

# Porast otpora i pad brzine na valovima

---

**Boras, Maris**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2008**

*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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:432543>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-06**

*Repository / Repozitorij:*

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



Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet strojarstva i brodogradnje

# **DIPLOMSKI RAD**

Mentor  
Prof. dr. sc. Većeslav Čorić

Maris Boras

Zagreb, 2008.

## Sažetak

---

Porast otpora broda na valovima značajan je kako brodograđevnim inženjerima tako i pomorcima. Da bi se odredila brzina kojom brod plovi, odnosno pad brzine broda na valovima potrebno je u obzir uzeti nekoliko faktora. U ovom radu oni su razloženi na namjerno smanjenje brzine i na prirodno ili nenamjerno smanjenje brzine.

Postoji nekoliko metoda kojima se može proračunavati srednja vrijednost dodatnog otpora broda na valovima, a u ovom radu je prikazana jedna od njih. Metodom rasipanja energije radijacijom (Gerritsma i Beukelman, 1972.) proračunat je dodatni otpor broda na valovima. Na temelju dobivenih rezultata analizirana je jedna plovidba na zadanoj ruti. Na koncu je dan prijedlog za daljnju optimizaciju plovnog puta.

Optimizacija plovnog puta danas je neizostavni dio svakog ozbiljnog planiranja plovidbe, kako iz ekonomskih aspekata tako i zbog povećanja sigurnosti posade i broda.

Izjavljujem da sam ovaj diplomski rad izradila samostalno, koristeći se navedenom literaturom te uz nazor mentora prof. dr. sc. Većeslava Čorića.

*Svima koji vjeruju...*

*Vidiš li ga kako liže i miluje pržinu. Jedva se usuđuje pobrškati žale. Gledajte kako se igra okolo hridi - baca im bisera, zlata - možda im žamori pjesme ljubavi - a sutra? Urlikat će ko bijesna zvijer, šibat će ih pjenom, bacat će im kamenje, ribe... oh! more - nevjerno! --*

Sirena, Ivo Vojnović, Zagreb 1884.

<b>Popis tablica, slika i dijagrama</b> .....	III
<b>Popis simbola</b> .....	V
<b>1. Uvod</b> .....	1
<b>2. O otporu na mirnom moru</b> .....	3
<b>3. Porast otpora broda na valovima</b> .....	5
<b>3.1. Smanjenje brzine broda na valovima</b> .....	8
3.1.1. Namjerno smanjenje brzine .....	8
3.1.2. Prirodno ili nenamjerno smanjenje brzine.....	9
Slika 3.1. Pad brzine na valovima za razna stanja mora.....	10
<b>3.2. Propulzija i dodatni otpor</b> .....	11
<b>3.3. Porast otpora na harmonijskom valu</b> .....	12
<b>3.4. Porast otpora na morskim valovima</b> .....	13
<b>3.5. Porast otpora od vjetra</b> .....	15
<b>4. Metode proračuna porasta otpora broda na valovima</b> .....	16
<b>5. Metoda rasipanja energije radijacijom</b> .....	18
<b>5.1. Proračun njihanja na harmonijskim valovima</b> .....	19
<b>5.2. Vrpčasta metoda</b> .....	21
5.2.1. Primjena i ograničenja.....	22
5.2.2. Koeficijenti u jednažbi njihanja .....	22
<b>6. Ilustracija metode rasipanja energije radijacijom</b> .....	24
<b>6.1. Analiza odabranog broda</b> .....	24
6.1.1. Osnovne značajke broda .....	24
<b>6.2. Opis softverske podrške</b> .....	25
<b>6.3. Proračun porasta otpora</b> .....	27
<b>7. Analiza rezultata</b> .....	34

<b>7.1. Opis realnih uvjeta prekoceanske plovidbe .....</b>	<b>34</b>
7.1.1. Opis odabrane rute .....	34
<b>7.2. Opis dostupnih podataka za vrijeme plovidbe .....</b>	<b>34</b>
7.2.1. Aktualni meteorološki podaci .....	36
<b>7.3. Analiza pogonskih troškova i trajanja plovidbe .....</b>	<b>40</b>
7.3.1. Operativni troškovi.....	40
7.3.2. Kapitalni troškovi .....	41
<b>7.4. Prijedlog organizacije plovidbe najpovoljnijom rutom.....</b>	<b>41</b>
7.4.1. Određivanje rute.....	41
7.4.2. Proračun vremena putovanja i potrošnje goriva .....	42
<b>8. Zaključak .....</b>	<b>46</b>
<b>Literatura.....</b>	<b>48</b>
<b>Prilozi .....</b>	<b>49</b>

## Popis tablica, slika i dijagrama

---

Slika 3.1 Pad brzine na valovima za razna stanja mora

Slika 3.2 Prikaz prijenosa energije

Slika 3.3 Prikaz proračuna ukupnog otpora

Slika 3.4 Povećanje otpora na harmonijskim valovima

Slika 3.5 Valni i susretni spektar

Slika 5.1. Objašnjenje oznaka korištenih u proračunu

Slika 5.3 Vrpčasta metoda

Slika 6.1. Vodne linije

Slika 7.2 Izvadak iz navigacijskog atlasa za sjeverni Atlantik sa ucrtanim vrijednostima prosječnog postotka pojavljivanja oluja za mjesec veljaču.

Slika 7.2 Izvadak iz navigacijskog atlasa za sjeverni Atlantik sa ucrtanim linijama pojavljivanja valnih visina većih ili jednakih 12ft (3,65m) za mjesec veljaču

Slika 7.3 Izvadak iz publikacije Bowditch 2002 – National Imagery and Mapping Agenci (SAD) prikazuje morske struje na Atlantiku

Slika 7.4 Prikaz područja koje pokriva NOAA

Slika 7.5 Prikaz stanica ispred kanadske obale

Slika 7.6 Prikaz podataka jedne mjerne stanice NOAA

Slika 7.7 Primjer prognoze za narednih 48 sati OPC-a za sjeverni Atlantik

Slika 7.8 Trenutni položaj brodova koje prati Total Fleet Management Service

Slika 7.9 Trenutna analiza morskih stuja na zapadnom Atlantiku

Slika 7. 10 Prikaz zamišljenih ruta A i B

Slika 7.11 Prognoza stanja mora sa ucrtanim rutama i predloženim dionicama

Slika A1. Model trupa broda

Tablica 6.1. Osnovne značajke m.b. Oluja

Tablica 7.1. Analiza plovnih ruta A i B

Tablica 7.2. Usporedba vremena trajanja plovidbe i potrošnje goriva za rute A i B

Tablica B1. Bezdimenzionalni hidrodinamički koeficijenti preuzeti iz izlazne datoteke programa WAVESHIP

Tablica B2. Hidrodinamički koeficijenti dodatne mase i promjena koeficijenata dodatne mase po duljini - obrada podataka izlazne datoteke WAVESHIP



Tablica B3. Hidrodinamički koeficijenti prigušenja – obrada podataka izlazne datoteke WAVESHIP

Tablica B4. Pomaci – obrada podataka izlazne datoteke WAVESHIP

Tablica B5. Proračun amplitude i faze apsolutnog pomaka uslijed poniranja i posrtanja

Tablica B6. Proračun amplitude relativnog pomaka uslijed poniranja i posrtanja

Tablica B7. Uz proračun dodatnog otpora prema izrazu 5.7

Dijagram 6.1 Hidrodinamički koeficijenti dodatne mase  $A_{33}$  koeficijenti prigušenja  $B_{33}$

Dijagram 6.2 Prikaz promjene koeficijenta dodatne mase po duljini broda

Dijagram 6.3 Prijenosna krivulja poniranja i posrtanja za  $\mu = 180^\circ$

Dijagram 6.4 Spektar valne energije prema ITTC - Bretschneider,  $H_{1/3} = 1,0$  m,  $T_0 = 10,0$  s

Dijagram 6.5 Prikaz ukupnog dodatnog otpora na morskim valovima

Dijagram 6.6 Prijenosna funkcija poniranja i posrtanja za kut nailaska valova  $\mu = 180^\circ$

Dijagram 6.7 Funkcija odziva za dodatni otpor od valova za kut nailaska valova  $\mu = 180^\circ$

Dijagram 6.8 Prijenosna funkcija poniranja i posrtanja za kut nailaska valova  $\mu = 155^\circ$

Dijagram 6.9 Funkcija odziva za dodatni otpor od valova za kut nailaska valova  $\mu = 155^\circ$

Dijagram 6.10 Prijenosna funkcija poniranja i posrtanja za kut nailaska valova  $\mu = 135^\circ$

Dijagram 6.11 Funkcija odziva za dodatni otpor od valova za kut nailaska valova  $\mu = 135^\circ$

Dijagram 6.12 Usporedba prijenosnih funkcija prema proračunu dvaju računalnih programa

Dijagram 6.13 Usporedba dodatnog otpora dvaju korištenih računalnih programa

Dijagram 7.1 Prikaz operativnih troškova

Dijagram 7.2 Dodatni otpor na valovlju značajnih valnih visina od 2 do 5 metara

## Popis simbola

---

$\alpha_W$  – smjer strujanja vjetra  
 $\eta$  – amplituda poniranja, posrtanja  
 $\delta$  – pomak u fazi  
 $\zeta_0$  – amplituda vala  
 $\lambda$  – valna duljina  
 $\mu$  – kut nailaska broda na valove  
 $\omega$  – valna frekvencija  
 $\omega_e$  – susretna frekvencija  
 $C_{AW}$  – funkcija odziva dodatnog otpora od valova  
 $A_{33}$  – koeficijent dodatne mase  
 $B_{33}$  – koeficijent prigušenja  
 $m_0$  - varijanca  
 $n$  – broj okretaja  
 $P, P^{(1)}, P^{(2)}$  – dinamički tlak  
 $P_B$  – kočna snaga  
 $P_E$  – efektivna snaga  
 $Q$  – moment vrtnje  
 $R_{AW}$  - dodatni otpor od valova  
 $R_{SW}$  - otpor na mirnom moru  
 $R_T$  – snaga otpora na mirnom moru  
 $R_W$  - otpor uslijed vjetra  
 $r_{30}$  – amplituda relativnog vertikalnog pomaka  
 $S$  – oplakana površina  
 $S_\zeta$  – valni spektar  
 $s_3$  – apsolutni vertikalni pomak  
 $s_{30}$  – amplituda apsolutnog vertikalnog pomaka  
 $T$  – sila poriva  
 $V, v_s$  – brzina broda  $\acute{c}$   
 $V_W$  – brzina vjetra  
 $x_B$  – udaljenost od težišta sistema

## 1. Uvod

---

Snaga potrebna da bi brod plovio morem ovisi o otporu kojeg pružaju more i zrak, o korisnosti propulzije i formi broda i njihovom međusobnom utjecaju. Otpor broda na mirnom moru često služi za prvu procjenu snage potrebne za plovidbu. Pri takvim procjenama u projektnoj fazi osnivanja broda, na snagu potrebnu da brod svlada otpor na mirnom moru dodaje se vrijednost koja se naziva dodatak na more (e: *sea margin*), kako bi se uzeo u obzir utjecaj okoline na ponašanje broda. Dodatak na more iznosi 10 do 30 % snage broda na mirnom moru. Ovaj postotak je procijenjen na osnovu iskustva sličnih brodova, brodova koji su plovili na istim rutama. Na osnovi racionalnih metoda može izračunati točniji dodatak na more, računajući dodatni otpor broda na valovima na osnovi gibanja broda na valovima.

Naručitelji brodova detaljno surađuju sa inženjerima brodogradnje u fazama gradnje broda. Međutim, brodograđevna znanja rijetko se primjenjuju jednom kada je brod porinut i suradnja između ove dvije struke izostaje. Vođeni mišlju gradnje broda koji će biti ekonomski opravdan i udovoljavati uvjetima tržišta nužno je i razmatrati problem broda u plovidbi.

Optimizacija plovnog puta danas je neizostavni dio svakog ozbiljnog planiranja plovidbe. U posljednjih dvadesetak godina pomorci donose odluke na osnovi podataka meteoroloških institucija. Znajući kakvo ih stanje mora i uvjeti okoline očekuju, odabiru se plovni putovi koji jamče manju potrošnju goriva, najkraće vrijeme plovidbe i ne manje važno, sigurnost posade, broda i tereta. Procjena može biti temeljena na osnovi

iskustava plovidbe na ruti u pitanju, na osnovi iskustava o ponašanju broda na valovima, što nikako ne treba zanemariti. No, budući da je danas moguće velikom točnošću proračunati kako brzinu broda na mirnom moru, tako i njen prirodan pad uslijed povećanja otpora od vjetra i valova, logično je da se i ova saznanja primijene u postupku donošenja odluka o odabiru plovnog puta.

Časniku na brodu zaduženom za odabir plovnog puta na raspolaganju moraju biti podaci na osnovi kojih će za zadanu valnu visinu i smjer valova moći iščitati brzinu broda, ili pad brzine broda.

## 2. O otporu na mirnom moru

---

Prognoza otpora broda najtočnije se danas određuje modelskim ispitivanjima u bazenima, također u fazi projektiranja koriste se i približne metode na osnovi već provedenih ispitivanja. Značajna su i ispitivanja u naravi. Mjerenje propulzijskih značajki na pokusnim plovdbama, osim za potvrdu ugovorenih plovdbenih značajki, može biti zanimljivo i kao potvrda modelskih ispitivanja.

U praksi su najčešće dostupni samo podaci o otporu za potpuno nakrcan brod, sa određenim omjerom gaza i širine broda. U tom slučaju koristi se grubo približenje koje drži da je otpor na mirnom moru razmjernan trećem korijenu kvadrata volumena istisnine, [1]. Ovaj pristup ne daje dobre rezultate za većinu situacija u kojima se brod u svom vijeku nađe. Primjerice za razne trimove i gazove te utjecaj bulba za različita stanja krcanja potrebno bi bilo imati zaseban proračun.

Osim toga i podatke koji su dostupni sa pokusne plovidbe, koji su također za jedno stanje krcanja, bi trebalo dodatno korigirati budući da je snaga općenito definirana kao umnožak sile i brzine:

$$P_E = R_T \cdot v_s, W \quad (2.1)$$

Gdje gornji izraz definira efektivnu snagu  $P_E$  otporom na mirnom moru  $R_T$  i brzinom broda  $v_s$ , snagu koja bi bila potrebna za tegljenje broda bez propulzije. Dok se na

pokusnoj plovidbi mjeri snaga  $P_B$ , kočna snaga (e: *brake power*), predana pogonskim strojem, snaga na prirubnici spojke.

Proračun otpora broda na mirnom moru prelazi okvire ovog rada i ovdje će biti uzeta njegova vrijednost kroz snagu izmjerenu na pokusnoj plovidbi, a za svako ozbiljnije pristupanje ovom problemu potrebno bi bilo imati odgovarajući proračun za pojedino stanje krcanja broda uz odgovarajuće gubitke.

