

Ivan ČATIPOVIĆ, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, I. Lučića 5, HR-10000 Zagreb, Hrvatska, ivan.catipovic@fsb.hr

Nastia DEGIULI, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, I. Lučića 5, HR-10000 Zagreb, Hrvatska, nastia.degiuli@fsb.hr

Većeslav ČORIĆ, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, I. Lučića 5, HR-10000 Zagreb, Hrvatska, veceslav.coric@fsb.hr

Andreja WERNER, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, I. Lučića 5, HR-10000 Zagreb, Hrvatska, andreja.werner@fsb.hr

Vedran SLAPNIČAR, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, I. Lučića 5, HR-10000 Zagreb, Hrvatska, vedran.slapnicar@fsb.hr

Jadranka RADANOVIĆ, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, I. Lučića 5, HR-10000 Zagreb, Hrvatska, jadranka.radanovic@fsb.hr

## DINAMIKA BRODA U TEGLJU

### Sažetak

Tegljenje kao specifična vrsta pomorskog prijevoza često se koristi za instaliranje objekata za bušenje i eksploataciju podvodnih plinskih i naftnih bušotina. Za potrebe ovog istraživanja, razmatra se brod tegljen na valovima u pramac. Jedan kraj linije za tegljenje spojen je s pramcem broda, a drugi se giba pravocrtno konstantnom brzinom. Razmatranja se provode u vertikalnoj ravnini, tako da je brod modeliran kao kruto tijelo s tri stupnja slobode gibanja. Uzbune sile uslijed valova uzete su u obzir, zajedno s dodanom masom i radijacijskim prigušenjem. Za procjenu sile u užetu za tegljenje koristi se pojednostavljeni pristup. Ovaj pristup uzima u obzir aksijalnu i geometrijsku krutost užeta za tegljenje, bez inercijskih sila i prigušenja. Zbog nelinearnih svojstava problema, proračuni su provedeni u vremenskoj domeni. Dobiveni numerički rezultati uspoređeni su s objavljenim eksperimentalnim rezultatima.

*Ključne riječi: tegljenje broda, uže za tegljenje, gibanja uslijed valova*

## DYNAMICS OF A SHIP IN TOWAGE

### Abstract

Towing as a specific type of sea transport is often used for installation of objects intended for drilling and exploitation of underwater gas and oil wells. For the purpose of this research, ship towed in head sea is considered. One end of the towing line is attached to ship's bow and another end has prescribed straight line motion. All considerations are done in the vertical plane so the ship is modeled as a rigid body with three degrees of freedom. Hydrodynamic loadings due to waves are taken into account along with added mass and damping. Simplified approach is used for the assessment of the forces acting on the towed ship due to the towing line. This approach takes into account axial and geometric stiffness of the towing line, disregarding damping and inertial forces. Due to the nonlinear properties of the problem, calculations are performed in the time domain. Obtained numerical results are compared with published experimental results.

*Key words: ship in towage, towing line, wave-induced motions*

## 1. Uvod

Tegljenje kao specifična vrsta pomorskog prijevoza često se koristi za instaliranje objekata za bušenje i eksploataciju podvodnih plinskih i naftnih bušotina. Također, tegljenje se pokazalo kao učinkovito rješenje za uklanjanje oštećenih brodova s mjesta nesreće. Kako bi se postigla zadovoljavajuća razina sigurnosti, važno je razviti matematički model koji opisuje gibanja tegljenog broda kao i vlačnu silu u užetu za tegljenje. Model bi trebao uključivati valna opterećenja, budući da se operacija tegljenja rijetko obavlja pri mirnom moru.

Desroches je razvio novu bazu podataka o ekstremnim vlačnim silama u užetu za tegljenje za otvoreni ocean, [1]. U svom istraživanju, ekstremna vlačna sila u užetu za tegljenje se sastoji od srednje vlačne sile i vršne dinamičke vlačne sile s 0,001 šanse za premašivanje ove vrijednosti u jednom danu. Statistika nelinearne dinamičke vlačne sile je određena numeričkom metodom simulacije na temelju gibanja broda za tegljenje i tegljenog broda. Izračun statistike za dinamičku vlačnu silu je proračunski zahtjevan. Stoga je u [1] razvijena baza ekstremnih vlačnih sila (za određeni brod za tegljenje, brod koji se tegli, brzinu tegljenja, stanje mora, kut vala i vrstu užeta za tegljenje) kako bi se brzo odredila vršna vlačna sila. U [2] je razmatrana dinamika podvodnog tegljenja fleksibilnih cilindričnih struktura, kao interakcijski problem tekućina-struktura. Ozbiljan problem u takvim operacijama tegljenja su razne vrste hidroelastične nestabilnosti kojima su izložene strukture pri određenim kritičnim brzinama tegljenja. Dakle, spomenuto istraživanje se bavi razvojem metode konačnih elemenata za dinamiku fleksibilnih tegljenih cilindara s naglaskom na stabilitet. Aproksimacija konačnim elementima izvedena je iz varijacijske formulacije problema zasnovane na Hamiltonovom principu. U radu [3] dane su jednadžbe gibanja za dinamičku spregu duge fleksibilne splavi za spašavanje i brzog broda za spašavanje na nepravilnim morskim valovima. Fleksibilna splav je modelirana koncentriranim masama koje su povezane oprugama. Jednadžbe se rješavaju numerički pomoću Runge-Kutta metode. Razvijeni numerički model daje smjernice za predviđanje opterećenja tegljenja i gibanja pri olujnim stanjima mora.

