

PROCJENA OTPORA JEDRILICE DUŽINE OKO 15 M PRIKLADNE ZA PLOVIDBU SVJETSKIM MORIMA

Petrović, Moana

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:734483>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-12**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Prijediplomski sveučilišni studij brodogradnje

Završni rad

**PROCJENA OTPORA JEDRILICE DUŽINE OKO 15 M
PRIKLADNE ZA PLOVIDBU SVJETSKIM MORIMA**

Rijeka, rujan 2024.

Moana Petrović

0023106525

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Prijediplomski sveučilišni studij brodogradnje

Završni rad

**PROCJENA OTPORA JEDRILICE DUŽINE OKO 15 M
PRIKLADNE ZA PLOVIDBU SVJETSKIM MORIMA**

Mentor: Prof. dr. sc. Roko Dejhalla

Rijeka, rujan 2024.

Moana Petrović

0023106525

Rijeka, 15.03.2024.

Zavod: Zavod za brodogradnju i inženjerstvo morske tehnologije
Predmet: Hidrodinamika plovniha objekata I

ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Pristupnik: **Moana Petrović (0023106525)**
Studij: Sveučilišni prijediplomski studij brodogradnje (1020)

Zadatak: **PROCJENA OTPORA JEDRILICE DUŽINE OKO 15 M PRIKLADNE ZA PLOVIDBU SVJETSKIM MORIMA / RESISTANCE ESTIMATION OF SAILBOAT WITH LENGTH OF APPROX. 15 M SUITABLE FOR SAILING AROUND THE WORLD**

Opis zadatka:

Odabrati glavne dimenzije jedrilice dužine oko 15 m prikladne za plovidbu svjetskim morima. Definirati formu te izraditi crtež linija jedrilice. Primjenom odgovarajuće metode izraditi proračun otpora jedrilice za odabrano područje brzina i različite kutove nagiba. Rezultate prikazati tablično i grafički. Odrediti potrebnu snagu porivnog motora te odrediti geometrijske značajke odgovarajućeg brodskog vijka.

Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanja diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.

Zadatak uručen pristupniku: 20.03.2024.

Mentor:
prof. dr. sc. Roko Dejhalla

Predsjednik povjerenstva za
završni ispit:
prof. dr. sc. Roko Dejhalla

Izjava

Sukladno čl. 9 Pravilnika o završnom radu, završnom ispitu i završetku sveučilišnih prijediplomskih studija izjavljujem da sam samostalno izradila rad pod naslovom „*Procjena otpora jedrilice dužine oko 15m prikladne za plovidbu svjetskom morima*“, konzultirajući se s mentorom te primjenjujući znanja stečena tijekom prijediplomskog studija.

U Rijeci, rujan 2024.

Moana Petrović

1. UVOD

Zadatak proračuna otpora jedrilice i odabira motora i broskog vijka za istu, zadatak je koji se odvaja od standardnih metoda koje se uče u sklopu fakultetski obaveza. Forma jedrilice koju sam ja imala zadanu u ovom radu je forma relativno malenog broda (dužine oko 15 metara) i ne toliko standardnih koncepcija, kao na primjer kod trgovačkih brodova.

To čini razmatranje problema otpora malo drukčijim nego kod standardnih brodova. Otpor trenja se računa po standardnim metodama, dok se već kod preostalog otpora golog trupa ona oslanja na aproksimirajuće metode temeljene na polinomima dobivenim iz testova ispitivanja različitih brodova.

I privjesci broda su netipični, naročito kobilica koja ima najveći udio u otporu privjesaka.

Jedrilica ima dodatne sile koje djeluju na otpor, stvorene od ploidbe jedrom i vjetar koji je potreban za pogon, ali koji isto prouzrokuje porast otpora.

Jedrilica dok jedri (zavisno od smjera vjetra), često je nagnuta pod nekakvim kutom što čini promjene u obliku uronjenog dijela trupa.

Kada se priča o odabiru vijka i motora taj proces se isto razlikuje od odabira za, primjerice, velike trgovačke brodove. Dok se kod velikih brodova na temelju željene brzine koju brodovlasnik želi, projektira najoptimalniji vijak za taj brod i njegovu zadaću, za male jedrilice se procijeni što bi bilo optimalno – izabere se već postojeći dizajn vijka koji najbliže odgovara tom zahtjevu te se provjerava koliko je vijak „daleko“ od optimuma.

Proračun otpora se izvršio prema „Delft Systematic Yacht Hull Series“ testirane u „Delft Shiphydrodynamics Laboratory“, a odabir vijka i motora se radio po postupcima opisanim u knjizi „Principles of Yacht Design“.

2. OSNOVNI PODACI I ODABIR FORME JEDRILICE

Po zadanim dimenzijama i nacrtima linija napravljena su očitavanja rebara te je time određena forma trupa. Osnovni podaci za jedrilicu su:

Duljina broda, $L_{OA} = 14,95$ m

Širina trupa, $B_{MAX} = 4,3$ m

Gaz broda, $T = 1,96$ m

Za sve proračune podaci za morsku vodu (za 20°C) su:

Gustoća: $\rho = 1025$ kg/m³

Kinematička viskoznost: $\nu = 1,8831 \cdot 10^{-6}$ m²/s

3,2000 1,6500

12,8000 7,2000

2.1 Zadani hidrostatički podaci

Tablica 2.1 Hidrostatika

gaz	istisnina	Lwl	Bwl	Sc	Aw	Cp	Cm	LCB	LCF
m	kg	m	m	m ²	m ²	-	-	m	m
1,50	4775	11,617	2,691	29,365	20,24	0,41	0,274	6,402	6,465
1,55	5873	12,082	2,849	31,856	22,39	0,425	0,284	6,411	6,436
1,60	7074	12,468	2,981	34,151	24,27	0,44	0,296	6,412	6,398
1,65	8367	12,817	3,088	36,335	25,99	0,452	0,308	6,407	6,357
1,70	9746	13,145	3,174	38,438	27,56	0,462	0,321	6,397	6,315
1,75	11202	13,459	3,247	40,486	29,03	0,471	0,335	6,383	6,27
1,80	12731	13,76	3,313	42,493	30,40	0,478	0,349	6,367	6,221
1,85	14329	14,035	3,376	44,476	31,69	0,485	0,361	6,347	6,17
1,90	15991	14,257	3,436	46,422	32,91	0,492	0,374	6,326	6,117
1,95	17714	14,471	3,493	48,353	34,06	0,498	0,385	6,303	6,062
2,00	19494	14,578	3,546	50,224	35,11	0,508	0,396	6,279	6,01

Gdje je:

Lwl dužina vodne linije, m

Bwl širina vodne linije, m

Sc oplakivana površina trupa, m²

Aw površina vodne linije, m²

Cp prizmatični koeficijent

Cm koeficijent površine glavnog rebra

S obzirom da je gaz za zadani brod $T=1,96$ m, što nemamo u podacima za hidrostatičku, potrebni podatci su nađeni interpolacijom između dva najbliža gaza za koje imamo podatke kako je prikazano u sljedećoj tablici:

Tablica 2.2 Aproximacija podataka za zadani gaz ($T=1,96m$)

gaz	istisnina	Lwl	Bwl	Sc	Aw	Cp	Cm	LCB	LCF
m	kg	m	m	m ²	m ²	-	-	m	m
1,95	17714	14,471	3,493	48,353	34,057	0,498	0,385	6,303	6,062
2,00	19494	14,578	3,546	50,224	35,112	0,508	0,396	6,279	6,01
1,96	18110	14,4924	3,5036	48,7272	34,268	0,5	0,3872	6,2982	6,0516

3. OTPOR BRODA-Aproksimacija hidrodinamičkih sila jedrilice temeljena na metodi „Delft Systematic Yacht Hull Serije“

Proračun ćemo raditi po metodi „DSYHS“ koja se tijekom godina proširivala, a danas sadrži informacije o otporu golog trupa, otporu trupa sa privjescima u ravnom i nagnutom stanju, porastu otpora zbog momenta trima jedara, porastu otpora zbog bočne sile pri različitim brzinama broda te kutovima nagiba i kutovima zanošenja. U ovom radu proračun otpora će se vršiti za određeno područje brzina u ravnom i nagnutom položaju trupa.

Nove formulacije za relevantne hidrodinamičke sile u funkciji geometrije trupa su izvedene da bi se pokrilo što više različitih oblika trupa i dizajna privjesaka. Na sljedećim stranicama biti će predstavljena skoro cijela slika izraza koji se mogu koristiti za Prognozni dijagram.

3.1 Uvod u metodu

„DSYHS“ se sastoji od široke serije od oko 50-ak modela trupova jedrilica, koje su sve bile testirane u „Delft Shiphydrodynamics Laboratory“ na „Delft University of Tehnology“ kroz posljednje godine.

Modeli brodova su se ispitivali da bi se došlo do jednadžbi koje bi se mogle koristiti kao aproksimacijske metode za procjenu najvažnijih hidrodinamičkih sila na jedrilici. Pošto se kroz 25 godina postojanja metode dizajn jedrilica jako promijenio, došlo je do potrebe za promjenom oblika testiranih trupova te promjenom pristupa metodi analize izmjerenih podataka serije „DSYHS“. Zbog toga dolazi do toga da se razvijaju tri glavna modela trupa po kojima su nastali i ostali. „DSYHS“ je vjerojatno najveća sistematizirana serija s tako velikom dosljednošću u obliku modela trupa i u tehnikama izmjere i njihovoj analizi.

Na temelju dobivenih podataka iz serije, moguće je razviti cijeli Prognozni dijagram da bi se procijenio dizajn i moguće varijacije u dizajnu jedrilice te da bi se predvidjele njezine performanse u ranom dijelu razvoja, kada je greške moguće popraviti.

Kao dio serije ispitan je manji broj jedrilica kako bi se riješili specifični problemi koji nisu (u potpunosti) pokriveni metodom, a kao primjer može se spomenuti otpor privjesaka i bočne sile. S obzirom na razvoj i promjenu izgleda privjesaka u posljednjem desetljeću, standardni

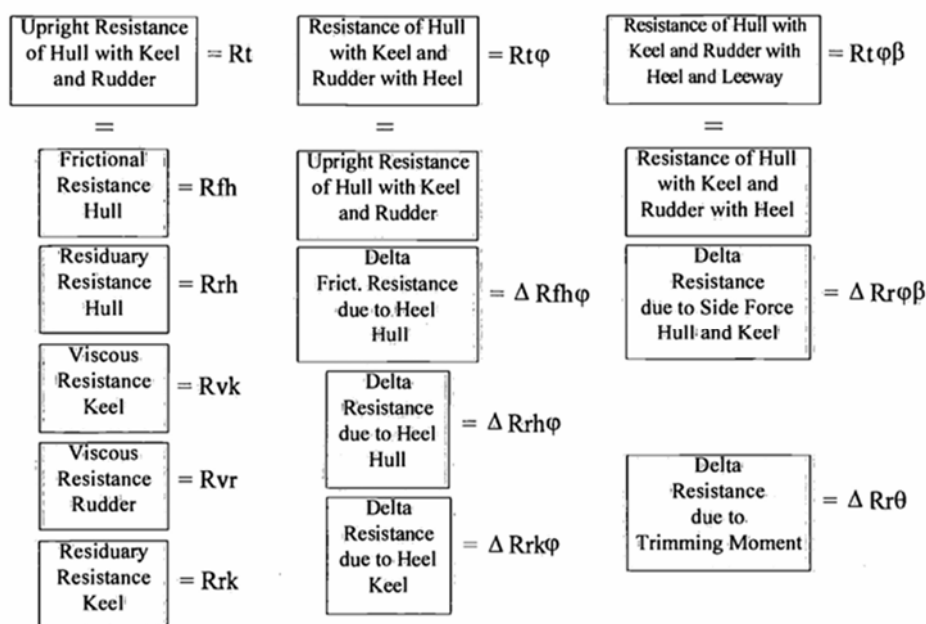
privjesci serije nisu više bili prilagođeni novim dizajnerskim trendovima. Cilj tih istraživanja bio je da se dođe do formula za izračun sila na privjescima posebno, tako da bi se mogla pokriti što veća razlika u modelima. Istraživanje je bilo bazirano na 13 različitih serija kobilica ispod jednog trupa i serije od 6 različitih kobilica ispod dva različita trupa.

Povećana zainteresiranost za razmatranje jedrilice na valovima i povećanje otpora zbog valova, doveli su do računanja preostalog otpora prilagođenog za upotrebu u Prognoznom dijagramu.

Kroz godine je došlo do promjene kod procjene hidrodinamičkih sila što je dovelo do dodatnih testiranja svih modela (i onih prethodno testiranih), pa se na primjer testirao otpor golog trupa te njegovo povećanje zbog trima i kuta nagiba odvojeno.

Sve promjene spomenute u tekstu dovele su do novih polinomnih izraza za aproksimaciju hidrodinamičkih sila na jedrilici.

Metoda kojom se hidrodinamičke sile rastavljaju u zasebne komponente je predstavljena u sljedećem dijagramu na Slici 1:



Slika 3.1 Podjela otpora trupa u komponente [1]

Izračun se započinje izračunom golog trupa u uspravnom stanju koji se dijeli na otpor trenja i preostali otpor. Potom se računa otpor kobilice i kormila također u uspravnom stanju, da bi se kompletirala cijela sastavnica viskoznog i preostalog otpora. Po potrebi se može dodati i otpor

valova, ukoliko ima potrebe (na primjer u smjeru kretanja jedrilice oštro u vjetar, do vjetra u bok). Tada je jedrilica nagnuta, pa se dodaje prirast otpora trenja i preostalog otpora trupa te kobilice i kormila zbog nagiba. Posljedično, pretpostavlja se zanošenje broda i povećanje otpora radi bočne sile, koje se proračunava kao funkcija kuta nagiba.

Na posljjetku sumiranjem svih spomenutih komponenti dolazimo do procjene ukupnog otpora jedrilice. Svaka od pojedinih komponenti i izrazi za računanje istih bit će objašnjeni u sljedećim izrazima.

Izraz za ukupan otpor može se napisati kao suma komponenti kao što je prikazano u sljedećem izrazu:

$$R_{t\phi\beta} = R_{fh\phi} + R_{vkr} + R_{rh} + \Delta R_{rh\phi} + R_{rk} + \Delta R_{rk\phi} + R_i \quad (3.1)$$

Gdje je:

$R_{t\phi\beta}$ Otpor trupa sa kobilicom i kormilom pod nagibom i sa kutom zanošenja, N

$R_{fh\phi}$ Otpor trenja trupa sa kutom nagiba, N

R_{vkr} Viskozni otpor kobilice, N

R_{rh} Preostali otpor trupa, N

$\Delta R_{rh\phi}$ Porast preostalog otpora trupa radi nagiba broda, N

R_{rk} Preostali otpor kobilice, N

$\Delta R_{rk\phi}$ Porast preostalog otpora radi nagiba kobilice, N

R_i Inducirani otpor, N

3.2 Opis metode

Originalni glavni model trupa za Delft Systematic Yacht Hull Seris je bio „Standfast 43“ iz 1974. godine. To je bio tipičan, suvremeni trkači trup jedrilice iz kojeg su izvedene varijacije za ostale testirane modele te je napravljena Serija 1 (od modela 2 do modela 22). Svi modeli serije su ispitivani u bazenima hidrodinamičkih instituta tijekom razdoblja od 10 godina.