### 3. Porast otpora broda na valovima

---

Ukupni otpor broda na valovima se može razložiti na nekoliko dijelova. Najznačajniji su otpor na mirnom moru, dodatni otpor uslijed vjetra te dodatni otpor od valova, pri čemu vrijedi:

- otpor na mirnom moru  $R_{SW}(V)$  ovisan je o brzini broda,
- otpor uslijed vjetra  $R_W(V, V_w, \alpha_w)$  ovisan je o brzini broda, brzini vjetra i smjeru strujanja vjetra,
- dodatni otpor od valova  $R_{AW}(V, H_{1/3}, T, \mu)$  ovisan je o brzini broda, značajnoj valnoj visini, sili poriva i kutu nailaska na valove.

Odnosno može se pisati:

$$R_{SW}(V) + R_W(V, V_w, \alpha_w) + R_{AW}(V, H_{1/3}, T, \mu) = T(V_a, n) \{1-t(V, n)\} \quad (3.1)$$

gdje je  $V$  – brzina broda,  $V_w$  brzina vjetra,  $\alpha_w$  smjer strujanja vjetra,  $H_{1/3}$  značajna valna visina,  $T$  – sila poriva,  $\mu$  – kut nailaska broda na valove,  $V_a$  brzina napredovanja vijka,  $n$  – broj okretaja,  $t$  - koeficijent upijanja.

Također valja spomenuti i dodatni otpor uslijed kormilarenja na nemirnom moru kada vjetar i valovi ometaju željeni kurs broda i dodatni otpor koji se povećava obraštanjem oplata broda.

Brod koji napreduje na valovima i sam stvara valove. Valove koje generira brod možemo gledat kao one koji su povezani sa napredovanjem kroz mirno more i valove vezane uz vertikalne relativne pomake odziva broda na valovima. Budući da valovi nose energiju slijedi zaključak da će brod koji se giba mirnim morem trošiti manje energije nego onaj na valovima.

Razmatramo brod simetrične, uglađene forme sa konstantnom brzinom  $U$  na nailaznim valovima koji napreduju u smjeru koji sa smjerom napredovanja broda čini kut  $\mu$ . Odabran je koordinatni sustav vezan za brod i brod napreduje brzinom srednje vrijednosti  $U$ . Frekvencija kojom valovi nailaze mijenja se u ovisnosti o brzini broda, ukoliko brod ne plovi na valovima koji mu nailaze u bok. Os  $x$  je u osi simetrije broda i pozitivan joj je smjer napredovanja broda. Pozitivan smjer osi  $z$  gleda prema gore i ishodište leži na neporemećenoj slobodnoj površini  $z = 0$ . Brod ima slobodu rotiranja oko bilo koje osi i giba se translatorno u smjeru koordinatnih osi. Dubina mora  $h$  je pretpostavljena konstantnom i dno odgovara točki  $z = -h$ . Također, pretpostavlja se da je tekućina idealna, neviskozna i nestlačiva te da je strujanje bezvrtložno i da postoji potencijal  $\Phi$  čiji je gradijent brzina čestice fluida:

$$\vec{u} = \text{grad}\Phi = \nabla\Phi \quad (3.2)$$

Nužan uvjet koji treba zadovoljit je da je Laplaceova jednakost koja govori o održanju mase, odnosno uvjetu nestlačivosti idealne tekućine.

$$\Delta \Phi = 0 \quad (3.3)$$

Nadalje na slobodnoj površini držimo do kinematičkih i dinamičkih rubnih uvjeta. Prvi kinetički uvjet govori da čestica fluida ne može napustiti slobodnu površinu, što se može pisati kao:

$$\frac{\partial\Phi}{\partial x} \frac{\partial\zeta}{\partial x} + \frac{\partial\Phi}{\partial y} \frac{\partial\zeta}{\partial y} + \frac{\partial\zeta}{\partial t} - \frac{\partial\Phi}{\partial z} = 0 \quad \text{za } z = \zeta \quad (3.4)$$



Drugi, dinamički rubni uvjet slobodne površine govori da tlak na slobodnoj površini odgovara atmosferskom tlaku. Ovo je točno ukoliko se zanemari napetost površine. Tlak u fluidu slijedi iz Bernoullijeve jednadžbe, koja sadrži potencijal brzine.

$$-\frac{p - p_0}{\rho} = \frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{1}{2} (\text{grad} \Phi)^2 + gz - \frac{1}{2} U^2 \quad (3.5)$$

Odnosno dinamička komponenta:  $p_d = -\rho g \frac{\partial \Phi}{\partial t}$ .

Dodatni otpor kao prirast sile mirnog fluida u smjeru x uzrokovan valovima može se pisati kao [2]:

$$\begin{aligned} R_{AW} &= \int_{S'} (-\rho g z + P) n_1 ds = \\ &= \int_S (-\rho g z + P^{(1)}) \cdot n_1 ds + \int_S [-\rho g (\xi_4 y - \xi_5 x) + \Delta P^{(1)}] \cdot n_1 ds + \\ &+ \int_{\Delta S} (-\rho g z + P^{(1)}) \cdot n_1 ds + \int_S (-\rho g z + P^{(1)}) \cdot \Delta n_1 ds + \\ &+ \int_S P^{(2)} ds + O(\zeta_A^3) \end{aligned} \quad (3.6)$$

Potez nad integralom označava srednju vremensku vrijednost, a ostali simboli označavaju:

$$n_1 = \vec{n}_1 \cdot \vec{i} = \cos(|n_1| \cdot x) \text{ komponenta normale}$$

S': stvarna oplakana površina

S: oplakana površina kada brod napreduje na mirnom moru

$\Delta S$ : promjena oplakane površine uslijed gibanja broda i uzdizanja vala

$P^{(1),(2)}$ : dinamički tlak fluida prvog i drugog reda

$\Delta P^{(1)}$ : promjena  $P^{(1)}$  na površini trupa uslijed gibanja broda

$\Delta n_1$ : promjena  $x$  – komponente normale na oplatu broda  $S$  uslijed poniranja i posrtanja

Integral  $\int_S [-\rho g(\xi_4 y - \xi_5 x) + \Delta P^{(1)}] \cdot n_1 ds$  je korekcija tlaka u referentnoj točki na oplakanoj površini  $S$  pripadajuće točke na površini  $S'$ .

Integral  $\int_{\Delta S} (-\rho g z + P^{(1)}) \cdot n_1 ds$  je doprinos od tlaka na oplatu uronjenu ili izronjenu uslijed

njihanja broda i uzdizanja vala, dok  $\int_S (-\rho g z + P^{(1)}) \cdot \Delta n_1 ds$  daje utjecaj promjene smjera

tlaka relativno u odnosu na os  $x$ , koja je nepomična u prostoru. Ovome je razlog definicija otpora kao sile u smjeru  $x$  koordinatnog sustava nepomičnog u prostoru, a ne kao sile u smjeru osi  $x$  referentnog koordinatnog sustava vezanog za brod.

Integracija hidrodinamičkog tlaka prema gornjem izrazu je prekomplicirana za proračun numeričkom integracijom za rad ovog obima. No ono što se može zaključiti i što valja imati na umu je da je dodatni otpor od valova uzrokovan poremećajima fluida, kao rezultat njihanja broda i raspršenja valova, efekt drugog reda.

### 3.1. Smanjenje brzine broda na valovima

#### 3.1.1. Namjerno smanjenje brzine

Kada se brod nađe na olujnom moru, kapetan smanjuje brzinu kako bi ublažio snažna i jaka djelovanja mora i odzive broda. Najvažnije pojave kao i vjerojatnost njihova pojavljivanja, koje potiču na ovakvu odluku su: zalijevanje palube, udaranje pramca - sraz (e: *slamming*), izranjanje vijka te ubrzanja.

- **Zalijevanje palube** morem će nastupiti ukoliko relativan pomak točke na pramcu nadmaši veličinu nadvođa, postane negativan, gdje treba uzeti u obzir i smanjenje nadvođa na pramcu uslijed formiranja pramčanog vala. Vjerojatnost ovog događaja može se pisati kao:

$$P_{ZP} = e^{-\frac{f_e'^2}{2m_{0s}}} \quad (3.7a)$$

gdje je  $f_e' = f_e - h_d(\zeta)$ , efektivno nadvođe umanjeno za dinamičku komponentu pojave pramčanog vala.

- **Udaranje pramca ili sraz** je pojava do koje dolazi kada pri određenim brzinama na nemirnom moru kada uslijed velikih pomaka poniranja i posrtanja, relativna vertikalna brzina pramca premaši kritičnu vrijednost i peta pramčane statve izroni iz mora te udari o morsku površinu pri ponovnom uranjanju. Vjerojatnost sraza treba promatrati kao združenu vjerojatnost izranjanja pramca i premašivanja kritične vrijednosti relativne vertikalne brzine gibanja pramca.

$$P_{SRAZ} = e^{-\left(\frac{T^2}{2m_{0s}} + \frac{v_0^2}{2m_{0v}}\right)} \quad (3.7b)$$

- **Izranjanje vijka** je pojava kada vijak izroni za veličinu jednaku jednoj trećini svog promjera. Ova pojava može uzrokovati i do 25% smanjenja poriva te oštećenje motora.
- **Ubrzanja**, ukoliko su velikih iznosa također mogu biti razlogom smanjenja brzine plovidbe. Kritične vrijednosti ubrzanja vezane su uz duljinu broda.

gdje je u gornjim izrazima vjerojatnosti  $m_0$  varijanca relativnog pomaka, odnosno brzine.

Može se zaključiti da će za brod koji je potpuno nakrcan od presudne važnosti za odluku o smanjenju brzine bit pojave zalijevanja palube, dok za lagano nakrcan brod su značajni sraz i ubrzanja na pramcu.

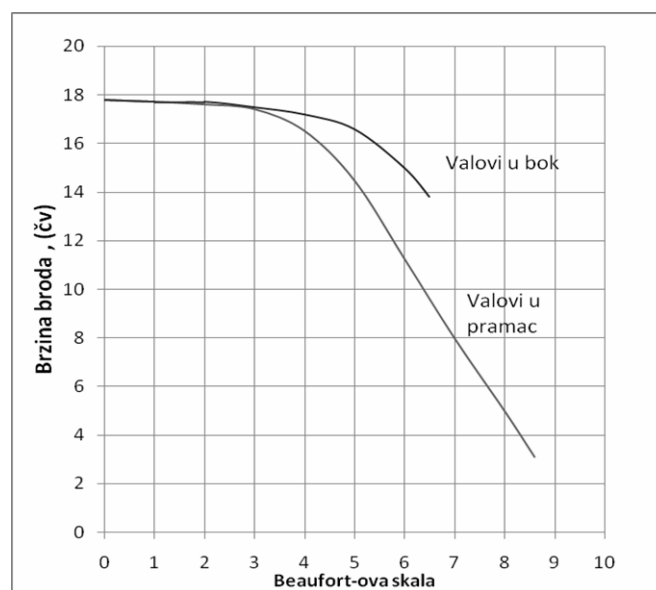
### 3.1.2. Prirodno ili nenamjerno smanjenje brzine

Brzina broda koji napreduje na valovima bit će manja nego na mirnom moru u slučaju da je snaga koju daje glavni stroj jednaka u oba slučaja. Osim zbog utjecaja

valova i vjetra, uzrok padu brzine je i dodatno opterećenje vijka koje uglavnom smanjuje njegovu korisnost. Budući da kapetan ovdje nema kontrolu nad gubitkom brzine zbog dodatnog otpora, koristi se pojam nenamjerno smanjenje ili neželjeno smanjenje brzine.

Ovaj neželjeni gubitak brzine se kreće u okvirima vrijednosti dva do tri čvora, kada se govori o trgovačkim flotama, deplasmanskim formama i donosi značajne financijske gubitke.

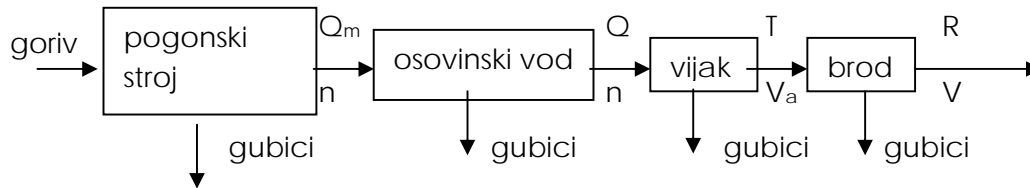
Slike 3.1 Prikazuje pad brzine na valovima za razna stanja mora.



Slika 3.1. Pad brzine na valovima za razna stanja mora

### 3.2. Propulzija i dodatni otpor

Brzina koju brod postiže osim o stanju mora ovisi i o hidrodinamičkim značajkama vijka, značajkama pogonskog stroja kao i o formi i nadgrađu broda.



Slika 3.2. Prikaz prijenosa energije

Kako je slikom 3.2 prikazano, moment potreban vijku mora biti u ravnoteži sa momentom koji predaje motor, dok poriv koji daje vijak mora biti u ravnoteži sa ukupnim otporom broda.

Odnosno:

$$Q_m(Q_0, n_0, c, n) = \frac{Q(V_a, n)}{\eta_m} \quad (3.8)$$

$$R_T(V, V_w, \alpha_w, H_{1/3}, T, \mu) = T(V_a, n)\{1-t(V, n)\}$$

Gdje su brzine  $V$  i  $V_a$  vezane su Taylor-ovim koeficijentom upijanja

$$V_a = V(1-w_T).$$

Sila poriva i moment za uvjete slobodne vožnje definirani su izrazima:

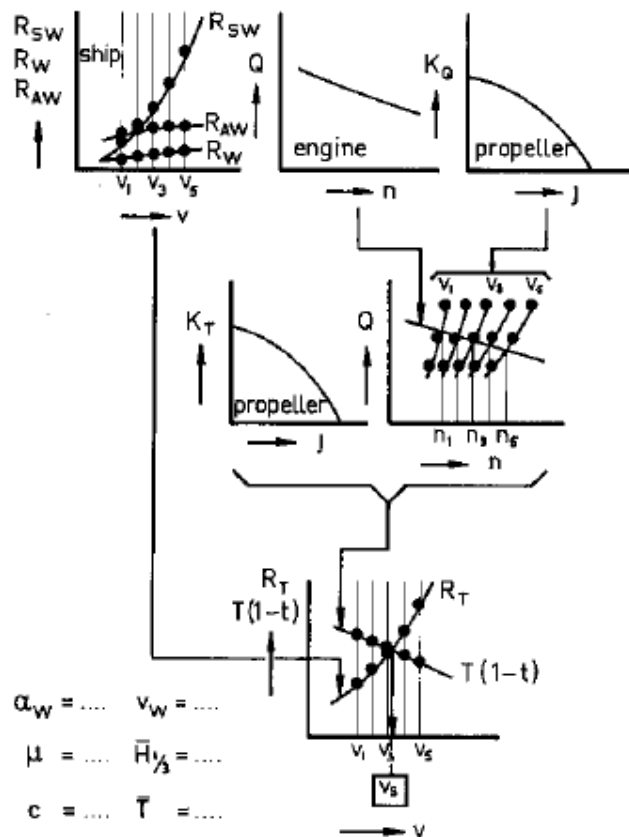
$$T = K_T \cdot \rho D^4 n^2, \text{ N} \quad (3.9)$$

$$Q = K_Q \cdot \rho D^5 n^2, \text{ Nm}$$

Koeficijenti  $K_T$  i  $K_Q$  ovise o broju krila vijka, odnosu površina vijka, omjeru uspona i

$$\text{koeficijentu napredovanja } J = \frac{V_a}{nD}$$

gdje su:  $N$  broj okretaja vijka o/s  
 $d$  promjer vijka, m.



