

Određivanje ukupnog otpora sistematske 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_v | / | 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.

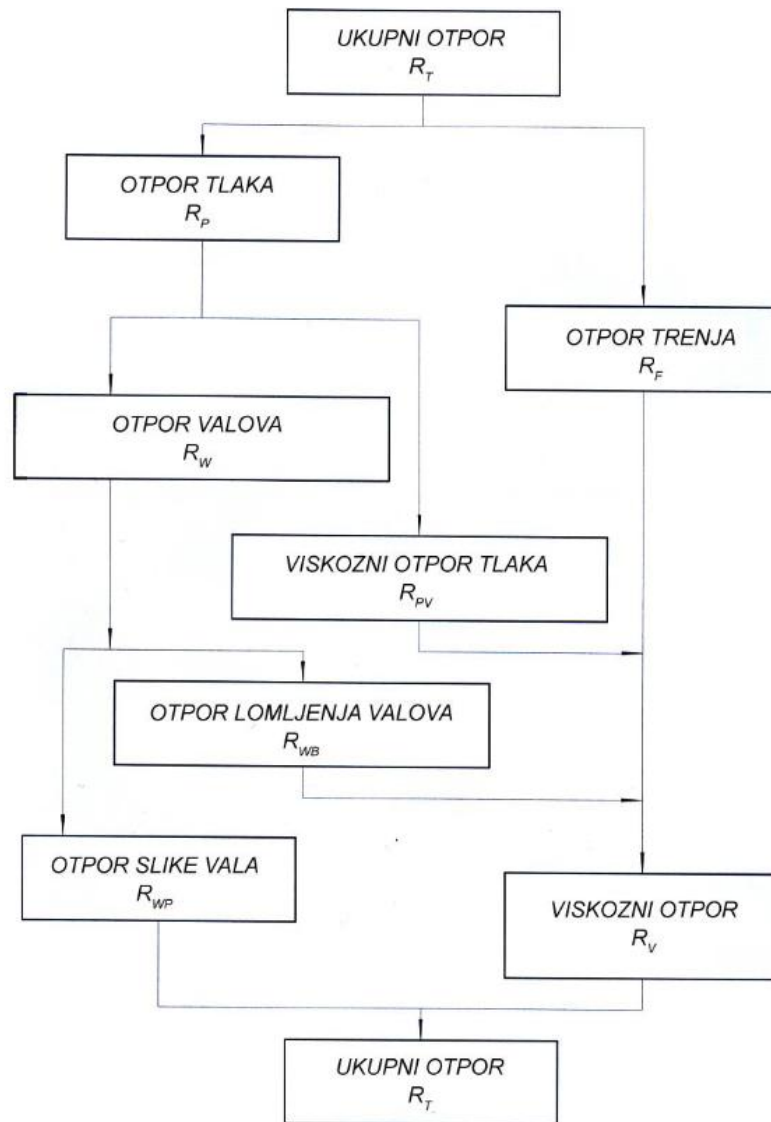
1.1. Pregled literature

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 krmi, 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

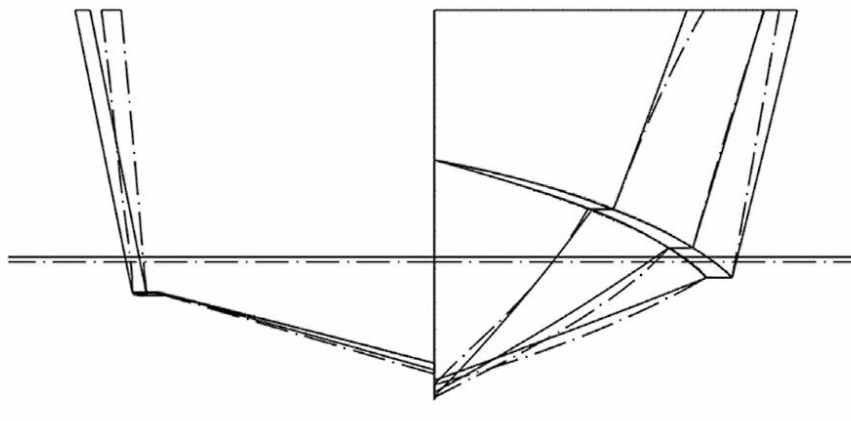
Trim broda je razlika gazova na krmi i pramcu, to jest uzdužni nagib broda prema krmi ili pramcu oko poprečne osi koja prolazi kroz težište plovne vodne linije [21]. Ukoliko je gaz na krmi veći od gaza na pramcu, brod je u zatezi, a ako je gaz na pramcu veći nego na krmi, brod je u pretezi. Kada je brod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

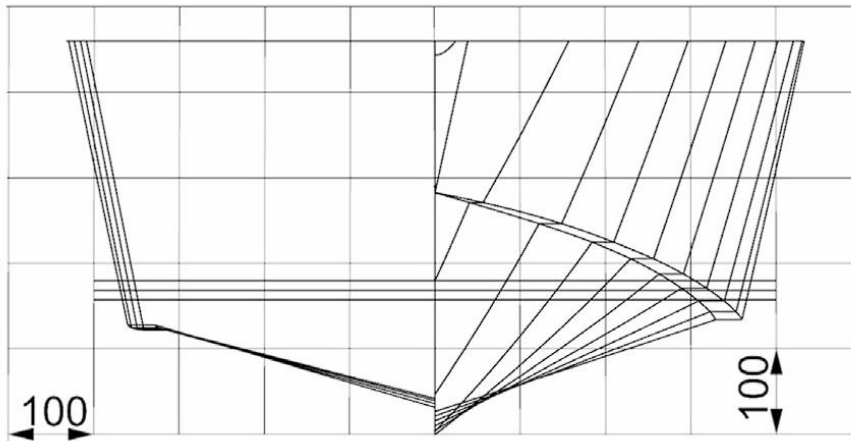
3. SISTEMATSKA SERIJA MODELA BRZIH BRODOVA „NAPLES SYSTEMATIC SERIES“

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.

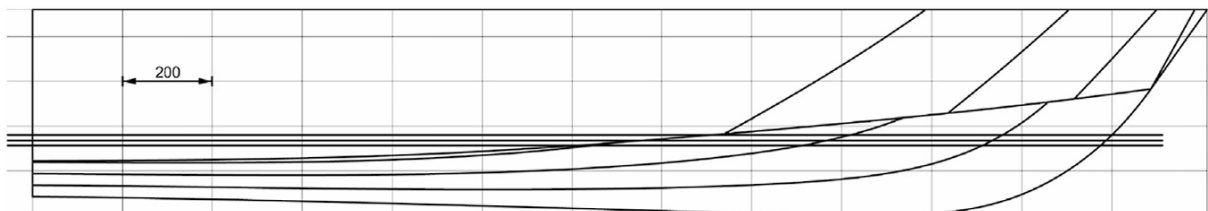


Slika 2. Usporedba modela C1 (puna linija) i C954 (isprekidana linija)

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.



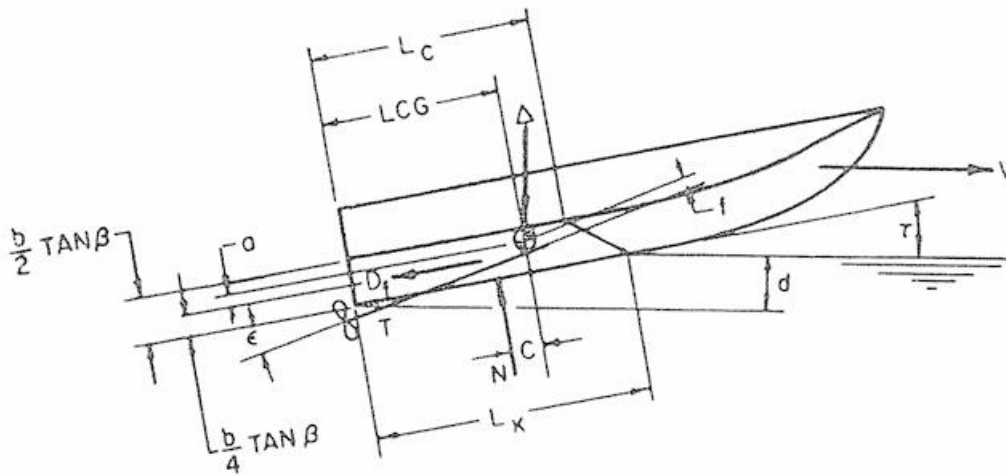
Slika 3. Poprečni presjek modela C1



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:

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

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

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

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) $4.25 < \frac{A_p}{\frac{L_p}{\sqrt{3}}} < 9.50$
- 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:

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

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

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

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

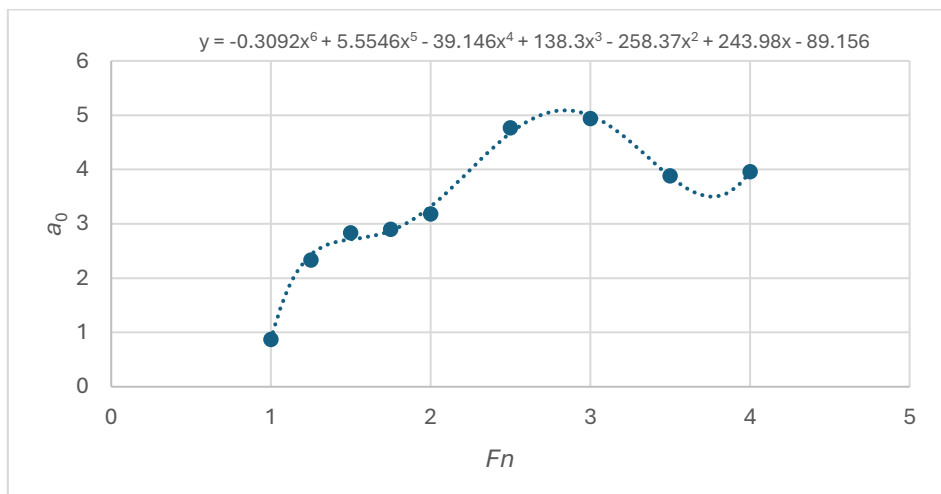
$$x'_5 = \frac{\tau - 5}{5} \quad (36)$$

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.

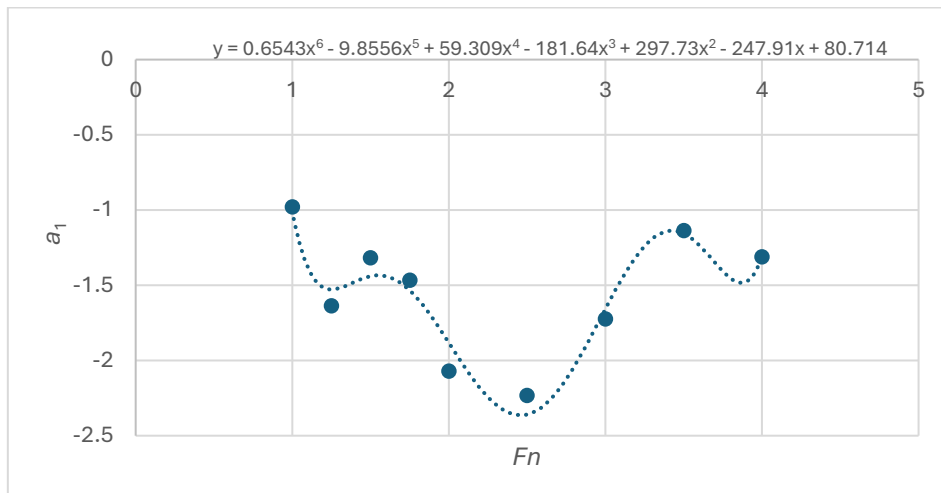
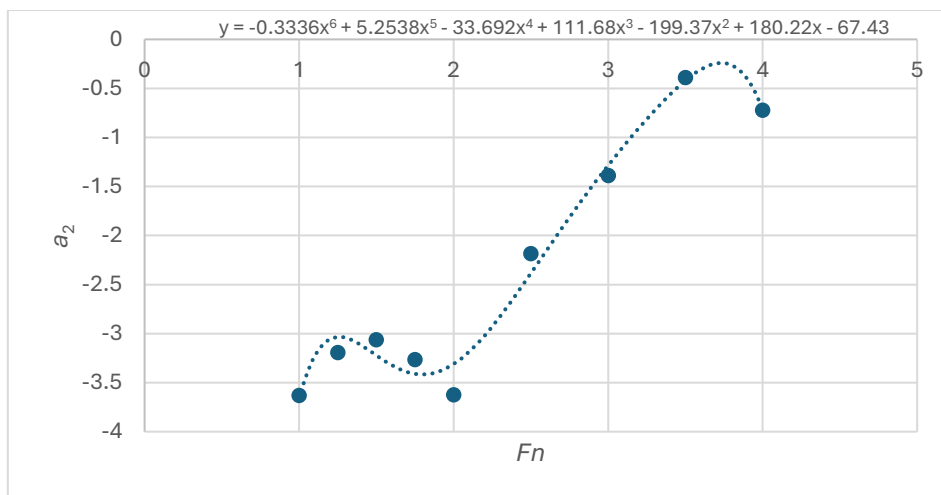
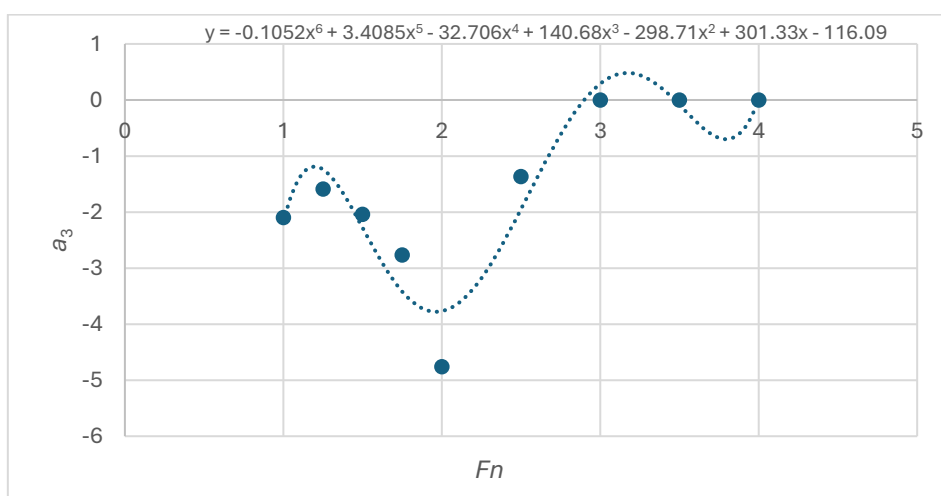
Dinamički kut trima određuje se na temelju regresijskih i neovisnih koeficijenata kako slijedi:

