelovanje bulba moguće je objasniti na različite načine. Jedan od osnovnih načina je činjenica da zaobljeno tijelo koje se giba ispod površine vode uzrokuje sustav valova koji započinje valnim dolom. Bulb ispod površine vodne linije ima svrhu stvaranja valnog dola koji bi se trebao poklopiti sa valnim brijegom pramčanog vala i na taj način djelomično smanjiti ukupnu elevaciju sustava pramčanih valova. Za najbolji učinak, bulb bi trebao uzrokovati val amplitude jednake amplitudi pramčanog vala, ali suprotne faze [12]. Amplituda pretežito ovisi o volumenu bulba i vertikalnom položaju njegovog težišta, dok se faza vezuje za duljinu bulba. Smanjenjem valnih elevacija na pramcu mijenja se raspored tlakova po oplakanoj površini i smanjuje se otpor valova. Prema tome, kod projektiranja forme broda, posebna se pažnja posvećuje odabiru odgovarajućeg oblika pramčanog bulba, kako bi se postigle čim povoljnije hidrodinamičke značajke forme broda.

Pored smanjenja otpora valova pokazalo se da pramčani bulb povoljno utječe na trim i stabilitet broda. Kod brodova s bulbom može se zamijetiti oko 12% manja potrošnja goriva u usporedbi sa brodovima bez bulba istog tipa, što znači značajnu uštedu u cjelokupnoj eksploataciji broda [13]. Uštede su značajnije kod većih brzina plovidbe [14]. Bulb također utječe na viskozni otpor zaglađivanjem strujanja u pramčanom području. Pramčani bulb je najdjelotvorniji način za smanjenje otpora broda, a time i potrošnje goriva, koji se može primijeniti ne mijenjajući pritom osnovnu formu broda niti njene glavne karakteristike [15]. Prvo značajno razmatranje teorije bulba izloženo je u Taylorovom radu [16] gdje prikazuje dijagrame koji su se mogli koristiti za projektiranje bulba s obzirom na dimenzije broda i projektnu brzinu broda.

- a) U radu [17] klasificirane su različite vrste bulbova kao i dijagrami za odabir prikladnog oblika bulba. Neki od tih dijagrama se još uvijek koriste kod projektiranja broda. Istovremeno dolazi do značajnog napretka u razvoju računalnih CFD metoda kojima bi se mogla potvrditi svrhovitost pramčanog bulba bez ispitivanja modela u bazenu. Kako djelovanje bulba izravno ovisi o strujanju oko njega, jasno je da su

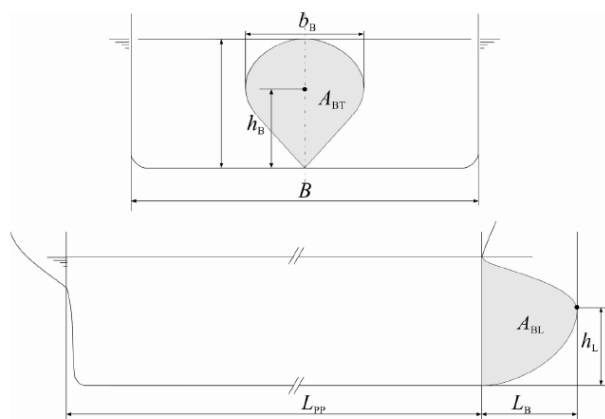
položaj, veličina i oblik bulba karakteristike o čijem izboru na kraju ovisi njegovo djelovanje. Na slici 20 [18] prikazana su tri osnovna tipa bulba:

- Δ - tip - poprečni presjek je oblika kapljice s težištem površine u donjem dijelu.
- O - tip – poprečni presjek je ovalan s težištem u sredini, kao i težište volumena.
- ∇ - tip - poprečni presjek je oblika kapljice s težištem površine i volumena bliže slobodnoj površini. ∇ - tip bulba povezuje se s povoljnim svojstvima pomorstvenosti pa se ta vrsta bulba u današnje vrijeme najčešće koristi.



Slika 20. Tipovi pramčanim bulbova

Odabir oblika bulba često se provodi empirijski, temeljem sličnih formi i poznatih izvedbi koje su se pokazale kao dobre. Međutim, činjenica je da nekoj formi broda ne odgovara bilo kakav bulb. Na temelju Krachtove podjele [17], prikazani su na slici 21 [18] parametri bulba koji će se tretirati kao karakteristični parametri.



Slika 21. Parametri bulba

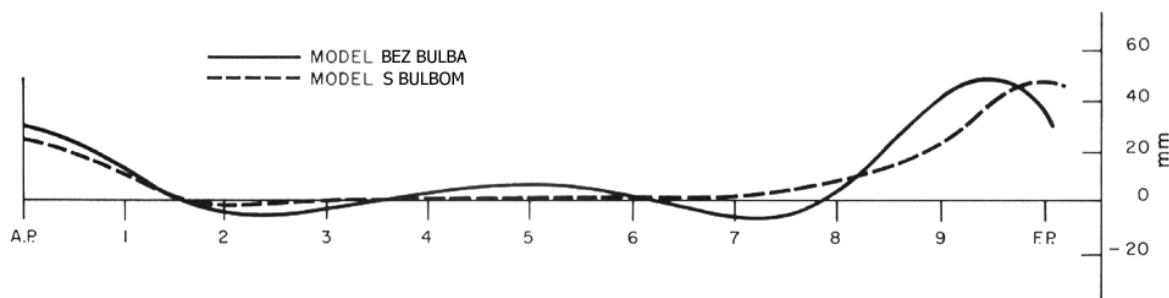
Parametri bulba su:

- b_B – maksimalna širina poprečnog presjeka bulba A_{BT} na pramčanoj okomici,
- h_L – verikalna udaljenost između osnovice broda i vrha bulba, odnosno najudaljenije točke na pramčanoj statvi u odnosu na pramčanu okomicu,
- h_B – verikalna udaljenost između osnovice broda i težišta poprečnog presjeka bulba na pramčanoj okomici,
- L_B – horizontalna udaljenost između pramčane okomice i najudaljenije točke na pramčanoj statvi.

8.2. Utjecaj pramčanog bulba na ukupni otpor broda

D.W. Taylor je smatrao da se otpor valova može smanjiti ako se uvede dodatni val koji će djelovati na poprečni sustav valova. Trup broda i pramčani bulb stvaraju zasebne sustave valova koji međusobno trebaju interferirati tako da se što više poništi brijeg pramčanog vala. Posljedica je smanjenje otpora valova.

Wigley je 1936. god. prvi postavio matematički model utjecaja pramčanog bulba na otpor valova. Ustanovio je da pri manjim brzinama ukupni otpor raste zbog povećanja trenja i otpora vrtloženja čemu su uzrok površina i oblik bulba. Ako je bulb postavljen na odgovarajućoj udaljenosti od pramčane okomice, pri višim brzinama plovidbe dolazi do smanjenja ukupnog otpora. Smanjenje otpora zbog interferencije valova nastale postojanjem bulba veće je od povećanja otpora trenja i vrtloženja zbog povećanja oplakane površine i oblika bulba. Na slici 22. [7] je prikazan profil poprečnog vala između pramčane okomice i krmene okomice za formu broda s bulbom i bez njega. Iz slike 22. se vidi kako je za formu s bulbom valna linija poprilično poravnana i ima manje brjegove samo u blizini okomica koji su naravno manji od valnih brijegova forme bez bulba.



Slika 22. Valni profil - za formu s bulbom i za formu bez bulba pri $Fn = 0,1267$, [7]

Wigleyevi rezultati omogućili su slijedeće zaključke:

- Najbolji Froudeovi brojevi za ugradnju bulba su $0,24 \leq Fn \leq 0,57$.
- Ako linije nisu previše konkavne najbolje je bulb produžiti tako da se težište bulba nalazi na pramčanoj okomici.
- Bulb treba biti što manje razvučen odnosno što je moguće kraći i što je moguće širi s obzirom na linije trupa koje ne smije značajno narušavati.
- Bulb ne smije biti preblizu slobodne površine vode.

Najveći utjecaj na otpor broda imaju krivulja površina rebara i teretna vodna linija pogotovo na pramčanom dijelu broda. Postavljanjem bulba na krajnju točku pramca krivulja areala rebara dobiva dodatnu površinu na pramčanoj okomici. Pritom se ne mijenja oblik vodne linije, budući da se bulb nalazi ispod, ali se mijenja uzdužni položaj težišta uzgona.

Rezultati mnogih ispitivanja potvrdili su Wigleyev teorijski zaključak da je bulb najefikasniji pri Froudeovim brojevima $Fn = 0,24$ i $Fn = 0,57$. Međutim, ispitivanjem je također utvrđeno da bulb može imati visoku efikasnost i pri manjim brzinama, primjerice za Froudeov broj $Fn = 0,24$ što se pripisuje povoljnom utjecaju bulba na viskozni otpor. Pokazalo se da se korištenjem bulba na konvencionalnim formama ukupni otpor se može smanjiti za 10 do 15%, dok se iskoristivost propulzije može povećati za oko 4 do 5% što u konačnici iznosi 20% smanjenje snage na osovini vijka. Bulb također ima prednost pri gibanju na valovima, jer je pad brzine broda na valovima manji. Da bi se postigla maksimalna iskoristivost, bulb ne treba smatrati dodatnim privjeskom već cijeli prednji dio forme trupa treba njemu prilagoditi. Pri manjim brzinama pokazalo se da je bolje ugraditi manji bulb, dok je sukladno tome pri većim brzinama bolje ugraditi veći bulb [19].

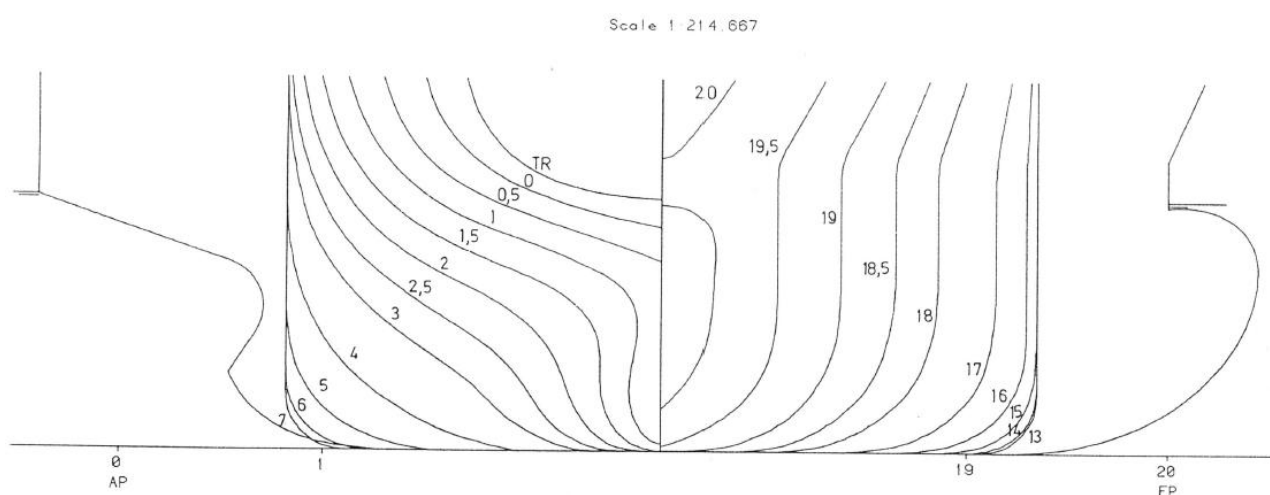
Najviše se istraživanja bavi utjecajem bulba na otpor broda u mirnoj vodi. Međutim, pri odabiru bulba potrebno je voditi računa o utjecaju bulba na njihanja na nepravilnim valovima. Ipak, ustanovilo se da bulb nema većeg utjecaja na posrtanje broda. Veći bulb može smetati prilikom sidrenja i privezivanja. Kod brodova većih brzina ponekad dolazi do kavitacije bulba koja se indicira vidljivom erozijom površine bulba i šumom. Zbog toga je bolje koristiti bulb eliptičnog oblika nego kružnog. Također je potrebno smanjiti sva zaoštrenja koja bi mogla prouzročiti kavitaciju.

Veliki bulb se ugrađuje na tankere i brodove za rasute terete koji plove manjim brzinama $0,12 \leq Fn \leq 0,20$. Pri tim brzinama otpor valova znatno je manji od viskoznog otpora.

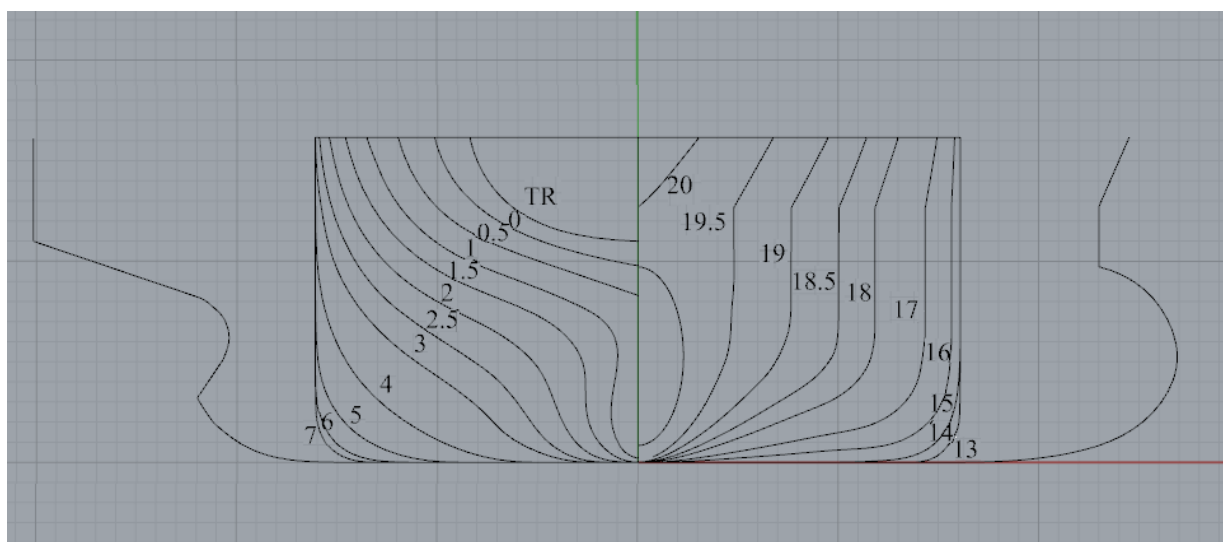
9. ISTRAŽIVANJE UTJECAJA OBLIKA PRAMČANOG DIJELA BRODA NA UKUPNI OTPOR

9.1. Generirani model forme s eliptičnim bulbom u programskom paketu *Rhinoceros*

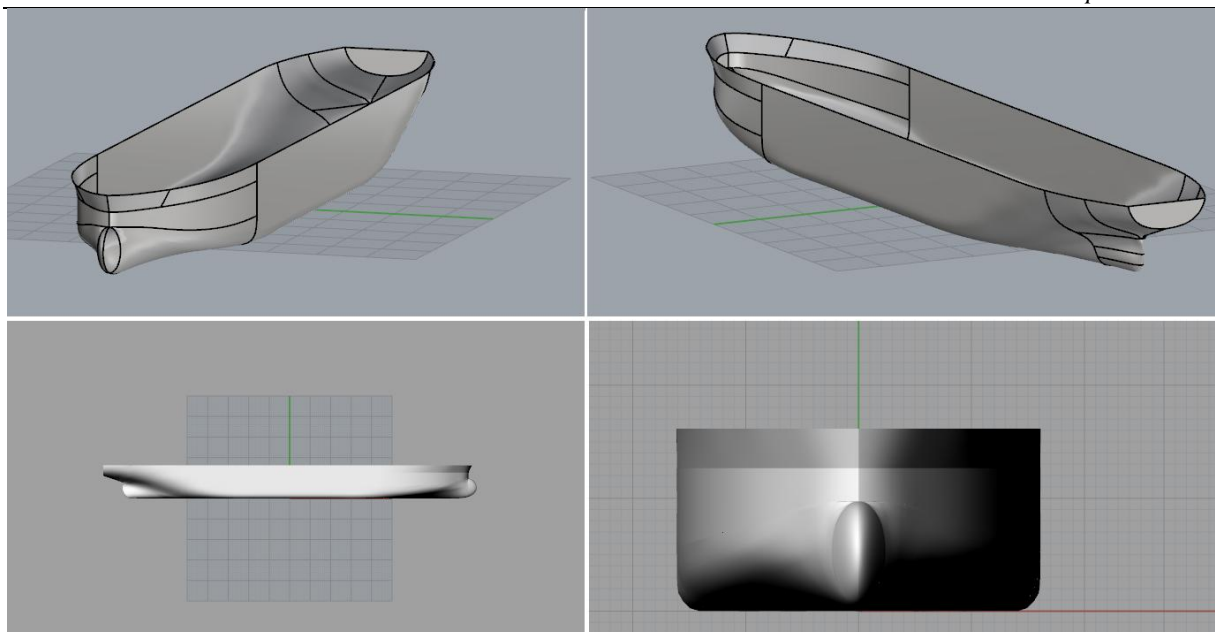
Na temelju nacрта rebara modela, slika 24., generiran je 3D model pomoću programskog paketa *Rhinoceros* pomoću 3D ploha koje ih povezuju, slika 25.