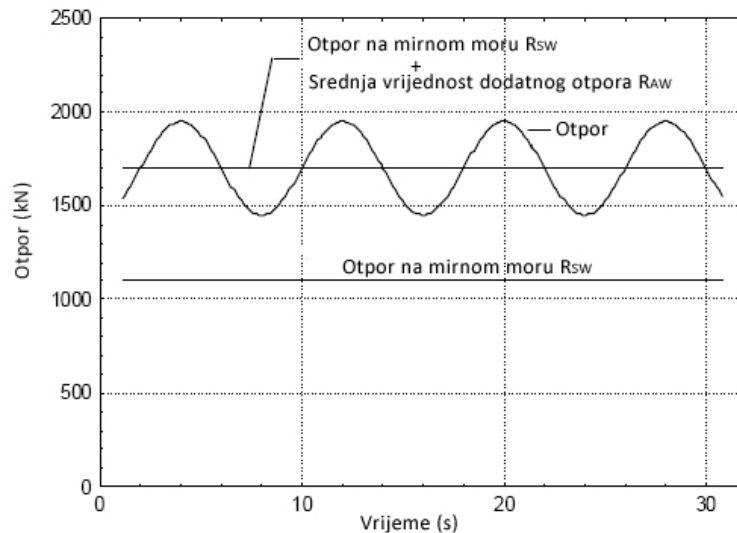
Slika 3.3. Prikaz proračuna ukupnog otpora

Uzimajući u obzir sve navedeno, proračun ukupnog otpora broda trebao bi imati slijed prikazan slikom 3.3. gdje se za zadane brzine računa potreban moment vijaka i odgovarajući moment motora. [3]

### 3.3. Porast otpora na harmonijskom valu

Slika 3.4 prikazuje otpor na pravilnim valovima u ovisnosti o vremenu. Razlikuje se konstantan dio otpora na mirnom moru te oscilirajući dio otpora od gibanja broda, relativno na nadolazeće pravilno valovlje. Srednja vrijednost porasta otpora u zadanom vremenu naziva se dodatni otpor na valovima,  $R_{AW}$ . [4]

Na raspolaganju je danas nekoliko teoretskih metoda koje predlažu proračun ove srednje vrijednosti dodatnog otpora broda na valovima i o njima će biti govora kasnije u ovom radu.



Slika 3.4 Povećanje otpora na harmonijskim valovima

### 3.4. Porast otpora na morskim valovima

Proračun otpora na morskim valovima se temelji na principu superpozicije harmonijskih komponenti iz valnog spektra.

Razmatra se frekvencijski raspon  $\Delta\omega_e$ , spektra energije nailaznih valova.

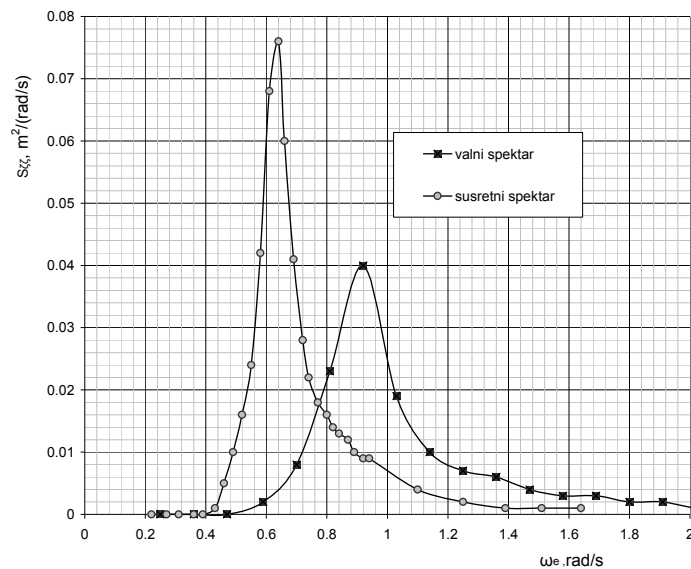
Zamijene li se na ovom malom frekvencijskom rasponu komponente vala sa jednim harmonijskim valom, amplituda tog harmonijskog vala mora biti:

$$\zeta_0 = \sqrt{2S_\zeta(\omega_e)\delta\omega_e} \quad (3.10)$$

Dodatni otpor uslijed ovoj jednog harmonijskog vala glasi:

$$2C_{AW}S_\zeta(\omega_e)\delta\omega_e, N \quad (3.11)$$

gdje  $C_{AW} = \frac{R_{AW}}{\zeta_0^2}$ , u  $N/m^2$  predstavlja funkciju odziva dodatnog otpora.



Slika 3.5 Valni i susretni spektar

Ako je srednja vrijednost dodatnog otpora za zadani frekvencijski raspon  $\Delta\omega$ :

$$\begin{aligned} \bar{R}_{AW} &= 2 \left| \frac{R_{AW}}{\zeta_a^2}(\omega_e) \right| \cdot \frac{1}{2} \zeta_a^2 = \\ &= 2 \left| \frac{R_{AW}}{\zeta_a^2}(\omega_e) \right| S_{\zeta}(\omega_e) \Delta\omega_e \end{aligned} \quad (3.12)$$

ukupna srednja vrijednost dodatnog otpora na morskim valovima slijedi nakon zbrajanja ili integracije po čitavom frekvencijskom rasponu:

$$\bar{R}_{AW} = 2 \sum_{\omega=0}^{\infty} \left| \frac{R_{AW}}{\zeta_a^2}(\omega_e) \right| S_{\zeta}(\omega_e) \Delta\omega_e \quad (3.13)$$

odnosno:

$$\bar{R}_{AW} = 2 \int_0^{\infty} \frac{R_{AW}}{\zeta_a^2}(\omega_e) S_{\zeta}(\omega_e) \cdot d\omega_e \quad (3.14)$$



### **3.5. Porast otpora od vjetra**

Brodovi sa velikim nadgrađima, kao putnički brodovi ili sa teretom na palubi, kao kontejnerski brodovi primjerice, osjećaju značajan utjecaj dodatnog otpora od vjetra. Isto tako ovdje valja spomenuti i brodove koji plove u balastu na malom gazu.

Valovi u pramac uglavnom dolaze sa vjetrom istog smjera koji povećava dodatni otpor, međutim ne postoji neposredna veza između stanja mora i stanja vjetra. Procjena dodatnog otpora od vjetra vezana za određeno stanje mora može se izraziti kroz najvjerojatniju brzinu vjetra.

#### 4. Metode proračuna porasta otpora broda na valovima

---

Dodatni otpor broda na valovima je nelinearna hidrodinamička sila drugog reda i njen proračun je stoga kompliciraniji od proračuna pojava koje su linearne. Prvu cjelovitu analizu dodatnog otpora na valovima je donio Maruo (1957., 1960. godine).

**Maruo** je iznio teoriju za proračun nelinearnih hidrodinamičkih sila koje djeluju na brod koji ne napreduje, nego se samo njiše na valovima. U obzir nije uzeto djelovanje difrakcije valova pa je ova metoda davala rezultate koji su premašivali vrijednosti dodatnog otpora u naravi pri nižim frekvencijama.

**Newman** 1970. godine daje matematičke formule za proračun srednje vrijednosti vertikalne sile i momenta na poluuronjeno tijelo koje se giba zadanom brzinom. **Strom-Tejsen** i grupa autora 1973. godine iznose detaljnu procjenu analitičkog očekivanja dodatnog otpora na valovima, što su potkrijepili sa rezultatima pokusa. **Salvensen** (1974., 1978.) je Newman-ove postavke povezao sa dvodimenzionalnim pristupom te je sile i momente drugog reda, koje djeluju na brod koji napreduje zadanom brzinom na valovima, opisao sa potencijalom prvog reda. **Boese**, također 1970.godine iznosi metodu gdje integracijom tlaka dolazi do dodatnog otpora, a **Gerritsma i Beukelman** 1972. godine daju teoriju koja izjednačava rad dodatnog otpora energijom sadržanom u valovima koji se šire od broda koji napreduje na valovlju. [5]

Danas svoju primjenu najčešće nalaze posljednje spomenute dvije metode.

Metodu integracije tlaka za proračun dodatnog otpora broda na valovima Boese je klasičnim hidrodinamičkim pristupom integracije uzdužnih komponenti oscilirajućih tlakova na oplakanu površinu trupa, došao do dodatnog otpora. Sile od tlaka koje djeluju na brod podijeljene su na dva dijela, na srednju vrijednost uzdužne sile i sile na poprečni presjek te dio od utjecaja vertikalnog nihanja broda.

Razlog ovome leži u primjeni vrpčaste teorije, koja u osnovi govori da nema uzdužnih utjecaja među odsječcima (e: *strips*).

Prijenosna funkcija srednje vrijednosti ukupnog dodatnog otpora prema Bose-u je [6]:

$$\frac{R_{aw}}{\zeta_a^2} = \frac{1}{2} \rho g \int_T \left( \frac{s_a}{\zeta_a} \right)^2 \frac{dy_w}{dx_b} dx_b + \frac{1}{2} \rho \nabla \omega_e^2 \frac{z_a}{\zeta_a} \frac{\theta_a}{\zeta_a} \cos(\varepsilon_{z\zeta} - \varepsilon_{\theta\zeta}) \quad (4.1)$$

Gdje je  $s = \zeta - z_x$  relativni vertikalni pomak.

Metoda rasipanja energije radijacijom (e: *radiated energy method*) za proračun dodatnog otpora broda na valovima koju su 1972. godine iznijeli su Gerritsma i Beukelman koja u samom svom nazivu krije i ideju koja govori da je rad dodatnog otpora jednak energiji sadržanoj u valovima radijacije stvorenih brodom koji se njiše na valovima. Više o ovoj metodi u narednom poglavlju.

## 5. Metoda rasipanja energije radijacijom

---

U ovoj metodi izjednačava se rad dodatnog otpora sa energijom sadržanom u valovima radijacije koji se šire od broda. Metoda se bazira na vrpčastoj teoriji i pogodna je za proračun dodatnog otpora za valove u pramac. [4]

Promatra se relativno njihanje karakterističnog presjeka odsječka na poziciji udaljenoj za  $x_{B1}$  od centra mase. Na morskoj površini ovaj pomak je dan sa:

$$r_3 = s_3 - \zeta \quad (5.1)$$

Gdje je  $s_3$  apsolutni pomak definiran kao:

$$s_3 = \eta_3 - x_{B1}\eta_5 \quad (5.2)$$

Hidrodinamička sila koja odgovara ovom pomaku, po metru duljine odsječka, može se izraziti kao:

$$\partial F_3 = \left[ (m' + a'_{33}) \ddot{r}_3 + \left( b'_{33} - U \frac{da'_{33}}{dx_{B1}} \right) \dot{r}_3 + c'_{33} r_3 \right], \text{ kN} \quad (5.3)$$

Kako je relativan pomak:

$$r_3 = r_{30} \sin(\omega_e t + \delta_{r3}), \text{ m} \quad (5.4)$$

Gdje su:  $r_{30}$  – amplituda pomaka

$\delta_{r3}$  – fazni pomak

Rad jednog odsječka za jedan period:

$$\partial E = \int_0^{T_e} \partial F_3 \partial r_3 dT_e = \pi \left( b'_{33} - U \frac{da'_{33}}{dx_{B1}} \right) \omega_e r_{30}^2, \text{ kN m} \quad (5.5)$$

Ukupan rad za čitav brod za jednog perioda, ako  $\partial x_{B1}$  teži nuli dobije se integracijom izraza (5.5) po duljini broda.

$$E = \pi \omega_e \int_0^L \left( b'_{33} - U \frac{da'_{33}}{dx_{B1}} \right) r_{30}^2 dx_{B1}, \text{ kN m} \quad (5.6)$$

Ovaj rad mora biti namiren od strane brodskog pogonskog stroja, ukoliko želimo da brod zadrži istu brzinu kako i za mirnog mora. Ukupni otpor broda jednak zbroju otpora na mirnom moru i dodatnog otpora uslijed valova. Kako je rad potreban da brod plovi preko jedne valne duljine:

$$E = R_{aw} \lambda, \text{ kN m}$$

sila dodatnog otpora uslijed valova je:

$$R_{aw} = \frac{\pi \omega_e}{\lambda} \int_0^L \left( b'_{33} - U \frac{da'_{33}}{dx_{B1}} \right) r_{30}^2 dx_{B1} \quad (5.7)$$

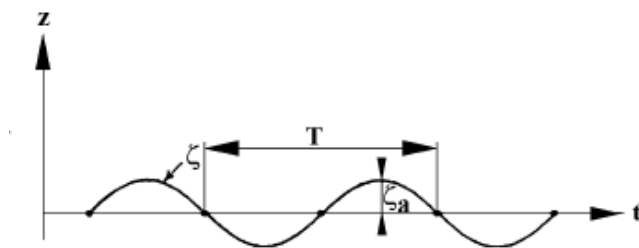
## 5.1. Proračun njihanja na harmonijskim valovima

Morski valovi definirani su kao suma harmonijskih valova:

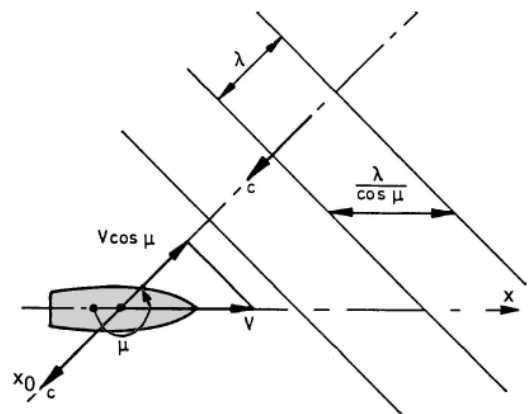
$$\zeta(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \zeta_{0n} \sin(k_n x - \omega_e t + \varepsilon_n) \quad (5.8)$$

gdje je  $\zeta_0$  amplituda vala,  $\varepsilon_n$  slučajni fazni pomak, a  $\omega_e$  susretna frekvencija koja ovisi o brzini napredovanja broda prema slijedećem izrazu:

$$\omega_e = \omega \left( 1 - V \frac{\omega}{g} \cos \mu \right) \quad (5.9)$$



Slika 5.1. Objašnjenje oznaka korištenih u proračunu



U gornjem izrazu  $\omega$  je prirodna frekvencija vala, a  $\mu$  kut nailaska broda na valove.

