Poboljšanje prognoze brzine broda istraživanjem korelacije model-brod

Zaninović, Ante

Scientific master's theses / Magistarski rad

2011

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:509628

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-23**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb

DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

POBOLJŠANJE PROGNOZE BRZINE BRODA ISTRAŽIVANJEM KORELACIJE MODEL-BROD

MAGISTARSKI RAD

Ante Zaninović, dipl. ing.

Zagreb, 2011.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

POBOLJŠANJE PROGNOZE BRZINE BRODA ISTRAŽIVANJEM KORELACIJE MODEL-BROD

MAGISTARSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Izvor Grubišić

Ante Zaninović, dipl. ing.

Zagreb, 2011.

PODACI ZA BIBLIOGRAFSKU KARTICU:

UDK: 629.5:629.5.018.71:629.5.018.75

Ključne riječi: model broda, brod, mjerenje, analiza, korelacija, brod za tekući teret, brod za rasuti teret

Znanstveno područje: TEHNIČKE ZNANOSTI

Znanstveno polje: Brodogradnja

Institucija u kojoj je rad izrađen: Fakultet strojarstva i brodogradnje, Brodarski institut

Mentor rada: Prof. dr. sc. Izvor Grubišić

Broj stranica: 90

Broj slika: 42

Broj tablica: 6

Broj korištenih bibliografskih jedinica: 27

Datum obrane: 21.12.2011.

Povjerenstvo: dr. sc. Vedran Slapničar, docent - predsjednik povjerenstva
dr. sc. Izvor Grubišić, red. prof. - voditelj magistarskog rada
dr. sc. Vladimir Andročec, red. prof. - član povjerenstva

Institucija u kojoj je rad pohranjen: Fakultet strojarstva i brodogradnje, Brodarski institut

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje
Poslijediplomski znanstveni studij
Smjer **BRODOGRADNJA I POMORSKA TEHNIKA**

Zagreb, 28.06.2011.

Zadatak za magistarski rad

Kandidat: Ante Zaninović, dipl.ing. brodogradnje

Naslov zadatka: **POBOLJŠANJE PROGNOZE BRZINE BRODA ISTRAŽIVANJEM KORELACIJE MODEL-BROD**

Sadržaj zadatka:

Važni parametri kod ugovaranja ali i primopredaje broda su postignuta brzina broda kod određene snage i brzine vrtnje stroja. Od samih početaka provođenja modelskih ispitivanja brodova pokušavala se uspostaviti veza između rezultata modelskih ispitivanja i ispitivanja brodova u naravi. Ispitivanjem većeg broja modela brodova i provedenim ispitivanjima brodova u naravi stvorene su pretpostavke da se uspoređivanjem prognoziranih brzina dobivenih ispitivanjem modela brodova i postignutih brzina na stvarnim brodovima odredi korelacija i time poboljšaju prognoze novih brodova. Često o dobro prognoziranoj brzini broda ovisi uspješnost novog projekta te zadovoljavanje ugovornih obveza. U cilju boljeg prognoziranja značajki postizive brzine kod određene snage novo projektiranih brodova potrebno je od dostupnih modelskih ispitivanja modela brodova u bazenu i pripadajućih ispitivanja brodova u naravi (na mjernoj milji) istražiti mogućnost boljeg definiranja korelacije (korelacijskih koeficijenata).
U radu je potrebno:

- sistematizirati do sada primjenjivane metode korelacije, korelacijske koeficijente kod prognoziranja brzine brodova,
- raščlaniti veličine, koje utječu na točnost mjerenja, kako u ispitivanju modela brodova u bazenu, tako i brodova u naravi,
- od dostupnih ispitivanja modela brodova i odgovarajućih ispitivanja u naravi, formirati bazu podataka te istražiti mogućnost poboljšavanja prognoziranja brzine uvođenjem novih korelacijskih koeficijenata (odnosno nove korelacijske linije).

Ovaj će magistarski rad primjenom znanstvenih metoda na korelaciji mjerenja i teoretskih rezultata doprinijeti uputama za uspješnije i sigurnije udovoljavanje projektnom zahtjevu.

Zadatak zadan: 12. 07. 2011.

Rad predan:

Mentor:

Prof.dr.sc. Izvor Grubišić

Predsjednik Odbora za poslijediplomske studije:
Prof.dr.sc. Jurica Sorić

Voditelj smjera:
Prof.dr.sc. Kalman Žiha

ZAHVALA

Svom mentoru, prof. dr.sc. Izvoru Grubišiću zahvaljujem na dugogodišnjem poticanju za moje stručno i znanstveno usavršavanje i konstantnoj podršci koju mi je pružio prilikom izrade ovog rada. Dovršenje rada ne bi bilo moguće bez njegovog stalnog podstreka i pozitivnog utjecaja.

Starijem kolegi gospodinu Zdravku Batiniću, dipl. ing. mom dugogodišnjem rukovoditelju unutar Brodarskog instituta, u tadašnjem Odjelu za ispitivanja u naravi, koji je nesebično pomagao nizom korisnih stručnih savjeta u izradi ovog rada.

Zahvaljujem također kolegama iz Djelatnosti Hidrodinamika plovnih objekata i modeliranje energetskih postrojenja, a posebno g. Miroslavu Radakoviću, dipl. ing. i Antoniju Antunović, dipl. ing. na pomoći oko formatiranja teksta i slika.
Na korisnim i dragocjenim savjetima i pomoći pri izradi rada zahvaljujem gospođi Gordani Semijalac, dipl. ing. i mr. sc. Marti Pedišić Buča.

Ovaj rad je nastao kao sinteza između ostalog i mog rada na mjerenjima u naravi u periodu zadnjih dvadeset godina. Bez dopuštenja da se koristim djelom baze podataka brodske hidrodinamike ne bi mogao biti napisan pa ovim putem zahvaljujem na ukazanom povjerenju još jednom svim djelatnicima Brodske hidrodinamike i Upravi Brodarskog instituta.

Kćerki Andrei i supruzi Sonji zahvaljujem na strpljenju kojem su me obasipale za vrijeme izrade rada.

SADRŽAJ

KLJUČNE RIJEČI 1
SAŽETAK 4
SUMMARY 5
POPIS SLIKA 9
POPIS TABLICA 11
1. UVOD 12
2. BRODOVI PUNE FORME 13
3. METODE KORELACIJE 15
3.1 Froudeova metoda 15
3.2 Telferova metoda geosima 18
3.3 Hughesova metoda 19
3.4 Metoda ITTC 1957 22
3.5 Prohaskina metoda 24
3.6 Metoda ITTC 1978 27
3.7 Metoda ITTC 1984 29
4. HIDRODINAMIČKI POKUSI S MODELIMA BRODOVA 32
4.1 Pokus otpora 33
4.2 Pokus vlastitog pogona 34
4.2.1 Kontinentalna metoda 36
4.2.2 Britanska metoda 37
4.3 Pokus slobodne vožnje vijka 39
4.4 Pokus sustrujanja 43
4.5 Pokus strujnica bojom i nitima 47
4.6 Točnost mjerenja propulzije na brodskim modelima 48
5. MJERENJE PROPULZIJE SA BRODOVIMA NA POKUSNOJ PLOVIDBI 49
5.1 Priprema mjerenja propulzije 49
5.1.1 Inspekcija broda 49
5.1.2 Pregled trupa i propulzora 49
5.1.3 Ugradnja instrumenata i kalibracija 49
5.1.4 Uvjeti provođenja pokusne plovidbe 50
5.2 Provođenje pokusa mjerne milje za vrijeme pokusne plovidbe 50
6. METODA ODREĐIVANJA KORELACIJSKIH LINIJA 53
6.1 Općenito o uzorcima model-brod 53
6.2 Razrada metode 54

7. ZAKLJUČAK 74
PRILOG 76
LITERATURA 87
KRATKI ŽIVOTOPIS 89
KRATKI ŽIVOTOPIS NA ENGLESKOM JEZIKU 90

KLJUČNE RIJEČI

Model broda, brod, mjerenje, analiza, korelacija, brod za tekući teret, brod za rasuti teret

KEY WORDS

Ship model, ship, measurement, analysis, correlation, tanker, bulk carrier

PREDGOVOR

Sistematsko praćenje ispitivanja brodskih modela u bazenima i mjerenja propulzije brodova u naravi (na pokusnoj plovidbi) važan su dio prakse jednog bazena kojom on poboljšava svoju kompetitivnost odnosno poziciju na tržištu. Ispitivanja modela brodova nezaobilazna su u procesu projektiranja broda kako bi se već u prvim fazama razvoja projekta broda dobilo što kvalitetniju sliku kakvu će brzinu imati brod u službi. Ispitivanja modela novogradnji nisu sama sebi svrha, njima se uvijek moraju postići neka poboljšanja (prilagođavanje forme novonastalim projektnim zahtjevima, specifični zahtjevi brodovlasnika ili brodogradilišta po pitanju tehničkih karakteristika broda). Rezultati pokusa s modelima su prognoza brzine, potrebne snage i okretaja propelera. Prognozirana brzina je samo jedan od važnih hidrodinamičkih pokazatelja kvalitete ispitivanog modela, koji je važan pri ugovaranju novogradnje. Da li će ona biti postignuta u uvjetima pokusne plovidbe i/ili tijekom službe i naravno uz koju snagu i okretaje stroja, podatak je koji nakon ugovaranja gradnje broda postaje jedan od najvažnijih karakteristika po kojima se ocjenjuje ispunjavanje projektnog zahtjeva. Njenim zadovoljavanjem brodogradilište može postići bolji financijski efekt jer su posljedice neispunjavanja zahtjeva brzine plaćanje penala ili brod može čak biti i odbijen.

U okviru pokusne plovidbe predaje se brod po točno zacrtanom i odobrenom planu ispitivanja koji u sebi sadrži pokus tzv. mjerne milje. Kod ovog se pokusa mjeri brzina broda, torzijski moment, okretaji na propelerskom vratilu, te potrošnja goriva. Pokus se provodi na točno definiranom poligonu kod najmanje tri dvostruka prolaza preko iste vode. Iz mjerenjem dobivenih podataka analizom se definiraju krivulje snage i okretaja na bazi brzine, te krivulja snage na bazi okretaja stroja. Podaci dobiveni s mjerenja u stvarnosti (u naravi) dragocjeni su jer se mogu uspoređivati s onima iz bazenskih prognoza. Usporedbom ovih veličina određuju se odstupanja prognoze od izmjerenih brzina broda na pokusnoj plovidbi. S dovoljnim brojem ispitanih modela i brodova u naravi mogu se sigurnije prognozirati parametri brzine, snage i okretaja novih modela brodova.

Da se baza podataka ispitanih modela i brodova u naravi „osnaži“ boljim prognozama za nove projekte brodova potrebno je istražiti i uvesti nove korelacijske linije. Od samog početka provođenja modelskih ispitivanja, uočeno je da se klasičnim prenošenjem rezultata s modela na brod ne može precizno prognozirati brzina (okretaji stroja) novog projekta broda. Oduvijek se događalo, i događa se, da izmjerene vrijednosti u bazenu prenesene na brodske vrijednosti ne daju same za sebe dobre prognoze. Ovo se događa radi brojnih parametara koji ne mogu biti obuhvaćeni mjerenjem na modelima brodova, ali i radi postojanja grešaka mjerenja kako na modelima tako i na brodovima. Razvojem tehnike mjerenja smanjivale su se greške mjerenja, a unapređivanjem znanosti mijenjane su i usložnjavane metode prognoziranja brzine/okretaja.

Kvaliteta pojedinih bazena očituje se upravo u kvaliteti prognoziranja brzine, snage i okretaja pojedinih tipova brodova. Jedan od važnih preduvjeta da se zadovolji kvaliteta u prognozama, da one budu točnije, je stalno sistematsko praćenje ispitivanja modela i brodova ispitanih u naravi. Uspoređivanjem rezultata prognoziranih s modelima i s ispitivanja na pokusnim plovidbama u naravi bazen može stalno popravljati i

poboljšavati svoje prognoze upotrebljavajući novije korelacijske koeficijente, čime postiže svoju bolju poziciju na tržištu pokazujući da prati razvoj novih tehnika u mjerenjima, analizi i interpretaciji izmjerenih podataka.

SAŽETAK

Važni parametri kod ugovaranja i primopredaje broda su postignuta brzina broda kod određene snage stroja odnosno strojeva s određenim nominalnim okretajima. Od samih početaka provođenja modelskih ispitivanja brodova pokušavalo se uspostaviti vezu između rezultata modelskih ispitivanja i ispitivanja brodova u naravi.

Ispitivanjem sve većeg broja modela brodova i provedbom ispitivanja brodova u naravi stvorene su pretpostavke za usporedbu prognoziranih brzina dobivenih ispitivanjem modela brodova i postignutih brzina na stvarnim brodovima radi određivanja korelacija i time poboljšaju prognoze novih brodova. Često o dobro prognoziranoj brzini broda ovisi uspješnost novog projekta kroz zadovoljavanje ugovornih obveza.

U radu se opisuje važnost stalnog istraživanja korelacije propitivanjem korištenih metoda u međusobnom odnosu između rezultata prognoza dobivenih modelskim ispitivanjima brodskih modela s ispitivanjima propulzijskih karakteristika brodova u naravi.

Izložene su najvažnije metode koje se primjenjuju prilikom prenošenja rezultata s modelskih na brodske vrijednosti. Navedene su njihove prednosti i mane.

Ukratko su opisani pokusi s brodskim modelima koji imaju za cilj prognoziranje brzine, potrebne snage i okretaja stroja. Dani su komentari točnosti pojedinih izmjerenih veličina.

Također su ukratko opisana propulzijska ispitivanja na brodovima u naravi uz osvrt na točnost mjerenja pojedinih veličina.

Prezentirana je u radu korištena metoda određivanja korelacijske linije za korekciju prognozirane snage i okretaja stroja. Korelacijska linija napravljena je od dostupnih podataka ispitivanja modela brodova u bazenu Brodarskog instituta i pripadajućih ispitivanja brodova u naravi na mjernoj milji. U okviru toga istraživane su mogućnosti boljeg definiranja korelacije odnosno korelacijskih koeficijenata.

Na kraju je napravljena usporedba dobivenih rezultata s rezultatima studije provedene prije 20 godina u Brodarskom institutu s komentarima, te prijedlog nove korelacijske linije model-brod.

SUMMARY

Important parameters when negotiating a ship and also when commissioning it are the speed attained at a specific engine power having a specific (usually nominal) RPM of the engine. From the very beginning of implementation of ship model tests, efforts were made to establish a link between the results of model tests and full-scale measurements.

By testing an increasing number of ship models and having the increased number of full-scale tests, and by comparing the predicted speeds obtained by model tests and the speeds achieved by full-scale ships, preconditions have been created for determining the correlation for actual ships and thereby improve the predictions for new ships. It is often the case that the success of a new project and meeting of contractual obligations depend on a well-predicted speed.

The importance of continuous research of the correlation by investigating the correlation methods used when correlating the results obtained by ship model tests and the results of propulsion characteristics obtained by full-scale tests is pointed out.

The most important methods applied for the transfer of model results to full-scale ship values are presented. Their advantages and disadvantages are discussed.

Experiments with ship models that are aimed at forecasting the speed, the required power and the engine speed are briefly described. Comments are given concerning the accuracy of the measured quantities. Full-scale propulsion tests are also briefly described, and the accuracy of the measurement of particular quantities is considered.

The method used for defining the correlation lines for the correction of the predicted power and engine speed is presented. A correlation line is made on the basis of the available ship model data obtained in model tests performed in the Brodarski Institute's testing facilities and the related full-scale tests (for measuring miles). Within this framework the possibilities for better defining of correlation (correlation coefficients) have been studied.

Finally, comparison between the results obtained and the results presented were made 20 years ago in Brodarski Institute and the comments and suggestions for further work are given.

POPIS OZNAKA I KRATICA

A_C	admiralitetska konstanta
A_{VT}	poprečna površina iznad vodne linije (trup + nadgrađe), m^2
B	širina broda odnosno modela, m
BI	Brodarski institut
CFD	Computer Fluid Dynamic
CP	koeficijent korelacije snage
C_A	koeficijent povećanog otpora zbog hrapavosti
C_{AA}	koeficijent otpora zraka
C_B	blok koeficijent, koeficijent punoće forme, ($C_B = \Delta/(L_{WL} \cdot B \cdot T)$)
C_D	koeficijent otpora trenja na modelu vijka
C_F	koeficijent otpora trenja
C_{Fo}	koeficijent otpora trenja u dvodimenzionalnom strujanju
C_R	koeficijent preostalog otpora
C_T	koeficijent ukupnog otpora
C_V	koeficijent viskoznog otpora
C_W	koeficijent otpora valova
c	duljina tetive krila vijka na 0.75D, m
D	promjer vijka, m
DCF	standardna hrapavost oplate
$F_D(Z)$	ispravak trenja, N
Fn	Froudeov broj
ITTC	International Towing Tank Conference
J	koeficijent napredovanja vijka
K_Q	koeficijent momenta vijka
K_T	koeficijent poriva vijka
K	faktor forme
k_1	koeficijent Prandtl-Pitotove cijevi
k_S	srednja hrapavost površine, μm
k_2	korelacijski koeficijent za okretaje na pokusnoj plovidbi
k_P	$30 \cdot 10^{-6}$ m prihvaćen iznos srednje hrapavosti krila vijka
L	duljina broda, odnosno modela, m
L_{WL}	duljina na vodnoj liniji, m
$l_{0.7R}$	duljina profila na 0.7R
N_S	broj okretaja stroja na pokusnoj plovidbi, o/min
N_{BAZ}	broj okretaja stroja iz prognoze u bazenu, o/min
P_B	snaga stroja, kW
P_D	predana snaga vijku, kW
P_E	snaga otpora, kW
R_F'	sila otpora trenja
R_R	sila preostalog otpora
R_T	sila ukupnog otpora
R_{VP}	sila viskoznog otpora tlaka, N
R_W	sila otpora valova, N
R_{WB}	sila otpora lomljenja valova, N

R_F'	sila otpora uslijed zakrivljenosti, N
Rn	Reynoldsov broj
S	oplakana površina, m^2
S_{BK}	površina ljuljne kobilice, m^2
t_W	temperatura vode, ºC
t_c	najveća debljina presjeka krila vijka na 0.75D
t	koeficijent smanjenog poriva modela i broda
T_{PR}	gaz na pramcu, m
T_{KR}	gaz na krmi, m
V_A	brzina napredovanja vijka, m/s
V_M	brzina modela odnosno kolica, m/s
V_R	rezultirajuća brzina dostrujavanja vode profilu krila vijka, m/s
V_S	brzina broda, čv
V	brzina broda, m/s
η_D	ukupni stupanj djelovanja propulzije
η_H	stupanj korisnosti trupa
η_m	stupanj mehaničkog djelovanja osovinskog voda
η_R	koeficijent prijelaza
η_o	stupanj djelovanja vijka u slobodnoj vožnji
Δ	istisnina, t
ΔC_T	korelacijski koeficijent, sadrži u sebi i utjecaj hrapavosti
ΔT_M	korekcija poriva modela, N
ΔQ_M	korekcija momenta modela, Nm
Δh	stupac vode, kod pokusa sustrujanja, m
λ	mjerilo modela
λ_T	koeficijent otpora trenja
w	efektivno sustrujanje modela, broda
w_{ND}	srednje nominalno sustrujanje preko diska vijka
P/D	omjer uspona i dijametra vijka na 0.75D
Z	broj krila vijka
Rn_{Co}	Reynolds-ov broj na 0.75D vijka
T	poriv, N
Q	moment, Nm
N	okretaji vijka, o/s

indeksi

M	model
S	brod
F	sila
I	inercijska
g	gravitacijska
c, n	koeficijenti

ρ	gustoća
O	slobodna vožnja vijka, slobodna vožnja vijka
BAZ	oznaka za bazen
PROG	oznaka za prognozu
KOR	oznaka za korigiranu snagu

Brodski vijak	propeler
Bulk carrier	brod za prijevoz rasutih tereta
Tanker	brod za prijevoz tekućih tereta

POPIS SLIKA

Slika 1. Karakteristična forma tankera i bulk carriera 14
Slika 2. Rastavljanje sile otpora po Froudeovoj metodi 16
Slika 3. Prijenos rezultata otpora po Froudeovoj metodi 16
Slika 4. Prikaz Telferove metode, preuzete iz [2] 18
Slika 5. Prikaz Hughesove metode, preuzeto iz [2] 20
Slika 6. Veličina $1+k = f(C_B, L / \nabla^{1/3})$, preuzeto iz [2] 21
Slika 7. Prikaz ITTC 1957 metode, preuzeto iz [12]. 22
Slika 8. Određivanje faktora forme prema Prohaski 25
Slika 9. Faktor forme za brodove kojima je $C_B > 0.80$ 26
Slika 10. Metoda ITTC 1978, prezuzeta iz [12]. 29
Slika 11. Model opremljen za pokus vlastitog pogona. 34
Slika 12. Korelacijski dodatak ΔC_T. 35
Slika 13. Rezultati vlastitog pogona - kontinetalna metoda. 36
Slika 14. Britanska metoda vlastitog pogona modela. 37
Slika 15. Određivanje vrijednosti za Q_M. 37
Slika 16. Prognozni dijagram propulzije 38
Slika 17. Prognozni dijagram apsorpcije vijka 38
Slika 18. Strujno tijelo za pokus slobodne vožnje. 39
Slika 19. Hidrodinamičke značajke modela vijka u slobodnoj vožnji 43
Slika 20. Određivanje efektivnog koeficijenta sustrujanja. 44
Slika 21. Prandtl-Pitotova cijev - mjerenje vode ili žive. 45
Slika 22. Srednji raspored sustrujanja po obodu vijka. 46
Slika 23. Određivanje srednjeg nominalnog sustrujanja. 46
Slika 24. Polje sustrujanja (Iso-wake krivulje) 47
Slika 25. Korelacijski koeficijent ΔC_T 55
Slika 26. Korelacijski koeficijent k_2 56
Slika 27. Korelacijski koeficijent CP (Tankeri – Puno opterećenje) 60
Slika 28. Korelacijski koeficijent k_2 (Tankeri – Puno opterećenje) 60
Slika 29. Korelacijski koeficijent CP (Tankeri – Balast) 61
Slika 30. Korelacijski koeficijent k_2 (Tankeri – Balast) 61
Slika 31. Korelacijski koeficijent CP (Bulk carrieri – Balast) 62
Slika 32. Korelacijski koeficijent k_2 (Bulk carrieri– Balast) 62
Slika 33. Korelacijski koeficijent CP (Bulk carrieri i tankeri – Balast) 63
Slika 34. Korelacijski koeficijent k_2 (Bulk carrieri i tankeri – Balast) 63
Slika 35. Korelacijski koeficijent CP (Tankeri – sva opterećenja) 64

Slika 36. Korelacijski koeficijent k_2 (Tankeri – sva opterećenja) 64
Slika 37. Usporedbeni dijagram tankera za sva opterećenja prema BI 67
Slika 38. Usporedbeni dijagram tankera za puni opterećenje prema BI 68
Slika 39. Usporedbeni dijagram tankera i bulk carriera za balast prema BI 69
Slika 40. Usporedbeni dijagram tankera za sva opterećenja prema ITTC 1978 70
Slika 41. Usporedbeni dijagram tankera za puni gaz prema ITTC 1978 71
Slika 42. Usporedbeni dijagram tankera i bulk carriera za balast prema ITTC 1978 72

POPIS TABLICA

Tablica 1. Koeficijent povećanja otpora kao funkcija veličine broda, prema [2]. 23
Tablica 2. Rezultati proračuna linearne regresije 65
Tablica 3. Tankeri 77
Tablica 4. Bulk carrier 81
Tablica 5. Tankeri 82
Tablica 6. Bulk carrier 86

1. UVOD

Osnovni je cilj ovog rada dati pregled metoda korelacije rezultata model-brod u cilju boljeg prognoziranja brzine broda, snage stroja i okretaja stroja jednovijčanih brodova pune forme, koje je Brodarski institut tijekom godina ispitivao u svojim bazenima i na pokusnim plovidbama. U okviru toga dan je komentar grešaka u mjerenju i analizi rezultata mjerenja što također utječe na točnost rezultata.

Potrebno je rezultate mjerenja kako modela tako i mjerenja u naravi rastaviti na pojedine sastavne dijelove fizikalno prihvatljive za ispravno prenašanje rezultata s modela na brod. Kod biranja metode kojom će se napraviti istraživanje nove korelacijske linije vodilo se računa o njenoj jednostavnosti i primjenjivosti u praksi u budućem radu u Brodarskom institutu.

Od samih početaka ispitivanja brodskih modela nastojalo se prenijeti rezultate ispitivanja s modela na brod. Prva korištena metoda bila je ona Wiliama Frouda, prikazana u [1] i njegov poznati poučak da se izmjerene vrijednosti otpora modela prenose na brodske vrijednosti uz jednakost koeficijenta preostalog otpora modela i broda (C_{RM}=C_{RS}).

Danas se u prenašanju izmjerenih vrijednosti s modela na brod prema [2] primjenjuju prije svega metoda ITTC 1957, metoda ITTC 1978, te metoda ITTC 1984. U Brodarskom institutu su tijekom niza godina istraživani utjecaji pojedinih metoda na prognoziranje brzine broda/okretaja stroja kroz radove [3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11]. Istraživani su utjecaji i propulzijskih komponenata. Zadnji objavljeni članci o korelaciji u Brodarskom institutu su iz 1990.g. [12], i usporedba modelskih ispitivanja s ispitivanja na 12 brodova u seriji objavljena 2004.g. [13].

U radu je odabrana metoda za koju su postojali svi ulazni podaci. Iz dostupnih materijala sa ispitivanja koja su provedena s modelima brodova i mjerenjima u naravi u zadnjih dvadeset i pet godina moglo se nakon analize izraditi i predložiti nove korelacijske linije. U radu će biti izrađene korelacijske linije za brodove za prijevoz tekućeg tereta (*tankeri*) i brodove za prijevoz rasutih tereta (*bulk carrieri*). Ovako specijalno izrađene korelacijske linije imaju smisla jer su brodovi sličnih karakteristika, sličnih brzina plovidbe. Dobivene korelacijske linije za snagu i okretaje trebale bi pokazati kakva je kvaliteta prognoziranja brzine za pojedine tipove brodova, te da li treba neki od ulaznih koeficijenata koji se unašaju tijekom obrade i analize pokusa mijenjati.

Metode ITTC 1978 i ITTC 1984 nisu primjenjive, jer nedostaju podaci, koji se zbog proteklog vremenskog perioda ne mogu pronaći za istraživane forme. Također bi se neki od pokusa s modelima morali provesti kod manjih brzina što je sada nemoguće napraviti, jer više ne postoje modeli brodova. Stoga se u radu s pažnjom komentiraju sve danas primjenjivane metode u raznim institucijama koje se bave mjerenjem na modelima i u naravi. U radu se u analizi ograničilo na korištenje metode ITTC iz 1957 s korelacijskim dodacima kojima se u konačnici pokazuje da unatoč jednostavnosti daju dobre rezultate u prognozama.

2. BRODOVI PUNE FORME

U radu se istražuju brodovi pune forme s blok koeficijentom $C_B \geq 0.76$ na projektnom gazu. U takve brodove spadaju brodovi za prijevoz tekućeg tereta i brodovi za prijevoz rasutog tereta, koji su i najčešće ispitivani brodski modeli i brodovi u Brodarskom institutu zadnjih 25 godina. Brzina ovakvih brodova je na bazi Froudeovog broja F_{nL} u rasponu 0.15 – 0.20. Oni su tipični primjerci trgovačkih brodova kod kojih je korisna nosivost važna, a ona se očituje u maksimiziranju volumena teretnog prostora u odnosu na sve ostale prostore na brodu.

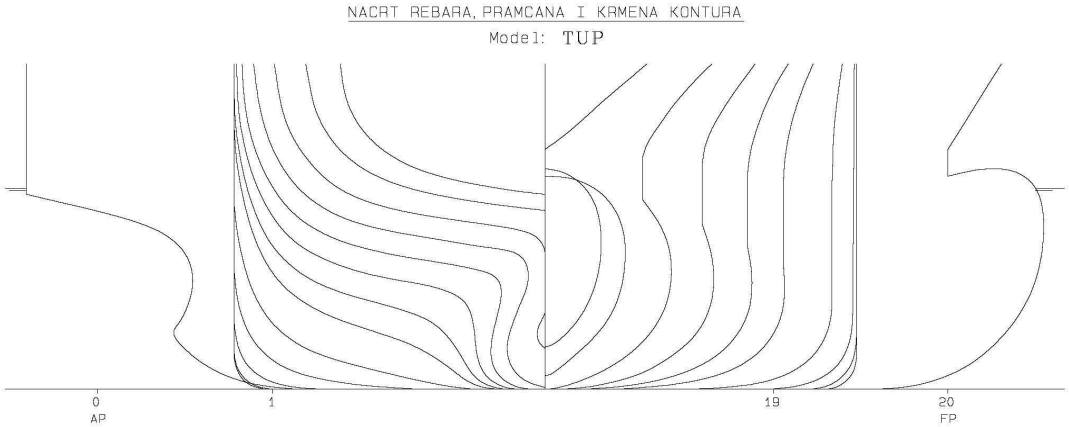
Zbog ovakvog zahtjeva bi bilo idealno napraviti formu barže, kojoj bi koeficijent punoće forme bio 1 (C_B =1.0), no to ne bi bilo dobro sa stajališta propulzije te ostalih plovidbenih karakteristika. Takav kutijasti trup imao bi jako niske koeficijente iskoristivosti, a upitna je i izvedba propelera na takvom brodu.

Da bi se postigao kompromis između maksimalnog prostora, uz najveće moguće brzine potrebno je napraviti formu trupa s veoma dugim paralelnim srednjakom, koji bi na pramcu i krmi imao zaoštrenje. Njime se postiže bolje savladavanje otpora valova (osobito na pramcu). Krma mora biti tako oblikovana radi osiguravanja što boljeg nastrujavanja vode vijku.

Korelacijski koeficijenti za prognozu otpora i propulzije određeni statističkom obradom uzorka parova model-brod objavljeni u literaturi, obično imaju malo zastupljenih brodova punih formi s koeficijentom istisnine $C_B \geq 0.76$. Za neke od tih brodova zapažena su neuobičajena i neprihvatljivo velika odstupanja prognoze od rezultata izmjerenih na pokusnim plovidbama.

Zahvaljujući učešću u ispitivanjima propulzije brodova tijekom više od šezdeset godina, Brodarski institut je stekao veliko iskustvo u ispitivanju i raspolaže s velikom bazom podataka za provjeru vlastitih prognoza. U brojnim publikacijama objavljivani su članci o korelaciji model-brod [3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13]. Sve veći broj ispitivanja omogućio je da se izdvojeno razmatraju različiti tipovi brodova i pouzdanije odrede korelacijski dodaci.

