

# Proračun sila otpora kretanja brodova

---

**Kulej, Mateja**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2018**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Transport and Traffic Sciences / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:119:732448>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-13**



*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Transport and Traffic Sciences -  
Institutional Repository](#)



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**  
**FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI**

**MATEJA KULEJ**

**PRORAČUN SILA OTPORA KRETANJA BRODOVA**

**ZAVRŠNI RAD**

**Zagreb, 2018.**

**SVEUČILIŠTE U ZAGREWBU**  
**FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI**

Završni rad

**PRORAČUN SILA OTPORA KRETANJA BRODOVA**  
**THE CALCULATION OF VESSEL HULL RESISTANCE**

**Mentor:** dr. sc. Tomislav Rožić

**Studentica:** Mateja Kulej

**JMBAG:** 0135235594

**Zagreb, 2018.**

## SAŽETAK

Brodski motor glavni je pokretač broda kao jedinstvene cjeline u svrhu njegovog optimalnog i učinkovitog rada. Sile koje se suprotstavljaju njegovom kretanju nazivaju se hidrodinamičke i aerodinamičke sile, koje zajedno predstavljaju otpor borda. U ovom radu one su razložene i prikazane kako utječu na modele u idealnim uvjetima. Modeli su izrađeni od parafina a površina je tehnički obrađena tako da je vanjski sloj u potpunosti gladak. Ispitivanje je vršeno u bazenu u Brodarskom institutu u Zgrebu. Nakon odrađenih simulacija dati su savjeti vezani za poboljšanje broskog motora uzimajući u obzir sile otpora kako bi u stvarnim uvjetima bila povećana brodska učinkovitost.

***Ključne riječi:*** brodski motor, hidrodinamičke i aerodinamičke sile, otpor broda

## SUMMARY

The vessel engine is the main driver of the vessel as a unique unit for its optimum and efficient operation. The forces that oppose its movement are called hydrodynamic and aerodynamic forces, which together represent the hull resistance. In this paper they are explained and shown how they affecting on models in ideal conditions. The models are made of paraffin and the surface is technically processed so that the outer layer is completely slick. The examination was done in the pool at the vessel's institute in Zagreb. After the simulations have been made, the tips for improvement are given to the vessel's engine taking into account the force of resistance to increase the vessel 's efficiency in real terms.

***Key words:*** vessel engine, hydrodynamic and aerodynamic forces, hull resistance

## Sadržaj

1. UVOD .....	1
2. KONSTRUKCIJSKE DIMENZIJE BRODA .....	2
3. KRETANJE BRODA NA MORU .....	18
4. VRSTE OTPORA KRETANJA BRODA NA MORU .....	35
4.1. Komponente otpora broda .....	36
4.2. Otpor trenja .....	39
4.3. Otpor virova ili utjecaj forme na stvaranje virova .....	41
4.4. Otpor valova .....	41
5. PRORAČUN OTPORA SILA KRETANJU BRODA .....	44
6. ZAKLJUČAK .....	57
Literatura .....	58
PRILOZI .....	61

## 1. UVOD

Brodovi predstavljaju veliku i složenu cjelinu te se sastoje od više manjih podsustava od kojih je svaki bitan za djelovanje ukupne cjeline. Kretanje broda na moru ovisi o njegovoj snazi a snaga ovisi o otporu koje pruža more i zrak. Prilikom gibanja broda kroz vodu na donji dio trupa djeluju hidrodinamičke sile koje se javljaju kao reakcija mase vode na tijelo. Na gornji dio broda utječu sile zraka odnosno aerodinamičke sile. Hidrodinamičke i aerodinamičke sile zajednički čine otpor broda. Zbog navedenog tema završnog rada je „Proračun sila otpora broda“ povezana sa proučavanjem rezultata dobivenih puštanjem modela u bazen u Brodarskom institutu u Zgrebu. Svrha rada je optimalno rješenje vezano za primjenu brodskog motora pri različitim brzinama usprkos silama otpora. Završni rad podijeljen je u šest poglavlja:

- 1. Uvod
- 2. Konstrukcijske dimenzije broda
- 3. Kretanje broda na moru
- 4. Vrste otpora kretanja broda na moru
- 5. Proračun otpora sila kretanju broda
- 6. Zaključak

U drugom poglavlju navedene su i objašnjene osnovne konstrukcijske dimenzije broda.

U trećem poglavlju objašnjen je način kretanja broda na moru odnosno kako se brod giba i opis uvjeta plovnosti.

Četvrto poglavlje govori o podjeli otpora koji se javljaju pri kretanju broda, prikazano matematičkim formulama.

U petom poglavlju tablično i grafički je prikazano optimalno rješenje brodskog motora i trupa vezano za različite brzine broda prilikom suprotstavljanja hidrodinamičkih i aerodinamičkih sila u idealnim uvjetima.

## 2. KONSTRUKCIJSKE DIMENZIJE BRODA

Glavni parametri koji karakteriziraju oblik trupa broda odnose se na glavne dimenzije i njihove međusobne odnose te koeficijente brodske forme. Sa stajališta konstrukcije broda trup se dijeli na četiri karakteristična područja po duljini a to je područje krmenog pika, područje strojarnice, područje teretnog prostora te područje pramčanog pika.

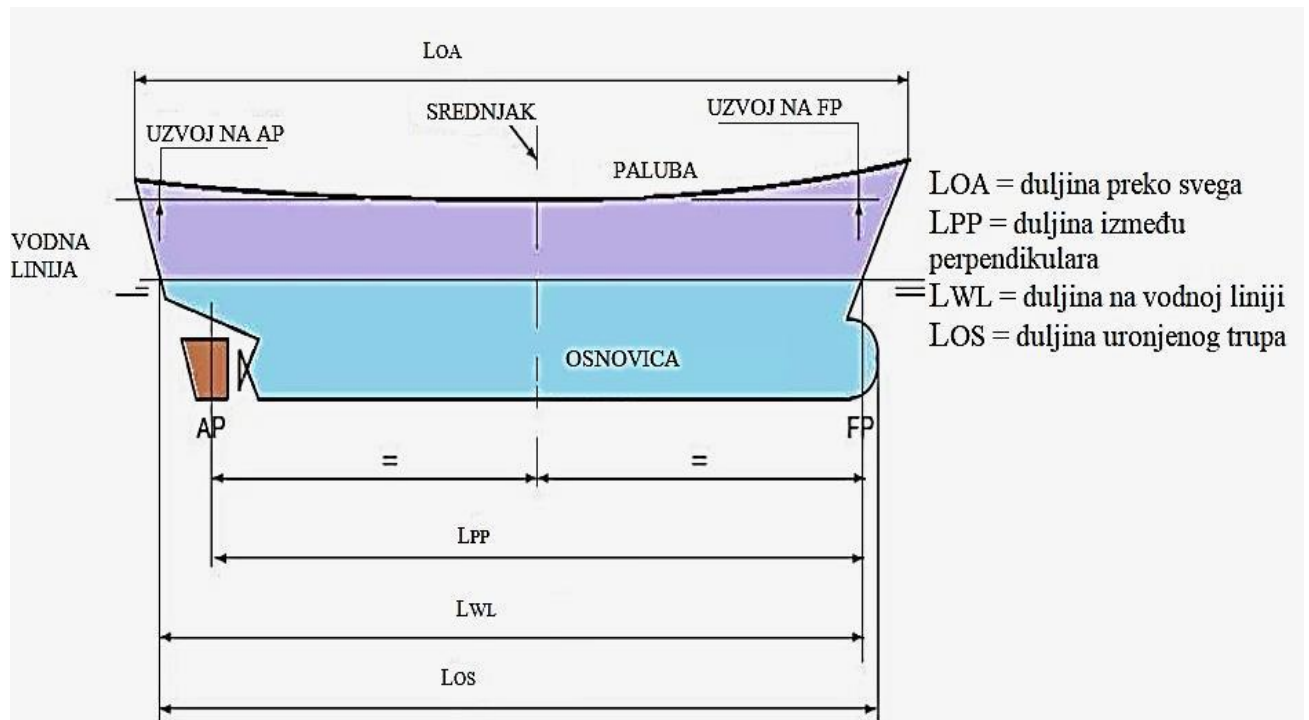
**Glavne dimenzije trupa broda su:**

- dimenzije duljine,
- dimenzije širine,
- dimenzije visine.

**Dimenzije duljine:**

- Duljina broda  $L$ , osnovna linearna dimenzija broda mjerena u uzdužnom smjeru trupa,
- Duljina preko svega ( $Loa$ ) je vodoravni razmak krajnjih točaka broda na pramcu i na krmi, kosnik i kormilo ne uzimaju se u obzir. Ta se duljina uzima u obzir u lukama za privez, prijevodnicama (ustavama), prolazima i dokovima s ograničenim dimenzijama,
- Duljina između okomica - perpendikulara ( $L_{pp}$ ) je vodoravni razmak između pramčane i krmene okomice (perpendikulara) na konstrukcijskoj vodnoj liniji koje prolaze kroz vanjski rub pramčane i krmene statve. Ako brod nema krmenu statvu tada okomica prolazi kroz osovinu kormila. Ta se duljina upotrebljava za računanje istisnine i za određivanje dimenzija broda prema propisima klasifikacijskih društava,
- Duljina konstruktivne vodne linije ( $L_{KVL}$ ) je vodoravni razmak između krajnjih točaka  $K_{VL}$ . Ta je duljina mjerodavna pri proračunu brodske pretege, prodora vode i proračuna nepotopivosti, nadvođa, te kod proračuna otpora broda,
- Duljina između okomica ( $L_{pp}$ ) može biti veća ili manja od duljine konstruktivne vodne linije ( $L_{KVL}$ ), što ovisi o tipu broda i formi krme, Kod čamaca za vesla ove duljine su jednake. Osim ovih duljina broda koje pomorci upotrebljavaju u svakodnevnoj praksi postoji i druge duljine kao npr.: Baždarska duljina ( $L_{reg}$ ) je vodoravni razmak između unutrašnje strane oplata na pramcu i krmi. Služi za određivanje zapremnine broda. Duljina paralelnog srednjaka ( $L_s$ ) je duljina na kojoj brod ima jednak poprečni presjek te nemaju svi brodovi tu duljinu,
- Duljina pramčanog zaoštrenja ( $L_p$ ) je udaljenost od pramčanog perpendikulara do početka paralelnog srednjaka, a nema li brod paralelnog srednjaka, onda do glavnog rebra,

- Duljina krmenog zaoštrenja ( $L_k$ ) je udaljenost od kraja paralelnog srednjaka (ili glavnog rebra ako brod nema paralelnog srednjaka) do presjecišta vodne linije s konturom krme broda. [1]



**Slika 1. Prikaz glavnih dimenzija broda**

Izvor: [https://www.fsb.unizg.hr/usb\\_frontend/files/1358505506-0-porivnisustavimalihbrodovas.pdf](https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1358505506-0-porivnisustavimalihbrodovas.pdf)

### **Dimenzije širine:**

- Širina broda ( $B$ ) je osnovna linearna dimenzija broda mjerena u horizontalnoj ravnini, okomito na uzdužnu os broda,
- Širina preko svega ( $B_{mak}$ ) je najveća širina broda, mjeri se na najširem mjestu broda preko bokoštitnice ili drugih dijelova koji strše preko brodskih bokova. Ta je širina važna za ulazak u luke, dokove, prijevodnice (ustave) i za prolaz između stupova mosta,
- Širina konstruktivne vodne linije ( $B_{KVL}$ ) je najveća širina  $K_{VL}$ . Kod većine brodova ona je jednaka širini glavnog rebra i proračunskoj širini,
- Baždarska širina ( $B_{reg}$ ) je najveća unutrašnja širina mjerena između drvene oplata na oba boka broda,
- Širina na glavnom rebru ( $B$ ) mjeri se na vanjskom rubu glavnog rebra, redovito je jednaka proračunskoj širini broda. Proračunska širina je najveća širina podvodnog dijela

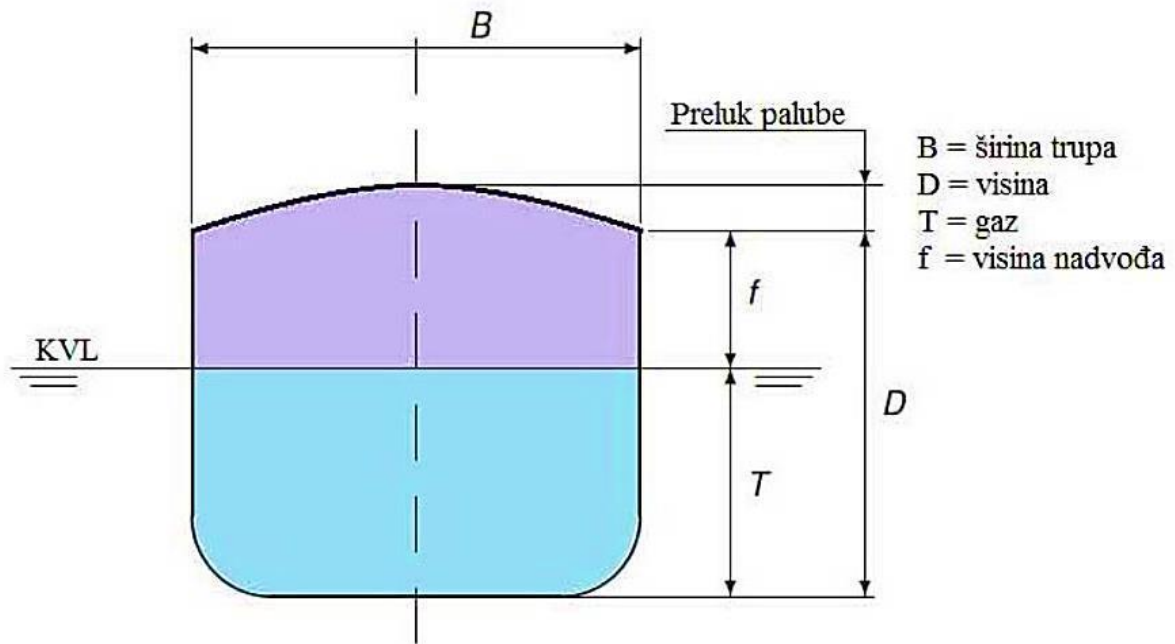


trupa mjerena do vanjskog ruba rebra na čeličnim brodovima, a do vanjske strane oplata na drvenim brodovima. Upotrebljava se za proračun koeficijenta glavnog rebra. [1]

***Dimenzije visine:***

- Bočna visina ( $H$ ) je okomit razmak između osnovice (gornja strana kobilice) i gornjeg brida sponje najviše neprekinute palube, mjerena na boku broda. Važna je za proračun čvrstoće, nepotonivosti, stabilnosti i za dimenzioniranje elemenata trupa,
- Dubina prostora ( $P_d$ ) se mjeri na različite načine i služi za izmjeru broskog prostora. To je dubina unutrašnjeg prostora u sredini broda od najviše točke dvodna, odnosno pokrova dvodna do gornjeg ruba sponje krovne palube. Dubina prostora daje informaciju časniku prilikom ukrcanja glomaznih tereta. Tada se računa do donjeg ruba sponje ispod koje dolazi teret,
- Gaz ( $T$ ) jest mjera za dubinu do koje je brod uronjen u vodu, mjeri se od vodne linije VL do najniže točke tijela broda kobilice,  $T_{max}$ , odnosno njegovih izdanaka (kormila, vijaka, kuka). Gaz je vrlo važan za brodove koji plove u lukama, rijekama, jezerima kanalima ograničene dubine. Za oznaku gaza stavljaju se propisani znakovi, zagaznice na vidljivom mjestu broda (pramac, krma i na sredini). Razlikuju se pramčani gaz ( $T_a$ ), gaz na sredini i krmeni gaz ( $T_k$ ).

Aritmetička sredina između gaza na pramcu i gaza na krmi daje srednji gaz ( $T_s$ ). Od toga gaza treba razlikovati konstrukcioni gaz koji je vertikalna udaljenost od osnovke, do  $K_{VL}$ . Primjenjuje se za proračun istisnine. Nadvođe ( $F_b$ ) je vertikalni razmak mjeran na boku broda na polovicu njegove duljine ( $L_{pp}$ ), od  $K_{VL}$  do gornje strane čeličnog palubnog opločenja, ako se preko čeličnog opločenja nalazi i drvena oplata, onda se nadvođe mjeri do gornje strane te palube. Zakrivljenost ili skok palube je okomit razmak ruba palube na prednjem ( $sp$ ), odnosno stražnjem ( $sk$ ) perpendikularu iznad najniže točke palube. Preluk palube ( $b$ ) je okomit razmak od sredine sponje do ruba palube, na najširem mjestu palube. Omogućava brže otjecanje vode s brodske palube. [1]



**Slika 2: Prikaz visine i širine broda**

Izvor: [https://www.fsb.unizg.hr/usb\\_frontend/files/1358505506-0-porivnisustavimalihbrodovas.pdf](https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1358505506-0-porivnisustavimalihbrodovas.pdf)

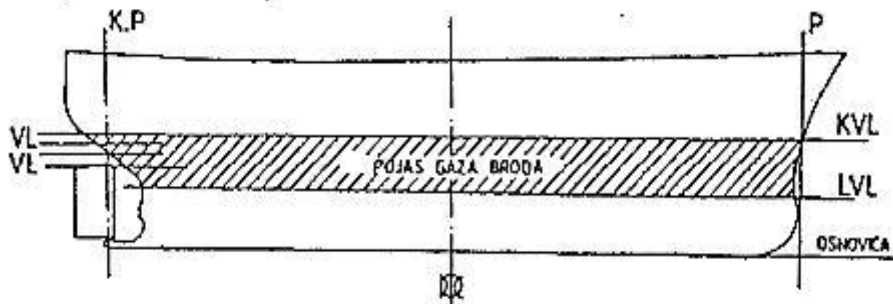
**Osnovni pojmovi brodske forme su:**

**Vodena (vodna) linija**  $V_L$  je plovna ravnina do koje brod uroni u vodu. Konstruktivna vodena linija  $K_{VL}$  je ona plovna vodena linija za koju je brod konstruiran., na toj liniji brod plovi potpuno opremljen i natovaren. Teretna vodena linija  $T_{VL}$  je momentalna vodena linija na kojoj brod plovi s nekim određenim teretom., kada je brod potpuno nakrcan  $T_{VL} = K_{VL}$ . Laka (teretna) vodena linija  $L_{VL}$  je ona vodena linija na kojoj plovi potpuno opremljen, prazan brod, bez tereta, goriva, vode posade itd. Glavno rebro  $)($  (je rebro koje ima najveću uronjenu površinu presjeka. Obično leži na polovici duljine broda, jednako udaljene od pramčanog i krmenog perpendikulara.

**Krmena okomica** (krmeni perpendikular  $KP$ ) je pravac okomit na ravninu konstrukcijske vodne linije, koji prolazi presjecištem konstrukcijske vodne linije s krmenim bridom krmene statve ili s krmenim bridom statve kormila ili s osi kormila, ako prethodno navedena presjecišta ne postoje (to jest ako brod nema statve kormila ili ako vodna linija ne siječe statvu).

**Pramčana okomica** (pramčani perpendikular  $PP$ ) je pravac okomit na ravninu konstrukcijske vodne linije koji prolazi probodištem prednjeg brida pramčane statve i ravnine konstrukcijske vodne linije, odnosno odgovarajućim probodištem prednjeg brida utora

pramčane statve kod drvenih brodova. Središnja okomica (središnji perpendikular SP) je (pomoćna) okomica koja se nalazi na sredini duljine broda na jednakoj udaljenosti i od pramčane i od krmene okomice. Perpendikular na drvenim brodovima su okomice u točkama gdje KVL siječe rub utora na statvama. [1]

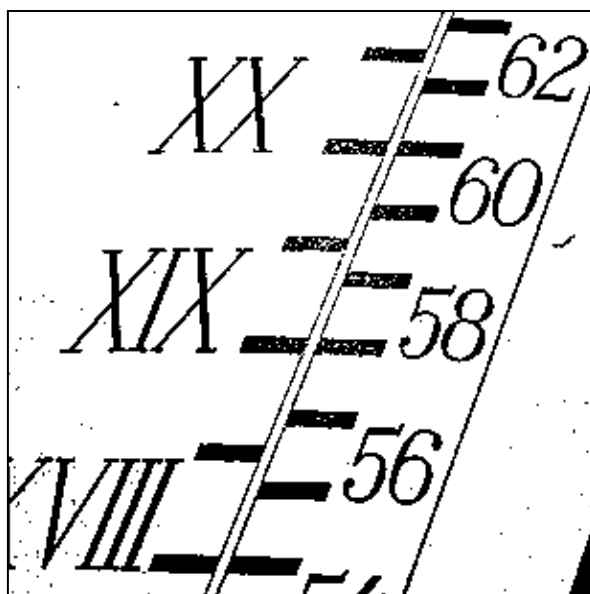


**Slika 3: Prikaz vodenih linija KVL i LVL, perpendikulara, osnovice, glavnog rebra i pojasa gaza**

Izvor: <http://www.joskodvornik.com/konstrukcija/konstrukcija-broda.pdf>

### **Zagaznice**

Zagaznice (gaznice), oznake na obim stranama pramčane i krmene statve u blizini perpendikulara, a na nekim brodovima i na oznaci nadvođa, koje označavaju gaz broda na tim mjestima. Gaz se mjeri od donjeg ruba kobilice do vodene linije. Ako negdje ima dijelova koji sežu ispod kobilice (propeler, statva ili kormilo), onda se gaz označi od donjeg ruba kobilice i ujedno doda veličina za koju je povećan npr. 5,10 [m] + 0,3 [m]. Zagaznice unesene u metričkom sustavu su u decimetrima, visina pojedinog broja iznosi 1 [dm], a isto toliki je i razmak između njih. Obično su označene samo parnim brojevima, a upisuju se u arapskim brojkama. Pri tom donji rub brojke označava onaj gaz koji ta brojka pokazuje. Ti se brojevi izrežu iz tankog lima i zavare na vanjsku oplatu broda. Boje se svijetlim bojama ako je oplata broda tamna i obrnuto. U zemljama koje upotrebljavaju engleski sustav mjera gaz se bilježi u stopama ( $1'/\text{stopa}/ = 0,3048$  [m], a u praksi se uzima  $1' = 0,305$  [m]) s tim što se one obično upisuju u rimskim brojkama. Svaka brojka je visoka  $1/2$  stope ( $6''/\text{inča}/$ ), koliki je i razmak između njih. [1]



**Slika 4: Prikaz zagaznica**

Izvor : <http://www.paluba.info/smf/index.php?topic=8021.0>

### ***Koeficijenti brodske forme***

Koeficijenti brodske forme su omjeri između površina brodskih presjeka ili volumena trupa prema površinama i volumenima geometrijskih likova i tijela. Koeficijenti forme su, dakle, bezdimenzionalni brojevi, koji su toliko veći koliko je forma trupa punija i obrnuto. Karakteriziraju oblik broskog trupa, raspored istisnine po duljini i visini broda i isti su ili slični za slične brodove.