Rezultirajući pomaci broda su:

$$\eta_j = \eta_{j0} \sin(\omega_e t + \delta_j), \text{ m, (j = 1,3)} \quad (5.10a)$$

$$\eta_j = x_{j0} \sin(\omega_e t + \delta_j), \text{ rad (j = 4,6)} \quad (5.10b)$$

U usvojenoj notaciji indeksa  $j = 1,6$ , indeksi redom označavaju:

- 1 – zalijetanje,
- 2 – zanošenje,
- 3 – poniranje,
- 4 – ljuljanje,
- 5 – posrtanje i
- 6 – zaošijanje.

Amplitude pomaka  $\eta_{i0}$  i pomaci u fazi  $\delta_i$  su funkcija brzine, kuta nailaska na valove i susretne frekvencije  $\omega_e$ .

Apsolutni vertikalni pomak uslijed poniranja i posrtanja je:

$$s_3 = s_{30} \sin(\omega_e t + \delta_{s3}), \text{ m} \quad (5.11)$$

dok su njegove amplitude:

$$s_{30} = \sqrt{(\eta_{30} \cos \delta_3 - x_{B1} \eta_{50} \cos \delta_5)^2 + (\eta_{30} \sin \delta_3 - x_{B1} \eta_{50} \sin \delta_5)^2} \quad (5.12)$$

i faza:

$$\text{tg} \delta_{s3} = \frac{\eta_{30} \sin \delta_3 - x_{B1} \eta_{50} \sin \delta_5}{\eta_{30} \cos \delta_3 - x_{B1} \eta_{50} \cos \delta_5} \quad (5.13)$$

Ako se komponentu u izrazu (5.8) zapiše kao:

$$\zeta = \zeta_0 \sin(\omega_e t - Q), \text{ m} \quad (5.14)$$

gdje se uzima u obzir da izdizanje vala nije istodobno za pojedini odsječak, nego se događa sa faznim pomakom:

$$Q = kx_{B1} \cos \mu \quad (5.15)$$

Prema izrazu (5.1), kada se uvrste svi izrazi u (5.4), slijedi da je amplituda relativnog pomaka

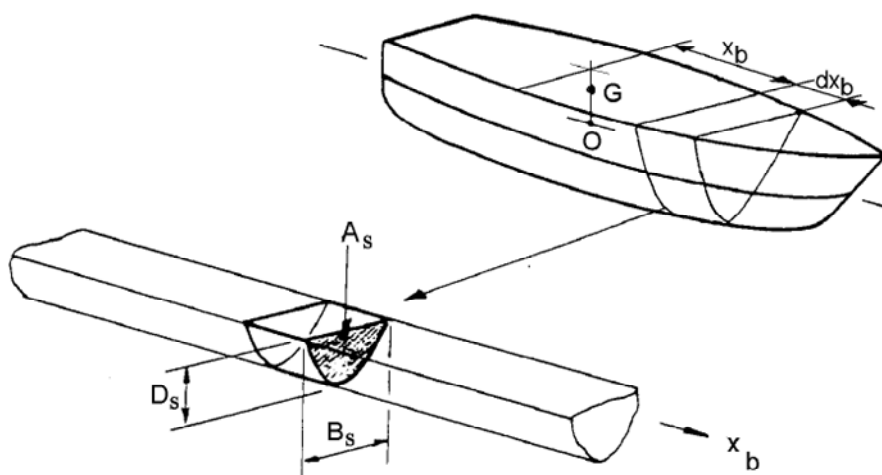
$$r_{30} = \sqrt{s_{30}^2 - 2s_{30}\zeta_0 \cos(\delta_{s3} + Q) + \zeta_0^2}, \text{ m} \quad (5.16)$$

i ukupni fazni pomak:

$$\operatorname{tg} \delta_{r3} = \frac{s_{30} \sin \delta_{s3} - \zeta_0 \sin Q}{s_{30} \cos \delta_{s3} - \zeta_0 \cos Q} \quad (5.17)$$

## 5.2. Vrpčasta metoda

Vrpčastom metodom se trodimenzionalna forma broda predstavlja nizom dvodimenzionalnih odsječaka kako je prikazano slikom 5.3 [4].



slika 5.3 Vrpčasta metoda

Za svaki odsječak, zamišljen kao dio beskonačnog cilindra, duljine  $\delta x_{B1}$  vezane su lokalne hidrodinamičke značajke, dodana masa, prigušenje i krutost, koje pridonose koeficijentima za čitavi trup u jednadžbi:

$$\sum_{j=1}^6 \left\{ \left[ M_{i,j} + A_{i,j}(\omega_e) \right] \cdot \ddot{x}_j(\omega_e, t) + B_{i,j}(\omega_e) \cdot \dot{x}_j(\omega_e, t) + C_{i,j}(\omega_e) \cdot x_j(\omega_e, t) \right\} = F_{wa_i}(\omega_e) \cdot \cos[\omega_e t + \varepsilon_i(\omega_e)] \quad (5.18)$$

gdje su za ovaj proračun značajni, redom koeficijent dodatne mase, prigušenja i krutosti:

$$\begin{aligned}
 A_{33} &= \int_L a_{33}(x, \omega_e) dx \\
 B_{33} &= \int_L b_{33}(x, \omega_e) dx \\
 C_{33} &= \rho g \int_L b dx
 \end{aligned}
 \tag{5.18a}$$

### 5.2.1. Primjena i ograničenja

Vrpčasta teorija prema Salvensenu, Tucku i Faltinsenu (1970) pretpostavlja da je: brod kruto i vitko tijelo, da je duljina broda znatno veća od širine ili gaza, brzina broda umjerena. Nadalje pretpostavlja se da je dubina mora znatno veća od valne duljine. Bitno ograničenje koje treba imati na umu je Forude – Krlov pretpostavka prema kojoj prisutnost trupa nema utjecaja na valove.

Prema STF (Salvesen, Tuck, Faltisen) metodi prvo se promatra brod na mirnoj vodi, zatim nailazi val i odbija se o trup broda – difrakcija, te nakon što je nailazni val pobudio brod na gibanje, brod sam odašilje valove – radijacija. Tako postoji osam potencijala brzine strujanja: potencijal brzine nailaznog vala, potencijal brzine difrakcijske komponente vala i šest potencijala brzine valova radijacije.

### 5.2.2. Koeficijenti u jednadžbi njihanja

Budući da se u proračunu dodatnog otpora prema metodi rasipanja energije radijacijom valova uzima u obzir samo njihanje broda u vertikalnoj ravnini, razmatramo brod koji ponire i posrće. Moment okolne tekućine u ravnini karakterističnog presjeka odsječka je:

$$M_3 = a_{33} \dot{x}_3, \text{ t m / s} \tag{5.19}$$

po metru duljine odsječka.



Sila koja je potrebna da se suprotstavi hidrodinamičkoj reakciji sačinjena je od promjene gore definiranog momenta u vremenu te od utjecaja koeficijenata prigušenja i krutosti:

$$\delta F_3 = \left( \frac{D}{Dt} (M_3) + b_{33} \dot{x}_3 + c_{33} x_3 \right) \delta x_{B1} \quad (5.20)$$

Gdje je

$$\frac{D}{Dt} (M_3) = \ddot{a}_{33} \dot{x}_3 + \dot{a}_{33} \ddot{x}_3 \quad (5.21)$$

po metru duljine odsječka.

Promjena dodatne mase:

$$\ddot{a}_{33} = \frac{d}{dx_{B1}} (\dot{a}_{33}) \dot{x}_{B1} = U \frac{d}{dx_{B1}} (\dot{a}_{33}) \quad (5.22)$$

po metru duljine odsječka.

Slijedi vertikalna sila, koja je usmjerena suprotno pozitivnom pomaku, odnosno osu  $z_{B1}$ , za pojedini odsječak analogijom koje se došlo do izraza (5.3):

$$\begin{aligned} \delta F_3 = & [\dot{a}_{33} (\ddot{x}_3 - x_{B1} \ddot{x}_5 + 2U \dot{x}_5) + \\ & + (b_{33} - U \frac{d\dot{a}_{33}}{dx_{B1}}) (\dot{x}_3 - x_{B1} \dot{x}_5 + Ux_5) + \\ & + c_{33} (x_3 - x_{B1} x_5)] \delta x_{B1} \end{aligned} \quad (5.23)$$

## 6. Ilustracija metode rasipanja energije radijacijom

---

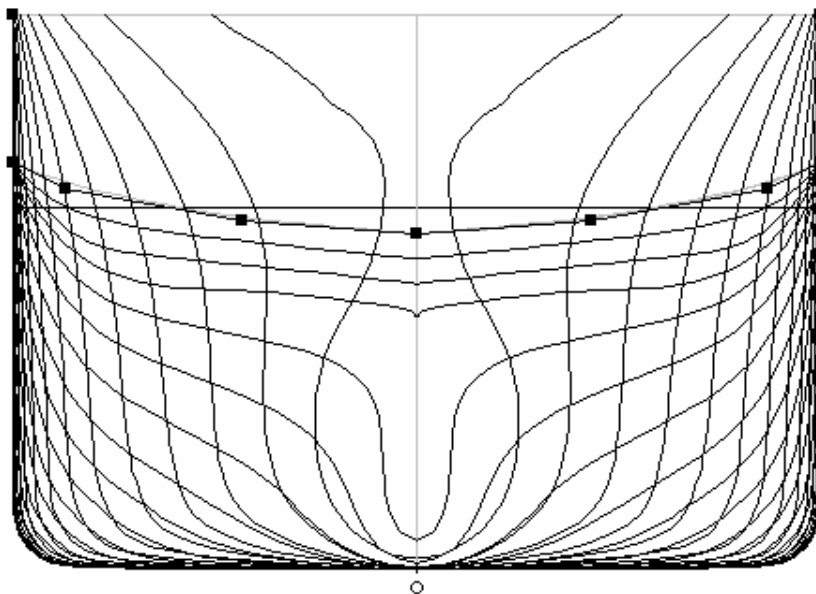
### 6.1. Analiza odabranog broda

Opisana metoda bit će ilustrirana na primjeru broda za prijevoz rasutog tereta, tipa handymax, m.b. Oluja. Brod je izgrađen u splitskom brodogradilištu Brodosplit – brodogradilište d.o.o. 1996. godine za dubrovačkog brodarka, Atlantsku plovidba d.d., u čijoj floti i danas plovi.

#### 6.1.1. Osnovne značajke broda

Osnovne značajke m.b. Oluja			
Duljina preko svega	$L_{oa}$	187.63	m
Duljina između okomica	$L_{pp}$	179.37	m
Širina	B	30.8	m
Visina	D	14.45	m
Gaz	T	10.97	m
Nosivost	DWT	50984	t
Koeficijent punoće	$C_B$	0.84	
Glavni stroj	MAN - B&W TYPE 5S 50 MC		
Snaga	$P_B$	7150	kW
Broj okretaja	n	127	o/min
Brzina	v	14.42	čv

Tablica 6.1. Osnovne značajke m.b. Oluja



Slika 6.1. Vodne linije

## 6.2. Opis softverske podrške

WAVESHIP iz paketa SESAM [7] je računalni program za hidrodinamičku analizu i proračunavanje opterećenja i odziva od valova, brodova i drugih vitkih pomorskih konstrukcija. WAVESHIP se može koristiti i kao dio programskog paketa SESAM i kako samostalna aplikacija. Razlika je u učitavanju ulaznih podataka, kroz model koji je već generiran u nekom drugom paketu ili kroz neposrednu ulaznu datoteku.

U ovom radu korišten je potonji pristup, a ulazne i izlazne datoteke se nalaze u prilogu.

WAVESHIP proračunava odziv na harmonijskom valu za brod koji napreduje zadanom brzinom, koristeći vrpčastu metodu prema Salvensenu, Tuck i Faltisenu. Vrpčasta metoda je linearna, što upućuje na pretpostavljanje malih amplituda te da su svi odzivi harmonijski i proporcionalni sa amplitudom nadolazećeg vala. U izlaznoj datoteci su dani, između ostalog, dodatna masa, prigušenje, uzbudne sile i pomaci za šest stupnjeva slobode gibanja.

Trup je modeliran podjelom na odsječke, koji su cilindri sa osi koja se prostire uzduž središnjeg presjeka trupa. Površina trupa na svakoj kontrolnoj površini, na

središnjici svakog odsječka, je definirana sa točkama koje daju koordinate površine trupa.

Za ilustrativni primjer izložen u nastavku, korišteni su rezultati hidrodinamičkih značajki koji su nadopunjeni relacijama koje čine osnovu proračuna porasta otpora na valovima prema metodi Gerritsma – Beukelman. Trup broda je modeliran sa dvadeset i jednim odsječkom, a distribucija masa broda preuzeta je iz knjige krcanja broda. Proračun je proveden za jednu brzinu napredovanja broda, odnosno jedan Froudeov broj,  $Fn = 0,159$  i jedan kut nailaska valova,  $\mu = 180^\circ$ , i deset valnih duljina,  $\lambda_{min} = 0,25L$ ,  $\lambda_{max} = 2,5L$ .

Računalni program SEAKEEPER [8] iz programskog paketa MAXSURF također proračunava dodatni otpor temeljem vrpčaste metode. Za već definiranu formu u osnovnom paketu, program, u vrlo jednostavnom grafičkom sučelju, daje mogućnost odabira stanja mora, promjene referentne točke, stanja krcanja, brzine napredovanja broda i kuta nailaska valova te sukladno tome i odzive, hidrodinamičke koeficijente i dodatni otpor. Metode za proračun dodatnog otpora koje su dane na odabir su dvije metode prema Gerritsma i Beukelmanu, koje se razlikuju u tome što je po prvoj proračun proveden na osnovi susretne frekvencije, a u drugoj na osnovi frekvencije vala. Valja imati na umu da obje metode vrijede samo za valove u pramac.

Osim po metodi Gerritsma i Beukelman, ovaj računalni program daje i opciju proračuna po metodi Salvensena, koja se temelji na proračunu uzdužne sile vala drugog reda koja djeluje na brod.