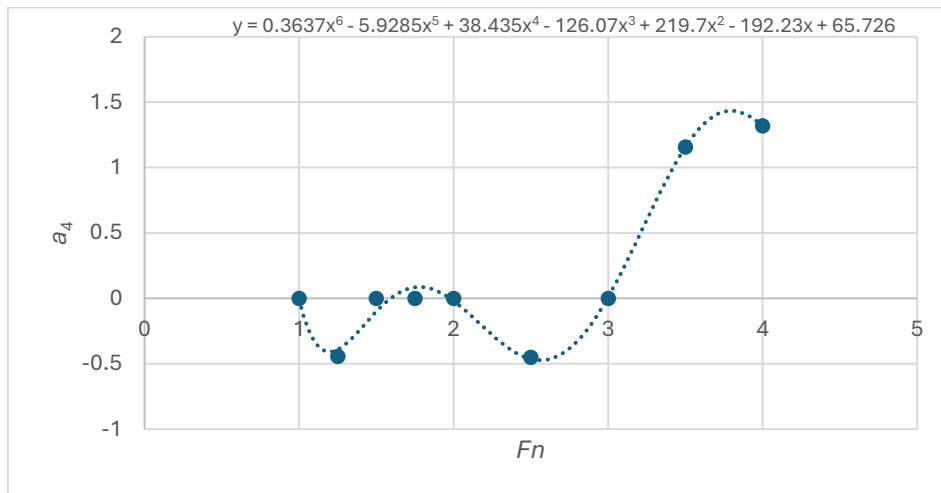
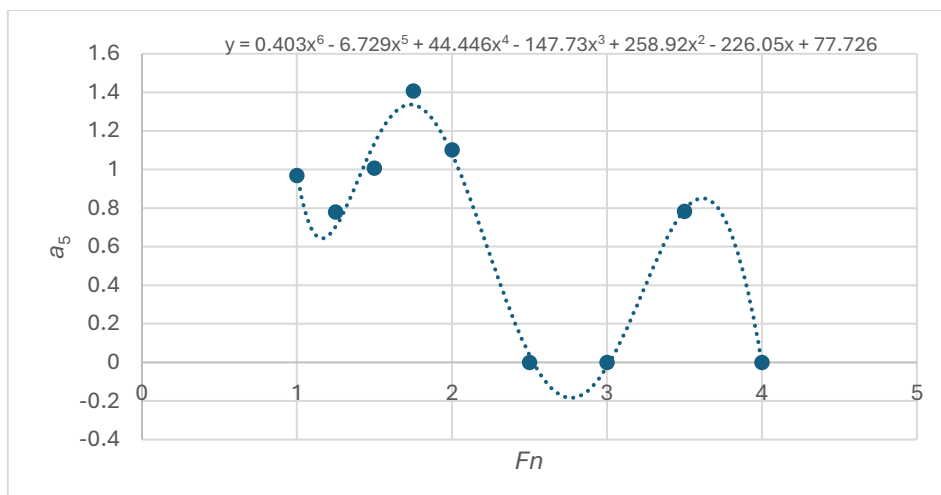
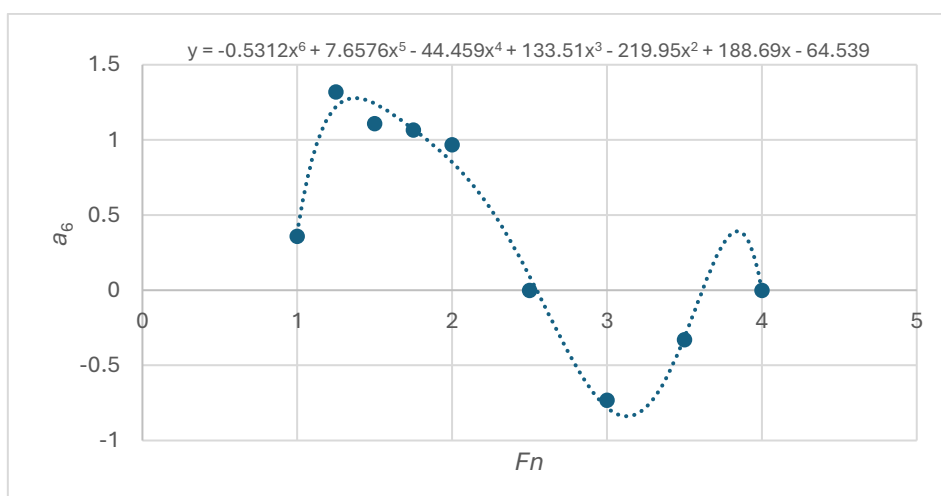
$$\tau = a_0 \cdot x_0 + a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + \dots + a_{25} \cdot x_{25} + a_{26} \cdot x_{26} \quad (37)$$

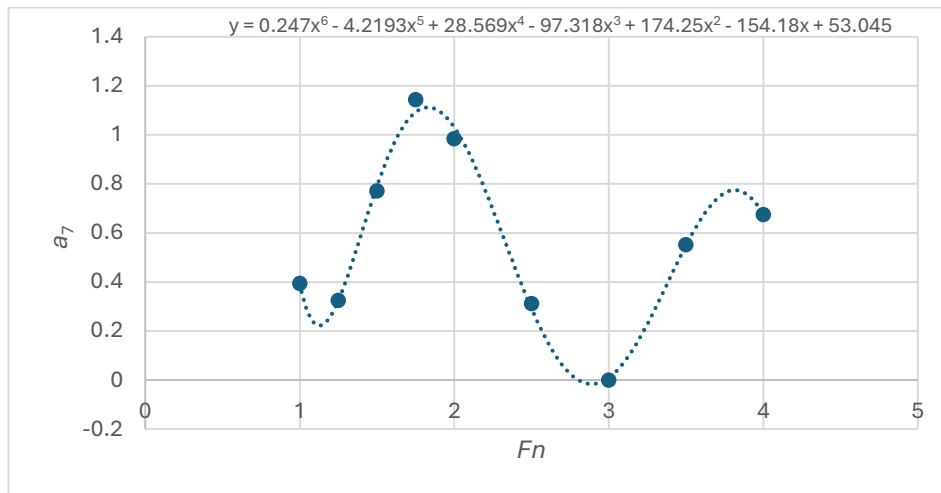
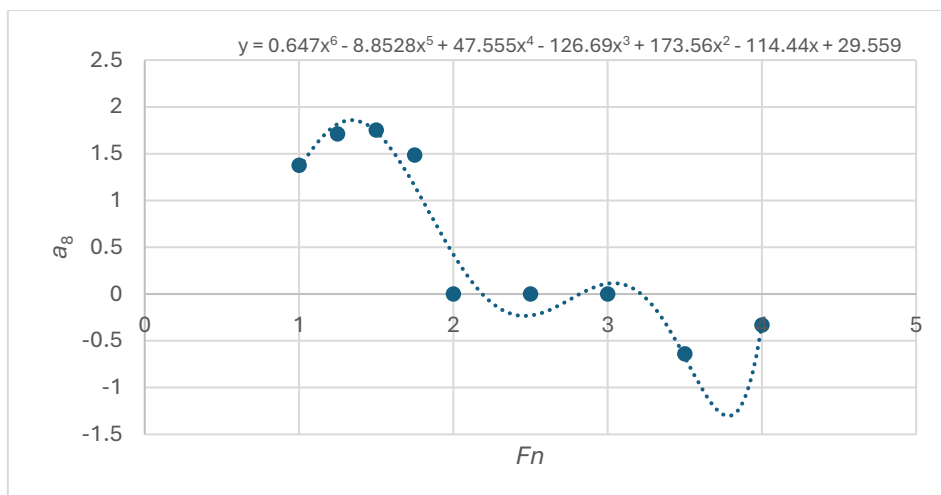
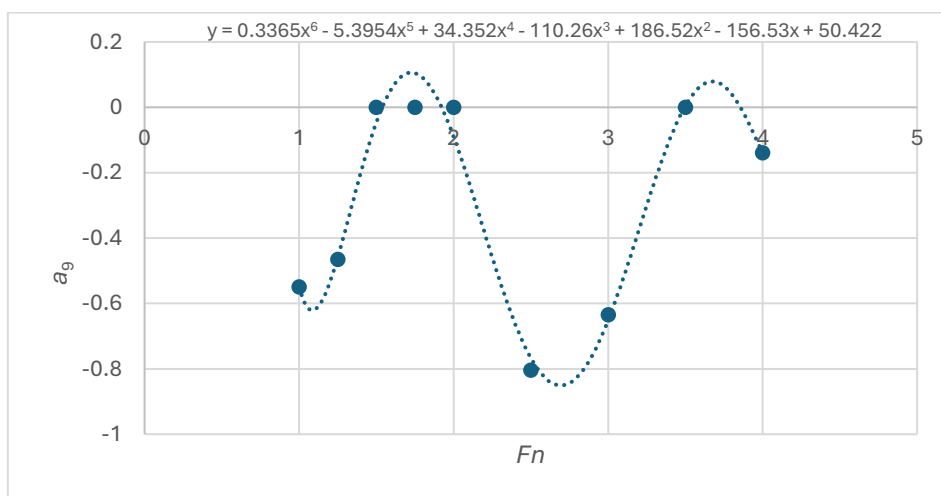
Regresijski koeficijenti navedeni u jednadžbi (37) mogu se iščitati iz grafova prikazanih na Slikama 6.-32.

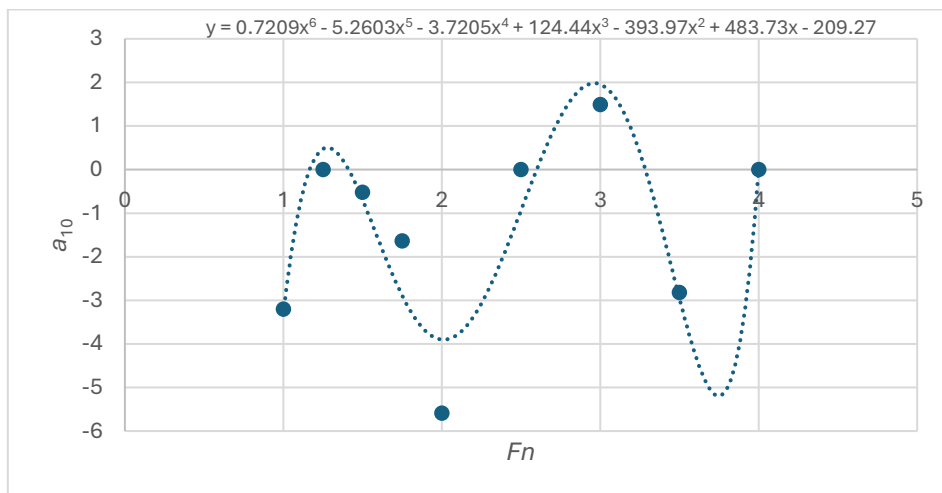
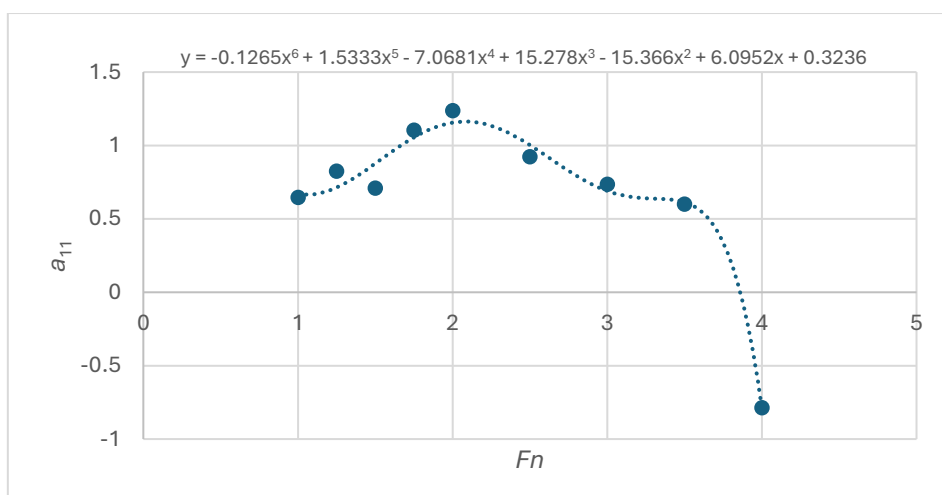
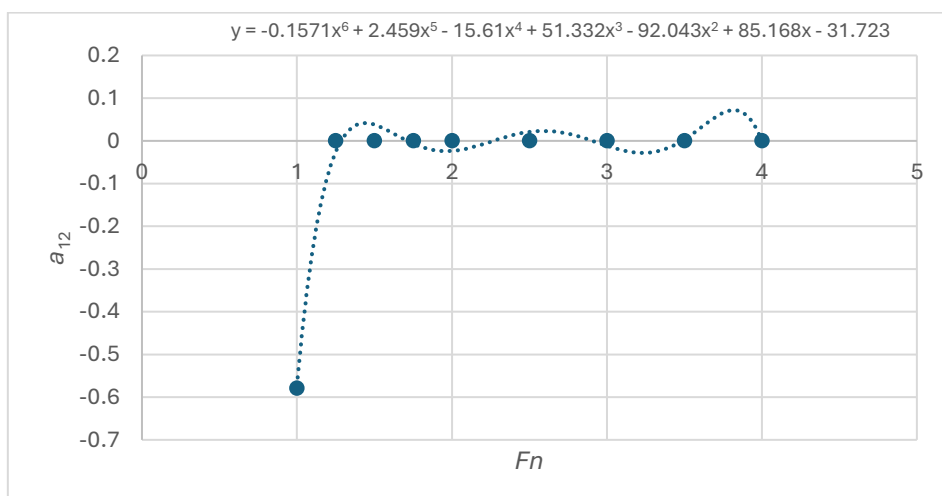


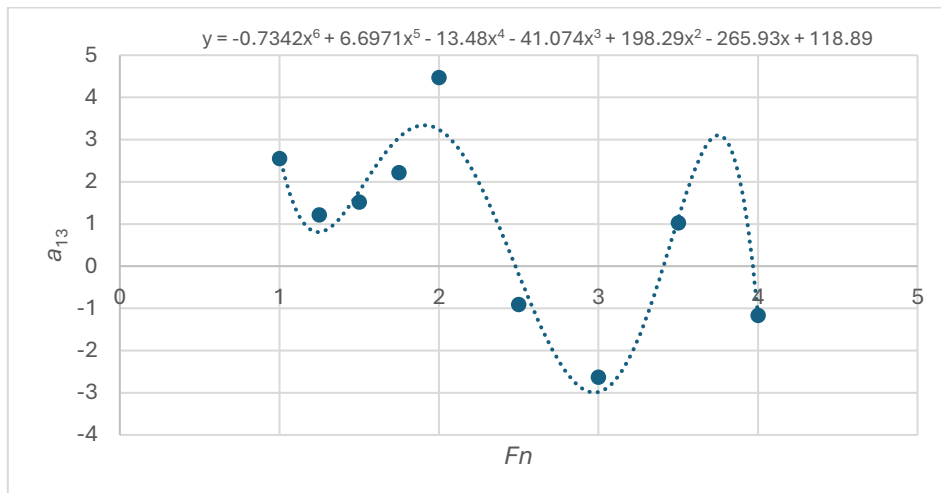
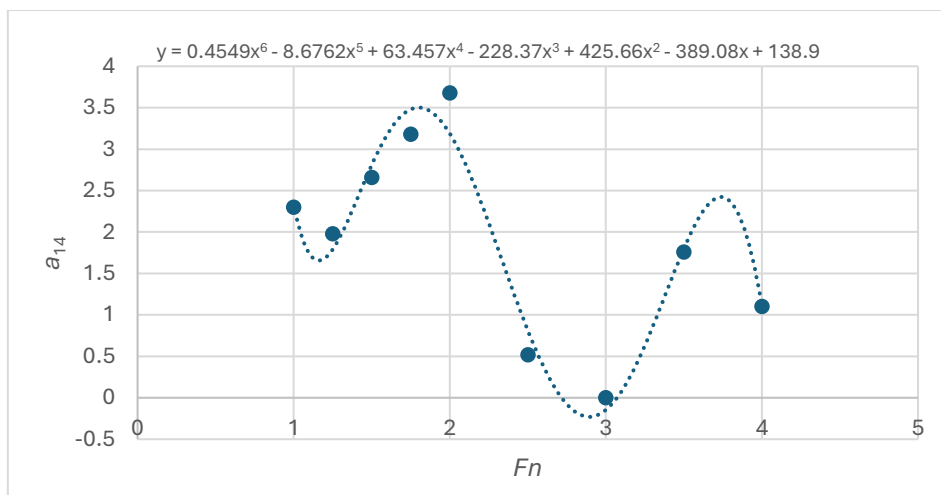
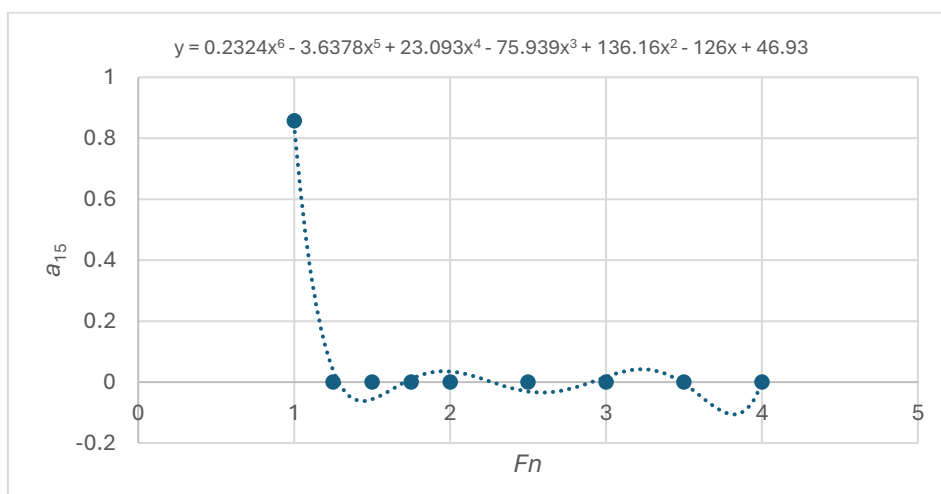
Slika 6. Ovisnost regresijskog koeficijenta a_0 o Froudeovom broju

