

Концептуална подела отпора

“Отпор брода” је **сила** која се противи кретању брода, а обухвата утицаје вискозности, инерције и гравитације

$$R_u = R_t + R_o.$$

укупни отпор

отпор трења

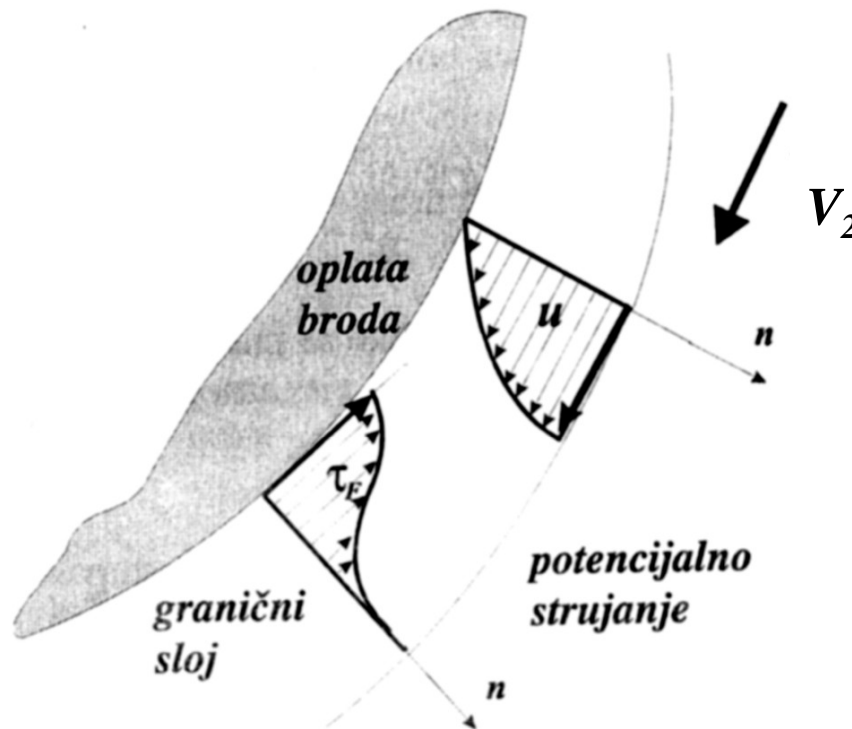
“преостали отпор” / “отпор облика”
(услед разлике притиска + таласа)

структура израза за силе:

$$R = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C \cdot A \cdot V^\alpha$$

(занемарени додатни отпори - ваздуха и привезака)

Отпор трења



Šematski prikaz graničnog sloja koji se formira uz trup broda (pogled s broda)

емпиријски обрасци

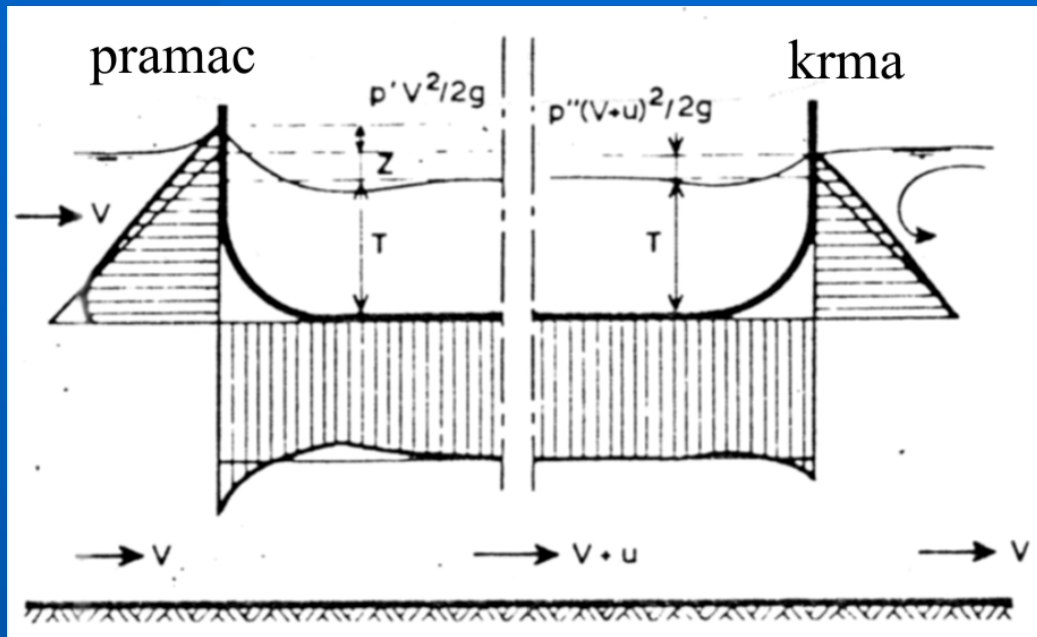
ITTC (1957):

$$R_{t_{ittc}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_{\tau_{ittc}} \cdot \Omega_{pl} \cdot V_2^2$$

