

# Procjena pomorstvenih karakteristika neoštećenog i oštećenog broda

---

Martić, Ivana

Master's thesis / Diplomski rad

2014

*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:235:698567>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-13**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Ivana Martić**

Zagreb, 2014.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentor:

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

Student:

Ivana Martić

Zagreb, 2014.

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

Zahvaljujem se mentorici prof. dr. sc. Nastiji Degiuli na pomoći i podršci te ukazanom povjerenju. Hvala Vam na svemu.

Veliku zahvalu dugujem doc. dr. sc. Ivanu Čatipoviću i dr. sc. Marku Tomiću što su uvijek bili na raspolaganju za moja pitanja i nedoumice. Hvala Vam obojici, puno ste mi pomogli i puno ste me naučili!

Konačno, neizmjernu zahvalnost želim izraziti svojim roditeljima koji su mi omogućili sve što sam do sada postigla.

Ivana Martić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**  
Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija brodogradnje



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

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Ivana Martić** Mat. br.: 0035176790

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **PROCJENA POMORSTVENIH KARAKTERISTIKA NEOŠTEĆENOG I OŠTEĆENOG BRODA**

Naslov rada na engleskom jeziku: **EVALUATION OF SEAKEEPING CHARACTERISTICS OF INTACT AND DAMAGED SHIP**

Opis zadatka:

Nakon pomorske nesreće, oštećeni brod treba ukloniti s mjesta događaja. Najčešće se za uklanjanje oštećenog broda koristi tegalj. Pri tome na hidrodinamiku broda veliki utjecaj ima naplavljena tekućina koja je prodrla u trup broda kroz nastalo oštećenje. Stoga je cilj ovog rada provesti procjenu pomorstvenih karakteristika oštećenog broda te rezultate analize usporediti s odgovarajućim pomorstvenim karakteristikama broda u neoštećenom stanju.

U okviru diplomskog rada potrebno je:

1. Proračunati dodatni otpor i prijenosne funkcije kontejnerskog broda za pravilne valove u pramac te dobivene rezultate usporediti s eksperimentalnim podacima iz literature.
2. Proračunati dodatni otpor i prijenosne funkcije kontejnerskog broda za različita stanja mora.
3. Simulirati oštećeno stanje broda definiranjem oštećenja na srednjem dijelu broda te proračunati odziv oštećenog broda za različita stanja mora.
4. Usporediti odziv broda u oštećenom i neoštećenom stanju.


U radu koristiti programski paket HydroSTAR (Bureau Veritas).

Zadatak zadan:  
25. rujna 2014.

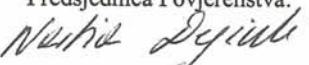
Rok predaje rada:  
27. studenog 2014.

Predviđeni datumi obrane:  
3., 4. i 5. prosinca 2014.

Zadatak zadao:

  
Prof. dr. sc. Nastia Degiuli

Predsjednica Povjerenstva:

  
Prof. dr. sc. Nastia Degiuli

## SADRŽAJ

|   |     |
|---|-----|
| SADRŽAJ .....   | I   |
| POPIS SLIKA .....   | III |
| POPIS TABLICA .....   | V   |
| POPIS OZNAKA .....  | VI  |
| SAŽETAK .....   | IX  |
| SUMMARY .....   | X   |
| 1. UVOD .....   | 1   |
| 1.1. Opor na mirnoj vodi .....  | 2   |
| 1.2. Opor valova .....  | 4   |
| 1.3. Dodatni opor na valovima .....   | 5   |
| 2. METODE ODREĐIVANJA DODATNOG OTPORA .....   | 7   |
| 2.1. Osnove linearne teorije valova .....   | 7   |
| 2.1.1. Teorija potencijalnog strujanja .....  | 9   |
| 2.2. Metode određivanja dodatnog otpora .....   | 10  |
| 3. DODATNI OTPOR KONTEJNERSKOG BRODA NA PRAVILNIM VALOVIMA ....   | 16  |
| 3.1. Uvod .....   | 16  |
| 3.2. Kvadratna prijenosna funkcija QTF i njezina aproksimacija .....                                    | 18  |
| 3.3. Priprema podataka za <i>HydroSTAR</i> .....  | 21  |
| 3.4. Rezultati proračuna .....  | 22  |
| 3.4.1. Sila zanošenja, sila dodatnog otpora na valovima i koeficijent dodatnog otpora na valovima ..... | 23  |
| 3.4.2. Usporedba numeričkih i eksperimentalnih rezultata .....  | 27  |
| 3.5. Ekstrapolacija rezultata .....   | 32  |
| 4. ODZIV BRODA NA VALOVIMA .....  | 37  |
| 4.1. Model njihanja broda na valovima .....   | 37  |
| 4.2. Prijenosna funkcija .....  | 41  |
| 4.3. Prijenosne funkcije modela kontejnerskog broda S-175 .....   | 41  |
| 4.4. Odziv kontejnerskog broda S-175 na pravilnim valovima .....  | 44  |
| 4.4.1. Susretna frekvencija .....   | 44  |
| 5. ODZIV OŠTEĆENOG BRODA NA VALOVIMA .....  | 50  |
| 5.1. Naplavljena tekućina kao dodana kruta masa broda .....   | 54  |
| 5.2. Spregnuta njihanja broda i tekućine unutar tanka .....   | 56  |
| 5.3. Usporedba rezultata .....  | 59  |
| 6. SPEKTAR ODZIVA BRODA ZA DEFINIRANA STANJA MORA .....   | 64  |
| 6.1. Uvod .....   | 64  |
| 6.2. Tabainov spektar valova .....  | 65  |
| 6.3. Odziv broda na morskim valovima .....  | 67  |
| 6.3.1. Spektar odziva neoštećenog broda .....   | 68  |
| 6.3.2. Spektar odziva oštećenog broda povećane mase istisnine .....                                     | 70  |

---

|   |    |
|---|----|
| 6.3.3. Spektar odziva oštećenog broda s naplavljenim tankom ..... | 73 |
| 7. DODATNI OTPOR ZA DEFINIRANA STANJA MORA .....                  | 78 |
| 8. ZAKLJUČAK.....   | 84 |
| LITERATURA.....   | 86 |

## POPIS SLIKA

|           |  |    |
|-----------|--|----|
| Slika 1.  | Brodski trup u vrpčastoj metodi [3] .....  | 11 |
| Slika 2.  | Nacrt rebara modela kontejnerskog broda S-175 [7] .....  | 16 |
| Slika 3.  | Eksperimentalno određeni koeficijenti dodatnog otpora [7] .....  | 17 |
| Slika 4.  | Mreža panela za trup modela S-175 [8] .....  | 21 |
| Slika 5.  | Usporedba koeficijenata dodatnog otpora na valovima za $Fr=0$ .....  | 28 |
| Slika 6.  | Usporedba koeficijenata dodatnog otpora na valovima za $Fr=0,087$ .....  | 29 |
| Slika 7.  | Usporedba koeficijenata dodatnog otpora na valovima za $Fr=0,148$ .....  | 30 |
| Slika 8.  | Usporedba koeficijenata dodatnog otpora na valovima za $Fr=0,198$ .....  | 31 |
| Slika 9.  | Sila dodatnog otpora broda za različite Froudeove brojeve .....  | 34 |
| Slika 10. | Postotak povećanja sile ukupnog otpora broda uslijed plovitbe na valovima u odnosu na plovitbu u mirnoj vodi ..... | 36 |
| Slika 11. | Stupnjevi slobode gibanja broda .....  | 38 |
| Slika 12. | Prijenosne funkcije modela broda S-175 [7] .....   | 42 |
| Slika 13. | Usporedba prijenosnih funkcija zalijetanja modela .....  | 42 |
| Slika 14. | Usporedba prijenosnih funkcija poniranja modela .....  | 43 |
| Slika 15. | Usporedba prijenosnih funkcija posrtanja modela .....  | 43 |
| Slika 16. | Prijenosne funkcije pomaka, brzine i ubrzanja za zalijetanje .....   | 46 |
| Slika 17. | Prijenosne funkcije pomaka, brzine i ubrzanja za poniranje .....   | 47 |
| Slika 18. | Prijenosne funkcije pomaka, brzine i ubrzanja za posrtanje .....   | 48 |
| Slika 19. | Brod na dugačkim valovima u pramac [12] .....  | 49 |
| Slika 20. | Gibanje slobodne površine tanka .....  | 52 |
| Slika 21. | Mreža panela kontejnerskog broda S-175 s unutrašnjim tankom .....  | 53 |
| Slika 22. | Prijenosne funkcije ubrzanja za zalijetanje .....  | 54 |
| Slika 23. | Prijenosne funkcije pomaka, brzine i ubrzanja za poniranje .....   | 55 |
| Slika 24. | Prijenosne funkcije pomaka, brzine i ubrzanja za posrtanje .....   | 56 |
| Slika 25. | Prijenosne funkcije pomaka, brzine i ubrzanja za zalijetanje .....   | 57 |
| Slika 26. | Prijenosne funkcije pomaka, brzine i ubrzanja za poniranje .....   | 58 |
| Slika 27. | Prijenosne funkcije ubrzanja za posrtanje .....  | 59 |
| Slika 28. | Usporedba prijenosnih funkcija zalijetanja za brzinu $v=0$ .....   | 60 |
| Slika 29. | Usporedba prijenosnih funkcija poniranja za brzinu $v=0$ .....   | 60 |
| Slika 30. | Usporedba prijenosnih funkcija posrtanja za brzinu $v=0$ .....   | 60 |
| Slika 31. | Usporedba prijenosnih funkcija zalijetanja za brzinu $v=3,604$ m/s .....   | 61 |
| Slika 32. | Usporedba prijenosnih funkcija poniranja za brzinu $v=3,604$ m/s .....   | 61 |
| Slika 33. | Usporedba prijenosnih funkcija posrtanja za brzinu $v=3,604$ m/s .....   | 61 |
| Slika 34. | Usporedba prijenosnih funkcija zalijetanja za brzinu $v=6,133$ m/s .....   | 62 |
| Slika 35. | Usporedba prijenosnih funkcija poniranja za brzinu $v=6,133$ m/s .....   | 62 |
| Slika 36. | Usporedba prijenosnih funkcija posrtanja za brzinu $v=6,133$ m/s .....   | 62 |
| Slika 37. | Usporedba prijenosnih funkcija zalijetanja za brzinu $v=8,203$ m/s .....   | 63 |
| Slika 38. | Usporedba prijenosnih funkcija poniranja za brzinu $v=8,203$ m/s .....   | 63 |
| Slika 39. | Usporedba prijenosnih funkcija posrtanja za brzinu $v=8,203$ m/s .....   | 63 |
| Slika 40. | Tabainov valni spektar za dvije značajne valne visine .....  | 67 |
| Slika 41. | Spektar odziva zalijetanja, poniranja i posrtanja neoštećenog broda .....  | 68 |
| Slika 42. | Spektar odziva zalijetanja, poniranja i posrtanja neoštećenog broda .....  | 69 |
| Slika 43. | Spektar odziva zalijetanja, poniranja i posrtanja neoštećenog broda .....  | 69 |
| Slika 44. | Spektar odziva zalijetanja, poniranja i posrtanja neoštećenog broda .....  | 70 |



|           |   |    |
|-----------|---|----|
| Slika 45. | Spektar odziva zalijetanja, poniranja i posrtanja oštećenog broda povećane mase za brzinu $v=0$ .....                     | 71 |
| Slika 46. | Spektar odziva zalijetanja, poniranja i posrtanja oštećenog broda povećane mase za brzinu $v=3,604$ m/s .....             | 71 |
| Slika 47. | Spektar odziva zalijetanja, poniranja i posrtanja oštećenog broda povećane mase za brzinu $v=6,133$ m/s .....             | 72 |
| Slika 48. | Spektar odziva zalijetanja, poniranja i posrtanja oštećenog broda povećane mase za brzinu $v=8,203$ m/s .....             | 72 |
| Slika 49. | Spektar odziva zalijetanja, poniranja i posrtanja oštećenog broda s naplavljenim tankom za brzinu $v=0$ .....             | 73 |
| Slika 50. | Spektar odziva zalijetanja, poniranja i posrtanja oštećenog broda s naplavljenim tankom za brzinu $v=3,604$ m/s .....     | 74 |
| Slika 51. | Spektar odziva zalijetanja, poniranja i posrtanja oštećenog broda s naplavljenim tankom za brzinu $v=6,133$ m/s .....     | 74 |
| Slika 52. | Spektar odziva zalijetanja, poniranja i posrtanja oštećenog broda s naplavljenim tankom za brzinu $v=8,203$ m/s .....     | 75 |
| Slika 53. | Spektar sila zanošenja neoštećenog broda.....   | 80 |
| Slika 54. | Spektar sila zanošenja oštećenog broda povećane mase .....  | 81 |
| Slika 55. | Spektar sila zanošenja oštećenog broda s naplavljenim tankom .....  | 81 |
| Slika 56. | Srednja vrijednost sile dodatnog otpora u ovisnosti o brzini napredovanja za značajnu valnu visinu $H_{1/3}=7,20$ m ..... | 82 |
| Slika 57. | Srednja vrijednost sile dodatnog otpora u ovisnosti o brzini napredovanja za značajnu valnu visinu $H_{1/3}=8,57$ m ..... | 82 |
| Slika 58. | Usporedba izračunatih vrijednosti koeficijenata dodatnog otpora na valovima s podacima iz literature [17], [18].....      | 83 |

## POPIS TABLICA

|   |    |
|---|----|
| Tablica 1. Značajke modela S-175 i broda u naravi.....  | 17 |
| Tablica 2. Frekvencije nailaznih valova.....  | 22 |
| Tablica 3. Froudeovi brojevi i brzine ispitanog modela S-175.....   | 22 |
| Tablica 4. Sile zanošenja, sile dodatnog otpora na valovima i bezdimenzijski koeficijenti za $Fr=0$ .....                     | 25 |
| Tablica 5. Sile zanošenja, sile dodatnog otpora na valovima i bezdimenzijski koeficijenti za $Fr=0,087$ .....                 | 25 |
| Tablica 6. Sile zanošenja, sile dodatnog otpora na valovima i bezdimenzijski koeficijenti za $Fr=0,148$ .....                 | 26 |
| Tablica 7. Sile zanošenja, sile dodatnog otpora na valovima i bezdimenzijski koeficijenti za $Fr=0,198$ .....                 | 27 |
| Tablica 8. Usporedba koeficijenata dodatnog otpora na valovima za $Fr=0$ .....  | 28 |
| Tablica 9. Usporedba koeficijenata dodatnog otpora na valovima za $Fr=0,087$ .....  | 29 |
| Tablica 10. Usporedba koeficijenata dodatnog otpora na valovima za $Fr=0,148$ .....   | 30 |
| Tablica 11. Usporedba koeficijenata dodatnog otpora na valovima za $Fr=0,198$ .....   | 31 |
| Tablica 12. Podaci za model i brod u naravi.....  | 33 |
| Tablica 13. Sile dodatnog otpora broda na valovima za različite omjere $\lambda/L$ i različite Froudeove brojeve.....         | 33 |
| Tablica 14. Koeficijenti i sila otpora broda pri pojedinim brzinama.....  | 35 |
| Tablica 15. Postotak povećanja sile ukupnog otpora broda uslijed plovidbe na valovima u odnosu na plovidbu u mirnoj vodi..... | 35 |
| Tablica 16. Hidrostatske značajke broda S-175.....  | 44 |
| Tablica 17. Susretne frekvencije kontejnerskog broda S-175.....   | 45 |
| Tablica 18. Karakteristike tanka.....   | 53 |
| Tablica 19. Hidrostatske značajke broda nakon oštećenja.....  | 54 |
| Tablica 20. Tabainov valni spektar za $H_{1/3}=7,20$ m.....   | 66 |
| Tablica 21. Tabainov valni spektar za $H_{1/3}=8,57$ m.....   | 67 |
| Tablica 22. Nulti spektralni momenti, značajne i srednje amplitude odziva zalijetanja.....                                    | 76 |
| Tablica 23. Nulti spektralni momenti, značajne i srednje amplitude odziva poniranja.....                                      | 76 |
| Tablica 24. Nulti spektralni momenti, značajne i srednje amplitude odziva posrtanja.....                                      | 77 |
| Tablica 25. Sile zanošenja neoštećenog broda.....   | 79 |
| Tablica 26. Sile zanošenja oštećenog broda s povećanom masom.....   | 79 |
| Tablica 27. Sile zanošenja oštećenog broda s naplavljenim tankom.....   | 80 |
| Tablica 28. Nulti spektralni momenti i srednje vrijednosti sila dodatnog otpora.....  | 82 |

## POPIS OZNAKA

| Oznaka     | Jedinica          | Opis  |
|------------|-------------------|---|
| $R_T$      | N                 | sila ukupnog otpora   |
| $\tau_0$   | N/m <sup>2</sup>  | tangencijalno naprezanje  |
| $S$        | m <sup>2</sup>    | oplakana površina   |
| $p$        | N/m <sup>2</sup>  | hidrodinamički tlak   |
| $R_V$      | N                 | viskozni otpor  |
| $R_W$      | N                 | otpor valova  |
| $C_F$      | -                 | koeficijent otpora trenja   |
| $C_{PV}$   | -                 | koeficijent viskoznog otpora tlaka  |
| $C_W$      | -                 | koeficijent otpora valova   |
| $C_A$      | -                 | koeficijent preostalog otpora   |
| $\rho$     | kg/m <sup>3</sup> | gustoća   |
| $v$        | m/s               | brzina  |
| $\omega_e$ | rad/s             | susretna frekvencija  |
| $\omega$   | rad/s             | frekvencija valova  |
| $k$        | 1/m               | valni broj  |
| $U$        | m/s               | brzina napredovanja broda   |
| $\beta$    | °                 | kut nailaska valova   |
| $\Phi$     | m <sup>2</sup> s  | potencijal brzine strujanja   |
| $\Psi$     | m <sup>2</sup> s  | strujna funkcija  |
| $g$        | m/s <sup>2</sup>  | ubrzanje zemljine sile teže   |
| $z$        | m                 | geodetska visina  |
| $\zeta$    | m                 | elevacija vala  |
| $\Phi_w$   | m <sup>2</sup> s  | potencijal brzine vala  |
| $\zeta_a$  | m                 | jedinična valna amplituda   |
| $d$        | m                 | dubina  |
| $\varphi$  | m <sup>2</sup> s  | potencijal brzine strujanja oko dvodimenzijских presjeka                    |
| $\vec{n}$  | -                 | vektor normale  |
| $c_0$      | -                 | linija oplakanog oboda presjeka   |
| $\vec{f}$  | N/m               | sila na dvodimenzijски presjek  |
| $\vec{m}$  | Nm/m              | moment na dvodimenzijски presjeci   |
| $\vec{r}$  | -                 | radijvektor   |
| $\phi_0$   | m <sup>2</sup> s  | kompleksni potencijal brzine strujanja                                      |
| $\phi_I$   | m <sup>2</sup> s  | kompleksni potencijal nailaznog vala  |
| $\phi_F$   | m <sup>2</sup> s  | kompleksni potencijal brzine gibanja za svih šest stupnjeva slobode gibanja |

|                           |  |  |
|---------------------------|--|--|
| $\phi_D$                  | $m^2s$   | kompleksni potencijal difrakcije   |
| $M_{jk}$                  | kg   | matrica masa   |
| $A_{jk}$                  | kg, kgm, kgm <sup>2</sup>  | matrica dodatne mase   |
| $B_{jk}$                  | kg/s, kgm/s,<br>kgm <sup>2</sup> /s  | matrica prigušenja   |
| $C_{jk}$                  | kg/s <sup>2</sup> , kgm/s <sup>2</sup> ,<br>kgm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> | matrica povratnih sila   |
| $\eta_k$                  | m  | pomak  |
| $F_j$                     | N  | uzbudna sila   |
| $F_j^I$                   | N  | Froude-Krilovljeva sila  |
| $F_j^D$                   | N  | difrakcijska komponenta uzbudne sile   |
| $L$                       | m  | duljina broda  |
| $\lambda$                 | m  | valna duljina  |
| $b_{33}$                  | -  | bezdimenzijski koeficijent prigušenja  |
| $a_{33}$                  | -  | bezdimenzijski koeficijent dodatne mase  |
| $v_{3a}^*$                | l/s  | vertikalna relativna brzina vrpce u vrpčastoj teoriji  |
| $R_{aw}$                  | N  | dodatni otpor na valovima  |
| $\lambda_e$               | m  | susretna valna duljina   |
| $S_\zeta(\omega_e)$       | $m^2s$   | spektar valova   |
| $m_{0R}$                  | $m^2$  | nulti spektralni moment  |
| $B$                       | m  | širina broda   |
| $T$                       | m  | gaz broda  |
| $\nabla$                  | $m^3$  | volumen istisnine  |
| $C_B$                     | -  | koeficijent punoće forme   |
| $F(\omega_i, \omega_j)$   | N  | niskofrekventno valno opterećenje drugog reda  |
| $F_q(\omega_i, \omega_j)$ | N  | valno opterećenje prvog reda   |
| $F_p(\omega_i, \omega_j)$ | N  | valno opterećenje drugog reda  |
| $\omega_i$                | rad/s  | frekvencija nailaznog vala   |
| $\omega_j$                | rad/s  | frekvencija nailaznog vala   |
| $\phi_\gamma$             | $m^2s$   | kompleksni potencijal valova difrakcije  |
| $\phi_k$                  | $m^2s$   | kompleksni potencijal valova radijacije  |
| $F_0(\omega_i)$           | N  | opterećenje uslijed integracije tlaka po oplakanoj površini (nulti član kvadratne prijenosne funkcije) |
| $F_1(\omega_i)$           | N  | prvi član kvadratne prijenosne funkcije  |
| $F_q^1$                   | N  | valno opterećenje prvog reda   |
| $F_{p1}^1$                | N  | valno opterećenje drugog reda i difrakcija   |
| $F_{p2}^1$                | N  | korekcija rubnih uvjeta na trupu   |
| $F_{p3}^1$                | N  | utjecaj tlaka duž slobodne površine  |

|                      |                  |  |
|----------------------|------------------|--|
| $F_2(\omega_i)$      | N                | drugi član kvadratne prijenosne funkcije   |
| $F_{ij}'$            | N                | sila zanošenja   |
| $m$                  | kg               | masa   |
| $F(t)$               | N                | valno opterećenje na niskim frekvencijama  |
| $a_i$                | m                | kompleksna amplituda nailaznog vala  |
| $a_j^*$              | m                | konjugirano kompleksna amplituda nailaznog vala  |
| $C_{xw}$             | -                | koeficijent dodatnog otpora na valovima  |
| $Re$                 | -                | Reynoldsov broj  |
| $\Phi_0$             | m <sup>2</sup> s | funkcija potencijala brzine strujanja nailaznog vala   |
| $\Phi_7$             | m <sup>2</sup> s | funkcija potencijala brzine strujanja difrakcijskog vala   |
| $\Phi_j$             | m <sup>2</sup> s | funkcija potencijala brzine strujanja  |
| $\delta_j$           | m                | kompleksna amplituda njihanja  |
| $\eta_{aj}$          | m                | realna vrijednost amplitude njihanja   |
| $\varepsilon_j$      | rad              | fazni pomak  |
| $H_{R_a}$            | m/m, °/m         | prijenosna funkcija  |
| $\xi$                | m                | vertikalna razlika između mirne slobodne površine i najviše točke valovite slobodne površine tanka prilikom njihanja |
| $Z_v^A$              | m                | vertikalna razlika položaja centra površine vodne linije   |
| $S_{R\zeta}(\omega)$ | m <sup>2</sup> s | spektar odziva   |
| $p$                  | -                | parametar Tabainovog spektra   |
| $\omega_m$           | -                | parametar Tabainovog spektra   |
| $H_{1/3}$            | m                | značajna valna visina  |
| $\sigma$             | -                | parametar Tabainovog spektra   |
| $R_{a1/3}$           | m, °             | srednja vrijednost trećine najviših amplituda odziva   |
| $\overline{R_a}$     | m                | srednja vrijednost svih amplituda odziva   |
| $r_i$                | m <sup>2</sup> s | ordinate funkcije spektra  |
| $\Delta\omega_{i,j}$ | rad/s            | raspon između dvije susjedne frekvencije spektra   |
| $\overline{R_{AW}}$  | N                | srednja vrijednost sile dodatnog otpora za stanje mora   |

## SAŽETAK

Odziv broda na valovima važno je predvidjeti već u fazi projektiranja broda. Usko je vezan uz postizanje i održavanje brzine napredovanja, potrebne snage te potrošnje goriva. Kako bi brod imao dobre pomorstvene karakteristike amplitude gibanja te ubrzanja moraju biti u prihvatljivim granicama, a dodatni otpor na valovima ne smije značajno utjecati na pad brzine broda. U ovom radu proračunat je odziv broda na pravilnim valovima u pramac te za definirana stanja mora u određenom frekvencijskom rasponu pri različitim brzinama plovidbe. Proračun je proveden u programskom paketu *HydroSTAR* (Bureau Veritas). Obzirom da je često nakon pomorskih nesreća oštećeni brod potrebno ukloniti s mjesta nesreće, proračunate su i pomorstvene karakteristike oštećenog broda. Oštećenje je simulirano pomoću dva modela: kao povećana masa istisnine broda te naplavljeni tank u sredini broda. Osim odziva broda na valovima proračunate su i sile dodatnog otpora broda uslijed plovidbe na valovima. Proračun je temeljen na linearnoj teoriji potencijalnog strujanja, a dodatni otpor određen je preko sile zanošenja kao valnog opterećenja drugog reda. Kvadratna prijenosna funkcija QTF koja opisuje niskofrekventna valna opterećenja drugog reda aproksimirana je samo nultim članom odnosno silom zanošenja na pojedinim frekvencijama nailaznih valova. Amplitude odziva broda prikazane su pomoću prijenosnih funkcija. Dana je usporedba pomorstvenih karakteristika neoštećenog i oštećenog broda. Rezultati proračuna pokazuju kako se odziv oštećenog broda s naplavljenim tankom neznatno razlikuje od odziva oštećenog broda s povećanom masom istisnine.

Ključne riječi: *potencijalno strujanje, valno opterećenje, pomorstvenost, odziv broda, dodatni otpor na valovima, kvadratna prijenosna funkcija, sila zanošenja*

## SUMMARY

It is necessary to predict ship response to waves already during the design phase. It affects the ship's ability to achieve and maintain speed, the necessary power and fuel consumption. In order to have good seakeeping characteristics of ship, motion amplitudes and accelerations must be within acceptable limits, and added resistance in waves should not have significant affect on the decrease in ship speed. In this paper the response of the ship in regular bow waves was calculated. The ship response was calculated at defined sea states in certain frequency range and at different forward speeds. Calculations were conducted using software package *HydroSTAR* (Bureau Veritas). Since after maritime accident damaged ship should be often removed from the place where accident occurred, seakeeping characteristics of damaged ship were also calculated. The damage was simulated using two models: as an increase of ship displacement mass and as flooded tank within midship area. In addition to the ship response to waves, the added resistance of ship in waves was calculated. Calculations are based on linear potential flow theory, and added resistance was determined by the wave drift force as the second order wave load. Quadratic transfer function QTF which describes low-frequency second order wave loads was approximated by its zeroth term only, i.e. by the drift load at incoming wave frequencies. Response amplitudes of the ship were presented using transfer functions. Seakeeping characteristics of the intact and damaged ship were compared. The calculation results show that response amplitudes of the damaged ship with flooded tank differ slightly from the response amplitudes of the damaged ship with increased displacement.

Key words: *potential flow, wave load, seakeeping, ship response, added resistance in waves, quadratic transfer function, drift force*

## 1. UVOD

U svrhu procjene sigurnosti plovidbe te mogućnosti obavljanja namjene za koju je brod projektiran potrebno je poznavati odziv broda na valovima odnosno njegove pomorstvene karakteristike. Za različite rute plovidbe broda i stanja mora na koja će prilikom plovidbe brod nailaziti vrši se proračun njihanja i opterećenja broda. Pomorstvenost broda obuhvaća sva gibanja, brzine i ubrzanja broda koja nastaju kao posljedica plovidbe na valovima. Na pomorstvenost utječu okolišni uvjeti, stanje broda te način rukovanja i upravljanja brodom. Brod ima dobre pomorstvene karakteristike ukoliko su mu amplitude gibanja umjerene, ubrzanja u prihvatljivim granicama za posadu, putnike i uređaje, a dodatni otpor koji nastaje uslijed plovidbe valovitim morem takav da ne uzrokuje značajni pad brzine broda i povećanje njegove snage i potrošnje. Odziv broda na valovima prikazuje se najčešće pomoću prijenosnih funkcija koje daju prikaz amplituda gibanja broda u ovisnosti o frekvencijama nailaznih valova te omogućuju daljnju procjenu odziva broda na određenim stanjima mora.

Otpor valova kao komponenta ukupnog otpora broda nastaje uslijed formiranja sustava valova na površini mirne vode. Posljedica je promjene hidrodinamičkog tlaka tekućine duž broskog trupa prilikom plovidbe. Sila otpora valova rezultanta je sila koje djeluju u smjeru normale na brodski trup. Porastom brzine broda raste i otpor valova. Iako je kod deplasmanskih formi otpor trenja najznačajnija komponenta ukupnog otpora broda, otpor valova u novije vrijeme postaje od velike važnosti obzirom da su sve veći zahtjevi na brzinu i trajanje plovidbe trgovačkih brodova. Napredovanjem broda na valovima dolazi do povećanja otpora i smanjuje se značajno brzina broda u odnosu na plovidbu mirnom tekućinom. Kako bi se održala brzina potrebno je povećati snagu, a samim time povećava se i potrošnja goriva. Iz tog razloga potrebno je dodatni otpor na valovima odrediti sa što većom točnošću.

Gibanje broda na valovima uzrokuje generiranje valova koji odvođe energiju od broda. Dodatni otpor na valovima očituje se kao sila zanošenja koja se javlja uslijed interferencije nailaznih valova i valova uslijed poniranja i posrtanja, kao sila prigušenja povezana s poniranjem i posrtanjem u mirnoj vodi (radijacija) te difrakcija uslijed interakcije valova i broda. Navedene sile povezane su s prijenosom energije od broda prema vodi te generiranjem valova od broda. Sila zanošenja najznačajnija je komponenta dodatnog otpora na valovima. Difrakcijska komponenta dodatnog otpora na valovima dominantna je pri visokim valnim frekvencijama, dok se viskozno prigušenje može zanemariti [1].



Analitičkim i numeričkim metodama te eksperimentalnim ispitivanjima moguće je s određenom točnošću odrediti komponente dodatnog otpora na valovima.

U ovom radu predstavljena je usporedba podataka dobivenih eksperimentalnim ispitivanjima i numeričkih rezultata izračuna dodatnog otpora na valovima kontejnerskog broda kako bi se provjerila točnost numeričkih metoda rješavanja tog složenog problema. Dodatni otpor na valovima određen je na temelju sila zanošenja kao srednjih vrijednosti valnih opterećenja drugog reda pri različitim frekvencijama nailaznih valova, odnosno pomoću aproksimacije kvadratne prijenosne funkcije QTF.

Također je proračunat odziv broda na pravilnim valovima u određenom rasponu frekvencija te se pomoću dobivenih prijenosnih funkcija odredio odziv za definirana stanja mora. Kako bi se procijenio utjecaj naplavljene tekućine u brodu prilikom oštećenja uslijed sudara ili nasukavanja, generiran je model s naplavljenim tankom i dobiveni odziv oštećenog broda uspoređen je s amplitudama odziva neoštećenog broda. Prilikom izrade rada korišten je programski paket *HydroSTAR* (Bureau Veritas).

### 1.1. Otpor na mirnoj vodi

Otpor broda je sila kojim tekućina djeluje na brod suprotno od smjera gibanja broda. Ovisi o svojstvima i geometriji tijela, karakteristikama tekućine te brzini gibanja tijela. Raščlanjuje se na komponente odnosno pojedine vrste otpora. Ukupni otpor broda kao hidrodinamička sila koja djeluje na brod može se odrediti ukoliko su poznata tangencijalna naprezanja i hidrodinamički tlakovi u smjeru normale u svim točkama oplakane površine trupa integracijom preko oplakane površine [2]:

$$R_r = \int_S \tau_0 \cos(\tau_0, x_1) dS + \int_S p \cos(p, x_1) dS \quad (1)$$

gdje je:

$\tau_0$  - tangencijalno naprezanje,

$x_1$  - položaj točke po duljini trupa,

$S$  - oplakana površina,

$p$  - hidrodinamički tlak.

Fluid djeluje na trup kontinuirano raspoređenim površinskim silama koje se mogu odrediti definiranjem vektora naprezanja površinskih sila. Strujanje fluida oko trupa broda očituje se kao granični sloj (i hidrodinamički trag) koji ima dominantan utjecaj viskoznosti te vanjsko područje oko trupa sa zanemarenim utjecajem viskoznosti odnosno potencijalno strujanje pretpostavljene idealne tekućine. Za razliku od idealnih fluida, sve realne tekućine imaju svojstvo viskoznosti ovisno o svojstvima tekućine i obliku strujanja koje uzrokuje trenje. Očituje se kao otpor tekućine prema smičnoj i kutnoj deformaciji pri gibanju. Silom se svladava rezultantna tangencijalna sila koja nastaje uslijed smičnog naprezanja kojim se tekućina opire deformaciji.

Obzirom da neviskozno potencijalno strujanje postoji samo ukoliko se oko trupa broda generiraju valovi na slobodnoj površini, otpor broda može se raščlaniti na viskozni otpor i otpor valova:

$$R_T = R_V(Re) + R_W(Fr) \quad (2)$$

gdje je:

$R_V$  - viskozni otpor kao funkcija Reynoldsovog broja,

$R_W$  - otpor valova kao funkcija Froudeovog broja.

Dio viskoznog otpora koji je posljedica tangencijalnih naprezanja između vode i oplata trupa broda definiran je kao otpor trenja, a preostali dio posljedica je promjene tlaka duž oplata trupa uslijed viskoznih pojava u graničnom sloju.

Dodatne komponente otpora uslijed utjecaja zraka i vjetra, hrapavosti oplata trupa, privjesaka te kormilarenja pretežno su viskoznog podrijetla ili nastaju kao posljedica stvaranja valova. Konačno, izraz za silu ukupnog otpora broda može se prikazati kao:

$$R_T = [C_F(Re) + C_{PV}(Re) + C_W(Fr) + C_A] \cdot \frac{1}{2} \rho v^2 S \quad (3)$$

gdje je:

$C_F$  - koeficijent otpora trenja,

$C_{PV}$  - koeficijent viskoznog otpora tlaka,

$C_W$  - koeficijent otpora valova,

$C_A$  - koeficijent preostalog otpora,

$\rho$  - gustoća fluida,

$v$  - brzina gibanja tijela,

$S$  - oplakana površina.

## 1.2. Otpor valova

Otpor valova predstavlja dio ukupnog otpora vezan uz energiju utrošenu za stvaranje te savladavanje valova. Valovi nastaju djelovanjem atmosferskih pojava te gibanjem tijela kroz tekućinu. Promjena tlaka u blizini slobodne površine izaziva deformaciju slobodne površine odnosno poremećaj koji uzrokuje složena valna gibanja čestica tekućine. Pomaknute mase fluida nastoje se pod djelovanjem gravitacijske sile vratiti u ravnotežan položaj no zbog inertnosti taj položaj premašuju te započinje oscilatorno gibanje čestica pod naizmjeničnim djelovanjem gravitacijskih i inercijskih sila.

Nastali valni oblik slobodne površine napreduje zajedno s tijelom koje se giba te zaostaje i širi se oko tijela. Zamiranje valova relativno je sporo uslijed slabo izraženog učinka viskoznosti odnosno sporog trošenja energije (prigušenja).

Valovi nastali uslijed atmosferskih pojava mogu biti gravitacijski, kapilarni i elastični. Gravitacijski (ovisno o načinu nastanka plimni, seizmički ili vjetrovni) nastaju uslijed djelovanja gravitacijskih sila koje pomiču čestice fluida iz ravnotežnog položaja, kapilarni nastaju uslijed napetosti površine, a elastični uslijed stlačivosti vode.

Uobičajena pojava je interferencija valova koje stvara tijelo gibajući se slobodnom površinom no isto tako interferencija valnog sustava tijela te nailaznih valova koji mogu biti uzročnikom povećanja sile ukupnog otpora broda.

Međudjelovanje tijela i valova (uslijed njihanja objekta na valovima) složeno je problemsko područje hidrodinamike te se stoga često radi jednostavnosti slika strujanja i pojava u valu aproksimira linearnom teorijom valova. Linearna teorija pretpostavlja harmonijske progresivne valove malih amplituda u odnosu na duljinu vala i dubinu te malu brzinu čestica vala u odnosu na samu brzinu napredovanja vala.

S druge strane razvijene su brojne numeričke metode i simulacije koje omogućuju rješavanje i vizualizaciju modela vala i strujanja oko uronjenog tijela.

Obzirom da je u naravi valni sustav nepravilan i promjenjiv u svakom trenutku, složeni sustav nailaznih valova definira se kao superpozicija harmonijskih valnih komponenti različitih

parametara (amplitude, frekvencije i smjera) kako bi se ostvarila valna površina nepravilna u svim smjerovima.

### 1.3. Dodatni otpor na valovima

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

Smanjenje brzine broda ovisi o otporu broda, karakteristikama vijka te upravljivosti broda. Gubitak brzine uzrokovan je sljedećim faktorima [3]:

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

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

Prema nekim istraživanjima brod koji napreduje na valovima može imati otpor uvećan za 15 do 30 % i to uglavnom uslijed dodatnog otpora na valovima [1].

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

$$\omega_e = \omega - kU \cos \beta \quad (4)$$

gdje je:

$\omega_e$  - susretna frekvencija,

$\omega$  - frekvencija valova,

$k$  - valni broj,

$U$  - brzina napredovanja broda,

$\beta$  - kut nailaska valova.

Dodatni otpor na valovima usko je povezan s valnim amplitudama. Kako bi se izbjegle pogreške u određivanju dodatnog otpora koje može uzrokovati kriva procjena valnih amplituda, potrebno je što točnije izmjeriti amplitude vala i odrediti funkciju valnih amplituda [4].

## 2. METODE ODREĐIVANJA DODATNOG OTPORA

### 2.1. Osnove linearne teorije valova

Kako bi se opisao model strujanja fluida oko tijela prilikom plovidbe na valovima na što jednostavniji način uz zadovoljavajuću točnost koristi se linearna teorija valova. Dio je teorijske hidromehanike koji se temelji na određenim pretpostavkama i pojednostavljenjima. Koristi se najjednostavniji oblik dvodimenzijskog progresivnog površinskog vala malih amplituda. Linearnom teorijom moguće je odrediti kinematičke i dinamičke značajke dvodimenzijskih površinskih valova te fizikalna svojstva i zakonitosti gibanja valova kako bi se moglo definirati njihovo međudjelovanje s trupom broda.