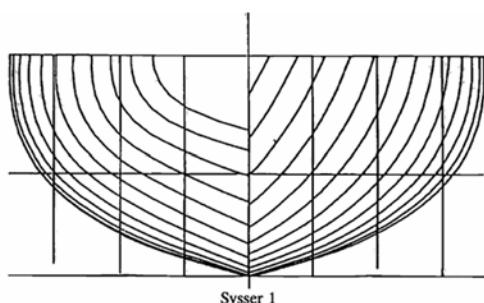
Nakon tog razdoblja dizajn jedrilica se podosta promijenio u odnosu na glavni model te je došlo do potrebe za uvođenjem novog glavnog modela za testiranje. Iz tog modela nastala je nova serija metode, „DSYHS Series 2“ koja sadrži modele od dvadesettećeg do dvadesetosmog. Nakon toga, na temelju istog glavnog modela razvija se Serija 3 sa 12 novih modela s jako malom istisninom i većim omjerom duljine i širine (do modela 40). Posljednji glavni model kao temelj za Seriju 4 predstavljen je 1995. godine u New Yorku od strane Sparkmana i Stephensa. To je model „IMS 40“, projektiran specijalno za istraživanja i testiranja na način da mu izmjere

budu nekakav prosjek standardnih mjera (IMS-Internationa Measurement System). Na temelju tog modela (model 44), testirano je još 9 modela (od modela 42 do 50).

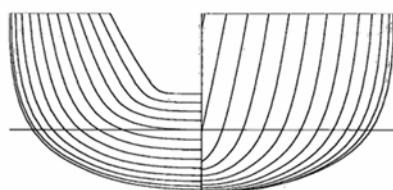
Generalno je kroz metodu „DSYHS“ ispitan dovoljan broj raznolikih oblika trupova da bi rezultati ispitivanja i izvedeni zaključci i jednađžbe bili upotrebljivi za velik raspon različitih jedrilica.

Bez obzira na širok raspon trupova koje metoda pokriva, ne znači da kroz budućnost neće biti potrebe za novim testiranjima zbog napretka u projektiranju jedrilica.

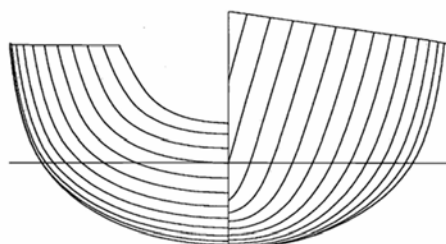
Da bi se stekao dojam izgleda glavnih modela metode, u nastavku je dan prikaz rebara sva tri glavna modela sa tablicom parametara istih.



Sysser 1



Sysser 25



Sysser 44

		Ranges		
Length - Beam Ratio	$\frac{Lwl}{Bwl}$	2.73	to	5.00
Beam - Draft Ratio	$\frac{Bwl}{Tc}$	2.46	to	19.38
Length - Displacement Ratio	$\frac{Lwl}{\nabla e^{\beta}}$	4.34	to	8.50
Longitudinal Centre of Buoyancy	LCB	0.0 %	to	-8.2 %
Longitudinal Centre of Floatation	LCF	-1.8 %	to	-9.5 %
Prismatic Coefficient	Cp	0.52	to	0.60
Midship Area Coefficient	Cm	0.65	to	0.78
Loading Factor	$\frac{Aw}{\nabla e^{\beta}}$	3.78	to	12.67

Slika 3.2 Nacrti rebara glavnih modela metode sa njihovim izmjerama [1]

3.3 Testiranje modela

Svi modeli su testirani u bazenu #1 koji je dug 145 metara, širok 4.5 metra i dubok 2.5 metara. Dužina vodne linije je između 1.6 metara (Serija 1) do 2.00 metara (ostale serije).

Za sve modele je testiran goli trup broda (bez privjesaka) za raspon brzina od $F_n = 0.10$ do $F_n = 0.60$. Mjerio se otpor, nosivost i trim za sljedeća stanja:

- Trup u uspravnom stanju bez korekcije za pogonsku silu jedrilja
- Trup u uspravnom stanju s korekcijom za trim zbog pogonske sile jedrilja
- Trup sa kutom nagiba od 20 stupnjeva bez korekcije trima

Da bi se održala dosljednost metode, kroz sve serije je korišteno isto kormilo i ista kobilica za sve modele. To znači da relativna veličina kobilice i kormila na jedrilici koja ima duljinu vodne linije 10 metara ovisi o veličini modela i njegovom mjerilu.

Svi privjesci testirani su u sljedećim uvjetima:

- Uspravni bez korekcije trima zbog pogonske sile jedara (za brzine od $F_n = 0.10$ do $F_n = 0.60$)
- U međusobnim kombinacijama za:
 - 4 različita kuta (npr. 0, 10, 20, 30 stupnjeva)
 - barem tri različite brzine (u rasponu $F_n = 0.25$ do 0.45)
 - 4 različita kuta zanošenja (npr. od 0 do 12 stupnjeva)

Tijekom eksperimenta mjerene su sljedeće vrijednosti:

- Brzina napredovanja modela
- Sila otpora
- Kut nagiba
- Moment nagiba
- Kut zanošenja
- Bočna sila
- Nosivost i trim broda (pri brzini)
- Moment trima

Standardne metode mjerenja za jedrilice u Delft Shiphydromechanics Laboratory-u su bile korištene kroz sve serije. To znači da su modeli bili vučeni kolicima bazena koja su dopuštala kretanja u vertikalnom smjeru, nagib oko uzdužne osi i nagib oko poprečne osi. Model je bio spojen na kolica s dva nosača po dužini jednako udaljena od težišta modela, jedan smješten na krmi drugi na pramcu modela.

Da bi se dobilo turbulentno strujanje za vrijeme ispitivanja, na modelu trupa i modelima privjesaka su pričvršćene trake za izazivanje turbulencije kod bazenskih ispitivanja. Na trupu su smještene 3 trake debljine 4 cm na jednakim udaljenostima, počevši od prednjeg kraja vodne linije. Na kobilici i kormilu smještena je po jedna traka, debljine 3 cm za kobilicu i debljine 2 cm za kormilo. Da bi se isključio otpor traka iz rezultata testiranja svi testovi su ponovljeni dva puta, jednom sa polovinom širine traka i drugi put sa trakama cijele širine. Razlika između dva navedena uvjeta služi za određivanje otpora samih traka. Otpor modela broda dobije se oduzimanjem otpora traka od izmjerenog otpora iz testa.

Svi podaci modela broda su ekstrapolirani na jedrilicu s vodnom linijom dužine 10 m. Ekstrapolacija se vrši prema Froudovoj metodi.

Za određivanje otpora trenja R_f koristi se sljedeći izraz:

$$R_f = \frac{1}{2} * \rho * V^2 * S * C_f \quad (3.2)$$

Gdje je:

ρ gustoća vode, kg/m^3

V brzina napredovanja broda, m/s

S oplakana površina broda (pri mirovanju broda), m^2

C_f (bezdimenzijski) koeficijent trenja

Za određivanje koeficijenta trenja koristi se eksploatacijska linija ITTC-57, prema kojoj vrijedi:

$$C_f = \frac{0,075}{(\log(Re)-2)^2} \quad (3.3)$$

Gdje se Reynoldsov broj (R_n) trupa određuje prema:

$$Rn = \frac{V * 0.7 * Lwl}{\nu} \quad (3.4)$$

Gdje je:

Lwl dužina vodne linije, m

ν kinematička viskoznost, m²/s

U izrazu za Reynoldsov broj trupa za duljinu je uvršteno 70 posto duljine vodne linije, dok je kod privjesaka uzeta njihova prosječna duljina.

Za uspravno stanje modela faktor forme trupa (k) je određen pomoću Prohaskine metode, međutim s obzirom na to da je faktor forme (k) izrazito mali (od k = 0.03 do k = 0.07) i da nema dobre formulacije za njegovo računanje kao funkcije geometrije trupa, odlučeno je da se u metodi neće određivati „k“ da bi se izračunao viskozni otpor eksploatacijskim metodama.

3.4 Otpor u mirnoj vodi

3.4.1 Otpor golog trupa

Prva od komponenata otpora broda koja se računa je otpor golog trupa broda.

3.4.1.1 Otpor golog trupa u uspravnom položaju

Prvo se računa otpor golog trupa u uspravnom položaju koji se dijeli na dva dijela: otpor trenja (ili viskozni otpor) golog trupa te preostali otpor.

3.4.1.1.1 Viskozni otpor

Računa se pomoću sljedeće formule:

$$R_{fh} = \frac{1}{2} * \rho * V^2 * S * C_f \quad (3.5)$$

Gdje je:

ρ gustoća vode, kg/m³

V brzina napredovanja broda, m/s

S_c oplakivana površina trupa (pri mirovanju broda), m²

C_f (bez dimenzijski) koeficijent trenja

Oplakivana površina trupa smatra se poznatom iz proračuna hidrostatičke.

Potpuno turbulentno strujanje oko trupa broda je pretpostavljeno za eksperiment kao i za strujanje u stvarnosti, pa se za računanje koeficijenta trenja C_f uzima ekstrapolacija linija prema ITTC 57. Iako je za duljinu kod određivanja Reynoldsovog broja izabrano 70% duljine vodne linije, opravdano kod Serije 1, taj odabir ostaje diskutabilan za Serije 2, 3 i 4. Za te serije bi točnije bilo uzeti 90% duljine vodne linije, ali zbog dosljednosti metode – za sve Serije „DYSHS“ metode uzeta je duljina od 70% L_{wl} za računanje R_n. Valja naglasiti da to ujedno utječe i na iznos preostalog otpora (ne samo viskoznog).

U nastavku je tablica proračunatog otpora trenja za trup u uspravnom položaju, po gore navedenim formulama. Vrijednosti otpora su nađene za raspon brzina od $Fn = 0,15$ do $Fn = 0,6$, gdje se Froudov broj računa po sljedećoj formuli:

$$Fn = \frac{V}{\sqrt{g \cdot Lwl}} \quad (3.6)$$

Gdje je:

Fn (bezdimenzijski) Froudov broj

V brzina broda, m/s

g gravitacijska konstanta, Nm^2/kg^2

Lwl dužina vodne linije, m

Tablica 3.1 Proračun otpora trenja za trup broda u uspravnom položaju

Fr	V	Rn	log Rn	Cf	Rfh
	m/s	/	/	/	N
0,1000	3,7696	20304279,0108	7,3076	0,0027	945,5853
0,1500	4,6168	24867561,5858	7,3956	0,0026	1372,4656
0,2000	5,3310	28714586,7513	7,4581	0,0025	1788,3052
0,2500	5,9603	32103883,9608	7,5066	0,0025	2196,2141
0,3000	6,5291	35168042,8577	7,5461	0,0024	2597,9653
0,3500	7,0523	37985827,7719	7,5796	0,0024	2994,7018
0,4000	7,5392	40608558,0216	7,6086	0,0024	3387,2197
0,4500	7,9965	43071880,1269	7,6342	0,0024	3776,1043
0,5000	8,4291	45401748,1022	7,6571	0,0023	4161,8032
0,5500	8,8405	47617755,1320	7,6778	0,0023	4544,6694
0,6000	9,2336	49735123,1715	7,6967	0,0023	4924,9882

Kako je napisano ranije, faktor forme „ k “ se ne uzima u obzir u „DSYHS“ metodi kod pretvaranja otpora trenja u viskozni otpor trupa. Ta odluka je donesena zbog nedostatka zadovoljavajuće formule za „ k “ kao funkcije parametara proizvoljnog trupa. Isto tako se takve jednadžbe ne mogu izvesti ni iz rezultata „DSYHS“ metode. Zbog svega navedenog, za „ k “ se uzima da je jednak nuli, a utjecaj forme broda se uzima kao dio komponente preostalog otpora broda.

3.4.1.1.2 Preostali otpor

Pomoću iskustva temeljenog na prethodnim izrazima, da bismo odredili preostali otpor jedrilice u uspravnom položaju koristimo sljedeći izraz:

$$\frac{R_{rh}}{\nabla c \cdot \rho \cdot g} = a_0 + \left(a_1 \cdot \frac{LCB_{fpp}}{Lwl} + a_2 \cdot Cp + a_3 \cdot \frac{\nabla c^{2/3}}{Aw} \cdot a_4 \cdot \frac{Bwl}{Lwl} \right) \cdot LW + \left(a_5 \cdot \frac{\nabla c^{1/3}}{Sc} + a_6 \cdot \frac{LCB_{fpp}}{LCF_{fpp}} + a_7 \cdot \left(\frac{LCB_{fpp}}{Lwl} \right)^2 + a_8 \cdot Cp^2 \right) \cdot \frac{\nabla^{1/3}}{Lwl} \quad (3.7)$$

Gdje je:

- R_{rh} preostali otpor golog trupa, N
- ∇c volumen istisnine golog trupa, m^3
- ρ gustoća mora, kg/m^3
- Lwl duljina vodne linije, m
- Bwl širina vodne linije, m
- LCB_{fpp} uzdužni položaj težišta uzgona, m
- LCF_{fpp} uzdužni položaj težišta uzgona m
- fpp pramčani perpedinkular (rebro 10)
- Cp prizmatični (bezdimenzijski) koeficijent
- Aw površina na vodnoj liniji, m^2
- Sc oplakivana površina golog trupa pri mirovanju broda, m^2

Neka od glavnih razmatranja koja su dovela do parametara uvrštenih u prethodni polinom:

1. Parametri u izrazu su upareni sa omjerom istisnine i duljine da bi postali neovisni o istisnini. Izraz je složen tako da pretpostavljeni porast otpora ima sličan trend kao omjer istisnine i duljine.
2. Omjer širine i dužine uveden je za sve brzine.
3. Omjer širine i gaza je zamijenjen omjerom istisnine i oplakivane površine trupa.
4. LCB i LCF su odvojeni da bi se koristili kao mjera za deformaciju trupa.
5. Kvadrati Cp -a i LCB -a su uvedeni da bi doprinijeli optimalnim vrijednostima Cp -a i LCB -a kao funkcije brzine u rasponu pokrivenom polinomom.