Forme brodskih modela i brodova za prijevoz tekućih tereta i brodova za prijevoz rasutih tereta su sličnih oblika. U radu su oni prvo analizirani odvojeno. Zadnji usporedbeni dijagrami i nove korelacijske linije pokazuju da se brodovi za prijevoz tekućeg tereta i brodovi za prijevoz rasutog tereta u balastu mogu zajedno analizirati. Rezultat analize je zajednička korelacijska linija za balast. Takvom se analizom postižu bolji rezultati prognoziranih brzina i okretaja nego kod prethodnih istraživanja korelacije.



Slika 1. Karakteristična forma tankera i bulk carriera
s pramčanom i krmenom konturom

Prikupljene i obrađivane forme brodova su s pramčanim bulbom, a krma im je s zrcalom/transomom. Uron krme je do početka zrcala/transoma kod stanja krcanja koje odgovara punom opterećenju.

3. METODE KORELACIJE

U radu su prikazane najvažnije metode koje se upotrebljavaju kod analize ispitivanja u bazenu. U kratkom opisu svake metode dane su i njene dobre i loše strane, jer nijedna metoda nije univerzalno primjenjiva.

3.1 Froudeova metoda

Temelje modelskih ispitivanja postavio je Froude 1868.g. u svom radu „Observations and suggestions on the subject of determining by experiment the resistance of ships“. On je prvi podijelio otpore modela odnosno broda na otpor trenja i preostali otpor . U radu je zaključio da na prvu komponentu utječu viskozne i inercijske sile, a na drugu gravitacijske i inercijske sile.
Prema Froudeu je otpor modela, odnosno broda, podijeljen na:

$R_{F'}$ - otpor trenja
R_R - preostali otpor

Otpor trenja $R_{F'}$ nastaje zbog viskoznosti, a preostali otpor R_R zbog djelovanja gravitacijskih i inercijskih sila.
Uz pretpostavku da preostali otpor ne ovisi o otporu trenja, pokus s modelom može se provesti prema Froudeovom zakonu, što znači:

$$V_M = \frac{V_S}{\sqrt{\lambda}} \tag{1}$$

Indeksi M i S odnose se na model odnosno brod, a λ je mjerilo modela. Otpor za brod i model može se izračunati tako da se izmjereni otpor modela podijeli na R_{FM} i R_{RM}. Ako se R_{FM} može izračunati onda se može odrediti R_{RM}

$$R_{TM} = R'_{FM} + R_{RM} \tag{2}$$

$$R_{RM} = R_{TM} - R'_{FM} \tag{3}$$

Preostali otpor može se prenijeti na brod množenjem s mjerilom sile. Ono se može prema (4) rastaviti na:

$$\lambda_F = \lambda_i = \lambda_g = \lambda_\rho \cdot \lambda_L{}^3 \cdot \lambda_g \tag{4}$$

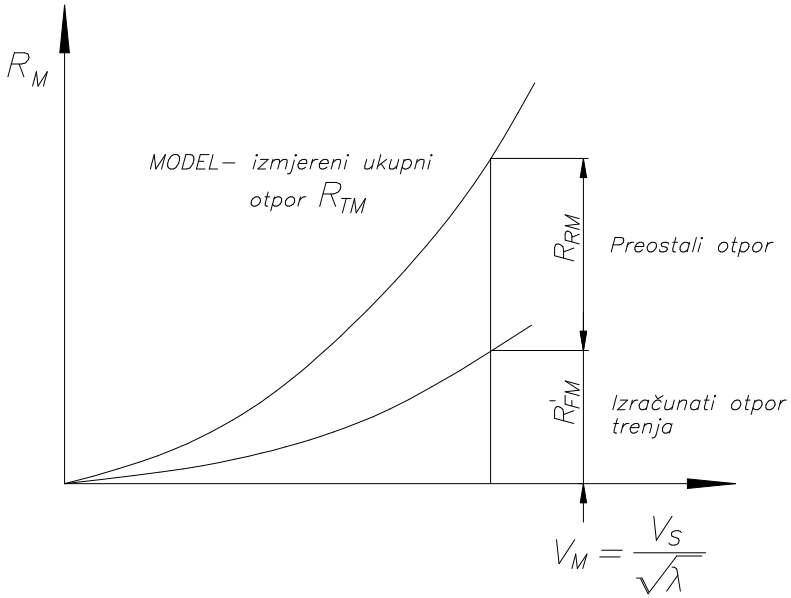
$$\frac{R_{RS}}{R_{RM}} = \lambda_\rho \cdot \lambda_L{}^3 \cdot \lambda_g = \frac{\rho_S}{\rho_M} \cdot \lambda_L{}^3 \cdot 1 \;\; ; \;\; \lambda_g = 1 \tag{5}$$

tj.:
$$R_{RS} = \frac{\rho_S}{\rho_M} \cdot \lambda_L{}^3 \cdot R_{RM} \tag{6}$$

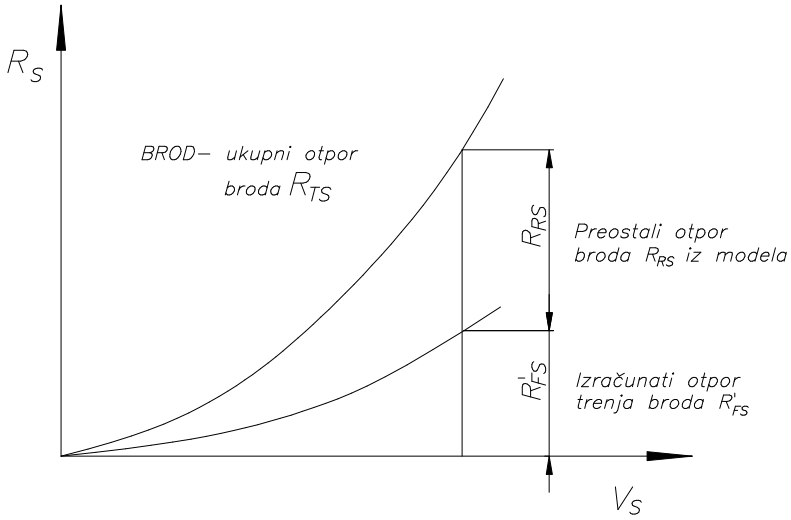
Ako se za brod upotrijebi isti način računanja otpora trenja kao i za model R_{FM}', ukupni otpor broda može se izračunati prema (7):

$$R_{TS} = R_{FS}' + R_{RS} = R_{FS}' + \frac{\rho_S}{\rho_M} \cdot \lambda_L{}^3 \cdot R_{RM} = R_{FS}' + \frac{\rho_S}{\rho_M} \cdot \lambda_L{}^3 \cdot \left(R_{TM} - R_{FM}'\right) \tag{7}$$

Iz (7) se može odrediti



Slika 2. Rastavljanje sile otpora po Froudeovoj metodi



Slika 3. Prijenos rezultata otpora po Froudeovoj metodi

W. Froude je otpor trenja modela i broda (R_{FM}', R_{FS}') računao pomoću „**ekvivalentne ploče**“, a pri tome nije uzimao u obzir zakrivljenost površine. Otpor trenja računao je prema izrazu (8):

$$R_F' = f \cdot S \cdot V^n \tag{8}$$

Vrijednost eksponenta odredio je njegov sin R. F. Froude i on iznosi:

n = 1.825

pa njegovim uvrštavanjem u izraz (8) on poprima oblik:

$$R_F' = f \cdot S \cdot V^{1.825} \tag{9}$$

Izraz za otpor trenja vremenom je promijenio oblik u (10):

$$R_F' = \frac{\rho \cdot g \cdot \lambda_t}{1000} \cdot S \cdot V^{1.825} \tag{10}$$

gdje je:

λ_t - koeficijent otpora trenja za model i brod (hrapava površina).

$$\lambda_t = \left(0.1392 + \frac{0.258}{2.68 + L}\right) \cdot \left[1 + 0.0043 \cdot (15 - t_W)\right] \tag{11}$$

L - duljina broda odnosno modela,
t_W - temperatura vode [°C],
S - oplakana površina [m^2],
V - brzina [m/s],
ρ - gustoća vode [kg/m^3].

U komponenti preostalog otpora R_R sadržani su otpor valova R_W, viskozni otpor tlaka R_{VP}, otpor lomljenja valova R_{WB} i otpor uslijed zakrivljenosti ΔR_F'.

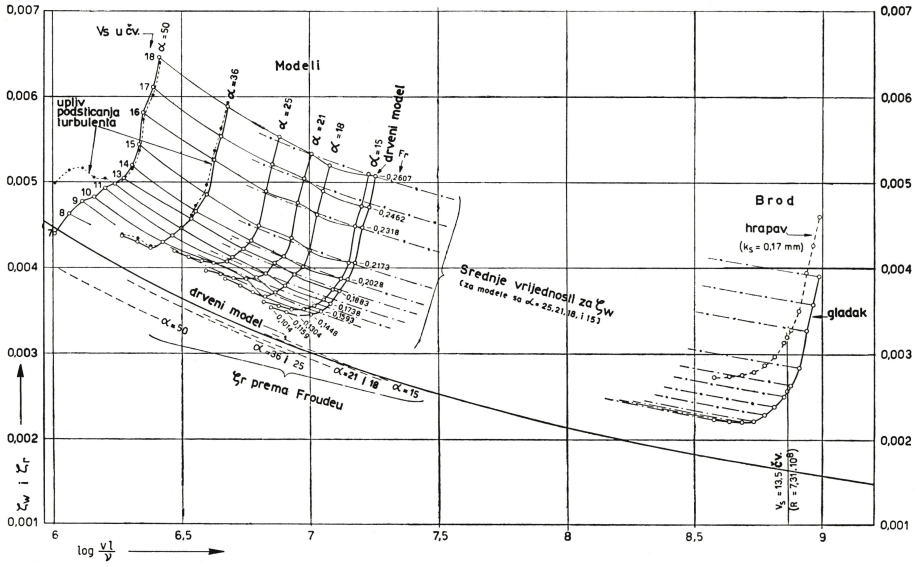
W. Froude je u svojoj metodi zanemario sljedeće činjenice:

- Čestice vode opisuju komplicirane putanje zbog valnog gibanja.
- Brzina strujanja oko broda je na nekim mjestima manja, a na nekima veća od brzine ravne ploče.
- Postoji odvajanje strujanja.
- Granični sloj može biti deblji ili tanji nego što je kod ravne ploče.

Usprkos svemu, Froudeov jednostavan princip podjele otpora na otpor trenja i preostali otpor još se i danas upotrebljava u velikom broju bazena. Međutim, jednadžbe i koeficijenti trenja R. E. Froudea više se ne koriste osim u možda nekoliko bazena.

3.2 Telferova metoda geosima

Ova se metoda bazira na radu E.V.Telfera iz 1927. [2]. Temelji se na ispitivanjima modela raznih mjerila. Telfer je uočio da iako je nemoguće zadovoljiti istovremeno i Reynoldsov i Froudeov zakon provodeći pokuse samo s jednim modelom, uporabom obitelji modela (izrađenih u raznim mjerilima) grafički se može predočiti zavisnost otpora o Reynoldsovom i Froudeovom broju.
U pokusima je ukazao na svojstvo zadržavanja jednake udaljenosti bilo kojih dviju krivulja. Ova jednakost razmaka među krivuljama konstantnih F_{nL} omogućava ekstrapolaciju do vrijednosti Reynoldsova broja koji odgovara brzini broda.
Na slici 4. je prikazana Telferova metoda.



Slika 4. Prikaz Telferove metode, preuzete iz [2]

Provođenje eksperimenata po ovoj metodi je skupo i zahtjeva puno vremena, te se u praksi primjenjuje samo u znanstvene svrhe.

3.3 Hughesova metoda

Godine 1954. Hughes je preporučio formulu za izračun koeficijenta otpora trenja na bazi ispitivanja glatkih ravnih površina u turbulentnom strujanju.
Za koeficijent otpora trenja predložio je izraz:

$$C_F = \frac{0.066}{(\log Rn - 2.03)^2} \tag{12}$$

Postoji dobro podudaranje između eksperimenta i predložene formule.

Hughes je otpor broda podijelio na tri dijela:

- **Otpor trenja u dvodimenzionalnom strujanju** ravnih površina (bez rubnog efekta) s istom površinom i istom srednjom duljinom kao brodski trup.
- **Otpor forme** (viskoznog tlaka) koji se dodaje otporu trenja, a koji se može odrediti s duboko uronjenim duplim modelom (otpor trenja i otpor forme).
- **Otpor slobodne površine**, koji je određen preko otpora duboko uronjenog duplog modela.

Hughesova podjela otpora je pogodna samo za analitičke svrhe jer se ova tri otpora ne mogu svaki posebno mjeriti, ali je logična jer navedene komponente mogu egzistirati nezavisno.

Hughes predlaže:

$$R_T = R_{Fosnovni} \cdot r + R_{slobodnepovrsine} \tag{13}$$

gdje je r odnos otpora i konstantan je za jednu formu:

$$r = (1+k) = \frac{R_F + R_{VP}}{R_F} = \frac{R_V}{R_F} \tag{14}$$

a k je faktor forme.

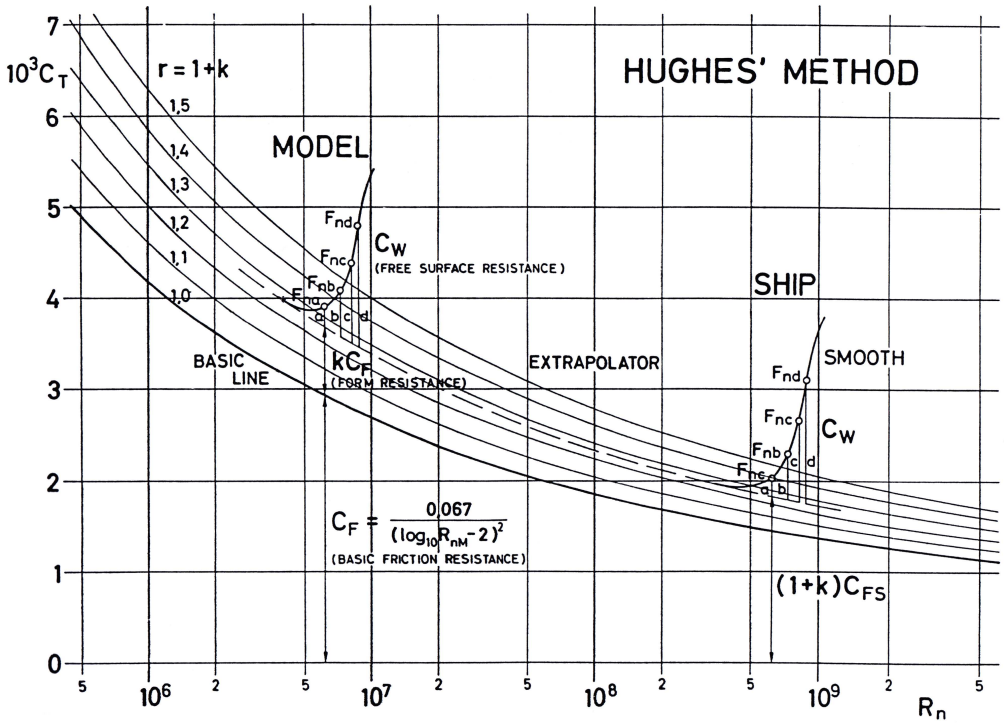
Kao osnovni koeficijent otpora trenja može se upotrijebiti predloženi izraz (12) ili neka slična formulacija. Slika 5 prikazuje krivulje C_F i $(1+k)C_F$ za različite vrijednosti k kao funkcije Reynoldsovog broja. Vrijednosti r, odnosno k, mogu se odrediti iz otpora pri malim brzinama.
Na dijagramu Slike 5. se nanese koeficijent otpora trenja i koeficijent ukupnog otpora te se povlačenjem tangente na krivulju $(1+k)C_F$ odnosno na krivulju C_T dobije se točka (*run in point*) iz koje se može odrediti faktor forme k i $(1+k)C_F$.

Veličina $(1+k)C_F$ se može upotrijebiti kao ekstrapolator. Otpor slobodne površine može se odrediti kao ostatak do krivulje C_T za koji se pretpostavlja da se prenosi prema

Froudeovom principu. Dodavanjem C_A zbog hrapavosti se može izračunati otpor, odnosno snaga pogonskih strojeva broda.

$$C_{TS} = C_F \cdot (1+k) + C_W + C_A \tag{15}$$

$$R_{TS} = C_{TS} \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_S^{\,2} \cdot S_S \right) \tag{16}$$



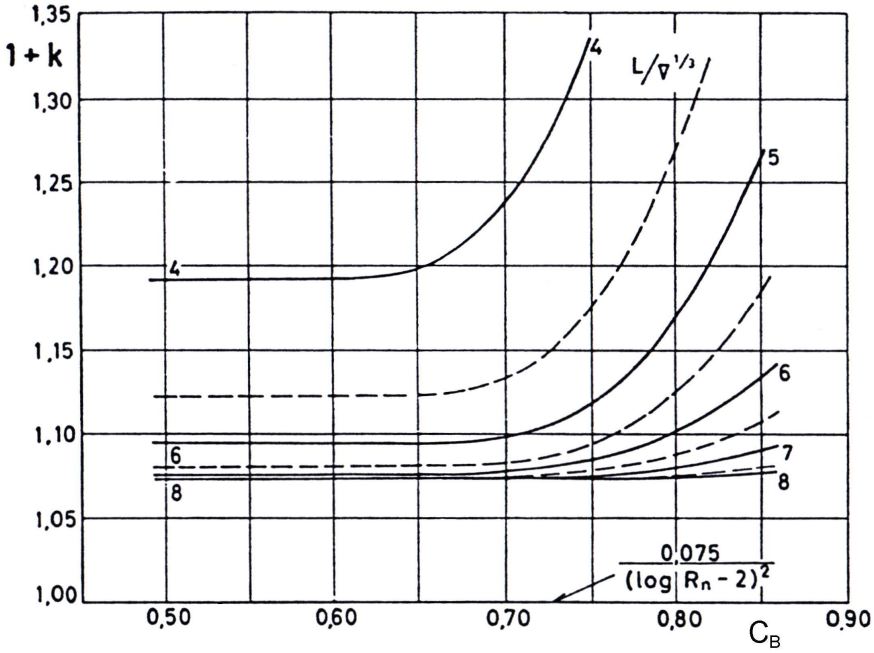
Slika 5. Prikaz Hughesove metode, preuzeto iz [2]

Mnogi bazeni s uspjehom upotrebljavaju Hughesovu metodu dok je neki kombiniraju s Prohaskinom metodom za određivanje faktora forme. Za određivanje faktora forme može se upotrijebiti Granvillova empirička formula [14]:

$$k = 18.7 \cdot \left(C_B \cdot \frac{B}{L} \right)^2 \tag{17}$$

te dijagram na Slici 6. gdje se faktor forme određuje kao funkcija koeficijenta istisnine i koeficijenta vitkosti:

$$r = 1 + k = f\left(C_B, \frac{L}{\nabla^{\frac{1}{3}}} = (M) \right) \tag{18}$$



Slika 6. Veličina 1+k = f (C_B, L / $\nabla^{1/3}$), preuzeto iz [2]

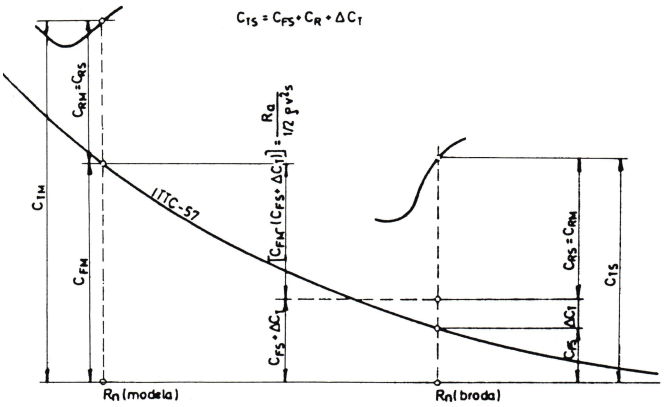
3.4 Metoda ITTC 1957

ITTC 1957 metoda se bazira na Froudeovom principu podijele ukupnog otpora na otpor trenja i preostali otpor odnosno na ITTC 1957 korelacijskoj liniji.

ITTC je korelacijska linija definirana izrazom:

$$C_F = \frac{0.075}{(\log Rn - 2)^2} \tag{19}$$

Ovako definirana korelacijska linija pokazala se dobrom sa stajališta inženjerske prakse. Slika 7. ilustrira metodu ITTC 1957, a preuzeta je iz [12].



Slika 7. Prikaz ITTC 1957 metode, preuzeto iz [12].

Ukupni koeficijent otpora određen ispitivanjem modela iznosi prema izrazu (20):

$$C_{TM} = \frac{R_{TM}}{\frac{1}{2} \cdot \rho_M \cdot V_M{}^2 \cdot S_M} \tag{20}$$

Koeficijent preostalog otpora određuje se na sljedeći način (21):

$$C_{RM} = C_{TM} - C_{FM} \tag{21}$$

Pri tome se koeficijent otpora trenja određuje pomoću izraza $C_F = f(R_n)$. Pretpostavlja se da je koeficijent preostalog otpora za brod i model isti za isti Froudeov broj pa kod odgovarajućih Reynoldsovih brojeva vrijedi izraz (22):

$$C_{RS} = C_{RM} = C_R \tag{22}$$

Na taj način dobijemo da je ukupni koeficijent otpora broda za stvarnu oplakanu površinu broda određen izrazom (23):

$$C_{TS} = C_{FS} + C_R + C_A \tag{23}$$

gdje je:

C_A - koeficijent povećanog otpora zbog hrapavosti
ΔC_T - korelacijski koeficijent u sebi uključuje i utjecaj hrapavosti koji koristi Brodarski institut

Neki bazeni uzimaju za C_A konstantnu vrijednost (npr. 0.0004) nezavisno o tipu i veličini broda. Drugi bazeni smatraju da C_A varira prema tipu i veličini broda (Δ ili L).
U Brodarskom se institutu taj dodatak uzima kao funkciju Reynoldsovog broja.

Koeficijent povećanog otpora kao funkcija veličine broda prikazan je sljedećom tablicom:

Δ [t]	C_A
1000	$0.6 \cdot 10^3$
10000	$0.4 \cdot 10^3$
100000	0
1000000	$-0.6 \cdot 10^3$

Tablica 1. Koeficijent povećanja otpora kao funkcija veličine broda, prema [2].

Da bi se dobile razumne prognoze, vrijednost koeficijenta povećanog otpora C_A može poprimiti i negativne vrijednosti, što ukazuje na nesavršenost korelacijske linije ITTC 1957.
Otpor broda određuje se pomoću izraza (24):

$$R_{TS} = \frac{1}{2} \cdot \rho_S \cdot C_{TS} \cdot V_S \cdot S_S \qquad [\mathrm{N}] \tag{24}$$

Dok se snaga određuje pomoću izraza (25):

$$P_{ES} = \frac{R_{TS} \cdot V_S}{1000} \quad [\mathrm{kW}] \tag{25}$$

3.5 Prohaskina metoda

Metoda prof. Prohaske prema [2] se bazira na Hughesovoj metodi uz dodatak da se faktor forme *k* određuje eksperimentalnim putem. Trodimenzionalni faktor forme *k* računa se prema izrazu:

$$k = \frac{C_V - C_{F0}}{C_{F0}} = \frac{C_V}{C_{F0}} - 1 \tag{26}$$

odnosno:

$$r = 1 + k \tag{27}$$

gdje je:

C_V - ukupni koeficijent viskoznog otpora
$C_F' = C_{F0}$ - koeficijent otpora trenja u dvodimenzionalnom strujanju.

U slučaju kada nema odvajanja:

$$C_T = C_W + (1 + k) \cdot C_{F0} \tag{28}$$

gdje je C_W koeficijent otpora valova.

$$C_W = a \cdot Fn^4 \tag{29}$$

Vrijednost koeficijenta valova varira u ovisnosti o koeficijentu istisnine C_B, pa za brodove kojima je $C_B > 0.80$ iznosi:

$$C_W = a \cdot Fn^6 \tag{30}$$

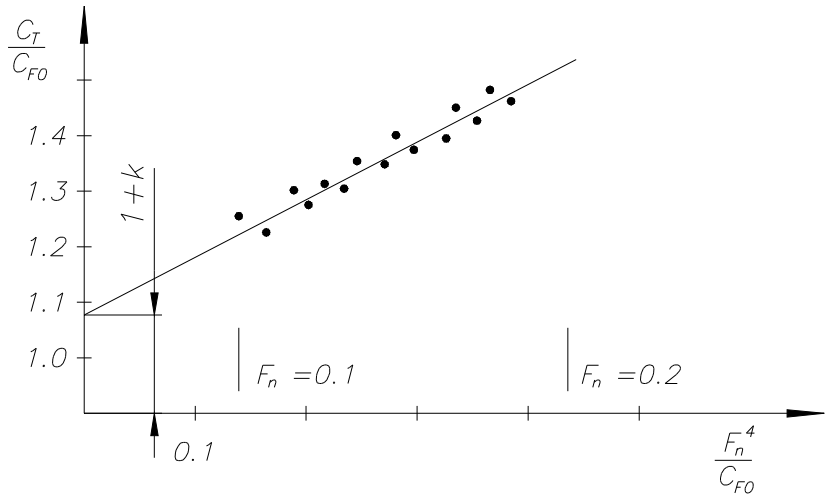
odnosno možemo pisati.

$$C_W = a \cdot Fn^n \tag{31}$$

Član *a* predstavlja koeficijent nagiba pravca u sljedećem izrazu:

$$\frac{C_T}{C_{F0}} = (1 + k) + a \cdot \frac{Fn^4}{C_{F0}} \tag{32}$$

Koeficijent nagiba pravca *a* odnosno objašnjenje pojedinih članova u gornjoj jednadžbi dani su na Slici 8.



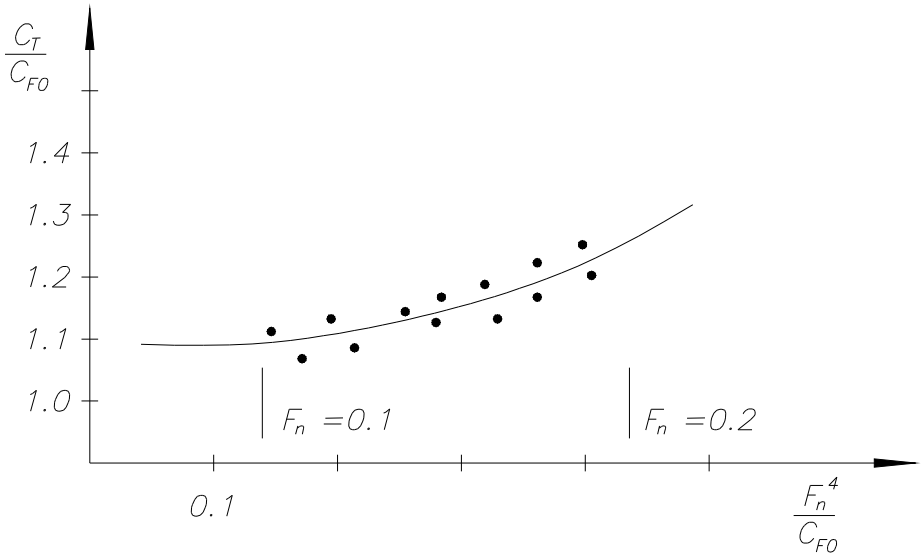
Slika 8. Određivanje faktora forme prema Prohaski

Za crtanje ovog dijagrama potrebno je izmjeriti desetak točaka C_T u području Froudeovih brojeva Fn = 0.1÷0.2 (0.22). Ovdje treba naglasiti da je mjerenje otpora pri niskim brzinama vrlo nesigurno, pogotovo s modelima brodova koji imaju pune forme krme zbog odvajanja strujanja. Za pune brodove, C_B > 0.80 u dijagramu se može dobiti konkavna krivulja što upućuje da su a i (1+k) ovisni o brzini.

Za pune brodove treba računati na više potencije Froudeovih brojeva (između 4 i 6 umjesto 4) pa slijedi izraz (33):

$$\frac{C_T}{C_{F0}} = (1+k) + a \cdot \frac{Fn^n}{C_{F0}} \tag{33}$$

gdje je *n* potencija između 4 i 6.



Slika 9. Faktor forme za brodove kojima je $C_B > 0.80$

3.6 Metoda ITTC 1978

Izraz za izračunvanje koeficijenta ukupnog otpora za brod bez ljuljnih kobilica prema ITTC 1978 metodi:

$$C_{TS} = (1+k) \cdot C_{FS} + C_R + C_A + C_{AA} \tag{34}$$

gdje je:

k - faktor forme određen iz ispitivanja otpora modela,
C_{FS} - koeficijent otpora trenja broda - ITTC 1957,
C_R - koeficijent preostalog otpora izračunat prema izrazu:

$$C_R = C_{TM} - (1+k) \cdot C_{FM} \tag{35}$$

C_{FM} - koeficijent trenja modela - ITTC 1957,
C_A - dodatak za hrapavost, izračunat prema izrazu:

$$C_A = \left[105 \cdot \left(\frac{k_s}{L_{WL}} \right)^{\frac{1}{3}} - 0.64 \right] \cdot 10^{-3} \tag{36}$$

gdje je:

k_s - srednja amplituda hrapave površine na 50 mm valovite površine (ako nije poznata hrapavost oplate broda može se uzeti da je jednaka $150 \cdot 10^{-6}$ m),
L_{WL} - duljina na vodnoj liniji,
C_{AA} - koeficijent otpora zraka, ako ne postoje rezultati ispitivanja u tunelu računa se prema izrazu (37):

$$C_{AA} = 0.001 \cdot \frac{A_{VT}}{S} = \frac{A_{VT}}{S} \cdot 10^{-3} \tag{37}$$

gdje je:

A_{VT} - poprečna površina, projicirana prednja površina iznad vodne linije (trup + nadgrađe),
S - oplakana površina trupa.