Pretpostavka je da je strujanje fluida u potencijalnoj teoriji bezvrtložno odnosno ne postoji rotacija čestica. Polje brzina se u tom slučaju može opisati neprekinutom skalarnom funkcijom koja ima konačnu vrijednost u svakoj točki tekućine i definira vektor brzine u toj točki. Naziva se funkcijom potencijala brzine strujanja  $\Phi(x, y, z; t)$  te se stoga i strujanje naziva potencijalnim.

Za bezvrtložno strujanje vrijedi:

$$\text{rot } \vec{v} = \nabla \times \vec{v} = 0 \quad (5)$$

gdje je  $v$  brzina strujanja fluida.

Slijedi:

$$\left( \frac{\partial v_z}{\partial y} - \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) \vec{i} + \left( \frac{\partial v_x}{\partial z} - \frac{\partial v_z}{\partial x} \right) \vec{j} + \left( \frac{\partial v_y}{\partial x} - \frac{\partial v_x}{\partial y} \right) \vec{k} = 0 \quad (6)$$

gdje su  $v_x, v_y$  i  $v_z$  komponente vektora brzine strujanja u smjeru koordinatnih osi.

Potencijal brzine strujanja matematička je funkcija bez fizikalnog značenja no ima svojstvo da je brzina u bilo kojem smjeru iz određene točke fluida jednaka derivaciji funkcije potencijala u tom smjeru [3]:

$$\begin{aligned} \vec{v}(x, y, z; t) &= \text{grad } \Phi(x, y, z; t) \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \Phi(x, y, z; t) \vec{i} + \frac{\partial}{\partial y} \Phi(x, y, z; t) \vec{j} + \frac{\partial}{\partial z} \Phi(x, y, z; t) \vec{k} \\ &= v_x \vec{i} + v_y \vec{j} + v_z \vec{k} \end{aligned} \quad (7)$$

Kao potencijal brzine i strujna funkcija  $\Psi$  može se definirati matematičkom funkcijom za koju vrijede slijedeći izrazi:

$$\begin{aligned} v_x &= \frac{\partial \Psi}{\partial y} \\ v_y &= -\frac{\partial \Psi}{\partial x} \end{aligned} \quad (8)$$

Izrazi vrijede za dvodimenzionalno strujanje odnosno za  $v_z = 0$ . Strujnica je krivulja za koju vrijedi  $\Psi = \text{const}$ . Volumen fluida između dvije strujnice proporcionalan je razlici vrijednosti strujnih funkcija između tih strujnica.

Kontinuitet mase fluida definiran je zakonom o očuvanje mase odnosno jednačbom kontinuiteta. Nestlačivost idealnog fluida omogućuje pretpostavku da je ukupna promjena protoka unutar određenog elementarnog volumena jednaka nuli. Količina idealnog fluida koja je ušla u elementarni volumen mora iz njega i izaći. Jednačba kontinuiteta određuje se na temelju sume protoka fluida u sva tri smjera elementarnog volumena [3]. Gustoća fluida je u tom slučaju konstantna za razliku od gustoće stlačivog fluida koja je funkcija položaja unutar elementarnog volumena. Jednačba kontinuiteta homogenog nestlačivog fluida poznata je kao Laplaceova jednačba:

$$\begin{aligned} \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} &= \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0 \\ \nabla \cdot \vec{v} &= \Delta \Phi = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

gdje je  $\Delta$  Laplaceov operator.

Linearna teorija valova temelji se i na Eulerovoj i Bernoullijevoj jednačbi. Eulerova jednačba definira ravnotežu sila na materijalnoj čestici. Komponenta sile u određenom smjeru uslijed djelovanja hidrodinamičkog tlaka na materijalnu česticu jednaka je umnošku mase diferencijalnog volumena te ubrzanja čestice u definiranom smjeru. U općenitom vektorskom obliku Eulerova jednačba glasi:

$$\nabla p = \rho \frac{D}{Dt} \vec{v} \quad (10)$$

gdje  $\frac{D}{Dt}$  predstavlja materijalnu derivaciju odnosno brzinu promjene fizikalnog svojstva čestice fluida.

Bernoullijeva jednačba predstavlja zakon očuvanja energije strujanja po jedinici mase fluida u linearnoj teoriji. U slučaju stabilnog strujanja nestlačive idealne tekućine ukupna energija fluida duž strujnice je konstantna te vrijedi:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{1}{2}v^2 + \frac{p}{\rho} + gz = \text{const.} \quad (11)$$

gdje je:

$z$  - geodetska visina,

$g$  - ubrzanje zemljine sile teže.

U slučaju nestacionarnog strujanja izraz (11) ovisan je isključivo o vremenu  $t$ :

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{1}{2}v^2 + \frac{p}{\rho} + gz = C(t) \quad (12)$$

### 2.1.1. Teorija potencijalnog strujanja

Potencijalno strujanje je homogeno, neviskozno i nestlačivo. Iako ograničena, teorija potencijalnog strujanja omogućuje uvid u sliku strujanja oko uronjenog tijela te značajke nailaznih valova.

U opisu značajki valova sve harmonijski promjenjive veličine u linearnom su odnosu s elevacijom vala  $\zeta$ .

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

Značajke valova moguće je odrediti koristeći potencijal brzine  $\Phi_w$  kao harmonijsku funkciju.

Potencijal brzine vala mora zadovoljiti četiri rubna uvjeta:

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

$$\nabla^2 \Phi_w = \frac{\partial^2 \Phi_w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi_w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi_w}{\partial z^2} = 0 \quad (13)$$

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

$$v_z = \frac{\partial \Phi_w}{\partial z} = 0 \quad \text{za } z = -d \quad (14)$$

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



$$\frac{\partial \Phi_w}{\partial t} + g\zeta = 0 \quad \text{za } z = 0 \quad (15)$$

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

$$\frac{dz}{dt} = \frac{\partial \zeta}{\partial t} \quad \text{za } z = \zeta \quad (16)$$

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

$$\Phi_w(x, z; t) = \frac{\zeta_a g}{\omega} \frac{\cosh k(d+z)}{\cosh kd} \sin(kx - \omega t) \quad (17)$$

gdje je:

$\zeta_a$  - jedinična valna amplituda,

$\omega$  - valna frekvencija,

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

$d$  - dubina.

U vodi neograničene dubine izraz  $\frac{\cosh k(d+z)}{\cosh kd}$  u jednadžbi potencijala brzine strujanja (17) poprima oblik  $e^{kz}$ .

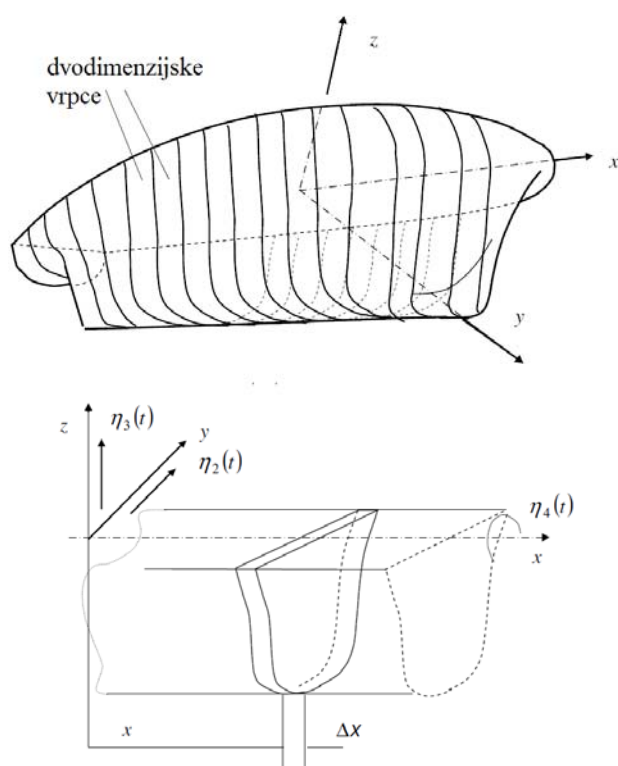
Na temelju potencijala brzine strujanja moguće je odrediti brzine, ubrzanja čestica fluida, hidrostatički i hidrodinamički tlak koji djeluje na određenoj dubini te energiju vala kao i brzinu kojom se ta energija prenosi.

## 2.2. Metode određivanja dodatnog otpora

Dodatni otpor broda na valovima moguće je okvirno odrediti najjednostavnijim načinom korištenjem empirijskih izraza. Razvijale su se i brojne teoretske metode proračuna dodatnog otpora no nisu sve metode davale zadovoljavajuće rezultate ili im je primjena bila relativno ograničena tipom broda, brzinom, smjerovima valova i slično. Često se temelje na vrpčastoj metodi koja omogućuje određivanje gibanja induciranih djelovanjem valova.

Prema nekim studijama vrpčasta metoda omogućuje rezultate zadovoljavajuće točnosti ukoliko je dominantan efekt radijacije, no uslijed difrakcije valova na pramčanom dijelu broda metoda zahtjeva određenu korekciju u izračunu dodatnog otpora [5].

Vrpčasta metoda omogućuje modeliranje odziva tijela koje se njiše na harmonijskom valu odnosno omogućuje određivanje hidrodinamičke pozadine uzbude i reakcije koja se temelji na potencijalu brzine strujanja u valovima radijacije te difrakcijskom valu. Obzirom da je brodski trup vitko tijelo čija je duljina dimenzijski bitno veća od njegove širine moguće je model trodimenzijske slike strujanja oko uronjenog dijela broskog trupa zamijeniti nizom lokalnih dvodimenzijskih modela. Trup broda "rastavlja" se na poprečne presjeke odnosno vrpce duljine  $\Delta x$ , Slika 1. Tada se trodimenzijsko strujanje oko trupa nadomješta dvodimenzijskim slikama strujanja oko poprečnih presjeka trupa.



Slika 1. Brodski trup u vrpčastoj metodi [3]

Pretpostavka je da se poprečni presjeci njišu s tri stupnja slobode: zanošenje  $\eta_2$ , poniranje  $\eta_3$  i ljuljanje  $\eta_4$ .

Takvo njihanje vrpce uzrokuje dvodimenzijsko strujanje jednako oko svakog poprečnog presjeka duž trupa broda. Kako bi vrijedilo pojednostavljenje slike strujanja vrpčastom metodom mora nekoliko fizikalnih uvjeta biti zadovoljeno: promjena poprečnih presjeka duž trupa mora biti što monotonija, brzina napredovanja mora biti mala u odnosu na frekvenciju

njihanja te utjecaj krajeva broda mora biti zanemariv. Na temelju zahtjevanih uvjeta vidljivo je kako navedena metoda vrijedi za vitke brodove koji plovo malim brzinama.

Također potrebno je uzeti u obzir i grešku zanemarenja krajeva trupa pri korištenju metode obzirom da su to područja izraženijeg trodimenzijskog oblika strujanja.

Vrpčasta teorija pretpostavlja bezvrtložno potencijalno strujanje što uvelike olakšava predodžbu slike strujanja.

Uz postavljene rubne uvjete na oplakanoj površini odnosno po obodu poprečnih presjeka trupa moguće je odrediti hidrodinamičke koeficijente njihanja te njihovom integracijom koeficijente jednadžbe dinamičke ravnoteže njihanja trodimenzijskog tijela. Potrebno je zadovoljiti uvjete nepromočivosti oplata odnosno normalna komponenta brzine čestice fluida mora biti jednaka normalnoj komponenti brzine dodirne točke na oplakanoj površini. Takvu sliku strujanja moguće je modelirati superponirajući jednostavnije komponente potencijalnog strujanja na odgovarajući način. Poznavajući potencijale brzine strujanja oko dvodimenzijskih presjeka prilikom zanošenja, poniranja te ljuljanja ( $\varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$ ), lineariziranom Bernoullijevom jednadžbom određuje se hidrodinamički tlak duž oboda presjeka:

$$p = -\rho \frac{\partial}{\partial t} \varphi(y, z; t) + \rho g z \quad (18)$$

Linijskim integralom tlaka po obodu presjeka moguće je odrediti silu i moment u smjeru koordinatnih osi:

$$\vec{f} = -\int_{c_0} p \vec{n} \, dc_0 \quad (19)$$

$$\vec{m} = -\int_{c_0} p \vec{r} \times \vec{n} \, dc_0 \quad (20)$$

gdje je  $\vec{n}$  normala iz točke na obodu,  $c_0$  linija oplakanog oboda presjeka, a  $\vec{r}$  radijvektor točke na obodu.

Integracijom sila i momenata koji djeluju na presjeke duž trupa određuje se ukupna sila i moment na trodimenzijsko tijelo trupa.

Kako bi se odredila hidrodinamička uzbuda i reakcija potrebno je na temelju lokalnih hidrodinamičkih koeficijenata uzbude, dodatne mase i prigušenja integracijom odrediti globalne hidrodinamičke koeficijente.

Obzirom da vrpčasta metoda omogućuje uvid u odziv broda koji se njiše na valovima, često su metode izračuna dodatnog otpora temeljene na njoj. Primjerice Faltinsenova metoda koja

određuje dodatni otpor direktnom integracijom tlaka po oplakanoj površini te Salvesenova metoda koja rješava problem potencijalnog strujanja [6].

Prva metoda najprije definira inducirana gibanja i opterećenja uslijed njihanja na valovima kako bi bilo moguće odrediti dinamičke tlakove i valnu elevaciju. Potencijal brzine strujanja sastoji se od tri dijela i prikazuje na sljedeći način:

$$\phi_0(x, y, z)e^{-i\omega_e t} = \phi_I + \phi_F + \phi_D \quad (21)$$

gdje je:

$\omega_e$  - susretna frekvencija,

$\phi_I$  - potencijal nailaznog vala,

$\phi_F$  - potencijal brzine gibanja u svih šest stupnjeva slobode pod djelovanjem sila,

$\phi_D$  - potencijal difrakcije.

Nakon što se odrede svi potrebni potencijali, dodatni otpor određuje se kao integracija dinamičkog tlaka po oplakanoj površini.

Salvesenovom metodom poštujući pretpostavke dugačkog, vitkog tijela te ograničenja potencijalne teorije, dodatni otpor simetričnog tijela na valovima određuje se rješavanjem jednadžbe dinamičke ravnoteže spregnutih gibanja poniranja i posrtanja:

$$\sum_{k=3,5} \left[ -\omega^2 (M_{jk} + A_{jk}) + i\omega B_{jk} + C_{jk} \right] \eta_k = F_j, \quad j = 3, 5 \quad (22)$$

gdje je:

$M_{jk}$  - matrica masa,

$A_{jk}$  - matrica dodatne mase,

$B_{jk}$  - matrica prigušenja,

$C_{jk}$  - matrica povratnih sila,

$\eta_k$  - pomak,

$F_j$  - uzbudna sila.

Uzбудna sila sastoji se od Froude-Krilovljeve sile  $F_j^I$  te difrakcijske komponente  $F_j^D$ . Sila nailaznog vala određuje se preko njegovog potencijala. Nakon što se odredi potencijal moguće je definirati sile i momente te procijeniti silu dodatnog otpora na valovima. Obzirom da navedena metoda daje dovoljno točne rezultate za slučaj omjera duljine broda i vala manje

od  $L/\lambda = 1,5$ , za male valne duljine potrebno je korigirati rezultate polu-empirijskim formulama.

Usporedbom metoda ustanovljeno je kako obje daju približno slične rezultate [6]. Iako ne omogućuju uvid u konačni otpor broda te gubitak njegove snage uslijed dodatnog otpora pri plovidbi na valovima, metode pružaju zadovoljavajuću točnost u okvirnoj procjeni dodatnog otpora.

Dodatni otpor moguće je odrediti i tzv. metodom radijacijske energije [3]. Također je temeljena na vrpčastoj teoriji te energiji oscilirajućeg tijela. Energija radijacije koja se prilikom osciliranja tijela širi tokom jednog perioda iznosi:

$$P = \frac{\pi}{\omega_e} \int_0^L \left[ b_{33} - U \frac{da_{33}}{dx_b} (v_{3a}^*)^2 \right] dx_b \quad (23)$$

gdje je:

$b_{33}$  - bezdimenzijski koeficijent prigušenja,

$U$  - brzina napredovanja tijela,

$a_{33}$  - bezdimenzijski koeficijent dodatne mase,

$v_{3a}^*$  - vertikalna relativna brzina vrpce u vrpčastoj teoriji.

Dodatni otpor na valovima  $R_{AW}$  kao dio ukupnog otpora koji je potreban kako bi brod prešao udaljenost jednaku jednoj susretnoj valnoj duljini može se izraziti preko energije osciliranja na sljedeći način :

$$P = R_{AW} \lambda_e \quad (24)$$

gdje je  $\lambda_e$  susretna valna duljina jednaka  $\frac{2\pi}{-k \cos \beta}$ .

Konačno dodatni otpor na valovima određuje se preko izraza:

$$R_{AW} = \frac{-k \cos \beta}{2\omega_e} \int_0^L \left[ b_{33} - U \frac{da_{33}}{dx_b} (v_{3a}^*)^2 \right] dx_b \quad (25)$$

Amplituda dodatnog otpora na valovima ovisna je o kvadratu valnih amplituda. Pri maksimalnim relativnim gibanjima stoga će se pojaviti i najveći dodatni otpor. Pri vrlo niskim valnim frekvencijama odnosno na dugačkim valovima relativna gibanja su manja, samim time i dodatni otpor pada. Slično vrijedi i za jako kratke valove kada se amplitude relativnih gibanja približavaju valnim amplitudama te apsolutna gibanja postaju neznčajna. Metoda

radijacijske energije daje zadovoljavajuće rezultate ukoliko su nailazni valovi u pramac ili bok.

Ukoliko je poznat spektar valova  $S_{\zeta}(\omega_e)$  na određenom području plovidbe moguće je pomoću prijenosnih funkcija odrediti spektar odziva te pojednostavljeno izračunati srednju vrijednost dodatnog otpora :

$$\overline{R_{AW}} = 2 \int_0^{\infty} S_{\zeta}(\omega_e) \frac{R_{AW}}{\zeta_a^2}(\omega_e) d\omega_e \quad (26)$$

odnosno kao:

$$\overline{R_{AW}} = 2m_{0R} \quad (27)$$

gdje je  $m_{0R}$  nulti spektralni moment odnosno površina ispod spektra odziva.

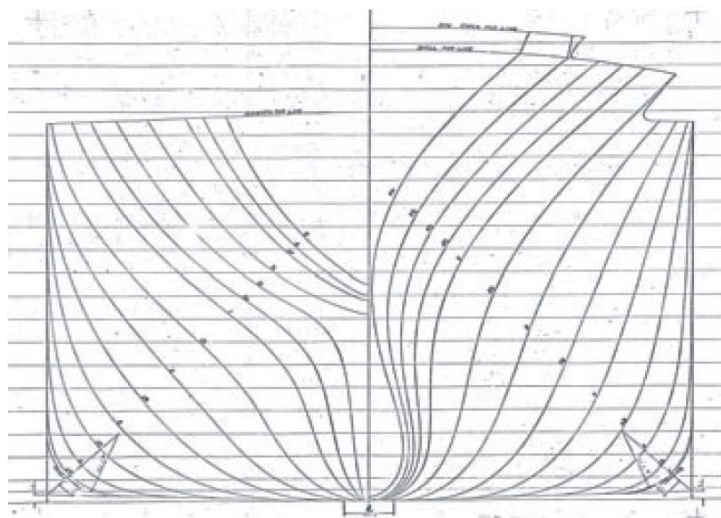
### 3. DODATNI OTPOR KONTEJNERSKOG BRODA NA PRAVILNIM VALOVIMA

#### 3.1. Uvod

Kako bi se napravila usporedba rezultata dobivenih eksperimentalno i numerički prilikom određivanja dodatnog otpora broda na valovima korišteni su podaci s bazenskog ispitivanja modela kontejnerskog broda S-175 [7]. Ispitivanja su provedena na modelu koji miruje i pri tri različite brzine. Inducirani su pravilni valovi u pramac ( $180^\circ$ ) valne visine 30 mm te različitih omjera valne duljine i duljine modela  $\lambda/L$ .

Modelu je omogućeno rotacijsko gibanje oko lateralne osi te translacijska gibanja u smjeru vertikalne i poprečne osi koordinatnog sustava modela. Na taj način omogućeno je registriranje gibanja poniranja, posrtanja i napredovanja (zalijetanja) modela.

Nacrt rebara ispitanog modela te značajke modela i broda u naravi prikazani su na Slici 2. i u Tablici 1.

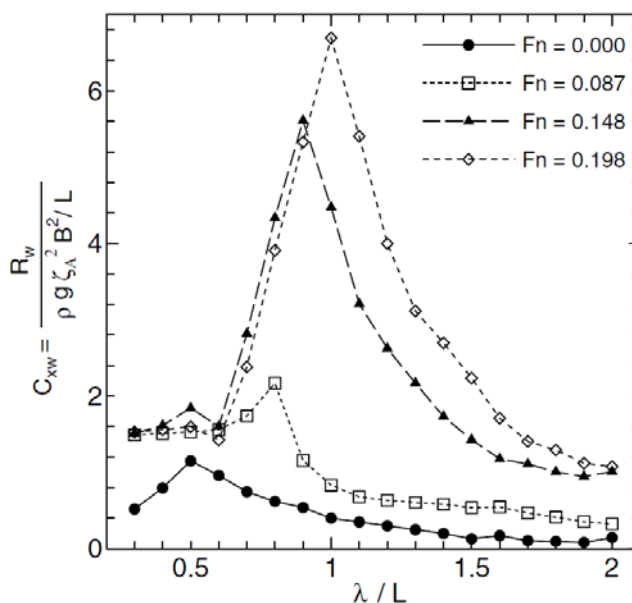


Slika 2. Nacrt rebara modela kontejnerskog broda S-175 [7][7]

Tablica 1. Značajke modela S-175 i broda u naravi

|  | Brod     | Model |
|--|----------|-------|
| Duljina $L$ , m                            | 175,00   | 3,00  |
| Širina $B$ , m                             | 25,40    | 0,435 |
| Gaz na pramcu $T_F$ , m                    | 7,00     | 0,120 |
| Gaz na sredini broda $T$ , m               | 9,50     | 0,163 |
| Gaz na krmi $T_A$ , m                      | 12,02    | 0,206 |
| Volumen istisine $\nabla$ , m <sup>3</sup> | 24154,13 | 0,122 |
| Koeficijent punoće $C_B$                   | 0,572    | 0,572 |

Amplitude gibanja modela pri različitim brzinama izmjerene su pomoću potencijometra te lasera, a sile dinamometrom. Dobiveni eksperimentalni podaci o koeficijentima dodatnog otpora na valovima za različite brzine prikazani su na Slici 3.



Slika 3. Eksperimentalno određeni koeficijenti dodatnog otpora [7]

Kako bi se numerički odredio dodatni otpor na valovima odnosno koeficijent dodatnog otpora korišten je program *HydroSTAR* (Bureau Veritas) [8]. *HydroSTAR* se temelji na teoriji potencijalnog strujanja i omogućuje izračun gibanja i sila prvog i drugog reda na temelju karakteristika modela i ulaznih parametara valova. Omogućuje izračun difrakcijske i radijacijske komponente dodatnog otpora broda, interakciju broda i valova te međudjelovanje više tijela itd. Obzirom da se *software* temelji na potencijalnom strujanju koje predviđa



rezonantno gibanje valova bez ograničenja dodaje se fiktivna sila u momentnim jednadžbama dinamičke ravnoteže kako bi se u obzir uzela disipacija energije odnosno prigušenje.

### 3.2. Kvadratna prijenosna funkcija QTF i njezina aproksimacija

Sila zanošenja uslijed nailaznog vala  $\zeta(t) = \zeta_a \cos(\omega t - kx)$  nastaje zbog hidrodinamičkog opterećenja drugog reda te interakcije između gibanja i valnog polja prvog reda. Uzevši u obzir potencijal brzine strujanja nailaznog vala u dubokoj vodi te na temelju Bernoullijeve jednadžbe moguće je općenito izraziti srednju vrijednost tlaka drugog reda čijom se integracijom duž trupa određuju sile i momenti drugog reda [9].

Potencijal brzine strujanja nailaznog vala u dubokoj vodi dan je sljedećom jednadžbom:

$$\Phi_w(x, z; t) = \frac{\zeta_a g}{\omega} e^{kz} \sin(kx - \omega t) \quad (28)$$

Nelinearizirana Bernoullijeva jednadžba glasi:

$$\frac{p(x, z; t)}{\rho} = -\frac{\partial \Phi}{\partial t} - \frac{1}{2} \nabla \Phi_w \cdot \nabla \Phi_w - gz \quad (29)$$

gdje je:

$$\begin{aligned} \nabla \Phi_w \cdot \nabla \Phi_w &= \Phi_x^2 + \Phi_z^2 = (\omega \zeta_a e^{kz})^2 \cos^2(kx - \omega t) + (\omega \zeta_a e^{kz})^2 \sin^2(kx - \omega t) = \\ &= (\omega \zeta_a e^{kz})^2 \end{aligned} \quad (30)$$

Slijedi da se tlak dan jednadžbom (23) može izraziti kao:

$$p(x, z; t) = \rho \zeta_a^2 (\omega e^{kz})^2 \quad (31)$$

Dodatni otpor na valovima određen je na temelju sile zanošenja kao opterećenja drugog reda uslijed nailaznih valova na trup broda, preko kvadratne prijenosne funkcije QTF. Dio energije koju posjeduju nailazni valovi nailaskom broda predaje se brodu u skladu sa zakonom o očuvanju količine gibanja. Što je brod punije forme sila zanošenja je značajnija. Obzirom da su se u proračunu razmatrali samo valovi u pramac, sila zanošenja djeluje u negativnom smjeru lateralne osi koordinatnog sustava broda. Numerička aproksimacija gibanja i opterećenja uslijed sila zanošenja zahtjeva poznavanje valnih opterećenja drugog reda pri različitim frekvencijama nailaznih valova. Niskofrekventna opterećenja mogu se opisati putem kvadratne prijenosne funkcije (QTF) nailaznih valova i difrakcijskih odnosno radijacijskih valnih polja. Kako bi se odredila QTF funkcija potrebno je dakle riješiti problem valnih opterećenja drugog reda.

Niskofrekventna valna opterećenja drugog reda događaju se na frekvencijama jednakim razlici dvije valne frekvencije u svim mogućim kombinacijama na određenom stanju mora. Proporcionalna su produktima valnih amplituda (QTF) i sastoje se od dva dijela - jedan dio ovisan je o kvadratnim produktima valnog polja prvog reda, a drugi dio o nailaznim i difrakcijskim potencijalima drugog reda koje je moguće odrediti na temelju Froude-Krylovljeve sile drugog reda te Haskindovog integrala na površini tijela kako slijedi [10]:

$$F(\omega_i, \omega_j) = F_q(\omega_i, \omega_j) + F_p(\omega_i, \omega_j) \quad (32)$$

gdje je:

$F_q(\omega_i, \omega_j)$  - opterećenje prvog reda,

$F_p(\omega_i, \omega_j)$  - opterećenje drugog reda,

$\omega_i, \omega_j$  - frekvencije nailaznog vala.

Dok je prvi dio moguće odrediti rješenjem valne difrakcije i radijacije prvog reda, drugi dio valnih opterećenja drugog reda sporo konvergira i uključuje gradijente potencijala brzine [10]. Haskindov integral omogućuje eliminaciju nepoznate funkcije potencijala difrakcije zamjenom potencijalom radijacije [3]:

$$\iint_S \phi_\gamma \frac{\partial \phi_k}{\partial n} dS = -\iint_S \phi_k \frac{\partial \phi_0}{\partial n} dS, k = 1 \dots 6 \quad (33)$$

gdje je:

$\phi_\gamma$  - potencijal valova difrakcije,

$\phi_k$  - potencijal valova radijacije,

$\phi_0$  - potencijal nailaznog vala,

$S$  - oplakana površina.

Obzirom da je QTF funkcija pretpostavljena kao pravilna funkcija frekvencija nailaznih valova  $\omega_i$  i  $\omega_j$  moguće je uzimajući u obzir izraz  $\Delta\omega = \omega_i - \omega_j$  razviti QTF funkciju u Taylorov red:

$$F(\omega_i, \omega_j) = F_0(\omega_i) + F_1(\omega_i)\Delta\omega + F_2(\omega_i)(\Delta\omega)^2 / 2 + \dots \quad (34)$$

Član nultog reda  $F_0(\omega_i)$  predstavlja opterećenje uslijed integracije tlaka po oplakanoj površini odnosno silu zanošenja. Često se koristi Newmanova aproksimacija prilikom određivanja tog člana iako se na taj način uvelike podcjenjuje opterećenje drugog reda i dobiva netočan fazni pomak obzirom da je aproksimacija realna, a QTF imaginarna funkcija.

Nulti član ovisan je o frekvenciji nailaznog vala kao srednjoj vrijednosti dviju frekvencija  $(\omega_1 + \omega_2)/2$ , član prvog reda linerno je proporcionalan razlici frekvencija  $\omega_1 - \omega_2$ , a drugi član proporcionalan je kvadratu razlike frekvencija.

Komponenta  $F_1(\omega_i)$  sastoji se od četiri dijela:

$$F_1(\omega_i) = F_q^1 + F_{p1}^1 + F_{p2}^1 + F_{p3}^1 \quad (35)$$

gdje je:

$F_q^1$  - doprinos valnog opterećenja prvog reda,

$F_{p1}^1$  - doprinos valnog opterećenja drugog reda i valova difrakcije,

$F_{p2}^1$  - korekcija drugog reda rubnih uvjeta na trupu,

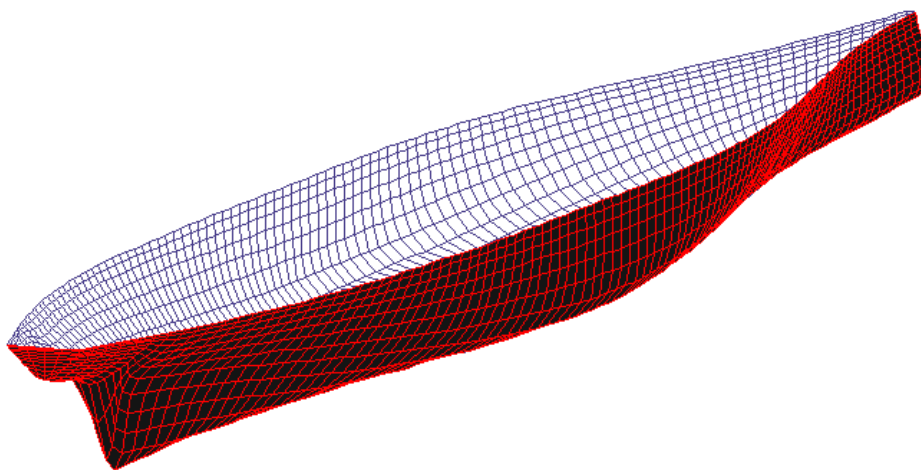
$F_{p3}^1$  - utjecaj tlaka duž slobodne površine.

Komponenta  $F_2(\omega_i)$  nema analitički izraz kao prve dvije komponente već ju je moguće odrediti kao razliku ukupne QTF funkcije u valnom polju bikromatskih valova i navedene nulte i prve komponente:

$$F_2(\omega_i) = \frac{2 \left[ F \left( \omega_i + \frac{\Delta\omega}{2}, \omega_i - \frac{\Delta\omega}{2} \right) - F_0(\omega_i) - F_1(\omega_i) \Delta\omega \right]}{\Delta\omega^2} \quad (36)$$

### 3.3. Priprema podataka za *HydroSTAR*

Forma je generirana u programu na način da su unesene koordinate točaka rebara, gaz te trim modela. Također su definirani podaci o masi, položaju težišta modela te radijusima tromosti mase oko težišta. Nakon što je forma definirana program generira mrežu panela do vodne linije, Slika 4.



Slika 4. Mreža panela za trup modela S-175 [8]

Na temelju podataka bazenskih ispitivanja definirani su pravilni valovi u pramac modela i nailazne frekvencije valova na temelju poznatih omjera  $\lambda/L$  [7]. Valne frekvencije za koje se provodi proračun izračunate su pomoću disperzivne jednadžbe za ograničenu dubinu vode obzirom da se radi o bazenu dubine 3,5 metara na temelju sljedećeg izraza:

$$\omega = \sqrt{kg \operatorname{th}(kd)} \quad (37)$$

gdje je:

$k$  - valni broj,

$g$  - ubrzanje sile teže,

$d$  - dubina.

Valne frekvencije određene pomoću izraza (37) prikazane su u Tablici 2.

Tablica 2. Frekvencije nailaznih valova

| Omjer $\lambda/L$ | Valna duljina $\lambda$ , m | Valni broj $k$ , 1/m | Frekvencija vala $\omega$ , rad/s |
|-------------------|-----------------------------|----------------------|-----------------------------------|
| 0,3               | 0,9                         | 6,981                | 8,276                             |
| 0,4               | 1,2                         | 5,236                | 7,167                             |
| 0,5               | 1,5                         | 4,189                | 6,410                             |
| 0,6               | 1,8                         | 3,491                | 5,852                             |
| 0,7               | 2,1                         | 2,992                | 5,418                             |
| 0,8               | 2,4                         | 2,618                | 5,068                             |
| 0,9               | 2,7                         | 2,327                | 4,778                             |
| 1,0               | 3,0                         | 2,094                | 4,533                             |
| 1,1               | 3,3                         | 1,904                | 4,322                             |
| 1,2               | 3,6                         | 1,745                | 4,138                             |
| 1,3               | 3,9                         | 1,611                | 3,975                             |
| 1,4               | 4,2                         | 1,496                | 3,831                             |
| 1,5               | 4,5                         | 1,396                | 3,701                             |
| 1,6               | 4,8                         | 1,309                | 3,583                             |
| 1,7               | 5,1                         | 1,232                | 3,476                             |
| 1,8               | 5,4                         | 1,164                | 3,378                             |
| 1,9               | 5,7                         | 1,102                | 3,287                             |
| 2,0               | 6,0                         | 1,047                | 3,203                             |

### 3.4. Rezultati proračuna

Proračun je proveden za četiri Froudeova broja odnosno četiri brzine modela prikazane u Tablici 3.

Tablica 3. Froudeovi brojevi i brzine ispitanog modela S-175

| Froudeov broj | Brzina modela $v$ , m/s |
|---------------|-------------------------|
| 0             | 0                       |
| 0,087         | 0,472                   |
| 0,148         | 0,803                   |
| 0,198         | 1,074                   |

Niskofrekventna valna opterećenja drugog reda u programskom paketu *HydroSTAR* određuju se prema tri metode:

1. Prva metoda temelji se na evaluaciji valnog polja prvog reda oko trupa duž vodne linije te određivanju gibanja prvog reda uzrokovanih tim valnim poljem (eng. *near field formulation*). Direktnom numeričkom integracijom tlaka po oplakanoj površini na temelju definirane forme određuje se opterećenje uslijed nailaznih valova:

$$F_{jj}' = \int_{S(t)} p(t) \vec{n} dS \quad (38)$$

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

2. Druga metoda temelji se na zakonu očuvanja količine gibanja (eng. *far field formulation*). Formulacija uključuje opterećenje valnog polja prvog reda i ima prednost pred prethodno navedenom metodom zbog brže konvergencije prilikom određivanja sila zanošenja te zbog stabilnosti metode no nedovoljno točno određuje vertikalne komponente sile zanošenja te QTF funkciju na niskim frekvencijama što može biti od velike važnosti u vodi ograničene dubine.

Zakon očuvanja količine gibanja u općenitom obliku glasi:

$$\frac{m d\vec{v}}{dt} = \frac{d\vec{p}}{dt} = 0 \quad (39)$$

3. Treća metoda kombinacija je integracije tlaka po oplakanoj površini te zakona očuvanja količine gibanja unutar kontrolnog volumena. Ova metoda daje dovoljno točne numeričke rezultate i mogućnost izračuna svih komponenata opterećenja uslijed sila zanošenja te izračun QTF funkcije niskih frekvencija. Temelji se na analizi volumena omeđenog brodskim trupom te kontrolnom površinom koja okružuje trup. Integracija tlaka po površini određuje se polu-analitičkim načinom koji koristi potencijale udaljene od trupa kao i prethodna metoda (eng. *middle field formulation*)

### 3.4.1. Sila zanošenja, sila dodatnog otpora na valovima i koeficijent dodatnog otpora na valovima

Valna opterećenja na niskim frekvencijama određuju se u vremenskoj domeni što uključuje poznavanje prijenosne kvadratne funkcije QTF kao i kompleksnih amplituda [10]. Niskofrekventno valno opterećenje definira se dvostrukom sumom prema izrazu:

$$F(t) = \Re \left\{ \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N F_{ij}' a_i a_j^* \exp[-i(\omega_i - \omega_j)t] \right\} \quad (40)$$

gdje je:

$F_{ij}'$  - sila zanošenja na valovima,

$a_i$  - kompleksna amplituda nailaznog vala,

$a_j^*$  - konjugirano kompleksna amplituda nailaznog vala,

$\omega_i, \omega_j$  - frekvencije nailaznog vala.

U svakom vremenskom koraku valno opterećenje na niskim frekvencijama određuje se kako bi se simulirala gibanja. Zbog dvostruke sumacije u jednadžbi (40) izračun je zahtjevan i dugotrajan te se koristi Newmanova aproksimacija QTF funkcije odnosno niskofrekventna valna opterećenja smatraju se silom zanošenja na pravilnim valovima kao aproksimacijom QTF funkcije samo nultim članom kako slijedi:

$$F'_{ij} = \text{sgn}(F') \sqrt{F'_{ii} \cdot F'_{jj}} \quad (41)$$

gdje je  $\text{sgn}(F')$  matematička signum funkcija koja osigurava zadržavanje predznaka valnog opterećenja neovisno o promjeni frekvencije  $\omega_j$ .

Konačno nakon uvrštavanja aproksimacije (41) u izraz za valno opterećenje (40) dobije se sljedeći izraz za valno opterećenje pri niskim frekvencijama:

$$F(t) = \left| \sum_{j=1}^N \sqrt{F'_{ij}} a_j \exp(-i\omega_j t) \right|^2 \quad (42)$$

gdje je  $F'_{ij}$  valno opterećenje za pojedinu frekvenciju vala odnosno sila zanošenja.

