

# Hidrodinamika broda s primjerom povećanja otpora broda za prijevoz tekućih tereta

---

**Selestrin, Toni**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2018**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Split, Faculty of Maritime Studies / Sveučilište u Splitu, Pomorski fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:164:340460>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-12-27**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository - Faculty of Maritime Studies - Split -  
Repository - Faculty of Maritime Studies Split for  
permanent storage and preservation of digital  
resources of the institution](#)



**SVEUČILIŠTE U SPLITU**

**POMORSKI FAKULTET U SPLITU**

**TONI SELESTRIN**

**HIDRODINAMIKA BRODA S  
PRIMJEROM POVEĆANJA OTPORA  
BRODA ZA PRIJEVOZ TEKUĆIH TERETA**

**DIPLOMSKI RAD**

**SPLIT, 2018.**

**SVEUČILIŠTE U SPLITU**  
**POMORSKI FAKULTET**  
**STUDIJ: POMORSKA NAUTIKA**

**HIDRODINAMIKA BRODA S**  
**PRIMJEROM POVEĆANJA OTPORA**  
**BRODA ZA PRIJEVOZ TEKUĆIH TERETA**

**DIPLOMSKI RAD**

**MENTOR:**  
**prof. dr. sc. Izvor Grubišić**

**STUDENT:**  
**Toni Selestrin**  
**(MB:0171243710)**

**SPLIT, 2018.**

## SAŽETAK

Hidrodinamika kao znanost proučava gibanje tekućina zajedno s uzrocima zbog kojih gibanje nastaje. Otpor broda je sila koja nastaje prilikom gibanja broda kroz fluid pri određenoj brzini. U radu se objašnjavaju uzroci i posljedice određenog otpora na brod. Otpori se proučavaju na mirnom moru zbog jednostavnijeg razumijevanja njihovog djelovanja. Tokom rada objašnjavaju se utjecaji valovitog mora, ponašanje broda na valovima i posljedice dodatnog otpora valova. Dodatni otpor valova promatra se u dva različita stanja broda: potpuno nakrcanom i balastnom. U svrhu ponašanja broda na valovima provedeno je praktično istraživanje i bilježeni su podaci na tankeru za prijevoz ulja i kemikalija u navigaciji.

**Ključne riječi:** *hidrodinamika, otpor broda, dodatni otpor valova, tanker za ulja i kemikalije*

## ABSTRACT

Hydrodynamics as a science studies the motion of the fluid together with the causes of motion. The resistance of a ship is the force which occurs during motion of the ship through the fluid at a specified speed. This study explains the causes and consequences of a certain resistance to the ship. All resistance of the vessel is explained on calm sea for easier understanding. This study explains the influence of rough seas, behavior of the ship on the waves and the consequences of additional wave resistance. Added wave resistance was evaluated in two draft conditions: full load and ballast. For this purpose practically research was carried out and data recorded on the oil/chemical tanker in real navigation.

**Keywords:** *hydrodynamics, ship resistance, added wave resistance, oil/chemical tanker*

# SADRŽAJ

1.	UVOD.....	1
2.	OTPOR BRODA .....	2
2.1	OPĆENITO O OTPORU BRODA.....	2
2.2	VRSTE OTPORA.....	2
2.2.1	Otpor trenja.....	3
2.2.2	Otpor valova .....	4
2.2.3	Otpor vrtloženja.....	6
2.2.4	Otpor zraka .....	7
2.3	UTJECAJ PRAMČANOG BULBA NA OTPOR BRODA.....	8
3.	PROPULZIJA BRODA.....	10
3.1	SNAGA I ISKORISTIVOST PROPULZIJE.....	10
3.2	OPĆENITO O VIJKU KAO PORIVNOM SREDSTVU BRODA.....	11
3.2.1	Dijelovi i geometrija vijka.....	12
3.2.2	Vijci sa fiksnim usponom.....	14
4.	POMORSTVENOST BRODA.....	15
4.1	MORSKI VALOVI I ELEMENTI VALOVA .....	15
4.2	PROMJENA BRZINE BRODA NA VALOVIMA .....	17
4.3	PONAŠANJE BRODA NA VALOVIMA .....	18
4.4	LJULJANJE BRODA NA VALOVIMA .....	20
4.5	PORAST OTPORA BRODA NA VALOVIMA.....	21
4.5.1	Metode proračuna porasta otpora broda na valovima .....	22
5.	UPRAVLJIVOST BRODA.....	23
5.1	UTJECAJ VIJKA NA UPRAVLJIVOST BRODA .....	23
5.1.1	Sila zapljuskivanja kormila .....	23
5.1.2	Sila zapljuskivanja krme.....	24

5.1.3	Sila otpora vijka.....	24
5.2	PRINCIP RADA KORMILA I UTJECAJ NA UPRAVLJIVOST BRODA .....	25
6.	KARAKTERISTIKE BRODA KORIŠTENOG ZA IZRADU RADA .....	27
6.1	GLAVNE ZNAČAJKE I NAMJENA .....	27
6.2	POGONSKI UREĐAJ, PROPULZOR I KORMILO.....	29
7.	PONAŠANJE BRODA NA VALOVIMA, PRIKAZ NA PRIMJERU .....	30
8.	ZAKLJUČAK.....	32
	POPIS SLIKA.....	33
	POPIS TABLICA.....	34
	LITERATURA .....	35

## 1. UVOD

Brod je tijekom cijelog svog radnog vijeka izložen utjecaju mora. Grana znanosti koja proučava kretanje/gibanje broda kroz more naziva se *hidrodinamika broda*.

Hidrodinamika kao znanost proučava gibanje tekućina zajedno s uzrocima zbog kojih gibanje nastaje, to jest sila koje djeluju na tekućinu. Ona proučava ovisnost tih sila i kretanja nastalog pod djelovanjem sila.

Brod se u plovidbi kreće kroz dva različita medija, zrak i vodu, koji su različite gustoće. Svaki od tih medija predstavlja zaseban otpor koji svaki brod treba savladati da bi se mogao kretati. Ono što dodatno opterećuje brodsku konstrukciju i povećava ukupni otpor broda jest to što se brod kreće i po valovitom moru.

U radu se objašnjavaju uzroci nastanka i posljedice određenog otpora na brod. Otpori se ponajprije proučavaju na mirnom moru zbog jednostavnijeg razumijevanja njihovog djelovanja. Tokom rada se objašnjavaju utjecaji valovitog mora te ponašanje samog broda na valovima kao i posljedice dodatnog otpora valova. U svrhu ponašanja broda na valovima provedeno je istraživanje i bilježeni su podaci na realnom brodu u navigaciji. Objašnjava se i utjecaj djelovanja vijka, propulzora, i kormila na hidrodinamička svojstva broda.

Za izradu rada korišteni su podaci prikupljeni tokom navigacije broda za prijevoz ulja i kemikalija (engl. *oil chemical tanker*). Podaci su prikupljeni za nakrcani brod kao i za brod u balastnom stanju te su zabilježeni parametri koji utječu na njegovo ponašanje na valovima.

## 2. OTPOR BRODA

Otpor broda prilikom kretanja jest sila koja se suprotstavlja kretanju broda. Prilikom kretanja brod uzrokuje poremećaje medijima kroz koji se kreće, vodi i zraku. Otpor broda proučava pojave koje se događaju prilikom jednolikog pravocrtnog gibanja kroz tekućinu. Ovisno o uzroku nastanka određenog otpora možemo ga promatrati kao otpor trenja, valova, vrtloženja i izdanaka. U ovom poglavlju su opisani uzroci i posljedice na brod određene vrste otpora.

### 2.1 OPĆENITO O OTPORU BRODA

Otporom nazivamo silu koju brod mora savladati da bi se pravocrtno gibao kroz vodu jednolikom brzinom. Sila potrebna za održavanje jednolike brzine bez upotrebe propulzora nazivamo silom tegljenja. Ona djeluje na brod u suprotnom smjeru od pravca kretanja broda. Prilikom konstrukcije broda osnovna zadaća je konstruirati formu trupa koja će omogućiti što manji otpor podvodnog dijela. Sila koja je potrebna za svladavanje otpora, vode i zraka, nazivamo porivnom silom. Porivnu silu proizvodi pogonski stroj, odnosno propulzor pod utjecajem snage pogonskog stroja. [13]

Pogonski stroj povećava ukupni otpor broda te je ukupni otpor broda u plovidbi veći od otpora broda koji se tegli. Ukoliko je podvodni dio broda čist od obraslina, govorimo o otporu golog trupa broda (*engl. Bare-hull resistance*). Prema tome, efektivnom snagom (*engl. Effective power*) nazivamo onu snagu pogonskog stroja koja je potrebna da se savlada otpor golog trupa broda. Efektivna snaga računa se prema sljedećoj formuli:

$$P_E = R_T \times V_S \quad (1)$$

gdje je:

$P_E$  – efektivna snaga, kW

$R_T$  – ukupni otpor, kN

$V_S$  – brzina broda, m/s

### 2.2 VRSTE OTPORA

Ukupni otpor broda sastoji se od više različitih komponenti koje uzrokuju različiti faktori u međusobnom djelovanju. Odnos tih faktora je veoma složen i da bi ga se



jednostavnije razjasnilo promatra se brod na potpuno mirnoj vodi. Ukupni otpor broda na mirnoj vodi možemo podijeliti na sljedeće vrste otpora: [10]

- Otpor trenja (engl. *frictional resistance*)
- Otpor valova (engl. *wave-making resistance*)
- Otpor vrtloženja (engl. *Eddy resistance*)
- Otpor zraka (engl. *air resistance*)

Otpor valova i zraka se u literaturi često naziva i preostalim otporom (engl. *residuary resistance*).

### 2.2.1 Otpor trenja

Ako pri kretanju broda pogledamo okomito prema vodenoj liniji, pri samom trupu, primijetit ćemo uzduž broda vrtloge vode koji se nalaze cijelo dužinom trupa. Ti vrtlozi su uzrokovani kretanjem broda i otporom trenja. Vrtlozi su donekle stabilni te ovisno o njihovom uzroku kraće ili duže vrijeme prate brod. Ispitivanjem je ustanovljeno da se čak i kod novogradnji, sa izrazito glatkim trupom, pojavljuju virovi vode i da otpor trenja iznosi između 80% i 85% ukupnog otpora kod sporih brodova, a kod brzih brodova 50% ukupnog otpora.

Svaka neravnina ili izraslina na trupu poput školjki koje se stvaraju tokom eksploatacije broda povećava otpor trenja. Iz gore navedenog može se zaključiti da će kod starijih brodova ovaj otpor biti izraženiji jer će podvodni dio sa godinama iskorištavanja dobiti neravnine, odnosno privjeske poput školjaka i morskih organizama. Ispitivanjem je uočeno da se zbog povećanja otpora trenja mijenjaju značajke propulzije i sustrujanja (engl. *wake*).