Metoda simulacije gibanja tegljenog broda i vlačne sile u užetu u vremenskoj domeni za slučaj pravilnih valova u pramac prikazana je u [4]. Dvodimenzionalna metoda koncentriranih masa s gravitacijskim učinkom je primijenjena za opisivanje dinamike užeta za tegljenje. Gibanja tegljenog broda i užeta za tegljenje su prikazana kao ravninska gibanja u vertikalnoj ( $X-Z$ ) ravnini. Uže za tegljenje modelirano je kao niz koncentriranih masa koje su zglobno povezane krutim štapovima. Torzija i uzdužno produljenje tih štapova su zanemareni. Razmatrani su pravilni valovi u pramac. Nadalje, u radu [5] je razvijen numerički model u vremenskoj domeni za gibanja tegljenog broda i vlačne sile u užetu za tegljenje na pravilnim valovima u pramac. Sva razmatranja se odnose na vertikalnu ravninu, tako da je brod modeliran kao kruto tijelo s tri stupnja slobode. Hidrodinamička opterećenja uslijed valova su uzeta u obzir kao i pridružena masa i prigušenje. Dinamika užeta za tegljenje je opisana konačnim elementima. Dobiveni numerički rezultati se dobro slažu s eksperimentalnim rezultatima.

## 2. Matematički model

### 2.1. Općenito

U ovom radu korišten je pojednostavljeni pristup za opis djelovanja užeta na dinamiku broda koji se tegli. Ovaj pristup uzima u obzir aksijalnu i geometrijsku krutost užeta za tegljenje. Zanemareno je djelovanje inercijskih sila i prigušenja tj. razvijen je kvazistatički model užeta. Unutar ovog modela razmatrani su samo mali iznosi progiba. Na osnovu navedenog, diferencijalna jednadžba statike užeta može se napisati u obliku:

$$T \frac{d^2 y}{dx^2} = q \quad (1)$$

gdje  $y(x)$  predstavlja deformirani oblik užeta u vertikalnoj ravnini,  $T$  uzdužnu vlačnu silu u užetu, a  $q$  distribuiranu težinu uslijed vlastite mase. Unutar ovog razmatranja pretpostavlja se da je  $q$  opterećenje koje je jednoliko distribuirano po osi  $x$ , slika 1. U ovom slučaju rješenje je takozvana parabolična lančanica. Drugim riječima, uvedeno je pojednostavljenje u kojem je  $q$  distribuirano po osi  $x$ , a ne po duljini užeta te se pravi oblik lančanice (koje treba zauzeti uže) aproksimira parabolom. Nadalje, posljedica ovog pojednostavljenja je i to da je vlačna sila  $T$  konstantna po duljini užeta. Također radi pojednostavljenja, unutar ovog modela ne razmatra se djelovanje uzgona na uže. Jednadžba (1) je linearna diferencijalna jednadžba drugog reda čije rješenje uz zadovoljenje rubnih uvjeta glasi:

$$y(x) = \frac{q}{2T}x^2 \quad (2)$$

Za potpuni opis prezentiranog modela potrebno je definirati izraz za polovinu duljine rastegnutog užeta  $\tilde{s}$ , slika 1. Uobičajeni postupak određivanja krivulje ako je poznat njen analitički oblik u ovom slučaju dovest će do kompliciranog i nepraktičnog izraza, [6]. Stoga će se ovdje pristupiti definiranju aproksimativnog izraza za duljinu  $\tilde{s}$ . U prvom koraku potrebno je odrediti radijus zakrivljenosti krivulje progibne linije užeta  $y(x)$  koja je prikazana jednadžbom (2). Izraz za radijus zakrivljenosti progibne linije glasi, [6]:

$$R = \frac{\left[1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right]^{\frac{3}{2}}}{\frac{d^2y}{dx^2}} \quad (3)$$

