

*mr. sc. Danko Gugić, dipl. ing, Sortina 55, Zagreb*  
*Marta Pedišić Buča, dipl. ing, Brodarski institut d.o.o., Av. V. Holjevca 20, Zagreb*

## **ANALIZA METODA ODREĐIVANJA OTPORA TRGOVAČKIH BRODOVA**

### **Sažetak**

U referatu se analizira mogućnost primjene raznih metoda za određivanje otpora u preliminarnom projektu za trgovačke brodove. Metode : Lap-Keller, Taylor-Gertler, Guldhammer-Harvald, Holtrop - Mennen, SSPA, Serija michiganskog bazena, Serija norveškog bazena (Trondheim), tri serije ruskih autora i Serija 60 su analizirane obzirom na pouzdanost i praktičnost upotrebe u računalnom programu modela preliminarnog projekta. Radom su obuhvaćeni tankeri, bulk-carrieri, kontejnerski i RO-RO brodovi. Najboljom se pokazala metoda Holtrop-Mennen. Temeljem ove metode izračunate su efektivne snage koje su uspoređene sa efektivnim snagama određenim po osam različitih modela. Ovi modeli su umnošci minimalnog seta značajki broda u obliku potencija čiji su eksponenti određeni regresijskom analizom. Na temelju statističke analize i praktičnosti predložen je najbolji od ovih modela, koji sadrži dužinu, širinu, gaz, koeficijent punoće i brzinu.

*Ključne riječi: preliminarni projekt, određivanje otpora, trgovački brodovi*

## **ANALYSIS OF MERCHANT SHIPS RESISTANCE CALCULATION METHODS**

### **Summary**

The application possibility of various resistance i.e. effective power calculation methods in the preliminary design models for merchant ships are analysed. Methods : Lap-Keller, Taylor-Gertler, Guldhammer-Harvald, Holtrop-Mennen, SSPA, Michigan tank series, Norwegian tank series, Series 60 and three series of russian authors are analysed regard to the reliability and practical application in the computer model of preliminary design. The following types of merchant ships are included : tankers, bulk-carriers, containers and RO-RO ships. As the best the Holtrop-Mennen method is chosen and the effective powers are then calculated upon this method. The regression equations based on the minimum set of the ship characteristics are built. Comparing obtained results the best of those regression models is proposed ( which includes length, breadth, draught, block coefficient and ship speed ) on the basis of the statistical analysis and practicability.

*Key words: preliminary design, resistance calculation method, merchant ship*

## 1. Uvod

Određivanje otpora broda odnosno efektivnih snaga u preliminarnom projektu vrlo je važan korak. Projektantima su potrebni jednostavni i dovoljno točni načini predviđanja efektivne snage broda. U tu svrhu koriste se približne metode dobivene pomoću analize metodičkih i statističkih serija brodova. Glavni zahtjevi na metode su praktičnost, kompjutorabilnost i točnost. Prednost imaju metode koje traže najmanje ulaznih podataka po mogućnosti osnovni set podataka: dužina, širina, gaz, koeficijent punoće istisnine i Froudeov broj odnosno brzina broda. Od objavljenih metoda, nastalih uglavnom između 50-tih i 80-tih godina prošlog stoljeća, u ovom su radu razmatrane metode dane u Tablici 1 i 2.

**Tablica 1.** Približne metode za proračun otpora, metodičke serije

**Table 1.** English translation

Naziv serije Mjesto i vrijeme ispitivanja Publikacija	Područje primjene	Opis ispitivanih Modela	Rezultati
1.1. Taylor – Gertler ; TG  Washingtonski bazen, Taylor ( ispitivanja do 1914 ) rezultati ‘Speed and Power of Ships’ 1933 Gertler –reanaliza ( 1948 – 1951 ) [1]	konstantni : $C_M = 0.925$ , $LCB = 0\%L$ sustavno varirani $C_p \rightarrow 0.48 - 0.86$ $B/T \rightarrow 2.25, 3.0, 3.75$ $\nabla / L^3 \rightarrow (0.7 - 8.75) \cdot 10^{-3}$ vrijedi za : $Fn \rightarrow 0.15 - 0.30$	- ‘parent’ forma krstarica Leviathan, 1900.god. -krstaška krma, bulb, dvvijčani - modeli $L = 6.096$ m -stimuliranje turbulencije na nekim modelima	$C_R = f( Fn, B/T, C_p, L/\nabla^{1/3} )$ $C_F$ - Schoenherr  $C_T = C_F + C_R + C_A$ $S = f( \nabla, L )$
1.2. SSPA serija linijskih trgovačkih brodova; SSPA  Goteborg, bazen SSPA, ispitivanja i reanaliza ( 1948 – 1950 ) [2]	konstantni : $B / T = 2.4$ -umjerena U forma sustavno varirani $C_B \rightarrow 0.525 - 0.75$ $L / B \rightarrow 6.18 - 8.35$ $LCB \rightarrow (-2 - +0.85)\% L$ $L / \nabla^{1/3} \rightarrow 5 - 7$ Vrijedi za $Fn \rightarrow 0.18 - 0.32$	‘ parent ‘ forma $C_B = 0.676$ 10 000 tdw  - karakteristična za -40 –te i 50 –te godine 20. stoljeća	$C_R = f( L / \nabla^{1/3}, Fn, C_B )$ + korekcija za $B/T$  $C_F$ – ITTC ‘57  $C_T = C_F + C_R + C_A$ $S = f( \nabla, L, C_B, B/T )$
1.3. Serija jednovijčanih tankera punih formi, SHL-UM  Michigan, Department of Naval Architecture and Marine Engineering, Ship Hydrodynamic Laboratory, University of Michigan, 1969 [3]	3 serije oblik rebara zadržan istim 1) $C_B \rightarrow 0.78 - 0.84$ 2) $L / B \rightarrow 6.25 - 7.839$  oblik rebara mijenjan 3) $B / T \rightarrow 2.16 - 2.76$  vrijedi za $Fn \rightarrow 0.14 - 0.22$	- tankeri i bulk-carrieri - 35 modela u 3 serije - modeli $L=6$ m - stimuliranje turbulencije - ispitivanja provedena sa privjescima	$r_R = f( C_B, B/T, L/B, Fn )$ $R_R = r_R \rho \nabla^{2/3} v^2$  $C_F$ – Schoenherr $C_F' = C_F + C_A$ $S = f( L, T, \nabla )$
<b>serija trgovačkih brodova velikih brzina; NSMET</b>  Norwegian Ship Model Experiment Tank, Trondheim, Norveška, 1972 [4]	konstantni : $\Delta$ , $C_M = 0.97$ rezultati u 2 skupine 1 ) $C_B \approx 0.56$ , $Fn_{\nabla} \rightarrow 0.48 - 0.82$ , $LCB \approx 1\%L$ , $L/B \rightarrow 5.7 - 7.2$ , $C_M \approx 0.97$ , $B/T = 2.6 - 3.3$ 2 ) $L / B \approx 6.64$ , $LCB \rightarrow (0.2 - 1.8)\%L$ $B / T \approx 2.941$ $C_B \rightarrow 0.525 - 0.595$ , $C_M \approx 0.97$ ispitivanja provedena za $V = 15 - 26$ kn	‘parent’ forma $\Delta = 20200$ t $LCB = 1\%L$ , $L/B = 6.64$ , $B/T = 2.941$  -umjerena U forma rebara  - $\lambda = 30$ - modeli $L = 5.533$ m, -stimuliranje turbulencije -postavljeno kormilo	- tablice sa vrijednostima $C_{TV}$ , $C_R = f( Fn_{\nabla} )$  - grafički prikaz $C_{TV} = f( L/B, B/T i Fn_{\nabla} )$  $C_{TV} = R_T / 0.5 \rho v^2 \nabla^{2/3}$