Na temelju izračunatih sila zanošenja pomoću programskog paketa *HydroSTAR* za trenutak  $t=0$  određene su sile dodatnog otpora na valovima:

$$F(t) = F'_{ij} a_j^2 \quad (43)$$

gdje je  $a_j$  amplituda nailaznih pravilnih valova u pramac. U ovom slučaju amplituda iznosi  $a_j=0,015$  m.

Konačno, koeficijent dodatnog otpora na valovima dan je sljedećim izrazom:

$$C_{sw} = \frac{F(t)}{\rho g a_j^2 B^2 / L} \quad (44)$$

gdje je:

$\rho$  - gustoća slatke vode u bazenu,  $\rho=1000$  kg/m<sup>3</sup>,

$g$  - ubrzanje sile teže,

$B$  - širina modela,

$L$  - duljina modela.

Kratice prethodno navedenih metoda izračuna niskofrekventnih valnih opterećenja drugog reda u programskom paketu *HydroSTAR* su sljedeće:

- PRE - direktna integracija tlaka po površini (eng. *near field formulation*),
- MOM - na temelju zakona o očuvanju količine gibanja (eng. *far field formulation*),
- CSF - pomoću kontrolne površine i udaljenih potencijala (eng. *middle field formulation*).

Dobiveni rezultati prikazani su u Tablicama 4.-7.

**Tablica 4. Sile zanošenja, sile dodatnog otpora na valovima i bezdimenzijski koeficijenti za  $Fr=0$**

| $Fr=0$     | PRE       | PRE    | PRE           | CFS       | CFS    | CFS           | MOM       | MOM    | MOM           |
|------------|-----------|--------|---------------|-----------|--------|---------------|-----------|--------|---------------|
| $\omega_j$ | $F'_{jj}$ | $F(t)$ | $C_{wx}$      | $F'_{jj}$ | $F(t)$ | $C_{wx}$      | $F'_{jj}$ | $F(t)$ | $C_{wx}$      |
| 3,203      | 10,64     | 0,0024 | <b>0,0172</b> | 10,640    | 0,0024 | <b>0,0172</b> | 6,445     | 0,0015 | <b>0,0104</b> |
| 3,287      | 12,37     | 0,0028 | <b>0,0200</b> | 12,370    | 0,0028 | <b>0,0200</b> | 7,613     | 0,0017 | <b>0,0123</b> |
| 3,378      | 14,27     | 0,0032 | <b>0,0231</b> | 14,270    | 0,0032 | <b>0,0231</b> | 9,171     | 0,0021 | <b>0,0148</b> |
| 3,476      | 16,18     | 0,0036 | <b>0,0261</b> | 16,180    | 0,0036 | <b>0,0261</b> | 11,410    | 0,0026 | <b>0,0184</b> |
| 3,583      | 17,61     | 0,0040 | <b>0,0285</b> | 17,610    | 0,0040 | <b>0,0285</b> | 14,930    | 0,0034 | <b>0,0241</b> |
| 3,701      | 17,51     | 0,0039 | <b>0,0283</b> | 17,510    | 0,0039 | <b>0,0283</b> | 20,920    | 0,0047 | <b>0,0338</b> |
| 3,831      | 13,62     | 0,0031 | <b>0,0220</b> | 13,620    | 0,0031 | <b>0,0220</b> | 31,710    | 0,0071 | <b>0,0512</b> |
| 3,975      | 1,59      | 0,0004 | <b>0,0026</b> | 1,586     | 0,0004 | <b>0,0026</b> | 51,690    | 0,0116 | <b>0,0835</b> |
| 4,138      | 26,37     | 0,0059 | <b>0,0426</b> | 26,370    | 0,0059 | <b>0,0426</b> | 88,380    | 0,0199 | <b>0,1428</b> |
| 4,322      | 81,79     | 0,0184 | <b>0,1322</b> | 81,790    | 0,0184 | <b>0,1322</b> | 152,400   | 0,0343 | <b>0,2463</b> |
| 4,533      | 176,00    | 0,0396 | <b>0,2844</b> | 176,000   | 0,0396 | <b>0,2844</b> | 252,800   | 0,0569 | <b>0,4086</b> |
| 4,778      | 305,50    | 0,0687 | <b>0,4937</b> | 305,500   | 0,0687 | <b>0,4937</b> | 381,100   | 0,0857 | <b>0,6159</b> |
| 5,068      | 429,60    | 0,0967 | <b>0,6943</b> | 429,600   | 0,0967 | <b>0,6943</b> | 490,300   | 0,1103 | <b>0,7924</b> |
| 5,418      | 494,40    | 0,1112 | <b>0,7990</b> | 494,400   | 0,1112 | <b>0,7990</b> | 525,300   | 0,1182 | <b>0,8489</b> |
| 5,852      | 575,80    | 0,1296 | <b>0,9306</b> | 575,800   | 0,1296 | <b>0,9306</b> | 579,400   | 0,1304 | <b>0,9364</b> |
| 6,410      | 795,70    | 0,1790 | <b>1,2859</b> | 795,700   | 0,1790 | <b>1,2859</b> | 792,700   | 0,1784 | <b>1,2811</b> |
| 7,167      | 475,20    | 0,1069 | <b>0,7680</b> | 475,200   | 0,1069 | <b>0,7680</b> | 449,800   | 0,1012 | <b>0,7269</b> |
| 8,276      | 265,20    | 0,0597 | <b>0,4286</b> | 265,200   | 0,0597 | <b>0,4286</b> | 222,600   | 0,0501 | <b>0,3597</b> |

**Tablica 5. Sile zanošenja, sile dodatnog otpora na valovima i bezdimenzijski koeficijenti za  $Fr=0,087$**



| <b>Fr=0,087</b> | PRE       | PRE    | PRE           | CFS       | CFS    | CFS           | MOM       | MOM    | MOM           |
|-----------------|-----------|--------|---------------|-----------|--------|---------------|-----------|--------|---------------|
| $\omega_j$      | $F'_{ij}$ | $F(t)$ | $C_{wx}$      | $F'_{ij}$ | $F(t)$ | $C_{wx}$      | $F'_{ij}$ | $F(t)$ | $C_{wx}$      |
| 3,203           | 57,27     | 0,0129 | <b>0,0926</b> | 57,27     | 0,0129 | <b>0,0925</b> | 28,77     | 0,0065 | <b>0,0465</b> |
| 3,287           | 64,96     | 0,0146 | <b>0,1050</b> | 64,96     | 0,0146 | <b>0,1049</b> | 31,76     | 0,0071 | <b>0,0513</b> |
| 3,378           | 70,65     | 0,0159 | <b>0,1142</b> | 70,65     | 0,0159 | <b>0,1141</b> | 30,76     | 0,0069 | <b>0,0497</b> |
| 3,476           | 70,60     | 0,0159 | <b>0,1141</b> | 70,60     | 0,0159 | <b>0,1141</b> | 20,50     | 0,0046 | <b>0,0331</b> |
| 3,583           | 57,84     | 0,0130 | <b>0,0935</b> | 57,84     | 0,0130 | <b>0,0934</b> | 9,03      | 0,0020 | <b>0,0146</b> |
| 3,701           | 20,41     | 0,0046 | <b>0,0330</b> | 20,41     | 0,0046 | <b>0,0329</b> | 76,22     | 0,0171 | <b>0,1232</b> |
| 3,831           | 59,99     | 0,0135 | <b>0,0970</b> | 59,99     | 0,0135 | <b>0,0969</b> | 213,40    | 0,0480 | <b>0,3448</b> |
| 3,975           | 206,70    | 0,0465 | <b>0,3341</b> | 206,70    | 0,0465 | <b>0,3340</b> | 475,30    | 0,1069 | <b>0,7681</b> |
| 4,138           | 440,40    | 0,0991 | <b>0,7117</b> | 440,40    | 0,0991 | <b>0,7117</b> | 950,50    | 0,2139 | <b>1,5361</b> |
| 4,322           | 763,60    | 0,1718 | <b>1,2341</b> | 763,60    | 0,1718 | <b>1,2340</b> | 1775,00   | 0,3994 | <b>2,8686</b> |
| 4,533           | 1148,00   | 0,2583 | <b>1,8553</b> | 1148,00   | 0,2583 | <b>1,8553</b> | 3113,00   | 0,7004 | <b>5,0309</b> |
| 4,778           | 1520,00   | 0,3420 | <b>2,4565</b> | 1520,00   | 0,3420 | <b>2,4565</b> | 4841,00   | 1,0892 | <b>7,8236</b> |
| 5,068           | 1596,00   | 0,3591 | <b>2,5793</b> | 1596,00   | 0,3591 | <b>2,5793</b> | 5072,00   | 1,1412 | <b>8,1969</b> |
| 5,418           | 1061,00   | 0,2387 | <b>1,7147</b> | 1061,00   | 0,2387 | <b>1,7147</b> | 1313,00   | 0,2954 | <b>2,1219</b> |
| 5,852           | 687,20    | 0,1546 | <b>1,1106</b> | 687,20    | 0,1546 | <b>1,1106</b> | 1809,00   | 0,4070 | <b>2,9235</b> |
| 6,410           | 508,20    | 0,1143 | <b>0,8213</b> | 508,20    | 0,1143 | <b>0,8213</b> | 3869,00   | 0,8705 | <b>6,2527</b> |
| 7,167           | 88,99     | 0,0200 | <b>0,1438</b> | 88,99     | 0,0200 | <b>0,1438</b> | 4180,00   | 0,9405 | <b>6,7553</b> |
| 8,276           | 78,81     | 0,0177 | <b>0,1274</b> | 78,81     | 0,0177 | <b>0,1273</b> | 5619,00   | 1,2643 | <b>9,0809</b> |

Tablica 6. Sile zanošenja, sile dodatnog otpora na valovima i bezdimenzijski koeficijenti za  $Fr=0,148$

| <b>Fr=0,148</b> | PRE       | PRE    | PRE           | CFS       | CFS    | CFS           | MOM       | MOM    | MOM            |
|-----------------|-----------|--------|---------------|-----------|--------|---------------|-----------|--------|----------------|
| $\omega_j$      | $F'_{ij}$ | $F(t)$ | $C_{wx}$      | $F'_{ij}$ | $F(t)$ | $C_{wx}$      | $F'_{ij}$ | $F(t)$ | $C_{wx}$       |
| 3,203           | 64,92     | 0,0146 | <b>0,1049</b> | 64,92     | 0,0146 | <b>0,1049</b> | 191,50    | 0,0431 | <b>0,3095</b>  |
| 3,287           | 53,93     | 0,0121 | <b>0,0872</b> | 53,93     | 0,0121 | <b>0,0871</b> | 214,80    | 0,0483 | <b>0,3471</b>  |
| 3,378           | 24,46     | 0,0055 | <b>0,0395</b> | 24,46     | 0,0055 | <b>0,0395</b> | 225,90    | 0,0508 | <b>0,3651</b>  |
| 3,476           | 36,61     | 0,0082 | <b>0,0592</b> | 36,61     | 0,0082 | <b>0,0591</b> | 209,60    | 0,0472 | <b>0,3387</b>  |
| 3,583           | 148,10    | 0,0333 | <b>0,2393</b> | 148,10    | 0,0333 | <b>0,2393</b> | 138,60    | 0,0312 | <b>0,2240</b>  |
| 3,701           | 334,30    | 0,0752 | <b>0,5403</b> | 334,30    | 0,0752 | <b>0,5402</b> | 33,06     | 0,0074 | <b>0,0534</b>  |
| 3,831           | 621,40    | 0,1398 | <b>1,0043</b> | 621,40    | 0,1398 | <b>1,0042</b> | 383,90    | 0,0864 | <b>0,6204</b>  |
| 3,975           | 1032,00   | 0,2322 | <b>1,6678</b> | 1032,00   | 0,2322 | <b>1,6678</b> | 1045,00   | 0,2351 | <b>1,6888</b>  |
| 4,138           | 1581,00   | 0,3557 | <b>2,5551</b> | 1581,00   | 0,3557 | <b>2,5550</b> | 2206,00   | 0,4964 | <b>3,5652</b>  |
| 4,322           | 2258,00   | 0,5081 | <b>3,6492</b> | 2258,00   | 0,5081 | <b>3,6492</b> | 3922,00   | 0,8825 | <b>6,3384</b>  |
| 4,533           | 2834,00   | 0,6377 | <b>4,5801</b> | 2834,00   | 0,6377 | <b>4,5800</b> | 5243,00   | 1,1797 | <b>8,4733</b>  |
| 4,778           | 2624,00   | 0,5904 | <b>4,2407</b> | 2624,00   | 0,5904 | <b>4,2407</b> | 4063,00   | 0,9142 | <b>6,5663</b>  |
| 5,068           | 1633,00   | 0,3674 | <b>2,6391</b> | 1633,00   | 0,3674 | <b>2,6391</b> | 477,60    | 0,1075 | <b>0,7719</b>  |
| 5,418           | 706,70    | 0,1590 | <b>1,1421</b> | 706,70    | 0,1590 | <b>1,1421</b> | 3696,00   | 0,8316 | <b>5,9732</b>  |
| 5,852           | 234,30    | 0,0527 | <b>0,3787</b> | 234,30    | 0,0527 | <b>0,3786</b> | 6186,00   | 1,3919 | <b>9,9973</b>  |
| 6,410           | 97,23     | 0,0219 | <b>0,1571</b> | 97,23     | 0,0219 | <b>0,1571</b> | 9210,00   | 2,0723 | <b>14,8845</b> |
| 7,167           | 165,20    | 0,0372 | <b>0,2670</b> | 165,20    | 0,0372 | <b>0,2669</b> | 9118,00   | 2,0516 | <b>14,7358</b> |
| 8,276           | 326,80    | 0,0735 | <b>0,5281</b> | 326,80    | 0,0735 | <b>0,5281</b> | 23560,00  | 5,3010 | <b>38,0758</b> |

**Tablica 7. Sile zanošenja, sile dodatnog otpora na valovima i bezdimenzijski koeficijenti za  $Fr=0,198$**

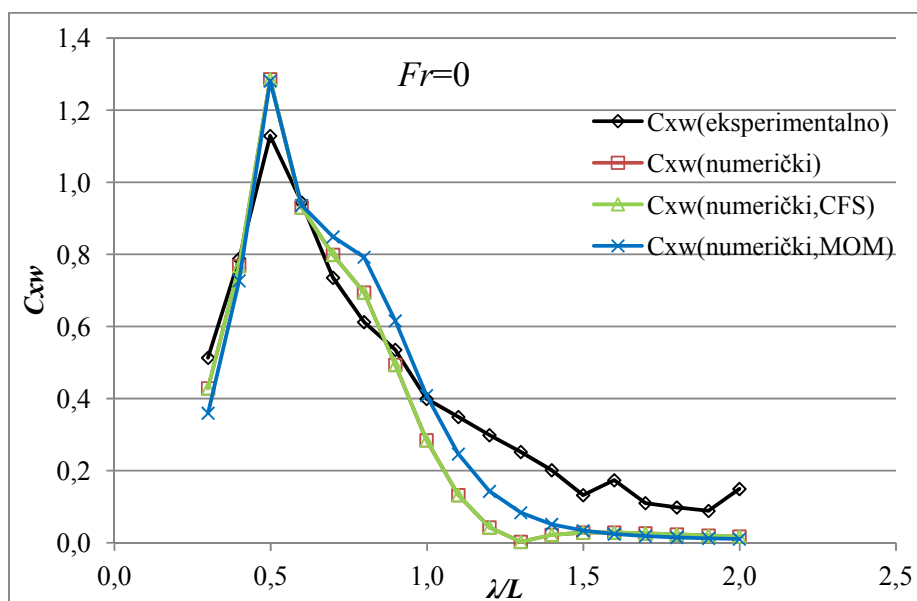
| $Fr=0,198$ | PRE       | PRE    | PRE           | CFS       | CFS    | CFS           | MOM       | MOM     | MOM             |
|------------|-----------|--------|---------------|-----------|--------|---------------|-----------|---------|-----------------|
| $\omega_j$ | $F'_{ij}$ | $F(t)$ | $C_{wx}$      | $F'_{ij}$ | $F(t)$ | $C_{wx}$      | $F'_{ij}$ | $F(t)$  | $C_{wx}$        |
| 3,203      | 7,76      | 0,0017 | <b>0,0125</b> | 7,76      | 0,0017 | <b>0,0125</b> | 499,30    | 0,1123  | <b>0,8069</b>   |
| 3,287      | 53,61     | 0,0121 | <b>0,0866</b> | 53,61     | 0,0121 | <b>0,0866</b> | 556,00    | 0,1251  | <b>0,8986</b>   |
| 3,378      | 159,10    | 0,0358 | <b>0,2571</b> | 159,10    | 0,0358 | <b>0,2571</b> | 593,30    | 0,1335  | <b>0,9588</b>   |
| 3,476      | 329,60    | 0,0742 | <b>0,5327</b> | 329,60    | 0,0742 | <b>0,5327</b> | 590,50    | 0,1329  | <b>0,9543</b>   |
| 3,583      | 590,30    | 0,1328 | <b>0,9540</b> | 590,30    | 0,1328 | <b>0,9540</b> | 516,50    | 0,1162  | <b>0,8347</b>   |
| 3,701      | 969,50    | 0,2181 | <b>1,5668</b> | 969,50    | 0,2181 | <b>1,5668</b> | 329,60    | 0,0742  | <b>0,5327</b>   |
| 3,831      | 1498,00   | 0,3371 | <b>2,4209</b> | 1498,00   | 0,3371 | <b>2,4209</b> | 2,31      | 0,0005  | <b>0,0037</b>   |
| 3,975      | 2204,00   | 0,4959 | <b>3,5619</b> | 2204,00   | 0,4959 | <b>3,5619</b> | 360,10    | 0,0810  | <b>0,5820</b>   |
| 4,138      | 3053,00   | 0,6869 | <b>4,9340</b> | 3053,00   | 0,6869 | <b>4,9340</b> | 33,24     | 0,0075  | <b>0,0537</b>   |
| 4,322      | 3716,00   | 0,8361 | <b>6,0055</b> | 3716,00   | 0,8361 | <b>6,0055</b> | 2420,00   | 0,5445  | <b>3,9110</b>   |
| 4,533      | 3597,00   | 0,8093 | <b>5,8132</b> | 3597,00   | 0,8093 | <b>5,8132</b> | 5741,00   | 1,2917  | <b>9,2781</b>   |
| 4,778      | 2553,00   | 0,5744 | <b>4,1260</b> | 2553,00   | 0,5744 | <b>4,1260</b> | 5024,00   | 1,1304  | <b>8,1194</b>   |
| 5,068      | 1256,00   | 0,2826 | <b>2,0298</b> | 1256,00   | 0,2826 | <b>2,0298</b> | 5376,00   | 1,2096  | <b>8,6883</b>   |
| 5,418      | 375,50    | 0,0845 | <b>0,6069</b> | 375,50    | 0,0845 | <b>0,6069</b> | 7864,00   | 1,7694  | <b>12,7092</b>  |
| 5,852      | 37,02     | 0,0083 | <b>0,0598</b> | 37,02     | 0,0083 | <b>0,0598</b> | 9852,00   | 2,2167  | <b>15,9220</b>  |
| 6,410      | 160,20    | 0,0360 | <b>0,2589</b> | 160,20    | 0,0360 | <b>0,2589</b> | 13050,00  | 2,9363  | <b>21,0904</b>  |
| 7,167      | 379,70    | 0,0854 | <b>0,6136</b> | 379,70    | 0,0854 | <b>0,6136</b> | 19350,00  | 4,3538  | <b>31,2719</b>  |
| 8,276      | 538,60    | 0,1212 | <b>0,8704</b> | 538,60    | 0,1212 | <b>0,8704</b> | 266000,00 | 59,8500 | <b>429,8880</b> |

### 3.4.2. Usporedba numeričkih i eksperimentalnih rezultata

Usporedba izračunatih koeficijenata dodatnog otpora na valovima primjenom različitih metoda s eksperimentalno dobivenim koeficijentima u ovisnosti o omjeru duljine vala i duljine modela dana je u Tablicama 8.-11. te prikazana na Slikama 5.-8.

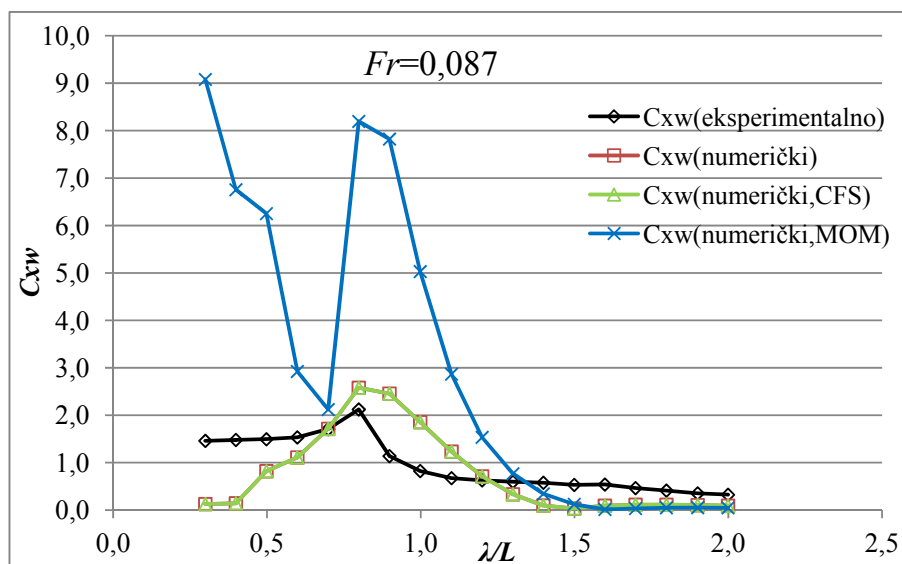
Tablica 8. Usporedba koeficijenta dodatnog otpora na valovima za  $Fr=0$ 

| eksperimentalno |          | numerički       |                 |                 |
|-----------------|----------|-----------------|-----------------|-----------------|
| $\lambda/L$     | $C_{xw}$ | PRE<br>$C_{xw}$ | CFS<br>$C_{xw}$ | MOM<br>$C_{xw}$ |
| 0,3             | 0,5134   | <b>0,4286</b>   | <b>0,4286</b>   | <b>0,3597</b>   |
| 0,4             | 0,7881   | <b>0,7680</b>   | <b>0,7680</b>   | <b>0,7269</b>   |
| 0,5             | 1,1289   | <b>1,2859</b>   | <b>1,2859</b>   | <b>1,2811</b>   |
| 0,6             | 0,9440   | <b>0,9306</b>   | <b>0,9306</b>   | <b>0,9364</b>   |
| 0,7             | 0,7354   | <b>0,7990</b>   | <b>0,7990</b>   | <b>0,8489</b>   |
| 0,8             | 0,6123   | <b>0,6943</b>   | <b>0,6943</b>   | <b>0,7924</b>   |
| 0,9             | 0,5354   | <b>0,4937</b>   | <b>0,4937</b>   | <b>0,6159</b>   |
| 1,0             | 0,3993   | <b>0,2844</b>   | <b>0,2844</b>   | <b>0,4086</b>   |
| 1,1             | 0,3491   | <b>0,1322</b>   | <b>0,1322</b>   | <b>0,2463</b>   |
| 1,2             | 0,2986   | <b>0,0426</b>   | <b>0,0426</b>   | <b>0,1428</b>   |
| 1,3             | 0,2520   | <b>0,0026</b>   | <b>0,0026</b>   | <b>0,0835</b>   |
| 1,4             | 0,2014   | <b>0,0220</b>   | <b>0,0220</b>   | <b>0,0512</b>   |
| 1,5             | 0,1321   | <b>0,0283</b>   | <b>0,0283</b>   | <b>0,0338</b>   |
| 1,6             | 0,1736   | <b>0,0285</b>   | <b>0,0285</b>   | <b>0,0241</b>   |
| 1,7             | 0,1101   | <b>0,0261</b>   | <b>0,0261</b>   | <b>0,0184</b>   |
| 1,8             | 0,0982   | <b>0,0231</b>   | <b>0,0231</b>   | <b>0,0148</b>   |
| 1,9             | 0,0884   | <b>0,0200</b>   | <b>0,0200</b>   | <b>0,0123</b>   |
| 2,0             | 0,1495   | <b>0,0172</b>   | <b>0,0172</b>   | <b>0,0104</b>   |

Slika 5. Usporedba koeficijenta dodatnog otpora na valovima za  $Fr=0$

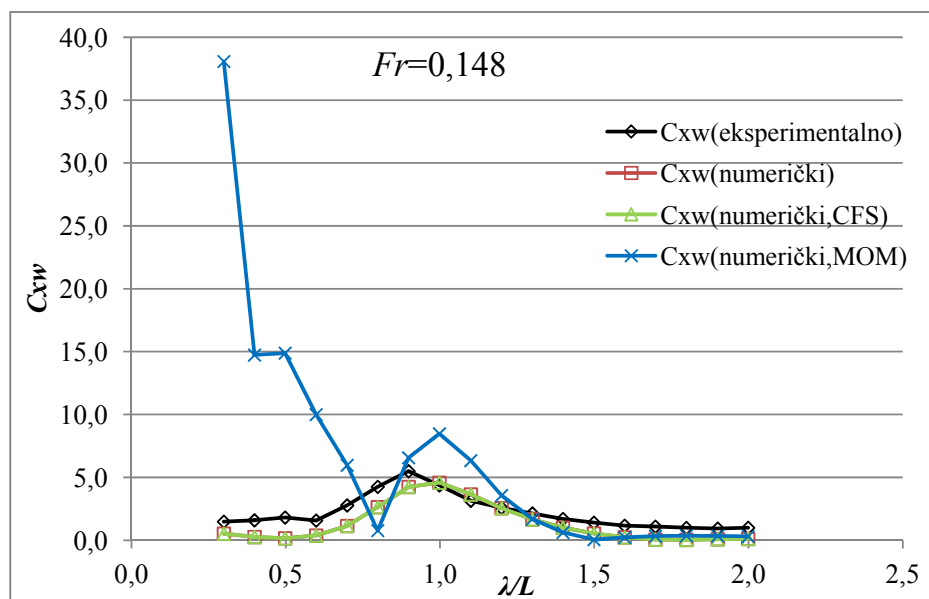
Tablica 9. Usporedba koeficijenta dodatnog otpora na valovima za  $Fr=0,087$ 

| eksperimentalno |          | numerički     |               |               |
|-----------------|----------|---------------|---------------|---------------|
|                 |          | PRE           | CFS           | MOM           |
| $\lambda/L$     | $C_{xw}$ | $C_{xw}$      | $C_{xw}$      | $C_{xw}$      |
| 0,3             | 1,4614   | <b>0,1274</b> | <b>0,1274</b> | <b>9,0810</b> |
| 0,4             | 1,4801   | <b>0,1438</b> | <b>0,1438</b> | <b>6,7554</b> |
| 0,5             | 1,4953   | <b>0,8213</b> | <b>0,8213</b> | <b>6,2528</b> |
| 0,6             | 1,5336   | <b>1,1106</b> | <b>1,1106</b> | <b>2,9236</b> |
| 0,7             | 1,7083   | <b>1,7147</b> | <b>1,7147</b> | <b>2,1220</b> |
| 0,8             | 2,1231   | <b>2,5793</b> | <b>2,5793</b> | <b>8,1970</b> |
| 0,9             | 1,1394   | <b>2,4565</b> | <b>2,4565</b> | <b>7,8236</b> |
| 1,0             | 0,8245   | <b>1,8553</b> | <b>1,8553</b> | <b>5,0310</b> |
| 1,1             | 0,6740   | <b>1,2341</b> | <b>1,2341</b> | <b>2,8686</b> |
| 1,2             | 0,6271   | <b>0,7117</b> | <b>0,7117</b> | <b>1,5361</b> |
| 1,3             | 0,5982   | <b>0,3341</b> | <b>0,3341</b> | <b>0,7681</b> |
| 1,4             | 0,5776   | <b>0,0970</b> | <b>0,0970</b> | <b>0,3449</b> |
| 1,5             | 0,5321   | <b>0,0330</b> | <b>0,0330</b> | <b>0,1232</b> |
| 1,6             | 0,5397   | <b>0,0935</b> | <b>0,0935</b> | <b>0,0146</b> |
| 1,7             | 0,4643   | <b>0,1141</b> | <b>0,1141</b> | <b>0,0331</b> |
| 1,8             | 0,4126   | <b>0,1142</b> | <b>0,1142</b> | <b>0,0497</b> |
| 1,9             | 0,3527   | <b>0,1050</b> | <b>0,1050</b> | <b>0,0513</b> |
| 2,0             | 0,3242   | <b>0,0926</b> | <b>0,0926</b> | <b>0,0465</b> |

Slika 6. Usporedba koeficijenta dodatnog otpora na valovima za  $Fr=0,087$

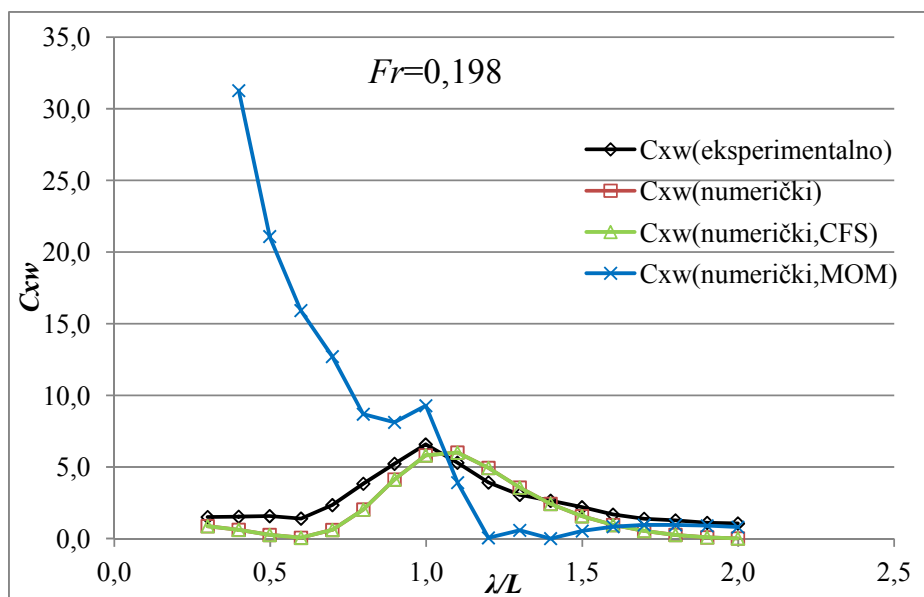
Tablica 10. Usporedba koeficijenta dodatnog otpora na valovima za  $Fr=0,148$ 

| eksperimentalno |          | numerički     |               |                |
|-----------------|----------|---------------|---------------|----------------|
| $\lambda/L$     | $C_{xw}$ | PRE           | CFS           | MOM            |
| 0,3             | 1,4830   | <b>0,5281</b> | <b>0,5281</b> | <b>38,0758</b> |
| 0,4             | 1,5917   | <b>0,2670</b> | <b>0,2670</b> | <b>14,7358</b> |
| 0,5             | 1,8119   | <b>0,1571</b> | <b>0,1571</b> | <b>14,8845</b> |
| 0,6             | 1,5740   | <b>0,3787</b> | <b>0,3787</b> | <b>9,9973</b>  |
| 0,7             | 2,7755   | <b>1,1421</b> | <b>1,1421</b> | <b>5,9732</b>  |
| 0,8             | 4,2552   | <b>2,6391</b> | <b>2,6391</b> | <b>0,7719</b>  |
| 0,9             | 5,4964   | <b>4,2407</b> | <b>4,2407</b> | <b>6,5663</b>  |
| 1,0             | 4,3693   | <b>4,5801</b> | <b>4,5801</b> | <b>8,4733</b>  |
| 1,1             | 3,1455   | <b>3,6492</b> | <b>3,6492</b> | <b>6,3384</b>  |
| 1,2             | 2,5773   | <b>2,5551</b> | <b>2,5551</b> | <b>3,5652</b>  |
| 1,3             | 2,1372   | <b>1,6678</b> | <b>1,6678</b> | <b>1,6888</b>  |
| 1,4             | 1,6993   | <b>1,0043</b> | <b>1,0043</b> | <b>0,6204</b>  |
| 1,5             | 1,4022   | <b>0,5403</b> | <b>0,5403</b> | <b>0,0534</b>  |
| 1,6             | 1,1628   | <b>0,2393</b> | <b>0,2393</b> | <b>0,2240</b>  |
| 1,7             | 1,0877   | <b>0,0592</b> | <b>0,0592</b> | <b>0,3387</b>  |
| 1,8             | 0,9895   | <b>0,0395</b> | <b>0,0395</b> | <b>0,3651</b>  |
| 1,9             | 0,9343   | <b>0,0872</b> | <b>0,0872</b> | <b>0,3471</b>  |
| 2,0             | 0,9978   | <b>0,1049</b> | <b>0,1049</b> | <b>0,3095</b>  |

Slika 7. Usporedba koeficijenta dodatnog otpora na valovima za  $Fr=0,148$

Tablica 11. Usporedba koeficijenta dodatnog otpora na valovima za  $Fr=0,198$ 

| eksperimentalno |          | numerički       |                 |                 |
|-----------------|----------|-----------------|-----------------|-----------------|
| $\lambda/L$     | $C_{xw}$ | PRE<br>$C_{xw}$ | CFS<br>$C_{xw}$ | MOM<br>$C_{xw}$ |
| 0,3             | 1,5054   | <b>0,8704</b>   | <b>0,8704</b>   | <b>429,8880</b> |
| 0,4             | 1,5303   | <b>0,6136</b>   | <b>0,6136</b>   | <b>31,2719</b>  |
| 0,5             | 1,5722   | <b>0,2589</b>   | <b>0,2589</b>   | <b>21,0904</b>  |
| 0,6             | 1,4014   | <b>0,0598</b>   | <b>0,0598</b>   | <b>15,9220</b>  |
| 0,7             | 2,3408   | <b>0,6069</b>   | <b>0,6069</b>   | <b>12,7092</b>  |
| 0,8             | 3,8332   | <b>2,0298</b>   | <b>2,0298</b>   | <b>8,6883</b>   |
| 0,9             | 5,2245   | <b>4,1260</b>   | <b>4,1260</b>   | <b>8,1194</b>   |
| 1,0             | 6,5729   | <b>5,8132</b>   | <b>5,8132</b>   | <b>9,2781</b>   |
| 1,1             | 5,2989   | <b>6,0055</b>   | <b>6,0055</b>   | <b>3,9110</b>   |
| 1,2             | 3,9188   | <b>4,9340</b>   | <b>4,9340</b>   | <b>0,0537</b>   |
| 1,3             | 3,0592   | <b>3,5619</b>   | <b>3,5619</b>   | <b>0,5820</b>   |
| 1,4             | 2,6451   | <b>2,4209</b>   | <b>2,4209</b>   | <b>0,0037</b>   |
| 1,5             | 2,1935   | <b>1,5668</b>   | <b>1,5668</b>   | <b>0,5327</b>   |
| 1,6             | 1,6773   | <b>0,9540</b>   | <b>0,9540</b>   | <b>0,8347</b>   |
| 1,7             | 1,3830   | <b>0,5327</b>   | <b>0,5327</b>   | <b>0,9543</b>   |
| 1,8             | 1,2718   | <b>0,2571</b>   | <b>0,2571</b>   | <b>0,9588</b>   |
| 1,9             | 1,0993   | <b>0,0866</b>   | <b>0,0866</b>   | <b>0,8986</b>   |
| 2,0             | 1,0588   | <b>0,0125</b>   | <b>0,0125</b>   | <b>0,8069</b>   |

Slika 8. Usporedba koeficijenta dodatnog otpora na valovima za  $Fr=0,198$

Na temelju dobivenih rezultata vidljiva su stanovita odstupanja izračunatih koeficijenata dodatnog otpora na valovima u odnosu na eksperimentalne podatke. Obzirom da se proračun temelji na teoriji potencijalnog strujanja i određenim pojednostavljenjima nije bilo moguće u potpunosti simulirati sliku strujanja te sile i opterećenja koje djeluju na model prilikom bazenskog ispitivanja. Metoda temeljena na direktnoj integraciji tlaka po oplakanoj površini (PRE) te metoda koja koristi kombinaciju integracije tlaka i analizu volumena omeđenog brodskim trupom i kontrolnom površinom (CFS) daju identične rezultate te pokazuju zadovoljavajuća slaganja s eksperimentalnim podacima.

Metoda temeljena na zakonu očuvanja količine gibanja (MOM) daje približne rezultate isključivo u slučaju mirovanja broda odnosno pri Froudeovom broju jednakom nula. Prilikom napredovanja broda određenim brzinama metoda daje velika odstupanja. Vidljivo je kako ta odstupanja sve više rastu porastom brzine odnosno Froudeovog broja. Obzirom da se metoda temelji na određivanju valnih opterećenja prvoga reda s nedovoljnom točnošću definira sile zanošenja te QTF funkciju osobito na nižim frekvencijama. Također ne pruža dovoljno točne rezultate u slučaju plitke ili vode ograničene dubine (kao što je bila pretpostavka proračuna) obzirom da koristi udaljene potencijale prilikom simuliranja strujanja.

Na temelju koeficijenata dodatnog otpora na valovima vidljivo je kako će značajniji porast dodatnog otpora odnosno sile ukupnog otpora broda biti veći na određenim frekvencijama ili valnim duljinama. Porastom brzine napredovanja broda raspon frekvencija na kojima može doći do porasta dodatnog otpora pomiče se u desno. Drugim riječima porastom Froudeovog broja frekvencije značajnijeg porasta sile otpora broda postaju sve veće. Takvi podaci korisni su prilikom planiranja rute plovidbe broda ovisno o stanjima mora te nominalne brzine plovidbe obzirom da se uslijed dodatnog otpora broda na valovima snaga te potrošnja goriva broda može povećati i do 85 % u odnosu na plovidbu mirnom vodom [11].

### **3.5. Ekstrapolacija rezultata**

Pomoću eksperimentalno dobivenih koeficijenata dodatnog otpora na pravilnim valovima [7] proračunat je dodatni otpor broda u naravi na temelju Froudeove sličnosti ispitanog modela i broda. U Tablici 12. dan je prikaz ulaznih parametara proračuna za model i brod u naravi.