Ovdje ćemo pretpostaviti da su nagibi progibne linije užeta relativno mali, tj. da je izraz  $(dy/dx)^2$  približno jednak nuli te dobivamo uobičajeni približni izraz za radijus zakrivljenosti progibne linije:

$$R = \frac{1}{\frac{d^2y}{dx^2}} \quad (4)$$

odnosno nakon uvrštavanja jednadžbe (2) dobiva se:

$$R = \frac{T}{q} \quad (5)$$

Nadalje, kada nam je poznat radijus zakrivljenosti jednostavnim izrazom možemo definirati duljinu  $\tilde{s}$  kao duljinu kružnog luka, slika 2.:

$$\tilde{s} = R\alpha \quad (6)$$

Ovdje treba imati na umu da navedena pojednostavljenja vode do konstantnog iznosa radijusa zakrivljenosti  $R$  te se može postaviti izraz (6). Naime, kao što je već opisano, u ovom modelu vlačna sila užeta  $T$  je konstantna, kao i distribuirano opterećenje  $q$ , stoga se dobiva i konstantni radijus zakrivljenosti  $R$ , vidi jednadžbu (5). Nadalje, ako detaljnije pogledamo jednadžbe (3), (4) i (5) te sliku 1. vidimo da jednadžba (5) daje egzaktni iznos radijusa zakrivljenosti progibne linije jedino u točki  $x=0$  tj. u tjemenu krivulje. Drugim riječima, duljina progibne linije užeta aproksimirana je duljinom kružnog luka čiji konstantni radijus je određen u tjemenu te iste progibne linije. U slijedećem koraku, na osnovu slike 2. može se napisati izraz:

$$\sin(\alpha) = \frac{h}{R} \quad (7)$$

gdje je  $h$  horizontalna projekcija polovine užeta za tegljenje, slika 1. Kombinirajući jednadžbe (6) i (7) slijedi:

$$\frac{h}{R} = \sin\left(\frac{\tilde{s}}{R}\right) \quad (8)$$

Jednadžba (8) pojednostavljuje se razvojem u Taylor-ov red po modelu, [6]:

$$\sin(\tau) = \tau - \frac{\tau^3}{6} + O(\tau^5) \quad (9)$$

te nakon množenja jednadžbe (8) s  $R$  slijedi:

$$h = \tilde{s} - \frac{\tilde{s}^3}{6R^2} \quad (10)$$

S druge strane, rastegnuta duljina  $\tilde{s}$  može se odrediti na osnovu vlačne sile  $T$  na uobičajeni način prema teoriji rastezljivog štapa

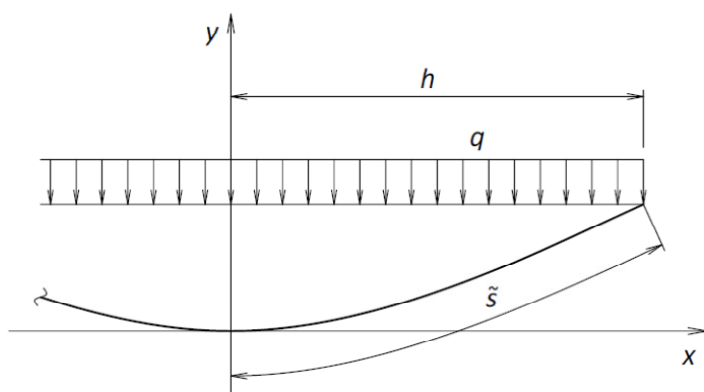
$$\tilde{s} = s \left( 1 + \frac{T}{AE} \right) \quad (11)$$

gdje  $s$  predstavlja polovinu duljine neopterećenog užeta, a  $AE$  aksijalnu krutost užeta.

Kombinirajući jednadžbe (5), (10) i (11) uz zanemarivanje malih veličina dobiva se konačni izraz za kvazistatički model užeta:

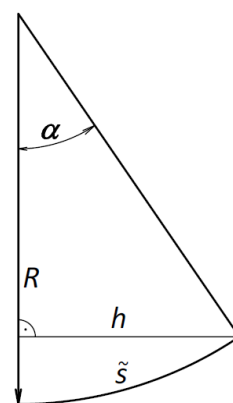
$$h = s \left( 1 + \frac{T}{AE} \right) - \frac{q^2 s^3}{6T^2} \quad (12)$$

Dobivena jednadžba definira vezu između vlačne sile  $T$  i horizontalne projekcije  $h$ .



**Fig. 1.** Quasi-static rope model

**Slika 1.** Kvazistatički model užeta



**Fig. 2.** Model for estimating the rope length

**Slika 2.** Model za procjenu duljine užeta

Jednadžba (12) je nelinearna stoga će se za njeno rješavanje primijeniti Newton-Raphsonova metoda kako slijedi, [6]:

$$f(T) = s \left( 1 + \frac{T}{AE} \right) - \frac{q^2 s^3}{6T^2} - h = 0 \quad (13)$$

s pripadajućom derivacijom:

$$\frac{df}{dT} = \frac{s}{AE} + \frac{q^2 s^3}{3T^3} \quad (14)$$

Da bi ostvarili konzistentnost ukupnog modela, jednadžba (12) mora se rješavati spregnuto s hidrodinamičkim modelom broda koji se tegli i to u vremenskoj domeni. Stoga se iznos horizontalne projekcije užeta  $h$  treba dovesti u vezu s pomacima broda. S obzirom da se ovdje radi o pojednostavljenom pristupu sprega je ostvarena samo kroz zalijetanje. Ovdje treba imati na umu da je  $h$  samo pola iznosa ukupne horizontalne projekcije užeta. Također, vlačna sila  $T$  iz užeta uzeta je u obzir kod dinamike broda kao vanjska horizontalna sila, uz zanemarenje momenta kojeg ova sila može prouzročiti.