Koeficijenti od a_0 do a_8 su definirani u sklopu metode za različite Froudove brojeve od $Fn = 0.10$ do $Fn = 0.60$ kako je prikazano u sljedećoj tablici:

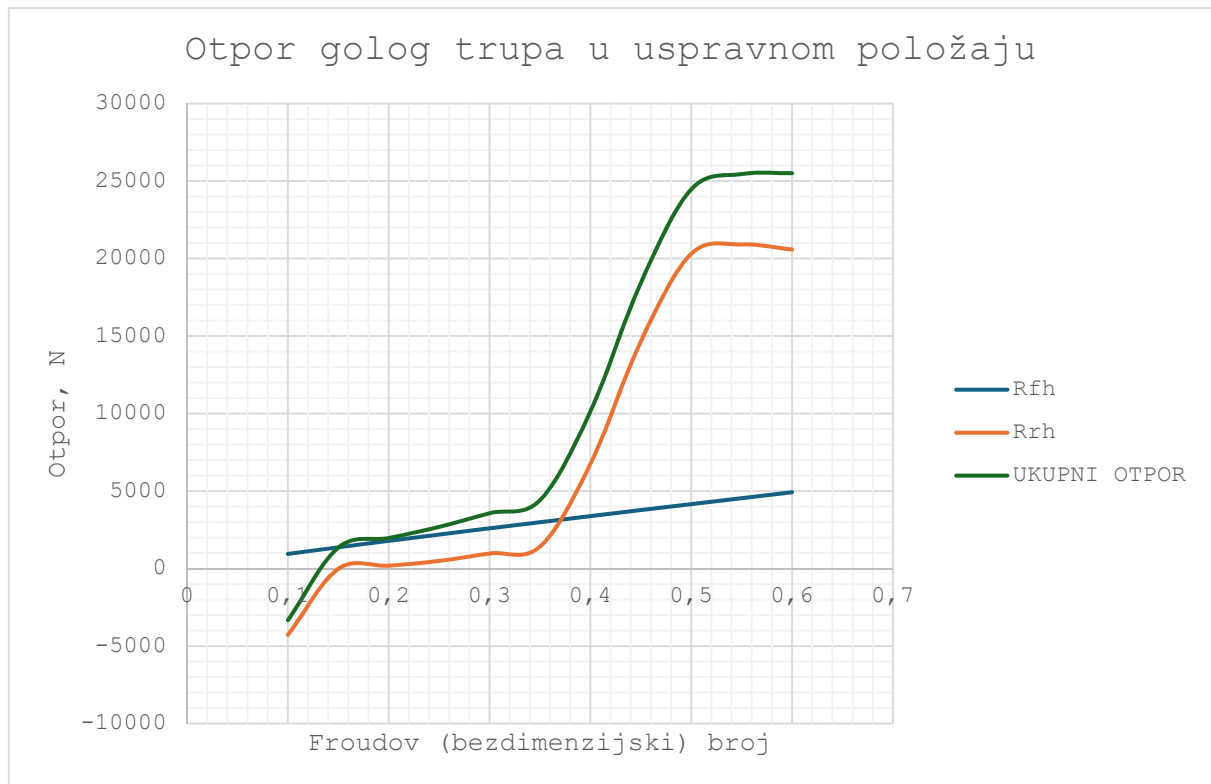
Tablica 3.2 Koeficijenti polinoma iz jednadžbe (3.7): Preostali otpor golog trupa

Fn	0,1000	0,1500	0,2000	0,2500	0,3000	0,3500
a0	-0,0014	0,0004	0,0014	0,0027	0,0056	0,0032
a1	0,0403	-0,1808	-0,1071	0,0463	-0,8005	-0,1011
a2	0,0470	0,1793	0,0637	-0,1263	0,4891	-0,0813
a3	-0,0227	-0,0004	0,0090	0,0150	0,0269	-0,0382
a4	-0,0119	0,0097	0,0153	0,0274	0,0519	0,0320
a5	0,0061	0,0118	0,0011	-0,0299	-0,0313	-0,1481
a6	-0,0086	-0,0055	0,0012	0,0110	0,0292	0,0837
a7	-0,0307	0,1721	0,1021	-0,0595	0,7314	0,0223
a8	-0,5530	-0,1728	-0,0648	0,1220	-0,3619	0,1587
Rrh, N	-4277,0495	-11,1690	185,8004	493,4375	976,5694	1415,6224

Fn	0,4000	0,4500	0,5000	0,5500	0,6000
a0	-0,0064	-0,0171	-0,0201	0,0495	0,0808
a1	2,3095	3,4017	7,1576	1,5618	-5,3233
a2	-1,5152	-1,9862	-6,3304	-6,0661	-1,1513
a3	0,0751	0,3242	0,5829	0,8641	0,9663
a4	-0,0858	-0,1450	0,1630	1,1702	1,6084
a5	-0,5349	-0,8043	-0,3966	1,7610	2,7459
a6	0,1715	0,2952	0,5023	0,9176	0,8491
a7	-2,4550	-3,5284	-7,1579	-2,1191	4,7129
a8	1,1865	1,3575	5,2534	5,4281	1,1089
Rrh, N	6742,7347	14657,1482	20307,8884	20906,7752	20581,6536

Krivulje otpora modela DSYHS metode, izračunate prethodnim polinomnim izrazom, pokazale su dovoljnu sličnost sa izmjerenim podacima za cijeli raspon testiranih brzina.

U nastavku je grafički prikaz otpora trenja golog trupa, preostalog otpora te ukupnog otpora trupa u uspravnom položaju.



Slika 3.3 Grafički prikaz otpora golog trupa zadane jedrilice

3.4.1.2 Promjena otpora zbog nagiba broda

Kada dođe do naginjanja jedrilice, dolazi i do promjene njenog otpora. U stvarnosti taj kut je izazvan poprečnim silama na jedrilju. To upućuje da sile koje podižu trup i njegove privjeske čine ogroman dio ukupnog otpora. Da bismo bili u mogućnosti izmjeriti porast tog otpora što točnije, prvi dio proračuna bio bi sam otpor zbog nagiba broda (bez bočnih sila). Ta promjena otpora je podijeljena u dvije komponente, viskozni otpor i preostali otpor.

3.4.1.2.1 Promjena viskoznog otpora

Promjeni viskoznog otpora golog trupa zbog nagiba broda, isključivo pridonosi promjena oplakivane površine trupa, što dovodi do zaključka da promjena faktora forme „k“ nije uzeta u obzir. Taj pristup proizlazi iz dva zaključka:

1. Faktor forme nije uzet u obzir ni kod uspravnog računanja viskoznog otpora.
2. Promjena faktora forme zbog nagiba broda se teško može izvući iz podataka dobivenih ispitivanjima u bazenu. Model se u bazenu može vući pod nagibom, ali tada nema distribucije bočne sile po dužini trupa što u stvarnosti nije slučaj. To upozorava na moguću zabunu između komponente povećanja otpora zbog nagiba i faktora forme.

Iz rezultata hidrostatičke metode DSYHS koji su izračunati za sve modele promjena oplakivane površine trupa sa nagibom je određena. Ta promjena može biti aproksimirana sa dovoljnom točnošću pomoću sljedećeg izraza:

$$Sc_{\varphi} = Sc_{(\varphi=0)} \cdot \left(1 + \frac{1}{100} \cdot \left(s_0 + s_1 \cdot \frac{Bwl}{Tc} + s_2 \cdot \left(\frac{Bwl}{Tc} \right)^2 + s_3 \cdot Cm \right) \right) \quad (3.8)$$

Gdje je:

- Bwl širina vodne linije, m
- Tc gaz golog trupa, m
- Cm (bezdimenzijski) koeficijent poprečnog presjeka broda
- Sc_{φ} oplakivana površina trupa nagnutoga za 20°, m²

U sljedećoj tablici prikazani su koeficijenti od s_0 do s_3 za različite kutove nagiba i rezultati za promjenu oplakivane površine razmatrane jedrilice:

Tablica 3.3 Koeficijenti za jednadžbu (3.8): Oplakivana površina trupa pri nagibu od 20°

$\varphi, ^\circ$	5,000	10,000	15,000	20,000	25,000	30,000	35,000
s_0	-4,112	-4,522	-3,291	1,850	6,510	12,334	14,648
s_1	0,054	-0,132	-0,389	-1,200	-2,305	-3,911	-5,182
s_2	-0,027	-0,077	-0,118	-0,109	-0,066	0,024	0,102
s_3	6,329	8,738	8,949	5,364	3,443	1,767	3,497
Sc_φ, m^2	47,727	46,941	46,476	46,462	46,223	45,951	45,274

Nakon što smo dobili procjenu iznosa oplakivane površine pri kutovima nagiba za naš trup pomoću izraza (3.5.), ali s uvrštenom površinom pri kutu nagiba (Sc_φ), izračunatoj u prethodnoj tablici, u sljedećoj tablici računamo otpor trenja:

Tablica 3.4 Proračun promjene otpora trenja zbog nagiba broda

Fr	V	Cf	$R_{fh\varphi=5}$	$R_{fh\varphi=10}$	$R_{fh\varphi=15}$	$R_{fh\varphi=20}$	$R_{fh\varphi=25}$	$R_{fh\varphi=30}$	$R_{fh\varphi=35}$
/	m/s	/	N	N	N	N	N	N	N
0,1	3,77	0,0027	926,2	910,9	901,9	901,6	897,0	891,7	878,6
0,15	4,62	0,0026	1344,3	1322,2	1309,1	1308,7	1301,9	1294,3	1275,2
0,2	5,33	0,0025	1751,6	1722,8	1705,7	1705,2	1696,4	1686,4	1661,6
0,25	5,96	0,0025	2151,1	2115,7	2094,8	2094,1	2083,4	2071,1	2040,6
0,3	6,53	0,0024	2544,6	2502,7	2478,0	2477,2	2464,5	2450,0	2413,9
0,35	7,05	0,0024	2933,2	2884,9	2856,4	2855,5	2840,8	2824,1	2782,5
0,4	7,54	0,0024	3317,7	3263,1	3230,8	3229,8	3213,2	3194,3	3147,2
0,45	8,00	0,0024	3698,6	3637,7	3601,7	3600,6	3582,1	3561,0	3508,5
0,5	8,43	0,0023	4076,4	4009,3	3969,6	3968,3	3948,0	3924,7	3866,9
0,55	8,84	0,0023	4451,4	4378,1	4334,8	4333,4	4311,1	4285,8	4222,7
0,6	9,23	0,0023	4823,9	4744,5	4697,5	4696,0	4671,9	4644,4	4576,0

Ako usporedimo oplakivanu površinu nagnutog trupa i oplakivanu površinu u uspravnom stanju ($Sc=48,727 m^2$), vidimo da se površina s kutom nagiba smanjuje, što znači i da je otpor trenja u takvom slučaju manjeg iznosa.

3.4.1.2.2 Promjena u preostalom otporu

Zbog asimetrije trupa kada je brod nagnut i posljedične promjene u rasporedu volumena istisnine po dužini broda, velika je vjerojatnost da će se pojaviti promjena u iznosu preostalog otpora.

Procjena te promjene se može napraviti na dva različita načina:

1. Da se koriste isti polinomi koji su korišteni za otpor u uspravnom položaju golog trupa, ali naći nove koeficijente koji se temelje na podacima iz ispitivanja trupa pod kutom.
2. Promjena preostalog otpora zbog kuta nagiba odredi se iz izmjerenih podataka i pojednostavljeni polinomni izrazi se formiraju za računanje te komponente zasebno.

Oba pristupa imaju pozitivnih i negativnih strana. Predviđanje ukupnog preostalog otpora nagnutog trupa sa značajkama uspravne geometrije je manje opravdano od predviđanja otpora u uspravnom položaju sa značajkama trupa za uspravni položaj i dodanom malom promjenom zbog nagiba. Ovdje ćemo koristiti drugu metodu za proračun, iako i prvi način daje jako slične rezultate.

Promjena preostalog otpora golog trupa, zbog nagiba je izvedena iz izmjerenog ukupnog otpora za nagib od 0 i 20 stupnjeva. Zatim se izračuna viskozni otpor u uspravnom položaju i s nagibom, pa se dobiveni rezultati oduzmu od ukupnog otpora nagnutog trupa, prema sljedećoj formuli:

$$\Delta Rrh\varphi_{(izmjereno)} = \Delta Rrh\varphi_{(izmjereno)} - Rrh_{(izračunato)} \quad (3.9)$$

Porast preostalog otpora pod nagibom od 20 stupnjeva može se izračunati prema jednadžbi:

$$\frac{\Delta Rrh_{\varphi=20}}{Vc \cdot \rho \cdot g} = u_0 + u_1 \cdot \frac{Lwl}{Bwl} + u_2 \cdot \frac{Bwl}{Tc} + u_3 \cdot \left(\frac{Bwl}{Tc}\right)^2 + u_4 \cdot LCB + u_5 \cdot LCB^2 \quad (3.10)$$

s koeficijentima u_0 do u_5 navedenim u sljedećoj tablici za različite brzine:

Tablica 3.5 Koeficijenti za jednadžbu (3.10): Proračun preostalog otpora trupa nagnutoga za 20°

Fn	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55
u_0	-0,0268	0,6628	1,6433	-0,8659	-3,2715	-0,1976	1,5873
u_1	-0,0014	-0,0632	-0,2144	-0,0354	0,1372	-0,148	-0,3749
u_2	-0,0057	-0,0699	-0,1640	0,2226	0,5547	-0,6593	-0,7105
u_3	0,0016	0,0069	0,0199	0,0188	0,0268	0,1862	0,2146
u_4	-0,0070	0,0459	-0,0540	-0,5800	-1,0064	-0,7489	-0,4818
u_5	-0,0017	-0,0004	-0,0268	-0,1133	-0,2026	-0,1648	-0,1174

Pomoću polinoma došli smo do izračuna preostalog otpora trupa nagnutog za 20° za sve promatrane brzine zapisane u sljedećoj tablici:

Tablica 3.6 Promjena preostalog otpora trupa nagnutog 20°

F_n	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55
$\Delta Rrh_{\varphi=20}$, N	-23,7	88,4	-172,5	-1350,3	-2431,2	-1915,0	-1054,0

Ovisnost porasta otpora o nagibu trupa određena je s puno manjom bazom podataka, ali su se rezultati pokazali dovoljno dobri.

Formula za određivanje porasta preostalog otpora zbog kuta nagiba glasi:

$$\Delta Rrh_{\varphi} = \Delta Rrh_{\varphi=20} \cdot 6.0 \cdot \varphi^{1.7} \quad (3.11)$$

sa kutom φ u radijanima. U sljedećoj tablici su prikazani rezultati proračuna:

Tablica 3.7 Prirast preostalog otpora za različite kutove nagiba

F_n	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6
	$\Delta Rrh_{\varphi=5}$	$\Delta Rrh_{\varphi=10}$	$\Delta Rrh_{\varphi=15}$	$\Delta Rrh_{\varphi=20}$	$\Delta Rrh_{\varphi=25}$	$\Delta Rrh_{\varphi=30}$	$\Delta Rrh_{\varphi=35}$
5,0	-2,2	8,4	-16,4	-128,2	-230,9	-181,9	-100,1
10,0	-7,3	27,3	-53,2	-416,7	-750,2	-590,9	-325,2
15,0	-14,6	54,3	-106,0	-830,1	-1494,6	-1177,3	-648,0
20,0	-23,7	88,6	-172,9	-1353,7	-2437,3	-1919,9	-1056,7
25,0	-34,7	129,5	-252,7	-1978,3	-3561,7	-2805,5	-1544,2
30,0	-47,3	176,6	-344,5	-2697,1	-4855,9	-3824,9	-2105,3
35,0	-61,4	229,5	-447,8	-3505,1	-6310,7	-4970,9	-2736,0

Vidljivo je iz prikaza da je porast otpora zbog nagiba relativno mali u usporedbi sa otporom za uspravno stanje trupa.

3.4.2 Otpor privjesaka

3.4.2.1 Viskozni otpor privjesaka

Viskozni otpor privjesaka, R_v je zbroj otpora trenja i drugih viskozni efekata na otpor popu faktora forme k :

$$R_v = R_f \cdot (1 + k) \quad (3.12)$$

Za računanje otpora trenja koristimo sljedeću formulu:

$$R_f = \frac{1}{2} * \rho * V^2 * S * C_f \quad (3.13)$$

U formuli se koeficijent otpora trenja računa prema ITTC 57 metodi:

$$C_f = \frac{0,075}{(\log(Re)-2)^2} \quad (3.14)$$

za turbulentno strujanje. Za određivanje Reynoldsovog broja, R_n za duljinu uvrštenu u formulu koristi se prosječna duljina privjesaka ili ako su privjesci podijeljeni u segmente, koristi se dužina svakog segmenta privjesaka zasebno.