Koeficijenti brodske forme su:

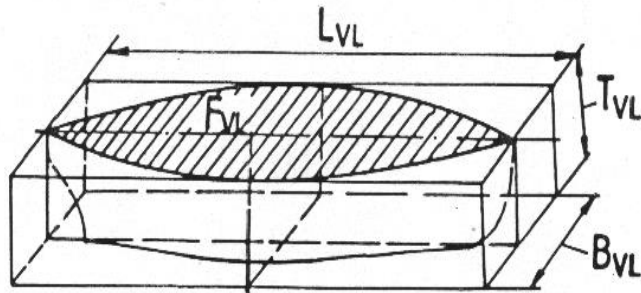
- Koeficijent vodne linije  $\alpha$ ,
- Koeficijent punoće glavnog rebra  $\beta$ ,
- Koeficijent istisnine  $\delta$ ,
- Koeficijent uzdužne finoće broda  $\varphi$ ,
- Koeficijent vertikalne finoće broda  $\psi$ .

***Koeficijent vodne linije  $\alpha$***  je omjer površine vodne linije i površine oko nje opisanog pravokutnika čija je stranica duljina vodne linije i širina glavnog rebra. Što je koeficijent  $\alpha$  manji, oblik teretne vodne linije je vitkiji, odnosno finiji, a što je on veći, oblik te linije je puniji. Lako je zaključiti da brži brodovi imaju finije linije, znači manji  $\alpha$ , a teretni brodovi, radi većeg prostora skladišta, imaju tuplju formu vodne linije, znači veći  $\alpha$  koji se kreće od 0.67 - 0.87. Izračun koeficijenta vodne linije prikazan je ovom formulom 1:

$$\alpha = \frac{FVL}{LVL * BVL} \quad (1) [1]$$

gdje je:

- FVL - površina vodne linije [m<sup>2</sup>],
- LVL - duljina vodne linije [m],
- BVL - širina glavnog rebra [m].[1]



**Slika 5: Koeficijent vodne linije**

Izvor:

[http://zoranpericsplit.weebly.com/uploads/1/2/4/9/12491619/21.koeficijenti\\_brodske\\_forme.d](http://zoranpericsplit.weebly.com/uploads/1/2/4/9/12491619/21.koeficijenti_brodske_forme.d)

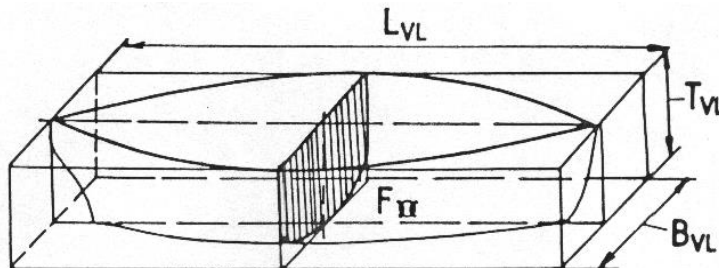
oc

**Koeficijent punoće glavnog rebra  $\beta$**  je omjer površine uronjenog dijela glavnog rebra i površine pravokutnika čije su stranice širina glavnog rebra i gaz na glavnom rebru.  $\beta$  se kreće u razmaku od 0.85- 0.98 te je njezin izračun prikazan formulom 2:

$$\beta = \frac{F_{\alpha}}{BVL \cdot TVL} \quad (2) [1]$$

gdje je:

- $F_{\alpha}$  - površina uronjenog dijela glavnog rebra [m<sup>2</sup>],
- BVL - širina glavnog rebra [m],
- TVL - gaz na glavnom rebru [m].



## Slika 6: Koeficijent glavnog rebra

Izvor:

[http://zoranpericsplit.weebly.com/uploads/1/2/4/9/12491619/21.koeficijenti\\_brodske\\_forme.d](http://zoranpericsplit.weebly.com/uploads/1/2/4/9/12491619/21.koeficijenti_brodske_forme.d)

oc

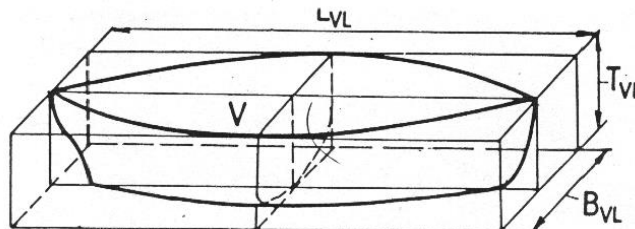
Punoća glavnog rebra utječe na otpor broda, a pokazuje kakve su mogućnosti krcanja tereta u skladište. Koeficijent je uvijek manji od jedan. Kod suvremenih brodova on se kreće oko 0,95 a kod velikih supertankera kreće se do 0,98, zbog toga ti brodovi imaju više prostora za ukrcaj tereta. Kod pontona  $\beta$  iznosi 1. [1]

**Koeficijent istisnine  $\delta$**  je omjer volumena istisnine broda i volumena paralelepipeda, čiji su bridovi duljina  $L_{VL}$ , širina  $B_{VL}$  i gaz broda te vodne linije  $T_{VL}$ . Koeficijent istisnine broda  $\delta$  kreće se u razmaku od 0.38 0.85 te se izračunava prema formuli 3:

$$\delta = \frac{V}{L_{VL} \cdot B_{VL} \cdot T_{VL}} \quad (3)$$

gdje je [1]:

- $V$  - volumen istisnine broda [ $m^3$ ],
- $B_{VL}$  - širina glavnog rebra [m],
- $T_{VL}$  - gaz na glavnom rebru [m],
- $L_{VL}$  - duljina vodne linije [m].



Slika 7: Koeficijent istisnine

Izvor:

[http://zoranpericsplit.weebly.com/uploads/1/2/4/9/12491619/21.koeficijenti\\_brodske\\_forme.d](http://zoranpericsplit.weebly.com/uploads/1/2/4/9/12491619/21.koeficijenti_brodske_forme.d)

oc

Što je koeficijent  $\delta$  veći, to je forma trupa punija, a što je manji, to je trup vitkiji. Prema vrijednosti tog koeficijenta možemo ustanoviti brzinu broda. Ovaj koeficijent daje dobru sliku nosivosti broda. Vrijednost  $\delta$  varira u velikim granicama, od 0,38 kod jedrenjaka pa do 0,85 kod teretnih brodova. [1]

**Koeficijent uzdužne finoće broda  $\varphi$**  je omjer između volumena broda i cilindra, čija je osnovica glavno rebro, a duljina ista kao duljina vodne linije. Uzdužna čvrstoća broda opisana je sljedećim formulama:

$$\varphi = \frac{V}{F * LVL} \quad (4)$$

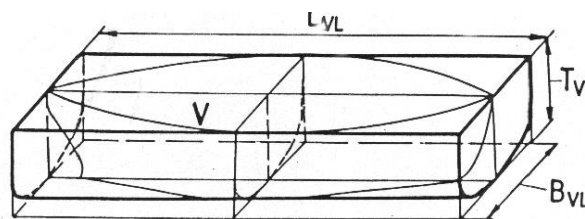
ako je:

$$F) o( = \beta * BVL * TVL \quad (5)$$

dobiva se:

$$\varphi = \frac{V}{\beta * BVL * TVL * LVL} \quad (6)$$

$$\varphi = \frac{\delta}{\beta} \quad (7)$$



**Slika 8: Koeficijent uzdužne finoće broda  $\varphi$**

Izvor:

[http://zoranpericsplit.weebly.com/uploads/1/2/4/9/12491619/21.koeficijenti\\_brodske\\_forme.d](http://zoranpericsplit.weebly.com/uploads/1/2/4/9/12491619/21.koeficijenti_brodske_forme.d)

oc

Dakle, koeficijent uzdužne finoće  $\varphi$  jednak je omjeru koeficijenata punoće broda  $\delta$  i koeficijenata punoće glavnog rebra  $\beta$  pa je njegova vrijednost uvijek veća od vrijednosti koeficijenata punoće broda. Ovaj nam odnos pokazuje kako je raspoređena istisnina po duljini broda. [1]

**Koeficijent vertikalne finoće broda  $\psi$**  je omjer volumena broda i cilindra, koji ima isti gaz kao i brod, a osnovicu površinu vodne linije za zadani gaz:

$$\psi = \frac{V}{FVL * LVL} \quad (8)$$

ako je:

$$FVL = \alpha * BVL * TVL \quad (9)$$

dobiva se:

$$\psi = \frac{V}{\alpha * BVL * LVL * TVL} \quad (10)$$

$$\psi = \frac{\delta}{\alpha} \quad (11)$$

Dakle, koeficijent vertikalne finoće  $\psi$  jednak je omjeru koeficijenata punoće broda  $\delta$  i koeficijenata punoće vodne linije  $\alpha$ , pa je njegova vrijednost također uvijek veća od vrijednosti koeficijenata punoće broda. Ovaj nam odnos pokazuje kako je raspoređena istisnina po visini broda. Veliki  $\psi$  znači koncentraciju istisnine bliže kobilici, a mali  $\psi$  bliže  $K_{VL}$ . Koeficijenti brodske forme prilično točno određuju formu broda. Za iste tipove brodova oni se dosta dobro podudaraju, ali kod raznih tipova brodova pokazuju znatne razlike. Razumljivo je da će se za brze brodove odabrati oštrije i vitkije forme od onih za spore brodove. Kod toga uvijek se mora izabrati kompromisnu sredinu kako bi se zadovoljila svojstva stabilnosti, plovnosti, otpora, ekonomičnosti, zapremnine, nosivosti itd. Oblik broda ovisi o dimenzijama, odnosima dimenzija, oblicima, položajima težišta glavnih presjeka (uzdužni presjek, vodena linija i glavno rebro), koeficijentima tih presjeka, istisnini, koeficijentu istisnine, međusobnim odnosima koeficijenata i o položaju težišta istisnine. [1]

### ***Nadvođe***

Nadvođe u širem smislu, visina boka broda iznad razine mora, mjerena okomito na polovici duljine broda, do gornjeg ruba one palube koja se smatra sastavnim dijelom nepropusnog broskog trupa.

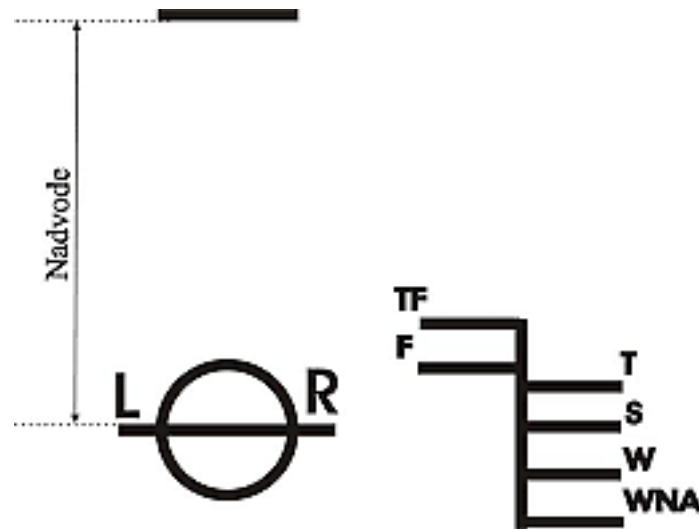
Međutim nadvođe u užem smislu tj. prema važećim propisima i Međunarodnoj konvenciji o teretnim linijama je točno određena mjera kojom se utvrđuje najveći dopušteni gaz broda i to za plovidbu u određenim geografskim područjima i razdobljima godišnjih doba. Vodna crta do koje brod uroni na najvećem dopuštenom gazu zove se teretna crta. Dovoljna visina nadvođa jedna je od glavnih uvjeta za sigurnost broda i ljudskih života na moru. Što je nadvođe veće, to je veća rezervna istisnina broda. S povećanjem nadvođa povećava se opseg stabilnosti broda, jer je uz istu bočnu visinu, a veće nadvođe, veći i kut nagiba broda, pri kojem rub palube uroni u vodu. Na uzburkanome moru valovi manje prelijevaju palubu što je nadvođe veće, pa je i veća sigurnost da se ne ošteti teret na palubi ili voda prodre u potpalublje. [1]



**Oznaka nadvođa** sastoji se od kruga na sredini broda ispod crte palube nadvođa te prekrštenog vodoravnog crtom čiji gornji rub prolazi središtem kruga. Crte nadvođa pokazuju maksimalne gazove do kojih se brod može nakrcati u raznim okolnostima: Ljetna teretna crta čiji gornji rub prolazi središtem kruga je označen slovom S Ova crta označuje maksimalni gaz na kojem brod može biti nakrcan u moru za vrijeme određenog ljetnog razdoblja i za određeno područje. Zimska teretna, označava se slovom W smještena je ispod ljetne crte nadvođa. Ova crta određuje plovidbu morem za određeno zimsko razdoblje u određenom području. Zimska teretna crta za sjeverni Atlantski ocean WNA ucrtava se ispod linije W za 50 [mm]. Prema pravilima ova crta se ucrtava samo na brodovima duljine do 100 [m], koji u zimskom razdoblju uplovljavaju u bilo koji dio sjevernog Atlantskog oceana. Tropska teretna crta T određuje maksimalan gaz u moru za dobre vremenske uvjete u određenim tropskim područjima. U tropima dozvoljava se smanjenje nadvođa za 1/48 ljetnog gaza. Ljetna teretna crta za slatku vodu označena gornjim rubom crte obilježene slovom F, a položena je od okomite crte prema krmi. Razlika između ljetne teretne crte za slatku vodu i ljetne teretne crte jednaka je dopuštenom povećanju krcanja u slatkoj vodi i za ostale teretne crte (W i WNA). Tropska teretna crta za slatku vodu označena gornjim rubom crte, obilježena slovima TF i položena od okomite crte prema krmi. Baždarska oznaka Baždarska oznaka primjenjuje se od 1965 godine. Prema ranijim pravilima brodovi su imali dvije vrste zaštitne palube . To su brodovi s otvorenom zaštitnom palubom i brodovi sa zatvorenom zaštitnom palubom. Baždarska oznaka je vodoravna crta tzv. osnovna crta iznad koje se nalazi jednostraničan trokut koji jednim svojim vrhom dodiruje gornji rub osnovne linije na polovici dužine. Okomita udaljenost od gornjeg ruba osnovne crte do gornjeg ruba dodatne crte iznosi 1/48 konstrukcijskog gaza mjenjenog do gornjeg ruba osnovne crte. Baždarska oznaka stavlja se na bokove broda, u blizini nadvođa i prema krmi. Zaštitna paluba nalazi se uvijek iznad neke donje nepropusne i neprekinute palube. U brodova s otvorenom zaštitnom palubom takva paluba ne smije biti nepropusna i mora imati otvore koji ne smiju i ne mogu nepropusno zatvoriti. [1]

Ti se otvori nazivaju tonažni otvori. Prostor ispod zaštitne palube pri baždarenju ne ulazi u tonažu broda. Na brodovima sa zatvorenom zaštitnom palubom i ta je paluba nepropusna i nema tonažnih otvora, a međupalublje pri baždarenju ulazi u tonažu broda, pa se takvom brodu dopušta manje nadvođe tj. veći gaz i veća nosivost. Očito je da zatvorena zaštitna paluba brodu pruža bolju sigurnost ali i veću bruto i neto registarsku tonažu. Na brodovima sa otvorenom zaštitnom palubom, prostor ispod zaštitne palube nije ulazio u

tonažu broda iako su brodari koristili taj prostor za ukrcaj nekih vrsta tereta. Da bi se povećala sigurnost broda, a brodovlasnicima udovoljilo da ne plaćaju lučke i druge pristojbe za taj prostor, određeno je da dvopalubni i više palubni brodovi imaju dvije bruto i dvije neto tonaže. [1]



**Slika 9: Prikaz nadvođa broda**

Izvor: [http://www.unizd.hr/Portals/1/docs/obavijesti/1\\_Dodatni%20program%20-%20Mornarske%20vještine.pdf](http://www.unizd.hr/Portals/1/docs/obavijesti/1_Dodatni%20program%20-%20Mornarske%20vještine.pdf)

Dakle, ukupna istisnina je promjenjiva veličina, a ovisi o uronu broda do nekog gaza. Laka istisnina je stvarna težina samog broda bez tereta i drugih masa. Nosivost DWT je masa tereta koju brod može ukrcati zajedno s gorivom, zaliham, posadom i nepoznatim težinama itd., do neke dozvoljene crte nadvođa, odnosno gaza broda. Ukupna nosivost DWAT je približno određena nosivost ali kao definicija ne mijenja značenje prethodne. Nosivost se obično iskazuje zajedno s gazom na dozvoljenoj ljetnoj crti nadvođa, a ako se to ne uradi drži se da je nosivost na tome gasu. Dakako određuje se i za druge crte npr., nosivost na zimskoj crti. Korisna nosivost ili nosivost tereta  $D_{wcc}$  je ukupna nosivost umanjena za mase goriva, vode, zaliha, nepoznatih težina, drugim riječima masa tereta koju brod može u određenom slučaju ukrcati. [1]

Korisna prostornost ili kapacitet je ukupan prostor broda namijenjen prijevozu tereta, a dijeli se na prostor za žitarice i prostor za i čini dio ukupne prostornosti, tj. obujma svih prostorija. Tonaža broda je ukupan prostor broda izračunat nakon mjerenja tj., baždarenja, danas prema odredbama IMO konvencije o baždarenju brodova (1969) kao bruto GT i neto

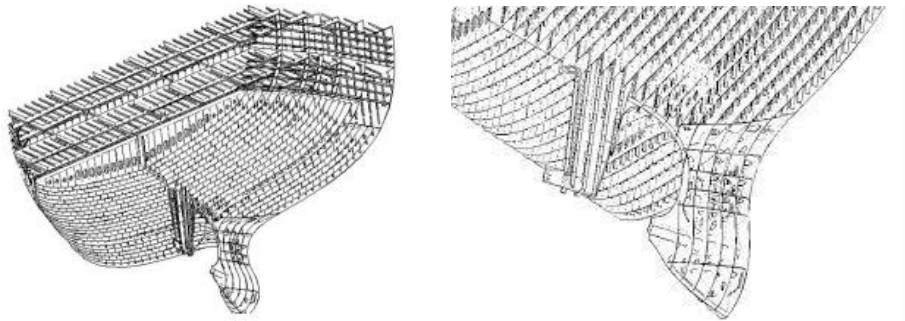
tonaža NT. Dakle istisnina i nosivost broda su promjenjive vrijednosti i ovise o uronu broda do dozvoljene crte nadvođa, pa se visina od crte glavne palube do crte urona također smatra promjenjivom i određena je prema Međunarodnoj konvenciji o teretnoj liniji (1966). Visina od gornjeg ruba kobilice do neke crte urona je gaz broda za taj uron. Gaz na lakoj vodnoj crti je gaz potpuno opremljenog broda ali bez tereta i teorijski je to najmanji gaz. Gaz na teretnoj vodnoj crti najveći je dopušteni gaz s obzirom na propisano nadvođe. Najveći gaz se mjeri od najniže točke na trupu do plovne crte i važan je u plovidbi plitkim vodama, stoga se naziva navigacijski gaz. Što se tiče planova i nacрта brod treba istaknuti da danas suvremeni trgovački brod ima veliki broj planova i nacрта koji se odnose na trup, strojeve i opremu ne računajući tehničku dokumentaciju proizvođača o čuvanju, rukovanju i održavanju pomoćnih dijelova. Međutim za potrebe iskorištavanja brodova najvažniji su sljedeći podaci: Opći plan GA plan je nacrt koji prikazuje brod u sve tri projekcije. Uzdužni presjek prikazuje sve prostorije za teret, opremu i strojarnicu, nadgrađe i tankove, bokocrt sredine broda prikazuje oblik broda od pramca prema krmi, a tlocrt prikazuje prostorije za teret, otvore i opremu i uređaje na svakoj palubi. Kapacitivni plan obično zajedno s ljestvicom nosivosti uz nacrt svih prostorija, posebice onih za teret, sadrži i detalje kapaciteta u tonama i zapremninskim jedinicama skladišta i tankova, zatim i glavne podatke o brodu. Grafički prikaz je u uzdužnom presjeku i tlocrtu. Kapacitivni plan pojedinih sekcija broda s dimenzijama prostorija i otvora, ponekad uz tablice s podacima s dozvoljenim opterećenjima na pojedinim dijelovima paluba i gornjeg dna dvostrukog dna. U praksi se ponajviše koriste opći i kapacitivni planovi. S pomoću tih planova tj., njihovih grafičkih i numeričkih podataka kao i onih dobivenih mjerenjem detalja na planovima i pretvorbom u prirodne vrijednosti, moguće je zadovoljiti brojne zahtjeve za procjenama i proračunima u funkciji iskorištavanja broda. [1]

### ***Konstrukcija trupa broda***

Konstrukcija broda je skup strukturnih (konstrukcijskih) elemenata koju u zajedničkom djelovanju osiguravaju brodu dovoljnu čvrstoću, krutost (nepromjenjivost, promjenjivost dimenzija u prihvatljivim granicama) i nepropusnost.