Treba napomenuti da unutar prezentiranog modela postoji problem numeričke nestabilnosti. Detaljnim pregledom jednadžbe (12) odnosno (13) možemo vidjeti da se tu radi o hiperboli sa singularitetom na poziciji  $T=0$ . Stoga u ovom slučaju, konvergencija se postiže tako da početno rješenje unutar Newton-Raphson-ove procedure postavimo na neku malu vrijednost kao na primjer  $qs/2$  u svakom vremenskom koraku prilikom rješavanja navedenog spregnutog modela. Na ovaj način početna vrijednost  $T$  se nalazi na lijevoj strani u odnosu na nultočku hiperbole, gdje je derivacija definirana jednadžbom (12) pogodna za Newton-Raphson-ovu metodu te se postiže monotona konvergencija. U slučaju da je početna vrijednost  $T$  takva da se nalazi desno od nultočke redovito dolazi do divergencije rješenja odnosno do zaustavljanja simulacije, jer u tom području nisu zadovoljeni uvjeti konvergencije koji su preporučeni Newton-Raphson-ovom metodom.

## 2.2. Hidrodinamika tegljenog broda u vremenskoj domeni

U realnim uvjetima, tegljeni brod se giba gotovo konstantnom brzinom. Unutar prezentiranog matematičkog modela spregnutog gibanja, brod koji se tegli pridržava se užetom za tegljenje dok se okolni fluid giba konstantnom brzinom, slika 3. Na ovaj način pojednostavljaju se izrazi spregnutog modela, a da pri tome nije izgubljen raspored i iznosi sila i momenata koji djeluju u realnim uvjetima. Drugim riječima, brzina okolnog fluida uzeta je u obzir kod proračuna uzbunih sila uslijed valova kao i kod određivanja hidrodinamičkih reakcija. Razmatraju se samo gibanja u vertikalnoj uzdužnoj ravnini.

Zbog nelinearnih karakteristika kvazstatičkog modela užeta, hidrodinamika tegljenog broda je opisana u vremenskoj domeni slijedećom jednadžbom:

$$\left( [M^m] + [A^\infty] \right) \{ \ddot{\xi}(t) \} + [B] \{ \dot{\xi}(\tau) \} + [C^h] \{ \xi(t) \} = \{ F(t) \} \quad (15)$$

gdje je  $\{ \xi(t) \}$  vektor pomaka broda u vremenu,  $[M^m]$  matrica mase uslijed vlastite mase broda,  $[A^\infty]$  dodatna masa broda za beskonačnu frekvenciju,  $[B]$  matrica prigušenja,  $[C^h]$  matrica hidrostatske krutosti,  $\{ F(t) \}$  vektor vanjskog opterećenja koji sadrži sile valova prvog reda i otpor broda kao i silu uslijed djelovanja užeta za tegljenje.

Sličan izraz za hidrodinamiku broda u vremenskoj domeni može se naći u [7] i [8]. Razlika je u određivanju sile prigušenja. U [7] radijacijsko prigušenje određuje se konvolucijskim integralom na osnovu memorijske funkcije. S obzirom da se ovdje radi o pojednostavljenom pristupu, matrica prigušenja  $[B]$  definirana je kao određeni postotak matrice kritičnog prigušenja za poniranje i

posrtanje, prema postupku iz [9]. Prigušenje za zalijetanje procijenjeno je pomoću krivulje otpora broda.

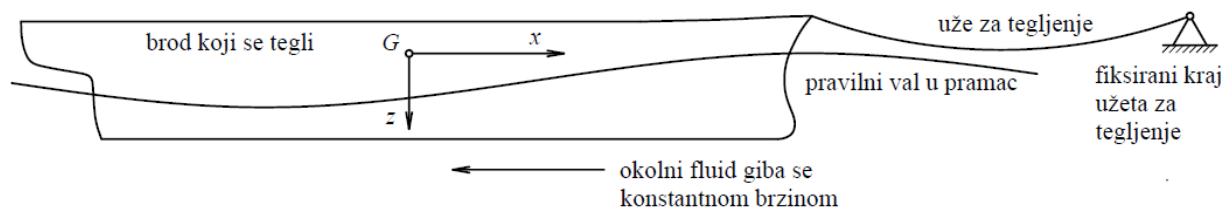


Fig. 3. Coupled model of towed ship

Slika 3. Spregnuti model tegljenog broda

### 2.3. Otpor broda u mirnoj vodi

Najniži nivo aproksimacije Navier-Stokesovih jednadžbi je Laplaceova jednadžba koja vrijedi pod pretpostavkama da je strujanje tekućine stacionarno, neviskozno i bezvrtložno. Unatoč navedenim ograničenjima, Laplaceova jednadžba ima mnoge primjene. Numeričko rješenje Laplaceove jednadžbe za simulaciju strujanja oko realnih konfiguracija je i dan danas osnovna metoda u mnogim inženjerskim problemima, tzv. panelna metoda ili metoda rubnih elemenata (eng. *Boundary Element Method* BEM). Glavna prednost panelne metode je što daje potpuno rješenje uz odgovarajuće rubne uvjete sa značajnim uštedama u potrebnom vremenu modeliranja.

