

## **THE ANALYSIS OF SOME PARAMETERS INFLUENCING ACCURACY OF THE WAVE PATTERN RESISTANCE DETERMINATION**

### **Summary**

The method for wave pattern resistance determination from wave pattern measurements in longitudinal cuts, in a tank of finite width, has been shown. The influence of the record length and the starting position with respect to the main hull stern, for a chosen trimaran configuration, on the accuracy of results have been analyzed. Dissipation of results becomes significant if the record length is too short. It has been shown that the wave pattern resistance decreases considerably as the record length becomes longer, which physically has no sense. Numerical experiments with theoretically generated waves show that the increase of the record length entails increase in the wave pattern resistance e.g. it converges to the theoretical value. Such behaviour can be attributed to the existence of certain physical phenomenon in the experiment that is not embraced by the present hydrodynamical model. For maximal disposable record length most of the experimentally obtained points lie within the confidence precision error band.

*Key words:* accuracy, wave pattern resistance, longitudinal cut, ship

## **ANALIZA NEKIH PARAMETARA KOJI UTJEČU NA TOČNOST PRI ODREĐIVANJU OTPORA RELJEFA SLOBODNE POVRŠINE**

### **Sažetak**

Prikazana je metoda određivanja otpora reljefa slobodne površine iz mjerenja reljefa slobodne površine u uzdužnim ravninama, u bazenu konačne širine. Analizirani su utjecaji duljine snimka i početne pozicije u odnosu na krmu glavnog trupa, za odabranu trimaransku konfiguraciju, na točnost rezultata. Rasipanje rezultata postaje značajno ako je snimak prekratak. Pokazalo se je da se otpor reljefa slobodne površine značajno smanjuje povećanjem duljine snimka, što fizikalno nema smisla. Numerički eksperimenti s teorijski generiranim valovima ukazuju na činjenicu da se povećanjem duljine snimka, povećava otpor reljefa slobodne površine, odnosno da konvergira prema teorijskoj vrijednosti. Ovakvo ponašanje se može pripisati postojanju nekog fizikalnog fenomena u eksperimentu, koji ovim hidrodinamičkim modelom nije obuhvaćen. Za maksimalnu raspoloživu duljinu snimka većina eksperimentalno dobivenih točaka leži unutar donje i gornje granice intervala pouzdanosti od 95%.

*Ključne riječi:* točnost, otpor reljefa slobodne površine, uzdužna ravnina, brod

## 1. Uvod

Određivanje otpora reljefa slobodne površine iz mjerenja reljefa slobodne površine značajnije se počelo primjenjivati u šezdesetim i sedamdesetim godinama, [5], [6]. Sve metode temelje se na konceptu bezvrtložnog strujanja idealne nestlačive tekućine. Gradnja fizikalnog i matematičkog modela za slučaj idealne tekućine zasniva se na tri osnovne pretpostavke:

1. Tekućina je nestlačiva i neviskozna.
2. Strujanje tekućine je bezvrtložno.
3. Kinematičko-dinamički uvjet na slobodnoj površini je linearan.

Ako se izvrši dekompozicija analitičkih izraza oblika slobodne površine na lokalni i slobodni sustav valova dobiveni izrazi za oblik slobodne površine vrijede u području  $x = X \rightarrow -\infty$ , odnosno  $|y| = Y \rightarrow \infty$ , gdje je moguće zanemariti utjecaj lokalnog sustava valova. Kako je praktično nemoguće zadovoljiti uvjet  $x = X \rightarrow -\infty$ ,  $|y| = Y \rightarrow \infty$ , mjerenja određenih elemenata reljefa slobodne površine vrše se u području koje je dovoljno daleko od brodskog trupa, tj. u području gdje analitički izrazi dovoljno točno predstavljaju realni fizikalni događaj. Dakle već postojećim pretpostavkama mora se dodati još jedna u obliku:

4. U području mjerenja moguće je zanemariti utjecaj lokalnog sustava valova.

Uslijed viskoznosti tekućine očito je postojanje graničnog sloja i vrtložnog traga, tj. područja gdje je polje brzine vrtložno ma koliko daleko se nalazili iza mjesta generiranja poremećaja. Slijedi da se mjerenja moraju vršiti dovoljno daleko i izvan područja graničnog sloja i vrtložnog traga. Navedeni uvjet se definira obliku:

5. Mjerenja se vrše u području gdje je utjecaj graničnog sloja i vrtložnog traga malen.

Iako je ovaj uvjet moguće realizirati u eksperimentu, činjenica postojanja graničnog sloja i vrtložnog traga nekompatibilna je s pretpostavkama 1. i 2. Unutar graničnog sloja i vrtložnog traga strujanje tekućine je vrtložno, a područje vrtložnog traga je aktivni generator valova. Kao posljedicu imamo postojanje viskoznog otpora valova  $R_{wv}$ .