Konstrukcija broda sastoji se od primarnih i sekundarnih elemenata strukture. Primarni elementi strukture su oni elementi koji na sebe preuzimaju opterećenja koja djeluju na brod, na trup broda kao cjelinu (savijanje, torzija i tlačne sile u poprečnom smislu). Primarni elementi strukture dijele se na elemente uzdužne i poprečne čvrstoće. Sekundarni strukturni elementi su oni strukturni elementi za koje se smatra da su podvrgnuti djelovanju tlakova i koncentriranih opterećenja tereta na manjem lokalnom području. Sekundarni elementi strukture nazivamo i elementi lokalne čvrstoće broda. [2]

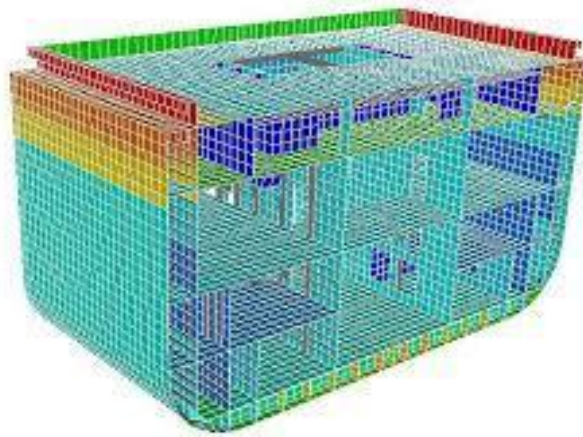
**Područje krmenog pika** je područje prostorno ukrepljenih i postavljenih strukturnih elemenata, posebno dizajnirani za preuzimanje jakih i promjenjivih koncentriranih opterećenja na pod. Kod kormila i kormilarskog uređaja (jednog ili više) propelera, i statvene cijevi (jedne ili više) te dijelova morskog valovlja koji se održavaju kao udarci tekućine na oplatu broda. Posebno opterećenje konstrukcije krmenog pika čine vibracije svih elemenata strukture nastale djelovanjem propelera, osovine kormilarskog uređaja i valovlja. Konstrukcija je izvedena sa uzdužnim i poprečnim strukturnim elementima raspoređenih u prostoru sa ostvarenim platformama. Poprečni elementi postavljeni su na svakom razmaku rebra, a razmak rebara je definiran propisima klasifikacijskih društava. Kod projektiranja konstrukcije krmenog pika obvezno je ostvariti mogućnost pristupa a time i mogućnost održavanja svakog dijela strukture. U krmenom piku u svojoj funkciji svi strukturni elementi su elementi lokalne čvrstoće. [2]



**Slika 10: Prikaz područja krmenog pika**

Izvor: <https://www.fsb.unizg.hr/kziha/shipconstruction/main/trgovbrod/19tankovi.pdf>

**Područje strojarnice** se izvodi u poprečnom sustavu gradnje sa jakim rebrenicama postavljenim na svakom drugom razmaku rebara ili prema propisima klasifikacijskih društava. Struktura dvodna izvodi se i sa jakim uzdužnim nosačima dvodna, posebno kao produžetak temelja glavnih i pomoćnih strojeva i održivih ležaja. Konstrukcija u području strojarnice određena je s obzirom na velika lokalna opterećenja od glavnog stroja, pomoćnih strojeva, održivih i temeljnih ležaja, kotlova i drugih koncentriranih tereta u skladu sa projektom. Razmak rebara u strojarnice određen je propisima klasifikacijskih društava, obično je veći kod rebara u pikovima, a manji kod razmaka rebara u teretnom prostoru. Uzdužne elemente strukture potrebno je produljiti u područje teretnog prostora u skladu sa zahtjevima registra i dobrom pomorskom praksom. Kod manjih brodova struktura strojarnice može se izvesti bez upotrebe dvodna, dok je kod većih brodova izvedba potrebna. [2]



**Slika 11: Prikaz strojarnice**

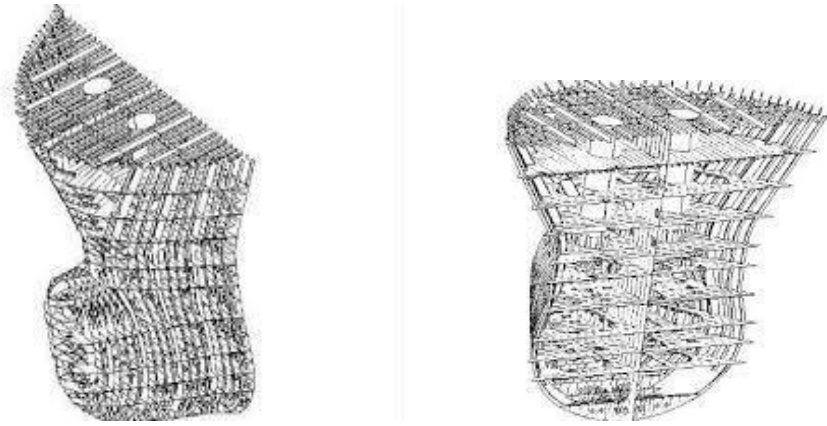
Izvor: <https://bib.irb.hr/datoteka/932232.HAZU-TULCS.pdf>

**Područje teretnog prostora** koje se kod modernih velikih brodova obično poklapa sa područjem paralelnog srednjaka može se ostvariti u jednom od sustava gradnje ovisno o namjeni i veličini broda. Sustavi gradnje su:

- Poprečni sustav,
- Mješoviti sustav,
- Uzdužni sustav.

Brodovi duljine ispod 100 [m] pod uvjetom da im problem uzdužne čvrstoće nije izražen u odnosu na zahtjeve poprečne čvrstoće mogu se izvesti u poprečnom sustavu gradnje. Brodovi od 100 m koji imaju (zbog vrste i načina krcanja tereta) probleme sa uzdužnom čvrstoćom i drugi brodovi duljine do 180 m (ponekad i više) grade se u mješovitom sustavu gradnje. Veliki brodovi (od 180 m na više obavezno se grade u uzdužnom sustavu gradnje jer najveće zahtjeve na konstrukciju predstavlja uzdužna i poprečna čvrstoća.

**Područje pramčanog pika** je područje od pramčane strane pa prema pramcu i struktura u tom području izvedena je kao prostorni sklop strukturnih elemenata. Izvodi se sa jakim uzdužnim i poprečnim elementima strukture sa većim brojem platformi, a dimenzije strukturnih elemenata određuju se na temelju zahtjeva lokalne čvrstoće i to zbog opterećenja sidara, sidrenog uređaja i lančanika, udaraca morskog valovlja uslijed posrtanja i poniranja broda. S obzirom na raspored strukturnih elemenata konstrukciju pramčanog pika možemo smatrati poprečnom, a razmak rebara određuje se prema propisima registra. [2]



**Slika 12: Prikaz područja pramčanog pika**

Izvor: <https://www.fsb.unizg.hr/kziha/shipconstruction/main/trgovbrod/19tankovi.pdf>

### 3. KRETANJE BRODA NA MORU

#### *Opći pojmovi stabilnosti broda*

##### *3.1 Gibanje broda*

Postoji šest stupnjeva slobode gibanja broda i dijele se na:

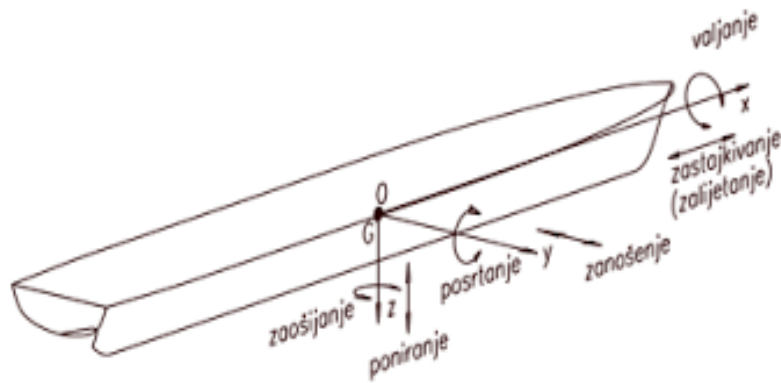
- Translacijska gibanja (uzdužno): a) zalijetanje (u smjeru osi  $x$ ) –  $\eta_1$  - kretanje naprijed-natrag b) zanošenje (u smjeru osi  $y$ ) –  $\eta_2$  - kretanje lijevo-desno c) poniranje (u smjeru osi  $z$ ) –  $\eta_3$  - kretanje gore-dolje,
- Rotacijska gibanja (poprečno): d) valjanje (oko osi  $x$ ) –  $\eta_4$  - kretanje lijevo-desno po vertikali e) posrtanje (oko osi  $y$ ) –  $\eta_5$  - kretanje gore-dolje po vertikali, f) zaošijanje (oko osi  $z$ ) –  $\eta_6$  - kretanje lijevo-desno u smjeru broda.

#### *Koordinatni sustav gibanja broda*

Prilikom opisivanja pojave međudjelovanja broda i fluida te njihovog gibanja, potrebno je jasno definirati koordinatne sustave:

- Nepomični koordinatni sustav (fiksni, inercijski)  $S(x_0, y_0, z_0)$  vezan je za Zemlju. Ravnina  $x_0y_0$  leži na mirnoj slobodnoj površini, pozitivan smjer osi  $x_0$  je u smjeru napredovanja vala, a može biti i zakrenut u smjeru napredovanja broda. Os  $z_0$  usmjerena je vertikalno prema gore,
- Koordinatni sustav broda  $G(x_b, y_b, z_b)$  vezan je za brod, a ishodište mu je u težištu broda  $G$ . Os  $x_b$  leži u smjeru uzdužne simetrale broda, a usmjerena je prema pramcu broda. Os  $y_b$  usmjerena je prema lijevom boku broda, a os  $z_b$  usmjerena je vertikalno prema gore. U stanju mirovanja broda ravnina  $x_b y_b$  paralelna je s mirnom slobodnom površinom.

Translatirajući koordinatni sustav  $O(x, y, z)$  kreće se brzinom broda  $U$ . Ako brod miruje smjerovi osi jednaki su onima koordinatnog sustava  $G(x_b, y_b, z_b)$ . kada se brod naginje oko uzdužne osi, dolazi do poprečnog naginjanja broda pa se radi o poprečnom stabilitetu. Kada se brod naginje oko poprečne osi dolazi do naginjanja u uzdužnom smislu pa je u pitanju uzdužni stabilitet broda. Naginjanje broda po pramcu i krmu se zove posrtanje. Naginjanje s boka na bok se zove ljuljanje. Istodobno posrtanje i ljuljanje naziva se valjanje broda. U plovidbi se nastoji, zbog štetnih posljedica za brod, izbjeći posrtanje i ljuljanje pa se brod izlaže valjanju. [3]



**Slika 13: Koordinatni sustav gibanja broda**

Izvor: <https://repositorij.pfst.unist.hr/islandora/object/pfst:75/preview>

Za proučavanje ljujanja broda promatra se ljujanje u mirnoj vodi i ljujanje pod utjecajem valova. Ljujanje u mirnoj vodi se stvara umjetno, što se izvodi samo prilikom pokusnog ljujanja. Za držanje broda na valovima bitno je vremensko trajanje ljujanja izraženo periodom ljujanja ( $t$ ) odnosno vremenom u sekundama za koje se brod nagne s jednog boka na drugi. Dvostruki period ljujanja ( $2t$ ) je period u kojem brod napravi jednu potpunu oscilaciju do početnog položaja ljujanja. Veličina ljujanja mjeri se kutom između krajnjih točaka nagiba na obje strane što predstavlja tzv. amplitudu ljujanja. Period ljujanja broda određuje se u brodogradilištu pokusnim ljujanjem, a u neposrednoj je korelaciji s metacentarskom visinom, dakle, stabilitetom broda. Poznavanje perioda ljujanja broda omogućuje bolje međusobno uspoređivanje brodova, nego pri uspoređivanju metacentarskih visina. [3]

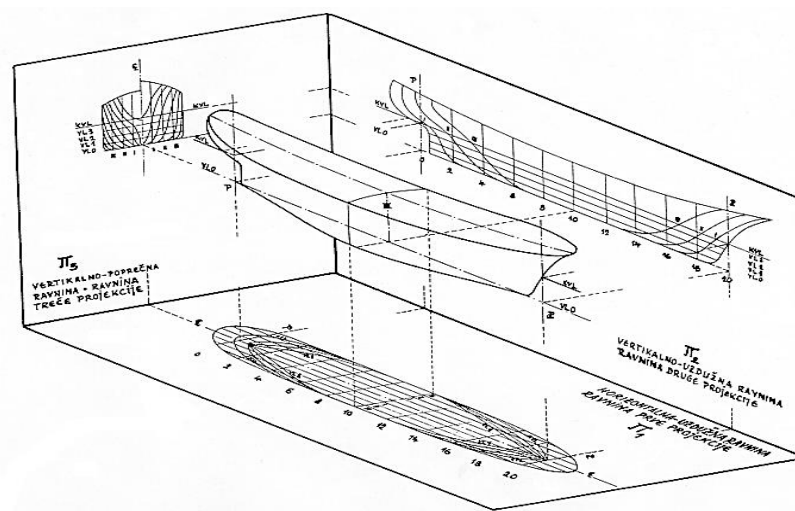
### **3.2 Poprečna i početna stabilnost broda**

Naginjanje broda oko uzdužne osi naziva se početna stabilnost broda. To je os koja se prostire od pramca do krme odnosno naginjanje broda lijevo i desno. Kod poprečnog naginjanja broda veći su kutovi nagiba. Početna poprečna stabilnost broda je ona stabilnost koju brod posjeduje kada se nalazi u uspravnom stanju ili je malo nagnut na uzdužnu os broda. Kod početnog stabiliteta kut nagiba ( $\varphi$ ) je mali i ne prelazi više od  $6 - 8^\circ$ , odnosno kod velikih morskih brodova do  $12^\circ$ . Do ove granice, vodne linije u početnom položaju (VL) i u nagnutom položaju (VL') sijeku se na težišnoj osi odnosno u točki koja leži u ravnini uzdužne simetrije broda. Zbog toga uronjeni i izronjeni klinovi imaju ne samo isti volumen, već i isti oblik, a položaj metacentra ostaje na istom mjestu (veličina metacentarske visine se ne mijenja). Brod koji posjeduje dobru početnu stabilnost ima sve preduvjete da mu do određene



granice i stabilnost pri velikim kutovima nagiba bude dobra, stoga je u većini slučajeva kod definiranja stabilneta dovoljno ispitati samo početni stabilitet. Vrijednost početne stabilnosti broda u uspravnom stanju izražena je udaljenošću GM što je između metacentra M i težišta sustava broda G. [4]

Vrijednost početne stabilnosti u nagnutom stanju izražena je vrijednošću momenta statičke stabilnosti  $Mst$  ( $Mst=U*GH$ ). Vrijednost početne poprečne stabilnosti broda pri kutovima većim od  $12^\circ$  bočnog nagiba izražena je GH polugom (poluga statičkog stabilneta). U je sila uzgona koja označava uspravljujuću silu koja nastoji vratiti brod u prvobitni položaj.



**Slika 14: Početna poprečna stabilnost broda**

Izvor: <https://www.fsb.unizg.hr/geometrija.broda/200/210/gb211.htm>

Uzdužna os broda ili simetrala dijeli brod na dvije jednake polovice, lijevu i desnu. Nagibanjem broda oko uzdužne osi nastaju nagibi na lijevu i desnu stranu, a takvo nagibanje zovemo poprečnim nagibanjem. Stabilnost koja se pri tome javlja naziva se poprečna stabilnost broda. [4]

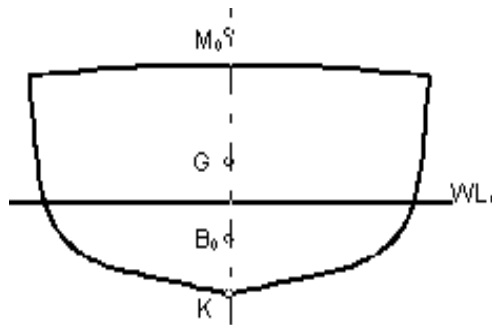
### ***Osnovne točke početne poprečne stabilnosti broda***

Osnovne točke stabilnosti broda su [4]:

- Kobilica (K) ili osnovica,
- Težište uzgona (F ili B),
- Težište težina ili težište sustava broda (G),

- Točka metacentra (M).

Kada brod plovi u uspravnom položaju, ove se točke nalaze jedna ispod druge prema zakonima plovnosti. Položaj težišta istisnine, težišta težine i točke metacentra određen je njihovom udaljenošću od kobilice ili osnovice te je udaljenost izražena u metrima. [4]



**Slika 15: Osnovne točke ravnoteže broda**

Izvor: <https://www.fsb.unizg.hr/geometrija.broda/100/110/gb114.htm>

Problem brodske stabilnosti podrazumijeva poznavanje sila i njihovih momenata. Sila može biti određena kao bilo koje guranje i vuča tijela, a djelovanje sile na neko tijelo određeno je:

- Jačinom sile,
- Smjerom djelovanja sile na tijelo,
- Točkom hvatišta iz kojeg djeluje sila, a hvatište te sile može biti na bilo kojoj točki u smjeru djelovanja te sile.

Moment sile je vrijednost zakretanja sile oko točke hvatišta i ovisit će o:

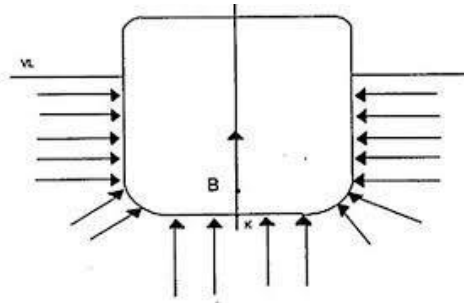
- Jačini sile,
- Kraku ili poluzi oko koje sila djeluje.

Moment mase pod pretpostavkom da je sila gravitacije stalna, tada je težina tijela proporcionalna njihovim masama. Rezultirajući moment dviju ili više težina oko neke točke može biti izražen pomoću momenata njihovih masa. [4]

### **3.3 Težište istisnine ili uzgona broda**

Težište uzgona (B) je zamišljena točka u kojoj su koncentrirane sve sile uzgona uronjenog dijela broda. Kada je brod u uspravnom stanju sile uzgona (U) ravnomjerno djeluju na uronjeni dio broda, želeći ga istisnuti, čime se bočne sile poništavaju. Zbrajaju se sve sile

okomito na VL. Oblik vodnih linija lijevo i desno od uzdužnice je jednak i zbog toga sile uzgona jednako djeluju na uronjeni dio broda te se težište uzgona nalazi u uzdužnici (simetrali) broda. [4]



**Slika 16: Težište istisnine**

Izvor: [http://www.fms-tivat.me/download/spec-radovi/Milinic\\_Andjela.pdf](http://www.fms-tivat.me/download/spec-radovi/Milinic_Andjela.pdf)

Tlak vode u nekoj točki, uronjenoj u vodu, djeluje u svim smjerovima, a veličina mu ovisi o dubini vode. Prema hidrostatskom zakonu o raspodjeli tlakova tlak u nekoj uronjenoj točki je:

$$p = \gamma * h \quad (12)$$

Sila tlaka u toj točki je:

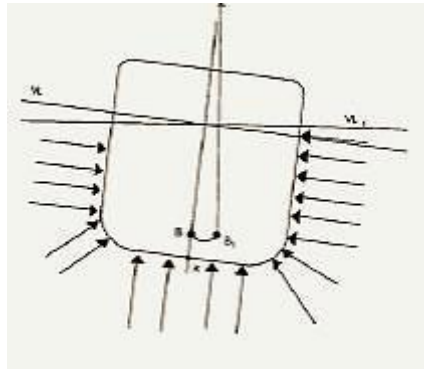
$$P = p * A \quad (13)$$

gdje je:

- A -površina na koju djeluje hidrostatski tlak.

Sile hidrostatskog tlaka (tlak pomnožen površinom na koju djeluje) obzirom na oblik trupa broda (zakrivljenost u tri koordinatna smjera) mogu se rastaviti u tri komponente od kojih su dvije horizontalne (jedna u smjeru duljine, a druga u poprečnom smjeru broda) i jednoj vertikalnoj. Rezultanta horizontalnih komponenata sila tlaka je jednaka ničiti, a rezultanta komponenata sila tlaka ima konačnu vrijednost i predstavlja uzgon pa djeluje vertikalno prema gore. To odgovara i Arhimedovom zakonu prema kojemu na svako tijelo uronjeno u tekućinu djeluje sila uzgona jednaka težini tim tijelom istisnute tekućine. Uzgon djeluje u težištu istisnute tekućine, odnosno u težištu volumena podvodnog dijela broda, a time njegov položaj ovisi o obliku podvodnog dijela broda. Za plovnost broda potreban je uzgon (U) koji djeluje na brod u težištu uzgona (B) dakle u težištu podvodnog volumena broda i to vertikalno prema gore, bude jednak ukupnoj težini broda (W). Pri nagibanju broda

dolazi do promjene položaja težišta uzgona (istisnine) Na strani nagiba povećava se volumen uronjenog dijela broda, a s tim i djelovanje sila uzgona. Na strani suprotnoj nagibu dolazi do smanjenja volumena za istu vrijednost uronjenog klina pa s tim i do smanjenja sile uzgona. Zbog takvog odnosa težište uzgona (B) se pomiče na stranu nagiba iz B u B<sub>1</sub>. [4]



**Slika 17: Pomicanje težišta uzgona**

Izvor: Plovnost i stabilnost broda – nastavni materijali predavanja, Fakultet prometnih znanosti, 2018. Zagreb

Položaj težišta uzgona (B) određen je njegovom udaljenošću od kobilice(K) kako položaj težišta istisnine ovisi o obliku uronjenog dijela broda, odnosno o obliku vodnih linija, njegova udaljenost od kobilice ovisit će o gazu broda. Za brodove pontonskog oblika naravno kobilici podvodni volumen je pravokutnog oblika i težište istisnine će biti na pola dužine i pola gaza u uzdužnici broda  $KB = \frac{1}{2}$  gaza. Za približno izračunavanje težišta istisnine (B, F) ispod vodne linije može se upotrijebiti izraz Morrisha:

$$\text{Udaljenost (B) ispod VL} = \frac{1}{3} \left( \frac{TS}{2} + \frac{V1}{A} \right) \quad (14)$$

gdje je:

- $TS$  = srednji gaz broda,
- $V1$  = volumen uronjenog dijela broda na  $TS$ ,
- $A$  = površina vodne linije na  $TS$ .