$$C_{\tau_{ittc}} = 0.075 (\log Re - 2)^{-2}$$

$$Re = V_2 L_{pl} / \nu - \text{Reynoldsov broj}$$

Отпор услед разлике притиска



$$R = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C \cdot A \cdot V^a$$

$$R = R_p$$

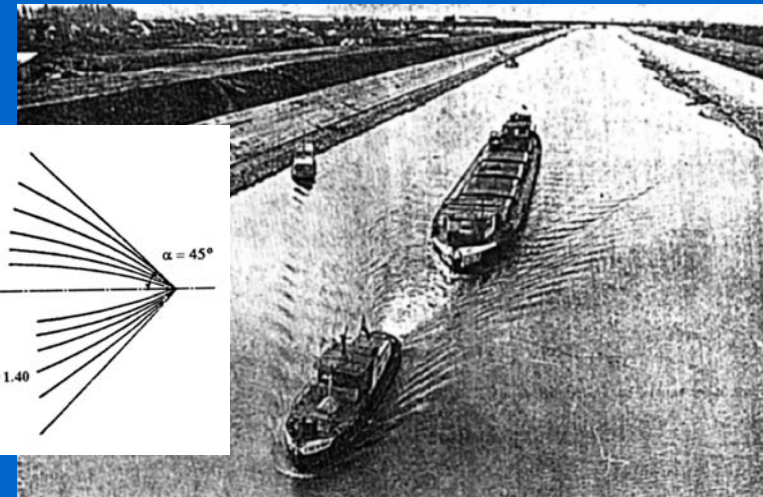
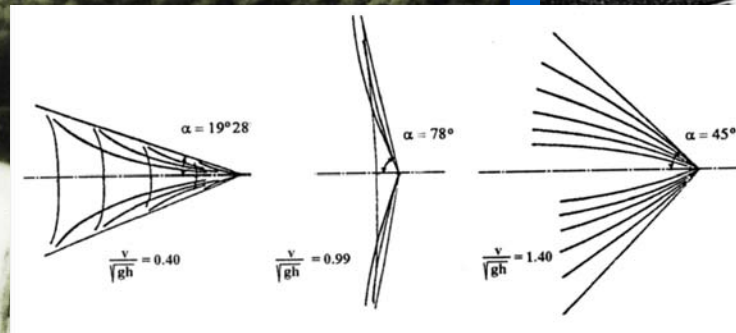
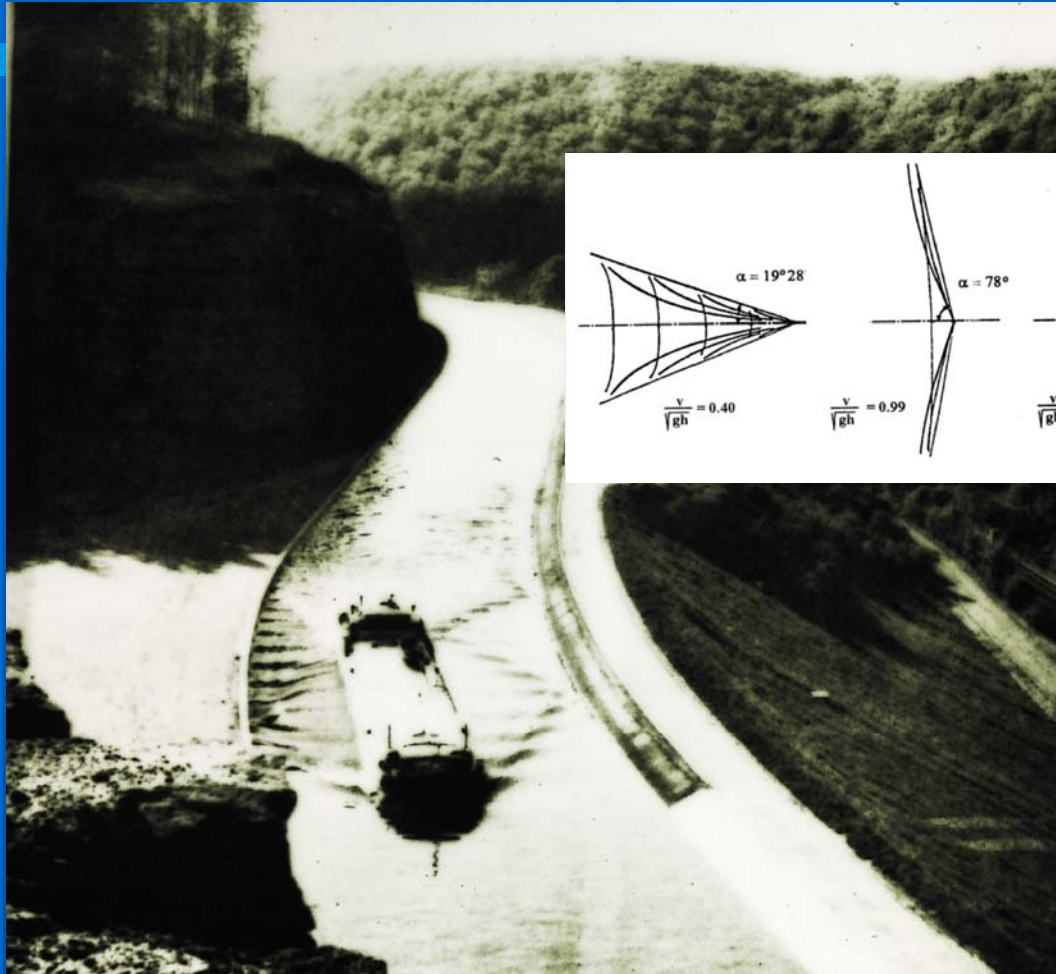
$$C = C_p (\text{Re}, \text{geom.})$$