Prvu empirijsku formulu za izračun otpora postavio je engleski inženjer, hidrodinamičar i brodski arhitekt William Froude. Froude je u svojim ispitivanjima na tegljenu ravnih ploha, u mirnoj vodi, zaključio da je specifični otpor po jedinici površine, pri bilo kojoj brzini tegljenja, manji kod duže plohe. To je opravdao time da pri stražnjem dijelu ravne plohe voda poprima gibanje slično prednjem dijelu plohe. Na temelju ovih ispitivanja postavio je formulu: [10]

$$R = f \times S \times V^n \quad (2)$$

gdje je:

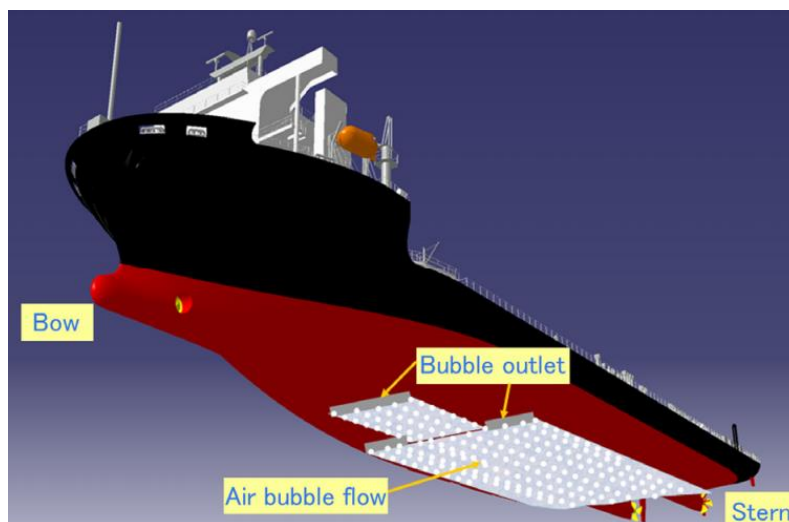
$R$  – otpor [kN]

$S$  – površina oplakane površine [ $m^2$ ]

$V$  – brzina broda [m/s]

Koeficijenti  $f$  i  $n$  ovise o duljini i stanju hrapavosti površine. Za zaglađene površine koeficijent  $n$  varira između 2,0 (ploha duljine 0,61 m) do 1,83 (ploha duljine 15,2 m), dok je kod hrapavih površina konstanta. Za ispitivanje duljine ploha  $f$  vrijednost opada sa povećanjem duljine te se povećava kod hrapavijih ploha. [10]

U novije vrijeme smanjenju otpora trenja pristupilo se metodom upuhivanja sitnih mjehurića zraka u granični sloj na dnu broda. Prvi je ovom načinu smanjivanja otpora pristupila japanska kompanija Mitsubishi Heavy Industries sa svojim sistemom MALS (engl. *Mitsubishi Air Lubrication System – MALS*). Princip rada ovog sistema je da se pomoću komprimiranog zraka upuhuju sitni mjehurići zraka u granični sloj između tekućine i dna broda. Mjehurići se upuhuju na pramcu broda i struja uzrokovana kretanjem broda ih razvlači duž cijelog dna. Ispitivanje ovog sustava je provedeno na stvarnom brodu za prijevoz cementa dužine 50m sa ravnim dnom te je ostvarena ušteda goriva od 5%. [11]



Slika 1. Mitsubishi Air Lubrication System – MALS [6]

### 2.2.2 Otpor valova

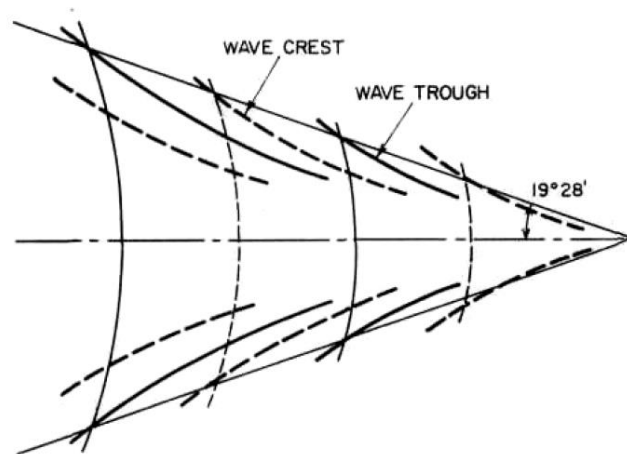
Kada se brod kreće kroz mirnu površinu mora svojim kretanjem uzrokuje pojavu valova na morskoj površini. Valovi sadrže potencijalnu i kinetičku energiju koja je

generirana propulzijskim sistemom broda, tj. kretanjem broda. U pogledu sila valovi uzrokuju povlačenje, točnije silu koja se suprotstavlja kretanju broda, tj. otpor.

Kada se tijelo kreće na površini ili u blizini površine dolazi do pojave razlike u tlakovima duž uronjene površine. Razlika u tlakovima prouzročit će stvaranje valova koji će za posljedicu imati preraspodjelu tlakova duž površine. Zbog toga će postojati razlika rezultanti na prednjem i stražnje dijelu tijela koja se naziva **otpor valova**. Pojavom otpora valova, točnije energije koja je potreba za proizvodnju i održavanje sustava valova, dolazi do gubitka u porivu broda. Energija, sila poriva, koju proizvodi propulzijski uređaj broda u jednoj mjeri se gubi na održavanje valnog sustava broda.

Otpor valova je jedna od komponenta ukupnog otpora koja je usko vezana za stvaranje valova iza broda u plovidbi. Bitna komponenta za formiranje vala iza broda je pramac broda. Što je ulazni kut vodene linije manji to se valovi kasnije lome, odnosno neće doći do lomljenja valova čim se poveća otpor broda, tj. poveća se njegova brzina. Za postizanje pogodnog ulaznog kuta vodene linije utječe i težište istisnine vodene linije. Upravo zbog toga u navigaciji je pogodno da je brod zatežan tj. da je gaz na pramcu manji od gaza na krmi.

Za shvaćanje otpora valova moramo znati ponešto i o sustavu brodskih valova. Smatra se da je prvo objašnjenje sustava brodskih valova postavio Lord Kelvin. [10] Teoriju je temeljio na ispitivanjima i promatranju jedne točke koja putuje po ravnoj liniji, na površini vode, i uslijed čega dolazi do stvaranja karakterističnog sustava valova iza te točke. Sustav se sastoji od transverzalnih valova neposredno iza točke iza kojih slijedi niz divergentnih (razilaznih) valova. Ustvrdio je da se valovi uvijek šire pod istim kutom, u odnosu na smjer plovidbe, i to sa svake strane broda u vrijednosti od  $19^{\circ}28'$  (slika 2.).



**Slika 2. Kelvinov sustav valova [8]**

Koeficijent otpora valova može se računati u hidrodinamičkom bazenu prema modelu broda ili računski na temelju teorije potencijalnog strujanja. Pomoću **Freudeovog broja** moguće je odrediti otpor kretanja objekta kroz fluid. Freudeov broj je bezdimenzijski broj i koristi se za uspoređivanje plovila različite veličine. Računa se prema formuli:

$$F_N = \frac{V}{\sqrt{g \times L}} \quad (3)$$

gdje je:

- v- brzina broda,
- g – gravitacijska konstanta,
- L – duljina vodne linije broda.

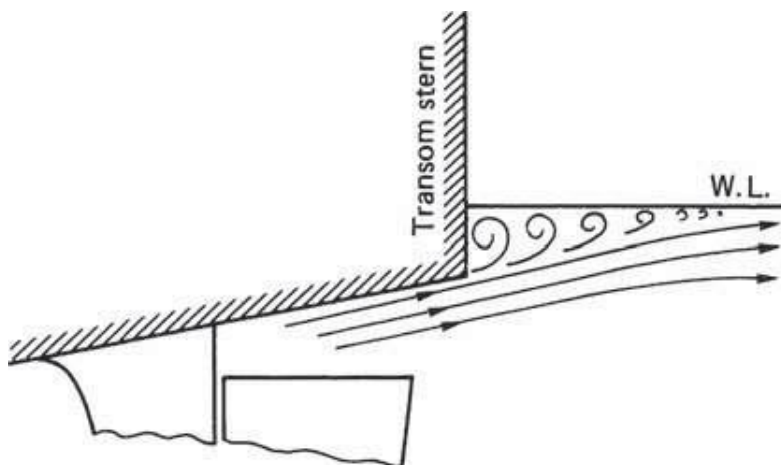
### 2.2.3 Otpor vrtloženja

Turbulentni pojas trenja koji se nalazi oko broda uzrokovan je vrtloženjem čestica vode, virova (engl. *eddy*). Točnije svi oblici otpora trenja uzrokovani su stvaranjem vrtloga. Termin **otpor vrtloženja** (engl. *eddy resistance*) koristi se za objašnjenje pojave virova, vrtloženja vode i njihovih negativnih učinaka na kretanje broda odnosno remećenja toka vode na krmi broda uzrokovanu naglim promjenama toka. Ponekad se u literaturi koristi kod opisivanja otpora privjesaka i sličnih dodataka, ali isključuje otpor uzrokovan trenjem oplakane površine.

Pojava vrtloženja vode na krmi brod javlja se ako nije postignuto dobro opstrujavanje oko krmenog dijela, odnosno oko lista kormila broda. Kod brodova sa malim

zaoštrenjem krme voda neće moći pratiti zakrivljenost krme te će pogodovati stvaranju virova iza broda, a samim time i povećanju otpora broda.

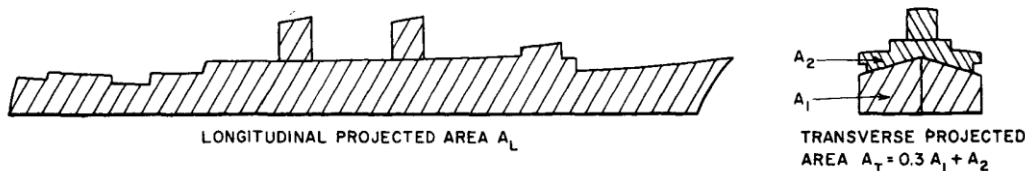
Kako je ranije navedeno otpor vrtloženja se pretežito koristi za objašnjavanje pojave virova na krmi broda (slika 3.). Uzrok nastajanja virova na krmi broda i iza privjesaka na trupu je jednak. Ali učinak tih virova na ukupni otpor broda je znatno veći kod krmenih virova nego kod virova privjesaka. Razlog tome je što je vrtložno gibanje vode na krmi uzrokovano samim kretanjem broda. Točnije, zbog kretanja broda kroz vodu tlak vode je najveći na pramcu i smanjuje se prema krmi sve do mjesta gdje se tok vodenih čestica u potpunosti ne razdvaja od broda. Tu se pojavljuju vrtložna gibanje vode. Upravo zbog toga vrtložno gibanje na krmi će imati veću turbulentnu kinetičku energiju od vrtloga iza privjesaka na trupu i samim time u znatno većoj mjeri utjecati na ukupni otpor broda.