Realna situacija u eksperimentu "ne zna" za postojanje fizikalnog i matematičkog modela. U izmjerenim elementima reljefa slobodne površine sadržan je i utjecaj graničnog sloja i vrtložnog traga. Znači, ako se otpor valova određuje iz elemenata reljefa slobodne površine, pri čemu su zadovoljene sve pretpostavke usvojenog hidrodinamičkog modela, ono što se dobije kao rezultat eksperimenta je neki prividni otpor valova koji se naziva otpor reljefa slobodne površine  $R_{wp}$ .

Najpopularnije su metode koje se temelje na analizi profila valova paralelnih s brzinom modela broda. Primjene svih eksperimentalnih metoda određivanja otpora reljefa slobodne površine, temeljene na mjerenju elemenata reljefa slobodne površine u uzdužnim ravninama  $y_j = \text{const.}$ , uvjetovane su činjenicom da se eksperimenti realiziraju u bazenima konačne širine  $b = \text{const.}$  Ove metode se više koriste nego metode koje se temelje na mjerenju elemenata reljefa slobodne površine u poprečnim ravninama, jer u realnim uvjetima u bazenu uglavnom zadovoljavaju sve polazne pretpostavke i mjerne sonde su nepomične u odnosu na apsolutni koordinatni sustav. Nedostatak metode SLC (Sharma Longitudinal Cut) je što zahtijeva beskonačno dugački snimak, odnosno odgovarajuću korekciju zbog konačne duljine snimka. Kako je predmet našeg interesa određivanje otpora reljefa slobodne površine trimaranskih formi, zbog specifičnosti brodske forme i oblika slobodne površine koju generira ovakva forma, standardni kriteriji odnosa  $Y/b$ ,  $Y/L$ , te duljine snimka definirane prvom idealnom refleksijom postaju upitni. Također je upitna i standardna procedura analitičkog

produženja duljine snimka reljefa slobodne površine zbog specifičnog oblika brodske forme. Za primjenu ove metode i na trimaranske brodske forme bilo bi nužno planiranje specifičnog eksperimentalnog programa s ciljem definiranja osnovnih kriterija koje je potrebno zadovoljiti u realizaciji eksperimenta. Metoda nesumnjivo postavlja najmanje zahtjeva u realizaciji, ali je vrlo osjetljiva na izbor poprečnog položaja uzdužne mjerne ravnine, [1], [4], [6], [7]. Iz navedenih razloga u radu nije korištena ova metoda. Korištene su LFT (Landweber Fourier Transform), MEM (Matrix Element Method) i MES (Method of Equivalent Singularity) metoda koje polaze od činjenice da se sustav valova, čiji je generator model broda, idealno reflektira o bočne stijenke bazena konačne širine  $b = \text{const}$ . Kako je polazni izraz za sve tri metode isti, i uvjeti primjene ovih metoda su isti. Prividno osnovni nedostatak metode SLC, da je duljina snimka valnog oblika konačna i ograničena širinom bazena, je otklonjen. S druge strane svaka refleksija sustava valova o bočne stijenke bazena ima za posljedicu prolazak valova kroz područje vrtložnog traga. Ova činjenica narušava osnovnu pretpostavku hidrodinamičkog modela, da je u području mjerenja tekućina neviskozna, a strujanje tekućine bezvrtložno. Prema istraživanjima, [3], [4], [8], [9], [10], [11], ovaj utjecaj se može zanemariti za slučaj jednog prolaska slobodnog sustava valova kroz područje vrtložnog traga, tj. za slučaj dvije idealne refleksije. U cilju eliminiranja lokalnog sustava valova mjerenja elemenata reljefa slobodne površine moraju se vršiti u području gdje je ovaj utjecaj zanemariv. Teorijska i eksperimentalna istraživanja pokazuju da je utjecaj lokalnog sustava valova zanemariv u području udaljenom za pola duljine broda iza krme broda, [4], [8], [9].

## 2. Analiza matematičkog modela

Polazna osnova eksperimentalnog određivanja otpora reljefa slobodne površine modela broda u bazenu metoda LFT, MEM i MES je analitički izraz oblika

$$h(x, y) = \sum_{m=0}^{\infty} \varepsilon_m (A_m \cos k_0 l_m x + B_m \sin k_0 l_m x) \cos k_0 t_m y, \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad (1)$$

gdje su

$h(x, y)$  - ordinate slobodnog sustava valova,

$$\varepsilon_m = \begin{cases} 0.5 & \text{za } m = 0 \\ 1 & \text{za } m = 1, 2, 3, \dots \end{cases},$$

$A_m, B_m$  - diskretne vrijednosti komponenata amplitudnog spektra slobodnog sustava valova,

$k_0$  - osnovni (kružni) valni broj,

$k_0 l_m$ ,  $m = 0, 1, 2, \dots$  - diskretne vrijednosti  $x$  komponenata valnog broja,

$k_0 t_m$ ,  $m = 0, 1, 2, \dots$  - diskretne vrijednosti  $y$  komponenata valnog broja.