$$A = A_{pl}$$

$$a = 2$$

“коэф. пуноће трупа”: $\delta = V_{pl} / (L_{pl} B_{pl} h_g) > 0.7$

Отпор услед таласа



$$R = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C \cdot A \cdot V^a$$

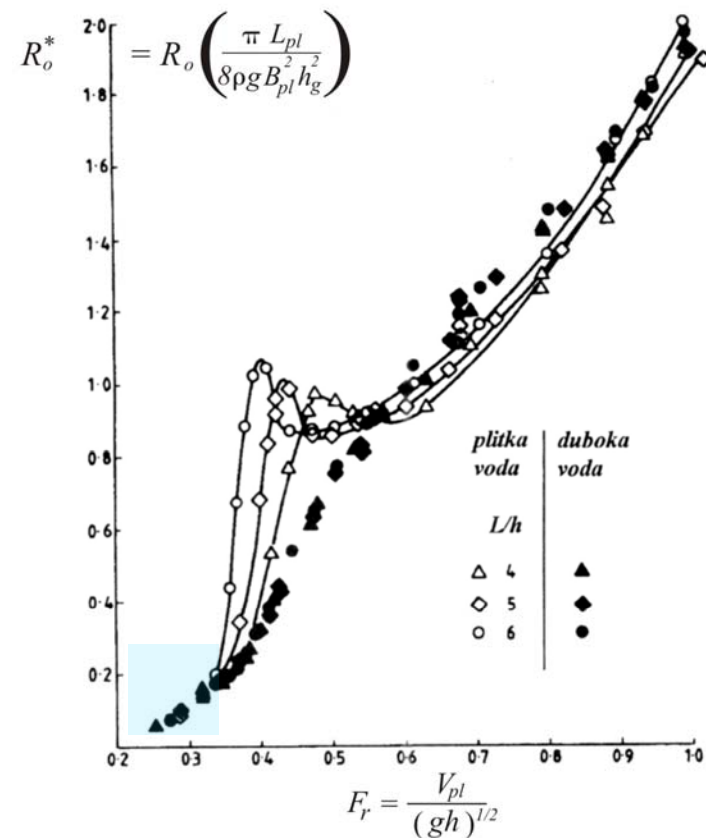
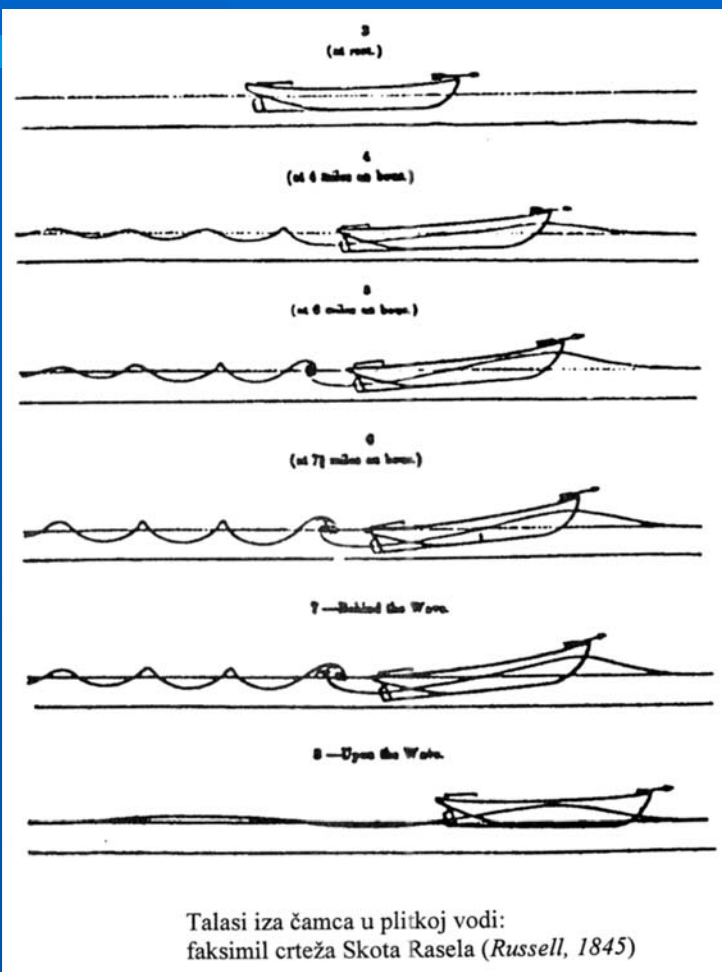
$$R = R_w$$

$$C = C_w (\text{Fr}, \text{geom.})$$

$$A = A_{pl}$$

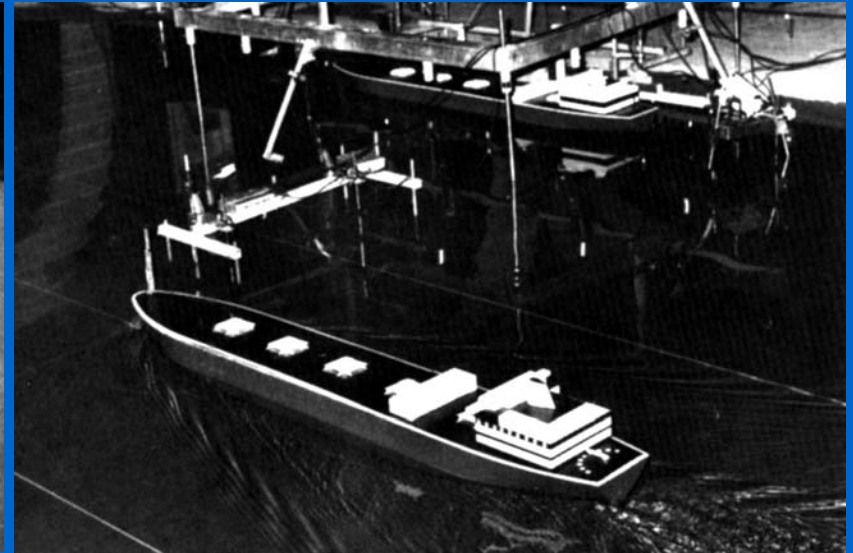
$$a = 2$$

Отпор услед таласа



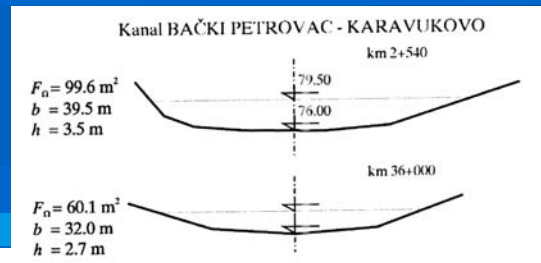
Мерење отпора брода

на прототипу / моделу



$$R_o \approx R_w = R_u - R_t$$

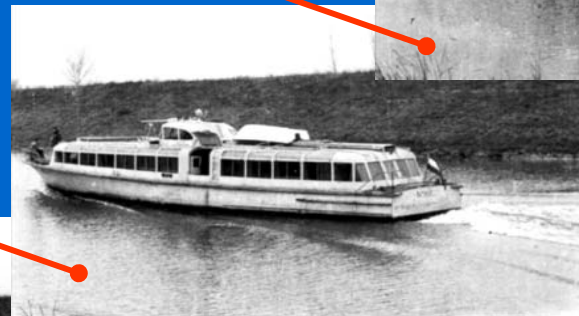
Отпор брода у пловном путу ограничене дубине и ширине



9.8 km/h



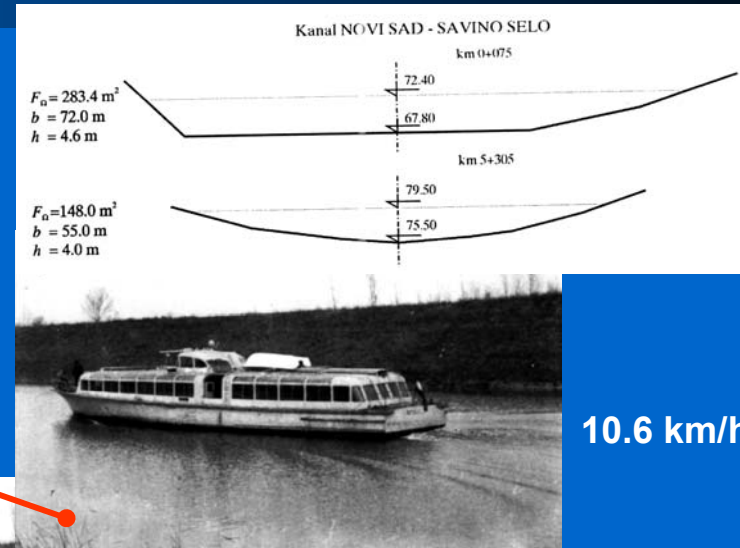
13.4 km/h



14.6 km/h



18.4 km/h



10.6 km/h

10.6.2007

Пловни путеви и пристаништа

Прорачун отпора брода

Полазне претпоставке:

- брод мирује, а вода у каналу тече брзином V_I која је једнака брзини пловидбе V_{pl} (“непоремећени” пресек 1-1 испред брода)
- рачунска брзина је релативна: $V_I = V_{pl} \pm v$, где је: v – брзина тока
- канал је призматичан, а течење устаљено, једнолико
- брод је у хоризонталном положају, удаљен од обале
- поремећај нивоа се апроксимира тако да је снижење нивоа (Δh) дуж брода константно

Поремећај нивоа око брода

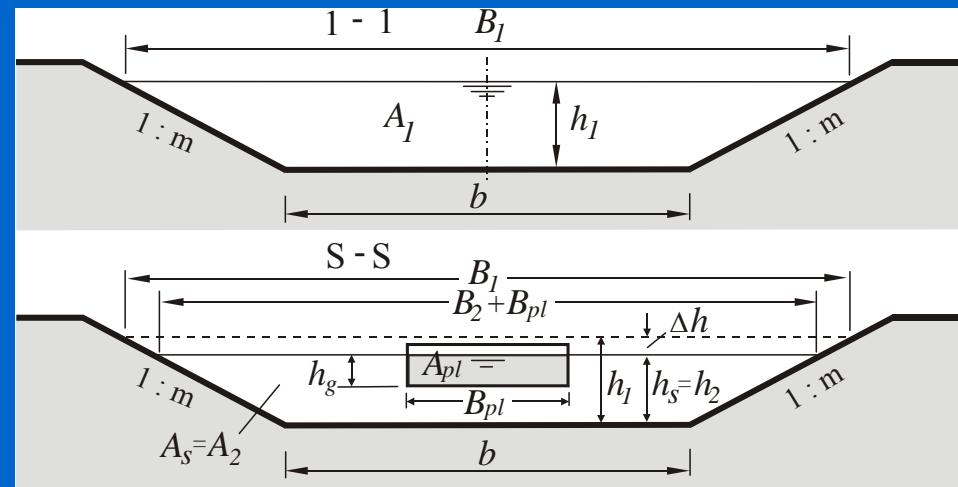
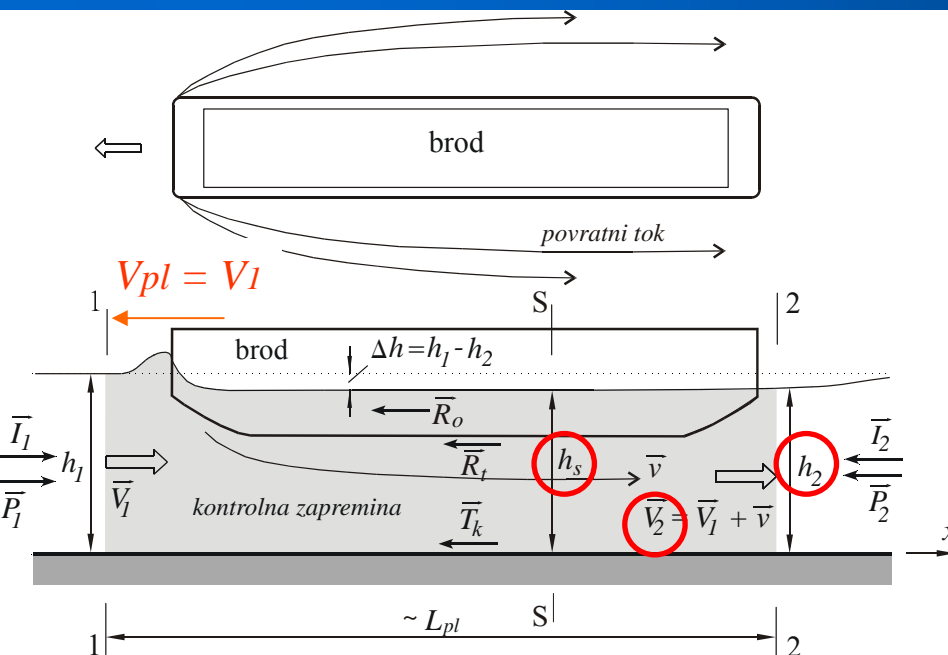