Ako je brod opremljen s ljuljnim kobilicama (*bilge keels*) koeficijent ukupnog otpora računa se prema izrazu (38):

$$C_{TS} = \frac{S + S_{BK}}{S}\left[(1+k)\cdot C_{FS} + C_A\right] + C_R + C_{AA} \tag{38}$$

gdje je:

S_{BK} - oplakana površina ljuljnih kobilica

Zbog nesigurnosti mjerenja pri niskim brzinama, preporučljiva je uporaba rezultata otpora u području Froudeovih brojeva:

$0.12 < Fn < 0.20$

Kod brodova s djelomično uronjenim bulbom na pramcu i brodova s tupim pramcem zbog otpora lomljenja valova postoje zamjerke na ovu metodu. U tim se slučajevima preporuča smanjiti granice ispitivanja Froudeovog broja (zbog otpora lomljenja valova) umjesto određivanja faktora forme prema izrazu Prohaske:

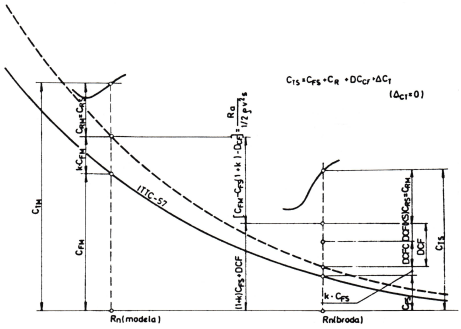
$$\frac{C_T}{C_F} = (1+k) + a\cdot\frac{Fn^4}{C_F} \tag{39}$$

ITTC preporuča izraz:

$$\frac{C_T}{C_F} = (1+k) + c\cdot\frac{Fn^n}{C_F} \tag{40}$$

gdje su koeficijenti *c* i *n* tako odabrani da najbolje aproksimiraju izmjerene točke. Parametre *n*, *c* i *k* treba odrediti metodom najmanjih kvadrata.
Metoda ITTC 1978 je u pogledu mehaničke sličnosti rađena na principima Froudeovog zakona kod kojeg postoji sumnja u ispravnost. Možda će u budućnosti biti potrebno dodati utjecaj mjerila na otpor valova.

Metoda ITTC 1978. ilustrirana je na Slici 10. Ova metoda, kao i sve metode koje raščlanjuju otpor na komponente ima bolju fizikalnu podlogu. Međutim, za korektnost metode trebalo bi uvesti i utjecaj mjerila na otpor valova.
Metoda ITTC 1978. ne vrijedi generalno za dvovijčane brodove. Da bi se metoda upotrijebila za ove brodove potrebno je u proračun uvesti korekciju.



Slika 10. Metoda ITTC 1978, prezuzeta iz [12].

3.7 Metoda ITTC 1984

Metoda ITTC 1984 se nastavlja na metodu ITTC 1978, a razlikuje po Reynoldsovom broju koji korigira koeficijente sustrujanja, poriva i momenta vijka.

$$C_{TS} = C_{FS} + C_{RM} + DCF + \Delta C_T \quad \text{prema ITTC 1984} \tag{41}$$

$$C_{RM} = C_{TM} - k \cdot C_{FM} - C_{FM} \quad \text{u drugom uz} \tag{42}$$

$$DCF = 150 \cdot 10^{-6}\ \text{m}, \quad \text{standardna hrapavost oplate} \tag{43}$$

Korelacijski dodatak ΔC_T je jednak prethodnoj metodi.

Za ITTC 1984 uzima se početno $\Delta C_T = 0$. Prema metodi ITTC 1984 osim za trenje ravne ploče, viskozne sile su presudne za doprinos forme (preko izraza $k \cdot C_F$, k-faktor forme), povećanje trenja uslijed hrapavosti oplate DCF a djeluju i kroz korelacijski dodatak ΔC_T.

U ovoj se metodi posebno pribraja otpor zraka broda u naravi.

- η_D ukupni stupanj djelovanja propulzije određen pokusom na modelu,
- η_m mehanički stupanj djelovanja osovinskog voda.

Tu se polazi od ukupnog otpora, s tim da se koeficijenti propulzije za brod, zbog promjene Reynoldsova broja posebno korigiraju kako slijedi:

$$P_B = \frac{C_T \cdot v}{\eta_D} \cdot 0.5 \cdot \rho \cdot v^2 \cdot S \cdot \frac{CP}{\eta_m} \tag{44}$$

Efektivno sustrujanje (jednovijčani brodovi):

$$w_S = (t + 0.04) + (w_M - t - 0.04) \cdot \frac{C_{VS}}{C_{VM}} \tag{45}$$

gdje je:

t	- koeficijent smanjenog poriva broda i modela
0.04	- utjecaj kormila u struji vijka
$C_V = (l + k) \cdot C_F$	- koeficijent viskoznog otpora

Za $w_M < w_S$ uzima se vrijednost w_M

Koeficijent poriva vijka:

$$K_{TS} = K_{TM} - \Delta K_T, \quad \text{gdje je} \tag{46}$$

$$\Delta K_T = -\Delta C_T \cdot 0.3 \cdot \frac{P}{D} \cdot \frac{c \cdot z}{D}, \quad \text{a} \tag{47}$$

$$\Delta C_D = C_{DM} - C_{DS} \quad \text{uz} \tag{48}$$

$$C_{DM} = 2 \cdot (1 + 2 \cdot \frac{t_c}{c}) \cdot \frac{0.044}{(Rn_{Co})^{1/6}} - \frac{5}{(Rn_{Co})^{2/3}} \tag{49}$$

$$C_{DS} = 2 \cdot (1 + 2 \cdot \frac{t_c}{c}) \cdot (1.89 + 1.62 \cdot \log \frac{c}{k_P})^{-2} \tag{50}$$

t_c	- ovdje najveća debljina presjeka krila vijka na 0.75D
P/D	- omjer uspona i dijametra vijka na 0.75D
c	- duljina tetive krila vijka na 0.75D
z	- broj krila vijka
Rn_{Co}	- Reynolds-ov broj na 0.75D vijka
k_P	- $30 \cdot 10^{-6}$ m prihvaćen iznos srednje hrapavosti krila vijka

Koeficijent momenta vijka:

$$\mathrm{K_{QS}} = \mathrm{K_{QM}} - \Delta \mathrm{K_Q} \tag{51}$$

$$\Delta K_Q = \Delta C_D \cdot 0.25 \cdot \frac{c \cdot z}{D} \tag{52}$$

S koeficijentom propulzije za brod može se računati kao i ranije.

$$P_B = CP \cdot \frac{C_\mathrm{T} \cdot v}{\eta_D} \cdot 1/2 \cdot \rho \cdot v^2 \cdot S \text{ , gdje je:} \tag{53}$$

CP - dodatak za pokusnu plovidbu

$$\eta_D = \frac{1-t}{1-w_S} \cdot \eta_R \cdot \eta_m \tag{54}$$

- koeficijent propulzije broda

t - koeficijent smanjenog poriva jednak za brod i model

$$\eta_\mathrm{R} = \frac{\mathrm{K_{Qo}}}{\mathrm{K_{QM}}} \tag{55}$$

- koeficijent prijelaza, jednak za brod i model

$$\eta_{OS} = \frac{K_{TS}}{K_{QS}} \cdot \frac{J_S}{2\pi} \tag{56}$$

- stupanj djelovanja vijka u slobodnoj vožnji

$$J_S = \frac{v_S}{N \cdot D} \tag{57}$$

- koeficijent napredovanja

4. HIDRODINAMIČKI POKUSI S MODELIMA BRODOVA

Provođenje pokusa propulzije s modelima brodova u bazenu ima za cilj preciznije određivanje i prognoziranje brzine i okretaja stroja za budući brod. Danas još ne postoji nadomjestak bazenskih ispitivanja pomoću računalnih proračuna dinamike fluida (CFD), kojima bi se eliminiralo ispitivanja u bazenu. Kad napredak tehnike i metode proračuna s CFD paketima to omoguće, opet će se pristupiti mjerenjima u naravi i odrediti nekakva korelacija prema proračunima no vjerojatno u drugom apsolutnom iznosu. Postoji čitav niz pokusa koji se obavljaju s pojedinim modelom kako bi se odredile propulzijske karakteristike broda.

U pripremi mjerenja s modelom potrebno je posebno voditi računa o izboru mjerila za izradu pojedinog modela. Ono mora biti određeno iz osnovnog uvjeta kako bi se osiguralo turbulentno strujanje na modelu i na privjescima (za potrebe ovog rada to su kormilo i vijak). Da bi se to osiguralo potrebno je koristiti što manje mjerilo, odnosno da model bude što veći. To naravno kolidira sa drugim uvjetima koji su definirani karakteristikama bazena kao laboratorija. Mjerni uređaji koji se upotrebljavaju u Brodarskom institutu za mjerenje na modelima također imaju svoju osjetljivost pa tijekom pripreme ispitivanja i prilikom izbora mjerila i o tome treba voditi računa. Dosadašnja praksa pokazuje da je odluka o mjerilu modela uvjetovana i veličinom vijka sa zalihe, koji je najbliži odgovarajućem vijku.

Prvo se ispitivanja vlastitog pogona provode s vijkom sa zalihe. Tek po završetku cijelog prvog ciklusa ispitivanja, definiranja polja sustrujanja i projektiranja vijka baš za ispitivani model broda provode se završna ispitivanja. Iz tih ispitivanja prognozira se brzina broda i pripadajući okretaji stroja za brod koji će se graditi. Pokusna plovidba u naravi samo služi za potvrđivanje tog rezultata. Već se u okviru prognoziranja treba osim zakonitosti prenašanja rezultata s modela na brod znati i korelacijske dodatke.

Postupak i redoslijed u ispitivanju brodskih modela potrebnih za prognozu u bazenu Brodarskog instituta podijeljeni su u dvije faze:

Prva faza (s vijkom sa zalihe):

- izbor mjerila modela ovisno o brzini broda, veličini broda i propulzora, te osjetljivosti mjernih uređaja i karakteristika s obzirom na mogućnosti bazena
- izbor propelera sa zalihe u prvoj fazi ispitivanja novog modela
- izrada modela i pripadajućih privjesaka
- ispitivanje otpora modela
- ispitivanje vlastitog pogona
- ispitivanje slobodne vožnje vijka
- ispitivanje sustrujanja
- pokus strujnica nitima ili bojom

Druga faza (s projektiranim vijkom za brod):

- ispitivanje otpora modela
- ispitivanje slobodne vožnje s projektiranim vijkom
- ispitivanje vlastitog pogona s projektiranim vijkom
- ispitivanje modela vijka u kavitacijskom tunelu što zahtjeva složenu pripremu i gdje se nekad radi i novi model u drugom mjerilu koje će odgovarati kavitaciji.

Prognoze brzina za željenu snagu izrađuju se u obje ove faze na pokusnoj plovidbi. Kod projektiranog vijka za pojedinu formu brzina je obično veća nego li kod ispitivanja i prognoze s vijkom sa zalihe. U dijelu gdje se radi prognoza brzine i okretaja važno je, osim iskustva u mjerenju, znati i kakve korelacijske koeficijente primijeniti u pojedinom pokusu.

Prije provođenja pokusa potrebno je izraditi model i privjeske, kontrolirati točnost njihove izrade, te opremiti model za pojedini pokus. Ovisno o pokusu razlikuju se pripreme modela.

U nastavku će ukratko biti opisana ispitivanja potrebna za prognoziranje brzine broda.

4.1 Pokus otpora

Kod pokusa otpora kroz bazen se s kolicima tegli model bez privjesaka kroz bazen. Pri tome se mjeri: brzina modela i sila otpora modela. Kod brzih modela, koji imaju i dinamički uzgon, mjere se i dinamičke komponente gibanja (kut trima u plovidbi, vertikalni pomak težišta). Ovo je najjednostavniji pokus, ali ujedno i nezaobilazan u prognoziranju brzine za brod, jer su izmjereni otpori kod pojedinih brzina ulazne veličine kod analize točaka autopropulzije kod ispitivanja vlastitog pogona modela broda.
Model se tegli u rasponu interesantnih brzina prema određenim koracima. Nakon toga se provede analiza s nekom od standardnih metoda te se uz korelacijske koeficijente vrijednosti otpora prenose na brod.

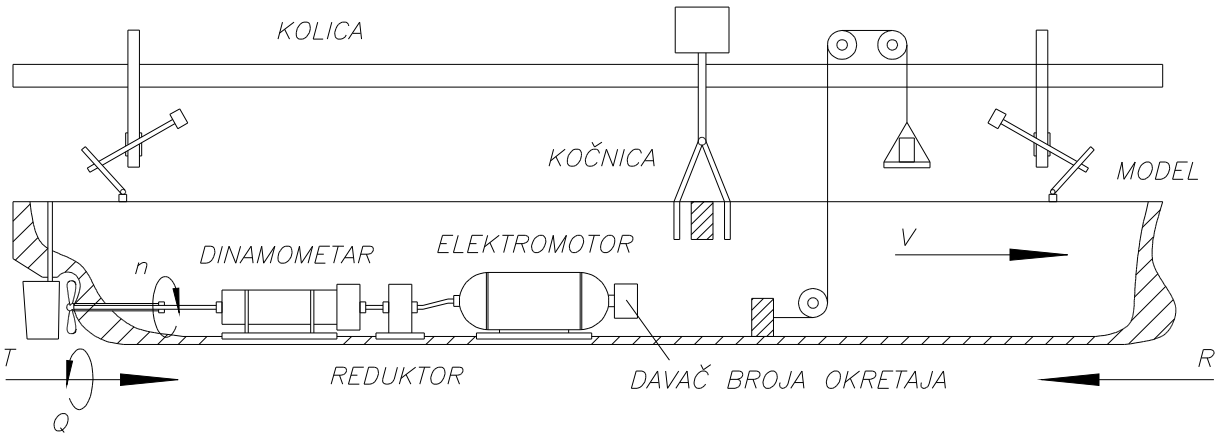
Iz literature [15, 16, 17] se vidi kako bazeni u svijetu upotrebljavaju različite metode korelacije. Bez obzira na nastojanje ITTC da unificira prognoziranje, ipak je ono podložno iskustvu, načinu provođenja pokusa, veličini modela, karakteristikama bazena.

U Brodarskom institutu se primjenjuje metoda ITTC 1957, koja prema iskustvu daje prihvatljive rezultate po točnosti, a istovremeno je jednostavnija za upotrebu od npr. metode ITTC 1978 ili ITTC 1984.
Primjena svake od metoda ima svoju pozitivnu i negativnu stranu. Uvođenje nove metode za korelaciju je složen proces i treba ga planski pripremiti i uvoditi.

4.2 Pokus vlastitog pogona

Za provođenje ovog pokusa model treba opremiti sa svim propulzijskim dijelovima kao i brod. Mora se izraditi kormilo i brodski vijak u mjerilu, a ako postoje neki izdanci, onda se i oni također moraju izraditi. Kod mjerenja izdanaka dobro bi bilo napraviti pokuse s i bez dodatnih izdanaka, u koje uglavnom u spadaju ljuljne kobilice, jer prenašanje rezultata s modela na brodske vrijednosti privjesaka nije isto kao kod modela broda u cjelini.

Na Slici 11. prikazan je model opremljen za izvođenje pokusa vlastitog pogona u bazenu.



Slika 11. Model opremljen za pokus vlastitog pogona.

U pokusu se mjeri:

T_M	- poriv,
Q_M	- moment,
n_M	- okretaji vijka,
V_M	- brzina modela odnosno kolica

Svrha ovog pokusa je određivanje komponenata propulzije koje služe za procjenu propulzijskih značajki broda, odnosno interakcije trup-vijak. Također služi za prognoziranje brzine odnosno potrebne snage pogonskog stroja za određenu brzinu.

Za provođenje analize rezultata pokusa vlastitog pogona potrebno je imati i rezultate pokusa:

- otpora modela broda,
- slobodne vožnje modela vijka.

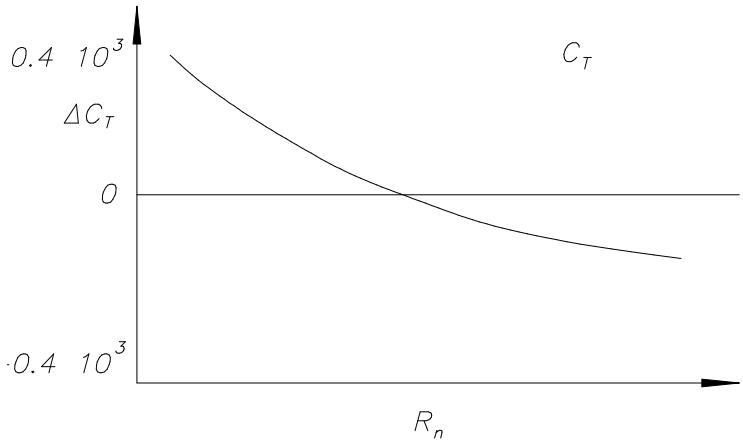
Za vrijeme pokusa vlastitog pogona slično kao i kod mjerenja otpora modela moguća su sljedeća gibanja:

- poniranje,
- zastajkivanje,
- valjanje,
- posrtanje.

Zastajkivanje je ograničeno dinamometrom, kojim je model vezan uz kolica. Broj okretaja elektromotora je ujedno i broj okretaja vijka, a regulira se tako da model ima brzinu kolica. Kod standardnih pokusa vlastitog pogona mjeri se 10÷20 mjernih točaka, zavisno o metodi. Zbog razlike u koeficijentima trenja za model i brod te zanemarivanja jednakosti Reynoldsovih brojeva, potrebno je za vrijeme pokusa primijeniti ispravak trenja (*skin friction correction*):

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot \rho_M \cdot V_M{}^2 \cdot S_M \cdot \left[C_{FM} - \left(C_{FS} + \Delta C_T \right) \right] \tag{58}$$

gdje je ΔC_T korelacijski dodatak koji se upotrebljava u Brodarskom institutu. Neki drugi bazeni upotrebljavaju C_A - korekciju trenja zavisno o duljini (površini), odnosno Reynoldsovom broju. U korelacijskom dodatku ΔC_T Brodarskog Instituta Slika 12. pored ostalih parametara uključen je i navedeni C_A.



Slika 12. Korelacijski dodatak ΔC_T.

Postoji nekoliko metoda provođenja pokusa vlastitog pogona, a najpoznatije su:

- Kontinentalna metoda
- Britanska metoda

Obje metode imaju primjenu u mjerenjima u Brodarskom institutu, a njihova primjena ovisi o tome da li se ispitivanje radi kod manjeg ili većeg raspona brzina modela.

4.2.1 Kontinentalna metoda

Kod kontinentalne metode unaprijed se izračuna sila ispravka trenja F_D za svaku brzinu u interesantnom području. Izračunata sila ispravka trenja postavlja se unaprijed u smjeru gibanja modela kod svake vožnje kroz bazen, odnosno mjerne točke. Rasterećenje silom F_D je potrebno kako bi se na vijku uspostavilo odgovarajuće stanje opterećenja kakvo odgovara vijku u naravi.
Slika 13. prikazuje rezultate navedene metode. Preračunavanje rezultata provodi se na sljedeći način:

$$V_S = V_M \cdot \sqrt{\lambda} \tag{59}$$

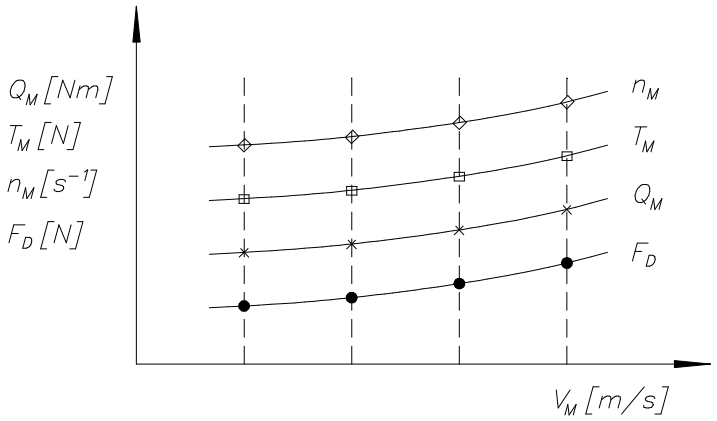
$$n_S = n_M \cdot \frac{1}{\sqrt{\lambda}} \tag{60}$$

$$T_S = \left(T_{Mizmjereno} \pm \Delta T\right) \cdot \frac{\rho_S}{\rho_M} \cdot \lambda^3 \cdot 10^3 \qquad \text{[kN]} \tag{61}$$

$$Q_S = \left(Q_{Mizmjereno} \pm \Delta Q_M\right) \cdot \frac{\rho_S}{\rho_M} \cdot \lambda^4 \cdot 10^3 \qquad \text{[kNm]} \tag{62}$$

$$P_D = \frac{2\pi \cdot n_S \cdot Q_S}{1000} \qquad \text{[MW]} \tag{63}$$

ako je Q_S [kNm] i n_S u [o/s].

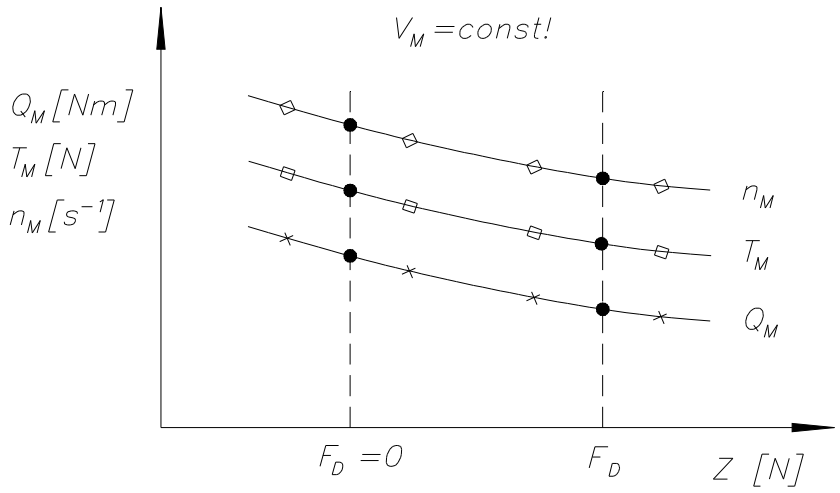


Slika 13. Rezultati vlastitog pogona - kontinetalna metoda.

Rezultati se preračunavaju na veličine za brod kako je gore prikazano. Korekcije ΔT_M i ΔQ_M potrebno je provesti zbog: trenja u statvenoj cijevi modela, temperature, utjecaja dubine, utjecaja stijenki i dr.

4.2.2 Britanska metoda

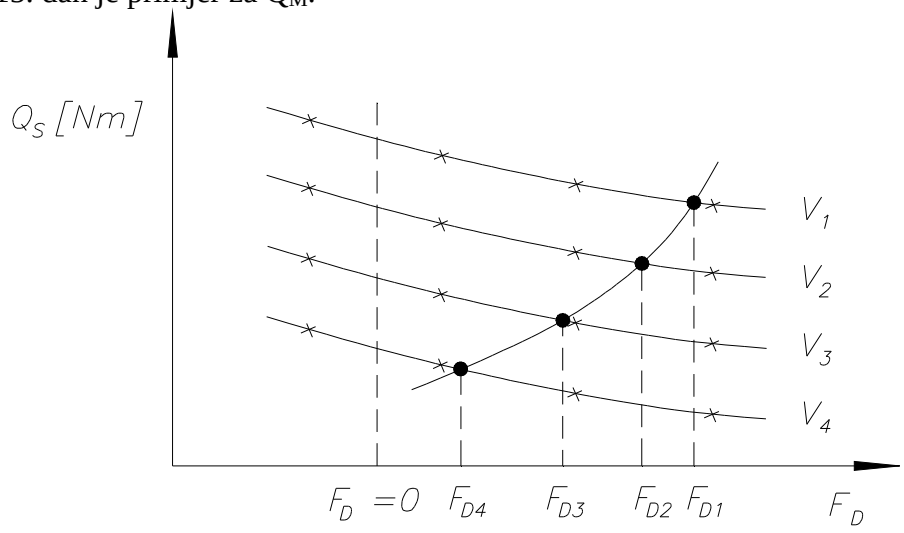
Britanska metoda prikazana je na Slici 14. Prilikom provođenja pokusa po britanskoj metodi mjere se iste fizikalne veličine kao i kod kontinentalne metode. Razlika je što se kod britanske metode za jednu konstantnu brzinu (V_M=const!) izmjeri 4 do 5 točaka pri različitom opterećenju. Područje mjerenja nalazi se u granicama određenim točkom vlastitog pogona modela, F_D=0, ili $Z<F_D$ (negativno opterećenje), odnosno točkom vlastitog pogona koje odgovara brzini broda $F_D=R_A$ (ispravak trenja) ili do $Z>F_D=R_A$.



Slika 14. Britanska metoda vlastitog pogona modela.

Sve veličine mjere se pri 4÷5 brzina.

Na Slici 15. dan je primjer za Q_M.



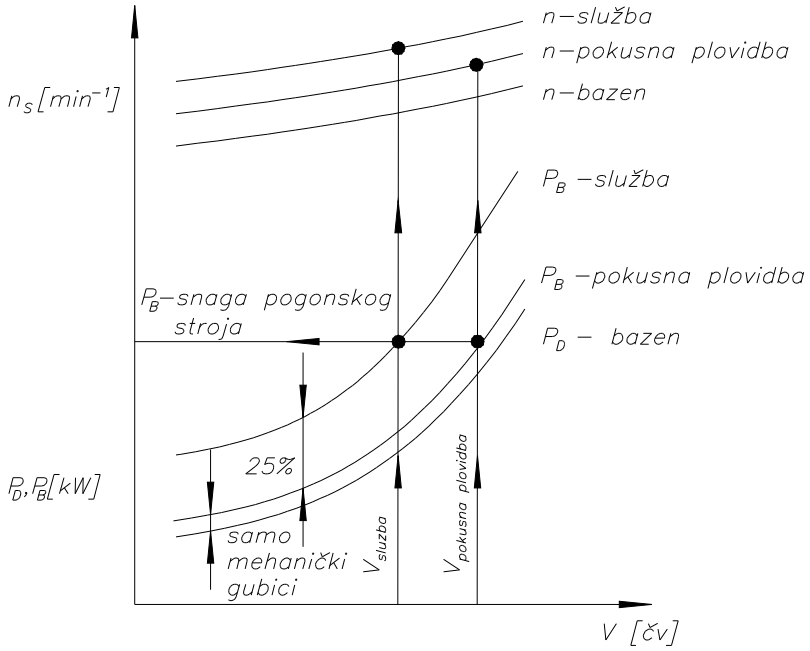
Slika 15. Određivanje vrijednosti za Q_M.

Za T_M i n_M rade se drugi dijagrami pa se iz njih može dobiti isti dijagram kao i s kontinentalnom metodom.

Obje metode u kombinaciji s rezultatima pokusa otpora i slobodne vožnje vijka daju sljedeće komponente propulzije:

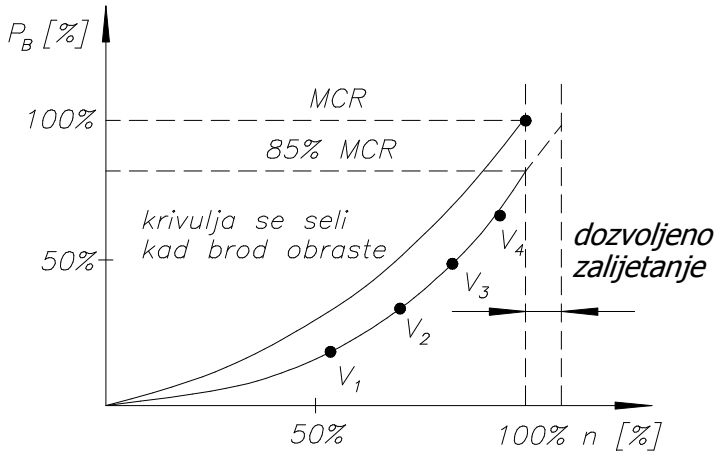
w, t, η_H, η_o, η_R, η_D

Na osnovu prethodnih analiza može se napraviti prognozni dijagram propulzije prikazan na Slici 16.



Slika 16. Prognozni dijagram propulzije

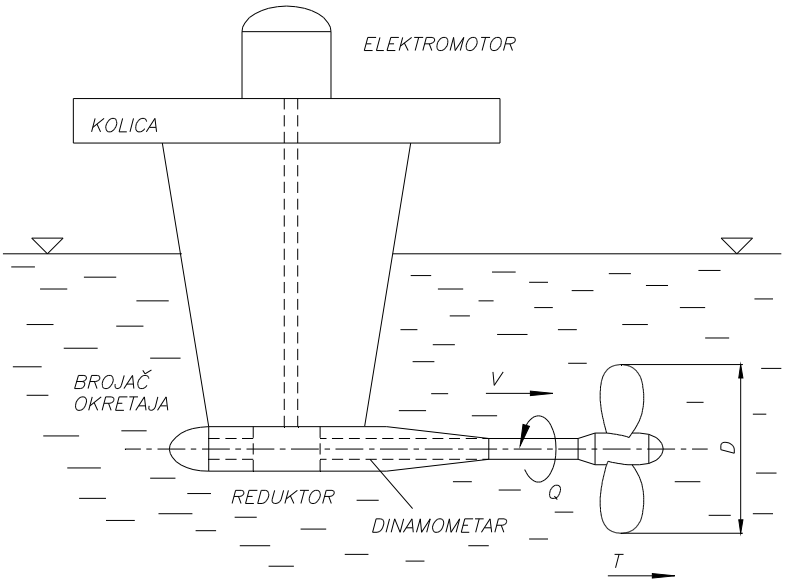
Postoje i drugi načini prikazivanja rezultata vlastitog pogona modela (Slika 17):



Slika 17. Prognozni dijagram apsorpcije vijka

4.3 Pokus slobodne vožnje vijka

Za određivanje hidrodinamičkih značajki vijka u slobodnoj vožnji potrebno je provesti pokus slobodne vožnje modela brodskog vijka u homogenom polju strujanja (neporemećenoj tekućini). Rezultati pokusa su K_Q, K_T i η_o dijagrami u ovisnosti o koeficijentu napredovanja vijka J koji određuje dinamičke karakteristike vijka. Dijagrami se koriste kao osnova pri projektiranju vijka za novi brod. Uvjeti rada vijka iza krme broda u odnosu na slobodnu vožnju u mnogome se razlikuju. Pokus slobodne vožnje provodi se u vrlo finom strujnom tijelu napravljenom za provođenje takvih pokusa, a dobiveni rezultati koriste se za računanje komponenata propulzije.



Slika 18. Strujno tijelo za pokus slobodne vožnje.

Hidrodinamičke značajke modela vijka i vijka u naravnoj veličini biti će iste ako je zadovoljena:

- geometrijska sličnost,
- kinematička sličnost,
- dinamička sličnost.

Geometrijska sličnost je zadovoljena ako je oblik modela vijka isti kao oblik stvarnog vijka. Problem predstavljaju ulazni i izlazni bridovi koji zbog čvrstoće modela moraju biti nešto veće debljine nego što to zahtjeva geometrijska sličnost.