Izraz (1) vrijedi za slučaj bazena beskonačne dubine i konačne konstantne širine  $b = \text{const}$ .

Intenzitet vektora valnog broja ( $m$ -ti mod) definiran je izrazom

$$k_m = k_0 (l_m^2 + t_m^2)^{1/2}, \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad (2)$$

a smjer  $m$ -tog moda vektora valnog broja definiran je vrijednošću direkcionog kuta

$$\theta_m = \arctg \frac{t_m}{l_m}, \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad (3)$$

Diskretne vrijednosti  $x$  i  $y$  komponenta  $m$ -tog moda vektora valnog broja vezane su relacijom

$$l_m = \left[ \frac{1}{2} \left( 1 + \sqrt{1 + 4t_m^2} \right) \right]^{1/2}, \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad (4)$$

U slučaju bazena konačne širine  $b$  vrijednosti  $l_m$  postoje samo u diskretnim točkama  $t_m = 2\pi m/k_0 b$ ,  $m = 0, 1, 2, \dots$ . U valnom broju  $k_0 t_m$  amplitudni spektar je Fourierov, a diskretne linije spektra su ekvidistantne s korakom  $2\pi/b$ . U valnom broju  $k_0 l_m$  amplitudni spektar nije Fourierov, diskretne linije spektra nisu ekvidistantne i položaj spektralnih linija određen je širinom bazena  $b$  i osnovnim valnim brojem  $k_0$ .

U izrazu (1) ordinate slobodnog sustava valova predstavljene su trigonometrijskom sumom beskonačnog broja članova reda oblika

$$(A_m \cos k_0 l_m ct + B_m \sin k_0 l_m ct) \cos k_0 t_m y, \quad x = ct \quad (5)$$

Skup trigonometrijskih funkcija  $\cos k_0 l_m ct$  i  $\sin k_0 l_m ct$  nije ortogonalan, iz čega slijedi da koeficijente  $A_m$  i  $B_m$  u izrazu (1) nije moguće dobiti standardnom procedurom primjene direktne Fourierove transformacije. Slobodni sustav valova  $h = h(x, y)$  je aperiodična funkcija. Prema usvojenom matematičkom modelu (1) ova funkcija nema osnovni (primitivni, fundamentalni) period. Period  $m$ -tog člana reda (1) je

$$T_m = \frac{2\pi}{k_0 l_m c} \quad (6)$$

i funkcija je valnog broja  $k_0 l_m$  s neekvidistantnim korakom u frekvencijskom području. Frekvencija  $m$ -tog člana reda (1) iznosi

$$f_m = \frac{k_0 l_m c}{2\pi} \quad (7)$$

Amplitude spektra slobodnog sustava valova definirane su u obliku

$$S_m = (A_m^2 + B_m^2)^{1/2}, \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad (8)$$

i trnu s porastom valnog broja.

Poznavanjem diskretnih vrijednosti komponenta  $A_m$  i  $B_m$  amplitudnog spektra slobodnog sustava valova u potpunosti su određeni svi članovi trigonometrijske sume (1), tj. definiran je slobodni sustav valova  $h = h(x, y)$ .

Koeficijent otpora reljefa slobodne površine definiran je izrazom

$$C_{wp} = \frac{R_{wp}}{0.5\rho c^2 S} = \frac{k_0 b}{2S} \sum_{m=0}^{M_{\max}} \varepsilon_m \frac{K_m}{1 + K_m} (A_m^2 + B_m^2) \quad (9)$$

Jasno je da je u realnim primjenama broj članova reda (1) konačan. Određivanje broja članova reda (1), prema [2], s ciljem dovoljno točnog opisivanja funkcije  $h = h(x, y)$  zavisi o:

1. Frekvencijskom sadržaju analognog signala mjenog valnog oblika  $h = h(x, y)$ .
2. Veličini vremenskog koraka uzorkovanja analognog signala.
3. Ukupnom periodu mjerenja (duljina analognog signala).

Frekvencijski sadržaj analognog signala valnog oblika  $h = h(x, y)$  definiran je izrazom (1), odnosno (7). Kako je frekvencija  $f_m$ , dana izrazom (7), rastuća funkcija slijedi da je najveća frekvencija u pojavi definirana brojem članova reda (1).

Veličina vremenskog koraka uzorkovanja analognog signala definirana je Shannonovim teoremom uzorkovanja prema kojem frekvencija uzorkovanja mora biti veća od dvostruke najveće frekvencije koju sadrži mjereni signal. Ako se sa  $f_s$  označi frekvencija uzorkovanja, ovaj kriterij se može napisati u obliku

$$f_s > 2f_m = \frac{k_0 l_m c}{\pi} \quad (10)$$

Iz izraza (10) dobiva se kriterij za vremenski korak uzorkovanja

$$\Delta t_s = \frac{1}{f_s} < \frac{\pi}{k_0 l_m c} \quad (11)$$

i kriterij za prostorni korak uzorkovanja

$$\Delta x_s = c \Delta t_s < \frac{\pi}{k_0 l_m} \quad (12)$$

Zadovoljenjem kriterija (10) ili (11) ili (12) kontrolira se frekvencijski sadržaj i mjenog signala i rezultirajućeg spektra. Ovim kriterijem nisu pouzdano određene vrijednosti amplituda spektra u mjenom valnom obliku.