самоходни теретњак
у пловном каналу
Савино село – Нови Сад



Класични приступ

закони одржања масе и енергије

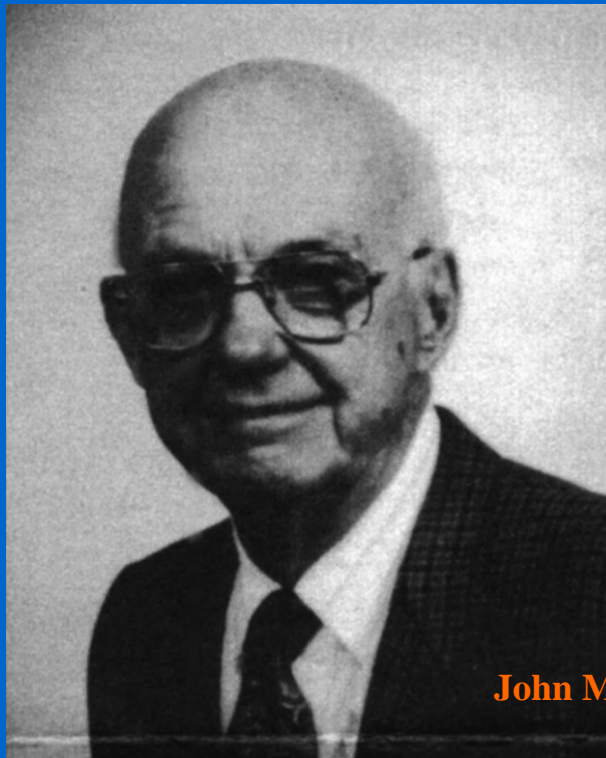


$$V_1 \cdot A_1 = V_s \cdot A_s$$

$$h_1 + \frac{V_1^2}{2g} = h_s + \frac{V_s^2}{2g},$$

$\Rightarrow h_s, V_s$
+ емпиријске формуле за R_t и R_o

Инжењерска апроксимација



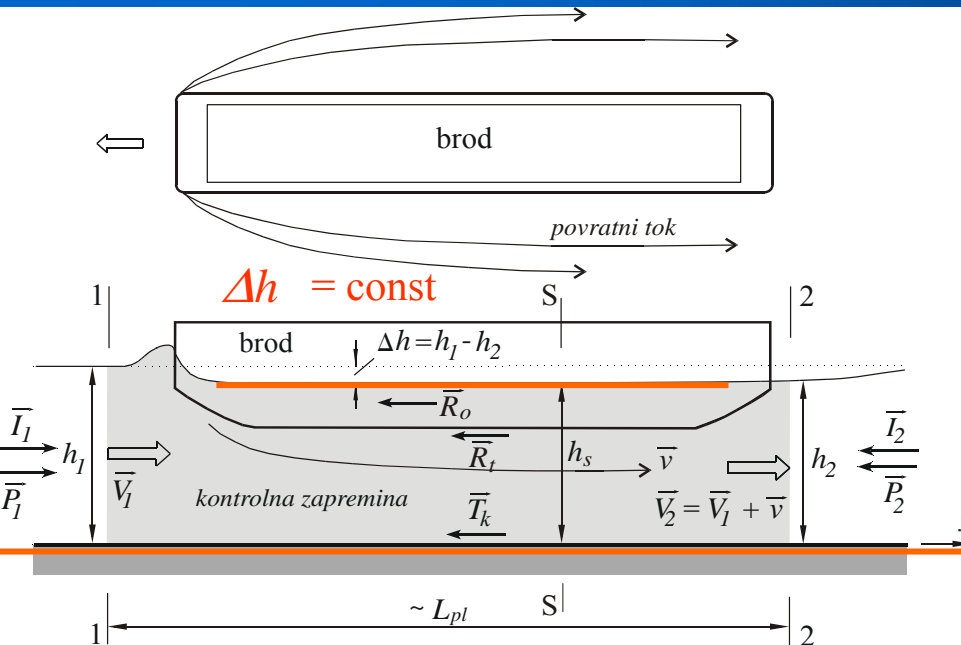
John McNown (1916-1998)

Аналогија између снаге пумпе
и погонске снаге брода

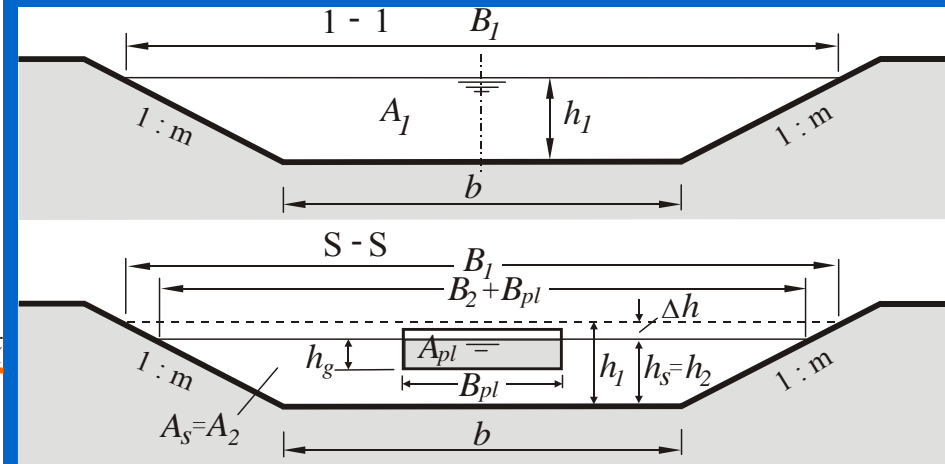
$$P_b = \rho \cdot g \cdot V_1 \cdot A_{pl} \cdot \Delta h \quad [\text{kW}]$$

$$R_o = \frac{P_b}{V_1} \quad [\text{kN}].$$

Нови приступ



закони одржања масе и кол. крет.



брзина повратног тока:

$$v = V_1 \frac{A_{pl} + \bar{B} \cdot \Delta h}{A_2}$$

равнотежа сила:

$$I_1 - I_2 + P_1 - P_2 - \underline{T_k} - \underline{R_t} - \underline{R_o} = 0.$$

непознате v , Δh

Интензитети сила у нумеричком моделу

инерцијалне силе: $I_1 - I_2 = \rho \cdot V_1^2 \cdot A_1 - \rho \cdot V_2^2 \cdot A_2$

силе притиска: $P_1 - P_2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot g \cdot b (h_1^2 - h_2^2) + \frac{1}{3} \cdot \rho \cdot g \cdot m (h_1^3 - h_2^3)$

сила трења за канал: $T_k = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \underline{C_{\tau k}} (O_2 - B_{pl} - 2h_g) L_{pl} \cdot v^2$

сила трења за брод: $R_t = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \underline{C_{\tau b}} \cdot \Omega_{pl} \cdot V_2^2$

преостали отпор брода: $R_o = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \underline{C_o} \cdot A_{pl} \cdot V_1^2$

(тропараметарски модел)

Итеративни рачунски алгоритам

$$C_{\tau k} = \text{const}$$

$$C_{\tau k} = 2g \cdot n^2 / R_{2k}^{1/3}$$

$n = \text{const}$ (Манингов коеф.)