Slika 23. Nacrt rebara postojeće forme



Slika 24. Nacrt rebara modela s eliptičnim bulbom u programskom paketu *Rhinoceros*



Slika 25. 3D model trupa s eliptičnim bulbom

9.2. Rezultati ukupnog otpora forme s eliptičnim bulbom za stanje projektnog gaza

U tablici 27. prikazane su vrijednosti parametara forme dobiveni izravnim mjerenjem generiranog modela u programskom paketu *Maxsurf Resistance*. U tablici su također vidljive i relativno odstupanje parametara generiranog modela od parametara postojeće forme.

Tablica 27. Rezultati i relativno odstupanje parametara forme s eliptičnim bulbom dobivenih simulacijom u programskom paketu *Maxsurf Resistance* za stanje projektnog gaza

	Postojeća forme	Forma s eliptičnim bulbom	Relativno odstupanje, %
L_{WL} , m	178,398	178,398	0,00
B , m	32,217	32,217	0,00
T , m	12,207	12,207	0,00
V , m ³	55528,24	54960,86	-1,02
S , m ²	8435,93	8386,996	-0,58
C_p	0,815	0,806	-1,10
C_{wp}	0,906	0,906	0,00
A_x , m ²	389,90	389,902	0,00
A_B , m ²	31,94	32,081	0,43
h_B , m	6,79	5,281	-22,20
T_{FP} , m	12,18	12,18	0,00
ν , m ² /s	$1,19 \cdot 10^{-06}$	$1,19 \cdot 10^{-06}$	0
ρ_w , t/m ³	1,026	1,026	0

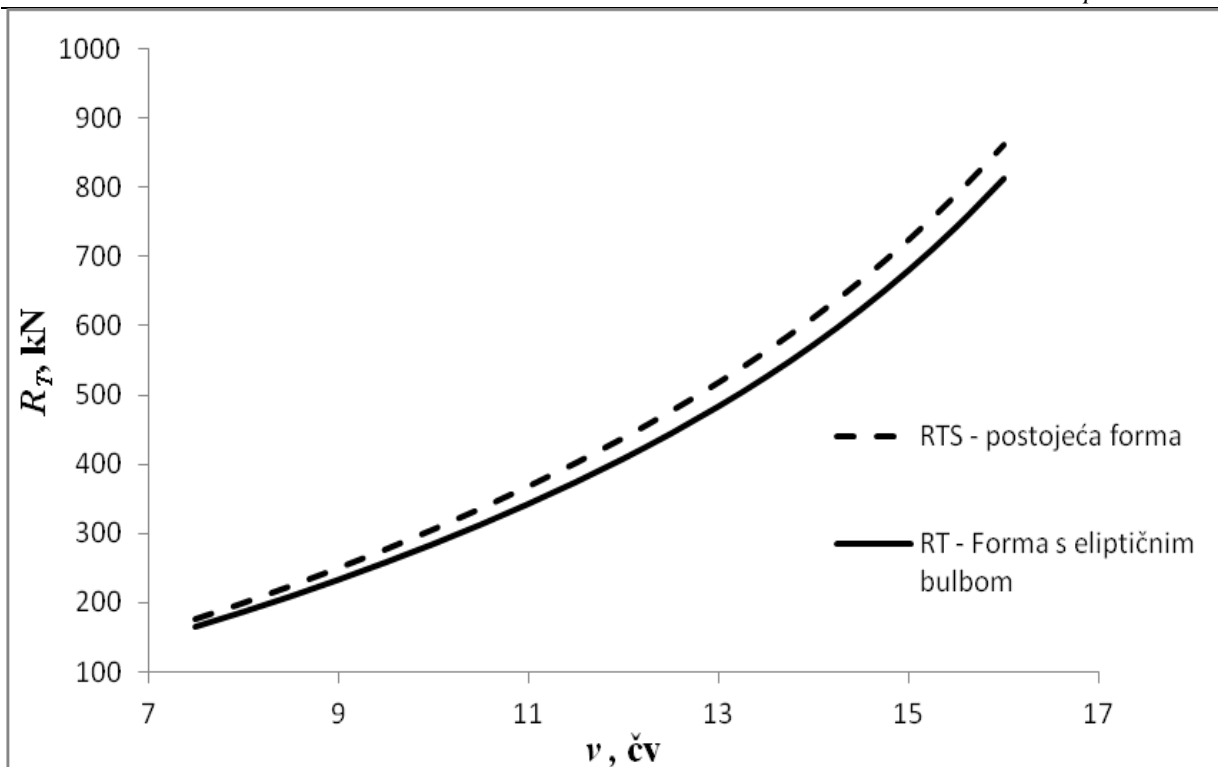
Iz tablice 27. može se vidjeti da prema relativnom odstupanju generirani model s eliptičnim bulbom u programskom paketu *Rhinoceros* u odnosu na postojeću formu zadovoljavajuće opisuje sve parametre potrebne za proračun ukupnog otpora. Značajnija odstupanja vezana su za parametre bulba.

U tablici 28. prikazani su rezultati analize ukupnog otpora u programskom paketu *Maxsurf Resistance* za zadani raspon brzina kao i relativno odstupanje ukupnog otpora forme s eliptičnim bulbom dobivenog simulacijom od ukupnog otpora postojeće forme.

Tablica 28. Rezultati i relativno odstupanje ukupnog otpora forme s eliptičnim bulbom za stanje projektog gaza

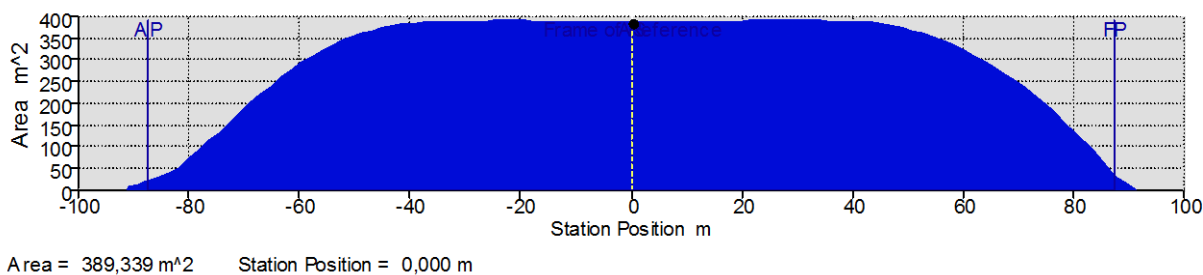
	Postojeća forma	Forma s eliptičnim bulbom	Apsolutno odstupanje	Relativno odstupanje, %
v_S , čv	R_{TS} , kN	R_T , kN		
7,5	176,1	164,6	-11,5	-6,99
8	199,2	186	-13,2	-7,10
8,5	223,8	208,6	-15,2	-7,29
9	249,7	232,6	-17,1	-7,35
9,5	277	257,9	-19,1	-7,41
10	305,8	284,5	-21,3	-7,49
10,5	336,1	312,7	-23,4	-7,48
11	368,2	342,6	-25,6	-7,47
11,5	402,1	374,3	-27,8	-7,43
12	438,3	408,2	-30,1	-7,37
12,5	477	444,6	-32,4	-7,29
13	518,6	483,9	-34,7	-7,17
13,5	563,7	526,6	-37,1	-7,05
14	612,7	573,3	-39,4	-6,87
14,5	666,3	624,6	-41,7	-6,68
15	725,3	681,3	-44,0	-6,46
15,5	790,4	744,1	-46,3	-6,22
16	862,5	813,9	-48,6	-5,97

Iz tablice 28. može se vidjeti da rezultati ukupnog otpora za generirani model s eliptičnim bulbom prema relativnom odstupanju pokazuju niže rezultate ukupnog otpora postojeće forme. Na slici 26. prikazana je usporedba krivulje ukupnog otpora forme s eliptičnim bulbom dobivene simulacijom u programskom paketu *Maxsurf Resistance* i krivulje ukupnog otpora postojeće forme za stanje projektog gaza.



Slika 26. Usporedba krivulje ukupnog otpora dobivene modelskim ispitivanjem i krivulje ukupnog otpora dobivene simulacijom u programskom paketu *Maxsurf Resistance* za stanje projektog gaza

Na slici 27. Prikazana je areala rebara forme s eliptičnim bulbom izmjerena u programskom paketu *Maxsurf Resistance*.



Slika 27. Areala rebara forme s eliptičnim bulbom za stanje projektog gaza

9.3. Rezultati ukupnog otpora formi s eliptičnim bulbom dobivenih afinom transformacijom početne forme s eliptičnim bulbom

Tijekom analize koeficijent punoće C_B , koeficijent prizmatičnosti C_P i volumen istisnine V održavani su na konstantni kako bi se zadovoljio princip afinosti i sama nosivost broda Δ_p .

Vrijednosti afinih transformacija parametara forme prikazane su u tablici 29.

Tablica 29. Afine transformacije parametara forme s eliptičnim bulbom

	λ_L	λ_B	λ_T	L_{PP},m	L_W,m	B, m	T, m	L_{PP}/B	B/T	A_X,m^2
FORMA	1	1	1	174,8	178,4	32,2	12,18	5,43	2,64	389,55
1	1,03	0,94	1,03	180,04	183,75	30,35	12,55	5,93	2,42	378,20
2	1,03	0,92	1,06	180,04	183,75	29,49	12,91	6,10	2,28	378,20
3	1,03	0,89	1,09	180,04	183,75	28,68	13,28	6,28	2,16	378,20
4	1,03	0,97	1,00	180,04	183,75	31,26	12,18	5,76	2,57	378,20
5	1,03	1,00	0,97	180,04	183,75	32,23	11,81	5,59	2,73	378,20
6	1,03	1,03	0,94	180,04	183,75	33,26	11,45	5,41	2,90	378,20
7	1,03	1,07	0,91	180,04	183,75	34,35	11,08	5,24	3,10	378,20
8	1,06	0,92	1,03	185,29	189,10	29,49	12,55	6,28	2,35	367,50
9	1,06	0,89	1,06	185,29	189,10	28,66	12,91	6,47	2,22	367,50
10	1,06	0,87	1,09	185,29	189,10	27,87	13,28	6,65	2,10	367,50
11	1,06	0,94	1,00	185,29	189,10	30,38	12,18	6,10	2,49	367,50
12	1,06	0,97	0,97	185,29	189,10	31,32	11,81	5,92	2,65	367,50
13	1,06	1,00	0,94	185,29	189,10	32,32	11,45	5,73	2,82	367,50
14	1,06	1,04	0,91	185,29	189,10	33,38	11,08	5,55	3,01	367,50
15	1,09	0,89	1,03	190,53	194,46	28,68	12,55	6,64	2,29	357,39
16	1,09	0,87	1,06	190,53	194,46	27,87	12,91	6,84	2,16	357,39
17	1,09	0,84	1,09	190,53	194,46	27,10	13,28	7,03	2,04	357,39
18	1,09	0,92	1,00	190,53	194,46	29,54	12,18	6,45	2,43	357,39
19	1,09	0,95	0,97	190,53	194,46	30,45	11,81	6,26	2,58	357,39
20	1,09	0,98	0,94	190,53	194,46	31,43	11,45	6,06	2,74	357,39
21	1,09	1,01	0,91	190,53	194,46	32,46	11,08	5,87	2,93	357,39

Iz tablice 29. vidljivo je da forme 10 i 17 ne zadovoljavaju uvjet B/T prema metodi Holtrop. U tablici 30. prikazani su parametri novih formi dobiveni afinom transformacijom forme s eliptičnim bulbom.

Tablica 30. Parametri novih formi broda dobiveni afinom transformacijom forme s eliptičnim bulbom

Iteracija	L_{WL} , m	B , m	T , m	S , m ²	LCG	A_x , m ²	A_{BT} , m ²	h_B , m	T_{FP} , m
Forma	178,40	32,22	12,21	8387	2,31	389,90	32,08	5,28	12,18
1	183,75	30,38	12,58	8479	2,38	378,85	31,18	5,44	12,55
2	183,75	29,51	12,94	8463	2,38	378,55	31,17	5,60	12,91
3	183,75	28,71	13,31	8461	2,38	378,77	31,18	5,75	13,28
4	183,75	31,28	12,21	8498	2,38	378,60	31,17	5,28	12,18
5	183,75	32,25	11,84	8528	2,38	378,44	31,17	5,12	11,81
6	183,75	33,28	11,48	8574	2,38	378,63	31,17	4,96	11,45
7	183,75	34,37	11,10	8607	2,41	377,37	31,11	4,80	11,08
8	189,10	29,51	12,58	8593	2,45	368,00	30,29	5,44	12,55
9	189,10	28,67	12,94	8581	2,45	367,81	30,28	5,60	12,91
10	189,10	27,90	13,31	8585	2,45	368,15	30,30	5,75	13,28
11	189,10	30,38	12,21	8606	2,45	367,68	30,27	5,28	12,18
12	189,10	31,35	11,84	8637	2,46	367,85	30,30	5,12	11,81
13	189,10	32,35	11,48	8678	2,45	368,00	30,30	4,96	11,45
14	189,10	33,41	11,11	8726	2,46	367,82	30,29	4,80	11,08
15	194,45	28,71	12,58	8709	2,52	357,96	29,46	5,44	12,55
16	194,45	27,90	12,94	8703	2,52	357,89	29,47	5,60	12,91
17	194,45	27,13	13,31	8708	2,52	357,94	29,46	5,75	13,28
18	194,45	29,54	12,21	8717	2,52	357,54	29,44	5,28	12,18
19	194,45	30,48	11,84	8743	2,52	357,64	29,46	5,12	11,81
20	194,45	31,44	11,48	8779	2,52	357,74	29,45	4,96	11,45
21	194,45	32,47	11,11	8823	2,52	357,53	29,45	4,80	11,08

U tablici 31. prikazane su vrijednosti relativnih odstupanja parametara novih formi dobivenih afinom transformacijom i simulacijom u programskom paketu *Maxsurf Resistance* forme s eliptičnim bulbom.