Ukupni period mjerenja (duljina analognog signala) definiran je realnom situacijom u eksperimentu, odnosno ograničenjima koje nameće matematički model. Ako se sa  $F_0$  označi ukupna duljina snimka izmjerenih valova u jednoj uzdužnoj mjerenoj ravnini  $y_j = \text{const.}$ , tada je rezolucija u frekvenciji vremenskog valnog oblika definirana izrazom

$$\Delta f_m = \frac{c}{F_0} \quad (13)$$

Za dovoljno veliki  $m$  iz (4) i (7) slijedi

$$l_m \approx \sqrt{t_m} \quad (14)$$

odnosno, uz (13) vrijedi

$$\Delta f_m = \frac{k_0 c}{2\pi} \Delta l_m \approx \frac{k_0 c}{2\pi} (\sqrt{t_m} - \sqrt{t_{m-1}}) \quad (15)$$

ili

$$\Delta f_m \approx \frac{1}{2} \sqrt{\frac{g}{2\pi b}} \frac{1}{\sqrt{m}} \quad (16)$$

Iz posljednje relacije i (13) dobiva se

$$m = \left(\frac{F_0}{b}\right)^2 \frac{gb}{8\pi c^2} = \frac{1}{8\pi} \left(\frac{F_0}{b}\right)^2 \frac{b}{L F n^2} \quad (17)$$

Iz posljednjeg izraza slijedi da je broj članova reda (1) za dani bazen širine  $b = \text{const.}$  i danu brzinu gibanja modela  $c$  (ili za dani Froudeov broj i duljinu modela  $L$ ) određen duljinom snimka  $F_0$ , odnosno izrazom (17) i (15) definirana je rezolucija u frekvenciji. S obzirom da je funkcija  $h = h(x, y)$  aperiodična, variranjem duljine  $F_0$  snimka valnog oblika mijenja se rezolucija u frekvenciji  $\Delta f_m$  što osigurava minimiziranje “gubitaka” vrijednosti amplituda spektra i određivanje točnih vrijednosti. Znači da se rekonstrukcija mjerenog valnog oblika i diskretnog signala (desna strana relacije (1) uz poznate vrijednosti  $A_m$  i  $B_m$ ) kontrolira frekvencijom uzorkovanja  $f_s$  i rezolucijom u frekvenciji  $\Delta f_m$ . Shannonovim teoremom, koji se odnosi na brzinu uzorkovanja, kontrolira se frekvencijski sadržaj i mjerenog signala i rezultirajućeg spektra. Variranjem rezolucije u frekvenciji  $\Delta f_m$  kontrolira se točnost amplituda spektra.

Kako je polazna osnova eksperimentalnog određivanja otpora reljefa slobodne površine modela broda u bazenu metoda LFT, MEM i MES isti izraz (1), izvedeni kriteriji za analizu valnog oblika vrijede za sve tri metode.

Primjenom bilo koje od metoda eksperimentalnog određivanja otpora reljefa slobodne površine moguće je odrediti diskretne vrijednosti komponenata amplitudnog spektra slobodnog sustava valova, tj. otpor reljefa slobodne površine. Vrijedno je napomenuti da ove metode ne omogućavaju određivanje brodske forme koja je generator poremećaja, odnosno ne postoji jednoznačna veza amplitudni spektar-brodska forma. Osnovni ograničavajući faktor primjene metoda LFT, MEM i MES je duljina  $F_0$  snimka valnog oblika u jednoj uzdužnoj ravnini. Mada su sve metode ravnopravne i za sve vrijede isti kriteriji, utjecaj povećanja broja modova pri istoj duljini snimka  $F_0$  nije isti.

Proces određivanja amplituda spektra u metodi LFT vezan je uz primjenu diskretne Fourierove transformacije na mjereni valni oblik uzet iz svake uzdužne mjerne ravnine i osrednjavanje u smislu metode najmanjih kvadrata odstupanja u prostoru spektra, te je nužno poštivati kriterij (17), čime je za  $b = \text{const.}$  i  $F_0 = \text{const.}$  definiran maksimalni broj modova koji je moguće vidjeti u mjernom snimku. Metode MEM i MES, prema realiziranim numeričkim simulacijama, ne zahtijevaju striktnu primjenu kriterija (17). Numerički eksperimenti realizirani s dvostrukim brojem modova daju pouzdane vrijednosti kako u području spektra tako i u fizičkom prostoru valova. Dakle, bitna prednost je na strani metoda MEM i MES. U numeričkoj realizaciji metoda MES je složenija od metode MEM, jer u postupku primjene sadrži i numeričku integraciju čiju točnost nije moguće procijeniti. Prednost je dana metodi MEM koja pruža mogućnost primjene za široko područje Froudeovih brojeva.