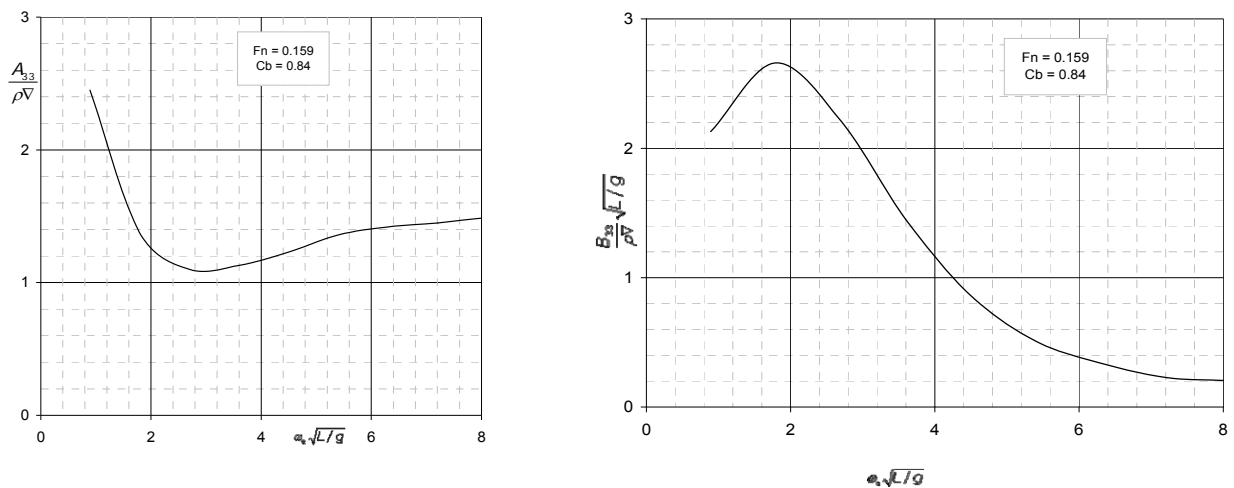
Zbog lakše manipulacije podacima za ovaj prvenstveno ilustrativni primjer korišteni su i podaci programa SEAKEEPER za nekoliko brzina napredovanja broda i smjera nailaska valova prema metodi Gerritsma i Beukelman na osnovi susretne frekvencije.

Za usporedbu rezultata ova dva pristupa dani su dijagramima 6.12. i 6.13.

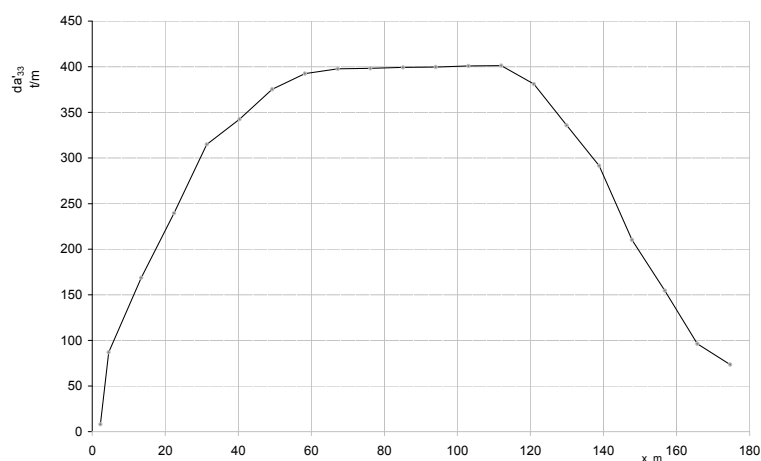
### 6.3. Proračun porasta otpora

Koristeći podatke izlazne datoteke računalnog programa WAVESHIP iz paketa SESAM, koeficijente dodatne mase, koeficijente prigušenja za svaki odsječak te pomake, prema metodi izloženoj u točki 5. slijedi proračun dodatnog otpora broda na valovima.

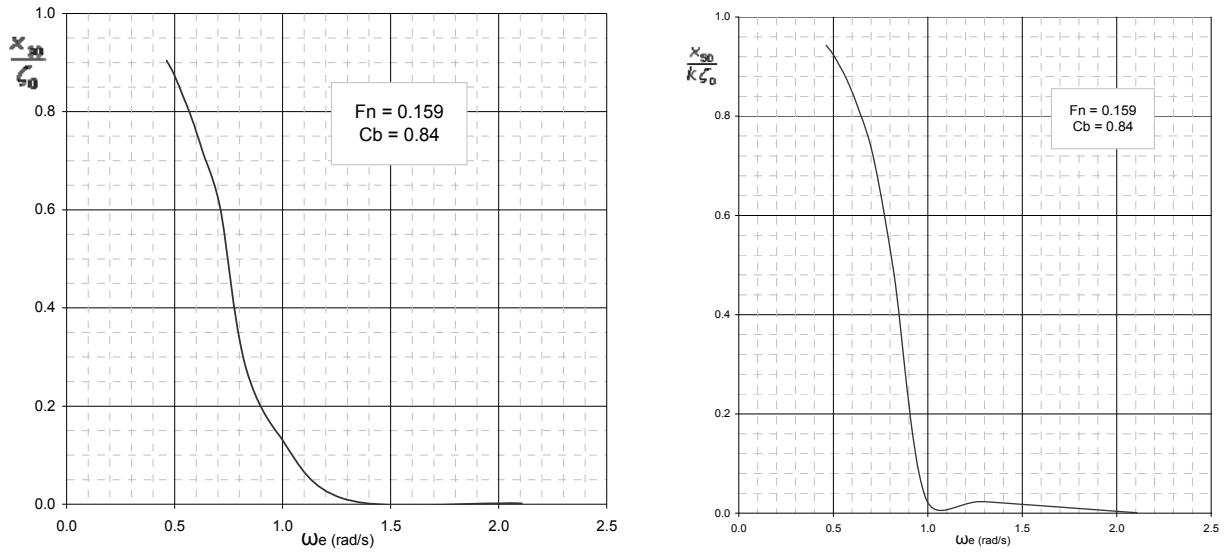
Na primjer, za smjer nailaska valova  $\mu = 180^\circ$  (valovi u pramac) i brzinu 13 čvorova, slijede hidrodinamičke značajke i prienosne funkcije poniranja i posrtanja, prikazane dijagramima 6.1 - 6.3



Dijagram 6.1 Hidrodinamički koeficijenti dodatne mase  $A_{33}$  koeficijenti prigušenja  $B_{33}$

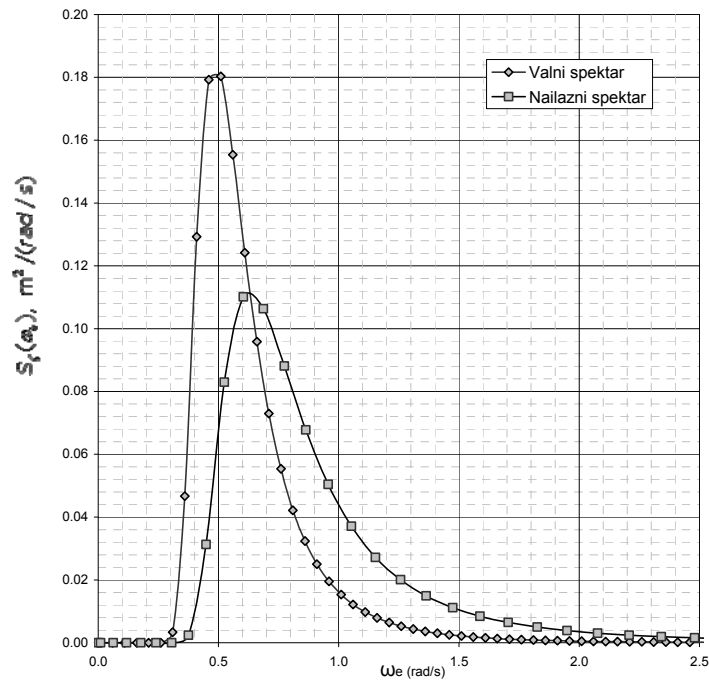


Dijagram 6.2 Prikaz promjene koeficijenta dodatne mase po duljini broda



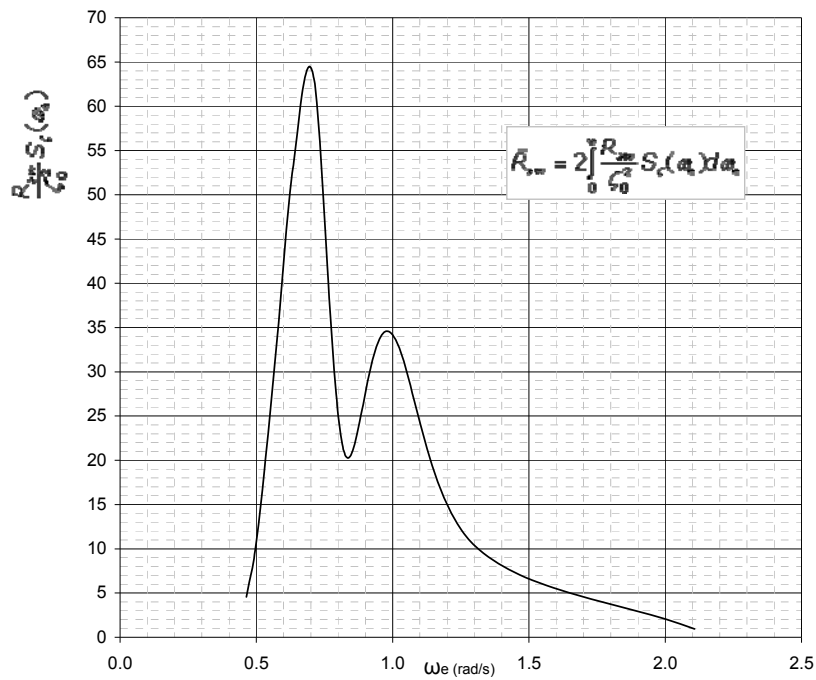
Dijagram 6.3 Prijenosna krivulja ponranja i posrtanja za  $\mu = 180^\circ$

Prema izrazu (5.7), odnosno (3.14) proračunava se dodatni otpor na harmonijskom valu, odnosno na morskim valovima.



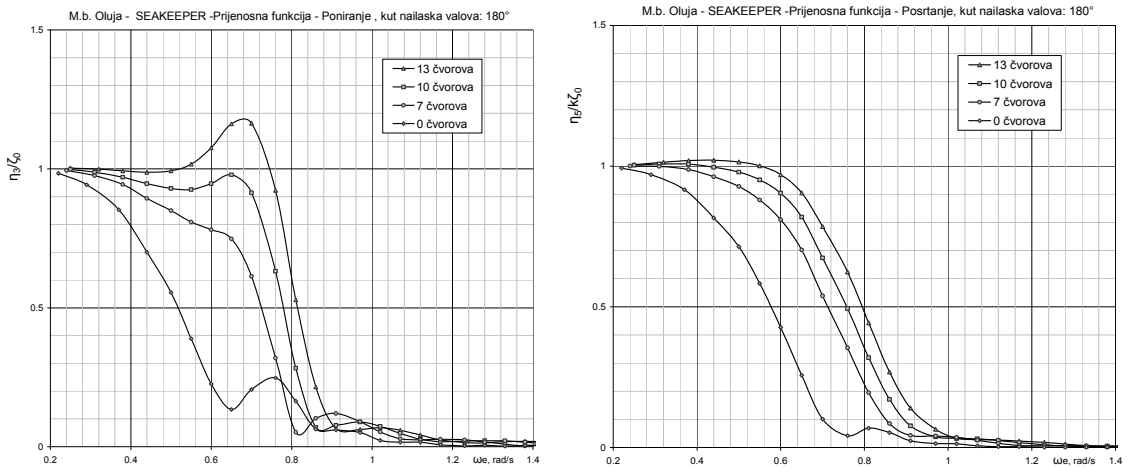
Dijagram 6.4 Spektar valne energije prema ITTC - Bretschneider,  $H_{1/3} = 1,0$  m,  $T_0 = 10,0$  s

Ukupni otpor broda na valovima prema Gerritsma i Beukelman za valove u pramac prikazan je dijagramom 6.5.

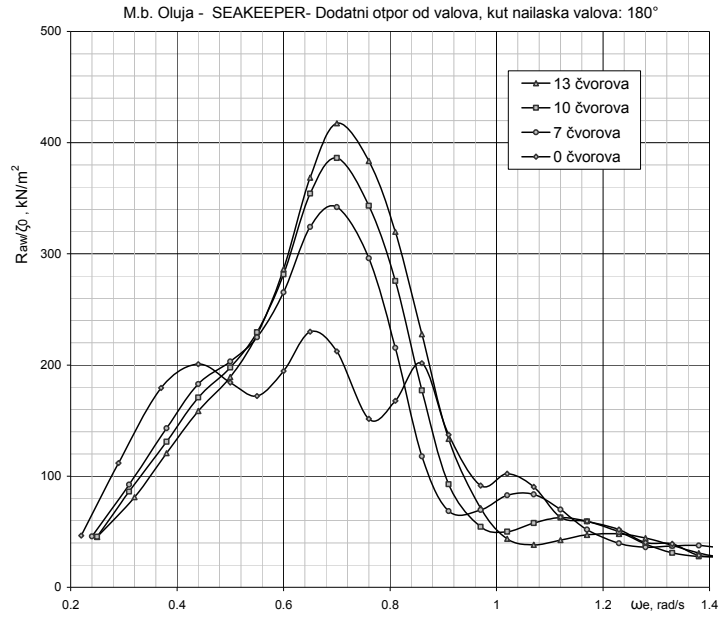


Dijagram 6.5 Prikaz ukupnog dodatnog otpora na morskim valovima

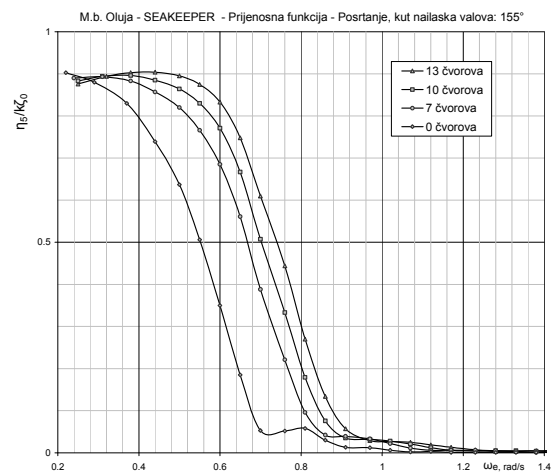
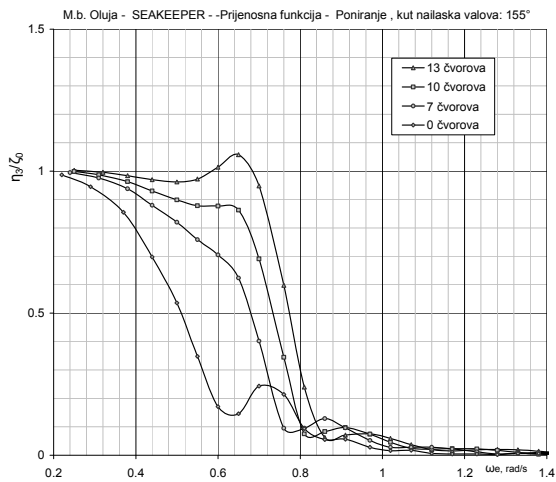
Slijede rezultati računalnog programa SEAKEEPER za nekoliko brzina napredovanja broda i smjera nailaska valova.