**Slika 3. Pojava virova na krmi broda [3]**

#### **2.2.4 Otpor zraka**

Brod se kreće u dva različita medija, tekućini i zraku. Tekućina uzrokuje otpor na podvodnom, uronjenom dijelu, a zrak na nadvodnom, vanjskom dijelu broda. Zrak može djelovati na otpor broda aktivno i pasivno. Aktivno djeluje kada je otpor uzrokovan vjetrom, a pasivno kada je uzrok otpora samo kretanje broda kroz zrak određene gustoće. Prema tome ako djeluje kao posljedica vjetra o otporu ovisi smjer i snaga vjetra, a kada je uzrok otpora samo kretanje broda tada ovisi o brzini broda i veličini nadvodnog dijela.



**Slika 4. Površina broda koja je pod utjecajem otpora zraka [10]**

**Pravi smjer i prava brzina** vjetra je termin kada govorimo o smjeru i brzini vjetra kao prirodnoj pojavi koja nije ovisna o smjeru i brzini kretanja nekog objekta. **Relativni smjer i relativna brzina** je termin kada opisujemo vjetar uzrokovan kretanjem nekog objekta kroz zrak, tada će brzina ovisiti o brzini samog objekta dok će smjer biti uvijek suprotan kretanju objekta.

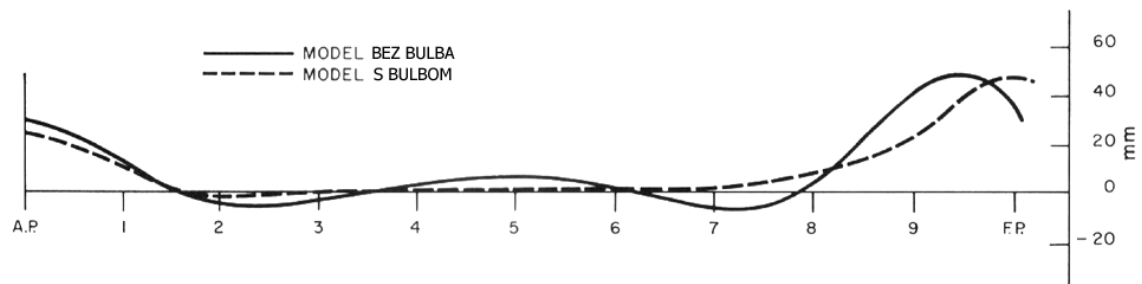
Zbog namjene samog nadgrađa broda njihova izvedba nije moguća da bi u potpunosti bili aerodinamični, a i zbog toga što bi drukčijom izvedbom smanjio samo otpor od vjetra koji suprotan smjeru kretanja broda. Veći dio otpora nadgrađa odnosi se na vrtloženje zraka koje se javlja iza nadgrađa te raste s kvadratom relativne brzine zraka.

### 2.3 UTJECAJ PRAMČANOG BULBA NA OTPOR BRODA

Američki pomorski brodograditelj i inženjer D. W. Taylor prilikom dizajniranja brodova je shvatio važnost izgleda pramca na otpor broda. Taylor je smatrao da bi drugi dodatni val na pramcu poništio utjecaj prvog vala. Kod dizajna broda USS Delawear (1907) napravljan je prvi kruškoliki pramac, bulb (engl. *bulbous bow*). [10] Brod je time dobio jako dobre performanse. Time je Taylor potvrdio svoje zamisli.

Brod i bulb proizvode zasebne valne sustave i time poništavaju brijeg pramčanog vala i smanjuju otpor. W. C. S. Wigley je proveo prva istraživanja i kalkulacije vezane za profil valova i otpor valova te je prvi postavio matematički model utjecaja bulba. Prema njegovim istraživanjima pri manjim brzinama ukupni otpor raste zbog povećanja trenja oplakivane površine i otpora vrtloženja zbog samog bulba. Dok kod većih brzina ukupni otpor se smanjiva zbog međudjelovanje sistema valova bulba i pramca broda. Ukoliko je bulb pravilno pozicioniran izaziva veće smanjivanje otpora nego što će svojim oblikom i trenjem prouzročiti. Wigley je svoju teoriju potvrdio na modelu dužine 4.44m.

Na Slici 5 prikazan je profil pramčanog vala broda sa bulbom i bez njega. Iz slike je vidljivo da brod sa bulbom ima poravnatiju krivulju, odnosno manji su brjegovi vala, nego kod forme broda bez bulba.



**Slika 5. Valni profil broda s bulbom i bez njega [13]**

### 3. PROPULZIJA BRODA

Kako bi brod uspješno savladao silu otpora, tj. kretao se, potreban mu je uređaj koji će proizvesti silu poriva. Sila koja je potrebna za savladavanje otpora nazivamo propulzijom, a uređaj koji je proizvodi propulzorom. U početku plovidbe propulzori su bili jednostavna sredstva poput vesala i jedra. Razvojem tehnologije razvijali su se i propulzori. Početkom 19. St. i razvojem parnog stroja pojavljuju se i prvi brodovi pogonjeni kolom kao propulzorom. Sredinom 19. st. prvi brod pogonjen vijkom prelazi Atlantik, od tada do danas prevladavaju vijci kao propulzori.

#### 3.1 SNAGA I ISKORISTIVOST PROPULZIJE

Brodski propulzor možemo promatrati kao pretvarač energije. Propulzor moment (engl. *torque*) i rotacijsko gibanje pomoću njega pretvara u translacijsko gibanje, poriv (engl. *trust*). Kako posljedicu pretvorbe energije dolazi do gubitka kinetičke energije u vidu ubrzavanja vode u struji vijka. Iskoristivost propulzije može se promatrati kao omjer između snage proizvedene glavnim pogonskim uređajem i snage koja dolazi do samog propulzora. Omjeru je dan naziv *kvazi-propulzijski koeficijent*, a računa se prema formuli:

$$\eta_D = \frac{P_E}{P_D} \quad (4)$$

gdje je:

$\eta_D$  - kvazipropulzivni koeficijent

$P_E$  - efektivna snaga (engl. *effective power*) [kW]

$P_D$  - snaga dovedena propulzoru (engl. *delivered power*), kW

Porivna snaga je veća od efektivne snage, odnosno snage koja je potrebna za tegljenje broda bez propulzora. Zbog djelovanja samog propulzora ukupni otpor broda se povećava te porivna sila mora savladati dodatni otpor. Iskoristivost samog propulzora uvelike varira ovisno o tipu propulzora i tipu broda. Brodski vijak kao propulzijsko sredstvo, sa svim svojim manama i dalje ima daleko veću iskoristivost u odnosu na druge tipove propulzora.



### 3.2 OPĆENITO O VIJKU KAO PORIVNOM SREDSTVU BRODA

Kod suvremenih brodova vijak prevladava kao porivno sredstvo. Vijak se pomoću pogonskog stroja okreće na osovini te proizvodi silu poriva koja pokreće brod kroz vodu. Njegova potisna snaga prenosi se preko osovine na trup broda. Vijak se sastoji od glavine i od 2-9 listova, tj. krila vijka. [2]

Prema tehničkoj izvedbi vijak možemo podijeliti na :

- vijke sa fiksnim krilima, gdje razlikujemo:
  - a) vijak čija su krila lijevana zajedno sa glavinom, tzv. monolitan vijak ( engl. *monoblock*), (slika 6)
  - b) vijak sa skidljivim krilima, gdje su krila pričvršćena na glavinu
- vijke sa upravljivim, pokretnim, krilima gdje je uspon vijka moguće mijenjati te se na taj način ostvaruje željena porivna snaga (engl. *controllable pitch propeller – CPP*)

Svaki od gore navedenih vijaka ima svoje prednosti i mane. Najčešće se koristi monolitan vijak zbog najvećeg stupnja iskoristivosti, jednostavnog održavanja i manje cijene izrade.

Vijci sa zakretnim krilima se uglavnom koriste na brodovima koji zbog svoje namjene imaju česte radnje priveza i odveza. Sa njima se jednostavnije upravlja sa zapovjedničkog mosta dok pogonski stroj uvijek okreće u istom smjeru neovisno o smjeru poriva. Na taj se način stroj tokom manevra ne mora pokretati u više navrata. Kod ovakvih vijaka krila vijka su površinom manja zbog lakšeg zakretanja krila, a okretaji pogonskog uređaja veći. Brodovi sa ovakvim sustavom će više izgubiti na brzini kod valovitog mora nego brodovi sa monolitnim vijkom.[14]



**Slika 6.** Desnokretni vijak sa fiksnim krilima

*Izvor: privatna arhiva autora*

Prema smjeru vrtnje vijak može biti desnokretni i lijevokretni. **Desnokretni** vijak je onaj koji u se u vožnji naprijed okreće na desnu stranu, u smjeru kazaljke na satu, a **lijevokretni** obratno. Smjer vrtnje se određuje gledano od krme prema pramcu u vožnji naprijed.

### 3.2.1 Dijelovi i geometrija vijka

Glavni dijelovi brodskog vijka su krila i glavina. Za jednostavnije razumijevanje principa rada brodskog vijka moramo razlikovati ulazni i izlazni brid te tlačnu i potlačnu stranu.

**Krila vijka** (engl. *blades*) je pričvršćeno za **glavinu** (engl. *hub*) vijka. Glavina vijka je najčešće šuplja te se pomoću konusnog spoja pričvrsti na osovinu pogonskog stroja (engl. *propeller shaft*). Vijak se zajedno sa osovinom motora okreće oko zamišljene osi  $x$  koja prolazi kroz središte glavine vijka i paralelna ili jednaka uzdužnici broda, ovisno o smještaju vijka. Kažemo da je pozitivan smjer osi  $x$  od krme prema pramcu, odnosno smjer vrtnje vijka se uvijek promatra gledano od krme prema pramcu .