U ovom radu nije se uzimala u obzir ovisnost poprečnog presjeka privjesaka i graničnog sloja uz iste (u kojem se strujanje mijenja iz laminarnog u turbulentno). Općenito, još uvijek nije riješen problem strujanja u graničnom sloju, osim uz približne korekcije otpora trenja i utjecaja forme.

Viskozni otpor i otpor zbog oblika forme uzet je u proračun pomoću dobro poznate formule za koeficijent forme „ k “ (iz knjige „Dinamika otpora fluida“ autora Hoernera) i koja je općenito prihvaćena u aerodinamičkim znanostima. Formula prikazuje faktor forme kao funkciju relativne debljine sekcije koja se promatra, a glasi:

$$(1 + k) = \left(1 + 2 \cdot \frac{t}{c} + 60 \cdot \left(\frac{t}{c}\right)^4\right) \quad (3.15)$$

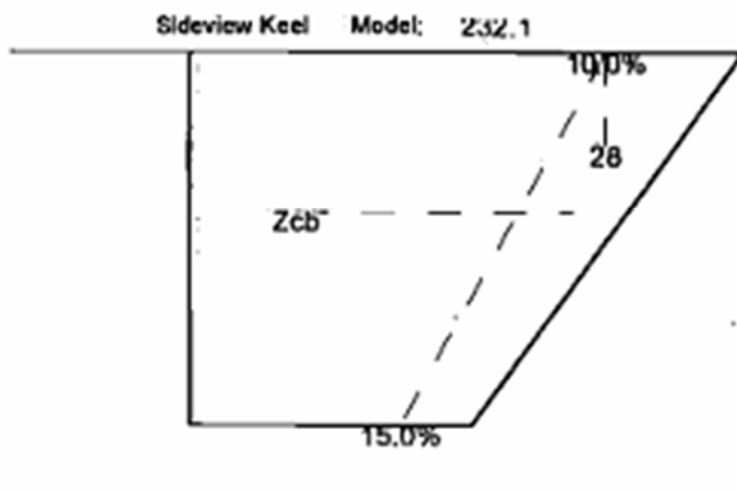
Gdje je:

t/c relativna debljina promatranog privjeska

$(1+k)$ faktor forme

Svaki privjesak (kao na primjer kormilo ili kobilica), računaju se po istoj formuli, a u ovom radu ćemo od privjesaka provjeriti kobilicu jer je jedino ona od nekog većeg značaja za otpor ovog broda.

Po nacrtima broda može se zaključiti da je promatrana kobilica najbližnja „IOR“ kobilici testiranoj na modelu broda 232. U nastavku je prikazan bočni pogleda navedene kobilice:



Slika 3.4 Bočni prikaz kobilice (iz „Delft Various Keel Series“) po kojoj se radi proračun naše kobilice: $t/c=12,5$ [1]

Za proračun viskozno otpora prema formuli 3.13 za oplakivanu površinu kobilice smo uzeli: $S=10,14 \text{ m}^2$ koju smo dobili tako da smo površinu kobilice aproksimirali s pravilnim geometrijskim likovima kojima poznajemo formule za tražene podatke.

Rezultati proračuna su dani u tablici u nastavku:

Tablica 3.8 Proračun otpora trenja i viskozno otpora za kobilicu (po jednadžbi za privjeske)

Fr	V	Cf	Rf	Rv
	m/s	/	N	N
0,1	3,77	0,0027	196,79	201,71
0,15	4,62	0,0026	285,63	292,77
0,2	5,33	0,0025	372,17	381,47
0,25	5,96	0,0025	457,06	468,48
0,3	6,53	0,0024	540,67	554,18
0,35	7,05	0,0024	623,23	638,81
0,4	7,54	0,0024	704,92	722,54
0,45	8,00	0,0024	785,85	805,50
0,5	8,43	0,0023	866,12	887,77
0,55	8,84	0,0023	945,80	969,44
0,6	9,23	0,0023	1024,94	1050,57

3.4.2.2 Preostali otpor privjesaka

Postojanje preostalog otpora privjesaka u uspravnom položaju je dugo vremena bio neopravdano zanemarivan. U radu Beukelmana i Keuninga iz 1957. godine pokazan je utjecaj kobilice na otpor (kao na primjer uzdužne distribucije volumena kobilice). Iz analiza rezultata eksperimenata golog trupa i trupa s privjescima (sa DSYHS metodom), u kojima je ista kobilica bila testirana na različitim trupovima, postalo je očito da bi se preostali otpor privjesaka trebao uzeti u obzir.

Usporedba rezultata tražila je da se iznos preostalog otpora kobilice dobije iz oduzimanja preostalog otpora golog trupa i trupa s privjescima. S obzirom na velike iznose rezultata otpora za brod i relativno malog iznosa otpora kobilice, to je taj način proračuna činilo vrlo nepouzdanim. Zbog toga je došlo do dodatne serije razmatranja kobilice (Delft Systematic Keel Series), u kojoj je grupa od šest različitih kobilica bila testirana na dva trupa različitih omjera širine i gaza. Rezultati testiranja ovdje će biti samo ukratko pojašnjeni. Tijekom testiranja otpor i poprečna sila koji djeluju na privjescima su mjereni direktno i odvojeno kao ukupne sile koje djeluju na model. Mjerenje se radilo na golim trupovima i na trupovima opremljenim sa različitim privjescima. Tijekom eksperimenta korištene su standardne mjere i načini provođenja testa za „Delft Shiphydrodromechanic Laboratory“.

Parametri korišteni za utvrđivanje preostalog otpora kobilice u uspravnom položaju su: raspon kobilice, istisnina kobilice i vertikalni položaj centra uzgona kobilice, omjer širine i gaza trupa te omjer sužavanja kobilice. Za otpor kobilice uzeta je razlika između otpora golog trupa i otpora trupa s privjescima. Ti su se rezultati koristili za formiranje polinoma za računanje otpora kobilice.

Treba naglasiti da je „DSKS“ još u procesu razvoja i mogu se očekivati proširenja serija kojima bi procjena otpora kobilice postala pouzdanija.

Postoji još jedna serija testiranih kobilica i zove se „Delft Various Keel Series“ (DVSK), a sastoji se od 13 različitih oblika kobilica ispod istog trupa. Kao dio serije ispitani su različiti oblici kobilica za trkaće jedrilice i za jedrilice za odmor (poput eliptičnih kobilica, kobilice s krilcima, kobilice plitkog gaza,...).

Izvedeni polinomi su se pokazali kao zadovoljavajući za procjenu otpora kobilice. Bazirani su na vezi između volumena kobilice i trupa, omjeru sužavanja kobilice, omjeru širine i gaza trupa, vertikalna pozicija uzgona volumena kobilice do slobodne površine i omjer volumena istisnine golog trupa i volumena istisnine kobilice:

$$\frac{Rrk}{\nabla k \cdot \rho \cdot g} = A_0 + A_1 \cdot \frac{T}{Bwl} + A_2 \cdot \frac{Tc + Zcbk}{\nabla k^{1/3}} + A_4 \cdot \frac{\nabla c}{\nabla k} \quad (3.16)$$

Gdje je:

Rrk preostali otpor kobilice, N

∇k volumen istisnine kobilice, m³

T maksimalni gaz jedrilice, m

Bwl širina vodne linije, m

Tc gaz golog trupa jedrilice, m

Zcbk vertikalna pozicija uzgona volumena kobilice, m

∇c volumen istisnine golog trupa, m³

Za manje brzine (manji Fn) povećanje preostalog otpora kobilice nije od nekog značaja ali se povećava s povećanjem brzine. Za ovako osjetljivu komponentu otpora, baza podataka je još uvijek mala te je sigurno da će se kroz budućnost polinomi nastaviti nadopunjavati novim podacima da bi metoda bila pouzdanija.

Na temelju svega izloženog u prethodnom dijelu teksta, priložena je tablica koeficijenata iz polinoma za određivanje preostalog otpora kobilice te rezultati za promatranu jedrilicu:

Tablica 3.9 Koeficijenti iz jednadžbe (3.16) i proračun preostalog otpora kobilice

Fn	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6
A ₀	- 0,00104	- 0,00550	- 0,01110	- 0,00713	- 0,03581	- 0,00470	0,00553	0,04822	0,01021
A ₁	0,00172	0,00579	0,01421	0,02632	0,08649	0,11592	0,07371	0,00660	0,14173
A ₂	0,00117	0,00390	0,00069	- 0,00232	0,00999	- 0,00064	0,05991	0,07048	0,06409
A ₃	- 0,00008	- 0,00009	0,00021	0,00039	0,00017	0,00035	0,00114	- 0,00035	- 0,00192
Rrk, N	12,9	27,1	-19,9	191,0	573,4	1464,2	2379,7	2902,5	3351,7

3.4.2.3 Promjene otpora privjesaka zbog nagiba broda

Smatra se da viskozni otpor privjesaka ne utječe na promjenu otpora jedrilice i ta je pretpostavka opravdana.

Međutim kod preostalog otpora privjesaka ta se tvrdnja ne može uzeti u obzir. Zbog nagiba broda volumen privjesaka se približava slobodnoj površini vode te zbog toga dolazi do porasta preostalog otpora (odnosno otpora zbog stvaranja površinskog vala), što potvrđuju i eksperimentalni podaci.

Pristup za procjenu tog otpora u ovom razmatranju vodi se sa dvije različite ideje.

Prva da je iznos stvaranja valova na površini slobodne površine zbog kobilice (bez bočne sile) ovisan o tome koliko je volumen kobilice udaljen od površine vode, na primjer da ovisi o omjeru širine i gaza ili omjeru raspona kobilice i dubini trpa.

Druga ideja je da iznos ovisan o otporu valova na površini koji prouzrokuje sami trup broda pa se može, na primjer, koristiti omjer duljine i istisnine. Svi ti utjecaji će, dakako, biti ovisni o samom kutu nagiba ali i o brzini broda (samim time i o Froudovom broju i primarnom stvaranju valova zbog trupa).

U nastavku će se efekti nastali zbog kobilice promatrati odvojeno, pa će se komponente otpora za uspravno stanje trupa i povećanje zbog njegovog nagiba oduzimati od preostalog otpora nagnutog trupa:

$$\nabla Rr k \varphi_{(izmjereno)} = Rr \varphi - Rr - \Delta Rr h \varphi \quad (3.17)$$

Gdje $Rr \varphi$ i Rr predstavljaju vrijednosti trupa sa kobilicom i kormilom. Zbog toga su sljedeći izrazi bili korišteni za aproksimaciju tih podataka:

$$\frac{\Delta Rr k \varphi}{\nabla k \cdot \rho \cdot g} = Ch \cdot Fn^2 \cdot \varphi \quad (3.18)$$

Gdje je Ch :

$$Ch = H_1 + H_2 \cdot \frac{Bwl}{Tc} + H_3 \cdot \frac{Tc}{T} \cdot \frac{Bwl}{Tc} + H_4 \cdot \frac{Lwl}{\nabla c^{1/3}} \quad (3.19)$$

Gdje su koeficijenti H_1 do H_5 dani u sljedećoj tablici:

Tablica 3.10 Koeficijenti iz jednadžbe (3.19) za proračun Ch

H_1	-3,5837
H_2	-0,0518
H_3	0,5958
H_4	0,2055

Iz čega dobijemo vrijednost za Ch : $Ch = 0,6548$, pa imamo sve potrebno za proračun promjene otpora kobilice u ovisnosti o kutu nagiba kako je prikazano u sljedećoj tablici:

Tablica 3.11 Promjena otpora kobilice zbog nagiba broda

F_n	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6
$\varphi, ^\circ$	$\Delta R_{rk\varphi},$ N	$\Delta R_{rk\varphi},$ N	$\Delta R_{rk\varphi},$ N	$\Delta R_{rk\varphi},$ N	$\Delta R_{rk\varphi},$ N	$\Delta R_{rk\varphi},$ N	$\Delta R_{rk\varphi},$ N	$\Delta R_{rk\varphi},$ N	$\Delta R_{rk\varphi},$ N
5	53,9	84,2	121,2	165,0	215,5	272,8	336,8	407,5	484,9
10	107,8	168,4	242,5	330,0	431,0	545,5	673,5	815,0	969,9
15	161,6	252,6	363,7	495,0	646,6	818,3	1010,3	1222,4	1454,8
20	215,5	336,8	484,9	660,0	862,1	1091,1	1347,0	1629,9	1939,7
25	269,4	420,9	606,2	825,1	1077,6	1363,9	1683,8	2037,4	2424,7
30	323,3	505,1	727,4	990,1	1293,1	1636,6	2020,5	2444,9	2909,6
35	377,2	589,3	848,6	1155,1	1508,7	1909,4	2357,3	2852,3	3394,5

Vidljivo je iz rezultata koliko otpor stvaranja valova privjesaka utječe na povećanje otpora kobilice. Znamo da je kod golog trupa taj iznos bio gotovo zanemariv, dok što se privjesaka tiče situacija je u potpunosti drugačija. Taj iznos se podosta osjeti u odnosu na ukupni iznos otpora privjesaka.

4. ODABIR BRODSKOG VIJKA I MOTORA

S obzirom da jedrilice osim jedrilja imaju i pogon na motor, važno je razmisliti o pravom dizajnu propele i potrebnoj snazi motora za različite uvjete.

Postoje tri razloga zašto se na jedrilicu pored jedara ugrađuje motorni pogon:

1. Da bi se lakše manevriralo brodom u lukama gdje je prostor ograničen. Brod je lakše kontrolirati motorom nego jedriljem. U nekim lukama je jedrenje zabranjeno iz sigurnosnih razloga.
2. Ako uvjeti za jedrenje nisu dobri i ako je putovanje vremenski ograničeno često se koristi motorni pogon.
3. U slučajevima nepogodnog i opasnog vremena, iz sigurnosnih razloga, da bi se izbjegle opasne situacije, dovoljno jaki motor može biti od velike pomoći.

Prvi uvjet ne stavlja nikakav poseban zahtjev za propulziju broda, osim dobre upravljivosti tijekom vožnje krmom, dok druga dva uvjeta stavljaju dva međusobno oprečna zahtjeva. Drugi uvjet traži što veću brzinu broda da bi se vrijeme utrošeno na putovanje što više skratilo, dok treći uvjet traži dovoljnu porivnu snagu za kontroliranje broda za vrijeme plovidbe po lošem vremenu.

Pošto je teško zadovoljiti oba uvjeta istovremeno, traži se takav vijak i motor da su pogodni za oba zahtjeva, s tim da se prioritet stavlja na zahtjev da vijak omogućava motoru da radi što bliže svom optimumu tijekom stanja lošeg vremena na moru.

Da bi došli do željenog odabira poslužit ćemo se proračunom otpora u mirnoj vodi, zatim ćemo dodati otpor valova da bi procijenili otpor broda po lošem vremenu. Iz podataka o otporu izračunati ćemo potrebnu snagu i odabrati vijak za oba uvjeta. Odabir mora biti takav da bude optimum za obje situacije ali i da su nam od strane proizvođača dostupni traženi vijak i brodski motor. Nakon odabira istražiti ćemo performanse naše kombinacije i za kraj dodati otpor vijka brodu za vrijeme jedrenja.