Tablica 12. Podaci za model i brod u naravi

|   | Model | Brod  |
|---|-------|-------|
| Gustoća $\rho$ , kg/m <sup>3</sup>                  | 1000  | 1025  |
| Valna amplituda $\zeta_a$ , m                       | 0,015 | 0,875 |
| Širina $B$ , m                                      | 0,435 | 25,4  |
| Duljina $L$ , m                                     | 3,0   | 175,0 |
| Koeficijent geometrijske sličnosti $\lambda=58,333$ |       |       |

Pomoću poznatog izraza za koeficijent dodatnog otpora na valovima te na temelju podataka za brod izračunate su sile dodatnog otpora na valovima prema izrazu:

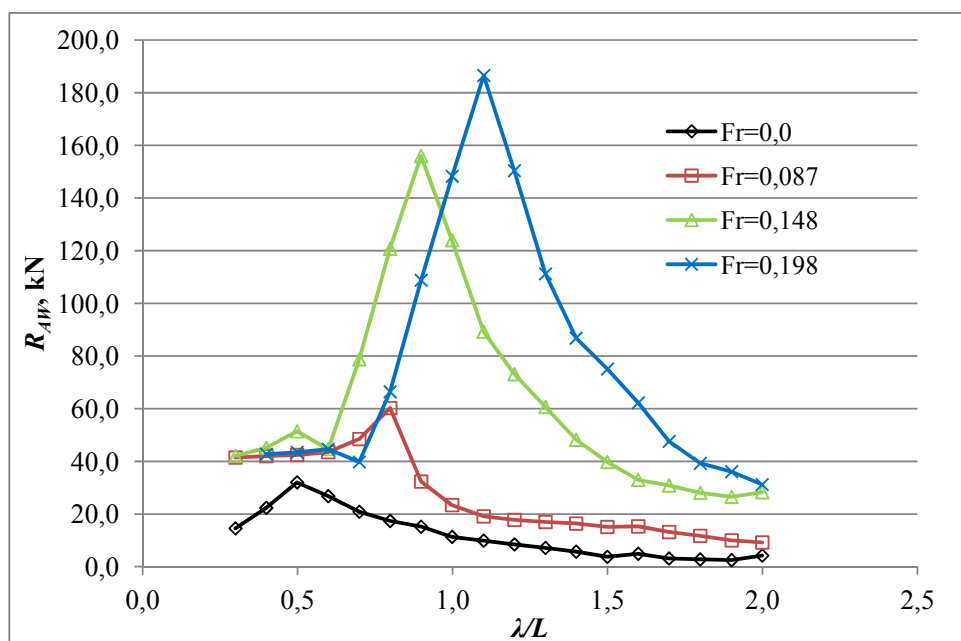
$$R_{AW} = C_{xw} \rho g \zeta_a^2 \frac{B^2}{L} \quad (45)$$

Dobiveni rezultati prikazani su u Tablici 13. i na Slici 9.

Tablica 13. Sile dodatnog otpora broda na valovima za različite omjere  $\lambda/L$  i različite Froudeove brojeve

| $\lambda/L$ | $R_{AW}$ , kN |            |            |            |
|-------------|---------------|------------|------------|------------|
|             | $Fr=0$        | $Fr=0,087$ | $Fr=0,148$ | $Fr=0,198$ |
| 0,3         | 14,570        | 41,476     | 42,090     | 42,726     |
| 0,4         | 22,367        | 42,009     | 45,175     | 43,433     |
| 0,5         | 32,039        | 42,439     | 51,425     | 44,621     |
| 0,6         | 26,793        | 43,525     | 44,672     | 39,775     |
| 0,7         | 20,871        | 48,484     | 78,771     | 66,435     |
| 0,8         | 17,377        | 60,257     | 120,769    | 108,792    |
| 0,9         | 15,195        | 32,336     | 155,995    | 148,280    |
| 1,0         | 11,332        | 23,402     | 124,007    | 186,549    |
| 1,1         | 9,908         | 19,129     | 89,273     | 150,391    |
| 1,2         | 8,473         | 17,797     | 73,146     | 111,220    |
| 1,3         | 7,152         | 16,978     | 60,656     | 86,824     |
| 1,4         | 5,717         | 16,394     | 48,228     | 75,072     |
| 1,5         | 3,750         | 15,103     | 39,795     | 62,255     |
| 1,6         | 4,928         | 15,318     | 33,002     | 47,603     |
| 1,7         | 3,125         | 13,176     | 30,871     | 39,252     |
| 1,8         | 2,787         | 11,711     | 28,084     | 36,097     |
| 1,9         | 2,510         | 10,010     | 26,517     | 31,199     |
| 2,0         | 4,242         | 9,201      | 28,320     | 30,051     |





Slika 9. Sila dodatnog otpora broda za različite Froudeove brojeve

Kako bi se okvirno procijenio postotak porasta otpora broda prilikom plovidbe na valovima u odnosu na plovidbu u mirnoj tekućini, na temelju faktora forme, oplakane površine te koeficijenta otpora valova izračunata je sila ukupnog otpora broda na mirnoj vodi [11]. Koeficijenti otpora trenja pri pojedinim brzinama izračunati su prema korelacijskoj liniji model-brod ITTC-1957:

$$C_F = \frac{0,075}{(\log Re - 2)^2} \quad (46)$$

Koeficijent ukupnog otpora definiran je izrazom:

$$C_T = (1+k)C_F + C_W \quad (47)$$

gdje je:

$k$  - faktor forme,

$C_W$  - koeficijent otpora valova.

Izraz za silu ukupnog otpora broda glasi:

$$R_T = 0,5 \cdot C_T \rho v^2 S \quad (48)$$

Rezultati su prikazani u Tablicama 14. i 15. te na Slici 10. Pretpostavljen je koeficijent kinematičke viskoznosti slane vode  $\nu=1,1883 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  (pri  $15^\circ\text{C}$ ).

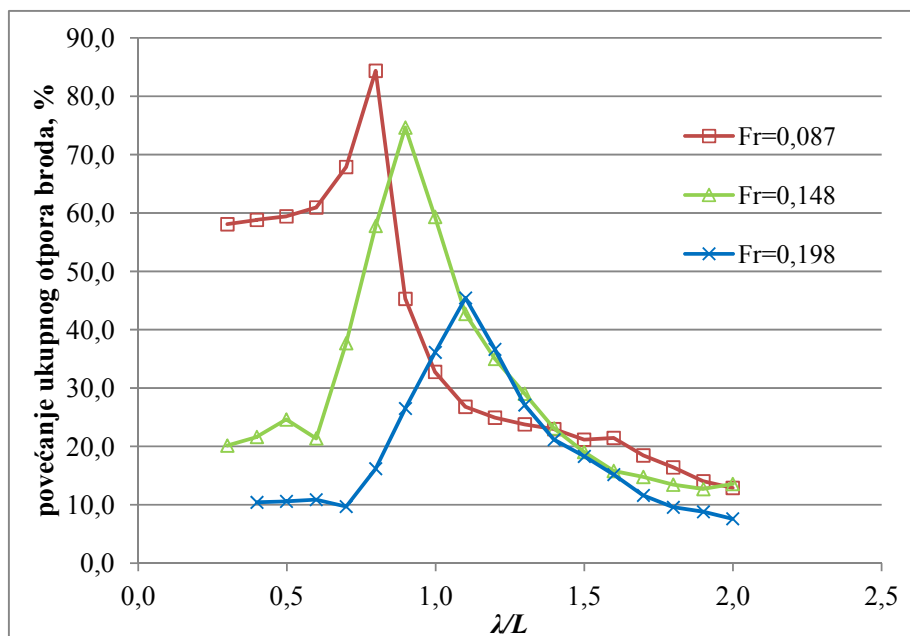
Oplakana površina broda iznosi  $5364,12 \text{ m}^2$ .

**Tablica 14. Koeficijenti i sila otpora broda pri pojedinim brzinama**

| $v, \text{ m/s}$ | $Fr$  | $Re$       | $C_W$     | $C_F$    | $C_T$    | $R_T, \text{ kN}$ |
|------------------|-------|------------|-----------|----------|----------|-------------------|
| 3,604            | 0,087 | 530898021  | 0,0000849 | 0,001658 | 0,001997 | 71,412            |
| 6,133            | 0,148 | 903201506  | 0,0002318 | 0,001550 | 0,002019 | 208,981           |
| 8,203            | 0,198 | 1208017954 | 0,0004932 | 0,001495 | 0,002217 | 410,540           |

**Tablica 15. Postotak povećanja sile ukupnog otpora broda uslijed plovidbe na valovima u odnosu na plovidbu u mirnoj vodi**

| $\lambda/L$ | Povećanje otpora, % |            |            |
|-------------|---------------------|------------|------------|
|             | $Fr=0,087$          | $Fr=0,148$ | $Fr=0,198$ |
| 0,3         | 58,08               | 20,14      | 10,41      |
| 0,4         | 58,83               | 21,62      | 10,58      |
| 0,5         | 59,43               | 24,61      | 10,87      |
| 0,6         | 60,95               | 21,38      | 9,69       |
| 0,7         | 67,89               | 37,69      | 16,18      |
| 0,8         | 84,38               | 57,79      | 26,50      |
| 0,9         | 45,28               | 74,65      | 36,12      |
| 1,0         | 32,77               | 59,34      | 45,44      |
| 1,1         | 26,79               | 42,72      | 36,63      |
| 1,2         | 24,92               | 35,00      | 27,09      |
| 1,3         | 23,77               | 29,02      | 21,15      |
| 1,4         | 22,96               | 23,08      | 18,29      |
| 1,5         | 21,15               | 19,04      | 15,16      |
| 1,6         | 21,45               | 15,79      | 11,60      |
| 1,7         | 18,45               | 14,77      | 9,56       |
| 1,8         | 16,40               | 13,44      | 8,79       |
| 1,9         | 14,02               | 12,69      | 7,60       |
| 2,0         | 12,88               | 13,55      | 7,32       |



**Slika 10. Postotak povećanja sile ukupnog otpora broda uslijed plovidbe na valovima u odnosu na plovidbu u mirnoj vodi**

Na Slici 10. vidljivo je kako je maksimalni porast ukupnog otpora broda vezan uz određenu valnu duljinu odnosno frekvenciju ili raspon istih. Dakle uslijed plovidbe broda na valovima pri određenim frekvencijama sila ukupnog otpora naglo raste. Porastom brzine broda raspon frekvencija najvećeg dodatnog otpora na valovima pomiče se prema višim frekvencijama odnosno manjim valnim duljinama. Korisno je poznavati raspon kritičnih frekvencija kako bi se eventualno mogla planirana ruta plovidbe broda korigirati s ciljem što manje potrošnje goriva uslijed porasta otpora na valovima. Kritične susretne frekvencije nailaznih valova mogu se izbjeći promjenom brzine broda tijekom plovidbe te promjenom kursa kako bi se ostvarila pogodna susretna frekvencija broda i nailaznih valova te izbjegao drastičan porast otpora i zahtjevano snage.

## 4. ODZIV BRODA NA VALOVIMA

### 4.1. Model njihanja broda na valovima

Dinamička opterećenja i njihanje broda na valovima složeni su hidrodinamički problemi. U svrhu procjene pomorstvenih karakteristika broda, odziv na valovima prikazuje se kao suma odziva broda na harmonijskim valovima različitih frekvencija što omogućuje dovoljno dobru procjenu vertikalnih, ali i horizontalnih gibanja i opterećenja. Odziv broda na morskim valovima procjenjuje se kroz statističku analizu za određeno stanje mora.

Njihanje broda uzrokovano je energijom koju nailazni val predaje brodu prilikom susreta. Dio energije utroši se na razbijanje vala odnosno difrakciju što uzrokuje promjenu smjera te amplitude vala, dio energije val predaje brodu, a dio zadržava te nastavlja napredovati iza broda. Difrakcijski val zadržava valnu duljinu odnosno frekvenciju i nakon susreta s brodom. Energija vala predana brodu, osim što uzrokuje njihanje broda, sastoji se od energije inercijskih sila, energije povratnih sila nastalih pomakom tijela iz ravnotežnog položaja te energije valova koji se šire oko broda prilikom njihanja tj. valova radijacije. Energija radijacijskih valova uzrokuje prigušenje njihanja broda, obzirom da brod dio energije njihanjem predaje valovima, te prividno povećanje mase broda. Hidrodinamička dodatna masa broda odnosi se na postojanje dodatne sile koje ubrzava okolnu vodu i trup broda prilikom njihanja, a koja je u fazi sa ubrzanjem njihanja tijela. Primjerice pri višim frekvencijama poniranja dodatna masa postaje gotovo jednaka masi broda [12].

Prilikom rješavanja problema interakcije vala i tijela uvode se određena pojednostavljenja. Ovisno o odnosu geometrije tijela i vala moguće je primjerice zanemariti poremećaj koji u strujanju tekućine vala uzrokuje tijelo te zanemariti utjecaj viskoznih sila i strujanje opisati potencijalnom teorijom. Model strujanja se linearizira pod pretpostavkom malih valnih amplituda te amplituda njihanja tijela. Strujanje se idealizirano analizira pomoću dva modela: strujanje oko nepomičnog tijela te strujanje tijela koje se njiše u mirnoj tekućini [3]. U prvom modelu na tijelo koje miruje nailazi val. Integracijom tlaka po oplakanoj površini tijela moguće je odrediti uzbudnu silu i moment kojim nailazni val djeluje na tijelo. Nailazni val i njegova difrakcijska komponenta formiraju oko broda sliku strujanja. Strujanje oko nepomičnog modela opisuje se funkcijom potencijala brzine strujanja nailaznog vala te funkcijom potencijala brzine strujanja njegove difrakcijske komponente:

$$\Phi(x, y, z; t) = \Phi_0(x, y, z; t) + \Phi_7(x, y, z; t) \quad (49)$$

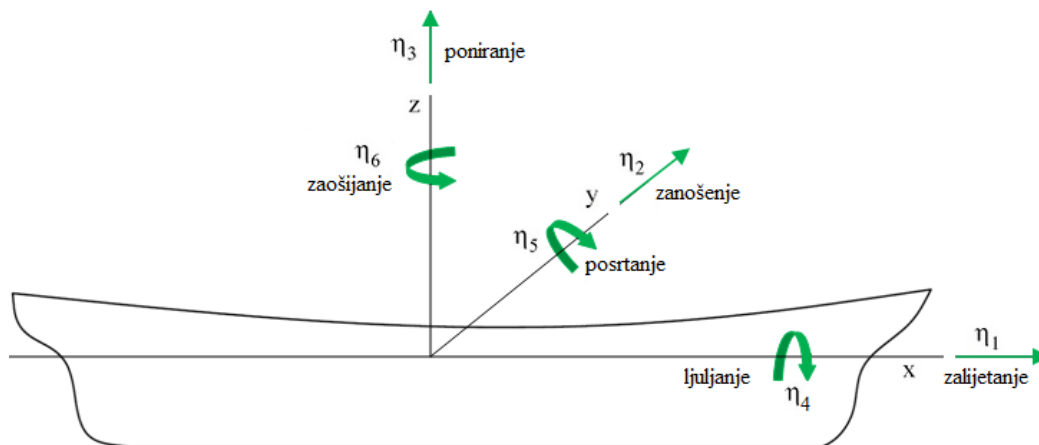
gdje je:

$\Phi_0$  - funkcija potencijala brzine strujanja nailaznog vala,

$\Phi_7$  - funkcija potencijala brzine strujanja difrakcijskog vala.

Potrebno je zadovoljiti pretpostavke potencijalnog strujanja idealne tekućine te kinematički (16) i dinamički (15) rubni uvjet na slobodnoj površini. Uz navedeno difrakcijski val zadovoljava i rubni uvjet nepromoćivosti (14) na oplakanoj površini tijela te uvjet radijacije u beskonačnosti. Dovoljno daleko od tijela potencijal brzine difrakcijske komponente nailaznog vala zadovoljava uvjet radijacije odnosno amplituda vala zamire.

U drugom modelu tijelo prisilno oscilira sa 6 stupnjeva slobode njihanja u mirnoj tekućini, Slika 11. Njihanje tijela opisano je funkcijama potencijala brzine strujanja  $\Phi_j(x, y, z; t)$ ,  $j=1\dots6$  u valovima radijacije nastalim uslijed 6 stupnjeva slobode gibanja tijela. Valovi radijacije također moraju zadovoljiti uvjet u beskonačnosti te rubni uvjet nepromoćivosti na oplakanoj površini.



**Slika 11. Stupnjevi slobode gibanja broda**

Njihanja broda dijele se na simetrična (zalijetanje, poniranje, posrtanje) te asimetrična (zanošenje, ljuljanje, zaošijanje). Prema linearnoj teoriji simetrična i asimetrična gibanja nemaju međusobni utjecaj odnosno sprega gibanja moguća je samo između po simetričnosti srodnih gibanja. Međusobni utjecaj pojedinih njihanja odnosno sprega njihanja od velike je važnosti pri određivanju dinamičkih gibanja i opterećenja broda.

Njihanje tijela u vremenskoj domeni za stupnjeve slobode  $j=1\dots6$  prikazuje se u kompleksnom obliku pomoću amplituda njihanja te frekvencije:

$$\eta_j(t) = \operatorname{Re}\{\delta_j e^{-\omega_e t}\} = \eta_{Cj} \cos \omega_e t + \eta_{Sj} \sin \omega_e t = \eta_{aj} \cos(\omega_e t + \varepsilon_j) \quad (50)$$

gdje je:

-  $\delta_j$  - kompleksna amplituda njihanja:

$$\delta_j = \delta_j^{\operatorname{Re}} + i\delta_j^{\operatorname{Im}} = \eta_{Cj} + i\eta_{Sj} \quad (51)$$

-  $e^{-\omega_e t}$  - vremenska harmonijska funkcija:

$$e^{-\omega_e t} = \cos \omega_e t - i \sin \omega_e t \quad (52)$$

-  $\omega_e$  - susretna frekvencija harmonijskog njihanja,

-  $\eta_{aj}$  - realna vrijednost amplitude njihanja:

$$\eta_{aj} = \sqrt{\eta_{Cj}^2 + \eta_{Sj}^2} \quad (53)$$

-  $\varepsilon_j$  - fazni pomak u odnosu na nailazni val:

$$\varepsilon_j = \operatorname{arctg} \frac{\eta_{Sj}}{\eta_{Cj}} \quad (54)$$

Pomaci broda zapravo su pomaci brodskog koordinatnog sustava u odnosu na translatorni koordinatni sustav koji se giba zajedno s brodom brzinom koja odgovara brzini napredovanja i ima ishodište na slobodnoj površini. Val je vezan uz nepomični koordinatni sustav na slobodnoj površini čija je os apscisa usmjerena u pozitivnom smjeru napredovanja vala.

Brzine i ubrzanja njihanja određuju se kao parcijalne derivacije pomaka:

$$\dot{\eta}_j(t) = \frac{\partial}{\partial t} \eta_j(t) = -\omega_e \eta_{aj} \sin(\omega_e t + \varepsilon_j) = \omega_e \eta_{aj} \cos\left(\omega_e t + \varepsilon_j + \frac{\pi}{2}\right) \quad (55)$$

$$\ddot{\eta}_j(t) = \frac{\partial^2}{\partial t^2} \eta_j(t) = -\omega_e^2 \eta_{aj} \cos(\omega_e t + \varepsilon_j) = \omega_e^2 \eta_{aj} \cos(\omega_e t + \varepsilon_j + \pi) \quad (56)$$

Pomaci, brzine i ubrzanja međusobno su pomaknuti za fazni kut  $\pi/2$ .

Poznavajući gibanja broda oko njegovog težišta moguće je odrediti pomake, brzinu i ubrzanje bilo koje točke broda. Ukoliko je gibanje točke u odnosu na translirajući koordinatni sustav odnosno neporemećenu slobodnu površinu radi se o apsolutnom gibanju, a gibanje u odnosu na valnu slobodnu površinu naziva se relativnim. U tom slučaju u obzir je potrebno uzeti i elevaciju valne površine na položaju promatrane točke. Pomaci broda (te brzine i ubrzanja kao parcijalne derivacije pomaka) određuju se linearnom superpozicijom harmonijskih gibanja broda. Gibanja u smjeru osi  $x$  superpozicija su zalijetanja, posrtanja te zaošijanja, u

smjeru osi  $y$  zanošenja, ljuljanja i zaošijanja, a u smjeru osi  $z$  poniranja, ljuljanja te posrtanja. Vertikalna njihanja broda gotovo da i ne utječu na poprečna njihanja, odnosno na sile i momente koji se javljaju u poprečnoj ravnini, zbog simetrije broda oko uzdužne osi. No poprečna njihanja imaju značajniji utjecaj na sile i momente u vertikalnoj ravnini [12].

Djelovanjem hidrodinamičke uzbude, kao posljedica njihanja javljaju se hidrostatičke i hidrodinamičke sile. Hidrostatičke odnosno povratne sile vraćaju brod u ravnotežno stanje, a hidrodinamičke sile prigušuju oscilatorna gibanja tijela. Povratne sile nastaju zbog pomaka tijela i djelovanja hidrostatičkog koeficijenta povratnog djelovanja. Hidrostatički koeficijenti neovisni su o brzini napredovanja broda te frekvencijama njihanja. U linernoj teoriji pretpostavka je da je odnos između hidrostatičke sile i pomaka linearan, a povratne sile nastaju samo uslijed promjene uzgona tijela. U stvarnosti nelinearnost njihanja broda u slučaju povratnih sila najviše dolazi do izražaja prilikom ljuljanja broda [12]. Hidrodinamičke sile nazivaju se još i hidrodinamičkom reakcijom tijela. One u fazi s brzinom njihanja nazivaju se dodatnom masom, a one u fazi s brzinom prigušenja njihanja. Prigušenje ovisi o brzini njihanja tijela. Prigušenje se u potencijalnoj teoriji strujanja naziva potencijalnim prigušenjem i odnosi se na odvođenje energije od broda valovima radijacije. Viskozno prigušenje uslijed trenja između slojeva tekućine zanemarivo je u slučaju njihanja broda osim kod njihanja oko uzdužne osi odnosno ljuljanja [12]. Hidrodinamička uzbuda sastoji se od Froude-Krilovljeve komponente odnosno sile koja bi djelovala na tijelo za slučaj da difrakcijska komponenta ne postoji te od difrakcijske komponente uslijed sudara vala i tijela.

Brod je u svakom trenutku njihanja u stanju dinamičke ravnoteže. Hidrodinamičke (i promjenjive hidrostatičke) sile i momenti uravnoteženi su inercijskim silama i momentima mase [3]. Jednadžba dinamičke ravnoteže glasi:

$$([M]+[A])\{\ddot{\eta}_j\}+[B]\{\dot{\eta}_j\}+[C]\{\eta_j\}=\zeta_a\{F_j(t)\} \quad (57)$$

gdje je:

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

$[A]$  - matrica dodatne mase,

$[B]$  - matrica prigušenja,

$[C]$  - matrica povratnih sila,

$\zeta_a$  - jedinična amplituda nailaznog vala,

$F_j(t)$  - hidrodinamička uzbuda.

#### 4.2. Prijenosna funkcija

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

Operator amplitude odziva prikazuje se kao:

$$RAO = \left| \frac{R_a}{\zeta_a} \right|^2 = H_{R_a}^2 \quad (58)$$

gdje je  $R_a$  amplituda odziva.

Prijenosne funkcije određuju se rješavanjem jednadžbi njihanja tijela na valovima. Prijenosna funkcija je u bezdimenzijskom obliku za slučaj translacijskih gibanja, a za slučaj rotacijskih gibanja tijela njihova bezdimenzionalnost postiže se dijeljenjem amplitude odziva dodatno s valnim brojem  $k$  prema sljedećem izrazu [3]:

$$RAO = \left| \frac{R_a}{k\zeta_a} \right|^2 \quad (59)$$

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

#### 4.3. Prijenosne funkcije modela kontejnerskog broda S-175

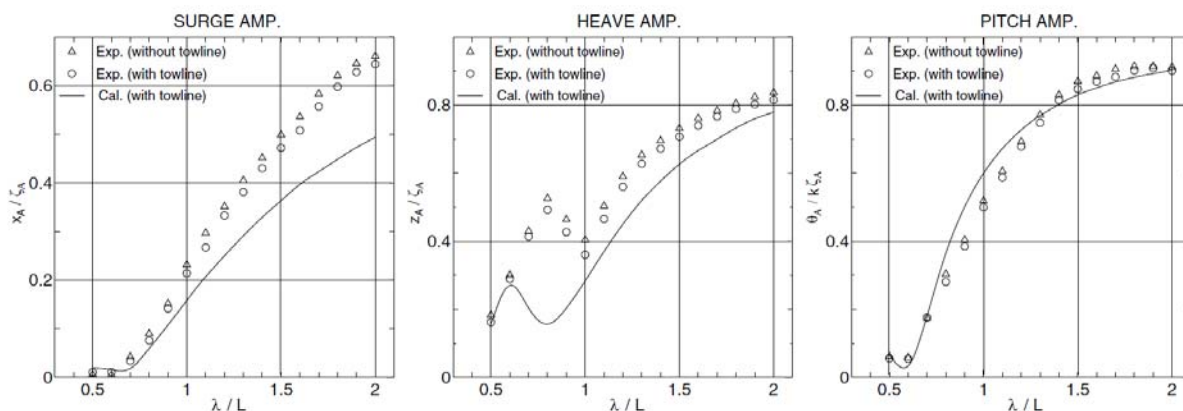
Kako bi se usporedili proračunski dobiveni odzivi broda na pravilnim valovima s podacima iz literature odnosno s eksperimentalnim podacima [7], pomoću programa *HydroSTAR* određene su amplitude pomaka modela kontejnerskog broda S-175 za Froudeov broj  $Fr=0,087$  što odgovara brzini napredovanja modela  $v_M = 0,472$  m/s.

Obzirom da su generirani nailazni valovi u pramac značajnije amplitude njihanja javljaju se za slučaj zalijetanja  $\eta_1$ , poniranja  $\eta_3$  i posrtanja  $\eta_5$ , dok su ostala njihanja zanemariva.



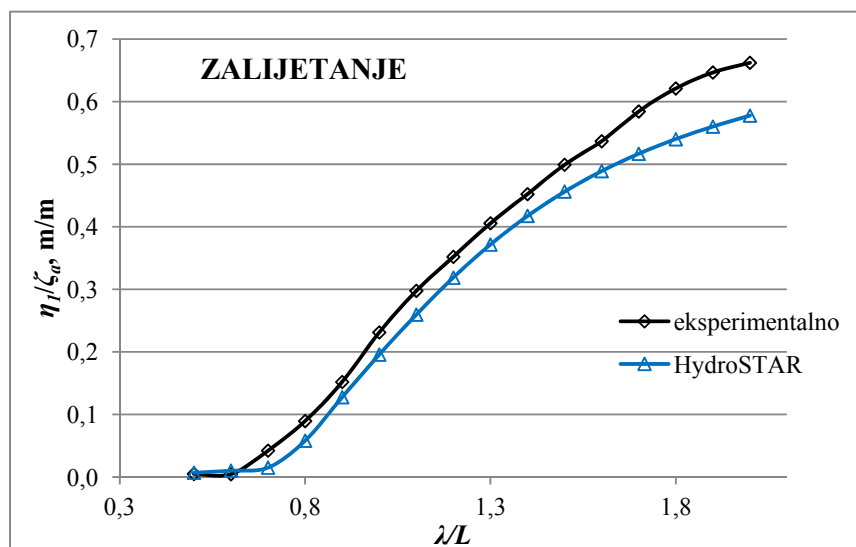
Na Slici 12. prikazane su eksperimentalno dobivene prijenosne funkcije modela broda bez i sa užetom za tegalj za navedene stupnjeve slobode gibanja.

U proračun su uzeti eksperimentalni podaci dobiveni tegljenjem modela bez užeta za tegalj.



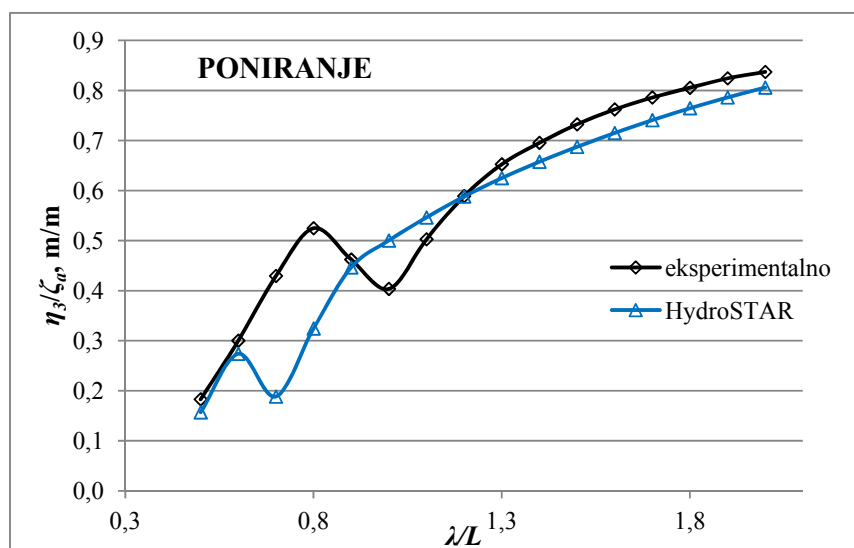
Slika 12. Prijenosne funkcije modela broda S-175 [7]

Na Slikama 13.-15. prikazana je usporedba eksperimentalnih podataka s numerički dobivenim bezdimenzionalnim amplitudama odziva za raspon omjera valnih duljina i duljine modela  $\lambda/L=0,3-2,0$ .

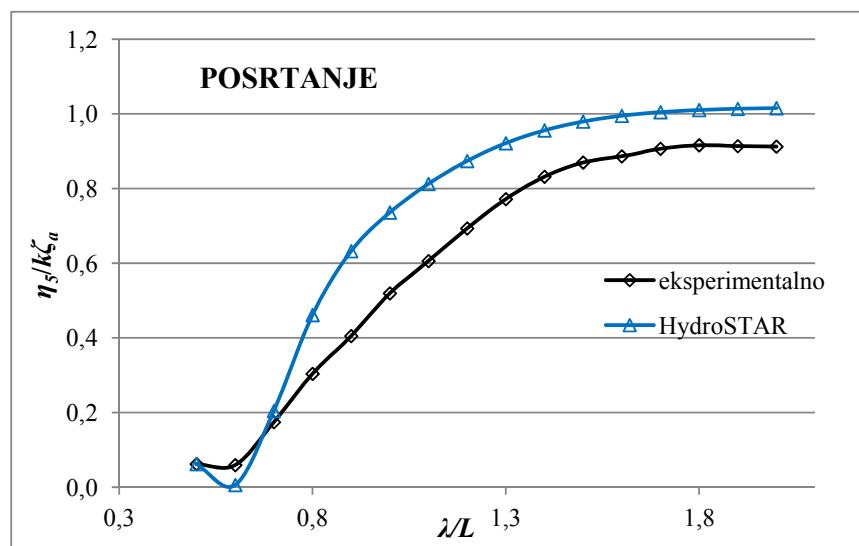


Slika 13. Usporedba prijenosnih funkcija zalijetanja modela

Amplituda odziva zalijetanja modela raste s povećanjem omjera  $\lambda/L$  odnosno s padom frekvencije valova. Porastom amplitude rastu i odstupanja između eksperimentalnih i proračunskih podataka. Amplitude odziva dobivene tegljenjem modela u bazenu nešto su veće od onih dobivenih programom *HydroSTAR*.



Slika 14. Usporedba prijenosnih funkcija poniranja modela



Slika 15. Usporedba prijenosnih funkcija posrtanja modela

Za slučaj poniranja vidljivo je kako za određene frekvencije odnosno omjere  $\lambda/L$  postoje značajnija odstupanja između amplituda odziva ( $\lambda/L=0,7; 0,8; 1,0$ ). Isti slučaj moguće je vidjeti na drugom dijagramu na Slici 12. Lokalni ekstremi prijenosne funkcije za navedene omjere valne duljine i duljine modela razlikuju se kod eksperimentalnih i proračunskih podataka. Numerički način izračuna radijacijskih i valnih opterećenja očigledno ne daje dovoljno točne rezultate za pojedine valne duljine.

U slučaju posrtanja izračunate amplitude nešto su veće od ekperimentalnih podataka gotovo za sve valne duljine zadanog raspona omjera  $\lambda/L$ .

Maksimalna odstupanja su oko 30-35% za omjere  $\lambda/L = 0,8-1,0$ .

#### 4.4. Odziv kontejnerskog broda S-175 na pravilnim valovima

Za potrebe proračuna odziva broda na valovima pomoću programa *HydroSTAR* model kontejnerskog broda S-175 na temelju geometrijske sličnosti između modela i broda skaliran je tako da odgovara veličini u naravi. Proračun je proveden za četiri Froudeova broja odnosno za tri različite brzine i brod u stanju mirovanja. Generirani su valovi u pramac istih omjera valnih duljina i duljine broda kao i kod proračuna dodatnog otpora, no frekvencije su određene na temelju disperzivne jednadžbe za vodu neograničene dubine:

$$\omega = \sqrt{kg} \quad (60)$$

Na temelju izlaznih rezultata zaključeno je kako valovi koji pod kutem od  $180^\circ$  nailaze na brod, ne stvaraju značajna njihanja broda oko uzdužne i vertikalne osi te u smjeru poprečne osi broskog koordinatnog sustava te su ta njihanja zanemarena.

U Tablici 16. prikazane su hidrostatske značajke kontejnerskog broda S-175.

Tablica 16. Hidrostatske značajke broda S-175

|                                      |   |
|--------------------------------------|---|
| <b>Gaz</b>                           | $T=12,01667$ m                              |
| <b>Volumen istisnine</b>             | $\nabla=24783$ m <sup>3</sup>               |
| <b>Masa istisnine</b>                | $\Delta =25402,575$ t                       |
| <b>Oplakana površina</b>             | $S=5436,5$ m <sup>2</sup>                   |
| <b>Površina vodne linije</b>         | $A_{WL}=3280,7$ m <sup>2</sup>              |
| <b>Položaj težišta mase, CG</b>      | $x_G=78,741$ m, $y_G=0,0$ m, $z_G=17,995$ m |
| <b>Položaj težišta istisnine, CB</b> | $x_B=78,741$ m, $y_B=0,0$ m, $z_B=7,728$ m  |

##### 4.4.1. Susretna frekvencija

Kut pod kojim valovi nailaze na brod naziva se susretni kut  $\beta$  i definira se kao kut koji zatvara vektor brzine broda s vektorom brzine vala. Ukoliko taj kut ne iznosi  $90^\circ$ , odnosno ukoliko valovi ne nailaze točno u bok broda, susretna frekvencija bit će različita od frekvencije nailaznih valova. Ona ovisi o brzini napredovanja broda te susretnom kutu i naravno o frekvenciji nailaznih valova. Određuje se prema izrazu (4).

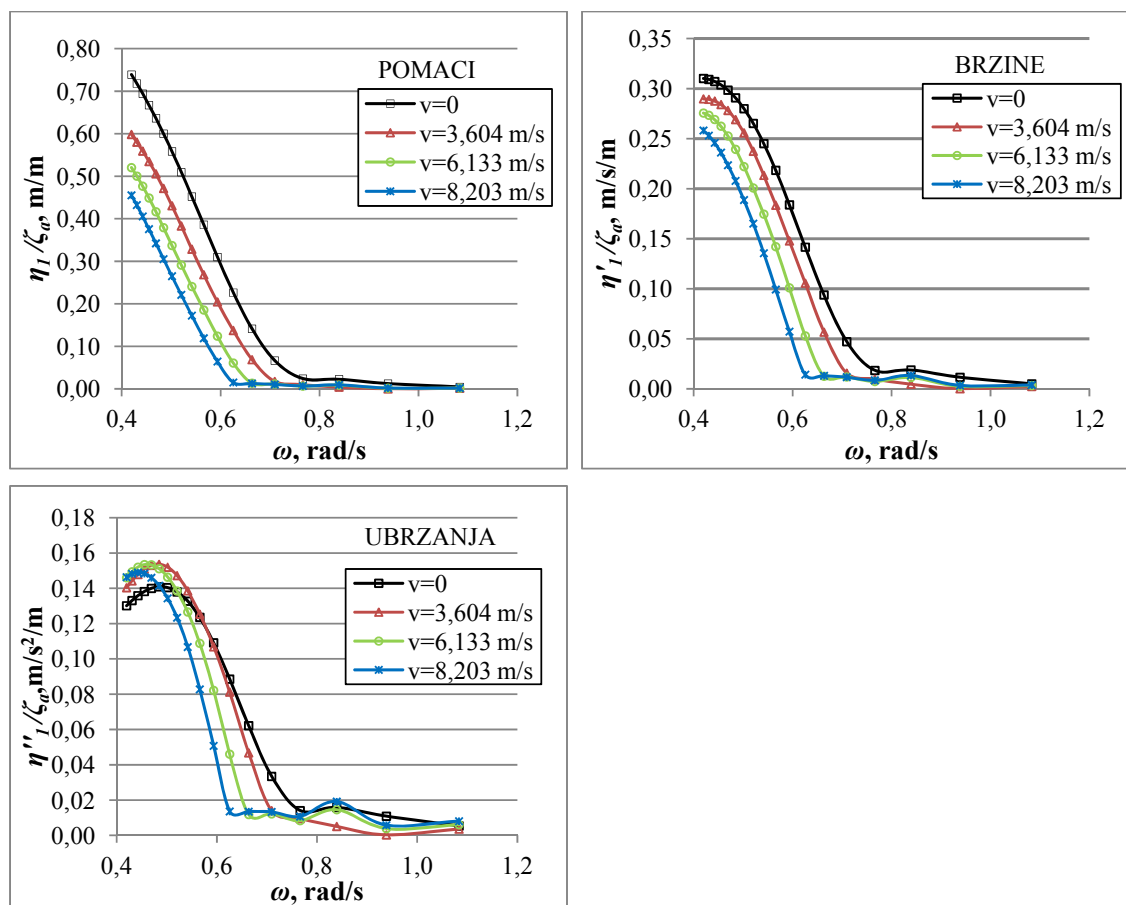
Susretne frekvencije kontejnerskog broda S-175 ovisno o brzini napredovanja broda prikazane su u Tablici 17.

Obzirom da se radi o valovima u pramac, susretne frekvencije  $\omega_e$  nešto su veće od frekvencija nailaznih valova i te razlike rastu s porastom brzine.