Tablica 31. Relativno odstupanje parametara novih formi dobivenih afinom transformacijom forme s eliptičnim bulbom u %

Iteracija	L_{WL} , %	B , %	T , %	V , %	S , %	LCG , %	A_x , %	A_{BT} , %	h_B , %	T_{FP} , %
1	2,91	-6,05	2,95	0,08	1,09	2,73	-2,92	-2,89	2,87	2,95
2	2,91	-9,17	5,66	0,00	0,89	2,86	-3,00	-2,93	5,63	5,65
3	2,91	-12,23	8,29	0,06	0,87	2,77	-2,94	-2,91	8,22	8,28
4	2,91	-2,99	0,00	0,01	1,31	2,86	-2,99	-2,93	-0,04	0,00
5	2,91	0,10	-3,13	-0,03	1,66	2,98	-3,03	-2,93	-3,12	-3,13
6	2,91	3,19	-6,37	0,02	2,18	2,82	-2,98	-2,92	-6,43	-6,38
7	2,91	6,26	-9,95	-0,26	2,56	4,06	-3,32	-3,12	-9,93	-9,93
8	5,66	-9,17	2,95	0,05	2,39	5,63	-5,95	-5,93	2,87	2,95
9	5,66	-12,36	5,66	-0,01	2,26	5,75	-6,01	-5,94	5,63	5,65
10	5,66	-15,47	8,29	0,09	2,31	5,63	-5,91	-5,87	8,22	8,28
11	5,66	-6,05	0,00	-0,04	2,55	5,71	-6,04	-5,98	-0,04	0,00
12	5,66	-2,78	-3,13	0,00	2,89	5,82	-5,99	-5,89	-3,12	-3,13
13	5,66	0,40	-6,37	0,05	3,35	5,71	-5,95	-5,90	-6,43	-6,38
14	5,66	3,57	-9,92	-0,01	3,89	5,82	-6,00	-5,91	-9,93	-9,93
15	8,26	-12,23	2,95	0,07	3,70	8,14	-8,92	-8,90	2,87	2,95
16	8,26	-15,47	5,66	0,05	3,63	8,25	-8,94	-8,87	5,63	5,65
17	8,26	-18,77	8,29	0,07	3,68	8,18	-8,93	-8,89	8,22	8,28
18	8,26	-9,05	0,00	-0,05	3,79	8,25	-9,05	-8,99	-0,04	0,00
19	8,26	-5,71	-3,13	-0,02	4,07	8,36	-9,02	-8,91	-3,12	-3,13
20	8,26	-2,46	-6,37	0,01	4,46	8,21	-8,99	-8,93	-6,43	-6,38
21	8,26	0,79	-9,92	-0,05	4,94	8,32	-9,05	-8,95	-9,93	-9,93

U tablicama 32. - 35. prikazane su vrijednosti ukupnog otpora novih formi dobivenih afinom transformacijom forme s eliptičnim bulbom s pripadajućim relativnim odstupanjem ukupnog otpora.

Tablica 32. Rezultati ukupnog otpora novih formi s eliptičnim bulbom (1 do 5) dobivenih afinom transformacijom sa pripadajućim relativnim odstupanjem od ukupnog otpora postojeće forme

Rezultati ukupnog otpora, kN						Relativno odstupanje ukupnog otpora, %				
v, čv	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
7,5	162,80	161,80	161,10	163,90	165,30	-8,17	-8,84	-9,31	-7,44	-6,53
8	184,00	182,80	182,00	185,20	186,80	-8,26	-8,97	-9,45	-7,56	-6,64
8,5	206,40	205,10	204,20	207,80	209,50	-8,43	-9,12	-9,60	-7,70	-6,83
9	230,10	228,70	227,70	231,60	233,60	-8,52	-9,18	-9,66	-7,82	-6,89
9,5	255,20	253,60	252,50	256,80	258,90	-8,54	-9,23	-9,70	-7,87	-6,99
10	281,6	279,9	278,7	283,4	285,7	-8,59	-9,25	-9,72	-7,90	-7,04
10,5	309,6	307,7	306,5	311,6	314,1	-8,56	-9,23	-9,66	-7,86	-7,00
11	339,3	337,3	336	341,4	344,1	-8,52	-9,16	-9,58	-7,85	-7,00
11,5	370,9	368,8	367,4	373,1	375,9	-8,41	-9,03	-9,44	-7,77	-6,97
12	404,7	402,5	401,1	407	410	-8,30	-8,89	-9,27	-7,69	-6,90
12,5	441	438,7	437,3	443,4	446,6	-8,16	-8,73	-9,08	-7,58	-6,81
13	480,3	478	476,6	482,8	486	-7,97	-8,49	-8,81	-7,42	-6,71
13,5	523,1	520,7	519,3	525,6	528,9	-7,76	-8,26	-8,55	-7,25	-6,58
14	569,9	567,4	566,1	572,4	575,7	-7,51	-7,98	-8,23	-7,04	-6,43
14,5	621,3	618,8	617,5	623,8	627,1	-7,24	-7,68	-7,90	-6,81	-6,25
15	678	675,6	674,3	680,5	683,8	-6,98	-7,36	-7,56	-6,58	-6,07
15,5	740,9	738,4	737,2	743,3	746,6	-6,68	-7,04	-7,22	-6,34	-5,87
16	810,5	808	806,8	812,9	816,2	-6,42	-6,75	-6,90	-6,10	-5,67

Tablica 33. Rezultati ukupnog otpora novih formi s eliptičnim bulbom (6 do 10) dobivenih afinom transformacijom sa pripadajućim relativnim odstupanjem od ukupnog otpora postojeće forme

Rezultati ukupnog otpora, kN						Relativno odstupanje ukupnog otpora, %				
v,čv	6	7	8	9	10	6	7	8	9	10
7,5	167,00	168,70	162,30	161,40	160,80	-5,45	-4,39	-8,50	-9,11	-9,51
8	188,70	190,60	183,40	182,40	181,80	-5,56	-4,51	-8,62	-9,21	-9,57
8,5	211,70	213,80	205,70	204,60	203,90	-5,72	-4,68	-8,80	-9,38	-9,76
9	236,00	238,30	229,40	228,10	227,40	-5,81	-4,78	-8,85	-9,47	-9,81
9,5	261,60	264,20	254,30	253,00	252,10	-5,89	-4,84	-8,93	-9,49	-9,88
10	288,7	291,50	280,70	279,20	278,30	-5,92	-4,91	-8,94	-9,53	-9,88
10,5	317,3	320,30	308,60	307,00	306,00	-5,92	-4,93	-8,91	-9,48	-9,84
11	347,5	350,80	338,20	336,40	335,40	-5,96	-4,96	-8,87	-9,45	-9,78
11,5	379,6	383,10	369,60	367,80	366,70	-5,93	-4,96	-8,79	-9,33	-9,65
12	413,9	417,60	403,20	401,30	400,20	-5,90	-4,96	-8,71	-9,22	-9,52
12,5	450,6	454,50	439,30	437,20	436,10	-5,86	-4,95	-8,58	-9,10	-9,38
13	490,3	494,30	478,20	476,10	474,90	-5,77	-4,92	-8,45	-8,93	-9,20
13,5	533,3	537,40	520,40	518,20	517,10	-5,70	-4,89	-8,32	-8,78	-9,01
14	580,2	584,40	566,40	564,10	563,00	-5,60	-4,84	-8,17	-8,62	-8,83
14,5	631,7	635,90	616,70	614,40	613,30	-5,48	-4,78	-8,04	-8,45	-8,64
15	688,4	692,70	672,00	669,60	668,50	-5,36	-4,71	-7,93	-8,32	-8,50
15,5	751,2	755,50	733,00	730,50	729,40	-5,22	-4,62	-7,83	-8,20	-8,36
16	820,9	825,20	800,30	797,60	796,40	-5,07	-4,52	-7,77	-8,14	-8,30

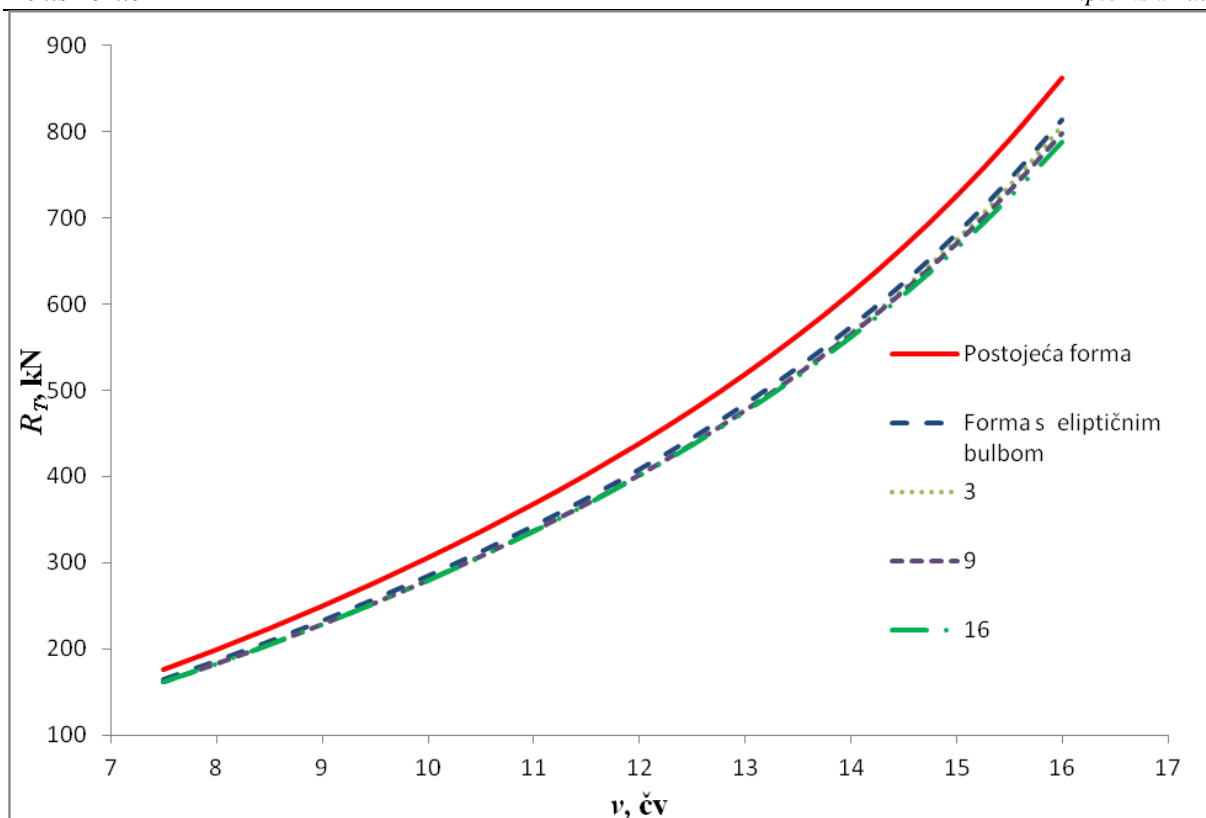
Tablica 34. Rezultati ukupnog otpora novih formi s eliptičnim bulbom (11 do 15) dobivenih afinom transformacijom sa pripadajućim relativnim odstupanjem od ukupnog otpora postojeće forme

Rezultati ukupnog otpora, kN						Relativno odstupanje ukupnog otpora, %				
v, čv	11	12	13	14	15	11	12	13	14	15
7,5	163,20	164,60	166,2	168	161,9	-7,90	-6,99	-5,96	-4,82	-8,77
8	184,50	186,00	187,8	189,8	183	-7,97	-7,10	-6,07	-4,95	-8,85
8,5	206,90	208,70	210,7	213	205,3	-8,17	-7,24	-6,22	-5,07	-9,01
9	230,70	232,60	234,9	237,4	228,9	-8,24	-7,35	-6,30	-5,18	-9,09
9,5	255,80	257,90	260,4	263,2	253,8	-8,29	-7,41	-6,37	-5,24	-9,14
10	282,30	284,60	287,3	290,4	280,1	-8,32	-7,45	-6,44	-5,30	-9,18
10,5	310,30	312,80	315,8	319,1	307,9	-8,31	-7,45	-6,43	-5,33	-9,16
11	340,00	342,70	345,9	349,4	337,4	-8,29	-7,44	-6,45	-5,38	-9,13
11,5	371,60	374,40	377,8	381,7	368,7	-8,21	-7,40	-6,43	-5,34	-9,06
12	405,30	408,30	411,9	416	402,1	-8,14	-7,35	-6,41	-5,36	-9,00
12,5	441,40	444,60	448,4	452,7	437,9	-8,07	-7,29	-6,38	-5,37	-8,93
13	480,40	483,70	487,7	492,2	476,5	-7,95	-7,22	-6,34	-5,36	-8,84
13,5	522,70	526,10	530,2	534,9	518,1	-7,84	-7,15	-6,32	-5,38	-8,80
14	568,70	572,20	576,5	581,3	563,4	-7,74	-7,08	-6,28	-5,40	-8,75
14,5	619,10	622,70	627,1	632,1	612,7	-7,62	-7,00	-6,25	-5,41	-8,75
15	674,40	678,20	682,7	687,8	666,7	-7,55	-6,94	-6,24	-5,45	-8,79
15,5	735,40	739,30	744	749,2	725,9	-7,48	-6,91	-6,24	-5,50	-8,89
16	802,80	806,70	811,6	816,9	790,9	-7,44	-6,92	-6,27	-5,58	-9,05

