

Određivanje ukupnog otpora systemske serije brzih brodova primjenom metode Savitsky

Mihalić, Dora

Undergraduate thesis / Završni rad

2025

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:235:969757>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-25**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Dora Mihalić

Zagreb, 2025.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentori:

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

Dr. sc. Ivana Martić, mag. ing. nav. arch.

Student:

Dora Mihalić

Zagreb, 2025.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu. Rad je izrađen u sklopu projekta HRZZ-IP-2020-02-8568 Hrvatske zaklade za znanost.

Zahvaljujem se svojim mentorima prof. dr. sc. Nastii Degiuli te dr. sc. Ivani Martić na pomoći i strpljenju.

Zahvaljujem se svojoj obitelji i zaručniku koji su mi pružali puno potpore tijekom studija kao i svojim prijateljima i kolegama na Fakultetu. Također ponosna sam na sebe jer nisam odustala.

Dora Mihalić



Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 – 04 / 25 – 06 / 01	
Ur.broj: 15 – 25 –	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Dora Mihalić** JMBAG: **0035224752**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Određivanje ukupnog otpora sistematske serije brzih brodova primjenom metode Savitsky**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Estimation of total resistance for a systematic series of planing hulls using the Savitsky method**

Opis zadatka:

Projektiranje brzih brodova uvelike je uvjetovano zahtjevom za smanjenjem potrošnje goriva iz ekonomskih i ekoloških razloga te poboljšanjem udobnosti na brodu, koja je nerijetko pri velikim brzinama narušena. Kako bi se postigla ravnoteža između navedenih zahtjeva potrebno je istražiti učinke različitih parametara na ukupni otpor broda. Za određivanje ukupnog otpora broda te kuta trima pri određenoj brzini u preliminarnoj fazi projektiranja brzih brodova moguće je primijeniti metodu Savitsky, koja omogućuje analitičko određivanje ukupnog otpora broda, uzgona te kuta trima na temelju poznatih geometrijskih značajki i brzine.

U završnom radu potrebno je za sistematsku seriju modela brzih brodova "Naples Systematic Series" odrediti ukupni otpor broda u mirnoj vodi i kut trima primjenom metode Savitsky te dobivene rezultate usporediti s eksperimentalnim rezultatima dostupnim u literaturi.

U radu je potrebno:

1. Dati pregled literature vezane uz hidrodinamičke značajke brzih brodova.
2. Dati matematičku osnovu određivanja ukupnog otpora broda i kuta trima primjenom metode Savitsky.
3. Odrediti ukupni otpor i kut trima primjenom metode Savitsky za sistematsku seriju modela brzih brodova "Naples Systematic Series" za široki raspon brzina.
4. Usporediti analitički dobivene rezultate ukupnog otpora modela broda i kuta trima s eksperimentalnim rezultatima dostupnim u literaturi te procijeniti točnost metode Savitsky u preliminarnoj fazi projektiranja brzih brodova.

Rezultate proračuna prikazati odgovarajućim tablicama, dijagramima i slikama.

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

Zadatak zadan:

19. 11. 2024.

Datum predaje rada:

1. rok: 20. i 21. 2. 2025.
2. rok: 10. i 11. 7. 2025.
3. rok: 18. i 19. 9. 2025

Predviđeni datum obrane:

1. rok: 24. 2. – 28. 2. 2025.
2. rok: 15. 7. – 18. 7. 2025
3. rok: 22. 9. – 26. 9. 2025.

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Nastia Degiuli

Nastia Degiuli

Dr. sc. Ivana Martić

Ivana Martić

Izv. prof. dr. sc. Ivan Čatipović

Čatipović

SADRŽAJ

SADRŽAJ.....	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA	VI
POPIS OZNAKA	VIII
SAŽETAK	XI
SUMMARY.....	XII
1. UVOD.....	1
1.1. Pregled literature	2
2. OTPOR BRODA	4
2.1. Trim broda.....	8
3. SISTEMATSKA SERIJA MODELA BRZIH BRODOVA „NAPLES SYSTEMATIC SERIES“	9
4. METODA SAVITSKY	11
5. METODA RADOJČIĆ.....	14
6. REZULTATI	41
6.1. Metoda Savitsky	41
6.2. Metoda Radojčić	45
7. GRAFIČKA USPOREDBA REZULTATA	73
7.1. Usporedba rezultata dobivenih primjenom metode Savitsky s eksperimentalnim rezultatima.....	73
7.2. Usporedba rezultata dobivenih primjenom metode Radojčić s eksperimentalnim rezultatima.....	76
8. ZAKLJUČAK.....	78

LITERATURA 79

POPIS SLIKA

Slika 1. Raščlana ukupnog otpora površinskog deplasmanskog broda [20]	4
Slika 2. Usporedba modela C1 (puna linija) i C954 (isprekidana linija)	9
Slika 3. Poprečni presjek modela C1	10
Slika 4. Uzdužni presjek modela C1	10
Slika 5. Grafički prikaz ulaznih parametara	11
Slika 6. Ovisnost regresijskog koeficijenta a_0 o Froudeovom broju	15
Slika 7. Ovisnost regresijskog koeficijenta a_1 o Froudeovom broju	16
Slika 8. Ovisnost regresijskog koeficijenta a_2 o Froudeovom broju	16
Slika 9. Ovisnost regresijskog koeficijenta a_3 o Froudeovom broju	16
Slika 10. Ovisnost regresijskog koeficijenta a_4 o Froudeovom broju	17
Slika 11. Ovisnost regresijskog koeficijenta a_5 o Froudeovom broju	17
Slika 12. Ovisnost regresijskog koeficijenta a_6 o Froudeovom broju	17
Slika 13. Ovisnost regresijskog koeficijenta a_7 o Froudeovom broju	18
Slika 14. Ovisnost regresijskog koeficijenta a_8 o Froudeovom broju	18
Slika 15. Ovisnost regresijskog koeficijenta a_9 o Froudeovom broju	18
Slika 16. Ovisnost regresijskog koeficijenta a_{10} o Froudeovom broju	19
Slika 17. Ovisnost regresijskog koeficijenta a_{11} o Froudeovom broju	19
Slika 18. Ovisnost regresijskog koeficijenta a_{12} o Froudeovom broju	19
Slika 19. Ovisnost regresijskog koeficijenta a_{13} o Froudeovom broju	20
Slika 20. Ovisnost regresijskog koeficijenta a_{14} o Froudeovom broju	20
Slika 21. Ovisnost regresijskog koeficijenta a_{15} o Froudeovom broju	20
Slika 22. Ovisnost regresijskog koeficijenta a_{16} o Froudeovom broju	21
Slika 23. Ovisnost regresijskog koeficijenta a_{17} o Froudeovom broju	21
Slika 24. Ovisnost regresijskog koeficijenta a_{18} o Froudeovom broju	21
Slika 25. Ovisnost regresijskog koeficijenta a_{19} o Froudeovom broju	22
Slika 26. Ovisnost regresijskog koeficijenta a_{20} o Froudeovom broju	22
Slika 27. Ovisnost regresijskog koeficijenta a_{21} o Froudeovom broju	22
Slika 28. Ovisnost regresijskog koeficijenta a_{22} o Froudeovom broju	23
Slika 29. Ovisnost regresijskog koeficijenta a_{23} o Froudeovom broju	23
Slika 30. Ovisnost regresijskog koeficijenta a_{24} o Froudeovom broju	23
Slika 31. Ovisnost regresijskog koeficijenta a_{25} o Froudeovom broju	24

Slika 32. Ovisnost regresijskog koeficijenta a_{26} o Froudeovom broju	24
Slika 33. Ovisnost regresijskog koeficijenta b_0 o Froudeovom broju.....	25
Slika 34. Ovisnost regresijskog koeficijenta b_1 o Froudeovom broju.....	25
Slika 35. Ovisnost regresijskog koeficijenta b_2 o Froudeovom broju.....	25
Slika 36. Ovisnost regresijskog koeficijenta b_3 o Froudeovom broju.....	26
Slika 37. Ovisnost regresijskog koeficijenta b_4 o Froudeovom broju.....	26
Slika 38. Ovisnost regresijskog koeficijenta b_5 o Froudeovom broju.....	26
Slika 39. Ovisnost regresijskog koeficijenta b_6 o Froudeovom broju.....	27
Slika 40. Ovisnost regresijskog koeficijenta b_8 o Froudeovom broju.....	27
Slika 41. Ovisnost regresijskog koeficijenta b_9 o Froudeovom broju.....	28
Slika 42. Ovisnost regresijskog koeficijenta b_{10} o Froudeovom broju	28
Slika 43. Ovisnost regresijskog koeficijenta b_{11} o Froudeovom broju.....	28
Slika 44. Ovisnost regresijskog koeficijenta b_{12} o Froudeovom broju	29
Slika 45. Ovisnost regresijskog koeficijenta b_{13} o Froudeovom broju	29
Slika 46. Ovisnost regresijskog koeficijenta b_{14} o Froudeovom broju	29
Slika 47. Ovisnost regresijskog koeficijenta b_{15} o Froudeovom broju	30
Slika 48. Ovisnost regresijskog koeficijenta b_{16} o Froudeovom broju	30
Slika 49. Ovisnost regresijskog koeficijenta b_{17} o Froudeovom broju	30
Slika 50. Ovisnost regresijskog koeficijenta b_{18} o Froudeovom broju	31
Slika 51. Ovisnost regresijskog koeficijenta b_{19} o Froudeovom broju	31
Slika 52. Ovisnost regresijskog koeficijenta b_{20} o Froudeovom broju	31
Slika 53. Ovisnost regresijskog koeficijenta b_{21} o Froudeovom broju	32
Slika 54. Ovisnost regresijskog koeficijenta b_{22} o Froudeovom broju	32
Slika 55. Ovisnost regresijskog koeficijenta b_{23} o Froudeovom broju	32
Slika 56. Ovisnost regresijskog koeficijenta b_{24} o Froudeovom broju	33
Slika 57. Ovisnost regresijskog koeficijenta b_{25} o Froudeovom broju	33
Slika 58. Ovisnost regresijskog koeficijenta b_{26} o Froudeovom broju	33
Slika 59. Ovisnost regresijskog koeficijenta c_0 o Froudeovom broju	34
Slika 60. Ovisnost regresijskog koeficijenta c_1 o Froudeovom broju	34
Slika 61. Ovisnost regresijskog koeficijenta c_2 o Froudeovom broju	35
Slika 62. Ovisnost regresijskog koeficijenta c_3 o Froudeovom broju	35
Slika 63. Ovisnost regresijskog koeficijenta c_4 o Froudeovom broju	35
Slika 64. Ovisnost regresijskog koeficijenta d_0 o Froudeovom broju.....	36
Slika 65. Ovisnost regresijskog koeficijenta d_1 o Froudeovom broju.....	36

Slika 66. Ovisnost regresijskog koeficijenta d_2 o Froudeovom broju.....	37
Slika 67. Ovisnost regresijskog koeficijenta d_3 o Froudeovom broju.....	37
Slika 68. Ovisnost regresijskog koeficijenta d_4 o Froudeovom broju.....	37
Slika 69. Ovisnost regresijskog koeficijenta d_5 o Froudeovom broju.....	38
Slika 70. Ovisnost regresijskog koeficijenta d_6 o Froudeovom broju.....	38
Slika 71. Ovisnost regresijskog koeficijenta d_7 o Froudeovom broju.....	38
Slika 72. Ovisnost regresijskog koeficijenta d_8 o Froudeovom broju.....	39
Slika 73. Ovisnost regresijskog koeficijenta d_9 o Froudeovom broju.....	39
Slika 74. Ovisnost regresijskog koeficijenta d_{10} o Froudeovom broju	39
Slika 75. Usporedba ukupnog otpora za model C3	73
Slika 76. Usporedba kuta trima za model C3	74
Slika 77. Usporedba ukupnog otpora za model C4	74
Slika 78. Usporedba kuta trima za model C4	75
Slika 79. Usporedba ukupnog otpora za model C5	75
Slika 80. Usporedba kuta trima za model C5	75
Slika 81. Usporedba ukupnog otpora za model C3	76
Slika 82. Usporedba kuta trima za model C3	76
Slika 83. Usporedba ukupnog otpora za model C4	77
Slika 84. Usporedba kuta trima za model C4	77

POPIS TABLICA

Tablica 1. Glavne značajke modela C3, C4 i C5	41
Tablica 2. Izmjerene vrijednosti za model C3	42
Tablica 3. Rezultati dobiveni metodom Savitsky za model C3.....	42
Tablica 4. Izmjerene vrijednosti za model C4	43
Tablica 5. Rezultati dobiveni metodom Savitsky za model C4.....	43
Tablica 6. Izmjerene vrijednosti za model C5	44
Tablica 7. Rezultati dobiveni metodom Savitsky za model C5.....	44
Tablica 8. Značajke modela C3, C4, C5	45
Tablica 9. Provjerena ograničenja za modele C3, C4 i C5.....	45
Tablica 10. Neovisni koeficijenti za model C3	46
Tablica 11. Neovisni koeficijenti za model C4	46
Tablica 12. Froudeovi brojevi za model C3	46
Tablica 13. Froudeovi brojevi za model C4	47
Tablica 14. Izračunati regresijski koeficijenti za brzinu 2,5 m/s, model C3	48
Tablica 15. Izračunati regresijski koeficijenti za brzinu 3 m/s, model C3	49
Tablica 16. Izračunati regresijski koeficijenti za brzinu 3,5 m/s, model C3	50
Tablica 17. Izračunati regresijski koeficijenti za brzinu 4 m/s, model C3	51
Tablica 18. Izračunati regresijski koeficijenti za brzinu 4,5 m/s, model C3	52
Tablica 19. Izračunati regresijski koeficijenti za brzinu 5 m/s, model C3	53
Tablica 20. Izračunati regresijski koeficijenti za brzinu 5,5 m/s, model C3	54
Tablica 21. Izračunati regresijski koeficijenti za brzinu 6 m/s, model C3	55
Tablica 22. Izračunati regresijski koeficijenti za brzinu 6,5 m/s, model C3	56
Tablica 23. Izračunati regresijski koeficijenti za brzinu 7 m/s, model C3	57
Tablica 24. Izračunati regresijski koeficijenti za brzinu 7,5 m/s, model C3	58
Tablica 25. Izračunati regresijski koeficijenti za brzinu 2,5 m/s, model C4	59
Tablica 26. Izračunati regresijski koeficijenti za brzinu 3 m/s, model C4	60
Tablica 27. Izračunati regresijski koeficijenti za brzinu 3,5 m/s, model C4	61
Tablica 28. Izračunati regresijski koeficijenti za brzinu 4 m/s, model C4	62
Tablica 29. Izračunati regresijski koeficijenti za brzinu 4,5 m/s, model C4	63
Tablica 30. Izračunati regresijski koeficijenti za brzinu 5 m/s, model C4	64
Tablica 31. Izračunati regresijski koeficijenti za brzinu 5,5 m/s, model C4	65

Tablica 32. Izračunati regresijski koeficijenti za brzinu 6 m/s, model C4	66
Tablica 33. Izračunati regresijski koeficijenti za brzinu 6,5 m/s, model C4	67
Tablica 34. Izračunati regresijski koeficijenti za brzinu 7 m/s, model C4	68
Tablica 35. Izračunati regresijski koeficijenti za brzinu 7,5 m/s, model C4	69
Tablica 36. Neovisni koeficijent x_5' za model C3	70
Tablica 37. Neovisni koeficijent x_5' za model C4	70
Tablica 38. Rezultati proračuna metodom Radojčić za model C3	71
Tablica 39. Rezultati proračuna metodom Radojčić za model C4	71

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
a	ft	Udaljenost između težišta mase i vektora otpora trenja
a_i	/	Regresijski koeficijenti dinamičkog trima
A_p	m ²	Projicirana oplakana površina
b_i	/	Regresijski koeficijenti omjera otpora i mase
B_{pa}	m	Srednja širina
B_{wl}	m	Širina vodne linije
c	ft	Udaljenost između težišta mase i normalne komponente otpora
C_A	/	Koeficijent dodatnog otpora
C_a	/	Korelacijski dodatak
C_F	/	Koeficijent otpora trenja
C_f	/	Koeficijent otpora trenja modela
C_f'	/	Koeficijent otpora trenja broda
c_i	/	Regresijski koeficijenti omjera površine i volumena
C_{L0}	/	Koeficijent istisnine
$C_{L\beta}$	/	Koeficijent uzgona
C_p	/	Udaljenost središta djelovanja tlaka od krmenog zrcala
C_{PV}	/	Koeficijent viskoznog otpora tlaka
C_T	/	Koeficijent ukupnog otpora
C_v	/	Koeficijent brzine
C_w	/	Koeficijent otpora valova
D	lb	Ukupni otpor
D_f	lb	Otpor trenja
d_i	/	Regresijski koeficijenti omjera L/L_p
f	ft	Udaljenost između vektora poriva i težišta mase
Fn	/	Froudeov broj
Fn_{∇}	/	Froudeov broj na temelju volumena istisnine
g	m/s ²	Ubrzanje Zemljine sile teže
L	m	Duljina broda
LCG	m	Uzdužni položaj težišta mase

L_{OA}	m	Duljina preko svega
L_p	m	Projicirana duljina modela broda
L_{WL}	m	Duljina vodne linije
M_{tot}	ft·lb	Ukupni moment
\vec{p}	Pa	Vektor hidrodinamičkog tlaka
\vec{p}_{pv}	Pa	Normalna naprezanja uzrokovana viskoznošću fluida
\vec{p}_w	Pa	Normalna naprezanja uzrokovana valovima
R	N	Ukupni otpor
R_{AA}	N	Otpor zraka i vjetra
RD	%	Relativna devijacija
Re	/	Reynoldsov broj
R_F	N	Otpor trenja
R_P	N	Otpor tlaka
R_{PV}	N	Viskozni otpor tlaka
R_R	N	Preostali otpor
R_S	N	Otpor vodene prašine
R_T	N	Ukupni otpor
R_V	N	Viskozni otpor
R_W	N	Otpor valova
S	m ²	Oplakana površina
$S/\nabla^{2/3}$	/	Bezdimenzijska oplakana površina
S_{WD}	m ²	Oplakana površina uronjenog dijela
v	m/s	Brzina broda
V	čv	Horizontalna komponenta brzine glisirajuće površine
VCG	m	Vertikalni položaj težišta mase
V_m	čv	Srednja brzina glisirajuće površine
x_n	/	Neovisni koeficijenti
β	°	Kut nagiba dna
Δ	kg	Masa istisnine
ΔC_F	/	Dodatak uslijed hrapavosti
∇	m ³	Volumen istisnine
ε	°	Kut između vektora poriva i kobilice
λ	/	Mjerilo sličnosti

ν	m^2/s	Kinematički koeficijent viskoznosti
ρ	kg/m^3	Gustoća fluida
τ	$^\circ$	Dinamički kut trima
$\vec{\tau}_0$	Pa	Vektor tangencijalnih naprezanja

SAŽETAK

U ovom završnom radu provedena je analiza primjenjivosti i točnosti metoda Savitsky i Radojčić za određivanje ukupnog otpora i kuta trima brzih brodova u okviru preliminarnog projekta. Ukupni otpor i kut trima izračunati su za modele brodova razvijene u okviru sistematske serije „Naples Systematic Series“ za koje su dostupni eksperimentalni rezultati. Dan je pregled proračuna ukupnog otpora i kuta trima prema obje metode uz navedena ograničenja primjene. Rezultati dobiveni u širokom rasponu brzina prikazani su tablično i grafički uz detaljnu analizu dobivenih odstupanja u odnosu na eksperimentalne rezultate. Rezultati pokazuju kako je primjenom obje metode moguće procijeniti ukupni otpor broda sa zadovoljavajućom točnošću, posebice pri nižim brzinama plovidbe, dok su dobivena odstupanja za kut trima nešto izraženija.

Ključne riječi: brzi brodovi, ukupni otpor, kut trima, metoda Savitsky, metoda Radojčić

SUMMARY

This thesis evaluates the applicability and accuracy of the Savitsky and Radojčić methods for determining the total resistance and trim angle of high-speed vessels in the preliminary ship design phase. The total resistance and trim angle were calculated for ship models from the "Naples Systematic Series," for which experimental data is available. A comprehensive overview of the calculation procedures for both methods is provided, along with their respective limitations. The results, covering a wide range of speeds, are presented in both tabular and graphical formats, accompanied by a detailed analysis of the deviations relative to experimental findings. The study confirms that both methods can estimate total resistance with satisfactory accuracy, particularly at lower speeds, while deviations in the predicted trim angle are more pronounced.

Key words: planing vessels, total resistance, trim angle, Savitsky method, Radojčić method

1. UVOD

Brzi brodovi predstavljaju posebnu kategoriju plovila čije se značajke bitno razlikuju od značajki deplasmanskih formi, osobito u pogledu dizajna, radnih značajki i namjene. Brzi brodovi uobičajeno plove pri Froudeovim brojevima većim od 0,4, što znači da su projektirani za postizanje velikih brzina i imaju veliku manevarsku sposobnost. [1] Brze brodove odlikuje hidrodinamički optimiran trup, snažni pogonski sustav i napredne upravljačke tehnologije. Jedan od ključnih čimbenika koji utječu na radne značajke brzih brodova je kut trima, odnosno uzdužni nagib broda, koji se mijenja s brzinom plovidbe. Određeni kut trima može uzrokovati povećanje ukupnog otpora i smanjenje brzine, stoga je njegova optimizacija ključna za učinkovitost plovidbe. Optimalnu vrijednost kuta trima moguće je postići na nekoliko načina, uključujući pravilnu raspodjelu tereta, specifičan projekt trupa te primjenom sustava za kontrolu balasta. Ove strategije omogućuju održavanje optimalnog kuta trima pri različitim brzinama i smanjenje ukupnog otpora. Kako bi se smanjio otpor i omogućilo postizanje većih brzina plovidbe, brzi brodovi imaju posebno oblikovane trupove i napredne pogonske sustave. U procesu optimizacije forme trupa brzih brodova, koriste se metode poput simulacija računalne dinamike fluida (RDF) i eksperimentalnih ispitivanja u bazenima za tegljenje modela brodova. Ove metode omogućuju precizno predviđanje otpora pri velikim brzinama i optimizaciju forme trupa broda. Razumijevanje tehničkih aspekata projekta i regulatornih zahtjeva ključno je za prepoznavanje prednosti i ograničenja svakog tipa broda. Time se omogućuje prilagodba specifičnim uvjetima plovidbe i osigurava učinkovita i sigurna eksploatacija brzih brodova.

U ovom radu analizirana je primjenjivost i točnost metoda koje su razvili Daniel Savitsky i Dejan Radojčić, a koje omogućuju određivanje približnih vrijednosti ključnih hidrodinamičkih parametara, uključujući kut trima i ukupni otpor brzih brodova pri različitim brzinama plovidbe. Navedene metode temelje se na empirijskim izrazima, a njihova točnost istražena je temeljem usporedbe s rezultatima eksperimentalnih ispitivanja za sistemsku seriju brzih brodova „Naples Systematic Series“. Validacija rezultata dobivenih primjenom empirijskih metoda pruža uvid u odstupanja između proračunskih i izmjerenih vrijednosti, što je ključno za daljnja poboljšanja i optimizaciju empirijskih metoda. Glavni cilj ove analize bio je utvrditi u kojoj mjeri metode koje su razvili Daniel Savitsky i Dejan Radojčić mogu pouzdano predvidjeti hidrodinamičke značajke brzih brodova u okviru njihovog projektiranja.

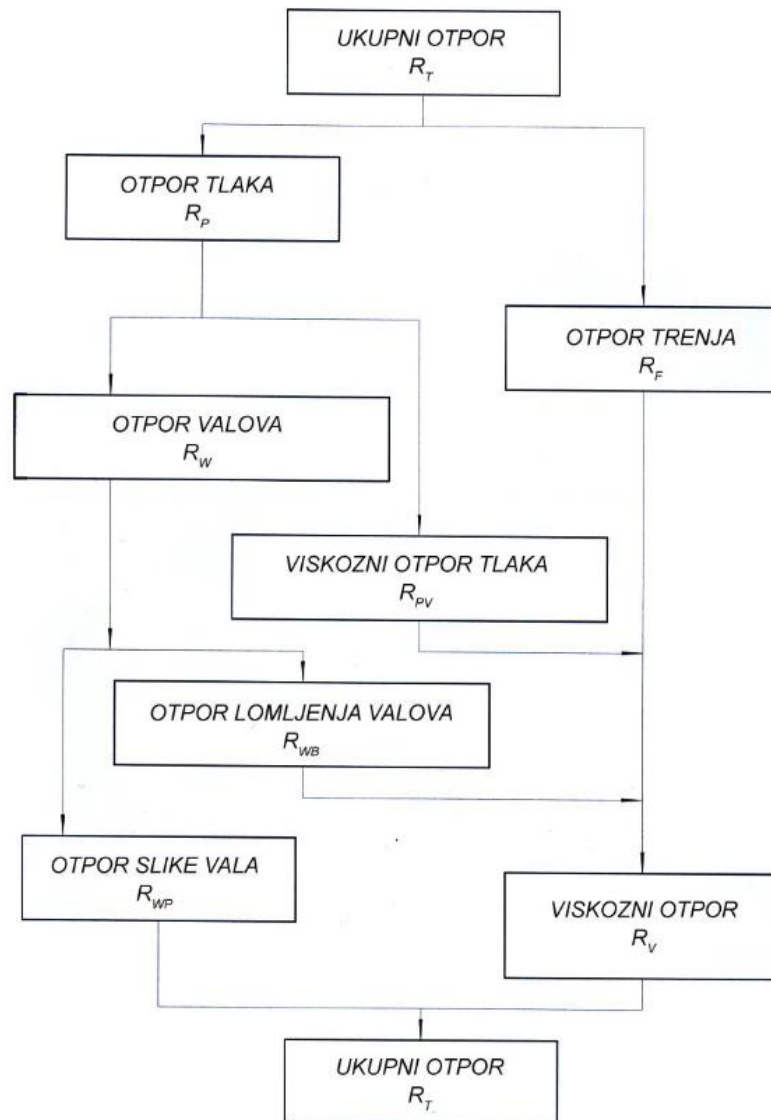
1.1. Pregled literature

Proces projektiranja broda između ostalog je usmjeren na smanjenje ukupnog otpora. Degiuli et al. [2] analizirali su utjecaj pramčanog oblika na ukupni otpor jahte na temelju eksperimentalnih ispitivanja i numeričkih simulacija. Rezultati su pokazali da bulb pramac može rezultirati smanjenjem otpora i do 7%, istovremeno smanjujući visinu generiranih valova. Ključnu ulogu u provedenom istraživanju imala je računalna dinamika fluida (RDF), koja je omogućila detaljni uvid u strujanje fluida oko različitih oblika pramca jahte. Farkas et al. [3] istraživali su učinke valne interferencije između trupova katamarana, što značajno utječe na ukupni otpor. Pokazano je da razmak između trupova i Froudeov broj imaju ključnu ulogu u određivanju ukupnog otpora, kuta trima i urona broda. Učinci valne interferencije kvantificirani su na temelju faktora interferencije. Nadalje, istražen je utjecaj mase broda i uzdužnog položaja težišta mase na ukupni otpor katamarana, pri čemu je utvrđeno da određeni položaj težišta mase broda može rezultirati smanjenjem ukupnog otpora katamarana [4]. Numeričkim simulacijama na temelju RDF-a analizirane su hidrodinamičke značajke jednotrupne jedrilice pri čemu je poseban naglasak stavljen na uzdužni stabilitet broda. Pokazano je da dodavanje klinova na krmu može poboljšati uzdužni stabilitet i smanjiti ukupni otpor [5]. Amoroso et al. [6] analizirali su optimalni položaj težišta mase s ciljem smanjenja ukupnog otpora kod jedrilica te su identificirali specifičan raspon Froudeovih brojeva u kojem je moguće postići minimalnu vrijednost ukupnog otpora. Viola et al. [7] analizirali su utjecaj položaja posade na ukupni otpor, uron i trim jedrilice, pri čemu su utvrdili da određeni položaj težišta mase poboljšava radne značajke plovila. Usporedba hidrodinamičkih značajki katamarana koji postiže velike brzine i jednotrupnog broda (jedrilice) pokazala je da katamaran ima veći ukupni otpor, ali i bolje značajke stabiliteta, osobito pri malim kutovima nagiba dna u poprečnom smislu (eng. deadrise angle) [8]. Istraživanjem problema izraženijeg poniranja i posrtanja (eng. porpoising) utvrđeno je da upuhivanje zraka na dnu trupa može značajno utjecati na ovu pojavu i poboljšati uzdužni stabilitet plovila [9]. U sličnom istraživanju, predložen je koncept heksamarana s ovjesnim sustavom, pri čemu su analize pokazale da ovaj sustav poboljšava stabilitet i smanjuje ukupni otpor te povoljno utječe na izraženija gibanja heksamarana [10]. Deng et al. [11] istraživali su hidrodinamičke značajke hidroaviona pri velikim brzinama koristeći numeričke simulacije. Njihovi rezultati potvrdili su važnost veličine mreže u numeričkim proračunima. Nadalje, istraživanja su pokazala da primjena hidrokrila na plovilima koja postižu velike brzine može rezultirati smanjenjem ukupnog otpora i kuta trima [12]. Shen et al. [13] analizirali su učinkovitost hidrokrila u smanjenju ukupnog otpora te utvrdili da pravilno postavljeno

hidrokrilo može rezultirati smanjenjem ukupnog otpora analizirane forme do 30,74% pri brzini od 8 m/s. Analizom gibanja autonomnog površinskog plovila koji postiže vrlo visoke brzine na valovima pokazano je da takva plovila imaju superiorne značajke pomorstvenosti u odnosu na konvencionalne brze brodove [14]. Također, istražen je utjecaj različitih konfiguracija krmenih zakrilaca na hidrodinamičke značajke plovila koje postiže velike brzine. Rezultati su pokazali da pravilno projektirana zakrilca smanjuju ukupni otpor i poboljšavaju energetska učinkovitost, dok su RDF simulacije omogućile detaljniji uvid u strujanje fluida i raspodjelu tlaka [15]. Također je ispitan utjecaj interceptora na ukupni otpor brzog broda, pri čemu je pokazano da pravilno dimenzionirani interceptori mogu značajno smanjiti ukupni otpor, dok neodgovarajuće postavljene interceptori mogu izazvati prekomjeren kut trima i negativno utjecati na radne značajke plovila [16]. Istraživanjem bočnih stabilizatora na glisirajućim trupovima utvrđeno je da bezdimenzijski razmak između trupova (S/L) ima značajan utjecaj na ukupni otpor i uzgon trimarana [17]. Istraživanja stepenastih glisirajućih trupova pokazala su poboljšanje radnih značajki u odnosu na trupove bez stepenica [18]. Korištenje naprednih numeričkih metoda, poput RDF simulacija, postalo je ključna strategija prilikom projektiranja plovila. Khazae et al. [19] istraživali su hidrodinamičke značajke glisirajućih trupova pomoću matematičkog modela temeljenog na RANS (eng. Reynolds Averaged Navier-Stokes) jednačbama te su dobivene numeričke rezultate usporedili s rezultatima dobivenim primjenom metode Savitsky. Utvrđeno je da RANS simulacije omogućuju veću točnost, iako zahtijevaju više računalnog vremena. Navedena istraživanja predstavljaju značajan napredak u razumijevanju i optimizaciji hidrodinamičkih svojstava plovila koja postižu velike brzine s naglaskom na smanjenju ukupnog otpora, poboljšanju stabiliteta i energetske učinkovitosti. Primjena naprednih numeričkih metoda, poput RDF-a, ključna je za uspješno projektiranje modernih plovila koja zadovoljavaju stroge ekološke i tehničke zahtjeve.

2. OTPOR BRODA

Otpor broda je sila kojom tekućina djeluje na brod suprotno od smjera gibanja broda. Brod prilikom plovidbe izaziva poremećaje u medijima kroz koje se kreće, odnosno u zraku i vodi. Ukupni otpor broda može se razložiti na različite komponente, što olakšava njegovo teorijsko određivanje i razumijevanje [20]. Na slici 1. prikazana je podjela ukupnog otpora.



Slika 1. Raščlana ukupnog otpora površinskog deplasmanskog broda [20]

Ukupni otpor R_T moguće je izraziti preko koeficijenta ukupnog otpora C_T koji ovisi o Froudeovom (Fn) te Reynoldsovom broju (Re):

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

gdje je:

ρ – gustoća fluida,

v – brzina broda,

S – oplakana površina.