Tablica 17. Susretne frekvencije kontejnerskog broda S-175

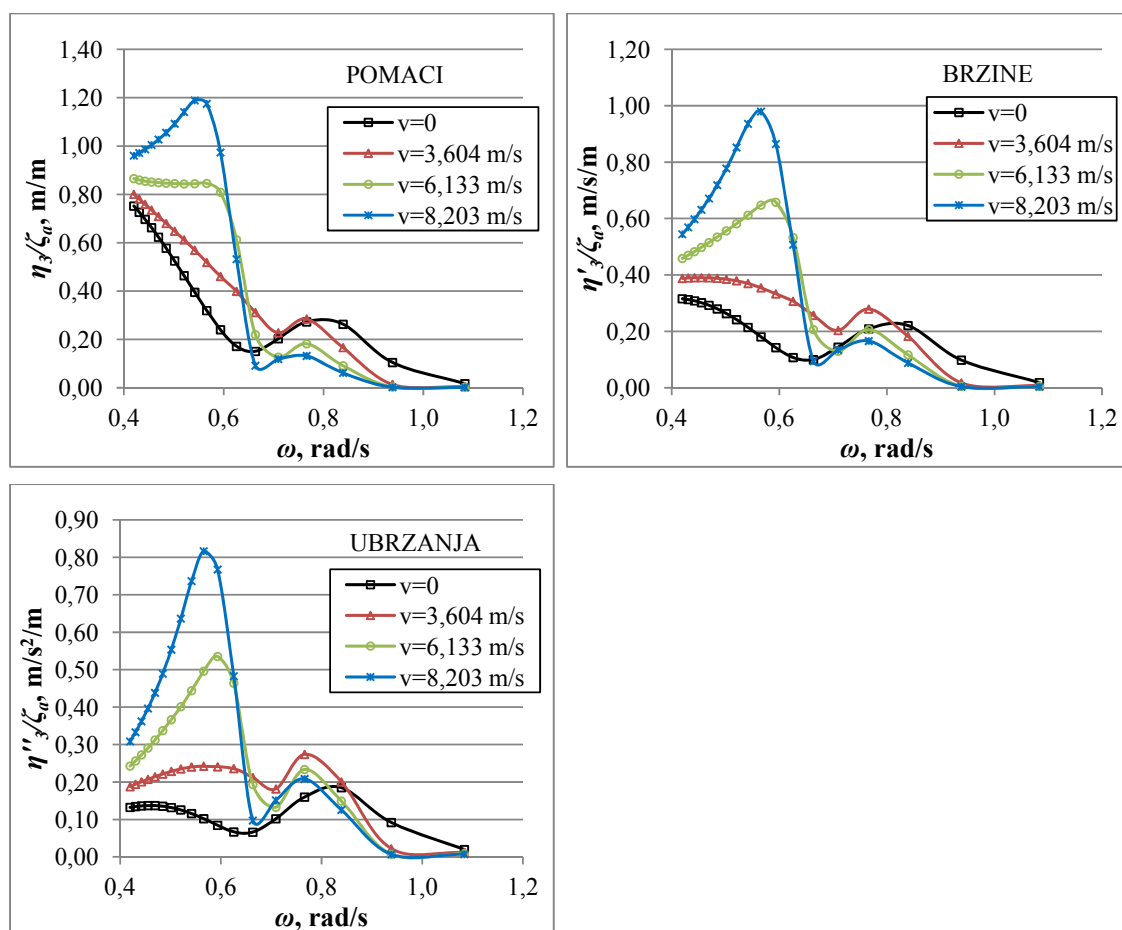
| $\omega$ ,<br>rad/s | $\lambda/L$ | $\lambda$ , m | $k$ , 1/m | Susretna frekvencija $\omega_e$ , rad/s |               |               |               |
|---------------------|-------------|---------------|-----------|---|---------------|---------------|---------------|
|                     |             |               |           | $v=0$                                   | $v=3,604$ m/s | $v=6,133$ m/s | $v=8,203$ m/s |
| 0,4197              | 2,0         | 350,0         | 0,0180    | 0,4197                                  | 0,4844        | 0,5298        | 0,5670        |
| 0,4306              | 1,9         | 332,5         | 0,0189    | 0,4306                                  | 0,4987        | 0,5465        | 0,5856        |
| 0,4424              | 1,8         | 315,0         | 0,0199    | 0,4424                                  | 0,5143        | 0,5647        | 0,6060        |
| 0,4552              | 1,7         | 297,5         | 0,0211    | 0,4552                                  | 0,5313        | 0,5847        | 0,6284        |
| 0,4692              | 1,6         | 280,0         | 0,0224    | 0,4692                                  | 0,5501        | 0,6068        | 0,6533        |
| 0,4846              | 1,5         | 262,5         | 0,0239    | 0,4846                                  | 0,5709        | 0,6314        | 0,6809        |
| 0,5016              | 1,4         | 245,0         | 0,0256    | 0,5016                                  | 0,5940        | 0,6589        | 0,7120        |
| 0,5205              | 1,3         | 227,5         | 0,0276    | 0,5205                                  | 0,6200        | 0,6899        | 0,7471        |
| 0,5418              | 1,2         | 210,0         | 0,0299    | 0,5418                                  | 0,6496        | 0,7253        | 0,7872        |
| 0,5659              | 1,1         | 192,5         | 0,0326    | 0,5659                                  | 0,6835        | 0,7661        | 0,8336        |
| 0,5935              | 1,0         | 175,0         | 0,0359    | 0,5935                                  | 0,7229        | 0,8137        | 0,8880        |
| 0,6256              | 0,9         | 157,5         | 0,0399    | 0,6256                                  | 0,7694        | 0,8703        | 0,9528        |
| 0,6635              | 0,8         | 140,0         | 0,0449    | 0,6635                                  | 0,8252        | 0,9387        | 1,0316        |
| 0,7093              | 0,7         | 122,5         | 0,0513    | 0,7093                                  | 0,8942        | 1,0239        | 1,1300        |
| 0,7662              | 0,6         | 105,0         | 0,0598    | 0,7662                                  | 0,9819        | 1,1332        | 1,2571        |
| 0,8393              | 0,5         | 87,5          | 0,0718    | 0,8393                                  | 1,0981        | 1,2797        | 1,4283        |
| 0,9384              | 0,4         | 70,0          | 0,0898    | 0,9384                                  | 1,2619        | 1,4889        | 1,6747        |
| 1,0835              | 0,3         | 52,5          | 0,1197    | 1,0835                                  | 1,5148        | 1,8175        | 2,0652        |

Na Slikama 16.-18. prikazane su dobivene prijenosne funkcije kontejnerskog broda S-175 i to za zalijetanje, poniranje i posrtanje kao usporedba za sva četiri Froudeova broja. U slučaju posrtanja bezdimenzionalnost je ostvarena pretvaranjem amplitude odziva iz stupnjeva u radijane te dijeljenjem amplitude dodatno s valnim brojem obzirom da su izlazni podaci o amplitudama iz programskog paketa *HydroSTAR*-a u jedinicama  $^{\circ}/m$ .



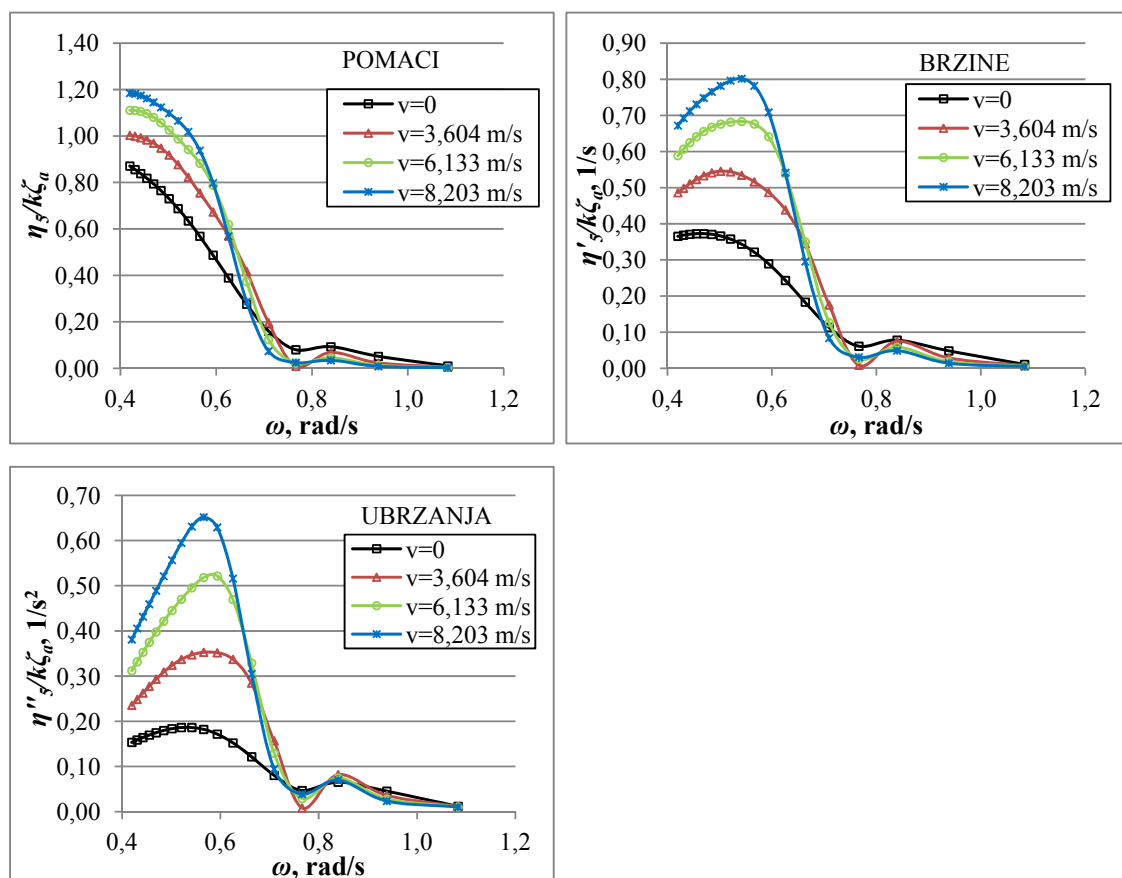
Slika 16. Prijenosne funkcije pomaka, brzine i ubrzanja za zalijetanje

Prijenosne funkcije zalijetanja broda pokazuju pad amplituda odziva zalijetanja s porastom brzine. Također povećanjem brzine, frekvencije nailaznih valova pri kojima amplitude zalijetanja postaju gotovo zanemarive su sve niže. Pri niskim frekvencijama amplitude zalijetanja broda teže amplitudama nailaznih valova. Drugim riječima na vrlo dugačkim valovima njihanje broda prati gibanje valova. Zalijetanje nema veliki utjecaj na poniranje i posrtanje odnosno relativno je zanemarivo u spregi njihanja simetričnih njihanja. Zalijetanje broda najveće je u nultočkama profila vala.



Slika 17. Prijenosne funkcije pomaka, brzine i ubrzanja za poniranje

U slučaju poniranja porastom brzine rastu i amplituda pomaka pri nižim frekvencijama te se javlja rezonancija frekvencije valova i prirodne frekvencije broda što je najočitije pri najvećoj promatranoj brzini. Lokalni maksimumi prijenosnih funkcija odgovaraju i spregi poniranja i posrtanja. Također pri niskim frekvencijama brod teži njihanju koje odgovara gibanju valova. Maksimalno poniranje na dugačkim valovima je na valnim brijegovima i dolovima kada je gotovo jednako amplitudi vala.

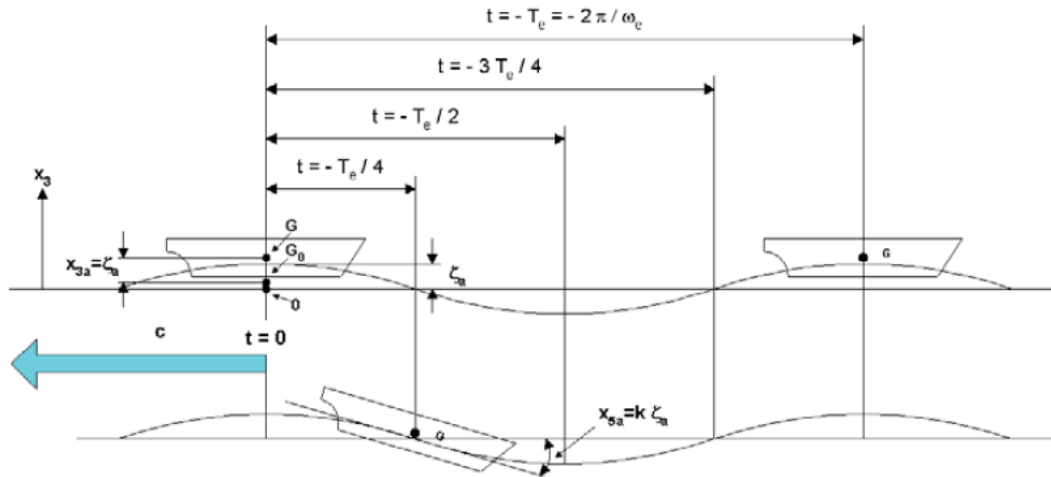


Slika 18. Prijenosne funkcije pomaka, brzine i ubrzanja za posrtanje

Posrtanje broda na valovima najveće je u nultočkama profila vala kao i kod zalijetanja u slučaju dugačkih valova. Na dijagramu amplituda pomaka posrtanja vidljivo je kako amplitude posrtanja zamiru porastom frekvencija nailaznih valova. Pri nižim frekvencijama može se primjetiti da su amplitude posrtanja veće što je veća brzina broda.

Iz navedenoga može se zaključiti kako je pri nižim frekvencijama nailaznih valova pogodnije da brod ima manju brzinu i prati gibanja valova za slučaj poniranja i posrtanja. S druge strane u slučaju zalijetanja pri nižim frekvencijama nailaznih valova pogodnija je veća brzina broda.

Na Slici 19. prikazana je interakcija broda i valova na vrlo dugačkim valovima za slučaj nailaznih valova u pramac.



Slika 19. Brod na dugačkim valovima u pramac [12]



## 5. ODZIV OŠTEĆENOG BRODA NA VALOVIMA

Oštećeni brod potrebno je često nakon pomorske nesreće tegliti do određenog mjesta. Prodrla voda unutar trupa broda osim što utječe i ugrožava stabilitet broda ima utjecaj i na njegove pomorstvene karakteristike. Voda u unutrašnjosti trupa djeluje na opterećenja broda prilikom plovidbe ili teglja te mijenja njihanja broda uslijed valova. Stoga je potrebno znati kakav utjecaj će tekućina koja se njiše zajedno s brodom imati na ukupna gibanja i opterećenja kako bi se eventualno mogao odrediti način i ruta tegljenja. Također je potrebno poznavati odzive broda u oštećenom stanju za neko određeno stanje mora kako bi se procijenio rizik teglja takvog broda.

Određivanje pomorstvenih karakteristika u tom slučaju temelji se na spregi njihanja broda kao krutog tijela te tekućine unutar tanka.

Problem spregnutog rješavanja gibanja i opterećenja broda te tekućine internih tankova također podliježe pretpostavkama linearne teorije potencijalnog strujanja. Gibanje tekućine unutar tankova te rješavanje pomorstvenih karakteristika broda dva su zasebno promatrana hidrodinamička dijela.

Brod zadovoljava klasičnu jednadžbu dinamičke ravnoteže (57) u svakom trenutku. Tekućina unutar tankova kao i brod ima 6 stupnjeva slobode gibanja. Obzirom da se radi o linearnoj potencijalnoj teoriji unutar tankova ne postoji prigušenje, a konačno rješavanje hidrodinamičkih gibanja i opterećenja unutar tankova daje dodatne članove matrice dodatne mase te matrice hidrostatičkih povratnih sila [13].

Gibanja te sile i momenti tekućine u tankovima opisuju se i rješavaju u lokalnom koordinatnom sustavu tanka te ih je potrebno transformirati i svesti na globalni koordinatni sustav broda.

Jednadžba dinamičke ravnoteže valjane za globalni brodski koordinatni sustav spregnutih matrica broda i tanka glasi [13]:

$$\omega^2 \left( [M_\varrho] + [A_\varrho] + [A_\tau] + [A_{\tau\varrho}] \right) - i\omega [B_\varrho] + \left( [C_\varrho] + [C_\tau] + [C_{\tau\varrho}] \right) \{ \eta_j \} = \{ F_\varrho \} \quad (61)$$

gdje je:

$[M_\varrho]$  - matrica masa broda,

$[A_\varrho]$  - matrica dodatne mase broda,

$[A_t]$  - matrica dodatne mase tanka,

$[A_{tQ}]$  - matrica dodatne mase koja povezuje ishodišta oba koordinatna sustava dobivena na temelju vektora koji spaja ishodišta,

$[B_Q]$  - matrica prigušenja broda,

$[C_Q]$  - matrica povratnih sila broda,

$[C_t]$  - matrica povratnih sila tanka,

$[C_{tQ}]$  - matrica povratnih sila broda i tanka,

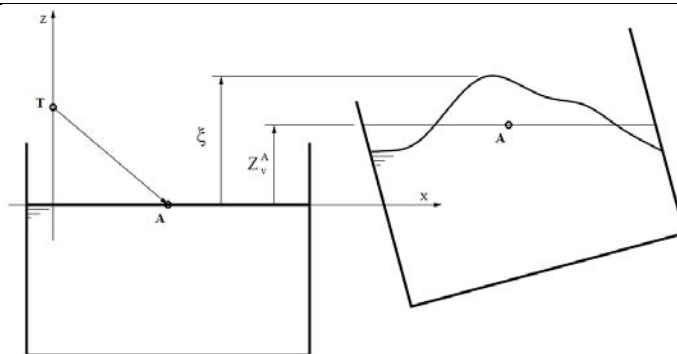
$\{F_Q\}$  - hidrodinamička uzbudna sila.

Za slučaj rješavanja pomorstvenih karakteristika samog broda tekućina unutar tankova smatra se krutom masom broda odnosno brod ima gaz koji odgovara slučaju kada su tankovi ispunjeni tekućinom, težište sustava uzima u obzir i tankove, ali tekućina unutar tankova nema utjecaj na gibanja i opterećenja broda.

Hidrostatičke sile i momenti koji djeluju na brod određuju se integracijom tlaka po oplakanoj površini. Hidrodinamička opterećenja moguće je odrediti na temelju potencijala brzine strujanja nailaznog vala i njegove difrakcijske komponente te radijacijskih potencijala njihanja broda kao što je već spomenuto.

Za slučaj gibanja tekućine u tanku sličan postupak koristi se pri određivanju hidrostatičkih i hidrodinamičkih opterećenja. Obzirom da je slobodna površina tanka prema linearnoj teoriji u svakom trenutku horizontalna koristi se korekcija vertikalne koordinate u integraciji tlaka po oplakanoj površini stijenki tanka. Proračuni se provode obzirom na centar slobodne površine tekućine u tanku.

Razlika između rješavanja hidrodinamičkog problema broda i tekućine u tanku je i nepostojanje difrakcijskog potencijala u tanku te drugačiji rubni uvjeti na slobodnoj površini obzirom da se slobodna površina tanka giba zajedno s brodom, Slika 20.



Slika 20. Gibanje slobodne površine tanka

Dinamički i kinematički rubni uvjet na slobodnoj površini glase:

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} = \frac{\partial \Phi}{\partial z} \quad (62)$$

$$-\rho g (\xi - Z_v^A) - \rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} = 0 \quad (63)$$

gdje je:

$\xi$  - vertikalna razlika između mirne slobodne površine i najviše točke valovite slobodne površine tanka prilikom njihanja,

$Z_v^A$  - vertikalna razlika položaja centra površine vodne linije.

Kombinacijom rubnih uvjeta dobije se:

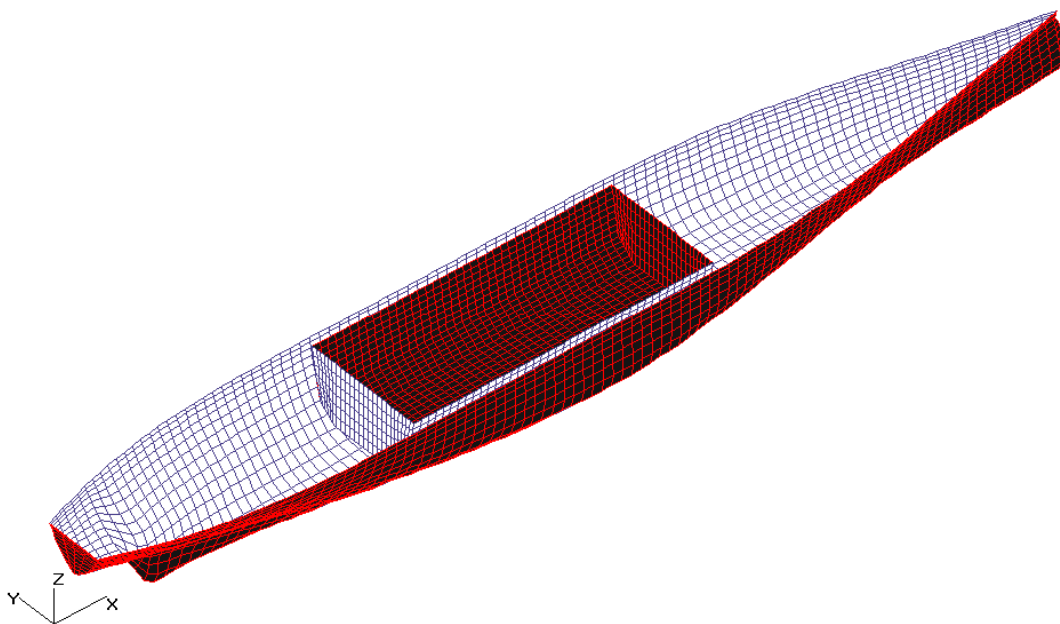
$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} + g \frac{\partial \Phi}{\partial z} = g \frac{\partial Z_v^A}{\partial t} \quad (64)$$

Kao što je napomenuto s obzirom da se radi o potencijalnoj teoriji i da ne postoji prigušenje, javlja se problem rezonantnih frekvencija gibanja tekućine u tanku i mogući su nerealni odzivi na tim frekvencijama [13]. Potrebno je stoga korigirati navedeni model određivanja spregnutih gibanja/odziva broda i tekućine u tanku barem okvirnim faktorima prigušenja koji mogu biti i na temelju iskustvenih podataka ili eksperimentalnih ispitivanja. Parametar za korekciju prigušenja u tankovima određuje se kroz usporedbu s eksperimentalnim podacima [14]. Osnovna ideja je korekcija rubnih uvjeta na stijenkama tanka određenim parametrima kako bi glavina disipacije energije bila na graničnim dijelovima tanka iako to nije sasvim točno.

Modeliranje gibanja tekućine u tankovima uslijed njihanja broda na valovima vrlo je složen postupak i navedeni problem nije moguće simulirati uz pomoć linearne teorije. Prema [13] gibanje tekućine u tanku nije moguće dovoljno točno simulirati ni nelinearnim potencijalnim teorijama, već je potrebno koristiti složenije modele (npr. model temeljen na Navier-Stokes

jednadžbama). No za potrebe procjene utjecaja koji tekućina u tankovima ima na njihanje broda potencijalna teorija daje zadovoljavajuće rezultate.

Kako bi se simulirao utjecaj naplavljene tekućine u trupu broda uslijed oštećenja generiran je naplavljeni tank u trupu navedenog kontejnerskog broda S-175, Slika 21. Volumen tekućine u tanku iznosi 48,49% volumena istisnine neoštećenog broda na gazu  $T = 12,01667$  m, odnosno 32,74% volumena istisnine broda koji je nakon naplave tekućine uronio za  $\Delta T = 3,483$  m. Karakteristike tanka prikazane su u Tablici 18.



Slika 21. Mreža panela kontejnerskog broda S-175 s unutrašnjim tankom

Tablica 18. Karakteristike tanka

|  |   |
|--|---|
| <b>Duljina</b>                                 | $L_T = 54,75$ m                                 |
| <b>Maksimalna širina</b>                       | $B_T = 22$ m                                    |
| <b>Položaj tanka po duljini broda</b>          | $x_1 = 48,405$ m, $x_2 = 103,155$ m             |
| <b>Volumen istisnine</b>                       | $V_T = 12018$ m <sup>3</sup>                    |
| <b>Masa istisnine</b>                          | $\Delta_T = 12318,45$ t                         |
| <b>Površina vodne linije</b>                   | $A_{WL,T} = 1204,5$ m <sup>2</sup>              |
| <b>Položaj težišta mase, <math>CG_T</math></b> | $x_G = 75,78$ m, $y_G = 0,0$ m, $z_G = 10,18$ m |

Naplavljena tekućina prvo je tretirana kao dodana masa broda no bez utjecaja gibanja tekućine unutar tanka. Ulazne značajke forme poput mase istisnine, položaja težišta sustava te radijusa tromosti mase iste su kao kod broda s napunjenim tankom te su prikazane u Tablici 19.

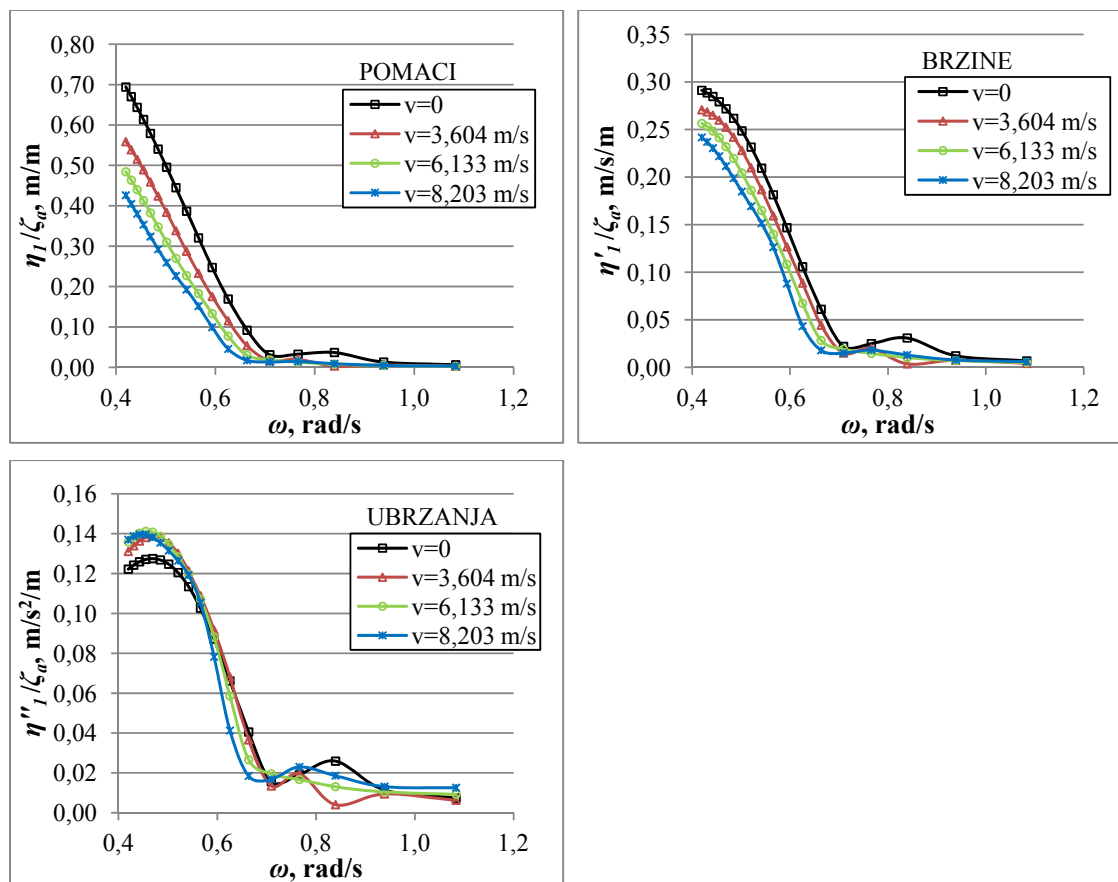
Tablica 19. Hidrostatske značajke broda nakon oštećenja

|                                      |   |
|--------------------------------------|---|
| <b>Gaz</b>                           | $T=15,5$ m  |
| <b>Volumen istisnine</b>             | $\nabla=36705$ m <sup>3</sup>                           |
| <b>Masa istisnine</b>                | $\Delta=37622,625$ t                                    |
| <b>Oplakana površina</b>             | $S=6790,1$ m <sup>2</sup>                               |
| <b>Površina vodne linije</b>         | $A_{WL}=3603,6$ m <sup>2</sup>                          |
| <b>Položaj težišta mase, CG</b>      | $x_G=77,745$ m, $y_G=0,0$ m, $z_G=15,439$ m             |
| <b>Položaj težišta istisnine, CB</b> | $x_B=77,745$ m, $y_B=0,0$ m, $z_B=9,711$ m              |
| <b>Radijusi tromosti mase</b>        | $r_{xx}=6,5748$ m, $r_{yy}=35,52$ m, $r_{zz}=35,8107$ m |

### 5.1. Naplavljena tekućina kao dodana kruta masa broda

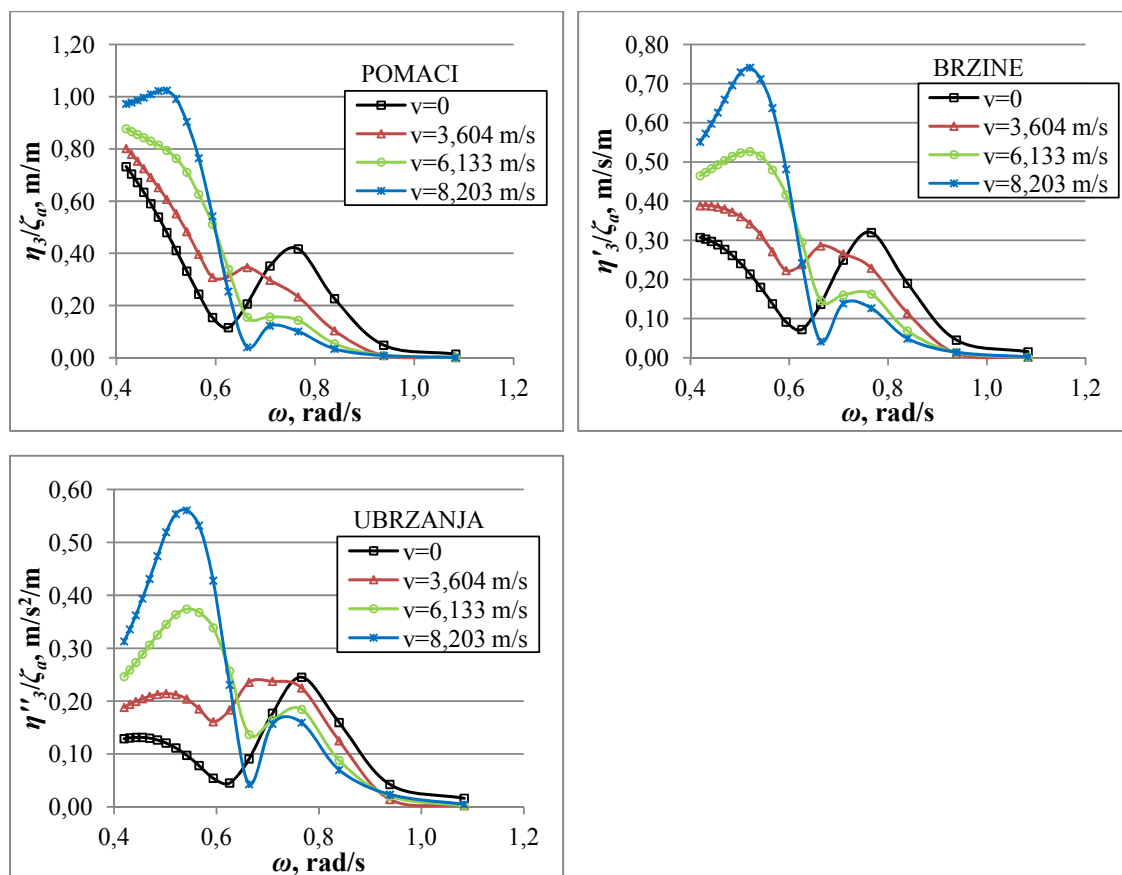
Za brod opisane forme i navedenih hidrostatskih karakteristika provedena je procjena pomorstvenih karakteristika tako što se naplavljena tekućina promatra kao povećana masa samog broda. Narinuti su pravilni nailazni valovi u pramac (180°) u rasponu frekvencija  $\omega=0,4197-1,0835$  rad/s što odgovara omjeru valne duljine i duljine broda  $\lambda/L=0,3-2,0$ .

Na Slikama 22.-24. prikazane su prijenosne funkcije odnosno amplitude odziva u bezdimenzionalom obliku o ovisnosti o frekvencijama nailaznih valova.



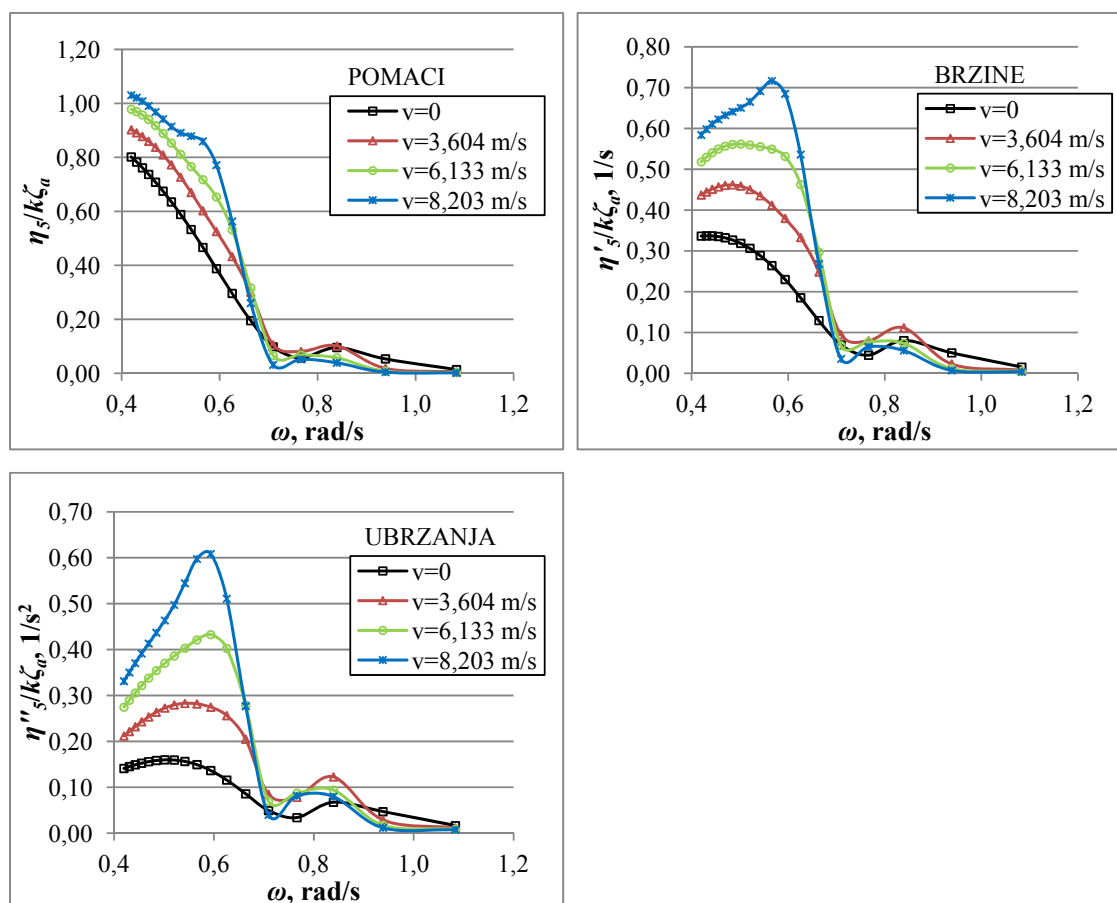
Slika 22. Prijenosne funkcije ubrzanja za zalijetanje

U slučaju zalijetanja vidljivo je kako porastom brzine pada amplituda odziva. U stanju mirovanja broda najveće su amplitude zalijetanja i može se zaključiti kako je slučaju niskih frekvencija nailaznih valova optimalno ploviti većim brzinama. Porastom frekvencije odnosno smanjenjem valnih duljina nailaznih valova amplituda odziva značajno se smanjuje.



Slika 23. Prijenosne funkcije pomaka, brzine i ubrzanja za poniranje

Prijenosne funkcije poniranja imaju nešto izraženije lokalne ekstreme za brod koji ima veći gaz i masu istisnine no maksimalne amplitude odziva su manje s obzirom da je brod tromiji. Najveće amplitude javljaju se oko područja rezonantnih frekvencija ovisno o brzini napredovanja broda.



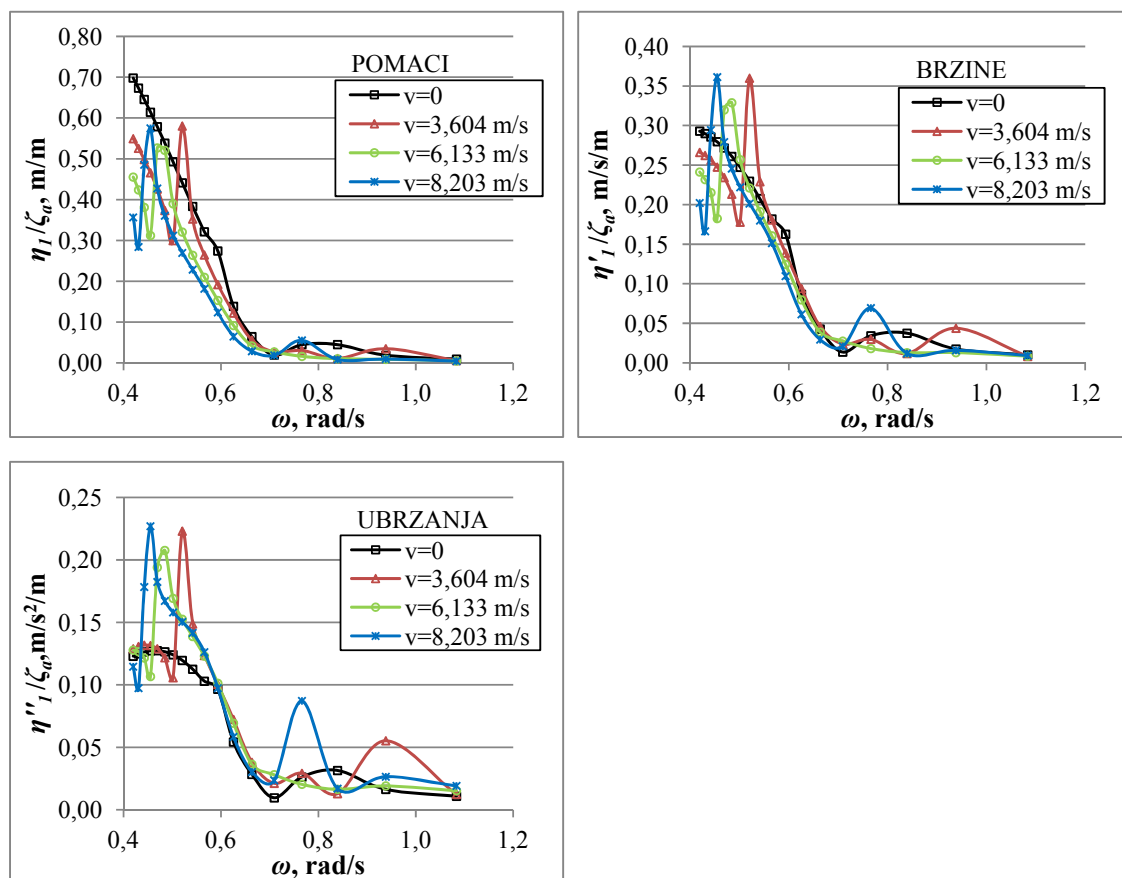
Slika 24. Prijenosne funkcije pomaka, brzine i ubrzanja za posrtanje

Amplitude posrtanja broda se smanjuju s porastom frekvencije nailaznih valova i manje su u odnosu na neoštećeni brod manje istisnine. Pri niskim frekvencijama slično kao i kod poniranja broda optimalnije je ploviti manjom brzinom broda kako bi amplitude gibanja bile što manje.