1.4. Serija kontejnerskih brodova i tankera; KB&T Rusija, 1972 [5]	konstantni : V – rebra , bulb na pramcu  varirani : $C_B \rightarrow 0.5, 0.55, 0.6, 0.65$ $L/B \rightarrow 4.8, 5.5, 6.2, 7.0$ $B/T \rightarrow 2.0, 3.5, 5.0$ $L / \nabla^{1/3} \rightarrow 4.35 - 7.1$ $C_p \rightarrow 0.565 - 0.675$	- modeli $L = 6.0$ m -stimuliranje turbulencije	$C_R' = f(C_B, L/B, Fn)$ $k_1, k_2$ $C_R = C_R' k_1 k_2$  $C_F = f(Rn)$  $C_T = C_F + C_R + C_A$
1.5. Serija tankera i bulk – carriera;  1.6. T&BC Rusija, 1955 – 1958 [5]	$C_B \rightarrow 0.6, 0.65, 0.7, 0.75, 0.8$ $L/B \rightarrow 6.0 - 8.5$ LCB $\rightarrow (-2.5 - 3) \% L$ $B/T \rightarrow 2.5$ $L / \nabla^{1/3} \rightarrow 4.96 - 7.50$ $C_p \rightarrow 0.612 - 0.815$	- modeli $L = 7.0$ m -stimuliranje turbulencije	$C_F$ –Prandtl –Schlichting $C_R' = f(C_B, Fn)$ $C_R = C_R' k_3 k_4 k_5$  $C_F = f(Rn)$  $C_T = C_F + C_R + C_A$
1.7. Serija tankera; T Rusija, 1967 – 1969 [5]	$C_B \rightarrow 0.8, 0.82, 0.84$ $L/B \rightarrow 5.5, 6.0, 6.5, 7.$ LCB $\rightarrow (1.6 - 3.5) \% L$ $B/T \rightarrow 2.76-3.06$ $L / \nabla^{1/3} \rightarrow 4.99 - 5.58$ $C_p \rightarrow 0.805 - 0.851$	- modeli $L = 6.0$ m	$C_R' = f(C_B, L/B)$ $C_R = C_R' k_1 k_5 k_A$  $C_F = f(Rn)$  $C_T = C_F + C_R + C_A$
1.8. Serija 60; S60 Washingtonski bazen, 1953 – 1957 Todd F.H., TBM report 1712, 1963 [5]	$C_B \rightarrow 0.6, 0.65, 0.7, 0.75, 0.8$ $L/B \rightarrow 5.5 - 8.5$ $B/T \rightarrow 2.5, 3.0, 3.5$ LCB $\rightarrow (-2.5 - +3.5) \% L$ $L / \nabla^{1/3} \rightarrow 4.555 - 7.498$ $C_p \rightarrow 0.614 - 0.805$	- modeli $L=6.096$ m - stimuliranje turbulencije	$C_F$ –Schoenherr $C_R = f(C_p, C_B, B/T)$ $C_R = C_R' k_5$  $C_F = f(Rn)$  $C_T = C_F + C_R + C_A$

Tablica 2. Približne metode za proračun otpora, statističke serije

Table 2 Approximate methods for ship resistance calculation based on statistical analysis