Za **kinematičku sličnost** vrijedi isto što i za ispitivanje otpora modela, tj. brzine u odgovarajućim prostorno-vremenskim točkama moraju imati istu veličinu i smjer te moraju biti u stalnom odnosu (model-vijak u naravi). Zato i odnos aksijalne brzine napredovanja vijka V_A i obodne brzine vijka (u nekoj točki) mora biti isti za model i vijak u naravi.

Prema tome vrijedi odnos:

$$\frac{V_A}{n \cdot \pi \cdot D} = const \tag{64}$$

gdje je *n* broj okretaja vijka izražen u [s^{-1}].
Koeficijent napredovanja vijka J, za model i vijak u naravi, određen je odnosom:

$$J = \frac{V_A}{n \cdot D} \tag{65}$$

Kinematička sličnost je zadovoljena za bilo koju brzinu i broj okretaja koji zadovoljava navedeni odnos.

Za **dinamičku sličnost** se mora zadovoljiti jednakost Froudeovog i Reynoldsovog broja tj.:

$$F_{nM} = F_{nS} \tag{66}$$

$$\left(\frac{\pi \cdot n \cdot D}{\sqrt{g \cdot D}}\right)_M = \left(\frac{\pi \cdot n \cdot D}{\sqrt{g \cdot L}}\right)_S \tag{67}$$

što daje:

$$n_M = n_S \cdot \sqrt{\frac{D_S}{D_M}} = n_S \cdot \sqrt{\lambda} \tag{68}$$

Prema Froudeovom zakonu brzina je jednaka:

$$V_M = \frac{V_S}{\sqrt{\lambda}} \tag{69}$$

dalje:

$$\frac{V_{AM}}{n_M \cdot D_M} = \frac{V_{AS}}{n_S \cdot D_S} \tag{70}$$

$$J_M = J_S$$

Reynoldsov broj za vijak može se definirati na sljedeći način.

$$Rn = \frac{l_{0.7R} \cdot V_R}{\nu} \tag{71}$$

gdje je:

l_{07R} - duljina profila na 0.7R (*chord length*),
V_R - rezultirajuća brzina dostrujavanja vode profilu krila vijka.

$$V_R^{\ 2} = V_A^{\ 2} + \left(0.7 \cdot n \cdot \pi \cdot D\right)^2 \tag{72}$$

ako se ovu jednadžbu podijeli s $(nD)^2$ dobivamo:

$$\frac{V_R^{\ 2}}{n^2 \cdot D^2} = \frac{V_A^{\ 2}}{n^2 D^2} + \left(0.7 \cdot \pi\right)^2 = c^2 \tag{73}$$

$$V_R^{\ 2} = c^2 \cdot n^2 \cdot D^2 \rightarrow V_R = c \cdot n \cdot D \tag{74}$$

Iz gornjeg izraza dobije se Reynoldsov broj:

$$Rn = \frac{l_{0.7R} \cdot V_R}{\nu} = c \cdot l_{0.7R} \cdot \frac{n \cdot D}{\nu} \tag{75}$$

Ako je $J_S = J_M$ i $\nu_S = \nu_M$ slijedi:

$$\left(l_{0.7R} \cdot n \cdot D\right)_M = \left(l_{0.7R} \cdot n \cdot D\right)_S \tag{76}$$

i

$$n_M = \frac{\left(l_{0.7R}\right)_S}{\left(l_{0.7R}\right)_M} \cdot \frac{D_S}{D_M} \cdot n_S \tag{77}$$

$$n_M = n_S \cdot \lambda^2 \tag{78}$$

Kao i kod mjerenja otpora modela broda zadovoljen je samo Froudeov zakon, dok iznos Reynoldsovog broja treba držati iznad kritične vrijednost $>10^5$ pa se na taj način smatra da mjerilo nema utjecaja. Ako je Reynoldsov broj manji primjenjuje se korekcija za utjecaj mjerila.

Za vrijeme pokusa slobodne vožnje vijka mjere se ove veličine:

T_M	- poriv
Q_M	- moment
n_M	- okretaji
$(V_A)_M$	- brzina napredovanja

Brzina napredovanja je u slučaju pokusa slobodne vožnje vijka jednaka brzini kolica. Na osnovu ovih vrijednosti mogu se definirati sljedeći bezdimenzionalni hidrodinamički koeficjenti i fizikalne veličine:

$$K_T = \frac{T}{\rho \cdot (n \cdot D)^2 \cdot D^2} = \frac{T}{\rho \cdot n^2 \cdot D^4} \quad \text{- Koeficijent poriva} \tag{79}$$

$$K_Q = \frac{Q}{\rho \cdot (n \cdot D)^2 \cdot D^3} = \frac{Q}{\rho \cdot n^2 \cdot D^5} \quad \text{- Koeficijent momenta} \tag{80}$$

Ovi se koeficijeni obično prikazuju kao funkcije koeficijenta napredovanja J:

$$J = \frac{V_A}{n \cdot D} \tag{81}$$

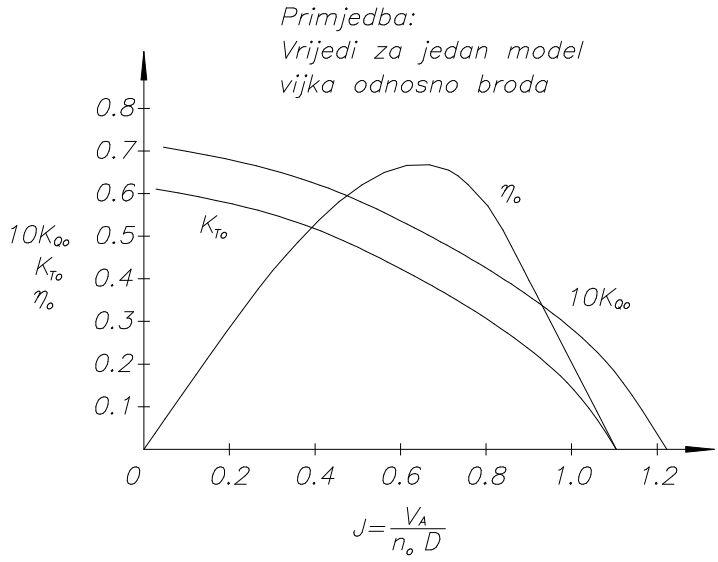
To je prikazano dijagramom slobodne vožnje vijka na Slika 19. U ovom se dijagramu obično doda i koeficijent korisnosti vijka u slobodnoj vožnji η_0 (*open water eficiency*) definiran sljedećim izrazom:

$$\eta_0 = \frac{P_T}{P_D} = \frac{T \cdot V_A}{2\pi \cdot n \cdot Q} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{V_A}{n \cdot D} \cdot \frac{\dfrac{T}{\rho \cdot n^2 \cdot D^4}}{\dfrac{Q}{\rho \cdot n^2 \cdot D^5}} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{V_A}{n \cdot D} \cdot \frac{K_T}{K_Q} \tag{82}$$

$$\eta_0 = \frac{J}{2\pi} \cdot \frac{K_T}{K_Q} \tag{83}$$

U dijagram slobodne vožnje vijka mogu se unijeti i neke druge veličine. Sve fizikalne veličine, koje se mjere u pokusu slobodne vožnje vijka nose indeks "O" (*open water test*). Dobro ih je upotrijebiti kada se koriste iste veličine iz pokusa vlastitog pogona.

Dijagram slobodne vožnje prikazan je na Slici 19.



Slika 19. Hidrodinamičke značajke modela vijka u slobodnoj vožnji
(Dijagram slobodne vožnje vijka)

4.4 Pokus sustrujanja

Sustrujanje je razlika između brzine modela, odnosno broda V i brzine dostrujavanja vode vijku V_A. Djeljenjem ove razlike s brzinom broda dobiva se koeficijent sustrujanja prema Tayloru:

$$w = \frac{V - V_A}{V} = 1 - \frac{V_A}{V} \tag{84}$$

Efektivni koeficijent sustrujanja određuje se pomoću vijka koji djeluje kao mjerni instrument i integrator. Efektivni koeficijent je definiran kao razlika između brzine u pokusu vlastitog pogona V i brzine u pokusu slobodne vožnje vijka V_A (jednoliko polje brzina), a koji pri istom broju okretaja razvija poriv T i apsorbira moment Q. Podjelom ove razlike s brzinom modela dobivamo dva koeficijenta sustrujanja. Jedan koeficijent se dobiva iz jednakosti koeficijenta poriva, a drugi iz jednakosti koeficijenta momenta. U oba se slučaja koeficijent sustrujanja određuje izrazom (84).

Ako se broj okretaja drži konstantnim, koeficijent napredovanja glasi:

$$J = \frac{V}{n \cdot D} \tag{85}$$

ili

$$J_o = \frac{V_A}{n \cdot D} \tag{86}$$

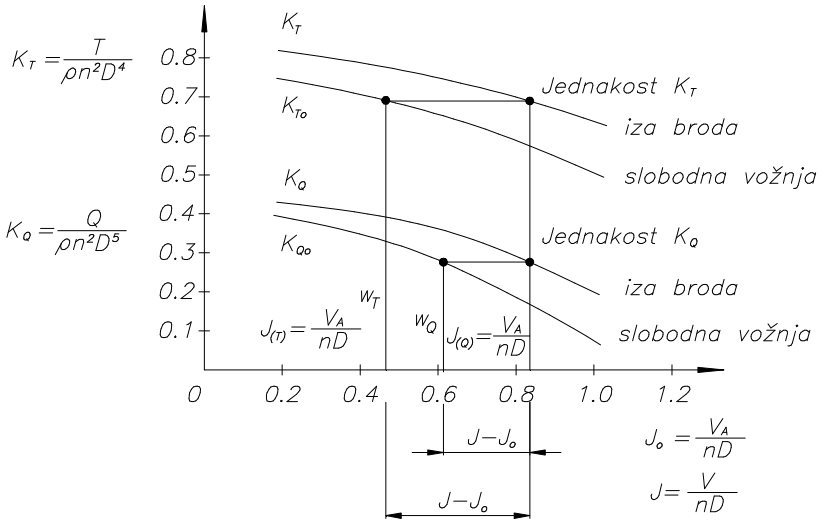
Ako se J i J_o uvrsti u jednadžbu (84), dobiva se:

$$w = \frac{J - J_o}{J} \tag{87}$$

Koeficijent sustrujanja može se odrediti pomoću dijagrama slobodne vožnje vijka u kojem su uz K_{Qo} i K_{To} iz slobodne vožnje vijka unesene krivulje K_Q i K_T dobivene u uvjetima rada iza broda prikazane Slikom 20. Ovdje je potrebno napomenuti da se vrijednosti w_T i w_Q međusobno razlikuju. Pogotovo je ta razlika velika kod jednovijčanih brodova, gdje je:

$$w_T > w_Q$$

Korištenjem različitih vijaka mijenjaju se rezultati sustrujanja. Različiti uvjeti pri usporedbi homogenog i nehomogenog polja vjerojatan su razlog ovih razlika. Možda bi se razlike izgubile ili smanjile kad bi se pokus slobodne vožnje zamijenio s pokusom iza standardne forme modela broda. Definiranjem nekih vrijednosti sustrujanja za takvu formu dobila bi se sigurnija osnova za usporedbu.



Slika 20. Određivanje efektivnog koeficijenta sustrujanja.

Postoje različiti načini za određivanje nominalnog sustrujanja, i to: mjerenje pomoću Prandtl-Pitotove cijevi s pet rupica, mjerenje pomoću krilaca, mjerenje pomoću prstenova i mjerenje pomoću lasera (Laser Doppler Velocitymeter).

Brzina sustrujanja prostorni je vektor koji ima sljedeće komponente:

- aksijalnu $V_A = V_x$
- radijalnu V_r
- tangencijalnu V_φ ili V_t

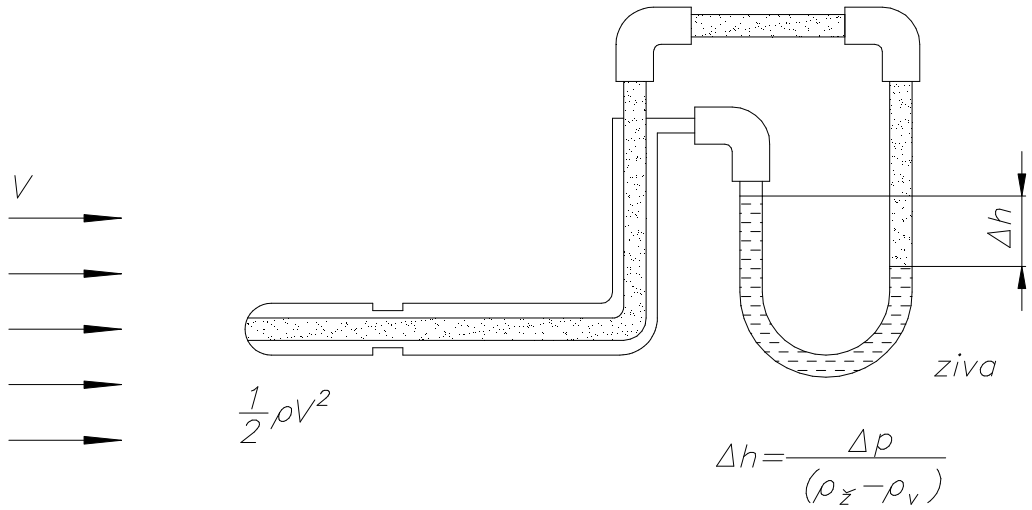
Mjerenje prostornog vektora brzine sustrujanja moguće je korištenjem Prandtl-Pitotovom cijevi s pet rupica prikazanom Slikom 21.

Pri tome se mjere veličine V_A i w_N, gdje je V_A aksijalna brzina dostrujavanja tekućine vijku u nekoj točki diska vijka (bez vijka), a w_N odgovarajući koeficijent nominalnog sustrujanja.

$$V_A = k_1 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta h} \tag{88}$$

gdje je:

k_1 - koeficijent Prandtl-Pitotove cijevi,
Δh - stupac vode određen prema sljedećoj slici:

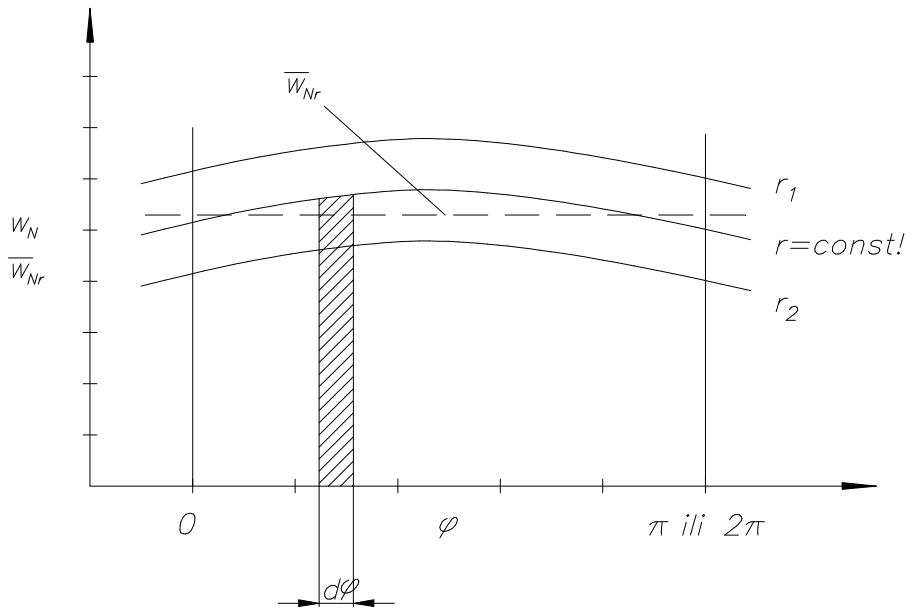


Slika 21. Prandtl-Pitotova cijev - mjerenje vode ili žive.

Odgovarajući koeficijent nominalnog sustrujanja:

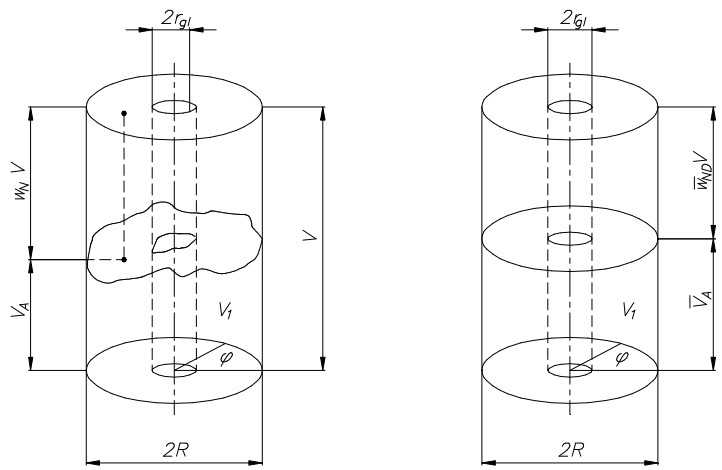
$$w_N = \frac{V - V_A}{V} \tag{89}$$

Za projektanta vijka važan je srednji raspored sustrujanja na svakom radijusu prikazan Slikom 22.



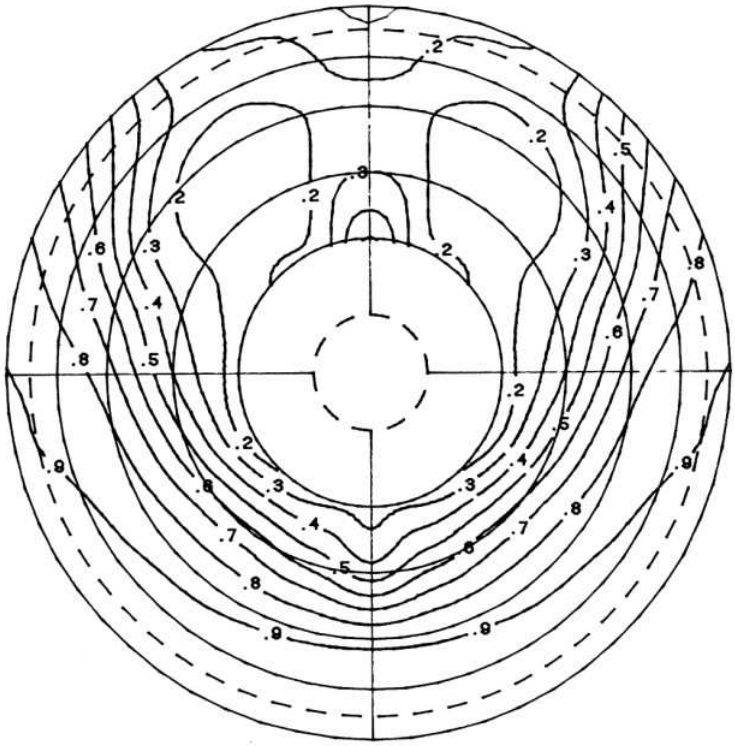
Slika 22. Srednji raspored sustrujanja po obodu vijka.

Površina ispod krivulje rasporeda sustrujanja po obodu vijka na određenom radijusu integrira se numerički, pošto funkcionalne ovisnosti $w_N = f(\varphi)$ nisu poznate.
Srednje nominalno sustrujanje preko diska vijka (pomoću volumena tekućine koja ne protekne kroz disk vijka) $\overline{w}_{ND}$ određuje se na sljedeći način prikazanim Slikom 23.



Slika 23. Određivanje srednjeg nominalnog sustrujanja.

Mjerenje sustrujanja se provodi kako bi se iz dobivenog polja sustrujanja dobilo osnove po kojima će se napraviti projekt vijka za neku formu.



Slika 24. Polje sustrujanja (Iso-wake krivulje)

4.5 Pokus strujnica bojom i nitima

Pokus se provodi kako bi se kod neke karakteristične brzine, obično u službi, predočilo kakvo će biti strujanje na pramčanom ili krmenom dijelu trupa ili na paralelnom srednjaku.
Pokus ima svoju primjenu iako se strujanje oko trupa može simulirati i u pojedinim programskim CFD paketima. U njima se uglavnom opstrujavanje oko brodskog trupa može promatrati kvalitativno, pa se za sada koriste i pokusi.

Kod pokusa nitima snima se podvodni dio trupa na kojem se vidi kakvo je optjecanje vode oko trupa modela broda. Nekad se to radi i za privjeske.

4.6 Točnost mjerenja propulzije na brodskim modelima

Greške koje se javljaju u eksperimentima s modelima mogu se podijeliti na:

- greške koje nastaju uslijed točnosti samog mjernog lanca
- greške u procedurama mjerenja
- greške u metodama analize rezultata i prognoziranja

ITTC [18] daje preporuke kako provoditi pokuse u bazenu, ali i kako proračunati greške mjerenja.
Svaka od mjerenih veličina ima svoju točnost, koja se može mjeriti ili procijeniti.

Procijene pogreške mjerenja pri ispitivanju modela uzete iz [19] su:

- otpor	± 1 %
- poriv	± 1 %
- ispravak trenja	± 2 %
-moment	± 1 %
- okretaji	± 0.1 %
- brzina	± 0.1 %

U mjerenju na modelima koriste se senzori jednake klase točnosti i za modele iz [19] kao i modela koji se obrađuju u ovom radu.

Greške uslijed ograničenja točnosti mjernog lanca deklarirane su za svaki uređaj od strane proizvođača. Kad se radi o vlastitom razvijenom mjernom uređaju umjeravanje se provede s pojedinim dijelovima i mjernim lancem u cjelini.

Greške u procedurama mjerenja mogu se procijeniti na manje od ± 0.5 % za svaku metodu.

5. MJERENJE PROPULZIJE SA BRODOVIMA NA POKUSNOJ PLOVIDBI

Mjerenje na pokusnoj plovidbi provodi se u skladu sa propisanim procedurama u [20, 21, 22, 23], koje uglavnom govore o uvjetima pod kojima i na koji način se provode pripreme i mjerenja. U [24] su također propisane procedure obavljanja analize izmjerenih rezultata kao i sadržaj konačnih tehničkih izvještaja.

5.1 Priprema mjerenja propulzije

Priprema za pokusnu plovidbu počinje puno prije samog terenskog ispitivanje, a sastoji se od pripreme mjernih instrumenata, broda, a ovisno o složenosti pokusne plovidbe i dodatnog educiranja brodovlasnika i brodograditelja.
Da bi se uspješno provelo mjerenje propulzije na pokusnoj plovidbi treba provesti pet aktivnosti od kojih su prve četiri pripremne, a tek je peta samo mjerenje i analiza rezultata mjerenja. Neke od aktivnosti se vremenski isprepliću s drugima, pa ih je bitno odraditi jer je dodatni izlazak na pokusnu plovidbu najskuplji.

5.1.1 Inspekcija broda

Inspekciju broda obavlja Klasifikacijsko društvo i ono daje odobrenje za obavljanje pokusne plovidbe. Da bi Klasifikacijsko društvo izdalo odobrenje potrebno je da brod zadovolji uvjete sigurnosti vezano za pogon, navigaciju, protupožarnu opremu, raspored ljudi po brodu, broj posade.
Dio inspekcije provodi se dok je brod još u gradnji, na opremanju, te u doku.

5.1.2 Pregled trupa i propulzora

Pregled trupa i propulzora obavlja Klasifikacijsko društvo, te predstavnici brodogradilišta i brodovlasnik. Ovaj se pregled kontinuirano obavlja od početka gradnje samog broda, prilikom kontrole zavara, kod nabave brodskog vijka, njegovog preuzimanja i ugradnje na brod. Što se mjerenja tiče obično se koriste saznanja o karakteristikama brodskog vijka i broda dobivene od brodogradilišta ili od brodovlasnika.

5.1.3 Ugradnja instrumenata i kalibracija

Priprema ispitivanja na brodu obuhvaća ovisno o opsegu i tipu ispitivanja odabir instrumenata za mjerenje, odabir mjesta za ugradnju te kalibriranje uređaja prije mjerenja. Kalibracija (uzimanje prve nul točke) se radi prije početka mjerne milje, te nakon završetka mjerne milje (uzimanje druge nul točke).

5.1.4 Uvjeti provođenja pokusne plovidbe

Uvjeti provođenja pokusne plovidbe pretpostavljaju da je brod funkcionalno spreman za vožnju, što obuhvaća spremnost propulzijskog kompleksa, navigacijskih sustava i osoblja da upravlja brodom.
Prema veličini i tipu broda potrebno je odabrati odgovarajući akvatorij odnosno poligon ispitivanja s obzirom na dubinu mora, te potrebu zalijetanja brodom prije mjerenja vožnjom ravnim kursom. Stanje mora obično se procjenjuje za vrijeme pojedinih mjerenja te upisuje u formulare mjerenja. Što se relativne ili apsolutne brzine vjetra tiče, ona se mjeri anemometrom, a u slučaju da prelazi određene granice, ovisno o veličini i tipu broda, radi se korekcija. Ukoliko se ispitivanje provede na plitkoj vodi može se primijeniti korekcija za utjecaj plitke vode.

5.2 Provođenje pokusa mjerne milje za vrijeme pokusne plovidbe

Brodski pogon treba biti funkcionalno spreman za vožnju maksimalnom brzinom tako da glavni pogonski stroj može razviti maksimalnu snagu.

Pokus mjerne milje provodi se na prethodno određenom poligonu mjerenja, a ovisno o načinu mjerenja brzine.

Na mjernoj milji se mjere:

- brzina broda
- okretaji stroja
- torzijska deformacija osovine
- potrošnja goriva

Osim toga očitavaju se informacije o kursu kojim se plovi za vrijeme mjerne milje, mjeri se brzina i smjer relativnog ili apsolutnog vjetra te procjenjuje stanje mora i valova.

Rezultati mjerenja koji se unose u izvještaj moraju sadržavati:

- uvodne obavijesti,
- instrumentarij i način mjerenja,
- rezultate mjerenja,
- nomenklaturu,
- tablicu koja sadrži:
    - a - opće podatke
    - b - podatke o mjernoj milji
    - c - podatke o brodu
    - d - podatke o stanju broda na pokusnoj plovidbi
    - e - podatke o brodskom vijku
    - f - podatke za snagu motora
    - g - te sve izmjerene vrijednosti za vrijeme ispitivanja
- dijagram snage i okretaja na bazi brzine broda
- dijagram kočene snage motora na bazi okretaja

Brzinu se može mjeriti na više načina, a za potrebe ovog rada navest će se tri:

- mjerenje vremena potrebnog da se prema oznakama na kopnu prijeđe putanja od 1 NM
- mjerenje pozicije i brzine pomoću sustava za pozicioniranje. Lokalno se postavi mjerni poligon sa minimalno tri antene na poznatim pozicijama. Odredi se kursna linija po kojoj brod treba ploviti za vrijeme mjerne milje i mjerenja. Antenom na brodu spojenom na mjerni uređaj mjeri se pozicija i brzina broda
- mjerenje pozicije i brzine s pomoću diferencijalnog globalnog sustava za pozicioniranje (DGPS)

Okretaje stroja mjeri se optičkom sondom s crno bijelim poljima nalijepljenim na osovinu.

Torzijska deformacija mjeri se pomoću tenzometarskih traka zalijepljenih u tzv. Wheatstoneov most. Iz izmjerene deformacije i okretaja računa se snaga po propisanoj proceduri.

Mjerenje se provodi prema procedurama koja su u skladu s normom ISO 19019, preporukama ITTC 23 te iskustvu Brodarskog instituta.
Mjerenje se vrši u stacionarnoj plovidbi pravocrtnim kursom uz najčešće tri režima brzine vrtnje na zamašnjaku pogonskog stroja. Brod mora, obzirom na svoju masu istisnine imati dovoljnu duljinu zaleta, što je za brod od cca 50000 tona mase istisnine oko 5 nautičkih milja. Za niže brzine zalet treba biti veći za oko 20%. Brod se tek nakon odgovarajućeg zaleta nalazi u stanju stabilizirane plovidbe te je moguće započeti s mjerenjema. U prolasku mjernom miljom mjere se brzina broda, okretaji na mjernoj osovini, torzijska deformacija na propelerskoj osovini i potrošnja goriva.

Radi precizne izmjere brzine, snage i okretaja stroja brod mora imati zalet i postignutu (najvišu) stacionarnu brzinu kod postavljenih okretaja stroja prije same mjerne milje. U tom će slučaju izmjerene vrijednosti snage biti najniže za narinute okretaje, uz istovremeno najveću izmjerenu brzinu. Mjerenje se provodi u kursu i protukursu kako bi se eliminirao utjecaj morske struje.
Uobičajeno je da se u okviru mjerne milje mjere minimalno tri režima plovidbe kako bi se mogle definirati slijedeće krivulje:

- snaga u odnosu na brzinu
- okretaji u odnosu na brzinu
- snaga stroja u odnosu na okretaje stroja

Mjerna nesigurnost sustava za mjerenje torzijskog momenta se sastoji od slijedećih osnovnih komponenata:

- mjernog lanca
- baždarenja
- ugradnje na brod
- preračunavanja momenta torzije

Mjerne veličine se na pokusnim plovidbama mjere s procijenjenom točnošću:

Brzina

Sva tri navedena načina mjerenja brzine prema [21] osiguravaju dovoljnu točnost. Moguće su oscilacije pri mjerenju brzine ovisno o primjenjenom sustavu i metodi mjerenja ali unutar granica od ± 0.02 čvora.

Prema [25] greška na brzinama od 15 čvorova može iznositi ± 0.1333%

Današnja praksa pokazuje da je najčešća primjena trećeg načina mjerenja brzine pomoću diferencijalnog globalnog sustava za pozicioniranje (DGPS).

Okretaji stroja

Brzina vrtnje stroja mjeri se s točnošću od ± 0.1 %

Snaga na osovini

Snaga se na osovini ako je poznat ili izmjeren modul smika koji ulazi u proračun snage mjeri s ± 1%. Ukoliko se prema vrsti materijala procijeni modul smika onda se prema [22] snaga računa s točnošću od ± 2%.

6. METODA ODREĐIVANJA KORELACIJSKIH LINIJA

6.1 Općenito o uzorcima model-brod

Pretraživanjem arhive Brodarskog instituta nastojalo se izdvojiti što veći broj uzoraka za analizu korelacije. Kao predmet istraživanja i analize odabrani su modeli brodova za prijevoz tekućih tereta te brodovi za prijevoz rasutih tereta. Pri odabiru brodskih modela i novoizgrađenih brodova s pripadajućim mjerenjima krenulo se od novijih brodova/modela prema starijima. Za uzorak modela brodova koji se u radu obrađuje uzeti su modeli ispitivani u Brodarskom institutu u razdoblju od 1983 – 2008.g. i brodovi građeni od 1985.- 2010.g. Ovi tipovi brodova imaju vrlo visoki blok koeficijent ($C_B \geq 0.76$) kojim se nastoji osigurati što veću korisnu nosivost. Zbog ovako velikih blok koeficijenata postoje poteškoće kod ispitivanja jer pri malim ispitnim brzinama modela odnosno s niskim Froudeovim brojevima Fn_L u rasponu $0.1 \div 0.15$ dolazi do velikog rasipanja rezultata mjerenja na modelima zbog odvajanja strujanja. Za kvalitetno mjerenje potrebno je model napraviti što većim da se osigura dobro prenašanje rezultata s modela na brod.