Reynoldsov broj predstavlja omjer inercijskih i viskoznih sila, dok Froudeov broj predstavlja omjer inercijskih i gravitacijskih sila kako slijedi:

$$Re = \frac{vL}{\nu} \quad (2)$$

$$Fn = \frac{v}{\sqrt{gL}} \quad (3)$$

gdje je:

L – duljina broda,

g – ubrzanje Zemljine sile teže,

ν – kinematički koeficijent viskoznosti.

Promatrajući infinitezimalno mali dio površine uronjenog dijela trupa broda i vektor naprezanja koji djeluje na tu površinu, a koji se može izraziti kroz vektore tangencijalnog i normalnog naprezanja, moguće je izračunati ukupni otpor na sljedeći način:

$$R_T = \int \vec{\tau}_0 \cos(\tau_0, x_1) dS + \int \vec{p} \cos(p, x_1) dS = R_F + R_P \quad (4)$$

gdje je:

$\vec{\tau}_0$ – vektor tangencijalnih naprezanja,

\vec{p} – vektor hidrodinamičkog tlaka,

R_F – otpor trenja,

R_P – otpor tlaka.

Ovom podjelom, koja se temelji na razumijevanju načina na koji tekućina djeluje na trup broda kroz raspodijeljene površinske sile, ukupni otpor se sastoji od dvije komponente: otpor trenja, koji je prikazan prvim integralom na desnoj strani jednadžbe (4) i otpor tlaka, koji je predstavljen drugim integralom na desnoj strani jednadžbe (4).

Vektor ukupnog naprezanja koji predstavlja površinske sile jednak je zbroju vektora tangencijalnog i normalnog naprezanja:

$$\vec{p}_N = \vec{\tau}_0 + \vec{p} \quad (5)$$

S obzirom na to da viskoznost fluida značajno utječe na strujanje oko trupa broda, posebno u područjima graničnog sloja i hidrodinamičkog traga, ukupni otpor broda također se može podijeliti na viskozni otpor i otpor valova:

$$R_T = R_V + R_W \quad (6)$$

$$R_V = C_V(Re) \frac{1}{2} \rho S v^2 \quad (7)$$

$$R_W = C_W(Fn) \frac{1}{2} \rho S v^2 \quad (8)$$

gdje je:

R_V – viskozni otpor kao funkcija Reynoldsovog broja,

R_W – otpor valova kao funkcija Froudeovog broja.

Viskozni otpor moguće je podijeliti na viskozni otpor tlaka i otpor trenja:

$$R_V = R_F + R_{PV} \quad (9)$$

$$R_{PV} = C_{PV}(Re) \frac{1}{2} \rho S v^2 \quad (10)$$

gdje je:

R_F – otpor trenja,

R_{PV} – viskozni otpor tlaka.

Otpor trenja nastaje djelovanjem tangencijalnih naprezanja na oplakanoj površini broda, kao rezultat interakcije između tekućine i oplata broda. Viskozni otpor tlaka predstavlja komponentu otpora koju nije moguće izravno mjeriti, a određuje se integracijom normalnih naprezanja uzrokovanih viskoznošću i turbulencijom. Ovaj otpor također se naziva otpor forme.

S obzirom na to da su mjerenja pokazala kako unutar viskozne tekućine nije moguće postići tlak koji bi postojao u idealnoj tekućini bez stvaranja valova na površini, vektor hidrodinamičkog tlaka može se izraziti kao kombinacija normalnog naprezanja uzrokovanog viskoznošću i normalnog naprezanja izazvanog valovima, kako slijedi:

$$\vec{p} = \vec{p}_{PV} + \vec{p}_W \quad (11)$$

Temeljem jednadžbe (11) otpor tlaka može se izraziti kao:

$$R_p = \int \vec{p}_{PV} \cos(p, x_1) dS + \int \vec{p}_W \cos(p, x_1) dS \quad (12)$$

Izraz za ukupni otpor može se zapisati kao:

$$R_T = (C_F(Re) + C_{PV}(Re) + C_W(Fn) + C_A) \frac{1}{2} \rho S v^2 \quad (13)$$

gdje je:

C_F – koeficijent otpora trenja,

C_{PV} – koeficijent viskoznog otpora tlaka,

C_W – koeficijent otpora valova,

C_A – koeficijent dodatnog otpora.

Režim plovidbe broda ovisi o načinu ostvarenja uzgonske sile. Froudeov broj na temelju volumena istisnine kod broda u hidrostatskom režimu plovidbe manji je od 1(1,3), dok je u hidrodinamičkom odnosno gliserskom režimu plovidbe Froudeov broj na temelju volumena istisnine veći od 3, odnosno 5 kod potpuno razvijenog glisiranja. Brodovi koji plove pri Froudeovim brojevima na temelju volumena istisnine između navedenih raspona, u poludeplasmankom su režimu plovidbe, odnosno uzgon ostvaruju i hidrostatičkim i hidrodinamičkim silama. Dok deplasmanske forme uzgon ostvaruju hidrostatičkim silama, hidrodinamički uzgon postaje dominantan kod brzih brodova koji glisiraju, pri čemu se povećanjem brzine generira dodatna uzgonska sila koja podiže trup iz vode, smanjujući uronjenu površinu i ukupan otpor. U tom položaju brod ima manji otpor pa uz istu pogonsku snagu može postići veće brzine od broda iste veličine, a normalnog (deplasmanskog) oblika. Dno glisera uzdužno je male zakrivljenosti, a poprečno je u obliku slova V, s ostrim prijelazom dna u bokove. Konstrukcijski elementi, poput zrcala na krmu, od iznimne su važnosti jer utječu na stabilnost, upravljivost i performanse broda pri visokim brzinama, pri čemu pravilno oblikovano zrcalo poboljšava prijelaz iz deplasmanskog u glisirajući režim.

Ukupni otpor brzih brodova, R_T može se raščlaniti na viskozni otpor (R_V), otpor valova (R_W), otpor vodene prašine (R_S) i otpor zraka i vjetra (R_{AA}) [22]:

$$R_T = R_V + R_W + R_S + R_{AA} \quad (14)$$

2.1. Trim broda

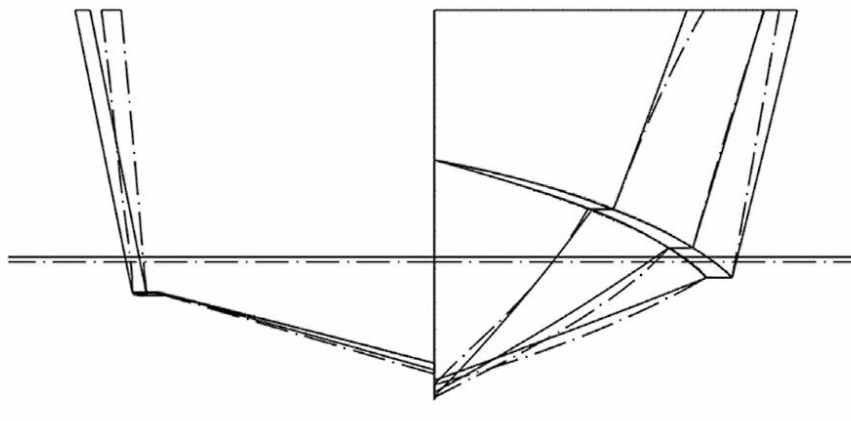
Trim broda je razlika gazova na krmi i pramcu, to jest uzdužni nagib broda prema krmi ili pramcu oko poprečne osi koja prolazi kroz težište plovne vodne linije [21]. Ukoliko je gaz na krmi veći od gaza na pramcu, brod je u zatezi, a ako je gaz na pramcu veći nego na krmi, brod je u pretezi. Kada je brod na ravnoj kobilici razlika gaza na pramcu i na krmi jednaka je nuli.

Statistički trim je definiran na temelju raspodjele mase i opterećenja broda. Dinamički kut trima uzima u obzir dodatne čimbenike koji se javljaju tijekom plovidbe, poput brzine broda, utjecaja valova, vjetra i raspodjele opterećenja. Na primjer, veća brzina broda može izazvati promjene u kutu trima zbog izraženijih hidrodinamičkih sila. Također, gibanje broda na valovima ili pod utjecajem vjetra može uzrokovati promjene u kutu trima.

Dinamički kut trima također je važan jer utječe na radne značajke broda, stabilnost i udobnost plovidbe. Preveliki kut trima može smanjiti učinkovitost plovidbe, povećati potrošnju goriva ili izazvati nelagodu za posadu i putnike. Stoga je važno optimizirati trim broda, kako statički, tako i dinamički, kako bi se postigla maksimalna sigurnost, udobnost i učinkovitost tijekom plovidbe.

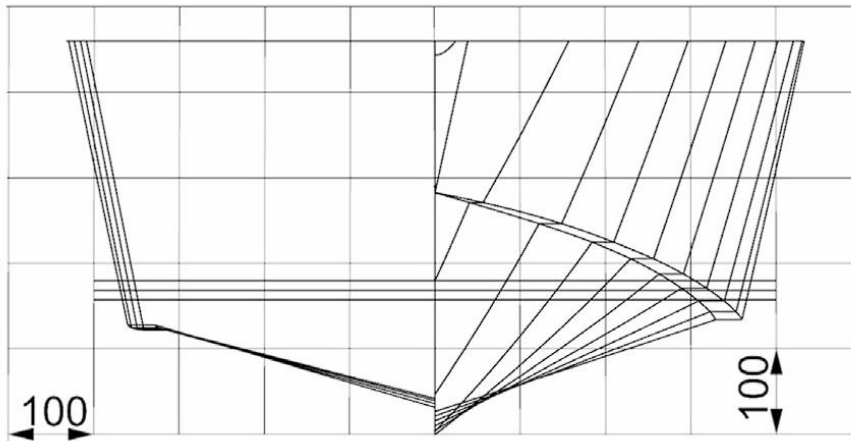
3. SISTEMATSKA SERIJA MODELA BRZIH BRODOVA „NAPLES SYSTEMATIC SERIES“

De Luca i Pensa [23] su proveli istraživanje hidrodinamičkih značajki brzih plovila koje su uvelike uvjetovane dvjema suprotstavljenim potrebama: smanjenjem potrošnje goriva (iz ekonomskih i ekoloških razloga) te poboljšanjem udobnosti na brodu, koja se pri visokim brzinama plovidbe obično narušava. Kako bi se postigla ravnoteža između tih zahtjeva, moguće je povećati poprečne kutove nagiba dna broda (eng. deadrise angle) od krme prema pramcu. To se može postići na dva načina: ograničavanjem kuta nagiba dna na pramčanom dijelu broda ili ravnomjernom promjenom kuta nagiba dna duž cijele duljine trupa. To omogućuje oblikovanje pramčanog dijela dna s većim kutovima nagiba dna u odnosu na srednju vrijednost. Ova opcija zahtijeva posebnu pažnju kako bi se izbjegla neodgovarajuća areala rebara. Često je najbolja opcija za uravnoteženje areale rebara podizanje linije kobilice prema krmi. Kombinacija ovih rješenja povećava udobnost smanjujući vertikalna ubrzanja, ali istovremeno uzrokuje povećanje dinamičkog kuta trima, što dovodi do povećanja otpora uzrokovanog uzgonom koji je glavna komponenta otpora tlaka kod brzih glisirajućih plovila. Pokazalo se da su interceptori vrlo učinkoviti za prevladavanje ovog nedostatka, jer djeluju kao korektori trima i kao visokoučinkoviti uređaji za povećanje uzgona. Obje ove funkcije rezultiraju smanjenjem otpora induciranog uzgonom, osobito u rasponu $Fn=0,5\div 0,8$ ($Fnv=1\div 3$), gdje su kutovi trima visoki. De Luca i Pensa [23] su razvili novu sistemsku seriju modela brzih brodova „Naples Systematic Series“. Model C1 nastao je na temelju već postojećeg modela broda C954 s povoljnim hidrodinamičkim značajkama sa i bez interceptora. Model C954, projektiran 1995. godine često je korišten zbog svojih povoljnih hidrodinamičkih značajki na mirnoj vodi i valovima. Na Slici 2. dana je usporedba modela C1 i C954.

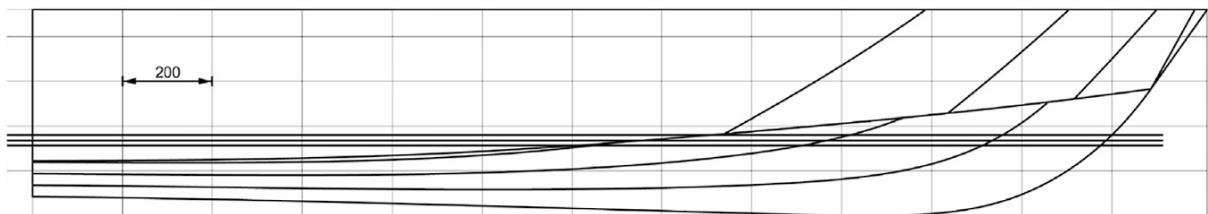


Slika 2. Usporedba modela C1 (puna linija) i C954 (isprekidana linija)

Sistematska serija modela brzih brodova „Naples Systematic Series“ sastoji se od pet modela. Četiri modela dobivena su modifikacijom C1 modela broda na način da su varirani širina i gaz, što je rezultiralo povećanjem omjera L/B i koeficijenta vitkosti dok su koeficijenti forme poput koeficijenta punoće i prizmatičkog koeficijenta ostali isti. Svih pet modela ispitano je u bazenu za modelska ispitivanja sa i bez interceptora. Na Slikama 2. i 3. prikazani su poprečni i uzdužni presjeci modela C1.



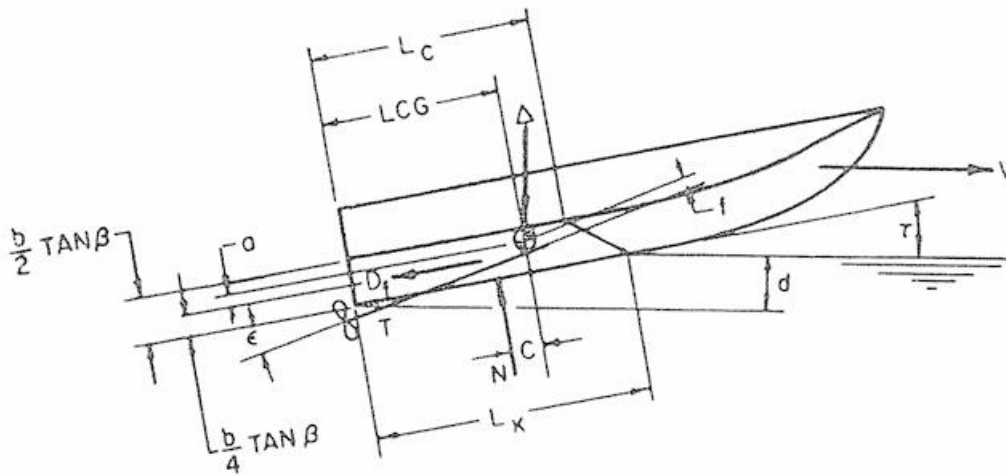
Slika 3. Poprečni presjek modela C1



Slika 4. Uzdužni presjek modela C1

4. METODA SAVITSKY

Daniel Savitsky istraživao je hidrodinamičke značajke prizmatičnih površina brzih brodova te predložio empirijske jednadžbe koje omogućuju između ostalog određivanje ukupnog otpora, uzgon i oplakanu površinu kao funkciju brzine, kuta trima, kuta nagiba dna i opterećenja. Na temelju rezultata provedenih istraživanja Savitsky je razvio jednostavnu proceduru za predviđanje zahtijevane snage brzih brodova [25]. Točnost i primjenjivost metode Savitsky istražena na temelju dostupnih eksperimentalnih rezultata za sistematsku seriju modela brzih brodova „Naples Systematic Series“. Grafički prikaz ulaznih parametara metode Savitsky dan je na Slici 5. Važno je napomenuti kako su mjerne jedinice ulaznih parametara iz SI sustava preračunate u mjerne jedinice potrebne za primjenu metode Savitsky.



Slika 5. Grafički prikaz ulaznih parametara

Za izračun dinamičkog kuta trima i ukupnog otpora potrebno je odrediti srednju vrijednost brzine glisirajuće površine, Reynoldsov broj, koeficijent otpora trenja i koeficijent brzine kako slijedi:

$$V_m = \frac{V \cdot (1 - (0.012 \cdot \tau^{1.1} - 0.0065 \cdot \beta \cdot (0.012 \cdot \lambda^{0.5} \cdot 51.1)))}{\lambda \cdot \cos(\tau)} \quad (15)$$

$$Re = \frac{V_m \cdot \lambda \cdot b}{\nu} \quad (16)$$

$$C_F = \frac{0.075}{(\log(Re) - 2)^2} \quad (17)$$

$$C_V = \frac{V}{\sqrt{gb}} \quad (18)$$

gdje je:

V_m – srednja brzina glisirajuće površine,

V – horizontalna komponenta brzine glisirajuće površine,

C_v – koeficijent brzine.

Koeficijenti istisnine $C_{L\beta}$ i uzgona C_{L0} određuju se iterativnim postupkom kako slijedi:

$$C_{L\beta} = \frac{\Delta}{0.5V^2b^2\rho} \quad (19)$$

$$C_{L\beta} = C_{L0} - 0.0065 \cdot \beta \cdot C_{L0}^{0.6} \quad (20)$$

$$C_{L0} = \frac{\tau^{1.1} \cdot (0.012 \cdot \lambda^{0.5} + 0.0055 \cdot \lambda^{2.5})}{C_v^2} \quad (21)$$

Nadalje, potrebno je odrediti udaljenosti za izračun momenta i ukupnog otpora:

$$a = VCG - \frac{b}{4} \cdot \tan(\beta) \quad (22)$$

$$C_P = 0.75 - \frac{1}{\frac{5.21 \cdot C_v^2}{\lambda^2 + 2.39}} \quad (23)$$

$$c = LCG - C_P \cdot \lambda \cdot b \quad (24)$$

gdje je:

a – udaljenost između težišta mase i vektora otpora trenja,

C_P – udaljenost središta djelovanja tlaka od krmenog zrcala,

c – udaljenost između težišta mase i normalne komponente otpora.

Otpor trenja, ukupni otpor i moment određuju se pomoću slijedećih izraza:

$$D_f = \frac{\rho \cdot V_m^2 \cdot b^2 \cdot \lambda \cdot (C_f + \Delta C_f)}{2 \cos(\beta)} \quad (25)$$

$$D = \frac{\Delta \cdot \tan(\tau) + D_f}{\cos(\tau)} \quad (26)$$

$$M_{tot} = \Delta \cdot \left(\frac{c}{\cos(\tau)} \cdot (1 - \sin(\tau) \cdot \sin(\tau + \varepsilon) - f \cdot \sin(\tau)) + D_f \cdot (a - f) \right) = 0 \quad (27)$$

gdje je:

D_f – otpor trenja,

D – ukupni otpor,

M_{tot} – ukupni moment.

Relativne devijacije ukupnog otpora i kuta trima računaju se kako slijedi:

$$RD (R_t) = \frac{R_{t,Sav} - R_{t,eksp}}{R_{t,eksp}} \cdot 100 \quad (28)$$

$$RD (\tau) = \frac{\tau_{Sav} - \tau_{eksp}}{\tau_{eksp}} \cdot 100 \quad (29)$$

5. METODA RADOJČIĆ

Dejan Radojčić je na temelju rezultata eksperimentalnih ispitivanja formi sistematskih serija 62, 65-A i 65-B predložio matematičke izraze za predviđanje ukupnog otpora, kuta trima i oplakane površine [26] koji se lako mogu programirati i primijeniti u okviru preliminarne faze projektiranja broda. Kod brzih brodova podrazumijeva se da će većinu vremena ploviti najvećom brzinom, zato se rasponi velikih brzina trebaju posebno razmatrati.

Kako bi metoda Radojčić bila primjenjiva, potrebno je zadovoljiti sljedeća ograničenja metode:

- a) $4.25 < \frac{A_p}{\frac{L_p}{\nabla^{\frac{1}{3}}}} < 9.50$
- b) $30.0 < \frac{100 * LCG}{L_p} < 44.3$
- c) $2.36 < \frac{L_p}{B_{pa}} < 6.72$
- d) $13.0^\circ < \beta < 37.4^\circ$

gdje je:

LCG – uzdužni položaj težišta mase,

β – poprečni kut nagiba dna broda na 50% duljine.

Sljedeći ulazni parametri su također potrebni za proračun:

$$B_{pa} = \frac{A_p}{L_p} \quad (30)$$

$$\nabla = \frac{\Delta}{\rho} \quad (31)$$

gdje je:

B_{pa} – srednja širina,

∇ - volumen istisnine,

A_p – projicirana oplakana površina,

L_p – projicirana duljina.

Nakon provjere ograničenja metode, u prvom koraku potrebno je izračunati neovisne koeficijente x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 koristeći sljedeće izraze:

$$x_1 = \frac{\frac{A_p}{2} - 6.875}{2.625} \quad (32)$$

$$x_2 = \frac{\frac{100 \cdot LCG}{L_p} - 37.15}{7.15} \quad (33)$$

$$x_3 = \frac{\frac{L_p}{Bpa} - 4.54}{2.18} \quad (34)$$

$$x_4 = \frac{\beta - 25.2}{12.2} \quad (35)$$

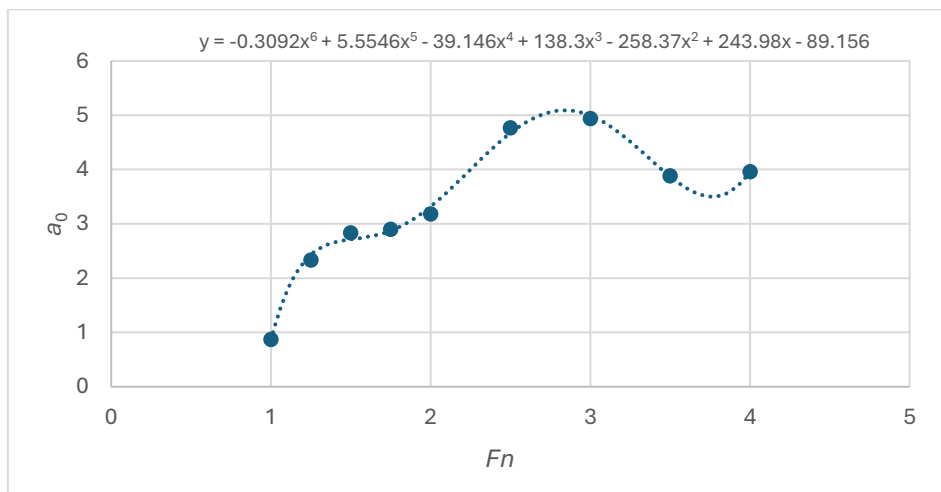
$$x'_5 = \frac{\tau - 5}{5} \quad (36)$$

Kako bi se mogli izračunati trim (τ), omjer ukupnog otpora i mase istisnine (R/Δ) te omjer površine i volumena (S/∇^2) potrebno je odrediti regresijske koeficijente kojima se opisuju navedene fizikalne veličine.

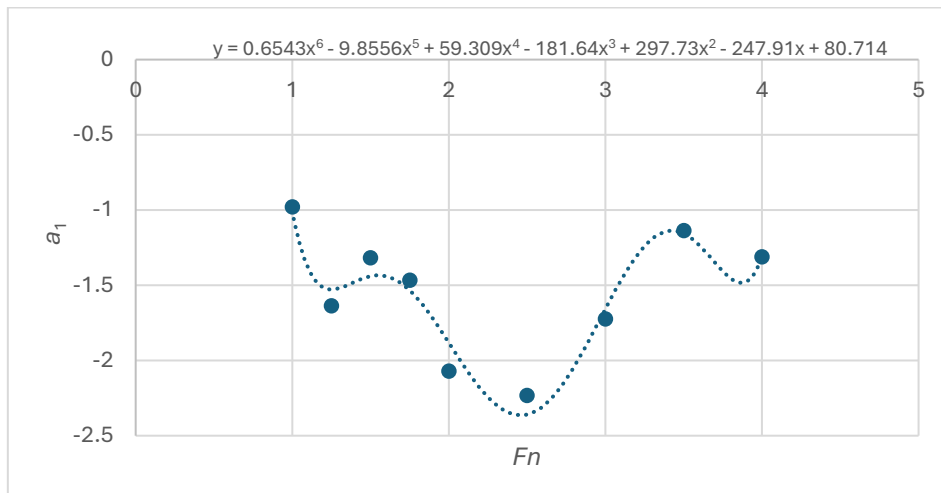
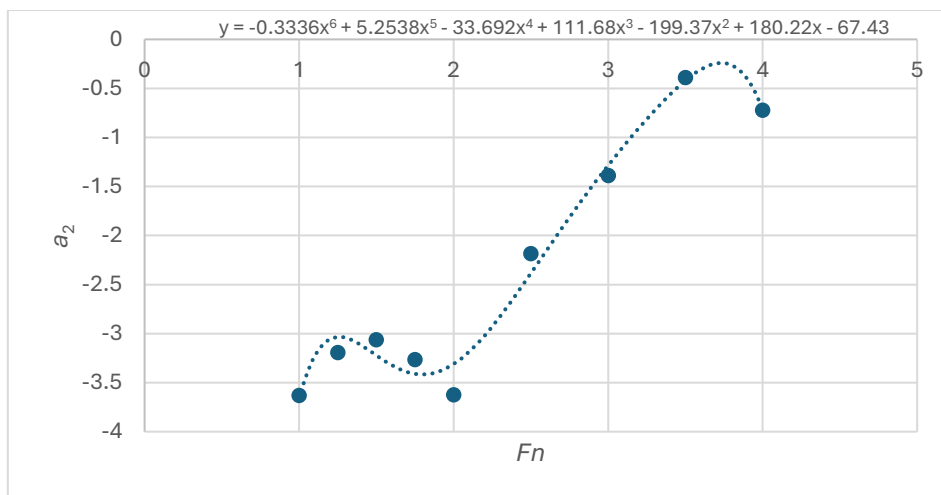
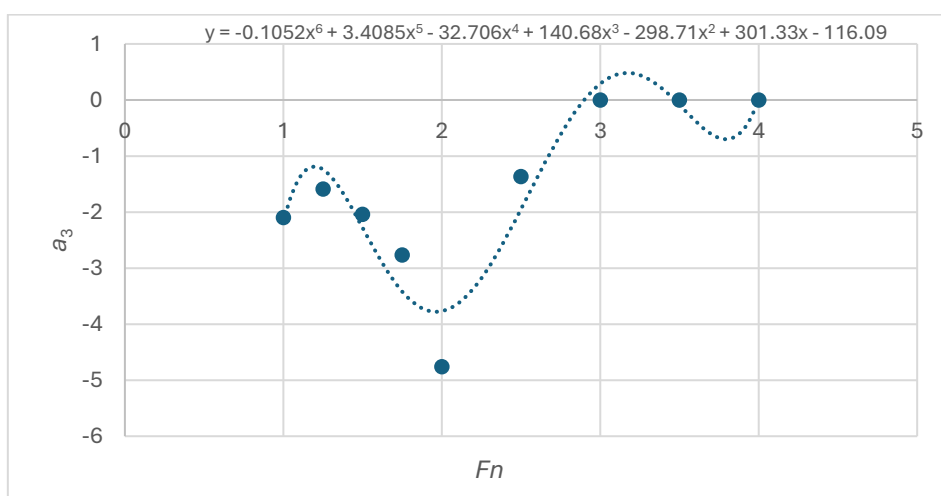
Dinamički kut trima određuje se na temelju regresijskih i neovisnih koeficijenata kako slijedi:

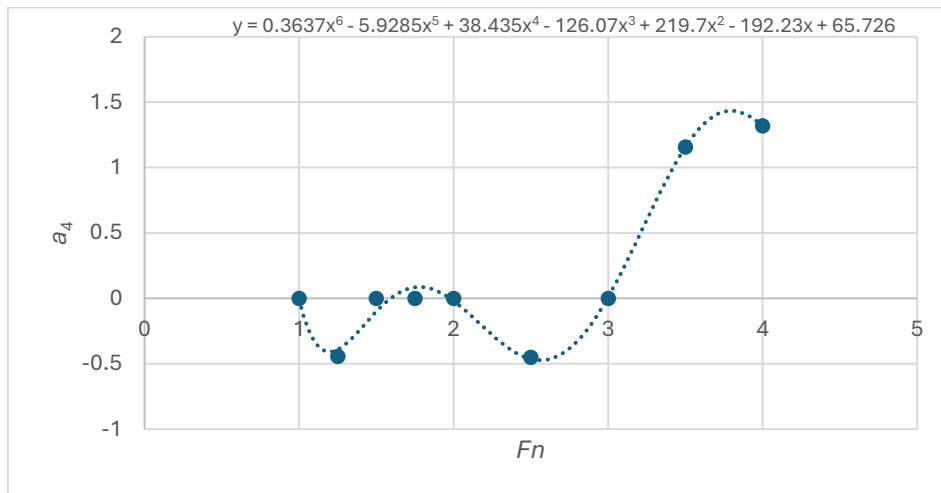
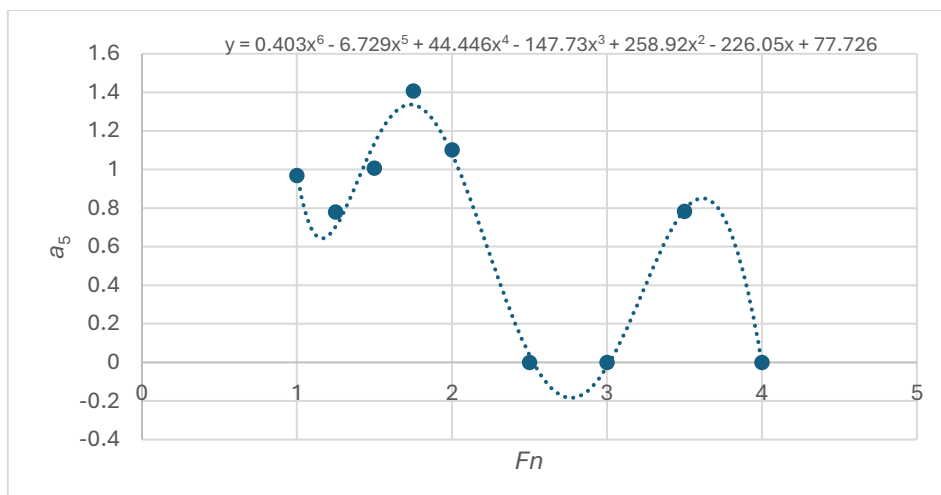
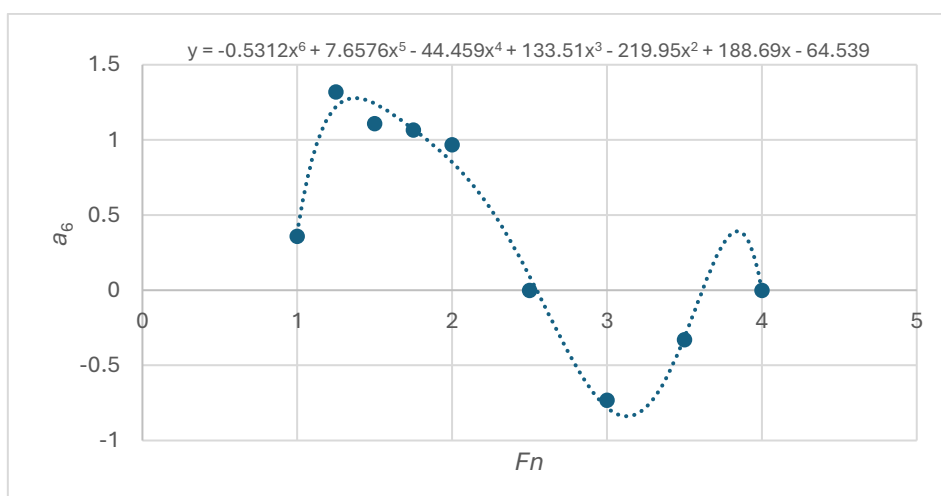
$$\tau = a_0 \cdot x_0 + a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + \dots + a_{25} \cdot x_{25} + a_{26} \cdot x_{26} \quad (37)$$

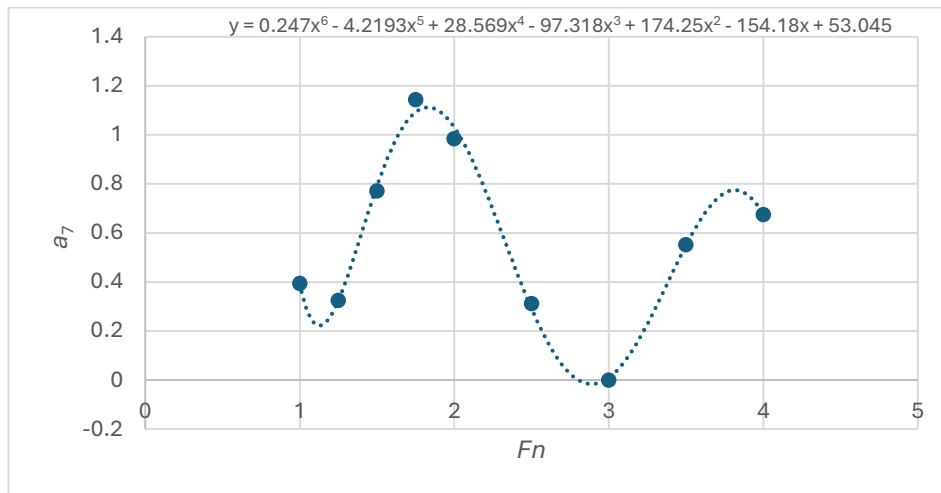
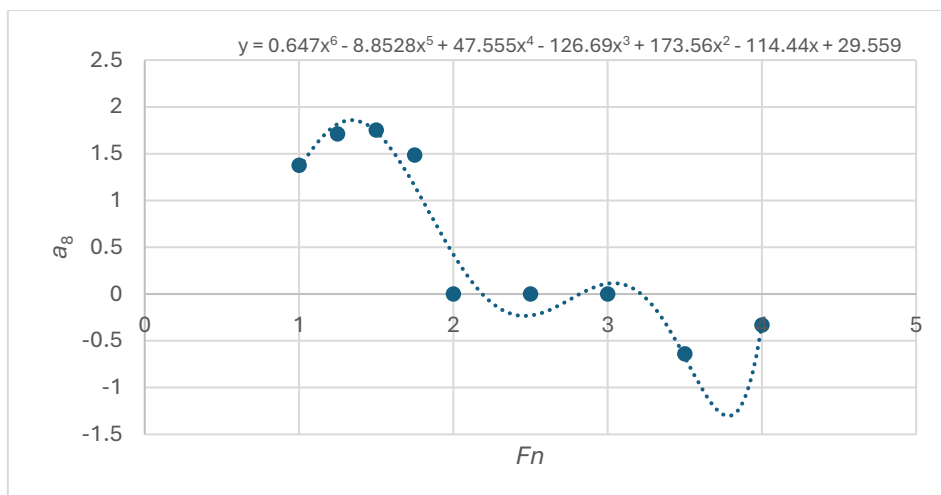
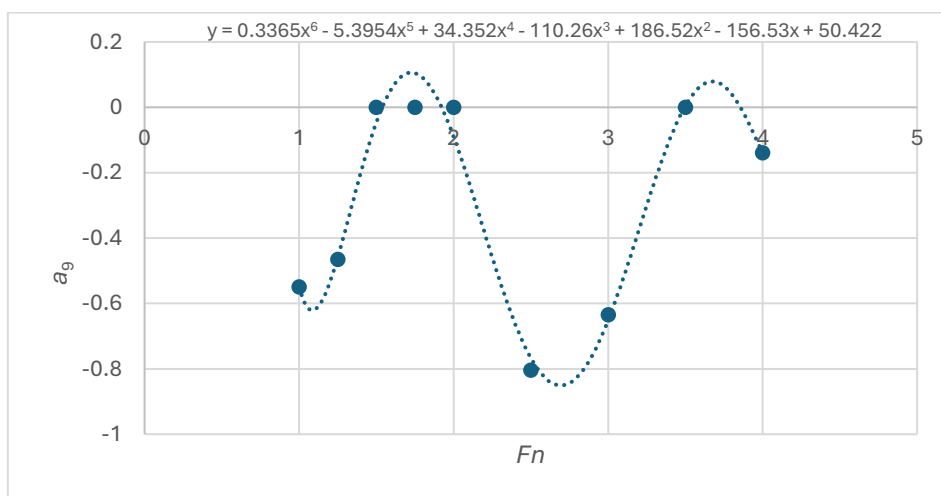
Regresijski koeficijenti navedeni u jednadžbi (37) mogu se iščitati iz grafova prikazanih na Slikama 6.-32.