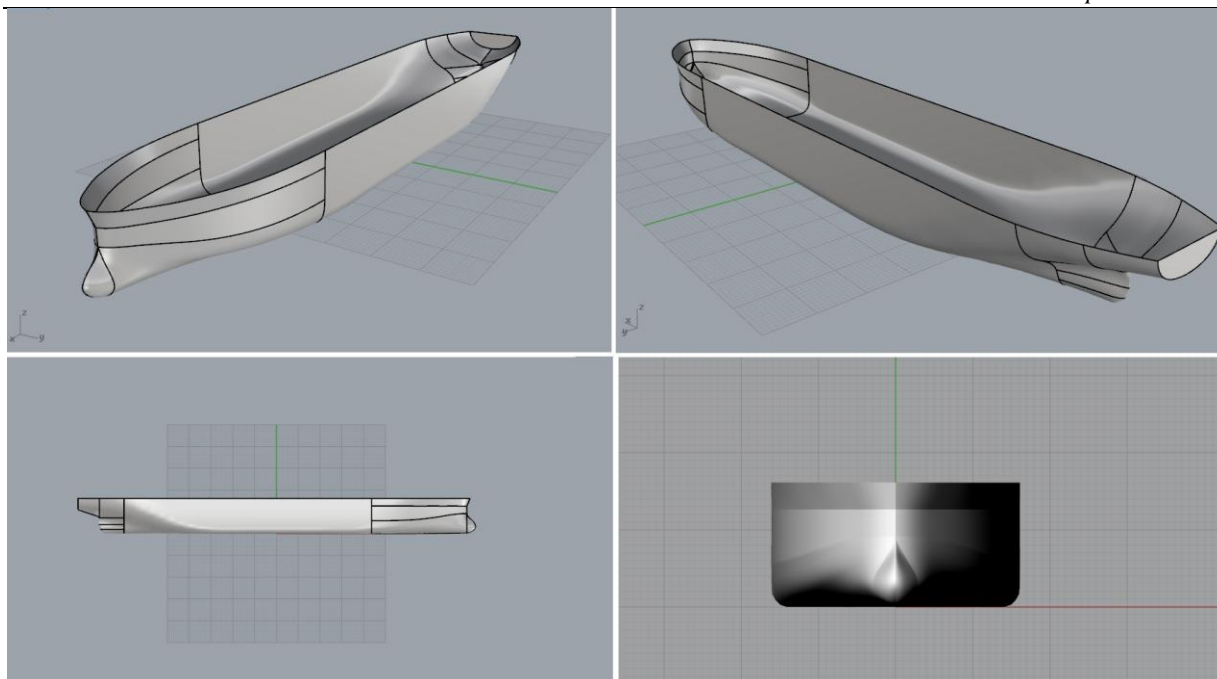
Tablica 35. Rezultati ukupnog otpora novih formi s eliptičnim bulbom (16 do 21) dobivenih afinom transformacijom sa pripadajućim relativnim odstupanjem od ukupnog otpora postojeće forme

Rezultati ukupnog otpora, kN							Relativno odstupanje ukupnog otpora, %					
v, čv	16	17	18	19	20	21	16	17	18	19	20	21
7,5	161,2	160,6	162,7	164	165,4	167,1	-9,24	-9,65	-8,24	-7,38	-6,47	-5,39
8	182,1	181,5	183,9	185,3	186,9	188,8	-9,39	-9,75	-8,32	-7,50	-6,58	-5,51
8,5	204,3	203,7	206,3	207,9	209,7	211,8	-9,54	-9,87	-8,48	-7,65	-6,72	-5,67
9	227,8	227,1	230	231,7	233,8	236,1	-9,61	-9,95	-8,57	-7,77	-6,80	-5,76
9,5	252,6	251,8	255	256,9	259,2	261,8	-9,66	-10,01	-8,63	-7,82	-6,87	-5,81
10	278,8	277,9	281,5	283,5	286	288,8	-9,68	-10,04	-8,63	-7,87	-6,92	-5,89
10,5	306,5	305,6	309,4	311,6	314,3	317,4	-9,66	-9,98	-8,63	-7,86	-6,94	-5,89
11	335,9	334,9	339	341,4	344,3	347,6	-9,62	-9,94	-8,61	-7,85	-6,94	-5,93
11,5	367,1	366,1	370,4	373	376,1	379,6	-9,53	-9,83	-8,56	-7,80	-6,91	-5,93
12	400,5	399,3	403,9	406,6	410	413,7	-9,44	-9,77	-8,52	-7,80	-6,90	-5,95
12,5	436,2	435	439,8	442,7	446,2	450,2	-9,35	-9,66	-8,46	-7,75	-6,90	-5,95
13	474,6	473,4	478,4	481,4	485,1	489,4	-9,27	-9,55	-8,40	-7,73	-6,91	-5,97
13,5	516,2	515	520,1	523,3	527,2	531,6	-9,20	-9,46	-8,38	-7,72	-6,92	-6,04
14	561,4	560,1	565,5	568,8	572,9	577,5	-9,14	-9,39	-8,35	-7,72	-6,95	-6,10
14,5	610,6	609,3	614,9	618,3	622,6	627,4	-9,12	-9,35	-8,36	-7,76	-7,02	-6,20
15	664,5	663	668,9	672,6	677	682	-9,15	-9,40	-8,43	-7,84	-7,13	-6,35
15,5	723,5	722	728,3	732,1	736,8	741,9	-9,25	-9,47	-8,53	-7,96	-7,27	-6,54
16	788,3	786,6	793,4	797,5	802,4	807,9	-9,41	-9,65	-8,71	-8,15	-7,49	-6,76

Na slici 28. prikazane su krivulje ukupnog otpora R_T u ovisnosti o brzini broda v postojeće forme, forme s eliptičnim bulbom i formi 3, 9 i 16 sa optimalnijim ukupnim otporom. Forme 3, 9 i 16 su najoptimalnije forme za svako pripadajuće povećanje duljine broda od 3%, 6% i 9%.



Slika 28. Krivulje ukupnog otpora postojeće forme, forme s eliptičnim bulbom i optimalnih formi s eliptičnim bulbom



Slika 31. 3D model trupa s Δ -tip bulbom

9.5. Rezultati ukupnog otpora forme s Δ -tip bulbom za stanje projektnog gaza

U tablici 36. prikazane su vrijednosti parametara forme dobiveni izravnim mjerenjem generiranog modela u programskom paketu *Maxsurf Resistance*. U tablici je također vidljivo i relativno odstupanje parametara generiranog modela od parametara postojeće forme.

Tablica 36. Rezultati i relativno odstupanje parametara forme s Δ -tip bulbom dobiveni simulacijom u programskom paketu *Maxsurf Resistance* za stanje projektnog gaza

	Postojeće forme	Forma s Δ -tip bulbom	Relativno odstupanje, %
L_{WL} , m	178,398	178,398	0,00
B , m	32,217	32,217	0,00
T , m	12,207	12,207	0,00
V , m ³	55528,24	55120,95	0,73
S , m ²	8435,93	8399,291	0,43
C_p	0,815	0,809	0,74
C_{wp}	0,906	0,906	0,00
A_x , m ²	389,90	389,902	0,00
A_B , m ²	31,94	31,296	2,03
h_B , m	6,79	3,845	43,36
T_{FP} , m	12,18	12,18	0,00
v , m ² /s	$1,19 \cdot 10^{-06}$	$1,19 \cdot 10^{-06}$	0
ρ_w , t/m ³	1,026	1,026	0

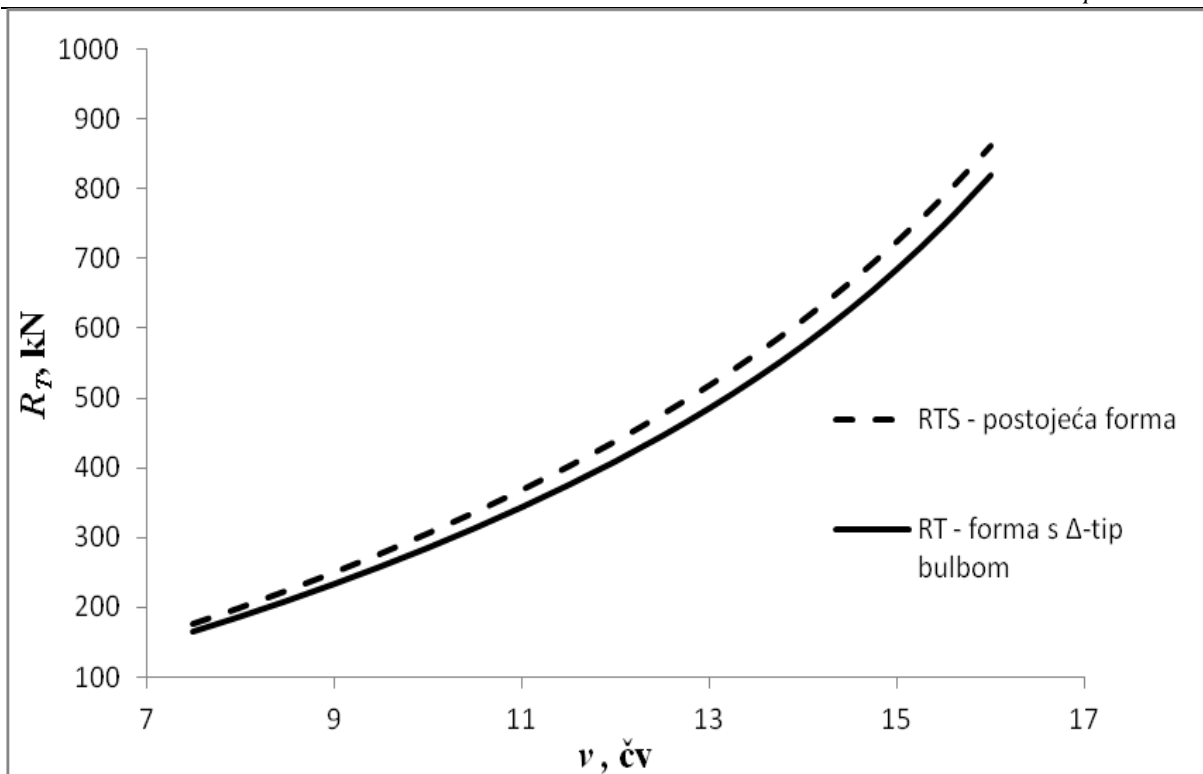
Iz tablice 36. može se vidjeti da prema relativnom odstupanju generirani model s Δ -tip bulbom u programskom paketu *Rhinoceros* u odnosu na postojeću formu zadovoljavajuće opisuje sve parametre potrebne za proračun ukupnog otpora. Značajnija odstupanja vezana su za parametre bulba.

U tablici 37. prikazani su rezultati analize ukupnog otpora u programskom paketu *Maxsurf Resistance* za zadani raspon brzina.

Tablica 37. Rezultati i relativno odstupanje ukupnog otpora forme s Δ -tip bulbom za stanje projektog gaza

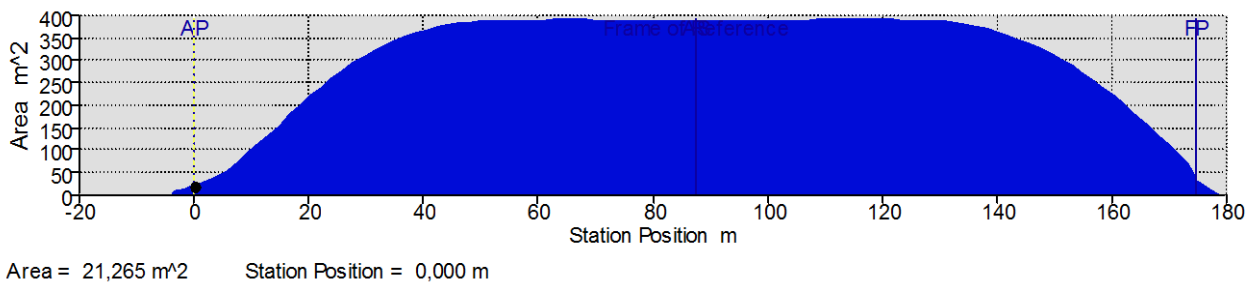
	Postojeća forma	Forme s Δ -tip bulbom	Apsolutno odstupanje	Relativno odstupanje, %
v_S , čv	R_{TS} , kN	R_T , kN		
7,5	176,1	165	-11,1	-6,73
8	199,2	186,5	-12,7	-6,81
8,5	223,8	209,2	-14,6	-6,98
9	249,7	233,2	-16,5	-7,08
9,5	277	258,5	-18,5	-7,16
10	305,8	285,2	-20,6	-7,22
10,5	336,1	313,5	-22,6	-7,21
11	368,2	343,5	-24,7	-7,19
11,5	402,1	375,4	-26,7	-7,11
12	438,3	409,4	-28,9	-7,06
12,5	477	446,1	-30,9	-6,93
13	518,6	485,7	-32,9	-6,77
13,5	563,7	528,8	-34,9	-6,60
14	612,7	576	-36,7	-6,37
14,5	666,3	628	-38,3	-6,10
15	725,3	685,5	-39,8	-5,81
15,5	790,4	749,4	-41,0	-5,47
16	862,5	820,4	-42,1	-5,13

Iz tablice 37. može se vidjeti da rezultati ukupnog otpora za generirani model s Δ -tip bulbom prema relativnom odstupanju daju niže rezultate ukupnog otpora postojeće forme. Na slici 32. prikazana je usporedba krivulja ukupnog otpora forme s Δ -tip bulbom dobivene simulacijom u programskom paketu *Maxsurf Resistance* i krivulje ukupnog otpora postojeće forme za stanje projektog gaza.



Slika 32. Usporedba krivulje ukupnog otpora forme s Δ -tip bulbom s krivuljom ukupnog otpora postojeće forme dobivene simulacijom u programskom paketu *Maxsurf Resistance* za stanje projektog gaza

Na slici 33. prikazana je areala rebara forme s Δ -tip bulbom izmjerena u programskom paketu *Maxsurf Resistance*.



Slika 33. Areala rebara forme s Δ -tip bulbom izmjerena za stanje projektog gaza

9.6. Rezultati ukupnog otpora formi s Δ -tip bulbom dobivenih afinom transformacijom početne forme s Δ -tip bulbom

Tijekom analize koeficijent punoće C_B , koeficijent prizmatičnosti C_p i volumen istisnine V održavani su konstantni kako bi se zadovoljio princip afinosti i sama nosivost broda Δ_p .

Vrijednosti afinih transformacija parametara forme prikazane su u tablici 38.

Tablica 38. Afine transformacije parametara forme s Δ -tip bulbom

	λ_L	λ_B	λ_T	L_{PP},m	L_W, m	B, m	T, m	L_{PP}/B	B/T	A_X, m^2
FORMA	1	1	1	174,8	178,4	32,2	12,18	5,43	2,64	389,55
1	1,03	0,94	1,03	180,04	183,75	30,35	12,55	5,93	2,42	378,20
2	1,03	0,92	1,06	180,04	183,75	29,49	12,91	6,10	2,28	378,20
3	1,03	0,89	1,09	180,04	183,75	28,68	13,28	6,28	2,16	378,20
4	1,03	0,97	1,00	180,04	183,75	31,26	12,18	5,76	2,57	378,20
5	1,03	1,00	0,97	180,04	183,75	32,23	11,81	5,59	2,73	378,20
6	1,03	1,03	0,94	180,04	183,75	33,26	11,45	5,41	2,90	378,20
7	1,03	1,07	0,91	180,04	183,75	34,35	11,08	5,24	3,10	378,20
8	1,06	0,92	1,03	185,29	189,10	29,49	12,55	6,28	2,35	367,50
9	1,06	0,89	1,06	185,29	189,10	28,66	12,91	6,47	2,22	367,50
10	1,06	0,87	1,09	185,29	189,10	27,87	13,28	6,65	2,10	367,50
11	1,06	0,94	1,00	185,29	189,10	30,38	12,18	6,10	2,49	367,50
12	1,06	0,97	0,97	185,29	189,10	31,32	11,81	5,92	2,65	367,50
13	1,06	1,00	0,94	185,29	189,10	32,32	11,45	5,73	2,82	367,50
14	1,06	1,04	0,91	185,29	189,10	33,38	11,08	5,55	3,01	367,50
15	1,09	0,89	1,03	190,53	194,46	28,68	12,55	6,64	2,29	357,39
16	1,09	0,87	1,06	190,53	194,46	27,87	12,91	6,84	2,16	357,39
17	1,09	0,84	1,09	190,53	194,46	27,10	13,28	7,03	2,04	357,39
18	1,09	0,92	1,00	190,53	194,46	29,54	12,18	6,45	2,43	357,39
19	1,09	0,95	0,97	190,53	194,46	30,45	11,81	6,26	2,58	357,39
20	1,09	0,98	0,94	190,53	194,46	31,43	11,45	6,06	2,74	357,39
21	1,09	1,01	0,91	190,53	194,46	32,46	11,08	5,87	2,93	357,39

Iz tablice 38. vidljivo je da forme 10 i 17 ne zadovoljavaju uvjet B/T prema metodi Holtrop. U tablici 39. prikazani su parametri novih formi dobiveni afinom transformacijom forme s Δ -tip bulbom.