Za praktičnu primjenu na brodu, udaljenost težišta istisnine od kobilice KB izračunava brodogradilište i dato je u obliku Hidrostatske krivulje ili tablice u koje se ulazi sa srednjim gazom broda  $TS$ , a vrijednost KB se izražavaju u metrima. Brod koji pluta mora istisnuti težinu vode koja odgovara njegovoj vlastitoj težini. Uronjeni dio broda osigurat će odgovarajući uzgon. Volumen prostora iznad vodne linije ne daje uzgon već predstavlja

njegovu rezervu. pri ukrcaju tereta dolazi do povećanja deplasmana, uranjanja broda, a time i smanjenja volumena iznad vodne linije, odnosno smanjenja rezervnog uzgona broda volumen iznad vodne linije osigurava potrebni rezervni uzgon, a može se izraziti kao volumen prostora ili kao postotak ukupnog volumena broda. svako tijelo koje pliva na vodi izloženo je djelovanju dviju sila: sile teže i uzgona. Svako je tijelo sastavljeno od pojedinih materijalnih točaka ili čestica mase kojih zbroj daje masu cijelog tijela. [4]

Težine pojedinih materijalnih točaka paralelne su sile koje djeluju prema središtu Zemlje. Rezultanta svih tih sila je težina tijela, a hvatište te rezultante je težište tijela. Hvatište rezultante svih težina broda zove se težište brodskog sustava, a označava se slovom G. Iz njega djeluje deplasman (prema središtu zemlje) te se zamišljena koncentracija svih masa odnosi na:

- Prazan brod,
- Oprema,
- Teret,
- Zalihe

Položaj težišta sustava uvjetovan je rasporedom težine broda što uključuje i teret, sukladno tome položaj težišta sustava određeno je dvjema koordinatama: [4]

- Njegovom udaljenošću od krmene okomice (perpendikulara),
- Visinom iznad osnovke tj. unutrašnjeg lica kobilice broda.

Težište sustava broda je zamišljena točka u kojoj su koncentrirane sve težine broda i točka u kojoj sve sile težina djeluju okomito prema dolje ukupnom silom jednakom težini broda. Svaka masa ima svoje težište iz kojeg djeluje moment sila . Kod nekog homogenog tijela, težište tog tijela je njegov geometrijski centar. Za tijelo koje posjeduje sve tri dimenzije (duljinu, širinu i visinu) i ima pravilan oblik, pretpostavlja se da je težište negdje na pola duljine , pola širine i pola visine. Kod brodova definira se kao udaljenost od:

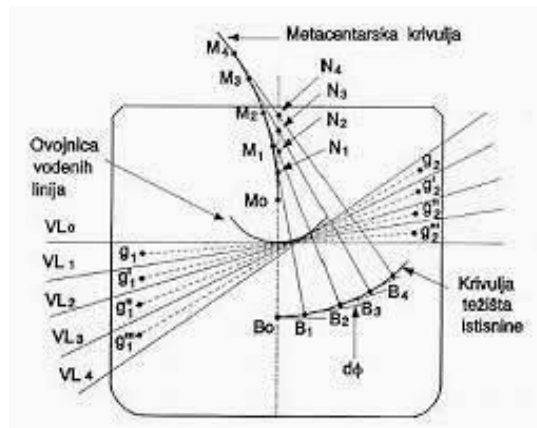
- Kobilice – KG
- Krmene okomice – XG (može biti i od glavnog rebra)

U eksploataciji broda, visinu težišta sustava broda KG određuje časnik broda zadužen za teret proračunom centracije. On nastoji rasporediti težine na brodu tako da njegova visina iznad kobilice nikad ne bude veća od visine početnog metacentra iznad kobilice KM. Težište nepravilnog oblika imat će svoje težište u ovisnosti prema rasporedu sila težina tog tijela. Kod broda u uspravnom položaju težište će se nalaziti na polovini njegove širine u simetrali, s obzirom da je, u većini slučajeva, brod simetričan u poprečnom smjeru. Kako brod nije simetričan u odnosu na glavno rebro (naprijed – natrag) težište će se nalaziti naprijed ili

natrag od glavnog rebra, što će opet ovisiti o rasporedu težina na brodu kao i na njegovoj visini iznad kobilice. Svaka promjena težina na brodu dovodi do pomicanja sustavnog težišta u sva tri smjera, po visini, duljini i bočno, jer se javlja promjena djelovanja sila težina prouzročenih tim težinama. Položaj težišta sustava broda G po visini je određen njegovom udaljenošću od kobilice K. Udaljenost KG izražava se u metrima. Prvo određivanje visine težišta sustava broda izrađuje brodogradilište kad je brod prazan ali potpuno opremljen. Visina KG naziva se visina težišta sustava broda. [4]

### ***3.4 Početni poprečni metacentar***

Kod manjih kutova možemo uzeti da je točka  $M_0$  stabilna na simetrali. Kod većih kutova ona se pomiče po metacentarskoj krivulji. Zbog toga prelazimo na GH polugu kao pokazatelj stabilnosti. Početni poprečni metacentar ovisi samo o formi podvodnog dijela broda. Brodovi se grade tako da kod nagnjanja uslijed pomaka B –  $B_1$  točka  $M_0$  bude što više. Visina metacentra iznad kobilice ovisi samo o formi broda. Zbog toga se nastoji podvodnom trupu broda dati takav oblik da kod nagnjanja metacentar bude što je moguće više. Kod svakog povećanja nagiba za neki kut  $\varphi$ , pomiče se težište uzgona B u  $B_1, B_2, B_3, B_4$  itd., stvarajući krivulju koja se zove krivulja težišta uzgona B. Metacentri se nalaze na sjecištima smjerova uzgona sa simetralnom ravninom broda. Uzgon djeluje uvijek okomito na pripadajuću vodnu liniju. Dva susjedna smjera uzgona sijeku se u središtu zakrivljenosti B – krivulje. Ta sjecišta se zovu pravi metacentri  $M_1, M_2, M_3, M_4$  itd., oko kojih se brod okreće kod nagnjanja. Geometrijsko mjesto koje čine pravi metacentri je krivulje težišta uzgona B i naziva se metacentarska krivulja. Stoga se može reći da je metacentar M središte zakrivljenosti B krivulje. Smatra se da se kod malih kutova nagiba, do  $12^\circ$  prividni i pravi metacentar nalaze u istoj točki na simetrali broda. Pri nagibu broda većem od  $12^\circ$  metacentar izlazi iz uzdužnice broda i kreće se po metacentarskoj krivulji. [4]



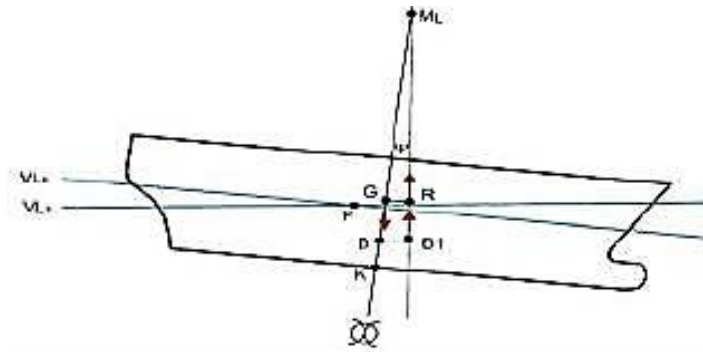
**Slika 18: Prikaz metacenarske krivulje**

Izvor: <https://www.pfri.uniri.hr/knjiznica/NG-dipl.NTPP/223-2014.pdf>

Poznavanje udaljenosti pravih metacentara od njima pripadajućih težišta istisnine MB, dakle radijus zakrivljenosti B – krivulje (metacentarski radijus), može poslužiti kod određivanja poluge statičke stabilnosti. Položaj početnog metacentra M određen je udaljenošću od kobilice i označava se KM (visina početnog metacentra iznad kobilice), te predstavlja točku oko koje zamišljamo rotaciju broda. Njegov položaj se određuje u brodogradilištu, a vrijednost izraženu u metrima predaje se uz brod u obliku tablica ili krivulja u koje se ulazi sa srednjim gazom broda Ts. [4]

### 3.5 Uzdužna stabilnost broda

Uzdužna stabilnost broda je ona stabilnost koju brod posjeduje prilikom nagibanja broda oko poprečne osi. Odnosno to je sposobnost broda da se vrati u prvobitni položaj nakon što prestanu djelovati sile koje ga pokušaju nagnuti u uzdužnom smjeru. Razlika između poprečne i uzdužne stabilnosti je u tome što brod nije simetričan u odnosu na glavno rebro, kao što je u odnosu na simetralnu ravninu. Simetralna ravnina dijeli brod na dva jednaka dijela odnosno na lijevu i desnu stranu. Glavno rebro ne dijeli brod nadvije polovice, iste oblikom. Brod je u uzdužnom smislu vrlo stabilan i zbog velike uzdužne metacenarske visine *MLG* uzdužni nagibi su mnogo manji od poprečnih nagiba broda. Na određenoj VL sile koje djeluju iz sustavnog težišta (G – deplasman) i težišta uzgona (B) nalaze se na istoj okomici na VL. Kada dođe do naginjana broda radi vanjske sile dolazi do pomaka samo točke B - B1 jer nema pomaka masa. To stvara sprega sila koje nastoje uspraviti brod. [4]



**Slika 19: Uzdužna stabilnost broda**

Izvor: Plovnost i stabilnost broda – nastavni materijali predavanja, Fakultet prometnih znanosti, 2018. Zagreb

Brod nije simetričan u odnosu na simetralnu ravninu (pramac – krma). Zbog toga promjene površine vodene linije neće biti iste kao ni klinovi. Kako volumeni klinova moraju biti isti može se desiti da nema iste promjene u visini izronjenog/uronjenog dijela broda. Nastale vodne linije sijeku se u svom težištu zatvarajući neki mali kut  $\varphi$ . Uz uvjet da uronjeni i izronjeni klin moraju biti isti, slijedi da su i statički momenti površina vodnih linija isti. Za uronjeni dio broda, os u kojoj se sijeku dvije vodne linije prolazi zajedničkim težištem. Težište plovne vodne linije F je zajedničko težište dviju vodnih linija kod uzdužnog nagibanja broda. To je točka oko koje se brod uzdužno nagiba. Zbog asimetričnosti broda u odnosu na glavno rebro, neće doći do iste promjene u visini izronjenog i zaronjenog klina, iako volumeni klinova moraju biti isti. Nejednolika visina klinova stvara različitu promjenu gaza broda u odnosu pramac–krma. Do promjene dolazi zbog različitog oblika uronjenog dijela broda u odnosu na glavno rebro. Težište plovne vodne linije po širini broda pada u uzdužnicu zbog jednakosti bokova dok po dužini redovito pada izvan sredine (glavno rebro). [4]

Površina uronjene vodne linije ovisi o uronjenom dijelu broda, tj. gazu broda, pa težište plovne vodne linije F i njegov položaj u odnosu na glavno rebro ovise o gazu broda. Određivanje udaljenosti težišta plovne vodne linije od sredine broda vrši brodogradilište. Krivulju ili tablice nalazimo u knjizi trima i stabilnosti u koje se ulazi s vrijednošću srednjeg gaza broda  $T_s$ . Kod vađenja vrijednosti udaljenosti težišta plovne vodne linije F, u tablicu se ulazi s izračunatim srednjim gazom broda  $T_s$ . Dobivena vrijednost, u metrima naziva se udaljenost težišta plovne vodne linije od sredine broda, a udaljenost se označava kraticom LCF ili XF. Brod stalno mijenja vodnu liniju, tj. gaz broda, pa s obzirom na to, težište plovne vodne linije može biti od sredine broda prema pramcu ili prema krmi. Kod nekog srednjeg



gaza može biti u sredini broda. U uzdužnoj stabilnosti broda uobičajena je upotreba predznaka. Svi elementi za proračun uzdužne stabilnosti koji se odnose na pramac imaju predznak minus (-), a svi elementi koji se odnose na krmu imaju predznak plus (+), ako brodogradilište ne označi suprotno. Kada se težište nalazi prema pramcu, dobiva predznak minus (-), kada se nalazi prema krmu dobiva predznak plus (+). Ukoliko se težište plovne vodne linije nalazi u sredini broda, uronuće pramca bit će jednako izronuću krme, ili obratno. S obzirom na to da je težište plovne vodne linije rijetko u sredini broda, uronuće pramca neće biti jednako izronuću krme, ili obratno. Položaj težišta plovne vodne linije značajan je kod proračuna uzdužne stabilnosti, tj. trima broda. Položaj F je značajan upravo zbog nejednolikog uranjanja pramca odnosno izranjanja krme. Težište plovne vodne linije kod maksimalnog gaza vrlo je blizu sredine broda. Kod potpuno praznog broda, pogotovo onog čije se nadgrađe nalazi na krmu, težište plovne vodne linije je sasvim prema pramcu. [4]

### **3.6 Opći pojmovi plovnosti broda**

Plovnost je opća sposobnost nekog tijela da se pod djelovanjem vanjskih sila može održavati na vodi, razlikuje se:

- Bezuvjetna plovnost,
- Uvjetna plovnost,
- Negativna plovnost,
- Tijelo je bez plovnosti.

Također ono je jedno od osnovnih svojstava broda, iz hidrostatičke je poznato da svako tijelo uronjeno u vodu gubi prividno na težini. Kolika je težina istisnute tekućine ovisi o obliku broda, gustoći te gustoći vode u kojoj pliva. Pri tome je tijelo opisano svojim oblikom, masom [kg ili t] i težištem [m], dok je tekućina karakterizirana svojom gustoćom [ $\text{kg/m}^3$  ili  $\text{t/m}^3$ ]. Primjenom Arhimedova zakona na plovne objekte mogu se formulirati tri uvjeta (zakona) plovnosti. Sila uzgona mora biti jednaka sili težine, sile težine i sile uzgona moraju biti na istom pravcu koji je okomit na teretnu vodenu liniju te je potrebno je da brod posjeduje stabilnu ravnotežu. Bezuvjetna plovnost je gustoća materijala od kojeg se tijelo sastoji ( $\rho t$ ) i ona je manja od gustoće vode ( $\rho v$ ) odnosno  $\rho t < \rho v$ . U slučaju bezuvjetne plovnosti tijelo pliva, a ako se nasilno uroni u vodu, izronit će nakon prestanka djelovanja sile koja je izazvala uronjavanje. Uvjetna plovnost je kada gustoća materijala od kojeg se tijelo sastoji ( $\rho t$ ) veća od gustoće vode ( $\rho v$ ) odnosno  $\rho t > \rho v$ , pod uvjetom da je tijelo takvog oblika da istiskuje obujam vode čija je masa jednaka masi tijela (brodovi). Negativna plovnost je kada je  $\rho t > \rho v$ ,

ali nije ispunjen uvjet da je tijelo takvog oblika da istiskuje obujam vode čija je masa jednaka masi tijela. U tom slučaju tijelo tone. Tijelo je bez plovnosti kada je gustoća tijela ( $\rho t$ ) jednaka gustoći vode ( $\rho v$ ) odnosno  $\rho t = \rho v$ . U navedenom slučaju tijelo lebdi u vodi, neovisno o dubini vode, jer ne postoji višak sile uzgona (ili opterećenje s površine) koji bi tijelo izbacio na površinu (potopio na dno). [4]

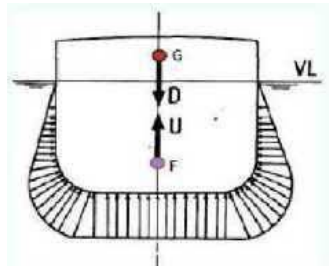
### ***I uvjet plovnosti***

Na svako tijelo uronjeno u tekućinu djeluje sila uzgona ( $U$ ), koja odgovara težini istisnute tekućine ( $V$ ), tj. umnožak volumena podvodnog dijela broda sa svim privjescima (kormilo, propeler) i gustoće vode u kojoj brod pliva, mora biti jednak ukupnoj težini broda, deplasmanu ( $D$ ). [4]

$$D = U = v * q * g \quad (15)$$

gdje je:

- $U$  - uzgon broda,
- $V$  volumen podvodnog dijela broda,
- $q$  gustoća vode,
- $g$  sila teža (gravitacija).



**Slika 20: Prvi uvjet plovnosti**

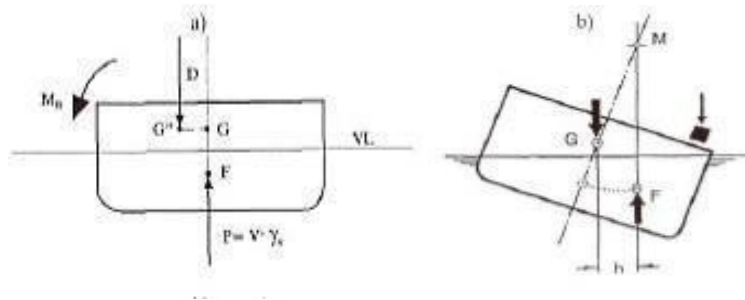
Izvor: <https://repozitorij.pfst.unist.hr/islandora/object/pfst:10/preview>

### ***II uvjet plovnosti***

Težište sustava broda ( $G$ ) i težište uzgona ( $B$ ), odnosno rezultanta svih težinskih sila ( $D$ ) i rezultanta specifičnih sila potiska uzgona ( $U$ ), moraju ležati duž iste napadne linije, okomite na vodnu liniju. Ako prethodno navedeni uvjet nije ispunjen, pojavit će se spreg sila ( $D$ ) i ( $U$ )

Taj spreg sila stvara moment naginjanja broda  $Mn$ , koji naginje brod, a u najnepovoljnijem slučaju može ga i prevrnut. Prva dva uvjeta zahtijevaju da tijelo koje pluta na vodi bude u ravnoteži, dok se trećim uvjetom ispunjava zahtjev stabilne ravnoteže. Brod mora ploviti u stabilnom položaju, tj. ako se zbog djelovanja neke vanjske sile (vjetar, valovi) brod nagne za neki kut, sam se mora vratiti u prvobitni položaj nakon prestanka djelovanja sile koja je izazvala nagib. Zbog sprega sila javlja se moment uspravljanja. Metacentar ( $M$ ) se

mora nalaziti iznad težišta broskog sustava (G), tj. metacentarska visina (MG) mora biti pozitivna, u protivnom se pojavljuje negativni moment ispravljanja (-Mi), odnosno negativni moment stabiliteta (-Mst) koji djeluje u istom smjeru kao i moment naginjanja, što najčešće može prouzrokovati prevrtanje broda. Brod se može nalaziti u tri različita položaja stabiliteta, što je u ovisnosti od međusobnog položaja njegovog težišta sustava (G) i metacentra (M). [4]



**Slika 21: II uvjet plovnosti**

Izvor: Plovnost i stabilnost broda – nastavni materijali predavanja, Fakultet prometnih znanosti, 2018. Zagreb

### III Uvjet plovnosti

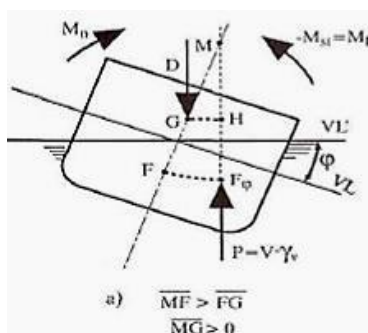
Brod je u stabilnom položaju ako je metacentar (M) iznad težišta sustava broda (G), pa je  $MF > FG$ . U tom slučaju postoji moment stabiliteta (Mst), odnosno moment ispravljanja (M) koji nastoji vratiti brod u prvotni uspravni položaj. Moment koji nastoji vratiti brod u uspravan položaj nakon naginjanja broda pod utjecajem neke vanjske sile. [4]

$$Mst = D * GH * Mst = D * MOG * \sin \varphi \quad (16)$$

Mst u ovisnosti o: [4]

- Deplasmanu – D,
- Metacentarskoj visini –  $MoG$ ,
- Kutu nagiba –  $\varphi$ .