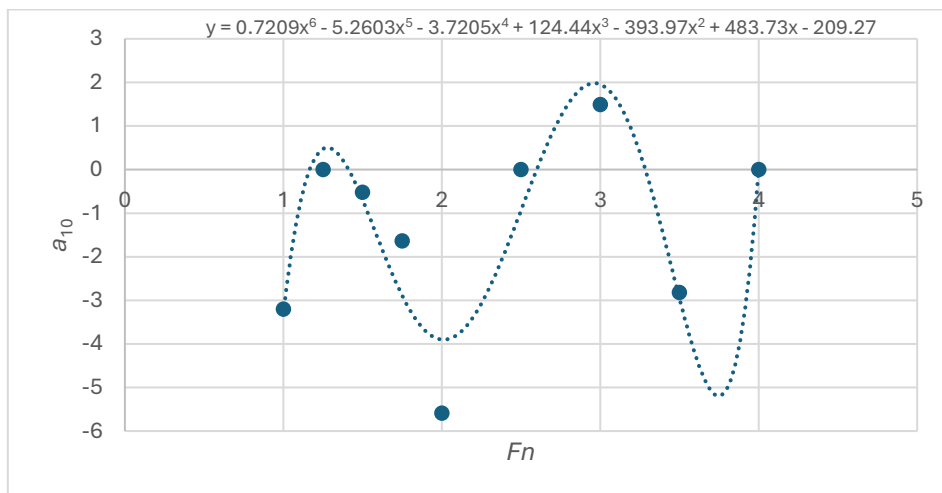
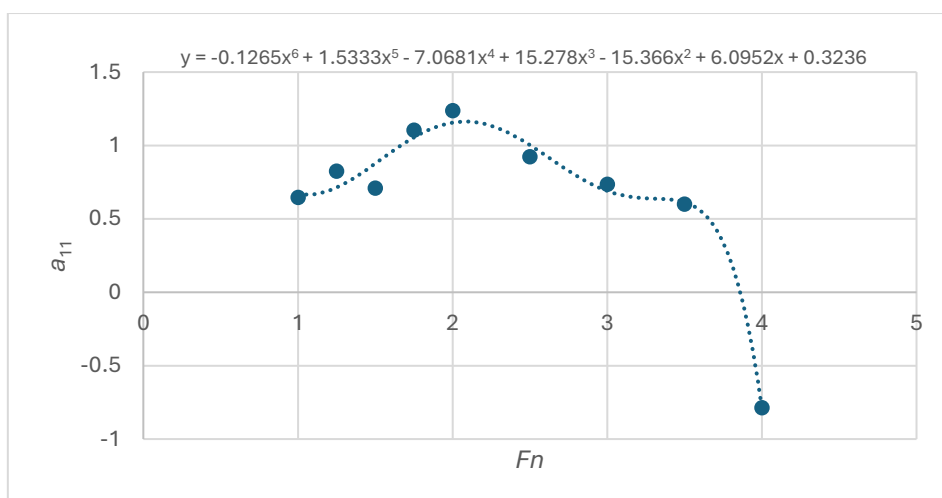
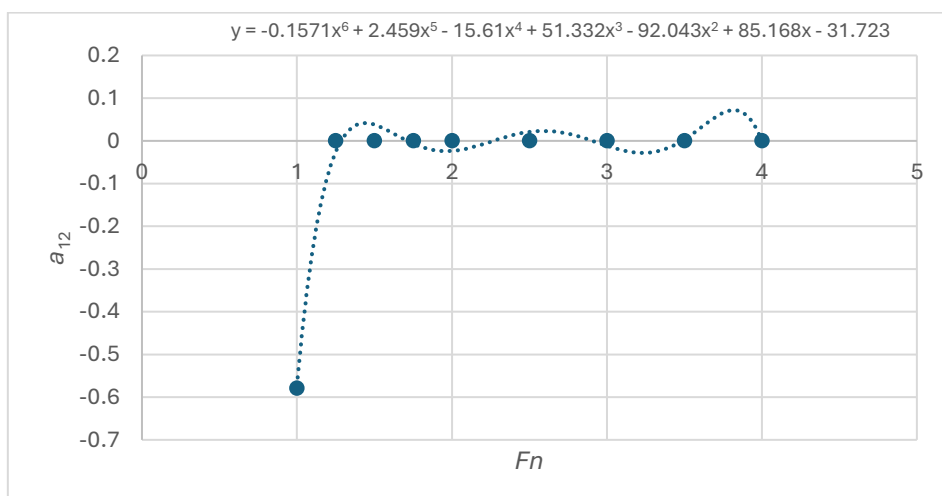


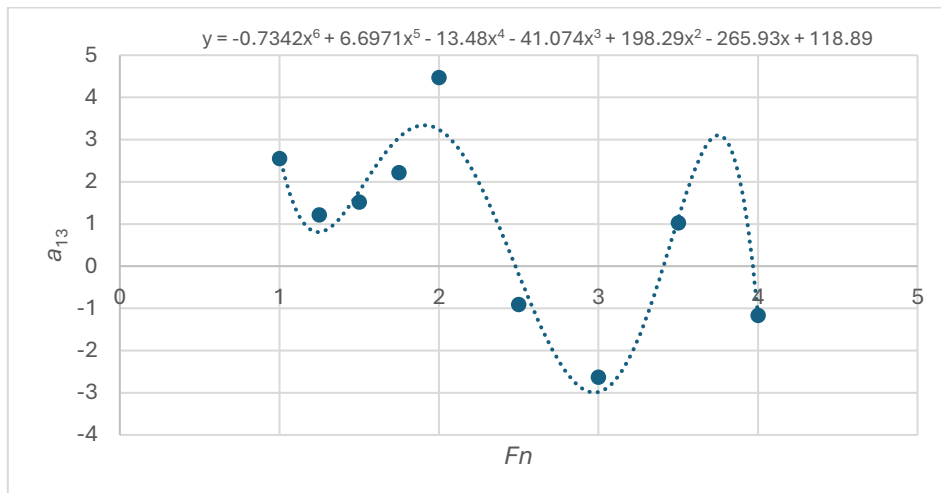
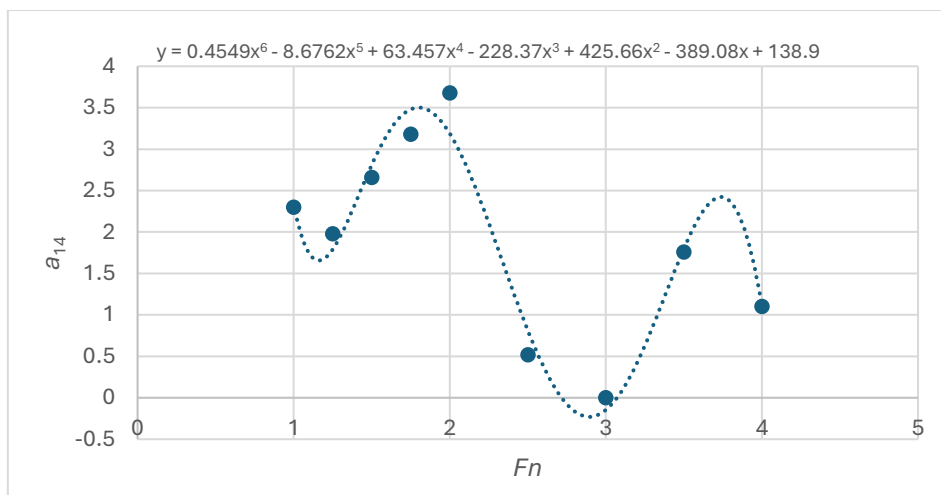
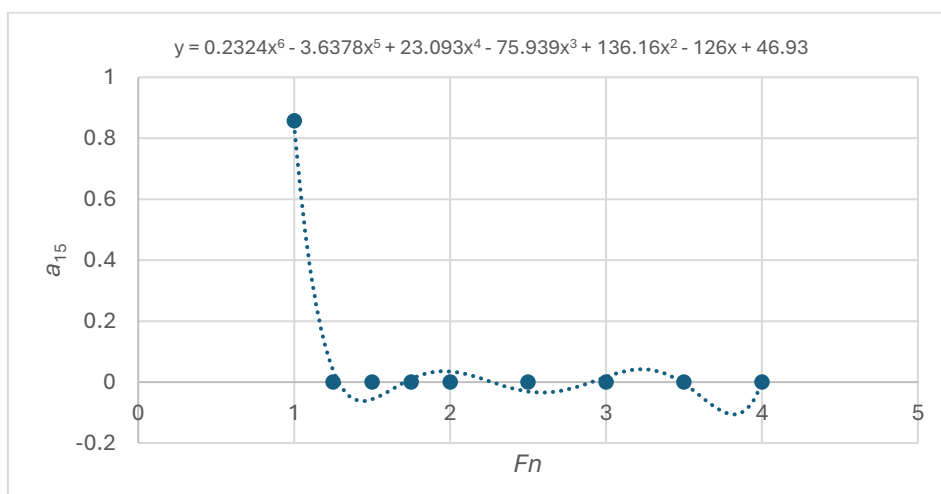
Slika 6. Ovisnost regresijskog koeficijenta a_0 o Froudeovom broju

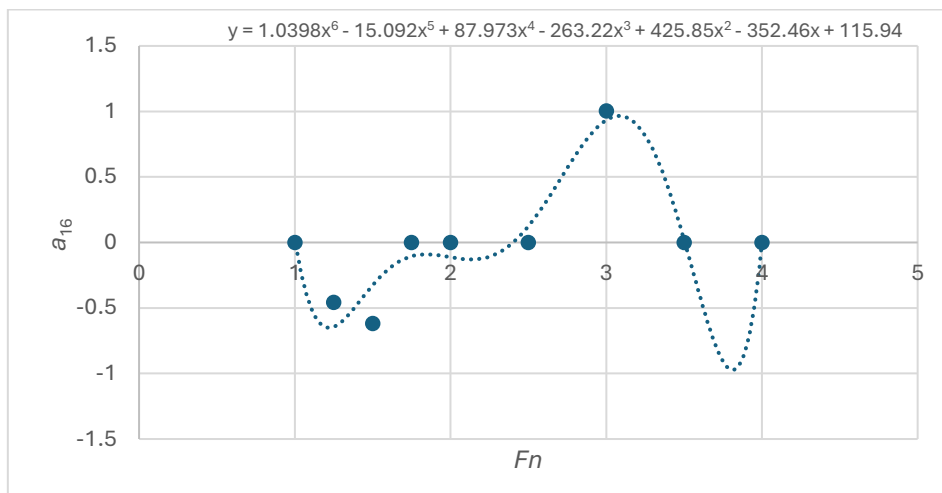
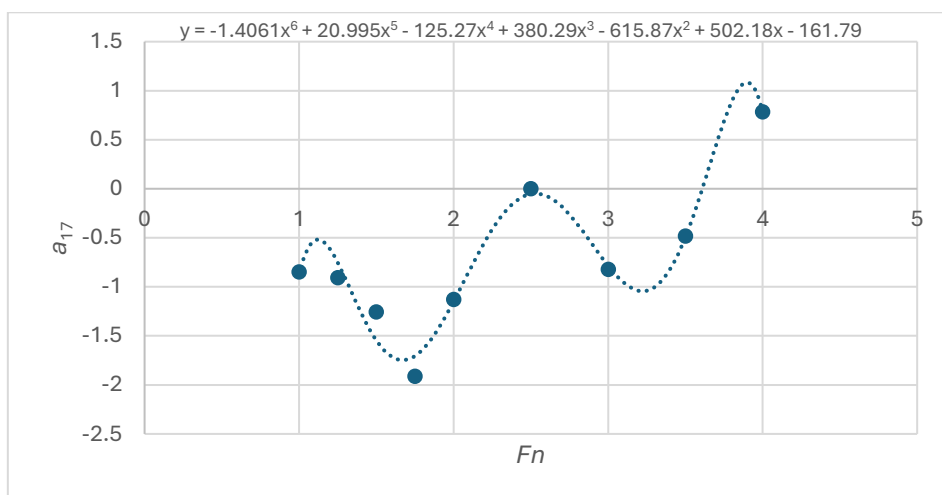
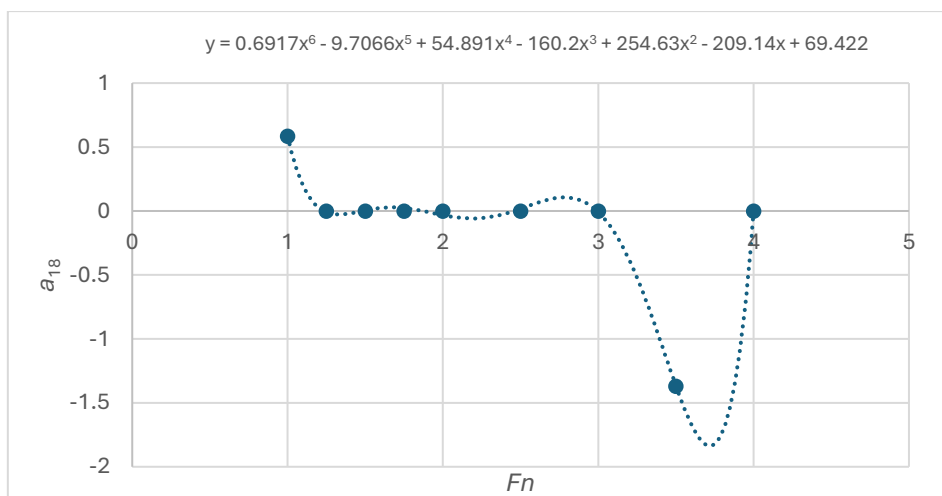
Slika 7. Ovisnost regresijskog koeficijenta a_1 o Froudeovom brojuSlika 8. Ovisnost regresijskog koeficijenta a_2 o Froudeovom brojuSlika 9. Ovisnost regresijskog koeficijenta a_3 o Froudeovom broju

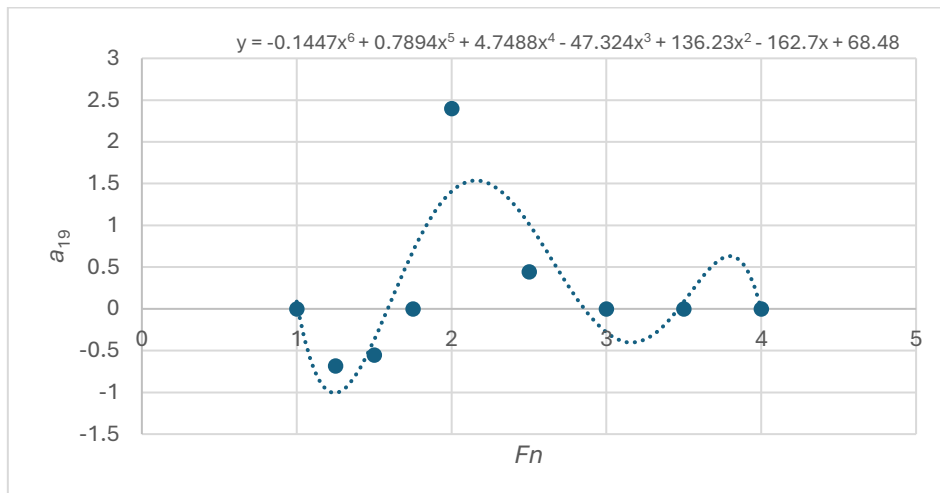
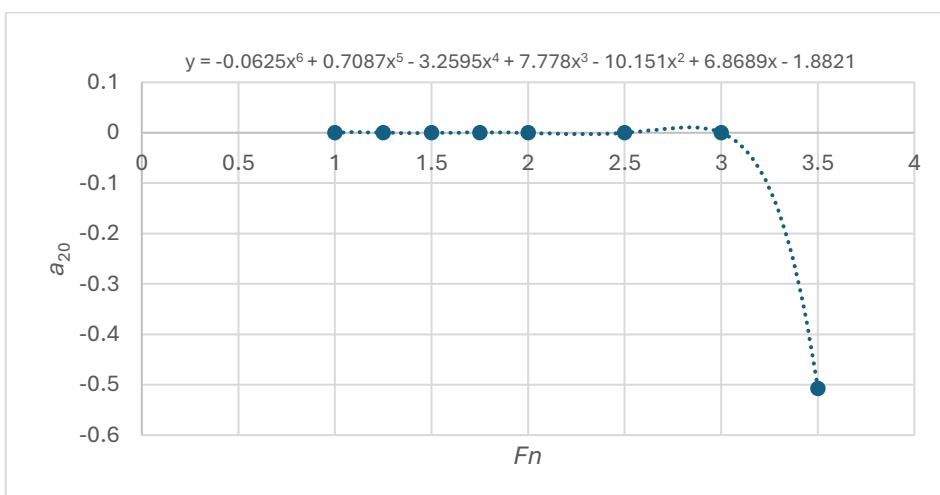
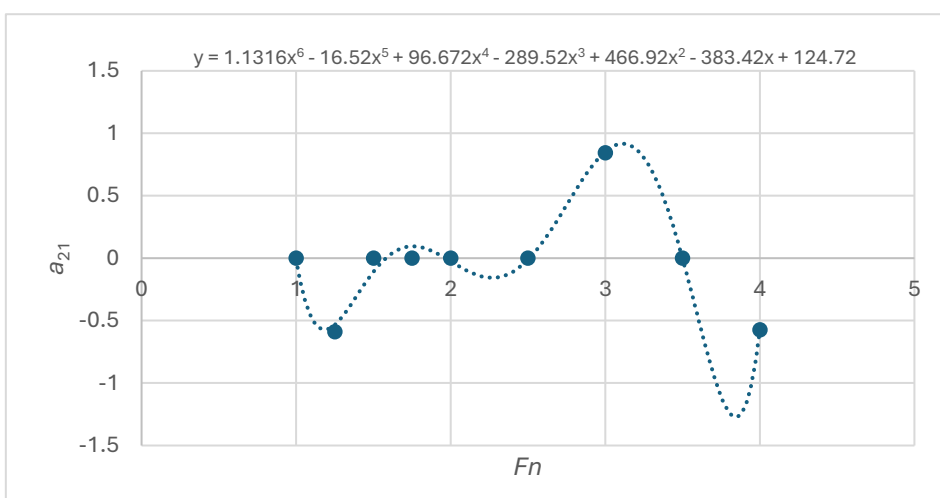
Slika 10. Ovisnost regresijskog koeficijenta a_4 o Froudeovom brojuSlika 11. Ovisnost regresijskog koeficijenta a_5 o Froudeovom brojuSlika 12. Ovisnost regresijskog koeficijenta a_6 o Froudeovom broju

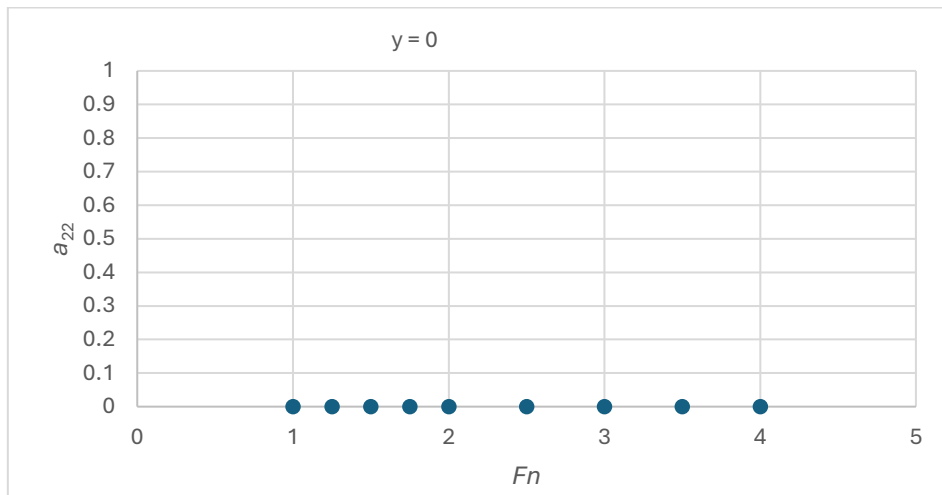
Slika 13. Ovisnost regresijskog koeficijenta a_7 o Froudeovom brojuSlika 14. Ovisnost regresijskog koeficijenta a_8 o Froudeovom brojuSlika 15. Ovisnost regresijskog koeficijenta a_9 o Froudeovom broju

Slika 16. Ovisnost regresijskog koeficijenta a_{10} o Froudeovom brojuSlika 17. Ovisnost regresijskog koeficijenta a_{11} o Froudeovom brojuSlika 18. Ovisnost regresijskog koeficijenta a_{12} o Froudeovom broju

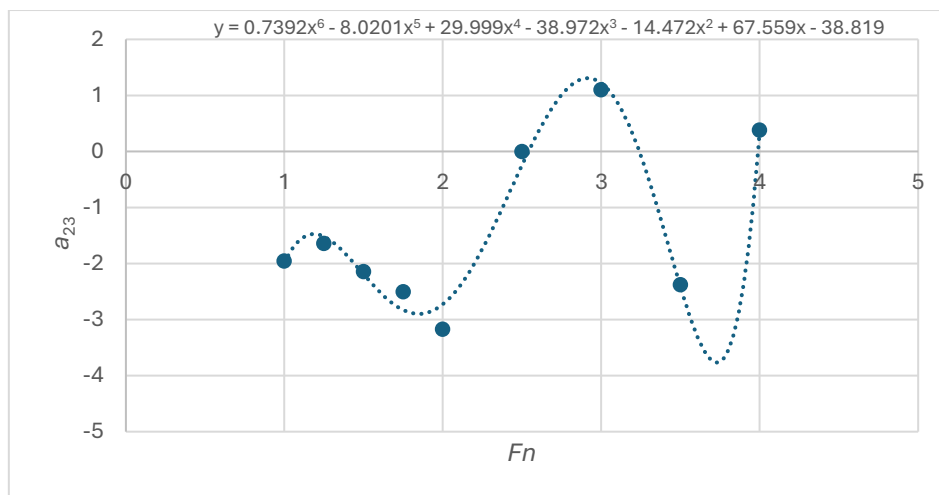
Slika 19. Ovisnost regresijskog koeficijenta a_{13} o Froudeovom brojuSlika 20. Ovisnost regresijskog koeficijenta a_{14} o Froudeovom brojuSlika 21. Ovisnost regresijskog koeficijenta a_{15} o Froudeovom broju

Slika 22. Ovisnost regresijskog koeficijenta a_{16} o Froudeovom brojuSlika 23. Ovisnost regresijskog koeficijenta a_{17} o Froudeovom brojuSlika 24. Ovisnost regresijskog koeficijenta a_{18} o Froudeovom broju

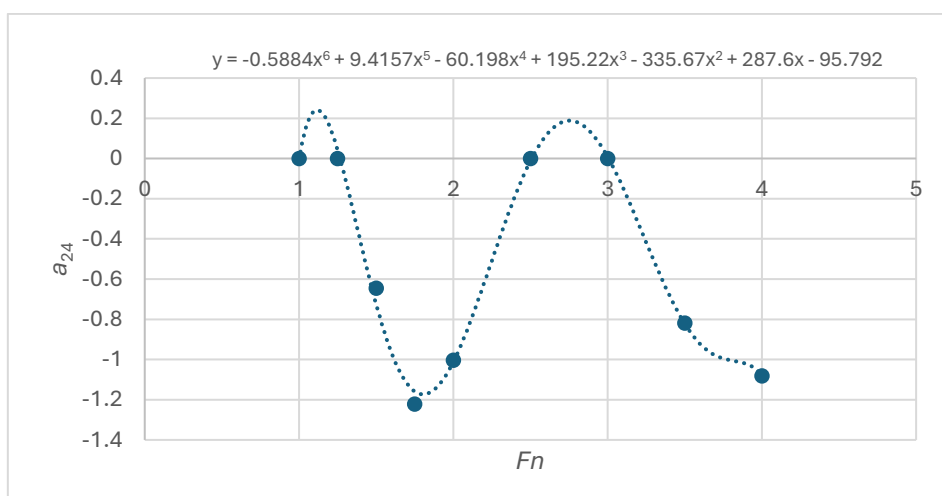
Slika 25. Ovisnost regresijskog koeficijenta a_{19} o Froudeovom brojuSlika 26. Ovisnost regresijskog koeficijenta a_{20} o Froudeovom brojuSlika 27. Ovisnost regresijskog koeficijenta a_{21} o Froudeovom broju



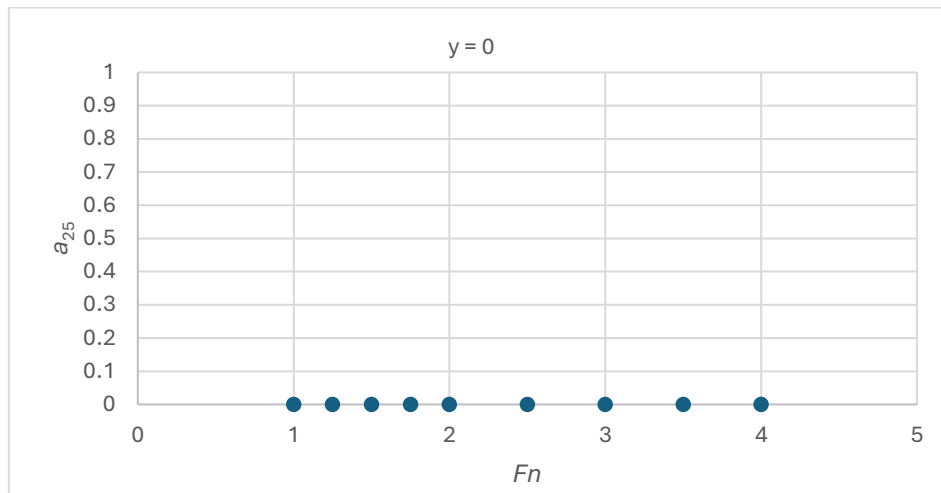
Slika 28. Ovisnost regresijskog koeficijenta a_{22} o Froudeovom broju



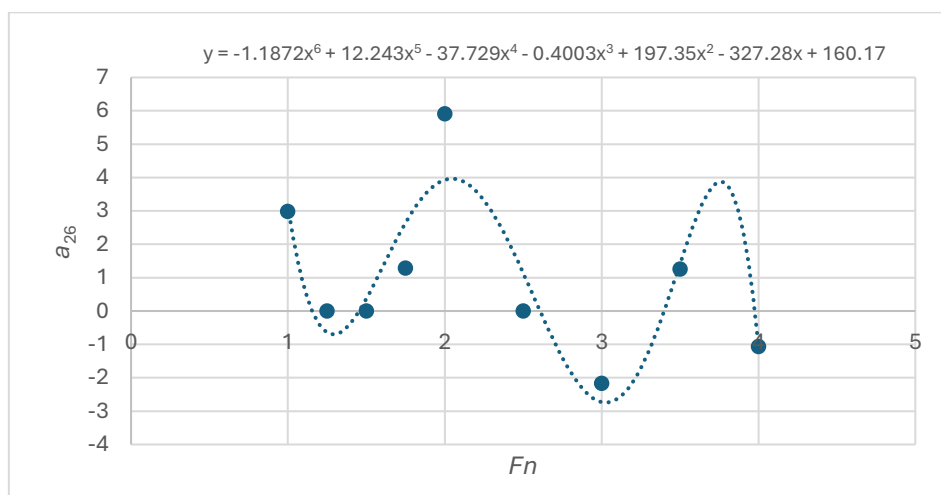
Slika 29. Ovisnost regresijskog koeficijenta a_{23} o Froudeovom broju



Slika 30. Ovisnost regresijskog koeficijenta a_{24} o Froudeovom broju



Slika 31. Ovisnost regresijskog koeficijenta a_{25} o Froudeovom broju



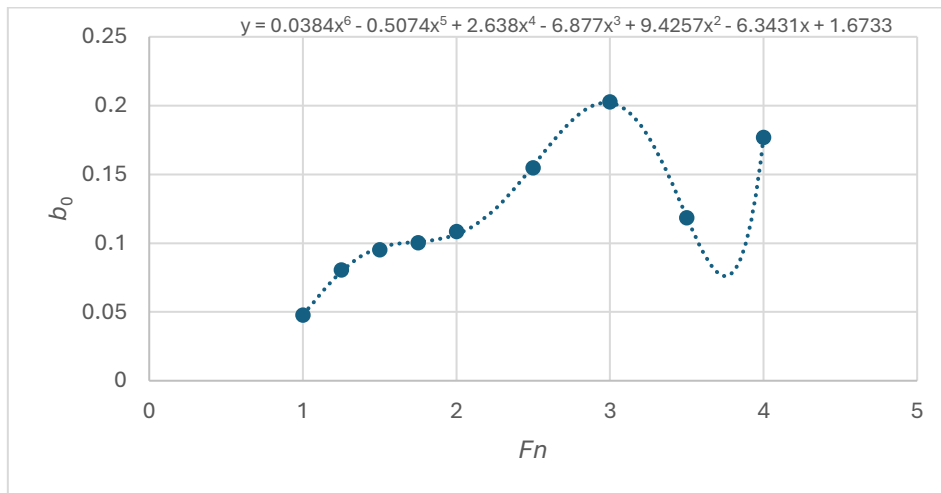
Slika 32. Ovisnost regresijskog koeficijenta a_{26} o Froudeovom broju

Omjer ukupnog otpora i mase istisnine, odnosno specifična vrijednost ukupnog otpora određuje se na sljedeći način:

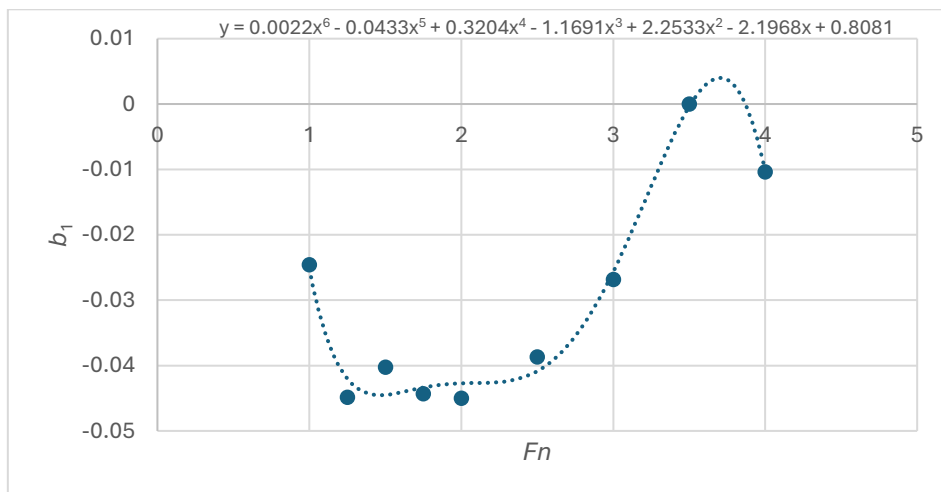
$$\frac{R}{\Delta} = b_0 \cdot x_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + \dots + b_{25} \cdot x_{25} + b_{26} \cdot x_{26} \quad (38)$$

Kako bi se izračunao ukupni otpor potrebno je vrijednost dobivenu primjenom jednadžbe (38) pomnožiti s masom broda u tonama te ubrzanjem Zemljine sile teže, g .