Ako promatramo vijak sa krme prema pramcu gledamo u njegovu **tlačnu stranu** (engl. *pressure side*), suprotna strana se naziva **potlačna strana** (engl. *suction side*). **Brid** je granica između tlačne i potlačne strane. Sila poriva se ostvaruje na način da vijak grabi vodu sa **ulaznim bridom** (engl. *leading edge or nose*) te je preko tlačne strane baca na **izlazni brid** (engl. *trailing edge or tail*). [2]

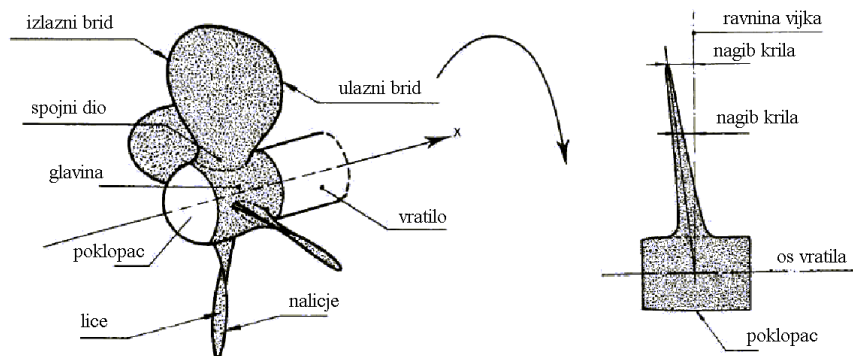
Kod okretanja dolazi do pada tlaka na potlačnoj, prednjoj, strani i do povećanja tlaka na tlačnoj, stražnjoj strani. Pad tlaka na prednjoj strani je veći od povećanja tlaka na stražnjoj strani te se na taj način ostvaruje sila poriva koja djeluje u smjeru osi vijka.

Stražnji dio glavine, tj. **poklopac** (engl. *cap*) mora dobro biti prilagođen strujanju koje proizlazi iz samog vijka da ne bi dolazilo do neželjenih skretanja strujanja iza vijka. Kod modernijih vijka na kapama se nekad nalaze i krilca koja dodatno povećavaju moment zakretanja i iskoristivost vijka, te smanjuju neželjeno vrtloženje iza vijka.

Promjer vijka je promjer na vrhovima krila. Točnije **promjer** (engl. *diameter*) vijka je promjer opisane kružnice sa središtem u centru glavine i tangentom na vrhovima krila.

**Nagib** je stupanj zakošenosti krila prema naprijed ili natrag u odnosu na glavinu. Nagib prema nazad pomaže pri trimovanju pramca prema gore što rezultira većom brzinom. Nagib krila prema naprijed pomaže pri spuštanju pramca.[3]

**Uspón** ili **korak** (engl. *propeller pitch*)  $P$  vijka možemo definirati kao teoretski pomak vijka. Odnosno kao aksijalni pomak jedne točke vijaka za puni okret,  $2 r \pi$ . Zbog toga što voda nije kruti medij vijak ne ostvaruje puni svoj korak. Prilikom okretanja dolazi do gubitka u koraku koji nazivamo **skliz** (engl. *slip*).[3]



**Slika 7. Dijelovi vijka [13]**

### **3.2.2 Vijci sa fiksnim usponom**

Danas se na trgovačkim brodovima najviše ugrađuju vijci sa fiksnim usponom i to u većoj mjeri monoblok vijci, čija su krila i glavina jedno tijelo. Razlog tome je dijelom zbog jednostavnosti izrade i manje cijene proizvodnje, a dijelom zbog jednostavnosti održavanja. Upravo zbog toga monoblok vijke imamo u različitim veličinama, od onih promjera desetak centimetara za manje brodice, do vijaka sa promjerom desetak metara za velike preookeanske brodove. [3]

Materijal koji se koristi za njihovu izradu također variraju ovisno o namjeni i veličini propelera i samog broda. Mješavina mesinga velike čvrstoće i mangana te, bronce od nikal aluminija su najčešće korištene. Broj krila, uglavnom od četiri do šest za trgovačke brodove, ovisi o broju okretaja motora, željenoj brzini broda i namjeni samog vijka. Vijke sa sedam ili više krila susrećemo na brodovima specijalne namjene kojima je cilj smanjivanje šuma vijka, poput seizmografskih brodova.

## 4. POMORSTVENOST BRODA

U prijašnjim poglavljima promatrani su otpori broda koji kao uzrok imaju čimbenike koje proizvodi sam brod, tj. njegova konstrukcija. Svi otpori su promatrani na mirnoj vodi. Tokom svog radnog vijeka brod će ploviti po nemirnom moru te će osim navedenih otpora i sila na njegovo kretanje utjecaj imati valovi i vjetar, njihova snaga. Valovi na brod bez obzira na uzrok njihovog nastajanja imaju negativan utjecaj poput: zalijevanja palube, izranjanja pramca, izranjanja broskog vijka, nastajanja naglih ubrzanja, nagla povećanja naprezanja konstrukcije, pad brzine i sl. U ovom poglavlju protumačit će se djelovanje valova na brod, njegovo ponašanje na valovima te tipovi valova i njihove osobine.

### 4.1 MORSKI VALOVI I ELEMENTI VALOVA

Prije nego razumijemo utjecaj i ponašanja broda na valovima moramo razumjeti uzrok njihovog nastajanja i djelovanje. Prema uzroku njihovog nastajanja valovi se dijele na: [13]

- plovidbeni valovi, posljedica kretanja broda
- vjetreni valovi, nastaju djelovanjem vjetra
- plimni valovi, nastaju utjecajem astronomskih sila
- tsunami, posljedica potresa ili lokalnih meteoroloških prilika.

Pored navedenih vrsta valova na moru se mogu susretati i valovi nastali utjecajem drugih sila, npr. kretanjem drugog objekta ili broda na morskoj površini. Snaga i utjecaj ovih valova na brod je mala i kratkotrajna stoga se u ovom radu neće dodatno obrađivati.

Za pomorstvenost broda najvažniji su valovi nastali utjecajem vjetra, vjetreni valovi. Oni su po učestalosti i snazi najčešće susretani na moru tokom kretanja broda. Visine nekih vjetrenih valova mogu dosežati čak visinu veću od 20 – 25 metara u plićim morima, dok je na oceanu službeno zabilježen najveći vjetreni val 18.9 metra na području Sjevernog Atlantika.

Uslijed djelovanja vjetra, točnije uslijed djelovanja trenja i razlike tlaka zraka dolazi do podizanja vodenog stupca, odnosno smanjivanja, te nastanka valova. **Vjetreni valovi**

(engl. *sea wind generated waves*) su nepravilni odnosno nemaju istu visinu te se ne zna kada će se pojaviti veći val. Kod ovakvih valova može se primijetiti manji val koji se pojavljuje na samom brijegu vala, odnosno dolazi do lomljena vrha vala. S obzirom da su nepravilni njihovi se periodi kao i duljine stalno mijenjaju. Konstanta kod vjetrovih valova je njihov smjer, koji je u smjeru ili gotovo u smjeru puhanja vjetra.

**Valovi mrtvog mora** (engl. *swell*) ne ovise o utjecaju sile već o mogućnosti mora da apsorbira energiju. Kad se vodeni stupac kreće u jednom smjeru pod utjecajem vanjskih sila on se nastavlja kretati i u trenutku kad sile prestanu djelovati. Smjer valova odgovara djelovanju sile vjetra koji je uzročnik nastajanja, a brzina mu opada sa vremenom. Valovi mrtvog mora su duljeg brijega i više su pravilniji od vjetrovih valova.

Kod opisivanja valova koristit će se sljedeći nazivi:

- **Valna dulji, L** – duljina vala označava udaljenost između vrhova dva uzastopna brijega vala [m]
- **Visina vala, V** – je vertikalna udaljenost između najniže točke doline i najviše točke brijega vala [m]
- **Period vala, T** – je vrijeme koje je potrebno da dva uzastopna brijega vala pođu kroz promatranu nepomičnu točku [s]

Za lakše određivanje visine valova te njihovo uspoređivanje koristi se međunarodno priznata ljestvica stanja mora, odnosno Douglasova skala (slika 8.) koju je odredio engleski kapetan Peter John Douglas 1920 godine .

Stanje mora	Opis	Visina valova (m)	Izgled mora
0	mirno ( <i>glatko, zrcalno, bonaca</i> )	0	more poput zrcala
1	mirno ( <i>naborano</i> )	0-0.1	mali valići ili bore s pojavama
2	malo valovito ( <i>valičasto</i> )	0.1-0.5	kratki ili mali valovi; uobličeni; bregovi izgledaju staklasto
3	umjereno valovito	0.5-1.25	veći valovi; mjestimice bjeline na valnim bregovima; more stvara isprekidano šuštanje
4	valovito	1.25-2.5	valovi s mnogo bjelina; mogućnost prskanja; šum mora slični muklom žamoru
5	jače valovito	2.5-4	valovi se propinju; neprekidne bjeline; pjena s vrhova prigodice se otpuhava kao morskog diva; valovi stvaraju neprekidno žamor
6	uzburkano	4-6	visokoki valovi imaju velike bjeline s kojih se pjena otpuhuje u gustim prugama; more se počinje valjati, a njegov je šum poput mukle huke
7	teško	6-9	veliki valovi se propinju; imaju duge pjenušave bregove koji se neprekidno ruše i stvaraju hučanje; velike količine pjene otpuhne s bregova daju morskoj površini bjelkast izgled i mogu utjecati na vidljivost; valovi se valjaju teško i udarno
8	vrlo teško	9-14	valovi visoki da manji i srednji brodovi u blizini povremeno nestaju iz vida; vjetar otkida vrhove svih valova; more je potpuno prekriveno gustim prugama pjene; zrak je toliko ispunjen pjenom i morskim dimom da ozbiljno ograničava vidljivost; valjanje valova stvara tutnjavu
9	izuzetno teško	>14	valovi se međusobno križaju iz raznih i nepredvidivih smjerova tvoreći složenu interferenciju koju je teško opisati; valovi se mogu prigodice djelomice rušiti

**Slika 8. Douglasova ljestvica stanja mora [7]**

## 4.2 PROMJENA BRZINE BRODA NA VALOVIMA

Kod nailaska broda na valovito more dolazi do dodatnih opterećenja brodske konstrukcije, propulzora i porivnog uređaja uslijed čega dolazi do smanjivanja brzine broda. Smanjivanje brzine može biti namjerno i nenamjerno (prirodno).