Naziv serije Publikacija u kojoj je objavljena	Područje primjene	1.9. Opis serije	Prikaz rezultata
Guldhammer i Harvald; GH 'Ship Resistance' (1965,1974) [6]	$L / \nabla^{1/3} \rightarrow 4.0 - 8.0$ $Fn \rightarrow 0.15 - 0.45$ $C_p \rightarrow 0.5 - 0.85$	- objedinjeni objavljeni rezultati ispitivanja serija iz različitih bazena	$C_R = f(L / \nabla^{1/3}, Fn, C_p)$ korekcije za $B/T$ , LCB, oblik rebara itd. $C_F$ – ITTC '57 $C_A$ $C_T = C_R + C_F + C_A$ S – dijagrami FORMDATA ili formula $S = f(L, C_B, B, T)$
Lap – Keller; LK [7] *ekstenzija Lapovih dijagrama – 'Diagrams for determining the resistance of single-screw ships', ISP 1954	$C_p \rightarrow 0.6 - 0.9$ $L/B \rightarrow 5 - 8$ $v / \sqrt{C_p L} \rightarrow 0.4 - 1.3$  - nije namijenjeno za brodove sa bulbom	- rezultati modelskih ispitivanja 107 velikih jednovijčanih brodova (bulk-carrieri i tankeri)	$r_R = f(LCB, C_p, v / \sqrt{C_p L})$ $C_R = f(r_R, L/B, C_M, B, T, S)$ $C_F$ – Schoenherr $C_A$ $C_T = C_F + C_R + C_A$ $R_T$ – korigirati za $B/T$ $S = f(V, L)$
Holtrop-Mennen; HM [8] i [9]	$Fn < 0.45$ $L/B \rightarrow 5.1-9.5$ $C_p \rightarrow 0.55 - 0.85$	- objedinjeni rezultati ispitivanja modela s rez.pokusnih plovidbi - regresijski izrazi	$R_T = R_F(1+k) + R_{APP} + R_W + R_B + R_{TR} + R_A$ - regresijski izrazi za navedene komponente otpora

Ideja je ovog rada odabrati najpovoljniju metodu, u smislu praktičnosti, kompjutorabilnosti i točnosti, te pomoću nje naći jednostavan model, složen od osnovnog seta značajki broda, kojim bi se određivale efektivne snage u fazi preliminarnog projekta.

## 2. Analiza i izbor najpovoljnije metode

**Metoda TG** (Taylor-Gertler) jednostavna je za primjenu, ima i vlastite dijagrame za oplakanu površinu. Međutim, svi brodovi iz ove serije imaju težište istisnine na sredini broda, a  $C_M=0.925$  što odudara od svojstava suvremenih trgovačkih brodova.

Glavno je ograničenje **metode SSPA** što nije primjenjiva za  $C_B > 0.75$ , tj. njome nisu obuhvaćeni puniji brodovi. Praktična je za upotrebu i zahtijeva samo osnovni set ulaznih podataka.

**Metoda SHL-UM**, serija punih brodova michiganskog hidrodinamičkog laboratorija ima vrlo uska ograničenja u pogledu koeficijenta punoće i omjera širine i gaza, ali pokriva područje brodova koji su slabo pokriveni drugim serijama. Prednost joj je što daje rezultate ispitivanja za tri stanja krcanja (puno opterećenje, 65% i 44% punog opterećenja) kao i propulzijske značajke. Jednostavna je za upotrebu i zahtijeva samo osnovni set podataka. U metodologiji nije preporučeno odgovarajući korelacijski faktor pa ga je potrebno pretpostaviti po nekoj drugoj osnovi.

**NSMET metoda** (serija norveškog bazena) je najjednostavnija za primjenu od svih spomenutih. Kao ulaz joj služi samo osnovni set podataka, a iz dijagrama se očitava samo volumenski koeficijent ukupnog otpora, te se u formuli za otpor ne koristi oplakana površina već istisnina

**Metoda KB&T** (serija kontejnerskih brodova i tankera, Rusija 1972. ) je primjenjiva za niske vrijednosti  $C_B$  od 0.5 do 0.65. Za korištenje ove metode potrebno je poznavanje oblika pramca ( da li brod ima bulb ). Obvezatna potreba za višestrukim interpolacijama također dodatno umanjuje pouzdanost.

**Metoda T&BC** (serija tankera i bulk-carriera, Rusija 1955.-1958. ) je među složenijima za primjenu zbog toga što zahtijeva brojna očitavanja iz dijagrama. Načini određivanja korelacijskog dodatka i oplakane površine nisu preporučeni. Uz osnovni set podataka kao ulazni podatak je potreban i položaj težišta istisnine.

**T metoda** (serija tankera i bulk-carriera, Rusija 1967.-1969. ) osim osnovnog seta podataka kao ulaz se zahtijeva i položaj težišta istisnine, kao i podatak da li brod ima bulb. Načini određivanja korelacijskog faktora i oplakane površine nisu preporučeni.

U **metodi S60** (Serija 60) nisu preporučeni načini određivanja korelacijskog dodatka i oplakane površine. Osim osnovnog seta kao ulazni podatak traži se i položaj težišta istisnine. Zahtijeva pri očitavanju višestruke interpolacije što umanjuje točnost.

**GH metoda** (Guldhammer – Harvald) je vrlo jednostavna za primjenu, ali ulaz uz osnovni set podataka traži i prizmatični koeficijent. Metoda je dobro koncipirana tako da se iz Froudeovog broja, prizmatičnog koeficijenta i koeficijenta vitkosti dobije koeficijent preostalog otpora očitanjem iz dijagrama, a dalje je taj koeficijent moguće korigirati ukoliko su poznati podaci o  $B/T$ ,  $LCB$  i obliku forme trupa. Područje primjene joj je vrlo široko.

**Metoda LK** (Lap-Keller) je visoke točnosti, jednostavna za primjenu, sve stavke u formuli za otpor su njome definirane, ali zahtijeva kao ulazne podatke položaj težišta istisnine i prizmatični koeficijent što najčešće u fazi preliminarnog projekta nije poznato. Najveća joj je zamjerka što ne uzima u obzir bulb na brodovima, a većina današnjih trgovačkih brodova ima bulb. Ovom metodom je moguće odrediti osim efektivne snage i snagu predanu vijku.