U arhivi je nađeno 26 modela brodova za tekući teret (tankera) i prema njima izvedena 92 tankera ispitana na pokusnoj plovidbi. Od toga je 60 ispitivanja bilo na projektnom ili scantling gazu, a 35 na balastnom. Dva su broda ispitana na oba gaza, što ukupno iznosi 95 provedenih ispitivanja na mjernoj milji. Nađeno je i 6 modela brodova za rasuti teret (bulk carriera) s 18 izvedenih brodova. Mjerenja s brodovima za rasuti teret su se radi praktičnosti provodila u balastu, a zatim su se vrijednosti preračunavale na projektni gaz. Iz tog su razloga mjerenja na pokusnoj plovidbi, ali i uzorci u analizi, brodova za rasuti teret uzeti samo na balastnom gazu.
Ukupno je u analizi obuhvaćeno 32 modela. Ispitivanja brodskih modela provedena su na najmanje dva gaza: puni gaz i balast. Na nekim su modelima provedena i ispitivanja na scantling gazu.
Samo su dva modela i broda u naravi imala propeler s upravljivim usponom, dok su ostali imali propeler s fiksnim usponom. Dijagrami pokazuju da propeler sa upravljivim usponom utječe na proračunate korelacijske koeficijenate.

Izborom veličine modela mjerilom modela može se utjecati na kvalitetu prognoze. Iskustvo pokazuje da je potrebno odabrati mjerilo koje osigurava turbulentno strujanje u pokusima otpora i vlastitog pogona kako na modelu tako i na privjescima i propeleru. Da bi se to postiglo treba postići Rn od minimalno 1×10^5 kod modela broda. Također je potrebno na pramčanom dijelu modela na udaljenosti 5 % od pramca odnosno na 19 teoretskom rebru postaviti stimulator turbulencije. Brodarski institut koristi žice promjera 1.0 mm kod stimuliranja turbulencije.
Izbor veličine modela mora biti takav da propeler bude što veći kako bi prenošenje rezultata na brodske vrijednosti bilo što pouzdanije.
Na modelima od 5.6 do 10.6 m postizani su visoki Reynoldsovi brojevi ($Rn \geq 7 \cdot 10^6$) čime je osigurano dobro mjerenje i prenašanje rezultata na brodske vrijednosti.

Blok koeficijenti ispitanih modela nalaze se u slijedećim intervalima:

- Modeli tankera ispitani na punom gazu $0.734 \leq C_B \leq 0.872$
- Modeli tankera ispitani na balastu $0.675 \leq C_B \leq 0.814$
- Modeli bulk carriera ispitani na balastu $0.700 \leq C_B \leq 0.805$

Za usporedbu i korelaciju kod brodova za rasuti teret su mjerodavna samo ispitivanja na balastu jer su i u naravi ispitani samo na balastu.

Pokusi s modelima provedeni su u skladu sa dobrom praksom Brodarskog instituta i pri tom se vodilo računa o svakom detalju ispitivanja. Sa svakim od modela napravljena su ispitivanja otpora, vlastitog pogona, slobodne vožnje vijka, pokus sustrujanja i pokus strujnica bojom ili nitima. Zadnja tri pokusa nisu mjerodavna u daljoj analizi korelacije u ovom radu pa nisu posebno ni komentirani. Njihova važnost je u prvoj fazi modelskih ispitivanja kada je za projektiranu formu potrebno definirati koeficijente sustrujanja, upijanja i ostale veličine potrebne za projekt brodskog vijka.

U radu se u analizi koristi metoda ITTC 1957, a ne neka od novijih metoda. Ovo proizlazi iz načina ispitivanja u bazenu Brodarskog instituta jer tijekom ispitivanja nisu mjerene neke veličine po metodi 1978 odnosno 1984. Naime, nije moguće jednostavno odrediti koeficijent forme *k* koji je jedan od ulaznih veličina u ovim novijim metodama. U radu se pokazalo da je korištena metoda osigurala dobru, ponekad čak i bolju točnost nego li novije metode jer se bolje poklapa s izmjerenim vrijednostima na brodovima.

Zbog obima materijala (rezultata pokusa) i opsega posla koji je napravljen u radu neće biti prikazani rezultati svih ispitivanja s modelima brodova kao ni svi rezultati ispitivanja na mjernoj milji.
Rezultati svih ispitivanja modela i brodova u naravi nalaze se u tehničkim izvještajima pohranjenim u Arhivi Brodarskog instituta. Zbirni rezultati analize mogu se naći u izvještaju [26]. U radu će ukratko biti opisana analiza i obrada izmjerenih vrijednosti. Time će biti predstavljen postupak analize sa svim uparenim uzorcima (karakteristični uvjeti za model i brod su da istisnina modela preračunata na brodske vrijednosti sa mjerilom modela treba biti jednaka ili približna onoj dobivenoj kod ispitivanja na mjernoj milji).
Teško je u ispitivanju u naravi na brodu postići identične uvjete istisnine kao tijekom ispitivanja s modelom.

6.2 Razrada metode

Sistematizirani su podaci s propulzijskih ispitivanja na modelima i brodovima na pokusnoj plovidbi.

U nastavku je dan pregled izraza kojima se uspoređuju podaci o brzinama i okretajima stroja prognoziranih s modela ispitanih u bazenu i na pokusnim plovidbama. Osnovni podaci o modelima i brodovima koji su analizirani dani su u u Prilogu, Tablicama 3 i 4.

Usporedbom rezultata brzine model/brod i brojeva okretaja stroja model/brod iz tablica je vidljiva preciznost prognoza.

U Brodarskom institutu primjenjuje se metoda ITTC 1957, koja se bazira na pretpostavci jednakosti koeficijenta preostalog otpora za isti Froudeov broj modela i broda.

$C_{RS} = C_{RM}$

Korištenjem korelacijske linije ITTC 1957

$$C_F = \frac{0.075}{\left(\log R_n - 2\right)^2} \tag{90}$$

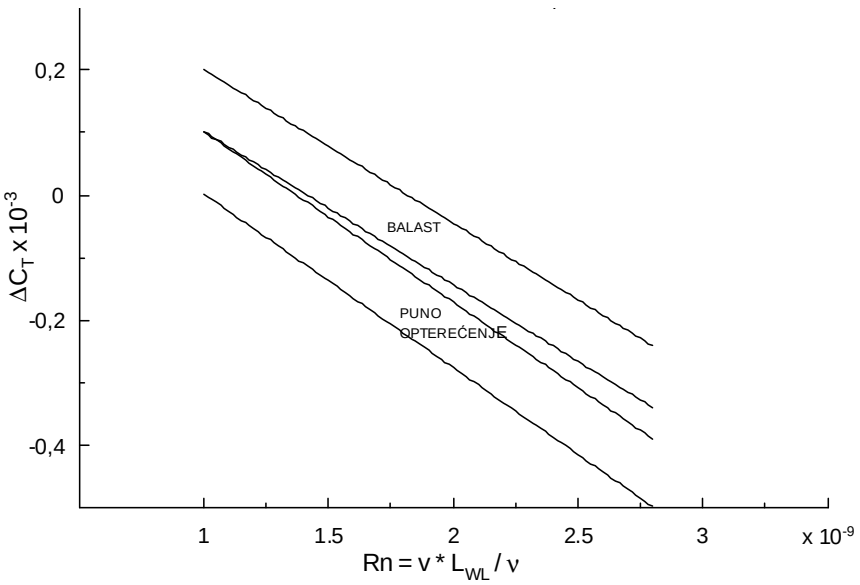
ukupni koeficijent otpora broda proračuna se kao suma

$$C_{TS} = C_{FS} + C_{RM} + \Delta C_T \tag{91}$$

s time da je

$$C_{RM} = C_{TM} - C_{FM} \tag{92}$$

Korelacijski dodatak ΔC_T se odredi prema krivulji iz [12] prikazanog na Slici 25.



Slika 25. Korelacijski koeficijent ΔC_T

Vrijednosti ΔC_T dane su u dijagramu na bazi Reynoldsova broja. Utjecaj sila viskoznog podrijetla u metodi Brodarskog instituta iskazuje se kroz koeficijent otpora trenja ekvivalentne ravne ploče i djelomice kroz Δ_{CT}.

Od proračunatog ukupnog otpora, snaga porivnog uređaja se može odrediti pomoću izraza (93):

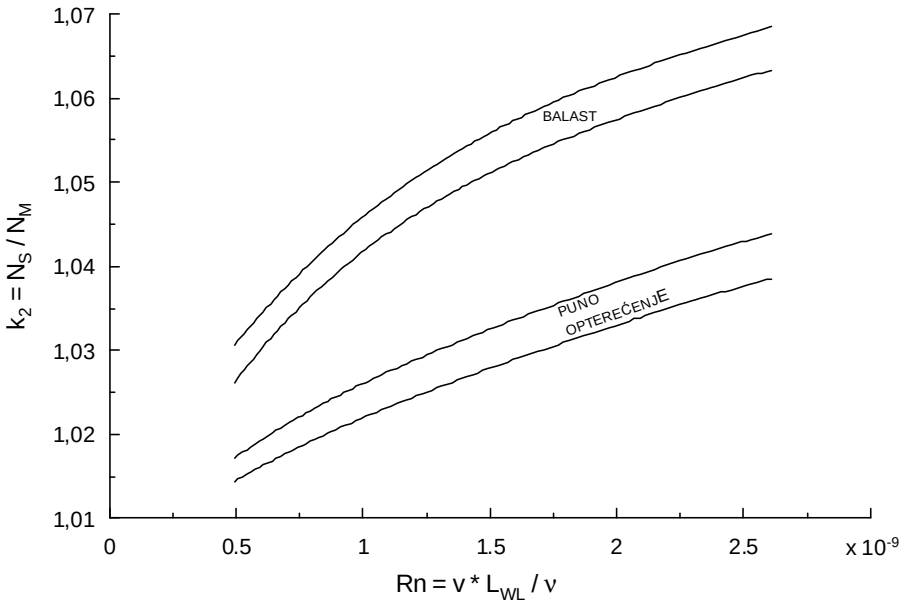
$$P_B = \frac{C_T \cdot V}{\eta_D} \cdot 0.5 \cdot \rho \cdot V^2 \cdot S \cdot \frac{CP}{\eta_m} \tag{93}$$

gdje je

CP = 1	- korelacijski dodatak ΔC_T ugrađuje se u otpor (C_T) prema Slici 25.
V	- brzina broda
ρ	- gustoća mora
S	- oplakana površina broda
η_D	- ukupni stupanj djelovanja propulzije određen pokusom na modelu,
η_m	- mehanički stupanj djelovanja brodskog propulzijskog uređaja.

Zbog odstupanja od zakona sličnosti u pokusu s modelom uvodi se dodatna korekcija okretaja vijka prema krivuljama u dijagramu na Slici 26. Nakon analize može se vidjeti koji je stvarno korelacijski koeficijent k_2 trebalo dodati na prognozirane okretaje kako bi se došlo do izmjerenih vrijednosti okretaja stroja na pokusnoj plovidbi.

$$N_S = k_2 \cdot N_{BAZ} \tag{94}$$



Slika 26. Korelacijski koeficijent k_2

Tablice osnovnih ulaznih podataka promatranih uzoraka ispitanih modela i brodova u naravi nalaze se u Prilogu.

Tankeri - modeli

U Tablicama 3 i 5 su prikazane vrijednosti za tankere.

Oznake modela dane su prema slijedećem ključu

TAP - kod modela označavaju

- slovo T označava tanker

- slovo A, B, ... –označava redoslijed modela

- slovo označava stanje krcanja na modelu
  P – puno opterećenje,
  B – balast,
  S - scantling

Bulk carrieri - modeli

U Tablici 4 i 6 su prikazane vrijednosti za bulk carriere s oznakom modela odnosno brodova prema slijedećem ključu:

BAB oznaka modela Bulk carrieri označava

- slovo B označava Bulk carrier

- slovo A, B, ... označava redoslijed modela

- slovo B –oznaka za balast

Brodovi

Oznake za brodove pod Gradnja su: - od 1 do 92 tankeri
- od 93 do 111 bulk carrieri

Brodovi tankeri počinju slovom T, a bulk carrieri sa B

Treći znak u brodovima, oznaka
P – puno opterećenje
B – balast
S – scantling

Rezultati proračuna nalaze se u izvještaju Brodarskog instituta. Za svaki odabrani uzorak modela proračunati su i nacrtani dijagrami kočene snage stroja na bazi brzine i okretaja stroja na bazi brzine. Za projektnim zahtjevom zadanu snagu stroja prognozirana je brzina na pokusnoj plovidbi i pripadajući okretaji stroja. U izvještajima s ispitivanja brodova u naravi za iste projektne snage stroja određene su brzine broda na pokusnoj plovidbi, a također i okretaji stroja. Istaknute su vrijednosti okretaja i brzine što odgovaraju stvarnoj radnoj točci vijka.

Prikazani parovi u Tablicama 3 i 4 u Prilogu mogu samo poslužiti za uspoređivanje rezultata postignute brzine i okretaja stroja za jednake snage stroja prognoze iz bazena i pokusne plovidbe u naravi. Kako bi se odredila točnost prognoze i njeno odstupanje prema mjerenju u naravi, treba uvesti dva koeficijenta: korelacijski koeficijent za snagu CP i korelacijski koeficijent za okretaje k_2.

Da se odrede korelacijski koeficijenti CP i k_2 potrebno je za brzine broda postignute na pokusnoj plovidbi interpolacijom odrediti vrijednosti snage i okretaja stroja. S tako dobivenim interpoliranim vrijednostima napravljen je prvo proračun predane snage vijku P_D, a zatim uvećan za mehaničke gubitke određen P_B.

Rezultati se nalaze u Prilogu Tablice 5 i 6.

U slijedećem koraku se zbog razlike u istisnini između ispitivanja s modelom u bazenu i ispitivanja u naravi, a prema normi ISO 15016 napravi korekcija za razliku u istisnini. Korekciju između istisnina iz pokusa sa modelom svedena na brodske vrijednosti i ona iz naravi sa pokusne plovidbe može se napraviti ako je razlika manja od 2 % . Norma ISO 15016 dozvoljava korekciju za istisninu upotrebom Admiralitetske konstante (95).

Korekcija za istisninu se napravi pomoću slijedećeg izraza:

$$A_C = \frac{\Delta^{\frac{2}{3}} \cdot V^3}{P_B} \tag{95}$$

gdje je:

P_B	- potrebna snaga stroja [kW],
Δ	- masa istisnine [t],
V	- brzina broda [čv].

Indeks BAZ je oznaka za bazen, PROG za prognozu i KOR za korigiranu vrijednost.
Korekcija prognozirane snage broda za istisninu koja odgovara istisnini na brodu može se izračunati prema donjem izrazu:

$$P_{BKOR} = \frac{(\Delta_{BAZ})^{\frac{2}{3}}}{\Delta_{PP}^{\frac{2}{3}}} \cdot P_{BPROG} \tag{96}$$

Iz ovako korigiranih snaga za istisninu na pokusnoj plovidbi proračuna se prema izrazu (97) korelacijski koeficijenti za snagu CP, a prema (98) korelacijski koeficijenti za okretaje k_2:

$$CP = \frac{P_{BPP}}{P_{BKOR}} \quad \text{i} \tag{97}$$

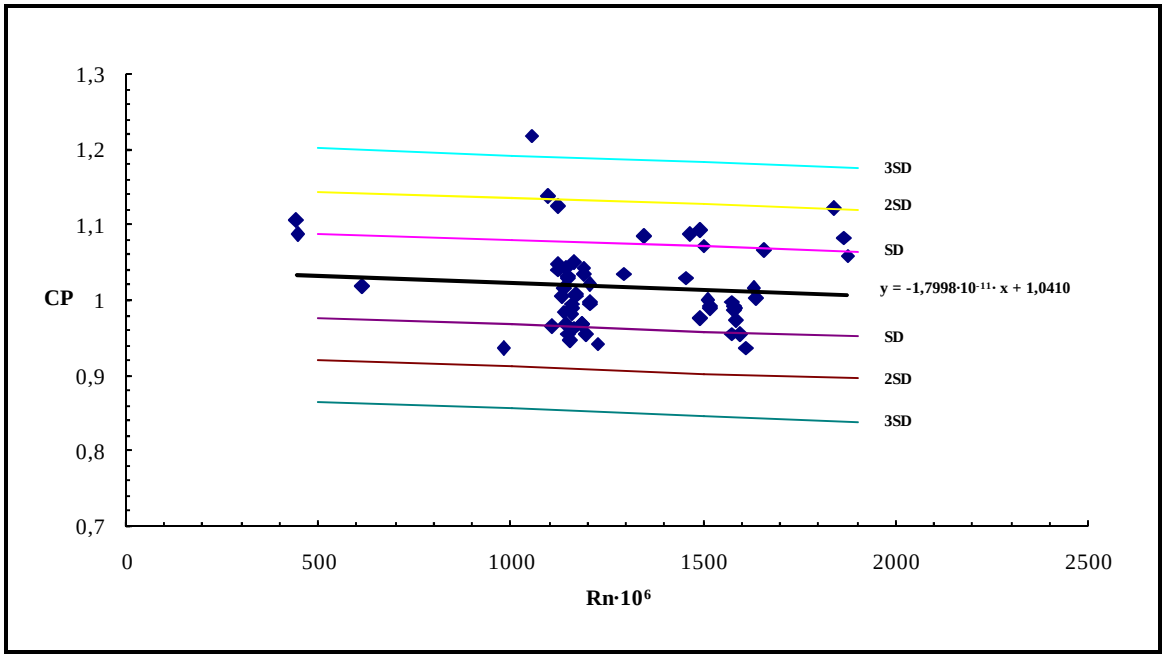
i

$$k_2 = \frac{N_{PP}}{N_{BAZ}} \tag{98}$$

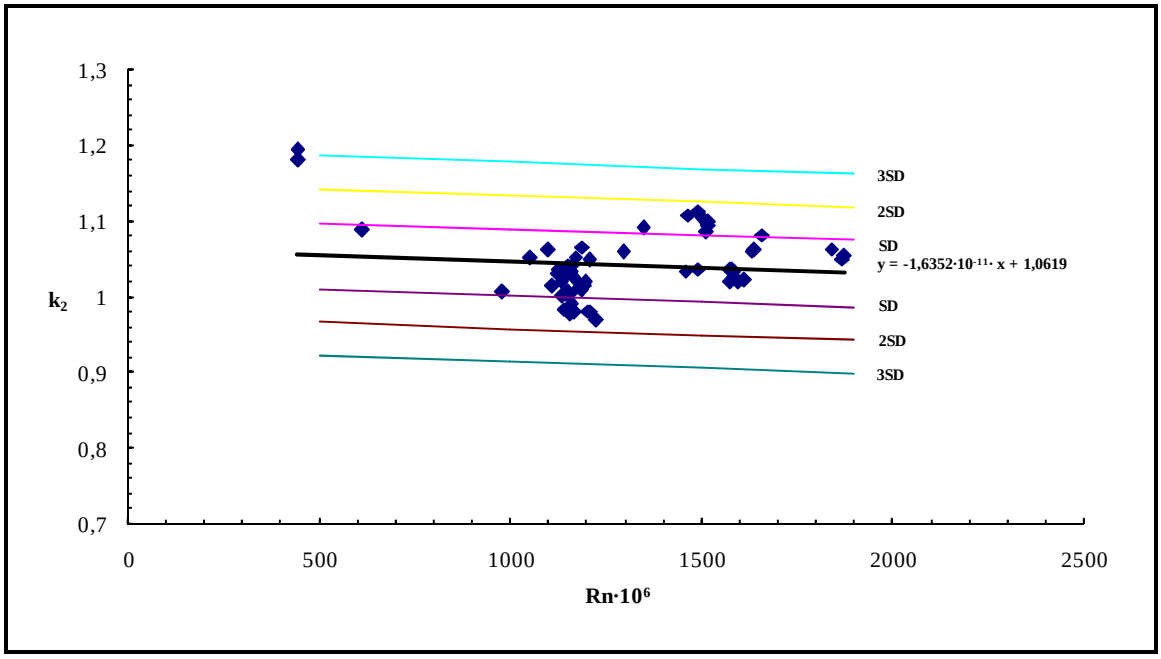
te njima pripadajući Reynoldsov broj.

U proračunu korelacijskih koeficijenata korišteni su prognozni dijagrami iz [26]. Za svaki ispitani model napravljeni su po metodi ITTC 1957.
Na Slikama 27 do 36 prikazani su navedeni dijagrami korelacijskih koeficijenata CP i k_2:
Vrijednosti CP i k_2 su prikazane u:

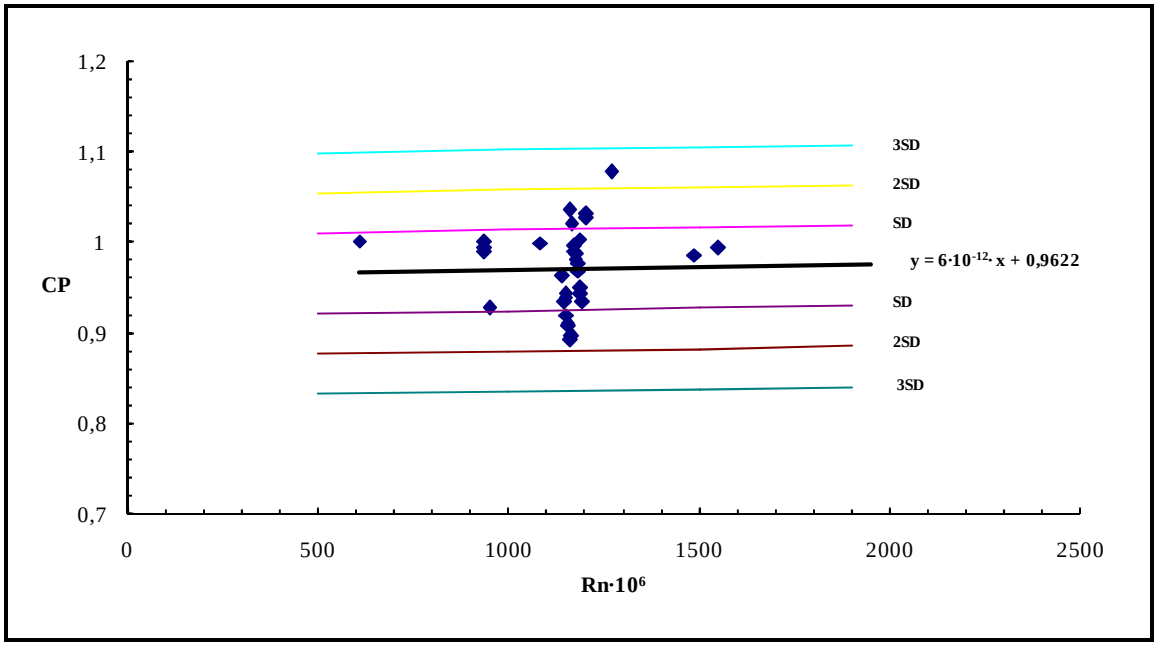
- Dijagram CP u ovisnosti o Rn za tankera na punom opterećenju
- Dijagram CP u ovisnosti o Rn za tankera na balastu
- Dijagram CP u ovisnosti o Rn za bulk carriere na balastu
- Dijagram CP u ovisnosti o Rn za tankere i bulk carriere na balastu
- Dijagram CP u ovisnosti o Rn za tankera na punom opterećenju i balastu zajedno
- Dijagram k_2 u ovisnosti o Rn za tankera na punom opterećenju
- Dijagram k_2 u ovisnosti o Rn za tankera na balastu
- Dijagram k_2 u ovisnosti o Rn za bulk carriere na balastu
- Dijagram k_2 u ovisnosti o Rn za tankere i bulk carriere na balastu
- Dijagram k_2 u ovisnosti o Rn za tankera na punom opterećenju i balastu zajedno



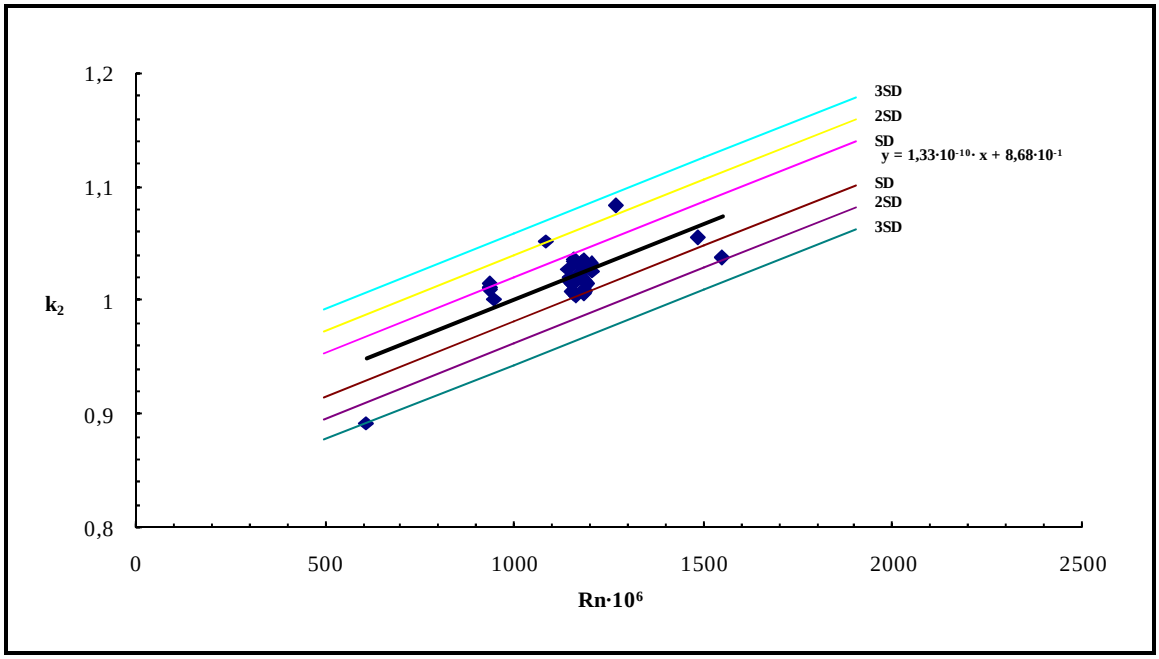
Slika 27. Korelacijski koeficijent CP (Tankeri – Puno opterećenje)



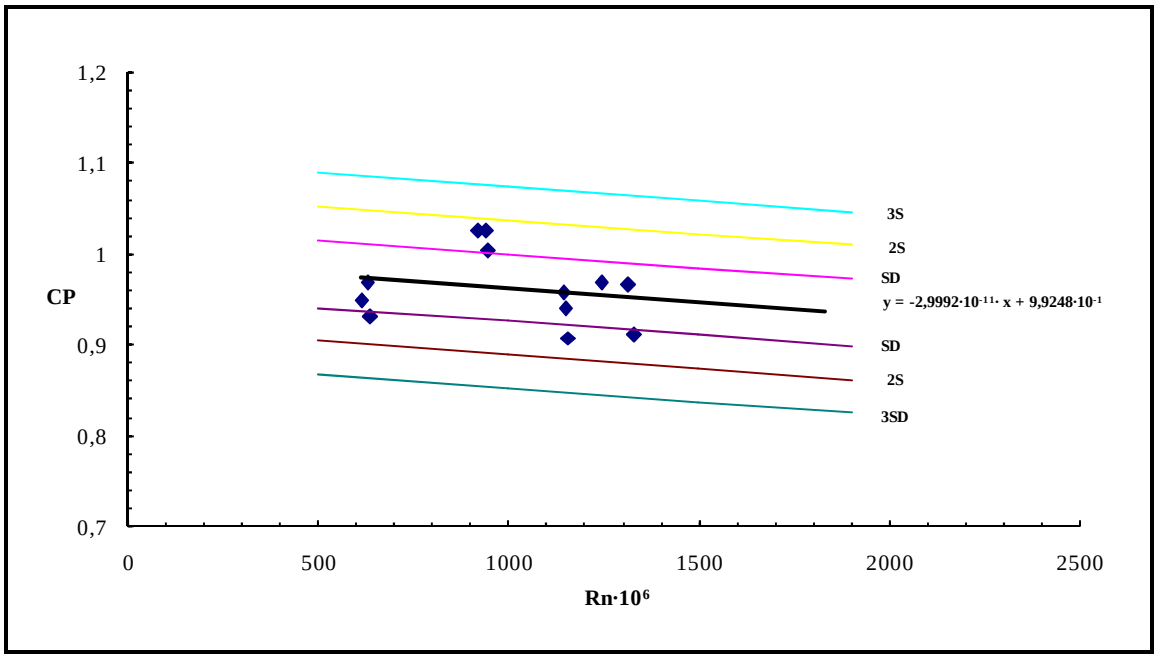
Slika 28. Korelacijski koeficijent k_2 (Tankeri – Puno opterećenje)



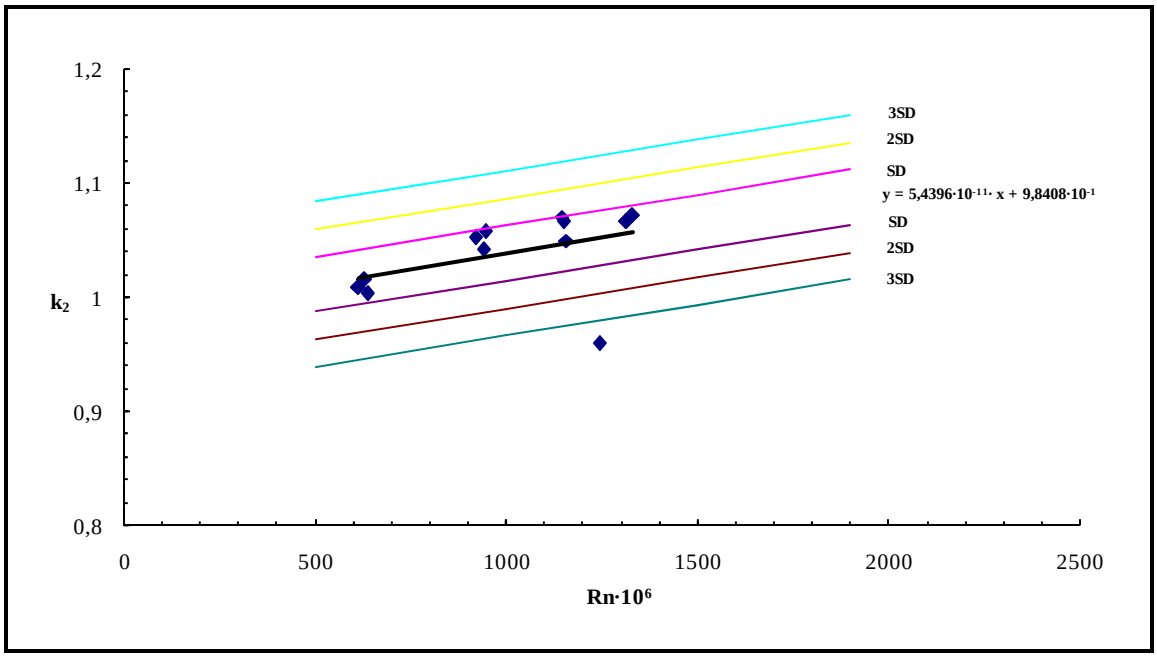
Slika 29. Korelacijski koeficijent CP (Tankeri – Balast)