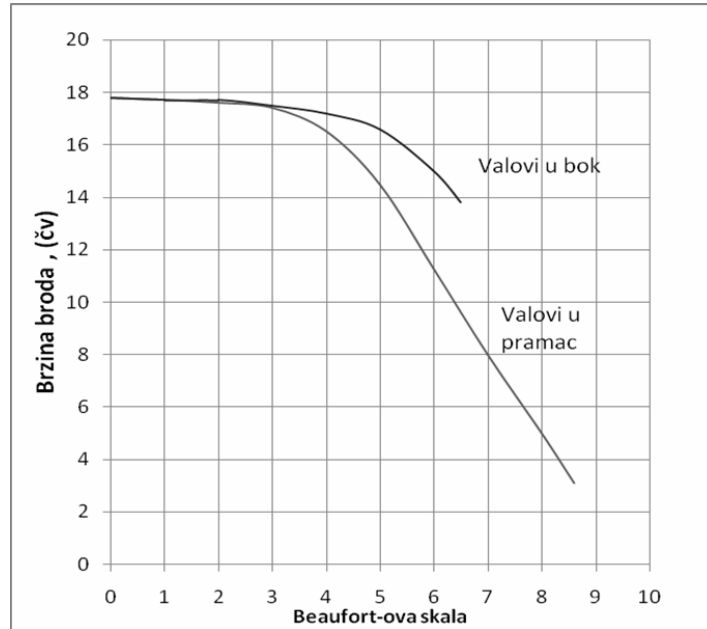
Kada govorimo o **namjernom smanjivanju brzine** govorimo o odluci kapetana koji smanjivanjem brzine želi umanjiti dodatna naprezanja broda. Najvažnije pojave koje želi umanjiti su zalijevanje palube, udaranje pramca, izranjanje vijka te ubrzanja.

**Zalijevanje palube** morem nastupa kada visina pramčanog vala nadmaši visinu nadvođa. Kod ove pojave treba uzeti u obzir smanjivanje nadvođa zbog posrtanja pramca te povećanje pramčanog vala uzrokovano nemirnim morem.

**Udaranje pramca** ili **srax** pojavljuje se kada pri određenoj brzini uslijedi velika vertikalna oscilacija pramca. Tada relativna vertikalna brzina prelazi kritičnu vrijednost te pramac u cijelosti izranja do točke kad izgubi na brzini i ponovno udara od morskog površinu te uranja.

Do **izranjanja vijka** dolazi kada vijak izroni jednom trećinom svog promjera. Do ovog efekta dolazi kada je velika oscilacija pramca, točnije kad pramac previše uranja, a valna duljina u odnosu na duljinu broda je pogodna za stvaranje ovog efekta. Posljedica izranjanja vijka može biti i smanjivanje poriva i do 25% te oštećenja na porivnom uređaju zbog naglih oscilacija u broju okretaja vijka. Pojava se češće događa kod manjih brodova i kod manje nakrcanih brodova.

Brzina broda kod nemirnog mora bit će manja nego na mirnom moru čak i kada je snaga koju proizvodi pogonski uređaj jednaka (slika 9.). Do opadanja brzine dolazi zbog utjecaja valova i vjetra ali i zbog opterećenja na vijku. Na navedeno smanjivanje brzine kapetan nema mogućnost utjecaja te je zbog toga zovemo **nenamjerno** ili **prirodno** smanjivanje brzine.



Slika 9. Odnos pada brzine broda i snage vjetra [2]

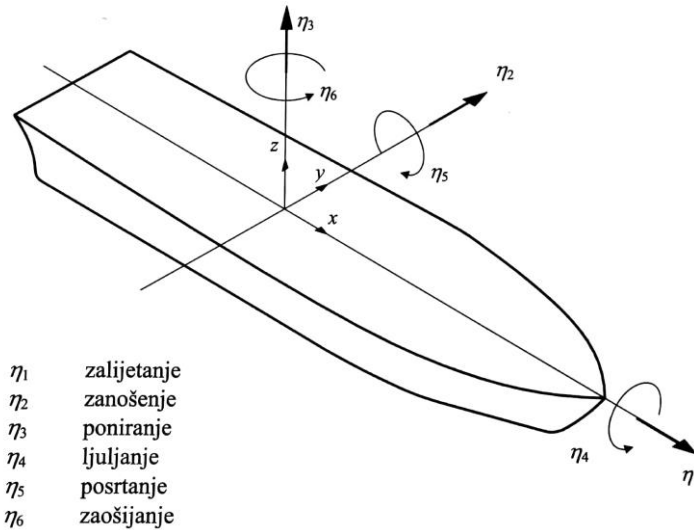
### 4.3 PONAŠANJE BRODA NA VALOVIMA

Kod promatranja gibanja broda na valovima uzima se u obzir da je brod kruto tijelo. Na ljuljanje broda će osim utjecaja sila valova djelovati i sama tromost broda. Gibanje broda možemo promatrati kao oscilacijska gibanja u odnosu na brodski koordinatni sustav  $(x,y,z)$ . U odnosu na koju os koordinatnog sustava promatramo gibanje broda i u kojem smjeru razlikujemo tri translacijska (uzdužna) i tri rotacijska (poprečna) gibanja, a to su:

- zalijetanje (engl. *surge*)
- zanošenje (engl. *sway*)
- poniranje (engl. *heave*)
- ljuljanje (engl. *roll*)
- posrtanje (engl. *pitch*)
- zaošijanje (engl. *yaw*).

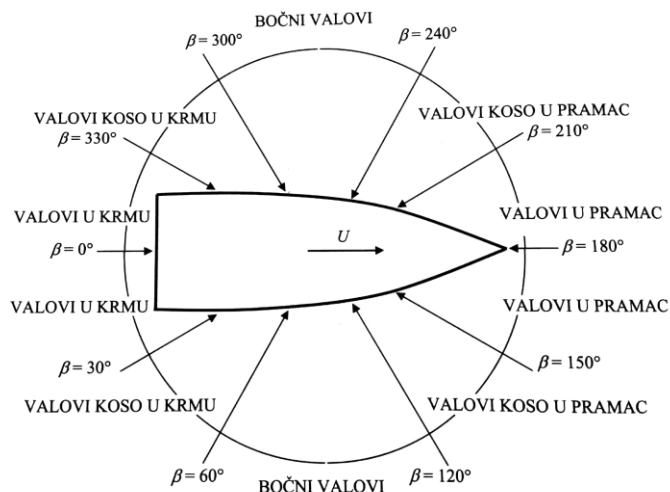
Smjer translacijskih i rotacijskih gibanja kao i koordinatni sustav broda prikazan je na slici 10.





**Slika 10. Gibanje broda na valovima u odnosu na osi  $x,y,z$  [12]**

Brod se neće jednako ponašati na svim valovima, točnije na svim kutovima prilaza valu. Njegovo ponašanje uvelike ovisi o kutu susreta, tj. **kursnom kutu**. Susretni ili kursni kut je kut što ga vektor brzine broda zatvara sa vektorom brzine vala.[12] Kod određenih kutova prilaza mogu se zamijetiti izraženija određena gibanja broda. Kod prilaska vala sa krmenog dijela broda izraženije će se očitovati zalijetanje, posrtanje te zaošijanje broda; dok će se kod prilaska valova u bok broda izraženije očitovati zanošenje i ljuljanje. U svrhu sigurne plovidbe broda za pomorce je od iznimne važnosti poznavanje utjecaja određenog kuta susreta i djelovanje valova na brod. Valove koji nailaze na brod možemo podijeliti prema kutu njihovog prilaska u odnosu na brod, tj. kursnom kutu (slika 11.).



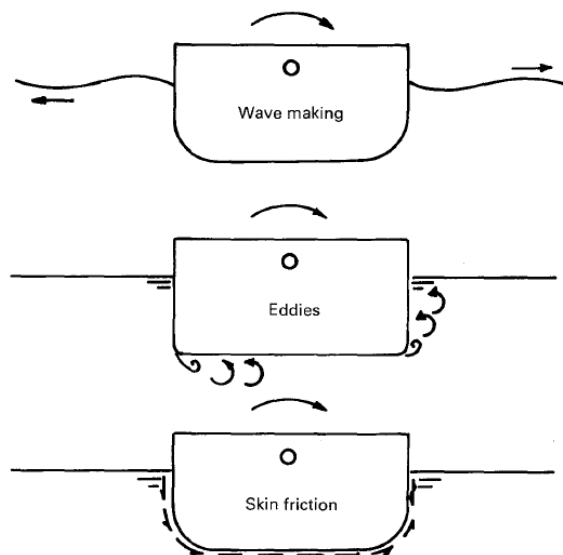
**Slika 11. Kursni kut i nazivi dolaznih valova [12]**

#### 4.4 LJULJANJE BRODA NA VALOVIMA

Ljuljanje broda uzrokuje kinetička energija nailaznog vala koja se prenosi na brod pri kontaktu. Dio energije se utroši na prigušivanje valova, odnosno njihovo raspršivanje (difrakciju), te se time mijenja njihov smjer i visina, dok se dio kinetičke energije prenosi na brod te uzrokuje ljuljanje. Preostala energija iz valova nastavlja se gibati u smjeru gibanja valova. Kod difrakcije, susreta sa brodom, val zadržava svoju duljinu odnosno frekvenciju. Kinetička energija koju valovi predaju brodu sastoji se od inercijskih sila, povratnih sila uzrokovanih pomakom broda iz ravnoteže te energije uzrokovane širenjem valova oko broda (radijacijom valova).

Prigušivanje njihanja broda uzrokuje kinetička energija radijacijskih valova jer se dio energije predaje samim ljuljanjem broda na valovima te se masa broda prividno povećava zbog pojave dodatnog otpora broda te dodatne težine mora na palubi. Dodatni otpor broda uzrokovan valovima detaljnije je opisan u poglavlju 4.5.

Uzrok pojave dodatnog otpora broda kod ljuljanja je pojava dodatnih virova na trupu broda koji se javljaju kod valjanja na pravilnim i nepravilnim valovima. Oblik trupa broda uvelike utječe na pojavu ovog otpora kod valjanja odnosno njegov utjecaj na ukupni otpor broda. Pojava virova uzrokovana valjanjem (slika 12.) javlja se na mjestu prelaska oplate iz dna u bočnu stranu broda. Otpor uzrokovan ovim virovima smanjuje brzinu valjanja broda odnosno povećava vrijeme potrebno da se brod ispravi u prvobitan uspravni položaj.