**Metoda HM** (Holtrop-Mennen) vrlo je širokog raspona primjene, koristi se regresijskim izrazima. Prednost joj je što razlučuje otpor u više komponenata od ostalih metoda ( vidi Tabl.

1 i 2 ) što omogućuje bolji uvid u doprinose pojedinih značajki broda otporu.

Obzirom na kompjutorabilnost sve metode, izuzevši metodu HM, su nepovoljne jer se temelje na dijagramima. Pri stvaranju odgovarajućeg koda najviše vremena oduzelo bi analitičko definiranje dijagrama i pronalaženje odgovarajućeg načina interpolacije. Najpraktičnija je metoda HM (Holtrop-Mennen) jer koristi regresijske izraze pa je kompjutorabilna bez dodatnih prilagodbi za razliku od ostalih razmatranih metoda.

Točnost razmatranih metoda ocijenit će se prema jačini korelacijske veze između vrijednosti efektivnih snaga, određenih za grupu brodova, i nekih značajki tih brodova. Značajke brodova uzete su iz četiri baze brodova (tanker, bulk-carrieri, kontejnerski i RO-RO brodovi) svrstanih u tri grupe kako je prikazano u Tablici 3.

**Tablica 3.** Baze brodova i granične vrijednosti značajki brodova

**Table 3** Groups of ships and margin values of ship's characteristics

Tip broda	GRUPA 1		GRUPA 2	GRUPA 3
	Tanker	Bulk-carrier	Containerski brod	RO-RO brod
Broj brodova	238	153	92	190
Izvor podataka	[10]	[11]	[12]	[13]
$L/B$	4.794 – 7.255	5.435 – 7.422	4.136 - 9.232	4.00 – 9.20
$B/T$	2.142 – 4.076	2.245-3.213	2.311 - 5.426	2.38 – 8.63
$F_n$	0.12 – 0.265	0.117-0.214	0.18 – 0.292	0.191 – 0.353
$C_B$	0.632 – 0.87	0.754 – 0.865	0.575 – 0.857	0.653 – 0.741
$\Delta$	2532 – 507770	22752-359936	3187 – 130 498	787 - 69 925

Pojedine metode zahtijevaju neke značajke broda koje nedostaju u ovim bazama pa su one određene korištenjem sljedećih dijagrama i/ili izraza :

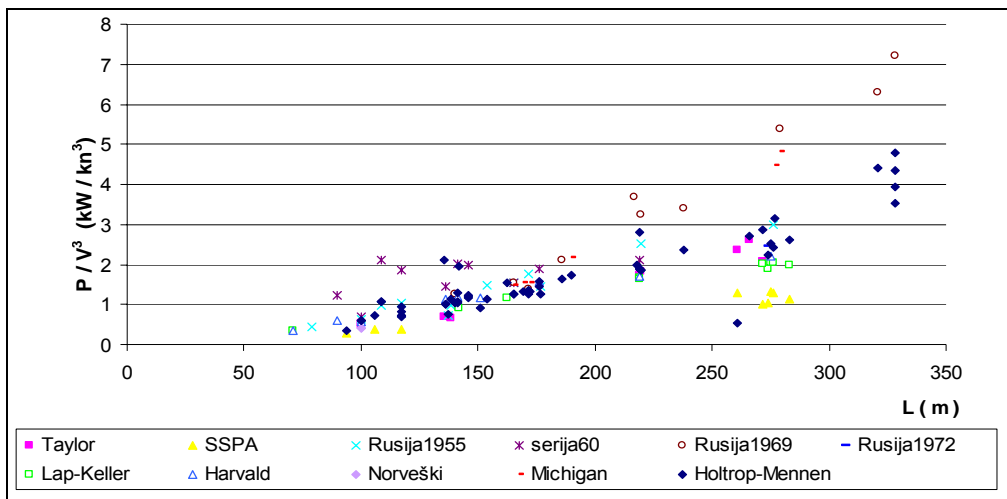
$LCB$  – srednja vrijednost prema [14] - Sl. 8.8 , str.242

$C_M$  – srednja vrijednost - Kerlen, HSVA, Benford, van Lammeren, Saunders [15], utjecaj oblika pramca prema [14] - Sl.8.1, str.233.

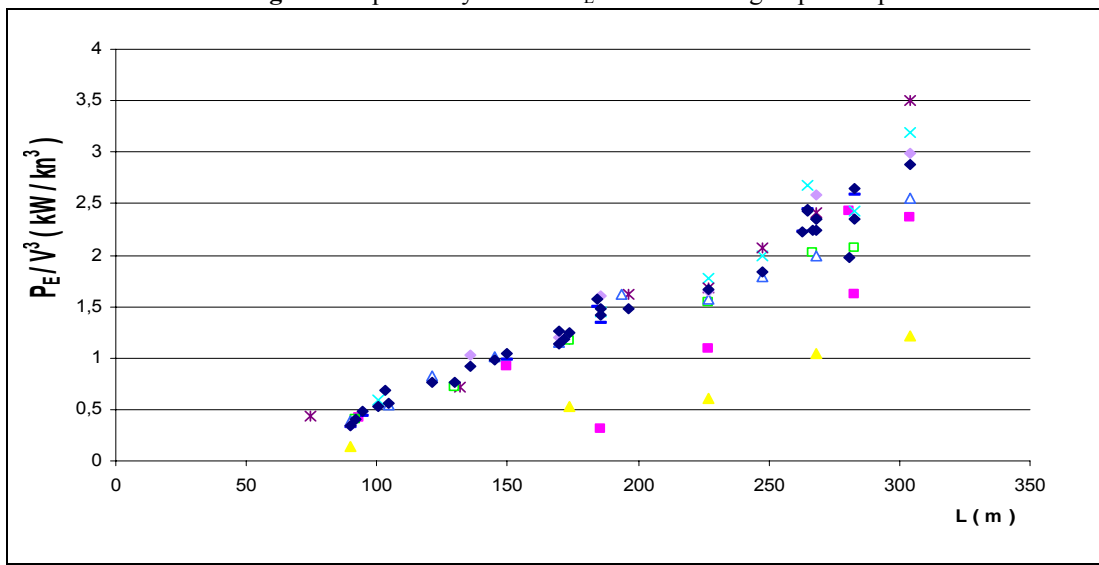
Za neke od brodova nije bio dostupan podatak o koeficijentu punoće istisnine pa je on određen pomoću izraza ( [14], str. 76 ) :

