

*mr. sc. Danko Gugić, dipl. ing, Sortina 55, Zagreb*  
*Goran Paladin, cand. dipl. ing, FSB, I. Lučića 5, Zagreb*  
*Stanko Ružić, dipl. ing, Brodarski institut d.o.o., Av. V. Holjevca 20, Zagreb*

## **MODEL PRELIMINARNOG PROJEKTA KONTEJNERSKIH BRODOVA**

### **Sažetak**

Temeljem podataka o 226 izgrađenih suvremenih kontejnerskih brodova analizirane su zavisnosti volumena prostora u trupu o broju kontejnera (nosivosti), istisnini i glavnim izmjerama te zavisnosti instalirane snage pogonskih strojeva o nosivosti, brzini i glavnim izmjerama. Ove zavisnosti su definirane za Post-Panamax razred kontejnerskih brodova regresijskim izrazima s vrijednošću koeficijenta korelacije većom od 0.9. Definiran je model za preliminarno određivanje glavnih značajki kontejnerskih brodova pomoću regresijskih izraza. Na primjeru kontejnerskog broda kapaciteta krcanja 5000 TEU pokazana je primjenjivost ovog modela.

*Ključne riječi: preliminarni projekt, kontejnerski brod*

## **PRELIMINARY DESIGN MODEL FOR CONTAINER SHIPS**

### **Summary**

The dependences of hull volume on deadweight (TEU container capacity), displacement and main dimensions and the dependences of built in main engine power on deadweight, speed and main dimensions are analyzed based on the characteristic of 226 contemporary built container ships. These dependences are defined for Post-Panamax container ship class by the regression equations for which correlation coefficients are greater than 0.9. The model for preliminary estimation of main dimensions is built based on the regression equations. The application of the relevant model is shown in the example for the container ship of 5000 TEU capacity.

*Key words: preliminary design, container ship*

## 1. Uvod

U ovom radu prikazan je sintetički model preliminarnog osnivanja temeljen na regresijskim izrazima i njegova primjena na projektu kontejnerskog broda nosivosti 5000 TEU. Model je razvijen s ciljem što jednostavnije i pouzdanije izrade preliminarnog projekta. U tu svrhu je napravljena i uređena baza kontejnerskih brodova, provedena regresijska analiza prema kriteriju maksimalne vrijednosti koeficijenta korelacije i definirani su regresijski izrazi za izračun nosivosti Dwt, duljine  $L_{PP}$ , širine B, visine H, gaza T, snagu pogonskog stroja  $P_B$  i koeficijenta punoće istisnine  $C_B$ . Jednostavnost primjene je postignuta malim brojem ulaznih varijabli. Regresijski izrazi, ograničenja, konstante i već poznati izrazi za proračun značajki broda ugrađeni su u model.

Brodovi su odabrani prema godištu gradnje i procjenjenoj kvaliteti. Valja napomenuti da nije moguće izabrati samo najbolje brodove, ali je moguće izabrati brodove koji su dovoljno dobri. Tako su odabrani brodovi iz baze brodova S. Ružića [1], iz flote najuspješnijih/najvećih brodarskih kompanija i brodovi iz godišnjaka The Significant Ships [2].

## 2. Regresijska analiza

Regresijski koeficijenti su određeni modelom linearne regresije [3] danim izrazom:

$$y_i = a + b_1 x_{i1} + b_2 x_{i2} + \dots + b_j x_{ij} + \dots + b_K x_{iK} + u_i \quad (1)$$

Za ocjenu točnosti i analizu regresijskih izraza korišteni su sljedeći statistički pokazatelji:

- Relativno rezidualno odstupanje:

$$u_{i,rel} = \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \cdot 100 \quad (2)$$

- Koeficijent korelacije:

$$R = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3)$$

- Standardna devijacija:

$$\sigma_{\hat{y}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \quad (4)$$

- Koeficijent varijacije:

$$V_{\hat{y}} = \frac{\sigma_{\hat{y}}}{\bar{y}} \cdot 100 \quad (5)$$

Regresijskim izrazima određeni su:

- Ukupna nosivost,  $Dwt = f(K)$
- Duljina između okomica,  $L_{PP} = f(K, Dwt)$ , Slika 3.
- Širina,  $B = f(K, L_{PP})$ , Slika 4.
- Visina,  $H = f(K, B)$ , Slika 5.
- Gaz,  $T = f(Dwt, L_{PP})$ , Slika 6.
- Snaga,  $P_B = f(K, L_{PP}, v)$ , Slika 7.
- Koeficijent punoće istisnine,  $C_B = f(F_N)$
- Broj kontejnera ispod palube,  $K_S = f(K)$

**Tablica 1.** Regresijski izrazi, statistički pokazatelji kvalitete regresijskih izraza, broj elemenata statističkog skupa kod definiranja pojedinog izraza

**Table 1.** Regression equations, statistical indicators of regression equations quality, number of statistical group elements at defining certain equation

Rb	Veličina	Regresijski izraz	$\sigma_{\hat{y}}$	$V_{\hat{y}}$	R
1.	$Dwt$	$7587.3 + 10.916 \cdot K$	3374.7 t	6.4 %	0.979
2.	$L_{PP}$	$227.45 - 0.002835 \cdot K + 0.0009638 \cdot Dwt$	3.77 m	1.4 %	0.94
3.	$B$	$60.62 + 0.00395 \cdot K - 0.1604 \cdot L_{PP}$	0.80 m	2.1 %	0.971
4.	$H$	$11.33 - 2.557 \cdot 10^{-5} \cdot K + 0.3203 \cdot B$	0.30 m	1.3 %	0.966
5.	$T$	$20.99 + 9.231 \cdot 10^{-5} \cdot Dwt - 0.05038 \cdot L_{PP}$	0.24 m	1.8 %	0.966
6.	$P_B$	$-107281 + 8.42 \cdot K + 78.07 \cdot L_{PP} + 3705 \cdot v$	2947.5 kW	5.8 %	0.964
7.	$C_B$	$1.1012 - 1.8793 \cdot F_N$	0.0008	0.1 %	0.999
8.	$K_S$	$-204.52 + 0.5208 \cdot K$	120 TEU	4.9 %	0.988

Odgovarajuća točnost regresijskih izraza postiže se iterativnim postupkom eliminacije [4] elemenata statističkog skupa. Za početni skup od 36 brodova iz Post-Panamax klase vrši se regresijska analiza i analiza vrijednosti statističkih pokazatelja. Eliminiraju se oni članovi za koje vrijednost relativnog rezidualnog odstupanja (2) prelazi zadane granice. Postupak eliminacije se ponavlja dok se ne postigne vrijednost koeficijenta korelacije (3) veća od 0.9. Izrazi za određivanje nosivosti  $Dwt$  i broja kontejnera ispod palube  $K_S$ , definirani su za kontejnerske brodove kapaciteta od 2000 do 7500 TEU.