Slika 12. Otpor broda uzrokovan ljuljanjem [10]

## 4.5 PORAST OTPORA BRODA NA VALOVIMA

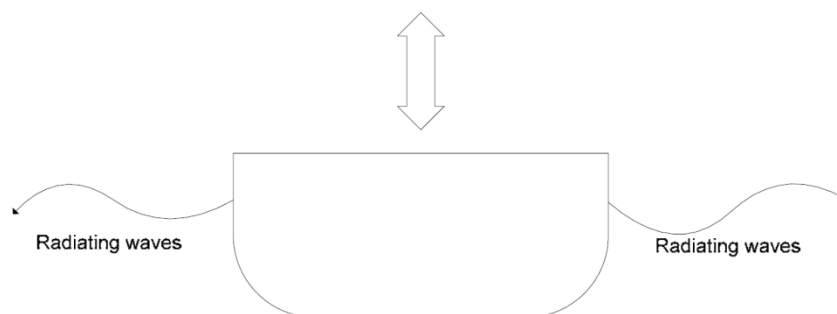
Dodatni otpor na valovima je dio ukupnog otpora broda koji je uzrokovan nailaskom broda na valove. Izračun dodatnog otpora valova može se računati kako dodatak otpora na mirnoj vodi da bi se predvidio ukupan otpor broda tokom plovidbe. Očekivano povećanje ukupnog otpora uslijed djelovanja otpora može biti između 15-30%.

Predviđanje djelovanja dodatnog otpora valova je vrlo bitna karika u izračunu ukupnog otpora broda. Također predviđanje utjecaja dodatnog otpora je ključno i za brodograditelje kako bi mogli pravilno odrediti snagu pogonskog uređaja da bi brod mogao zadržati svoje sposobnosti i brzinu tokom djelovanja dodatnog otpora.

Dodatno utrošenu energiju u obliku valova možemo podijeliti u tri uzroka dodatnog otpora uslijed djelovanja: [15]

- a) vertikalnih gibanja
- b) difrakcije
- c) viskoznih učinaka.

Dodatni otpor uslijed djelovanja **vertikalnih gibanja** nastaje zbog interferencije prilaznih valova i valova koji nastaju uslijed samog kretanja broda. Izraženiji utjecaj imaju vertikalna gibanja broda, točnije poniranje i posrtanje broda. Kod ovih kretanja broda na valovima javljaju se izraženi radijacijski valovi (slika 13.), odnosno valovi koji se kreću okomito od smjera kretanja broda i ne nastaju uslijed kretanja broda na mirnom moru. Ova pojava je u literaturi poznata i kao zaošijanje broda te ima najveći udio u dodatnom otporu broda na valovima.



**Slika 13. Radijacijski valovi uslijed posrtanja broda [10]**

Pri visokim valnim frekvencijama javlja se dodatni otpor uslijed **difrakcije**, odnosno tada je njezin utjecaj najizraženiji, dok je kod niskih frekvencija njezin utjecaj zanemariv. Difrakcijom nazivamo međusobno djelovanje nailaznih valova koji se reflektiraju od trup broda i valova radijacije.

Iz navedenog može se zaključiti da će najveći utjecaj na povećanje dodatnog otpora broda na valovima imati sila zanošenja, odnosno poniranje i posrtanje broda. Izraženiji utjecaj ove sile je kod suprotnog smjera valova od smjera kretanja broda, kod je kod bočnog prilaska valova utjecaj ove sile zanemariv. Kod posrtanja broda može doći do izlaska dijela vijka izvan medija u kojemu se brod kreće te time uzrokovati opadanje iskoristivosti porivnog uređaja i dodatna opterećenja na pogonskom uređaju. Ponekad se javlja i potreba smanjivanja broja okretaja, kako bi se smanjila opterećenja, što dovodi do još izraženijeg pada brzine broda.

#### **4.5.1 Metode proračuna porasta otpora broda na valovima**

Dodatni otpor uzrokovan djelovanjem valova na otpor broda vrlo je složen proračun jer se temelji na nelinearnim jednadžbama. Stoga nema cjelovite metode koja bi točno izračunavala dodatni otpor na valovima. U ovom poglavlju se pruža osvrt na neke važnije teorije i metode izračuna dodatnog otpora valova.

Cjelovitu analizu ovog problema prvi je postavio **Maruo** (1957. godine). Maruo iznosi teoriju nelinearnih jednadžbi temeljenu na brodu koji se ne kreće na valovima, promatra brod koji stoji i njiše se na valovima. Njegova metoda nije davala pune rezultate jer nije uzeo u obzir difrakciju valova, odnosno njihovo skretanje kada naiđu na zapreku.

Američki brodograditelj **J. N. Newman** 1970. godine postavlja matematičke formule za izračun vertikalne sile i momenta temeljeno na poluuronjenom tijelu koje se giba određenom brzinom. Iste te godine **Boese** postavlja metodu izračuna koja se temelji na porastu tlaka koji uzrokuje porast otpora. 1972. godine **Gerritsma** i **Beukelman** u svojoj teoriji izjednačavaju rad dodatnog otpora energijom koju u sebi sadrži val. **Storm-Tejsn** i grupa autora na temelju pokusa iznose detaljnu procjenu analitičkog očekivanja otpora. **Nil Salvensen** (1974. godine) je sile i momente koje djeluju na brod, koji se kreće zadanom brzinom, opisao kao potencijal prvog reda. Njegov izračun je temeljen na Newman-ovim tezama.

Danas se najčešće koriste metoda koje su postavili Gerritsma i Beukelman te Boese.

## 5. UPRAVLJIVOST BRODA

Ovisno o vrsti i namjeni broda njegove se manevarske sposobnosti uvelike razlikuju. Svaki brod ima svoje osobine i karakteristike, čak i ako se radi o brodovima iste namjene i dizajna. Na upravljivost broda utječu vanjski i unutrašnji faktori. Da bi mogli razumjeti ponašanje broda moramo razumjeti i osnovne principe rada uređaja koji direktno utječu na upravljivost broda, propulzor i kormilo.

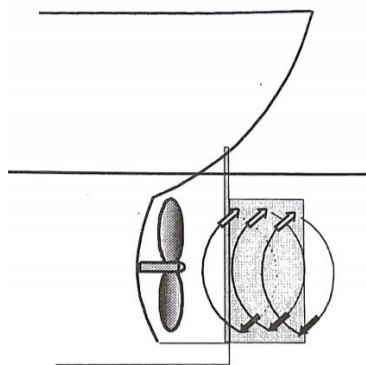
### 5.1 UTJECAJ VIJKA NA UPRAVLJIVOST BRODA

Brodski vijak kao posljedicu svoga rada, vrtnje, proizvodi određene sile u vodi koji utječu na brod. Jedina korisna sila je sila poriva koja je ujedno i zaslužna sa kretanja broda. Osim sile poriva vijak proizvodi neke sile koje utječu na brod zbog blizine trupa i kormila broda. Iz gore navedenog razlikujemo:

- silu zapljuskivanja kormila
- silu otpora, tj. bočni poriv
- silu zapljuskivanja krme pri vožnji krmom. [14]

#### 5.1.1 Sila zapljuskivanja kormila

Zbog blizine kormila i utjecaja kružnog gibanja čestica vode koje uzrokuje vijak, vodene čestice zapljuskuju plohu kormila. Sile će podjednako udarati na gornju i na donju plohu kormila. Zbog razlike u gustoći medija u kojoj se brod nalazi veći utjecaj će imati sila koja udara na donji dio lista kormila zbog veće gustoće medija u kojoj se nalazi. Upravo zbog ove sile kod desnookrentnog vijka pramac će zakretati u desno, a krma izbijati u lijevo.



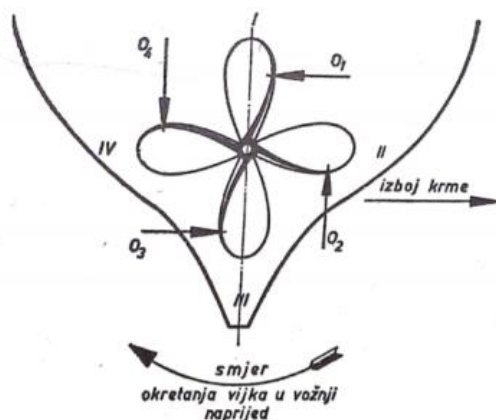
Slika 14. Sila zapljuskivanja lista kormila [14]

### 5.1.2 Sila zapljuskivanja krme

Sila zapljuskivanja krme javlja se samo kod vožnje broda krmom. Jedino u toj situaciji vijak strujnice vode usmjerava prema trupu broda. S obzirom da se vijak okreće i svojom vrtnjom uzrokuje kružno gibanje čestica vode one će udarati po trupu broda. Kod desnookretnog vijka, koji se kod vožnje krmom okreće u lijevu stranu (obrnuto od smjera kazaljke na satu), strujnice vode udaraju u desnu stranu krme broda. Zbog ove sile kod desnookretnog vijka krma broda će izbijati u lijevo, a pramac zakretati u desno.

### 5.1.3 Sila otpora vijka

Krila vijka se nikada ne nalaze na istoj dubini vode te zbog toga djeluju u područjima različite gustoće vode i hidrostatskim tlakovima. Posljedica toga su i različiti otpori na svakom listu vijka. Najveći otpor će imati ono krilo koje se nalazi na većoj dubini. [14]



Slika 15. Sila otpora na listovima vijka [1]

U koliko promatramo desnookretni vijak sa četiri lista (slika 17.) najveći otpor javlja se na krilu broj 3, a najmanji na krilu broj 1. Sile koje se javljaju na ova dva lista su suprotnog smjera i različitih veličina. Upravo zbog toga što je sila na krilu broj 3 veća, utjecaj njegove sile će biti izraženiji. Krila 2 i 4 djeluju na istoj dubini te je njihov otpor jednak te ne utječe na izboj broda već na vibraciju krmenog dijela.

Uzimamo li u obzir sile koje djeluju na vijku i sile koje su posljedica djelovanja vijka na kormilo primjećujemo da su suprotnog smjera djelovanja. One bi se samim time trebala poništavati ali zbog njihovih različitih veličina to se ne događa. Sila otpora vijka ili

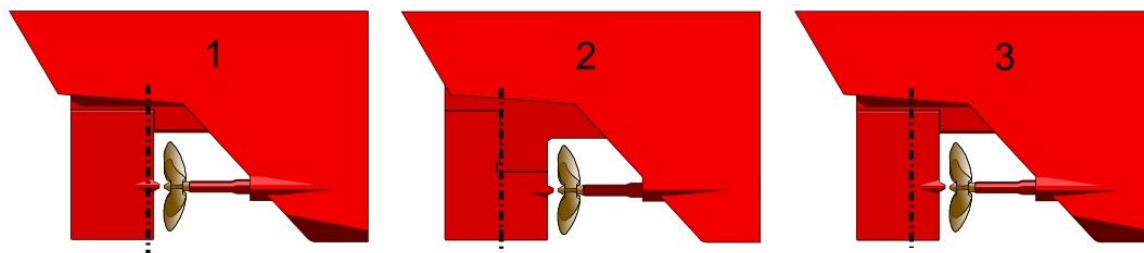
**bočni poriv** je uvijek veći od sile zapljuskivanja lista kormila i sile zapljuskivanja krme. Upravo zbog toga kod desnookretnog vijka pri vožnji naprijed krma broda izbija u desno, a pramac zakreće u lijevo. Kod ljevookretnog vijka je obratno.