$$C_B = 0.70 + \frac{1}{8} \tan^{-1} \frac{(23 - 100F_n)}{4} \quad (1)$$

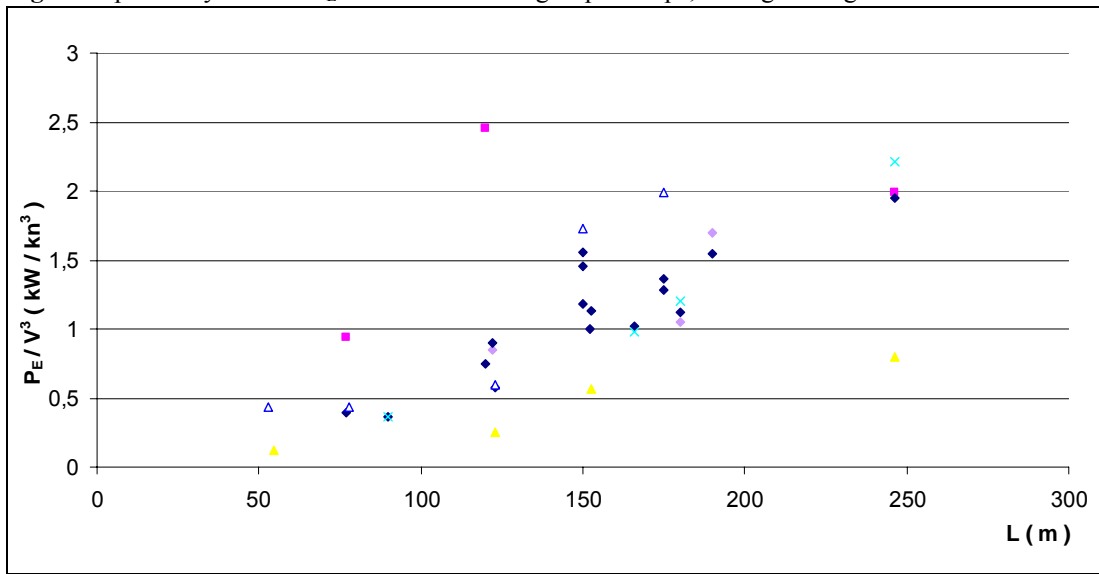
Za većinu metoda odabrano je po desetak brodova iz prve grupe, te po desetak brodova iz druge i treće grupe zajedno te su za njih određeni otpori i efektivne snage. Za metode SHL-UM, NSMET, KB&T i T efektivne snage su računane za manje od deset brodova koji su zadovoljavali ograničenja tih metoda. Otpor i efektivne snage prema metodi HM računati su korištenjem fortranskog koda, [16], za brodove iz baza koji su zadovoljavali ograničenja metode HM:  $F_n < 0.45$ ,  $C_p$  od 0.55 do 0.85 i  $L/B$  od 5.1 do 9.5 kao i ograničenja u ostalim metodama. Proračun je obuhvatio 57 brodova iz prve grupe, 38 brodova iz druge grupe te 16 brodova iz treće grupe. Za ocjenu jačine korelacijske veze formirani su sljedeći dijagrami za sve tri grupe brodova : snaga/istisnina na bazi brzine, snaga / brzina<sup>3</sup> na bazi duljine i konstanta admiraliteta na bazi brzine. Konstatirano je da dijagram snaga / brzina<sup>3</sup> na bazi duljine, [16], daje najbolji uvid u poklapanje tj. rasipanje rezultata dobivenih prema raznim metodama. Ovi su dijagrami dani na slikama 1,2 i 3.



Slika 1. Zavisnost omjera  $P_E / V^3$  o  $L$  - prva grupa brodova  
 Fig. 1 Dependency of ratio  $P_E / V^3$  -  $L$  - first group of ships



Slika 2. Zavisnost omjera  $P_E / V^3$  o  $L$  - druga grupa brodova; legenda je dana na Slici 1  
 Fig. 2 Dependency of ratio  $P_E / V^3$  -  $L$  - second group of ships; the legend is given at Picture 1



Slika 3. Zavisnost omjera  $P_E / V^3$  o  $L$  - treća grupa brodova ; legenda je dana na Slici 1  
 Fig. 3 Dependency of ratio  $P_E / V^3$  -  $L$  - third group of ships; legend is given at Picture 1

U Tablici 4. dan je prikaz koeficijenata determinacije za pojedine grupe brodova za razmatrane metode.