### 3. Model preliminarnog projekta

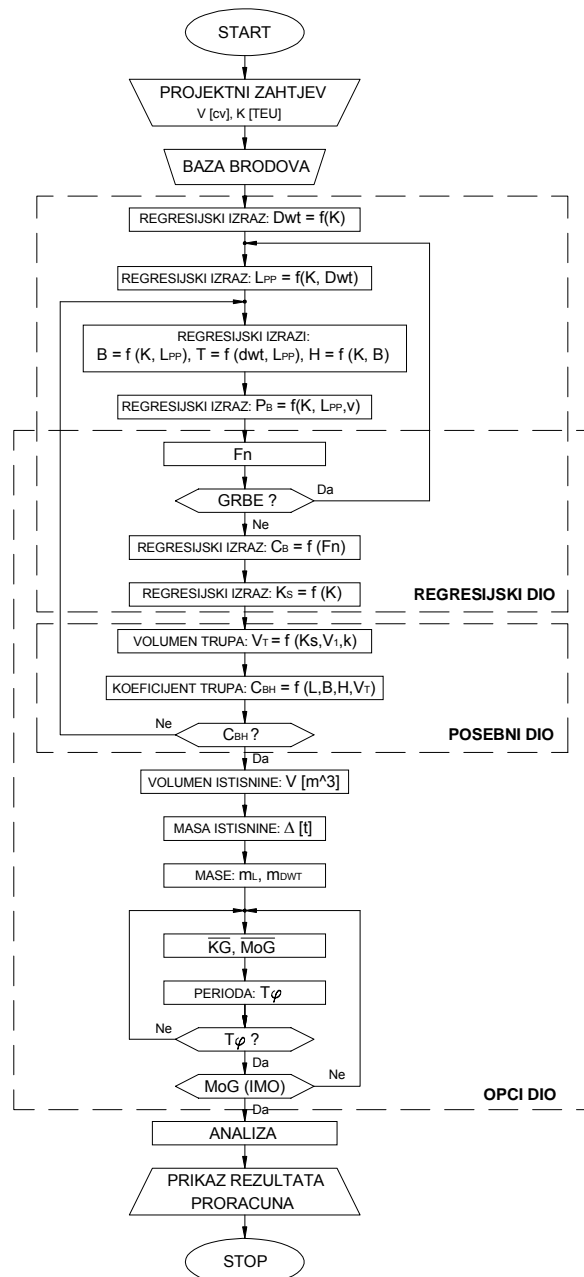
Modelom koji se temelji na regresijskim izrazima, za razliku od uobičajenih modela koji se temelje na odabiru prototipa, moguće je osnivati brodove koji su udaljeni od mogućih prototipova unutar projektnog prostora ili se nalaze u prostoru u kojem ne postoje prototipovi, a koji je prognoziran regresijskim izrazima. Prednost ovog modela je i znatna ušteda vremena potrebnog da se započne s preliminarnim projektom jer nije potrebno uvijek iznova tražiti i analizirati razne prototipove. Proširenje projektnog zahtjeva se postiže dodavanjem ulaznih varijabli (npr. zahtjev za hlađenim teretom) i (ili) se ugradi u model kao konstanta ili ograničenje.

Model se sastoji od tri dijela:

Regresijski dio: U kojem su određene značajke broda na temelju regresijskih izraza.

Posebni dio: U okviru općeg dijela. Odnosi se na posebne značajke za kontejnerski brod. U razmatranom slučaju, to je prostor potreban da bi se smjestio zahtjevani broj kontejnera ispod glavne palube. Prostor je određen duljinom  $L_{pp}$ , širinom  $B$ , visinom  $H$  i koeficijentom punoće trupa na temelju visine  $C_{BH}$

Opći dio: Proračun ostalih značajki. Provjera rezultata s obzirom na grbe na krivulji otpora, stabilitet i punoću trupa. Proračun masa. Analiza.



Slika 1. Dijagram toka modela preliminarnog projekta s označenim dijelovima modela

Figure 1. Flow chart of preliminary project model with indicated model parts

#### 4. Primjer primjene modela

Za primjer odabran je kontejnerski brod iz Post-Panamax razreda nosivosti 5000 TEU i brzine 25 čv. Proračun masa i koeficijenta trupa  $C_{BH}$  proveden je koristeći izraze iz [5], početna metacentarska visina MoG prema izrazima iz [6]. Konstante iz proračuna  $V_1$ ,  $k$ ,  $k_O$  i  $k_{PO}$  uzete su prema [5].