## 5.2 PRINCIP RADA KORMILA I UTJECAJ NA UPRAVLJIVOST BRODA

Ravna vertikalna ploha postavljena na uzdužnicu broda iza brodskog vijka, kod brodova sa jednim vijkom, koja se okreće oko svoje osi nazivamo kormilom. Kormilo se sastoji od **osovine** i **lista**. Održavanje željenog kursa broda te zakretanje broda postiže se okretanjem lista kormila. Prema položaju osovine kormila u odnosu na list razlikujemo:

- balansna
- polubalansna
- balansna kormila.

Kod nebalansnih (br. 1) kormila list se cijelom svojom površinom nalazi iza osovine, polubalansnim (br. 2) kormilima 10 do 15% površine lista nalazi ispred osovine lista kormila dok kod balansnih (br. 3) 20 do 25% površine lista (slika 18.). [5] Ovakva izvedba kormila omogućava upotrebu manje sile pri okretanju lista kormila.



Slika 16. Vrste kormila prema položaju osovine [9]

Da bi kormilo moglo biti efikasno mora imati točno određenu površinu koja je ovisna o dužini i gasu broda. Površina se računa po sljedećoj formuli: [1]

$$F = \frac{L \times T}{k} \quad (5)$$

gdje je:

$L$  – dužina broda

$T$  – gaz broda

$k$  – koeficijent koji kod trgovačkih brodova iznosi od 50 do 65.

Da bi se opisao princip rada kormila te njegov utjecaj na upravljivost broda moramo prvo razumjeti sile koje djeluju na kormilo. Upravo sile koje djeluju na kormilo zakreću brod te kormilo neće imati utjecaja kad brod miruje. U vožnji naprijed kad je kormilo u sredini, paralelno sa uzdužnicom broda, silnice vode struje usporedno sa njegovom površinom te je njegov otpor minimalan.

Kada se kormilo postavi lijevo ili desno dolazi do povećanja tlaka na njegovoj prednjoj plohi. Prednja ploha kormila je ona koja je u momentu okreta kormila blizu vijku broda. Strujanje koje uzrokuje brodski vijak i samo kretanje broda više nije paralelno sa kormilom te dolazi do povećanja tlaka na prednjoj plohi kormila. Na suprotnoj, stražnjoj strani, prema Bernoullijevom zakonu dolazi do podtlaka zbog ubrzanog strujanja vode.

Tlak i podtlak stvaraju **silu kormila** i nastoje list kormila ispraviti u početan neutralan položaj. Sila kormilarskog uređaja se suprotstavlja tome te list kormila zadržava pri željenom odklonu i krma počinje izbijati, a pramac zakretati. Kada je kormilo otklonjeno u desnu stranu krma izbija u desno, a pramac zakreće u lijevo i obratno.

Sila kormila ovisi o kutu odklona lista kormila. Ona je proporcionalna razlici tlakova na listu kormila i zbog toga možemo pretpostaviti da je najveća kod kuta odklona  $45^\circ$  od uzdužnice broda. U praksi se pokazalo da kormilo ima najbolji utjecaj, pri vožnji naprijed, kada je maksimalni kut odklona između  $30^\circ$  i  $35^\circ$  zbog pogodnog kuta djelovanja silnica vode; dok je u vožnji krmom maksimalni kut odklona  $20^\circ$ .



## 6. KARAKTERISTIKE BRODA KORIŠTENOG ZA IZRADU RADA

Prilikom izrade rada korišteni su podatci i prikazi na primjeru prikupljeni na brodu M/T Primjer 1. Podatci su prikupljeni tokom redovne eksploatacije broda. Brod je prevozio teret palminog i kanola ulja na putovanjima između Azije i Europe. U ovom poglavlju biti će opisane glavne karakteristike broda, te pogonski i propulzijski uređaj.

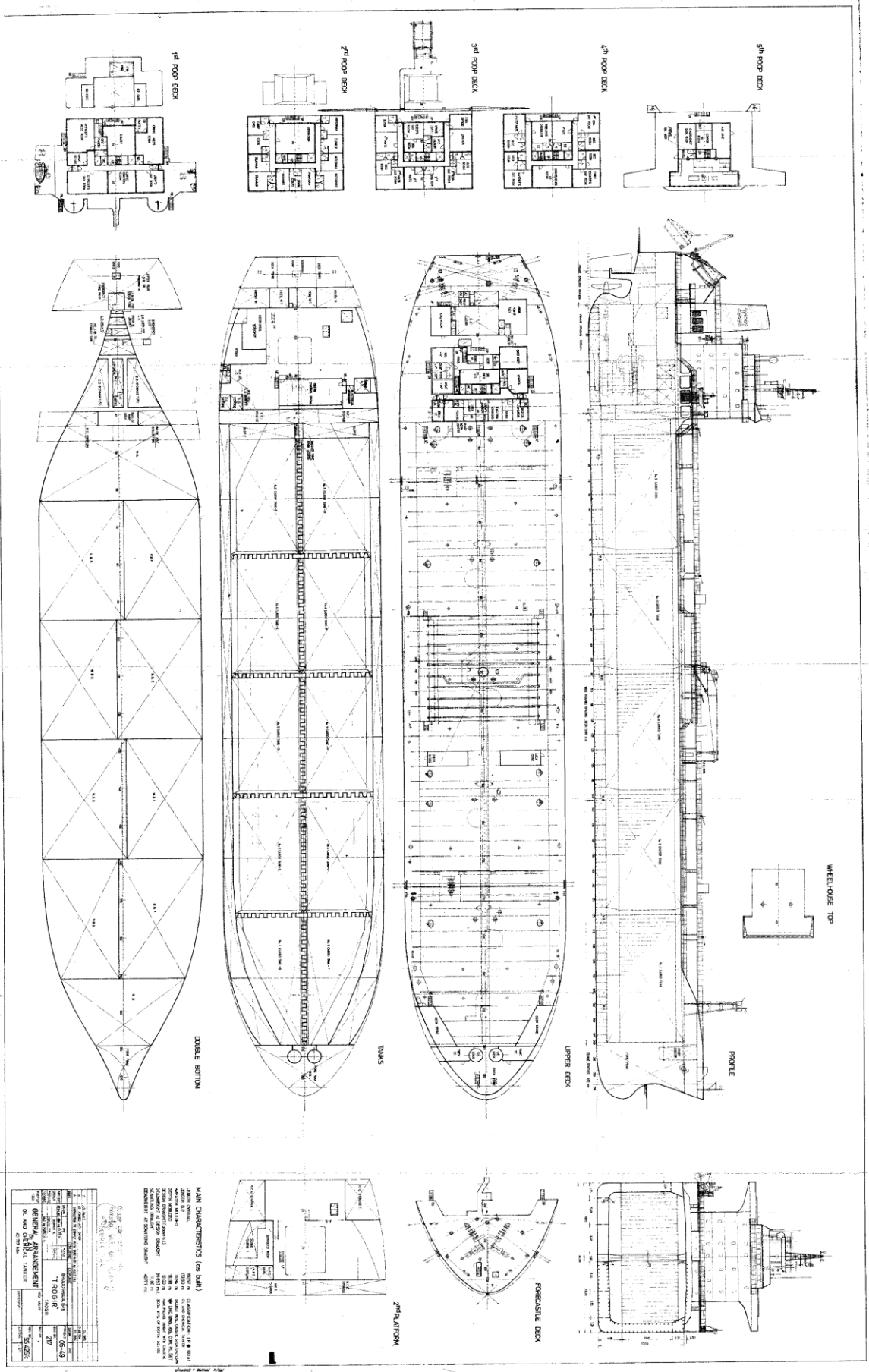
### 6.1 GLAVNE ZNAČAJKE I NAMJENA

Brod je, uključivo sa cijelom svojom opremom konstruiran prema kriterijima neograničene međunarodne plovidbe, za prijevoz ulja te kemikalija kategorije Y, Z i OS. Najveća dopuštena specifična gustoća tereta za koju je brod konstruiran, pri zapremnini tanka od 100%, je  $1.025 \text{ t/m}^3$ . Maksimalni kapacitet tereta koji brod može prevesti pri zapremnini tanka od 100% iznosi  $5135,9 \text{ m}^3$  te je podijeljen u 12 tankova tereta uključujući i tzv. *slop* tankove. Projektiran je u skladu sa klasifikacijskim mjerilima Loyd's registra.

Njegove glavne dimenzije su:

- Duljina preko svega  $L_{OA} = 180.77\text{m}$
- Duljina između okomica  $L_{BP} = 173.80\text{m}$
- Širina  $B = 32.00\text{m}$
- Visina  $H = 45.80$
- Maksimalni gaz  $T_{MAX} = 12.60\text{m}$
- Nosivost  $DWT = 47\ 352\text{t}$
- Ukupni volumen tankova tereta  $V = 51\ 035.9\text{m}^3$

Brod je građen sa dvostrukom oplatom (engl. *double hull*) te dvostrukim dnom (engl. *double bottom*) kako bi se u slučaju sudara ili nasukanja smanjila mogućnost izlivanja tereta u more. Tankovi za balast su odvojeni od tankova tereta te se mogu *inertirati*. Za iskrcaj tereta koristi se sustav hidrauličnih centrifugalnih uronjenih pumpi, te se u svakom tanku nalazi po jedna pumpa. Brod je opremljen sa deset Framo pumpi kapaciteta  $550\text{m}^3/\text{h}$  te dvije pumpe kapacitet  $100\text{m}^3/\text{h}$  koje su ugrađene u tzv. *slop* tankove. Za *inertiranje* tankova koristi se sustav inertnog plina dobivenog iz generatora inertnog plina kapaciteta  $5,750 \text{ m}^3/\text{h}$ .



Slika 17. Generalni plan broda M/T Primjer 1

## 6.2 POGONSKI UREĐAJ, PROPULZOR I KORMILO

Kao glavni pogonski uređaj broda koristi se dizelski motor marke Sulzer snage 8310kW pri 123rpm (okretaja u minuti) pri čemu je potrošnja goriva 34.5t po danu. Propulzijski uređaj broda je desnokretni vijak sa fiksnim krilima lijevanim u komadu.

Karakteristike broskog vijka su:

- Promjer  $D = 5800\text{mm}$
- Broj krila  $n = 4$
- Ušpon  $P = 3895\text{mm}$
- Smjer vrtnje u vožnji naprijed u smjeru kazaljke na satu
- Računata težina 14.1t.