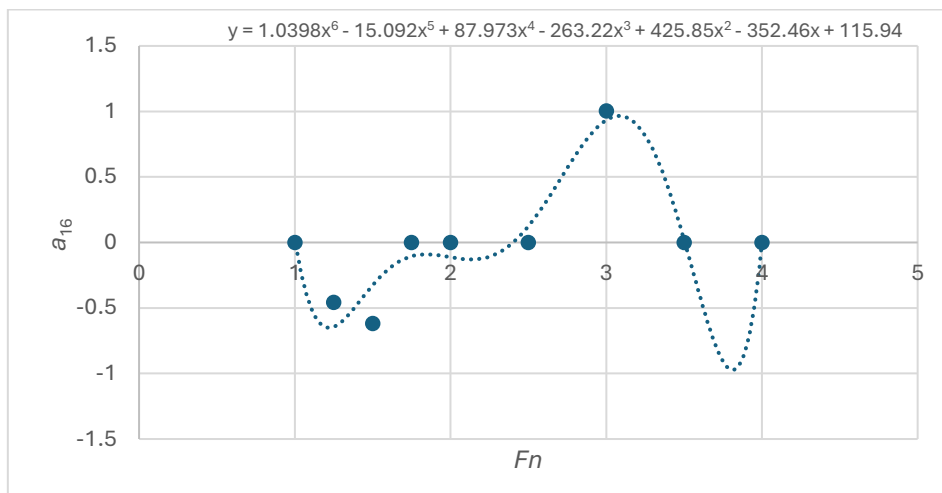
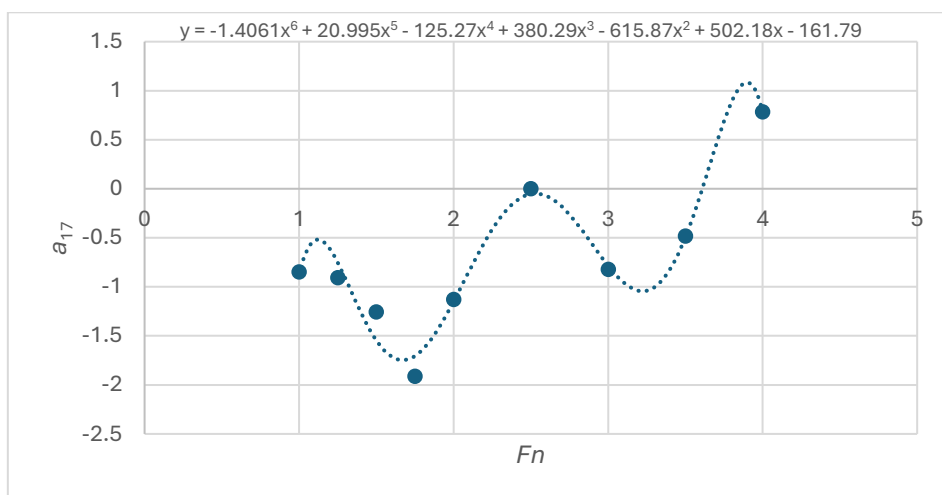
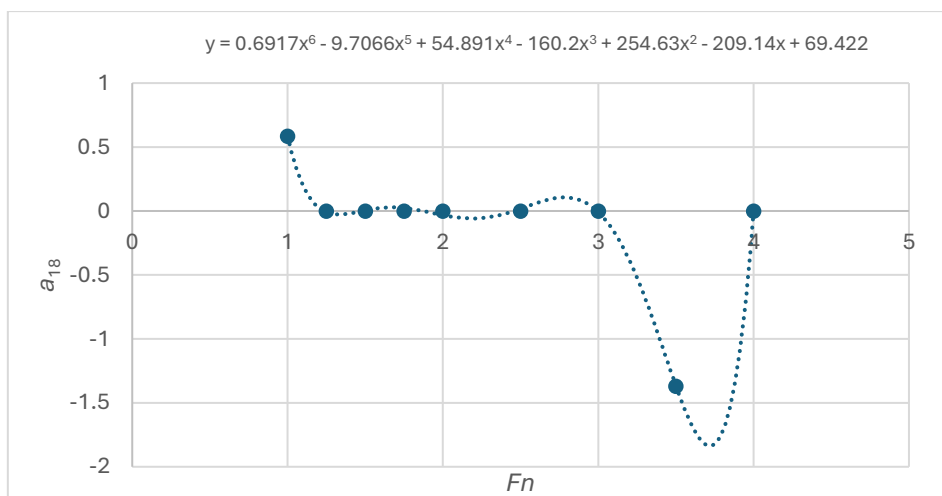
Slika 7. Ovisnost regresijskog koeficijenta a_1 o Froudeovom brojuSlika 8. Ovisnost regresijskog koeficijenta a_2 o Froudeovom brojuSlika 9. Ovisnost regresijskog koeficijenta a_3 o Froudeovom broju

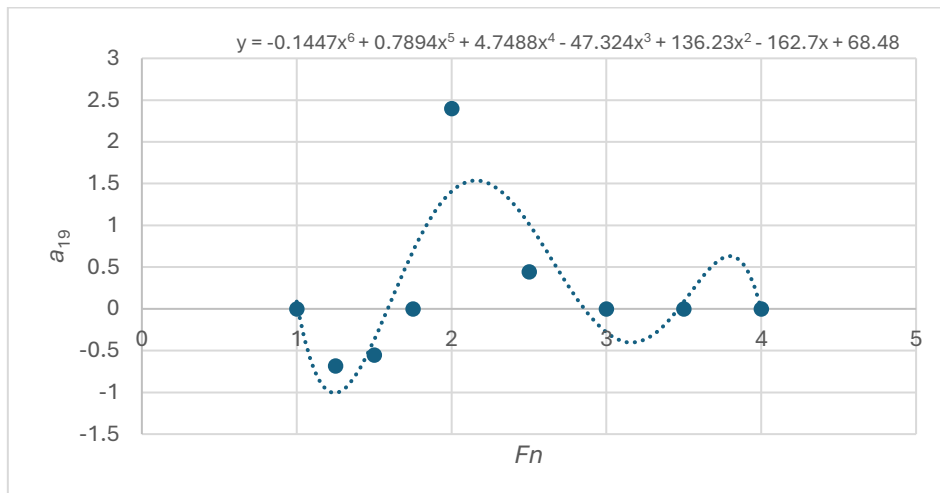
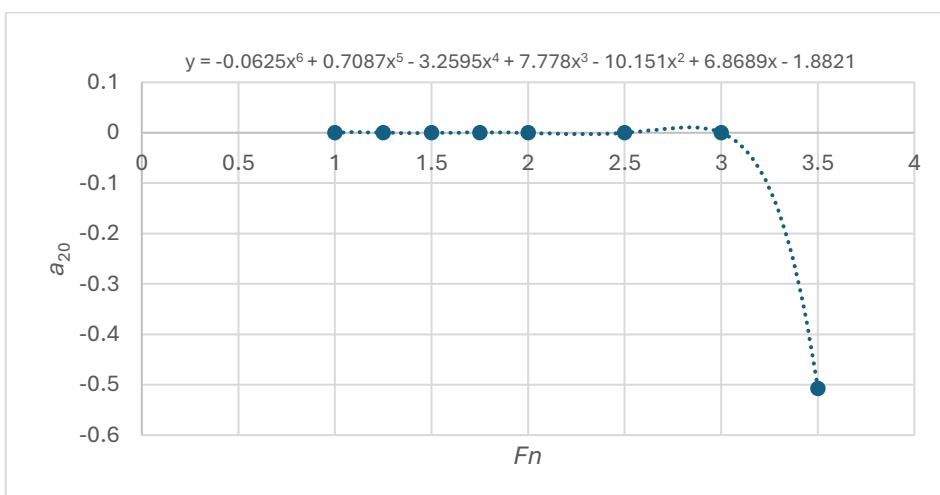
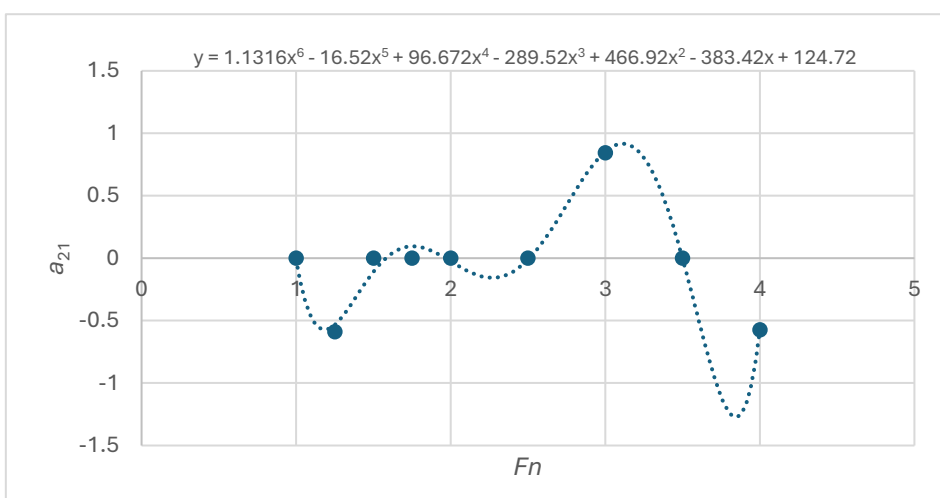
Slika 10. Ovisnost regresijskog koeficijenta a_4 o Froudeovom brojuSlika 11. Ovisnost regresijskog koeficijenta a_5 o Froudeovom brojuSlika 12. Ovisnost regresijskog koeficijenta a_6 o Froudeovom broju

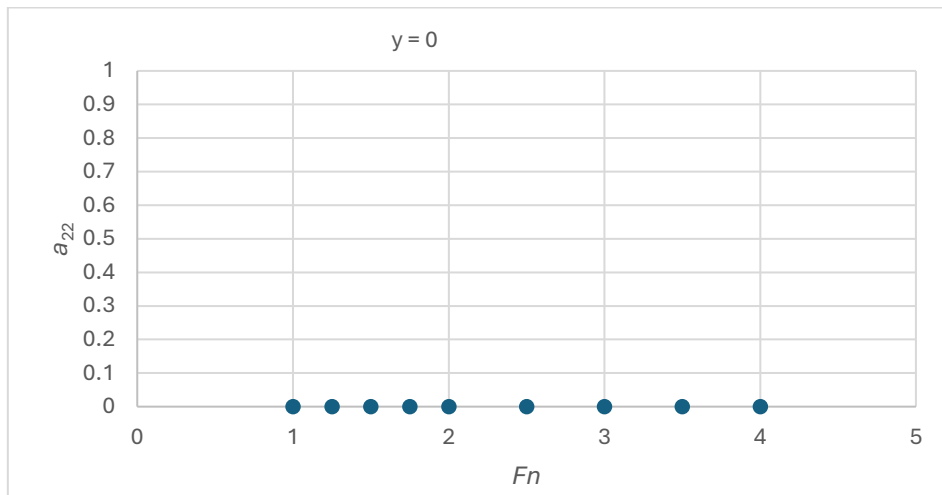
Slika 13. Ovisnost regresijskog koeficijenta a_7 o Froudeovom brojuSlika 14. Ovisnost regresijskog koeficijenta a_8 o Froudeovom brojuSlika 15. Ovisnost regresijskog koeficijenta a_9 o Froudeovom broju

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

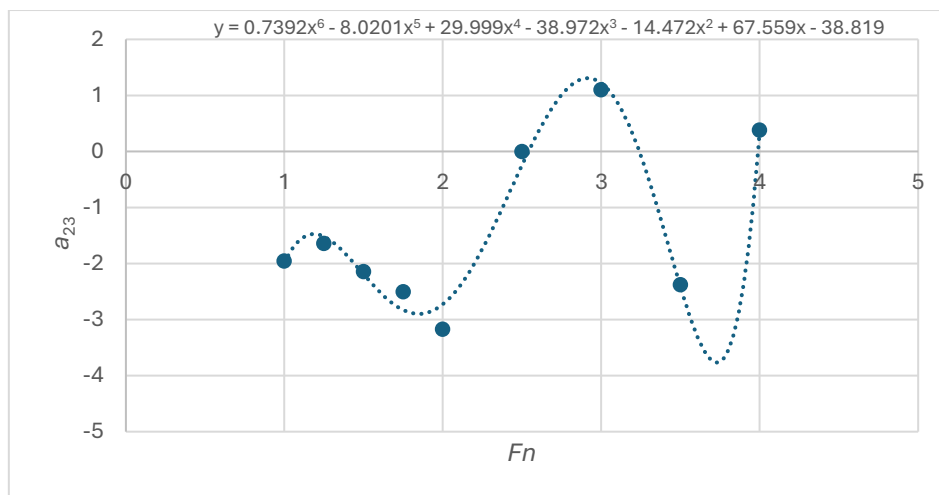
Slika 19. Ovisnost regresijskog koeficijenta a_{13} o Froudeovom brojuSlika 20. Ovisnost regresijskog koeficijenta a_{14} o Froudeovom brojuSlika 21. Ovisnost regresijskog koeficijenta a_{15} o Froudeovom broju

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

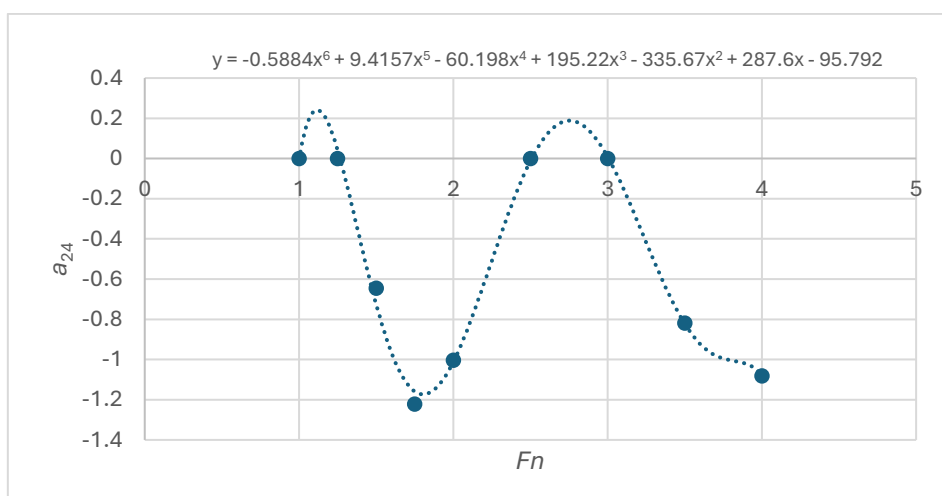
Slika 25. Ovisnost regresijskog koeficijenta a_{19} o Froudeovom brojuSlika 26. Ovisnost regresijskog koeficijenta a_{20} o Froudeovom brojuSlika 27. Ovisnost regresijskog koeficijenta a_{21} o Froudeovom broju



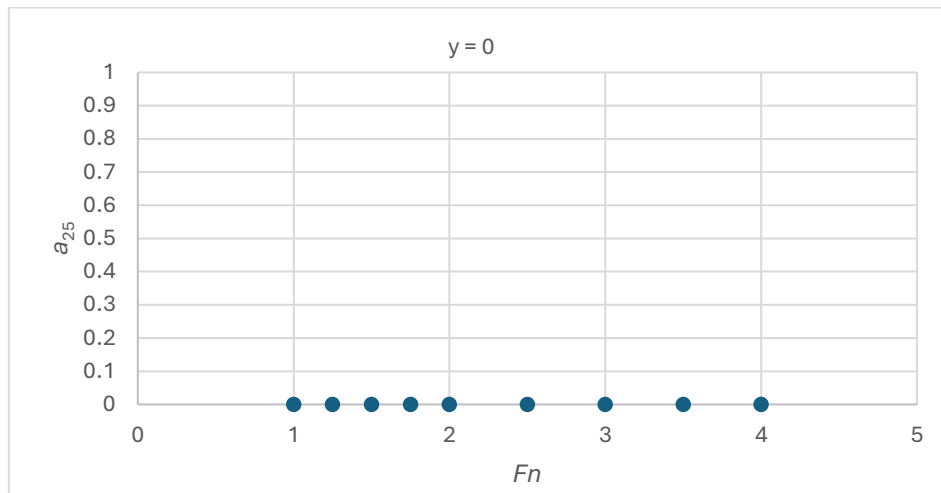
Slika 28. Ovisnost regresijskog koeficijenta a_{22} o Froudeovom broju



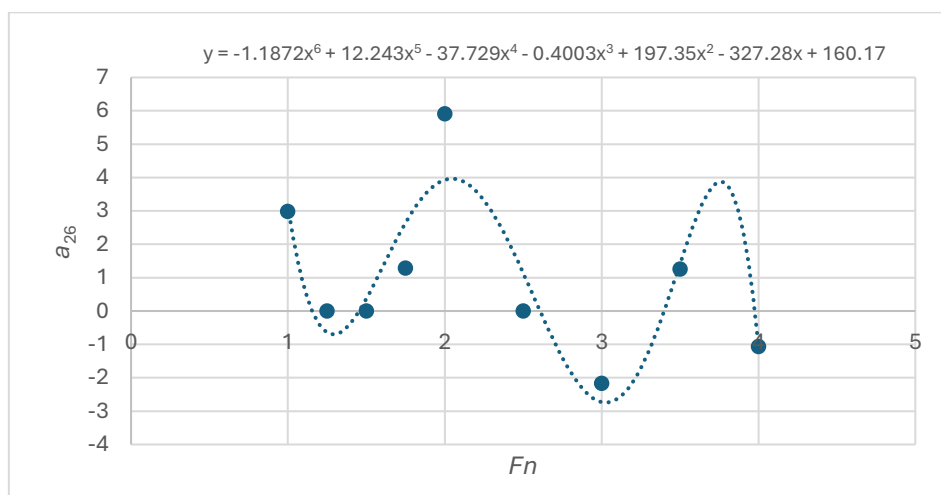
Slika 29. Ovisnost regresijskog koeficijenta a_{23} o Froudeovom broju