**Tablica 4.** Koeficijenti determinacije  $R^2$  razmatranih metoda

**Table 4** Coefficients of determination  $R^2$  for models

	$R^2$ – prva grupa brodova	$R^2$ – druga grupa brodova	$R^2$ – treća grupa brodova
Taylor-Gertler	0.9592	0.8432	-
SSPA	0.9252	0.9676	0.9254
Metoda SHL-UM	0.995	-	-
Metoda NSMET	-	0.9701	0.7529
Metoda KB&T	-	0.9924	-
Metoda T&BC	0.9314	0.9603	0.9993
Metoda T	0.9747	-	-
Seriya 60	0.3277	0.9973	-
Guldhammer-Harvald	0.9794	0.972	0.9215
Lap-Keller	0.9894	0.9953	-
Metoda HM	0.8260	0.9696	0.7986

Napomena : ako je polje ostalo prazno broj obrađenih brodova bio je nedostatan za određivanje koeficijenta determinacije

Obzirom na kompjutabilnost i činjenicu da pokriva daleko najšire područje brodova iz baza odabrana je kao najpovoljnija metoda HM (Holtrop-Mennen). Koeficijent korelacije  $R$  za tu metodu iznosi 0.909 za prvu grupu, 0.985 za drugu grupu i 0.894 za treću grupu brodova što ukazuje, prema [17], na čvrstu korelaciju što dodatno potvrđuje ispravnost odabira.

### 3. Jednostavni model za određivanje efektivnih snaga otpora

Efektivna snaga koja je izračunata pomoću fortranskog koda primjenom metode HM uspoređuje se sa efektivnim snagama izračunatim po osam jednostavnih modela :

$$\text{Model 1 } P_E = a_1 [L + (2T + B)]^{a_2} V^{a_3} \quad (2)$$

$$\text{Model 2 } P_E = a_1 L^{a_2} (2T + B)^{a_3} V^{a_4} \quad (3)$$

$$\text{Model 3 } P_E = a_1 L^{a_2} B^{a_3} T^{a_4} V^{a_5} \quad (4)$$

$$\text{Model 4 } P_E = a_1 L^{a_2} B^{a_3} T^{a_4} \Delta^{a_5} V^{a_6} \quad (5)$$

$$\text{Model 5 } P_E = a_1 M^{a_2} \Delta^{a_3} V^{a_4} \quad (6)$$

$$\text{Model 6 } P_E = a_1 \left(\frac{L}{B}\right)^{a_2} \left(\frac{B}{T}\right)^{a_3} \Delta^{a_4} V^{a_5} \quad (7)$$

$$\text{Model 7 } P_E = a_1 L^{a_2} B^{a_3} T^{a_4} C_B^{a_5} V^{a_6} \quad (8)$$

$$\text{Model 8 } P_E = a_1 L^{a_2} B^{a_3} T^{a_4} M^{a_5} V^{a_6} \quad (9)$$

Model 1 temelji se na formuli  $R_T = 0.5\rho v^2 SC_T$ , a ostali su složeni od značajki iz osnovnog seta značajki broda. Gornji izrazi se ln-iziraju za potrebe višestruke linearne regresije.

Npr. izraz 7 u ln obliku je :

$$\ln P_E = \ln a_1 + a_2 \ln L + a_3 \ln B + a_4 \ln T + a_5 \ln C_B + a_6 \ln V \quad (10)$$

Nakon regresije izrazi se vraćaju u izvorni oblik sa koeficijentima čije vrijednosti su određene regresijom. Proračuni su izvedeni za sve brodove iz baza brodova, Tablica 1, ako su zadovoljavali ograničenja HM metode.

Prema vrijednostima standardne devijacije za sve tri grupe brodova najboljima su se pokazali modeli 4,7 i 8 što je i vidljivo u Tablici 5.

**Tablica 5.** Standardne devijacije  $\sigma$  vrijednosti  $\ln P_E$  određenih pomoću pojedinih modela

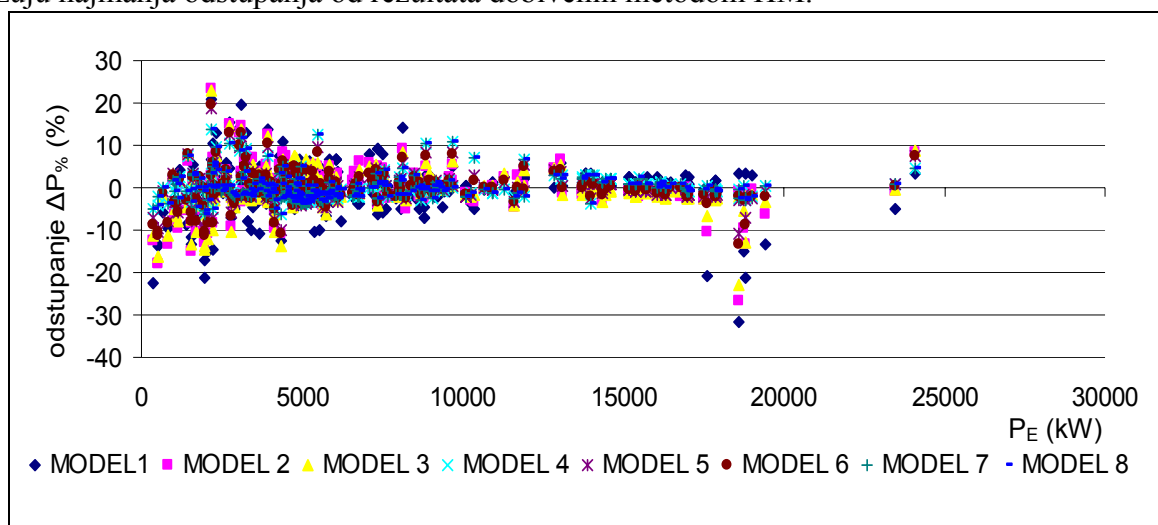
**Table 5** English translation

Model br.	$\sigma$ – GRUPA 1	$\sigma$ – GRUPA 2	$\sigma$ – GRUPA 3
1	0.0592	0.0950	0.0824
2	0.0475	0.0905	0.0548
3	0.0458	0.0911	0.0536
4	0.0309	0.0236	0.0291
5	0.0336	0.0655	0.0554
6	0.0364	0.0690	0.0465
7	0.0309	0.0236	0.0291
8	0.0309	0.0236	0.0291