Brod je u indiferentnom položaju ako se metacentar (Mo) i težište sustava broda (G) podudaraju, pa je  $MG = BG$  (FG). Tu ne postoji moment stabiliteta tako da brod ostaje nagnut pod kutom pod kojim leži, sve dok ga neka sila ne prisili na postavljanje u drugi položaj. Brod je u labilnom položaju ako je metacentar (Mo) ispod težišta sustava broda (G), pa je  $MF < FG$ . U tom slučaju postoji moment stabiliteta (Mst), odnosno moment ispravljanja (Mi) koji nastoji vratiti brod u prvotni uspravni položaj. [4]



**Slika 22: Primjer kada je  $MF > FG$**

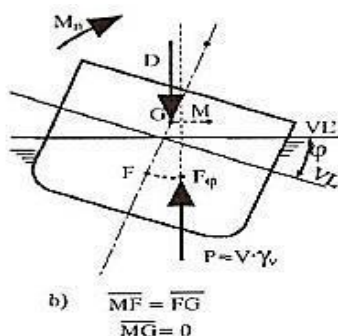
Izvor: Plovnost i stabilnost broda – nastavni materijali predavanja, Fakultet prometnih znanosti, 2018. Zagreb

$$Mst = D * GHMst = D * MOG * \sin\varphi \quad (17) [4]$$

Mst u ovisnosti o:

- Deplasmanu –  $D$
- Metacentarskoj visini –  $MOG$
- Kutu nagiba -  $\varphi$

Brod je u indiferentnom položaju ako se metacentar ( $M_o$ ) i težište sustava broda ( $G$ ) podudaraju, pa je  $MG = BG$  ( $FG$ ). Tu ne postoji moment stabiliteta tako da brod ostaje nagnut pod kutom pod kojim leži, sve dok ga neka sila ne prisili na postavljanje u drugi položaj. Brod je u labilnom položaju ako je metacentar ( $M_o$ ) ispod težišta sustava broda ( $G$ ), pa je  $MF < FG$ . U tom slučaju pojavit će se negativni moment ispravljanja ( $-M_i$ ), odnosno negativni moment stabiliteta ( $-Mst$ ) koji će težiti povećanju kuta nagiba, tj. prouzročit će prevrtanje broda. [4]



**Slika 23: Primjer kada je  $MF < FG$**

Izvor: Plovnost i stabilnost broda – nastavni materijali predavanja, Fakultet prometnih znanosti, 2018. Zagreb

**Stabilitet** je sposobnost broda da se vrati u uspravan položaj nakon što je bio nagnut djelovanjem nekih vanjskih sila, ili je to svojstvo broda da se protivi silama koje ga nastoje pomaknuti iz položaja ravnoteže uslijed djelovanja vanjskih sila ili zbog pomicanja masa na brodu. Odnosno sposobnost da se automatski vrati u uspravan položaj ( položaj ravnoteže) nakon prestanka djelovanja vanjskih sila/momenata koji su ga pomakli iz položaja ravnoteže. Brod koji nema takvo svojstvo ne može uopće ploviti, a brod koji ga nema u dovoljnoj mjeri nije siguran za plovidbu, i predstavlja opasnost za osoblje i teret koji prevozi. Po smjeru gibanja razlikujemo:

- Poprečni stabilitet broda,
- Uzdužni stabilitet broda.

Stabilitet ovisi o formi trupa broda i rasporedu mase (tereta) na brodu, pa se može podijeliti na:

- Stabilitet forme,
- Stabilitet težina.

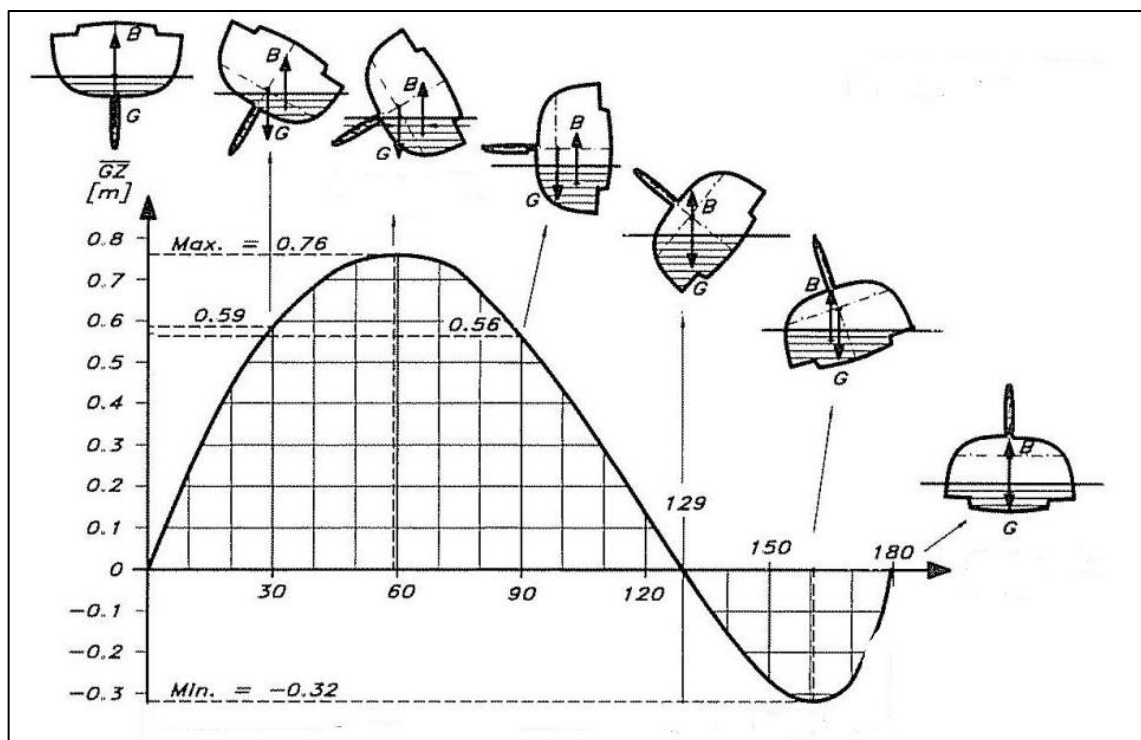
Ovisno o djelovanju momenata, odnosno momenti sila koji djeluju na brod, a potječu od vjetra, valova, prodora mase vode ili tereta, mogu djelovati statički ili dinamički, stoga se razlikuju:

- Statički stabilitet (ukrcani teret, pomak tereta, balast...),
- Dinamički stabilitet (vjetar, valovi...).

### **3.7 Statički stabilitet broda**

Kada vanjske sile djeluju ravnomjerno po jakosti i po pravcu brod se prestaje nagnjati (ali ostaje nagnut). Kada se statički moment nagnjanja vanjske sile izjednači sa statičkim momentom sile uzgona (momentom stabiliteta,  $M_{st}$ ) – tj., kada se uspostavi statička ravnoteža. Prestankom djelovanja vanjskih sila nestaje u moment nagnjanja ( $M_n$ ), a moment stabiliteta ( $M_{st}$ ) vraća brod u prvobitni ravnotežni položaj. Područje OR – opseg ili trajnost stabilnosti GH i  $M_{st}$  pozitivni, do kuta R brod stabilan. Kod klasičnih brodova OR je od 65 - 85°. [4]

Stabilitet broda može se potpuno odrediti ako je poznata veličina poluge stabiliteta (GH). Međutim, za poznavanje momenta statičkog stabiliteta dovoljno je poznavati veličine poluge statičkog stabiliteta (GH) za razne kutove nagiba ( $\varphi$ ). Veličina GH se obično izražava u obliku tzv. Ridovog dijagrama: [4]



**Slika 24: Statički stabilitet broda**

Izvor: <http://nautica-portal.com/forum/index.php?topic=1001.0>

Krivulja statičkog stabiliteta - dijagram koji prikazuje promjenu statičkog stabiliteta. Na apscisi se naznače kutovi nagnjanja broda, a kao ordinate se uzimaju poluge stabiliteta. Kod običnih teretnih brodova poluga i moment stabiliteta imaju maksimalnu vrijednost pri nagnjanju broda od 35–400 , što približno odgovara situaciji kada rub gornje palube zahvaća vod. Stabilitet se dalje postupno smanjuje i traje do kuta nagnjanja od 60-700° kada vrijednost poluge GH postane nula i brod se prevrne. Udaljenost od ishodišta dijagrama do drugog sjecišta krivulje apscisom zove se trajnost ili opseg stabiliteta. Kut pri kojem krivulja stabiliteta dosegne svoj maksimum jest granica do koje se brod može nagnuti bez opasnosti da će se prevrnuti. Kada, međutim statički moment nagnjanja broda postane veći od najvećeg momenta uspravljanja brod će se najčešće prevrnuti. stoga se silazna grana krivulje statičkog stabiliteta broda često naziva upropašćujuća grana krivulje stabiliteta. [4]

Znatnija poboljšanja dobiju se proširenjem broda samo u predjelu teretne vodne linije, dok kod manjih gazova ostaje manja širina i prema tome manji početni stabilitet. Na taj način bi se otklonile posljedice prevelikog stabiliteta, tj. pojačano ljuljanje primjenjuju se na brodovima različiti uređaji –tankovi protiv ljuljanja, ljuljanje kobilice, mehanička pomična pera, brodski zvrk i sl. U praksi se gotovo uvijek vrše proračuni teretnih brodova obično preko poluge statičkog stabiliteta sa šest osnovnih slučajeva opterećenja:

- Brod potpuno opterećen sa teretom i gorivom (s homogenim teretom, sa teškim teretom),
- Brod sa punim teretom bez goriva (s homogenim teretom, sa teškim teretom),
- Opremljen, prazan brod, bez tereta ali sa balastom (s gorivom, bez goriva).

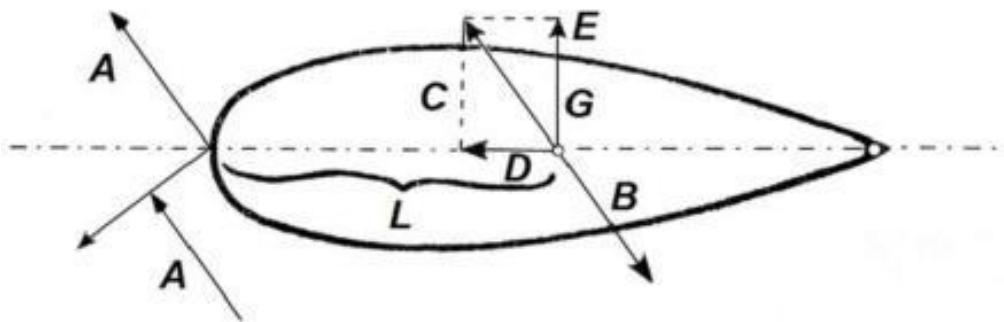
Vrlo stabilni brodovi također lako dolaze u interferenciju s valovima što još jače povećava ljuljanje. Zato se danas grade takvi morski putnički brodovi koji imaju manji početni stabilitet ali zato veliko nadvođe, da ne bi brodu prijetila opasnost od prevrtanja. Kod brodova duge plovidbe, na početku je brod maksimalno opskrbljen gorivom, ima malo nadvođe pa kad bi imao još i mali početni stabilitet, postojala bi opasnost od prevrtanja. [4]

#### 4. VRSTE OTPORA KRETANJA BRODA NA MORU

Osnovne komponente otpora prilikom kretanja broda su:

- Otpor trenja,
- Otpor virova ili utjecaj forme na stvaranje virova,
- Otpor valova.

Gibanju (plovidbi) broda suprotstavljaju se hidrodinamičke i aerodinamičke sile, koje zajednički čine otpor broda. Sila otpora broda, pri nekoj brzini plovidbe, jednaka je sili potrebnoj za tegljenje broda istom brzinom. Silu, jednaku i suprotnu otporu, stvara najčešće neki propulzor, a nazivamo je porivna sila. Dakle pri gibanju broda (plovidbi odabranim kursom) pojavljuju se dvije dinamičke sile, sila otpora i sila poriva (otpor i poriv). One su predmet istraživanja dvije posebne znanstvene discipline Teorije broda, Otpora broda i Propulzije broda. Teorija otpora vode i zraka nastala gibanjem broda temelji se na hidrodinamičkim zakonima. Poznavanje teoretskih osnova otpora daje mogućnost projektiranja brodova s manjim otporom uz zadovoljenje ostalih zahtjeva. To omogućava smanjenje snage glavnih pogonskih strojeva ili pri istoj snazi povećavanje brzine. Oba slučaja dovode do poboljšanja eksploatacijskih karakteristika broda. [2]



**Slika 25: Prikaz otpora sila kretanja broda**

Izvor: <http://nautica-portal.com/forum/index.php?topic=4839.60>

Sila A koja kao zbroj svih sila strujanja vode, djeluje u težištu kormila. Ona uzrokuje izbijanje krme u lijevo. Zbog djelovanja sile A nastaje u težištu broda sila B, koja okreće pramac broda u desno. Tom okretanju u desno se suprotstavlja sila otpora vode C, sa hvatištem u težištu broda G. Ta je sila jednaka po jačini sili B, ali je protivnog djelovanja. [2]



Sile A i B, kako se na slici vidi, stvaraju par sila sa krakom L, koje nastoje brodsku krmu okrenuti u desno. Ako se sila otpora vode C, po zakonu paralelograma sila, rastavi u dvije komponente, dobije se sila D, koja djeluje u uzdužnici broda, te usporava brzinu, i sila E koja djeluje okomito na uzdužnicu, te naginje brod prilikom okretanja. Osim toga, dobiven je uvid u prirodu osnovnih hidrodinamičkih pojava opstrujavanja trupa broda te mogućnost da se izmjenom više varijanti forme modela dođe do najpovoljnije forme sa stajališta otpora. [2]

Definiranjem metode određivanja otpora, koja je modificirana i danas se primjenjuje u svim bazenima (bazenima za ispitivanje modela plovila) svijeta (kod nas u Brodarskom institutu u Zagrebu), Froude je učinio revolucionaran korak u razvoju teorije broda i brodske hidrodinamike. Danas se sve hidrodinamičke značajke broda ispituju ili provjeravaju u, za tu svrhu, moderno opremljenim bazenima, koje danas imaju sve značajnije pomorske zemlje. [2]



Slika 26: Bazen za ispitivanje sila otpora broda  
Izvor: Brodarski institut u Zagrebu

#### 4.1. Komponente otpora broda

Pri gibanju broda kroz vodu, na površinu podvodnog dijela trupa djeluju hidrodinamičke sile reakcija mase vode na tijelo koje se u njoj giba, koja je neravnomjerno raspoređena po površini. Suma reakcija svih sila koje djeluju na trup broda, na uzdužnu simetralnu ravninu (ravnina  $x, z$ ) čini silu otpora broda. Smjer sile otpora suprotan je smjeru gibanja broda, odnosno djeluje u smjeru strujanja vode. [2]

Fizikalna priroda sila koje čine otpor vode je različita. Jedne se javljaju kao posljedica viskoznosti (unutrašnjeg trenja) tekućine, a druga kao posljedica djelovanja gravitacije (ubrzanja sile teže) na masu tekućine. Na element površine djeluju dvije elementarne hidrodinamičke sile. One nastaju od tangencijalnih naprezanja na površini i normalnog tlaka na površinu. Tangencijalna elementarna sila je sila koju dobijemo sumiranjem svih elementarnih tangencijalnih sila na pravac gibanja broda te ga nazivamo otpor trenja. Normalna elementarna sila tlaka na uronjenu površinu je tlaku površine. Suma svih elementarnih sila tlaka na pravac gibanja broda čini komponentu otpora koja se naziva otpor tlaka  $R_p$ . [2]

Tlakovi su neravnomjerno raspodijeljeni po površini trupa, na pramčanom su veći nego na krmenom, pa iz te razlike i nastaje otpor tlaka. Otpor tlaka se dijeli, prema vidljivim pojavama, na otpor virova  $R_v$  i na otpor valova  $R_w$ . Otpor virova nastaje djelomično, kao posljedica forme a djelomično, kao i otpor trenja, zbog viskoznosti vode, a otpor valova posljedica je djelovanja gravitacije (težinskog svojstva tekućine). [2]

Valovi nastaju gibanjem broda na površini ili u blizini površine vode zbog promjene hidrodinamičkog tlaka uzduž broda nastalog uslijed strujanja vode zbog djelovanja gravitacije. Nastali valovi i sami mijenjaju raspodjelu tlaka duž broda. [2]

Ukupna sila otpora vode gibanju broda, sastoji se od tri komponente: otpora trenja, otpora virova i otpora valova odnosno njihovog zbroja:

$$R = R_f + R_v + R_w \quad (18)$$

Ako je tijelo koje se giba u tekućini duboko uronjeno ono ne stvara valove na površini, pa je otpor valova jednak nuli. U tom slučaju otpor vode sastoji se od otpora trenja i otpora virova (zaronjena podmornica):

$$R = R_f + R_v \quad (19)$$

Kada bi se tijelo gibalo na velikoj dubini u idealnoj tekućini (zamišljena tekućina bez unutrašnjeg trenja – viskoznosti), tada bi ukupan otpor bio jednak nuli. To je Dalamberov paradoks. Brod se giba na granici dvaju medija – vode i zraka. Nadvodni se dio giba u zraku koji, kao i voda pruža otpor gibanju broda. Na površini nadvodnog dijela nastaju aerodinamičke sile. One su, kao i hidrodinamičke, neravnomjerno raspoređene po površini. Otpor zraka  $R_z$  se sastoji fizikalno i od istih komponenta kao i otpor vode, od kojih su značajnije otpor forme i trenja. Međutim, zbog manjeg značaja otpora zraka njega ne razlažemo na komponente. [2]

Brod također ima niz privjesaka ili izdanaka na svom podvodnom dijelu trupa, kao što su kormila, propeleri, ljuljne kobilice, skrokovi osovina, nogavice, tuneli bočnih porivnih

sredstava i drugi čiji otpor kojeg nazivamo otpor izdanaka  $R_t$  treba posebno pribrojiti otporu vode. Ukupni otpor broda može se izraziti kao suma svih komponenata otpora: [2]

$$RT = Rf + Rv + Rw + Ri + Rz \quad (20)$$

Otpor trenja i otpor forme, kao posljedice viskoznosti, kao posljedica viskoznosti, čije se postojanje očituje u pojavi graničnog sloja vode uz površinu trupa i virova iza broda, mogu se zbrojiti zajedno u viskoznu komponentu otpora vode:

$$Rv = Rf + Rw \quad (21)$$

Viskozna komponenta sile otpora funkcija je Rejnoldsovog broja  $R_n$ :

$$Rv = f(R_n) \quad (22)$$

Rejnoldsov broj je bezdimenzionalni broj određen je izrazom:

$$R_n = \frac{v \cdot L}{\nu} \quad (23)$$

pri čemu je:

- $v$  [m/s] brzina broda,
- $L$  [m] duljina broda,
- $\nu$  [m<sup>2</sup>/s] kinematički koeficijent viskoznosti.

Otpor valova se očituje u stvaranju valova na površini tekućine. Kad su valovi na površini gravitacijska pojava, iako uzrokovani promjenom tlaka u tekućini, oni nastaju zbog mase tekućine u gravitacijskom polju te je tada otpor valova funkcija drugog bezdimenzionalnog broja kojeg nazivamo Froude-ov broj  $F_n$ , te je:

$$Rw = f(F_n) \quad (24)$$

Froude-ov broj određen je izrazom:

$$F_n = \frac{v}{\sqrt{gL}} \quad (25)$$

pri čemu je:

- $v$  [m/s] brzina gibanja,
- $L$  [m] duljina na vodnoj liniji ( $L_vL$ ),
- $g$  [m/s<sup>2</sup>] gravitacijska konstanta. [2]

Hidrodinamička komponenta otpora broda, prema ovoj podijeli, jednaka je:

$$R = Rv + Rw \quad (26)$$

Iz praktičnih razloga, nastalih nepoznavanjem zakonitosti pojava koje se javljaju pri opstrujivanju trupa, Froude je ukupni otpor vode podijelio na otpor trenja  $R_f$  i preostali otpor  $R_r$ , koji se sastoji od otpora forme i otpora valova: [2]

$$R = R_f + R_r = R_f \quad (27)$$

Brzina se brodova karakterizira nekom vrijednošću Froude-ovog broja ( $F_n$ ) kao relativnom brzinom. U zavisnosti od vrijednosti Froudeovog broja mogu se brodovi podijeliti na:

- spore brodove ( $F_n < 0,22$ ) punih formi za koje je presudan otpor trenja i iznosi do 80% ukupnog otpora,
- srednje brze brodove ( $0,23 < F_n < 0,35$ ) s udjelom otpora trenja do 70 % ,
- brze brodove ( $F_n > 0,35$ ) u kojih se počinje dominirati otpor valova, a otpor trenja se u ukupnom udjelu mijenja od 50 % na niže s daljnjim povećanjem brzine.

Vrijednost Froude-ovog broja 0,35 rijetko prelaze trgovački brodovi zbog velike neekonomičnosti, nego samo ratni brodovi i to u kratkotrajnim vožnjama. Udio otpora virova je 5 ÷ 15% zraka (bez vjetra) 1,5 ÷ 3%. [2]

Snaga otpora ili efektivna snaga se dobije ako se ukupna sila otpora pomnoži sa brzinom:

$$P_e = RT * v \quad (28)$$

Ovako dobivena snaga na temelju određivanja otpora vrijedi za novi čisti trup pri vožnji na mirnoj i dovoljno dubokoj vodi. U eksploataciji će brod naići na niz različitih uvjeta, koje nije moguće unaprijed predvidjeti, a koji, u pravilu već od samog početka eksploatacije povećavaju otpor i traže dodatnu snagu. To su obraštanje podvodnog dijela i povećanje hrapavosti oplata, vjetar, valovi, ograničena dubina vode uski prolazi i riječni tok i drugi. [2]

## 4.2. Otpor trenja

Sa stajališta eksploatacije broda otpor trenja je najvažnija komponenta ukupne sile otpora. Otpor trenja je posljedica djelovanja tangencijalnih naprezanja između čestica vode i brodske oplata unutar graničnog sloja. Još prije Froude-a bilo je poznato da otpor trenja ovisi o veličini i hrapavosti površine, viskoznosti i gustoći tekućine. No nije se ništa znalo o prirodi strujanja i njegovom utjecaju na Otpor trenja. Froude-ova formula za otpor trenja, koju je on postavio na bazi svojih eksperimenata s pločama, teoretski nije zadovoljavala. Dublje poimanje otpora trenja dala su istraživanja Reynolds (1888.). [2]

Eksperimentirajući sa strujanjem tekućine kroz cijevi različitog promjera i hrapavosti unutrašnje stjenke, Reynolds je utvrdio stanoviti pad brzine tekućine u blizini stjenke cijevi.