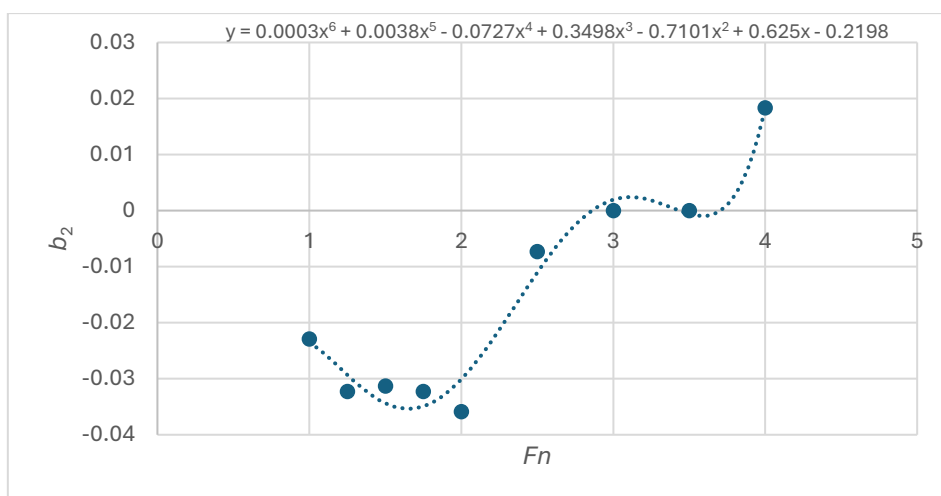
Regresijski koeficijenti navedeni u jednadžbi (38) mogu se iščitati iz grafova prikazanih na Slikama 33.-59.



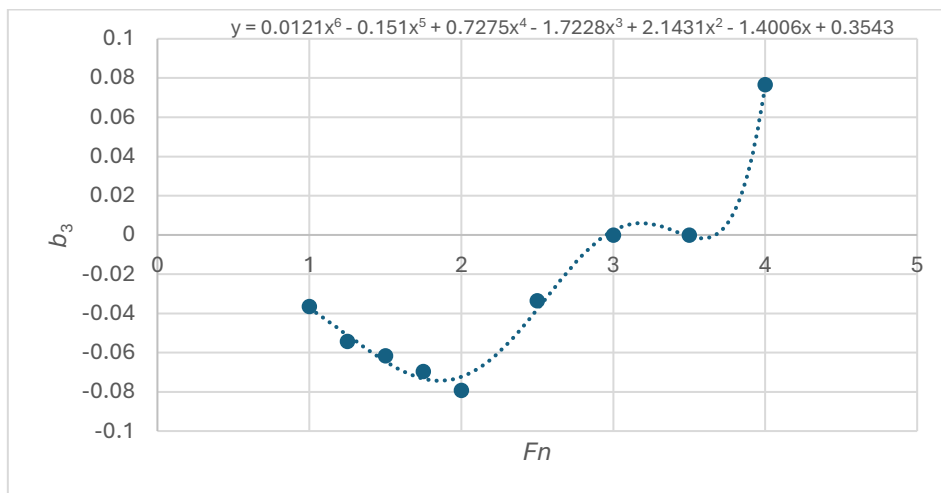
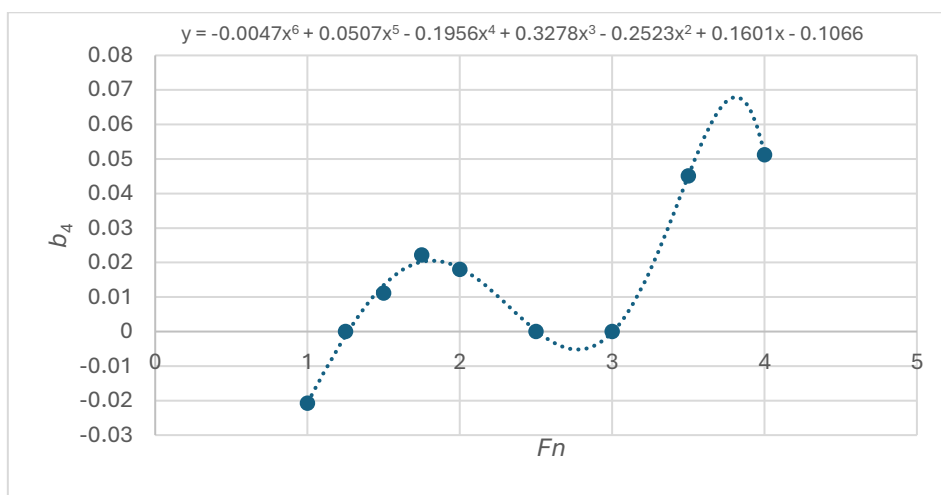
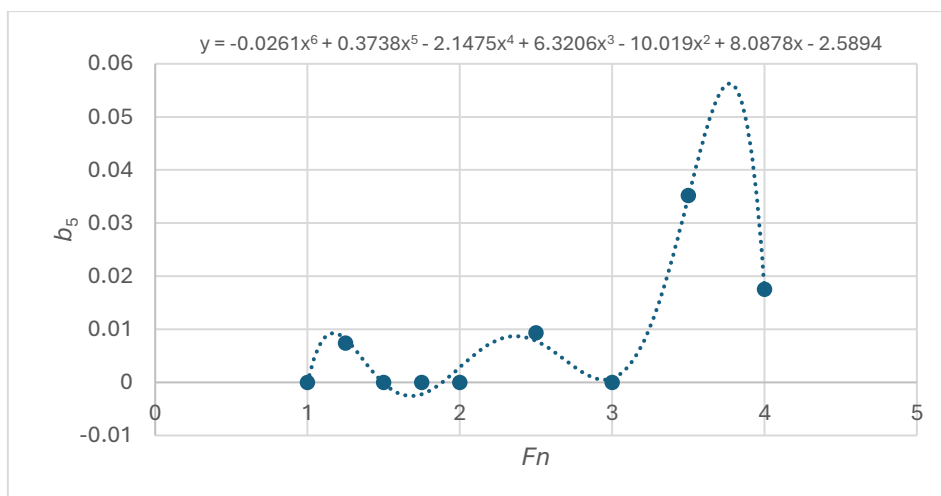
Slika 33. Ovisnost regresijskog koeficijenta b_0 o Froudeovom broju

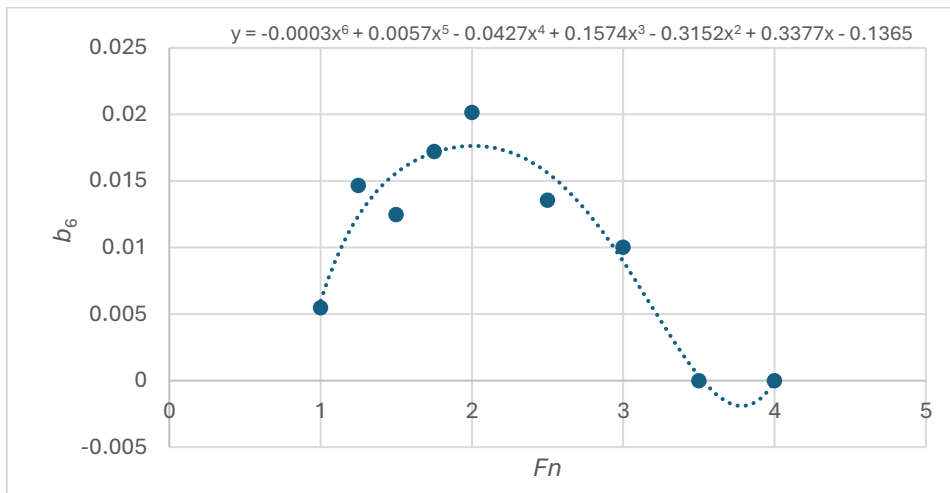
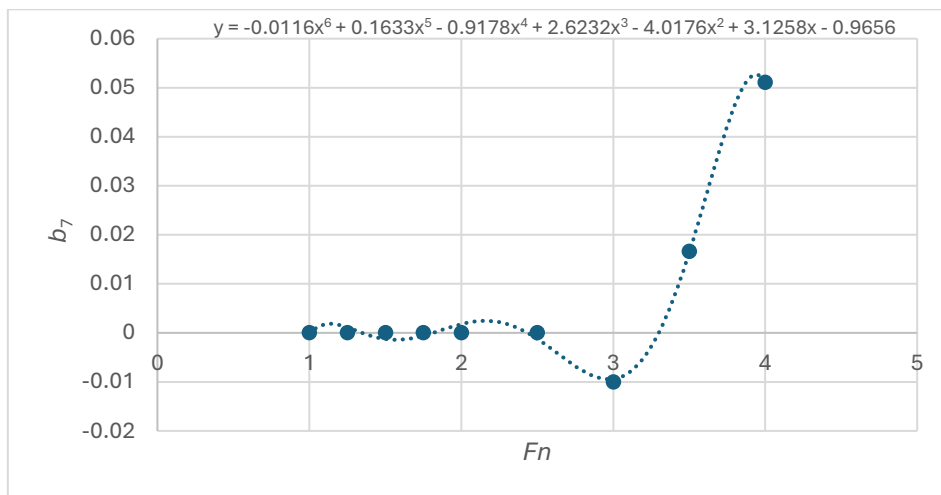
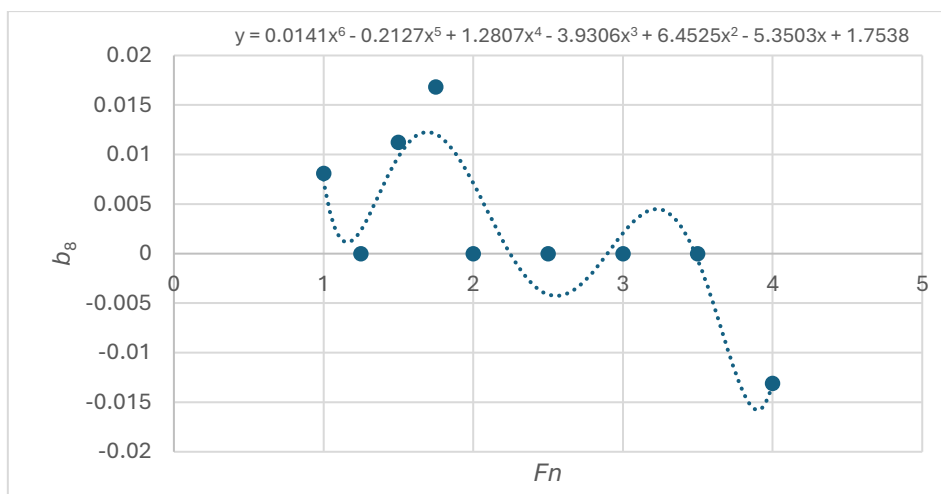


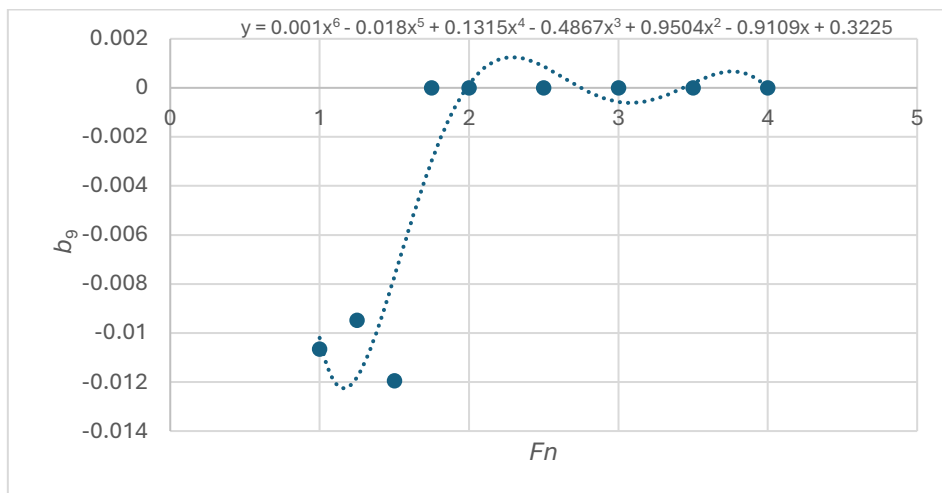
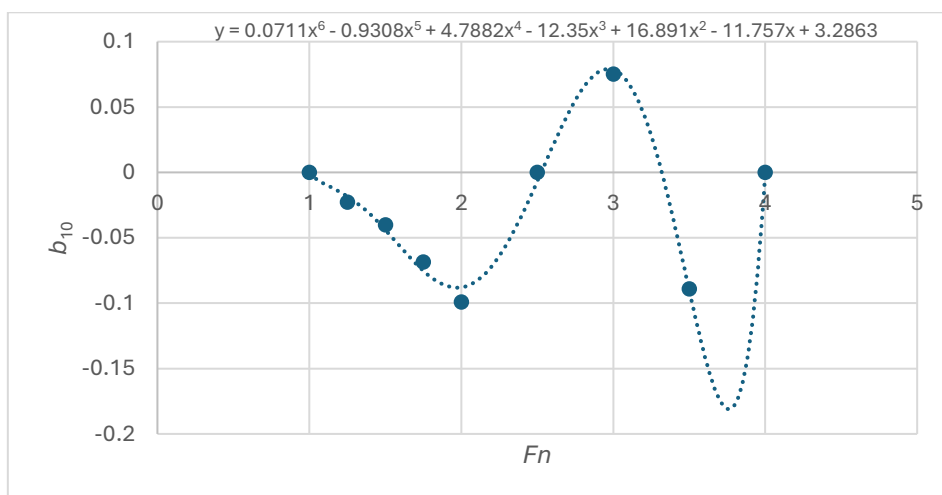
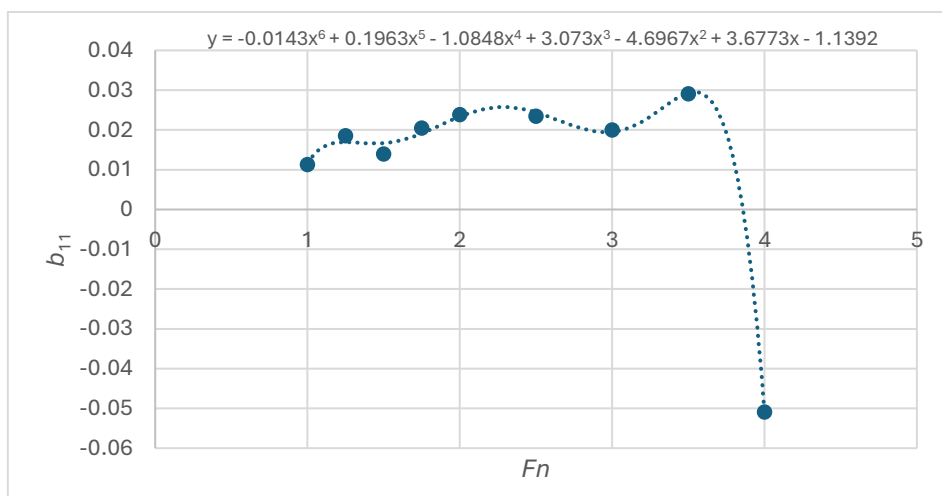
Slika 34. Ovisnost regresijskog koeficijenta b_1 o Froudeovom broju

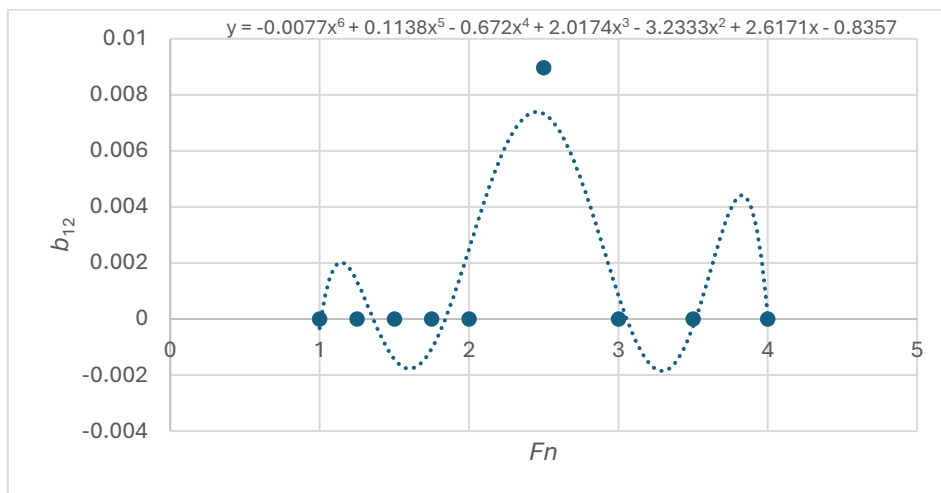
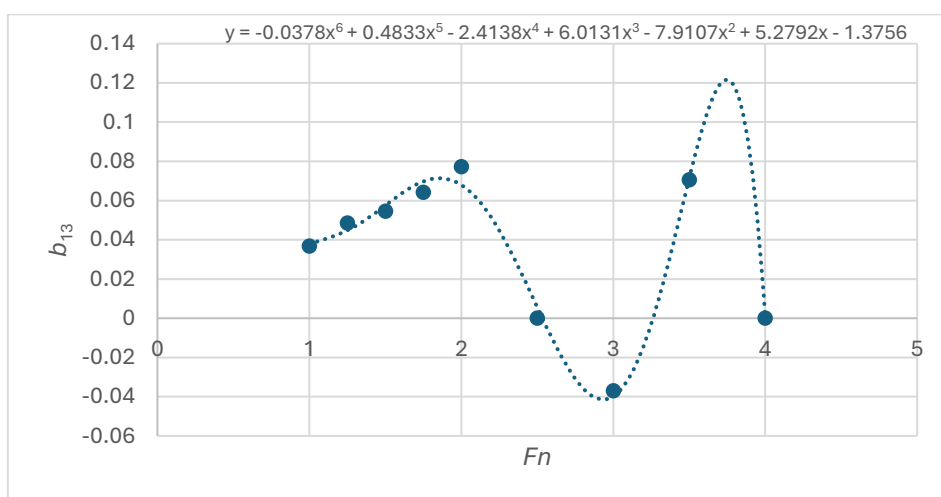
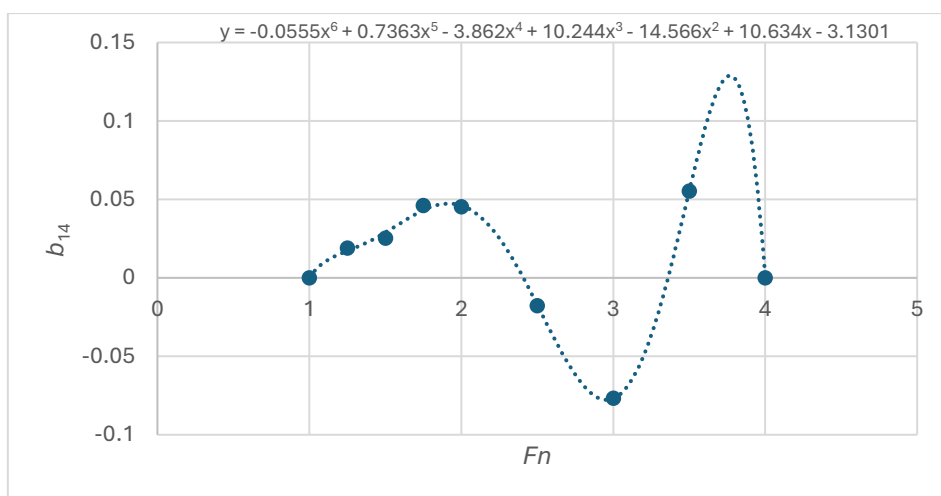


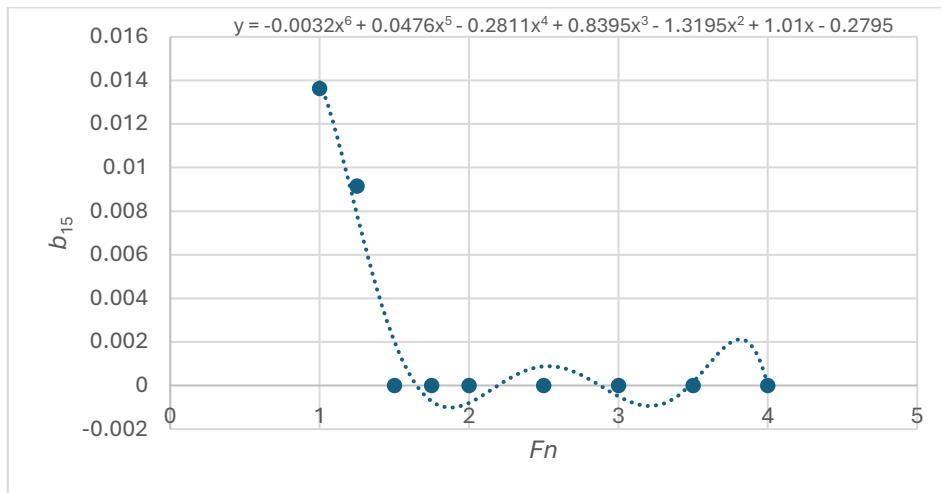
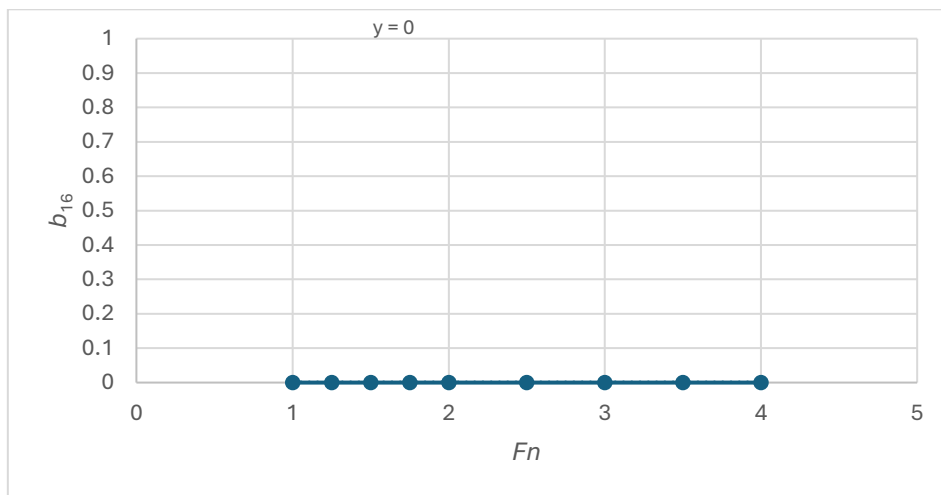
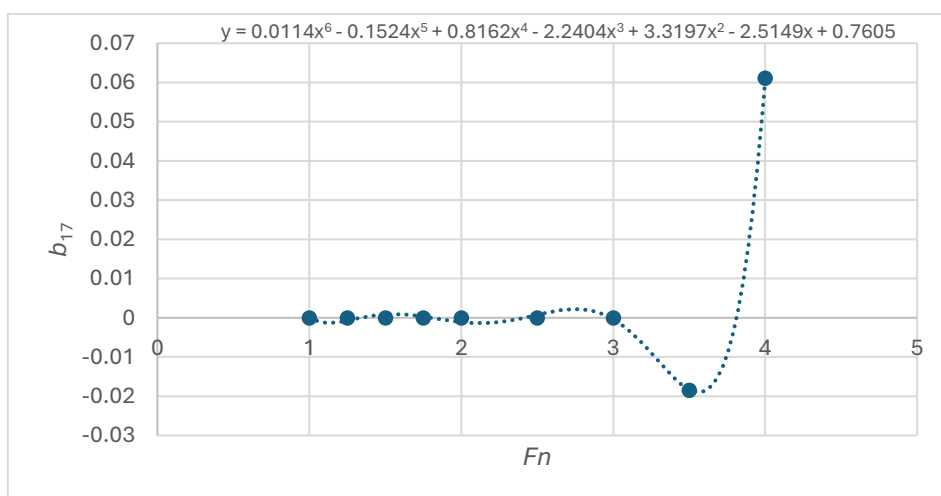
Slika 35. Ovisnost regresijskog koeficijenta b_2 o Froudeovom broju

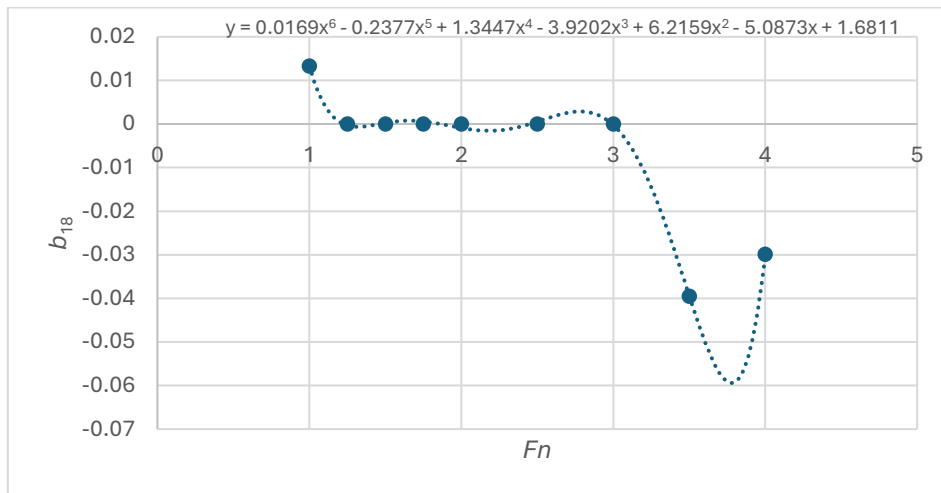
Slika 36. Ovisnost regresijskog koeficijenta b_3 o Froudeovom brojuSlika 37. Ovisnost regresijskog koeficijenta b_4 o Froudeovom brojuSlika 38. Ovisnost regresijskog koeficijenta b_5 o Froudeovom broju

Slika 39. Ovisnost regresijskog koeficijenta b_6 o Froudeovom brojuSlika 40. Ovisnost regresijskog koeficijenta b_7 o Froudeovom brojuSlika 40. Ovisnost regresijskog koeficijenta b_8 o Froudeovom broju

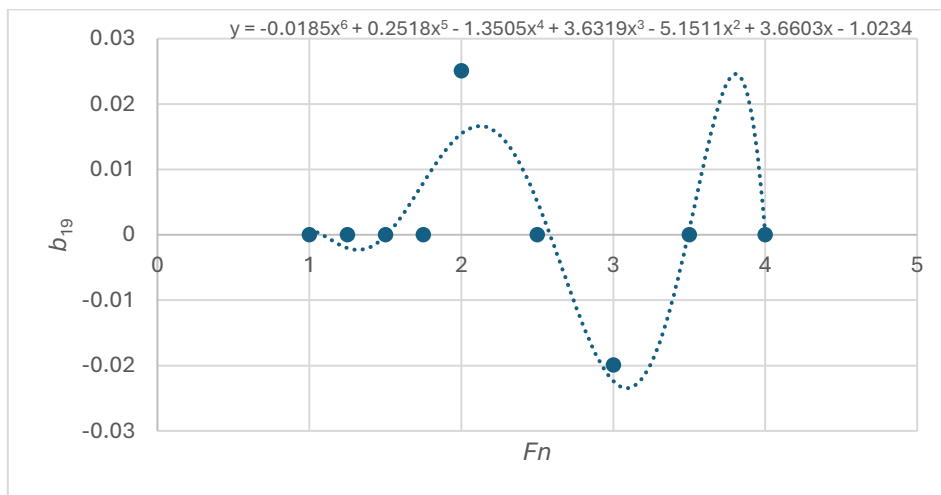
Slika 41. Ovisnost regresijskog koeficijenta b_9 o Froudeovom brojuSlika 42. Ovisnost regresijskog koeficijenta b_{10} o Froudeovom brojuSlika 43. Ovisnost regresijskog koeficijenta b_{11} o Froudeovom broju

Slika 44. Ovisnost regresijskog koeficijenta b_{12} o Froudeovom brojuSlika 45. Ovisnost regresijskog koeficijenta b_{13} o Froudeovom brojuSlika 46. Ovisnost regresijskog koeficijenta b_{14} o Froudeovom broju