## 5.2. Spregnuta njihanja broda i tekućine unutar tanka

Kako bi se proračunale pomorstvene karakteristike broda koji ima naplavljeni tank te utjecaj gibanja i opterećenja tekućine u tanku na globalna njihanja broda, uz navedene hidrostatske značajke forme prikazane u Tablici 19., uzeta je u obzir i morska voda u tanku. Tank je napunjen do vrha odnosno do gaza broda od 15,5 m. Pomoću programa *HydroSTAR* najprije su izračunata difrakcijska i radijacijska opterećenja te opterećenje uslijed nailaznih valova, a potom je napravljen proračun radijacije unutar tanka. Prilikom rješavanja jednadžbe dinamičke ravnoteže dva proračuna svedena su na isti globalni koordinatni sustav broda kako

bi se odredila njihanja broda i tanka zajedno. Na Slikama 25.-27. prikazane su dobivene prijenosne funkcije oštećenog broda s naplavljenim tankom za zalijetanje, poniranje i posrtanje.

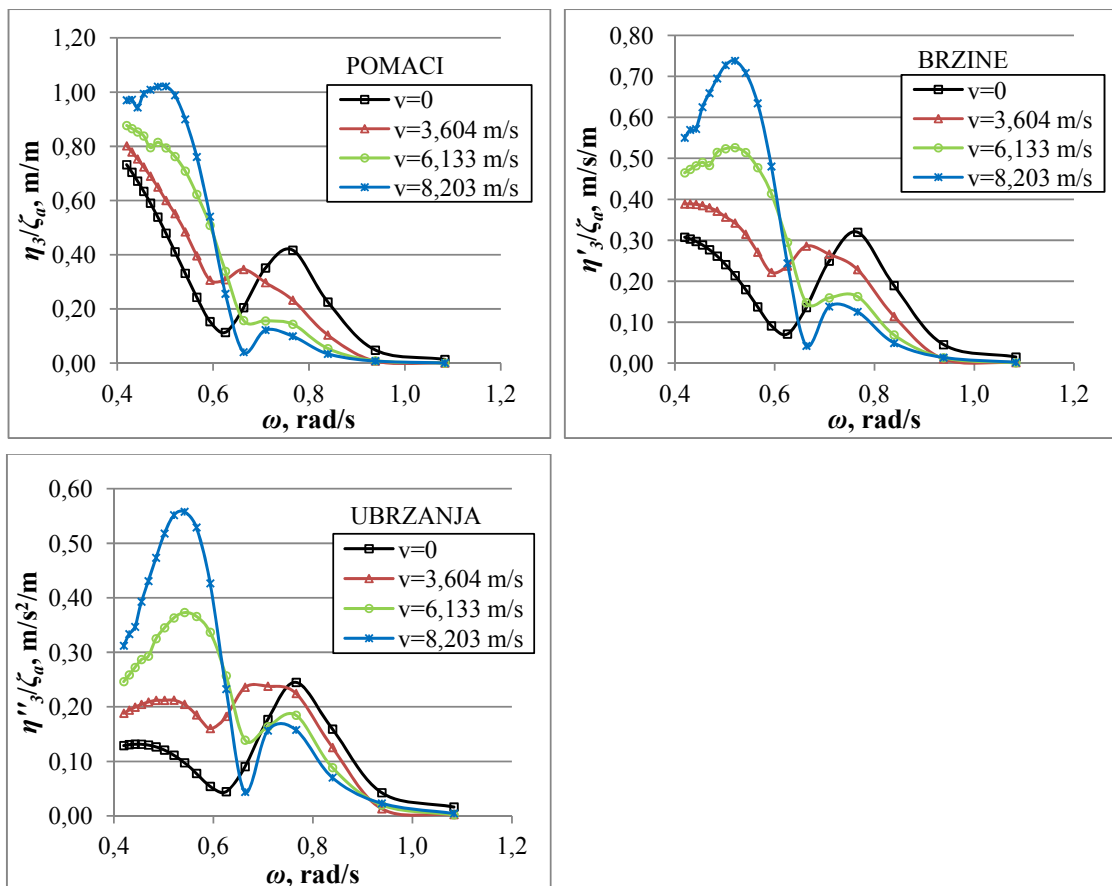


Slika 25. Prijenosne funkcije pomaka, brzine i ubrzanja za zalijetanje

U slučaju zalijetanja broda vidljiv je značajniji utjecaj gibanja tekućine u tanku na njihanja broda pri niskim frekvencijama nailaznih valova za sve brzine napredovanja broda. Ovisno o brzini napredovanja dolazi do lokalnih ekstrema pri nižim frekvencijama odnosno rezonantnim frekvencijama. Kao što je već bilo spomenuto, na vrlo dugačkim valovima optimalnije je ploviti većom brzinom što se tiče zalijetanja.

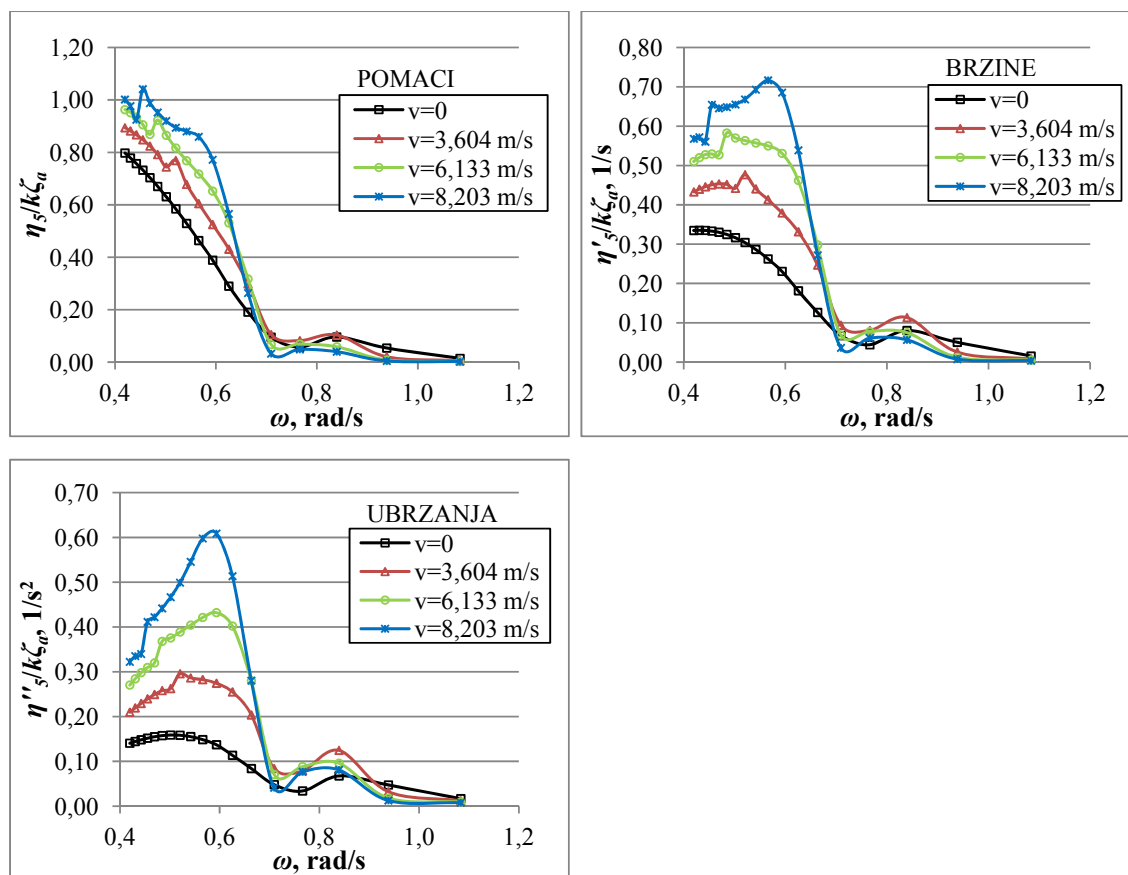
Prijenosne funkcije poniranja na Slici 26. imaju izraženije lokalne ekstreme, no nema značajnijeg utjecaja vode u tanku na amplitudu odziva. Najveće amplitude javljaju se oko područja rezonantnih frekvencija ovisno o brzini napredovanja broda.





Slika 26. Prijenosne funkcije pomaka, brzine i ubrzanja za poniranje

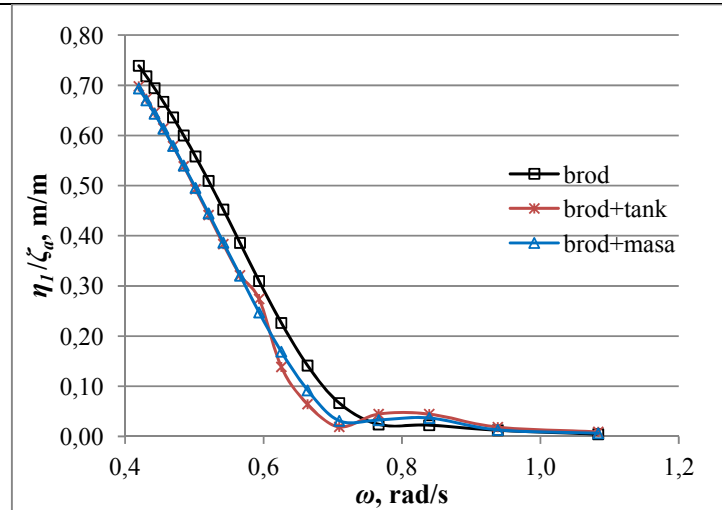
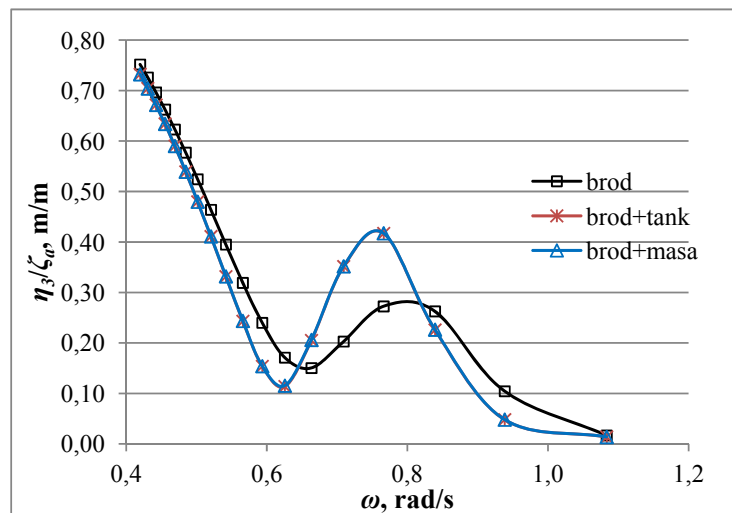
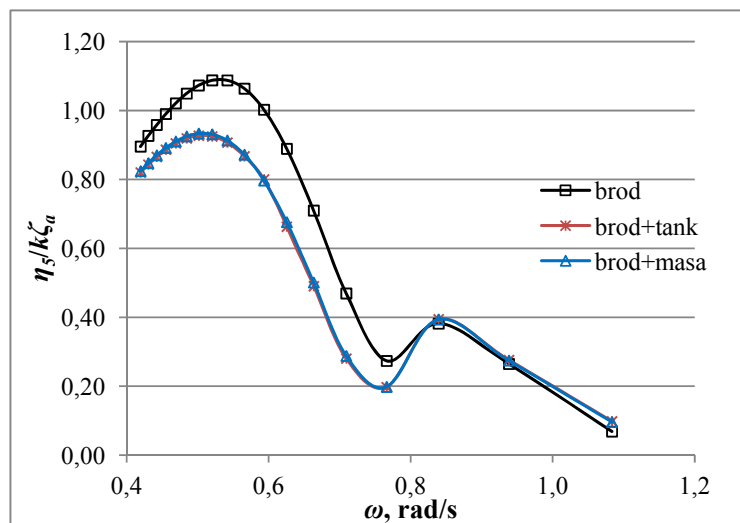
Amplitude posrtanja broda padaju porastom frekvencije nailaznih valova, Slika 27. Pri niskim frekvencijama javljaju se blago rezonantna područja odnosno pri određenim frekvencijama amplitude posrtanja imaju skok no on je gotovo zanemariv.

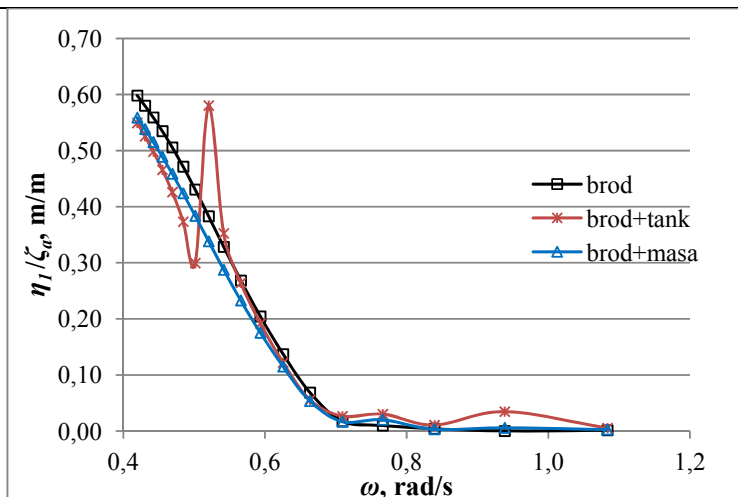
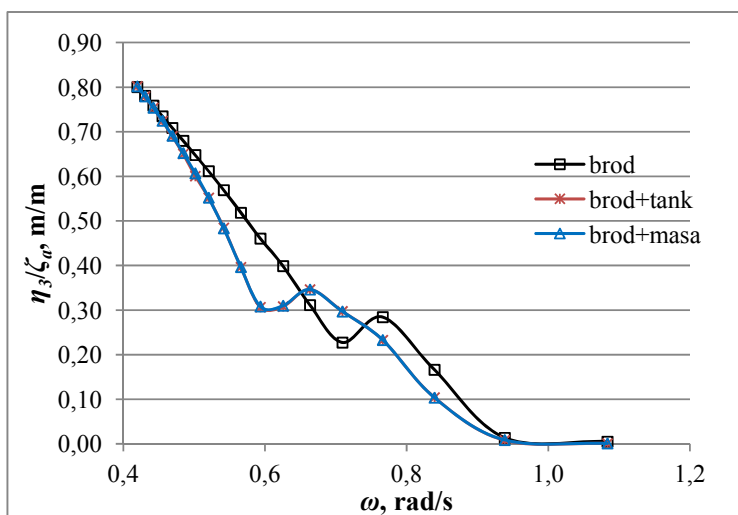
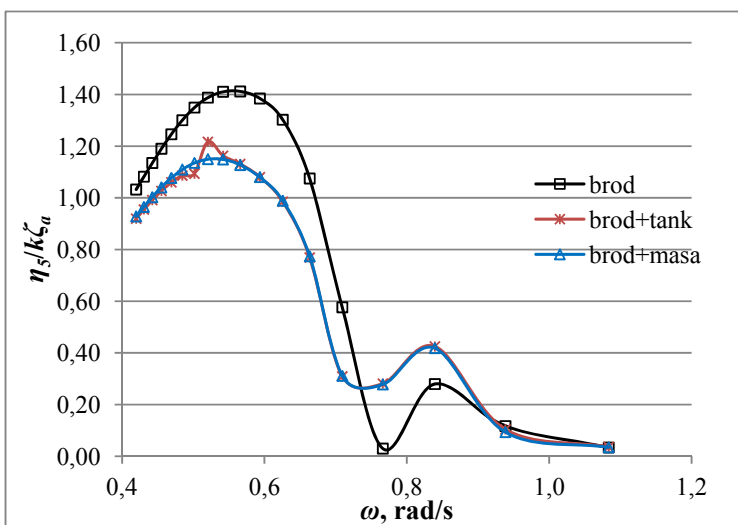


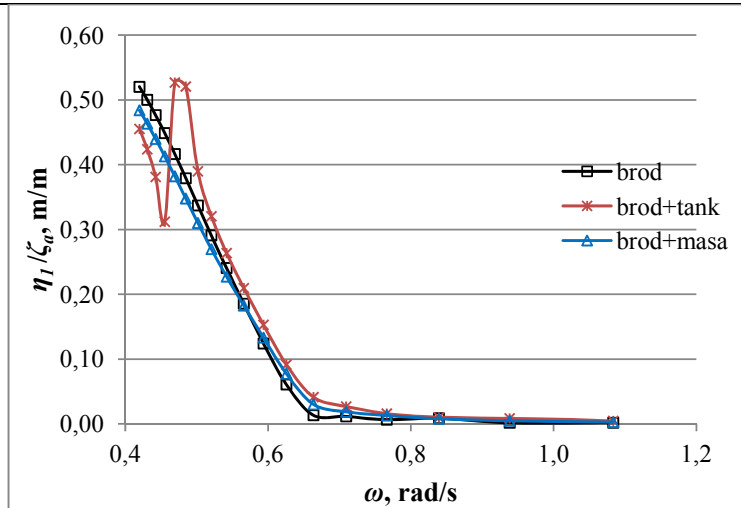
Slika 27. Prijenosne funkcije ubrzanja za posrtanje

### 5.3. Usporedba rezultata

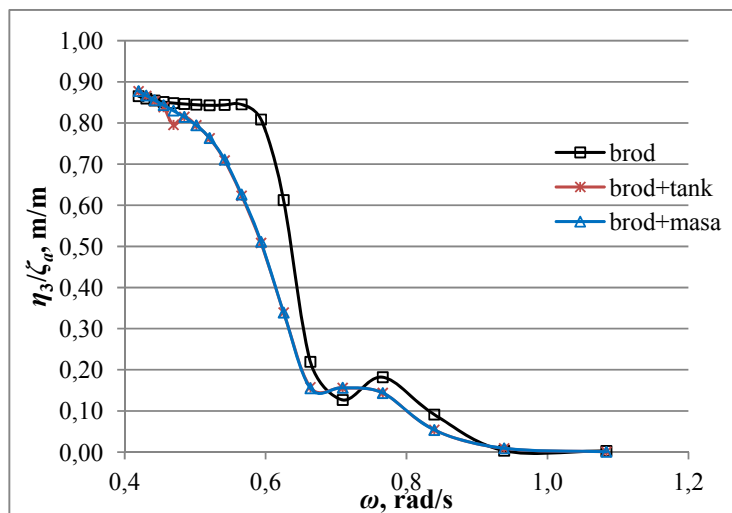
Kako bi se kvalitativno prikazala razlika između pomorstvenih karakteristika oštećenog stanja broda i početnog neoštećenog te razlika između dva načina na koji je tretirana naplavljena tekućina u tanku za sve brzine dana je usporedba prijenosnih funkcija na Slikama 28.-39. Radi preglednosti prikazane su samo usporedbe prijenosnih funkcija pomaka zalijetanja, poniranja i posrtanja.

Slika 28. Usporedba prijenosnih funkcija zalijetanja za brzinu  $v=0$ Slika 29. Usporedba prijenosnih funkcija poniranja za brzinu  $v=0$ Slika 30. Usporedba prijenosnih funkcija posrtanja za brzinu  $v=0$

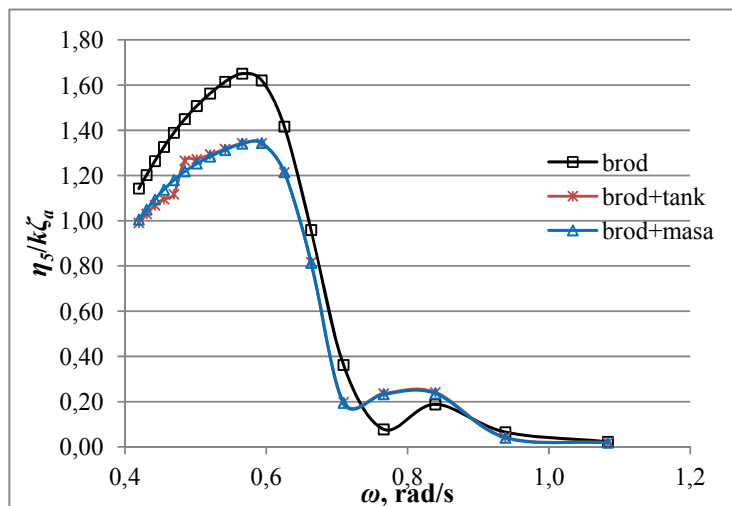
Slika 31. Usporedba prijenosnih funkcija zalijetanja za brzinu  $v=3,604$  m/sSlika 32. Usporedba prijenosnih funkcija poniranja za brzinu  $v=3,604$  m/sSlika 33. Usporedba prijenosnih funkcija posrtanja za brzinu  $v=3,604$  m/s



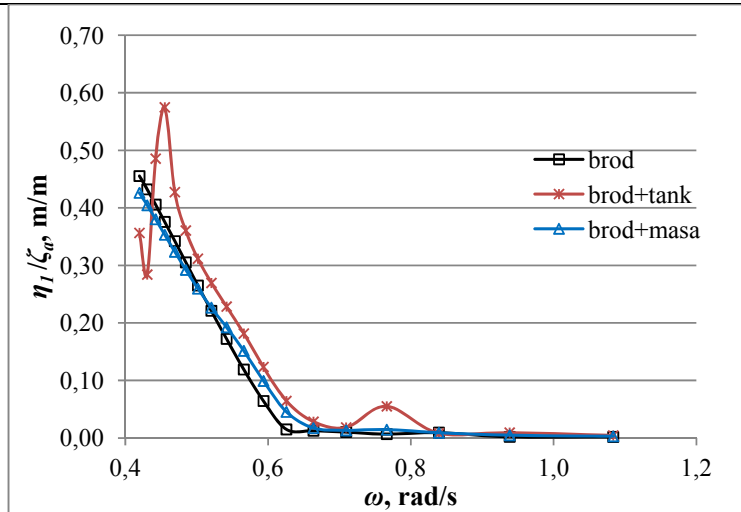
Slika 34. Usporedba prijenosnih funkcija zalijetanja za brzinu  $v=6,133$  m/s



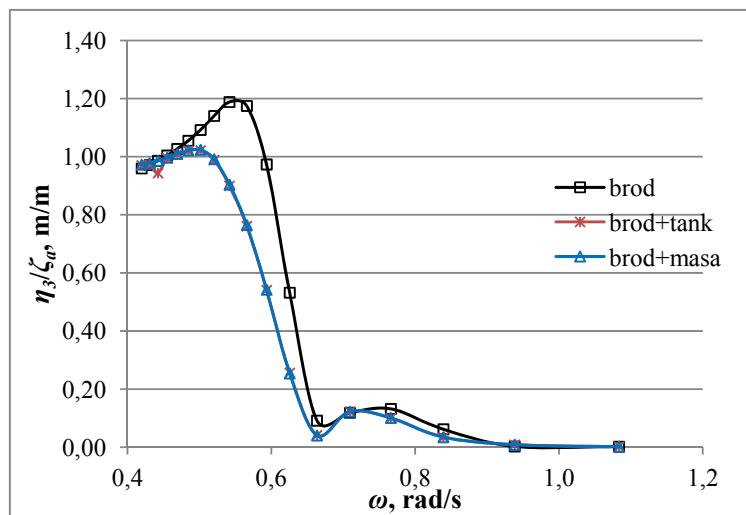
Slika 35. Usporedba prijenosnih funkcija poniranja za brzinu  $v=6,133$  m/s



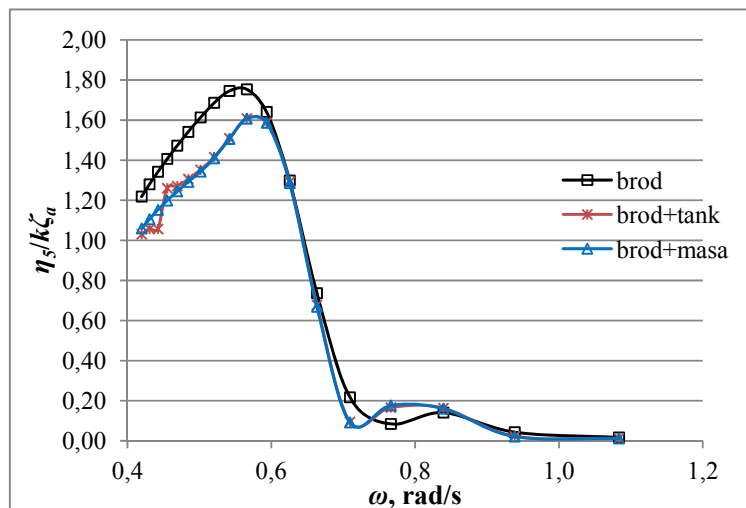
Slika 36. Usporedba prijenosnih funkcija posrtanja za brzinu  $v=6,133$  m/s



Slika 37. Usporedba prijenosnih funkcija zalijetanja za brzinu  $v=8,203$  m/s



Slika 38. Usporedba prijenosnih funkcija poniranja za brzinu  $v=8,203$  m/s



Slika 39. Usporedba prijenosnih funkcija posrtanja za brzinu  $v=8,203$  m/s

## 6. SPEKTAR ODZIVA BRODA ZA DEFINIRANA STANJA MORA

### 6.1. Uvod

Morski valovi slučajan su proces ovisan o vremenu. Bilježe se valografima kroz određeni period kako bi se prikupile informacije o rasponu valnih visina i perioda tipičnih valova koji se javljaju na nekom području. Slučajan valni proces mora u kraćem vremenskom periodu zadovoljavati uvjete homogenosti i stacionarnosti odnosno funkcija gustoće vjerojatnosti nije ovisna o mjestu i vremenu mjerenja te ergodičnosti (mogućnost da se analizom pojedinačnog vremenskog zapisa predstavi čitav valni proces) kako bi ga bilo moguće opisati matematičkim statističkim veličinama.

Odziv broda na nepravilnim valovima određuje se kroz najčešće definirani spektar gustoće energije valnih amplituda. Spektar valova općenito prikazuje relativnu važnost i pojavnost komponenti pravilnih valova koji po principu superpozicije stvaraju nepravilan val. Obzirom da je profil morskih valova nepravilan, valni spektar omogućuje približan matematički opis. Nepravilnost vala čini prelamanje valova iz više smjerova, valovi nastali uslijed refleksije od obale te valovi mrtvog mora nastali na nekom drugom mjestu. Poznavanje funkcije gustoće spektra valova osnova je za projektiranje opterećenja brodskih i pomorskih konstrukcija. Spektar energije valova  $S_{\zeta}(\omega)$  odnosno energija valne amplitude na određenoj frekvenciji vala ovisi o kvadratu amplitude vala i definiran je na sljedeći način:

$$S_{\zeta}(\omega)d\omega = \frac{1}{2}\zeta_a^2(\omega) \quad (65)$$

Moguće ga je odrediti na osnovi mjerenja, no često se koristi jedan od idealiziranih teorijskih spektara valova. Standardni spektri valova opisani su malim brojem parametara ili karakterističnih veličina slučajnog stanja mora. Karakteristične veličine spektra valova su nulti valni period te značajna valna visina (srednja vrijednost trećine najviših valnih visina). Primjenu superpozicije odziva na pravilnim valovima te prijenosnih funkcija u proračunima odziva broda na nekom stanju mora omogućuje linearna hidrodinamička analiza. Svaka pravilna komponenta nepravilnog vala ima svoju frekvenciju, amplitudu te fazni kut.

Razlikuju se susretni spektar energije valova te spektar energije valova. Susretni spektar obuhvaća frekvencije kojima je brod izložen dok spektar energije valova obuhvaća raspon frekvencija valova [3]. Površine ispod krivulja jednog i drugog spektra moraju biti jednake obzirom da se količina energije valova ne mijenja.

Spektar odziva broda moguće je relativno jednostavno odrediti ukoliko je poznat valni spektar te prijenosne funkcije broda. Naime spektar odziva broda određuje se množenjem kvadrata svake pojedine prijenosne funkcije s definiranim spektrom valova:

$$S_{R_\zeta}(\omega) = \left| \frac{R_a}{\zeta_a}(\omega) \right|^2 \cdot S_\zeta(\omega) \quad (66)$$

Kako bi se procijenio odziv broda na nepravilnim valovima potrebno je proračunati odziv broda na pravilnim valovima u određenom frekvencijskom rasponu. Svaka komponenta pravilnog vala prenosi se u komponentu odziva množenjem s odgovarajućom amplitudom odziva odnosno prijenosne funkcije. Često se u praksi odziv broda na nepravilnim valovima proračunava samo za određena njihanja broda koja se smatraju najvažnijima ili najučestalijima prilikom plovidbe broda [12].

Obzirom da je valni spektar jednak susretnom spektru samo u slučaju mirovanja broda (bez brzine napredovanja) te nailaznih valova u pramac (90°) spektar odziva kontejnerskog broda S-175 u ovom radu temelji se na susretnom spektru energije valova osim u slučaju mirovanja broda.

Susretni spektar valova definira se kao:

$$S_\zeta(\omega_e) d\omega_e = \frac{1}{2} \zeta_a^2(\omega_e) \quad (67)$$

## 6.2. Tabainov spektar valova

U proračunu je korišten Tabainov spektar valova za Jadransko more kako bi se procijenila sigurnost teglja broda na stanjima mora karakterističnima za Jadran. Vjetrom generirani valovi i njihova povezanost s jačinom vjetra na Jadranu bilježeni su tijekom desetak godina, a izmjereni podaci rezultirali su definiranjem projektnog spektra valova.

Prema podacima u literaturi [3] maksimalne značajne valne visine za Jadran iznose od 6,1 m do 9,1 m uz valne duljine do 80 m te nulte periode u iznosu od 10,5 s.

Tabainov spektar valova definiran je kao:

$$S_\zeta(\omega) = 0,862 \frac{0,0135 g^2}{\omega^5} e^{\left[ \frac{5,186}{\omega^4 H_{1/3}^2} \right]} 1,63^p \quad (68)$$

gdje je:



$$p = e^{-\left[\frac{(\omega - \omega_m)^2}{2\sigma^2\omega_m^2}\right]} \quad (69)$$

$$\omega_m = 0,32 + \frac{1,8}{H_{1/3} + 0,60} \quad (70)$$

$$\sigma = \begin{cases} 0,08 & \text{za } \omega \leq \omega_m \\ 0,1 & \text{za } \omega > \omega_m \end{cases} \quad (71)$$

Tabainov spektrar zapravo je modifikacija JONSWAP (*Joint North Sea Wave Project*) spektra uz drugačije parametre i faktor oblika. Prema teorijskim predviđanjima najvjerojatnija maksimalna značajna valna visina za povratni period od 20 godina iznosi 7,20 m te 8,57 m za povratni period od 100 godina [15]. Proračun je proveden za dvije navedene značajne valne visine.

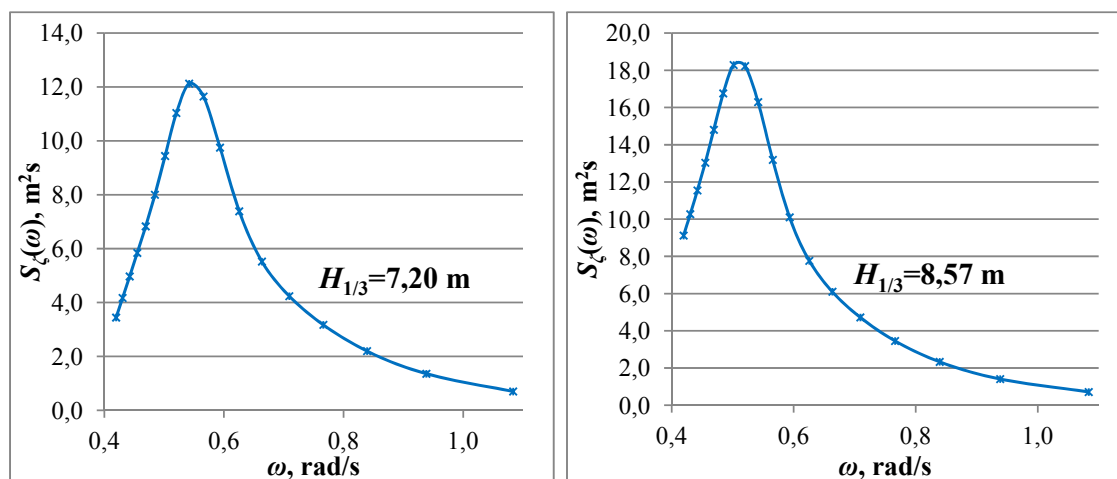
U Tablicama 20. i 21. prikazane su karakteristike odnosno parametri Tabainovog valnog spektra za dvije značajne valne visine. Također su prikazane i funkcije gustoće vjerojatnosti spektra za te dvije valne visine, Slika 40.