Na taj način izdvojen je dio tekućine nazvan "granični sloj" u kojem se čestice tekućine gibaju sporije što su bliže stjenci, da bi im na samoj površini stjenke brzina bila nula. Na taj način je utvrđeno postojanje otpora unutar graničnog sloja koji ovisi o nekoliko faktora, koji se mogu složiti u jedan bezdimenzionalni koeficijent, kasnije nazvan Reynoldsov broj. Na osnovu vrijednosti njegovog broja ustanovljena su dva načina strujanja tekućine: laminarno i turbulentno. [2]

Do vrijednosti kritičnog Reynoldsovog broja  $R_{nkr}$  strujanje je laminarno, a preko toga turbulentno. Time se mijenja i veličina otpora pri strujanju. Ovo treba imati u vidu prilikom određivanja veličine otpora putem tegljenja ili određivanja otpora trenja ekvivalentne glatke ploče. Prilikom tegljenja modela u bazenu konstantnom brzinom gotovo na cijeloj duljini osim malog dijela na krmi, režim strujanja je laminiran ( $R_n < R_{nkr}$ ). Poveća li se brzina (veći  $R_n$ ) točka prijelaza laminarnog režima strujanja u turbulenti pomiče se prema pramcu. Daljnjim povećanjem brzine, točka prijelaza se dalje pomiče prema pramcu, dok konačno turbulentni režim ne zahvati cijelu duljinu modela. Kako pomicanje točke prijelaza prema pramcu nije proporcionalno povećanju  $R_n$ , može se pretpostaviti da trenje u uzvjesnom stupnju zavisi i od forme trupa (trodimenzionalnost forme). [2]

Debljina graničnog sloja raste od pramca prema krmi. Brzina čestica vode unutar graničnog sloja, počevši od glavnog rebra, pada i u nekoj točki krmenog završetka potpuno gubi kinetičku energiju (točka stagnacije) što dovodi do otkidanja graničnog sloja. Iza te točke vidljiva je pojava virova i relativno strujanje vode u suprotnom smjeru takozvana zona sustrujanja. Rezultat takvog strujanja je otpor virova. Ako se otpor trenja izrazi preko koeficijenta otpora  $C_f$  i hidrodinamičke sile:

$$\frac{1}{2} \rho v^2 S \quad (29)$$

dakle:

$$R_f = C_f * \frac{1}{2} \rho * v^2 S \quad (30)$$

- $S$  – oplakana površina trupa [ $m^2$ ],
- $\rho$  – gustoća vode [ $kgm^{-3}$ ],
- $v$  – brzina gibanja broda [ $ms^{-1}$ ]. [2]

### 4.3. Otpor virova ili utjecaj forme na stvaranje virova

Pojavljaju se tri osnovna razloga utjecaja forme na otpor virova. Forma trupa je trodimenzionalna u odnosu na dvodimenzionalnost ploče na temelju koje se određuje otpor trenja. Uslijed zakrivljenosti broskog trupa mijenja se brzina strujanja duž trupa, što se prema Bernulijevom zakonu održava na promjenu tlaka. Brzina se strujanja povećava do sredine, a zatim se smanjuje prema krmi. Pošto je putanja jedne strujnice niz zaobljenu formu trupa veća od putanje niz ravnu ploču, to i prosječna brzina mora biti veća. Prema tome i otpor trenja mora biti veći od otpora ploče. Što je forma punija (manji odnos  $L/B$  i veći koeficijent istisnine  $CB$ ), ovo povećanje je veće. [2]

Granični sloj prema krmi poprima najveću debljinu i time djeluje kao da prividno produžuje formu krme. Otklanjanje strujnica potencijalnog strujanja izvan takvo graničnog sloja rezultira smanjenjem vrijednosti povišenog tlaka na krmi. Time se povećava razlika između pramčanog i krmenog tlaka što čini otpor viskoznog tlaka. [2]

Loše hidrodinamički riješena forma uzrokuje pojavu točke stagnacije unutar graničnog sloja (A) i otkidanje vrtloga. To znači da strujnice ne teku glatko niz trup, nego, pošto ne mogu slijediti njegov oblik, dovode do otkidanja graničnog sloja i vrtloženja. [2]

Virovi sobom odnose dio energije koju je brod utrošio za njihovo stvaranje, a to je onda otpor virova. Na ovu pojavu najviše utječe dužina krmenog zaoštrenja trupa. Smanjenje otpora virova postiže se dobrom hidrauličkom formom trupa i privjesaka na podvodnom dijelu, te smanjivanjem površine podvodne površine oplata broda. [2]

### 4.4. Otpor valova

Brod prilikom svog gibanja stvara na površini složen sustav valova. Sustav se sastoji o pramčanih i krmenih razilaznih i poprečnih valova. Valovi odnose dio energije broda utrošene na njihovo stvaranje. Pramčani sustav valova nastaje na mjestu povišenog hidrodinamičkog tlaka, iza pramčane statve, i uvijek počinje s valnim brijegom. Krmeni sustav počinje s valnim brijegom ili dolom u zavisnosti od forme krme i trenja te nastaje nešto ispred krmene statve. [2]

Razilazni valovi čine niz kratkih valova čije središnjice sa simetralom broda zatvaraju kut  $\alpha = 18 - 20^\circ$ , a tangente na njihovu frontu kut  $\beta = 2\alpha$ . Poprečni su svojom frontom okomiti na simetralu broda. Njihova se fronta povećava s udaljavanjem od pramca ili krme, a visina pada. Pramčani poprečni valovi interferiraju s krmenim, pri čemu je ta interferencija povoljna ako smanjuje krmeni sustav, a nepovoljna ako ga pojačava. Pojava interferencije valnih sustava i njezini efekt ovisi o brzini i duljini broda, odnosno o Froude-ovom broju. [2]

Otpor valova je sila koja održava stvoreni sistem valova, čija je brzina jednaka brzini broda i koji tako putuje s brodom. Energija koju sa sobom odnose valovi dio je energije brodskih pogonskih strojeva što se troši na pokretanje broda. Brzina deplasmanskih brodova upravo je ograničena postojanjem otpora valova, pa to je razlog što su maksimalne brzine brodova u proteklih sto godina povećale. Granica prihvatljive maksimalne brzine gibanja površinskog, deplasmanskog broda može se odrediti promatrajući odnos duljine vala i duljine broda. U praksi ta granica nastupa onda kada je duljina vala  $\lambda$  približno jednaka duljini broda ( $L$ ) na plovnoj vodnoj liniji. [2]

Pošto je brzina vala jednaka brzini broda, za  $\lambda = L$  i poznatu brzinu vala,  $u$  koju umjesto uvrstimo  $L$ ,

$$v = \sqrt{\frac{g}{\lambda}} \quad (31)$$

$$v = \sqrt{\frac{gL}{2\pi}} \quad (32)$$

dobivamo vrijednost Froude-ovog broj za taj granični slučaj:

$$Fn = \frac{v}{\sqrt{gL}} = \frac{gL}{\sqrt{2\pi}gL} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} = 0.4 \quad (33)$$

Stvarna brzina koja odgovara ovom graničnom slučaju naziva se granična brzina broda. Nastojeći da se postigne brzina veća od granične brod bi se, tako reći, morao popeti na vodeni brijeg koji stvara ispred sebe. U nekim slučajevima brodovi sa snažnim pogonskim strojevima i uskim vodnim linijama (razarači) mogu postići vrlo veliku relevantnu brzinu ( $F_n$ ), ali je to vrlo neekonomično pa o tome treba voditi računa pri eksploataciji broda. Pošto je povećanje brzina klasičnih deplasmanskih brodova danas moguće jedino neekonomičnim povećanjem snage pogonskih strojeva, traže se druga rješenja. To se ostvaruje i udaljavanjem trupa broda od površine vode bilo da se od nje uzdigne (gliseri, hidrokrilni i ledenjaci), bilo da se trup dublje uroni (podmornice). I pored toga, zbog drugih prednosti deplasmanskih brodova, s tom činjenicom ograničenje brzine mora biti prihvaćeno. [2]

Otpor broda određuje se pokusom tegljenja modela u bazenu ili na osnovu statističkih podataka serijskih ispitivanja i približnih formula. Prema Froude-ovoj metodi ukupni otpor broda dijeli se na otpor trenja  $R_f$  i preostali otpor  $R_R$ . Uz zadovoljavanje kriterija sličnosti, a to je jednakost Froude-ovih brojeva od kojih ovise ukupni otpor valova i donekle otpor virova. Iz jednakosti Froude-ovih brojeva, te unaprijed određene dimenzije modela (određuju

se u skladu s dimenzijama bazena za ispitivanje modela) dobivamo potrebnu brzinu modela u bazenu:

$$\frac{V_B}{\sqrt{L_B}} = \frac{V_M}{\sqrt{L_M}} \quad (34)$$

$$V_M = V_B \sqrt{\frac{L_M}{L_B}} = \frac{V_B}{\sqrt{\lambda}}, \quad (35)$$

gdje je:

- $V_B$  – brzina broda [m/s],
- $V_M$  – brzina modela [m/s],
- $L_B$  – duljina broda [m],
- $L_M$  – duljina modela [m], [2].

$\lambda = L_B/L_M$  – linearno mjerilo ili koeficijent geometrijske sličnosti broda ili modela. Tegljenjem modela odgovarajućom brzinom određuje se ukupni otpor modela  $R_{TM}$ . Kako se otpor trenja modela i broda može izračunati, tada je preostali otpor modela:

$$RRM = RTM - RFM \quad (36)$$

ili izraženo preko koeficijenta otpora:

$$CRM = CTM - CFM = CRB \quad (37)$$

Pri jednakosti Froude-ovih brojeva koeficijent preostalog otpora modela i koeficijent preostalog otpora broda jednaki su ( $CRM = CRB$ ). Na taj se način može odrediti ukupni otpor broda, odnosno koeficijent ukupnog otpora broda:

$$CTB = CFB + CRB + CA \quad (38)$$

gdje je:

$C_A$  – korelacionarni dodatak ( dodatak hrapavosti). [2]

Ukupni otpor broda određen je izrazom:

$$RT = CT * \frac{1}{2} * \rho v^2 S \quad (39)$$

Smanjivanje otpora valova za zahtijevanu brzinu postiže se finijom formom, povoljnom interferencijom valnih sustava, ugradnjom bulba na pramcu kod nekih brodova i slično. Pramčani bulb se primjenjuje kao rješenje radi prigušenja pramčanog vala kod brzih brodova punije forme. Svrha mu je da se izmjeni raspored tlakova na pramčanom ili krmenom dijelu broda (krmeni bulb) i omogući povoljnija interferencija valova. [2]



## 5. PRORAČUN OTPORA SILA KRETANJU BRODA

U ovome poglavlju prikazat će se ispitivanje proračuna otpora sila kretanju broda. Tablicama i grafovima prikazat će se optimalno rješenje brodskog motora za pojedine brzine broda s obzirom na sile otpora koje utječu na njegovo kretanje. Ispitivanja su vršena u bazenu Brodarskog instituta u Zagrebu prema idealnim uvjetima. Također, modeli su izrađeni prema narudžbi privatnih tvrtki te zbog privatnosti podataka vrsta broda i njegova namjena nije poznata. [5]



**Slika 27: Prikaz modela za ispitivanje**

Izvor: Pokusi otpora broda, Brodarski institut u Zagrebu, 2018.

### ***REZULTATI ISPITIVANJA:***

Rezultati ispitivanja u ovom izvještaju odnose se na označene modele iz sheme serije prikazano tablicom 1. Dane su vrijednosti za četiri modela ali proračun je izvršen samo za model M-1122. U tablici 1. prikazan je omjer duljina i širina vodnih linija i gaza za modele na kojima se vršilo ispitivanje zajedno s balastom. Kroz daljnje ispitivanje uzete su vrijednosti samo prvog modela kako bi se kasnije podaci mogli prenijeti na brod. Zapravo to je hipotetički brod, koji se dobije prenošenjem rezultata s modela na brod  $\lambda = 45$ . Rezultati hipotetičkog broda vrijede za morsku vodu ( $\rho = 1026 \text{ kg/m}^3$ ) i temperaturu vode  $15^\circ \text{ C}$ . [5]

**Tablica 1. Odnosi vrijednosti modela prilikom ispitivanja**

	Omjer duljine i širine vodne linije	Balast	Omjer širine na vodnoj liniji i gaz	Balast
M-1122	LWL/BWL= 4,625	4,399	BWL/T= 4,50	6,87
M-1123	LWL/BWL= 6,375	6,06	BWL/T= 4,50	6,87
M-1124	LWL/BWL= 6,375	6,06	BWL/T= 3,50	5,345
M-1125	LWL/BWL= 4,625	4,399	BWL/T= 3,50	5,345

Izvor: Pokusi otpora broda, Brodarski institut u Zagrebu, 2018.

## **MODELI**

Brodski modeli izvedeni su iz parafina. Za vrijeme ispitivanja modeli su imali ugradbenu žicu promjera 1 [mm] na 19 teorijskom rebru za stimuliranje turbulencije. Površine modela su bile tehnički glatke. [5]



**Slika 28: Model za ispitivanje otpora broda**

Izvor: Pokusi otpora broda, Brodarski institut u Zagrebu, 2018.

## **POKUSI OTPORA I PRENOŠENJE REZULTATA S MODELA NA BROD**

Za vrijeme pokusa otpora modeli nisu imali ugradbeno kormilo. Vučna sila, sila tegljenja, bila je u pravcu osi osovine valja, a hvatište približno u težištu istisnine. Tijekom ispitivanja model je imao sve slobode gibanja, osim translacije bočno i rotacije oko vertikalne osi. Prenošnje rezultata s modela na hipotetički brod provedeno je pomoću korelacijske linije. ITTC 1957 s ukupnim koeficijentom korelacije  $\Delta C_T = 0$  za sve modele ovog ispitivanja na punom gazu i u balastu. Ovaj korelacijski dodatak vrijedi samo za hipotetičke

brodove, a dobije se prenošenjem rezultata s modela na brod geometrijskim mjerilom  $\lambda = 45$ .  
[5]



**Slika 29: Prikaz modela za mjerenje sile dinamometrom**

Izvor: Pokusi otpora broda, Brodarski institut u Zagrebu, 2018.

Prenošenje rezultata s modela na brod provedeno je standardnom metodom BI-a koja predstavlja da je koeficijent preostalog otpora  $C_R$  isti za brod i model pri istim Froude-ovim brojevima modela i broda. Koeficijent ukupnog otpora broda dobiven je na sljedeći način:

- koeficijent ukupnog otpora modela:

$$CT_m = C_R + CF_m \quad (40)$$

- koeficijent preostalog otpora modela (broda):

$$C_R = CT_m - CF_m \quad (41)$$

- koeficijent ukupnog otpora broda:

$$CT = C_R + CF + \Delta CT \quad (42)$$

Ukupni otpor broda određen je prema izrazu:

$$RT = CT \frac{1}{2} \rho v^2 S \quad (43)$$

a snaga tegljenja prema:

$$PE = \frac{RT \cdot v}{1000} \quad (44)$$

[5]

**Tablica 2. Koeficijenti i otpori prilikom kretanja modela**

CTm	koeficijent ukupnog otpora modela	1
CFm	koeficijent otpora trenja modela	1
CR	koeficijent preostalog otpora modela i broda	1
CT	koeficijent ukupnog otpora broda	1
CF	koeficijent otpora trenja broda	1
$\Delta CT$	koeficijent ukupnog relacijskog dodatka	1
RT	Ukupni otpor broda	N
PE	efektivna snaga ili otpor tegljenja	kW
$\rho$	gustoća morske vode	kg/m <sup>3</sup>
v	brzina broda	m/s
S	oplakana površina	m <sup>2</sup>

Izvor: Pokusi otpora broda, Brodarski institut u Zagrebu, 2018.

Tablica 2. prikazuje glavne parametre koji se pojavljuju prilikom ispitivanja te su dane njihove vrijednosti. Potrebi su svi parametri za daljnji proračun. Proračun se izračunava iz prethodno navedenih formula (40), (41), (42), (43), (44). Najvažniji parametri su: koeficijent ukupnog otpora modela CTm, koeficijent otpora trenja modela CFm te efektivna snaga PE. Temeljem danih podataka dobivaju se gafovi koji prikazuju ovisnosti ovih koeficijenata o brzini ispitanog modela za hipotetički brod.

**Tablica 3. Hidrostatki podaci ispitivanog modela**

<b>Model 11</b>	<b>M-1122</b>	<b>BROD</b>	<b>MODEL</b>
Duljina između okomica		234,43 m	5,2318 m
Duljina na vodnoj liniji		240,02 m	5,3338 m
Širina na središnjem presjeku		5188 m	1,1530 m
Najveća širina vodne linije		51,88 m	1,1530 m
Širina na najvećem presjeku		51,88 m	1,1530 m
Gaz na pramcu		11,53 m	0,2562 m
Gaz na krmi		11,53 m	0,2562 m
Gaz na središnjem presjeku		11,53 m	0,2562 m
Gaz na najvećem presjeku		11,53 m	0,2562 m
Površina središnjeg presjeka		595,16 m <sup>2</sup>	0,2939 m <sup>2</sup>
Površina najvećeg presjeka		595,16 m <sup>2</sup>	0,2939 m <sup>2</sup>
Površina vodne linije		11178 m <sup>2</sup>	5,5201 m <sup>2</sup>
Oplakana površina golog trupa		15457 m <sup>2</sup>	7,6330 m <sup>2</sup>
Oplakana površina s privjescima		15635 m <sup>2</sup>	7,7209 m <sup>2</sup>
Gustoća vode		1,026 t/m <sup>3</sup>	
Volumen istisnine		117246 m <sup>3</sup>	1,2867 m <sup>3</sup>
Masa istisnine golog trupa		120295 t	
Masa istisnine s privjescima		120463 t	12885 t
Uzdužni položaj težišta istisnine		4,34 m	0,0965 m
Uzdužni vertikalni položaj težišta istisnine			1,845 Lpp
Vertikalni položaj težišta istisnine			5,99 m
<b>KOEFICIJENTI I OMJERI</b>			
Koeficijent punoće vodne linije			0,8976
Koeficijent punoće središnjeg presjeka			0,995
Koeficijent punoće najvećeg presjeka			0,995
Koeficijent punoće forme		Lpp	0,8325
Koeficijent punoće forme		Lwl	0,8166
Prizmatički koeficijent			0,8368
Vertikalni prizmatički koeficijent			0,9098
Froudeov koeficijent duljine		M	4,6102
Froudeov koeficijent oplakane površine			6,4524
Omjer duljine i širine na WL			4,626
Omjer širine na WL i gaza na sredini			4,5004

Izvor: Pokusi otpora broda, Brodarski institut u Zagrebu, 2018.

U 3. tablicu uneseni su hidrostatski podatci vezani za model M - 1122 na kojem se provodi pokus. Ovi podaci preneseni su i kroz daljnji tijek proračuna. Hidrostatski podaci važni su zbog osnovnih parametra modela kako bi se njegovi podatci stavili u odnos sa hipotetičkim brodom jer se krajnji rezultati ispitivanja prenose u realne uvjete. U tablici je navedena širina, duljina, gaz, površina presjeka, volumen i masa istisnine uzdužnog i vertikalnog položaja. Koeficijenti punoće presjeka, vodnih linija, punoće forme, prizmatički koeficijent i omjer širina i duljina ispisani su u obliku omjera modela naspram hipotetičkog broda. Najvažniji koeficijent je Froudeov jer se pomoću njega računaju vrijednosti prikazane u sljedećoj tablici.

**Tablica 4. Izmjerene vrijednosti modela i stanja vode prilikom pokusa**

STANJE MODELA			STANJE VODE U BAZENU			
Gaz na pramcu	0,256 m		Temperatura	285,75 K		
				(12,6°C)		
Gaz na krmi	0,2562 m		Gustoća	999,34 kg/m <sup>3</sup>		
Volumen istisnine	1,2867 m <sup>3</sup>	Kinematički viskozitet			1.215 E-6 m <sup>2</sup> /s	
Masa modela	0,6645 t					
Privjesci	Nema					
Sredstvo turbulencije	Žica za preusmjeravanje na 19 rebru					
V <sub>m</sub> (m/s)	Fn (Lwl)	Fn	RT <sub>m</sub>	CT <sub>m</sub>	Lw <sub>lm</sub> (m)	Sm (m <sup>2</sup> )
		(Vol)	(N)	* 1000		
0,401	0,055	0,123	3,64	5,935	5,3338	7,633
0,5001	0,069	0,153	4,95	5,191	5,3338	7,633
0,549	0,076	0,168	5,78	5,028	5,3338	7,633
0,6	0,083	0,184	7,06	5,142	5,3338	7,633
0,7	0,097	0,214	8,65	4,629	5,3338	7,633
0,801	0,111	0,245	11,08	4,528	5,3338	7,633
0,9	0,124	0,276	14,02	4,538	5,3338	7,633
0,95	0,131	0,291	15,52	4,509	5,3338	7,633
1,049	0,145	0,321	19,4	4,622	5,3338	7,633
1,1	0,152	0,337	20,62	4,468	5,3338	7,633
1,201	0,166	0,368	24,62	4,475	5,3338	7,633
1,3	0,18	0,398	29,78	4,62	5,3338	7,633
1,4	0,194	0,429	35,85	4,796	5,3338	7,633

Izvor: Pokusi otpora broda, Brodarski institut u Zagrebu, 2018.

Podaci navedeni u tablici 4. odnose se na podatke ispitivanog modela te stanja vode u bazenu. Upisane vrijednosti dobivene su u laboratorijskim uvjetima (mirna voda, kontrolirana temperatura vode, nema vjetra, valova). Prilikom pokusa model je bio pušten pri različitim brzinama koje su u tablici označene s ( $V_m$ ), te izražene u metrima po sekundi.  $F_n$  je Froudeov broj koji se dobiva formulom (25) i izračunat je prema duljini vodne linije  $i$  na bazi istisnine.  $R_{Tm}$  je sila otpora koja se mjeri prilikom pokusa,  $C_{Tm}$  računa se prema prethodno navedenoj formuli (42).  $S_m$  je oplakana površina golog trupa izražena u metrima kvadratnim navedena u tablici 3 iz koje se također očitava i duljina na vodnoj liniji odnosno  $L_{wl}$ .