**Tablica 2.** Tablični prikaz pror. u preliminarnom projektu **Table 2.** Table view of calcul. in preliminary project

Korak	Veličina	Izraz	Rezultat
1	Dwt	$7587.3 + 10.916 \cdot K$	62163.3 t
2	$L_{pp}$	$227.45 - 0.002835 \cdot K + 0.0009638 \cdot Dwt$	273.19 m
3	B	$60.615 - 0.1604 \cdot L_{pp} + 0.003948 \cdot K$	36.54 m
4	H	$11.33 - 2.557 \cdot 10^{-5} \cdot K + 0.3203 \cdot B$	22.90 m
5	T	$20.99 + 9.231 \cdot 10^{-5} \cdot Dwt - 0.05038 \cdot L_{pp}$	12.97 m
6	$P_B$	$-107281 + 8.42 \cdot K + 78.07 \cdot L_{pp} + 3705 \cdot v$	48762 kW
7	Fn	$0.514 \cdot v / \sqrt{9.81 \cdot L_{pp}}$	0.248
8	$C_B$	$1.1012 - 1.8793 \cdot Fn$	0.634
9	V	$L_{pp} \cdot B \cdot T \cdot C_B$	82089.3 m <sup>3</sup>
10	$\Delta$	$V \cdot \rho_{SW}$	84141.6 t
11	$K_S$	$-204.52 + 0.5208 \cdot K$	2458 TEU
11	$V_T$	$K_S \cdot V_1 / k$	167964 m <sup>3</sup>
13	$C_{BH}$	$L_{pp} \cdot B \cdot H / V_T$	0.737
14	$m_{ST}$	$0.000345 \cdot (L_{pp} \cdot B \cdot H)^{0.9} \cdot (0.675 + C_B / 2)$	15483.1 t
15	$m_O$	$k_O \cdot L_{pp} \cdot B$	3593.2 t
16	$m_{OST}$	$k_{PO} \cdot P^{0.7}$	1319.8 t
17	$m_{GS}$	$12 \cdot (P_B / n)^{0.84}$	2103.1 t
18	$m_M$	$m_{GS} + m_{OST}$	3427.2 t
19	$m_R$	2% od Dwt	1243.3 t
20	$m_L$	$m + m + m$	22499.2 t
21	$m_{DWT}$	$\Delta - m_{ST} + m_{OST}$	62885.2 t
22		$ m_{DWT} / Dwt - 1  < 1.5\%$	1.16 %
23	$C_M$	očitano prema [6], Table 1.7	0.97
24	$\overline{KB}$	$T \cdot (0.9 - 0.3 \cdot C_M - 0.1 \cdot C_B)$	7.1 m
25	$C_{WP}$	$1/3 \cdot (1 + 2 \cdot C_B / \sqrt{C_M})$	0.76
26	$\overline{BM}$	$(3 \cdot C_{WP} - 1) \cdot B^2 / 24 \cdot C_B \cdot T$	8.7 m
27	$\overline{KM}$	$\overline{KB} + \overline{BM}$	15.8 m
28	$\overline{KG}$	$0.65 \cdot H$	14.9 m
29	$\overline{MoG}$	$\overline{KM} - \overline{KG}$	0.9 m
30	Cf	$0.373 + 0.023 \cdot B/T - 0.043 \cdot L_{pp} / 100$	0.3203
31	Tf	$1 / \sqrt{\dots}$	24.7 s

**Tablica 3.** Granične vrijednosti brzine prema podacima iz baze brodova**Table 3.** Speed boundary values by data from the ship database

Kapacitet, K [TEU]	Brzina, v [čv]
4000	23.3 ± 0.8
5000	24.4 ± 0.8
6000	25.4 ± 0.8
7000	26.2 ± 0.8
8000	27 ± 0.8

## 5. Analiza rezultata i zaključak

Regresijski izrazi za određivanje glavnih izmjera, instalirane snage i volumena u trupu definirani su uz zadani koeficijent korelacije 0.9. Kod određivanja nekih izraza ( $K_S$ ,  $L_{PP}$  i  $T$ ) broj elemenata statističkog niza je nešto manji nego što je uobičajeno kod provođenja regresijske analize. Ipak, mali iznosi standardne devijacije, mali broj eliminacija u iterativnom postupku te dobre regresijske vrijednosti za cijeli raspon zavisne varijable ukazuju na to da su izrazi dovoljno dobri.