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



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



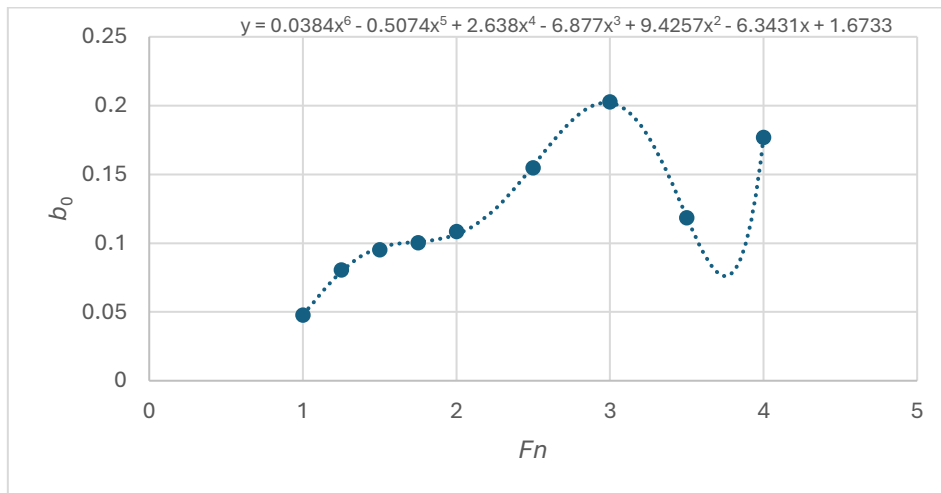
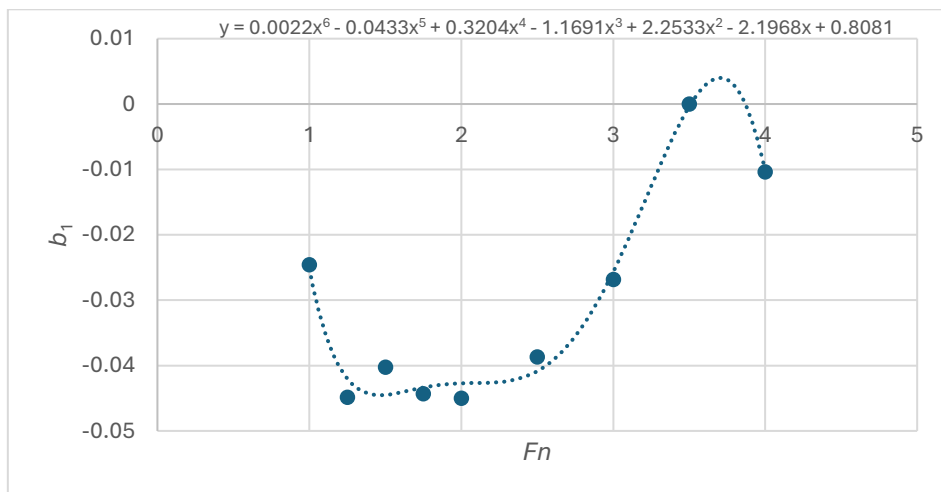
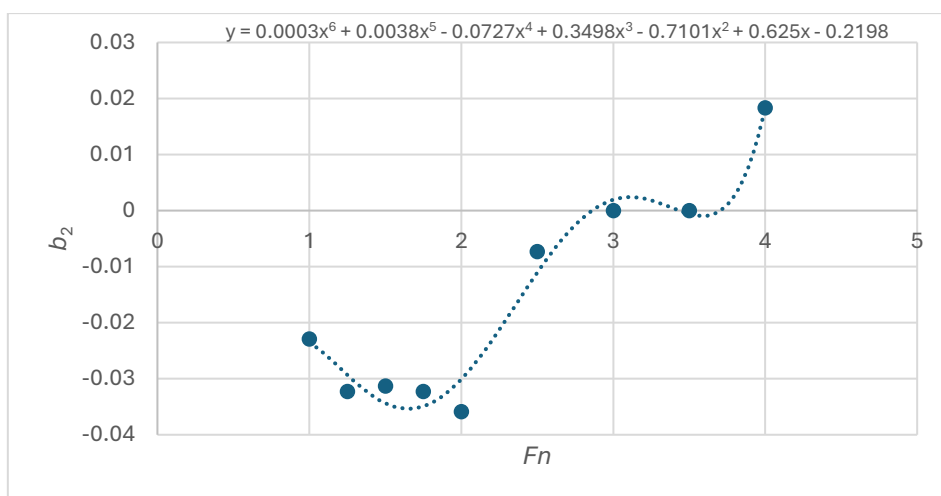
Slika 32. Ovisnost regresijskog koeficijenta a_{26} o Froudeovom broju

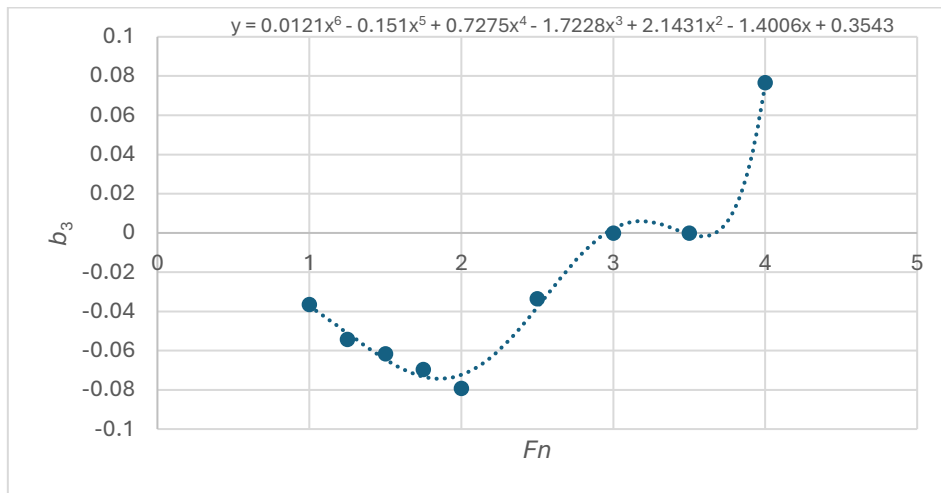
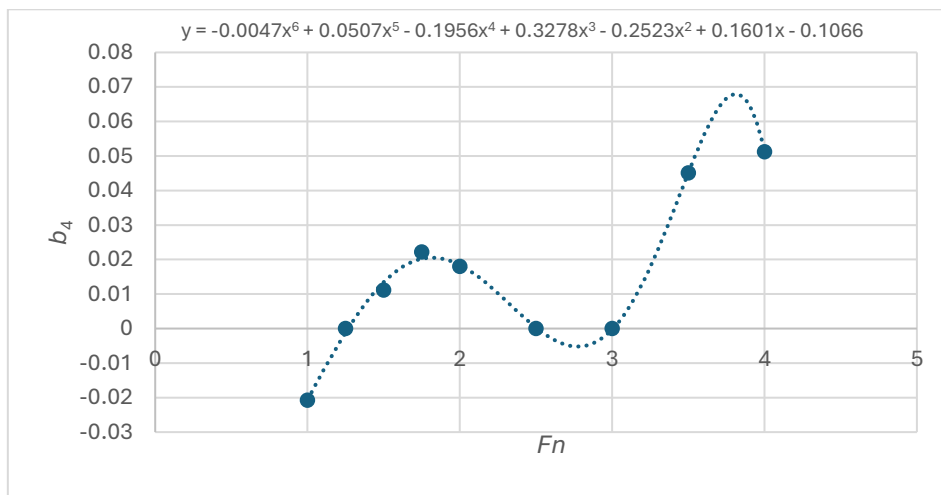
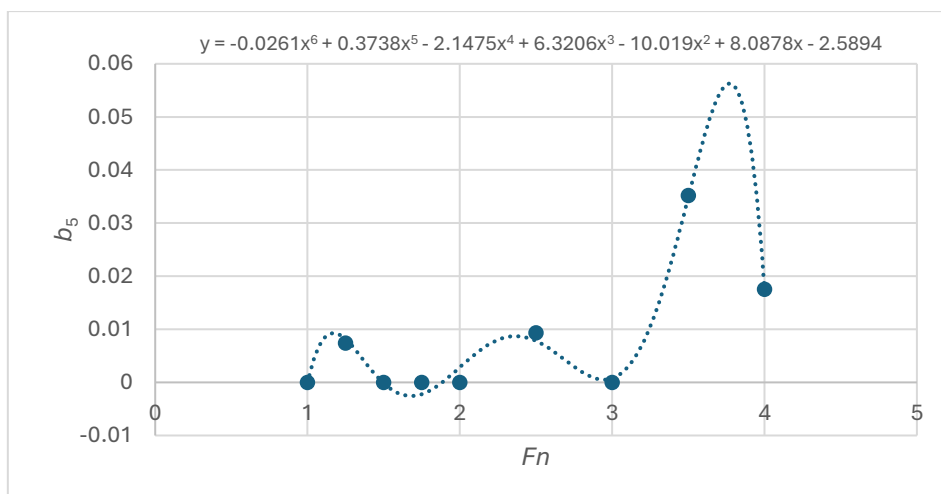
Omjer ukupnog otpora i mase istisnine, odnosno specifična vrijednost ukupnog otpora određuje se na sljedeći način:

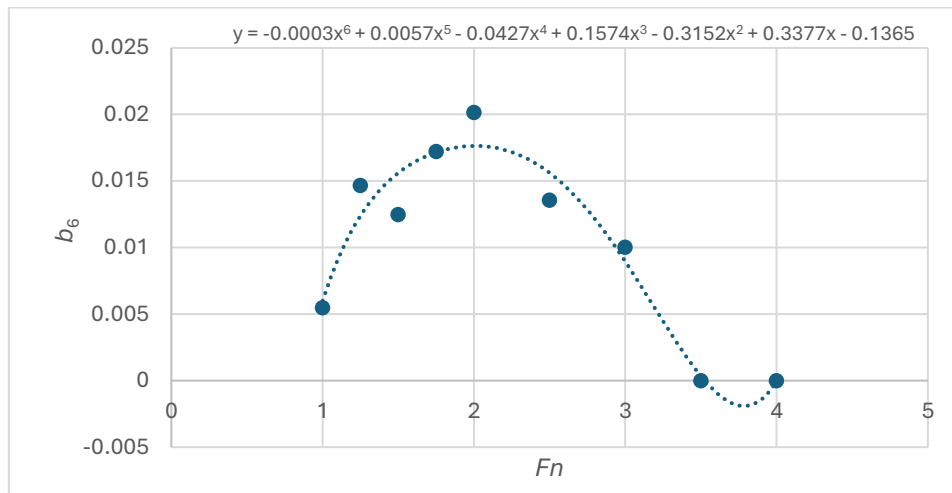
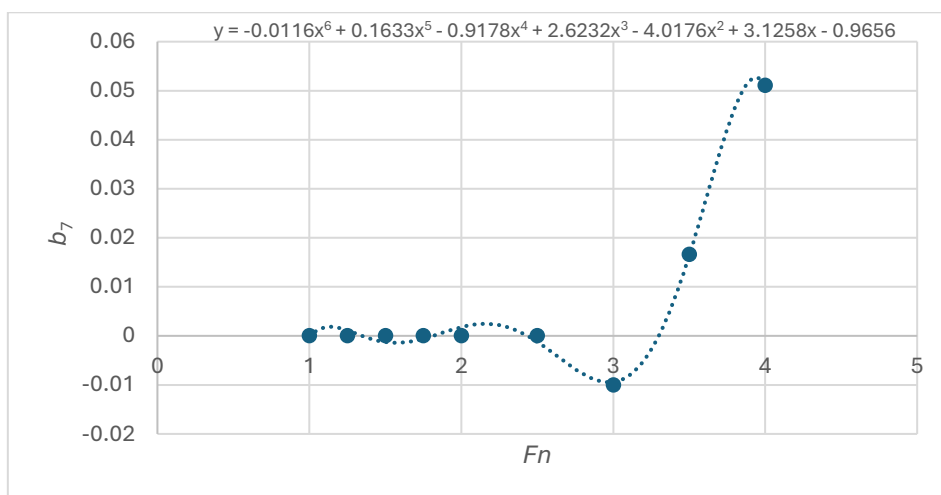
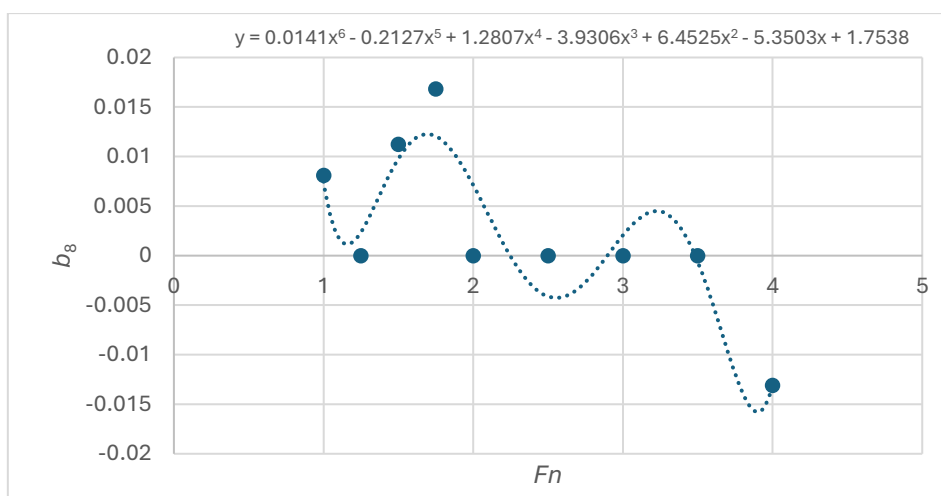
$$\frac{R}{\Delta} = b_0 \cdot x_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + \dots + b_{25} \cdot x_{25} + b_{26} \cdot x_{26} \quad (38)$$

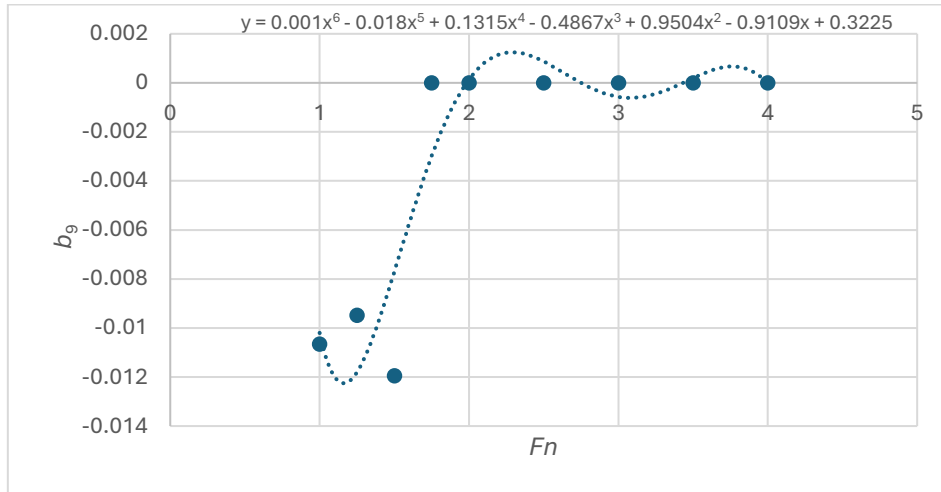
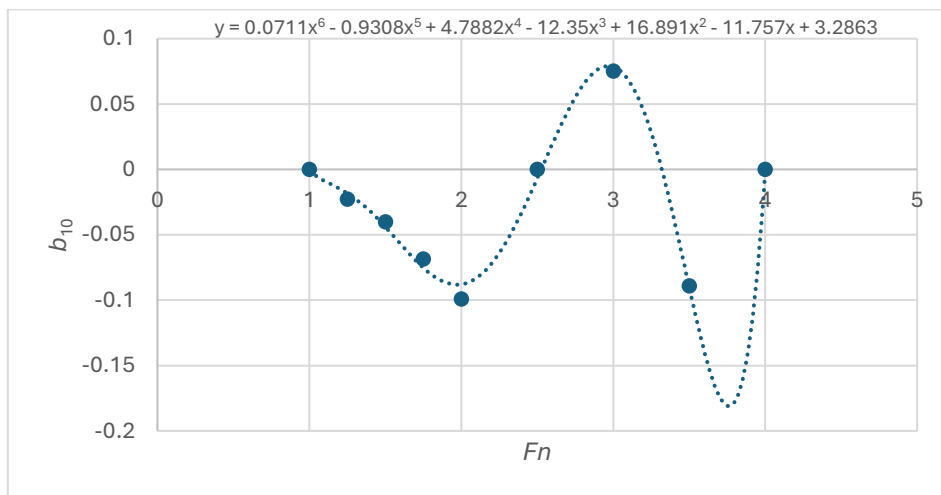
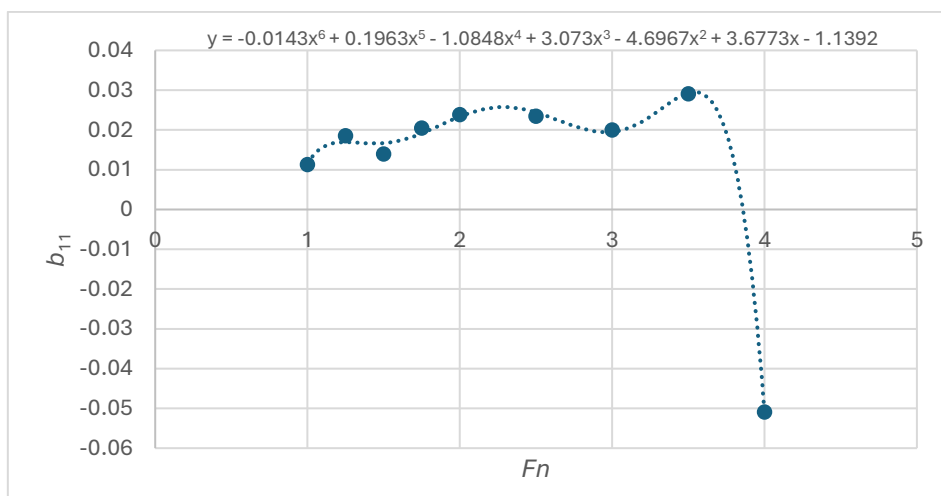
Kako bi se izračunao ukupni otpor potrebno je vrijednost dobivenu primjenom jednadžbe (38) pomnožiti s masom broda u tonama te ubrzanjem Zemljine sile teže, g .