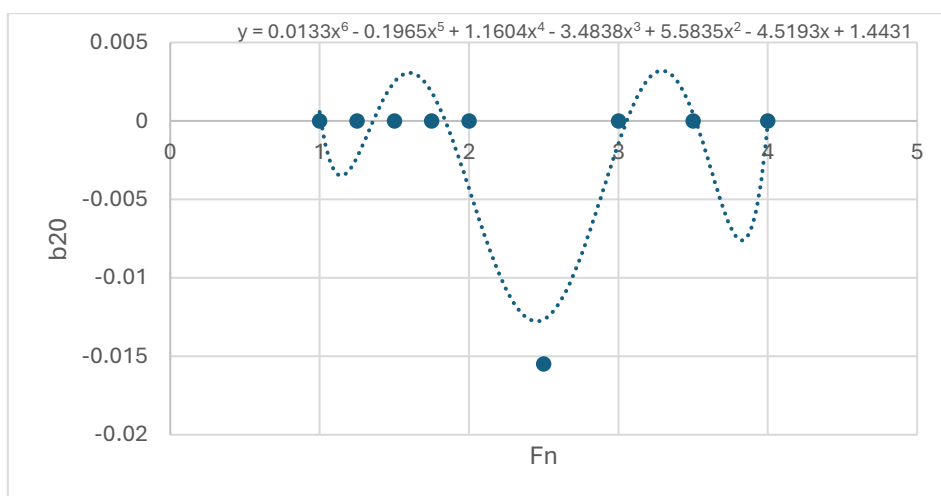
Slika 47. Ovisnost regresijskog koeficijenta b_{15} o Froudeovom brojuSlika 48. Ovisnost regresijskog koeficijenta b_{16} o Froudeovom brojuSlika 49. Ovisnost regresijskog koeficijenta b_{17} o Froudeovom broju



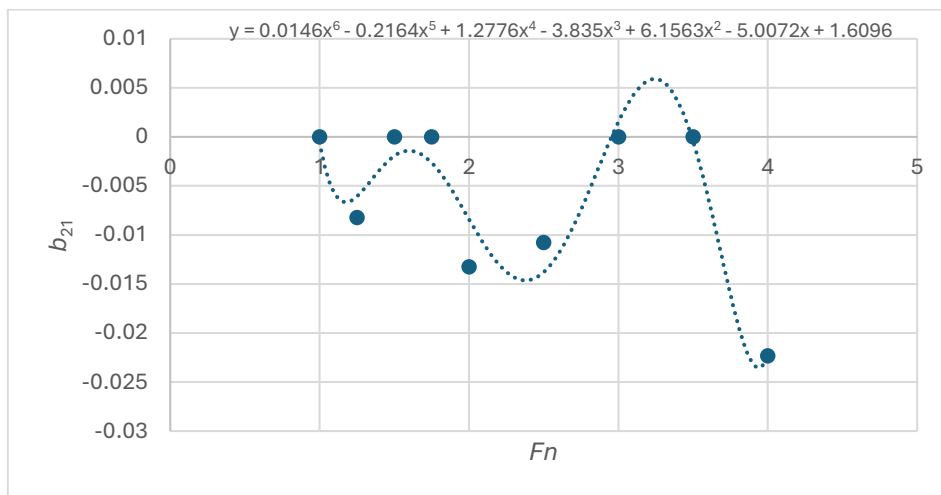
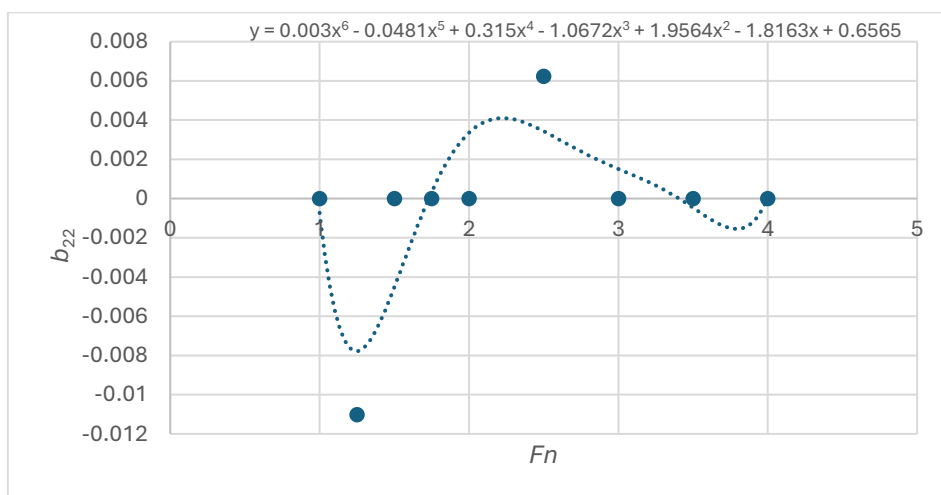
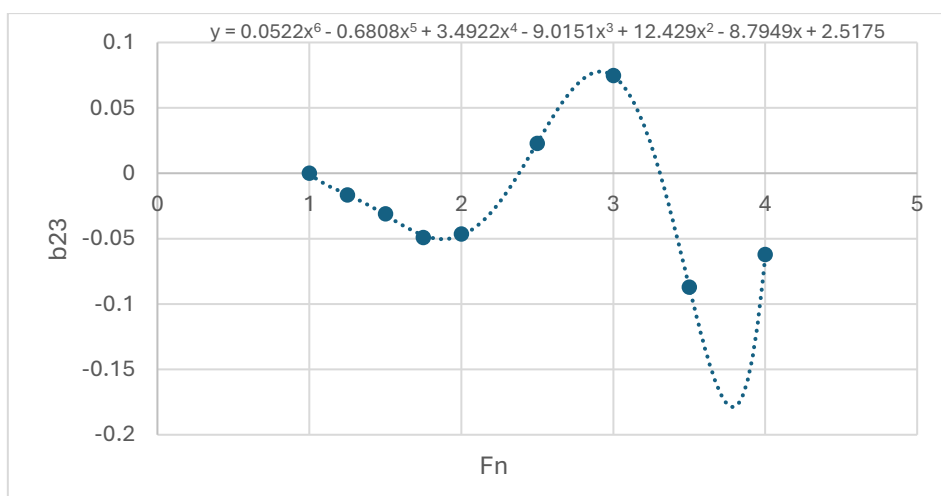
Slika 50. Ovisnost regresijskog koeficijenta b_{18} o Froudeovom broju

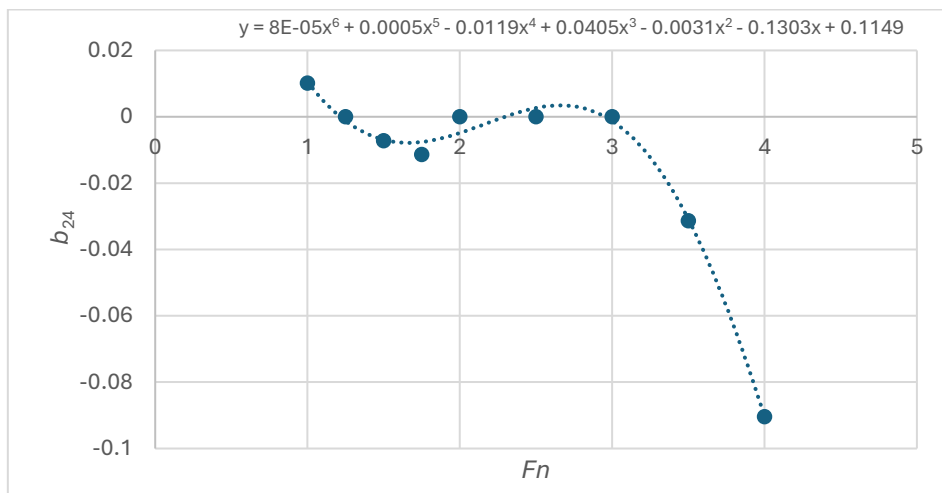
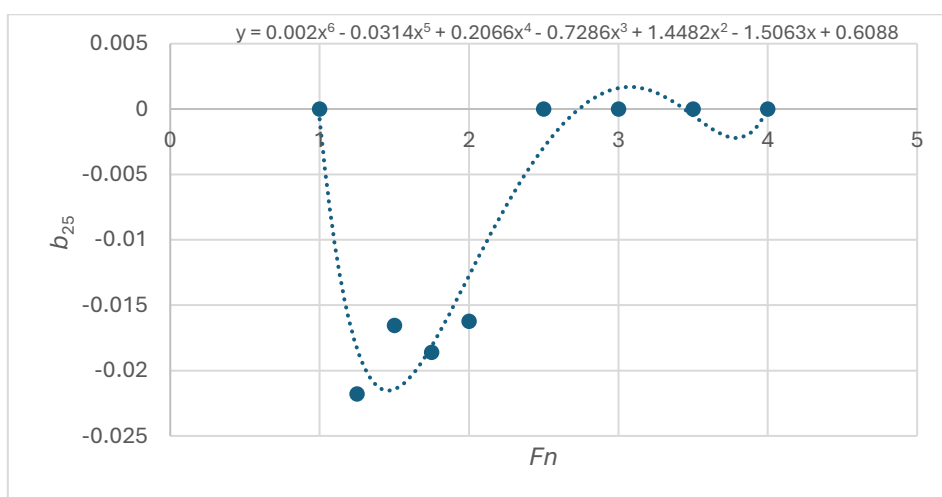
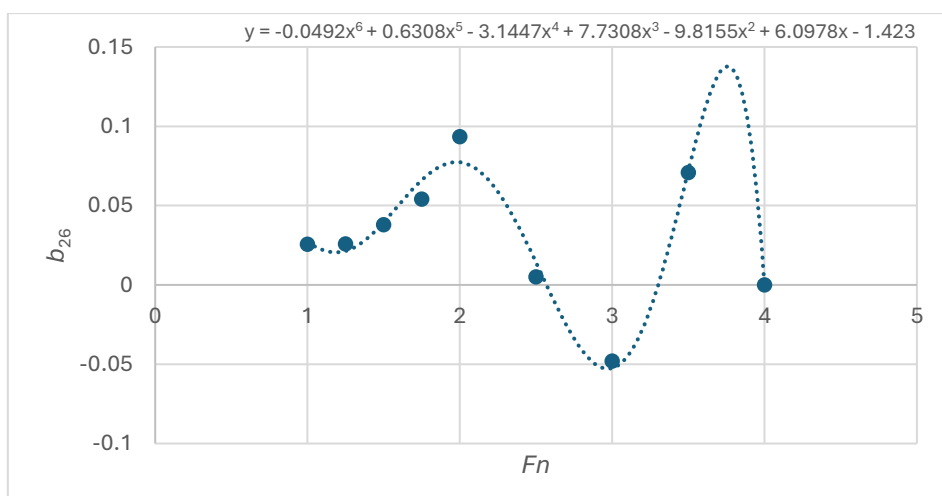


Slika 51. Ovisnost regresijskog koeficijenta b_{19} o Froudeovom broju



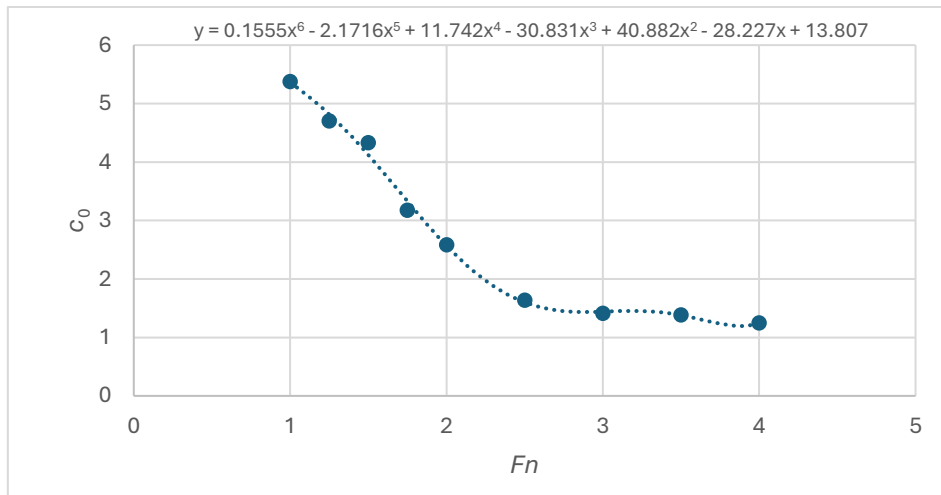
Slika 52. Ovisnost regresijskog koeficijenta b_{20} o Froudeovom broju

Slika 53. Ovisnost regresijskog koeficijenta b_{21} o Froudeovom brojuSlika 54. Ovisnost regresijskog koeficijenta b_{22} o Froudeovom brojuSlika 55. Ovisnost regresijskog koeficijenta b_{23} o Froudeovom broju

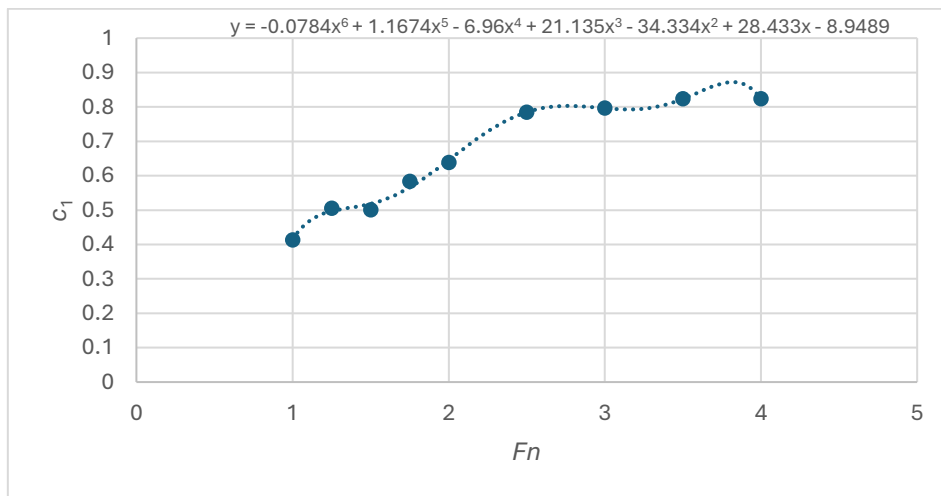
Slika 56. Ovisnost regresijskog koeficijenta b_{24} o Froudeovom brojuSlika 57. Ovisnost regresijskog koeficijenta b_{25} o Froudeovom brojuSlika 58. Ovisnost regresijskog koeficijenta b_{26} o Froudeovom broju

Bezdimenzijska oplakana površina određuje se primjenom jednadžbe (39), dok su jednadžbe regresijskih koeficijenata kao funkcija Froudeovog broja prikazane na Slikama 60. - 64:

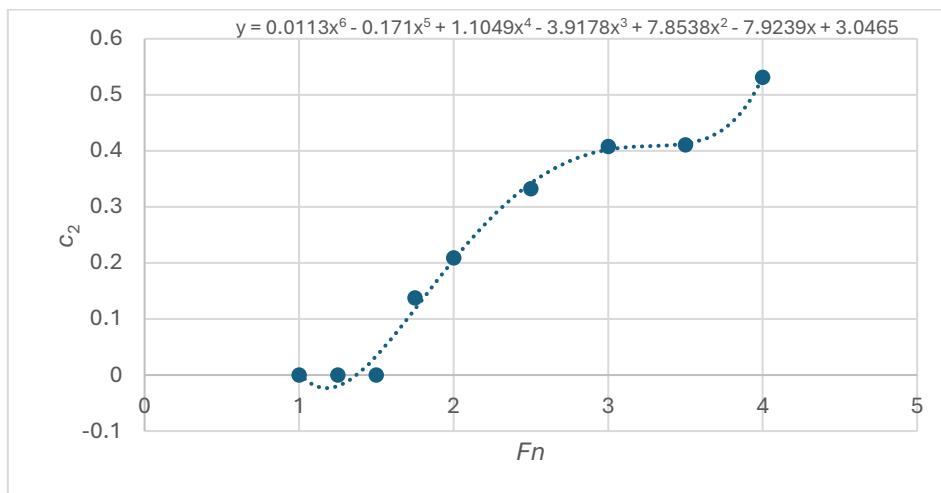
$$\frac{S}{\sqrt[3]{2}} = c_0 \cdot (x_1 + 2)^{c_1} \cdot (x_2 + 2)^{c_2} \cdot (x_3 + 2)^{c_3} \cdot (x_4 + 2)^{c_4} \quad (39)$$



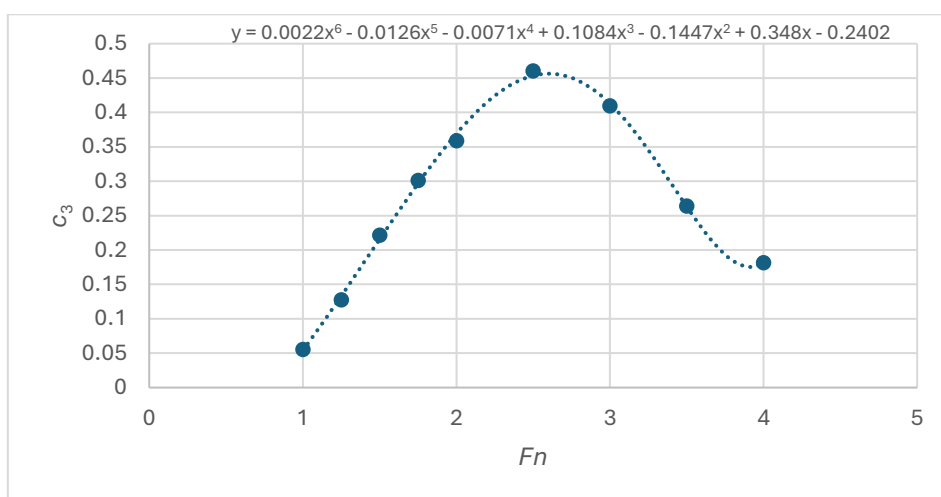
Slika 59. Ovisnost regresijskog koeficijenta c_0 o Froudeovom broju



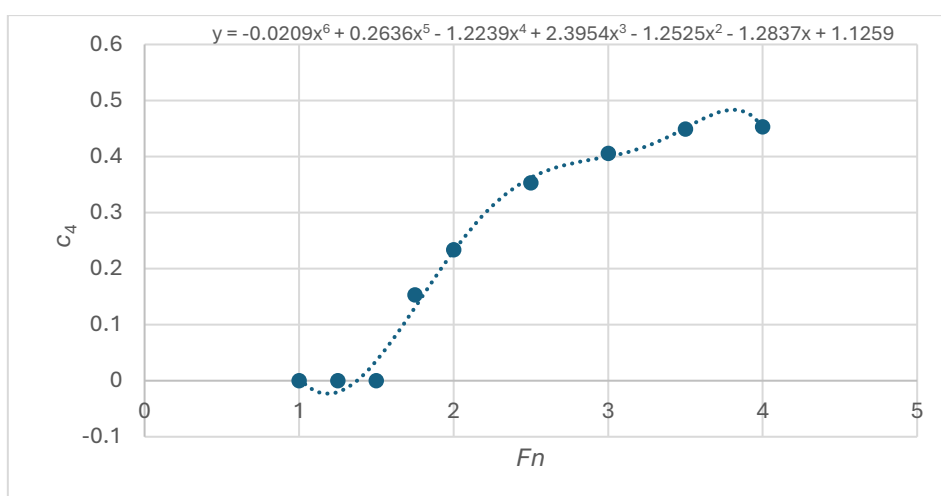
Slika 60. Ovisnost regresijskog koeficijenta c_1 o Froudeovom broju



Slika 61. Ovisnost regresijskog koeficijenta c_2 o Froudeovom broju



Slika 62. Ovisnost regresijskog koeficijenta c_3 o Froudeovom broju

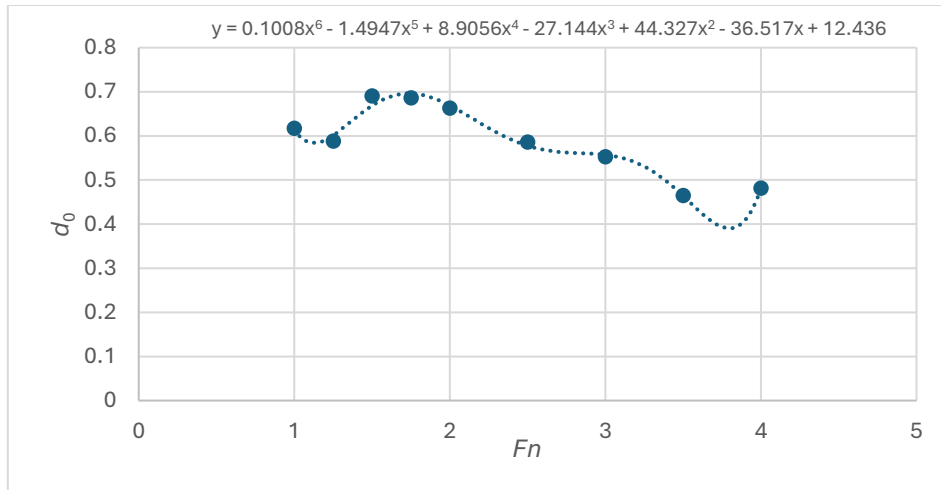


Slika 63. Ovisnost regresijskog koeficijenta c_4 o Froudeovom broju

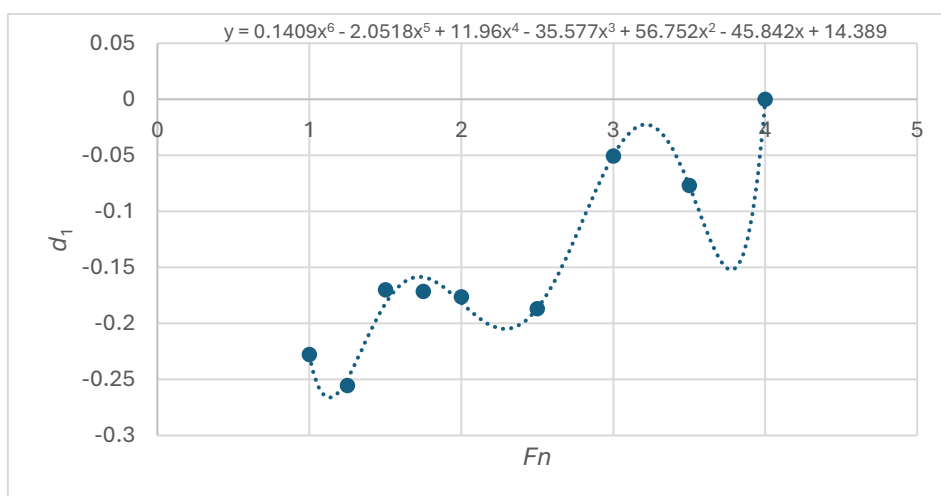
Omjer $\frac{L}{L_p}$ moguće je odrediti na sljedeći način:

$$\frac{L}{L_p} = d_0 \cdot x_0 + d_1 \cdot x_1 + d_2 \cdot x_2 + d_3 \cdot x_3 + d_4 \cdot x_4 + d_5 \cdot x_5' + d_6 \cdot x_1^2 + \dots + d_{10} \cdot x_5'^2 \quad (40)$$

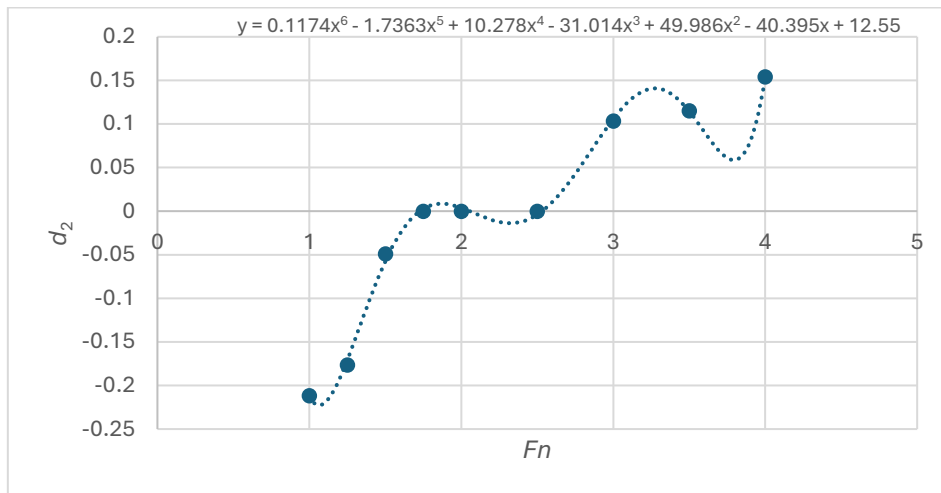
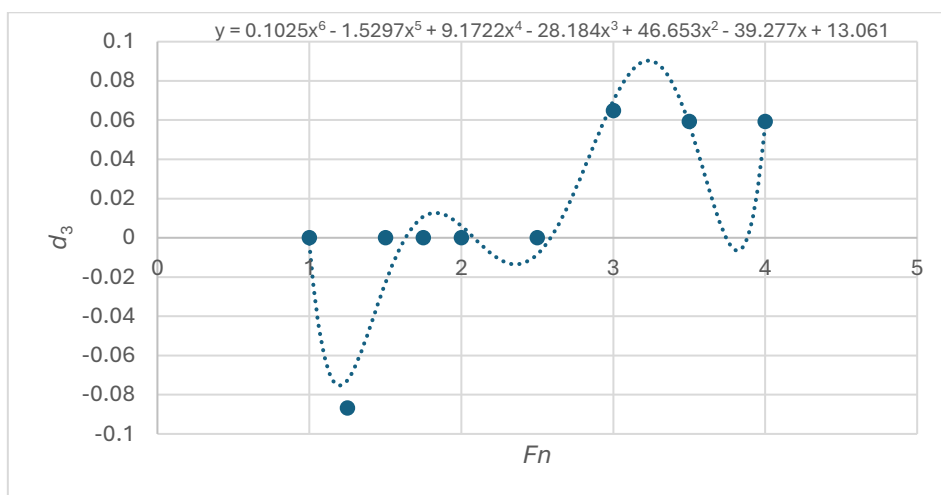
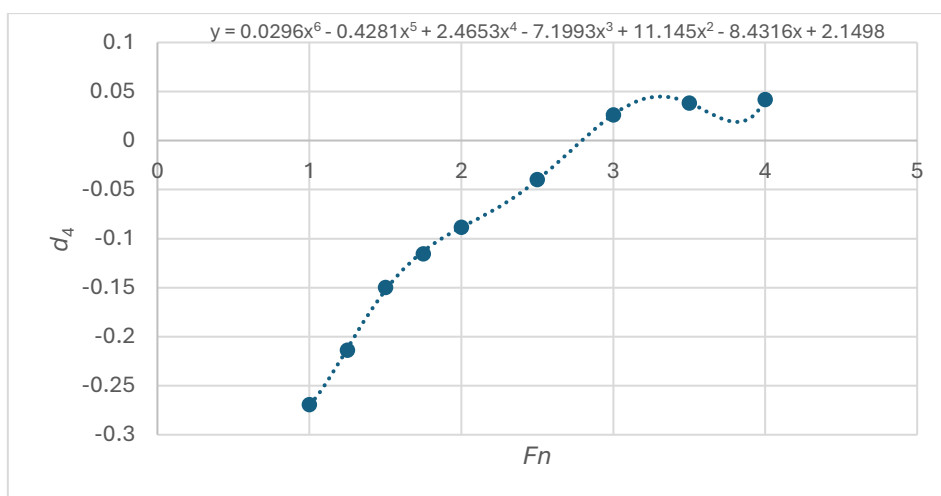
Regresijski koeficijenti navedeni u jednadžbi (40) mogu se iščitati sa Slika 65.-75.

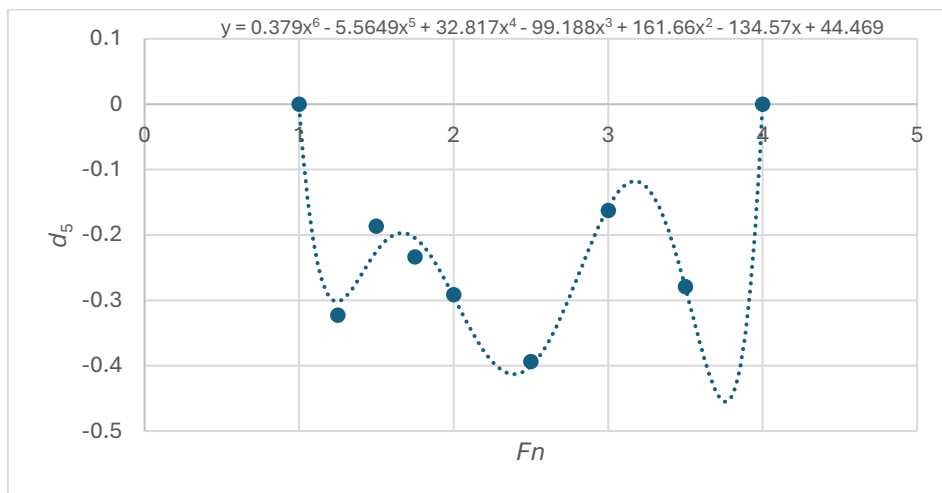
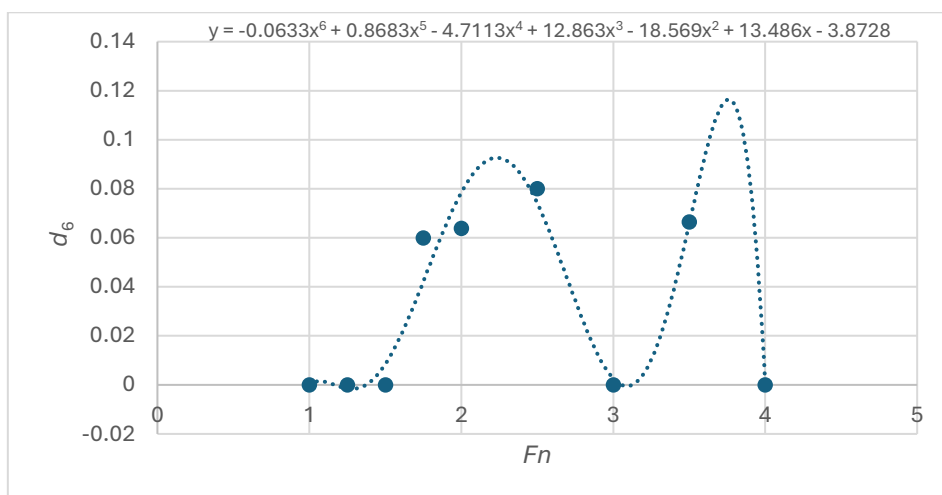
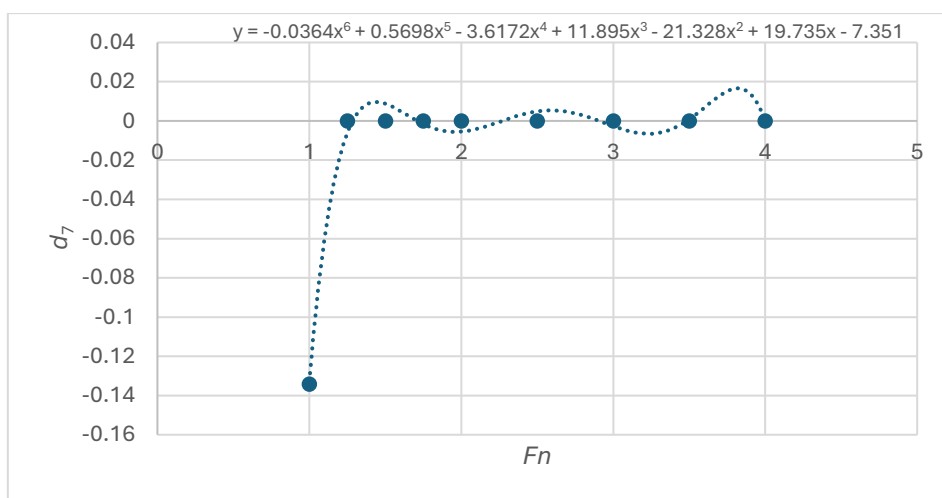