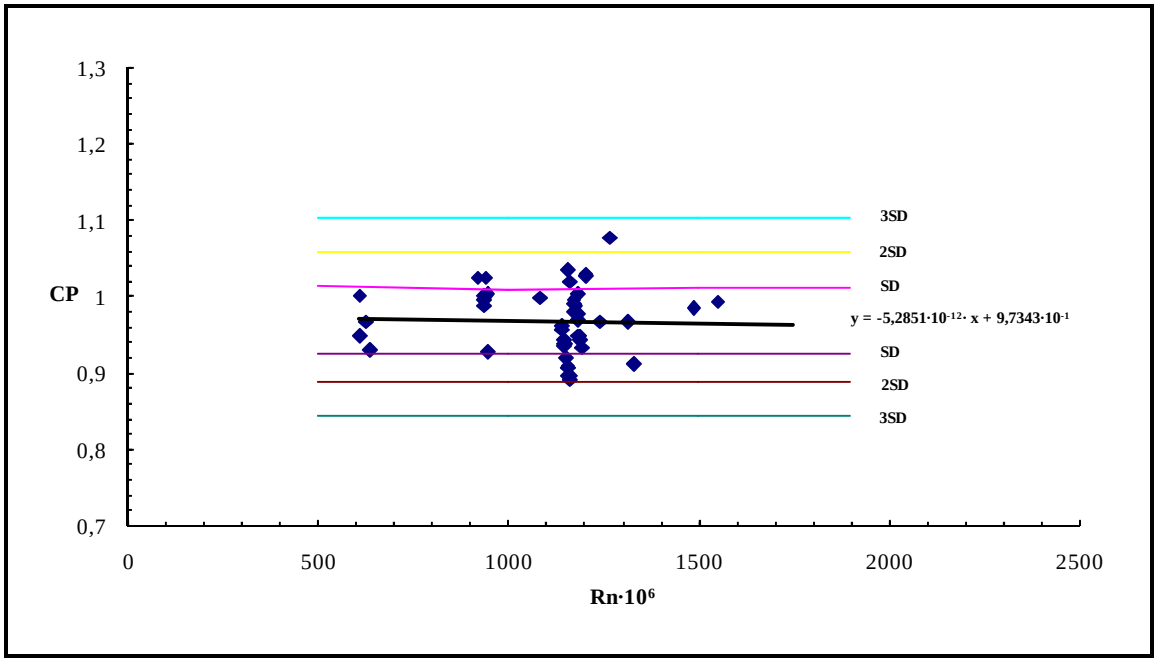
Slika 30. Korelacijski koeficijent k_2 (Tankeri – Balast)



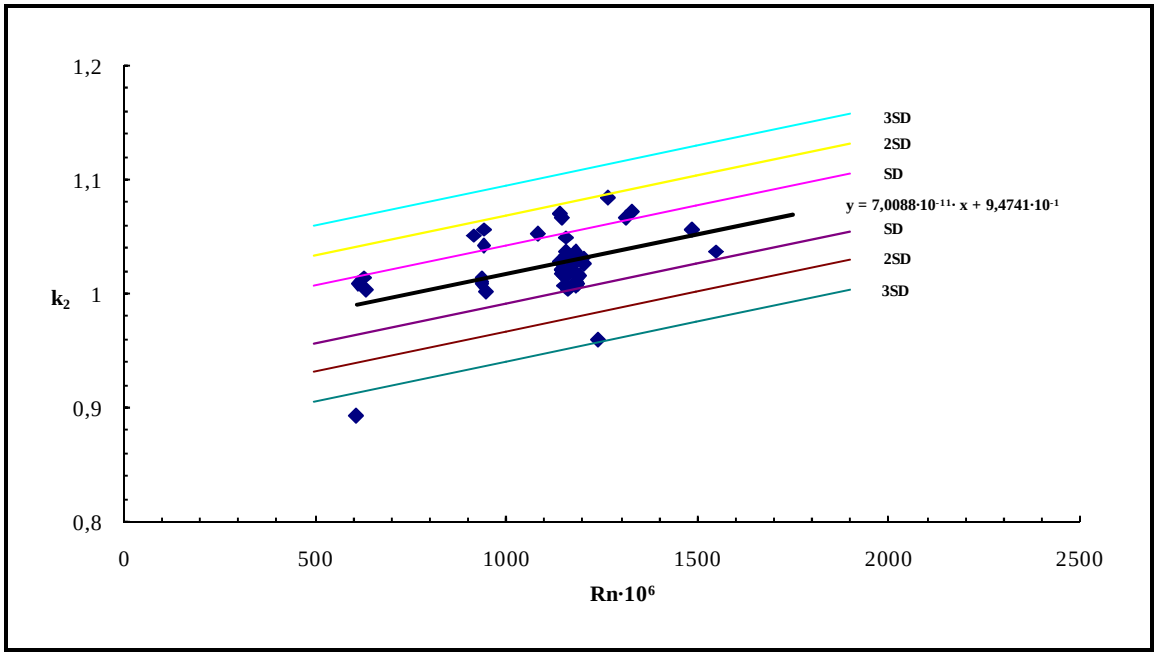
Slika 31. Korelacijski koeficijent CP (Bulk carrieri – Balast)



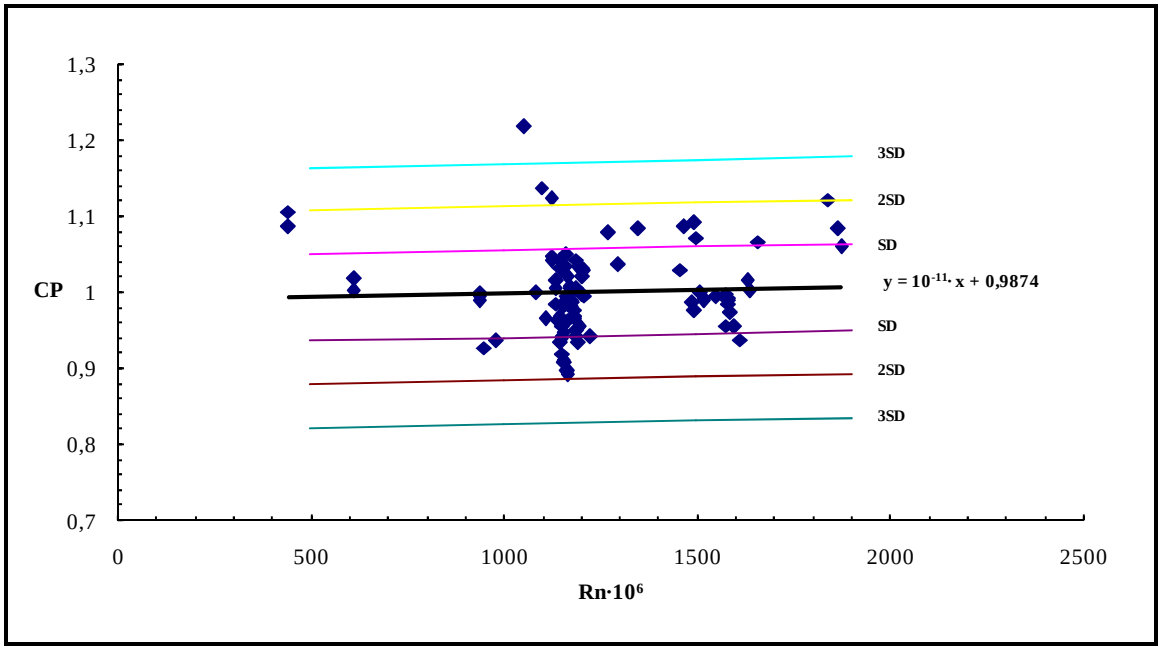
Slika 32. Korelacijski koeficijent k_2 (Bulk carrieri– Balast)



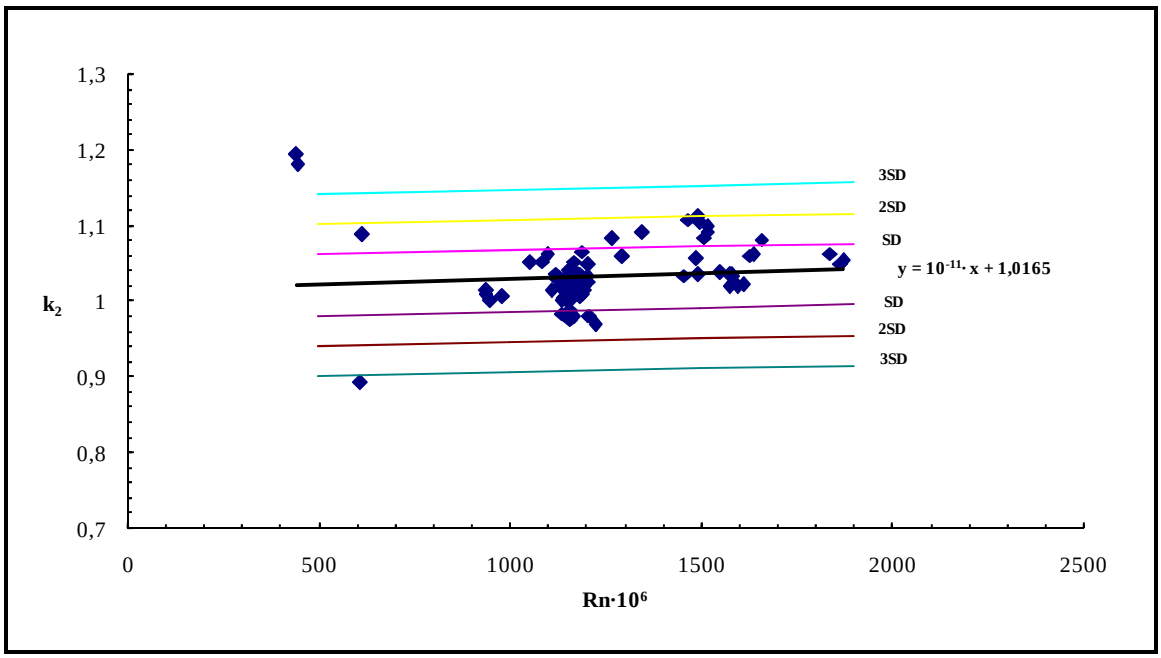
Slika 33. Korelacijski koeficijent CP (Bulk carrieri i tankeri – Balast)



Slika 34. Korelacijski koeficijent k_2 (Bulk carrieri i tankeri – Balast)



Slika 35. Korelacijski koeficijent CP (Tankeri – sva opterećenja)



Slika 36. Korelacijski koeficijent k_2 (Tankeri – sva opterećenja)

U dijagramima su za svaki pojedini slučaj unesene vrijednosti koeficijenata CP i k_2 u zavisnosti o Reynoldsovom broju. Nakon toga je prema [27] napravljena linearna regresija, te određena standardna devijacija, te unesene vrijednosti ± SD, ± 2SD i ± 3SD.

U Tablici 2 su prikazani dobiveni izrazi za linearne regresije CP i k_2 u zavisnosti o Reynoldsovom broju i vrijednost standardne devijacije za pojedini istraživani slučaj.

Slika	Dijagram	Izraz	Standardna devijacija
27	CP Tankeri puno opterećenje	$-1.799\cdot10^{-11}\cdot Rn+1.041$	0.05594
29	CP Tankeri balast	$0.6\cdot10^{-11}\cdot Rn+0.9622$	0.04449
31	CP Bulk carrieri balast	$-2.999\cdot10^{-11}\cdot Rn+0.9925$	0.03693
33	CP Bulk carrieri i Tankeri balast	$-0.528\cdot10^{-11}\cdot Rn+0.9734$	0.04293
35	CP Tankeri sva opterećenja	$1\cdot10^{-11}\cdot Rn+0.9874$	0.05712
28	k_2 Tankeri puno opterećenje	$-1.635\cdot10^{-11}\cdot Rn+1.062$	0.04385
30	k_2 Tankeri balast	$13.30\cdot10^{-11}\cdot Rn+0.868$	0.01917
32	k_2 Bulk carrieri balast	$5.439\cdot10^{-11}\cdot Rn+0.9841$	0.02411
34	k_2 Bulk carrieri i Tankeri balast	$7.009\cdot10^{-11}\cdot Rn+0.9474$	0.02553
36	k_2 Tankeri sva opterećenja	$1\cdot10^{-11}\cdot Rn+1.0165$	0.04025

Tablica 2. Rezultati proračuna linearne regresije

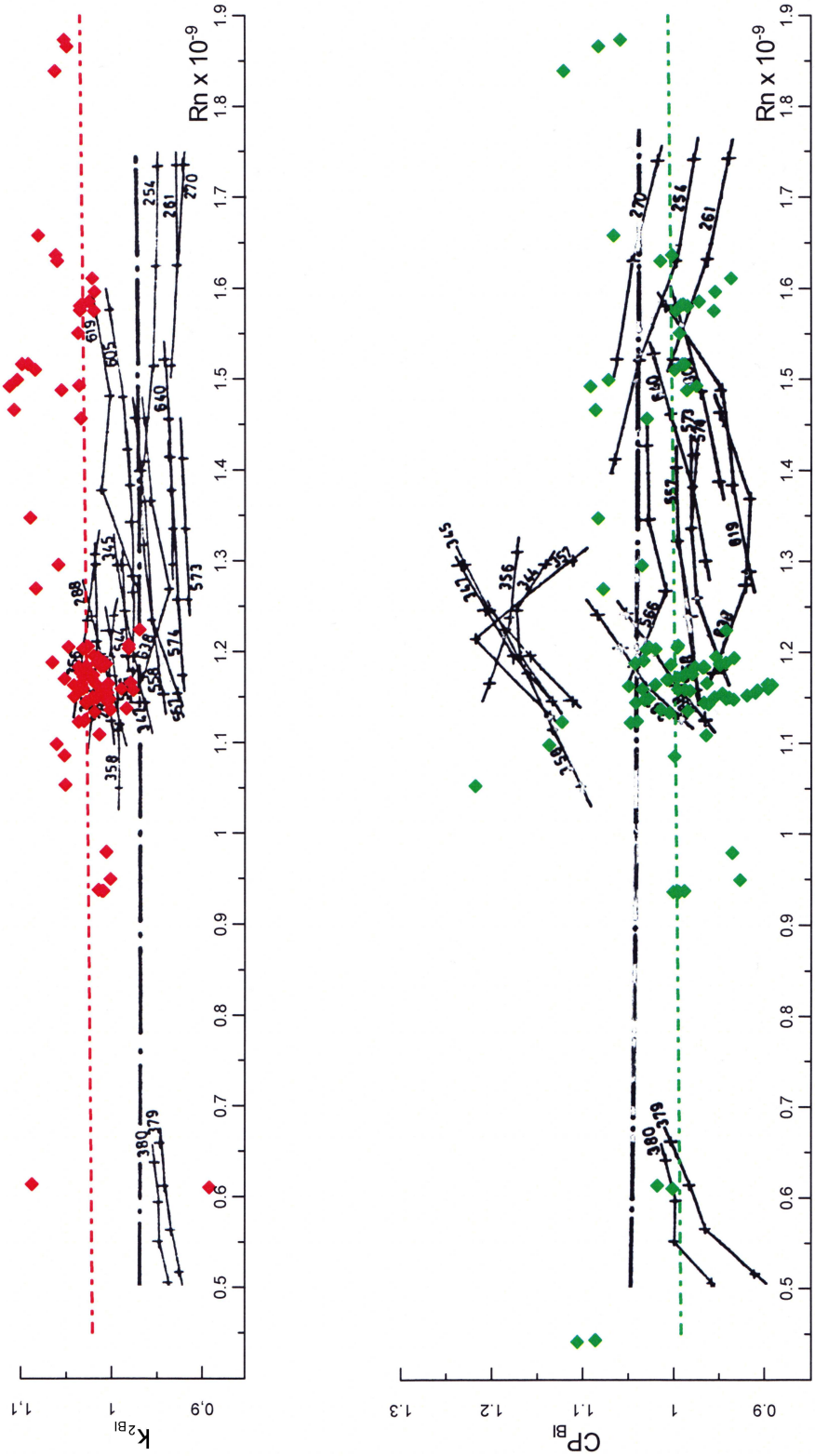
U dijagramima CP i k_2 za pojedine tipove brodova pokazana su uglavnom dobra slaganja ispitivanja u bazenima i pripadajuće prognoze sa rezultatima mjerenja u naravi. Standardne devijacije proračunate su za svaku linearnu regresiju, te su prikazane uz pripadajuće regresijske izraze u Tablici 2.
Vrijednosti korelacije CP za tankere za sva opterećenja (puno+balast) pokazuju najbolje slaganje rezultata prognoze, ali i njihovo najveće rasipanje. Kao što je prije prikazano ΔC_T sadrži, po metodi koja se primjenjuje u Brodarskom institutu, i korekciju za CP što potvrđuje da je ΔC_T dobro odabran. Rezultati prikazani u Tablicama 3, 4, 5 i 6 navedeni su kronološki za tankere i bulk carriere. Rezultati pokazuju sve bolje prognoze Brodarskog instituta. Slaganje rezultata ispitivanja bulk carriera je nešto lošije nego tankera, ali to se tumači mnogo manjim uzorkom. U konačnoj analizi je izbačeno sedam brodova-bulk carriera sa znatnim odstupanjima bazenske prognoze od ispitivanja u naravi.
Od spomenutih 7 brodova njih 5 je iz stare serije izgrađenih brodova pa se postavlja pitanje pouzdanosti mjerenja u tom slučaju. Mjerenje u naravi je provedeno torziometrom MAIHAK koji je mogao dati nepouzdane rezultate. U svakom slučaju, odstupanja su bila prevelika da bi se uzela u daljnjoj analizi koeficijenata. U slučaju ispitivanja dva novija broda javila su se odstupanja jer su ispitivanja provedena na izrazito lošem moru što je imalo utjecaja na rezultate mjerenja.

Kod tankera su izdvojena samo 2 broda koja su imala propeler upravljivog uspona koji nije bilo moguće kontrolirati kod ispitivanja u naravi. Uspon na propeleru u naravi nije odgovarao usponu kod provedenog modelskog ispitivanja a onda nije mogao imati ni jednaku apsorpciju snage.

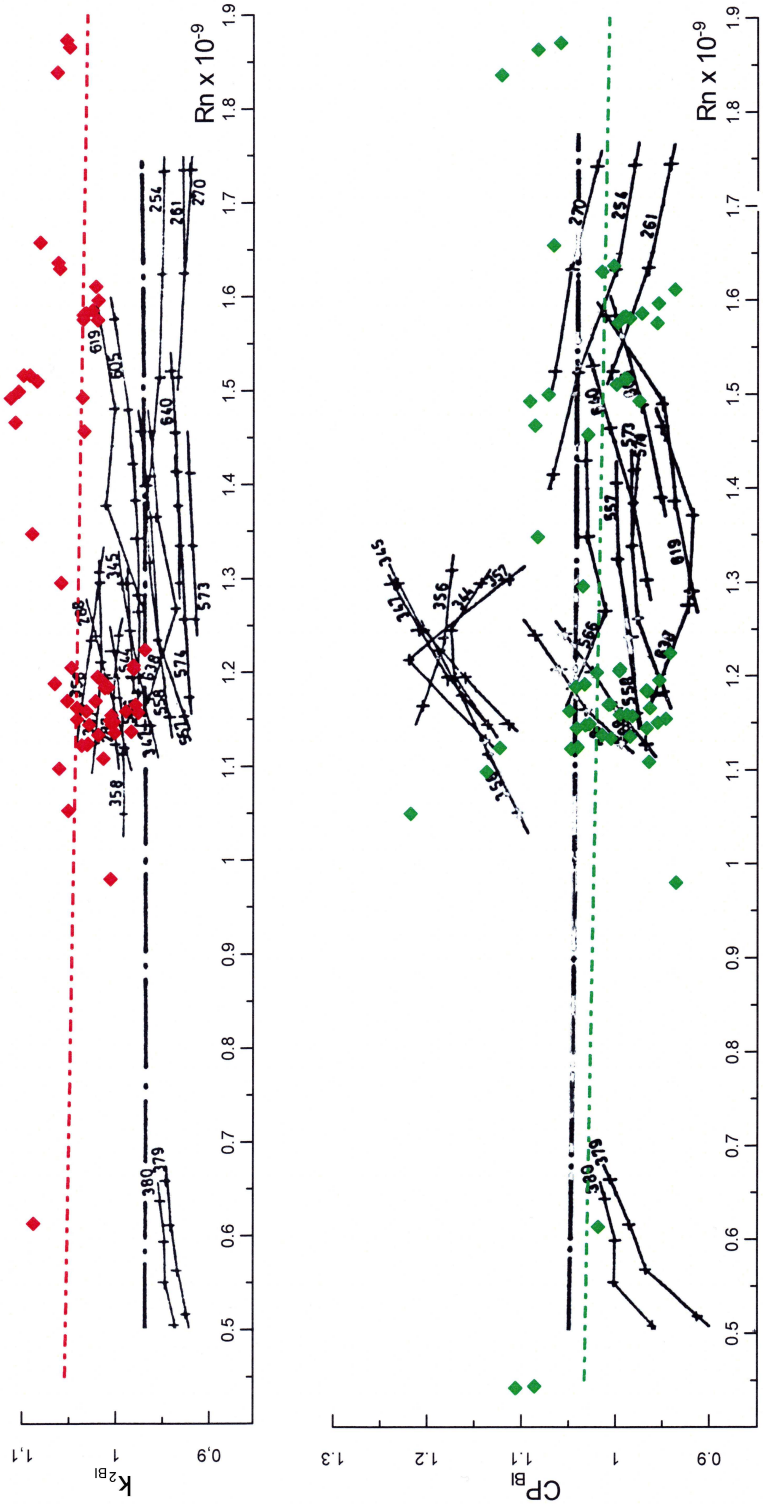
Na kraju je napravljena usporedba između istraživanja na uzorku objavljenih u Brodarskom institutu u zadnjih dvadeset i pet godina s onim sa starijom korelacijom objavljenom u [12].
Preko starih dijagrama koeficijenata CP i k_2 napravljenih u ovisnosti o Reynoldsovom broju, obrađenih sa ispitanim starijim modelima i brodovima u naravi ucrtane su nove točke dobivene novijim istraživanjem kako bi se zorno pokazalo dobivene razlike kao i poboljšanje u prognoziranju brodova punih formi. Broj uzoraka u novijem istraživanju je veći, s dosta brodova iz serija, tako da novija analiza upućuje na povećanje kvalitete obavljenih mjerenja u naravi u zadnjih dvadeset pet godina.

Razlog tome je:

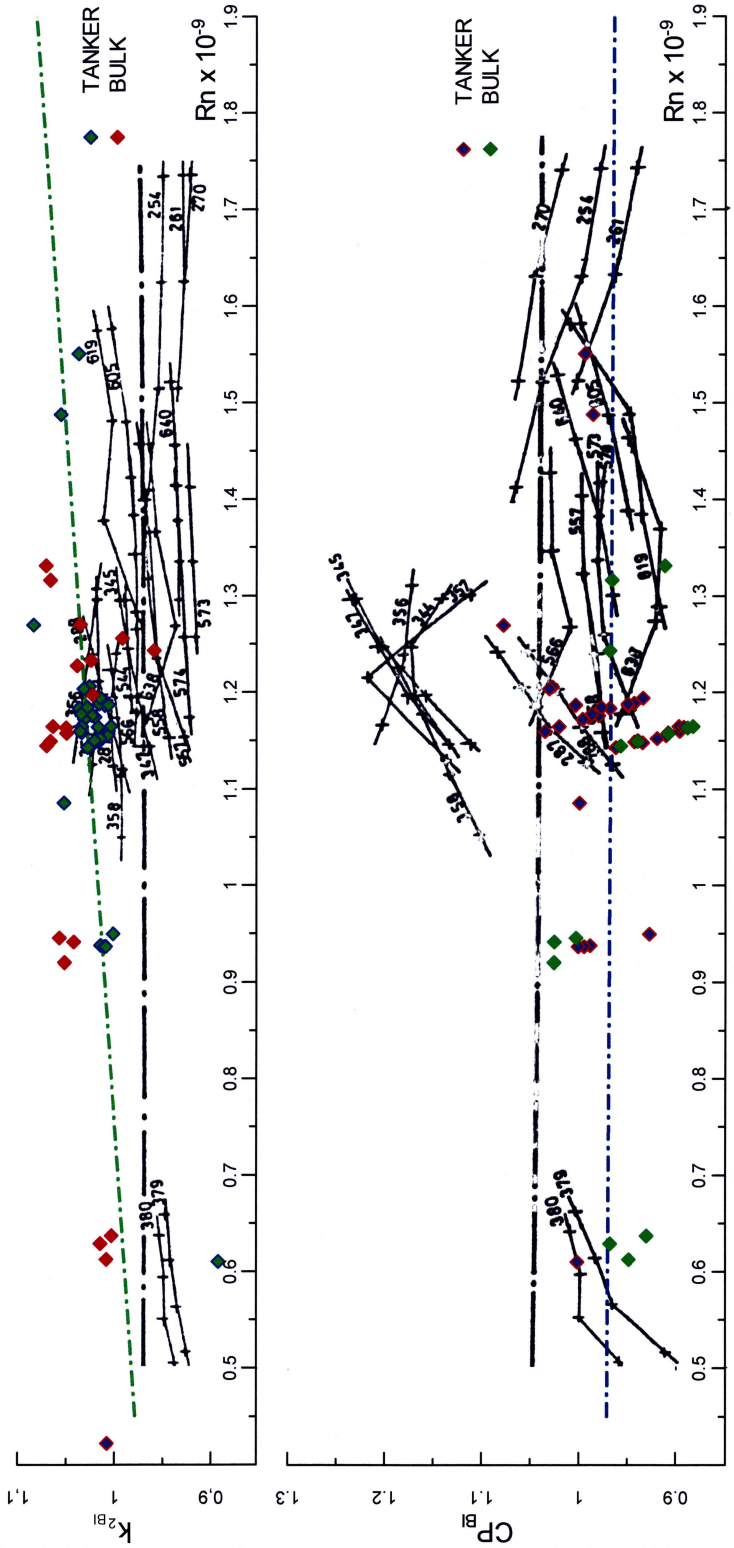
- razvoj mjerne tehnike
    - primjena tenzometrije u mjerenjima snage na osovini
    - primjena diferencijalnog globalnog sustava za pozicioniranje (DGPS)
- razvoj metodologije mjerenja
    - propisivanje procedura za ispitivanje
    - propisivanje procedura za analizu izmjerenih rezultata



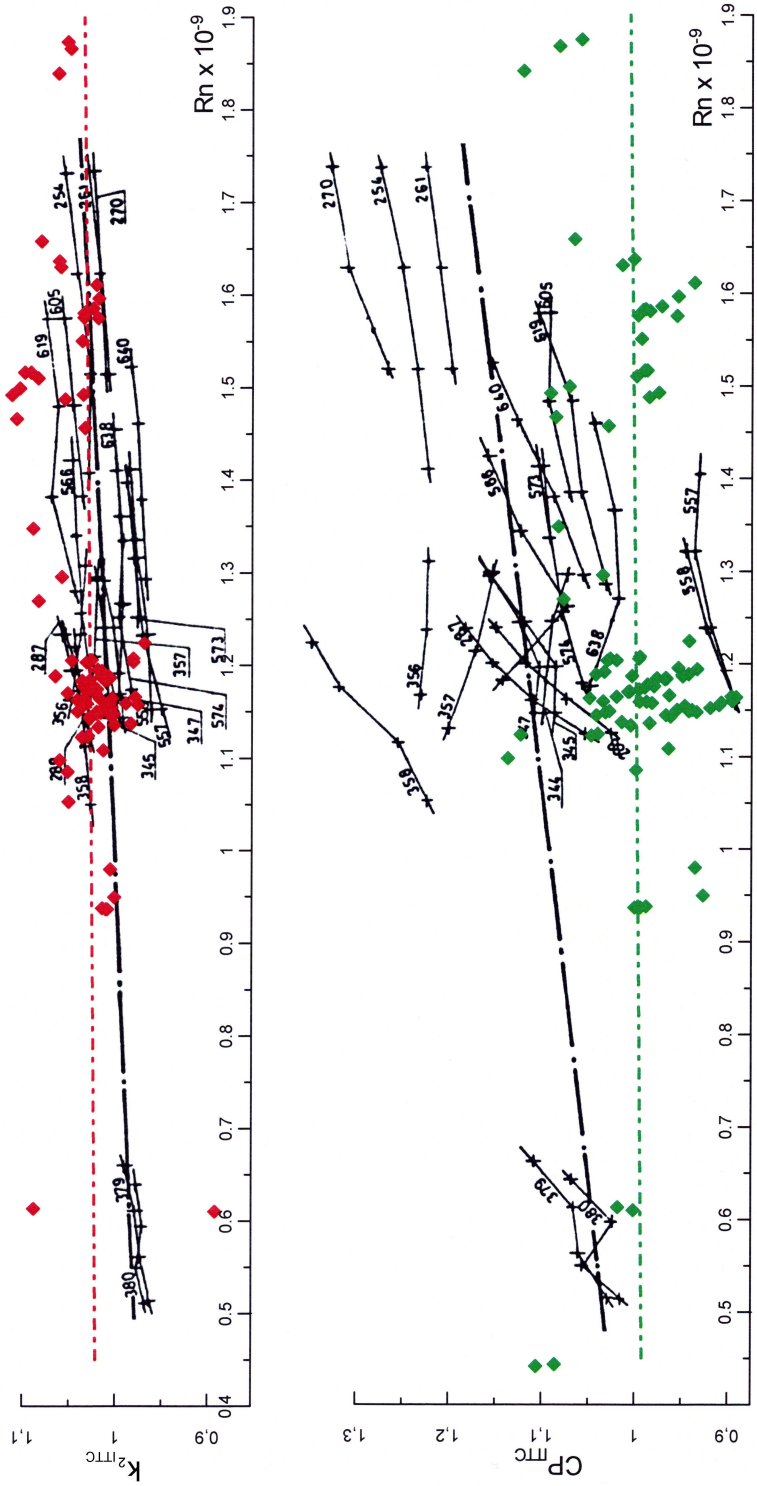
Slika 37. Usporedbeni dijagram tankera za sva opterećenja prema BI