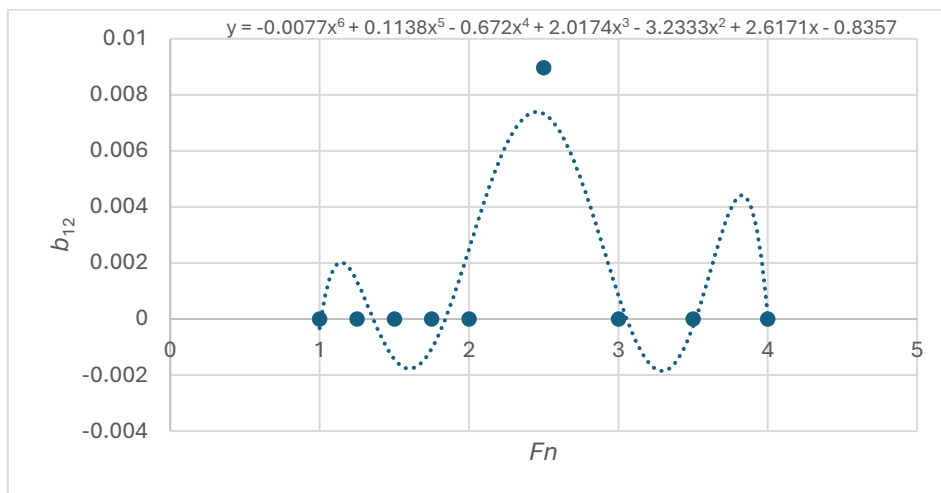
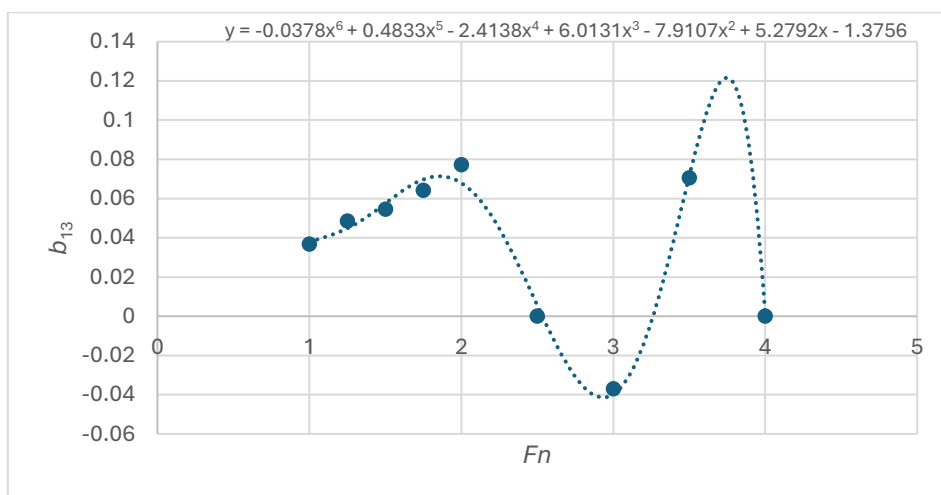
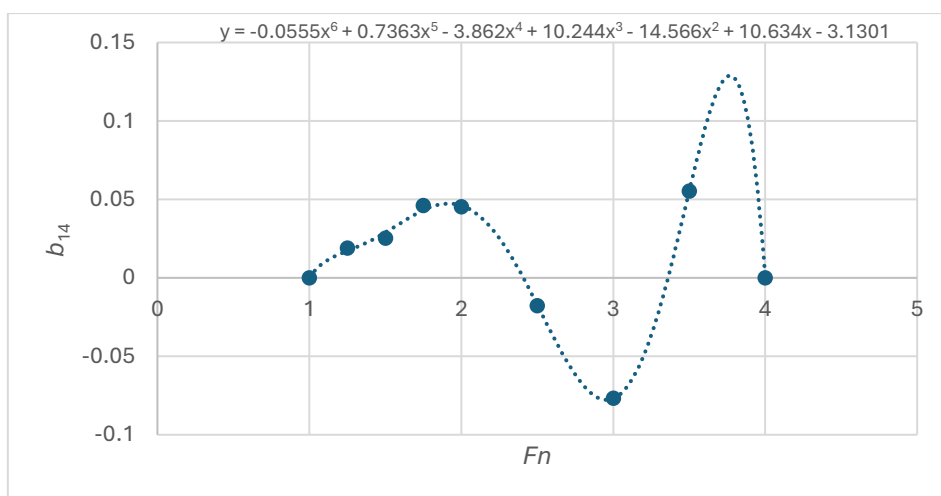
Regresijski koeficijenti navedeni u jednadžbi (38) mogu se iščitati iz grafova prikazanih na Slikama 33.-59.

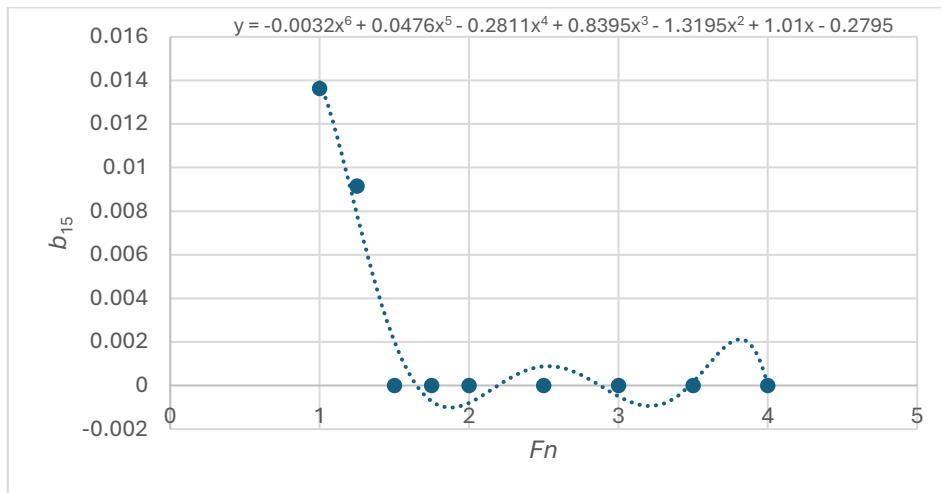
Slika 33. Ovisnost regresijskog koeficijenta b_0 o Froudeovom brojuSlika 34. Ovisnost regresijskog koeficijenta b_1 o Froudeovom brojuSlika 35. Ovisnost regresijskog koeficijenta b_2 o Froudeovom broju

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

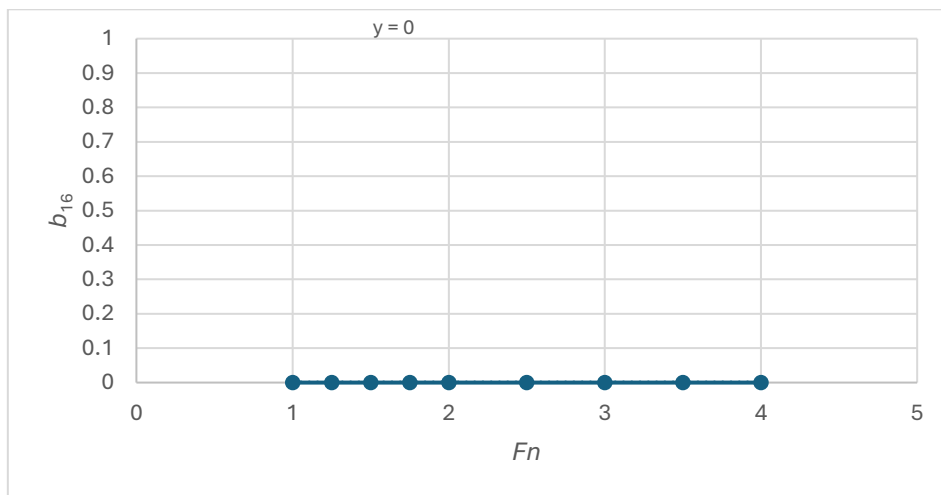
Slika 39. Ovisnost regresijskog koeficijenta b_6 o Froudeovom brojuSlika 40. Ovisnost regresijskog koeficijenta b_7 o Froudeovom brojuSlika 40. Ovisnost regresijskog koeficijenta b_8 o Froudeovom broju

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

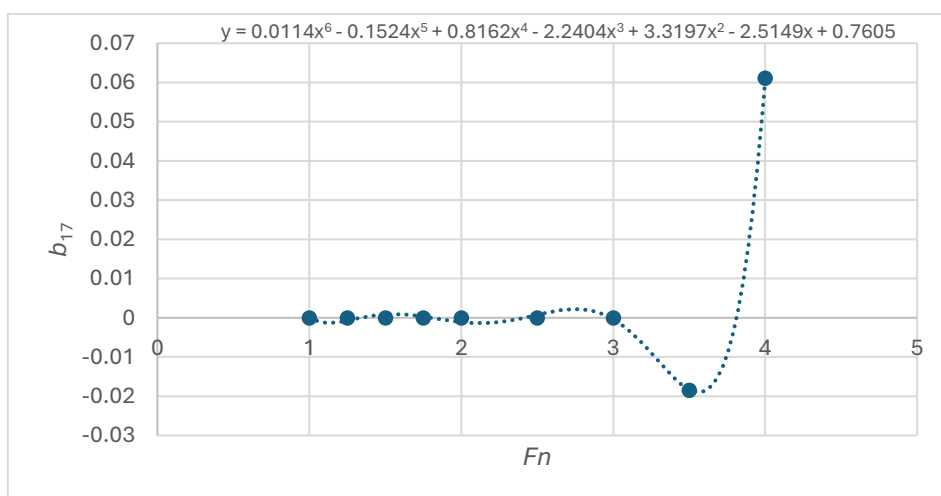
Slika 44. Ovisnost regresijskog koeficijenta b_{12} o Froudeovom brojuSlika 45. Ovisnost regresijskog koeficijenta b_{13} o Froudeovom brojuSlika 46. Ovisnost regresijskog koeficijenta b_{14} o Froudeovom broju



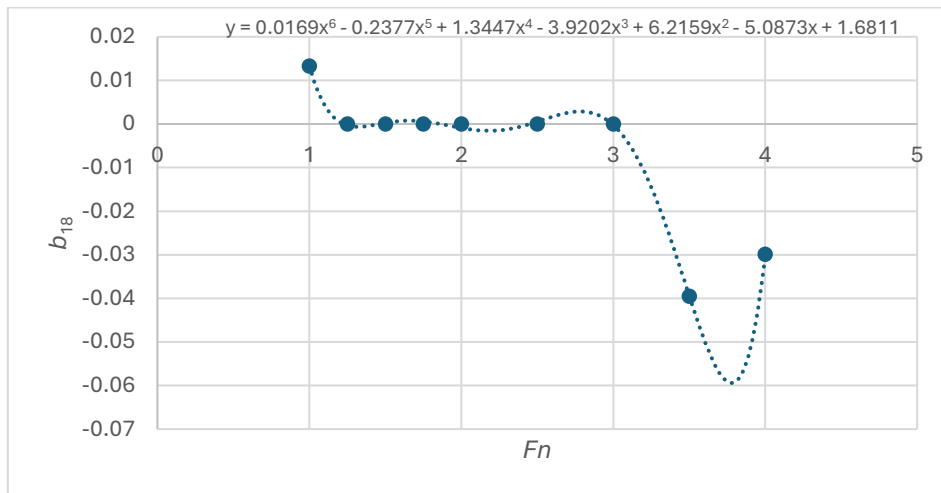
Slika 47. Ovisnost regresijskog koeficijenta b_{15} o Froudeovom broju



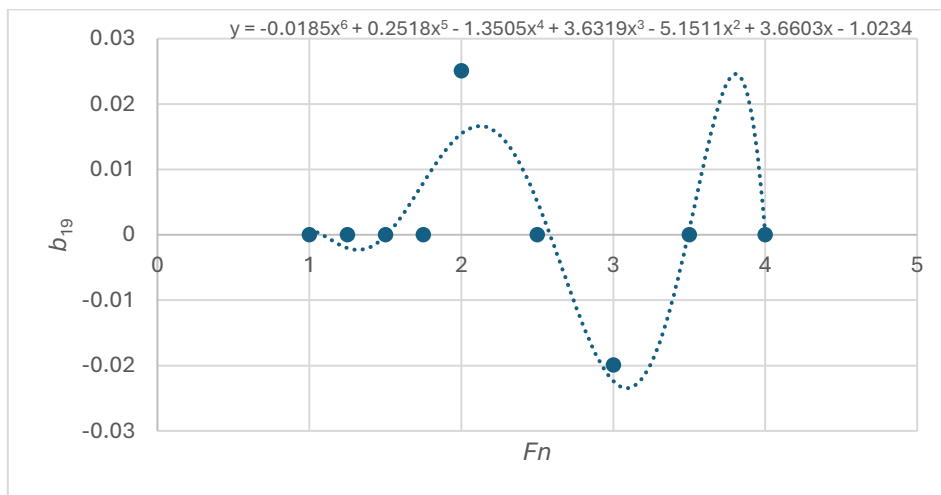
Slika 48. Ovisnost regresijskog koeficijenta b_{16} o Froudeovom broju



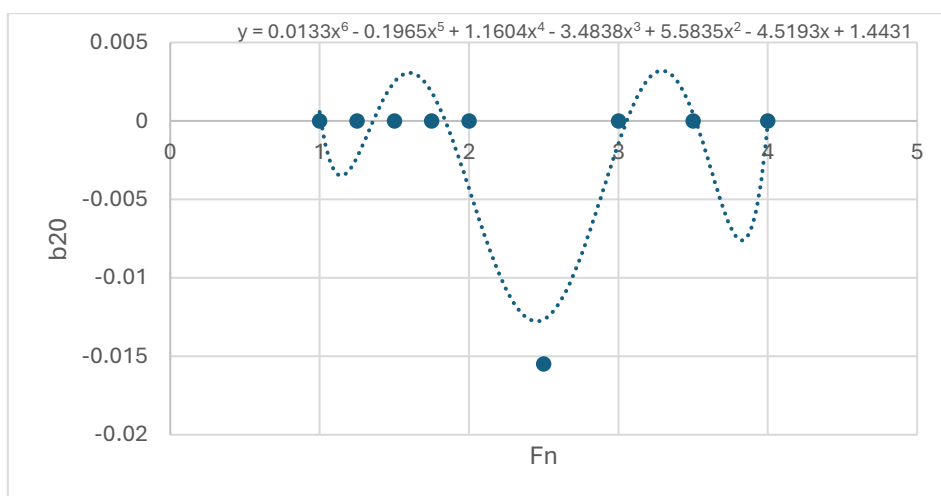
Slika 49. Ovisnost regresijskog koeficijenta b_{17} o Froudeovom broju