### 3. Rezultati provedene analize i zaključci

Tablica 1 Glavne dimenzije Table 1 Principle dimensions

	Glavni trup	Bočni trup	Ukupno
Duljina L(m)	2.4384	1.2192	2.4384
Širina B(m)	0.24384	0.12192	0.8534
Gaz T(m)	0.1524	0.0762	0.1524
Deplasman (kg)	40.273	5.034	50.341
Oplakana površina (m <sup>2</sup> )	0.88842	0.22210	1.33262
L/B	10.0	10.0	
B/T	1.6	1.6	
C <sub>B</sub>	0.444	0.444	
C <sub>P</sub>	0.666	0.666	

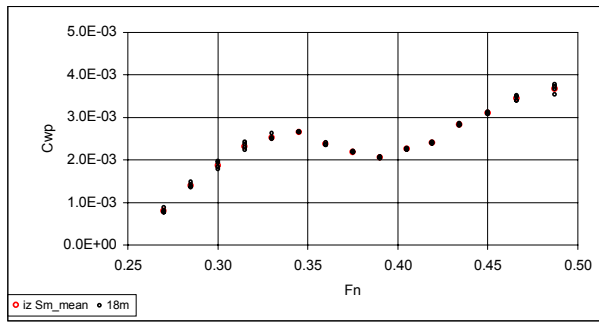
Analizirani su utjecaji duljine snimka  $F_0$  i početne pozicije  $x_0$ , u odnosu na krmu glavnog trupa trimaranske konfiguracije, na točnost rezultata.

Odabrana trimaranska konfiguracija se sastoji od standardnih Wigleyevih trupova, čije su glavne dimenzije dane u Tablici 1, za koju je  $d/L_M = 0.5$  i  $s/L_M = 0.3$ , gdje je  $d$  udaljenost u uzdužnom smjeru (smjer gibanja) između pramca srednjeg i pramaca bočnih trupova i  $s$  udaljenost u poprečnom smjeru između uzdužnih simetralnih ravnina bočnih trupova.

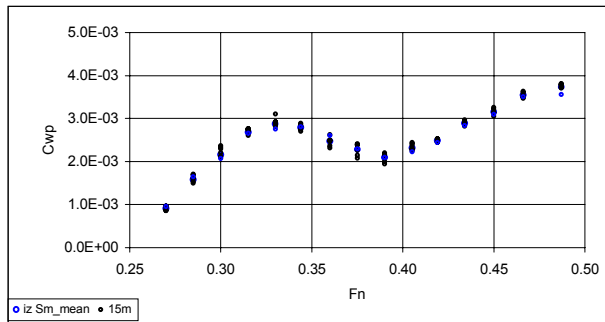
Eksperimenti su provedeni u bazenu Sveučilišta u Trstu (DINMA-Trieste) duljine 50m, širine 3.1 m i dubine 1.6m. Određivanje otpora reljefa slobodne površine izvršeno je za dvije različite duljine valnog oblika  $F_0 = 18$  m i  $F_0 = 15$  m, za četiri odnosno šest pozicija iza krme glavnog trupa za šest uzdužnih mjernih ravnina. Proračuni su izvršeni primjenom metode MEM, pri čemu je usvojen dvostruki maksimalni broj modova  $m = 2M_{\max}$ , gdje je  $M_{\max}$  određen iz kriterija (17). Za veću duljinu snimka analizirane pozicije iza krme iznose  $x_0/L_M = 0.5; 0.91; 1.32; 1.73$ , dok za manju duljinu snimka analizirane pozicije iznose  $x_0/L_M = 0.5; 0.91; 1.32; 1.73; 2.14; 2.55$ . Cijeli proračun je proveden za dvije serije mjerenja, čime je u analizu uključena i ponovljivost rezultata. Na slikama 1-3 prikazani su rezultati za područje Froudeovih brojeva od 0.271 do 0.487. Dobiveni rezultati ukazuju na činjenicu da veća duljina valnog oblika daje niže vrijednosti koeficijenta otpora reljefa slobodne površine, što je u suprotnosti s očekivanim, odnosno što fizikalno nema smisla. Naime, veća duljina snimka znači i veći broj modova, odnosno više članova sume, što bi trebalo rezultirati i u većem koeficijentu otpora reljefa slobodne površine. Ovakvo ponašanje se može pripisati postojanju nekog fizikalnog fenomena u eksperimentu, koji ovim hidrodinamičkim modelom nije obuhvaćen. Na slikama je nanosena i vrijednost koeficijenta otpora reljefa slobodne površine dobivena iz osrednjenog spektra slobodnog sustava valova, za analizirane pozicije iza krme. Kao što je vidljivo na slikama, nema većih rasipanja rezultata, što navodi na zaključak da početna pozicija mjernog snimka nema većeg utjecaja na rezultate. Naravno da ta udaljenost mora biti dovoljno daleko od modela broda, kako bi se mogao zanemariti lokalni sustav valova. Na slikama 4-8 dana su odstupanja koeficijenta otpora reljefa slobodne površine od vrijednosti dobivenih iz osrednjenog spektra, u postotcima, za razne pozicije iza krme i dvije različite duljine snimka. Odstupanja su znatno manja, unutar  $\pm 5\%$ , za veću duljinu snimka, što se može smatrati dovoljno točnim. Kraća duljina snimka unosi u proračun veća rasipanja rezultata. Utjecaj ovog parametra je dominantan. Daljnju numeričku analizu trebalo bi usmjeriti na iznalaženje optimalne vrijednosti duljine snimka u funkciji Froudeovog broja. Kako je jedan od kriterija verifikacije metode i rekonstrukcija valnih oblika generiranih amplitudnim spektrima određenim primjenom metode na izmjerene valne oblike i usporedba s izmjerenim valnim oblicima u uzdužnim mjernim ravninama, izvršena je rekonstrukcija za jednu uzdužnu ravninu i jedan odabrani Froudeov broj. Na slikama 9 i 10, za duljinu snimka  $F_0 = 18$  m i 4 razne pozicije iza krme, ucrtane su gornja i donja granica intervala pouzdanosti od 95%, definirana izrazom