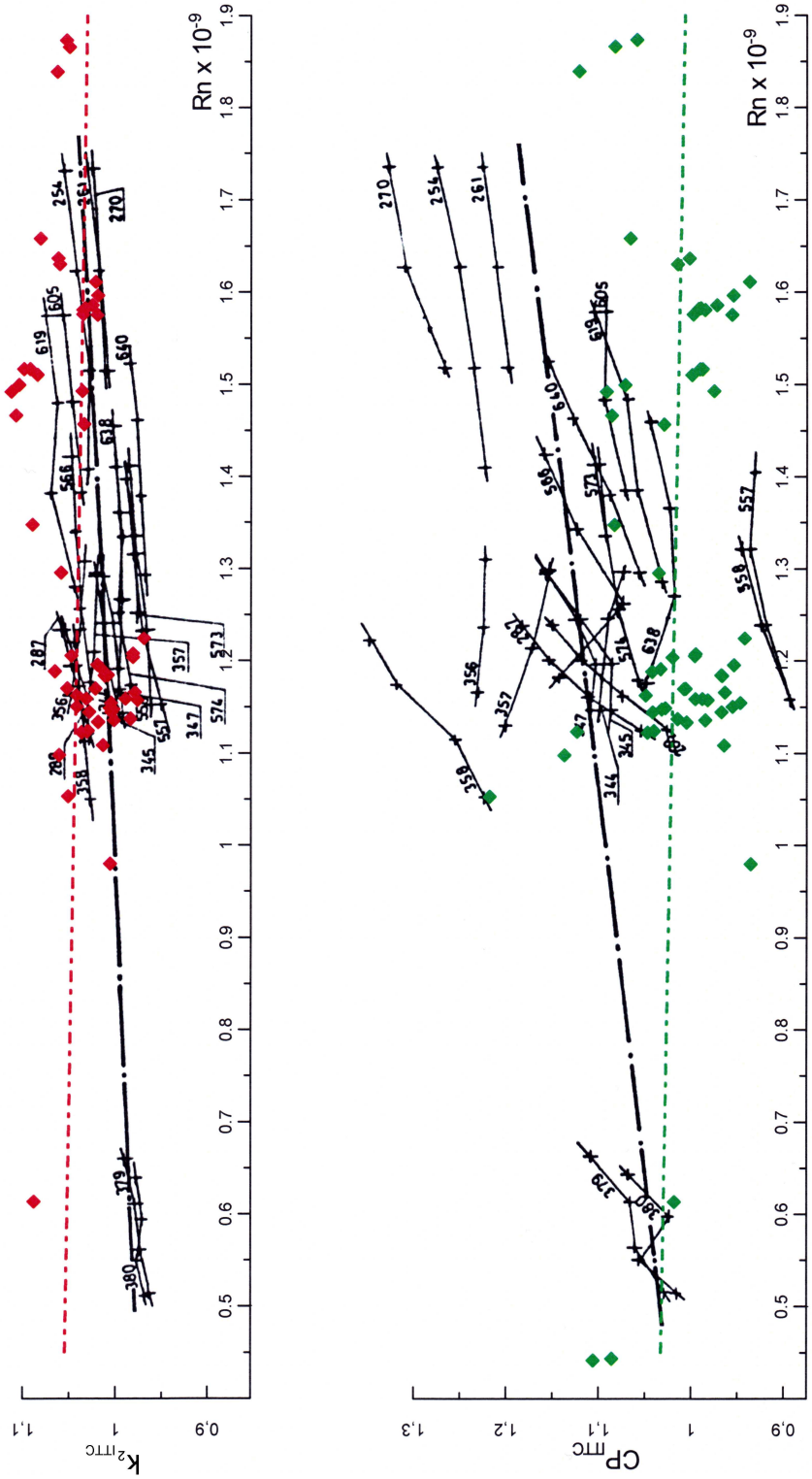
Slika 38. Usporedbeni dijagram tankera za puni opterećenje prema BI



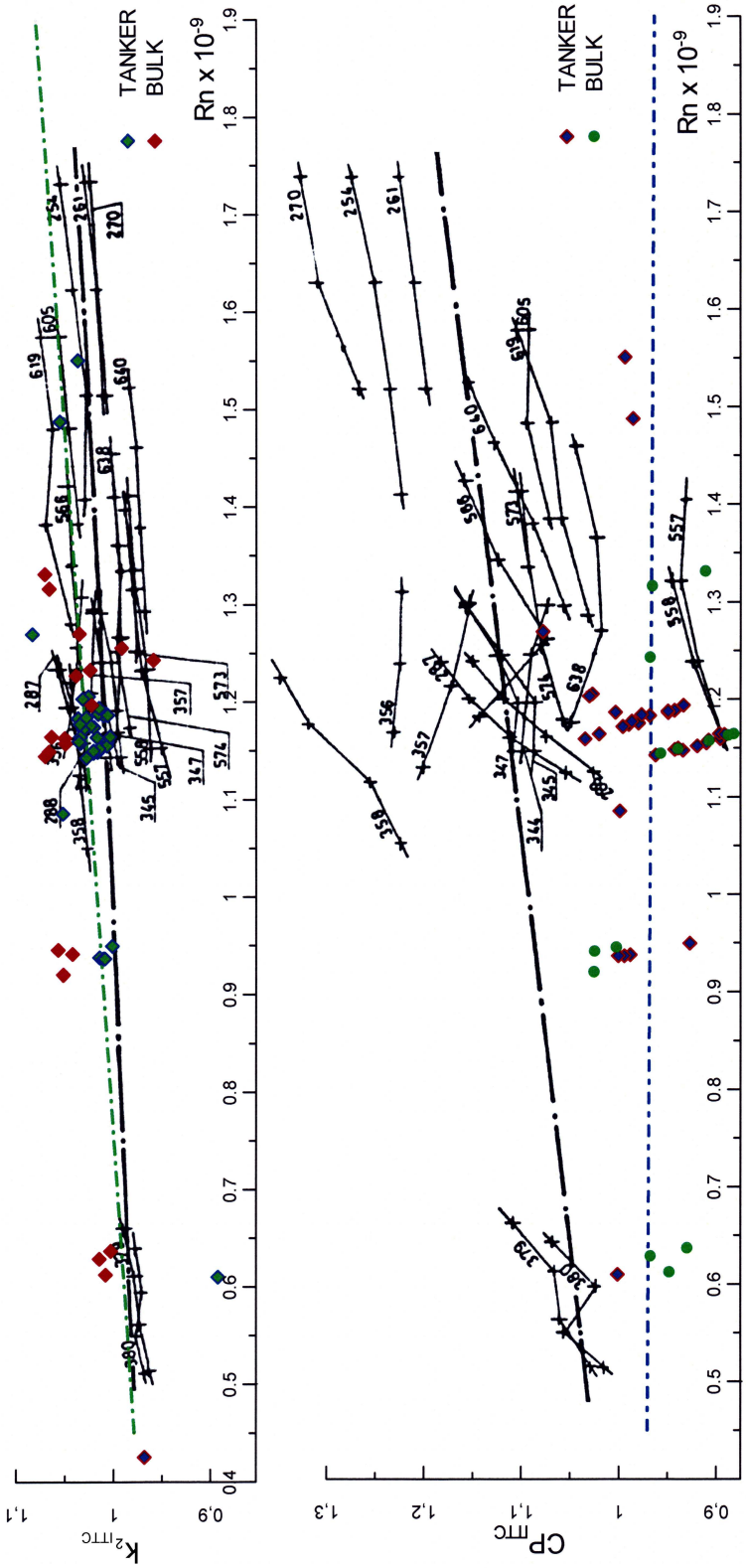
Slika 39. Usporedbeni dijagram tankera i bulk carriera za balast prema BI



Slika 40. Usporedbeni dijagram tankera za sva opterećenja prema ITTC 1978



Slika 41. Usporedbeni dijagram tankera za puni gaz prema ITTC 1978



Slika 42. Usporedbeni dijagram tankera i bulk carriera za balast prema ITTC 1978

Na krajnjim usporedbenim dijagramima može se uočiti bolje slaganje korelacije kod ispitivanja tankera na punom opterećenju u odnosu na korelacijske linije za snagu CP iz rada [12]. Koeficijent korelacije za okretaje k_2, kod ispitivanja tankera na punom opterećenju, ima veću standardnu devijaciju SD, ali su vrijednosti s krivulje linearne regresije dobivene koreliranjem ispitanih modela i brodova realnije, tj. odgovaraju početno pretpostavljenoj vrijednosti koeficijenta k_2 sa Slike 26.
Usporedbom ispitivanih tankera po metodi ITTC 1978 iz [12] tankeri na punom gazu pokazuju bolje slaganje po koeficijentu korelacije za snagu CP od metode ITTC 1978, s gotovo jednako dobrim slaganjem u korelacijskom koeficijentu za okretaje k_2 i uz nešto veće rasipanje.
Kombinirani dijagram s prikazanim tankerima i bulk carrierima u balastu u korelacijskom koeficijentu za snagu CP su bliži jedinici od metode po BI i metode po ITTC 1978 iz [12]. Bolje slaganje se pojavljuje i kod korelacijskog koeficijenta za okretaje k_2 jer bi pretpostavljeni koeficijent k_2 trebao biti veći od 1.0

Analitički izrazi za korelacijske koeficijente za snagu CP i okretaje k_2 po metodi Brodarskog instituta iz [12]:

$CP = 1.0470-0.0032\ Rn \times 10^{-9}$ SD = 0.080

$k_2 = 0.9694+0.0017\ Rn \times 10^{-9}$ SD = 0.0284

Izrazi za korelacijske koeficijente za snagu CP i okretaje k_2 po metodi ITTC 1978 odnosno ITTC 1984 iz [12]:

$CP = 0.9698+0.1233\ Rn \times 10^{-9}$ SD = 0.0813

$k_2 = 0.9577+0.0463\ Rn \times 10^{-9}$ SD = 0.0253

Analitički novopredloženi izrazi za korelacijske koeficijente za snagu CP i okretaje k_2:

- za tankere na punom opterećenju:

$CP = -1.799 \cdot 10^{-11} \cdot Rn+1.041$ SD =0.05594

$k_2 = -1.635 \cdot 10^{-11} \cdot Rn +1.062$ SD = 0.04385

- za tankere i bulk carriere na balastnom opterećenju

$CP = -0.528 \cdot 10^{-11} \cdot Rn +0.9734$ SD = 0.04293

$k_2 = 7.009 \cdot 10^{-11} \cdot Rn +0.9474$ SD = 0.02553

7. ZAKLJUČAK

Uspoređujući metodu koja je primijenjena u ovom radu s metodom objavljenom u [12], a prikazanom u usporedbenim dijagramima u prethodnom poglavlju vidi se da su nove korelacijske linije i po korelacijskim koeficijentima za snagu CP i korelacijskim koeficijentima za okretaje k_2 za sve promatrane grupe uzoraka bolje od ranije objavljenih korelacijskih linija. Bolja slaganja su posebno vidljiva u korelaciji okretaja k_2, ali uz veću standardnu devijaciju, koja se očituje u rasipanju SD analiziranih vrijednosti k_2. Ovo je uočeno i kod korelacijskog koeficijenta za snagu CP kod tankera za sva stanja krcanja.
Ispitivanja nekih modela brodova punih formi ne daju pouzdanu osnovu za prognozu otpora i propulzije brodova u naravi. Mjerenje na modelima brodova, ali i mjerenja u naravi, podložna su greškama kako samih metoda, tako i mjernih senzora i mjernog lanca.

Greške u samom načinu analize mogu uzrokovati razlike prognoziranih brzina broda i okretaja stroja od onih izmjerenih u naravi. Razlike u istisnini između ispitivanja u naravi i ispitivanja s modelima mogu se riješiti svođenjem na jednaku istisninu, ako razlike nisu velike. Kod većih razlika istisnina i veća razlika u trimu broda potrebno je ponoviti propulzijske pokuse u bazenu s modelom. To se obično treba napraviti na kraju ciklusa, nakon ispitivanja na pokusnoj plovidbi, kada obično nedostaju sredstva za provođenje pokusa s modelom. Ipak kod terminski dobro vođenog projekta i kada se ispitivanja s modelom obavljaju u vrijeme dobro definiranog stanja krcanja projektiranog broda, može se kvalitetno odabrati stanje balasta i punog opterećenja. Provođenje pokusa na modelu potrebno je kvalitetno analizirati i kontrolirati točnost mjerenja. Prijenos rezultata na brod, bez obzira na primijenjenu metodu koja se upotrebljava, i mjerenje na brodu u naravi također je podložno greškama. Ipak su rezultati mjerenja u naravi najmjerodavniji. Kod mjerenja u naravi, važna je temeljita priprema mjerenja koja se sastoji u odabiru dobrog poligona za mjerenje, kvalitetnog očitanja gazova broda na zagaznicama i bilježenja stanja vremenskih prilika na mjernom poligonu. Pri samom je mjerenju posebno važna preciznost provođenja mjerenja uz poštivanje procedure propisane normom ISO 19019 [23]. Ako je potrebno, izmjerene vrijednosti u naravi mogu se preračunati na bazenske uvjete (plitka voda, vjetar, more) prema normi ISO 15016 [24].

U radu određeni i prikazani koeficijenti korelacije CP i k_2 daju bolje mogućnosti prognoziranja nego upotreba starijih korelacijskih linija CP i k_2. Podaci s mjerenja analizirani su prema tipu brodova i stanju krcanja. Zahvaljujući reprezentativnom uzorku provedena je opsežna analiza. Promatranjem rezultata analize kroz CP i k_2 za pojedine tipove brodova, uočeno je da su CP linije bliske jedinici. Najveće odstupanje je vidljivo kod analiziranih bulk carriera. Najbolje slaganje koeficijenta CP pokazuje linija analiziranih tankera za sva stanja krcanja. Linija CP za analizirane tankere u balastu pokazuju nešto veća odstupanja.

Korelacijski koeficijent k_2 za sve analizirane grupe uzoraka pokazuje dobra slaganja. No najbolje je slaganje kod tankera na punom opterećenju.

Eksperimentalno-analitički pristup opisan u ovom radu i reprezentativan uzorak omogućuju pouzdaniju prognozu i za posebno neprikladne forme punih brodova.

Analizom nije moguće kvalitetno obuhvatiti utjecaj mjerila na pramčano i krmeno zaoštrenje odnosno bulb na pramcu i krmi. Ovi elementi broda imaju važan utjecaj na potrebnu snagu i okretaje stroja.

Pristup rastavljanja i analize brodova po grupama predstavlja poboljšanje obzirom na prethodne korelacije. U zadnjih 25 godina mjerenja u naravi i mjerenja u bazenima napravljen je skok u metodama mjerenja i načinu analize rezultata mjerenja. Važan korak postignut je nabavom nove opreme. Od 2000.g. se mjerenje pozicije i brzine broda radi sa novim DGPS sustavom, a tenzometrijskom metodom se mjeri snaga od 1986. g.

Trebalo bi provesti analizu i po novijim metodama (ITTC 1978 i ITTC 1984) u kojima bi se u analizi obuhvatilo koeficijente sustrujanja i pokus slobodne vožnje vijka. Za potrebe ovog rada to nije bilo moguće učiniti jer su ti podaci bili nedostupni.

Potrebno je rad na korelaciji trajno unapređivati povremeno radeći analize kad se nakupi određeni broj modela i brodova.

PRILOG

REZULTATI ISPITIVANJA MODELA														POKUSNA PLOVIDBA						
BROJ MODELA	λ	ISTISNINA s privjescima	L_{PP}	L_{WL}	B	T_{PR}	T_{KR}	C_B	STANJE KRCANJA	$\Delta C_T \cdot 10^{-3}$	K_2	V_{PROG}	N_{BAZ}	GRADNJA	ISTISNINA s privjescima	T_{PR}	T_{KR}	V_{PP}	N_S	P_B
	-	t	m	m	m	m	m	-		-	-	čv	min^{-1}	-	t	m	m	čv	min^{-1}	kW
TAP	18	13367	110,00	113,57	19,00	8,00	8,00	0,779	Pun	0,25	1,025	12,53	186,6	**1P**	13354	7,95	8,05	12,47	201,9	2380
TAB		6647	110,00	106,22	19,00	3,80	4,80	0,704	Balast	0,35	1,04	13,26	182,9	**2B**	6647	3,80	4,80	13,26	200,5	2380
TBP	30,5	75224	216,00	219,57	32,20	12,60	12,60	0,837	Pun	-0,1	1,03	14,51	83,6	**3P**	75200	12,55	12,62	14,17	87,1	7446
TCP	36	121357	238,00	242,20	42,48	14,43	14,43	0,810	Pun	-0,15	1,03	14,39	74,2	**4P**	121500	14,43	14,43	14,46	81,9	9495
														5P	122000	14,42	14,47	14,46	81,4	9495
														6P	121500	14,43	14,30	14,40	80,5	9495
														7P	121500	14,40	14,47	13,98	80,0	9495
TDP	26	40754	176,00	179,60	26,80	10,66	10,66	0,790	Pun	0,05	1,03	14,59	119,7	**8P**	40700	10,65	10,62	14,62	117,3	6255
TEP	30	66815	205,00	209,07	36,00	10,97	10,97	0,804	Pun	-0,05	1,03	14,45	104,2	**9P**	66913	10,98	10,98	14,31	109,1	8000
TEB		39048	205,00	198,74	36,00	5,90	7,50	0,736	Balast	0,05	1,05	15,02	102,5	**9B**	38861	5,85	7,50	14,75	108,5	8000
TFP	33,5	96120	236,00	238,96	39,40	12,19	12,19	0,826	Pun	-0,15	1,03	14,71	110,2	**10P**	98000	12,05	12,20	14,42	119,8	9396
TFB		58483	236,00	235,01	39,40	6,50	9,00	0,750	Balast	-0,08	1,06	15,19	106,3	**11P**	96354	12,19	12,14	14,49	119,5	9396
TGP	27	50255	169,00	173,20	32,20	11,00	11,00	0,818	Pun	0	1,03	15,18	108,1	**12P**	50336	11,10	10,95	15,39	115,4	8870
THP	27,6	45108	173,88	177,21	32,00	10,00	10,00	0,790	Pun	-0,05	1,03	15,08	118,8	**13P**	45150	9,94	9,97	15,10	122,9	7480
THB		30659	173,88	170,44	32,00	6,80	7,20	0,760	Balast	0,05	1,05	15,34	115,4	**14B**	30639	6,73	7,23	15,56	119,7	7480
														15B	30472	6,76	7,17	15,69	123,2	7480
														16P	45108	10,00	10,00	14,91	120,6	7480
														17B	30110	6,80	7,20	15,71	120,1	7480
														18B	30110	6,80	7,20	15,65	119,5	7480
														19B	30990	6,93	7,20	15,78	120,5	7480
														20B	30110	6,80	7,20	15,55	120,1	7480
														21B	30610	6,80	7,20	15,77	122,0	7480
														22B	30100	6,80	7,15	15,61	120,0	7480
														23B	30716	6,81	7,18	15,58	120,4	7480
														24B	30610	6,78	7,23	15,48	120,2	7480
TIP	28	50775	174,80	178,40	32,20	10,98	10,98	0,801	Pun	-0,05	1,03	15,14	122,0	**25P**	50937	11,00	11,03	15,32	125,4	7480
														26B	30305	6,41	7,42	15,89	123,4	7480

Tablica 3. Tankeri

REZULTATI ISPITIVANJA MODELA														POKUSNA PLOVIDBA						
BROJ MODELA	λ	ISTISNINA s privjescima	L_{PP}	L_{WL}	B	T_{PR}	T_{KR}	C_B	STANJE KRCANJA	$\Delta C_T \cdot 10^{-3}$	K_2	V_{PROG}	N_{BAZ}	GRADNJA	ISTISNINA s privjescima	T_{PR}	T_{KR}	V_{PP}	N_S	P_B
	-	t	m	m	m	m	m	-		-	-	čv	min^{-1}	-	t	m	m	čv	min^{-1}	kW
TIB		30471	174,80	172,71	32,20	6,40	7,40	0,746	Balast	0,01	1,05	15,61	119,6	**27B**	30568	6,42	7,40	15,70	123,0	7480
														28B	30305	6,41	7,42	15,72	123,6	7480
														29B	30305	6,41	7,42	15,86	123,3	7480
														30B	30526	6,45	7,45	15,67	124,0	7480
														31B	30805	6,50	7,50	15,82	126,2	7480
														32B	30526	6,44	7,43	15,88	124,2	7480
														33B	30568	6,41	7,40	15,96	124,8	7480
														34P	51350	11,00	11,20	15,33	125,1	7465
														35B	31427	6,52	7,68	15,83	125,2	7465
														36B	30649	6,35	7,55	15,57	123,4	7465
														37P	50834	11,00	11,00	15,14	124,8	7465
														38B	30533	6,30	7,55	15,50	122,9	7465
														39B	30520	6,40	7,40	16,12	127,7	8532
														40B	30364	6,30	7,52	16,09	128,1	8532
TJP	28	49822	175,00	177,83	32,00	11,00	11,00	0,788	Pun	-0,05	1,03	15,31	122,8	**41P**	49855	11,00	11,00	15,52	127,2	7415
														42P	49855	11,00	11,00	15,10	126,0	7415
TKP	22,5	23563	141,00	145,20	23,75	8,50	8,50	0,804	Pun	0,1	1,03	15,4	130,2	**43P**	23415	8,45	8,45	15,58	133,7	6458
TKB		14309	141,00	138,74	23,75	4,60	6,10	0,734	Balast	0,2	1,045	15,58	128,8	**43B**	14174	4,63	6,06	15,80	132,0	6458
														44B	14200	4,64	6,04	15,60	131,0	6458
														45B	13967	4,50	6,01	15,58	130,2	6458
														46B	14328	4,60	6,07	15,58	130,0	6458
TLP	30,45	76329	220,00	224,99	32,20	12,55	12,55	0,836	Pun	0	1,03	15,2	100,9	**47P**	76581	12,50	12,58	15,32	105,6	9800
TLB		42185	220,00	214,71	32,20	6,91	7,57	0,787	Balast	0,1	1,05	15,98	98,1	**48B**	41555	6,83	7,52	16,00	103,8	9800
TMP	28	49946	174,00	176,80	32,20	11,00	11,00	0,789	Pun	-0,05	1,03	15,3	124,3	**49P**	50005	11,00	11,00	15,28	130,5	7720
TMB		31385	174,00	172,27	32,20	6,63	7,84	0,735	Balast	0,01	1,05	15,72	122,4	**50B**	31469	6,71	7,85	15,78	127,2	7720
TNP	33	79414	230,00	234,99	36,40	11,00	11,00	0,841	Pun	-0,05	1,029	15,29	103,1	**51P**	80139	11,04	11,10	15,48	106,9	10500
TOP	27,7	39435	176,00	180,00	30,00	9,00	9,00	0,809	Pun	-0,05	1,03	15,37	119,3	**52P**	39833	9,05	9,05	15,28	120,2	6715
TOB		24675	176,00	174,50	30,00	4,92	6,88	0,735	Balast	0,05	1,05	15,58	118,3	**53B**	26132	5,20	7,23	15,70	120,4	6715
TPP	27	44533	169,00	172,60	29,80	11,00	11,00	0,784	Pun	-0,05	1,03	14,67	121,5	**54P**	44790	10,96	11,03	14,83	124,7	6650
TQP	28	49832	175,00	177,83	32,00	11,00	11,00	0,788	Pun	-0,05	1,03	15,66	125,5	**54P**	44790	10,96	11,03	15,31	129,5	7620
														55P	49854	11,00	11,00	15,90	124,2	8260

Tablica 3. nastavak

REZULTATI ISPITIVANJA MODELA														POKUSNA PLOVIDBA						
BROJ MODELA	λ	ISTISNINA s privjescima	L_{PP}	L_{WL}	B	T_{PR}	T_{KR}	C_B	STANJE KRCANJA	$\Delta C_T \cdot 10^{-3}$	K_2	V_{PROG}	N_{BAZ}	GRADNJA	ISTISNINA s privjescima	T_{PR}	T_{KR}	V_{PP}	N_S	P_B
	-	t	m	m	m	m	m	-		-	-	čv	min^{-1}	-	t	m	m	čv	min^{-1}	kW
														56P	49854	11,00	11,00	15,68	123,5	8260
														57P	50020	11,00	10,98	15,63	122,9	8260
														58P	49772	10,98	11,00	15,43	124,3	8260
														59P	49854	11,00	11,00	15,65	124,5	8260
TRP	28	50899	176,00	178,40	32,20	11,00	11,00	0,795	Pun	-0,05	1,03	14,64	103,4	**60P**	50892	10,98	11,05	14,70	104,1	6340
														61P	50892	10,98	11,05	14,98	104,1	6840
														62P	50961	11,01	10,98	14,67	105,7	6412
														63P	50961	11,01	10,98	15,00	105,7	6912
														64P	51089	10,97	10,99	14,55	105,7	6412
														65P	51089	10,97	10,99	14,85	105,7	6912
														66P	51196	11,02	11,00	14,53	106,2	6412
														67P	51196	11,02	11,00	14,87	106,2	6912
														68P	50986	11,00	11,00	14,81	105,5	6412
														69P	50986	11,00	11,00	15,09	105,5	6912
														70P	50986	11,00	11,00	14,21	105,7	6412
														71P	50986	11,00	11,00	14,54	105,7	6912
TSP	26,5	31365	160,80	164,48	26,40	9,00	9,00	0,800	Pun	-0,05	1,03	15,44	123,8	**72B**	19418	5,30	6,52	15,77	128,4	6600
TSB		19712	160,80	158,91	26,40	5,30	6,52	0,737	Balast	0,05	1,05	15,8	122,4	**73P**	31584	8,97	9,03	14,78	122,4	6600
TTP	40,3	176094	270,01	280,03	48,20	16,00	16,00	0,824	Pun	-0,22	1,04	15,72	80,5	**74P**	176508	16,00	16,00	15,17	82,4	14270
														75P	176508	16,00	16,00	15,45	83,2	14270
														76P	176508	16,00	16,00	15,39	82,6	14270
TUS	28	57097	174,80	178,37	32,20	12,20	12,20	0,810	Scantling	-0,11	1,025	14,71	119,6	**77S**	57269	12,20	12,19	14,89	126,6	7480
TVP	35	88160	220,00	228,53	42,00	11,35	11,35	0,819	Pun	-0,15	1,03	15,96	102,9	**78P**	88286	11,35	11,35	15,83	105,4	12175
TVB		53940	220,00	219,01	42,00	6,50	8,10	0,753	Balast	-0,05	1,05	16,31	101,0	**79B**	54246	6,50	8,10	16,35	105,1	12175
														80P	88286	11,35	11,35	16,28	107,4	12175
TWP	36,43	113000	236,00	246,72	42,00	13,50	13,50	0,822	Pun	-0,2	1,034	15,85	90,2	**81P**	113165	13,43	13,50	15,52	95,5	12715
TXP	13	2977	72,30	75,68	13,00	4,20	4,20	0,734	Pun	0,3	1,01	14,14	238,0	**82P**	3004	4,20	4,20	13,53	249,1	1332
TXB		2300	72,30	72,79	13,00	3,00	3,70	0,693	Balast	0,4	1,02	14,02	215,6	**83P**	2961	4,26	4,11	13,47	249,5	1332
														84B	2391	2,90	4,00	12,91	249,5	1332

Tablica 3. nastavak

REZULTATI ISPITIVANJA MODELA														POKUSNA PLOVIDBA						
BROJ MODELA	λ	ISTISNINA s privjescima	L_{PP}	L_{WL}	B	T_{PR}	T_{KR}	C_B	STANJE KRCANJA	$\Delta C_T \cdot 10^{-3}$	K_2	V_{PROG}	N_{BAZ}	GRADNJA	ISTISNINA s privjescima	T_{PR}	T_{KR}	V_{PP}	N_S	P_B
	-	t	m	m	m	m	m	-		-	-	čv	min^{-1}	-	t	m	m	čv	min^{-1}	kW
TYP	33,66	76269	220,00	224,20	32,24	12,20	12,20	0,859	Pun	-0,1	1,03	16,21	100,8	**85P**	76526	12,20	12,20	16,33	104,4	11526
														86P	76526	12,20	12,20	16,23	104,5	11526
														87P	76526	12,20	12,20	16,28	105,0	11526
														88P	76526	12,20	12,20	16,29	105,0	11526
														89P	76526	12,20	12,20	16,44	104,8	11526
														90P	76526	12,20	12,20	16,30	104,9	11526
TZP	36,43	112941	236,00	246,72	42,00	13,50	13,50	0,822	Pun	-0,1	1,03	15,6	101,7	**91P**	113156	13,50	13,50	15,32	105,8	11526
														92P	113156	13,50	13,50	15,26	105,2	11526

Tablica 3. nastavak

REZULTATI ISPITIVANJA MODELA														POKUSNA PLOVIDBA						
BROJ MODELA	λ	ISTISNINA s privjescima	L_{PP}	L_{WL}	B	T_{PR}	T_{KR}	C_B	STANJE KRCANJA	$\Delta C_T \cdot 10^{-3}$	K_2	V_{PROG}	N_{BAZ}	GRADNJA	ISTISNINA s privjescima	T_{PR}	T_{KR}	V_{PP}	N_S	P_B
	-	t	m	m	m	m	m	-		-	-	čv	min^{-1}	-	t	m	m	čv	min^{-1}	kW
BAB	25	12344,6	142,60	139,62	22,40	4,32	6,45	0,701	Balast	0,25	1,059	16,40	79,3	**93B**	20670	8,52	8,52	15,22	84,7	4725
														94B	20600	8,48	8,5	15,21	85,4	4725
														95B	20580	8,5	8,5	15,29	86,4	4725
BBB	30	42582	183,00	181,95	32,00	8,80	8,80	0,805	Balast	-0,05	1,04	15,06	105,7	**96B**	42015	8,8	8,5	15,62	114,3	8262
														97B	42015	8,7	8,5	15,58	114,2	8262
														98B	42015	8,7	8,5	15,19	108,1	7414
														99B	42225	8,6	8,6	15,94	113,1	8262
														100B	41490	8,7	8,3	15,65	113,4	8262
BCB	28	26639	188,00	185,47	28,00	5,50	6,90	0,767	Balast	0,05	1,05	15,55	89,9	**101B**	26809	5,5	7	16,04	99,6	7330
														102B	26809	5,35	6,95	15,86	97,4	7330
BDB	28,5	32237	179,00	178,67	30,80	7,20	7,20	0,791	Balast	0,05	1,053	14,65	116,2	**103B**	32291	7,2	7,2	14,96	126	6435
														104B	32291	7,2	7,2	14,85	126,6	6435
														105B	32291	7,2	7,2	14,79	126,3	6435
														106B	32291	7,2	7,2	15,03	127	6435
														107B	32291	7,2	7,2	15,05	128,9	6435
BEB	18	7027	99,60	99,44	18,59	4,50	5,20	0,743	Balast	0,30	1,04	14,03	123,8	**108B**	7034	4,5	5,2	14,26	128	2760
														109B	7070	4,56	5,21	14,17	128	2760
														110B	7070	4,47	5,24	14,22	128	2760
BFB	27,7	36817	182,00	180,43	32,24	7,72	7,72	0,792	Balast I	-0,05	1,045	15,27	115,9	**111B**	37039	7,74	7,74	15,42	122,6	7300