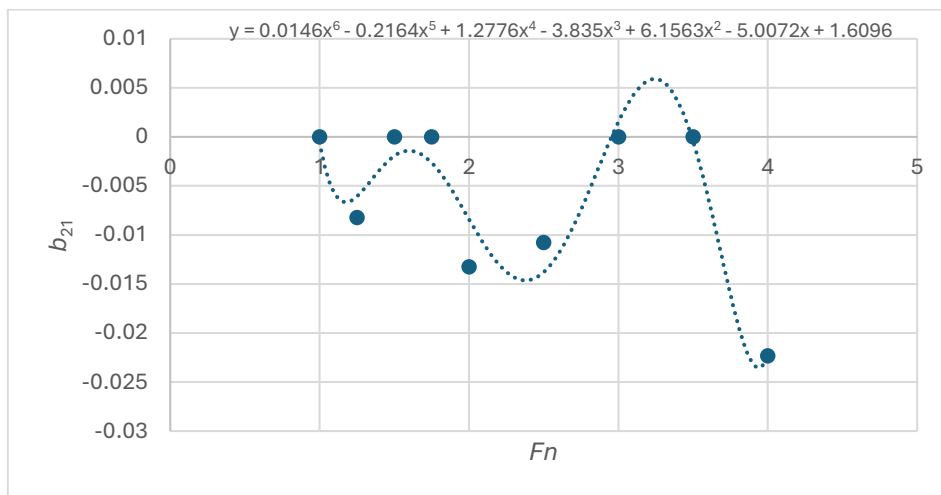
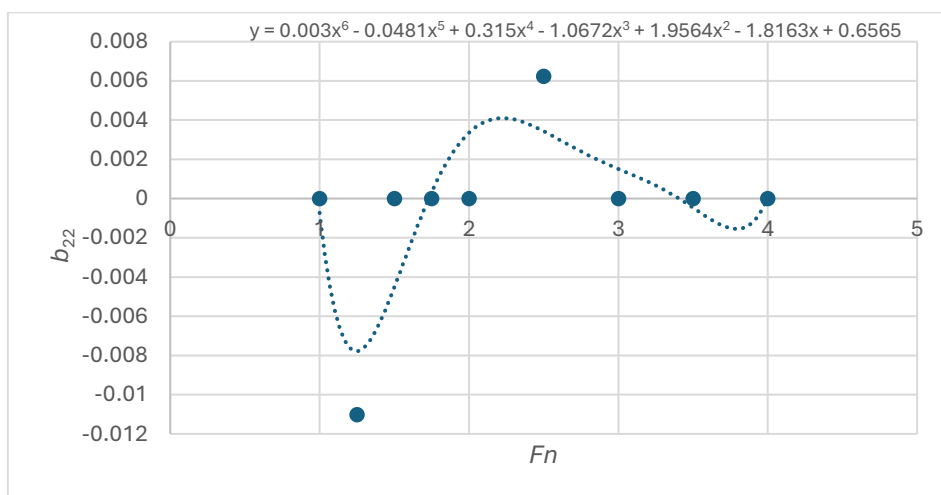
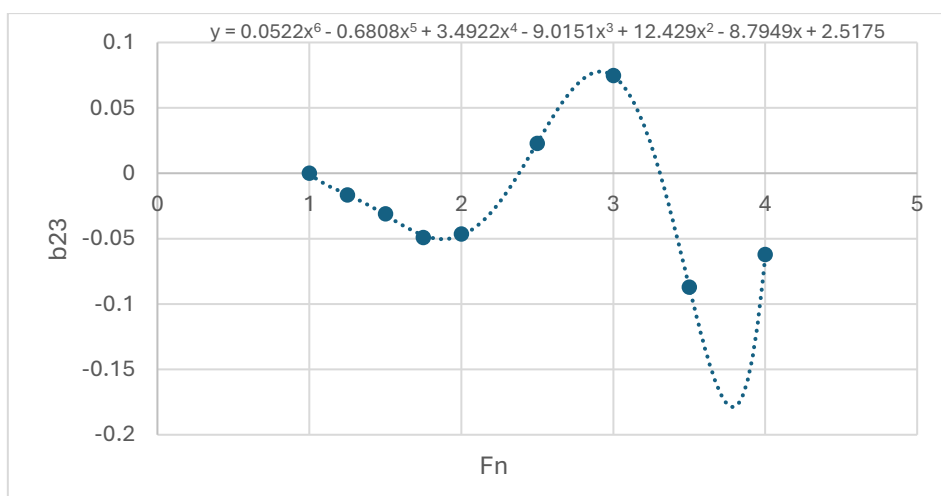
Slika 50. Ovisnost regresijskog koeficijenta b_{18} o Froudeovom broju

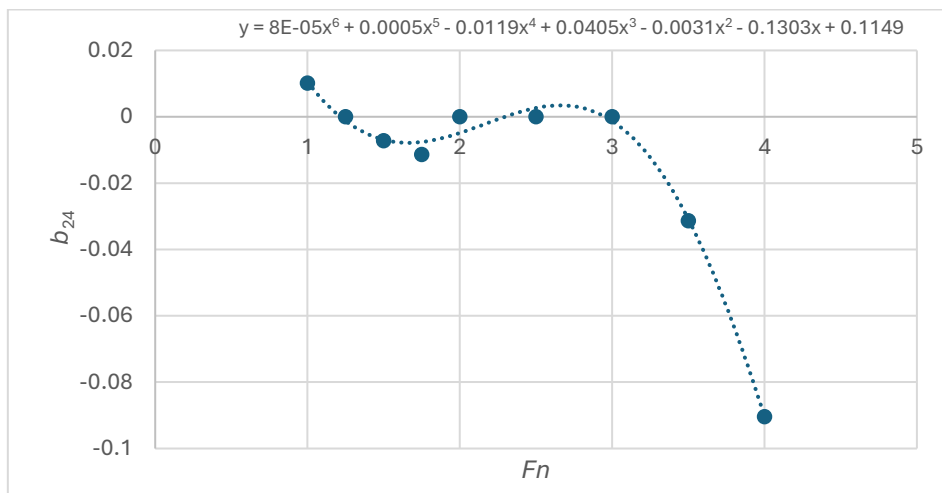
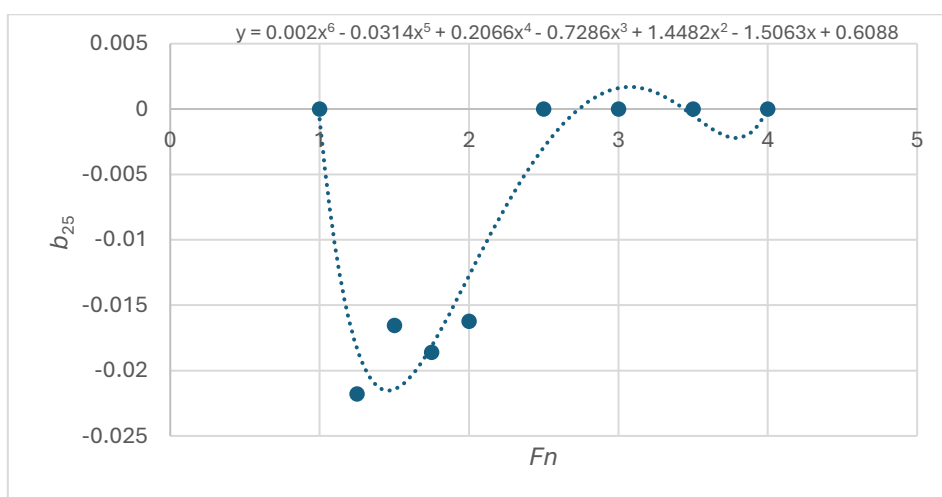
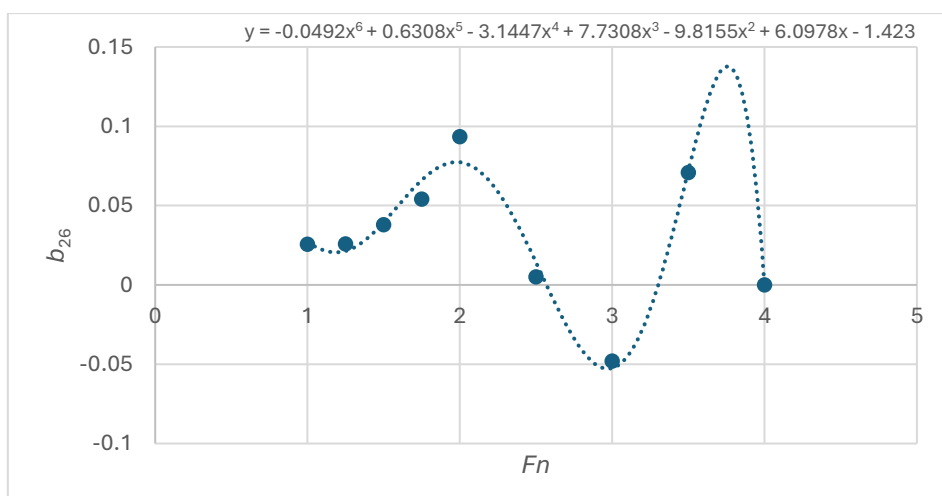


Slika 51. Ovisnost regresijskog koeficijenta b_{19} o Froudeovom broju



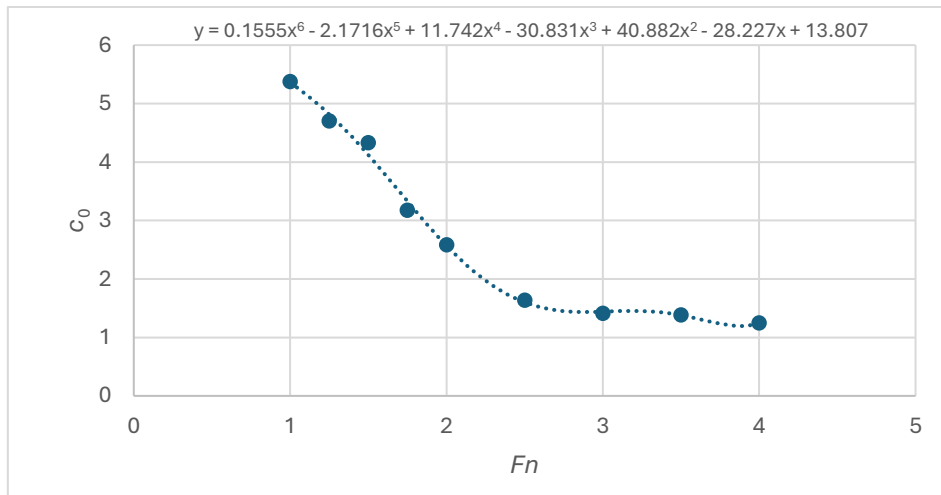
Slika 52. Ovisnost regresijskog koeficijenta b_{20} o Froudeovom broju

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

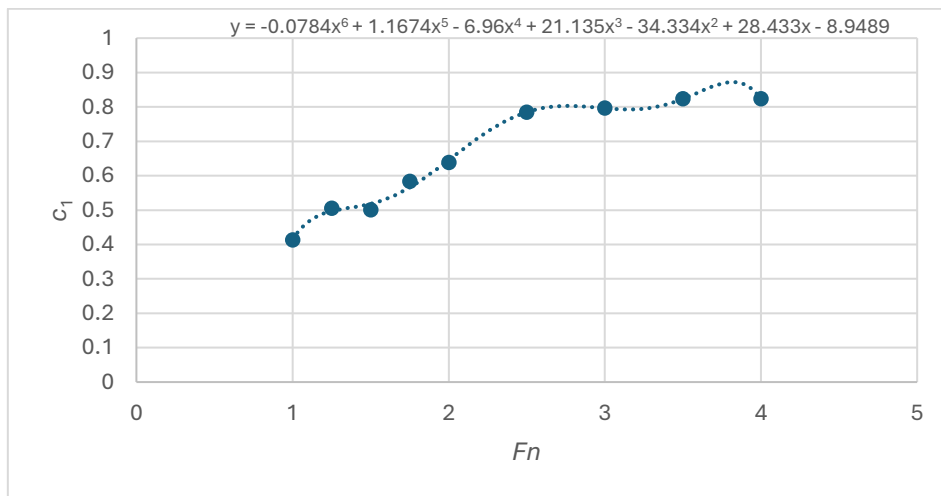
Slika 56. Ovisnost regresijskog koeficijenta b_{24} o Froudeovom brojuSlika 57. Ovisnost regresijskog koeficijenta b_{25} o Froudeovom brojuSlika 58. Ovisnost regresijskog koeficijenta b_{26} o Froudeovom broju

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

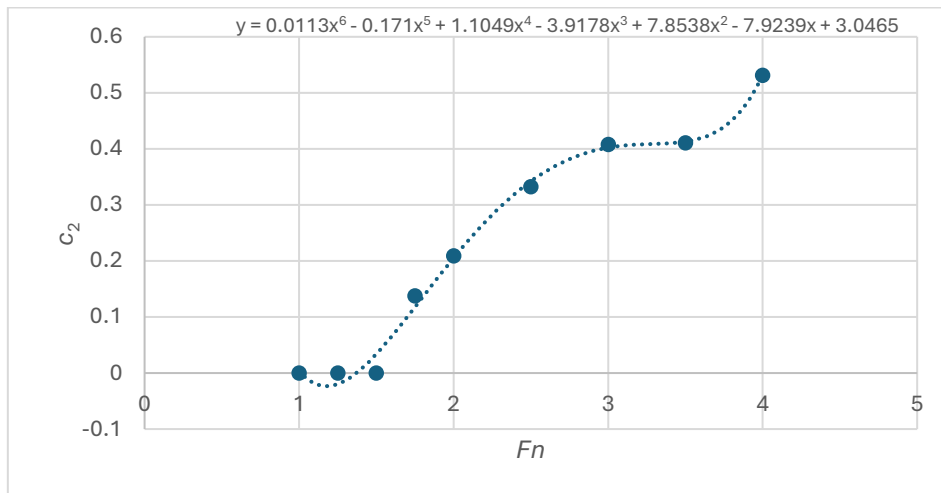
$$\frac{S}{\sqrt[3]{\sigma}} = c_0 \cdot (x_1 + 2)^{c_1} \cdot (x_2 + 2)^{c_2} \cdot (x_3 + 2)^{c_3} \cdot (x_4 + 2)^{c_4} \quad (39)$$



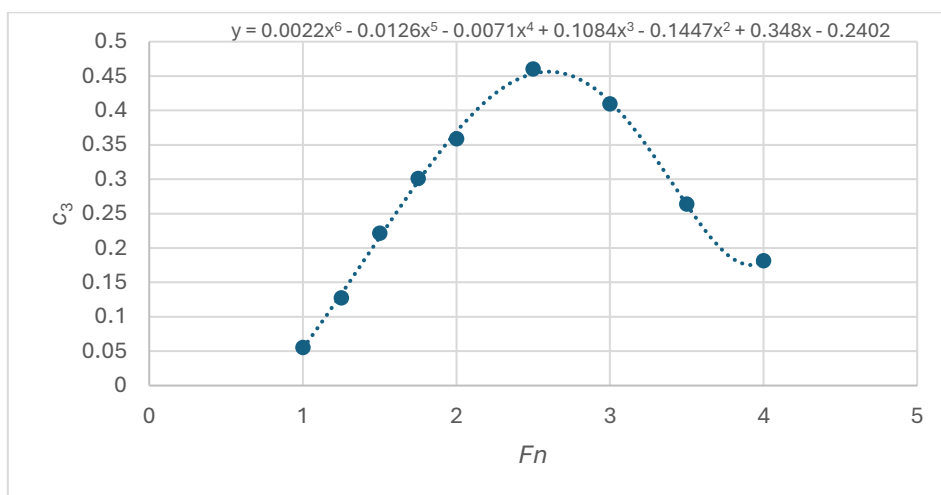
Slika 59. Ovisnost regresijskog koeficijenta c_0 o Froudeovom broju



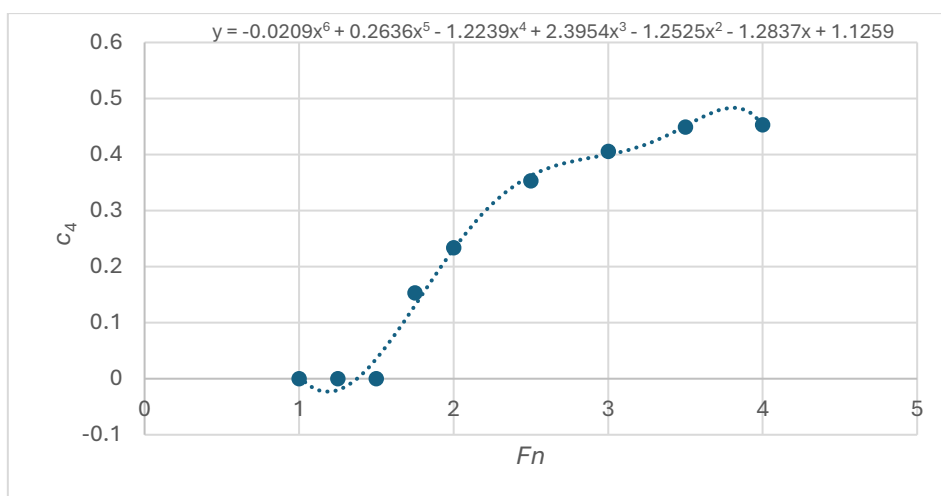
Slika 60. Ovisnost regresijskog koeficijenta c_1 o Froudeovom broju