Ukupni otpor broda se sastoji od viskoznog otpora i otpora valova. Viskozni otpor broda se sastoji od otpora trenja i viskoznog otpora tlaka, a za praktične proračune viskozni otpor se izračunava preko otpora trenja i faktora forme koji ovisi o obliku trupa. Otpor trenja se izračunava pomoću korelacijske linije model-brod ITTC 1957 koja uključuje utjecaj trodimenzijskog strujanja.

Faktor forme može se izračunati prema različitim empirijskim formulama. Takve empirijske formule ne mogu predstavljati ništa drugo osim prosječne vrijednosti svih brodova koji se koriste u analizama. Upotreba takvih empirijskih metoda može dati netočan rezultat koji ne predstavlja stvarni relativni otpor između različitih projekata. Empirijska formula koja uzima u obzir i utjecaj forme na tlak i trenje je metoda Holtrop za predviđanje faktora forme.

Za izračunavanje otpora valova koristit će se vlastiti programski paket temeljen na nelinearnoj metodi za proračun otpora valova. Programski paket izračunava stacionarno neviskozno strujanje oko broskog trupa, sliku valova i otpor valova. Dakle, rješava se potpuno nelinearni problem potencijalnog strujanja iterativnim postupkom, na temelju metode uzdignutih panela. Glavna prednost ovih metoda je vrlo kratko vrijeme proračuna, u odnosu na metode temeljene na Reynoldsovima osrednjenim Navier-Stokesovim jednadžbama, tzv. RANS metode (eng. Reynolds-averaged Navier-Stokes equations).

Primijenjena metoda temelji se na nelinearnom proračunu otpora valova broda primjenom Dawsonove iterativne metode podignutih panela (eng. **RA**ised **P**anel **I**terative **D**awson - **RAPID**), razvijene u MARIN-u, [10]. Numeričko rješenje nelinearnog potencijalnog problema sastoji se od sekvencijalnih linearnih rješenja definiranih tako da se iteracijskim postupkom rješenje prilagođava do postizanja konvergencije. U svakom koraku rješava se Laplaceova jednadžba koristeći ravne kvadrilateralne panele s konstantnim intenzitetom izvora po panelu. Metoda se temelji na podizanju panela slobodne površine s izvorima na neku visinu iznad početne slobodne površine. Kinematičko-dinamički rubni uvjet na trenutnoj slobodnoj površini tretira se primjenom Dawsonove metode u kojoj se derivacije brzina modeliraju pomoću diferencijalnih shema. Detaljni opis metode može se naći u [10] i [11].

Budući da se metoda temelji na teoriji neviskoznog strujanja, čime se isključuje utjecaj graničnog sloja, zone "mrtve vode" iza krme i odvajanja strujanja, amplitude krmenog sustava

valova su obično precijenjene; vrlo malo za brodove s vitkom transom krmom, a više za punije forme trupa. Postupak za izračun ukupnog otpora može se naći u [5].

#### 2.4. Karakteristike poprečnog presjeka žičanog užeta

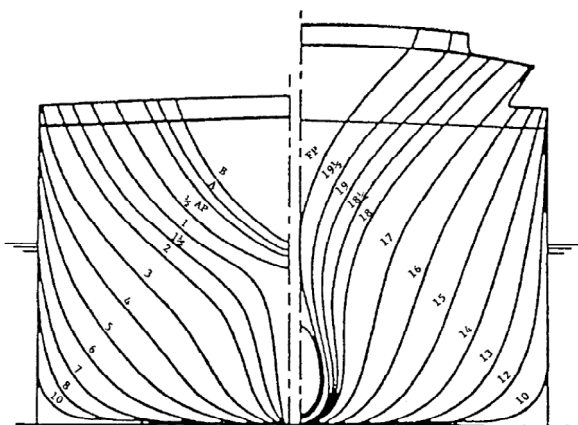
U sljedećem ilustrativnom primjeru uže za tegljenje je izrađeno od žičane užadi. Budući da matematički model užeta za tegljenje ima implementiranu aksijalnu krutost, potrebno je procijeniti karakteristike poprečnog presjeka žičane užadi. To se može postići samo grubom procjenom kako slijedi:

$$A = \frac{n \pi d^2}{4} \quad (16)$$

gdje  $n$  označava broj niti u žičanom užetu,  $d$  promjer niti,  $A$  poprečni presjek. Jednadžba (16) je uzeta iz [12], gdje se razmatra aproksimacija svojstava poprečnog presjeka savitljivih električnih vodiča.