Tablica 4. Bulk carrier

BROJ MODELA	ISTISNINA s privjescima	V_{prog}	N_{BAZEN}	P_B	GRADNJA	ISTISNINA s privjescima	V_{PROG}	N_S	P_B	MEH. GUBICI ZA P.P.	P_D Iz bazena za V_{PP}	P_B Iz bazena za V_{PP}	N Iz bazena za V_{PP}	KOR. ISTISNINE	P_B KOR. ISTISNINA	CP (BI)	Rn_{Lwl}	k_2
	t	čv	min^{-1}	kW		t	čv	min^{-1}	kW		kW	kW	min^{-1}	m	kW			
TAP	13367	12,53	186,6	2380	**1P**	13354	12,47	201,8	2380	2,00	2290	2336	185,5	1,0006	2337	1,0183	6,13E+08	1,0881
TAB	6647	13,26	182,9	2380	**2B**	6647	13,26	200,5	2380	2,00	2330	2377	224,6	1,0000	2377	1,0014	6,1E+08	0,8927
TBP	75224	14,51	83,6	7446	**3P**	75200	14,17	87,1	7446	2,00	6737	6872	79,9	1,0002	6873	1,0833	1,35E+09	1,0901
TCP	121357	14,39	74,2	9495	**4P**	121500	14,46	81,9	9495	2,00	9430	9619	74,5	0,9992	9611	0,9879	1,52E+09	1,0993
					5P	122000	14,46	81,4	9495	2,00	9430	9619	74,5	0,9965	9585	0,9906	1,52E+09	1,0926
					6P	121500	14,4	80,5	9495	2,00	9323	9509	74,21	0,9992	9502	0,9993	1,51E+09	1,0848
					7P	121500	13,98	80	9495	2,00	8577	8749	72,2	0,9992	8742	1,0862	1,47E+09	1,1080
TDP	40754	14,59	119,7	6255	**8P**	40700	14,62	117,3	6255	2,00	6038	6159	119,2	1,0009	6164	1,0147	1,14E+09	0,9841
TEP	66815	14,45	104,2	8000	**9P**	66913	14,31	109,1	8000	1,00	7658	7735	103	0,9990	7727	1,0353	1,3E+09	1,0592
TEB	39048	15,02	102,5	8000	**9B**	38861	14,75	108,5	8000	1,00	7399	7399	100,1	1,0032	7423	1,0778	1,27E+09	1,0839
TFP	96120	14,71	110,2	9396	**10P**	98000	14,42	119,7	9396	1,00	8632	8718	107,6	0,9872	8606	1,0917	1,49E+09	1,1129
TFB	58483	15,19	106,3	9396	**11P**	96354	14,49	119,5	9396	1,00	8781	8781	108,2	0,9984	8767	1,0718	1,5E+09	1,1044
TGP	50255	15	110,7	8870	**12P**	50336	15,39	115,4	8870	2,00	9194	9378	114,8	0,9989	9368	0,9469	1,15E+09	1,0052
THP	45108	15,08	118,8	7480	**13P**	45150	15,1	122,9	7480	1,00	7443	7517	119,1	0,9994	7513	0,9956	1,16E+09	1,0319
THB	30659	15,34	115,4	7480	**15B**	30472	15,69	123,2	7480	1,00	8125	8206	119,1	1,0041	8240	0,9078	1,16E+09	1,0344
					16P	45108	14,91	120,6	7480	1,00	7108	7179	117,2	1,0000	7179	1,0419	1,14E+09	1,0290
					17B	30110	15,71	120,1	7480	1,00	8168	8250	119,3	1,0121	8350	0,8958	1,16E+09	1,0067
					18B	30110	15,65	119,5	7480	1,00	8041	8121	118,6	1,0121	8220	0,9100	1,15E+09	1,0076
					19B	30990	15,78	120,5	7480	1,00	8319	8402	120	0,9929	8342	0,8966	1,16E+09	1,0042
					20B	30110	15,55	120,1	7480	1,00	7832	7910	117,6	1,0121	8006	0,9343	1,15E+09	1,0213
					21B	30610	15,77	122	7480	1,00	8297	8380	119,9	1,0011	8389	0,8917	1,16E+09	1,0175
					22B	30100	15,61	120	7480	1,00	7957	8037	118,2	1,0123	8136	0,9194	1,15E+09	1,0152
					23B	30716	15,58	120,4	7480	1,00	7894	7973	117,9	0,9988	7963	0,9393	1,15E+09	1,0212
					24B	30610	15,48	120,2	7480	1,00	7689	7766	116,9	1,0011	7774	0,9622	1,14E+09	1,0282
TIP	50775	15,14	122,0	7480	**25P**	50937	15,32	125,4	7480	0,00	7755	7755	123,9	0,9979	7739	0,9666	1,18E+09	1,0121
					26B	30305	15,89	123,4	7480	0,00	7905	7905	122,3	1,0036	7934	0,9428	1,19E+09	1,0090

Tablica 5. Tankeri

BROJ MODELA	ISTISNINA s privjescima	V_{prog}	N_{BAZEN}	P_B	GRADNJA	ISTISNINA s privjescima	V_{PROG}	N_S	P_B	MEH. GUBICI ZA P.P.	P_D Iz bazena za V_{PP}	P_B Iz bazena za V_{PP}	N Iz bazena za V_{PP}	KOR. ISTISNINE	P_E KOR. ISTISNINA	CP (BI)	Rn_{Lwl}	k_2
	t	čv	min^{-1}	kW		t	čv	min^{-1}	kW		kW	kW	min^{-1}	m	kW			
TIB	30471	15,61	119,6	7480	**27B**	30568	15,7	123	7480	0,00	7570	7570	120,5	0,9979	7554	0,9902	1,17E+09	1,0207
					28B	30305	15,72	123,6	7480	0,00	7605	7605	120,7	1,0036	7633	0,9800	1,18E+09	1,0240
					29B	30305	15,86	123,3	7480	0,00	7852	7852	122	1,0036	7881	0,9492	1,19E+09	1,0107
					30B	30526	15,67	124	7480	0,00	7518	7518	120,2	0,9988	7509	0,9961	1,17E+09	1,0316
					31B	30805	15,82	126,2	7480	0,00	7781	7781	121,7	0,9928	7725	0,9683	1,18E+09	1,0370
					32B	30526	15,88	124,2	7480	0,00	7887	7887	122,2	0,9988	7878	0,9495	1,19E+09	1,0164
					33B	30568	15,96	124,8	7480	0,00	8029	8029	122,9	0,9979	8012	0,9336	1,19E+09	1,0155
					34P	51350	15,33	125,1	7465	0,00	7774	7774	124	0,9925	7716	0,9675	1,18E+09	1,0089
					35B	31427	15,83	125,2	7465	0,00	7799	7799	121,7	0,9796	7640	0,9771	1,18E+09	1,0288
					36B	30649	15,57	123,4	7465	0,00	7344	7344	119,3	0,9961	7316	1,0204	1,16E+09	1,0344
					37P	50834	15,14	124,8	7465	0,00	7413	7413	122,1	0,9992	7407	1,0078	1,17E+09	1,0221
					38B	30533	15,5	122,9	7465	0,00	7223	7223	118,6	0,9986	7213	1,0349	1,16E+09	1,0363
					39B	30520	16,12	127,7	8532	0,00	8314	8314	124,4	0,9989	8305	1,0273	1,21E+09	1,0265
					40B	30364	16,09	128,1	8532	0,00	8261	8261	124,1	1,0023	8280	1,0304	1,20E+09	1,0322
TJP	49822	15,31	122,8	7415	**41P**	49855	15,52	127,2	7415	1,00	7700	7777	124,7	0,9996	7774	0,9539	1,20E+09	1,0200
					42P	49855	15,1	126	7415	1,00	6998	7068	120,9	0,9996	7065	1,0496	1,16E+09	1,0422
TKP	23563	15,4	130,2	6458	**43P**	23415	15,58	133,7	6458	1,00	6806	6874	132,9	1,0042	6903	0,9355	9,80E+08	1,0060
TKB	14309	15,58	128,8	6458	**43B**	14174	15,8	132	6458	1,00	6854	6923	131,8	1,0063	6966	0,9270	9,49E+08	1,0015
					44B	14200	15,6	131	6458	1,00	6436	6500	129,1	1,0051	6534	0,9884	9,37E+08	1,0147
					45B	13967	15,58	130,2	6458	1,00	6396	6460	128,8	1,0051	6493	0,9946	9,36E+08	1,0109
					46B	14328	15,58	130	6458	1,00	6396	6460	128,8	0,9991	6454	1,0006	9,36E+08	1,0093
TLP	76329	15,2	100,9	9800	**47P**	76581	15,32	105,6	9800	1,00	9971	10071	101,9	0,9978	10049	0,9753	1,49E+09	1,0363
TLB	42185	15,98	98,1	9800	**48B**	41555	16	103,8	9800	1,00	9746	9843	98,3	1,0101	9943	0,9856	1,49E+09	1,0560
TMP	49946	15,3	124,3	7720	**49P**	50005	15,28	130,5	7720	1,00	7603	7679	124	0,9992	7673	1,0061	1,17E+09	1,0524
TMB	31385	15,72	122,4	7720	**50B**	31469	15,78	127,2	7720	1,00	7759	7837	122,9	0,9982	7823	0,9869	1,18E+09	1,0350
TNP	79414	15,29	103,1	10500	**51P**	80139	15,48	106,9	10500	1,00	10942	11051	104,8	0,9940	10985	0,9559	1,58E+09	1,0200
TOP	39435	15,37	119,3	6715	**52P**	39833	15,28	120,2	6715	1,00	6477	6542	118,4	0,9933	6498	1,0334	1,19E+09	1,0152
TOB	24675	15,58	118,3	6715	**53B**	26132	15,7	120,4	6715	1,00	6883	6952	119,6	0,9625	6691	1,0036	1,19E+09	1,0067
TPP	44533	14,67	121,5	6650	**54P**	44790	14,83	124,7	6650	1,00	6852	6921	123	0,9962	6894	0,9646	1,11E+09	1,0138
TQP	49832	15,66	125,5	8260	**55P**	49854	15,31	129,5	7620	1,00	7725	7802	127,9	0,9962	7772	0,9804	1,14E+09	1,0125
					55P	49854	15,9	124,2	8260	1,00	8682	8769	128,1	0,9997	8766	0,9423	1,22E+09	0,9696

Tablica 5. nastavak

BROJ MODELA	ISTISNINA s privjescima	V_{prog}	N_{BAZEN}	P_B	GRADNJA	ISTISNINA s privjescima	V_{PROG}	N_S	P_B	MEH. GUBICI ZA P.P.	P_D Iz bazena za V_{PP}	P_B Iz bazena za V_{PP}	N Iz bazena za V_{PP}	KOR. ISTISNINE	P_B KOR. ISTISNINA	CP (BI)	Rn_{LwI}	k_2
	t	čv	min^{-1}	kW		t	čv	min^{-1}	kW		kW	kW	min^{-1}	m	kW	-		
					56P	49854	15,68	123,5	8260	1,00	8218	8300	125,8	0,9997	8298	0,9955	1,21E+09	0,9817
					57P	50020	15,63	122,9	8260	1,00	8116	8116	125,2	0,9975	8096	1,0203	1,20E+09	0,9816
					58P	49772	15,43	124,3	8260	1,00	7838	7916	116,6	1,0008	7923	1,0426	1,19E+09	1,0660
					59P	49854	15,65	124,5	8260	1,00	8293	8293	118,8	0,9997	8291	0,9963	1,21E+09	1,0480
TRP	50899	14,64	103,4	6340	**60P**	50892	14,7	104,1	6340	0,00	6437	6437	103,9	1,0001	6438	0,9848	1,14E+09	1,0019
		14,81	105,0	6840	**61P**	50892	14,98	104,1	6840	0,00	6962	6962	106,6	1,0001	6963	0,9824	1,16E+09	0,9765
					62P	50961	14,67	105,7	6412	0,00	6384	6384	103,7	0,9992	6379	1,0052	1,13E+09	1,0193
					63P	50961	15	105,7	6912	0,00	7001	7001	106,8	0,9992	6995	0,9881	1,16E+09	0,9897
					64P	51089	14,55	105,7	6412	0,00	6177	6177	102,6	0,9975	6162	1,0406	1,12E+09	1,0302
					65P	51089	14,85	105,7	6912	0,00	6712	6712	105,4	0,9975	6695	1,0324	1,15E+09	1,0028
					66P	51196	14,53	106,2	6412	0,00	6144	6144	102,4	0,9961	6120	1,0477	1,12E+09	1,0371
					67P	51196	14,87	106,2	6912	0,00	6750	6750	105,5	0,9961	6724	1,0280	1,15E+09	1,0066
					68P	50986	14,81	105,5	6412	0,00	6637	6637	105	0,9989	6629	0,9672	1,14E+09	1,0048
					69P	50986	15,09	105,5	6912	0,00	7181	7181	107,7	0,9989	7173	0,9636	1,17E+09	0,9796
					70P	50986	14,21	105,7	6412	0,00	5645	5645	99,6	0,9989	5639	1,1372	1,10E+09	1,0612
					71P	50986	14,54	105,7	6912	0,00	6160	6160	102,5	0,9989	6153	1,1234	1,12E+09	1,0312
TSP	31365	15,44	123,8	6600	**72B**	19418	15,77	128,4	6600	1,00	6474	6539	122	1,0101	6605	0,9993	1,09E+09	1,0525
TSB	19712	15,8	122,4	6600	**73P**	31584	14,78	122,4	6600	1,00	5390	5444	116,4	0,9954	5419	1,2180	1,05E+09	1,0515
TTP	176094	15,72	80,5	14270	**74P**	176508	15,17	82,4	14270	1,00	12619	12745	77,5	0,9984	12725	1,1214	1,84E+09	1,0632
					75P	176508	15,45	83,2	14270	1,00	13364	13498	79	0,9984	13477	1,0589	1,87E+09	1,0532
					76P	176508	15,39	82,63	14270	1,00	13201	13201	78,7	0,9984	13180	1,0827	1,87E+09	1,0499
TUS	57097	14,71	119,6	7480	**77S**	57269	14,89	126,6	7480	1,00	7767	7845	121,5	0,9980	7829	0,9554	1,15E+09	1,0420
TVP	88160	15,96	102,9	12175	**78P**	88286	15,83	105,4	12175	1,00	11720	11837	101,9	0,9990	11826	1,0295	1,46E+09	1,0343
TVB	53940	16,31	101,0	12175	**79B**	54246	16,35	105,1	12175	1,00	12175	12297	101,3	0,9962	12250	0,9938	1,55E+09	1,0375
					80P	88286	16,28	107,4	12175	1,00	12877	13006	105,1	0,9990	12993	0,9370	1,61E+09	1,0219
TWP	113000	15,85	90,2	12715	**81P**	113165	15,52	95,5	12715	1,00	11818	11936	88,3	0,9990	11925	1,0663	1,66E+09	1,0815
TXP	2977	13,69	215,7	1332	**82P**	3004	13,53	249,1	1332	3,00	1198	1234	210,9	0,9940	1227	1,0860	4,43E+08	1,1811
TXB	2300	14,02	215,6	1332	**83P**	2961	13,47	898,5	1332	3,00	1165	1200	209,1	1,0036	1204	1,1061	4,41E+08	1,1936
					84B	2391	12,91	898,5	1332	3,00	892	919	191,8	0,9745	895	1,4878	4,23E+08	1,3013

Tablica 5. nastavak

BROJ MODELA	ISTISNINA s privjescima	V_{prog}	N_{BAZEN}	P_B	GRADNJA	ISTISNINA s privjescima	V_{PROG}	N_S	P_B	MEH. GUBICI ZA P.P.	P_D Iz bazena za V_{PP}	P_B Iz bazena za V_{PP}	N Iz bazena za V_{PP}	KOR. ISTISNINE	P_B KOR. ISTISNINA	CP (BI)	Rn_{Lwl}	k_2
	t	čv	min^{-1}	kW		t	čv	min^{-1}	kW		kW	kW	min^{-1}	m	kW			
TYP	76269	16,21	100,8	11526	**85P**	76526	16,33	104,4	11526	1,00	11762	11880	101,8	0,9978	11853	0,9724	1,59E+09	1,0255
					86P	76526	16,23	104,5	11526	1,00	11462	11577	100,9	0,9978	11551	0,9979	1,58E+09	1,0357
					87P	76526	16,28	105,0	11526	1,00	11611	11727	101,4	0,9978	11701	0,9851	1,58E+09	1,0355
					88P	76526	16,29	105,0	11526		11641	11641	101,5	0,9978	11615	0,9923	1,58E+09	1,0345
					89P	76526	16,44	104,8	11526		12103	12103	102,8	0,9978	12076	0,9545	1,60E+09	1,0195
					90P	76526	16,30	104,9	11526		11671	11671	101,6	0,9978	11645	0,9898	1,58E+09	1,0325
TZP	112941	15,6	101,7	12204	**91P**	113156	15,32	105,8	11526	1,00	11403	11517	99,6	0,9987	11502	1,0020	1,64E+09	1,0622
					92P	113156	15,26	105,2	11526		11529	11372	99,2	0,9987	11371	1,0149	1,63E+09	1,0605

Tablica 5. nastavak

BROJ MODELA	ISTISNINA s privjescima	V_{prog}	N_{BAZEN}	P_B	GRADNJA	ISTISNINA s privjescima	V_{PROG}	N_S	P_B	MEH. GUBICI ZA P.P.	P_D Iz bazena za V_{PP}	P_B Iz bazena za V_{PP}	N Iz bazena za V_{PP}	KOR. ISTISNINE	P_B KOR. ISTISNINA	CP (BI)	Rn_{LwI}	k_2
	t	čv	min^{-1}	kW		t	čv	min^{-1}	kW		kW	kW	min^{-1}	m	kW			
BAB	12345	16,4	79,3	4536	**93B**	20670	15,22	84,7	4725	1,0	4586	4632	81,3	0,9951	4609	1,0251	9,41E+08	1,0424
					94B	20600	15,21	85,4	4725	1,0	4574	4619	81,2	0,9974	4607	1,0256	9,20E+08	1,0519
					95B	20580	15,29	86,4	4725	1,0	4674	4721	81,7	0,9980	4712	1,0028	9,45E+08	1,0572
BBB	42582	15,06	105,7	8262	**96B**	42015	15,62	114,3	8262	1,0	9722	9819	110,3	1,0090	9907	0,8340	1,27E+09	1,0360
					97B	42015	15,58	114,2	8262	1,0	9598	9694	109,9	1,0090	9781	0,8447	1,23E+09	1,0393
					98B	42015	15,19	108,1	7414	1,0	8484	8569	105,7	1,0090	8646	0,8575	1,20E+09	1,0230
					99B	42225	15,94	113,1	8262	1,0	10769	10877	114,0	1,0056	10938	0,7553	1,26E+09	0,9921
					100B	41490	15,65	113,4	8262	1,0	9815	9913	110,7	1,0175	10086	0,8191	1,23E+09	1,0247
BCB	26639	15,55	89,9	7330	**101B**	26809	16,04	99,6	7330	2,0	7920	8078	93,0	0,9958	8044	0,9112	1,33E+09	1,0712
					102B	26809	15,86	97,4	7330	2,0	7472	7621	91,3	0,9958	7589	0,9659	1,32E+09	1,0667
BDB	32237	14,65	116,2	6435	**103B**	32291	14,96	126	6435	2,0	6959	7098	120,0	0,9989	7090	0,9076	1,16E+09	1,0499
					104B	32291	14,85	126,6	6435	2,0	6723	6858	118,7	0,9989	6850	0,9394	1,15E+09	1,0667
					105B	32291	14,79	126,3	6435	2,0	6599	6731	118,0	0,9989	6723	0,9571	1,14E+09	1,0706
					106B	32291	15,03	127	6435	2,0	7114	7256	120,9	0,9989	7248	0,8878	1,16E+09	1,0507
					107B	32291	15,05	128,9	6435	2,0	7159	7302	121,1	0,9989	7294	0,8822	1,16E+09	1,0642
BEB	7027	14,03	123,8	2700	**108B**	7034	14,26	128	2760	4,0	2856	2970	127,6	0,9993	2968	0,9300	6,37E+08	1,0034
					109B	7070	14,17	128	2760	4,0	2753	2863	126,1	0,9959	2852	0,9678	6,29E+08	1,0150
					110B	7070	14,22	128	2760	4,0	2810	2922	126,9	0,9959	2910	0,9484	6,12E+08	1,0086
BFB	36817	15,27	115,9	7300	**111B**	37039		122,6	7300	1,0	7495	7570	127,8	0,9960	7540	0,9682	1,24E+09	0,9593

Tablica 6. Bulk carrier

LITERATURA

[1] Dr. Ir. W. P. A. Van Lammeren, Otpor i propulzija brodova, Brodarski institut, 1952, (s engleskog preveo Prof. Ing. S. Šilović)

[2] SV. AA. Harvald, Resistance and propulsion of Ships, A Wiley-Interscience Publication John Wiley & Sons, SAD, 1987.

[3] A. Gamulin, Program korelacije model-brod, Interni izvještaj BI br. 127

[4] I. Antunović, Korelacija propulzivnih ispitivanja modela u BI s mjerenjima na pokusnim plovidbama izgrađenih brodova, interni izvještaj BI br. 149

[5] I. Antunović, A. Gamulin, Korelacija propulzivnih ispitivanja, Interni izvještaj br. 194

[6] I. Antunović, A. Gamulin, Correlation of Model Propulsion and Resistance Tests in Towing Tanks of Brodarski Institut with Measurements on Trial, 12th ITTC, Rim, 1969.

[7] Z. Batinić, Usporedba bazenskih prognoza ....., Savjetovanje o pokusnim plovidbma, Zagreb, 1980.

[8] A. Gamulin Korelacija model-brod za velike i pune brodove, Interni izvještaj BI br. 255

[9] Z. Batinić, Korelacija model-brod jednovijčanih brodova u balastu, građenih u brodogradilištu „3. MAJ“, I Simpozij Teorije i prakse brodogradnje in memoriam prof. L. Sorta, Opatija, 1980.

[10] Z. Batinić, Prikaz rasipanja rezultata ispitivanja“, Okrugli stol Hidrodinamika u osnivanju, Zagreb, 1987.

[11] Z. Batinić, I. Antunović, Prilog korelaciji i prognozi otpora i propulzije brodova punih formi u Brodarskom institutu, Zadatak A3I03, Faza 9b, Izvještaj BI 5004-M, svibanj, 1990.

[12] Z. Batinić, I. Antunović, Prilog korelaciji prognozi otpora i propulzije brodova punih formi u Brodarskom institutu, Zbornik radova IX simpozija „Teorija i praksa brodogradnje“ , stranice od 115 do 134, Dubrovnik, travanj, 1990.

[13] A. Zaninović, Prilog istraživanju korelacije kod propulzijskih ispitivanja na brodovima, Zbornik radova XVI simpozija „Teorija i praksa brodogradnje“ , stranice od 115 do 134, Plitvice, listopad, 2004., Tema 8. članak 3., 7 stranica

[14] Granville P.S. Partial Form Factors from Equivalent Bodies of Revolution for the Froude Method of Predicting Ship Resistance, STAR Symposium, 1975, 9-1

[15] Report of Performance Committee, 15th ITTC Conference, Netherland, 1978, str. 359 - 404

[16] The Specialist Commitee on Powering Performance Prediction, Proceedings of the 24th ITTC – Vol II, Edinburg, 2005.

[17] The Specialist Commitee on Powering Performance Prediction, Proceedings of the 25th ITTC – Vol II, Fukuoka, Japan, 2008.

[18] 23rd ITTC procedure za ispitivanje u bazenu, Venice, 2002,

[19] Antun Gamulin, Hidrodinamika i osnivanje oblika poludeplasmanskog broda (čamca) – PRILOZI – (od 1.7 do 1.11 i 2.1 i 2.2), Zagreb, 1990.

[20] 23rd ITTC Recommended Procedures, Full Scale Measurement Speed and Power Trials Trial Conduct, Venice, 2002

[21] Preporučeni postupci za mjerenje u naravi, Interno izdanje 114-I

[22] SB 9355 Standardi za provođenje pokusne plovidbe, Jadranbrod, 1990

[23] ISO 19019 Sea-going vessels and marine technology-Instructions for planning, carrying out and reporting sea trials, 2005

[24] ISO 15016 Ship and marine technology – Guidelines for the assessment of speed and power performance by analysis of speed trial data, 2002

[25] The Specialist Committee on Speed and Powering Trials, 23rd ITTC – Volume II, Venice, 2002.

[26] A. Zaninović, Zbirni rezultati analize otpora, autopropulzije i prognoznih dijagrama korištenih u magistarskom radu, Izvještaj Brodarskog instituta br. 503 - I, 2011.

[27] E. Kreyszig, Advanced Engineering Mathematics, 8th Edition, John Wiley & Sons Inc., Printed in Singapore, 1999.

KRATKI ŽIVOTOPIS

Ante Zaninović je rođen 26.10.1962.g. u Puli. Osnovnu i srednju školu završava u Puli. Od 1981 – 1985.g. studira i završava Mornaričku Vojnu Akademiju u Splitu. Nakon njenog završetka upisuje studij brodogradnje koji završava 1990.g. i stječe zvanje diplomiranog inženjera brodogradnje

Po završetku studija zapošljava se u Brodarskom institutu u kojem radi neprekidno do danas. U razdoblju od 1991. – 2002.g. radi u *Sektoru brodska hidrodinamika* kao mladi inženjer – istraživač, a potom i kao stariji istraživač. Vodi ispitivanja u bazenima *Sektora brodske hidrodinamike*, kao i ispitivanja koja su se provodila na brodovima u naravi. Reorganizacijom unutar Brodarskog instituta (2003.) formirana je organizacijska jedinica *Odjel za ispitivanja u naravi* gdje postaje zamjenikom voditelja. Godine 2006. imenovan je voditeljem iste organizacijske jedinice. Reorganizacijom Brodarskog instituta početkom 2009.g. postaje voditeljem novoformirane organizacijske jedinice *Čvrstoća, vibracije i ispitivanja u naravi*. Sredinom 2011g., objedinjavanjem više organizacijskih jedinica koja se bave mjerenjem u *Djelatnost Hidrodinamika plovnih objekata i modeliranje energetskih postrojenja*, imenovan je Zamjenikom voditelja djelatnosti.

Kroz svoj rad i djelovanje u Brodarskom institutu surađivao je na projektima pod vodstvom Fakulteta strojarstva i brodogradnje (Formiranje baze ribarskih brodova, ...).

Unutar brodske hidrodinamike radio je na projektima pod vodstvom dr. sc A. Gamulin, dr. sc. M. Ljubetić te dr. sc. M. Sambolek (Hidrodinamička optimizacija perspektivnih brodova, poludeplasmanskih, katamarana, glisera). Na projektima je radio na izradi programa za prognoziranje propulzije brzih brodova.
Objavio je dvadeset članaka i stručnih radova iz područja Hidrodinamike broda.

Proveo je mjerenja na više od sto pedeset brodova raznih tipova, veličina i namjena te napisao tehnička izvješća sa mjerenja. U mjerenjima u naravi uvodio je nove metode i tehnike mjerenja i analize rezultata s mjerenja.
Kroz rukovođenje u organizacijskoj jedinici Čvrstoća, vibracije i ispitivanja u naravi stječe znanja i iz mjerenja na drugim područjima tehnike.

Tijekom svog dvadesetogodišnjeg rada radio je i surađivao na projektima brodova raznih namjena: ratnih, radnih, jahti, brzih plovila i jedrilica. Po njegovim nacrtima izrađeno je do sada petnaestak plovila raznih namjena.

KRATKI ŽIVOTOPIS NA ENGLESKOM JEZIKU

Ante Zaninović was born on 26 October 1962 in Pula, where he finished primary and secondary school. From 1981 to 1985 he studied at the Naval Academy in Split. After graduation from the Naval Academy he enrolled at the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture in Zagreb where he earned his BSc degree in Naval Architecture.

After graduation he was employed at Brodarski Institute and has been working there since then. From 1991 to 2002 he worked in the Ship Hydrodynamics Department as an engineer - researcher, then as a senior researcher. He ran the tests in the towing tanks as well as full-scale tests during sea trials. In 2003 during reorganization within Brodarski Institute, a new organizational unit Full Scale Measurement Group was formed and he was appointed Deputy Head. In 2006 he became the head of the same organizational unit. In early 2009 he became the head of the newly created organizational unit Strength, Vibration and Full-Scale Measurements. When in 2011 a number of Brodarski Institute organizational units involved in measurement activities were consolidated into the unit named Marine Hydrodynamics and Modelling of Power Plants he has been appointed deputy head of the same.

Through his work and activities in Brodarski Institute he also collaborated in projects led by the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture in Zagreb (Development of a database for fishing vessels).

He worked within the Ship Hydrodynamics Department on projects led by A. Gamulin, PhD, M. Ljubetić, PhD, and M. Sambolek, PhD (Hydrodynamic optimization of promising ships, semi-displacement ships, catamarans, high-speed craft). Within these projects he worked on the development of programs for the prediction of ship propulsion. He published twenty articles and papers dealing with the topics in the field of ship hydrodynamics.

He participated in full-scale measurements onboard one hundred and fifty vessels of various types, sizes and purposes and prepared technical reports related to these measurements. In the area of full-scale measurements he introduced new methods and techniques in the measurements and analysis of the measurement results.
As the head of organizational unit Strength, Vibration and Full-Scale Measurements he has also acquired knowledge related to the measurements and measurement techniques in other technical fields.

Through the twenty years of professional experience he worked and collaborated in the projects of ships for various purposes: naval vessels, working boats, yachts, high-speed craft, sailing ships. On the basis of his drawings some fifteen vessels intended for various purposes have been made.