Analizom primjene modela na projektu kontejnerskog broda od 5000 TEU utvrđeno je:

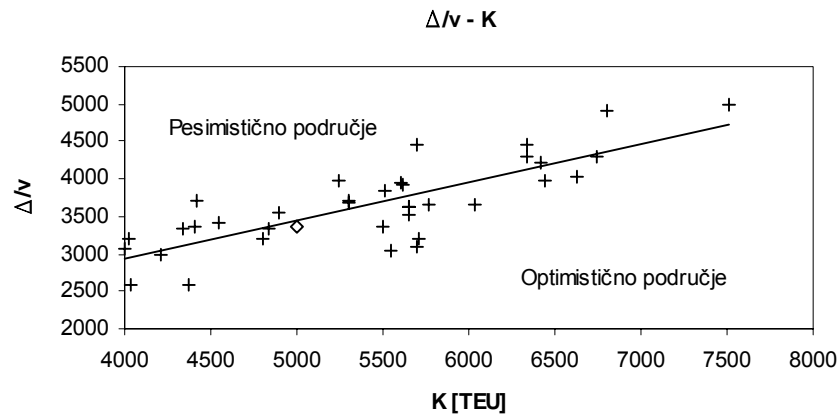
- $F_n$  – zadovoljava sa stanovišta grba otpora; u granicama je za kontejnerske brodove iz baze
- $C_{BH}$  – ima uobičajenu vrijednost u odnosu na  $C_B$  nije suviše visoka, niti suviše niska što znači da je brod dovoljno velik za projektni kapacitet, ali ne i prevelik
- $T_f$  – perioda ljuljanja je dovoljno duga; brod ne postiže velika ubrzanja prilikom gibanja na valovima; time je smanjena opasnost od gubitka kontejnera
- $MoG$  – vrijednost ove značajke je često nepouzdana zato što je funkcija značajki broda koje se određuju nakon preliminarnog projekta; za metacentarsku visinu od 0.9 m postiže se dobar period ljuljanja
- $Dwt$  i  $m_{DWT}$  – vrijednost  $m_{DWT}$  iz proračuna je u odnosu na zadanu nosivost  $Dwt$  (regresijska vrijednost) unutar zadane granice odstupanja od 1.5 %

U razmatranom slučaju izabran je prosječan brod iz Post-Panamax razreda za kojeg je u prvoj iteraciji postignuta zadana točnost. Kod projekata za koje želimo da budu bolji od prosječnih potrebno je odrediti što znači bolji i prema tome prilagoditi postupak odabira i eliminacije brodova. Prosjek je postignut zato što su u iterativnom postupku podjednako eliminirani bolji i lošiji brodovi. Ako se dobrota broda razmatra kao zavisnost omjera istisnine i brzine o kapacitetu krcanja, u pripadnom dijagramu (Slika 2.) može se jasno odrediti optimistično i pesimistično područje projekata. Ovakvo razmatranje slijedi ideju: Što više tereta, uz što veću brzinu, a što manju istisninu. Pomoću ovakvog dijagrama moguće je prije regresijske analize izostaviti brodove koji se nalaze u pesimističnom području. Time se bez intervencije u iterativni postupak eliminacije postižu bolji projekti.

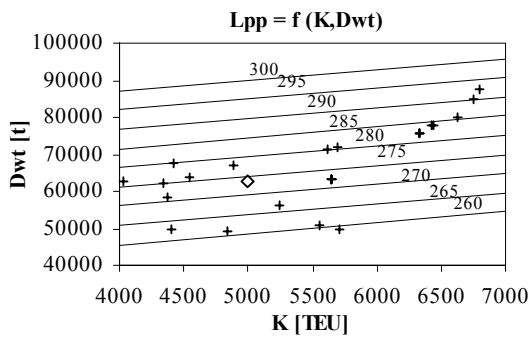
Daljnje istraživanje će pokazati koliko je ovakav model zapravo dobar, a također će biti istražene i druge mogućnosti povećanja kvalitete projekta.