U ovom dijelu otpor ne treba procijeniti takvom točnošću kao kod dijela zadatka koji se fokusira na proračun otpora, ali ćemo uzeti prethodne rezultate kad ih već imamo izračunate. Takvo pojednostavljenje se smije napraviti zbog dva razloga:

1. Da bi dovoljno dobro odabrali našu propulziju – veća točnost nije potrebna
2. Neke stvari koje se trebaju uzeti u obzir (poput otpora valova zbog vjetra i lošeg vremena), jako su komplicirane ili nemaju izraze koji zadovoljavaju proračun

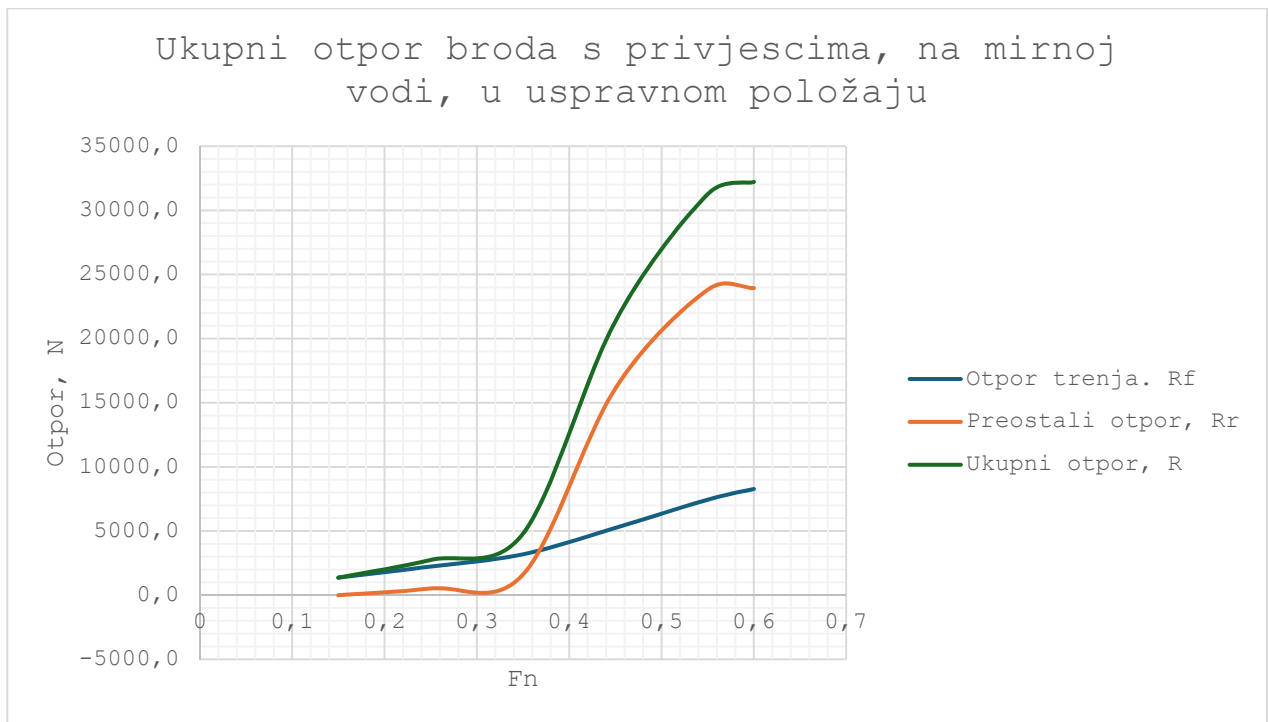
Proračun za odabir brodskog vijka i motora ćemo napraviti prema knjizi „Principles of yacht design“ (Larsson, Eliasson i Orych).

4.1 Procjena otpora na mirnoj vodi

Za proračun otpora na mirnoj vodi (da bi odredili snagu motora i odabrali brodski vijak), možemo zanemariti sve komponente otpora osim otpora trenja i preostali otpor uspravnog trupa što imamo već izračunato iz prethodnog dijela zadatka. Rezultati prethodnog poglavlja su prikazani u sljedećoj tablici:

Tablica 11 Procjena otpora na mirnoj vodi, u uspravnom položaju (iz 3. poglavlja)

Fn	0,15	0,25	0,35	0,45	0,55	0,6
Rf hull, N	1372,5	2196,2	2994,7	3776,1	4544,7	4925,0
Rr hull, N	-11,2	493,4	1415,6	14657,1	20906,8	20581,7
Rf keel, N	285,6	457,1	623,2	785,8	945,8	1024,9
Rr keel, N	0,0	27,1	191,0	1464,2	2902,5	3351,7
Rf, N	1372,5	2223,3	3185,7	5240,3	7447,1	8276,7
Rr, N	-11,2	520,5	1606,6	16121,3	23809,2	23933,4
Ukupni otpor na mirnoj vodi, N	1361,3	2743,8	4792,3	21361,6	31256,4	32210,1



Slika 4.1 Grafički prikaz otpora broda sa privjescima (rezultati iz 3. poglavlja)

Za otpor broda pri plovidbi lošim vremenskim uvjetima treba se dodati porast otpora zbog takvih uvjeta.

Porast otpora zbog valova pri lošem vremenu ćemo uzeti pomoću izraza iz DSYHA metode (poglavlje o porastu otpora zbog valova). Pošto promatramo otpor pri lošem vremenu, za visinu vala uzeti ćemo 4m, a za period vala 6s. To su uvjeti za vjetar koji puše brzinom od 15 m/s na otvorenom moru. Na oceanima valovi mogu biti veći i njihova perioda može trajati duže, međutim iako su valovi veći, njihov je otpor često manji nego kod uvjeta koje smo mi zadali za proračun. Gori uvjeti od navedenih mogu se pojaviti ali su ekstremni te da bi ih zadovoljili morali bismo žrtvovati performanse za normalne uvjete u kojima brod puno češće plovi.

Izraz za procjenu otpora valova za vrijeme loših vremenskih uvjeta glasi:

$$\frac{R_{AW} \cdot 100}{\rho \cdot g \cdot Lwl \cdot H_{1/3}^2} = A_1 \cdot \frac{k_{yy}}{Lwl} \cdot \frac{\nabla c^{1/3}}{Lwl} + A_2 \cdot \frac{k_{yy}}{Lwl} + A_3 Cp^2 + A_4 \frac{Lwl}{Bwl} + A_5 \cdot \left(\frac{Lwl}{Bwl}\right)^2 + A_6 \cdot \frac{Bwl}{Tc} + A_7 \cdot \left(\frac{Bwl}{Tc}\right)^2 \quad (4.1)$$

Gdje je:

∇c volumen istisnine trupa, m^3

ρ gustoća morske vode, kg/m^3

g gravitacijsko ubrzanje, m/s^2

T_1 period vala, s

$H_{1/3}$ Srednja visina vala, m

k_{yy} koeficijent momenta inercije, m (može se uzeti kao $\frac{1}{4}$ ukupne dužine broda za dovoljno dobre rezultate procjene otpora)

Za proračun ćemo uzeti sljedeće podatke:

Kao što smo već naglasili $T_1=6s$, $H_{1/3}=4$ m i $k_{yy}=3,7375$ (iz izraza da k_{yy} možemo uzeti kao četvrtinu L_{wl} -a).

Da bi izračunali polinom prvo računamo T_1' po formuli:

$$T_1' = T_1 \cdot \sqrt{\frac{g}{L_{wl}}} \quad (4.2)$$

Za naš slučaj vrijedi:

$T_1'=4,936$

Za kut nailaska valova 145° koeficijenti za gornji polinom su prikazani u sljedećoj tablici:

Tablica 12 Koeficijenti iz jednadžbe (4.1), za $T_1'=4,5$ i $T_1'=5$ i kut nailaska vala 145°

	T_1'					
	F_n	0,15	0,25	0,35	0,45	0,6
A ₁	4,5	9,65417	11,3470	11,9519	8,31017	7,15663
	5	6,61965	8,00457	8,60084	6,11602	5,30594
A ₂	4,5	-0,5700	-0,5778	-0,4638	-0,1925	0,11397
	5	-0,3997	-0,4326	-0,3667	-0,1664	0,06011
A ₃	4,5	-0,297	-0,3290	-0,2670	-0,0927	0,13746
	5	-0,2018	-0,2369	-0,2006	-0,0746	0,09472
A ₄	4,5	-0,0678	-0,0576	-0,0578	-0,0557	-0,0917
	5	-0,0466	-0,0422	-0,0444	-0,042	-0,0689
A ₅	4,5	0,01025	0,00871	0,00847	0,00784	0,01192
	5	0,00706	0,00646	0,00663	0,00602	0,00912
A ₆	4,5	0,00485	-0,0004	-0,0048	-0,0063	-0,0079
	5	0,00324	0,0007	-0,0025	-0,0042	-0,0062
A ₇	4,5	0,00050	0,00072	0,00093	0,00085	0,00097
	5	0,00035	0,00046	0,00063	0,00062	0,00076

S obzirom na to da $T'1$ u našem slučaju iznosi 4,936, interpolacijom između koeficijenata u gornjoj tablici našli smo naše koeficijente napisane u tablici u nastavku:

Tablica 13 Koeficijenti iz jednadžbe (4.1) za vrijednosti $T'1=4,936$

F_n	0,1500	0,2500	0,3500	0,4500	0,6000	0,5500
A_1	7,0079	8,4322	9,0296	6,3968	5,5427	6,1121
A_2	-0,4215	-0,4512	-0,3791	-0,1698	0,0670	-0,0908
A_3	-0,2140	-0,2487	-0,2091	-0,0770	0,1002	-0,0179
A_4	-0,0493	-0,0442	-0,0461	-0,0438	-0,0718	-0,0531
A_5	0,0075	0,0067	0,0069	0,0063	0,0095	0,0073
A_6	0,0034	0,0006	-0,0028	-0,0045	-0,0064	-0,0051
A_7	0,0004	0,0005	0,0007	0,0006	0,0008	0,0007

Ukupni otpor trupa na valovima računa se pomoću prethodnog polinoma i dobivaju se sljedeće vrijednosti tablično prikazane:

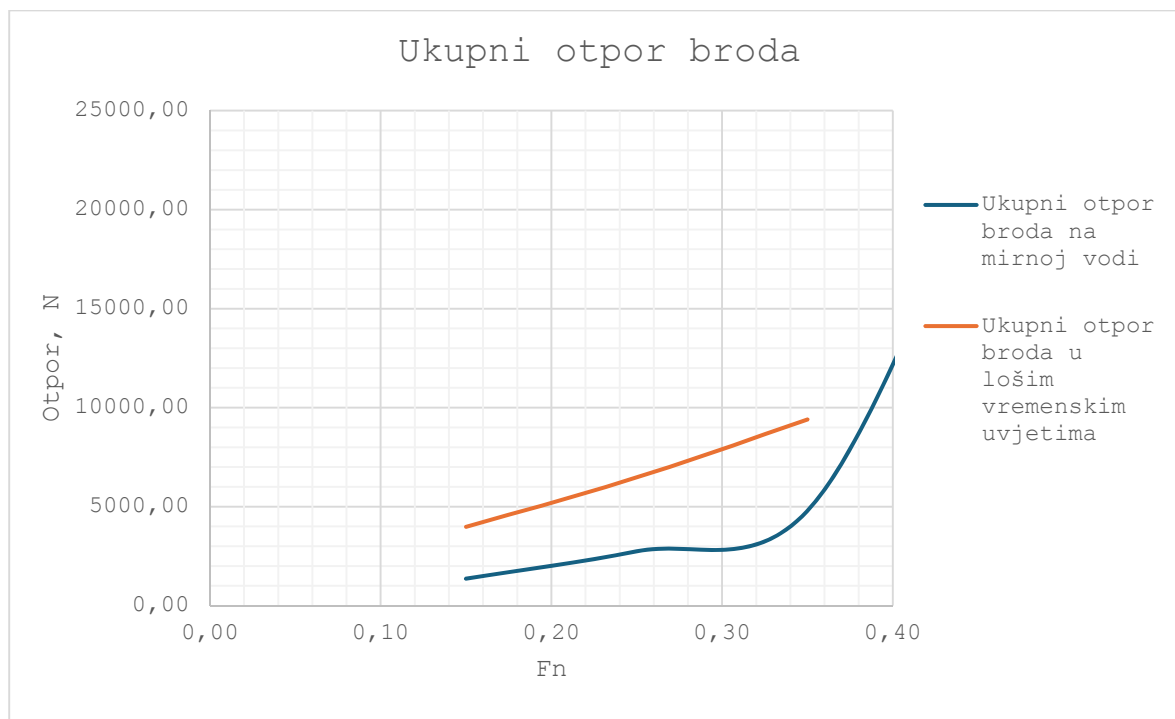
Tablica 14 Proračun otpora vala pri lošim vremenskim uvjetima

F_n	0,15	0,25	0,35	0,45	0,6
$R_{AW, N}$	2621,13	3724,43	4609,89	3568,56	3560,9

Da bi stekli bolji dojam, grafički i tablično ćemo prikazati otpor broda pri lošim vremenskim uvjetima i na mirnoj vodi:

Tablica 15 Ukupni otpor trupa broda (s privjescima) u mirnoj vodi i po lošim vremenskim uvjetima

F_n	0,15	0,25	0,35	0,45
R, N (mirna voda)	1361,30	2743,76	4792,25	21361,60
R, N (loši vremenski uvjeti)	3982,43	6468,19	9402,14	/



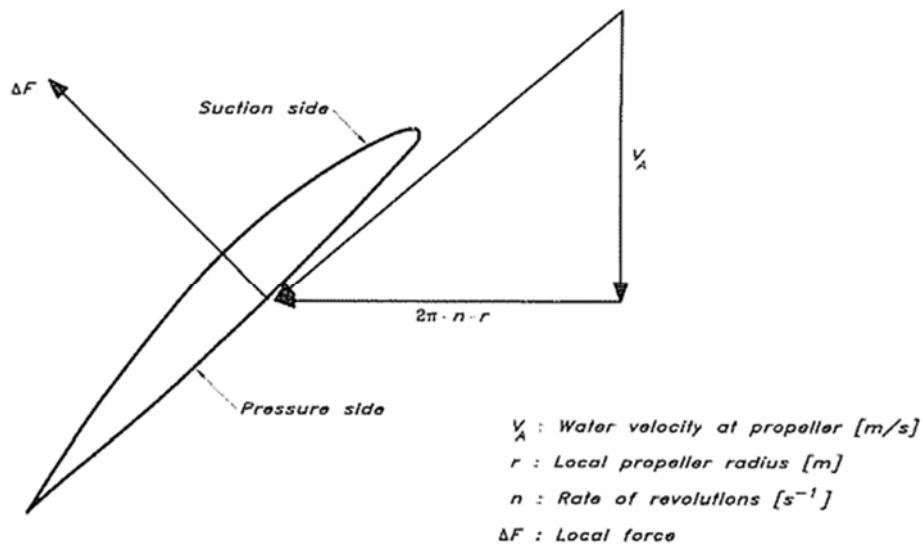
Slika 4.2 Grafički prikaz ukupnog otpora na mirnoj vodi i u lošim vremenskim uvjetima

Iz tabličnog prikaza vidimo koliki je porast otpora radi otpora valova. Isto tako možemo primijetiti da nakon $F_n = 0,3$ otpor počinje naglo rasti, što nam govori da su to brzine za koje je forma ovoga trupa napravljena i svako naknadno dodavanje brzine je besmisleno, jer na jako veliku snagu dobivamo minimalno povećanje brzine broda.