Dijagram 6.6 Prijenosna funkcija poniranja i posrtanja za kut nailaska valova  $\mu = 180^\circ$

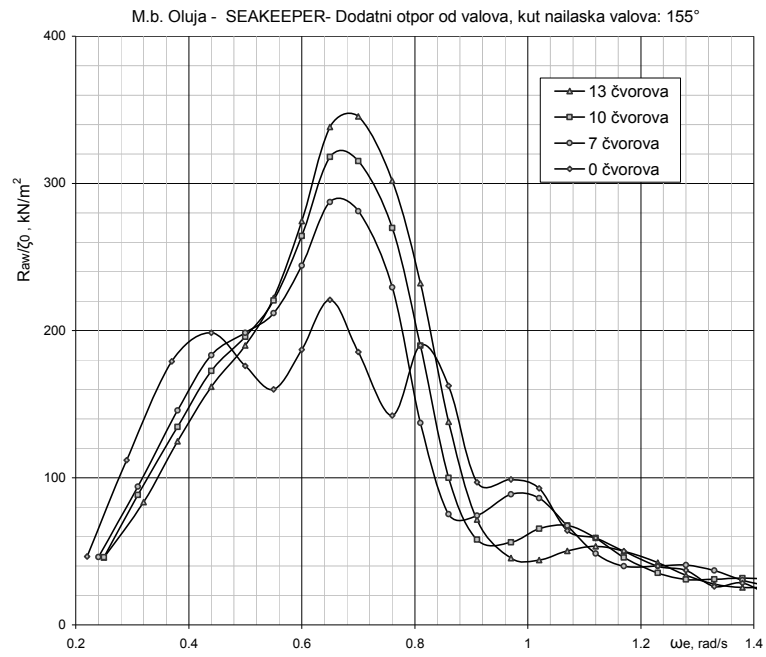


Dijagram 6.7 Funkcija odziva za dodatni otpor od valova za kut nailaska valova  $\mu = 180^\circ$

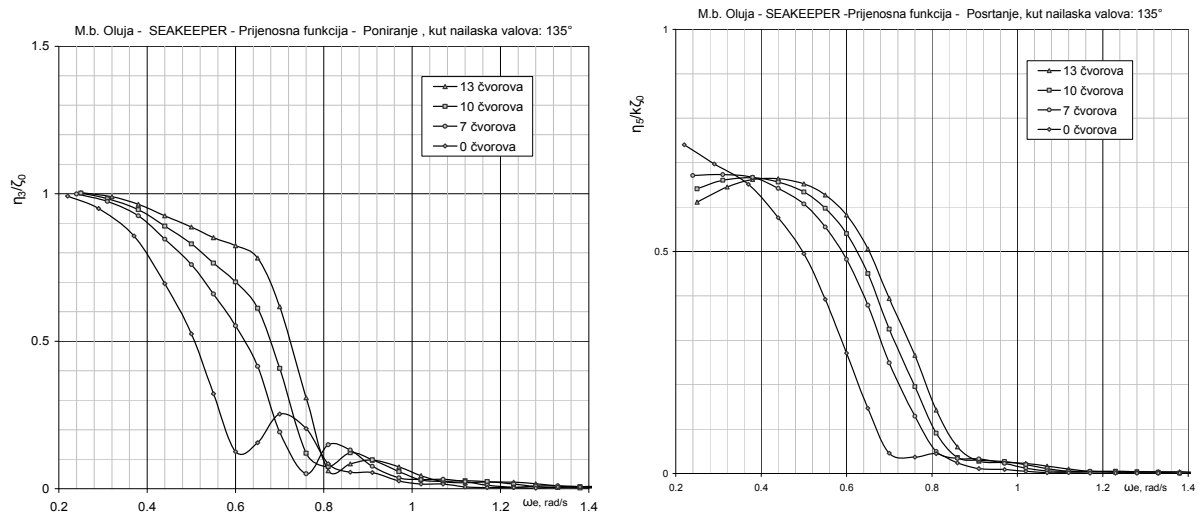


Dijagram 6.8 Prijenosna funkcija poniranja i posrtanja za kut nailaska valova  $\mu = 155^\circ$

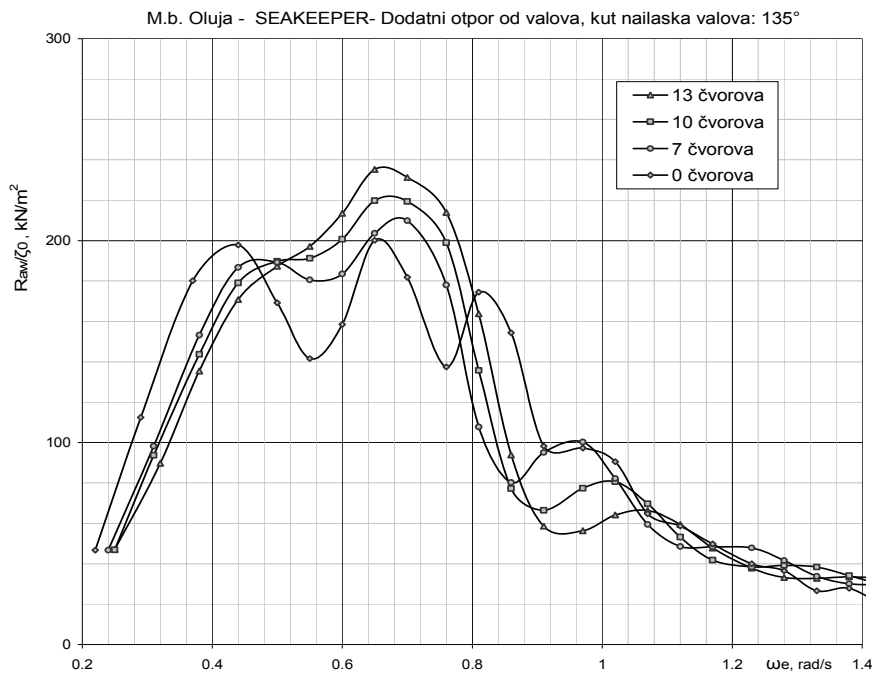




Dijagram 6.9 Funkcija odziva za dodatni otpor od valova za kut nailaska valova  $\mu = 155^\circ$

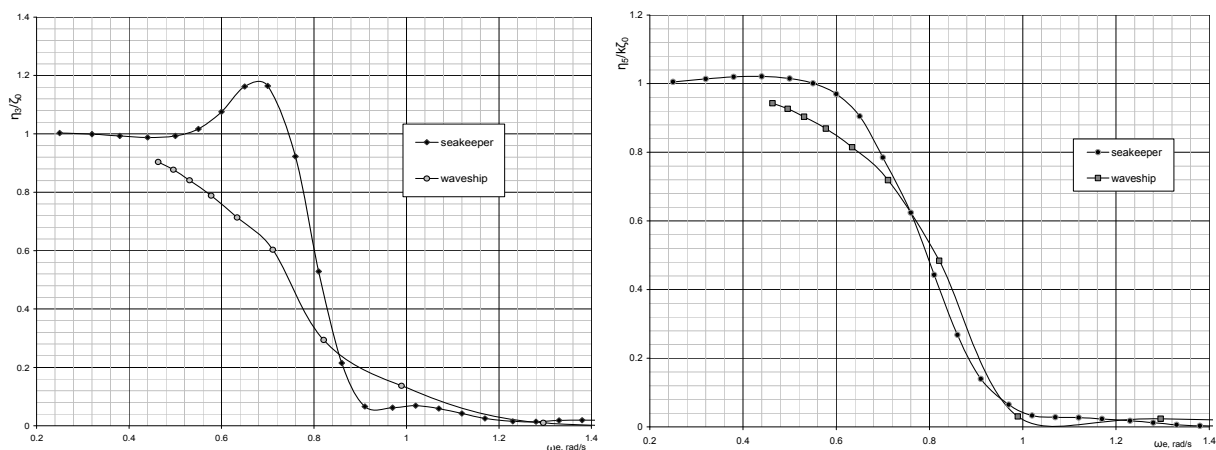


Dijagram 6.10 Prijenosna funkcija poniranja i posrtanja za kut nailaska valova  $\mu = 135^\circ$

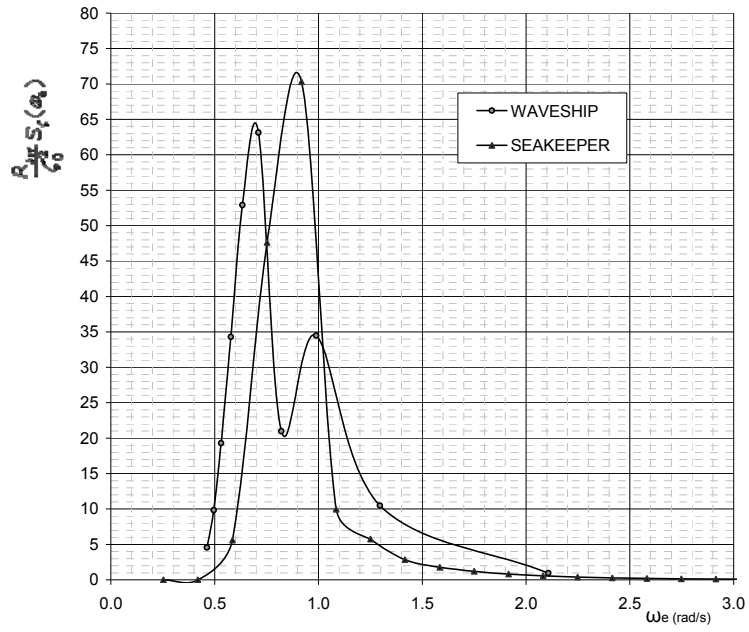


Dijagram 6.11 Funkcija odziva za dodatni otpor od valova za kut nailaska valova  $\mu = 135^\circ$

Za usporedbu dani su dijagram 6.12 i 6.13 koji prikazuju rezultate dodatnog otpora i prijenosnih krivulja poniranja i posrtanja, koji su proračunati koristeći hidrodinamičke značajke njihanja prema programu WAVESHIP koje su nadopunjene relacijama koje čine osnovu proračuna dodatnog otpora broda prema Gerritsma – Beukelman metodi i računalnog programa SEAKEEPER.



Dijagram 6.12 Usporedba prijenosnih funkcija prema proračunu dvaju računalnih programa



Dijagram 6.13 Usporedba dodatnog otpora dvaju korištenih računalnih programa

## **7. Analiza rezultata**

---

### **7.1. Opis realnih uvjeta prekoceanske plovidbe**

#### **7.1.1. Opis odabrane rute**

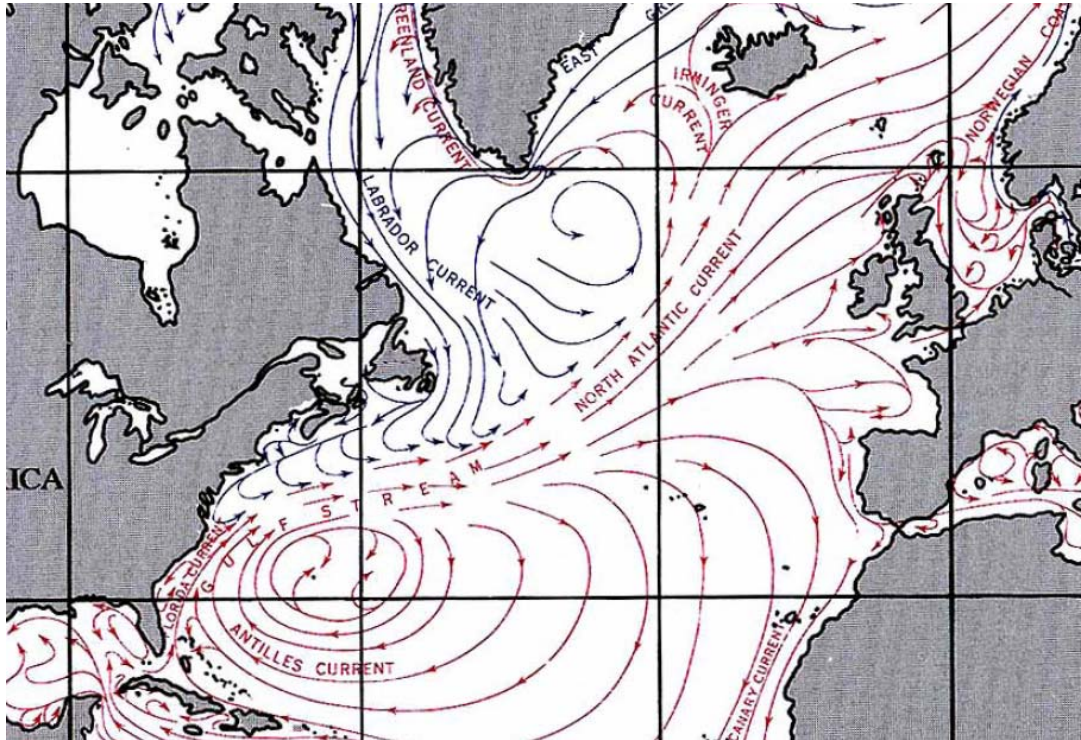
Za primjer je odabrana međukontinentalna ruta Antwerpen (Belgija) - Montreal (Kanada). Razlog za odabir ove rute, je u približenju realnim uvjetima, problema porasta otpora broda na valovima. Antwerpen je odabran kao jedna od vodećih europskih luka, kroz koju na godinu prođe i do 180 milijuna tona tereta. Montreal je luka koju još nazivaju i lukom u srcu kontinenta, međutim, razlog za njen odabir je prvenstveno dobivanje rute koja pokriva sjeverni Atlantik, a tako i jedno od najzahtjevnijih područja plovidbe.

### **7.2. Opis dostupnih podataka za vrijeme plovidbe**

Pomorcima su na raspolaganju razne karte i priručnici kojima se služe u navigaciji. Većina njih je nastala dugogodišnjim sakupljanjem podataka na osnovi mjerenja i iskustva plovidbe na rutama u pitanju. Najčešće su to atlas navigacijskih karata [8] koji sadrže podatke o morskim strujama, atmosferskom tlaku, temperaturama mora sa ucrtanim plovnim putovima za određeno doba godine. Časnicima na brodu ovo je osnovni izvor informacija na temelju kojeg odabiru plovni put.