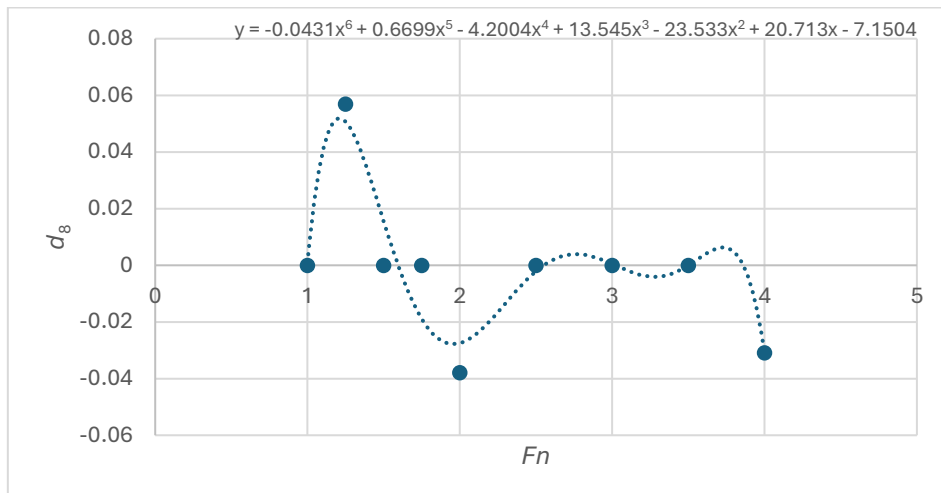
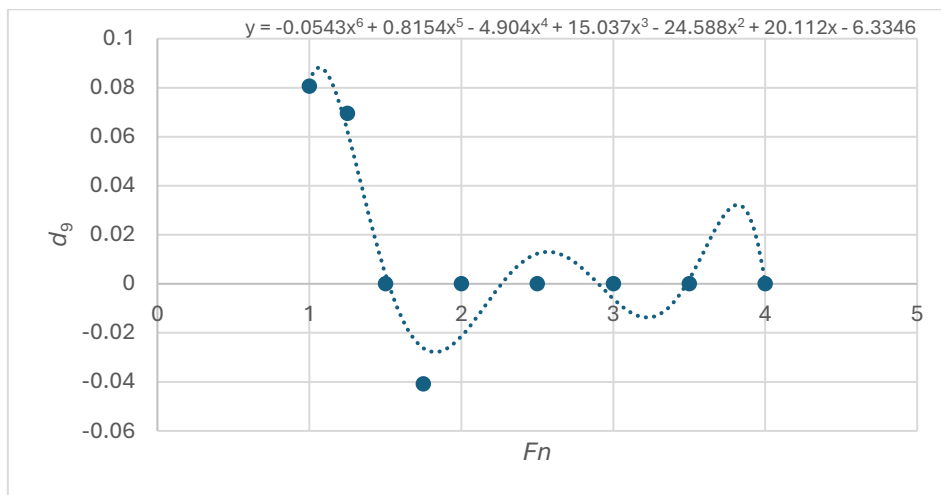
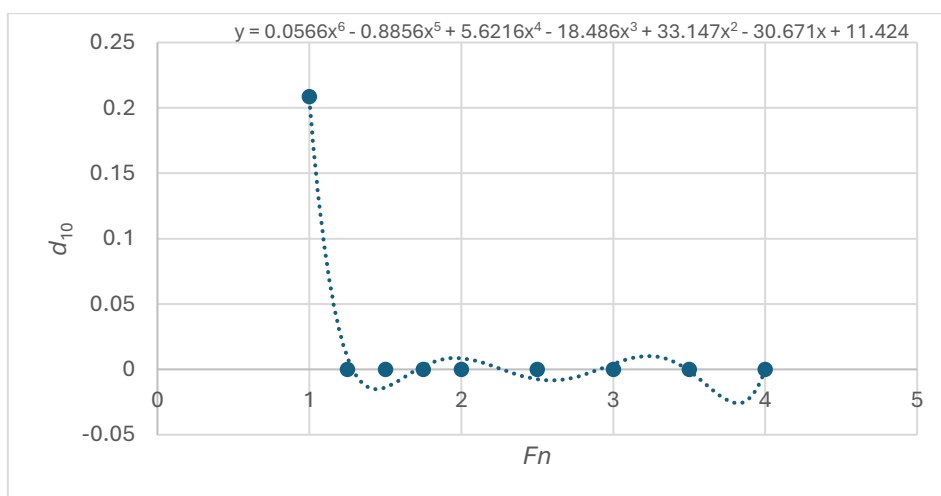
Slika 64. Ovisnost regresijskog koeficijenta d_0 o Froudeovom broju



Slika 65. Ovisnost regresijskog koeficijenta d_1 o Froudeovom broju

Slika 66. Ovisnost regresijskog koeficijenta d_2 o Froudeovom brojuSlika 67. Ovisnost regresijskog koeficijenta d_3 o Froudeovom brojuSlika 68. Ovisnost regresijskog koeficijenta d_4 o Froudeovom broju

Slika 69. Ovisnost regresijskog koeficijenta d_5 o Froudeovom brojuSlika 70. Ovisnost regresijskog koeficijenta d_6 o Froudeovom brojuSlika 71. Ovisnost regresijskog koeficijenta d_7 o Froudeovom broju

Slika 72. Ovisnost regresijskog koeficijenta d_8 o Froudeovom brojuSlika 73. Ovisnost regresijskog koeficijenta d_9 o Froudeovom brojuSlika 74. Ovisnost regresijskog koeficijenta d_{10} o Froudeovom broju

Konačno, s ciljem određivanja $\frac{R}{\Delta}$ modela broda ili broda u naravi za različite vrijednosti mase istisnine potrebno je primijeniti korekciju, koja se računa na slijedeći način:

$$\lambda = \sqrt[3]{\frac{\Delta_s \cdot \rho_m}{\Delta_m \cdot \rho_s}} = \sqrt[3]{\frac{\Delta_s}{\Delta_m} \cdot 2.3} \quad (41)$$

$$L_{pm} = \frac{L_p}{\lambda} \quad (42)$$

$$L_m = \frac{L}{L_p} \cdot L_{pm} \quad (43)$$

$$L_s = \frac{L}{L_p} \cdot L_p \quad (44)$$

$$Re_M = L_m \cdot Fn_V \cdot 4.9423 \cdot 10^6 \quad (45)$$

$$Re_S = \frac{L_s \cdot Fn_V \cdot \sqrt{g \cdot V^{\frac{1}{3}}}}{\nu} \quad (46)$$

$$\frac{R}{\Delta} = \frac{R}{\Delta} + ((C'_f + C_a) + C_f) \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{S}{V^{\frac{2}{3}}} \cdot Fn_V^2 \quad (47)$$

gdje je:

λ – mjerilo,

L_{pm} – duljina modela,

L_s – projicirana duljina broda,

Re_M – Reynoldsov broj modela,

Re_S – Reynoldsov broj broda,

C_a – korelacijski dodatak.

Koeficijent otpora trenja modela, odnosno originalne forme C_f iterativno se računa prema Schoenherrovoj liniji trenja:

$$\frac{0.242}{\sqrt{C_f}} = \log(Re_M \cdot C_f) \quad (48)$$

Koeficijent otpora trenja broda ili nove forme C'_f se računa prema korelacijskoj liniji model-brod ITTC-1957:

$$C'_f = \frac{0.075}{(\log(Re_S) - 2)^2} \quad (49)$$

6. REZULTATI

6.1. Metoda Savitsky

S obzirom da su značajke mase bile dostupne samo za tri od pet modela za koje su dostupni eksperimentalni podaci ukupnog otpora i kuta trima [23], analiza je provedena za modele C3, C4 i C5. Uzdužni položaj težišta mase (LCG) te omjer vertikalnog položaja težišta mase i širine na vodnoj liniji (VCG/BWL) preuzeti su iz [24]. Glavne značajke modela C3, C4 i C5 prikazane su u Tablici 1.

Tablica 1. Glavne značajke modela C3, C4 i C5

	Model C3	Model C4	Model C5
L_{OA} , m	2,611	2,611	2,611
L_{WL} , m	2,400	2,400	2,400
L_P , m	2,487	2,487	2,487
$B_{WL}=b$, m	0,576	0,493	0,410
Δ , kg	73,93	54,12	37,40
LCG , m	0,945	0,945	0,945
$\frac{VCG}{B_{WL}}$	0,5	0,5	0,5
VCG , m	0,288	0,2465	0,205
ε , °	12	12	12
f , m	0	0	0
β , °	13,2	13,2	13,2
ΔC_f	0,0004	0,0004	0,0004

U Tablicama 2.-7. prikazani su rezultati dobiveni primjenom metode Savitsky te usporedba s eksperimentalno dobivenim rezultatima.

Tablica 2. Izmjerene vrijednosti za model C3

v , m/s	C_T	S_{WD} , m ²	R_T , N	τ , °
2,5	0,015623	1,26	61,51556	2,27
3	0,013973	1,16	72,93906	2,75
3,5	0,010538	1,26	81,32702	3,03
4	0,009231	1,22	90,09456	3,08
4,5	0,008612	1,15	100,276	3,29
5	0,008927	1	111,5875	3,93
5,5	0,00855	0,92	118,9733	4,38
6	0,007866	0,88	124,5974	4,39
6,5	0,007192	0,86	130,6607	4,19
7	0,006931	0,8	135,8476	4,04
7,5	0,006978	0,73	143,2671	3,78

Tablica 3. Rezultati dobiveni metodom Savitsky za model C3

v , m/s	S_{WD} , m ²	$D=R_T$, N	$RD(R_T)$, %	τ , °	$RD(\tau)$, %
2,5	1,26	55,670	-9,502	3,105	36,789
3	1,16	64,635	-11,385	3,398	23,58
3,5	1,26	74,031	-8,972	3,728	23,036
4	1,22	83,085	-7,781	4,040	31,171
4,5	1,15	90,998	-9,252	4,258	29,417
5	1	97,466	-12,655	4,332	10,241
5,5	0,92	102,833	-13,567	4,272	-2,459
6	0,88	107,721	-13,545	4,118	-6,193
6,5	0,86	112,683	-13,759	3,912	-6,646
7	0,8	118,093	-13,07	3,683	-8,841
7,5	0,73	124,175	-13,326	3,451	-8,711

Na temelju rezultata dobivenih za model C3 vidljivo je kako su pri manjim brzinama relativne devijacije dobivene za ukupni otpor manje od onih dobivenih za kut trima. Najveće odstupanje ukupnog otpora dobivenog metodom Savitsky u odnosu na eksperimentalne rezultate iznosi -

13,759 %, dok je najveće odstupanje za kut trima 36,789 %. Moguće je uočiti kako su odstupanja ukupnog otpora manja pri manjim brzinama, dok su odstupanja kuta trima veća pri manjim brzinama.

Tablica 4. Izmjerene vrijednosti za model C4

v , m/s	C_t	S_{wd} , m ²	R_T , N	τ , °
2,5	0,010846	1,17	39,65569	1,86
3	0,009516	1,14	48,81708	2,1
3,5	0,008226	1,1	55,42268	2,4
4	0,007236	1,06	61,36128	2,52
4,5	0,006876	1	69,6195	2,6
5	0,006864	0,94	80,652	2,88
5,5	0,00672	0,87	88,4268	3,53
6	0,006647	0,79	94,52034	3,81
6,5	0,00648	0,73	99,9297	3,93
7	0,00614	0,7	105,301	3,89
7,5	0,005575	0,72	112,8938	3,73

Tablica 5. Rezultati dobiveni metodom Savitsky za model C4

v , m/s	S_{WD} , m ²	$D=R_T$, N	$RD(R_T)$, %	τ , °	$RD(\tau)$, %
2,5	1,17	37,042	-6,592	2,440	31,193
3	1,14	43,76	-10,359	2,644	25,892
3,5	1,1	50,880	-8,196	2,881	20,026
4	1,06	58,034	-5,422	3,129	24,155
4,5	1	64,828	-6,883	3,345	28,636
5	0,94	71,009	-11,956	3,481	20,862
5,5	0,87	76,617	-13,356	3,516	-0,393
6	0,79	81,920	-13,331	3,462	-9,134
6,5	0,73	87,243	-12,696	3,345	-14,873
7	0,7	92,847	-11,827	3,193	-17,922
7,5	0,72	98,912	-12,385	3,024	-18,939

Najveće odstupanje ukupnog otpora dobivenog metodom Savitsky za model C4 u odnosu na eksperimentalne rezultate iznosi -13,356 %, dok je najveće odstupanje za kut trima 31,193 %. Kao i kod modela C3, moguće je uočiti kako su odstupanja ukupnog otpora manja pri manjim brzinama, dok su odstupanja kuta trima pri manjim brzinama veća.

Tablica 6. Izmjerene vrijednosti za model C5

v , m/s	C_T	S_{WD} , m ²	R_T , N	τ , °
2,5	0,008469	0,95	25,14234	1,32
3	0,007428	0,92	30,75192	1,56
3,5	0,006654	0,9	36,68018	1,75
4	0,005938	0,89	42,27856	1,77
4,5	0,005532	0,88	49,29012	1,81
5	0,005328	0,85	56,61	1,88
5,5	0,005413	0,8	65,4973	2,12
6	0,005405	0,74	71,9946	2,65
6,5	0,005184	0,68	74,46816	3,05
7	0,005157	0,63	79,5983	3,19
7,5	0,005228	0,58	85,28175	3,04

Tablica 7. Rezultati dobiveni metodom Savitsky za model C5

v , m/s	S_{WD} , m ²	$D=R_T$, N	$RD(R_T)$, %	τ , °	$RD(\tau)$, %
2,5	0,95	24,142	-3,977	1,843	39,647
3	0,92	29,281	-4,782	1,975	26,585
3,5	0,9	34,774	-5,197	2,130	21,725
4	0,89	40,413	-4,412	2,303	30,136
4,5	0,88	45,999	-6,678	2,477	36,868
5	0,85	51,389	-9,222	2,624	39,595
5,5	0,8	56,559	-13,647	2,718	28,203
6	0,74	61,605	-14,431	2,746	3,638
6,5	0,68	66,691	-10,444	2,716	-10,945
7	0,63	71,977	-9,575	2,642	-17,161
7,5	0,58	77,588	-9,021	2,541	-16,397

Za model C5 dobivene su najveće relativne devijacije za kut trima. Kao i kod modela C3 i C4, moguće je uočiti kako su odstupanja ukupnog otpora manja pri manjim brzinama, dok su odstupanja kuta trima pri manjim brzinama veća. Najveće odstupanje kuta trima dobiveno je pri najmanjoj brzini i iznosi 39,647 %.

6.2. Metoda Radojčić

Podaci potrebni za proračun po metodi Radojčić prikazani su u Tablici 8. U Tablici 9 dane su vrijednosti parametara modela C3, C4 i C5 na temelju kojih je moguće ocijeniti zadovoljavaju li ograničenja metode. Važno je napomenuti kako omjer L_p/B_{pa} kod modela C5 ne zadovoljava zadana ograničenja te je stoga navedeni model izostavljen iz daljnje analize.

Tablica 8. Značajke modela C3, C4, C5

	C3	C4	C5
A_p, m^2	1,104637	0,945184	0,785731
Δ, kg	73,93	54,12	37,4
$\nabla, kg/m^3$	0,076216	0,0557938	0,0385567
LCG, m	0,945	0,945	0,945
L_p, m	2,487	2,487	2,487
B_{pa}, m	0,444164	0,3800499	0,3159353
$\beta (50\% L_p), ^\circ$	22,3	22,3	22,3

Tablica 9. Provjerena ograničenja za modele C3, C4 i C5

	C3	C4	C5
$\frac{A_p}{\frac{2}{\nabla^3}}$	6,145	6,473	6,885
$\frac{100 * LCG}{L_p}$	37,998	37,998	37,998
$\frac{L_p}{B_{pa}}$	5,599	6,544	7,872
β	22,3	22,3	22,3

Nadalje, izračunani su neovisni koeficijenti x_1, x_2, x_3, x_4 prikazani u Tablicama 10. i 11.

Tablica 10. Neovisni koeficijenti za model C3

C3	x_1	-0,2781
	x_2	0,1185
	x_3	0,4859
	x_4	-0,2377

Froudeovi brojevi za odgovarajuće brzine modela C3 i C4 prikazani su u Tablicama 12. i 13.

Tablica 11. Neovisni koeficijenti za model C4

C4	x_1	-0,1530
	x_2	0,1185
	x_3	0,9192
	x_4	-0,2377

Tablica 12. Froudeovi brojevi za model C3

C3	v , m/s	Fn
	2,5	1,2260406
	3	1,4712487
	3,5	1,7164568
	4	1,9616649
	4,5	2,206873
	5	2,4520811
	5,5	2,6972893
	6	2,9424974
	6,5	3,1877055
	7	3,4329136
	7,5	3,6781217

Tablica 13. Froudeovi brojevi za model C4

C4	$v, \text{m/s}$	Fn
	2,5	1,2914631
	3	1,5497557
	3,5	1,8080483
	4	2,0663409
	4,5	2,3246335
	5	2,5829262
	5,5	2,8412188
	6	3,0995114
	6,5	3,357804
	7	3,6160966
	7,5	3,8743892

Regresijski koeficijenti za modele C3 i C4 prikazani su u Tablicama 14. - 35.

Tablica 14. Izračunati regresijski koeficijenti za brzinu 2,5 m/s, model C3

v , m/s	Fn	a		b		c	
2,5	1,226041	a_0	2,3642929	b_0	0,076328	c_0	4,87593718
		a_1	-1,517106	b_1	-0,041284	c_1	0,49329066
		a_2	-3,046803	b_2	-0,028986	c_2	-0,0219853
		a_3	-1,209157	b_3	-0,049881	c_3	0,12525283
		a_4	-2,392392	b_4	-0,002917	c_4	-0,0222697
		a_5	0,6770162	b_5	-0,049881	$S/\sqrt[3]{3}$	6,9400977
		a_6	1,1847314	b_6	0,0121034		
		a_7	0,2927555	b_7	0,0012226		
		a_8	1,7832122	b_8	0,0018789	d	
		a_9	-0,506235	b_9	-0,011988	d_0	0,59494026
		a_{10}	0,403167	b_{10}	-0,016583	d_1	-0,2551625
		a_{11}	0,7028119	b_{11}	0,0168445	d_2	-0,1833385
		a_{12}	-0,050662	b_{12}	0,001426	d_3	-0,0730113
		a_{13}	0,8168168	b_{13}	0,0440323	d_4	-0,2177597
		a_{14}	1,7313114	b_{14}	0,0165084	d_5	-0,2927394
		a_{15}	0,0602501	b_{15}	0,008362	d_6	0,00012204
		a_{16}	-0,664617	b_{16}	0	d_7	-0,0111966
		a_{17}	-0,666436	b_{17}	-0,00097	d_8	0,05163074
		a_{18}	0,0077283	b_{18}	6,419E-06	d_9	0,06964354
		a_{19}	-1,009688	b_{19}	-0,002087	d_{10}	0,01810565
		a_{20}	0,0012735	b_{20}	-0,00247	L/L_p	0,81810496
		a_{21}	-0,565569	b_{21}	-0,006277		
		a_{22}	0	b_{22}	-0,007653		
		a_{23}	-1,489925	b_{23}	-0,014811		
		a_{24}	0,0939479	b_{24}	-0,000105		
		a_{25}	0	b_{25}	-0,017236		
		a_{26}	-0,515865	b_{26}	0,0210645		
		τ	2,6486084	R/Δ	0,0740221		

Tablica 15. Izračunati regresijski koeficijenti za brzinu 3 m/s, model C3

v , m/s	Fn	a		b		c	
3	1,471249	a_0	2,71247604	b_0	0,094749931	c_0	4,208084477
		a_1	-1,43768153	b_1	-0,04462819	c_1	0,513688006
		a_2	-3,20020751	b_2	-0,03474033	c_2	0,024581164
		a_3	-2,13594070	b_3	-0,06347629	c_3	0,205983837
		a_4	-2,11741800	b_4	0,012112181	c_4	0,025273616
		a_5	1,084755707	b_5	0,001840658	$S/\sqrt{3}^2$	6,934506356
		a_6	1,244500971	b_6	0,015511345		
		a_7	1,761738598	b_7	-0,00144859		
		a_8	1,761738598	b_8	0,008941153	d	
		a_9	-0,1008429	b_9	-0,00821908	d_0	0,660851122
		a_{10}	-0,44666328	b_{10}	-0,04022386	d_1	-0,18925693
		a_{11}	0,854963058	b_{11}	0,016467981	d_2	-0,07270285
		a_{12}	0,03846696	b_{12}	-0,00154669	d_3	-0,02691411
		a_{13}	1,609157022	b_{13}	0,056235308	d_4	-0,15807727
		a_{14}	2,691085151	b_{14}	0,027073404	d_5	-0,22577967
		a_{15}	-0,07664261	b_{15}	0,002410737	d_6	0,007649504
		a_{16}	-0,39244576	b_{16}	0	d_7	0,009928328
		a_{17}	-1,44421540	b_{17}	0,000628551	d_8	0,020721103
		a_{18}	0,00232861	b_{18}	8,90956E-05	d_9	0,012900864
		a_{19}	-0,49760679	b_{19}	-0,00135712	d_{10}	-0,01397075
		a_{20}	0,000667893	b_{20}	0,002633693	L/L_p	0,830702843
		a_{21}	-0,17354410	b_{21}	-0,00212888		
		a_{22}	0	b_{22}	-0,00484209		
		a_{23}	-2,09176407	b_{23}	-0,02954515		
		a_{24}	-0,65247918	b_{24}	-0,00603452		
		a_{25}	0	b_{25}	-0,02109441		
		a_{26}	0,173178874	b_{26}	0,036963229		
		τ	2,83866414	R/Δ	0,085663275		

Tablica 16. Izračunati regresijski koeficijenti za brzinu 3,5 m/s, model C3

v , m/s	Fn	a		b		c	
3,5	1,716457	a_0	2,856908799	b_0	0,099042865	c_0	3,434555638
		a_1	-1,49097855	b_1	-0,04382929	c_1	0,554504947
		a_2	-3,41395738	b_2	-0,03693019	c_2	0,103953808
		a_3	-3,31063315	b_3	-0,07350126	c_3	0,285896735
		a_4	-1,89152893	b_4	0,019919163	c_4	0,115242074
		a_5	1,327854679	b_5	-0,00051193	$S/\sqrt{3}$	6,951153013
		a_6	1,079209727	b_6	0,01708737		
		a_7	1,229455916	b_7	-0,00168301		
		a_8	1,229455916	b_8	0,011746647	d	
		a_9	0,084261284	b_9	-0,00336494	d_0	0,695061547
		a_{10}	-2,62399161	b_{10}	-0,07139248	d_1	-0,15925048
		a_{11}	1,033072166	b_{11}	0,018256892	d_2	-0,00789887
		a_{12}	-0,00466473	b_{12}	-0,00196447	d_3	0,012361635
		a_{13}	2,921272461	b_{13}	0,069629848	d_4	-0,11634343
		a_{14}	3,454896843	b_{14}	0,040484189	d_5	-0,18933134
		a_{15}	-0,01868020	b_{15}	-0,00066059	d_6	0,038941018
		a_{16}	-0,15519184	b_{16}	0	d_7	0,000565855
		a_{17}	-1,6818412	b_{17}	0,000216793	d_8	-0,01464785
		a_{18}	0,032469361	b_{18}	0,000652498	d_9	-0,01956282
		a_{19}	0,537593503	b_{19}	0,005666522	d_{10}	0,001634882
		a_{20}	0,002311553	b_{20}	0,003327153	L/L_p	0,854145927
		a_{21}	0,064810565	b_{21}	-0,00200203		
		a_{22}	0	b_{22}	0,000333129		
		a_{23}	-2,76947252	b_{23}	-0,04523719		
		a_{24}	-1,15121761	b_{24}	-0,00687570		
		a_{25}	0	b_{25}	-0,01790767		
		a_{26}	2,408847333	b_{26}	0,063588952		
		τ	2,800201109	R/Δ	0,088618845		

Tablica 17. Izračunati regresijski koeficijenti za brzinu 4 m/s, model C3

v , m/s	Fn	a		b		c	
4	1,961665	a_0	3,2564433	b_0	0,1015961	c_0	2,67493996
		a_1	-1,804842	b_1	-0,043451	c_1	0,62745152
		a_2	-3,365972	b_2	-0,034836	c_2	0,18853004
		a_3	-3,795866	b_3	-0,075187	c_3	0,35813322
		a_4	-1,940553	b_4	0,0195305	c_4	0,21278622
		a_5	1,1314426	b_5	0,0049925	$S/\sqrt[3]{3}$	6,77428105
		a_6	0,8629437	b_6	0,0173714		
		a_7	1,0667692	b_7	-0,000473		
		a_8	0,5041283	b_8	0,0068574	d	
		a_9	-0,07411	b_9	0,0002846	d_0	0,67500896
		a_{10}	-3,854198	b_{10}	-0,08789	d_1	-0,1780768
		a_{11}	1,146213	b_{11}	0,021737	d_2	-0,0049524
		a_{12}	-0,029549	b_{12}	0,0007527	d_3	0,01388523
		a_{13}	3,3034996	b_{13}	0,0717441	d_4	-0,0909764
		a_{14}	3,3127907	b_{14}	0,0446589	d_5	-0,2661496
		a_{15}	0,0113706	b_{15}	-0,000851	d_6	0,07613257
		a_{16}	-0,15805	b_{16}	0	d_7	-0,0043816
		a_{17}	-1,179236	b_{17}	-0,001468	d_8	-0,0250919
		a_{18}	-0,015243	b_{18}	-0,000826	d_9	-0,015941
		a_{19}	1,3172846	b_{19}	0,0129405	d_{10}	0,0108016
		a_{20}	0,0023475	b_{20}	-0,001361	L/L_p	0,84779983
		a_{21}	-0,034957	b_{21}	-0,007345		
		a_{22}	0	b_{22}	0,0042599		
		a_{23}	-2,792265	b_{23}	-0,048253		
		a_{24}	-1,088446	b_{24}	-0,004044		
		a_{25}	0	b_{25}	-0,012011		
		a_{26}	3,8976696	b_{26}	0,0785242		
		τ	3,2133938	R/Δ	0,0920308		

Tablica 18. Izračunati regresijski koeficijenti za brzinu 4,5 m/s, model C3

v , m/s	Fn	a		b		c	
4,5	2,206873	a_0	3,91593717	b_0	0,114097778	c_0	2,050868173
		a_1	-2,17412166	b_1	-0,04400639	c_1	0,7069829
		a_2	-3,03313410	b_2	-0,03005805	c_2	0,262864198
		a_3	-3,36003288	b_3	-0,06637333	c_3	0,414329599
		a_4	-2,16603948	b_4	0,012610446	c_4	0,292467761
		a_5	0,622106769	b_5	0,012302838	$S/\sqrt{3}^2$	6,314301825
		a_6	0,563761699	b_6	0,016284564		
		a_7	-0,06477821	b_7	-0,00162779		
		a_8	-0,06477820	b_8	-0,00199670	d	
		a_9	-0,43716427	b_9	0,002305992	d_0	0,626950221
		a_{10}	-3,31948350	b_{10}	-0,07070003	d_1	-0,20486789
		a_{11}	1,143599713	b_{11}	0,023279126	d_2	-0,02781452
		a_{12}	-0,01549596	b_{12}	0,003892856	d_3	-0,00082259
		a_{13}	2,289142452	b_{13}	0,054630518	d_4	-0,07100225
		a_{14}	2,356157972	b_{14}	0,02644996	d_5	-0,37234022
		a_{15}	-0,01726304	b_{15}	0,000540664	d_6	0,094785644
		a_{16}	-0,19719555	b_{16}	0	d_7	-8,4449E-05
		a_{17}	-0,39990801	b_{17}	-0,00234326	d_8	-0,01322788
		a_{18}	-0,04919891	b_{18}	-0,00195616	d_9	0,007631536
		a_{19}	1,504076573	b_{19}	0,013326777	d_{10}	0,006217907
		a_{20}	0,000553323	b_{20}	-0,00669826	L/L_p	0,783561844
		a_{21}	-0,20246277	b_{21}	-0,01353069		
		a_{22}	0	b_{22}	0,006420731		
		a_{23}	-1,94490307	b_{23}	-0,02739237		
		a_{24}	-0,63363358	b_{24}	0,000695327		
		a_{25}	0	b_{25}	-0,00547351		
		a_{26}	3,606074773	b_{26}	0,066284063		
		τ	3,905293968	R/Δ	0,104458201		

Tablica 19. Izračunati regresijski koeficijenti za brzinu 5 m/s, model C3

v , m/s	Fn	a		b		c	
5	2,452081	a_0	4,614199622	b_0	0,138632888	c_0	1,637529644
		a_1	-2,34106342	b_1	-0,04398427	c_1	0,762458322
		a_2	-2,52397876	b_2	-0,02576010	c_2	0,318741008
		a_3	-2,23818080	b_3	-0,04936471	c_3	0,445858819
		a_4	-2,34900547	b_4	0,003337596	c_4	0,341768138
		a_5	0,085119397	b_5	0,015755455	$S/\sqrt{3}$	5,7344052
		a_6	0,13476684	b_6	0,013383921		
		a_7	-0,27838311	b_7	-0,0080134		
		a_8	-0,27838310	b_8	-0,00999337	d	
		a_9	-0,78309584	b_9	0,00340131	d_0	0,585278464
		a_{10}	-1,37224088	b_{10}	-0,01954518	d_1	-0,19783109
		a_{11}	1,029208605	b_{11}	0,020195594	d_2	-0,03526002
		a_{12}	0,005546307	b_{12}	0,004519821	d_3	-0,00020057
		a_{13}	0,24508174	b_{13}	0,021908513	d_4	-0,04685059
		a_{14}	1,088745001	b_{14}	-0,01517603	d_5	-0,40446846
		a_{15}	-0,05754890	b_{15}	0,002226853	d_6	0,081952982
		a_{16}	-0,04471657	b_{16}	0	d_7	0,006101573
		a_{17}	0,111964393	b_{17}	-0,00181484	d_8	0,006997766
		a_{18}	0,006568758	b_{18}	-0,00087968	d_9	0,030081458
		a_{19}	1,115941518	b_{19}	0,003662874	d_{10}	-0,00038898
		a_{20}	0,002368063	b_{20}	-0,00753743	L/L_p	0,682570579
		a_{21}	-0,14157049	b_{21}	-0,01574254		
		a_{22}	0	b_{22}	0,007797879		
		a_{23}	-0,51317897	b_{23}	0,014966172		
		a_{24}	-0,12859098	b_{24}	0,005370345		
		a_{25}	0	b_{25}	0,000906659		
		a_{26}	1,669225769	b_{26}	0,027668109		
		τ	4,683032083	R/Δ	0,125982071		

Tablica 20. Izračunati regresijski koeficijenti za brzinu 5,5 m/s, model C3

v , m/s	Fn	a		b		c	
5,5	2,697289	a_0	5,0835444	b_0	0,1647916	c_0	1,43952677
		a_1	-2,173304	b_1	-0,041526	c_1	0,77802969
		a_2	-1,963604	b_2	-0,025866	c_2	0,35201752
		a_3	-0,909371	b_3	-0,0309	c_3	0,44541683
		a_4	-2,296761	b_4	-0,002455	c_4	0,361326
		a_5	-0,215261	b_5	0,0151165	$S/\sqrt{3}^2$	5,26843061
		a_6	-0,377959	b_6	0,0080692		
		a_7	0,0766661	b_7	-0,019618		
		a_8	-0,169417	b_8	-0,015087	d	
		a_9	-0,933383	b_9	0,0048137	d_0	0,56761621
		a_{10}	0,8643929	b_{10}	0,0426804	d_1	-0,1450728
		a_{11}	0,8566021	b_{11}	0,0125987	d_2	-0,0094122
		a_{12}	0,0015804	b_{12}	0,0013352	d_3	0,03098454
		a_{13}	-1,892526	b_{13}	-0,010109	d_4	-0,0165174
		a_{14}	0,108857	b_{14}	-0,064645	d_5	-0,3273505
		a_{15}	-0,062465	b_{15}	0,0037341	d_6	0,04433727
		a_{16}	0,3292004	b_{16}	0	d_7	0,00682599
		a_{17}	0,0943722	b_{17}	-0,00182	d_8	0,02423487
		a_{18}	0,1000009	b_{18}	0,0009223	d_9	0,03990113
		a_{19}	0,4176895	b_{19}	-0,013063	d_{10}	0,00283456
		a_{20}	0,011137	b_{20}	-0,001529	L/L_p	0,62205883
		a_{21}	0,2176374	b_{21}	-0,012568		
		a_{22}	0	b_{22}	0,0097479		
		a_{23}	0,8463023	b_{23}	0,0598815		
		a_{24}	0,1313981	b_{24}	0,0079661		
		a_{25}	0	b_{25}	0,006925		
		a_{26}	-0,885956	b_{26}	-0,018588		
		τ	5,2333372	R/Δ	0,1467347		