$C_{\tau b}$ → претпостављена вредност → итеративно решавање система основних једначина све док се не задовољи услов:

$$R_t = R_{t \text{ ittc}}; C_{\tau b} = C_{\tau \text{ ittc}}$$

$$R_{t \text{ ittc}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_{\tau \text{ ittc}} \cdot \Omega_{pl} \cdot V_2^2$$

$$C_{\tau \text{ ittc}} = 0.075 (\log \text{Re} - 2)^{-2}$$

$$\text{Re} = V_2 L_d / \nu - \text{Reynoldsov broj}$$

C_o → претпостављена вредност → итеративно решавање система основних једначина све док се не задовољи биланс сила

Microsoft Excel - Rbrod

File Edit View Insert Format Tools Data Window Help

H20

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
16	C2	0.0078		Cm [-]	1.4142		asimetric samohod	28.284	318	1580	20	2037.856					
17												1800.000					
18																	
19	3. Rezultati																
20							delta h[m]	0.123									
21	smer	V1 [m/s]															
22	uzvodni	1.67															
23	nizvodni	1.67															
24																	
25	A1/Apl	5.25															
26	R2k [m]	1.8018															
27	Ctk [-]	0.0064															
28																	
29																	
30																	
31																	
32																	
33																	
34																	
35																	
36																	
37																	
38																	
39																	
40																	
41																	
42																	
43																	
44																	
45																	
46																	
47																	
48																	
49																	
50																	

Goal Seek

Set cell: \$K\$28

To value: 1.e-4

By changing cell: \$H\$20

OK Cancel

Suma sila 0.0000

Pb Ru Re Cttc Rt-itc |Rt-Rt-itc| Ro'-Ru-Rt |Ro'-Ro|

[kW] [kN] [-] [-] [kN] [kN] [kN] [kN]

40.23 24.14 3.20E+08 0.0025 12.17 0.0002 11.97 0.0004

vezbe-primer Sheet2 Sheet3

Point

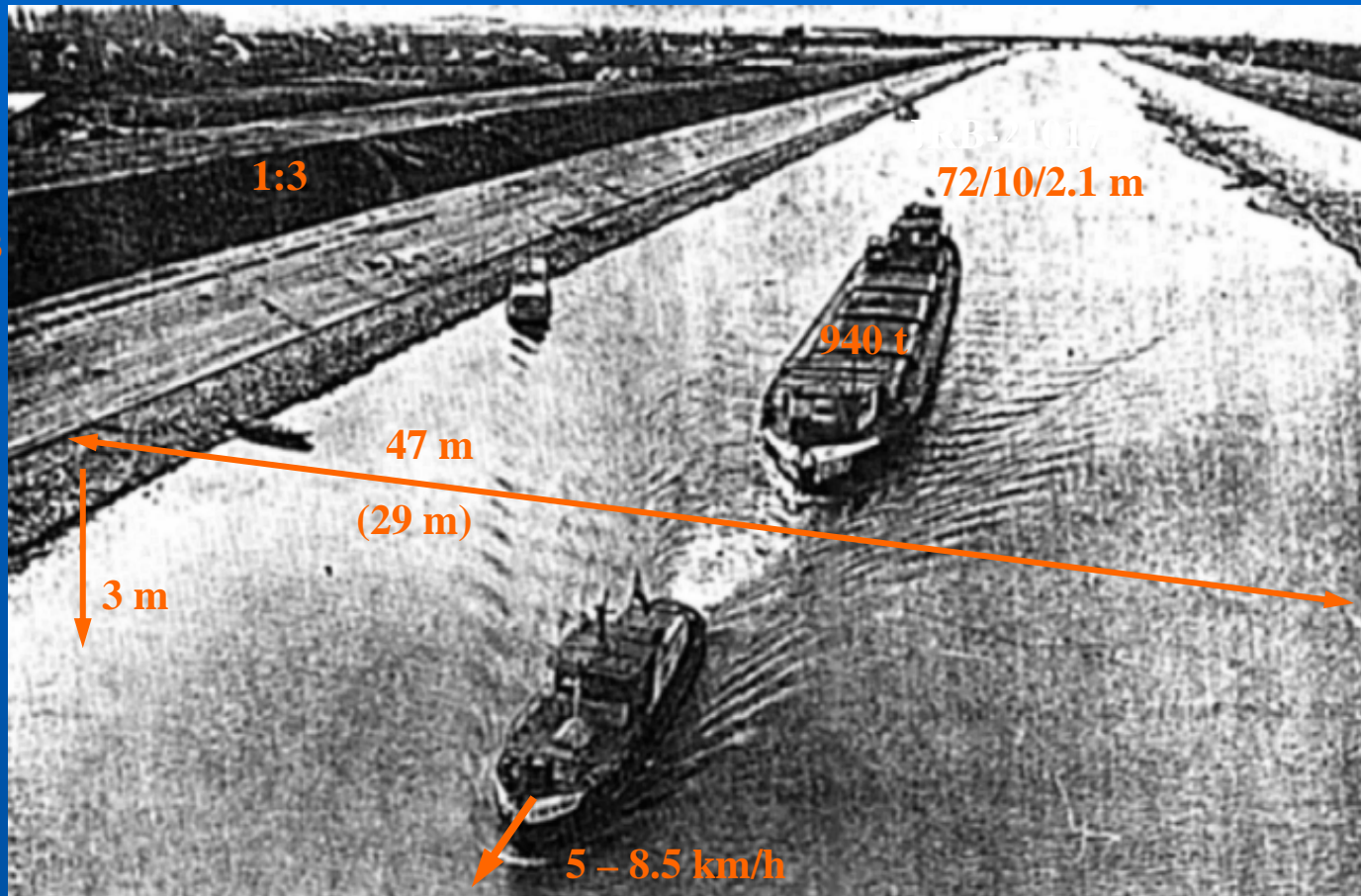
Start PCTeX32 - [C:\Knjiga3\O... SokoBanjaM31 Microsoft Excel - Rbrod