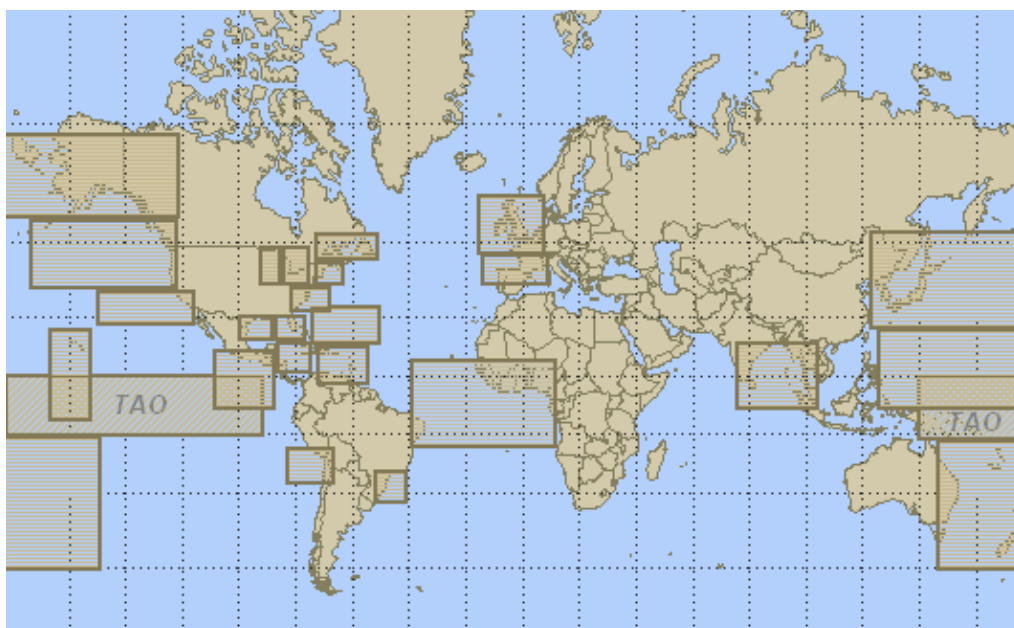




Slika 7.3 Izvadak iz publikacije Bowditch 2002 – National Imagery and Mapping Agenci (SAD) prikazuje morske struje na Atlantiku

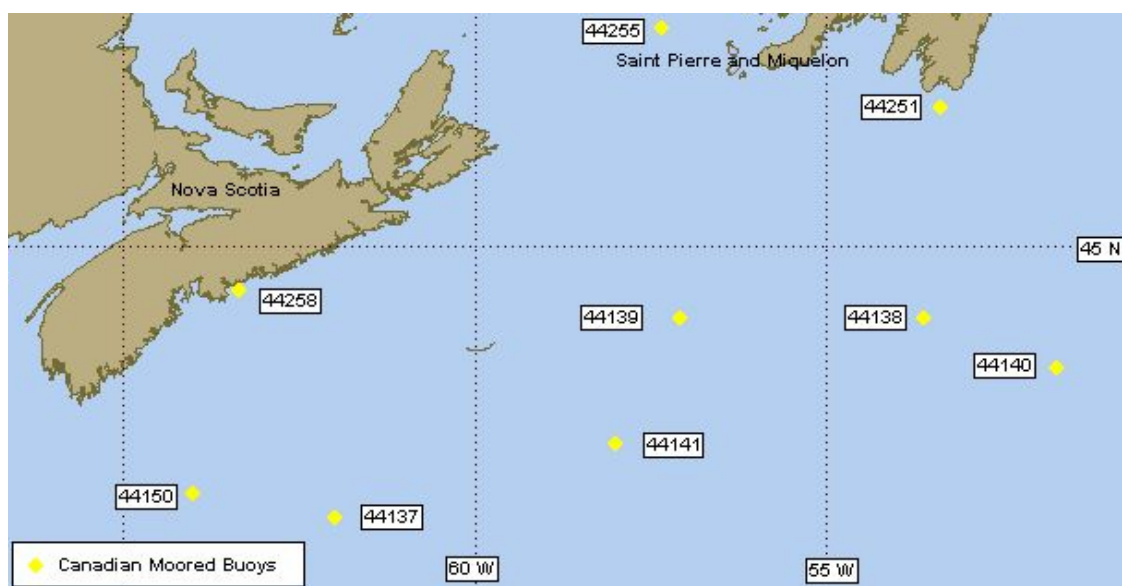
### 7.2.1. Aktualni meteorološki podaci

Nekoliko je meteoroloških institucija sa kojima posada broda komunicira za vrijeme plovidbe. Jedna od njih je NOAA – National Oceanic and Atmospheric Administration, odnosno njen odjel NWS – National Weather Service i NDBC - National Data Buoy Center, koje su pod vladom Sjedinjenih američkih država. Brodovima su na zahtjev dostupni meteorološki podaci koje NWS i NDBC sakupljaju od ostalih brodova koji se trenutno nalaze na poziciji u pitanju, plutača koje se nalaze na par stotina milja od obale ili sa platformi.

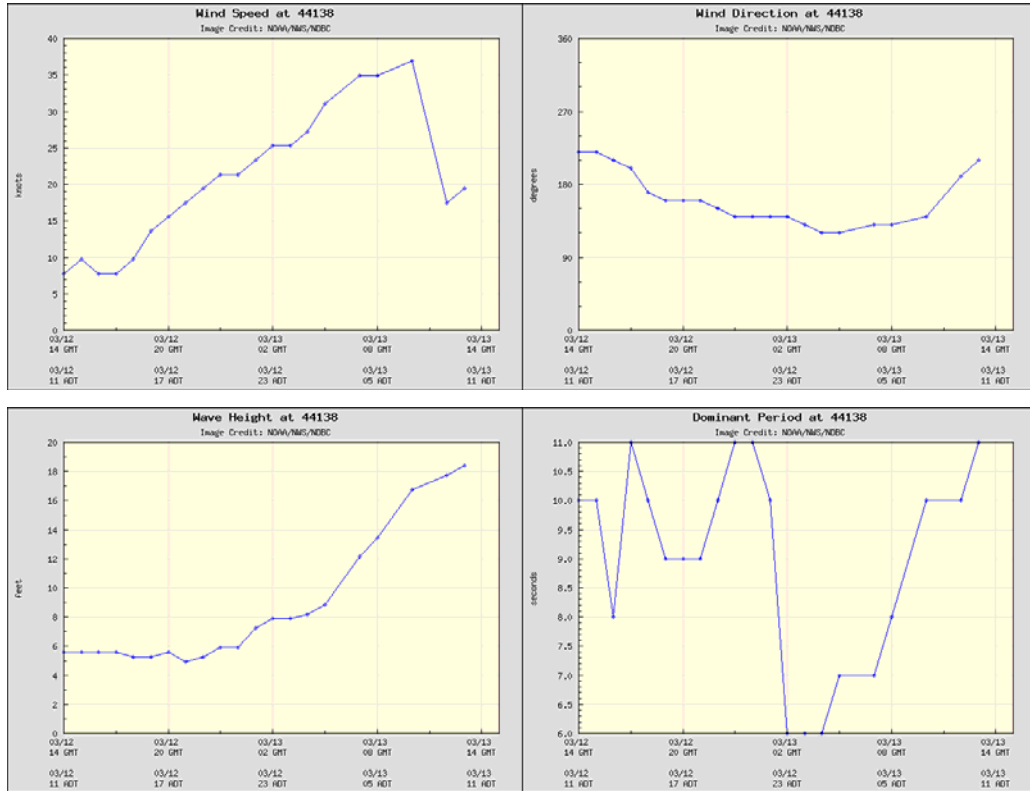


Slika 7.4 Prikaz područja koje pokriva NOAA

Podaci koje daje ova služba, u grafičkom obliku ili tablično svakih šest do dvanaest sati, za pojedinu stanicu ili brod su: smjer vjetera, brzina i naleti vjetera, značajna valna visina i dominantni period, atmosferski tlak, temperature zraka i mora. Također brod sam može sudjelovati u ovom prikupljanju podataka.

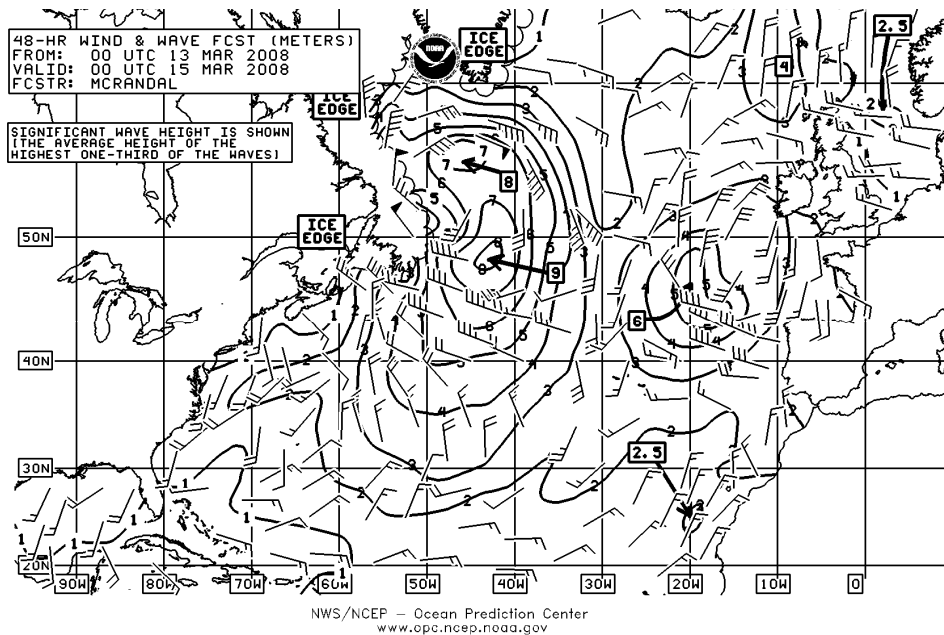


Slika 7.5 Prikaz stanica ispred kanadske obale



Slika 7.6 Prikaz podataka jedne mjerne stanice NOAA

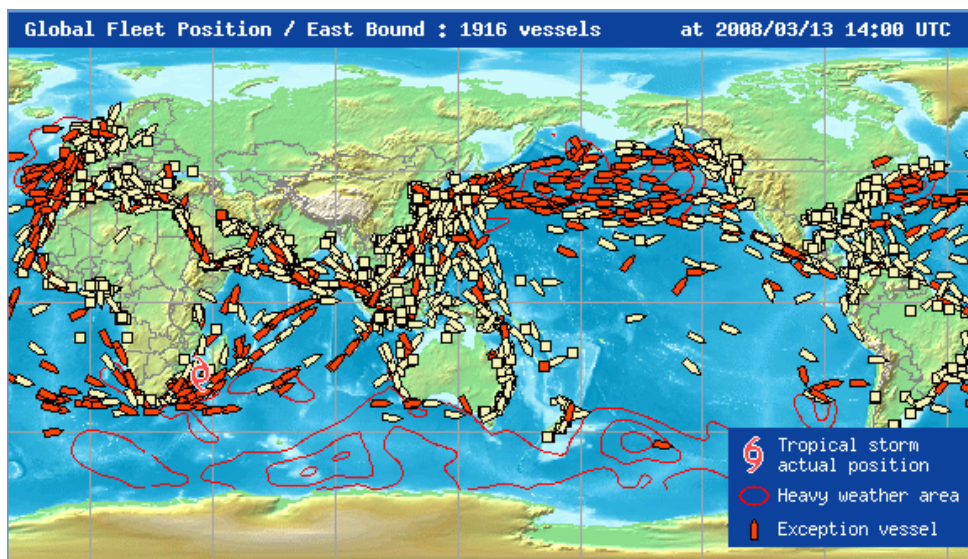
Dio NOAA je i Ocean Prediction Center – OPC zadužen za vremenske prognoze na Atlanskom i Tihom oceanu. Slika 7.5 prikazuje jednu kartu koju NOAA pruža kao jednu od svojih usluga.



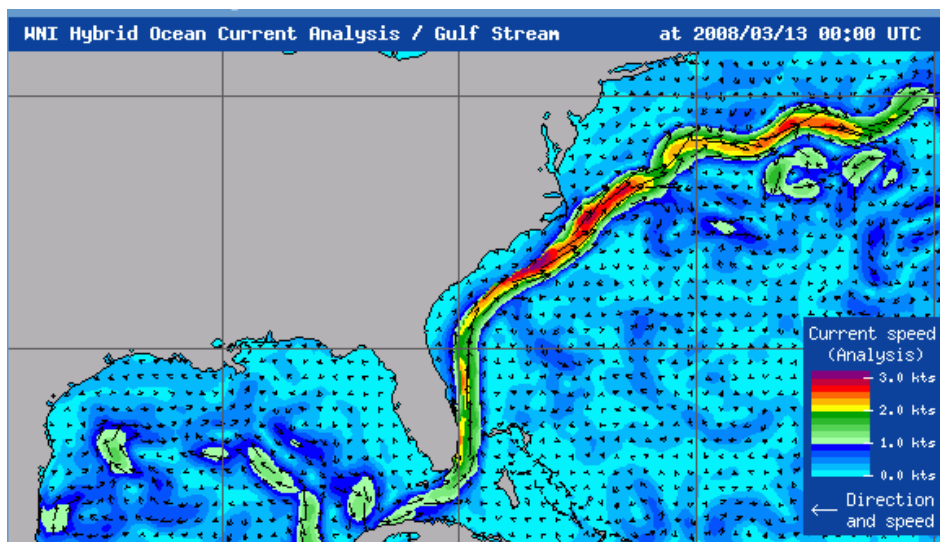
Slika 7.7 Primjer prognoze za narednih 48 sati OPC-a za sjeverni Atlantik



Osim meteoroloških podataka posada broda i brodar koriste i usluge institucija koje su specijalizirane za praćenje plovidbe. Primjerice Total Fleet Management Service je usluga Weathernews Inc., jedne od najvećih privatnih meteoroloških službi, koja nudi osim meteoroloških podataka i uslugu praćenja i optimiziranja plovidbe. Na početku svakog putovanja brod se javlja službi podacima o željenom odredištu i stanju broda (balast, stanje krcanja, teret na palubi...).



Slika 7.8 Trenutni položaj brodova koje prati Total Fleet Management Service



Slika 7.9 Trenutna analiza morskih struja na zapadnom Atlantiku

Ukoliko brod prati napatke službe, brodar u slučaju kašnjenja broda, u eventualnom pravnom sukobu sa vlasnikom tereta, procjenu službe može koristiti kao dokaz u svoju obranu.

Ovdje valja napomenuti kako morske struje imaju značajan utjecaj u odluci odabira plovnog puta.

### **7.3. Analiza pogonskih troškova i trajanja plovidbe**

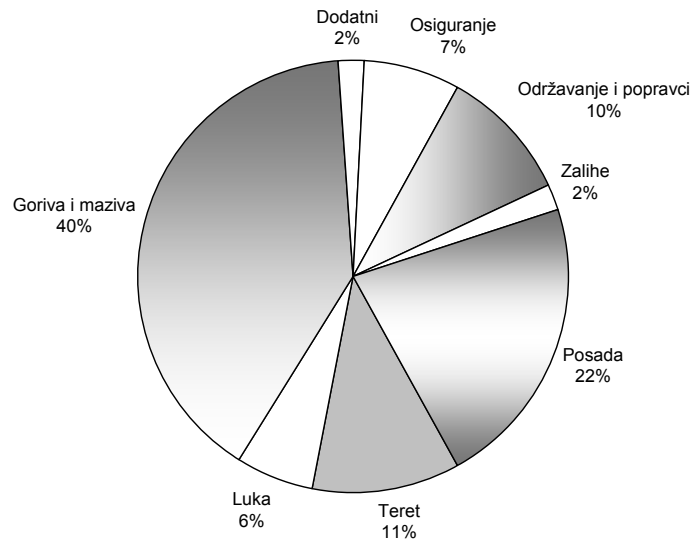
Odabir plovnog puta trgovačkog broda utjecat će na njegovu ekonomiju, kako vremenom trajanja plovidbe tako i troškovima koji za njenog trajanja nastaju. Troškove broda možemo razvrstati na operativne i kapitalne troškove.