**Tablica 5. Statistički podatci izgladenog modela**

V <sub>m</sub> (m/s)	CT <sub>m</sub> (rac)	CT <sub>m</sub> (izgl)	Apsolutna pogreška	Regresivna pogreška (%)
	* 1000	*1000	* 1000	
0,401	5,935	5,049	0,886	17,55
0,5	5,191	4,883	0,308	6.,1
0,549	5,028	4,808	0,22	4,57
0,6	5,142	4,738	0,404	8,52
0,7	4,629	4,629	0	0
0,801	4,528	4,557	0,029	-0,65
0,9	4,538	4,521	0,017	0,38
0,95	4,509	4,512	0,003	-0,06
1,049	4,622	4,508	0,114	2,53
1,1	4,468	4,516	0,048	-1,06
1,201	4,475	4,558	0,083	-1,82
1,3	4,62	4,637	0,017	-0,37
1,4	4,796	4,734	0,053	1,12
Ukupni koeficijent korelacije			0,6922	
Standardna pogreška			3,52E-04	

Izvor: Pokusi otpora broda, Brodarski institut u Zagrebu, 2018.

Tablica 5. prikazuje statistiku temeljenu na izgladenim vrijednostima gdje se na kraju dobiva odstupanje. Brzina i ukupni otpor modela ispisan je iz tablice 4 zajedno sa C<sub>m</sub> (rac) dok se izgladeni ukupni otpor izračunava prema formuli:

$$CT_m = \frac{RT_m}{\frac{1}{2} * \rho * v^2 * S}. \quad (45)$$

Apsolutna i regresivna pogreška dobiva se uzimajući u obzir sve prethodno navedene podatke. Odstupanje je prikazano u rubrici standardna pogreška. Standardna pogreška iznosi 3,25E – 04 koja je nastala temeljem ispitivanja.



**Tablica 6: Konačni rezultati modela**

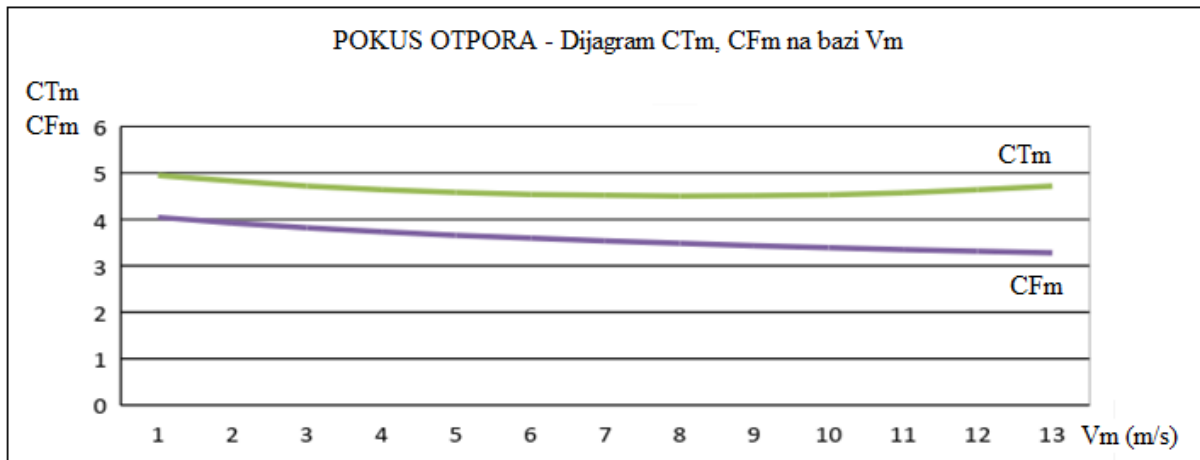
Vm	Fn	Rn	RTm	CTm	CFm *1000	CR
(m/s)	(LwL)	*10 <sup>-7</sup>	(N)	* 1000		* 1000
0,46	0,064	0,202	4	4,948	4,046	0,902
0,537	0,074	0,236	5,3	4,826	3,923	0,903
0,613	0,085	0,269	6,78	4,721	3,821	0,9
0,69	0,095	0,303	8,42	4,638	3,734	0,903
0,767	0,106	0,337	10,27	4,577	3,659	0,918
0,844	0,117	0,37	12,32	4,538	3,593	0,945
0,92	0,127	0,404	14,59	4,517	3,534	0,982
0,997	0,138	0,438	17,08	4,507	3,482	1,026
1,074	0,148	0,471	19,83	4,511	3,434	1,077
1,15	0,159	0,505	22,87	4,532	3,39	1,142
1,227	0,17	0,539	26,27	4,575	3,35	1,225
1,304	0,18	0,572	30,08	4,641	3,313	1,328
1,38	0,191	0,606	34,31	4,721	3,279	1,442
		Korelacioni dodatak		0		
			<b>BROD</b>			
V	Fn	Fn	Rn	CT	CF	(K)
(CV)	(LWL)	(Vol)	* 10 <sup>-8</sup>	* 1000	* 1000	
6	0,064	0,141	6,235	2,527	1,624	0,501
7	0,074	0,164	7,274	2,496	1,593	0,584
8	0,085	0,188	8,313	2,467	1,566	0,668
9	0,095	0,211	9,352	2,447	1,543	0,751
10	0,106	0,235	10,391	2,441	1,523	0,835
11	0,117	0,258	11,43	2,451	1,506	0,918
12	0,127	0,282	12,469	2,472	1,49	1,001
13	0,138	0,305	13,508	2,501	1,475	1,085
14	0,148	0,329	14,547	2,539	1,462	1,168
15	0,159	0,352	15,586	2,592	1,45	1,252
16	0,17	0,376	16,625	2,664	1,438	1,335
17	0,18	0,399	17,665	2,756	1,428	1,419
18	0,191	0,423	18,704	2,86	1,418	1,502

Izvor: Pokusi otpora broda, Brodarski institut u Zagrebu, 2018.

Dane vrijednosti u tablici 6. odnose se na preračunavanje podataka sa modela na hipotetički brod. Fn, Vm, RTm i Rn prepisani su iz prethodno navedene tablice 5., dok se CR određuje prema formuli (41). CFm se računa:

$$CFm = \frac{0,075}{\log(Re-2)^2} \quad (45)$$

Brzina se prebacuje u čvorove, a koeficijent ukupnog otpora broda  $CT$  dobiva se prema formuli (42), dok se vrijednost  $C_f$  dobiva prema formuli (45) s promijenjenom bazom logaritma ( $\log_{10}$ ) za brod.  $R_n$  predstavlja Reindsolov broj, a  $K$  je neovisan o proračunu.



**Grafikon 1. Dijagram  $CT_m$ ,  $CF_m$  u ovisnost o  $V_m$**

Izvor: Prilagodio autor prema Pokusi otpora broda, Brodarski institut u Zagrebu, 2018.

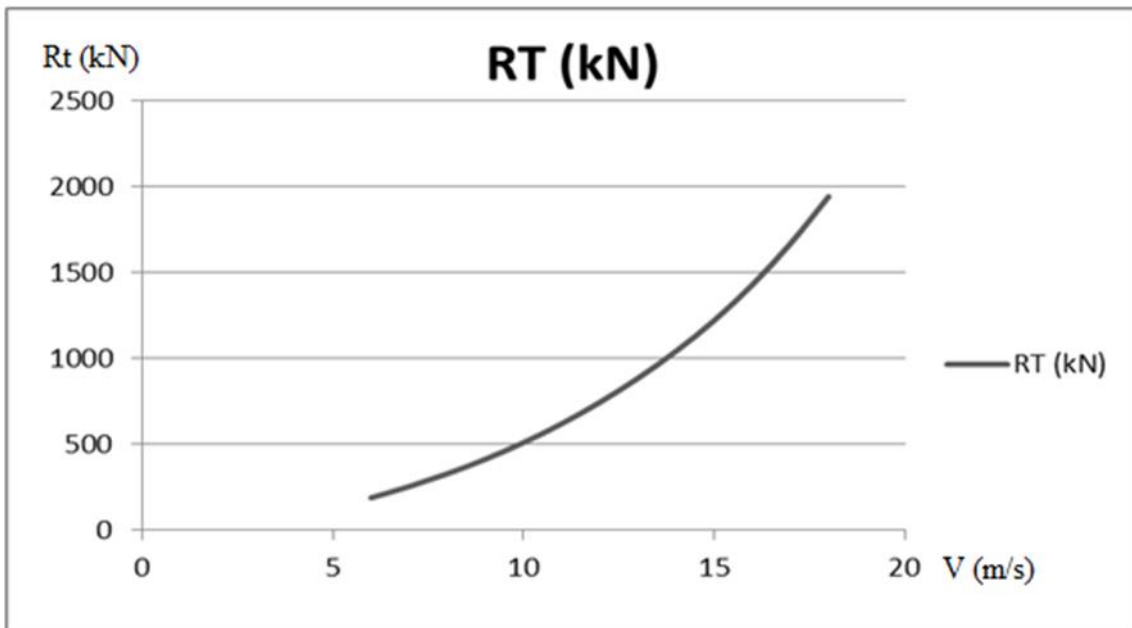
Grafikon 1. prikazuje ovisnost ukupnog otpora i otpora trenja broda o brzini. Brzina je izražena u metrima po sekundi, a otpor i trenje prebačeni su s modela na brod gdje se njihov rezultat iz tablice 6. množio s tisuću kako bi se dobila realna brodska vrijednost. S porastom brzine raste ukupni otpor te nam njezina krivulja prikazuje optimalno područje plovidbe. Kada je forma loša i brzine nisu usklađene događa se deformacija na  $CT_m$  dijagramu što znači da brzina za taj brod nije primijenjena. Iz ovog grafa se očituje da je brod za cijeli raspon brzina preporučen. Prema Reynoldsovom broju ( $R_n$ ) i formuli (46) dobije se ravna krivulja otpora trenja u ovisnosti o različitim promjenama brzina.

**Tablica 7. Konačni rezultati ispitivanja**

<b>ZNAČAJKE BRODA</b>					
Istisnina	120295 t				
Gaz na pramcu	11,53 m				
Gaz na krmi	11,53m	Trim	0,00 m		
Srednji gaz	11,53 m				
Gustoća vode	1.026 t/m <sup>3</sup>				
<b>BRZINA</b>	<b>OTPOR</b>	<b>SNAGE OTPORA U KILOVATIMA</b>			
V (CV)	RT (kN)	PE (ukupne)	PEF (trenja)	PER (preostale)	C
6	190,9	589	379	210	0,649
7	256,6	924	590	334	0,641
8	331,2	1363	865	497	0,633
9	415,8	1925	1214	711	0,628
10	512,2	2635	1644	991	0,627
11	622,1	3520	2163	1358	0,629
12	746,8	4610	2778	1832	0,635
13	886,6	5929	3497	2432	0,642
14	1044	7519	4329	3190	0,652
15	1223,3	9439	5280	4159	0,665
16	1430,6	11775	6359	5416	0,684
17	1670,8	14611	7572	7039	0,707
18	1944,4	18003	8927	9077	0,734

Izvor: Pokusi otpora broda, Brodarski institut u Zagrebu, 2018.

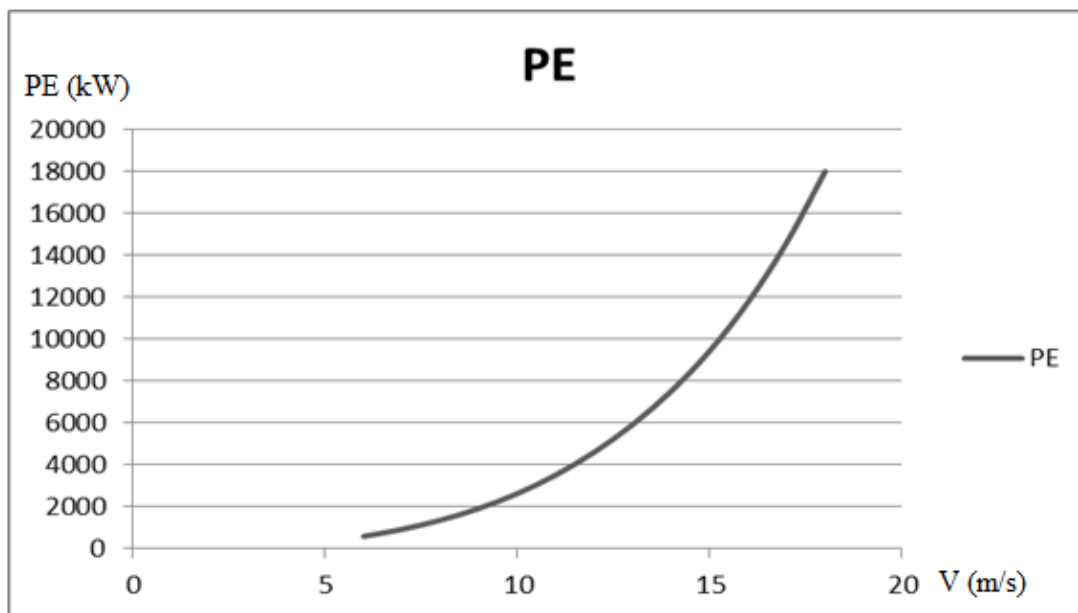
U zadnjoj tablici prikazani su konačni rezultati gdje su zadane vrijednosti broda prepisane iz tablice 3. Otpor broda jednak je otporu modela. Otpor RT dobije se iz formule (43) a snaga PE je otpor množen s brzinom. PE (ukupno) je snaga koja je podijeljena na dvije komponente dobiva se zbrajanjem PEF (trenja) i PER (preostale snage), a C predstavlja bezdimenzionalni broj.



**Grafikon 2. Prikaz ovisnosti otpora o brzini**

Izvor: Prilagodio autor prema Pokusi otpora broda, Brodarski institut u Zagrebu, 2018.

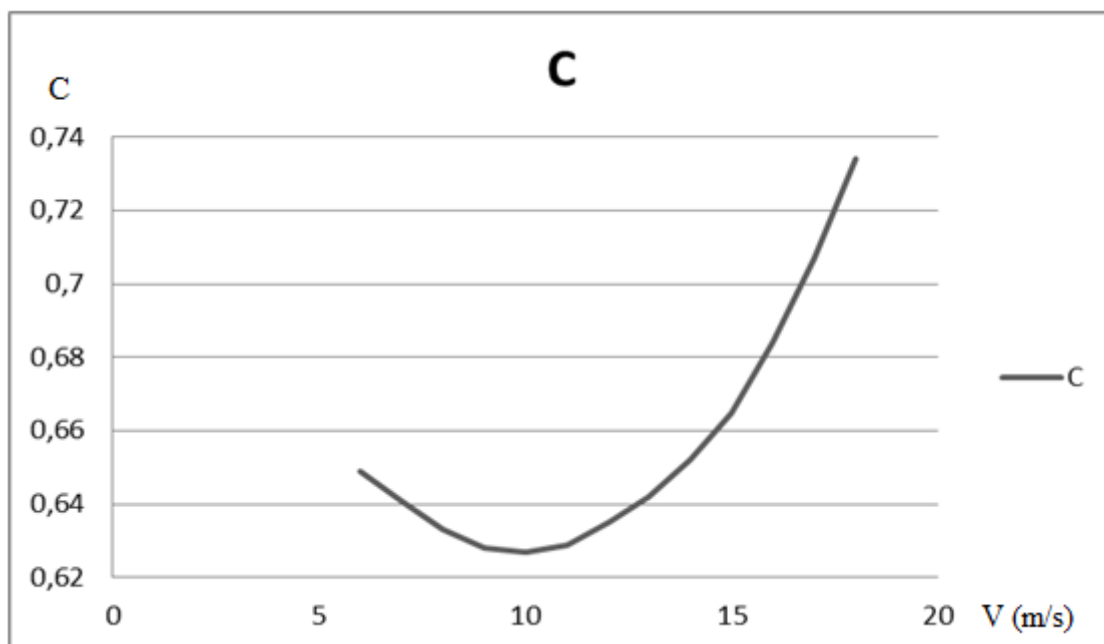
Grafikon 2. prikazuje ovisnost ukupnog otpora broda, izraženog u kilonjutnima, o brzini izraženoj u metrima po sekundi. S povećanjem brzine povećava se i ukupni otpor broda.



**Grafikon 3. Prikaz snage u ovisnosti o brzini**

Izvor: Pokusi otpora broda, Brodarski institut u Zagrebu, 2018.

Grafikon 3. prikazuje ovisnost efektivne snage, izražene u kilovatima, o brzini izraženoj u metrima po sekundi. Povećanjem brzine povećava se i efektivna snaga broda.



**Grafikon 4. Prikaz koeficijenta C u ovisnosti o brzini**

Izvor: Pokusi otpora broda, Brodarski institut u Zagrebu, 2018.

Grafikon 4. prikazuje ovisnost koeficijenta C o brzini. Koeficijent C je bezimenzionalni koeficijent te on raste sa porastom brzine.

## 6. ZAKLJUČAK

Porastom otpora broda na moru osim posade koja upravlja brodom mora se baviti i brodograđevna struka. Zajedničkim znanjem možemo kvalitetno doprinijeti razvoju, poboljšanju i davanju različitih rješenja prilikom nastanka problema. U ovom radu je stavljeno težište na sile otpora koje djeluju na kretanja broda. Rezultati su se očitavali sa modela koji su bili izrađeni u adekvatnom geometrijskom mjerilu i u idealnim tj. laboratorijskim uvjetima. Iz priloženog se može vidjeti da je za cijeli raspon brzina projekt broda prihvatljiv. Prema rezultatima pokusa otpora odabrana je odgovarajuća snaga motora.

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 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.

Budući da se u ovom radu promatrao model u idealnim uvjetima te da određeni podatci nisu dostupni zbog privatnosti korisnika, može se zaključiti da je za određenu vrstu, veličinu i snagu broda potrebna određena snaga motora koja se dimenzionira i uz pomoć modelskih ispitivanja mora biti dostatna za svladavanje efektivne snage tj. snage otpora u svim realnim uvjetima (stanje mora, obraštanje broda i sl.)

## Literatura

- [1] Dvornik J., Konstrukcija broda: Split: Pomorski fakultet u Splitu; 2013.
- [2] Dvornik J., Konstrukcija broda: Split: Pomorski fakultet u Splitu;2006.
- [3] Terestrička navigacija, Preuzeto sa: <https://www.fsb.unizg.hr/kziha/SPP.pdf> [Pristupljeno: rujan 2018.]
- [4] Rožić T., Plovnost i stabilnost broda – nastavni materijali predavanja, Fakultet prometnih znanosti, 2018. Zagreb
- [5] Pokusi otpora broda, Brodarski institut u Zagrebu, 2018.

## Popis slika:

Slika 1. Prikaz glavnih dimenzija broda.....	3
Slika 2. Prikaz visine i širine broda.....	5
Slika 3. Prikaz vodenih linija KVL i LVL, perpendikulara, osnovice, glavnog rebra i pojasa gaza.....	6
Slika 4. Prikaz zagaznica.....	7
Slika 5. Koeficijent vodne linije.....	8
Slika 6. Koeficijent glavnog rebra.....	9
Slika 7. Koeficijent istisnine .....	9
Slika 8. Koeficijent uzdužne finoće broda $\varphi$ .....	10
Slika 9. Prikaz nadvođa broda.....	13
Slika 10. Prikaz područja krmenog pika .....	15
Slika 11. Prikaz strojarnice.....	16
Slika 12. Prikaz područja pramčanog pika .....	17
Slika 13. Koordinatni sustav gibanja broda .....	19
Slika 14. Početna poprečna stabilnost broda .....	20
Slika 15. Osnovne točke ravnoteže broda .....	21
Slika 16. Težište istisnine.....	22
Slika 17. Pomicanje težišta uzgona .....	23
Slika 18. Prikaz metacenarske krivulje .....	26
Slika 19. Uzdužna stabilnost broda .....	27
Slika 20. Prvi uvjet plovnosti .....	29
Slika 21. II uvjet plovnosti .....	30
Slika 22. Primjer kada je $MF > FG$ .....	31
Slika 23. Primjer kada je $MF < FG$ .....	31
Slika 24. Statički stabilitet broda.....	33
Slika 25. Prikaz otpora sila kretanja broda.....	35
Slika 27. Prikaz modela za ispitivanje.....	44
Slika 28. Model za ispitivanje otpora broda.....	45
Slika 29. Prikaz modela za mjerenje sile dinamometrom .....	46



## **Popis tablica:**


Tabela 1. Odnosi vrijednosti modela prilikom ispitivanja .....	45
Tablica 2. Koeficijenti i otpori prilikom kretanja modela.....	47
Tablica 3. Hidrostatki podaci ispitivanog modela.....	48
Tablica 4. Izmjerene vrijednosti modela i stanja vode prilikom pokusa.....	49
Tablica 5. Statistički podatci izgladenog modela .....	50
Tablica 6. Konačni rezultati modela.....	52
Tablica 7. Konačni rezultati ispitivanja.....	54

## **Popis grafikona:**

Grafikon 1. Dijagram $CT_m$ , $CF_m$ u ovisnost o $V_m$ .....	53
Grafikon 2. Prikaz ovisnosti otpora o brzini .....	55
Grafikon 3. Prikaz snage u ovisnosti o brzini .....	55
Grafikon 4. Prikaz koeficijenta $C$ u ovisnosti o brzini .....	56

# PRILOZI

## Prilog 1. Osnovni parametri modela za ispitivanje, prijenos rezultata s modela na brod

	BRODARSKI INSTITUT ZAGREB	Oznaka:	List:		
		int. oznaka: 5221-M	izmjene:	7	

3. REZULTATI ISPITIVANJA

Rezultati ispitivanja u ovom izvještaju se odnose na označene modele iz sheme serije:

	P.O.	BAL.	P.O.	BAL.
M-1122	$L_{\text{WT}}/B_{\text{WT}}=4,625$	4,399	$B_{\text{WT}}/T=4,50$	6,87
M-1123	$L_{\text{WT}}/B_{\text{WT}}=6,375$	6,06	$B_{\text{WT}}/T=4,50$	6,87
M-1124	$L_{\text{WT}}/B_{\text{WT}}=6,375$	6,06	$B_{\text{WT}}/T=3,50$	5,345
M-1125	$L_{\text{WT}}/B_{\text{WT}}=4,625$	4,399	$B_{\text{WT}}/T=3,50$	5,345

i hipotetičkih brodova, koji se dobiju prenošenjem rezultata s modela na brod s mjerilom  $\lambda=45$ . Rezultati hipotetičkih brodova vrijede za morsku vodu ( $\rho=1026 \text{ kg/m}^3$ ) i temperaturu vode  $15^\circ \text{ C}$ .