Tablica 39. Parametri novih formi broda dobiveni afinom transformacijom forme s Δ -tip bulbom

Iteracija	L_{WL} , m	B , m	T , m	S , m ²	LCG	A_x , m ²	A_{BT} , m ²	h_B , m	T_{FP} , m
FORMA	178,40	32,22	12,21	8399,29	2,52	389,90	31,30	3,85	12,18
1	183,75	30,28	12,58	8477,02	2,59	377,64	30,31	3,96	12,55
2	183,75	29,64	12,94	8493,80	2,59	380,21	30,53	4,08	12,91
3	183,75	28,67	13,31	8467,76	2,59	378,35	30,37	4,19	13,28
4	183,75	31,25	12,21	8505,89	2,59	378,21	30,36	3,85	12,18
5	183,75	32,22	11,84	8536,29	2,59	378,06	30,36	3,73	11,81
6	183,75	33,18	11,48	8572,17	2,59	377,53	30,31	3,62	11,45
7	183,75	34,47	11,11	8654,85	2,59	379,51	30,48	3,50	11,08
8	188,93	29,63	12,57	8596,34	2,77	368,54	29,63	3,97	12,55
9	188,93	28,67	12,94	8585,49	2,75	367,81	29,53	4,08	12,91
10	188,93	28,03	13,31	8608,54	2,75	369,85	29,69	4,19	13,28
11	188,93	30,28	12,21	8596,37	2,75	366,51	29,43	3,85	12,18
12	188,93	31,25	11,84	8626,83	2,75	366,72	29,45	3,73	11,81
13	188,93	32,22	11,48	8662,93	2,75	366,53	29,43	3,62	11,45
14	188,93	33,51	11,11	8747,12	2,75	368,88	29,63	3,50	11,08
15	194,28	28,67	12,58	8708,40	2,82	357,56	28,70	3,96	12,55
16	194,28	28,03	12,94	8727,41	2,82	359,55	28,87	4,08	12,91
17	194,28	27,06	13,31	8701,43	2,82	357,10	28,66	4,19	13,28
18	194,28	29,64	12,21	8737,50	2,82	358,71	28,80	3,85	12,18
19	194,28	30,61	11,84	8768,26	2,83	359,15	28,85	3,73	11,81
20	194,28	31,57	11,48	8804,82	2,82	359,20	28,84	3,62	11,45
21	194,28	32,54	11,11	8838,91	2,83	358,24	28,77	3,50	11,08

U tablici 40. prikazane su vrijednosti relativnih odstupanja parametara novih formi dobivenih afinom transformacijom i simulacijom u programskom paketu *Maxsurf Resistance* forme s Δ -tip bulbom.

Tablica 40. Relativno odstupanje parametara novih formi dobivenih afinom transformacijom forme s Δ -tip bulbom u %

Iteracija	L_{WL} , %	B , %	T , %	V , %	S , %	LCG , %	A_x , %	A_{BT} , %	h_B , %	T_{FP} , %
1	2,91	-6,38	2,95	-0,23	0,92	2,75	-3,25	-3,26	2,93	2,95
2	2,91	-8,70	5,66	0,44	1,11	2,86	-2,55	-2,52	5,69	5,65
3	2,91	-12,36	8,29	-0,05	0,81	2,75	-3,05	-3,06	8,28	8,28
4	2,91	-3,09	0,00	-0,09	1,25	2,82	-3,09	-3,07	0,03	0,00
5	2,91	0,00	-3,13	-0,13	1,60	2,93	-3,13	-3,07	-3,06	-3,13
6	2,91	2,91	-6,37	-0,27	2,02	2,82	-3,28	-3,26	-6,36	-6,38
7	2,91	6,54	-9,92	0,25	2,95	2,93	-2,74	-2,68	-9,86	-9,93
8	5,58	-8,72	2,92	0,17	2,29	9,30	-5,80	-5,63	3,03	2,95
9	5,58	-12,36	5,66	-0,10	2,17	8,48	-6,01	-5,98	5,69	5,65
10	5,58	-14,95	8,29	0,46	2,43	8,41	-5,42	-5,43	8,28	8,28
11	5,58	-6,38	0,00	-0,45	2,29	8,48	-6,38	-6,36	0,03	0,00
12	5,58	-3,09	-3,13	-0,40	2,64	8,58	-6,32	-6,26	-3,06	-3,13
13	5,58	0,00	-6,37	-0,44	3,04	8,45	-6,38	-6,36	-6,36	-6,38
14	5,58	3,84	-9,92	0,19	3,98	8,55	-5,70	-5,64	-9,86	-9,93
15	8,17	-12,36	2,95	-0,13	3,55	10,85	-9,05	-9,06	2,93	2,95
16	8,17	-14,95	5,66	0,42	3,76	10,94	-8,44	-8,41	5,69	5,65
17	8,17	-19,05	8,29	-0,26	3,47	10,88	-9,19	-9,19	8,28	8,28
18	8,17	-8,70	0,00	0,19	3,87	10,94	-8,70	-8,67	0,03	0,00
19	8,17	-5,26	-3,13	0,31	4,21	11,04	-8,56	-8,49	-3,06	-3,13
20	8,17	-2,04	-6,37	0,33	4,61	10,91	-8,55	-8,53	-6,36	-6,38
21	8,17	0,99	-9,92	0,05	4,97	11,00	-8,84	-8,78	-9,86	-9,93

U tablicama 41. - 44. prikazane su vrijednosti ukupnog otpora novih formi dobivenih afinom transformacijom forme s Δ -tip bulbom s pripadajućim relativnim odstupanjem ukupnog otpora.

Tablica 41. Rezultati ukupnog otpora novih formi s Δ -tip bulbom (1 do 5) dobivenih afinom transformacijom sa pripadajućim relativnim odstupanjem od ukupnog otpora postojeće forme

Rezultati ukupnog otpora, kN						Relativno odstupanje ukupnog otpora, %				
v, čv	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
7,5	162,90	162,70	161,40	164,20	165,60	-8,10	-8,24	-9,11	-7,25	-6,34
8	184,10	183,90	182,40	185,60	187,10	-8,20	-8,32	-9,21	-7,33	-6,47
8,5	206,50	206,30	204,60	208,20	209,80	-8,38	-8,48	-9,38	-7,49	-6,67
9	230,20	230,00	228,20	232,10	233,90	-8,47	-8,57	-9,42	-7,58	-6,76
9,5	255,20	255,00	253,00	257,30	259,30	-8,54	-8,63	-9,49	-7,66	-6,83
10	281,7	281,4	279,3	283,9	286,2	-8,56	-8,67	-9,49	-7,71	-6,85
10,5	309,7	309,4	307,1	312,1	314,5	-8,52	-8,63	-9,44	-7,69	-6,87
11	339,4	339,1	336,6	342	344,6	-8,49	-8,58	-9,39	-7,66	-6,85
11,5	371	370,8	368,1	373,7	376,5	-8,38	-8,44	-9,24	-7,60	-6,80
12	404,8	404,6	401,8	407,6	410,6	-8,28	-8,33	-9,08	-7,53	-6,75
12,5	441,1	441	438,1	444,1	447,1	-8,14	-8,16	-8,88	-7,41	-6,69
13	480,4	480,4	477,4	483,5	486,6	-7,95	-7,95	-8,63	-7,26	-6,58
13,5	523,1	523,3	520,1	526,3	529,5	-7,76	-7,72	-8,38	-7,11	-6,46
14	569,9	570,2	566,9	573	576,2	-7,51	-7,45	-8,08	-6,93	-6,33
14,5	621,2	621,7	618,4	624,4	627,6	-7,26	-7,17	-7,75	-6,71	-6,17
15	677,8	678,5	675,1	681	684,2	-7,01	-6,90	-7,44	-6,51	-6,01
15,5	740,4	741,5	737,9	743,7	746,8	-6,75	-6,59	-7,11	-6,28	-5,84
16	809,8	811,2	807,5	813,1	816,2	-6,51	-6,32	-6,81	-6,08	-5,67

Tablica 42. Rezultati ukupnog otpora novih formi s Δ -tip bulbom (6 do 10) dobivenih afinom transformacijom sa pripadajućim relativnim odstupanjem od ukupnog otpora postojeće forme

Rezultati ukupnog otpora, kN						Relativno odstupanje ukupnog otpora, %				
v,čv	6	7	8	9	10	6	7	8	9	10
7,5	167,00	169,60	162,70	161,60	161,60	-5,45	-3,83	-8,24	-8,97	-8,97
8	188,70	191,70	183,80	182,60	182,60	-5,56	-3,91	-8,38	-9,09	-9,09
8,5	211,70	215,00	206,30	204,90	204,80	-5,72	-4,09	-8,48	-9,22	-9,28
9	236,00	239,70	229,90	228,40	228,40	-5,81	-4,17	-8,61	-9,33	-9,33
9,5	261,60	265,70	255,00	253,30	253,20	-5,89	-4,25	-8,63	-9,36	-9,40
10	288,6	293,10	281,40	279,60	279,50	-5,96	-4,33	-8,67	-9,37	-9,41
10,5	317,2	322,00	309,30	307,40	307,30	-5,96	-4,38	-8,66	-9,34	-9,37
11	347,4	352,60	339,00	336,90	336,80	-5,99	-4,42	-8,61	-9,29	-9,32
11,5	379,5	385,10	370,50	368,20	368,30	-5,96	-4,41	-8,53	-9,21	-9,18
12	413,7	419,70	404,10	401,80	401,80	-5,95	-4,43	-8,46	-9,08	-9,08
12,5	450,5	456,70	440,30	437,80	437,90	-5,88	-4,44	-8,34	-8,95	-8,93
13	490	496,60	479,20	476,60	476,90	-5,84	-4,43	-8,22	-8,81	-8,74
13,5	533	539,80	521,50	518,80	519,10	-5,76	-4,43	-8,09	-8,65	-8,59
14	579,8	586,90	567,60	564,70	565,20	-5,67	-4,40	-7,95	-8,50	-8,40
14,5	631,1	638,40	618,00	615,00	615,60	-5,58	-4,37	-7,82	-8,34	-8,24
15	687,7	695,10	673,30	670,20	671,00	-5,47	-4,34	-7,72	-8,22	-8,09
15,5	750,3	757,80	734,40	731,00	732,00	-5,34	-4,30	-7,63	-8,13	-7,98
16	819,6	827,30	801,70	798,10	799,30	-5,23	-4,25	-7,58	-8,07	-7,91

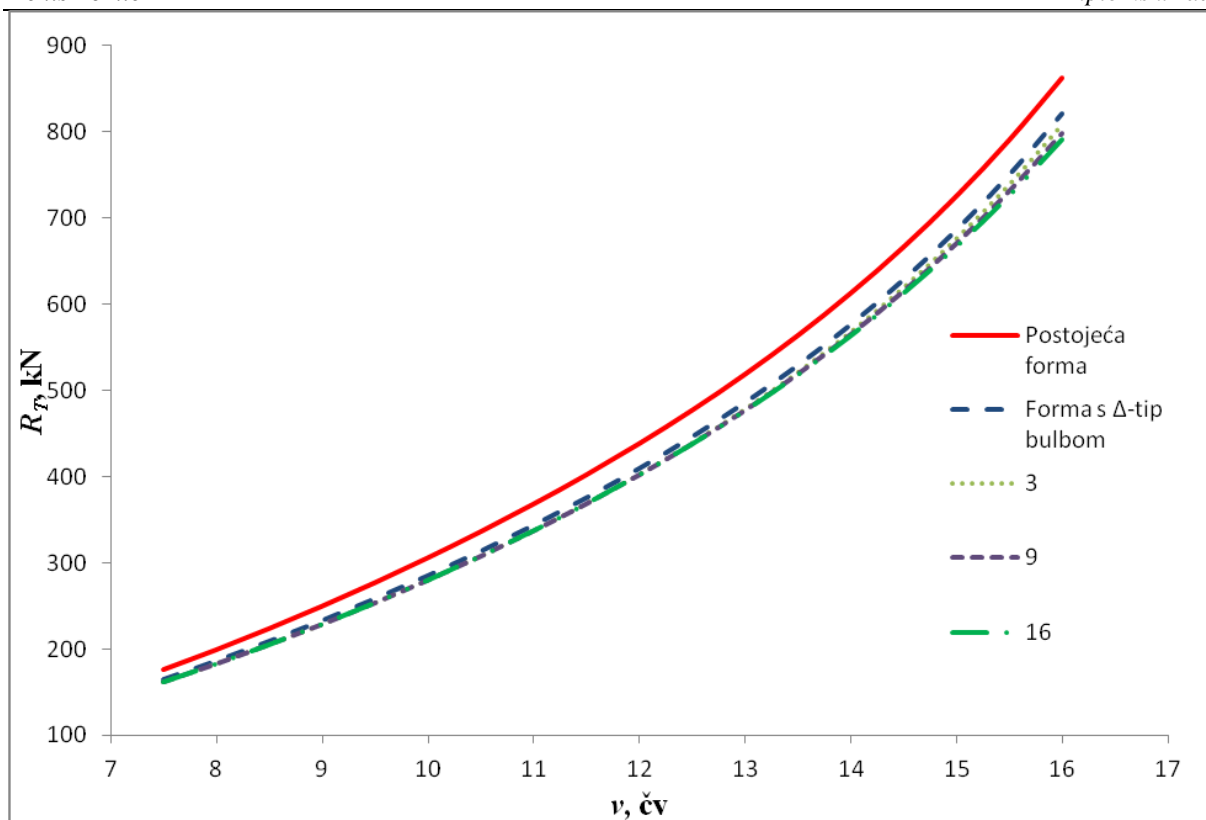
Tablica 43. Rezultati ukupnog otpora novih formi s Δ -tip bulbom (11 do 15) dobivenih afinom transformacijom sa pripadajućim relativnim odstupanjem od ukupnog otpora postojeće forme