6:14 PM

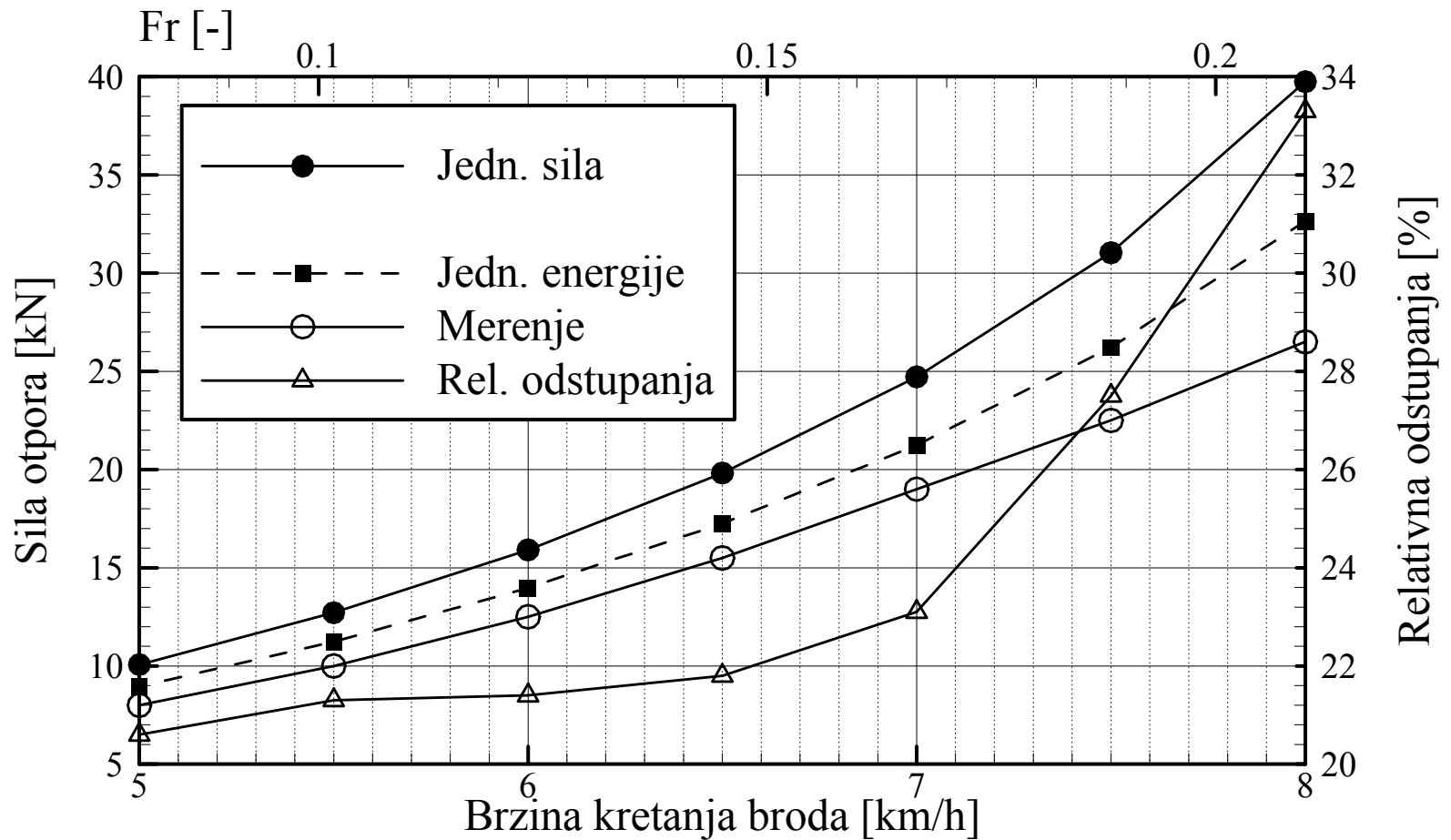
Провера нумеричког модела

проф. С. Чолић (1967)

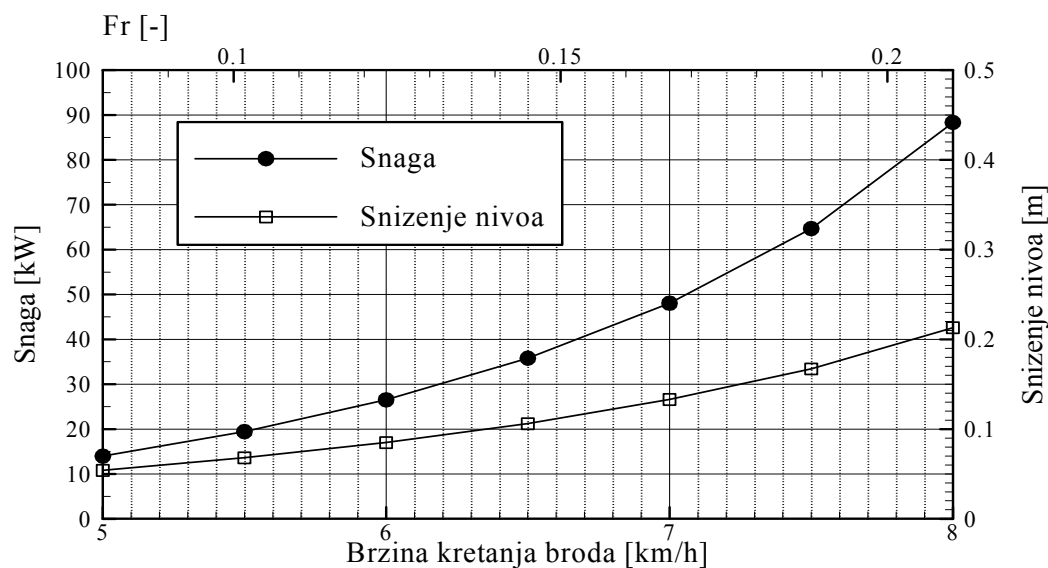
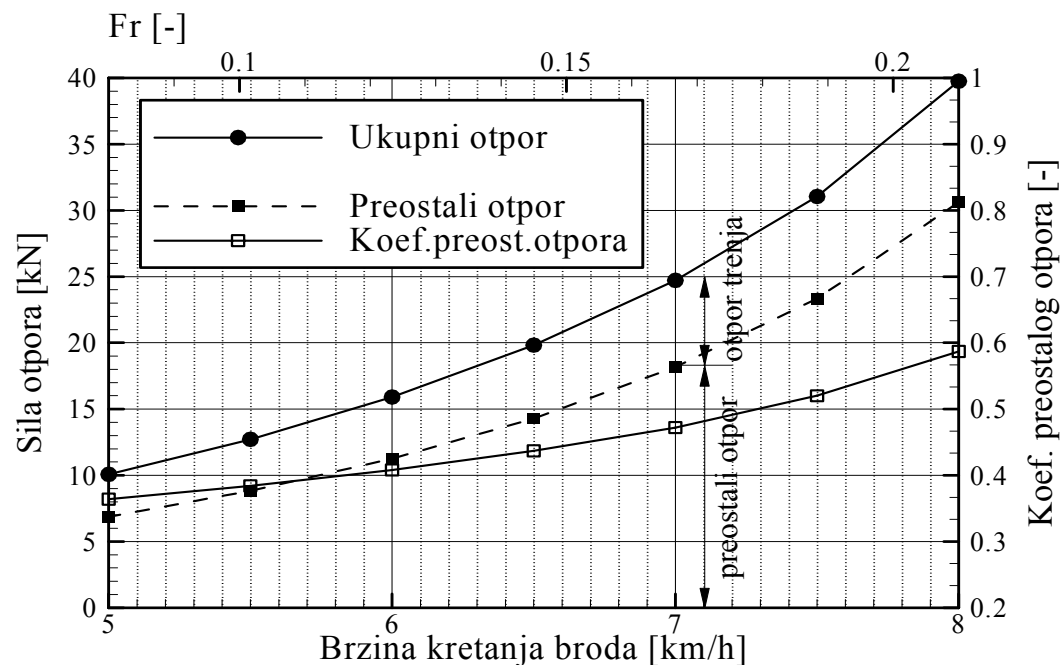
$$\frac{A}{A_{pl}} = 6.23$$