4.2 Karakteristike brodskog vijka

Krila vijka se ponašaju poput krila aviona dok se okreću u vodi i tako stvaraju silu poriva. Ukupna brzina vijka sastoji se od dvije komponente, aksijalna (kretanje prema naprijed) i tangencijalna (izazvana rotacijom vijka). Aksijalna brzina vijka za nas je od većeg značenja pa ćemo nju i promatrati. Ona je manja od brzine broda radi efekta sustrujanja (dok kojeg dolazi zbog rada vijka iza krme broda) ali kod jedrilica vijak se nalazi pričvršćen ispod trupa pa efekt sustrujanja ima mali utjecaj na brzinu (do cca 10%), pa ćemo ga zanemariti za proračun. Kod brodova kojima vijak radi iza krme taj efekt se nikako ne smije zanemariti jer utjecaj trupa ima veliku značajku u iznosu brzine.

Na slijedećoj slici je prikazan presjek krila vijka sa prikazom nekih geometrijskih značajki i dimenzija.



Slika 4.3 Geometrijske značajke krila vijka [2]

Najvažnije značajke propelera su nagib (P , m) i radijus (r , m). Pomoću nagiba kontroliramo kut nailaska vode na vijak, čime kontroliramo rezultantnu silu na vijku. Rezultantna sila ima jednu aksijalnu komponentu – poriv broda, i tangencijalnu komponentu koja povećava neželjeni moment.

Da bi olakšali analizu vijka i rada propulzije uvedeni su sljedeći bezdimenzijski koeficijenti (karakteristike vijka):

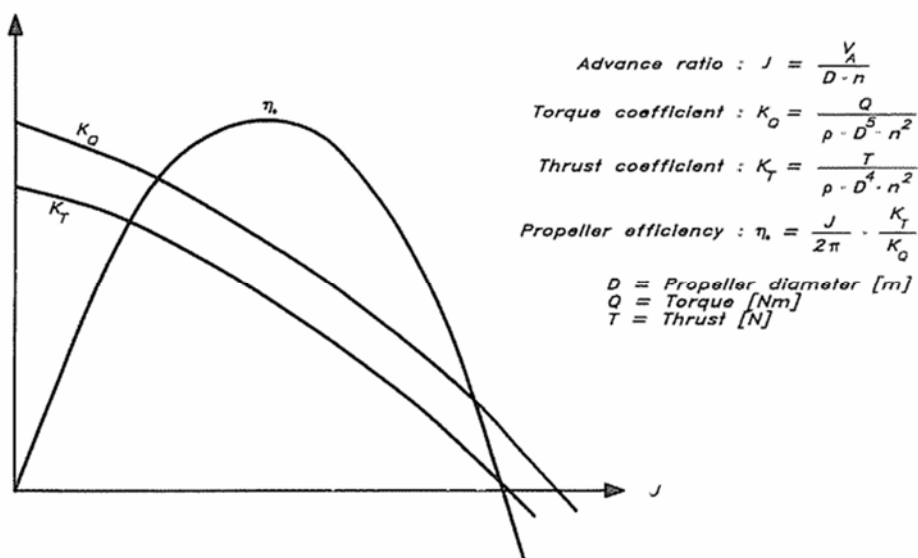
J-koeficijent napredovanja

K_T -Koeficijent poriva

K_Q -koeficijent momenta

η_0 -Stupanj djelovanja poriva

Karakteristike vijka često prikazujemo grafički (slika 4.4) kao funkcije brzine okretaja (odnosno J koeficijenta).



Slika 4.4 Karakteristike brodskog vijka [2]

Gdje je:

D promjer vijka, m

Q moment, Nm

T poriv, N

Da bi dobili takav dijagram vijak se ispituje u bazenu testom slobodne vožnje (vijak bez trupa). Ispitivanje se vrši na dva načina: s konstantnom brzinom napredovanja i promjenom broja okretaja vijka, ili konstantnim brojem okretaja, a promjenom brzine napredovanja. Na model su pričvršćeni mjerni uređaji pomoću kojih se dolazi do podataka za izradu dijagrama karakteristike vijka.

4.3 Projektiranje optimalnog vijka

Da bi našli optimalni vijak za naš brod, trebamo znati brzinu pritjecanja vode na vijak V_A , poriv T (ili snagu motor) i brzinu okretaja vijka. Iako je brzina V_A manja od brzine broda i poriv mora biti veći od otpora broda, za jedrilicu možemo uzeti pretpostavku da su jednaki. To neće znatno utjecati na proračun jer kako je već objašnjeno, za vijak koji se nalazi ispod trupa broda te razlike su zanemarive.

Iako su za jedrilice (zbog manjeg otpora vijka), pogodniji vijci s dva sklopiva krila, ovdje ćemo zbog većeg izbora podataka raditi proračun sa trokrilnim vijkom.

Proračun započinjemo tako da ugrubo odredimo snagu motora potrebnu za jedrilicu. Računa se da za jednu tonu istisnine treba 4-5 kW snage. To bi značilo da za jedrilicu iz proračuna (istisnine 18,11 tona) treba motor snage između 72-90 kW.

S tim podatkom traži se iz kataloga proizvođača dostupan motor koji najbolje odgovara potrebama broda koji se promatra. Ja sam izabrala motor sljedećih karakteristika:

- Snaga motora: $P_D=80$ kW (odnosno 110 mhp)
- Broj okretaja: $n=3200$ okretaja/min sa omjerom prijenosa 2,5 što znači da se vijak može vrtjeti maksimalnom brzinom $n=21,33$ okretaja/s

Sada znamo koje su nam karakteristike motora, znamo poriv koji je jednak otporu za zadanu brzinu (i posebno promatramo slučaj loših vremenskih uvjeta i uvjeta na mirnoj vodi). Pomoću tih podataka tražimo optimalni vijak za svaki slučaj posebno.

Tablica 16 Proračun karakteristika vijka i potrebne snage za zadanu brzinu

	mirna voda			loši vremenski uvjeti		
F_n	0,25	0,35	0,45	0,15	0,25	0,35
V_A , m/s	5,96	7,05	9,23	4,62	5,96	7,05
T , N	2743,8	4792,3	21361,6	3982,4	6468,2	9402,1
B_u	13,12	12,39	15,25	26,35	20,15	17,35
δ	175	165	190	244	218	210
D , m	0,48	0,54	0,81	0,52	0,60	0,69
P/D	0,78	0,80	0,73	0,60	0,64	0,67
P , m	0,37	0,43	0,59	0,31	0,38	0,46
η_0	0,68	0,69	0,67	0,59	0,64	0,65
P_D , kW	24,0	49,0	294,4	31,2	60,2	102,0

Gdje je:

F_n Froudov broj

V_A brzina pritjecanja vode, m/s

T poriv broda, N

B_u koeficijent poriva koji se računa prema formuli:

$$B_u = 13,36 \cdot \sqrt{\frac{T \cdot n^2}{\rho \cdot V_A^4}} \quad (4.3)$$

δ omjer iščitan iz dijagrama B_u - δ

D promjer krila vijka u metrima do kojeg dođemo pomoću formule:

$$D = \frac{\delta \cdot V_A}{101,3 \cdot n} \quad (4.4)$$

P/D omjer uspona i promjera vijka iščitan iz dijagrama pomoću kojeg nađemo optimalni uspon za zadanu brzinu

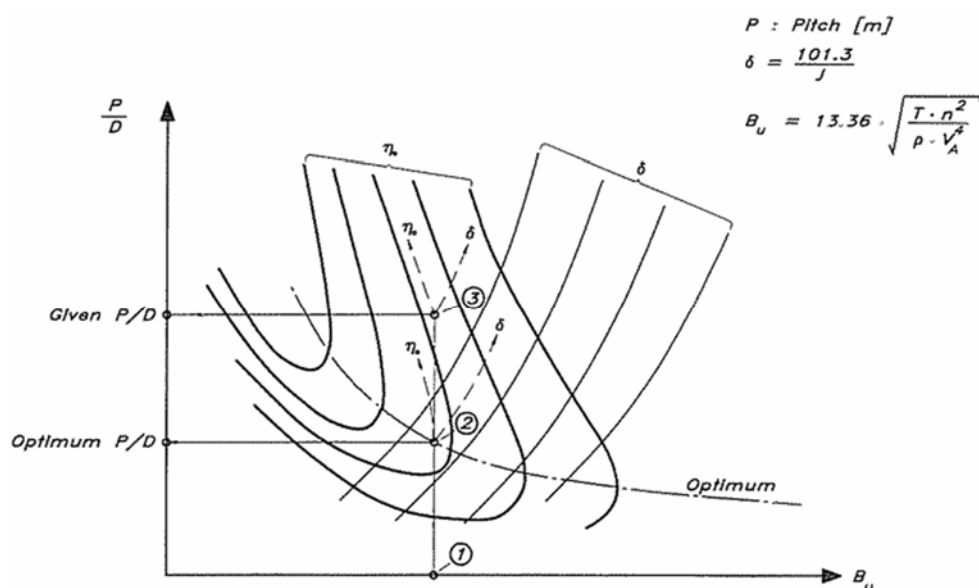
P uspon krila vijka, m

η_0 stupanj djelovanja brodskog vijka koji je također iščitan iz dijagrama

P_D snaga predana vijku u kW koja se računa pomoću formule:

$$P_D = \frac{T \cdot V_A}{\eta_0} \quad (4.5)$$

Da bi bolje razumjeli gornju tablicu i kako smo došli do podataka treba malo pobliže objasniti korištenje B_u - δ dijagrama. Skica istoga je prikazana na sljedećoj slici:



Slika 4.5 Princip korištenja B_u - δ dijagrama [2]

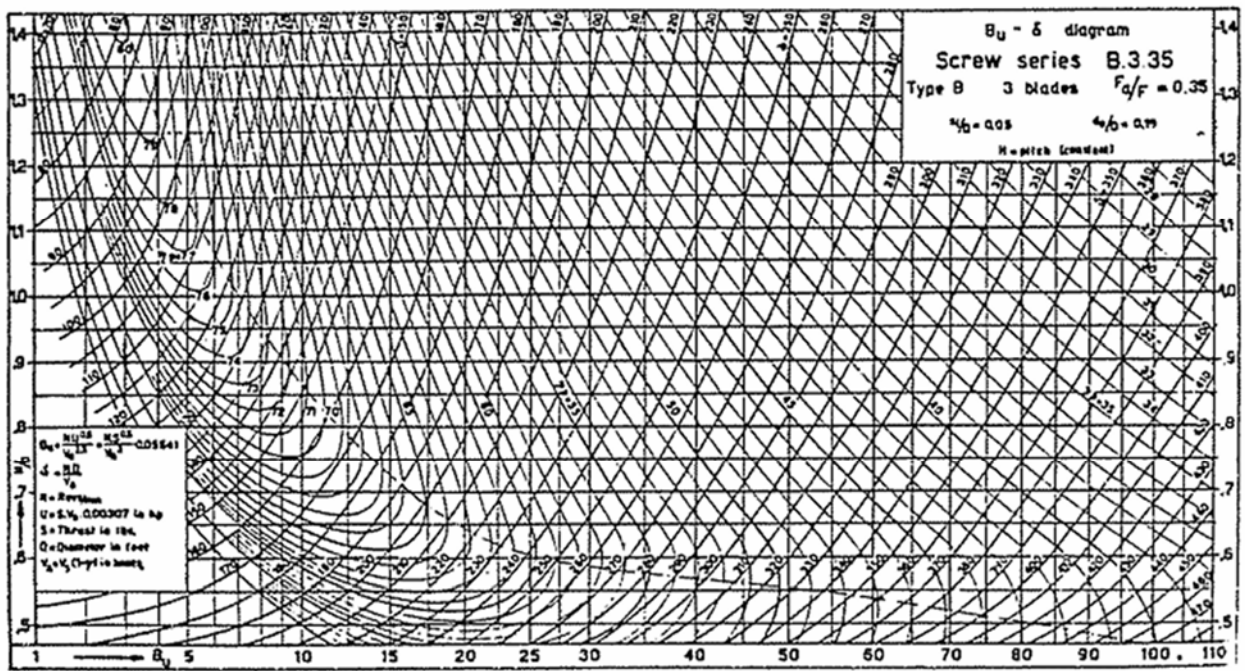
Prvi korak za korištenje dijagrama je izračunati B_u koeficijent i koristiti taj podatak kao početnu točku za ulazak u dijagram (točka 1 na dijagramu na slici 4.4.)

Nakon toga penjemo se okomito do točke koja sječe krivulju optimuma za naš B_u koeficijent. Točka sjecišta omogućava nam da iščitamo ostale podatke. Ako povučemo horizontalu do vertikalne osi dijagrama, možemo iščitati omjer P/D .

Koeficijente δ i η_0 nađemo tako što interpoliramo našu točku sjecišta B_u i krivulje optimalnog vijka između dvije krivulje poznatih vrijednosti za traženi koeficijent te nađemo iznose za naš slučaj.

Dijagramom je moguće služiti se i ako imamo zadani omjer P/D te izračunamo B_u i pomoću tog sjecišta tražimo daljnje podatke ali mi smo naš proračun radili po prvom načinu.

Na sljedećoj slici je prikazan B_u - δ dijagram korišten u našem proračunu:



Slika 4.6 B_u - δ dijagram za vijke serije B 3.354 sa tri krila (korišten u ovom proračunu) [2]

4.3.2 Odabir brodskog vijka

Nakon što smo našli optimalni vijak za naš promatrani raspon brzina (i iznos otpora za te brzine), treba doći do zaključka što odabrati. Kao što je vidljivo iz proračuna za različite brzine i različite uvjete vožnje veličina promjera jako varira (od 0,48 do 0,80 m), pa treba dobro razmisliti koji vijak odabrati.

Sigurnost je prioritet, pa ćemo naći dovoljnu snagu motora da možemo u trenucima havarije imati pouzdanu propulziju. Međutim ne možemo potpuno žrtvovati performanse (brzinu broda) po mirnom moru koji su česti uvjeti za brod u službi, da bi imali dovoljno snage za ekstremnu situaciju koju brod možda neće ni doživjeti ili će je doživjeti jako mali broj puta za vrijeme trajanja službe.

Isto tako treba naći vijak koji je dostupan od strane proizvođača jer se za jedrilice ne izrađuje poseban vijak koji je najoptimalniji za taj brod, već se traži od postojećih vijaka nešto što je najbliže optimumu jedrilice.