Rezultati ukupnog otpora, kN						Relativno odstupanje ukupnog otpora, %				
v, čv	11	12	13	14	15	11	12	13	14	15
7,5	163,10	164,40	165,9	168,5	162	-7,97	-7,12	-6,15	-4,51	-8,70
8	184,30	185,80	187,4	190,4	183,1	-8,08	-7,21	-6,30	-4,62	-8,79
8,5	206,70	208,40	210,2	213,6	205,4	-8,27	-7,39	-6,47	-4,78	-8,96
9	230,50	232,30	234,4	238	229	-8,33	-7,49	-6,53	-4,92	-9,04
9,5	255,50	257,60	259,8	263,9	253,9	-8,41	-7,53	-6,62	-4,96	-9,10
10	282,00	284,20	286,7	291,1	280,2	-8,44	-7,60	-6,66	-5,05	-9,14
10,5	310,00	312,40	315,1	319,9	308,1	-8,42	-7,59	-6,66	-5,06	-9,09
11	339,70	342,30	345,1	350,3	337,6	-8,39	-7,57	-6,69	-5,11	-9,06
11,5	371,20	374,00	377	382,6	368,9	-8,32	-7,51	-6,66	-5,10	-9,00
12	404,80	407,80	411	417	402,3	-8,28	-7,48	-6,64	-5,11	-8,95
12,5	440,90	444,00	447,4	453,7	438,1	-8,19	-7,43	-6,62	-5,14	-8,88
13	479,80	483,00	486,6	493,2	476,7	-8,09	-7,37	-6,58	-5,15	-8,79
13,5	522,00	525,30	529	536	518,3	-7,99	-7,31	-6,56	-5,17	-8,76
14	568,00	571,40	575,1	582,4	563,6	-7,87	-7,23	-6,54	-5,20	-8,71
14,5	618,20	621,70	625,5	633,2	612,9	-7,78	-7,17	-6,52	-5,23	-8,71
15	673,40	677,00	680,9	688,8	666,8	-7,71	-7,13	-6,52	-5,30	-8,77
15,5	734,20	737,90	741,9	750,1	726	-7,65	-7,11	-6,54	-5,37	-8,87
16	801,30	805,10	809,1	817,7	791	-7,64	-7,13	-6,60	-5,48	-9,04

Tablica 44. Rezultati ukupnog otpora novih formi s Δ -tip bulbom (16 do 21) dobivenih afinom transformacijom sa pripadajućim relativnim odstupanjem od ukupnog otpora postojeće forme

v, čv	Rezultati ukupnog otpora, kN						Relativno odstupanje ukupnog otpora, %					
	16	17	18	19	20	21	16	17	18	19	20	21
7,5	161,9	160,6	163,3	164,7	166,1	167,5	-8,77	-9,65	-7,84	-6,92	-6,02	-5,13
8	182,9	181,5	184,6	186,1	187,7	189,2	-8,91	-9,75	-7,91	-7,04	-6,13	-5,29
8,5	205,2	203,6	207,1	208,7	210,5	212,3	-9,06	-9,92	-8,06	-7,24	-6,32	-5,42
9	228,8	227	230,8	232,7	234,7	236,6	-9,13	-10,00	-8,19	-7,31	-6,39	-5,54
9,5	253,7	251,8	255,9	258	260,2	262,3	-9,18	-10,01	-8,25	-7,36	-6,46	-5,60
10	280	277,9	282,4	284,7	287,1	289,4	-9,21	-10,04	-8,29	-7,41	-6,51	-5,67
10,5	307,9	305,5	310,5	312,9	315,5	318	-9,16	-10,02	-8,24	-7,41	-6,53	-5,69
11	337,4	334,8	340,1	342,8	345,6	348,3	-9,13	-9,98	-8,26	-7,41	-6,54	-5,71
11,5	368,7	366	371,7	374,5	377,5	380,4	-9,06	-9,86	-8,18	-7,37	-6,52	-5,70
12	402,2	399,3	405,3	408,2	411,5	414,5	-8,98	-9,77	-8,14	-7,37	-6,51	-5,74
12,5	438	434,9	441,2	444,4	447,8	451	-8,90	-9,68	-8,11	-7,34	-6,52	-5,76
13	476,6	473,3	479,9	483,2	486,8	490,2	-8,81	-9,57	-8,06	-7,33	-6,53	-5,79
13,5	518,3	514,9	521,8	525,2	529	532,5	-8,76	-9,48	-8,03	-7,33	-6,56	-5,86
14	563,6	560	567,2	570,8	574,7	578,4	-8,71	-9,41	-8,02	-7,34	-6,61	-5,93
14,5	613	609,1	616,7	620,5	624,6	628,3	-8,69	-9,39	-8,04	-7,38	-6,68	-6,05
15	667,1	662,8	670,9	674,8	679,1	682,9	-8,72	-9,43	-8,11	-7,48	-6,80	-6,21
15,5	726,3	721,7	730,3	734,4	738,9	742,8	-8,83	-9,52	-8,23	-7,63	-6,97	-6,41
16	791,4	786,3	795,6	799,9	804,6	808,6	-8,98	-9,69	-8,41	-7,83	-7,20	-6,67

Na slici 34. prikazane su krivulje ukupnog otpora R_T u ovisnosti o brzini broda v postojeće forme, forme s Δ -tip bulbom i optimalnih formi s Δ -tip bulbom. Forme 3, 9 i 16 su najoptimalnije forme za svako pripadajuće povećanje duljine broda od 3%, 6% i 9%.



Slika 34. Krivulje ukupnog otpora postojeće forme, forme sa Δ -tip bulbom i optimalnih formi sa Δ -tip bulbom

10. ODZIV I DODATNI OTPOR POSTOJEĆE FORME I OPTIMIZIRANIH FORMI NA VALOVIMA

10.1. Njihanja broda na valovima

U svrhu procjene pomorstvenih karakteristika broda, odziv na valovima prikazuje se kao suma odziva broda na harmonijskim valovima različitih frekvencija što omogućuje dovoljno dobru procjenu vertikalnih, ali i horizontalnih gibanja i opterećenja. Odziv broda na morskim valovima procjenjuje se kroz statističku analizu za određeno stanje mora. Njihanje broda uzrokovano je energijom koju nailazni val predaje brodu prilikom susreta. Energija se dijeli na tri dijela:

- dio energije utroši se na razbijanje vala odnosno difrakciju što uzrokuje promjenu smjera te amplitude vala,
- dio energije val predaje brodu,
- dio energije zadržava te val nastavlja napredovati iza broda.

Difrakcijski val zadržava valnu duljinu odnosno frekvenciju i nakon susreta s brodom. Energija vala predana brodu sastoji se od:

- energije inercijskih sila,
- energije povratnih sila nastalih pomakom tijela iz ravnotežnog položaja te
- energije valova koji se šire oko broda prilikom njihanja tj. valova radijacije.

Energija radijacijskih valova uzrokuje prigušenje njihanja broda obzirom da brod dio energije njihanjem predaje valovima. Hidrodinamička dodatna masa broda odnosi se na postojanje dodatne sile koja ubrzava vodu oko trupa i trup broda prilikom njihanja, a koja je u fazi s ubrzanjem njihanja tijela. Primjerice pri višim frekvencijama poniranja dodatna masa postaje gotovo jednaka masi broda [7].

Prilikom rješavanja problema interakcije vala i tijela uvode se određena pojednostavljena. Ovisno o odnosu geometrije tijela i vala moguće je primjerice zanemariti poremećaj koji u strujanju tekućine vala uzrokuje tijelo te zanemariti utjecaj viskoznih sila i strujanje opisati potencijalnom teorijom. Model strujanja se linearizira pod pretpostavkom malih valnih amplituda te amplituda njihanja tijela.

Strujanje se idealizirano analizira pomoću dva modela:

- strujanje oko nepomičnog tijela,
- strujanje tijela koje se njiše u mirnoj tekućini [20].

U prvom modelu na tijelo koje miruje nailazi val. Integracijom tlaka po oplakanoj površini tijela moguće je odrediti uzbudnu silu i moment kojim nailazni val djeluje na tijelo. Nailazni val i njegova difrakcijska komponenta formiraju oko broda sliku strujanja. Strujanje oko nepomičnog modela opisuje se funkcijom potencijala brzine strujanja nailaznog vala te funkcijom potencijala brzine strujanja njegove difrakcijske komponente:

$$\Phi(x, y, z; t) = \Phi_0(x, y, z; t) + \Phi_7(x, y, z; t) \quad (89)$$

gdje je:

Φ_0 - funkcija potencijala brzine strujanja nailaznog vala,

Φ_7 - funkcija potencijala brzine strujanja difrakcijskog vala.

Potrebno je zadovoljiti pretpostavke potencijalnog strujanja idealne tekućine te kinematički i dinamički rubni uvjet na slobodnoj površini. Uz navedeno difrakcijski val zadovoljava i rubni uvjet nepromočivosti na oplakanoj površini tijela te uvjet radijacije u beskonačnosti. Dovoljno daleko od tijela potencijal brzine difrakcijske komponente nailaznog vala zadovoljava uvjet radijacije odnosno amplituda vala zamire [19].

U drugom modelu tijelo prisilno oscilira sa 6 stupnjeva slobode njihanja u mirnoj tekućini, slika 1. Njihanje tijela opisano je funkcijama potencijala brzine strujanja $\Phi_j(x, y, z; t)$, $j=1...6$ u valovima radijacije nastalim uslijed 6 stupnjeva slobode gibanja tijela. Valovi radijacije također moraju zadovoljiti uvjet u beskonačnosti te rubni uvjet nepromočivosti na oplakanoj površini.

Njihanja broda dijele se na:

- simetrična (zalijetanje, poniranje, posrtanje),
- asimetrična (zanošenje, ljuljanje, zaošijanje).

Prema linearnoj teoriji simetrična i asimetrična gibanja nemaju međusobni utjecaj odnosno sprega gibanja moguća je samo između po simetričnosti srodnih gibanja. Međusobni utjecaj pojedinih njihanja odnosno sprega njihanja od velike je važnosti pri određivanju dinamičkih gibanja i opterećenja broda.

Djelovanjem hidrodinamičke uzbude, kao posljedica njihanja javljaju se hidrostatičke i hidrodinamičke sile. Hidrostatičke odnosno povratne sile vraćaju brod u ravnotežno stanje, a hidrodinamičke sile prigušuju oscilatorna gibanja tijela. Povratne sile nastaju zbog pomaka tijela i djelovanja hidrostatičkog povratnog djelovanja. U linearnoj teoriji pretpostavka je da je odnos između hidrostatičke sile i pomaka linearan, a povratne sile nastaju samo uslijed promjene uzgona tijela. U stvarnosti nelinearnost njihanja broda u slučaju povratnih sila najviše dolazi do izražaja prilikom ljujanja broda [19].

Hidrodinamičke sile nazivaju se još i hidrodinamičkom reakcijom tijela. One u fazi s brzinom njihanja nazivaju se dodatnom masom, a one u fazi s brzinom prigušenje njihanja. Prigušenje ovisi o brzini njihanja tijela. Prigušenje se u potencijalnoj teoriji strujanja naziva potencijalnim prigušenjem i odnosi se na odvođenje energije od broda valovima radijacije. Viskozno prigušenje uslijed trenja između slojeva tekućine zanemarivo je u slučaju njihanja broda osim kod njihanja oko uzdužne osi odnosno ljujanja [7].

Hidrodinamička uzbuda sastoji se od Froude-Krilovljeve komponente odnosno sile koja bi djelovala na tijelo za slučaj da difrakcijska komponenta ne postoji te od difrakcijske komponente uslijed sudara vala i tijela. Brod je u svakom trenutku njihanja u stanju dinamičke ravnoteže. Hidrodinamičke i promjenjive hidrostatičke sile i momenti uravnoteženi su inercijskim silama i momentima mase [20].

Jednadžba dinamičke ravnoteže glasi:

$$([M] + [A])\{\ddot{\eta}_j\} + [B]\{\dot{\eta}_j\} + [C]\{\eta_j\} = \zeta_a \{F_j(t)\} \quad (90)$$

gdje je:

$[M]$ - matrica mase tijela i momenata tromosti mase,

$[A]$ - matrica dodatne mase,

$[B]$ - matrica prigušenja,

$[C]$ - matrica povratnih sila,

ζ_a - jedinična amplituda nailaznog vala,

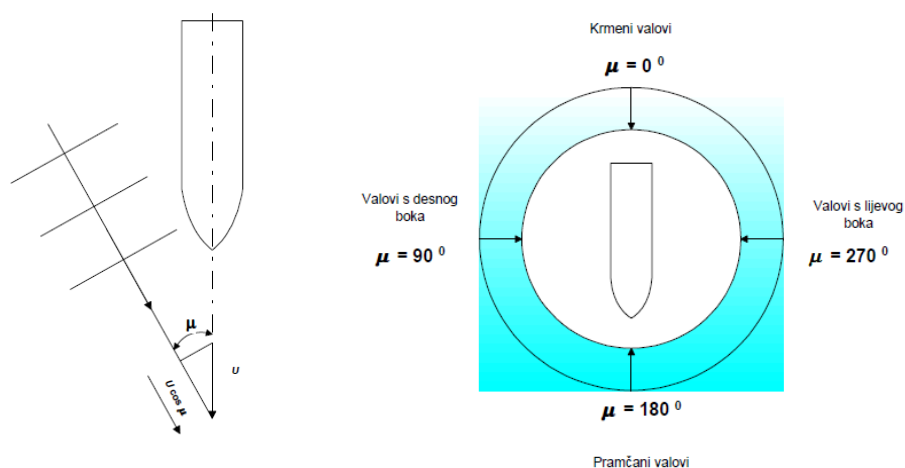
$F_j(t)$ - hidrodinamička uzbuda.

10.2. Frekvencija i kut susretanja valova

Frekvencija je prema definiciji broj titraja u određenom vremenskom intervalu. Pri razmatranju njihanja broda titraji su harmonijska njihanja izražena u radijanima. Zbog toga se valna frekvencija izražava u radijanima u sekundi. Kada brod plovi pramcem na valove određenom brzinom razumljivo je da će vertikalna njihanja broda (poniranje i posrtanje) biti u tom slučaju veća i da će tih njihanja u jednom vremenskom intervalu biti više nego kada brod smanji brzinu plovidbe.

Kut susretanja valova je kut koji zatvara uzdužna simetrala broda sa smjerom napredovanja valova, slika 35. Kut susretanja valova jednak je nuli za krmene valove dok je za pramčane valove 180° ili π . Kut susretanja valova definiran je na slici 35 [7].

Pod valovima u krmeni kvartal podrazumijevaju se oni valovi koji sa simetralom broda zatvaraju kutove od 0° do 90° s desnog boka ili od 270° do 360° s lijevog boka. Bočni valovi su valovi koji dolaze točno u lijevi ili desni bok broda pod kutem od 90° ili 270° .



Slika 35. Kut susretanja valova i položaj broda prema valovima

10.3. Prijenosna funkcija

Odziv broda na valovima uobičajeno se prikazuje prijenosnim funkcijama H_{R_a} odnosno operatorima amplitude odziva *RAO* (eng. *response amplitude operator*) obzirom da se određuju na temelju odnosa amplituda njihanja broda i valova. Prijenosne funkcije za određeni raspon frekvencija nailaznih harmonijskih valova prikazuju bezdimenzijske amplitude odziva gibanja, brzine i ubrzanja tijela na valovima [20].