$$U_p(x) = t_N \sqrt{\frac{1}{n \cdot N - 1} \sum_{i=1}^{N-n} [H_i(x) - \bar{H}(x)]^2} \quad (18)$$

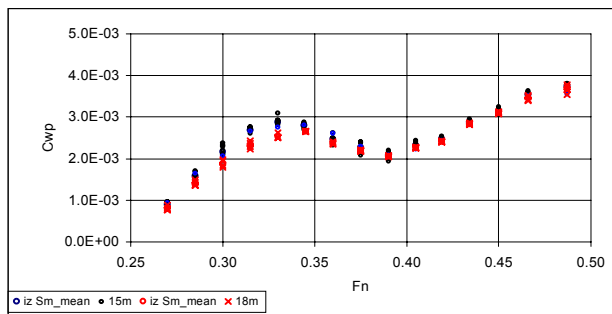
gdje je  $\bar{H}(x)$  osrednjena vrijednost uzorka, a  $t_N$  je dano s  $t$  razdiobom. Na slici 9 ( $t_N = 1.96$ ,  $n \cdot N = 10 \cdot 4 = 40$ ) prikazani su rezultati za 4 početne pozicije  $x_0$  i 10 raznih kombinacija broja mjernih soni (od maksimalno 6 do minimalno 3). Na slici 10 ( $t_N = 3.306$ ,  $n \cdot N = 1 \cdot 4 = 4$ ) prikazani su rezultati za 4 početne pozicije  $x_0$  i svih 6 mjernih soni. Slike ukazuju na relativno uski interval pouzdanosti, odnosno dobro slaganje izmjerenih i reproduciranih valnih oblika.



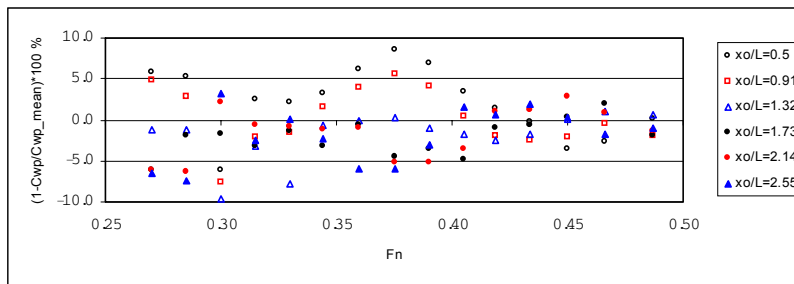
Slika 1. Koeficijent otpora reljefa slobodne površine za četiri pozicije iza krme glavnog trupa



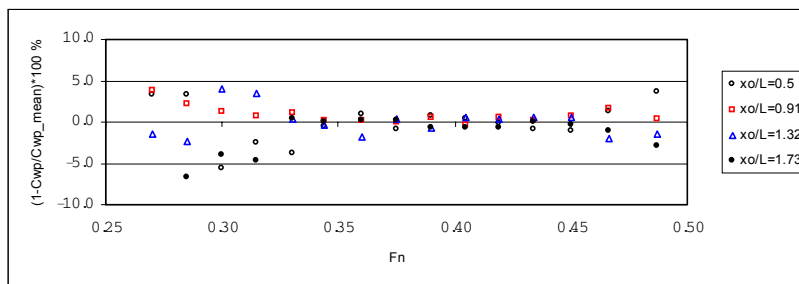
Slika 2. Koeficijent otpora reljefa slobodne površine za šest pozicija iza krme glavnog trupa