**Tablica 20. Tabainov valni spektrar za  $H_{1/3}=7,20$  m**

| $\omega$ , rad/s | $\omega_m$ | $\sigma$ | $p$    | $S_{\zeta}(\omega)$ , m <sup>2</sup> /s |
|------------------|------------|----------|--------|---|
| 0,4197           | 0,550769   | 0,08     | 0,0120 | 3,4420                                  |
| 0,4306           | 0,550769   | 0,08     | 0,0243 | 4,1708                                  |
| 0,4424           | 0,550769   | 0,08     | 0,0486 | 4,9683                                  |
| 0,4552           | 0,550769   | 0,08     | 0,0952 | 5,8404                                  |
| 0,4692           | 0,550769   | 0,08     | 0,1802 | 6,8264                                  |
| 0,4846           | 0,550769   | 0,08     | 0,3238 | 8,0014                                  |
| 0,5016           | 0,550769   | 0,08     | 0,5365 | 9,4389                                  |
| 0,5205           | 0,550769   | 0,08     | 0,7898 | 11,0340                                 |
| 0,5418           | 0,550769   | 0,08     | 0,9795 | 12,1235                                 |
| 0,5659           | 0,550769   | 0,1      | 0,9630 | 11,6459                                 |
| 0,5935           | 0,550769   | 0,1      | 0,7401 | 9,7489                                  |
| 0,6256           | 0,550769   | 0,1      | 0,3973 | 7,3853                                  |
| 0,6635           | 0,550769   | 0,1      | 0,1231 | 5,5198                                  |
| 0,7093           | 0,550769   | 0,1      | 0,0159 | 4,2340                                  |
| 0,7662           | 0,550769   | 0,1      | 0,0005 | 3,1733                                  |
| 0,8393           | 0,550769   | 0,1      | 0,0000 | 2,1981                                  |
| 0,9384           | 0,550769   | 0,1      | 0,0000 | 1,3527                                  |
| 1,0835           | 0,550769   | 0,1      | 0,0000 | 0,6974                                  |

Tablica 21. Tabainov valni spektar za  $H_{1/3}=8,57$  m

| $\omega$ , rad/s | $\omega_m$ | $\sigma$ | $p$    | $S_{\zeta}(\omega)$ , m <sup>2</sup> /s |
|------------------|------------|----------|--------|---|
| 0,4197           | 0,516292   | 0,08     | 0,0649 | 9,1188                                  |
| 0,4306           | 0,516292   | 0,08     | 0,1162 | 10,2679                                 |
| 0,4424           | 0,516292   | 0,08     | 0,2018 | 11,5444                                 |
| 0,4552           | 0,516292   | 0,08     | 0,3349 | 13,0313                                 |
| 0,4692           | 0,516292   | 0,08     | 0,5221 | 14,8056                                 |
| 0,4846           | 0,516292   | 0,08     | 0,7450 | 16,7603                                 |
| 0,5016           | 0,516292   | 0,08     | 0,9387 | 18,2872                                 |
| 0,5205           | 0,516292   | 0,1      | 0,9967 | 18,2287                                 |
| 0,5418           | 0,516292   | 0,1      | 0,8851 | 16,2898                                 |
| 0,5659           | 0,516292   | 0,1      | 0,6303 | 13,1886                                 |
| 0,5935           | 0,516292   | 0,1      | 0,3269 | 10,0990                                 |
| 0,6256           | 0,516292   | 0,1      | 0,1063 | 7,7635                                  |
| 0,6635           | 0,516292   | 0,1      | 0,0172 | 6,1008                                  |
| 0,7093           | 0,516292   | 0,1      | 0,0009 | 4,7214                                  |
| 0,7662           | 0,516292   | 0,1      | 0,0000 | 3,4553                                  |
| 0,8393           | 0,516292   | 0,1      | 0,0000 | 2,3323                                  |
| 0,9384           | 0,516292   | 0,1      | 0,0000 | 1,4051                                  |
| 1,0835           | 0,516292   | 0,1      | 0,0000 | 0,7125                                  |



Slika 40. Tabainov valni spektar za dvije značajne valne visine

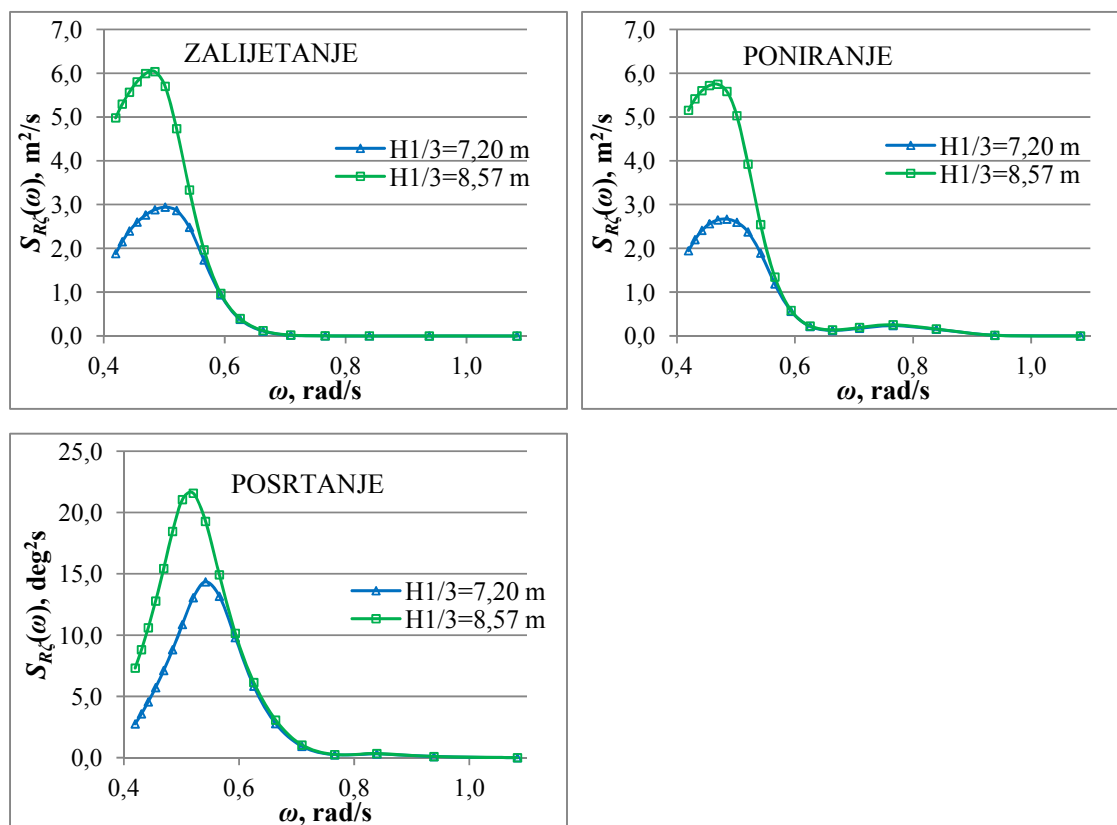
### 6.3. Odziv broda na morskim valovima

Za dobivene amplitude odziva na temelju prijenosnih funkcija napravljen je proračun odziva broda na morskim valovima na definiranim stanjima mora. Za svaku pojedinu frekvenciju bezdimenzionalna amplituda odziva kvadrirana je kako bi se dobio RAO i na temelju

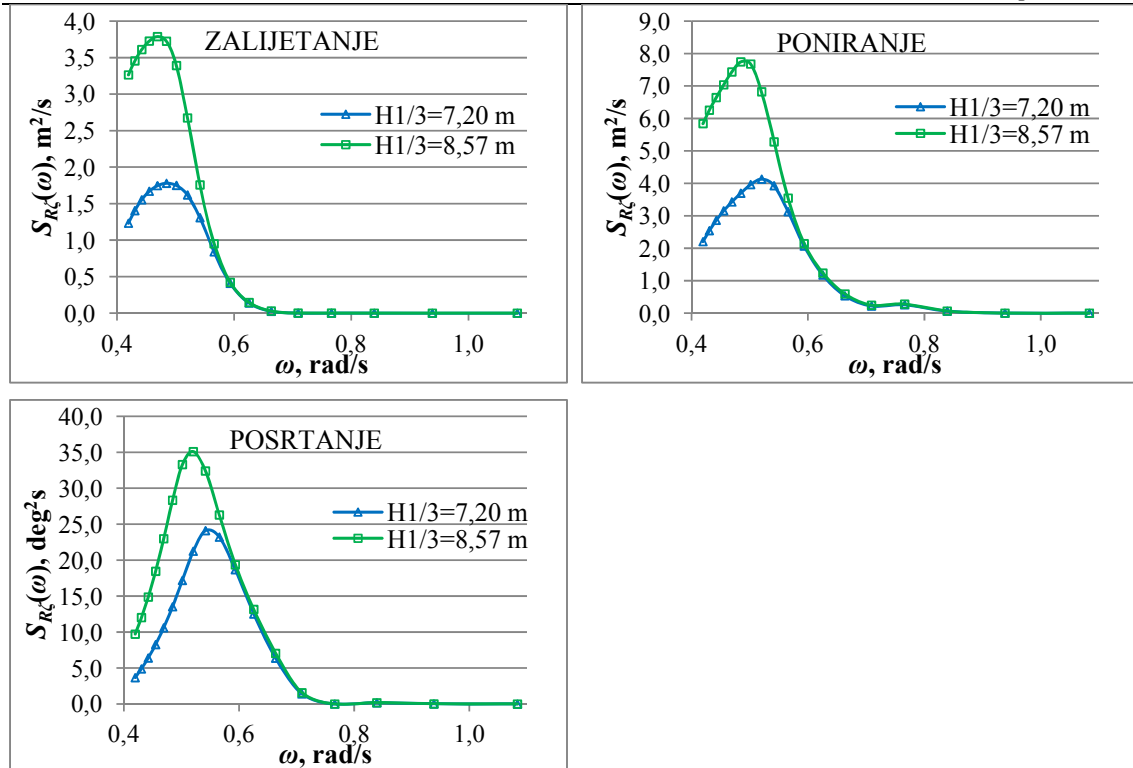
jednadžbe (66) pomnožena je sa spektrom odnosno valnom energijom sadržanom u komponenti nepravilnog vala koja odgovara istoj frekvenciji.

### 6.3.1. Spektar odziva neoštećenog broda

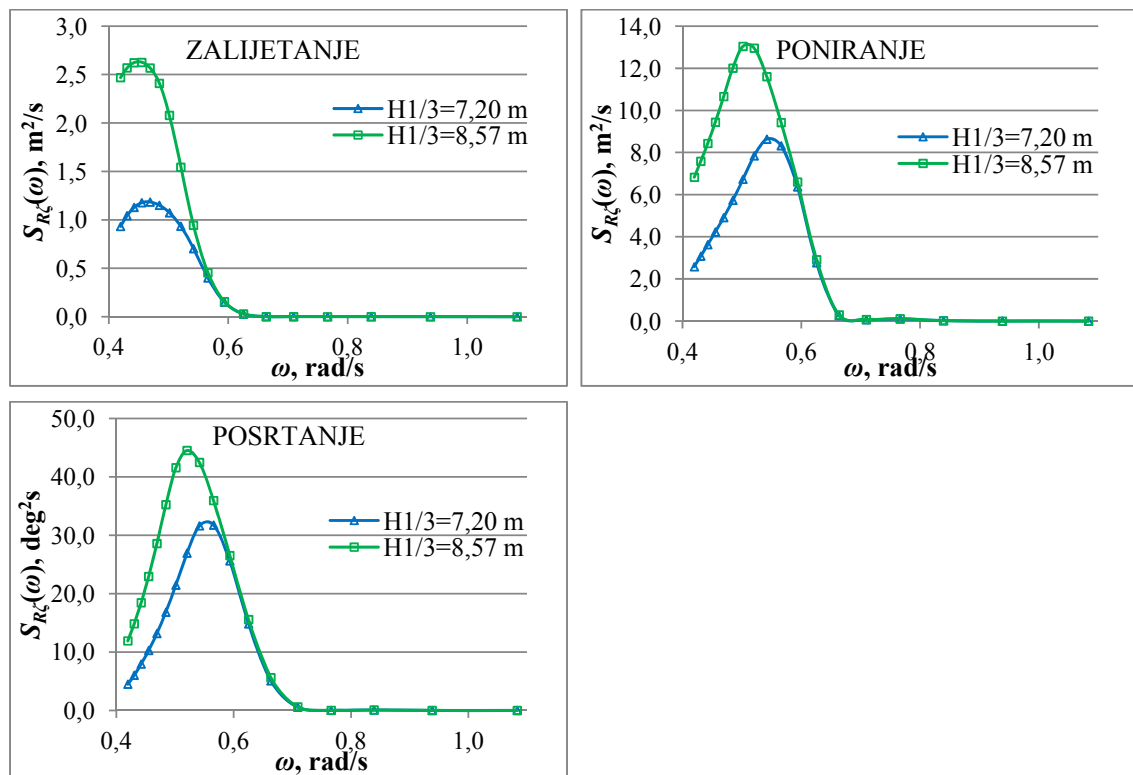
Na Slikama 41.-44. prikazani su spektri odziva zalijetanja, poniranja i posrtanja neoštećenog broda za dva stanja mora pri različitim brzinama napredovanja broda.



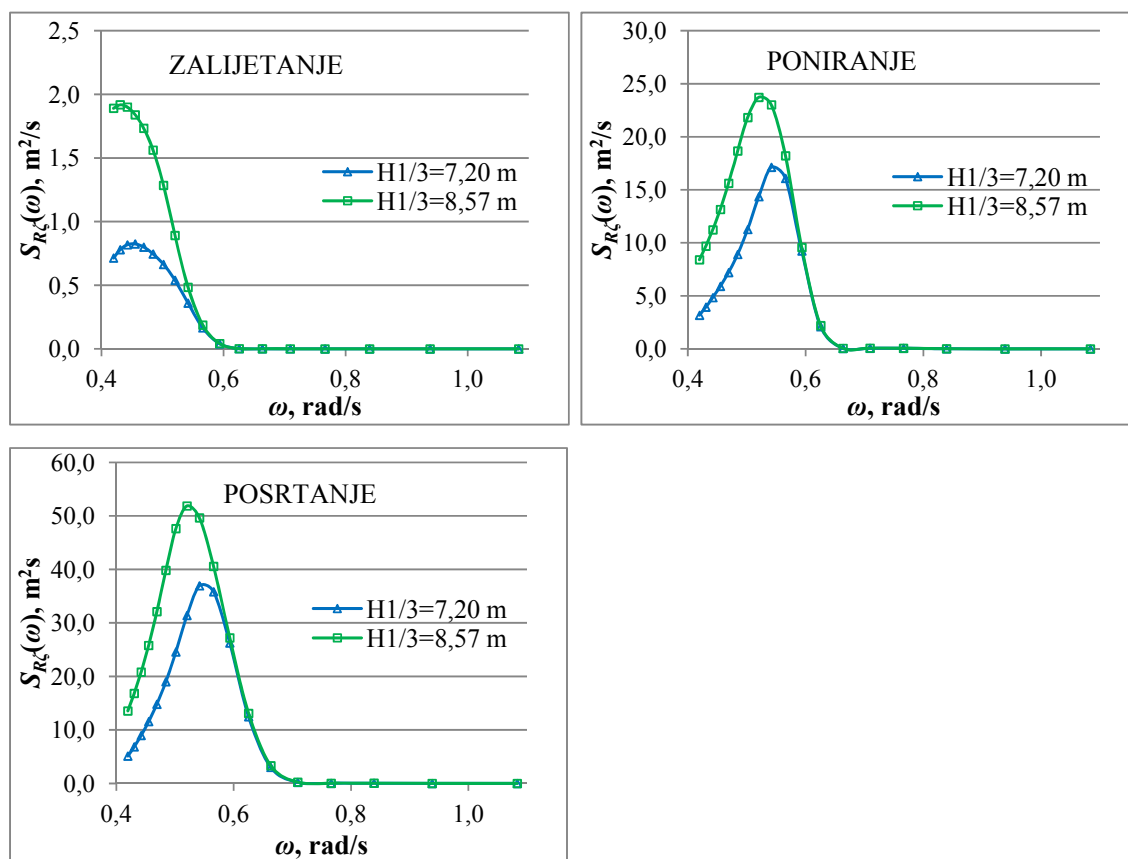
Slika 41. Spektar odziva zalijetanja, poniranja i posrtanja neoštećenog broda za brzinu  $v=0$



Slika 42. Spektr odziva zalijetanja, poniranja i posrtanja neoštećenog broda  
za brzinu  $v=3,604$  m/s



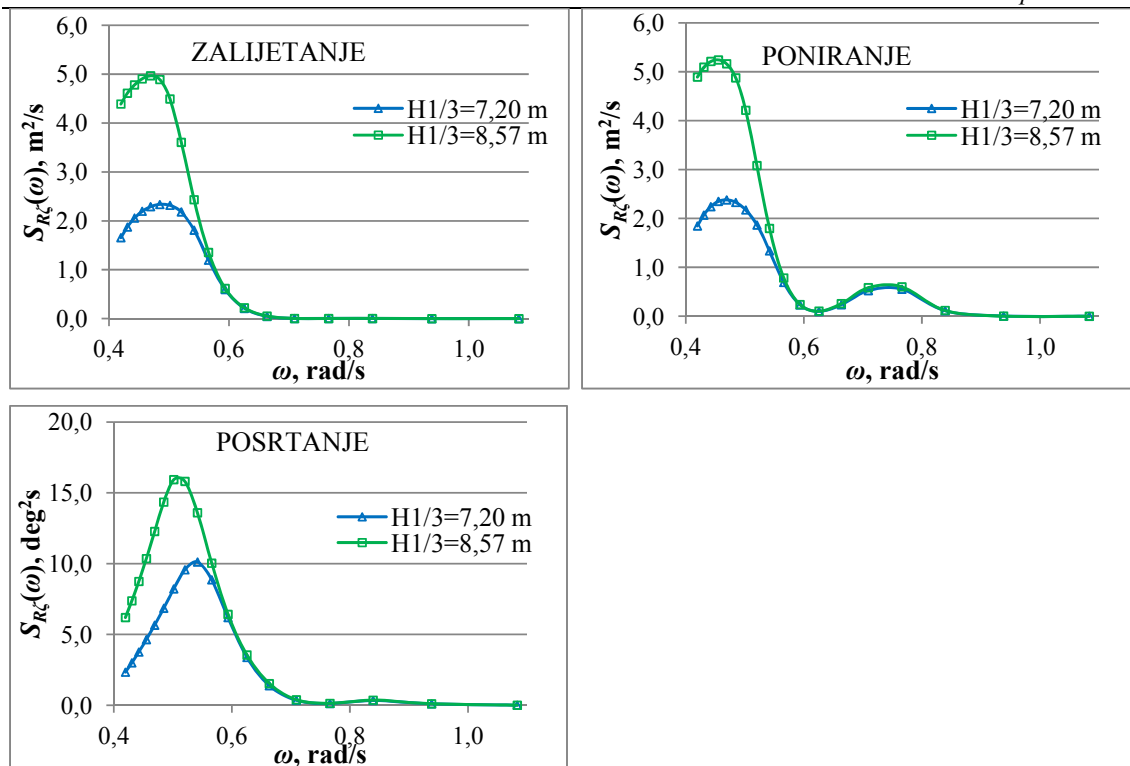
Slika 43. Spektr odziva zalijetanja, poniranja i posrtanja neoštećenog broda  
za brzinu  $v=6,133$  m/s



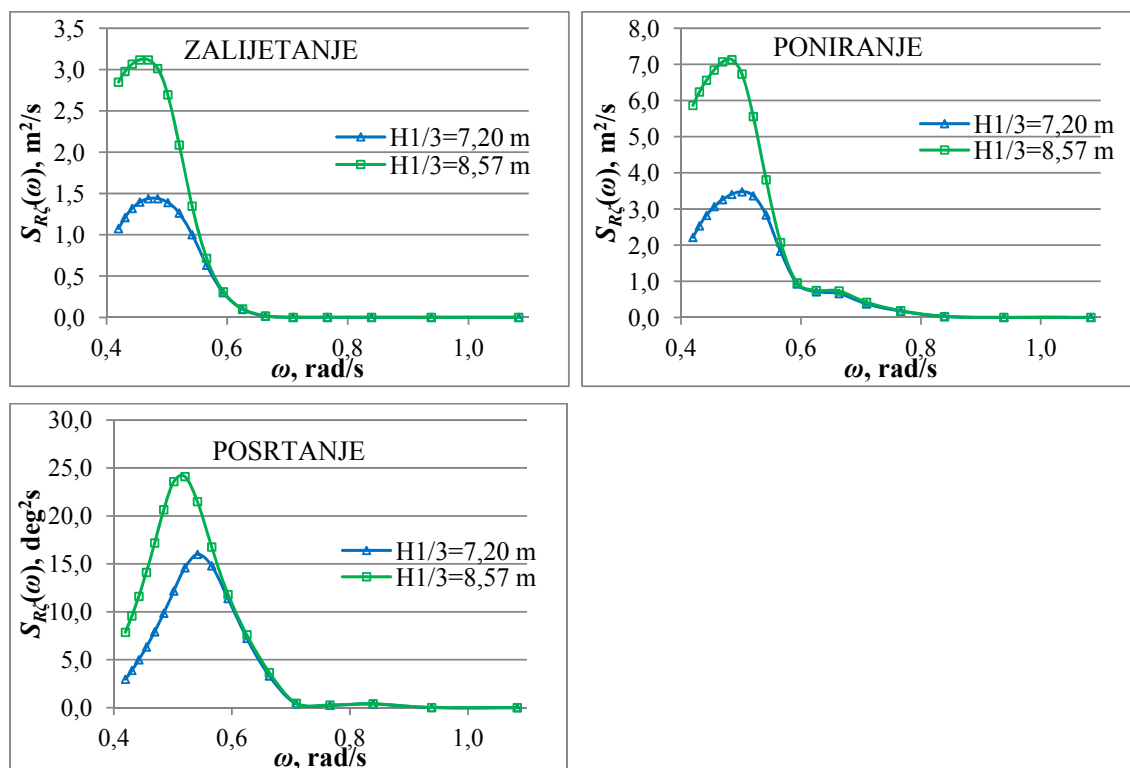
Slika 44. Spektar odziva zalijetanja, poniranja i posrtanja neoštećenog broda za brzinu  $v=8,203$  m/s

### 6.3.2. Spektar odziva oštećenog broda povećane mase istisnine

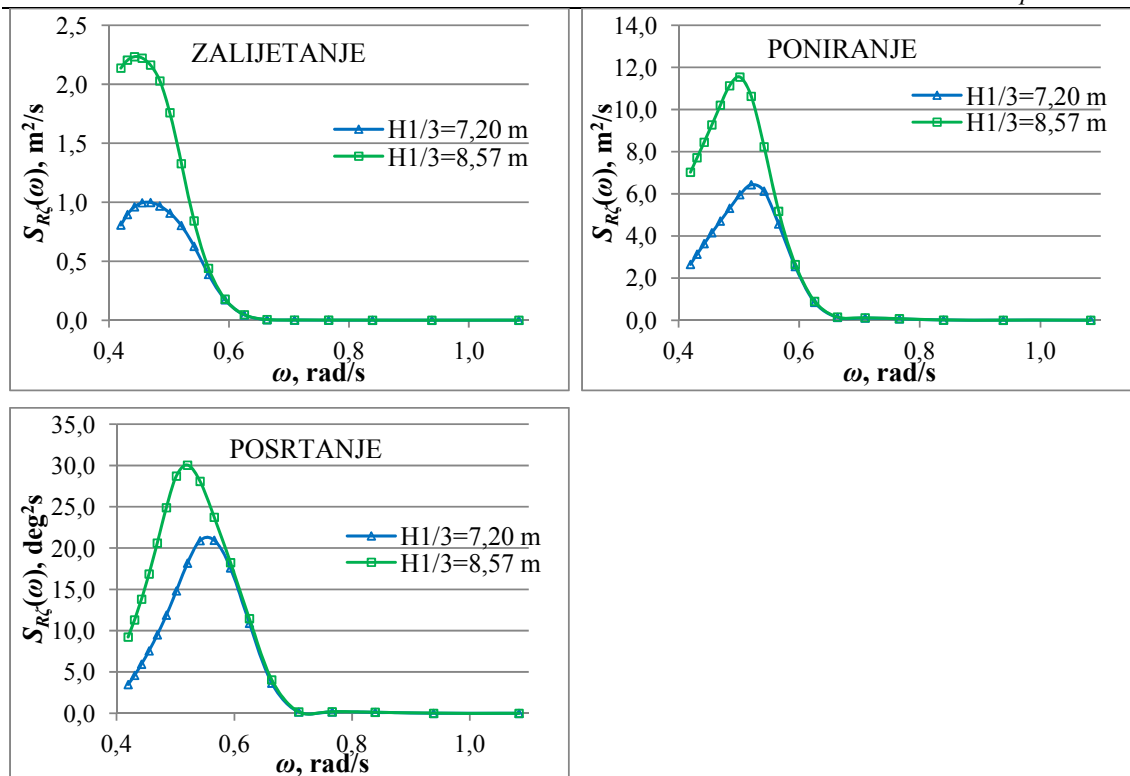
Na Slikama 45.-48. prikazani su spektri odziva zalijetanja, poniranja i posrtanja oštećenog broda povećane mase istisnine za dva stanja mora pri različitim brzinama napredovanja broda.



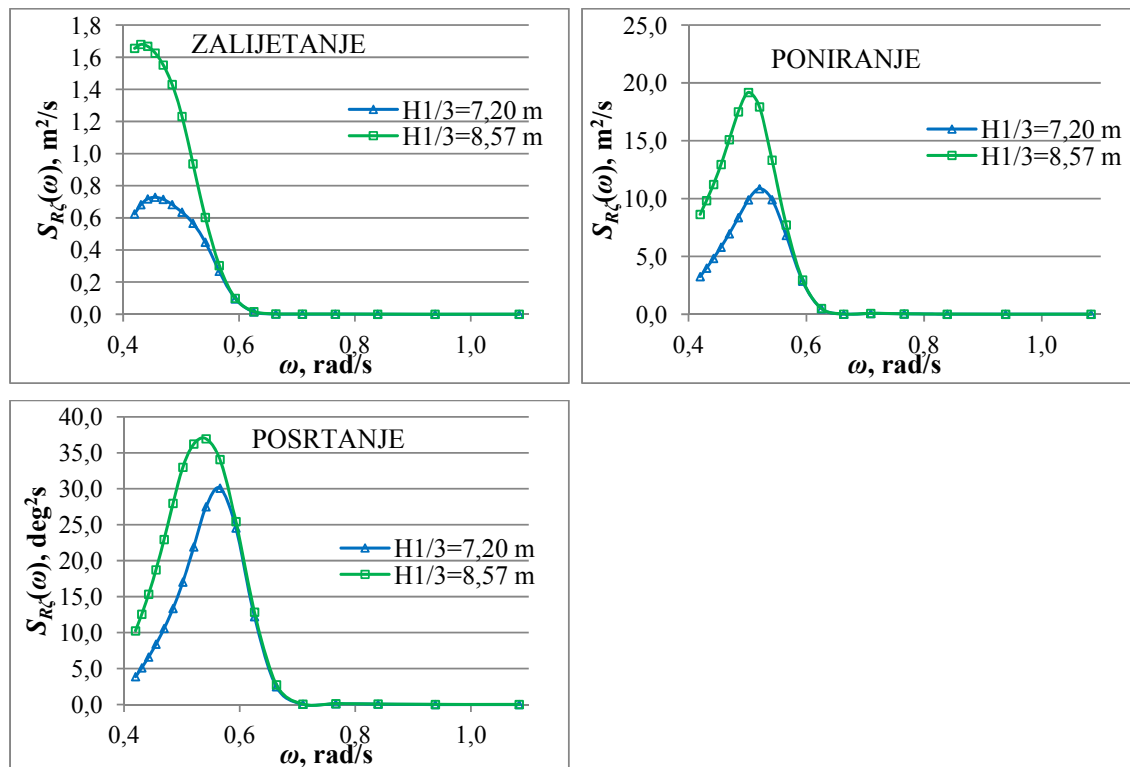
Slika 45. Spektar odziva zalijetanja, poniranja i posrtanja oštećenog broda povećane mase za brzinu  $v=0$



Slika 46. Spektar odziva zalijetanja, poniranja i posrtanja oštećenog broda povećane mase za brzinu  $v=3,604$  m/s



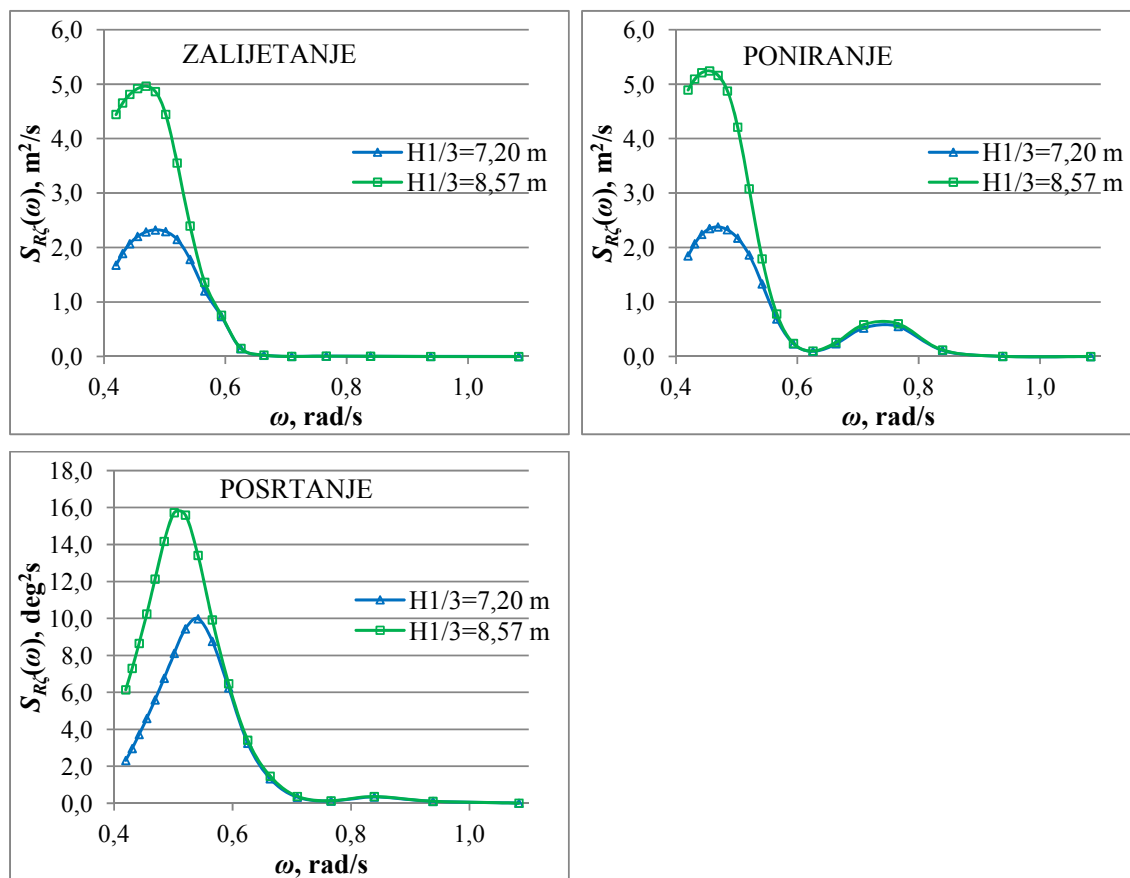
Slika 47. Spektar odziva zalijetanja, poniranja i posrtanja oštećenog broda povećane mase za brzinu  $v=6,133$  m/s



Slika 48. Spektar odziva zalijetanja, poniranja i posrtanja oštećenog broda povećane mase za brzinu  $v=8,203$  m/s

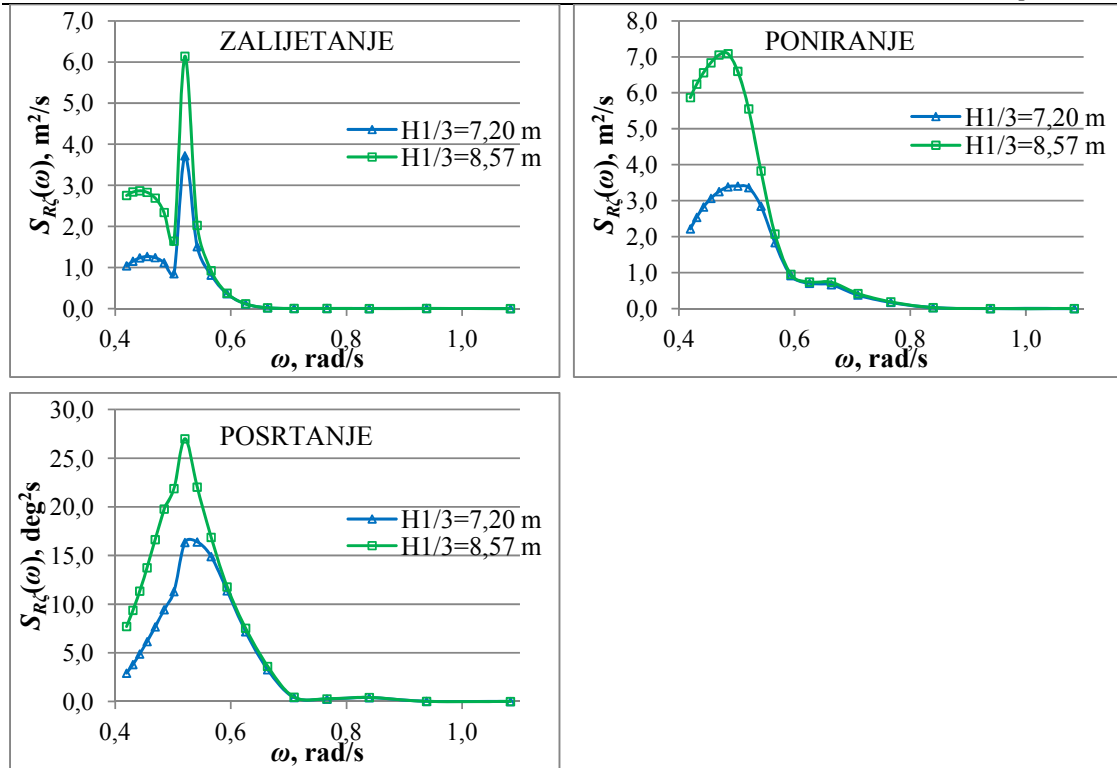
### 6.3.3. Spektar odziva oštećenog broda s naplavljenim tankom

Na Slikama 49.-52. prikazani su spektri odziva zalijetanja, poniranja i posrtanja oštećenog broda s naplavljenim tankom za dva stanja mora pri različitim brzinama napredovanja broda.

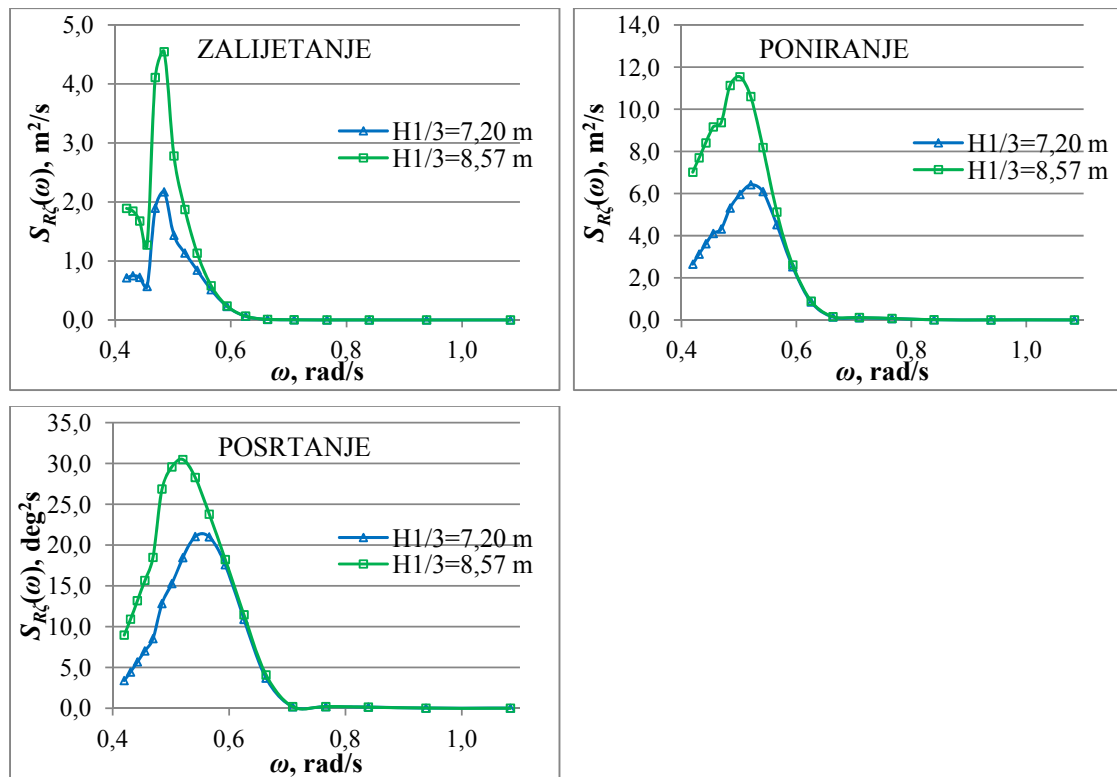


Slika 49. Spektar odziva zalijetanja, poniranja i posrtanja oštećenog broda s naplavljenim tankom za brzinu  $v=0$

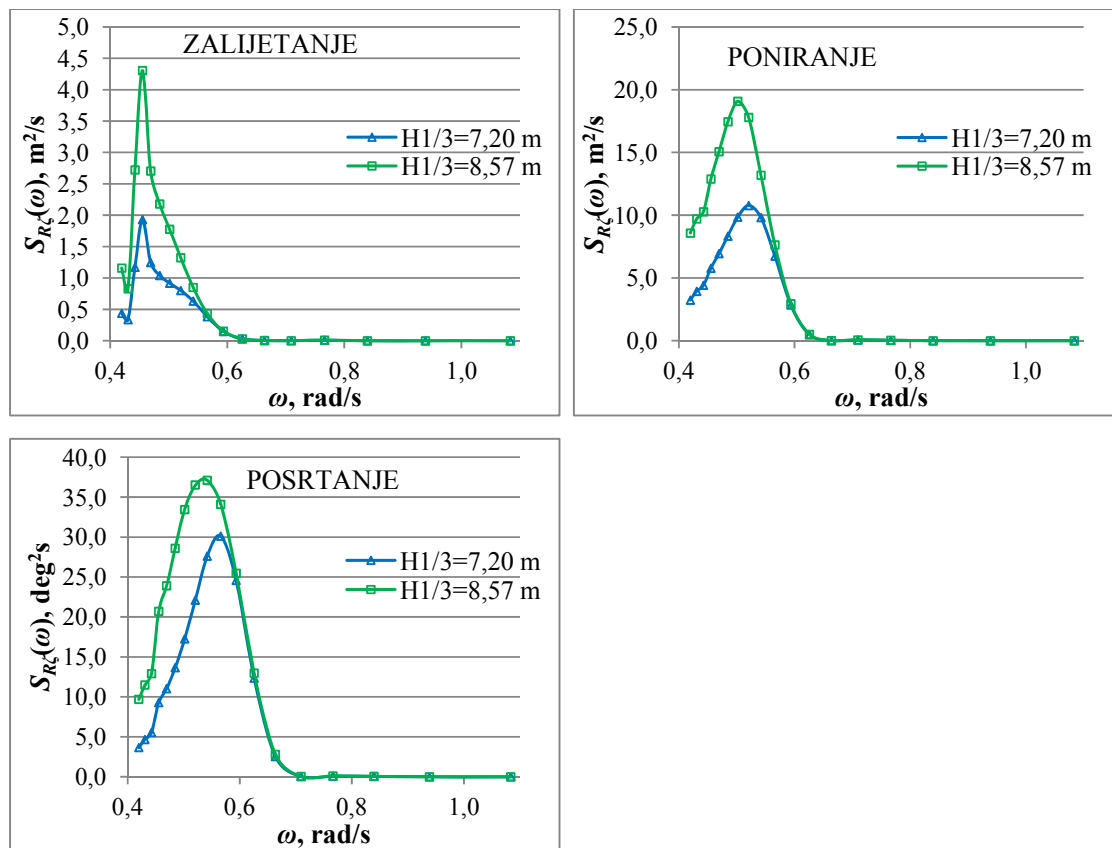




Slika 50. Spektar odziva zalijetanja, poniranja i posrtanja oštećenog broda s naplavljenim tankom za brzinu  $v=3,604$  m/s



Slika 51. Spektar odziva zalijetanja, poniranja i posrtanja oštećenog broda s naplavljenim tankom za brzinu  $v=6,133$  m/s



Slika 52. Spektar odziva zalijetanja, poniranja i posrtanja oštećenog broda s naplavljenim tankom za brzinu  $v=8,203$  m/s

Pomoću spektra energije odziva moguće je odrediti značajne i srednje amplitude odziva za navedena stanja mora. Srednja vrijednost trećine najviših amplituda odziva te srednja vrijednost svih amplituda odziva za neko stanje mora određuju se na temelju nultog spektralnog momenta odnosno površine ispod spektra na sljedeći način:

$$R_{a1/3} = 2\sqrt{m_{0R}} \quad (72)$$

$$\bar{R}_a = 1,25\sqrt{m_{0R}} \quad (73)$$

gdje je  $m_{0R}$  nulti spektralni moment odziva.

Kako bi se mogla odrediti površina ispod spektralne funkcije korišteno je trapezno pravilo integriranja uzevši u obzir da su frekvencije nailaznih valova te susretne frekvencije određene na temelju omjera valne duljine i duljine broda te nemaju pravilan korak.

Nulti spektralni moment određen je pomoću trapeznog pravila kako slijedi:

$$m_0 = \frac{r_0 + r_1}{2} \Delta\omega_{0,1} + \frac{r_1 + r_2}{2} \Delta\omega_{1,2} + \dots + \frac{r_{n-1} + r_n}{2} \Delta\omega_{n-1,n} \quad (74)$$

gdje  $r_i$  predstavlja ordinate funkcije spektra odziva na pojedinim frekvencijama, a  $\Delta\omega_{i,j}$  raspon između dvije uzastopne frekvencije.

U Tablicama 22.-24. dan je prikaz dobivenih vrijednosti nultih spektralnih momenata te značajnih i srednjih vrijednosti amplituda odziva.