## 6. Prilog

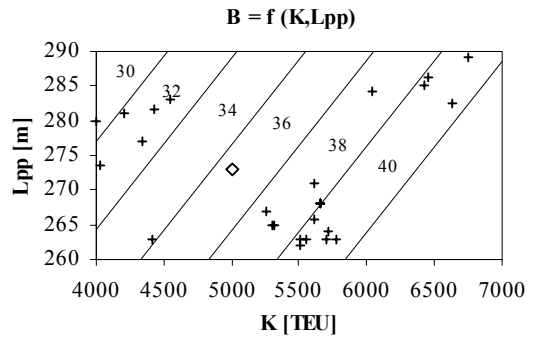
U prilogu je prikazan dijagram za procjenu dobrote projekta/broda (Slika 2.) i grafička interpretacija rezultata regresijske analize. U dijagramima regresijskih vrijednosti (Slike 3.-7.) ucrtane su vrijednosti za razmatrani brod koje su izračunate u Tablici 1. Linije u dijagramima označavaju konstantne vrijednosti regresijskih veličina u koracima.



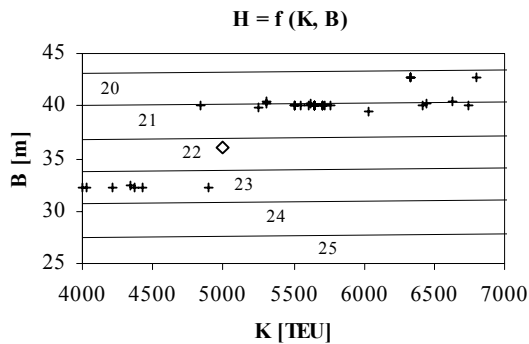
**Slika 2.** Dijagram za ocjenu dobrote projekta/broda; ordinata je omjer mase istisnine D [t] i brzine v [čv]  
**Figure 2.** Diagram for project/ship goodness estimation; ordinate is displacement D [t] and speed v [kn] ratio



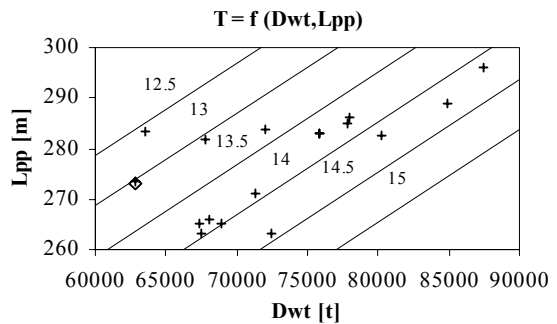
**Slika 3.** Ovisnost duljine L<sub>PP</sub> o kapacitetu K i nosivosti Dwt, korak 5 m  
**Figure 3.** Dependence of length L<sub>PP</sub> upon capacity K and deadweight Dwt, step 5 m



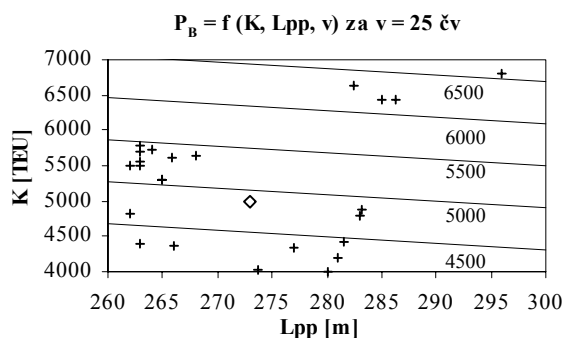
**Slika 4.** Ovisnost širine B o kapacitetu K i duljini L<sub>PP</sub>, korak 2 m  
**Figure 4.** Dependence of breadth B upon capacity K and length L<sub>PP</sub>, step 2 m



**Slika 5.** Ovisnost visine H o kapacitetu K i širini B, korak 1 m  
**Figure 5.** Dependence of height H upon capacity K and breadth B, step 1 m