Tablica 21. Izračunati regresijski koeficijenti za brzinu 6 m/s, model C3

v , m/s	Fn	a		b		c	
6	2,942497	a_0	5,140950057	b_0	0,172787416	c_0	1,391066704
		a_1	-1,73945339	b_1	-0,03576150	c_1	0,760259787
		a_2	-1,43078508	b_2	-0,03421092	c_2	0,361233668
		a_3	0,109498471	b_3	-0,02022514	c_3	0,408953285
		a_4	-1,93281268	b_4	0,001127503	c_4	0,361903656
		a_5	-0,15241722	b_5	0,016539749	$S/\sqrt{3}^2$	4,912944175
		a_6	-0,81056004	b_6	-0,00025646		
		a_7	0,018016855	b_7	-0,03342328		
		a_8	0,018016855	b_8	-0,01967266	d	
		a_9	-0,82642313	b_9	0,00789956	d_0	0,565684617
		a_{10}	2,008819398	b_{10}	0,076608897	d_1	-0,07337092
		a_{11}	0,703953489	b_{11}	0,003020918	d_2	0,034107163
		a_{12}	-0,03143697	b_{12}	-0,00466414	d_3	0,081311513
		a_{13}	-2,99745868	b_{13}	-0,01720767	d_4	0,012904596
		a_{14}	-0,13724120	b_{14}	-0,09396986	d_5	-0,20252765
		a_{15}	-0,02644270	b_{15}	0,005710607	d_6	0,006542768
		a_{16}	0,696817497	b_{16}	0	d_7	0,001237188
		a_{17}	-0,28974763	b_{17}	-0,00609134	d_8	0,036909744
		a_{18}	0,046883176	b_{18}	-0,00152733	d_9	0,041154396
		a_{19}	-0,21020196	b_{19}	-0,02843323	d_{10}	0,017814794
		a_{20}	0,010574695	b_{20}	0,009752509	L/L_p	0,62305567
		a_{21}	0,643990863	b_{21}	-0,00731528		
		a_{22}	0	b_{22}	0,01334501		
		a_{23}	1,35202568	b_{23}	0,077042741		
		a_{24}	0,0243477	b_{24}	0,006594735		
		a_{25}	0	b_{25}	0,012602729		
		a_{26}	-2,60357330	b_{26}	-0,04186359		
		τ	5,374831258	R/Δ	0,149899571		

Tablica 22. Izračunati regresijski koeficijenti za brzinu 6,5 m/s, model C3

v , m/s	Fn	a		b		c	
6,5	3,187705	a_0	4,770827591	b_0	0,142585033	c_0	1,380490336
		a_1	-1,28228148	b_1	-0,02780085	c_1	0,733470106
		a_2	-0,94730574	b_2	-0,05364085	c_2	0,34799136
		a_3	0,453404908	b_3	-0,02526761	c_3	0,337946494
		a_4	-1,32984067	b_4	0,017707523	c_4	0,358082513
		a_5	0,209077757	b_5	0,029439909	$S/\sqrt{3}$	4,450048994
		a_6	-0,93974752	b_6	-0,01207360		
		a_7	-0,05006336	b_7	-0,04510011		
		a_8	-0,05006336	b_8	-0,03003787	d	
		a_9	-0,53850092	b_9	0,01385675	d_0	0,551948909
		a_{10}	1,046086513	b_{10}	0,044223775	d_1	-0,03489419
		a_{11}	0,629273929	b_{11}	-0,00620268	d_2	0,05440129
		a_{12}	-0,06618017	b_{12}	-0,01073419	d_3	0,118420609
		a_{13}	-2,24754776	b_{13}	0,022027333	d_4	0,02832853
		a_{14}	0,469271191	b_{14}	-0,07562667	d_5	-0,15742386
		a_{15}	0,00956365	b_{15}	0,009730877	d_6	-0,00058015
		a_{16}	0,676134481	b_{16}	0	d_7	-0,00422093
		a_{17}	-0,52980664	b_{17}	-0,01763410	d_8	0,053659963
		a_{18}	-0,36502379	b_{18}	-0,01421596	d_9	0,050983819
		a_{19}	-0,42540565	b_{19}	-0,03221477	d_{10}	0,035355217
		a_{20}	-0,06255378	b_{20}	0,021759417	L/L_p	0,627385151
		a_{21}	0,707470943	b_{21}	-0,00703546		
		a_{22}	0	b_{22}	0,019194705		
		a_{23}	0,459163582	b_{23}	0,038128791		
		a_{24}	-0,36374703	b_{24}	-0,00031944		
		a_{25}	0	b_{25}	0,01813372		
		a_{26}	-2,24734608	b_{26}	-0,01339749		
		τ	5,22363889	R/Δ	0,119182402		

Tablica 23. Izračunati regresijski koeficijenti za brzinu 7 m/s, model C3

$v, \text{ m/s}$	Fn	a		b		c	
7	3,432914	a_0	4,1593949	b_0	0,0690387	c_0	1,29913855
		a_1	-1,089491	b_1	-0,02138	c_1	0,72281835
		a_2	-0,519497	b_2	-0,085072	c_2	0,31910214
		a_3	0,0824471	b_3	-0,046926	c_3	0,2420228
		a_4	-0,685759	b_4	0,0455729	c_4	0,35868738
		a_5	0,6229785	b_5	0,0592802	$S/\sqrt{3}^2$	3,73479277
		a_6	-0,624281	b_6	-0,02768		
		a_7	0,5099757	b_7	-0,052511		
		a_8	-0,574754	b_8	-0,053615	d	
		a_9	-0,252091	b_9	0,02361	d_0	0,50204004
		a_{10}	-1,934175	b_{10}	-0,062188	d_1	-0,0718702
		a_{11}	0,6058402	b_{11}	-0,01779	d_2	0,0118971
		a_{12}	-0,065127	b_{12}	-0,014137	d_3	0,11077167
		a_{13}	0,266292	b_{13}	0,1095845	d_4	0,01840837
		a_{14}	1,6155643	b_{14}	-0,004123	d_5	-0,2951852
		a_{15}	-0,01062	b_{15}	0,0175997	d_6	0,03850248
		a_{16}	-0,003085	b_{16}	0	d_7	-0,0007093
		a_{17}	-0,064927	b_{17}	-0,03442	d_8	0,08702345
		a_{18}	-1,163597	b_{18}	-0,039009	d_9	0,08861953
		a_{19}	-0,100209	b_{19}	-0,018872	d_{10}	0,04279964
		a_{20}	-0,355534	b_{20}	0,0300077	L/L_p	0,59934377
		a_{21}	0,0585557	b_{21}	-0,01927		
		a_{22}	0	b_{22}	0,0277162		
		a_{23}	-1,663135	b_{23}	-0,061661		
		a_{24}	-0,796317	b_{24}	-0,013843		
		a_{25}	0	b_{25}	0,0241436		
		a_{26}	0,3649894	b_{26}	0,0722578		
		τ	5,0350116	R/Δ	0,050753		

Tablica 24. Izračunati regresijski koeficijenti za brzinu 7,5 m/s, model C3

v , m/s	Fn	a		b		c	
7,5	3,678122	a_0	3,680658533	b_0	-0,01695993	c_0	1,114555732
		a_1	-1,26209462	b_1	-0,02316221	c_1	0,725105532
		a_2	-0,23199214	b_2	-0,12649643	c_2	0,290503409
		a_3	-0,56137221	b_3	-0,07145824	c_3	0,141920197
		a_4	-0,24284719	b_4	0,073873649	c_4	0,353939783
		a_5	0,733963351	b_5	-0,07145824	$S/\sqrt{3}$	2,858716014
		a_6	-0,02958526	b_6	-0,04716959		
		a_7	-1,30024440	b_7	-0,06103574		
		a_8	-1,30024440	b_8	-0,09402195	d	
		a_9	-0,17149611	b_9	0,037852214	d_0	0,432952481
		a_{10}	-4,88698986	b_{10}	-0,17995357	d_1	-0,15920023
		a_{11}	0,437824561	b_{11}	-0,04660816	d_2	-0,08668254
		a_{12}	-0,02632109	b_{12}	-0,01509707	d_3	0,065444517
		a_{13}	2,816124448	b_{13}	0,205490642	d_4	-0,01409316
		a_{14}	2,524146857	b_{14}	0,073749723	d_5	-0,54520298
		a_{15}	-0,09071370	b_{15}	0,030155358	d_6	0,092538654
		a_{16}	-1,07054546	b_{16}	0	d_7	0,012409093
		a_{17}	1,19862943	b_{17}	-0,04329735	d_8	0,140382054
		a_{18}	-1,87170465	b_{18}	-0,06587619	d_9	0,155889518
		a_{19}	0,479373197	b_{19}	0,003026287	d_{10}	0,040553745
		a_{20}	-1,14658282	b_{20}	0,035192115	L/L_p	0,578617061
		a_{21}	-1,11532830	b_{21}	-0,04650495		
		a_{22}	0	b_{22}	0,039894758		
		a_{23}	-3,53876265	b_{23}	-0,17390850		
		a_{24}	-1,03571889	b_{24}	-0,03432263		
		a_{25}	0	b_{25}	0,032262581		
		a_{26}	3,34147156	b_{26}	0,16808898		
		τ	4,751185962	R/Δ	-0,02481205		

Tablica 25. Izračunati regresijski koeficijenti za brzinu 2,5 m/s, model C4

v , m/s	Fn	a		b		c	
2,5	1,2914631	a_0	2,528248625	b_0	0,082958876	c_0	4,712815278
		a_1	-1,51342809	b_1	-0,043061771	c_1	0,500041869
		a_2	-3,04607513	b_2	-0,030719251	c_2	-0,014981358
		a_3	-1,34469151	b_3	-0,053584049	c_3	0,146570759
		a_4	-2,34667705	b_4	0,001655475	c_4	-0,015891673
		a_5	0,762439535	b_5	0,007694435	$S/\sqrt{V}^{2/3}$	6,925724314
		a_6	1,247882809	b_6	0,013254638		
		a_7	0,392999431	b_7	0,000473691		
		a_8	1,83661912	b_8	0,003483123	d	
		a_9	-0,39996196	b_9	-0,011314811	d_0	0,610934547
		a_{10}	0,496752573	b_{10}	-0,021478384	d_1	-0,238901486
		a_{11}	0,735051396	b_{11}	0,016796255	d_2	-0,15402388
		a_{12}	0,002356128	b_{12}	0,000658676	d_3	-0,065405758
		a_{13}	0,855812243	b_{13}	0,046629705	d_4	-0,200770498
		a_{14}	1,922656921	b_{14}	0,01898478	d_5	-0,288590894
		a_{15}	-0,01945259	b_{15}	0,006591717	d_6	-0,000203435
		a_{16}	-0,63077145	b_{16}	0	d_7	0,00120027
		a_{17}	-0,86804508	b_{17}	-0,000479167	d_8	0,047465491
		a_{18}	-0,02033466	b_{18}	-0,000568099	d_9	0,054732088
		a_{19}	-0,98722512	b_{19}	-0,0025953	d_{10}	-0,00098395
		a_{20}	0,00081454	b_{20}	-0,001151887	L/L_p	0,786114333
		a_{21}	-0,49032748	b_{21}	-0,005314906		
		a_{22}	0	b_{22}	-0,00751451		
		a_{23}	-1,58408833	b_{23}	-0,018291426		
		a_{24}	-0,08197517	b_{24}	-0,002247096		
		a_{25}	0	b_{25}	-0,01932282		
		a_{26}	-0,65994890	b_{26}	0,023167404		
		τ	2,812564169	R/Δ	0,080652897		

Tablica 26. Izračunati regresijski koeficijenti za brzinu 3 m/s, model C4

v , m/s	Fn	a		b		c	
3	1,549755	a_0	2,74700958	b_0	0,097190279	c_0	3,96692578
		a_1	-1,4237818	b_1	-0,04449923	c_1	0,52279603
		a_2	-3,28566155	b_2	-0,03591834	c_2	0,04805442
		a_3	-2,54682834	b_3	-0,06732273	c_3	0,23194523
		a_4	-2,01984465	b_4	0,01549384	c_4	0,05126005
		a_5	1,20477722	b_5	9,50745E-05	$S\sqrt{V}^{2/3}$	6,947842099
		a_6	1,200983687	b_6	0,016173951		
		a_7	1,634965554	b_7	-0,00185038		
		a_8	1,634965554	b_8	0,010691532	d	
		a_9	-0,00415935	b_9	-0,00662685	d_0	0,6778593
		a_{10}	-1,13987357	b_{10}	-0,05026955	d_1	-0,17332579
		a_{11}	0,91403568	b_{11}	0,016705368	d_2	-0,04452519
		a_{12}	0,028238177	b_{12}	-0,00209351	d_3	-0,01049757
		a_{13}	2,062729508	b_{13}	0,060967352	d_4	-0,14250208
		a_{14}	3,011738504	b_{14}	0,031415045	d_5	-0,20149681
		a_{15}	-0,06328978	b_{15}	0,001070438	d_6	0,015544773
		a_{16}	-0,28940690	b_{16}	0	d_7	0,007741897
		a_{17}	-1,60974603	b_{17}	0,000749508	d_8	0,007564239
		a_{18}	0,020758486	b_{18}	0,00051305	d_9	-0,00156667
		a_{19}	-0,17616336	b_{19}	0,000400281	d_{10}	-0,01027232
		a_{20}	0,001120646	b_{20}	0,003567738	L/L_p	0,813954828
		a_{21}	-0,05672996	b_{21}	-0,00138058		
		a_{22}	0	b_{22}	-0,00318691		
		a_{23}	-2,34524424	b_{23}	-0,03499259		
		a_{24}	-0,86782365	b_{24}	-0,00679840		
		a_{25}	0	b_{25}	-0,02057490		
		a_{26}	0,855573043	b_{26}	0,045381749		
		τ	2,873197684	R/Δ	0,088103623		

Tablica 27. Izračunati regresijski koeficijenti za brzinu 3,5 m/s, model C4

v , m/s	Fn	a		b		c	
3,5	1,808048	a_0	2,968724623	b_0	0,099439483	c_0	3,142109282
		a_1	-1,58482693	b_1	-0,04354545	c_1	0,578938103
		a_2	-3,43244142	b_2	-0,03660641	c_2	0,13596962
		a_3	-3,59778115	b_3	-0,07530711	c_3	0,314203593
		a_4	-1,87825009	b_4	0,020703236	c_4	0,152409705
		a_5	1,305081153	b_5	0,000871439	$S/\nabla^{2/3}$	6,917567726
		a_6	1,003968357	b_6	0,017338201		
		a_7	0,960741128	b_7	-0,00121045		
		a_8	0,960741128	b_8	0,01070419	d	
		a_9	0,061475655	b_9	-0,00180588	d_0	0,693085051
		a_{10}	-3,26740825	b_{10}	-0,08057057	d_1	-0,16223293
		a_{11}	1,086770264	b_{11}	0,019537105	d_2	-0,00092572
		a_{12}	-0,01912138	b_{12}	-0,00120560	d_3	0,01682634
		a_{13}	3,218229508	b_{13}	0,072363266	d_4	-0,10546911
		a_{14}	3,516025617	b_{14}	0,043980857	d_5	-0,20742622
		a_{15}	0,000295375	b_{15}	-0,00101186	d_6	0,053540269
		a_{16}	-0,13489179	b_{16}	0	d_7	-0,00250172
		a_{17}	-1,56331534	b_{17}	-0,00038305	d_8	-0,02177782
		a_{18}	0,020543134	b_{18}	0,000249681	d_9	-0,02190003
		a_{19}	0,885622233	b_{19}	0,008778303	d_{10}	0,006896274
		a_{20}	0,002669397	b_{20}	0,002012192	L/L_p	0,82774233
		a_{21}	0,05729077	b_{21}	-0,00354436		
		a_{22}	0	b_{22}	0,002022485		
		a_{23}	-2,87774559	b_{23}	-0,04865222		
		a_{24}	-1,19128522	b_{24}	-0,00615918		
		a_{25}	0	b_{25}	-0,01587359		
		a_{26}	3,135051387	b_{26}	0,071647509		
		τ	2,912016933	R/Δ	0,089015464		

Tablica 28. Izračunati regresijski koeficijenti za brzinu 4 m/s, model C4

v , m/s	Fn	a		b		c	
4	2,0663409	a_0	3,516093816	b_0	0,105314156	c_0	2,386130041
		a_1	-1,97196146	b_1	-0,043635563	c_1	0,662542366
		a_2	-3,25390426	b_2	-0,032967684	c_2	0,222115094
		a_3	-3,71693752	b_3	-0,072685969	c_3	0,384596727
		a_4	-2,02710874	b_4	0,017183737	c_4	0,250028471
		a_5	0,937030146	b_5	0,008306086	$S/\sqrt{2/3}$	6,60853797
		a_6	0,749350971	b_6	0,017095068		
		a_7	0,965789769	b_7	-0,000458539		
		a_8	0,225736092	b_8	0,003253627	d	
		a_9	-0,21671370	b_9	0,001324339	d_0	0,655752588
		a_{10}	-3,84420793	b_{10}	-0,085220005	d_1	-0,191397027
		a_{11}	1,160315846	b_{11}	0,022841602	d_2	-0,014239315
		a_{12}	-0,02695762	b_{12}	0,002233548	d_3	0,007616373
		a_{13}	3,036664245	b_{13}	0,066885386	d_4	-0,082469466
		a_{14}	2,980313577	b_{14}	0,040052454	d_5	-0,314716404
		a_{15}	0,004332398	b_{15}	-0,000364231	d_6	0,087517118
		a_{16}	-0,18627359	b_{16}	0	d_7	-0,003366387
		a_{17}	-0,84550875	b_{17}	-0,00202915	d_8	-0,022017211
		a_{18}	-0,03796265	b_{18}	-0,00151539	d_9	-0,007004059
		a_{19}	1,475539473	b_{19}	0,014260859	d_{10}	0,01002802
		a_{20}	0,001579004	b_{20}	-0,003895725	L/L_p	0,790008215
		a_{21}	-0,11845916	b_{21}	-0,01020897		
		a_{22}	0	b_{22}	0,005360805		
		a_{23}	-2,53092217	b_{23}	-0,042513293		
		a_{24}	-0,92343640	b_{24}	-0,002142169		
		a_{25}	0	b_{25}	-0,009231973		
		a_{26}	4,007672682	b_{26}	0,077004437		
		τ	3,473044349	R/Δ	0,095748855		

Tablica 29. Izračunati regresijski koeficijenti za brzinu 4,5 m/s, model C4

v , m/s	Fn	a		b		c	
4,5	2,324633	a_0	4,26359183	b_0	0,124734462	c_0	1,82401162
		a_1	-2,29200886	b_1	-0,04419139	c_1	0,73809738
		a_2	-2,80231848	b_2	-0,02770056	c_2	0,29232810
		a_3	-2,88062014	b_3	-0,05890330	c_3	0,43305147
		a_4	-2,27301714	b_4	0,008115399	c_4	0,32018509
		a_5	0,34924527	b_5	0,014614886	$S/\nabla^{2/3}$	6,033782143
		a_6	0,37397005	b_6	0,01515329		
		a_7	-0,21536685	b_7	-0,00396467		
		a_8	-0,21536685	b_8	-0,00616505	d	
		a_9	-0,61855147	b_9	0,002877971	d_0	0,604479896
		a_{10}	-2,50408983	b_{10}	-0,04948082	d_1	-0,20735163
		a_{11}	1,100282507	b_{11}	0,022440671	d_2	-0,03516877
		a_{12}	-0,00384862	b_{12}	0,004639394	d_3	-0,00395525
		a_{13}	1,387829107	b_{13}	0,040129569	d_4	-0,06026564
		a_{14}	1,748432601	b_{14}	0,008804947	d_5	-0,40139616
		a_{15}	-0,03871012	b_{15}	0,001367946	d_6	0,092627356
		a_{16}	-0,15583769	b_{16}	0	d_7	0,003206535
		a_{17}	-0,09523664	b_{17}	-0,00220479	d_8	-0,00368223
		a_{18}	-0,03397975	b_{18}	-0,00171618	d_9	0,019596737
		a_{19}	1,377485575	b_{19}	0,009905677	d_{10}	0,00241061
		a_{20}	0,000563589	b_{20}	-0,00789601	L/L_p	0,702968115
		a_{21}	-0,21305519	b_{21}	-0,01528192		
		a_{22}	0	b_{22}	0,00709522		
		a_{23}	-1,29620447	b_{23}	-0,00893346		
		a_{24}	-0,37616478	b_{24}	0,003073467		
		a_{25}	0	b_{25}	-0,00236915		
		a_{26}	2,834404617	b_{26}	0,050263933		
		τ	4,252948636	R/Δ	0,115094885		

Tablica 30. Izračunati regresijski koeficijenti za brzinu 5 m/s, model C4

v , m/s	Fn	a	B	c			
5	2,58292	a_0	4,90796094	b_0	0,15350802	c_0	1,507793592
		a_1	-2,29369687	b_1	-0,04306738	c_1	0,77584258
		a_2	-2,22486076	b_2	-0,02501238	c_2	0,339461226
		a_3	-1,52055000	b_3	-0,03912758	c_3	0,449960054
		a_4	-2,35863779	b_4	-0,00058375	c_4	0,355398249
		a_5	-0,11681178	b_5	0,015664013	$S/\nabla^{2/3}$	5,464261811
		a_6	-0,13637098	b_6	0,010887972		
		a_7	-0,24883444	b_7	-0,01368914		
		a_8	-0,24883448	b_8	-0,01302829	d	
		a_9	-0,89478411	b_9	0,004027929	d_0	0,572790625
		a_{10}	-0,12606855	b_{10}	0,014557947	d_1	-0,17451685
		a_{11}	0,939516709	b_{11}	0,016578725	d_2	-0,02538978
		a_{12}	0,007610836	b_{12}	0,003284277	d_3	0,012731489
		a_{13}	-0,95641157	b_{13}	0,003281975	d_4	-0,03118056
		a_{14}	0,495738965	b_{14}	-0,04219812	d_5	-0,37517630
		a_{15}	-0,06613093	b_{15}	0,003038436	d_6	0,063727562
		a_{16}	0,13616455	b_{16}	0	d_7	0,007410554
		a_{17}	0,168161751	b_{17}	-0,00153450	d_8	0,016933496
		a_{18}	0,061079054	b_{18}	0,000243204	d_9	0,037009407
		a_{19}	0,758725073	b_{19}	-0,00482103	d_{10}	-0,00030332
		a_{20}	0,00648474	b_{20}	-0,00517346	L/L_p	0,635338542
		a_{21}	0,021016385	b_{21}	-0,01461833		
		a_{22}	0	b_{22}	0,008687719		
		a_{23}	0,271752175	b_{23}	0,040396375		
		a_{24}	0,053292754	b_{24}	0,007139379		
		a_{25}	0	b_{25}	0,004164871		
		a_{26}	0,293332759	b_{26}	0,002140205		
τ	4,976793407	R/Δ	0,140857209				

Tablica 31. Izračunati regresijski koeficijenti za brzinu 5,5 m/s, model C4

v , m/s	Fn	a		b		c	
5,5	2,8412188	a_0	5,172597509	b_0	0,173114766	c_0	1,399533884
		a_1	-1,93824815	b_1	-0,038526006	c_1	0,770343084
		a_2	-1,64506845	b_2	-0,029549941	c_2	0,360327141
		a_3	-0,24480126	b_3	-0,023093943	c_3	0,428439854
		a_4	-2,11962533	b_4	-0,001804607	c_4	0,363020505
		a_5	-0,22277918	b_5	0,015106795	$S/\nabla^{2/3}$	5,058746703
		a_6	-0,65583296	b_6	0,003581746		
		a_7	0,005545968	b_7	-0,027734716		
		a_8	-0,04739713	b_8	-0,017503595	d	
		a_9	-0,89989247	b_9	0,006339683	d_0	0,566093437
		a_{10}	1,750035012	b_{10}	0,068780705	d_1	-0,102202144
		a_{11}	0,759742808	b_{11}	0,007016384	d_2	0,016265252
		a_{12}	-0,01545209	b_{12}	-0,001996268	d_3	0,05998466
		a_{13}	-2,73246977	b_{13}	-0,018900134	d_4	0,00163505
		a_{14}	-0,14113695	b_{14}	-0,086287026	d_5	-0,252410522
		a_{15}	-0,04451582	b_{15}	0,004751583	d_6	0,020131996
		a_{16}	0,569095297	b_{16}	0	d_7	0,004032289
		a_{17}	-0,11397766	b_{17}	-0,003558788	d_8	0,031862917
		a_{18}	0,101540516	b_{18}	0,000408546	d_9	0,040783429
		a_{19}	0,015831098	b_{19}	-0,022927006	d_{10}	0,010588177
		a_{20}	0,014540666	b_{20}	0,004703844	L/L_p	0,651935412
		a_{21}	0,485263351	b_{21}	-0,009342266		
		a_{22}	0	b_{22}	0,01161127		
		a_{23}	1,291983209	b_{23}	0,075393869		
		a_{24}	0,112012877	b_{24}	0,0077524		
		a_{25}	0	b_{25}	0,010291966		
		a_{26}	-2,08882414	b_{26}	-0,037137455		
		τ	5,322390347	R/Δ	0,155057835		

Tablica 32. Izračunati regresijski koeficijenti za brzinu 6 m/s, model C4

v , m/s	Fn	a		b		c	
6	3,099514	a_0	4,945832068	b_0	0,158701565	c_0	1,387556807
		a_1	-1,43008254	b_1	-0,03074289	c_1	0,74230271
		a_2	-1,11561547	b_2	-0,04526598	c_2	0,355059423
		a_3	0,418752313	b_3	-0,02135942	c_3	0,367063563
		a_4	-1,56379434	b_4	0,010201349	c_4	0,359153906
		a_5	0,056824281	b_5	0,022940427	$S/\nabla^{2/3}$	4,642481803
		a_6	-0,94103990	b_6	-0,00739820		
		a_7	0,022564152	b_7	-0,04137901		
		a_8	0,022564152	b_8	-0,02515453	d	
		a_9	-0,65296063	b_9	0,011319183	d_0	0,560212222
		a_{10}	1,662111398	b_{10}	0,065045729	d_1	-0,04148503
		a_{11}	0,646159053	b_{11}	-0,00293323	d_2	0,052723149
		a_{12}	-0,05603750	b_{12}	-0,00874344	d_3	0,108954983
		a_{13}	-2,75234974	b_{13}	0,001810835	d_4	0,025263761
		a_{14}	0,162714244	b_{14}	-0,08883391	d_5	-0,15602666
		a_{15}	0,00042946	b_{15}	0,007929553	d_6	-0,00316770
		a_{16}	0,751817298	b_{16}	0	d_7	-0,00287258
		a_{17}	-0,49916193	b_{17}	-0,01260424	d_8	0,046342581
		a_{18}	-0,16671338	b_{18}	-0,00819136	d_9	0,045112278
		a_{19}	-0,41030997	b_{19}	-0,03273163	d_{10}	0,029621813
		a_{20}	-0,02090704	b_{20}	0,017689591	L/L_p	0,702979601
		a_{21}	0,754526752	b_{21}	-0,00604656		
		a_{22}	0	b_{22}	0,016807389		
		a_{23}	0,952170216	b_{23}	0,059687275		
		a_{24}	-0,20475035	b_{24}	0,002886014		
		a_{25}	0	b_{25}	0,016136213		
		a_{26}	-2,65902032	b_{26}	-0,03073127		
		τ	5,179713269	R/Δ	0,135813721		

Tablica 33. Izračunati regresijski koeficijenti za brzinu 6,5 m/s, model C4

v , m/s	Fn	a		b		c	
6,5	3,357804	a_0	4,353102934	b_0	0,09528682	c_0	1,335946713
		a_1	-1,10763105	b_1	-0,02284162	c_1	0,723615194
		a_2	-0,64241061	b_2	-0,07422149	c_2	0,32888919
		a_3	0,256499355	b_3	-0,03897131	c_3	0,273059666
		a_4	-0,8725286	b_4	0,036265421	c_4	0,358097166
		a_5	0,510980589	b_5	0,048482542	$S/\nabla^{2/3}$	3,980233524
		a_6	-0,76714754	b_6	-0,02248724		
		a_7	-0,36784119	b_7	-0,05058695		
		a_8	-0,36784117	b_8	-0,04463116	d	
		a_9	-0,32660155	b_9	0,020174538	d_0	0,521467205
		a_{10}	-0,88159196	b_{10}	-0,02361323	d_1	-0,05196559
		a_{11}	0,614988106	b_{11}	-0,01342555	d_2	0,032685939
		a_{12}	-0,07070960	b_{12}	-0,01346142	d_3	0,118704764
		a_{13}	-0,62793483	b_{13}	0,078930449	d_4	0,024410888
		a_{14}	1,244742851	b_{14}	-0,03026667	d_5	-0,23242846
		a_{15}	0,003733014	b_{15}	0,014695418	d_6	0,022183718
		a_{16}	0,274888535	b_{16}	0	d_7	-0,00308563
		a_{17}	-0,30388093	b_{17}	-0,02921647	d_8	0,074475063
		a_{18}	-0,89254533	b_{18}	-0,03039835	d_9	0,073425751
		a_{19}	-0,25043047	b_{19}	-0,02465890	d_{10}	0,042055388
		a_{20}	-0,22886906	b_{20}	0,028007766	L/L_p	0,713244247
		a_{21}	0,338254389	b_{21}	-0,01387134		
		a_{22}	0	b_{22}	0,024785088		
		a_{23}	-0,93836388	b_{23}	-0,02612223		
		a_{24}	-0,67550059	b_{24}	-0,00896107		
		a_{25}	0	b_{25}	0,022181843		
		a_{26}	-0,61401059	b_{26}	0,041379514		
		τ	4,805914233	R/Δ	0,071884189		

Tablica 34. Izračunati regresijski koeficijenti za brzinu 7 m/s, model C4

v , m/s	Fn	a		b		c	
7	3,6160966	a_0	3,76302332	b_0	0,002174836	c_0	1,167287305
		a_1	-1,19426164	b_1	-0,021458087	c_1	0,725653617
		a_2	-0,28001998	b_2	-0,115323829	c_2	0,296337704
		a_3	-0,41933875	b_3	-0,06654845	c_3	0,165983298
		a_4	-0,32443194	b_4	0,067740306	c_4	0,357324477
		a_5	0,754713593	b_5	0,087767655	$S/\nabla^{2/3}$	3,080548361
		a_6	-0,17748164	b_6	-0,041874584		
		a_7	0,735940359	b_7	-0,058002949		
		a_8	-1,14054499	b_8	-0,082345942	d	
		a_9	-0,16393957	b_9	0,033791478	d_0	0,44830692
		a_{10}	-4,35569819	b_{10}	-0,156584323	d_1	-0,138396726
		a_{11}	0,51398205	b_{11}	-0,036162857	d_2	-0,060253275
		a_{12}	-0,03662127	b_{12}	-0,014849682	d_3	0,077191167
		a_{13}	2,347754918	b_{13}	0,184998312	d_4	-0,004877556
		a_{14}	2,376458724	b_{14}	0,059051363	d_5	-0,487367644
		a_{15}	-0,06930276	b_{15}	0,026572089	d_6	0,082058
		a_{16}	-0,81493556	b_{16}	0	d_7	0,008885752
		a_{17}	0,835630757	b_{17}	-0,043155574	d_8	0,125676634
		a_{18}	-1,75797811	b_{18}	-0,060165405	d_9	0,137373038
		a_{19}	0,346249927	b_{19}	-0,001985695	d_{10}	0,040855191
		a_{20}	-0,87762638	b_{20}	0,033744738	L/L_p	0,685892453
		a_{21}	-0,81629144	b_{21}	-0,038460902		
		a_{22}	0	b_{22}	0,036361233		
		a_{23}	-3,23761992	b_{23}	-0,15003795		
		a_{24}	-1,00023332	b_{24}	-0,028499291		
		a_{25}	0	b_{25}	0,029858777		
		a_{26}	2,769700558	b_{26}	0,14845431		
		τ	4,638640013	R/Δ	-0,016110839		

Tablica 35. Izračunati regresijski koeficijenti za brzinu 7,5 m/s, model C4

v , m/s	Fn	a		b		c	
7,5	3,874389	a_0	3,72734201	b_0	-0,03441991	c_0	0,978646602
		a_1	-1,40931657	b_1	-0,03683454	c_1	0,690798037
		a_2	-0,29841146	b_2	-0,16300078	c_2	0,28782488
		a_3	-0,58162907	b_3	-0,06877561	c_3	0,081857449
		a_4	-0,14122051	b_4	0,080933804	c_4	0,317995931
		a_5	0,377791275	b_5	0,105363453	$S\sqrt{V}^{2/3}$	2,28100421
		a_6	0,153253968	b_6	-0,06551860		
		a_7	-1,30272449	b_7	-0,08142393		
		a_8	-1,30272449	b_8	-0,13413496	d	
		a_9	-0,32364975	b_9	0,052922626	d_0	0,434491071
		a_{10}	-4,01680118	b_{10}	-0,16407389	d_1	-0,15719028
		a_{11}	-0,10411808	b_{11}	-0,10552999	d_2	-0,13339450
		a_{12}	-0,03212641	b_{12}	-0,01868178	d_3	0,064163818
		a_{13}	2,162334466	b_{13}	0,217232555	d_4	-0,03516850
		a_{14}	2,282206911	b_{14}	0,052075967	d_5	-0,54078643
		a_{15}	-0,10387353	b_{15}	0,042497098	d_6	0,070462696
		a_{16}	-1,31789233	b_{16}	0	d_7	0,015137524
		a_{17}	2,102010049	b_{17}	-0,02395445	d_8	0,181910228
		a_{18}	-1,46872625	b_{18}	-0,06818384	d_9	0,20419654
		a_{19}	0,534219004	b_{19}	0,004454787	d_{10}	0,055784354
		a_{20}	-2,44399072	b_{20}	0,045284849	L/L_p	0,699130702
		a_{21}	-1,57889198	b_{21}	-0,07279927		
		a_{22}	0	b_{22}	0,054042289		
		a_{23}	-2,60184772	b_{23}	-0,18308478		
		a_{24}	-1,07396894	b_{24}	-0,05536536		
		a_{25}	0	b_{25}	0,042555763		
		a_{26}	2,65208848	b_{26}	0,164527894		
		τ	4,797869439	R/Δ	-0,04227203		

Kako bi se odredili regresijski koeficijent d potrebno je odrediti neovisni koeficijent x_5' , Tablice 36. i 37.