Operator amplitude odziva prikazuje se kao:

$$RAO = \left| \frac{R_a}{\zeta_a} \right|^2 = H_{R_a}^2 \quad (91)$$

gdje je R_a amplituda odziva.

Prijenosne funkcije određuju se rješavanjem jednadžbi njihanja tijela na valovima. Prijenosna funkcija je u bezdimenzijskom obliku za slučaj translacijskih gibanja, a za slučaj rotacijskih gibanja tijela njihova bezdimenzionalnost postiže se dijeljenjem amplitude odziva dodatno s valnim brojem k prema izrazu [20]:

$$RAO = \left| \frac{R_a}{k\zeta_a} \right|^2 \quad (92)$$

Obzirom da je odziv broda definiran harmonijskim funkcijama te ovisi o amplitudama i faznim pomacima koji se određuju za različite frekvencije i smjerove nailaznih valova, prijenosne funkcije njihanja broda određuju se za svaku pojedinu brzinu broda i susretni kut broda i valova.

10.4. Dodatni otpor na valovima

Dodatni otpor na valovima dio je ukupnog otpora broda, a nastaje prilikom napredovanja broda na nailaznim valovima. Povezan je sa smanjenjem brzine plovidbe odnosno često se prikazuje kao dodatna snaga stroja potrebna za održavanje brzine prilikom plovidbe na valovima. Izgubljena energija uslijed povećanja otpora na valovima nadomješta se pojačanim radom porivnog stroja.

Smanjenje brzine broda ovisi o otporu broda, karakteristikama vijka te upravljivosti broda. Gubitak brzine uzrokovan je sljedećim faktorima:

- dodatni otpor uslijed utjecaja vjetra na trup i nadgrađe,
- povećanje otpora uslijed njihanja (poniranja i posrtanja),
- dodatni otpor uslijed difrakcije valova,
- povećanje otpora uslijed zanošenja i zaošijanja te pomaka kormila,
- gubitak učinkovitosti propulzijskog sustava uslijed rada vijka u uvjetima različitim od onih na mirnoj vodi,
- namjerno smanjenje brzine radi ublažavanja dinamičkih učinaka plovidbe (ubrzanja, udaranje pramca, održavanje kursa, itd.).

Dodatni otpor te smanjenje brzine najjače je izraženo prilikom plovidbe broda na težim stanjima mora. Tada primjerice vijak često uzrokuje i dodatna dinamička opterećenja i gubitak poriva broda što je moguće procijeniti na temelju eksperimentalnih podataka.

Tijekom plovidbe na valovima vrijednost otpora broda mijenja se ciklički. Ukupni otpor sastoji se od otpora na mirnoj vodi koji je konstantan pri određenoj brzini te dodatnog otpora na valovima koji ovisi o susretnoj frekvenciji. Poznavanje susretne frekvencije od velike je važnosti u rješavanju problema njihanja broda. Ovisna je o smjeru nailaska valova, frekvenciji valova, valnom broju te brzini napredovanja broda kako slijedi [20]:

$$\omega_e = \omega - kU \cos \beta \quad (93)$$

gdje je:

ω_e - susretna frekvencija,

ω - frekvencija valova,

k - valni broj,

U - brzina napredovanja broda,

β - kut nailaska valova

10.5. Teorija potencijalnog strujanja

Potencijalno strujanje je homogeno, neviskozno i nestlačivo. Iako ograničena, teorija potencijalnog strujanja omogućuje uvid u sliku strujanja oko uronjenog tijela te značajke nailaznih valova. U opisu značajki valova sve harmonijski promjenjive veličine u linearnom su odnosu s elevacijom vala ζ .

Pretpostavka je malih valnih strmina odnosno valnih amplituda u primjeni potencijalne teorije u opisu valova kako bi se kvadratni članovi mogli zanemariti prilikom proračuna.

Značajke valova moguće je odrediti koristeći potencijal brzine Φ_w kao harmonijsku funkciju.

Potencijal brzine vala mora zadovoljiti četiri rubna uvjeta [20]:

1. Laplaceovu jednadžbu odnosno jednadžbu kontinuiteta prema kojoj je divergencija vektora brzine u bilo kojoj točki fluida jednaka nuli:

$$\nabla^2 \Phi_w = \frac{\partial^2 \Phi_w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi_w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi_w}{\partial z^2} = 0 \quad (94)$$

2. Uvjet nepromočivosti na dnu prema kojem je vertikalna komponenta brzine čestice fluida na dnu jednaka nuli:

$$v_z = \frac{\partial \Phi_w}{\partial z} = 0 \quad \text{za} \quad z = -d \quad (95)$$

3. Dinamički uvjet na slobodnoj površini prema kojem je tlak na slobodnoj površini jednak atmosferskom tlaku:

$$\frac{\partial \Phi_w}{\partial t} + g\zeta = 0 \quad \text{za } z = 0 \quad (96)$$

4. Kinematički uvjet prema kojem čestica fluida na slobodnoj površini ima vertikalnu komponentu brzine jednaku vertikalnoj brzini slobodne površine:

$$\frac{dz}{dt} = \frac{\partial \zeta}{\partial t} \quad \text{za } z = \zeta \quad (97)$$

Zadovoljavanjem navedenih uvjeta moguće je izraziti potencijal brzine strujanja valova u vodi ograničene dubine:

$$\Phi_w(x, z; t) = \frac{\zeta_a g}{\omega} \frac{\cosh k(d+z)}{\cosh kd} \sin(kx - \omega t) \quad (98)$$

gdje je:

ζ_a - jedinična valna amplituda,

ω - valna frekvencija,

k - valni broj, $k = 2\pi / \lambda$,

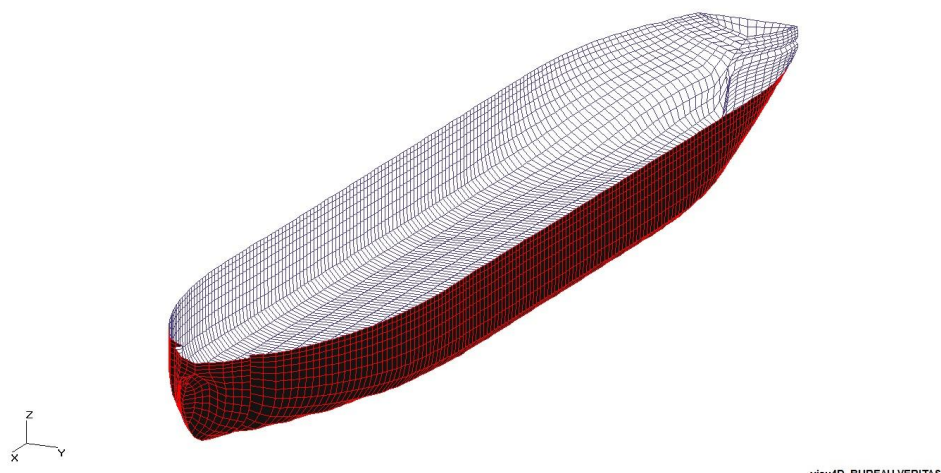
d - dubina.

U vodi neograničene dubine izraz $\frac{\cosh k(d+z)}{\cosh kd}$ u jednadžbi potencijala brzine strujanja (97)

poprima oblik e^{kz} . Na temelju potencijala brzine strujanja moguće je odrediti brzine, ubrzanja čestica fluida, hidrostatički i hidrodinamički tlak koji djeluje na određenoj dubini te energiju vala kao i brzinu kojom se ta energija prenosi [19].

10.6. Priprema podataka za analizu u programskom paketu *HydroSTAR*

Forma je generirana u programskom paketu na način da se unesene koordinate točaka rebara, gaz te trim modela. Potom su definirani podaci o masi, položaju težišta modela te radijusima tromosti mase oko težišta. Nakon što je forma definirana program generira mrežu panela do vodne linije, slika 36. U programskom paketu *HydroSTAR* generirala se mreža od 4500 panela, odnosno 150 panela po duljini broda i 30 panela po porečnom presjeku broda.



Slika 36. Mreža panela za trup postojeće forme

Za provedbu analize definirani su pravilni valovi u pramac broda i raspon valnih frekvencija.

Za izračunavanje omjera λ/L korištena je disperzivna jednačba:

$$\omega = \sqrt{kg \tanh(kd)} \quad (99)$$

gdje je:

k - valni broj,

g - ubrzanje sile teže,

d - dubina vode.

Budući da u promatranj analizi brod plovi u neograničenoj dubini vode član $\tanh(kd)$ u jednačbi (98) približno je jednak $\tanh(kd) = 1$.

Niskofrekventna valna opterećenja drugog reda u programskom paketu *HydroSTAR* određuju se prema metodi koja se temelji na evaluaciji valnog polja prvog reda oko trupa duž vodne linije te određivanju gibanja prvog reda uzrokovanih tim valnim poljem. Direktnom numeričkom integracijom tlaka po oplakanoj površini na temelju definirane forme određuje se opterećenje uslijed nailaznih valova:

$$F_{ij}' = \int_{S(t)} p(t) \bar{n} dS \quad (100)$$

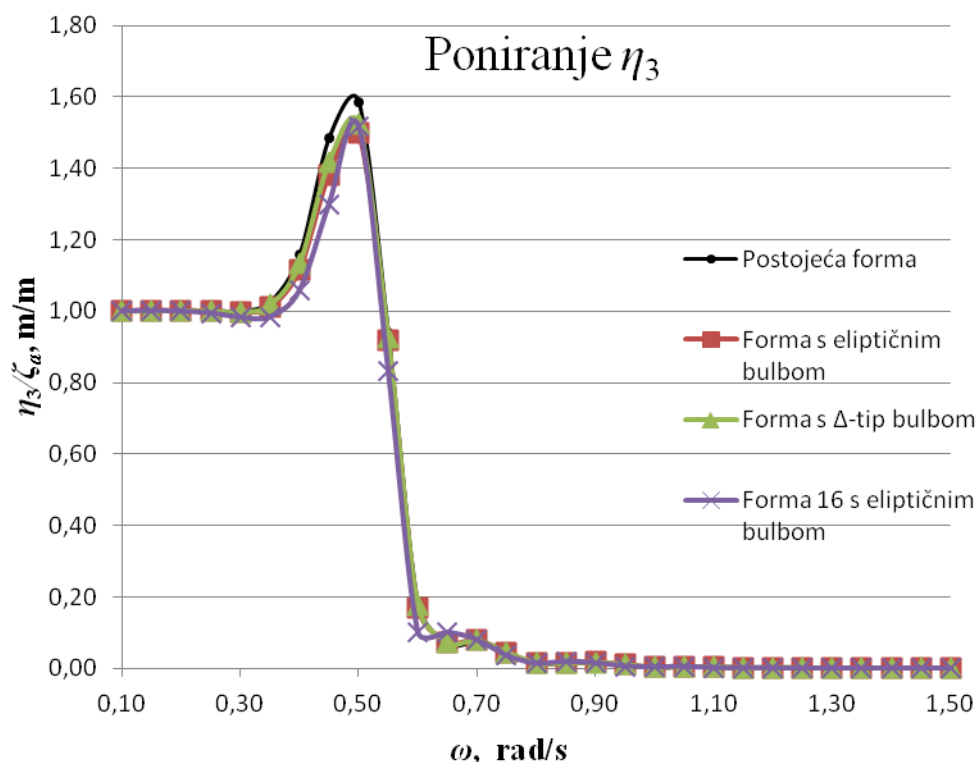
gdje je F_{ij}' sila zanošenja, a $p(t)$ tlak na oplakanoj površini trupa [21].

10.7. Odziv postojeće forme i optimalne forme na pravilnim valovima

Kako bi se usporedili dobiveni odzivi optimalne forme na pravilnim valovima s odzivima postojeće forme pomoću programskog paketa *HydroSTAR* određene su amplitude pomaka broda postojeće forme, forme s eliptičnim bulbom, forme s Δ -tip bulbom kao i najoptimalnije forme 16 s eliptičnim bulbom pri brzini napredovanja broda $v = 15$ čv.

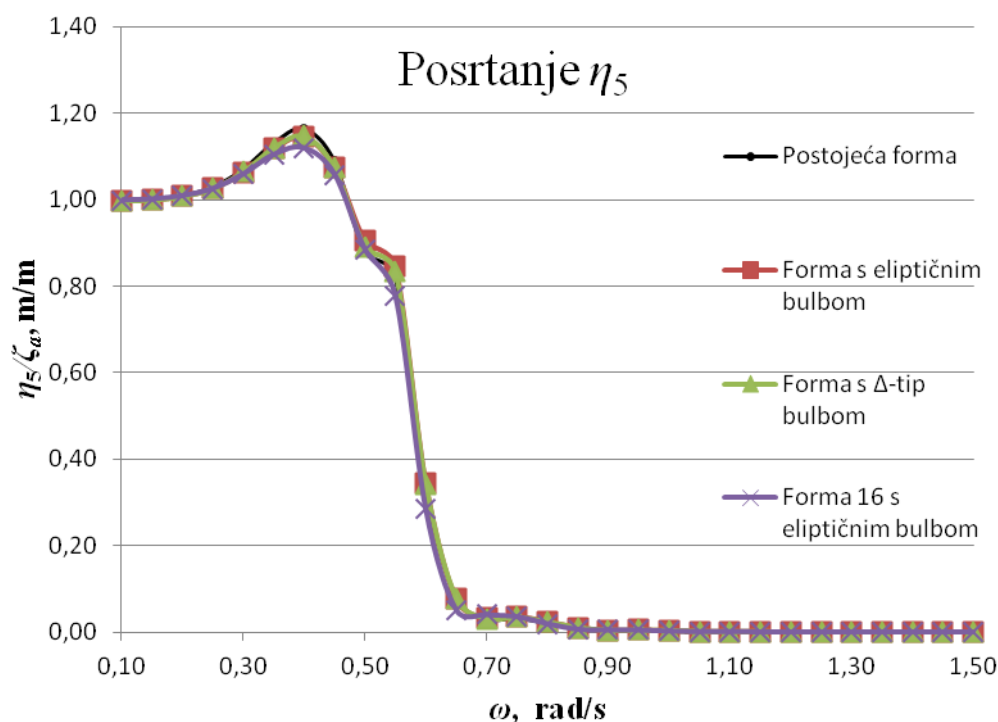
Na temelju izlaznih rezultata zaključeno je kako valovi koji pod kutem od 180° nailaze na brod, ne stvaraju značajna njihanja broda oko uzdužne i vertikalne osi te u smjeru poprečne osi brodskog koordinatnog sustava te su ta njihanja zanemarena. Značajnija njihanja javljaju se za slučaj poniranja η_3 i posrtanja η_5 , dok su ostala njihanja zanemariva.

Na slikama 37. i 38. prikazane su dobivene prijenosne funkcije navedenih formi i to za poniranje i posrtanje. U slučaju posrtanja bezdimenzionalnost je ostvarena pretvaranjem amplitude odziva iz stupnjeva u radijane te dijeljenjem amplitude dodatno s valnim brojem obzirom da su izlazni podaci o amplitudama iz programskog paketa *HydroSTAR* dani u $^\circ/m$.