Slika 61. Ovisnost regresijskog koeficijenta c_2 o Froudeovom broju



Slika 62. Ovisnost regresijskog koeficijenta c_3 o Froudeovom broju

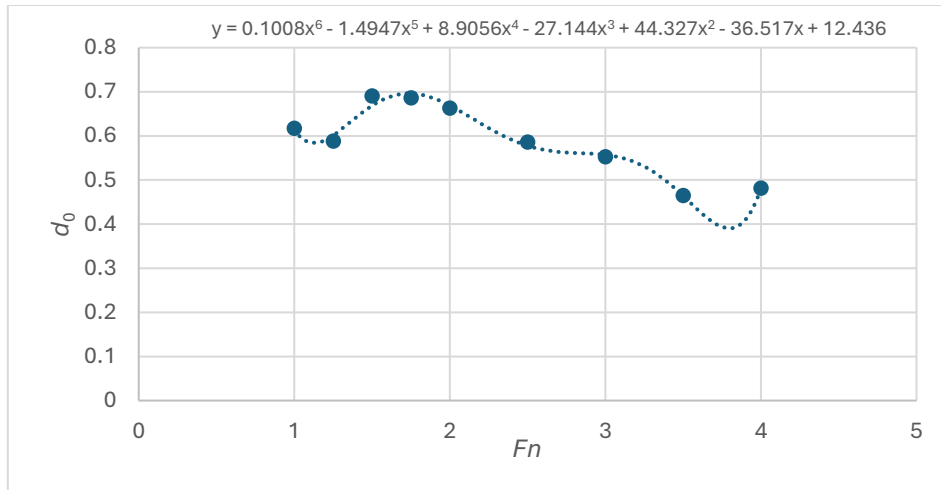


Slika 63. Ovisnost regresijskog koeficijenta c_4 o Froudeovom broju

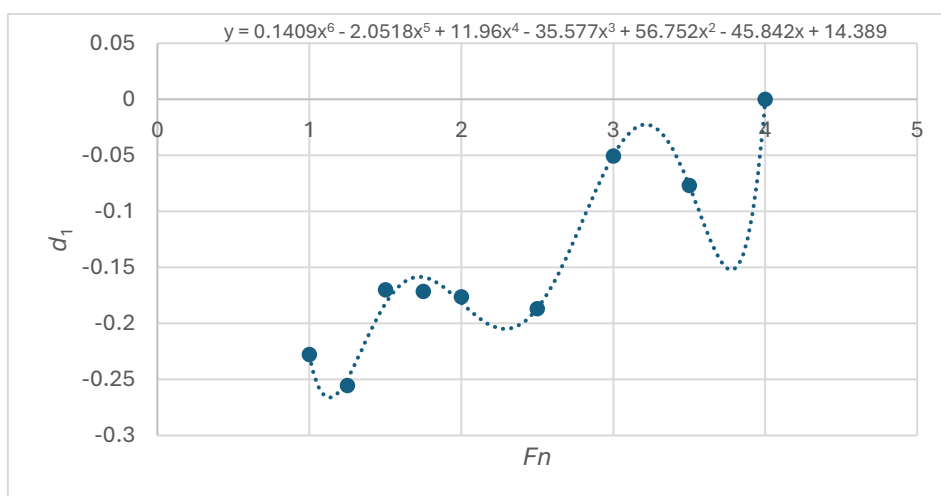
Omjer $\frac{L}{L_p}$ moguće je odrediti na sljedeći način:

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

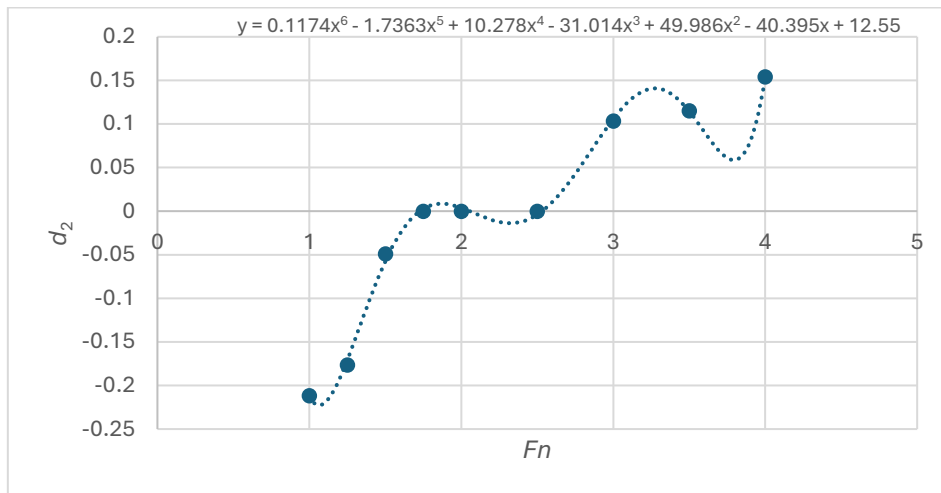
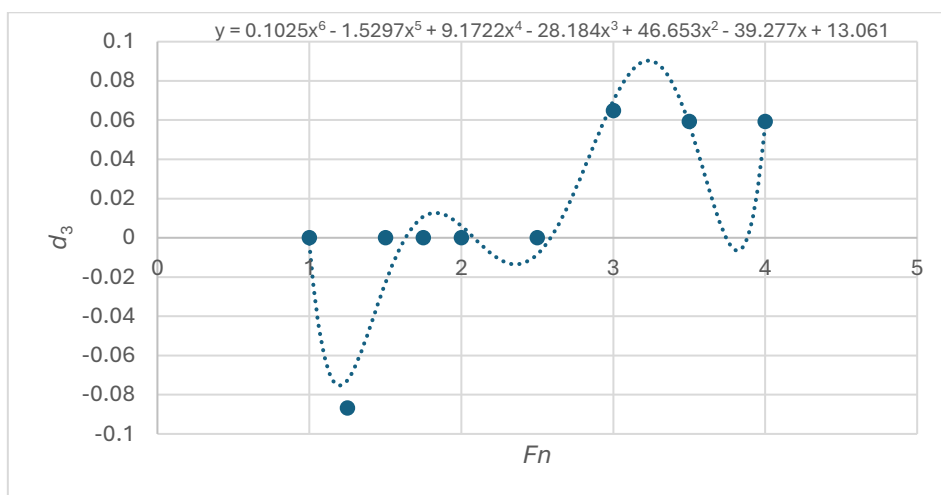
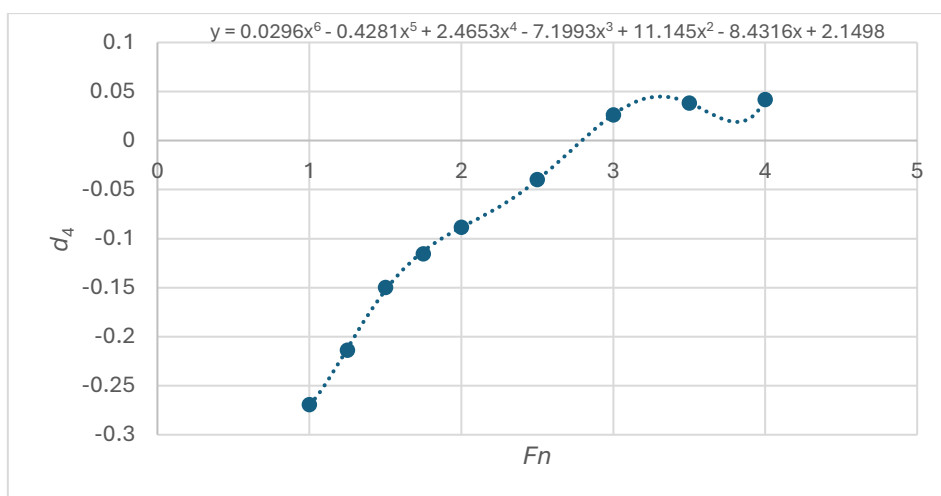
Regresijski koeficijenti navedeni u jednadžbi (40) mogu se iščitati sa Slika 65.-75.

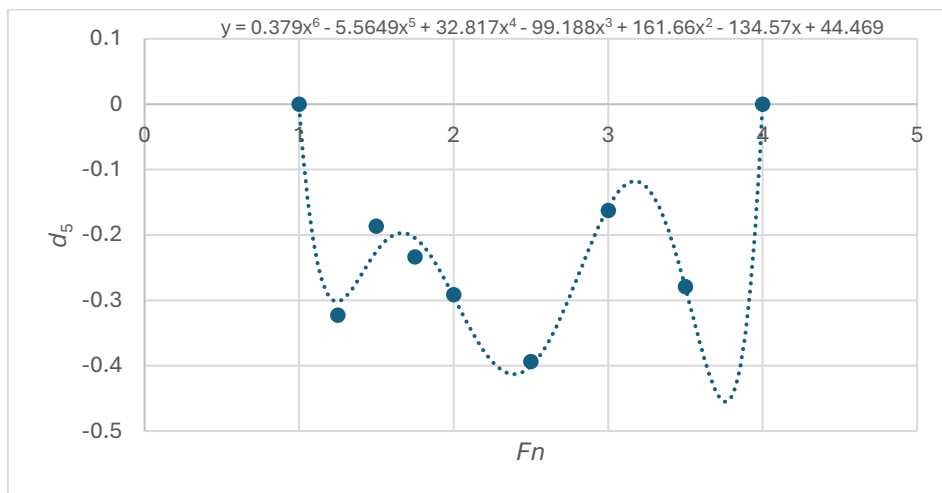
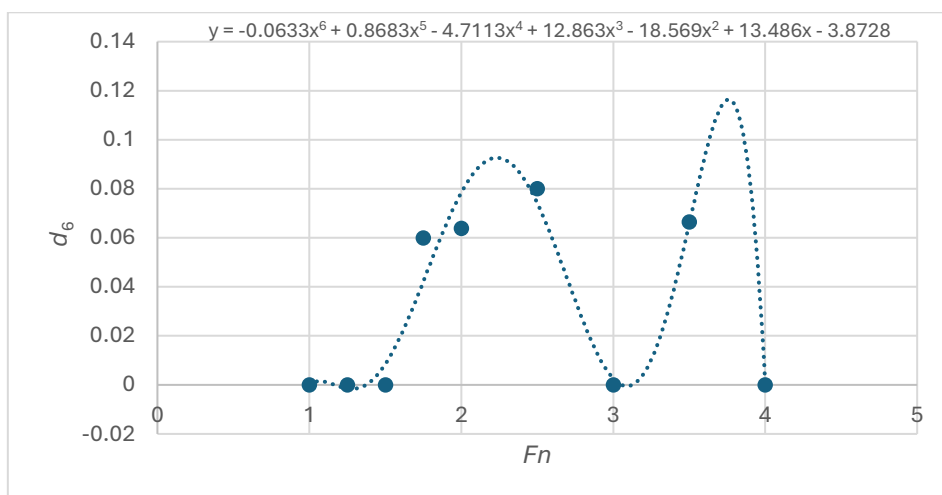
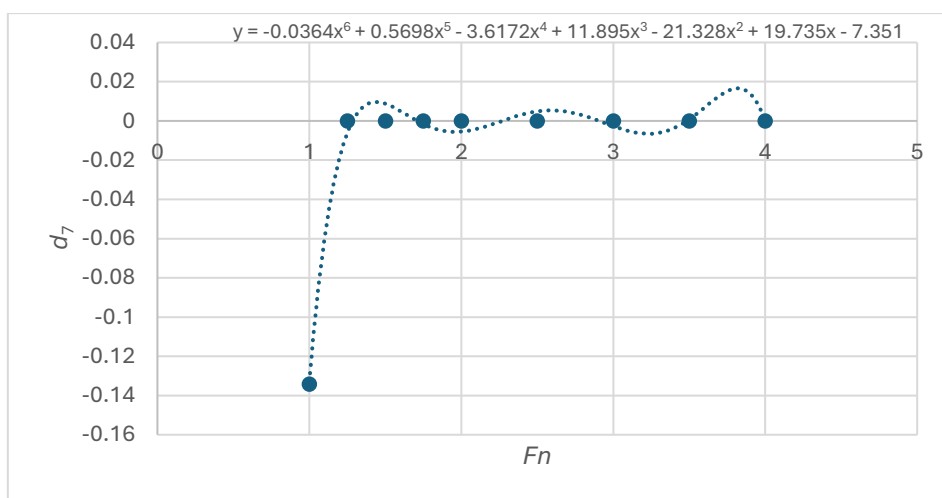


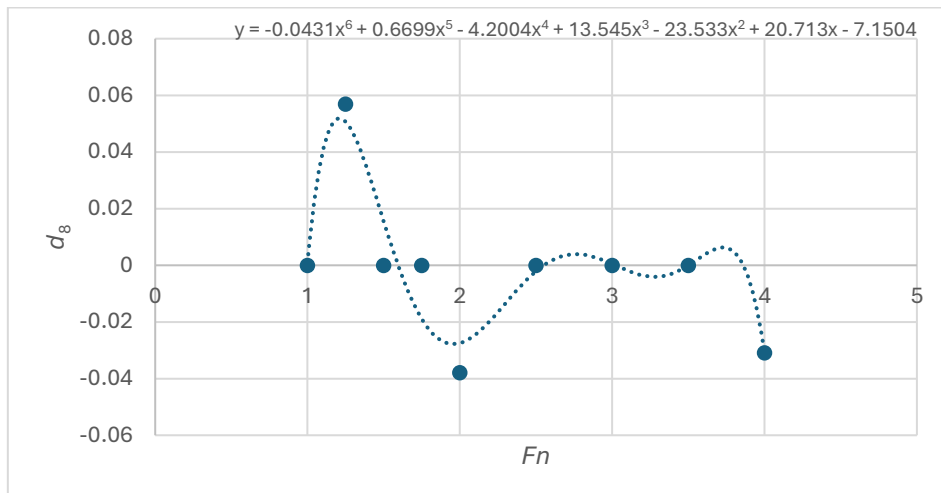
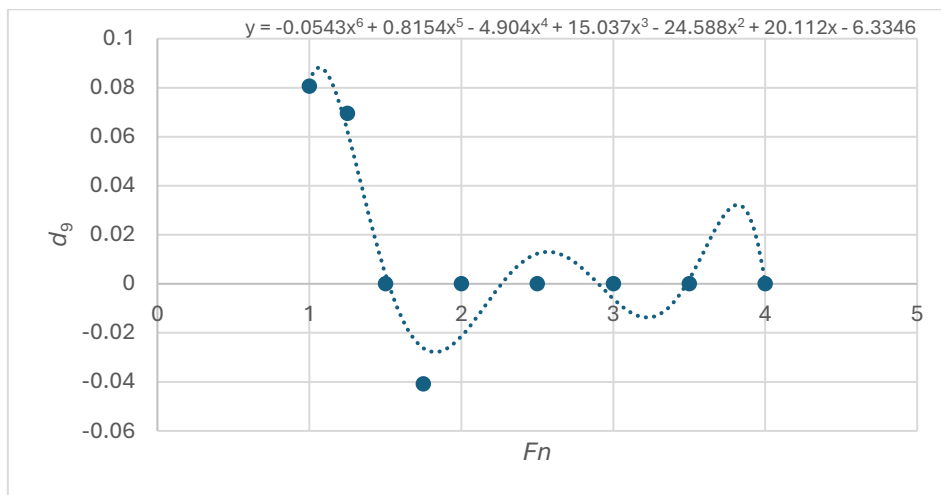
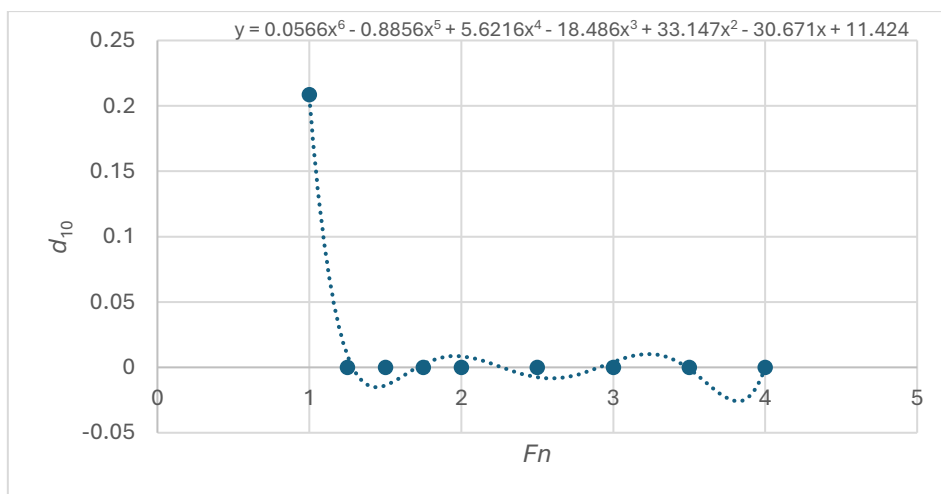
Slika 64. Ovisnost regresijskog koeficijenta d_0 o Froudeovom broju