Tablica 36. Neovisni koeficijent x_5' za model C3

v , m/s	Fn	x_5'
2,5	1,226	-0,470278
3	1,4712	-0,432267
3,5	1,7165	-0,43996
4	1,9617	-0,357321
4,5	2,2069	-0,218941
5	2,4521	-0,063394
5,5	2,6973	0,0466674
6	2,9425	0,0749663
6,5	3,1877	0,0447278
7	3,4329	0,0070023
7,5	3,6781	-0,049763

Tablica 37. Neovisni koeficijent x_5' za model C4

v , m/s	Fn	x_5'
2,5	1,2915	-0,43748716
3	1,5497	-0,42536046
3,5	1,8080	-0,41759661
4	2,0663	-0,30539113
4,5	2,3246	-0,14941027
5	2,5829	-0,00464131
5,5	2,8412	0,064478069
6	3,0995	0,035942654
6,5	3,3578	-0,03881715
7	3,6161	-0,07227199
7,5	3,8744	-0,04042611

Rezultati dobiveni metodom Radojčić prikazani su u Tablicama 38. i 39. za modele C3 i C4. Mjerilo geometrijske sličnosti za model C3 iznosi 0,119, a za model C4 0,107.

Tablica 38. Rezultati proračuna metodom Radojčić za model C3

v , m/s	τ , °	R/Δ	$S/\nabla^{2/3}$	$R/\Delta(kor)$	R , N	$RD(R_T)$, %	$RD(\tau)$, %
2.5	2.6486	0.0740	6.9401	0.0814	58.9690	-4.1396	16,679
3	2.8387	0.0857	6.9345	0.0957	69.3687	-4.8950	3,2242
3.5	2.8002	0.0886	6.9512	0.1017	73.7260	-9.3462	-7,5841
4	3.2134	0.0920	6.7743	0.1082	78.4234	-12.9543	4,331
4.5	3.9053	0.1045	6.3143	0.1234	89.4062	-10.8399	18,702
5	4.6830	0.1260	5.7344	0.1474	106.7881	-4.301	19,161
5.5	5.2333	0.1467	5.2684	0.1705	123.5470	3.8443	19,483
6	5.3748	0.1499	4.9129	0.1757	127.3229	2.1874	22,434
6.5	5.2236	0.1192	4.4500	0.1460	105.8275	-19.0058	24,669
7	5.0350	0.0508	3.7348	0.0767	55.5891	-59.0798	24,629
7.5	4.7512	-0.0248	2.8587	-0.0022	-1.5887	-101.1089	25,693

Tablica 39. Rezultati proračuna metodom Radojčić za model C4

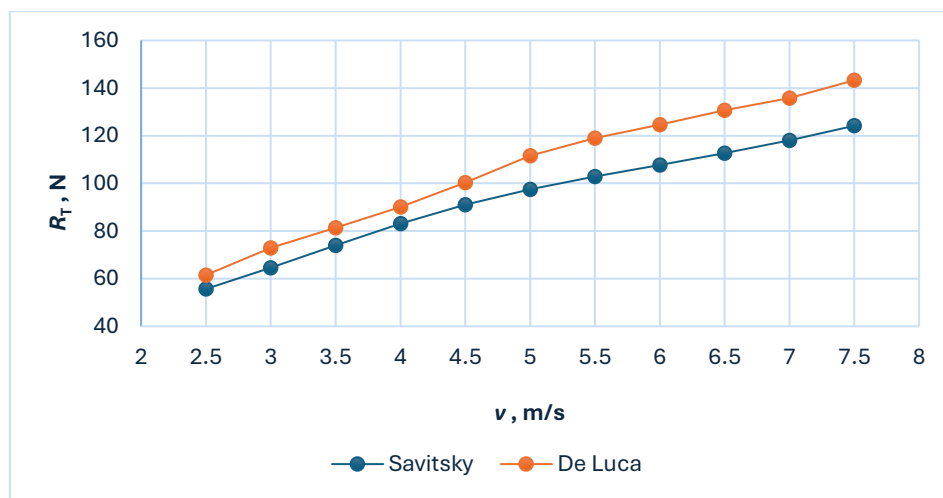
v , m/s	τ , °	R/Δ	$S/\nabla^{2/3}$	$R/\Delta(kor)$	R , N	$RD(R_T)$, %	$RD(\tau)$, %
2.5	2.8126	0.0807	6.9257	0.0891	47.3041	19.287	51,2131
3	2.8732	0.0881	6.9478	0.0997	52.9126	8.3896	36,8189
3.5	2.9120	0.0890	6.9176	0.1041	55.2363	-0.3363	21,334
4	3.4730	0.0957	6.6085	0.1141	60.5804	-1.2726	37,8192
4.5	4.2529	0.1151	6.0338	0.1363	72.3638	3.9418	63,5749
5	4.9768	0.1409	5.4643	0.1646	87.3552	8.3112	72,8053
5.5	5.3224	0.1551	5.0587	0.1809	95.9977	8.5617	50,7759
6	5.1797	0.1358	4.6425	0.1629	86.4756	-8.5111	35,9504
6.5	4.8059	0.0719	3.9802	0.0986	52.3141	-47.6491	22,2879
7	4.6386	-0.0161	3.0805	0.0076	4.0574	-96.1469	19,2452
7.5	4.7979	-0.0423	2.2810	-0.0225	-11.9376	-110.574	28,6292

Na temelju rezultata dobivenih za model C3 vidljivo je kako su relativne devijacije dobivene za ukupni otpor veće od onih dobivenih za kut trima. Najveće odstupanje ukupnog otpora dobivenog metodom Radojčić u odnosu na eksperimentalne rezultate iznosi čak -101,1089 % pri brzini od 7,5 m/s, dok je najveće odstupanje za kut trima 25,693 %. Moguće je uočiti kako su odstupanja ukupnog otpora manja pri manjim brzinama, dok su odstupanja kuta trima veća pri manjim brzinama. Rezultati dobiveni metodom Radojčić za model C4 pokazuju da su odstupanja ukupnog otpora i kuta trima najvećeg od svih dobivenih rezultata. Vidljivo je kako kut trima pri manjim brzinama ima veću relativnu devijaciju, dok su relativne devijacije ukupnog otpora veće pri većim brzinama.

7. GRAFIČKA USPOREDBA REZULTATA

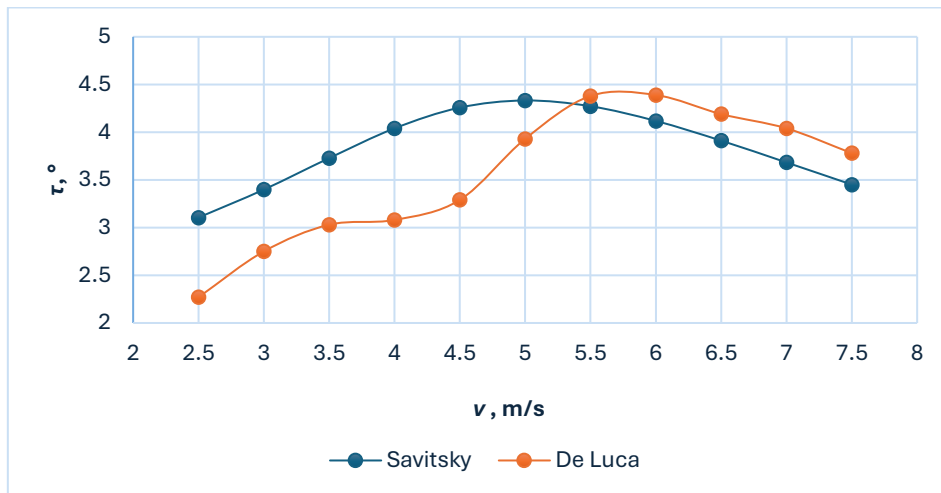
U ovom poglavlju dana je grafička usporedba rezultata dobivenih primjenom metoda Savitsky i Radojčić s eksperimentalnim rezultatima kako bi se omogućila vizualna usporedba istih. Cilj usporedbe je analizirati točnost i primjenjivost navedenih metoda u postupku preliminarnog projektiranja brzih brodova.

7.1. Usporedba rezultata dobivenih primjenom metode Savitsky s eksperimentalnim rezultatima



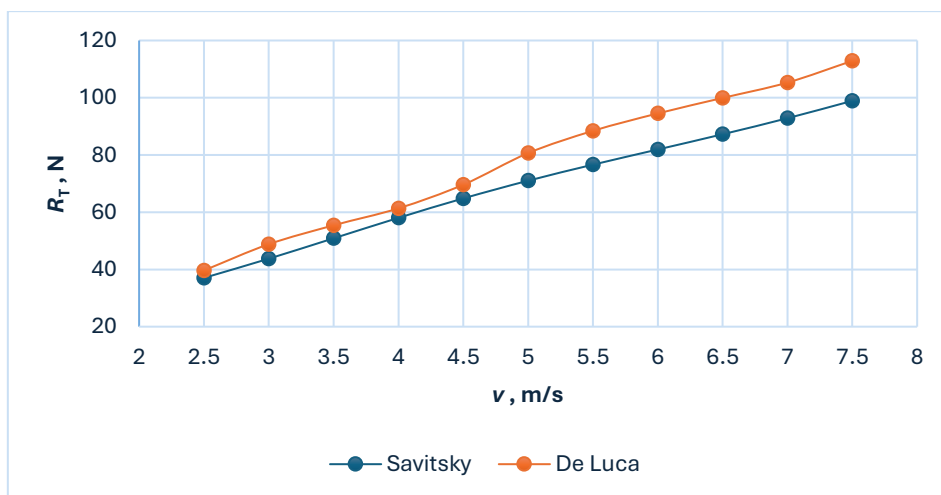
Slika 75. Usporedba ukupnog otpora za model C3

Na Slici 75. dan je grafički prikaz ukupnog otpora u ovisnosti o brzini. Moguće je zaključiti kako trend rezultata dobivenih metodom Savitsky odgovara trendu eksperimentalnih rezultata te kako je ostvarena zadovoljavajuća točnost. S druge strane, na Slici 76. prikazan je kut trima u ovisnosti o brzini, gdje je vidljivo kako kut trima izračunate metodom Savitsky u značajnijoj mjeri odstupa od eksperimentalnih rezultata u području brzina do 5 m/s. Pri brzinama većim od 5 m/s dobivena je zadovoljavajuća točnost kuta trima.

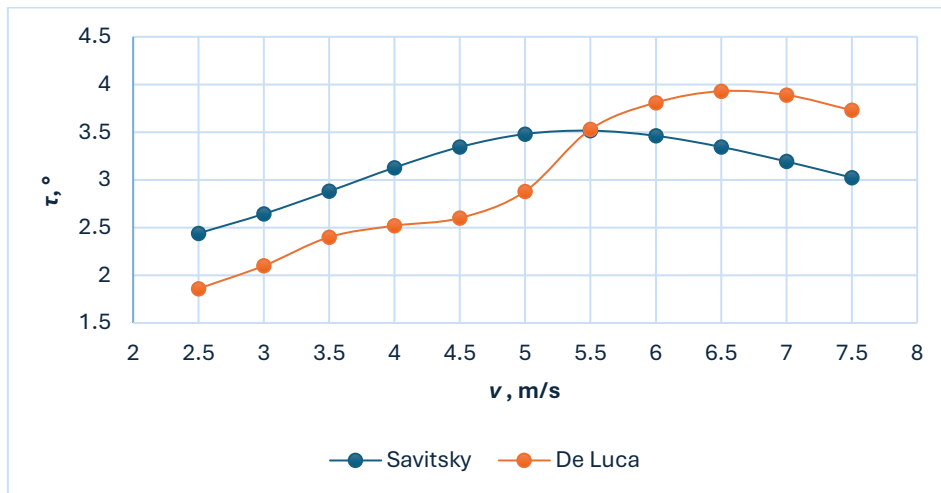


Slika 76. Usporedba kuta trima za model C3

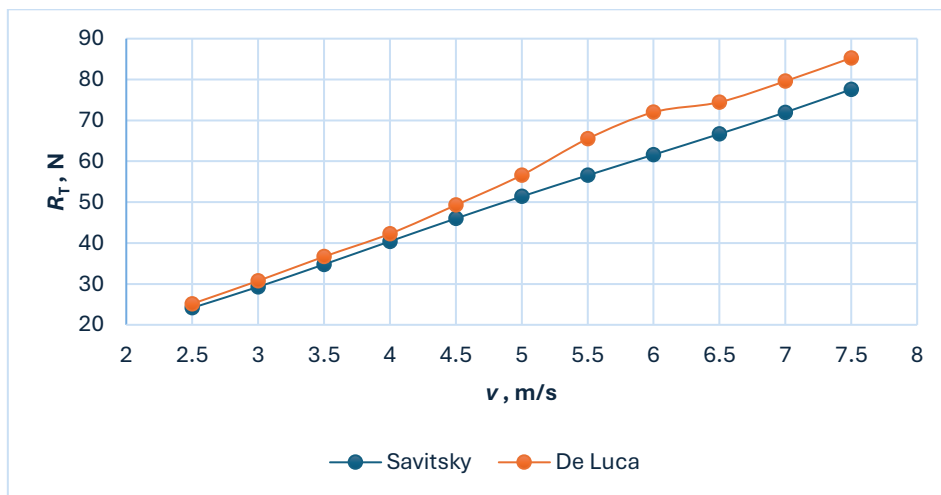
Na Slikama 77. i 78. prikazani su rezultati ukupnog otpora i kuta trima za model C4. Vidljivo je kako je ukupni otpor dobiven primjenom metode Savitsky zadovoljavajuće točnosti, posebice u području brzina do 4,5 m/s. S druge strane kut trima određen metodom Savitsky pokazuje drugačiji trend u odnosu na eksperimentalne rezultate uz značajnija odstupanja u čitavom području analiziranih brzina osim u slučaju brzine od 5,5 m/s. Slično je moguće uočiti i kod modela C5, Slike 79. i 80., gdje su također dobivena značajnija odstupanja za kut trima te zadovoljavajući rezultati za ukupni otpor.



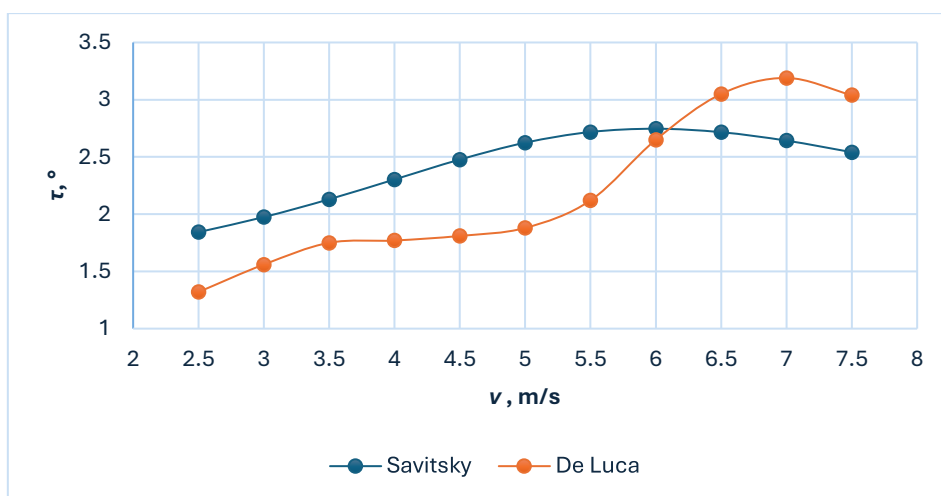
Slika 77. Usporedba ukupnog otpora za model C4



Slika 78. Usporedba kuta trima za model C4

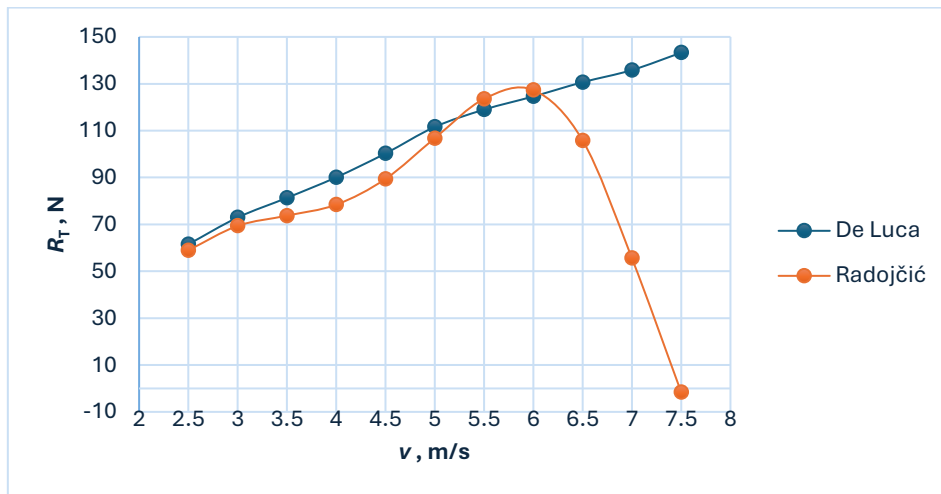


Slika 79. Usporedba ukupnog otpora za model C5

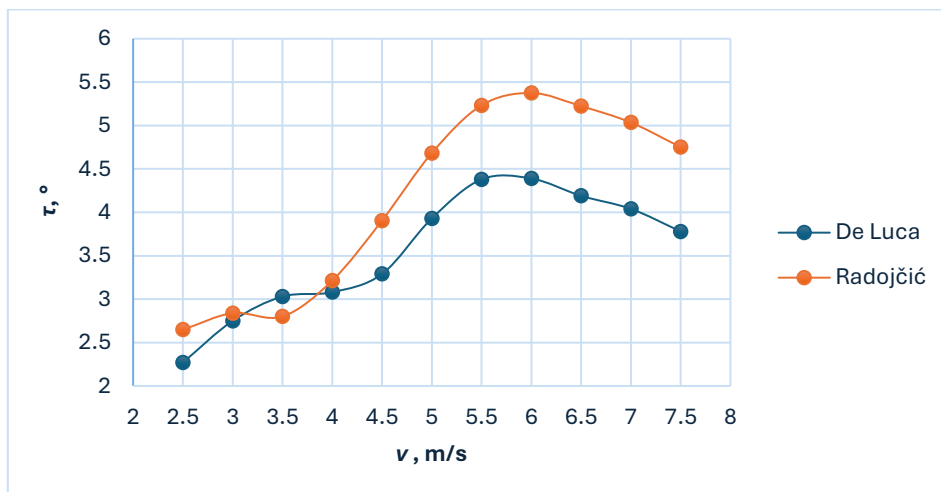


Slika 80. Usporedba kuta trima za model C5

7.2. Usporedba rezultata dobivenih primjenom metode Radojčić s eksperimentalnim rezultatima



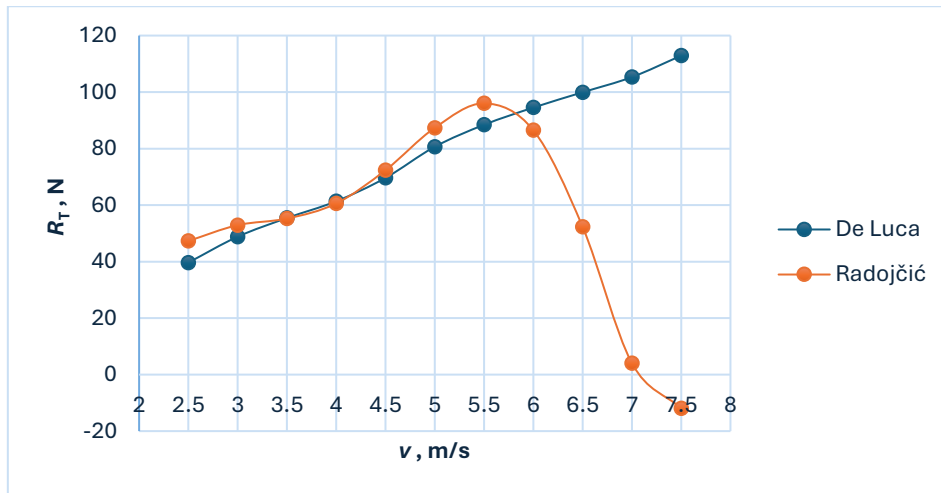
Slika 81. Usporedba ukupnog otpora za model C3



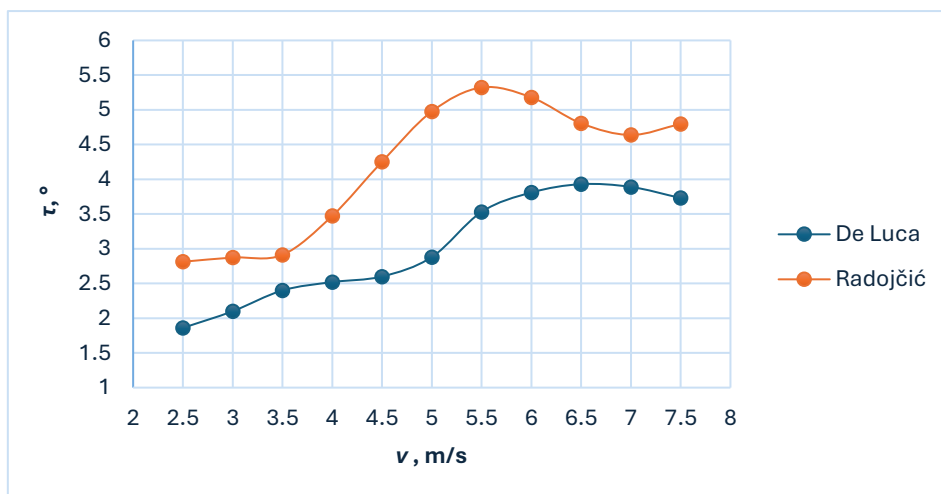
Slika 82. Usporedba kuta trima za model C3

Na Slikama 81. i 82. prikazani su rezultati za model C3 dobiveni metodom Radojčić u usporedbi s eksperimentalnim rezultatima. Na Slici 81. uočava se značajnije odstupanje između izračunatih i eksperimentalnih vrijednosti ukupnog otpora za brzine veće od 6 m/s. Za brzine veće od 6 m/s rezultati dobiveni metodom Radojčić su nepouzdana. Trend krivulje kuta trima dobiven primjenom metode Radojčić prati trend krivulje eksperimentalnih vrijednosti, uz nešto veća odstupanja pri većim brzinama. Kod modela C4, moguće je također uočiti značajnija odstupanja između izračunatih i eksperimentalnih vrijednosti ukupnog otpora za brzine veće od 6 m/s, Slika 83. Kut trima određen primjenom metode Radojčić za slučaj modela C4 pokazuje

nešto izraženija odstupanja te ne prati trend krivulje kuta trima dobiven eksperimentalnim putem, Slika 84.



Slika 83. Usporedba ukupnog otpora za model C4



Slika 84. Usporedba kuta trima za model C4

8. ZAKLJUČAK

U ovom radu provedena je detaljna analiza točnosti i primjenjivosti metoda Savitsky i Radojčić za procjenu ukupnog otpora i kuta trima brzih brodova pri različitim brzinama plovidbe. Dobiveni rezultati uspoređeni su s eksperimentalnim podacima modela brodova razvijenih u okviru sistematske serije „Naples Systematic Series“. Cilj usporedbe bio je utvrditi razinu točnosti u predviđanju ukupnog otpora i kuta trima pomoću navedenih metoda u okviru preliminarnog projektiranja brzih brodova. Dok je metoda Savitsky primijenjena na sva tri modela, uslijed ograničenja metode Radojčić model C5 je izostavljen iz analize. Rezultati pokazuju kako je primjenom obje metode moguće procijeniti ukupni otpor broda sa zadovoljavajućom točnošću, posebice pri nižim brzinama plovidbe, dok su dobivena odstupanja za kut trima nešto izraženija.

Trend krivulje ukupnog otpora dobiven primjenom metode Savitsky zadovoljavajuće prati trend krivulje eksperimentalnih podataka u cijelom rasponu brzina. S druge strane, trend krivulje ukupnog otpora dobiven primjenom metode Radojčić prati eksperimentalne podatke pri nižim brzinama (do 5 m/s), dok su s porastom brzine odstupanja veća. Najmanja odstupanja ukupnog otpora dobivena su za model C5 primjenom metode Savitsky u cijelom rasponu analiziranih brzina, što ukazuje na visoku razinu pouzdanosti ove metode u određivanju ukupnog otpora. S druge strane, iako rezultati dobiveni primjenom metode Radojčić pokazuju zadovoljavajuću točnost pri manjim brzinama, pri većim brzinama rezultati su nepouzdana. Kut trima određen primjenom obje metode pokazuje značajnija odstupanja u odnosu na eksperimentalne rezultate. Trendovi krivulja kuta trima ne pokazuju u većoj mjeri slaganje s trendom krivulje eksperimentalno izmjerenih kutova trima, što upućuje na ograničenja obje metode u točnom predviđanju ovog parametra.

Rezultati provedene analize ukazuju na to da metoda Savitsky daje točnije vrijednosti ukupnog otpora u usporedbi s metodom Radojčić u cijelom analiziranom rasponu brzina, što je vidljivo iz izračunatih relativnih devijacija u odnosu na eksperimentalno dostupne podatke. S druge strane ni jedna od analiziranih metoda ne omogućuje pouzdano predviđanje dinamičkog kuta trima u okviru preliminarnog projektiranja brzih brodova.

LITERATURA

- [1] Faltinsen, O. M. (2005). Hydrodynamics of high-speed marine vehicles. *Cambridge University Press google schola*, 3, 386-391.
- [2] Degiuli, N., Farkas, A., Martić, I., Zeman, I., Ruggiero, V., & Vasiljević, V. (2021). Numerical and experimental assessment of the total resistance of a yacht. *Brodogradnja: An International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering for Research and Development*, 72(3), 61-80.
- [3] Farkas, A., Degiuli, N., Tomljenović, I., & Martić, I. (2024). Numerical investigation of interference effects for the Delft 372 catamaran. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 238(2), 385-394.
- [4] Hajiabadi, A., Shafaghat, R., & Moghadam, H. K. (2018). A study into the effect of loading conditions on the resistance of asymmetric high-speed catamaran based on experimental tests. *Alexandria engineering journal*, 57(3), 1713-1720.
- [5] Ashkezari, A. Z., & Moradi, M. (2021). Three-dimensional simulation and evaluation of the hydrodynamic effects of stern wedges on the performance and stability of high-speed planing monohull craft. *Applied Ocean Research*, 110, 102585.
- [6] Amoroso, C. L., Liverani, A., & Caligiana, G. (2018). Numerical investigation on optimum trim envelope curve for high performance sailing yacht hulls. *Ocean Engineering*, 163, 76-84.
- [7] Viola, I. M., Enlander, J., & Adamson, H. (2014). Trim effect on the resistance of sailing planing hulls. *Ocean engineering*, 88, 187-193.
- [8] Shajaripour, M., & Zeraatgar, H. (2024). Hydrodynamic performance comparison of planing catamarans with mono-hulls using numerical and experimental methods. *Applied Ocean Research*, 153, 104283.
- [9] Wang, L., Qin, S., Fang, H., Wu, D., Huang, B., & Wu, R. (2021). Inhibition on porpoising instability of high-speed planing vessel by ventilated cavity. *Applied Ocean Research*, 111, 102688.
- [10] Liu, X., Yang, J., Wu, D., Hou, L., Du, L., & Wan, Q. (2024). Experimental study of a high-speed suspension hexamaran in calm water. *Ocean Engineering*, 311, 118778.

- [11] Deng, R., Ren, H., Li, H., Huang, S., & Wu, T. (2024). Numerical study on the hydrodynamic performance of a high-speed taxiing fuselage: Investigation on the affecting factors in the numerical simulation. *Ocean Engineering*, 309, 118499.
- [12] Soma, G. C., & Vijayakumar, R. (2023). Hydrodynamic performance of high-speed displacement vessel with hull vane. *Ocean Engineering*, 285, 115362.
- [13] Shen, H., Xiao, Q., Zhou, J., Su, Y., & Bi, X. (2022). Design of hydrofoil for the resistance improvement of planing boat based on CFD technology. *Ocean Engineering*, 255, 111413.
- [14] Song, Y., Du, X., Jiang, Y., & Hu, Y. (2023). Numerical investigation on the resistance characteristics and motion characteristics of the ultra-high-speed aerodynamically alleviated marine vehicle in regular head waves. *Ocean Engineering*, 289, 116284.
- [15] Tripathi, S., & Vijayakumar, R. (2024). Numerical and experimental study of stern flaps impact on resistance and propulsion of high-speed displacement ships. *Ocean Engineering*, 292, 116483.
- [16] Mansoori, M., Fernandes, A. C., & Ghassemi, H. (2017). Interceptor design for optimum trim control and minimum resistance of planing boats. *Applied Ocean Research*, 69, 100-115.
- [17] Suwasono, B., Akbar, H. M. A., Sahir, A., & Munazid, A. (2017). Outrigger RC boat model hull development as a high speed craft based on resistance and lift force. *Procedia engineering*, 194, 197-202.
- [18] Bilandi, R. N., Vitiello, L., Mancini, S., Nappo, V., Roshan, F., Tavakoli, S., & Dashtimanesh, A. (2020). Calm-water performance of a boat with two swept steps at high-speeds: Laboratory measurements and mathematical modeling. *Procedia Manufacturing*, 42, 467-474.
- [19] Khazaei, R., Rahmansetayesh, M. A., & Hajizadeh, S. (2019). Hydrodynamic evaluation of a planing hull in calm water using RANS and Savitsky's method. *Ocean Engineering*, 187, 106221.
- [20] Degiuli, N., *Otpor i propulzija broda*, podloge za nastavu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb.

- [21] Martić, I., Anušić, B., Degiuli, N., & Grlj, C. G. (2024). Numerically Investigating the Effect of Trim on the Resistance of a Container Ship in Confined and Shallow Water. *Applied Sciences*, 14(15), 6570.
- [22] Faltinsen, O. M. (2005). Hydrodynamics of high-speed marine vehicles. *Cambridge University Press google schola*, 3, 386-391.
- [23] De Luca, F., & Pensa, C. (2017). The Naples warped hard chine hulls systematic series. *Ocean Engineering*, 139, 205-236.
- [24] De Luca, F., Pigazzini, R., Rosano, G., & Coppola, T. (2024). Roll characteristics of the Naples Systematic Series. *Ocean Engineering*, 296, 117097.
- [25] Savitsky, D. (1964). Hydrodynamic design of planing hulls. *Marine Technology and SNAME News*, 1(04), 71-95.
- [26] Radojčić, D. (1984). A statistical method for calculation of resistance of the stepless planing hulls. *International shipbuilding progress*, 31(364), 296-309.