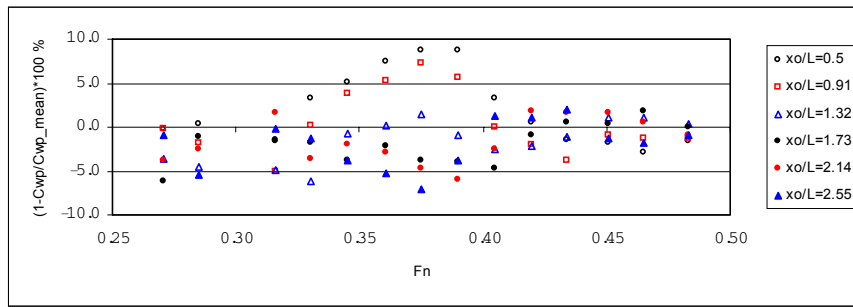
Slika 3. Koeficijent otpora reljefa slobodne površine za dvije duljine valnog oblika



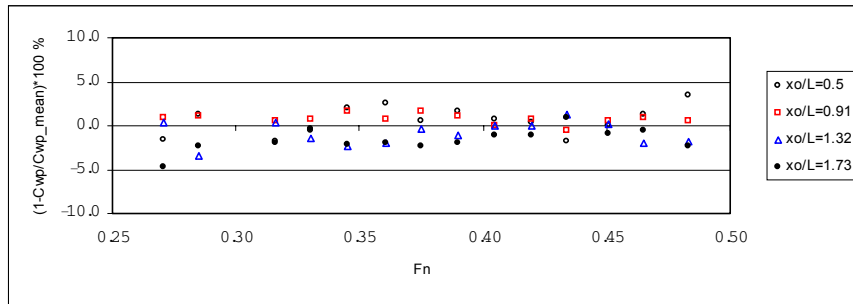
Slika 4. Odstupanja koeficijenta otpora reljefa slobodne površine, prva serija mjerenja,  $F_0 = 15$  m



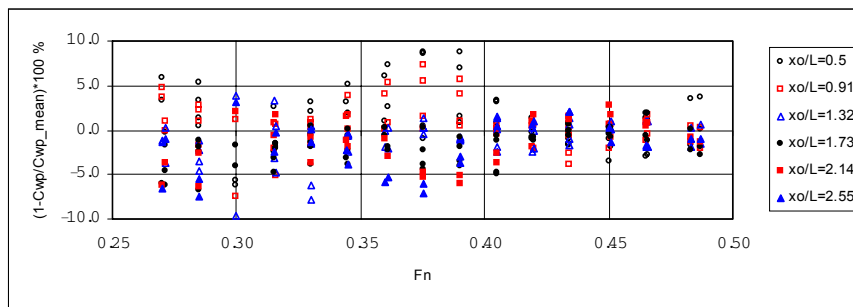
Slika 5. Odstupanja koeficijenta otpora reljefa slobodne površine, prva serija mjerenja,  $F_0 = 18$  m



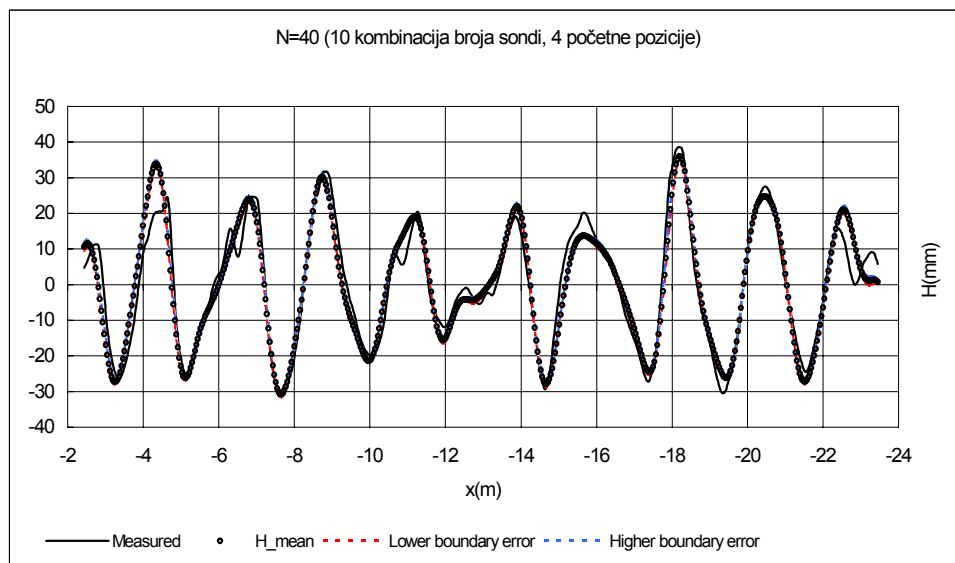
Slika 6. Odstupanja koeficijenta otpora reljefa slobodne površine, druga serija mjerenja,  $F_0 = 15$  m