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 | $S/\sqrt{3}^2$ | 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 , 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 | F_n | 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 | F_n | 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

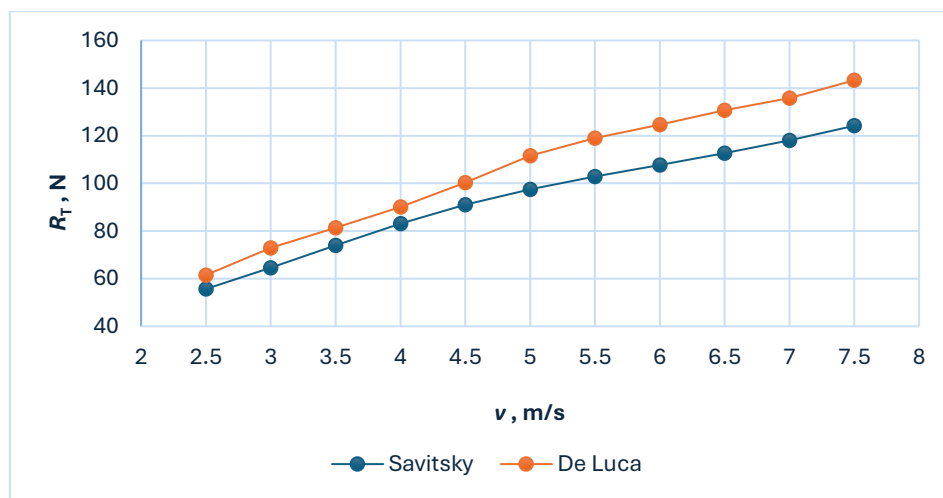
| v , m/s | τ , ° | R/Δ | $S/\nabla^{2/3}$ | $R/\Delta(kor)$ | R , N | $RD(R_T)$, % | $RD(\tau)$, % |
|-----------|------------|------------|------------------|-----------------|----------|---------------|----------------|
| 2.5 | 2.8126 | 0.0807 | 6.9257 | 0.0891 | 47.3041 | 19.287 | 51,2131 |
| 3 | 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

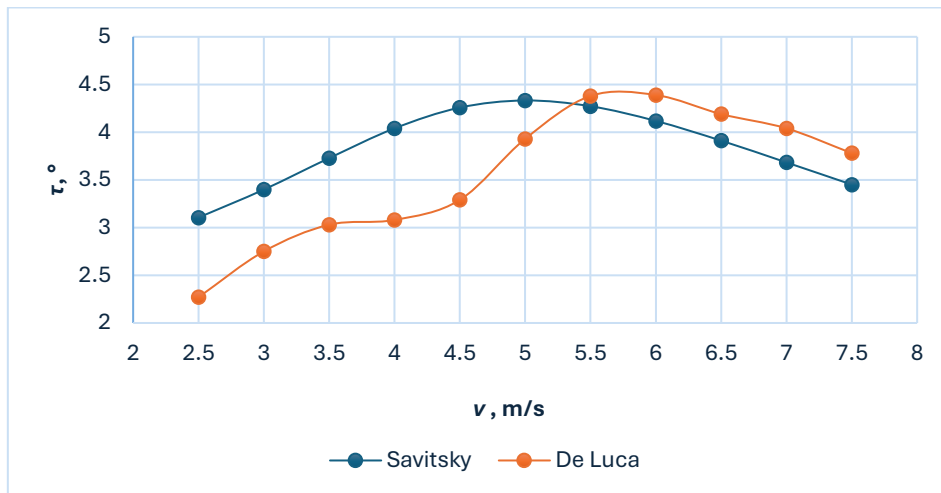
U ovom poglavlju dana je grafička usporedba rezultata dobivenih primjenom metoda Savitsky i Radojčić s eksperimentalnim rezultatima kako bi se omogućila vizualna usporedba istih. Cilj usporedbe je analizirati točnost i primjenjivost navedenih metoda u postupku preliminarnog projektiranja brzih brodova.

7.1. Usporedba rezultata dobivenih primjenom metode Savitsky s eksperimentalnim rezultatima



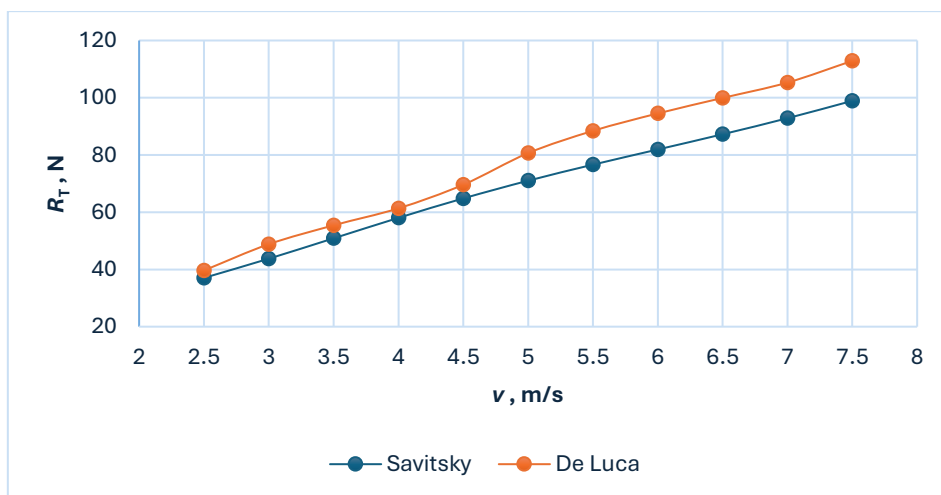
Slika 75. Usporedba ukupnog otpora za model C3

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.

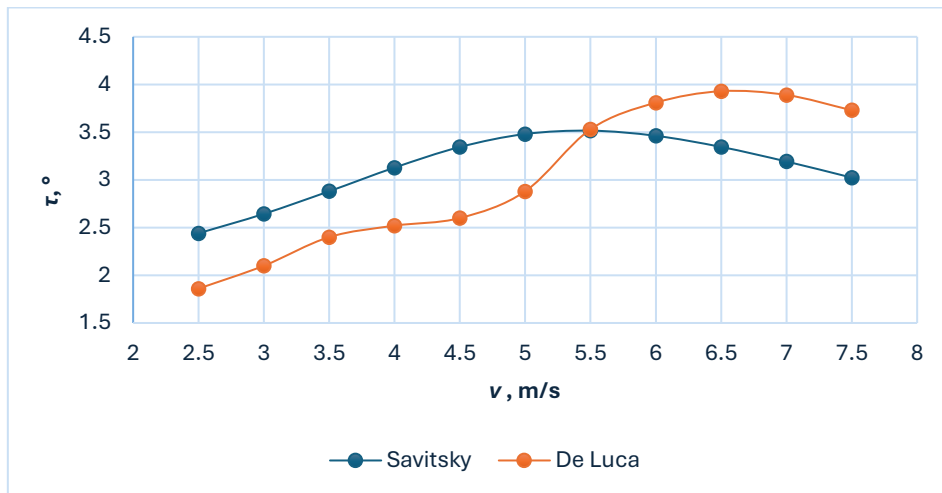


Slika 76. Usporedba kuta trima za model C3

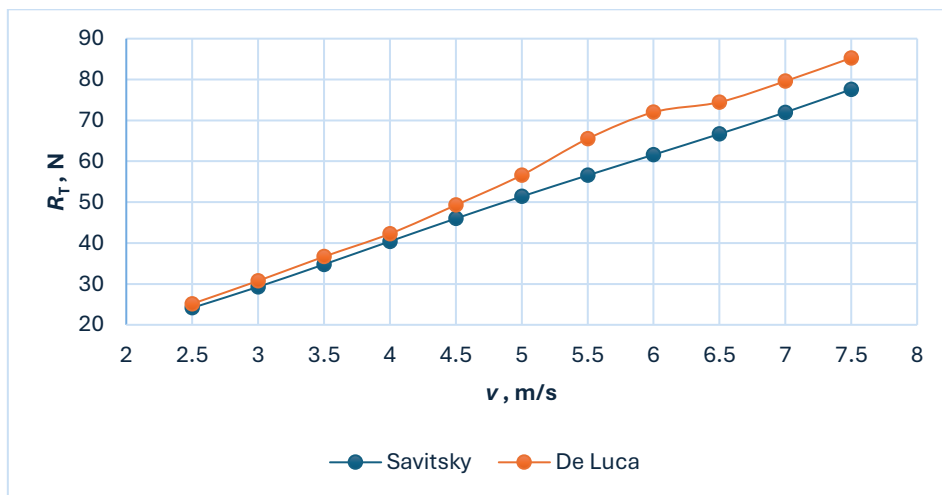
Na Slikama 77. i 78. prikazani su rezultati ukupnog otpora i kuta trima za model C4. Vidljivo je kako je ukupni otpor dobiven primjenom metode Savitsky zadovoljavajuće točnosti, posebice u području brzina do 4,5 m/s. S druge strane kut trima određen metodom Savitsky pokazuje drugačiji trend u odnosu 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.



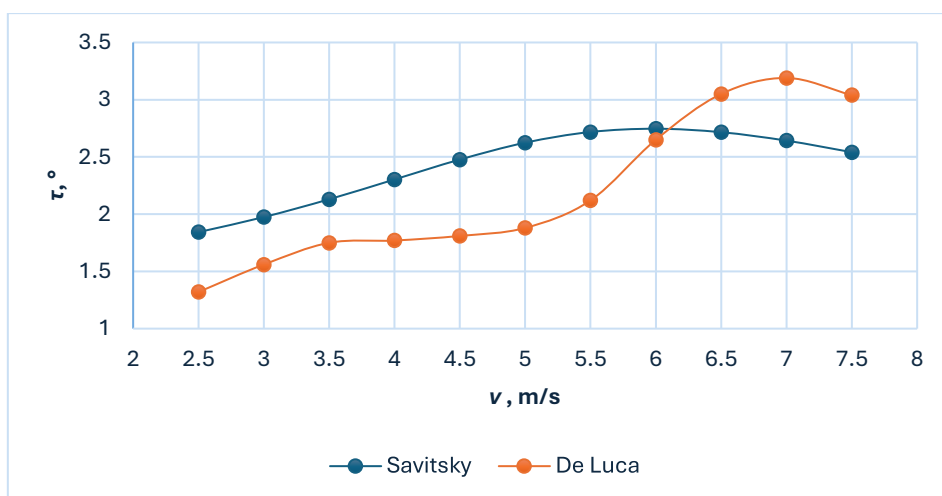
Slika 77. Usporedba ukupnog otpora za model C4



Slika 78. Usporedba kuta trima za model C4

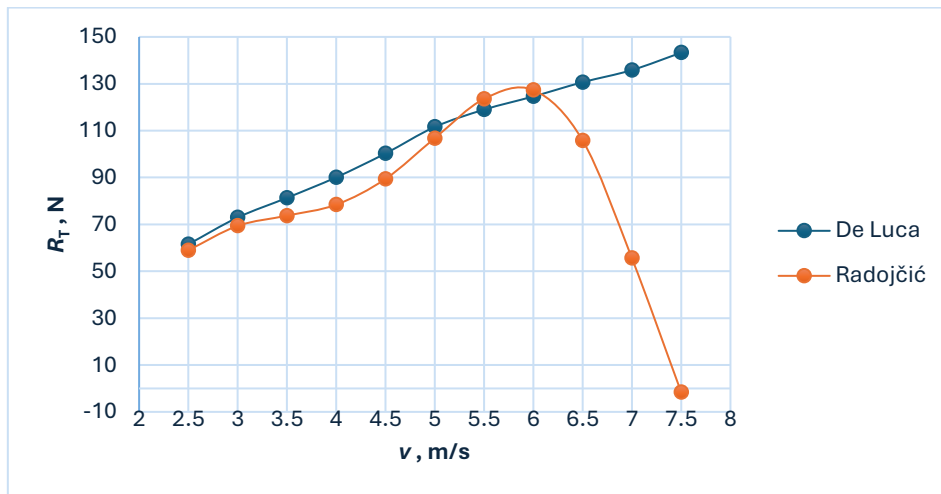


Slika 79. Usporedba ukupnog otpora za model C5

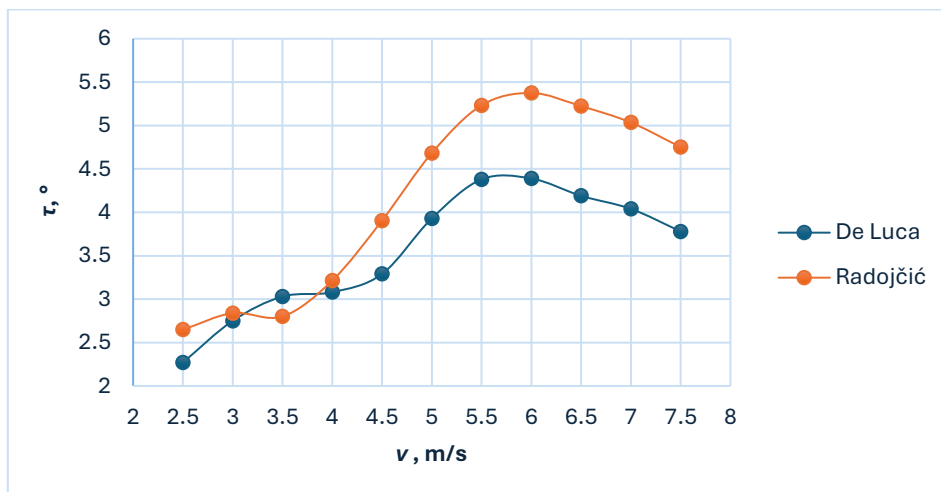


Slika 80. Usporedba kuta trima za model C5

7.2. Usporedba rezultata dobivenih primjenom metode Radojčić s eksperimentalnim rezultatima



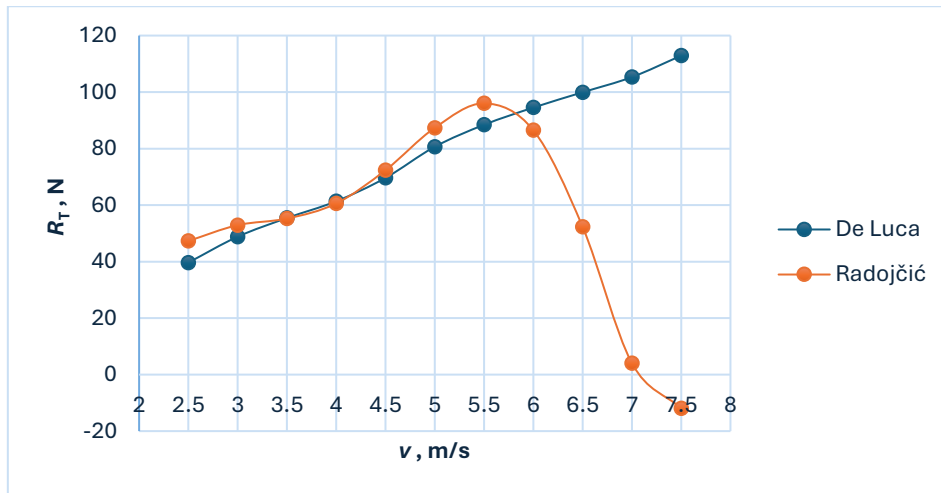
Slika 81. Usporedba ukupnog otpora za model C3



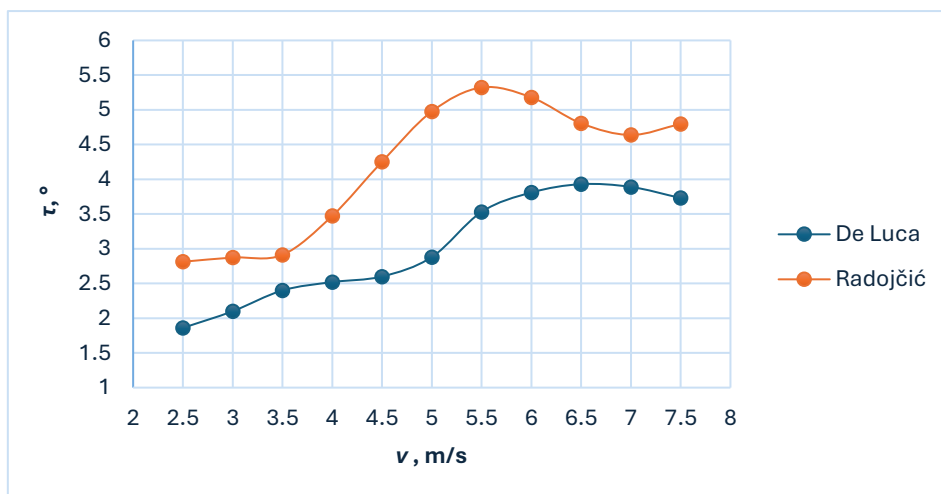
Slika 82. Usporedba kuta trima za model C3

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.