#### **7.3.1. Operativni troškovi**

Operativni troškovi su svi oni troškovi koje stvara jedan brod, a ne uključuju kapitalne troškove. Operativni troškovi se mogu razvrstati na: troškove brodovlasnika, troškove plovidbe i na troškove tereta. Troškovi brodovlasnika su sačinjeni od troškova vezanih uz posadu (osobni dohodci posade, osiguranje, zalihe i sl.), vezanih uz održavanje i popravke (koje obavlja posada ili vanjski suradnik), troškove osiguranja broda i dodatne troškove. Troškove brodovlasnika je vrlo teško egzaktno povezati optimizacijom plovnog puta, ali veza je bjelodana. Primjerice kada brod plovi na nemirnom moru, konstrukcija će trpjeti veća naprezanja, čime će se povećavati vjerojatnost oštećenja, odnosno potrebe za popravcima. Sličan primjer nalazimo kada se govori o oplati i njenom premazivanju u svrhu postizanja što manjeg otpora trupa, kada se premazi više oštećuju nego kad brod plovi na mirnom moru. Dodatni troškovi na koje se brodovlasnik može odlučiti u svrhu poboljšanja poslovanja, može upravo biti i ulaganje u istraživanje optimizacije plovnog puta.

Troškovi plovidbe sačinjeni su od troškova goriva i maziva i od troškova koji nastaju u luci. Troškovi goriva su čvrsto vezani uz odabir plovnog puta. Kako je u prethodnim poglavljima objašnjeno, na valovima dodatni otpor broda podrazumijeva pad brzine i potraživanje povećanja izlazne snage motora. Povrh svega, vrijeme trajanja plovidbe se povećava, pa se i ukupna količina, tako i troškovi, goriva pogonskog stroja

povećavaju, a goriva i maziva za pomoćne strojeve i uređaje, koji ovise samo o trajanju plovidbe.



Dijagram 7.1 Prikaz operativnih troškova

### 7.3.2. Kapitalni troškovi

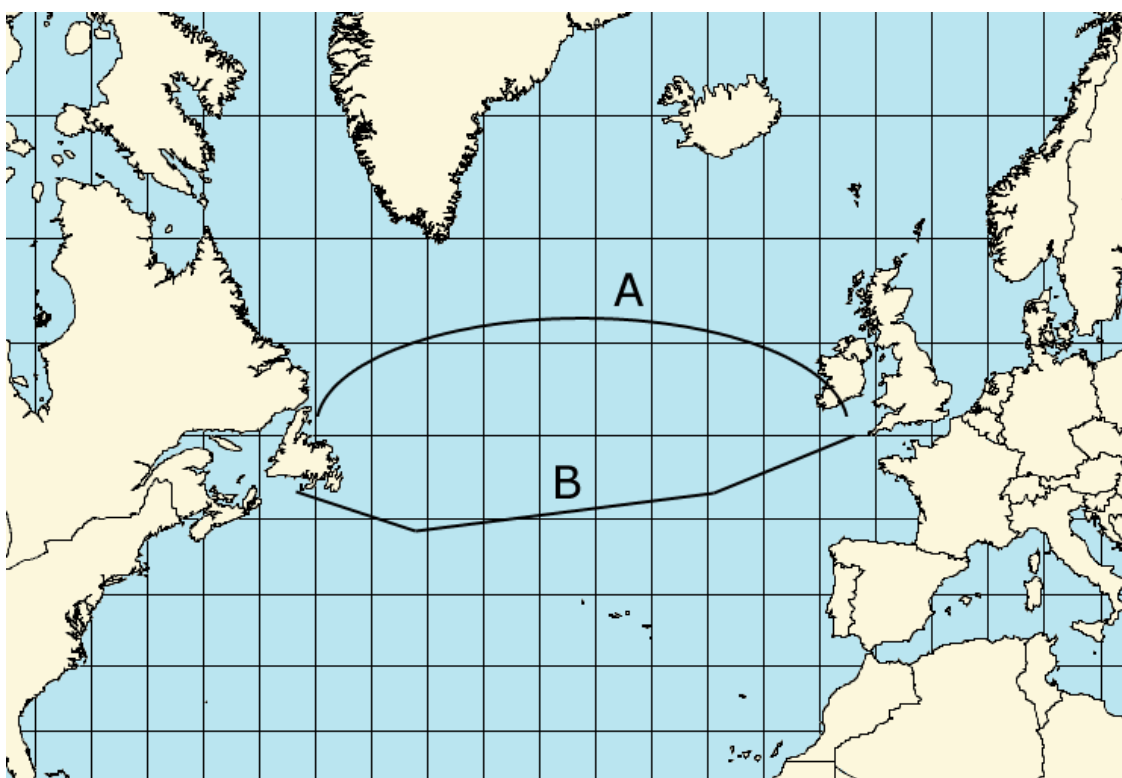
Naizgled, prema gore izloženom, kapitalni troškovi nisu neposredno vezani za odabir plovnog puta. Međutim ako se uzme u obzir brod koji za svog vijeka trpi manja oštećenja, izgledno je da će njegova tržišna vrijednost biti veća nego broda koji je pretrpio značajnija oštećenja.

## 7.4. Prijedlog organizacije plovidbe najpovoljnijom rutom

### 7.4.1. Određivanje rute

Za ovaj ilustrativni primjer odabrane su dvije rute:

- ruta A - ortodroma, putanja koja čini najkraću udaljenost između dvije točke na kugli. Ovdje valja napomenuti da je kod ručnog upravljanja iznimno teško ploviti po ortodromi, budući se kurs stalno mijenja, ako se ne plavi po paralelama ili meridijanima. (Slika 7.10)
- ruta B - zaobilazna ruta (Slika 7.10)



Slika 7. 10 Prikaz zamišljenih ruta A i B

#### 7.4.2. Proračun vremena putovanja i potrošnje goriva

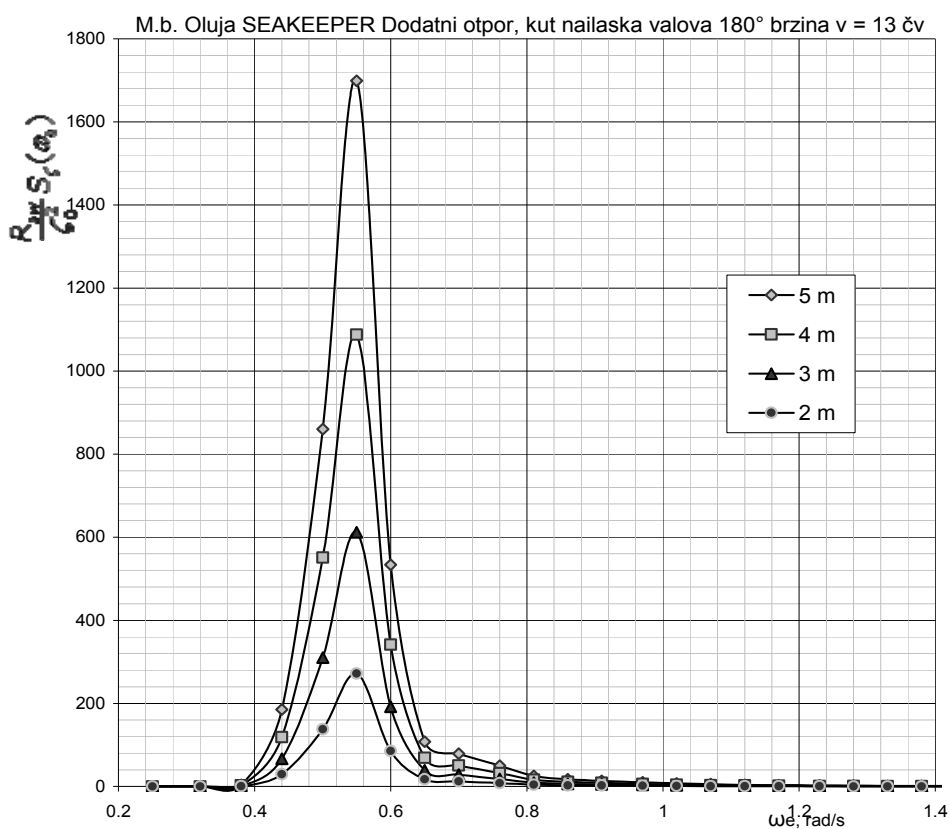
Za predložene dvije rute simulira se plovidba. Ovdje će se uzeti u obzir samo dio putovanja na otvorenom moru. Brod ploveći nailazi na razna stanja mora. Za ovaj ilustrativni primjer uzima se trenutna slika Atlantskog oceana kao vremenski stalna za vrijeme trajanja plovidbe, (slika 7.11). U proračun su uzeta ograničenja: značajne valne visine, valni periodi i smjer nailaska valova za pojedine dionice su konstantni, broj okretaja vijka se uzima konstantnim. Za slučajeve premašivanja 90% nominalne snage u račun ulazi pad brzine.



ruta A		Duljina plovnog puta	Značajna valna visina	Dodatni otpor	Dodatni utrošak snage	Vrijeme plovidbe	Potrošnja goriva
		nm	m	kN	kW	h	t/h
dionica	I	690.0	5	368.4	2463.6	53.1	1.2
	II	580.0	4	235.8	1576.8	44.6	1
	III	600.0	5	368.4	2463.6	46.2	1.2
	IV	620.0	4	235.8	1576.8	47.7	1
UKUPNO		2490.0				191.5	

ruta B		Duljina plovnog puta	Značajna valna visina	Dodatni otpor	Dodatni utrošak snage	Vrijeme plovidbe	Potrošnja goriva
		nm	m	kN	kW	h	t/h
dionica	I	300.0	5	368.4	2463.6	23.1	1.2
	II	850.0	4	235.8	1576.8	65.4	1
	III	1040.0	3	126.6	846.6	80.0	0.8
	IV	601.0	2	59.0	394.5	46.2	0.75
UKUPNO		2791.0				214.7	

Tablica 7.1. Analiza plovnih ruta A i B



Dijagram 7.2 Dodatni otpor na valovlju značajnih valnih visina od 2 do 5 metara

Optimizacija plovne rute bi se trebala provoditi na osnovu vremena trajanja plovidbe i na osnovi potrošnje goriva.

ruta	Ukupna duljina rute	Vrijeme trajanja plovidbe	Potrošnja goriva
	nm	dana	t/dan
A	2490.0	7.98	26.4
B	2791.0	8.95	21.4

Tablica 7.2. Usporedba vremena trajanja plovidbe i potrošnje goriva za rute A i B

## 8. Zaključak

---

Fenomenom porasta otpora broda u plovidbi na valovitom moru se osim pomoraca i brodara mora baviti i brodograđevna struka. Tek sa spajanjem ovih znanja možemo kvalitetno doprinositi razvoju, rješenju i primjeni rješenja ovog pitanja. Činjenica koju treba imati na umu je da more koje pomorac osjeća, hidrodinamički proračun idealizira.

U ovom radu je izložena prvenstveno metodologija kojom bi se problem porasta otpora broda u plovidbi na valovima mogao rješavati. Naglasak je dan na proračun porasta otpora uslijed valova i to samo prema jednoj od metoda. Iz izloženog se može zaključiti da će proračun za realne uvjete bit dugotrajan i mukotrpan. Međutim, osmišljavanjem i primjenom naprednih računalnih programa, vrijeme proračuna bi se znatno smanjilo, a točnost povećala.

Za složeniju analizu, kojom bi se približilo realnim uvjetima broda u plovidbi, potrebno je imati proračun koji bi u sebi sadržavao sintezu od rada glavnog stroja, propulzije do otpora broda na mirnom moru te konačno ponašanje i odziv broda na valovima. Proračun bi se nadalje trebao provoditi u realnom vremenu, za parametre koji su promjenjivi iz sata u sat, na osnovi kojeg bi se optimizirao plovni put u cilju smanjenja troškova goriva, vremena plovidbe i naravno povrh svega, povećanja sigurnosti posade, tereta i samog broda. Kako su iz dana u dan dostupne sve točnije meteorološke



prognoze, one u sprezi sa hidrodinamičkim simulacijama mogu davati odgovor časnicima na brodu, na pitanje odabira rute plovidbe.

Budući da je u ovom radu promatran jedan trgovački brod, a tome u prilog ide i činjenica da većina brodova danas i jesu iz trgovačke flote, nameće se i sveprisutni ekonomski aspekt ovog problema. Cijene goriva danas neumitno rastu i troškovi koji se mogu smanjiti odabirom plovnog puta nerijetko se postavljaju ispred sigurnosti posade, a tu cijenu, na sreću u ovom području ljudske djelatnosti, gorivo još nije doseglo.

## Literatura

---

- [1] Rawson, K.J., Basic Ship Theory, Butterworth – Heinemann, Oxford, UK, 2001.
- [2] Advances in marine hydrodynamics
- [3] Journé, J.M.J., Prediction of Speed and Behaviour of Ship in a Seaway, Report 0427-P, Delft University of Technology, Netherlands, 1976.
- [4] Lloyd, A.R.J.M., Ship Behaviour in Rough Weather, A R J M Lloyd, Hampshire, UK, 1998.
- [5] Gerritsma, J., Beukelman, W. Analysis of modified strip theory for the calculation of ship motion and wave bending moments, NSRC Report 96S
- [6] Journé, J.M.J., Offshore Hydrodynamics, Delft University of Technology, Delft, Netherlands, 2001.
- [7] DNV, Waveship, Sesam User's Manual, DNV, Høvik, Norway, 1993.
- [8] Formation Design Systems, Seakeeper User Manual, Formation Design Systems, 2004.
- [9] Atlas of Pilot Charts – North Atlantic Ocean, NVPUB106, National Imagery and Mapping Agency, USA, 2002.
- [10] Bowditch, N.L.D., The American Practical Navigator, National Imagery and Mapping Agency, USA, 2002.
- [11] Arribas, F.P., Some methods to obtain the added resistance of a ship advancing in waves, Science Direct, doi:10.1016, 2006.
- [12] Fang, M.-C., Chen, G.-R., On the nonlinear hydrodynamic forces for a ship advancing in waves, Science Direct, doi:10.1016, 2005.
- [13] Sambolek, M., Prijevod tablica simbola na hrvatski jezik – ITTC symbols, Brodarski institut, Zagreb.

## Prilozi

---