**Slika 6.** Ovisnost gaza T o nosivosti Dwt i duljini L<sub>PP</sub>, korak 0.5 m  
**Figure 6.** Dependence of draught T upon deadweight Dwt and length L<sub>PP</sub>, step 0.5 m



**Slika 7.** Ovisnost snage  $P$  o kapacitetu  $K$  i duljini  $L_{pp}$ , za  $v = 25$  čv, korak 500 kW

**Figure 7.** Dependence of power  $P$  upon capacity  $K$  and length  $L_{pp}$ , for  $v = 25$  kt, step 500 kW

## 7. Popis oznaka

**Tablica 4.** Popis oznaka prema redoslijedu pojavljivanja u tekstu

**Table 4.** List of marks by order of appearance in the text

Oznaka	Opis	Jed.	Oznaka	Opis	Jed.
$y$	zavisna varijabla		$V_1$	volumen TEU kontejnera	$m^3$
$x$	nezavisna varijabla		$k$	koeficijent slaganja kontejnera u skladišta	
$\hat{y}$	regresijska vrijednost zavisne varijable		$C_{BH}$	koeficijent punoće istisnine na temelju visine	
$\bar{y}$	aritmetička sredina empirijske vrijednosti zavisne varijable		$m_{ST}$	masa čelika	t
$u_{i, rel}$	relativno rezidualno odstupanje	%	$m_O$	masa opreme	t
$R$	koeficijent korelacije		$k_O$	koeficijent opreme	
$\sigma_{\hat{y}}$	standardna devijacija		$m_{OST}$	masa ostale strojne opreme	t
$V_{\hat{y}}$	koeficijent varijacije	%	$k_{PO}$	koeficijent opreme pogonskog dijela	
$K$	kapacitet krcanja kontejnera	TEU	$m_{GS}$	masa glavnog stroja	t
$v$	brzina broda	čv	$m_M$	masa strojnog dijela	t
Dwt	ukupna nosivost (regresijska)	t	$m_R$	rezerva	t
$L_{pp}$	duljina između okomica	m	$m_L$	masa broda na LVL	t
$B$	širina broda	m	$m_{DWT}$	ukupna nosivost	t
$H$	visina broda	m	$C_M$	koeficijent punoće glavnog rebra	
$T$	gaz broda	m	$\overline{KB}$	visina težišta istisnine iznad osnovice	m
$P_B$	snaga	kW	$C_{WP}$	koeficijent punoće vodne linije	
$Fn$	Froudeov broj		$\overline{BM}$	metacentarski radijus	m
$C_B$	koeficijent punoće istisnine		$\overline{KM}$	visina metacentra iznad osnovice	m
$V$	volumen istisnine	$m^3$	$\overline{KG}$	visina težišta mase iznad osnovice	m
$\Delta$	masa istisnine	t	$\overline{MoG}$	početna metacentarska visina	m
$K_S$	broj kontejnera u skladištima	TEU	$C_f$	koeficijent periode ljuljanja	
$V_T$	ukupni volumen tereta	$m^3$	$T_f$	perioda ljuljanja	s

**LITERATURA**

- [1] Ružić S.: Formiranje baze podataka i statistička obrada podataka za brodove za prijevoz kontejnera, diplomski rad, mentor prof. A. Gamulin, FSB Zagreb, veljača 1997.
- [2] Lingwood J., Knaggs T.: Significant Ships of 1997-2003, MRINA 1997.-2003.
- [3] Šošić I., Serdar V.: Uvod u statistiku, Školska knjiga Zagreb, 1995.
- [4] Gugić D., Ružić S.: Regresijska analiza ovisnosti instalirane snage i glavnih izmjera kontejnerskih brodova o kapacitetu krcanja kontejnera, SORTA, Trogir 2002.
- [5] Watson D. G. M.: Practical Ship Design, Elsevier, Oxford, 1998.
- [6] Schneekluth H., Bertram V.: Ship design for efficiency and economy, Butterworth – Heinemann, Oxford, 1998.
- [7] Belamarić, I.: Brod i entropija, Književni krug, Split, 1998.