Slika 37. Prijenosne funkcije pomaka za poniranje

Iz slike 37. je vidljivo da kod amplituda poniranja pri nižim frekvencijama se javlja rezonancija frekvencije valova i prirodne frekvencije broda. Lokalni maksimumi prijenosnih funkcija odgovaraju i sprezi poniranja i posrtanja. Također pri niskim frekvencijama brod teži njihanju koje odgovara gibanju valova. Maksimalno poniranje na dugačkim valovima je na valnim brijegovima i dolovima kada je gotovo jednako amplitudi vala. Na slici 37. je također vidljivo da postojeća forma ima najviše vrijednosti poniranja dok optimalna forma 16 s eliptičnim bulbom ima najniže vrijednosti poniranja.



Slika 38. Prijenosne funkcije pomaka za posrtanje

Posrtanje broda na valovima najveće je u nultočkama profila vala. Na dijagramu amplituda posrtanja, slika 38., vidljivo je kako amplitude posrtanja zamiru porastom frekvencija nailaznih valova. Pri nižim frekvencijama može se primjetiti da su amplitude posrtanja veće. Na slici 38. je također vidljivo da postojeća forma ima vrijednosti posrtanja dok optimalna forma 16 s eliptičnim bulbom ima najniže.

10.8. Dodatna sila otpora na valovima

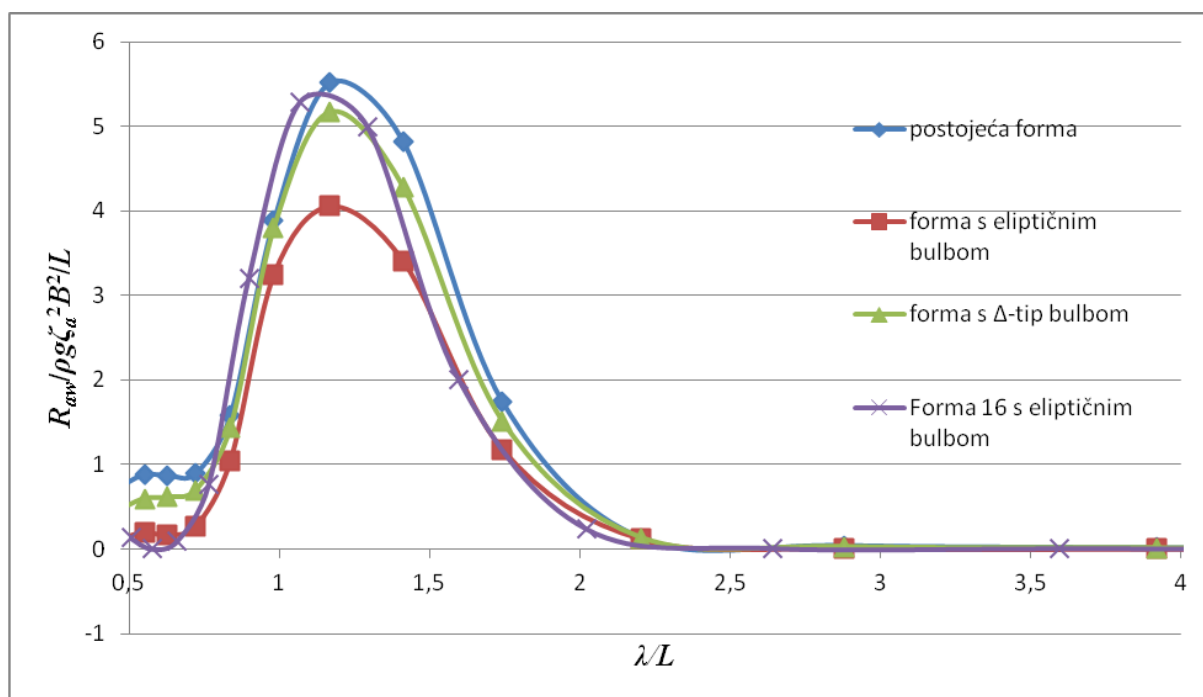
Dodatni otpor određen je na temelju sila zanošenja broda na pojedinim frekvencijama. Srednja vrijednost sile dodatnog otpora određena je pomoću sljedećeg izraza:

$$\overline{R_{AW}} = 2 \int_0^{\infty} \left| \frac{R_{aw}}{\zeta_a^2}(\omega) \right| S_{\zeta}(\omega) d\omega \quad (101)$$

gdje $\frac{R_{aw}}{\zeta_a^2}(\omega)$ predstavlja silu zanošenja za određenu frekvenciju.

Izraz $\int_0^{\infty} \left| \frac{R_{aw}}{\zeta_a^2}(\omega) \right| S_{\zeta}(\omega) d\omega$ predstavlja površinu ispod spektra odziva sila zanošenja za definirano stanje mora [19].

S obzirom da je razmatrano valno opterećenje drugog reda odnosno kvadratna prijenosna funkcija QTF aproksimirana pomoću Newmanove formulacije [21], na taj način podcijenjen je dodatni otpor broda na valovima. Kako bi se dobiveni rezultati navedenih formi mogli usporediti, za brzinu napredovanja $v=15$ čv, napravljen je proračun sila zanošenja odnosno sile dodatnog otpora na valovima svih prikazanih formi. Rezultati su prikazani u bezdimenzijskom obliku na slici 39.



Slika 39. Usporedba izračunatih vrijednosti koeficijenta dodatnog otpora na valovima

Iz Slike 39. može se zaključiti kako krivulje izračunatih bezdimenzijskih vrijednosti sile dodatnog otpora na valovima za sve forme imaju isti trend. Može se primjetiti kako se

ekstremna vrijednost dobivenih funkcije bezdimenzijske sile dodatnog otpora u ovisnosti o omjeru λ/L nalazi na nižoj frekvenciji. Usporedbom dobivenih rezultata može se zaključiti da optimalna forma 16 s eliptičnim bulbom pokazuje niže vrijednosti koeficijenta dodatnog otpora na valovima od postojeće forme. Najoptimalnija formu u analizi dodatnog otpora pokazala se forma s eliptičnim bulbom.

11. ZAKLJUČAK

Poznavanje ukupnog otpora u fazi predprojekta je jedan od važnijih čimbenika samog projektiranja broda te postoji više načina njegove procjene. Ukoliko je dostupan numerički model razmatrane forme broda koji omogućuje brzu procjenu ukupnog otpora, moguće je među razmatranim projektima odabrati najpovoljniji sa stajališta ukupnog otpora. Jedan od načina procjene ukupnog otpora je i generiranje virtualnog modela kojim će se u prikladnom programskom paketu izvršiti izračun ukupnog otpora.

Generirani model i proračun ukupnog otpora u ovom radu temelji se na metodi Holtropa [6]. Model je generiran u programskom paketu *Rhinoceros*, a rezultati ukupnog otpora su dobiveni programskim paketom *Maxsurf Resistance*. Usporedbom rezultata ukupnog otpora dobivenih simulacijom i dostupnim eksperimentalnim ispitivanjima [2] pokazalo se da maksimalne relativne pogreške generiranog modela za stanje projektnog gaza iznose do 1% u slučaju parametara forme, dok za rezultate ukupnog otpora relativna pogreška iznosi do 8%. Od tri stanja krcanja koja su ispitana dva stanja krcanja zadovoljila su ulazne parametre proračuna metodom Holtropa. Na temelju dobivenih rezultata ukupnog otpora za projektno stanje krcanja istraživao se utjecaj glavnih izmjera broda i pramčanog oblika na rezultat ukupnog otpora te su se razmatrali utjecaji na odziv broda na valovima i sila dodatnog otpora na valovima u programskom paketu *HydroSTAR*.

Za ispitivanje utjecaja glavnih izmjera broda mijenjana je duljina broda L_{pp} , širina broda B i gaz broda T . Pri analizi volumen istisnine V , koeficijent punoće forme C_B i koeficijent prizmatičnosti C_P održavani su konstantnim kako bi se zadovoljio uvjet afinosti i nosivosti broda. Pri usporedbi utjecaja glavnih izmjera broda i pramčanog oblika na odziv broda na valovima i dodatnu silu otpora na valovima koristili su se rezultati za projektnu brzinu $v=15$ čv. Utjecaj pramčanog oblika broda istraživao se generiranjem dva dodatna oblika pramčanog bulba, eliptični bulb i Δ -tip bulb, koji su primjenjivi za formu broda korištenu u radu prema [17]. Pri istraživanju utjecaja pramčanog oblika broda također su se koristile affine transformacije glavnih izmjera broda kako bi se u konačnici izabrala najoptimalnija forma.

Rezultati proračuna ukupnog otpora primjenom metode Holtropa pokazuju dobro poklapanje trenda krivulje ukupnog otpora s rezultatima modelskih ispitivanja, no određeno odstupanje postoji. Odstupanje rezultata približno jednakog je iznosa i mijenja se ovisno o stanju krcanja broda. Za stanje potpuno nakrcanog broda rezultati ukupnog otpora daju relativne pogreške

ukupnog otpora do 20%, dok relativne pogreške kod projektog stanja krcanja iznose do 8%.

Razlog pojavljivanja relativne pogreške se može naći u nedostatku znanja o utjecaju koeficijenta forma $(1+k)$ na ukupni otpor. Drugi razlog je i postojanje pramčanog bulba koji također može utjecati na ukupni otpor pri korištenju metode Holtropa. Duboko uronjeni bulb pokazuje bolje rezultate nego pramčani bulb koji se nalazi u blizini slobodne površine.

Istraživanjem utjecaja glavnih izmjera broda pokazalo se da generirana forma 16 u slučaju sva tri tipa bulba daje najmanje vrijednosti ukupnog otpora. Forma 16 generirana je povećanjem duljine L_{pp} za 9%, smanjenjem širine broda B za 13% i povećanjem gaza broda T za 6%.

Pripadajući omjeri duljine i širine broda i omjer širine i gaza broda iznose $\frac{L_{pp}}{B} = 6,84$ i

$\frac{B}{T} = 2,16$. Prosječno smanjenje ukupnog otpora forme 16 iznosi 4,36%. Tijekom istraživanja

utjecaja pramčanog oblika, forma 16 s eliptičnim bulbom pokazala se najoptimalnijom i prosječna vrijednost smanjenja ukupnog otpora iznosi 9,40%, dok forma 16 sa Δ -tip bulbom daje prosječno smanjenje ukupnog otpora od 8,95%. Obzirom da je važno odrediti odziv broda na valovima u fazi predprojekta izračunat je odziv poniranja i posrtanja broda, kao i koeficijent sile dodatnog otpora na valovima, u programskom paketu *HydroSTAR*. Analizom odziva broda na valovima forma 16 s eliptičnim bulbom u usporedbi sa postojećom formom i formom s Δ -tip bulbom pokazala je najmanje amplitude odziva poniranja i posrtanja. Usporedbom dobivenih rezultata može se zaključiti da optimalna forma 16 s eliptičnim bulbom pokazuje niže vrijednosti koeficijenta dodatnog otpora na valovima od postojeće forme. Najoptimalnija forma u analizi dodatnog otpora pokazala se postojeća forma s eliptičnim bulbom.

Metoda Holtropa korištena za izračun ukupnog otpora nakon usporedbe s dostupnim podacima pokazuje odstupanja ukupnog otpora unutar dozvoljenih granica za stanje projektog gaza. Pri upotrebi metode treba voditi računa o ulaznim parametrima potrebnim za proračun. Istraživanjem se pokazalo da adekvatne promjene glavnih izmjera broda i provjera utjecaja različitih oblika pramčanog bulba na ukupni otpor može djelovati smanjenjem vrijednosti ukupnog otpora i do 10%. Preporuka je korištenje metode Holtropa i programskih alata samo u svrhu analize i određivanja ukupnog otpora u fazi predprojekta. Za pouzdanu procjenu ukupnog otpora odabranog projekta potrebno je provesti modelska ispitivanja.

LITERATURA

- [1] Prpić-Oršić J., Faltinsen O.M., „*Estimation of Ship Speed Loss and Associate CO₂ Emissions in a Seaway*“ Ocean Engineering, Vol. 44, No. 1, pp. 1-10, 2012.
- [2] „*RESISTANCE AND PROPULSION MEASUREMENTS, Ship model: M – 11618, Propeller model: V -1010 (KAMEWA project) "TROGIR" Shipyard – Trogir*“, Interni izvještaj, Brodarski Institut, Zagreb 1996.
- [3] Rhinoceros 3d V5.0, McNeel North America, 2015.
- [4] Maxsurf Resistance 20.02 V8i, Bentley, 2013.
- [5] HydroSTAR for Experts V6.11, Bureau Veritas Paris, 2010.
- [6] Holtrop J., G.G.J. Mennen, „*An approximate power prediction method*“, International Shipbuilding Progress Marine Technology Monthly , Rotterdam, 1982.
- [7] Radan, D., „*Uvod u hidrodinamiku broda*“, Sveučilište u Dubrovniku, Dubrovnik, 2004.
- [8] Degiuli, N., „*Otpor i propulzija broda*“, interna skripta, FSB
- [9] Holtrop J., „*A Statistical Resistance Prediction Method With a Speed Dependent Form Factor*“, Maritime Research Institute Netherlands, Presented on SMSSM'88, Varna, 1988.
- [10] Formation Design Systems Pty Ltd., „*Hullspeed Windows Version 11.0 User Manual*“, 1984 – 2004
- [11] www.fsb.unizg.hr/geometrija.broda/, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb
- [12] Larsson, L., Raven, H. C. „*Ship Resistance and Flow*“, SNAME, New Jersey, 2010.
- [13] Harries, S., Abt, C., Heimann, J., Hochkirch, K. „*Advanced Hydrodynamic Design of Container Carriers for Improved Transport Efficiency*“, Design & Operation of Container Ships, Royal Institution of Naval Architects, London UK, 2006
- [14] Wyatt, D. C., Chang, P. A., „*Development and Assessment of a Total Resistance Optimized Bow for the AE 36*“, Marine Technology, Vol. 31, No. 2, pp. 149, 1994.
- [15] Hochkirch, K., Bertram, V., „*Slow Steaming Bulbous Bow Optimization for a Large Containership*“, Proceedings of the 8th International Conference on Computer and IT Applications in the Maritime Industries, 10-12 May, pp. 390-398, Budapest, 2009.
- [16] Taylor, D. W., „*Speed and Power of Ships*“, Washington, 1933.

-
- [17] Kracht, A. M., „*Design of bulbous bows*“, SNAME Transactions, vol. 86, pp. 197-271, Jersey City, 1978.
- [18] Matulja D., „*Numerička optimizacija hidrodinamičkih značajki forme broda u mirnoj vodi*“, Doktorska disertacija, Rijeka, 2013.
- [19] Journée, J.M.J., Massie W.W.: „*Offshore Hydromechanics*“, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands, 2001.
- [20] Prpić-Oršić, J., Čorić, V.: „*Pomorstvenost plovnih objekata*“, Zigo, Rijeka, 2006.
- [21] Martić, I. „*Diplomski rad: Procjena pomorstvenih karakteristika neoštećenog i oštećenog broda*“, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2014.