### 3. Ilustrativni primjer

Na temelju prikazanog matematičkog modela, za model kontejnerskog broda S-175 izračunata su za različite valne duljine inducirana valna gibanja za slučaj pravilnih valova u pramac i vlačna sila koja djeluje u točki tegljenja broda koji se tegli. Kako bi se verificirao i validirao predloženi matematički model dobiveni rezultati su uspoređeni s rezultatima modelskih ispitivanja [4]. Proračunski model je prikazan na slici 3. Pretpostavlja se da je gibanje broda koji tegli zadano, jer je točka tegljenja broda koji tegli fiksirana za kolica za tegljenje i giba se pravocrtno konstantnom brzinom. U ovoj studiji su eksperimenti provedeni s modelom fiksiranim u odnosu na zanošenje i zaošijanje. Tegljeni brod može zalijetati, ponirati i posrtati. Zalijetanje i poniranje su mjereni laserskim daljinomjerom, a posrtanje potencijetrom. Tegljeni model je povezan s dinamometrom fiksiranim za kolica za tegljenje pomoću užeta za tegljenje, u ovom slučaju žičano uže. Vlačna sila koja djeluje u točki tegljenja mjerena je pomoću dinamometra.



Slika 4. Nacrt rebara kontejnerskog broda S-175

Fig. 4. Body plan of S-175 container ship

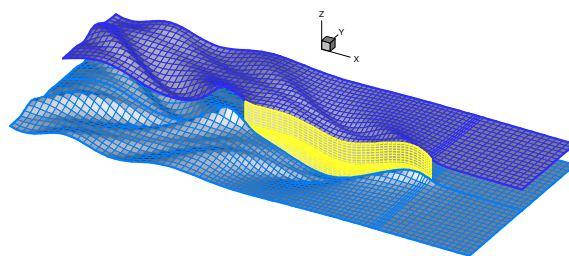
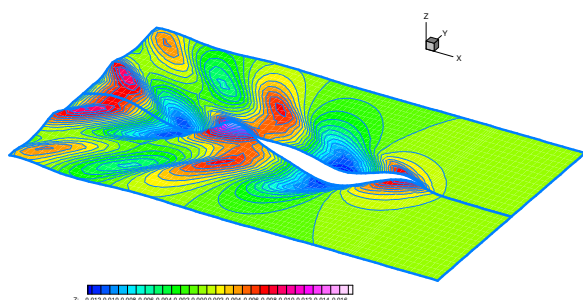


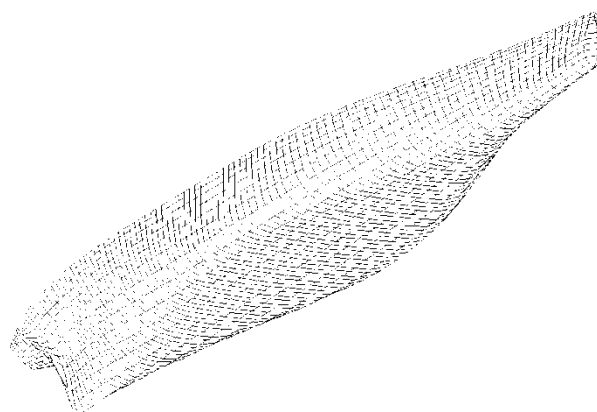
Fig. 5. Hull and the free surface panelling for S-175 container ship model at  $Fn = 0.35$

Slika 5. Paneli trupa i slobodne površine za modela kontejnerskog broda S-175 pri  $Fn = 0,35$



**Fig. 6.** Wave pattern around the S-175 container ship model at  $Fn = 0.35$

**Slika 6.** Slika valova oko modela kontejnerskog broda S-175 pri  $Fn = 0,35$



**Fig. 7.** Panel elements of S-175 container ship model, HYDROSTAR [13]

**Slika 7.** Paneli modela kontejnerskog broda S-175, HYDROSTAR [13]

Sva ispitivanja provedena su za konstantnu brzinu tegljenja od  $0,471\text{m/s}$  koja odgovara brzini od  $7,0$  čvorova za brod u naravi. Visina valova je iznosila  $30\text{ mm}$ , a omjer između valne duljine i duljine modela variran je u rasponu  $\lambda/L = 0,5 - 2,0$ .

Glavne dimenzije kontejnerskog broda S-175 u naravi i njegovog modela prikazane su u tablici 1., a nacrt rebara prikazan je na slici 4. Položaj težišta mase LCG i radijusa inercija u tablici 1. predstavljaju stvarne vrijednosti dobivene modelskim ispitivanjima [4]. Svojstva žičanog užeta su dani u tablici 2.