Moj odabir je bio vijak sljedećih dimenzija:

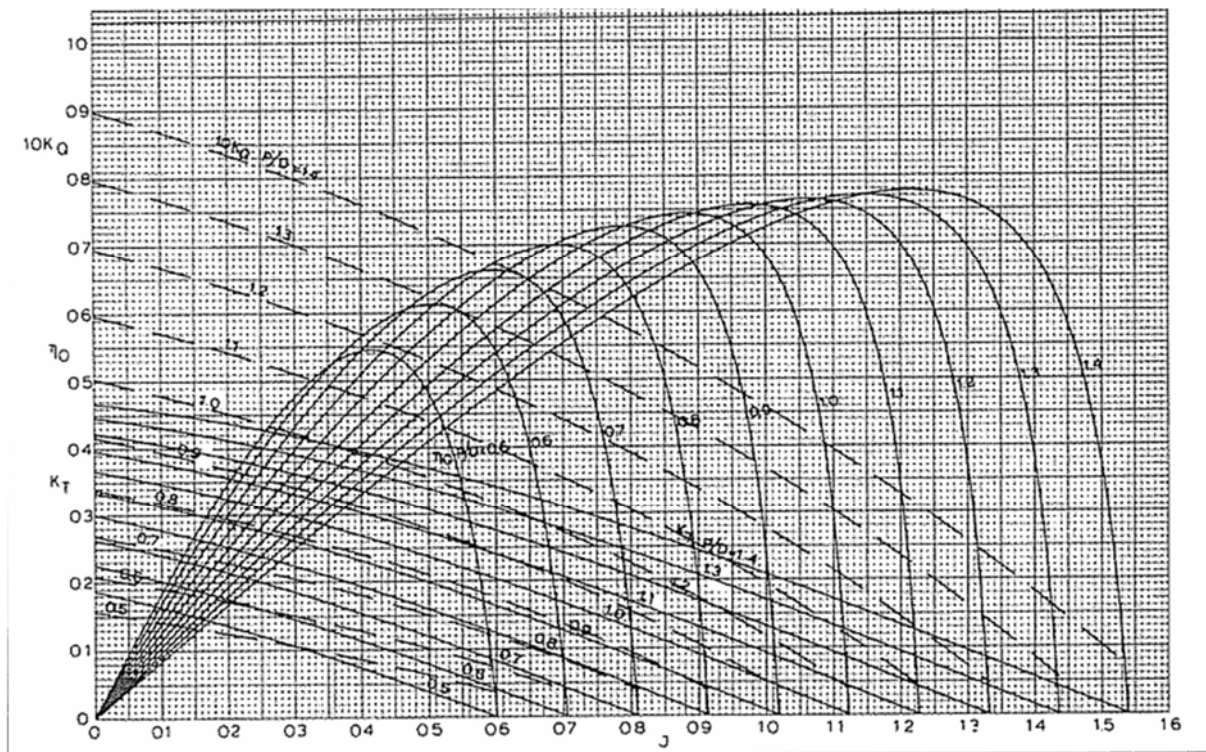
$D=45,72$ cm

$P=38,10$ cm

$P/D=0,69$

4.3.3 Provjera odabranog vijka

Da bi provjerili karakteristike vijka pomažemo se sa dijagramom priloženim u nastavku. Dijagram prikazuje ovisnost koeficijenata K_T , K_Q i n_0 o koeficijentu napredovanja.



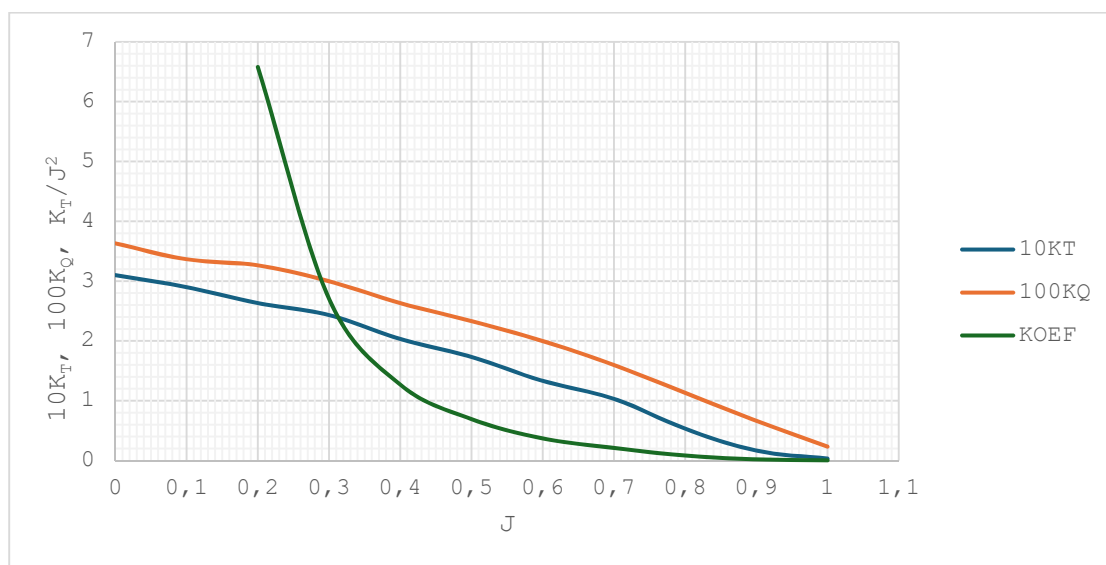
Slika 4.7 Dijagram karakteristika broskog vijka (sa 3 krila) [2]

Za nastavak proračuna i dalje ćemo uzeti da je brzina V_A jednaka brzini broda, a sila poriva T jednaka sili ukupnog otpora broda.

Iz prethodnog dijagrama interpolacijom nalazimo krivulje K_T i K_Q u ovisnosti o J za naš omjer P/D . Pomoću tih krivulja nađemo za iste vrijednosti J i koeficijent $\frac{K_T}{J^2}$ te napravimo grafički i tablični prikaz svih koeficijenata u ovisnosti o koeficijentu napredovanja J :

Tablica 17 Karakteristike vijka u ovisnosti o J

J	$10K_T$	$100K_Q$	K_T/J^2
0,1000	2,8990	3,3640	28,9900
0,2000	2,6320	3,2640	6,5800
0,3000	2,4320	2,9980	2,7022
0,4000	2,0320	2,6310	1,2700
0,5000	1,7320	2,3310	0,6928
0,6000	1,3320	1,9980	0,3700
0,7000	1,0320	1,5980	0,2106
0,8000	0,5320	1,1310	0,0831
0,9000	0,1650	0,6650	0,0204
1,0000	0,0330	0,2320	0,0033



Slika 4.8 Grafički prikaz karakteristika brodskog vijka

S obzirom da za $\frac{K_T}{J^2}$ vrijedi sljedeća jednadžba:

$$\frac{K_T}{J^2} = \frac{T}{\rho \cdot D^2 \cdot V_A^2} \quad (4.6)$$

Iz izrađenog grafa možemo naći podatke za proračun broja okretaja n i potrebne snage P_D prema sljedećoj tablici:

Tablica 18 Proračun brzine okretaja vijka i potrebne snage za zadanu brzinu

	mirno more			loši vremenski uvjeti		
F_n	0,15	0,25	0,35	0,15	0,25	0,35
$V_A, \text{ m/s}$	4,6168	5,9603	7,0523	4,6168	5,9603	7,0523
$T, \text{ N}$	1361,2970	2743,7630	4792,2530	3982,4311	6468,1938	9402,1402
K_T/J^2	0,2058	0,2489	0,3105	0,6021	0,5867	0,6092
J	0,6400	0,6300	0,5600	0,7000	0,5700	0,4700
K_Q	0,0180	0,0190	0,0215	0,0116	0,0210	0,0240
$n, \text{ s}^{-1}$	13,1159	17,2013	22,8970	11,9917	19,0120	27,2815
$P_D, \text{ kW}$	13,1754	31,3715	83,7279	6,4893	46,8165	158,0934

Gdje su n i P_D izračunati po formulama:

$$n = \frac{V_A}{D \cdot J} \quad (4.7)$$

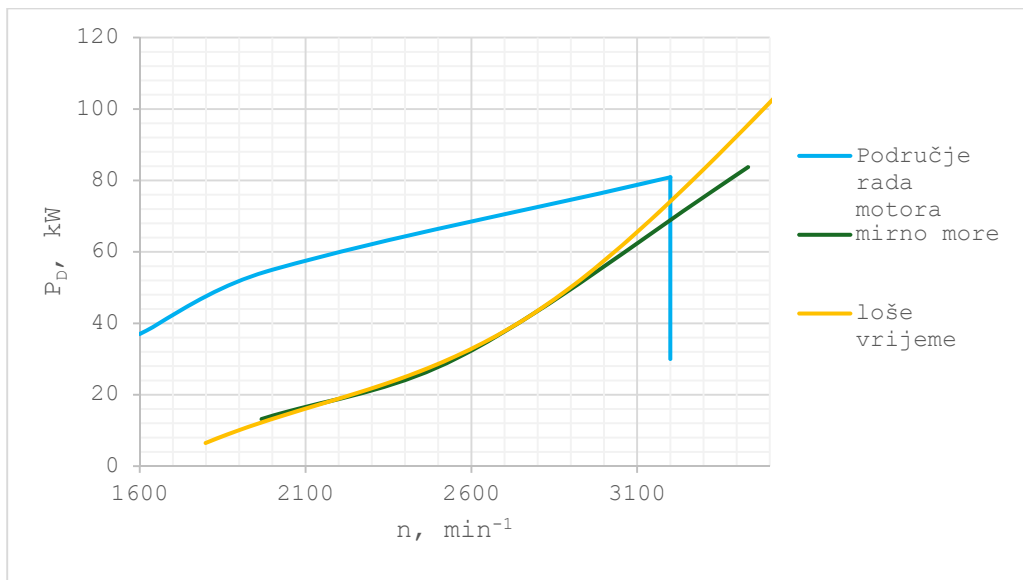
$$P_{D=2 \cdot \pi \cdot K_Q \cdot \rho \cdot D^5} \quad (4.8)$$

a K_Q i J su očitani iz dijagrama sa slike . Promjer D je poznat od prije ($D=45,72\text{cm}$).

Sljedeći korak je napraviti dijagram prikaza snage u ovisnosti o broju okretaja za krivulje (za vrijeme plovidbe mirnim morem i u teškim vremenskim uvjetima). Te krivulje uspoređujemo s područjem rada motora, nakon čega možemo donijeti zaključke o odabiru našeg vijka.

Gornja desna točka u dijagramu označava sjecište maksimalnog broja okretaja i maksimalne snage motora. Da bi mogli reći da je naš vijak optimalan, krivulja snage vijka (u ovisnosti o broju okretaja), bi trebala u najidealnijem slučaju prolaziti kroz tu točku.

U zadanom slučaju obje krivulje (za mirno more i nevirijeme) ne prolaze kroz tu točku ali su joj dovoljno blizu, što se vidi na dijagramu u nastavku:



Slika 4.9 Područje rada motora i provjera uskladbe vijka sa motorom

Na slici imamo situaciju lakog vijka. Motor je dostigao svoj maksimalni broj okretaja ali ne i maksimalnu snagu, odnosno vijak nije dovoljno opterećen. S obzirom da vijak za jedrilicu ne biramo kao najoptimalniji izbor već po izboru onoga što je dostupno od proizvođača, ovakvi rezultati su zadovoljavajući. Vijak ima malo prostora da ako dođe slučajno do porasta otpora to neće naštetiti brzini broda ali i dalje taj „višak“ snage nije pretjerano velik.

Zaključak je da je odabir vijka prihvatljiv i opravdan.

4.3.4 Provjera površine krila-kavitacija

Ako tijekom rada vijka naglo dođe do velikog pada tlaka, dolazi do pojave kavitacije koja ima puno negativnih utjecaja na brod i vijak. Smanjuje efikasnost rada vijka, povećava šum i vibracije, te oštećuje vijak.

Da bi se to sve izbjeglo provjerava se da li je površina krila dovoljno velika da izdrži snagu poriva. Provjera se vrši jednostavnom Burillovom metodom objašnjenom u nastavku.

Provjeravat ćemo najkritičniji slučaj kada je sila poriva najveća, a to je :

- Uvjeti mirne vode kada je:

Brzina $V_A=7,05$ m/s

Poriv $T=4792,25$ N

Koeficijent napredovanja $J=0,56$

Prvi korak je proračun kavitacijskog broja pomoću sljedeće formule:

$$\sigma = \frac{p_p - p_v}{\frac{1}{2} \rho v_A^2 \left[1 + \left(\frac{0,7 \pi}{J} \right)^2 \right]} \quad (4.9)$$

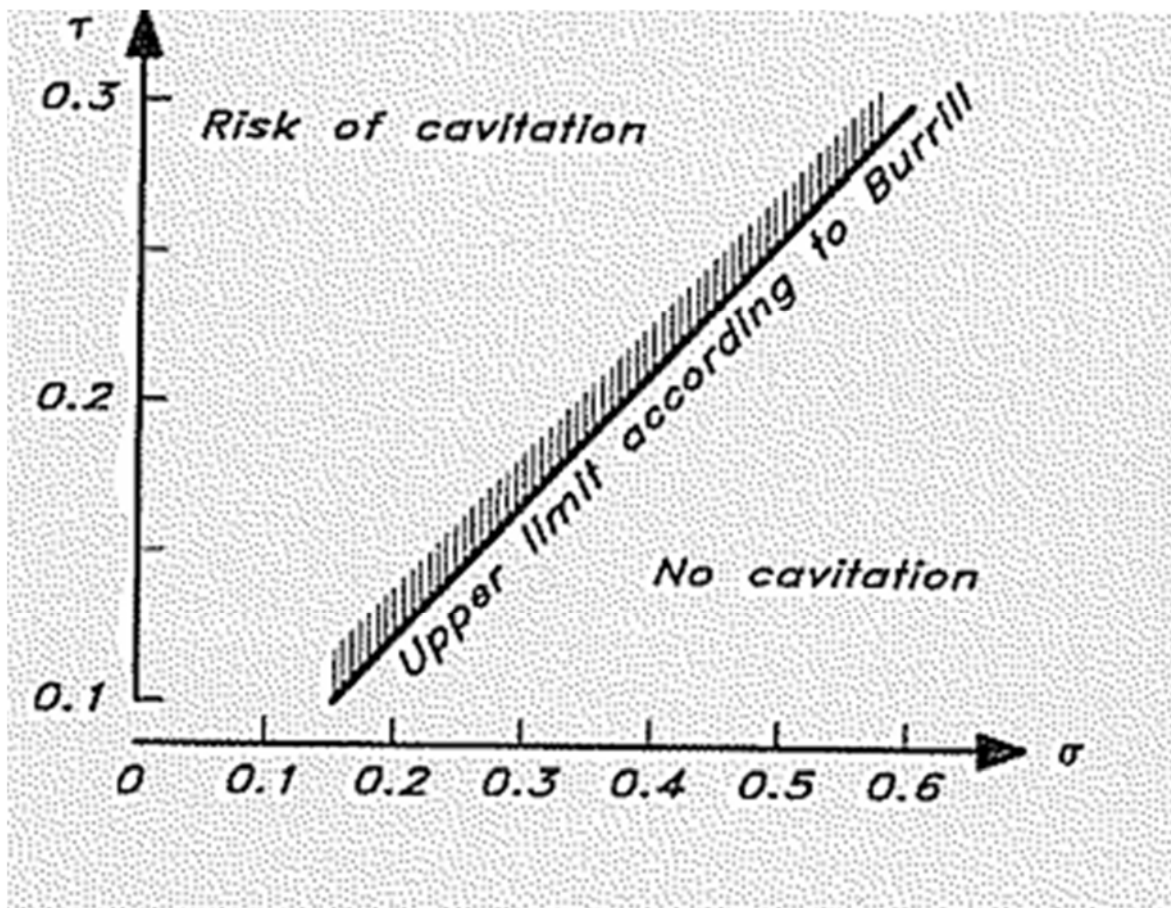
Gdje je:

$p_p = p_{atm} + \rho \cdot g \cdot h_p$, Pa najniži tlak pri kojem je najveća šansa da dođe do pojave kavitacije, gdje je $h_p = 0,4814$ m, $g = 9,80665$ (N*m²)/kg², $p_{atm} = 101300$ Pa, a $\rho = 1025,9$ kg/m³

$p_p = 106138,9$ Pa

p_v tlak isparavanja za vode za zadanu temperaturu, mi ćemo za naš slučaj uzeti da je $p_v = 2300$ Pa za temperaturu od 15 C

Uvrštavanjem podataka u jednadžbu dobivamo iznos kavitacijskog broja: $\sigma = 0,2479$, te pomoću njega u dijagramu na sljedećoj slici nalazimo iznos za τ :



Slika 4.10 Burillov dijagram [2]

Po očitavanju $\tau=0,155$ te je omjer razvijene površine i površine područja diska propele jednak:

$$\frac{A_D}{A_0} = \frac{T}{\tau \cdot \frac{1}{2} \rho \cdot V_A^2 \cdot \left[1 + \left(\frac{0,7 \cdot \pi}{J} \right)^2 \right] \cdot \left(1,067 - 0,229 \cdot \frac{P}{D} \right) \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D^2} \quad (4.10)$$

Iz čega dobijemo da omjer A_D/A_0 iznosi 0,33.