Tablica 22. Nulti spektralni momenti, značajne i srednje amplitude odziva zalijetanja

| ZALIJETANJE       |                | $v=0$       |             | $v=3,604$ m/s |             | $v=6,133$ m/s |             | $v=8,203$ m/s |             |
|-------------------|----------------|-------------|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|
| $H_{1/3}$         |                | 7,20 m      | 8,57 m      | 7,20 m        | 8,57 m      | 7,20 m        | 8,57 m      | 7,20 m        | 8,57 m      |
| neoštećen<br>brod | $m_0, m^2$     | 0,44        | 0,79        | 0,25          | 0,47        | 0,15          | 0,29        | 0,09          | 0,19        |
|                   | $R_{a1/3}, m$  | <b>1,33</b> | <b>1,78</b> | <b>1,00</b>   | <b>1,36</b> | <b>0,78</b>   | <b>1,08</b> | <b>0,61</b>   | <b>0,87</b> |
|                   | $\bar{R}_a, m$ | 0,83        | 1,11        | 0,63          | 0,85        | 0,49          | 0,68        | 0,38          | 0,54        |
| brod+<br>masa     | $m_0, m^2$     | 0,34        | 0,63        | 0,20          | 0,38        | 0,13          | 0,25        | 0,09          | 0,18        |
|                   | $R_{a1/3}, m$  | <b>1,17</b> | <b>1,58</b> | <b>0,90</b>   | <b>1,23</b> | <b>0,73</b>   | <b>1,01</b> | <b>0,62</b>   | <b>0,85</b> |
|                   | $\bar{R}_a, m$ | 0,73        | 0,99        | 0,56          | 0,77        | 0,46          | 0,63        | 0,38          | 0,53        |
| brod+<br>tank     | $m_0, m^2$     | 0,34        | 0,62        | 0,25          | 0,44        | 0,18          | 0,34        | 0,14          | 0,28        |
|                   | $R_{a1/3}, m$  | <b>1,17</b> | <b>1,58</b> | <b>1,00</b>   | <b>1,32</b> | <b>0,85</b>   | <b>1,17</b> | <b>0,76</b>   | <b>1,05</b> |
|                   | $\bar{R}_a, m$ | 0,73        | 0,99        | 0,62          | 0,83        | 0,53          | 0,73        | 0,48          | 0,66        |

Tablica 23. Nulti spektralni momenti, značajne i srednje amplitude odziva poniranja

| PONIRANJE         |                | $v=0$       |             | $v=3,604$ m/s |             | $v=6,133$ m/s |             | $v=8,203$ m/s |             |
|-------------------|----------------|-------------|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|
| $H_{1/3}$         |                | 7,20 m      | 8,57 m      | 7,20 m        | 8,57 m      | 7,20 m        | 8,57 m      | 7,20 m        | 8,57 m      |
| neoštećen<br>brod | $m_0, m^2$     | 0,42        | 0,74        | 0,71          | 1,17        | 1,32          | 2,03        | 2,10          | 3,24        |
|                   | $R_{a1/3}, m$  | <b>1,29</b> | <b>1,73</b> | <b>1,69</b>   | <b>2,16</b> | <b>2,29</b>   | <b>2,85</b> | <b>2,90</b>   | <b>3,60</b> |
|                   | $\bar{R}_a, m$ | 0,81        | 1,08        | 1,05          | 1,35        | 1,43          | 1,78        | 1,81          | 2,25        |
| brod+<br>masa     | $m_0, m^2$     | 0,38        | 0,67        | 0,57          | 0,99        | 0,92          | 1,55        | 1,34          | 2,30        |
|                   | $R_{a1/3}, m$  | <b>1,24</b> | <b>1,64</b> | <b>1,52</b>   | <b>1,99</b> | <b>1,92</b>   | <b>2,49</b> | <b>2,32</b>   | <b>3,03</b> |
|                   | $\bar{R}_a, m$ | 0,77        | 1,03        | 0,95          | 1,24        | 1,20          | 1,56        | 1,45          | 1,89        |
| brod+<br>tank     | $m_0, m^2$     | 0,38        | 0,67        | 0,57          | 0,98        | 0,91          | 1,53        | 1,33          | 2,27        |
|                   | $R_{a1/3}, m$  | <b>1,24</b> | <b>1,64</b> | <b>1,51</b>   | <b>1,98</b> | <b>1,91</b>   | <b>2,48</b> | <b>2,31</b>   | <b>3,01</b> |
|                   | $\bar{R}_a, m$ | 0,77        | 1,03        | 0,95          | 1,24        | 1,19          | 1,55        | 1,44          | 1,88        |

Tablica 24. Nulti spektralni momenti, značajne i srednje amplitude odziva posrtanja

| POSRTANJE          |                         | $v=0$       |             | $v=3,604$ m/s |             | $v=6,133$ m/s |             | $v=8,203$ m/s |             |
|--------------------|-------------------------|-------------|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|
| $H_{1/3}$          |                         | 7,20 m      | 8,57 m      | 7,20 m        | 8,57 m      | 7,20 m        | 8,57 m      | 7,20 m        | 8,57 m      |
| neoštećeni<br>brod | $m_0, \text{deg}^2$     | 2,28        | 3,36        | 3,88          | 5,57        | 4,79          | 6,91        | 5,09          | 7,48        |
|                    | $R_{a1/3}, \text{deg}$  | <b>3,02</b> | <b>3,67</b> | <b>3,94</b>   | <b>4,72</b> | <b>4,38</b>   | <b>5,26</b> | <b>4,51</b>   | <b>5,47</b> |
|                    | $\bar{R}_a, \text{deg}$ | 1,89        | 2,29        | 2,46          | 2,95        | 2,74          | 3,28        | 2,82          | 3,42        |
| brod+<br>masa      | $m_0, \text{deg}^2$     | 1,58        | 2,40        | 2,54          | 3,75        | 3,32          | 4,80        | 4,07          | 5,80        |
|                    | $R_{a1/3}, \text{deg}$  | <b>2,51</b> | <b>3,10</b> | <b>3,19</b>   | <b>3,87</b> | <b>3,64</b>   | <b>4,38</b> | <b>4,03</b>   | <b>4,82</b> |
|                    | $\bar{R}_a, \text{deg}$ | 1,57        | 1,94        | 1,99          | 2,42        | 2,28          | 2,74        | 2,52          | 3,01        |
| brod+<br>tank      | $m_0, \text{deg}^2$     | 1,56        | 2,37        | 2,56          | 3,75        | 3,32          | 4,80        | 4,09          | 5,84        |
|                    | $R_{a1/3}, \text{deg}$  | <b>2,50</b> | <b>3,08</b> | <b>3,20</b>   | <b>3,88</b> | <b>3,64</b>   | <b>4,38</b> | <b>4,05</b>   | <b>4,83</b> |
|                    | $\bar{R}_a, \text{deg}$ | 1,56        | 1,92        | 2,00          | 2,42        | 2,28          | 2,74        | 2,53          | 3,02        |

## 7. DODATNI OTPOR ZA DEFINIRANA STANJA MORA

Za već spomenuta stanja mora sa značajnim valnim visinama od 7,20 m i 8,54 m izračunate su srednje vrijednosti dodatnog otpora na valovima neoštećenog i oštećenog broda. Dodatni otpor određen je na temelju sila zanošenja broda na pojedinim frekvencijama. Sila zanošenja najjednostavnija je aproksimacija kvadratne prijenosne funkcije QTF te omogućuje izračun sile dodatnog otpora za određenu frekvenciju ( $\Delta\omega=0$ ).

Srednja vrijednost sile dodatnog otpora određena je pomoću sljedećeg izraza [16]:

$$\overline{R_{AW}} = 2 \int_0^{\infty} \left| \frac{R_{AW}}{\zeta_a^2}(\omega) \right| S_{\zeta}(\omega) d\omega \quad (75)$$

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

Izraz  $\int_0^{\infty} \left| \frac{R_{AW}}{\zeta_a^2}(\omega) \right| S_{\zeta}(\omega) d\omega$  predstavlja površinu ispod spektra odziva sila zanošenja za definirano stanje mora odnosno nulti spektralni moment. Spektralna funkcija dobivena je množenjem sila zanošenja u ovisnosti o frekvenciji te odgovarajuće ordinate Tabainovog spektra. Nulti spektralni moment određen je trapeznim pravilom integracije prema jednadžbi (74).

U Tablicama 25.-27. prikazane su apsolutne vrijednosti sila zanošenja dobivenih pomoću programa *HydroSTAR* za određene frekvencije, a na Slikama 53.-55. prikazane su spektralne funkcije odziva odnosno sile zanošenja na definiranim stanjima mora.

Tablica 25. Sile zanošenja neoštećenog broda

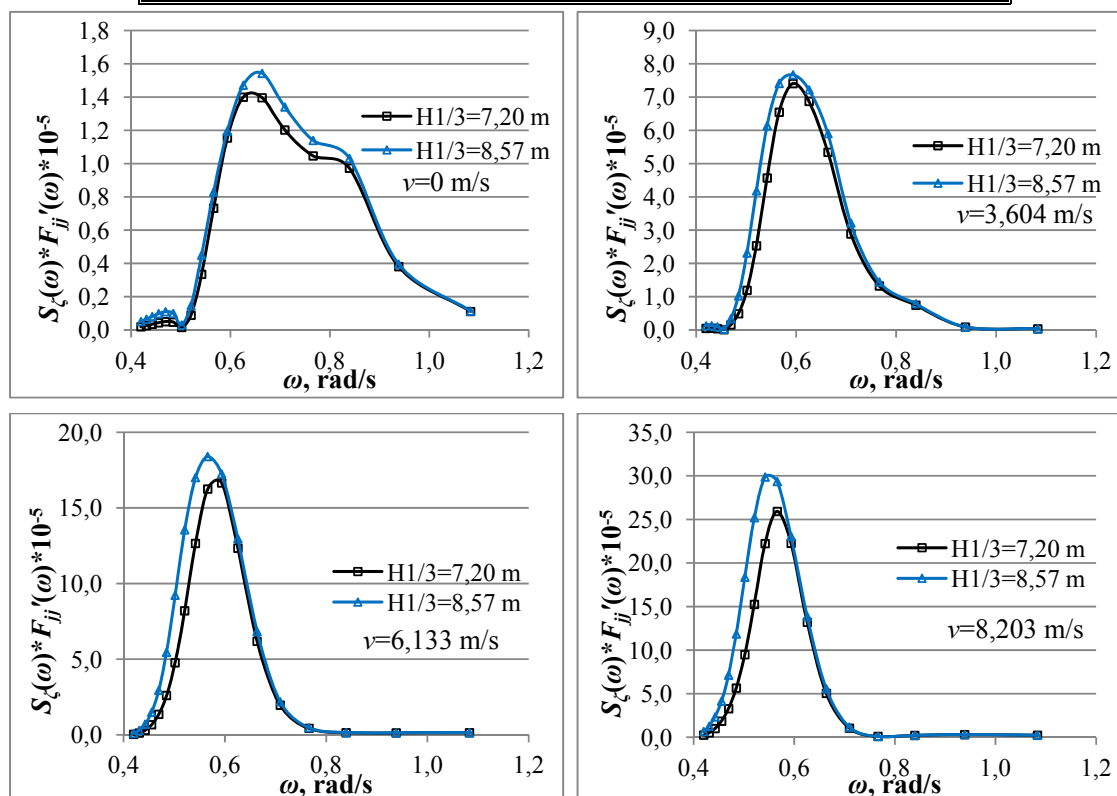
| $\omega$ , rad/s | Sile zanošenja $F_{ij}'$ , N |               |               |               |
|------------------|------------------------------|---------------|---------------|---------------|
|                  | $v=0$                        | $v=3,604$ m/s | $v=6,133$ m/s | $v=8,203$ m/s |
| 0,4197           | 560,3                        | 1393,0        | 944,3         | 7343,0        |
| 0,4306           | 634,0                        | 1269,0        | 2849,0        | 12510,0       |
| 0,4424           | 704,1                        | 827,0         | 6113,0        | 20350,0       |
| 0,4552           | 752,7                        | 204,6         | 11460,0       | 31860,0       |
| 0,4692           | 742,1                        | 2284,0        | 19880,0       | 48260,0       |
| 0,4846           | 595,7                        | 6120,0        | 32530,0       | 70770,0       |
| 0,5016           | 167,8                        | 12660,0       | 50470,0       | 100500,0      |
| 0,5205           | 804,5                        | 22950,0       | 74360,0       | 138300,0      |
| 0,5418           | 2764,0                       | 37700,0       | 104400,0      | 183400,0      |
| 0,5659           | 6289,0                       | 56190,0       | 139500,0      | 222600,0      |
| 0,5935           | 11840,0                      | 75950,0       | 170800,0      | 228400,0      |
| 0,6256           | 18950,0                      | 93010,0       | 167100,0      | 178700,0      |
| 0,6635           | 25290,0                      | 96760,0       | 112100,0      | 91530,0       |
| 0,7093           | 28390,0                      | 68130,0       | 46410,0       | 24960,0       |
| 0,7662           | 32970,0                      | 41750,0       | 13650,0       | 3360,0        |
| 0,8393           | 44230,0                      | 33980,0       | 6523,0        | 10340,0       |
| 0,9384           | 28150,0                      | 6408,0        | 9708,0        | 23210,0       |
| 1,0835           | 15980,0                      | 5085,0        | 20510,0       | 34580,0       |

Tablica 26. Sile zanošenja oštećenog broda s povećanom masom

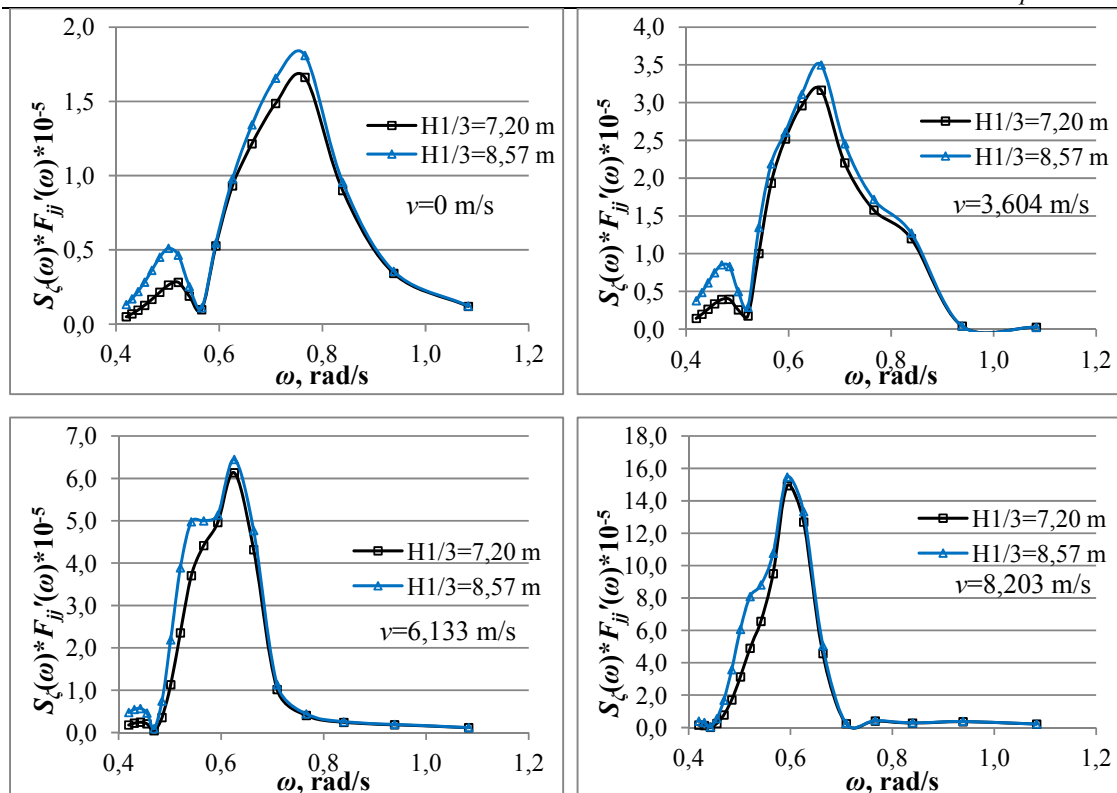
| $\omega$ , rad/s | Sile zanošenja $F_{ij}'$ , N |               |               |               |
|------------------|------------------------------|---------------|---------------|---------------|
|                  | $v=0$                        | $v=3,604$ m/s | $v=6,133$ m/s | $v=8,203$ m/s |
| 0,4197           | 1451,0                       | 4137,0        | 5198,0        | 4345,0        |
| 0,4306           | 1662,0                       | 4737,0        | 5323,0        | 3031,0        |
| 0,4424           | 1902,0                       | 5315,0        | 4910,0        | 367,4         |
| 0,4552           | 2169,0                       | 5738,0        | 3536,0        | 4248,0        |
| 0,4692           | 2445,0                       | 5756,0        | 624,1         | 11400,0       |
| 0,4846           | 2688,0                       | 4950,0        | 4441,0        | 21320,0       |
| 0,5016           | 2793,0                       | 2718,0        | 11970,0       | 33170,0       |
| 0,5205           | 2550,0                       | 1587,0        | 21330,0       | 44380,0       |
| 0,5418           | 1556,0                       | 8268,0        | 30550,0       | 54060,0       |
| 0,5659           | 834,2                        | 16600,0       | 37900,0       | 81590,0       |
| 0,5935           | 5411,0                       | 25840,0       | 50880,0       | 153200,0      |
| 0,6256           | 12610,0                      | 40070,0       | 83060,0       | 171800,0      |
| 0,6635           | 22000,0                      | 57350,0       | 78220,0       | 82790,0       |
| 0,7093           | 35090,0                      | 52010,0       | 23980,0       | 5572,0        |
| 0,7662           | 52360,0                      | 49740,0       | 12750,0       | 12660,0       |
| 0,8393           | 40960,0                      | 54550,0       | 10890,0       | 12570,0       |
| 0,9384           | 25300,0                      | 2992,0        | 13650,0       | 26830,0       |
| 1,0835           | 17130,0                      | 3592,0        | 16500,0       | 30790,0       |

Tablica 27. Sile zanošenja oštećenog broda s naplavljenim tankom

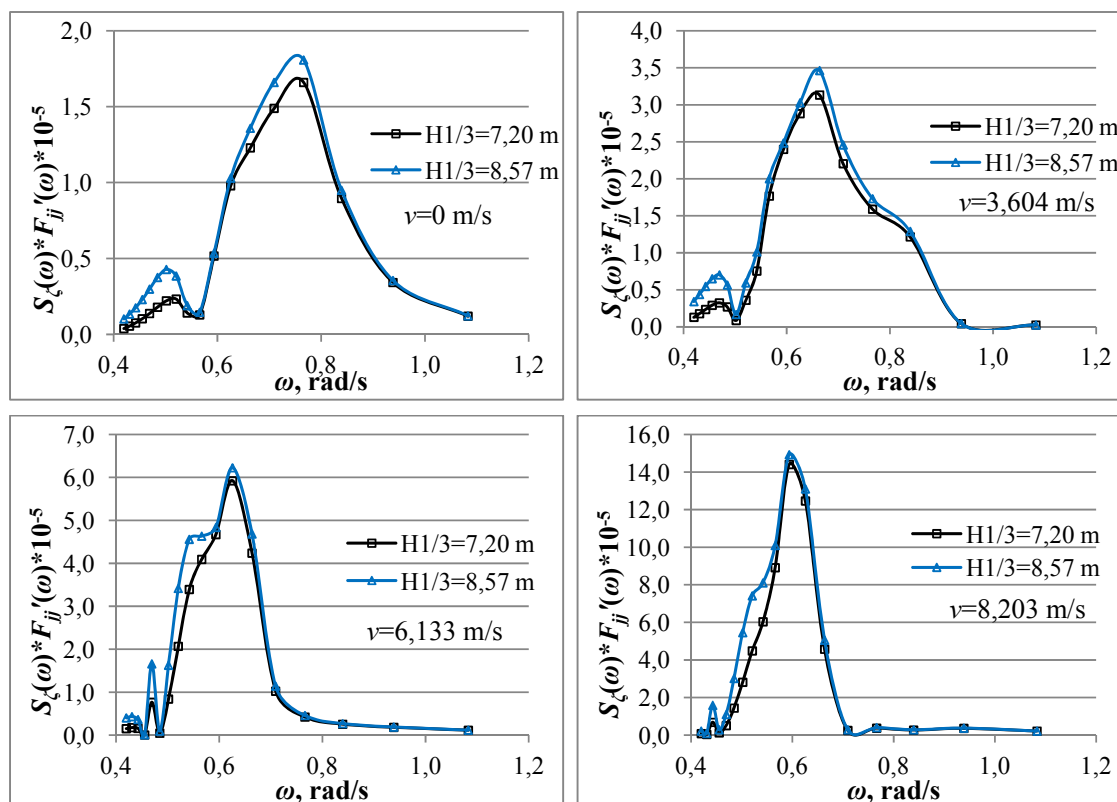
| $\omega$ , rad/s | Sile zanošenja $F_{ij}$ , N |               |               |               |
|------------------|-----------------------------|---------------|---------------|---------------|
|                  | $v=0$                       | $v=3,604$ m/s | $v=6,133$ m/s | $v=8,203$ m/s |
| 0,4197           | 1115,0                      | 3741,0        | 4408,0        | 2386,0        |
| 0,4306           | 1302,0                      | 4262,0        | 4213,0        | 916,9         |
| 0,4424           | 1518,0                      | 4731,0        | 3170,0        | 13750,0       |
| 0,4552           | 1760,0                      | 4994,0        | 79,5          | 2186,0        |
| 0,4692           | 2014,0                      | 4746,0        | 11210,0       | 7478,0        |
| 0,4846           | 2240,0                      | 3371,0        | 572,8         | 18010,0       |
| 0,5016           | 2339,0                      | 913,2         | 8902,0        | 29850,0       |
| 0,5205           | 2110,0                      | 3257,0        | 18750,0       | 40680,0       |
| 0,5418           | 1165,0                      | 6216,0        | 27990,0       | 49770,0       |
| 0,5659           | 1105,0                      | 15170,0       | 35140,0       | 76540,0       |
| 0,5935           | 5299,0                      | 24600,0       | 47930,0       | 147800,0      |
| 0,6256           | 13260,0                     | 39010,0       | 80210,0       | 168800,0      |
| 0,6635           | 22260,0                     | 56760,0       | 76820,0       | 82900,0       |
| 0,7093           | 35170,0                     | 52070,0       | 24200,0       | 6040,0        |
| 0,7662           | 52320,0                     | 50130,0       | 13290,0       | 11700,0       |
| 0,8393           | 40730,0                     | 55310,0       | 11550,0       | 12170,0       |
| 0,9384           | 25270,0                     | 3172,0        | 13520,0       | 26680,0       |
| 1,0835           | 17180,0                     | 3508,0        | 16410,0       | 30700,0       |



Slika 53. Spektar sile zanošenja neoštećenog broda



Slika 54. Spektar sila zanošenja oštećenog broda povećane mase



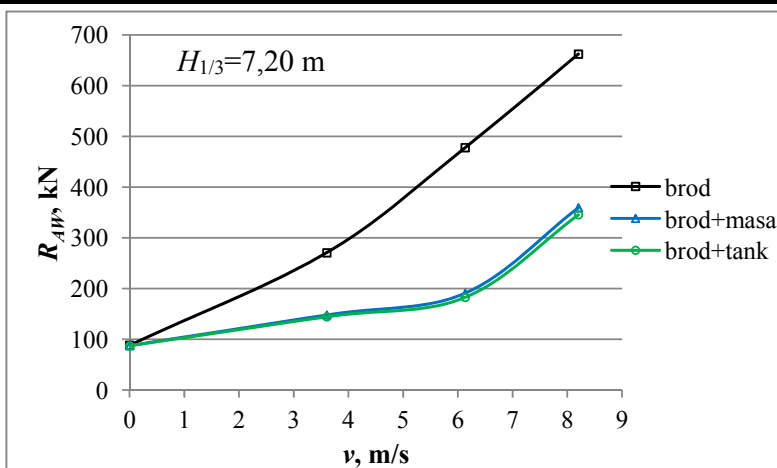
Slika 55. Spektar sila zanošenja oštećenog broda s naplavljenim tankom



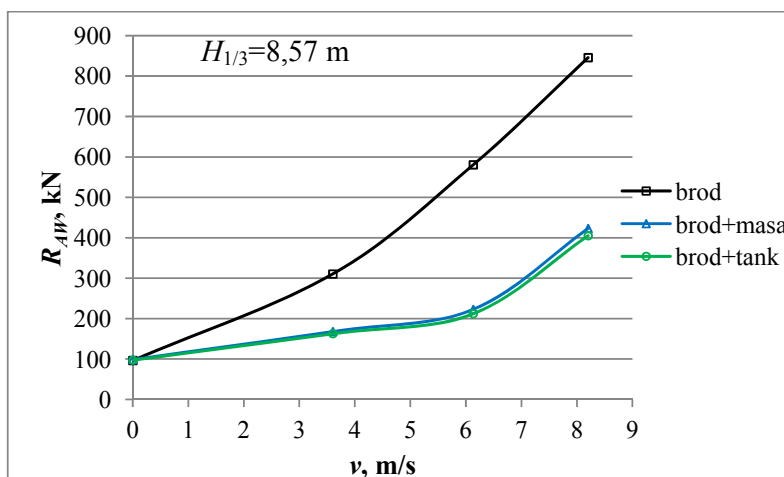
Srednje vrijednosti sile dodatnog otpora određene pomoću izraza (75) prikazane su u Tablici 28. i u ovisnosti o brzini na Slikama 56. i 57.

Tablica 28. Nulti spektralni momenti i srednje vrijednosti sile dodatnog otpora

|               |                                | v=0          |              | v=3,604 m/s   |               | v=6,133 m/s   |               | v=8,203 m/s   |               |
|---------------|--------------------------------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| $H_{1/3}$     |                                | 7,20 m       | 8,57 m       | 7,20 m        | 8,57 m        | 7,20 m        | 8,57 m        | 7,20 m        | 8,57 m        |
| brod          | $m_0, \text{Nm}^2$             | 44130,1      | 48160,4      | 135363,9      | 155141,2      | 238971,3      | 290244,1      | 331115,3      | 422780,0      |
|               | $\overline{R_{AW}}, \text{kN}$ | <b>88,26</b> | <b>96,32</b> | <b>270,73</b> | <b>310,28</b> | <b>477,94</b> | <b>580,49</b> | <b>662,23</b> | <b>845,56</b> |
| brod<br>+masa | $m_0, \text{Nm}^2$             | 43834,8      | 49268,7      | 74070,6       | 84054,2       | 95471,9       | 111426,7      | 179680,9      | 211488,8      |
|               | $\overline{R_{AW}}, \text{kN}$ | <b>87,67</b> | <b>98,54</b> | <b>148,14</b> | <b>168,11</b> | <b>190,94</b> | <b>222,85</b> | <b>359,36</b> | <b>422,97</b> |
| brod<br>+tank | $m_0, \text{Nm}^2$             | 43612,76     | 48677,05     | 72201,78      | 81359,67      | 91300,77      | 106080,23     | 172771,22     | 202551,76     |
|               | $\overline{R_{AW}}, \text{kN}$ | <b>87,22</b> | <b>97,35</b> | <b>144,40</b> | <b>162,72</b> | <b>182,60</b> | <b>212,16</b> | <b>345,54</b> | <b>405,10</b> |

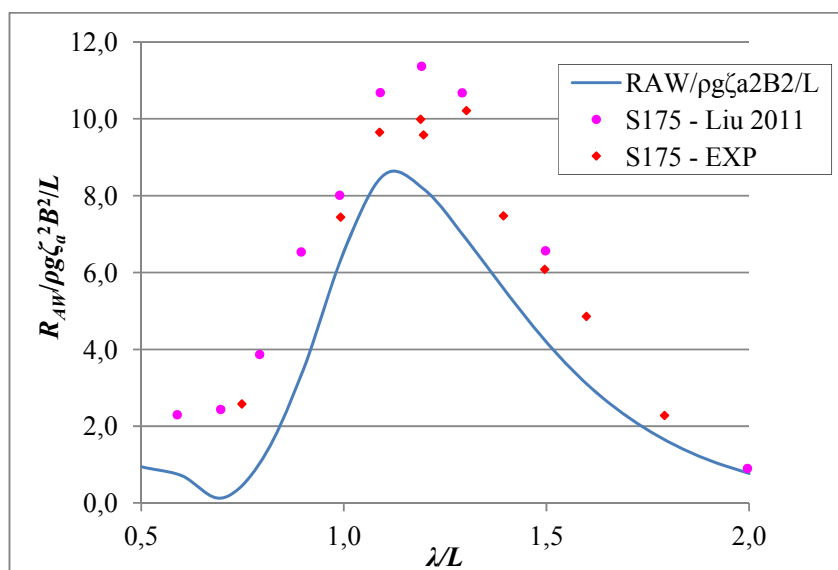


Slika 56. Srednja vrijednost sile dodatnog otpora u ovisnosti o brzini napredovanja za značajnu valnu visinu  $H_{1/3}=7,20\text{m}$



Slika 57. Srednja vrijednost sile dodatnog otpora u ovisnosti o brzini napredovanja za značajnu valnu visinu  $H_{1/3}=8,57\text{m}$

S obzirom da je razmatrano valno opterećenje drugog reda odnosno kvadratna prijenosna funkcija QTF aproksimirana pomoću Newmanove formulacije, na taj način podcijenjen je dodatni otpor broda na valovima. Kako bi se dobiveni rezultati usporedili s podacima iz literature i kako bi se potkrijepila ta pretpostavka, za Froudeov broj  $Fr=0,275$  napravljen je proračun sile zanošenja odnosno sile dodatnog otpora na valovima kontejnerskog broda S-175 i napravljena je usporedba s podacima dobivenim eksperimentalno [17] te numerički pomoću 3D nelinearne panelne metode na temelju Rankineovog potencijala (Greenove funkcije) koja omogućuje modeliranje nelinearnog stacionarnog strujanja u frekvencijskoj domeni [18]. Rezultati su prikazani u bezdimenzionalnom obliku na Slici 58.



Slika 58. Usporedba izračunatih vrijednosti koeficijenta dodatnog otpora na valovima s podacima iz literature [17], [18]

Iz Slike 58. može se zaključiti kako krivulja izračunatih bezdimenzijskih vrijednosti sile dodatnog otpora na valovima oblikom prati eksperimentalne i numeričke vrijednosti iz literature. Budući da se u radu proračun sile dodatnog otpora temelji na potencijalnoj teoriji, vidljiva su stanovita odstupanja u odnosu na eksperimentalne i numeričke podatke. Isto tako može se primjetiti kako se ekstremna vrijednost dobivene funkcije bezdimenzijske sile dodatnog otpora u ovisnosti o omjeru  $\lambda/L$  nalazi na nižoj frekvenciji nego što je to u slučaju eksperimentalnih i numeričkih podataka iz literature.

## 8. ZAKLJUČAK

Cilj ovog rada je procjena pomorstvenih karakteristika i dodatnog otpora na valovima neoštećenog i oštećenog broda. Odziv broda na valovima određen je rješavanjem jednadžbe dinamičke ravnoteže na valovima u frekvencijskoj domeni pod pretpostavkom potencijalnog strujanja odnosno linearne teorije. Na temelju dobivenih rezultata moguće je zaključiti kako oštećeni brod s povećanom masom istisnine od oko 32% ukupne mase istisine nema značajan utjecaj na odziv broda. Uslijed smanjenih prirodnih frekvencija i porasta tromosti oštećenog broda amplitude odziva oštećenog broda se smanjuju u odnosu na neoštećeni brod. Pri većim Froudeovim brojevima odnosno većim brzinama razlike u odzivu oštećenog i neoštećenog broda su nešto veće. U slučaju naplavljenе tekućine unutar tanka, rješenja spregnutog gibanja broda i tekućine u tanku ne pokazuju značajan utjecaj osim u slučaju zalijetanja broda pri nižim frekvencijama odnosno na dugačkim valovima. U tom području javljaju se skokovi prijenosnih funkcija što znači naglo povećanje amplituda pomaka broda. Tekućina u tanku gotovo nema utjecaja na poniranje i posrtanje broda. U slučaju poniranja ne dolazi do deformacije slobodne površine pa su takvi rezultati bili i za očekivati. Obzirom da je modeliranje strujanja i opterećenja tekućine u tanku izrazito složeno, teško je kvalitetno opisati navedeni hidrodinamički problem linearnom potencijalnom teorijom. Iako se smatra da linearna teorija dovoljno dobro uzima u obzir utjecaj gibanja tekućine u tankovima na globalna gibanja broda, pojednostavljenjima potencijalne teorije te korištenjem okvirnih parametara prigušenja taj je utjecaj podcijenjen.

Prilikom proračuna dodatnog otpora broda na valovima korištene su tri metode u programskom paketu *HydroSTAR*. Dok direktna integracija tlaka po oplakanoj površini te analiza volumena unutar kontrolne površine u kombinaciji s integracijom tlaka daju približne rezultate u usporedbi s eksperimentalnima, metoda koja koristi zakon o očuvanju količine gibanja daje značajna odstupanja od eksperimentalnih rezultata osim u slučaju mirovanja broda. Budući da koristi udaljene potencijale metoda očuvanja količine gibanja gotovo je neupotrebljiva u slučaju vode ograničene dubine.

Kvadratna prijenosna funkcije QTF koja predstavlja niskofrekventna valna opterećenja aproksimirana je nultim članom odnosno silom zanošenja koja je konstantna za pojedinu frekvenciju nailaznog vala. Ta tzv. Newmanova aproksimacija uvelike olakšava proračun dodatnog otpora na valovima no isto tako značajno podcijenjuje konačne sile dodatnog otpora.

S obzirom da su valovi u radu generirani samo u pramac, pretpostavljeno je da će Newmanova aproksimacija QTF funkcije dati dovoljno dobru procjenu valnog opterećenja. Na temelju dobivenih rezultata proračuna dodatnog otpora za definirana stanja mora neoštećenog i oštećenog broda može se zaključiti kako, slično kao i kod proračuna amplituda odziva, modeli oštećenja povećane mase i naplavljene tekućine daju približno iste rezultate. Neoštećeni brod ima značajniju silu dodatnog otpora nego što je to za oštećeni brod. Budući da se oštećeni brod s padom prirodne frekvencije prilikom gibanja na valovima ima značajnije odzive na nižim frekvencijama gdje je spektralna energija stanja mora manja, i dodatni otpor na valovima će biti manji.

Linerna potencijalna teorija daje dobru procjenu pomorstvenih karakteristika broda. Potrebno je prilagoditi rubne uvjete te pažljivo odrediti faktor prigušenja koji će onemogućiti beskonačne odzive posebice u slučaju tanka s tekućinom unutar broda. Usprkos brojnim pojednostavljenjima linearna potencijalna teorija daje zadovoljavajuće rezultate i u velikoj mjeri pojednostavljuje proračun interakcije broda i nailaznih valova.

## LITERATURA

- [1] Alexandersson, M.: A Study of Methods to Predict Added Resistance in Waves, M.Sc. Thesis, KTH Centre for Naval Architecture, Stockholm, 2009.
- [2] Gamulin, A.: Otpor i propulzija broda, interna skripta FSB-a, Zagreb, 1997.
- [3] Prpić-Oršić, J., Čorić, V.: Pomorstvenost plovnih objekata, Zigo, Rijeka, 2006.
- [4] Kashiwagi, M.: Prediction of Added Resistance by Means of Unsteady Wave-Pattern Analysis, Proceedings of the 25<sup>th</sup> International Workshop on Water Waves and Floating Bodies, 25<sup>th</sup> IWWWFB, Harbin, China, 2010.
- [5] Kashiwagi, M., Ikeda, T., Sasakawa, T.: Effects of Forward Speed of a Ship on Added Resistance in Waves, International Journal of Offshore and Polar Engineering, Vol. 20, No. 3, 2010., pp. 196-203.
- [6] Matulja, D., Sportelli, M., Prpić-Oršić, J., Guedes Soares, C.: Methods for estimation of ships added resistance in regular waves, Zbornik XIX. simpozija Teorija i praksa brodogradnje (In memoriam prof. Leopold Sorta), SORTA 2010, Lumbarda, Otok Korčula, Hrvatska, 2010.
- [7] Nakayama, Y., Yasukawa, H., Hirata, N. and Hata, H.: Time Domain Simulation of Wave-induced Motions of a Towed Ship in Head Seas, Proceedings of the Twenty-second (2012) International Offshore and Polar Engineering Conference, 22<sup>nd</sup> ISOPE Conference Rhodes, Greece, June 2012, pp. 901-907.
- [8] HYDROSTAR for Experts, v6.11 - User Manual, 2010. Bureau Veritas, Paris.
- [9] <http://ocw.mit.edu>, Design of Ocean Systems MIT Course, Lecture 11: Drift and Slowly-Varying Loads, MIT OpenCourseWare.
- [10] Chen, X. B. and Rezende, F.: Computations of low-frequency wave loading, Proceedings of the 23<sup>rd</sup> International Workshop on Water Waves and Floating Bodies, 23<sup>rd</sup> IWWWFB, Jeju, Korea, 2008.
- [11] Degiuli, N., Čatipović, I., Martić, I., Werner, A., Čorić, V.: Influence of added resistance in regular waves on ship fuel consumption, Proceedings of the 9<sup>th</sup> Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment, 9<sup>th</sup> SDEWES Conference, Venice-Istanbul, 2014.
- [12] Radan, D.: Uvod u hidrodinamiku broda, Sveučilište u Dubrovniku, Dubrovnik, 2004.

- 
- [13] Malenica, Š., Zalar, M., Chen, X.B.: Dynamic coupling of seakeeping and sloshing, Proceedings of The Thirteenth (2003) International Offshore and Polar Engineering Conference, 13<sup>th</sup> ISOPE Conference, Honolulu, Hawaii, USA, May 2003, pp. 486-492.
- [14] Diebold, L., Baudin, E., Henry, J., Zalar, M.: Effects on sloshing pressure due to the coupling between seakeeping and tank liquid motion, Proceedings of the 23rd International Workshop on Water Waves and Floating Bodies, 23<sup>rd</sup> IWWWFB, Jeju, Korea, 2008.
- [15] Parunov, J., Senjanović, I.: Wave loads on oil tankers in the Adriatic sea, Proceedings of the 1st Conference on Marine Technology in memoriam of the academician Zlatko Winkler, Rijeka, 2005, pp. 98-111.
- [16] Journée, J.M.J., Massie W.W.: Offshore Hydromechanics, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands, 2001.
- [17] Feng, P., Ma, N., Gu, X.: A practical method for predicting the propulsive performance of energy efficient ship with wave devouring hydrofoils at actual seas, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment, 2013.
- [18] Liu, S., Papanikolaou, A., Zaraphonitis, G.: Prediction of added resistance of ships in waves, Ocean Engineering, Vol. 38, No. 4, 2011, pp. 641-650.