**Table 2.** Principal dimensions of S-175 container ship

**Tablica 1.** Glavne dim. kontejnerskog broda S-175

	Brod u naravi	Model
Duljina $L$ (m)	175,00	3,00
Širina $B$ (m)	25,40	0,435
Gaz na pramcu $d_f$ (m)	7,00	0,120
Gaz na glavnom rebru $d_m$ (m)	9,50	0,163
Gaz na krmi $d_a$ (m)	12,02	0,206
Volumen $V$ (m <sup>3</sup> )	24154,13	0,122
Koeficijent punoće $C_b$	0,572	0,572
Položaj težišta masa LCG $x_G$ (m)		-0,141
Radijus okretanja $k_{yy}/L$		0,239

**Table 2.** Properties of the wire rope

**Tablica 2.** Karakteristike žičane užadi

Oznaka	Iznos	Jedini ca
Promjer žičane užadi	3	mm
Raspodijeljena masa žičane užadi	0,0346	kg/m
Youngov modul materijala žičane užadi	193	GPa
Broj niti	49	-
Promjer niti	0,335	mm
Površina presjeka	4,325	mm <sup>2</sup>
Moment inercije presjeka (minimalna vrijednost)	0,0304	mm <sup>4</sup>

Oplata trupa sastoji se od 1280 panela, a slobodna površina od 1275 panela za jednu simetričnu polovinu. Slika 5. prikazuje panele trupa i slobodne površine za nelinearni proračun otpora valova koji se generiraju automatskom prilagodbom. Elevacije slobodne površine su pet puta uvećane zbog preglednosti. Slika 6. prikazuje trodimenzionalnu stacionarnu sliku valova oko modela kontejnerskog broda S-175 pri  $Fn = 0,35$ . Valne visine su pet puta uvećane i normalizirane s duljinom modela broda.



Proračun uzбудnih sila i hidrodinamičkih reakcija dodane mase i prigušenja je proveden pomoću programa HYDROSTAR [13], koji je razvijen u Bureau Veritas-u. HYDROSTAR se temelji na teoriji potencijalnog strujanja i trodimenzionalnoj metodi rubnih elemenata i ima mogućnost uzimanja u obzir brzinu napredovanja broda. Prigušenje u vremenskoj domeni, radi pojednostavljena, je definirano kao 20% od kritičnog prigušenja (vidi poglavlje 2.2). Vizualizacija mreže za model kontejnerskog broda S-175 dobivena programom HYDROSTAR je prikazana na slici 7.

Najveća ispitana veličina vremenskog koraka u simulacijama u vremenskoj domeni iznosila je 0,1s. Za veće vremenske korake pojavljuje se numerička nestabilnost koja kvari rezultate simulacije. Da bi bili sigurni za sve simulacije uzeta je veličina vremenskog koraka od 0,05s. Manji vremenski koraci su prihvatljivi, ali znatno produžuju vrijeme simulacije.