Radi ilustracije dobrote modela izračunata su postotna odstupanja  $\Delta P_{\%}$  vrijednosti efektivnih snaga  $P_{E_{HM}}$  određenih po metodi HM i vrijednosti efektivnih snaga  $P_{E_i}$  određenih pomoću pojedinih modela, a prema donjem izrazu :

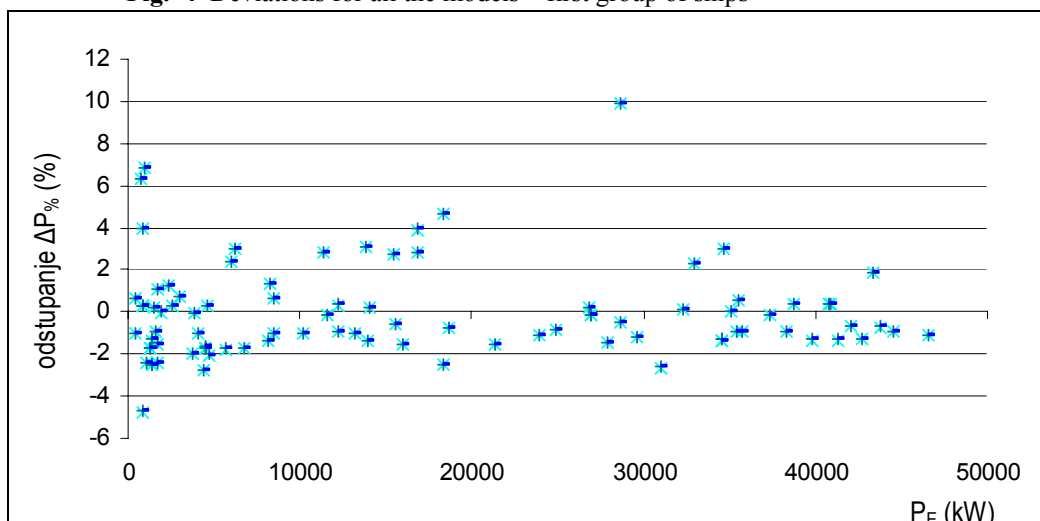
$$\Delta P_{\%} = 100 (P_{E_{HM}} - P_{E_i}) / P_{E_{HM}} \quad (11)$$

Odstupanja su prikazana na Slikama 4,5 i 6 – kako je bilo za očekivati modeli 4,7 i 8 pokazuju najmanja odstupanja od rezultata dobivenih metodom HM.



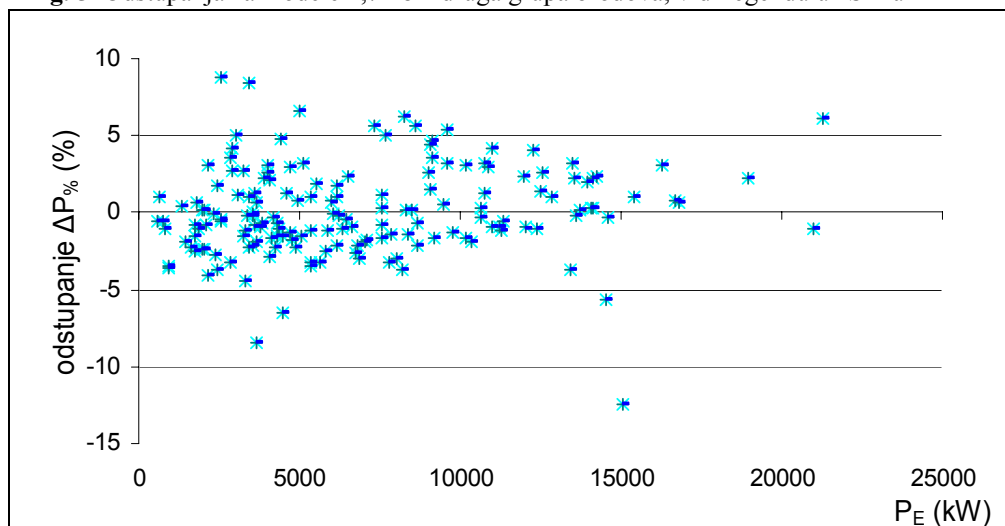
**Slika 4.** Odstupanja za sve razmatrane modele – prva grupa brodova

Fig. 4 Deviations for all the models – first group of ships



Slika 5. Odstupanja za modele 4,7 i 8 – druga grupa brodova; vidi legendu uz Sliku 4

Fig. 5 Odstupanja za modele 4,7 i 8 – druga grupa brodova; vidi legendu uz Sliku 4



Slika 6. Odstupanja za modele 4,7 i 8 – treća grupa brodova; vidi legendu uz Sliku 4

Fig. 6 Deviations for the models No 4,7 and 8 – third group of ships; legend is given at the Picture No.4

Sa stanovišta praktičnosti za projektanta od ova tri modela najprihvatljiviji je model 7 zbog toga što u ulazu u usporedbi s modelima 4 i 8 sadrži najprikladniji set podataka. U Tablici 6 dane su srednje vrijednosti apsolutnih iznosa postotnih odstupanja i intervali povjerenja od 99,7%, prema normalnoj raspodjeli, za model 7 posebno za svaku grupu brodova.