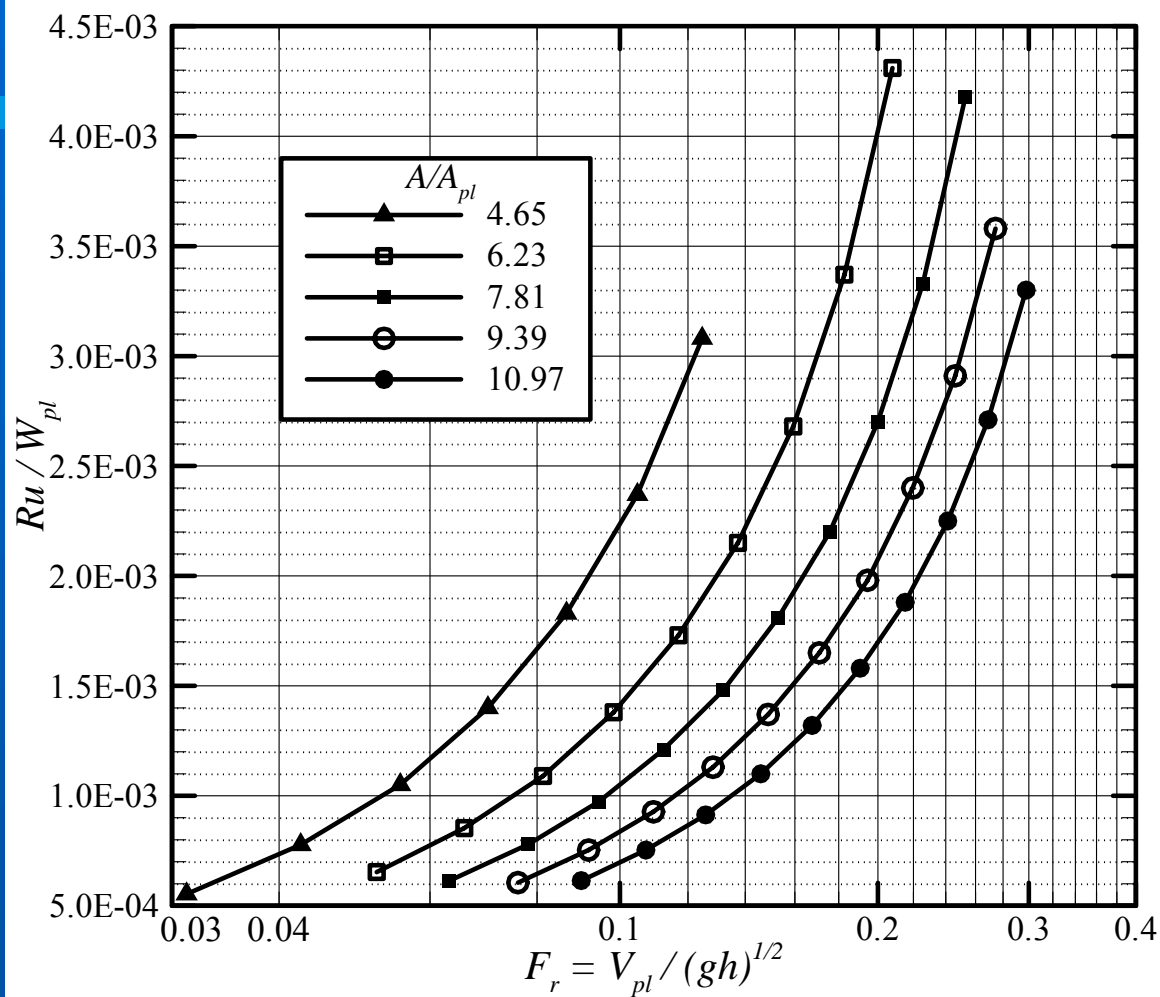


Поређење резултата прорачуна и мерења



Резултати прорачуна



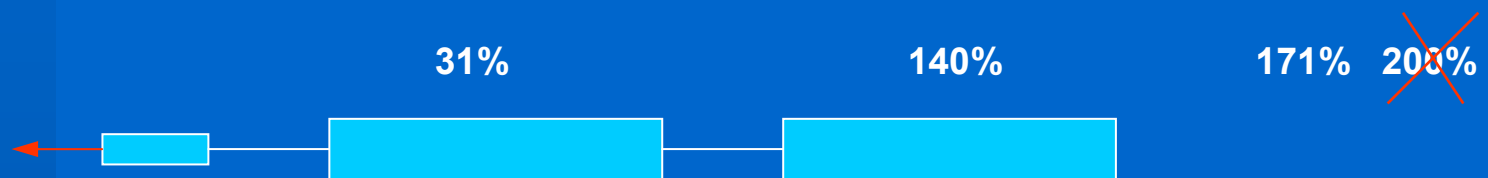


Закључци

- Аналогија између снаге пумпе и погонске снаге брода даје могућност релативно поуздане процене отпора брода у пловном путу ограниченог габарита.
- Подешавање вредности параметара модела може се итеративно обавити преко једначина биланса сила, одржања масе и обрасца ITTC за отпор трења.

Отпор састава

тегљени састав



$$R_{u-sas} = R_{u-teg} + k_s \cdot \sum R_{u-pl}$$

$k_s < 1$... “коефицијент састава”

(експериментално утврђене вредности)

Отпор састава

ПОТИСКИВАНИ САСТАВ



а) једно “велико” пловило

б) преко “коефицијента састава” $k_s < 1$: $R_{u-sas} = k_s \cdot \sum R_{u-pl}$

* * *

Отпор потискиваног састава је мањи од отпора тегљеног састава услед:

- мање укупне оквашене површине (мањег трења)
- бољих услова опструјавања
- мањег кривудања у току пловидбе

Последица: при истој погонској снази, брзине потискиваног састава могу бити до 20% веће од брзина тегљених састава !