Iz Bu- δ dijagrama razmatrale su se karakteristike vijaka sa omjerom A_D/A_0 od 0,35 (iščitano iz dijagrama), što znači da je $0,33 < 0,35$ i uvjet za kavitaciju je zadovoljen, to jest površina krila našeg vijka je u redu.

4.3.5 Otpor vijka

Otpor vijka se računa po sljedećoj formuli:

$$R_p = 0,5 \cdot V^2 \cdot C_D \cdot A_p \quad (4.11)$$

Gdje je:

V brzina, čvor

C_D koeficijent otpora vijka koji je: $C_D=1,2$ za vijak sa nepomičnim krilima, $C_D=0,3$ za vijak sa nepomičnim krilima koji se slobodno rotira, $C_D=0,06$ za sklopivi vijak

A_p frontalna površina vijka, m^2 i računa se prema fomuli:

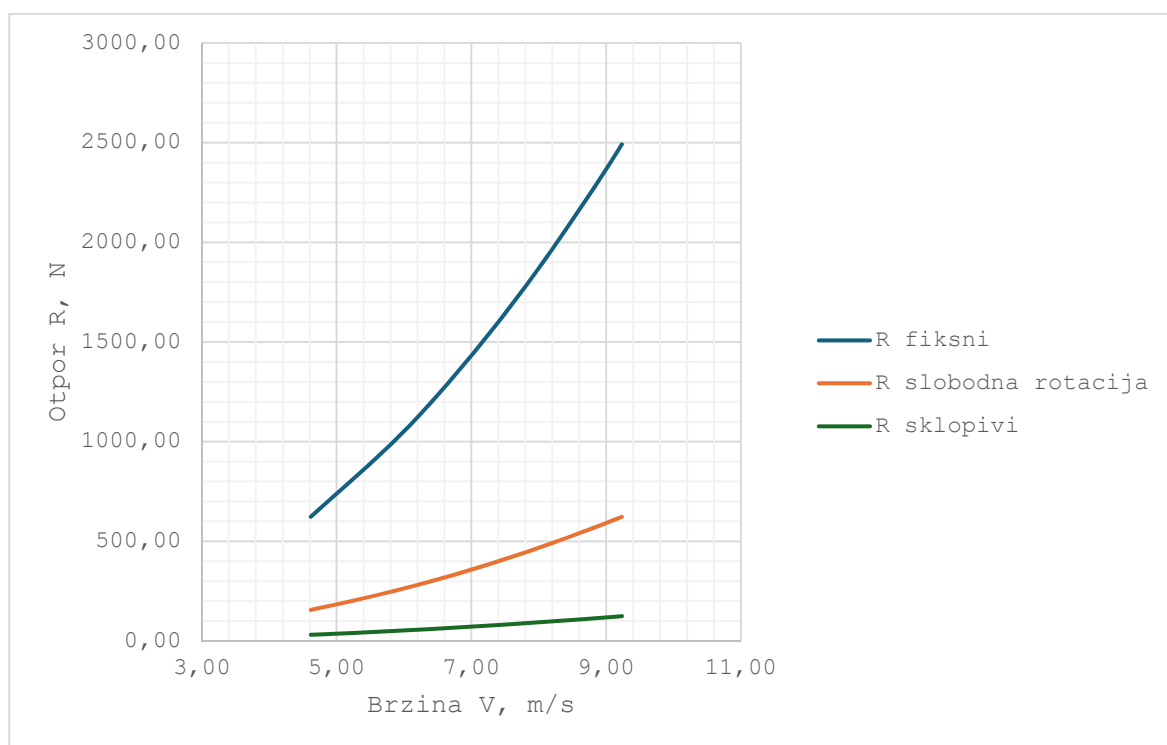
$$A_p = \frac{A_D}{A_0} \cdot \left(1,067 - 0,229 \cdot \frac{P}{D} \right) \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \quad (4.12)$$

Za $A_p=0,04748$ vrijednosti otpora za sve tri izvedbe vijka su sljedeće:

Tablica 19 Otpor fiksnog vijka, otpor vijka koji ima mogućnost slobodne rotacije i otpor sklopivog vijka

V	Rp-fiksni	Rp-sl.rot.	Rp-sklopivi
m/s	N	N	N
4,62	622,97	155,74	31,15
5,96	1038,29	259,57	51,91
7,05	1453,60	363,40	72,68
8,00	1868,92	467,23	93,45
8,84	2284,23	571,06	114,21
9,23	2491,89	622,97	124,59

Grafički prikaz otpora za sve tri izvedbe vijka:



Slika 4.11 Otpor brodskog vijka (fiksni vijak, slobodnorotirajući i sklopivi)

5. ZAKLJUČAK

Aproksimirajućim metodama temeljenim na ispitivanjima modela došli smo do procjene otpora jedrilice duge 14,95 m. Na temelju dobivenih rezultata za otpor je odabran brodski vijak i motor te je ispitan rad vijka sa motorom te da li vijak zadovoljava uvjete za kavitaciju.

Provjera usklađivanja rada motora i vijka pokazala je da pri maksimalnom broju okretaja iskorištavamo malo manju snagu motora od maksimalne što znači da imamo „lagani vijak“. Odabranu kombinaciju ipak možemo smatrati zadovoljavajućom iz dva razloga:

1. Taj iznosi nije puno manji od maksimalnog, a vijak je izabran između ponuđenih na temelju našeg optimalnog vijka (dakle nemamo optimalni vijak rađen za promatrani brod već približno sličan vijak onome što je po proračunu optimalno).
2. Ako slučajno dođe do porasta otpora (obrastanje podvodnog dijela trupa, loši vremenski uvjeti,...) vijak ima „prostora“ da dođe taman u optimalno područje rada za svoje karakteristike i za snagu izabranog motora.

Primjetno je kroz proračun postalo da za povećanje brzine iznad vrijednosti Froudovog broja od 0.4 naglo raste otpor broda, što znači da je to neka smisljena maksimalna brzina za trup koji je zadan. Mislim da je forma jedrilice pomalo zastarjela, te da bi od moderne jedrilice te veličine i sa takvom snagom motora mogli očekivati veću brzinu plovidbe motorom, no za ovaj primjer trupa mislim da su rezultati u skladu sa očekivanjima.

Literatura

- [1] Keuning, Sonnenberg, „Approximation of the Hydrodynamic Forces on a Sailing Yacht based on the Delft Systematic Yacht Hull Series“, Amsterdam, 1998.
- [2] Larsson, Eliasson, Orych, „Principles of Yacht Design“, Bloomsbury Publishing Plc, London, 2022.

Popis oznaka i kratica

A_w površina na vodnoj liniji, m^2

B_{MAX} širina trupa, m

B_u koeficijent poriva

B_{wl} širina vodne linije, m

C_f (bezdimenzijski) koeficijent trenja

C_m koeficijent površine poprečnog presjeka broda

C_p prizmatični koeficijent

D promjer vijka, m

F_n (bezdimenzijski) Froduov broj

F_{pp} pramčani perpedinkular (rebro 10)

g gravitacijska konstanta, Nm^2/kg^2

$H_{1/3}$ srednja visina vala, m

J koeficijent napredovanja

K_T Koeficijent poriva

K_Q koeficijent momenta

k_{yy} koeficijent momenta inercije, m

LOA duljina broda, m

LCB_{fpp} uzdužni položaj težišta uzgona, m

LCF_{fpp} uzdužni položaj težišta uzgona, m

L_{wl} duljina vodne linije, m

ρ gustoća mora, kg/m^3

P uspon krila vijka, m

P/D omjer uspona i promjera vijka

PD snaga predana vijku u kW

$R_{fh\phi}$ Otpor trenja trupa sa kutom nagiba, N

R_i Inducirani otpor, N

R_{rh} Preostali otpor golog trupa, N

R_{rk} Preostali otpor kobilice, N

$R_{t\phi\beta}$ Otpor trupa sa kobilicom i kormilom pod nagibom i sa kutom zanošenja, N

R_{vkr} Viskozni otpor kobilice, N

S oplakana površina broda (pri mirovanju broda), m^2

S_c oplakivana površina trupa, m^2

$S_{c\phi}$ oplakivana površina nagnutog trupa, m^2

T maksimalni gaz, m

T_c gaz golog trupa jedrilice, m

t/c relativna debljina promatranog privjeska

T_1 period vala, s

V brzina broda, m/s

ν kinematička viskoznost, m^2/s

V_A brzina pritjecanja vode, m/s

Z_{cbk} vertikalna pozicija uzgona volumena kobilice, m

Q moment, Nm

$\Delta R_{rh\phi}$ Porast preostalog otpora trupa radi nagiba broda, N

$\Delta R_{rk\phi}$ Porast preostalog otpora radi nagiba kobilice, N

∇_c volumen istisnine golog trupa, m^3

∇_k volumen istisnine kobilice, m^3

η_0 Stupanj djelovanja poriva

$(1+k)$ faktor forme

POPIS SLIKA I TABLICA

Popis tablica

Tablica 2.1 Hidrostatika	2
Tablica 2.2 Aproksimacija podataka za zadani gaz ($T=1,96m$).....	3
Tablica 3.1 Proračun otpora trenja za trup broda u uspravnom položaju	12
Tablica 3.4 Proračun promjene otpora trenja zbog nagiba broda	17
Tablica 3.5 Koeficijenti za jednadžbu (3.10): Proračun preostalog otpora trupa nagnutoga za 20°	18
Tablica 3.6 Promjena preostalog otpora trupa nagnutog 20°	19
Tablica 3.7 Prirast preostalog otpora za različite kutove nagiba	19
Tablica 3.8 Proračun otpora trenja i viskoznog otpora za kobilicu (po jednadžbi za privjeske)	21
Tablica 3.9 Koeficijenti iz jednadžbe (3.16) i proračun preostalog otpora kobilice	23
Tablica 3.10 Koeficijenti iz jednadžbe (3.19) za proračun Ch	25
Tablica 4.1 Procjena otpora na mirnoj vodi, u uspravnom položaju (iz 3. poglavlja).....	27
Tablica 4.2 Koeficijenti iz jednadžbe (4.1), za $T'_1=4,5$ i $T'_1=5$ i kut nailaska vala 145°	29
Tablica 4.3 Koeficijenti iz jednadžbe (4.1) za vrijednosti $T'_1=4,936$	30
Tablica 4.4 Proračun otpora vala pri lošim vremenskim uvjetima	30
Tablica 4.5 Ukupni otpor trupa broda (s privjescima) u mirnoj vodi i po lošim vremenskim uvjetima	30
Tablica 4.6 Proračun karakteristika vijka i potrebne snage za zadanu brzinu.....	34
Tablica 4.7 Karakteristike vijka u ovisnosti o J	40
Tablica 4.8 Proračun brzine okretaja vijka i potrebne snage za zadanu brzinu.....	41
Tablica 4.9 Otpor fiksnog vijka, otpor vijka koji ima mogućnost slobodne rotacije i otpor sklopivog vijka	44

Popis slika

Slika 3.1 Podjela otpora trupa u komponente [1]	5
Slika 3.2 Nacrti rebara glavnih modela metode sa njihovim izmjerama [1]	7
Slika 3.3 Grafički prikaz otpora golog trupa zadane jedrilice	15
Slika 3.4 Bočni prikaz kobilice (iz „Delft Various Keel Series“) po kojoj se radi proračun naše kobilice: $t/c=12,5$ [1]	21
Slika 4.5 Princip korištenja $B_u-\delta$ dijagrama [2].....	36
Slika 4.6 $B_u-\delta$ dijagram za vijke serije B 3.354 sa tri krila (korišten u ovom proračunu) [2]37	
Slika 4.7 Dijagram karakteristika brodskog vijka (sa 3 krila) [2]	39
Slika 4.8 Grafički prikaz karakteristika brodskog vijka	40
Slika 4.9 Područje rada motora i provjera uskladbe vijka sa motorom.....	42
Slika 4.10 Burillov dijagram [2].....	43
Slika 4.11 Otpor brodskog vijka (fiksni vijak, slobodnorotirajući i sklopivi).....	45

Sažetak

U ovom radu procijenjen je otpor jedrilice dužine 14,95 m, za plovidbu svjetskim morima, te je odabran vijak i motor za istu.

Otpor se procjenjuje pomoću „Delft Systematic Yacht Hull Series“, te se računa otpor golog trupa, otpor s privjescima u uspravnom i nagnutom stanju. Za odabir snage motora i vijka procijenjen je i otpor broda pri plovidbi po lošem vremenu.

Odabir motora i vijka je izvršen po metodama iz knjige „Principles of Yacht Design“. Pomoću postupka opisanog u knjizi pronađena je odgovarajuća snaga motora te potrebne dimenzije vijka. Po tim podacima su izabrani postojeći motor i vijak prema potrebama broda.

Ključne riječi: jedrilica, otpor, goli trup, privjesci, brodski vijak, snaga motora, kavitacija, otpor vijka

Summary

In this paper, the resistance of a sailing yacht (14,95 m) has been assessed for navigation in the world's oceans, and a propeller and engine has been selected for it.

The resistance is evaluated using the „Delft Systematic Yacht Hull Series“, and it calculates the resistance of the bare hull as well as the resistance with appendages in both upright and inclined positions. To determine the engine power and propeller size, the ship's resistance in adverse weather conditions has also been estimated.

The selection of the engine and propeller was carried out using methods from the book „Principles of Yacht Design“. Using the procedures described in the book, the appropriate engine power and required propeller dimensions were determined. Based on this information, existing engine and propeller were chosen according to the needs of the vessel.

Key words: sailing yacht, resistance, bare hull, appendages, propeller, engine power, cavitation, resistance of the propeller

Prilozi

PRILOG 1

PRILOG 2 Očitanja rebara