Tablica 6. Prikaz statističkih vrijednosti za model 7

Table 6 Statistical values for model No. 7

	PRVA GRUPA	DRUGA GRUPA	TREĆA GRUPA
$\frac{\sum_{i=1}^n  x_i }{n}$	2.09	1.59	2.20
$\sigma$	2.974	2.231	2.905
$(\bar{x} \pm 3\sigma)$	-8.971 - +8.868	-6.715 +6.665	-8.632 - +8.80

Za određivanje efektivnih snaga u preliminarnom projektu, a na temelju dane analize, predlaže se model 7 odnosno sljedeći izrazi:

$$P_E = 0.00303 L^{0.251} B^{0.633} T^{0.571} C_B^{1.26} V^{3.63} \quad (12)$$

KONTEJNERSKI BRODOVI – brodovi grupe 2

$$P_E = 0.00331 L^{0.265} B^{0.897} T^{0.466} C_B^{2.11} V^{4.39} \quad (13)$$

RO-RO BRODOVI – brodovi grupe 3

$$P_E = 0.003215 L^{-0.212} B^{0.942} T^{0.428} C_B^{2.42} V^{4.33} \quad (14)$$

#### 4. Zaključak

Predloženi regresijski izrazi imaju prednost pred približnim metodama zbog svoje jednostavnosti i praktičnosti u korištenju, naročito u nekom kompjutorskom kodu preliminarnog projekta broda. Također daju izravan uvid u doprinos osnovnog seta značajki broda otporu broda.

Točnost predloženog modela, odnosno širina  $3\sigma$  intervala povjerenja ograničavaju njegovu primjenu samo u preliminarnom projektu.

Daljna istraživanja mogla bi proširiti analizu s otpora broda tj. efektivnih snage na snagu predanu vijku jer neke od obrađenih metoda uključuju i procjenu propulzijskih značajki te potrebne snage predane vijku. Ovo proširenje dodatno bi pomoglo projektantu.

#### LITERATURA

- [1] Gerltler M. : *A Reanalysis of the original test data for the Taylor Standard Series*, The David W. Taylor Model Basin, Washington, 1954
- [2] Williams A.: *The SSPA Cargo Liner Series Resistance*, Publications of the Swedish State Shipbuilding Experimental Tank, Goteborg, 1969
- [3] Tsuchida K., Yakoo K., Yazaki A., Moriyama S., Ohashi S. : *Systematic resistance and propulsion tests with models of single-screw full bodied, oil tankers* , Japanese Ministry of Transport, Ship Research Institute Report, The University of Michigan, 1969
- [4] A.Akre: *Propulsive performance in still water of high speed cargo ships with methodically varied form coefficients*, Norwegian Ship Model Experiment Tank Publication, 1972
- [5] Vojtkunskij J. i drugi : *Spravočnik po teoriji Korablja* , Lenjingrad, 1985
- [6] Harvald Sv.Aa: *Resistance and Propulsion of Ships*, A Wiley-Interscience Publication, John Wiley&Sons, 1972
- [7] Keller W.H.: *Extended diagrams for determining the Resistance and required Power for single-screw ships*, ISP, 1972
- [8] Holtrop J., Mennen G.G.J.: *An approximate power prediction method*, ISP, (29)1982
- [9] Holtrop J. : *A statistical re-analysis of resistance and propulsion data*, ISP, (31)1984
- [10] Brigić J. : *Zavisnosti prostora o glavnim značajkama tankera*, diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2001
- [11] Fridel J. : *Zavisnost prostora u trupu o glavnim značajkama broda za rasuti teret*, diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2003
- [12] Ružić S.: *Formiranje baze podataka i statistička obrada podataka za brodove za prijevoz kontejnera* , diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1997
- [13] Slapničar V. *Odnos pregrađivanja i sigurnosti RO-RO brodova*, magistarski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2001
- [14] Watson, D.G.M: *Practical Ship Design*, Elsevier, Oxford, 1998

- [15] Parsons, G.M. *Parametric Design*, dostupno na [www\\_personal.engin.umich.edu](http://www_personal.engin.umich.edu) ( 05.07.2004)
- [16] Gugić D., Kota I.: *Doprinos određivanju mase pogonskog postrojenja u preliminarnom projektu tankera*, Zbornik radova, SORTA 2002
- [17] Šošić I., Serdar V.,: *Uvod u statistiku*, Školska knjiga, Zagreb, 1995

## NOMENKLATURA

$a_i$	-	varijable iz regresijskog modela	$V$	-	brzina broda ( kn )
$B$	-	širina broda ( m )	$v$	-	brzina broda ( m/s )
$C_B$	-	koeficijent punoće istisnine	$\Delta$	-	masa istisnine ( t )
$C_M$	-	koeficijent glavnog rebra	$\nabla$	-	volumen istisnine ( m <sup>3</sup> )
$C_p$	-	prizmatični koeficijent	$\lambda$	-	mjerilo modela
$C_A$	-	korelacijski dodatak	$\sigma$	-	standardna devijacija
$C_F$	-	koeficijent otpora trenja			
$C_R$	-	koeficijent preostalog otpora			
$C_T$	-	ukupni koeficijent otpora			
$C_{TV}$	-	volumenski koeficijent otpora			
$F_n$	-	Froudeov broj			
$F_{n\nabla}$	-	Froudeov broj na bazi istisnine			
$k$	-	faktor forme			
$k_i$	-	koeficijenti korekcije otpora			
$L$	-	duljina broda ( m )			
LCB	-	uzdužni položaj težišta istisnine u % L			
$M$	-	koeficijent vitkosti trupa			
$P_E$	-	efektivna snaga ( kW )			
$P_{EHM}$	-	efektivna snaga prema metodi HM ( kW )			
$R$	-	koeficijent višestruke linearne korelacije			
$R_A$	-	dodani otpor ( kN )			
$R_{APP}$	-	otpor privjesaka ( kN )			
$R_B$	-	otpor bulba ( kN )			
$R_F$	-	otpor trenja ( kN )			
$R_R$	-	preostali otpor ( kN )			
$R_T$	-	ukupni otpor broda ( kN )			
$R_{TR}$	-	otpor transoma			
$R_W$	-	otpor valova			
$r_T$	-	specifični koeficijent preostalog otpora			
$R_n$	-	Reynoldsov broj			
$S$	-	oplakana površina			
$T$	-	gaz broda ( m )			