3.1. Modeli

Brodski modeli izrađeni su iz parafina. Za vrijeme ispitivanja modeli su imali ugrađenu žicu promjera 1 mm na 19 teorijskom rebru za stimuliranje turbulencije. Površine modela su bile tehnički glatke.

3.2. Pokusi otpora i prenošenje rezultata s modela na brod


Za vrijeme pokusa otpora modeli nisu imali ugrađeno kormilo. Vučna sila, sila tegljenja, bila je u pravcu osi osovine vijka, a hvatište približno u težištu istisnine. Tijekom ispitivanja model je imao sve slobode gibanja, osim translacije bočno i rotacije oko vertikalne osi. Prenošnje rezultata s modela na hipotetički brod provedeno je pomoću korelacijske linije ITTC- 1957. god. s ukupnim koeficijentom korelacije  $\Delta C_T=0$  za sve modele ovog ispitivanja na punom gazu i u balastu. Ovaj korelacijski dodatak vrijedi samo za hipotetičke brodove, a dobije se prenošenjem rezultata s modela na brod geometrijskim mjerilom  $\lambda=45$ .

Prenošenje rezultata s modela na brod provedeno je standardnom metodom BI-a koja pretpostavlja da je koeficijent preostalog otpora  $C_R$  isti za brod i model pri istim Froude-ovim brojevima modela i broda. Koeficijent ukupnog otpora broda dobiven je na slijedeći način:

$$C_{Tm} = C_R + C_{Fm} \quad \text{- koeficijent ukupnog otpora modela}$$
$$C_R = C_{Tm} - C_{Fm} \quad \text{- koeficijent preostalog otpora modela (broda)}$$

Izvor: Pokusi otpora broda, Brodarski institut u Zagrebu, 2018.

Prilog 2. Opis osnovnih parametri za izračunavanje proračuna te prikaz formula



**BRODARSKI INSTITUT  
ZAGREB**

Oznaka: \_\_\_\_\_

Inf. oznaka: 5221-M

Izmjene: \_\_\_\_\_

List: 8

$C_T = C_R + C_F + \Delta C_T$  - koeficijent ukupnog otpora broda

Ukupni otpor broda određen je prema izrazu:

$$R_T = C_T \frac{1}{2} \rho v^2 S \quad , N$$

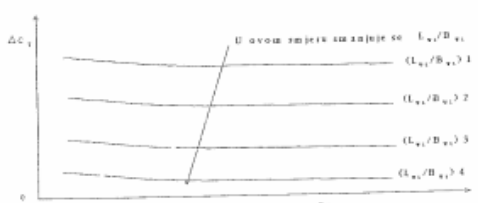
a snaga tegljenja broda prema:

$$P_E = R_T \cdot v / 1000 \quad , kW$$

gdje je :

$C_{Tm}$ - koeficijent ukupnog otpora modela	1
$C_{Fm}$ - koeficijent otpora trenja modela	1
$C_R$ - koeficijent preostalog otpora modela i broda	1
$C_T$ - koeficijent ukupnog otpora broda	1
$C_F$ - koeficijent otpora trenja broda	1
$\Delta C_T$ - koeficijent ukupnog relacijskog dodatka	1
$R_T$ - ukupni otpor broda	N
$P_E$ - efektivna snaga ili otpor tegljenja	kW
$\rho$ - gustoća morske vode	kg/m <sup>3</sup>
$v$ - brzina broda	m/s
$S$ - oplakana površina broda	m <sup>2</sup>

Za male odnose  $L_{WL}/B$  u uvjetima punog opterećenja broda i balasta vrijednosti snage otpora naglo rastu zbog viskoznog otpora tlaka (otpor forme). To se pokazuje i na faktorima forme i nominalnim koeficijentima sustrujanja, kao i na drugim komponentama propulzije. O ovoj činjenici treba voditi računa i korelacijski dodatak  $\Delta C_T$  odrediti kao funkciju  $R_H$  i omjera  $L_{WL}/B_{WL}$ .



Gornji dijagram odrediti će se na bazi modelskih ispitivanja i mjerenja na brodovima u naravi, našeg i nekih drugih bazena (publicirani rezultati).


Izvor: Pokusi otpora broda, Brodarski institut u Zagrebu, 2018.

Prilog 3. Hidrostatski podatci ispitivanog modela M – 1122

BRODARSKI INSTITUT ZAGREB		Oznaka:	List:
		Inf. oznaka: 5221-M	14
H I D R O S T A T S K I   P O D A C I			
Model: M-1122	Mjerilo: 45.000		
	BROD	MODEL	
Duljina izmedju okomica	235.43 m	5.2318 m	
Duljina na vodnoj liniji	240.02 m	5.3338 m	
Sirina na sredisnjem presjeku	51.88 m	1.1530 m	
Najveca sirina vodne linije	51.88 m	1.1530 m	
Sirina na najvećem presjeku	51.88 m	1.1530 m	
Gaz na pramcu	11.53 m	0.2562 m	
Gaz na krmi	11.53 m	0.2562 m	
Gaz na sredisnjem presjeku	11.53 m	0.2562 m	
Gaz na najvećem presjeku	11.53 m	0.2562 m	
Povrsina sredisnjeg presjeka	595.16 m <sup>2</sup>	0.2939 m <sup>2</sup>	
Povrsina najvećeg presjeka	595.16 m <sup>2</sup>	0.2939 m <sup>2</sup>	
Povrsina vodne linije	11178. m <sup>2</sup>	5.5201 m <sup>2</sup>	
Oplakana površina golog trupa	15457. m <sup>2</sup>	7.6330 m <sup>2</sup>	
Oplakana površina s privjescima	15635. m <sup>2</sup>	7.7209 m <sup>2</sup>	
Gustoca vode	1.026 t/m <sup>3</sup>		
Volumen istisnine	117246. m <sup>3</sup>	1.2867 m <sup>3</sup>	
Masa istisnine golog trupa	120295. t		
Masa istisnine s privjescima	120463. t	1.2885 t	
Uzduzni položaj tezista istisnine *)	4.34 m	0.0965 m	
Uzduzni položaj tezista istisnine *)	1.845 %Lpp		
Vertikalni položaj tezista istisnine	5.99 m	0.1330 m	
K O E F I C I J E N T I   I   O M J E R I			
Koeficijent punoce vodne linije	0.8976		
Koeficijent punoce sredisnjeg presjeka	0.9950		
Koeficijent punoce najvećeg presjeka	0.9950		
Koeficijent punoce forme (Lpp)	0.8325		
Koeficijent punoce forme (Lwl)	0.8166		
Prizmatički koeficijent	0.8368		
Vertikalni prizmatički koeficijent	0.9098		
Froudeov koeficijent duljine (M)	4.8102		
Froudeov koeficijent oplakane površine (S)	6.4524		
Omjer duljine i sirine na WL	4.6260		
Omjer sirine na WL i gaza na sredini	4.5004		
*) (+) od sredisnjeg presjeka prema pramcu (-) od sredisnjeg presjeka prema krmi			

Izvor: Pokusi otpora broda, Brodarski institut u Zagrebu, 2018.

Prilog 4. Izmjerene vrijednosti izgladenog M – 1122 modela

 <b>BRODARSKI INSTITUT ZAGREB</b>	Oznaka	List:
	Inf. oznaka: 5221-M	Izmjene: 43

POKUS OTPORA - Izmjerene vrijednosti

Model: M-1122                      Pokus: Bl-7276                      Datum: 15.04.1993

Mjerilo modela: 45.000                      Voditelj pokusa: VRDOLJAK

Materijal: PARAFFIN

STANJE MODELA                      STANJE VODE U BAZENU

Gaz na pramcu                      0.2562 m                      Temperatura 285.75 K (12.6 st.C)

Gaz na krmi                      0.2562 m                      Gustoca                      999.34                      kg/m<sup>3</sup>

Volumen istisnine                      1.2867 m<sup>3</sup>                      Kinematički

Masa modela                      0.6645 t                      viskozitet                      1.215E-6                      m<sup>2</sup>/s

Privjesci: NONE

Sredstvo turbulencije: TRIP WIRE AT 19 STATION

Vm (m/s)	Fn (LWL)	Fn (Vol)	RTm (N)	CTm *1000	LWLM (m)	Sm (m <sup>2</sup> )
0.401	0.055	0.123	3.64	5.935	5.3338	7.6330
0.500	0.069	0.153	4.95	5.191	5.3338	7.6330
0.549	0.076	0.168	5.78	5.028	5.3338	7.6330
0.600	0.083	0.184	7.06	5.142	5.3338	7.6330
0.700	0.097	0.214	8.65	4.629	5.3338	7.6330
0.801	0.111	0.245	11.08	4.528	5.3338	7.6330
0.900	0.124	0.276	14.02	4.538	5.3338	7.6330
0.950	0.131	0.291	15.52	4.509	5.3338	7.6330
1.049	0.145	0.321	19.40	4.622	5.3338	7.6330
1.100	0.152	0.337	20.62	4.468	5.3338	7.6330
1.201	0.166	0.368	24.62	4.475	5.3338	7.6330
1.300	0.180	0.398	29.78	4.620	5.3338	7.6330
1.400	0.194	0.429	35.85	4.796	5.3338	7.6330

Izvor: Pokusi otpora broda, Brodarski institut u Zagrebu, 2018.

Prilog 5. Statistika mjerenja na modelu M – 1122, prikaz standardne pogreške

BRODARSKI INSTITUT ZAGREB		Oznaka	Int. oznaka	izmjene	List
			5221-M		44
<u>POKUS OTPORA - Statistika mjerenja</u>					
Model: M-1122		Pokus: B1-7276		Datum: 15.04.1993	
Broj izgladjivanja:10					
Vm (m/s)	CTm (rac) *1000	CTm (izgl) *1000	Apsolutna pogreska *1000	Relativna pogreska (%)	
0.401	5.935	5.049	0.886	17.55	
0.500	5.191	4.883	0.308	6.31	
0.549	5.028	4.808	0.220	4.57	
0.600	5.142	4.738	0.404	8.52	
0.700	4.629	4.629	0.000	0.00	
0.801	4.528	4.557	-0.029	-0.65	
0.900	4.538	4.521	0.017	0.38	
0.950	4.509	4.512	-0.003	-0.06	
1.049	4.622	4.508	0.114	2.53	
1.100	4.468	4.516	-0.048	-1.06	
1.201	4.475	4.558	-0.083	-1.82	
1.300	4.620	4.637	-0.017	-0.37	
1.400	4.796	4.743	0.053	1.12	
Ukupni koeficijent korelacije 0.6922					
Standardna pogreska 0.3524E-03					

Izvor: Pokusi otpora broda, Brodarski institut u Zagrebu, 2018.

Prilog 6. Koeficijenti izgladenog modela M – 1122 prebačeni u ralne parametre

BRODARSKI INSTITUT ZAGREB		Oznaka:	int. oznaka:	izmjene:	List:
			5221-M		45

POKUS OTPORA - Koeficijenti

Model: M-1122      Pokus: BI-7276      Datum: 15.04.1993

- M O D E L -

Vm (m/s)	Fn (LWL)	Rn *10** <sup>-7</sup>	RTm (N)	CTm *1000	CFm *1000	CR *1000
0.460	0.064	0.202	4.00	4.948	4.046	0.902
0.537	0.074	0.236	5.30	4.826	3.923	0.903
0.613	0.085	0.269	6.78	4.721	3.821	0.900
0.690	0.095	0.303	8.42	4.638	3.734	0.903
0.767	0.106	0.337	10.27	4.577	3.659	0.918
0.844	0.117	0.370	12.32	4.538	3.593	0.945
0.920	0.127	0.404	14.59	4.517	3.534	0.982
0.997	0.138	0.438	17.08	4.507	3.482	1.026
1.074	0.148	0.471	19.83	4.511	3.434	1.077
1.150	0.159	0.505	22.87	4.532	3.390	1.142
1.227	0.170	0.539	26.27	4.575	3.350	1.225
1.304	0.180	0.572	30.08	4.641	3.313	1.328
1.380	0.191	0.606	34.31	4.721	3.279	1.442

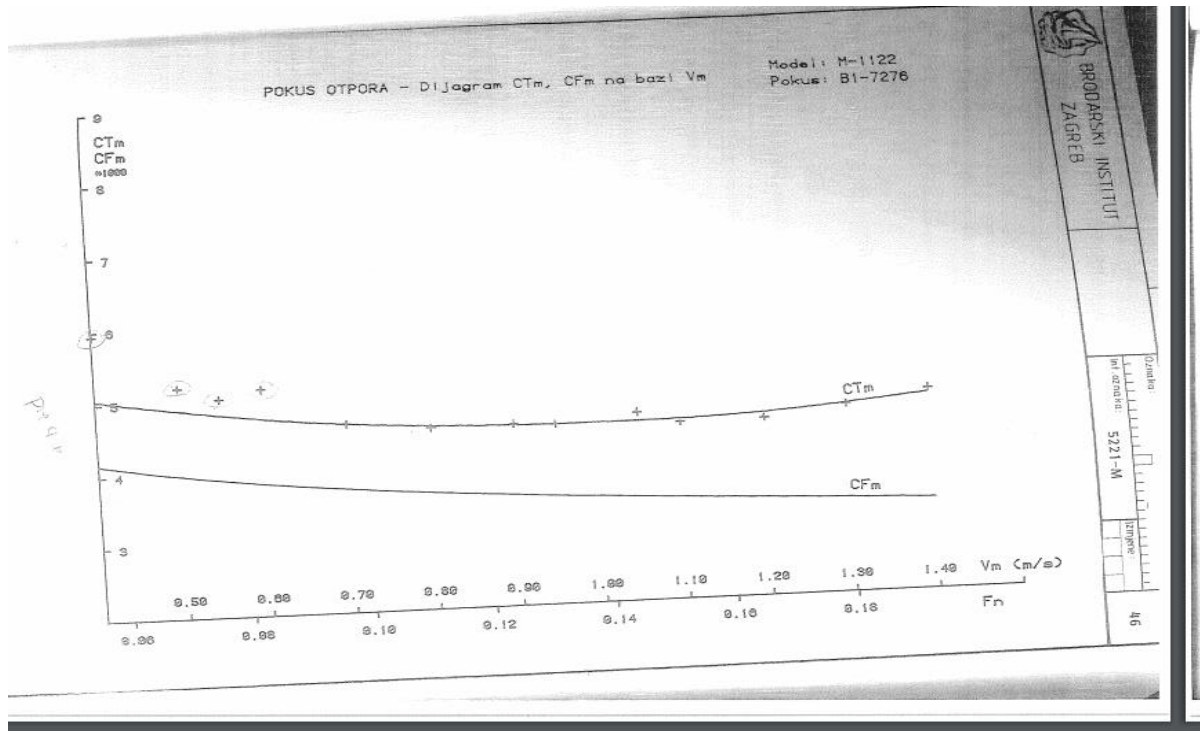
Korelacioni dodatak 0.00000

- B R O D -

V (cv)	Fn (LWL)	Fn (Vol)	Rn *10** <sup>-8</sup>	CT *1000	CF *1000	(K)
6.00	0.064	0.141	6.235	2.527	1.624	0.501
7.00	0.074	0.164	7.274	2.496	1.593	0.584
8.00	0.085	0.188	8.313	2.467	1.566	0.668
9.00	0.095	0.211	9.352	2.447	1.543	0.751
10.00	0.106	0.235	10.391	2.441	1.523	0.835
11.00	0.117	0.258	11.430	2.451	1.506	0.918
12.00	0.127	0.282	12.469	2.472	1.490	1.001
13.00	0.138	0.305	13.508	2.501	1.475	1.085
14.00	0.148	0.329	14.547	2.539	1.462	1.168
15.00	0.159	0.352	15.586	2.592	1.450	1.252
16.00	0.170	0.376	16.625	2.664	1.438	1.335
17.00	0.180	0.399	17.665	2.756	1.428	1.419
18.00	0.191	0.423	18.704	2.860	1.418	1.502

Izvor: Pokusi otpora broda, Brodarski institut u Zagrebu, 2018.

Prilog 7. Dijagram CTm i CFm na bazi Vm u ovisnosti o brzini



Izvor: Pokusi otpora broda, Brodarski institut u Zagrebu, 2018.

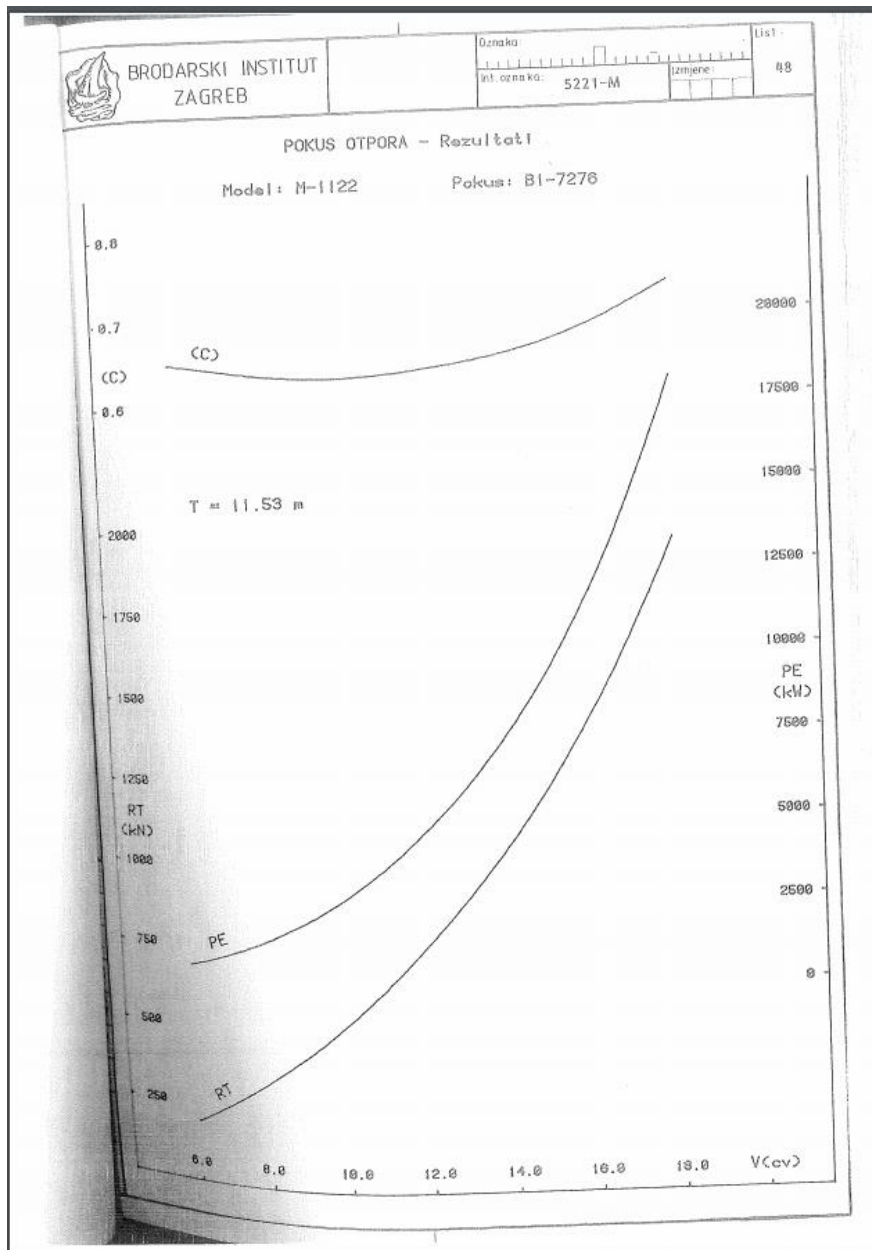


Prilog 8. Konačni rezultati preneseni sa izglađenog modela M – 1122 na brod

BRODARSKI INSTITUT ZAGREB		Oznaka:	Lisť:		
		int. oznaka: 5221-M	izmjene:	47	
<b>POKUS OTPORA - Rezultati</b>					
Pokus: B1-7276					
Model: M-1122		Mjerilo modela: 45.000			
Privjesci: NONE					
ZNACAJKE BRODA					
Istisnina	=	120295.	t		
Gaz na pramcu	=	11.53	m		
Gaz na krmi	=	11.53	m	Trim = 0.00 m	
Srednji gaz	=	11.53	m		
Gustoca vode	=	1.026	t/m <sup>3</sup>		
<b>BRZINA</b>	<b>OTPOR</b>	<b>SNAGE OTPORA U KILOVATIMA</b>			
<b>V</b>	<b>RT</b>	<b>PE</b>	<b>PEF</b>	<b>PER</b>	<b>(C)</b>
(cv)	(kN)	(ukupne)	(trenja)	(preostale)	
6.00	190.9	589.	379.	210.	0.649
7.00	256.6	924.	590.	334.	0.641
8.00	331.2	1363.	865.	497.	0.633
9.00	415.8	1925.	1214.	711.	0.628
10.00	512.2	2635.	1644.	991.	0.627
11.00	622.1	3520.	2163.	1358.	0.629
12.00	746.8	4610.	2778.	1832.	0.635
13.00	886.6	5929.	3497.	2432.	0.642
14.00	1044.0	7519.	4329.	3190.	0.652
15.00	1223.3	9439.	5280.	4159.	0.665
16.00	1430.6	11775.	6359.	5416.	0.684
17.00	1670.8	14611.	7572.	7039.	0.707
18.00	1944.4	18003.	8927.	9077.	0.734

Izvor: Pokusi otpora broda, Brodarski institut u Zagrebu, 2018.

Prilog 9. Prikaz grafova ovisnosti koeficijenta C, efektivne snage PE i ukupnog otpora RT o brzini



Izvor: Pokusi otpora broda, Brodarski institut u Zagrebu, 2018.