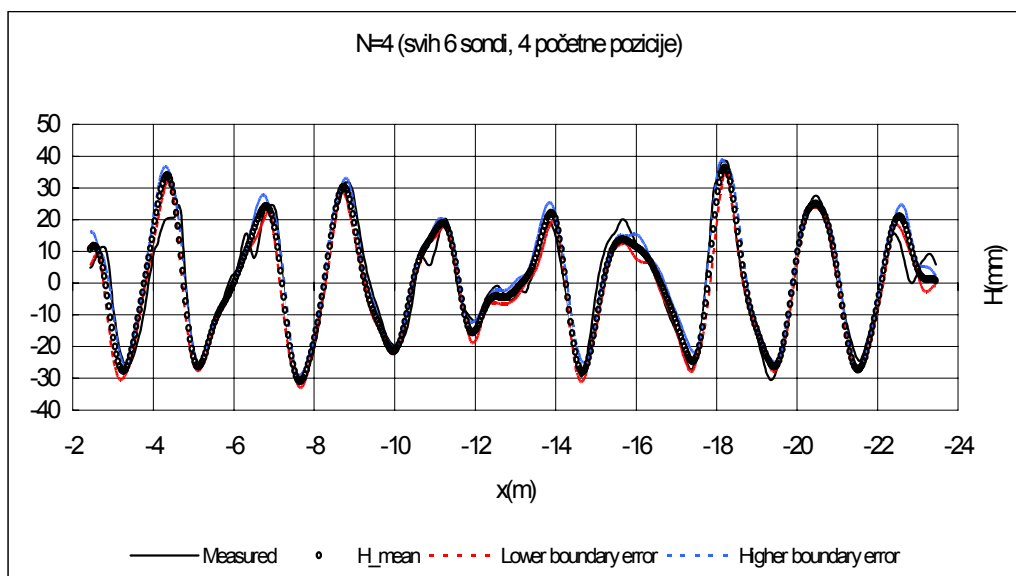
Slika 7. Odstupanja koeficijenta otpora reljefa slobodne površine, druga serija mjerenja,  $F_0 = 18$  m



Slika 8. Odstupanja koef. otpora reljefa slobodne površine, prva i druga serija mjerenja,  $F_0 = 15$  m i  $F_0 = 18$  m



Slika 9 Izmjereni i rekonstruirani valni oblici za  $Fn = 0.390$  i  $y_2 = 1.046$  m



Slika 10. Izmjereni i rekonstruirani valni oblici za  $Fn = 0.390$ ,  $y_2 = 1.046$  m

## LITERATURA

- [1] Battistin, D., Danielli, A., Zotti, I., Numerical and Experimental Investigations on Wave Resistance of Trimaran Configurations, IX CONGRESS IMAM 2000, Ischia, Naples, April 2000, Proceedings Vol. I, pp. 56-63.
- [2] Bendat, J., Piersol, A., Random Data: Analysis and Measurement Procedures, Wiley-Interscience, New York, 1971.
- [3] Degiuli, N., Experimental Determination of Wave Pattern Resistance of Wigley Trimaran Series, PhD Thesis, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, University of Zagreb, 2001.
- [4] Dumez, F.X., Cordier, S., Accuracy of Wave Pattern Analysis Methods in Towing Tanks, Proc. Symposium on Naval Hydrodynamics, Trondheim, 1996, pp. 97-110.
- [5] Eggers, K., Über die Ermittlung des Wellenwiderstandes eines Schiffsmodells durch Analyse seines Wellensystems, Schiffstechnik, Band 9, Heft 46, 1962, pp.79-84, discussion pp. 85-85.
- [6] Eggers, K., Sharma, S.D., Ward, L.W., An Assessment of Some Experimental Methods for Determining the Wavemaking Characteristics of a Ship Form, Trans. SNAME, vol. 75, 1967, pp. 112-144, discussion pp. 144-157.
- [7] Lalli, F., Di Felice, F., Esposito, P.G., Moriconi, A., Piscopia, R., Longitudinal Cut Method Revisited: A Survey on Main Error Sources, Journal of Ship Research, Vol. 44, No. 2, June 2000, pp. 120-139.
- [8] Landweber, L., An evaluation of the method of direct determination of wavemaking resistance from surface-profile measurements, International seminar on theoretical wave resistance, University of Michigan, An Arbor, 1963, pp. 559-574, discussion pp. 575-582.
- [9] Moran, D.D., Landweber, L., A Longitudinal-Cut Method for Determining Wavemaking resistance, Journal of Ship Research, vol. 16, no. 1, March 1972, pp. 21-40.
- [10] Tsai, C., Study of total, viscous and wave resistance of a family of Series-60 models; further development of a procedure for determination of wave resistance from longitudinal-cut, surface-measurements, Ph.D.Thesis, IIHR, 1972, I-IX + 1-84.
- [11] Tsai, C., Landweber, L., Further Development of a Procedure for Determination of Wave Resistance from Longitudinal-Cut, Surface-Profile Measurements, Journal of Ship Research, vol. 19, no. 2, June 1975, pp. 65-75.