Karakteristike kormila broda:

- Površina lista  $p = 33.036\text{m}^2$
- Maksimalna servisna brzina  $V_{\text{MAX}} = 15.1\text{čv}$
- Tip kormila polubalansno - ovješeno



**Slika 18. Vijak i kormilo M/T Primjer 1**

*Izvor: Privatna arhiva autora*

## 7. PONAŠANJE BRODA NA VALOVIMA, PRIKAZ NA PRIMJERU

Za izradu ovoga rada korišten je primjer tankera za prijevoz ulja i kemikalija (engl. *oil-chemical tanker*) opisanih karakteristika unutar poglavlja 6. Podaci utjecaja i ponašanja broda na valovima prikupljeni su tokom navigacije broda na sjevernom području Pacifičkog oceana, za nakrcani brod, i na području Južnog Kineskog mora, za brod u balastnom stanju.

U Tablici 1 prikazani podatci su dati kao srednja vrijednost unutar jednog dana, a izraženi su u sljedećim mjernim jedinicama:

- kurs broda – odnosi se na smjer kretanja broda [ $^{\circ}$ ]
- brzinu broda - čvorovi
- smjer valova - odnosi se na smjer iz kojega dolaze valovi
- stanje mora - prema Douglasovoj skali,
- okretaji glavnog pogonskog stroja - broj okretaja u minuti [RPM]
- potrošnja goriva glavnog pogonskog stroja [t].

Skлиз (engl. *Slip*) je naziv za razliku između teorijske i stvarne brzine napredovanja vijka, negativan predznak skliza označava da brod plovi u smjeru djelovanje morske struje.

Iz navede tablice vidljivo je da smjer djelovanja i visina valova znatno utječe na potrošnju goriva, brzinu broda i skliz vijka.

Kod **nakrcanog broda** uočava se da pri djelovanju valova u bok broda kod stanja mora 6 (vidi sliku 8. – Douglasova ljestvica, str. 16) i stanja mora 7 imamo razliku brzine broda od 1.21čv dok su okretaji motora i potrošnja goriva gotovo jednaki. Također za isti primjer uočava se porast opterećenja na vijku. Kod nakrcanog broda pri djelovanju valova koso u pramac broda pri stanju mora 5 i stanju mora 6 brzina znatno više opada, 2.81 čv, povećava se potrošnja goriva za 2.51t i znatno raste skliz vijka unatoč prisilnom smanjivanju broja okretaja motora u svrhu smanjivanja opterećenja na propulzora.

Kod **broda u balastnom stanju** i djelovanju valova u bok broda uočava se da pri stanju mora 7 i stanju mora 6 opterećenje na vijku opada, brzina raste, potrošnja goriva također raste, a broj okretaja motora se smanjuje.

Iz gore navedenog i prema podacima iz tablice može se zaključiti da valovi imaju veći utjecaj na nakrcan brod nego na brod u balastnom stanju. Razlog je što se pogonski uređaj i propulzor bore sa znatno većim težinama broda, prilog tome je i manja potrošnja goriva kod brod u balastnom stanju.

Također zaključuje se da brzina znatno više opada ukoliko valovi djeluju u pramac broda, odnosno koso na pramac, nego kad valovi prilaze brodu sa boka. Razlog tome je što se pogonski uređaj broda kod prilaza pramcem na valove mora suprotstavljati vektoru brzine valova koja tada djeluje u suprotnom smjeru od vektora brzine broda. Dok kod bočnog prilaza vektor brzine valova je okomit na vektor brzine broda te samim time ima manji utjecaj na njegovo smanjivanje.

Također djelovanje valova u pramac broda izaziva veća opterećenja na propulzoru koje je vidljivo iz porasta skliza vijka.

**Tablica 1. Podaci utjecaja valova na ponašanje broda M/T Primjer 1**

*Izvora: Istraživanje autora*

KURS BRODA	SKLIZ	BRZINA BRODA	SMJER VALOVA	STANJE MORA	OKRETAJI MOTORA	POTROŠNJA GORIVA
Nakrcan brod						
190° - SSW	1.67%	12.92	SW	3	104.10	24.88
208° - SW	-3.98%	13.6	SE	2	103.74	24.75
270° - W	8.84%	11.68	NW	5	101.90	19.69
271° - W	28.98%	8.87	NW	6	99.03	22.20
290° - WNW	19.54%	10	SW	5	98.49	23.99
291° - WNW	21.25%	9.87	NW	6	99.37	22.43
250° - WSW	5.60%	12	SW	6	88.36	22.20
251° - WSW	15.69%	10.92	NW	6	102.65	24.45
260° - WSW	25.03%	9.71	NW	7	102.62	24.80
Balastno stanje						
168° - SSE	11.10%	9.45	NE	7	84.22	14.22
140° - SE	16.11%	8.80	NE	7	83.06	17.63
115° - ESE	5.78%	9.63	NE	6	80.95	18.81
217° - SSW	-9.03%	10.75	E	2	78.13	16.43

## 8. ZAKLJUČAK

Kroz rad objašnjene su hidrodinamičke pojave i metode izračuna istih prilikom kretanje broda kroz fluid.

Rad, kao i istraživanje koje je provedeno na realnom brodu u navigaciji, bazira se na povećanju ukupnog otpora broda uzrokovano valovima na koje brod nailazi. Dodatni otpor na valovima je dio ukupnog otpora broda koji je uzrokovan nailaskom broda na valove. Izračun dodatnog otpora valova može se računati kao dodatak otpora na mirnoj vodi da bi se predvidio ukupan otpor broda tijekom plovidbe kao dodatak otporu na mirnoj vodi.

Dodatni otpor uzrokovan djelovanjem valova na otpor broda vrlo je složen proračun. Ne postoji cjelovite metode koja bi točno izračunavala dodatni otpor na valovima koja bi se koristila za usporedbu na različitim tipovima brodova. Stoga se izračun dodatnog otpora valova temelji na procijeni porasta ukupnog otpora. Predviđanje njegovog djelovanja je vrlo bitna karika u izračunu ukupnog otpora broda i ključno je za brodograditelje kako bi mogli pravilno odrediti snagu pogonskog uređaja da bi brod mogao zadržati svoje sposobnosti i brzinu.

Istraživanje ponašanja broda na valovima provedeno je u dva različita stanja broda, potpuno nakrcanom i balastnom stanju. Iz istraživanja je vidljivo da smjer djelovanja i visina valova znatno utječe na potrošnju goriva, brzinu broda i skliz vijka.

Prema provednom istraživanju može se zaključiti da valovi imaju veći utjecaj na nakrcan brod nego na brod u balastnom stanju. Razlog je što se pogonski uređaj i propulzor rade pri većoj brodskoj istisnini broda.

Također, iz navedenog istraživanja može se zaključiti da brzina znatno više opada ukoliko valovi djeluju u pramac broda, odnosno koso na pramac, nego kad valovi prilaze brodu sa boka. Kod bočnog prilaza vektor brzine valova je okomit na vektor brzine broda te samim time ima manji utjecaj na njegovo smanjivanje. Također, djelovanje valova u pramac broda izaziva veća opterećenja na propulzoru koje je vidljivo iz porasta skliza vijka.

## POPIS SLIKA

Slika 1. Mitsubishi Air Lubrication System – MALS [6] .....	4
Slika 2. Kelvinov sustav valova [8] .....	6
Slika 3. Pojava virova na krmi broda [3] .....	7
Slika 4. Površina broda koja je pod utjecajem otpora zraka [10] .....	8
Slika 5. Valni profil broda s bulbom i bez njega [13] .....	9
Slika 6. Desnookretni vijak sa fiksnim krilima .....	12
Slika 7. Dijelovi vijka [13] .....	13
Slika 8. Douglasova ljestvica stanja mora [7] .....	16
Slika 9. Odnos pada brzine broda i snage vjetra [2] .....	18
Slika 10. Gibanje broda na valovima u odnosu na osi $x,y,z$ [12] .....	19
Slika 11. Kursni kut i nazivi dolaznih valova [12] .....	19
Slika 12. Otpor broda uzrokovan ljuljanjem [10] .....	20
Slika 13. Radijacijski valovi uslijed posrtanja broda [10] .....	21
Slika 16. Sila zapljuskivanja lista kormila [14] .....	23
Slika 17. Sila otpora na listovima vijka [1] .....	24
Slika 18. Vrste kormila prema položaju osovine [9] .....	25
Slika 14. Generalni plan broda M/T Primjer 1 .....	28
Slika 15. Vijak i kormilo M/T Primjer 1 .....	29

## **POPIS TABLICA**

Tablica 1. Podaci utjecaja valova na ponašanje broda M/T Primjer 1 .....	31
--	----



## LITERATURA

- [1] Buljan, I. (1982). *Manevriranje brodom*. Školska knjiga.
- [2] Carlton, J. (2007). *Marine Propellers and Propulsion, Second edition*. Elsevier ltd.
- [3] Carlton, J. (2012). *Marine propellers and propulsion, Third edition*. Elsevier ltd.
- [4] FESB Split. (2010). *Otpor i propulzija broda*. Skripta za kolegija.
- [5] FESB Split. *Konstrukcija kormila borda*. Skripta kolegija "Konstrukcija broda 2".
- [6] <http://gcaptain.com/high-fuel-costs-new-emissions-regs-pushing-boundaries-naval-architecture>. Preuzeto 04/ 2018
- [7] <http://prognoza.hr/prognoze.php?id=pomorci>. Preuzeto 04/ 2018
- [8] <http://www.mermaid-consultants.com>. Preuzeto 04/ 2018
- [9] <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rudder>. Preuzeto 04/ 2018
- [10] Lewis, E. V. (1988). *Principles of Naval Architecture - Second Revision*. The Society of Naval Architects and Marine Engineers, Jersey City.
- [11] Mitsubishi Heavy Industries Technical Review. (2011). *CFD Predictions of Bubbly Flow around an Energy - saving Ship with MALS system*. Tokio: Mitsubishi, Japan.
- [12] Prpić-Oršić, J., & Čorić, V. (2006). *Pomorstvenost plovnih objekata*. Rijeka: Zigo.
- [13] Radan, D. (2004). *Uvod u hidrodinamiku broda*. Sveučilište u Dubrovniku.
- [14] Radulić, R. (2005). *Manevriranje brodom* (drugo izdanje izd.). Profil.
- [15] Rebull, S. M. (2014). *Powering a Vessel in Seaway*. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.
- [16] Sambolek, M. (2012). *Propulzija broda*. Brodarski institut Zagreb.
- [17] Vučinić, A. (1997). *Hidrodinamika plovnih objekata*. Sveučilište u Rijeci.