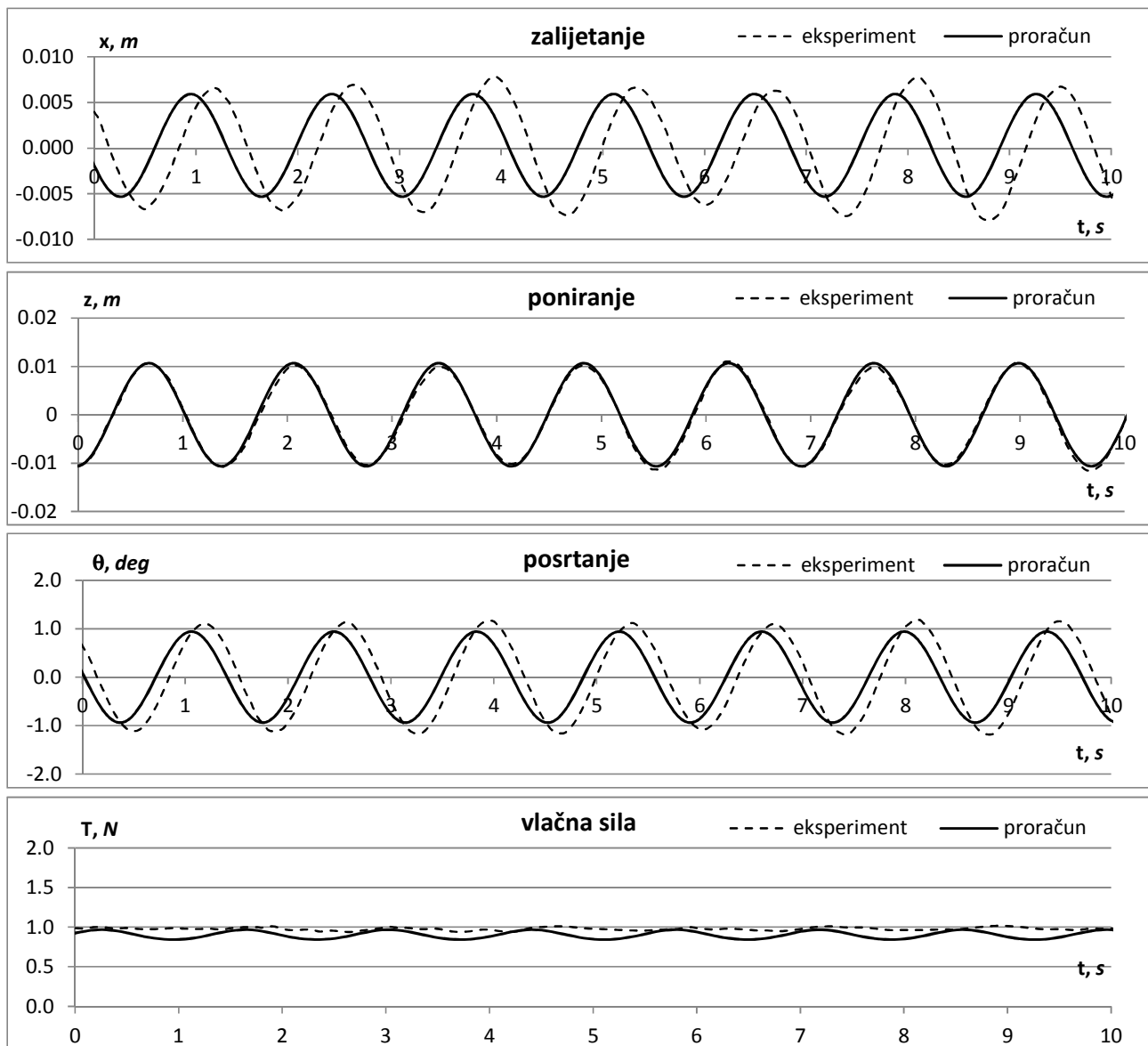
#### 4. Rezultati

Proračun gibanja induciranih valovima tegljenog broda i vlačne sile koja djeluje u točki tegljenja je proveden za širok raspon valnih duljina  $\lambda/L = 0,5 - 2,0$ . Dobiveni numerički rezultati uspoređeni su s objavljenim eksperimentalnim rezultatima [4]. Slika 8. prikazuje usporedbu između rezultata simulacije i mjerenja u vremenu za zalijetanje, poniranje i posrtanje tegljenog broda na pravilnim valovima u pramac i vlačnu silu koja djeluje u točki tegljenja za valnu duljinu  $\lambda/L = 1,4$ . Kao što se može vidjeti iz slike 8. izračunate amplitude gibanja razlikuju se od eksperimentalnih vrijednosti. Međutim, te razlike u amplitudama nisu značajne i periode valnih gibanja dobivene simulacijom su gotovo iste kao i one dobivene eksperimentom. Postoji dobro slaganje između izračunatog i eksperimentalnog faznog pomaka za zalijetanje i posrtanje. Izračunati fazni pomak za poniranje slaže se jako dobro s eksperimentom. Može se zaključiti da je predloženi numerički model sposoban predvidjeti zalijetanje, poniranje i posrtanje tegljenog broda za valnu duljinu  $\lambda/L = 1,4$  s razumnom točnošću. Izračunata vlačna sila u vremenu pokazuje veće oscilacije amplituda od eksperimentalnih, tako da su minimalne vrijednosti vlačnih sila 10 % manje od eksperimentalnih. Međutim, prosječna vlačna sila u užetu za tegljenje se vrlo malo razlikuje od prosječne vlačne sile dobivene eksperimentom, koja je gotovo konstantna i iznosi 1N.

Nadalje, amplitude valnih gibanja i prosječna vrijednost vlačne sile koja djeluje u točki tegljenja su dobivene iz izračunatih podataka u vremenu za raspon valnih duljina  $\lambda/L = 0,5 - 2,0$  i uspoređene s eksperimentalnim vrijednostima kao što je prikazano na slikama 9.-12. Amplitude valnih gibanja standardnog pokusa pomorstvenosti (bez užeta za tegljenje) su također ucrtane na slikama 9.-12. Amplitude zalijetanja  $x_A$  i poniranja  $z_A$ , su bezdimenzionalizirane dijeljenjem s amplitudom vala  $\zeta_A$  i amplituda posrtanja  $\theta_A$  dijeljenjem s nagibom vala  $k\zeta_A$ . Izračunate amplitude zalijetanja se dobro slažu s eksperimentalnim vrijednostima, slika 9. Izračunate amplitude poniranja su niže od eksperimentalnih vrijednosti u rasponu  $\lambda/L = 0,5 - 1,0$ , slika 10. Za valne duljine  $\lambda/L > 1,0$  može se uočiti izuzetno dobro slaganje rezultata. Lokalni minimumi i maksimumi nastupaju pri valnim duljinama koje se razlikuju između proračuna i eksperimenta. Što se tiče amplituda posrtanja izračunate vrijednosti imaju isti trend kao i eksperimentalne vrijednosti, premda su nešto manje od eksperimentalnih vrijednosti za raspon  $\lambda/L > 1,2$ , slika 11. Pretpostavlja se da su razlike između izračunatih amplituda i amplituda dobivenih eksperimentom posljedica zanemarivanja viskoznih sila u našem numeričkom modelu temeljenom na potencijalnom strujanju, koje su posebno izražene kod posrtanja.

Slika 12. prikazuje usporedbu između izračunate i izmjerene prosječne vlačne sile koja djeluje u točki tegljenja. Izračunata prosječna vrijednost vlačne sile je konstantna za cijeli raspon valnih duljina. Ova konstantna vrijednost od 0,902 N je jednaka procijenjenom ukupnom otporu broda. To je bilo i za očekivati s obzirom da je model užeta za tegljenje kvazistatičan i osrednjene vrijednosti

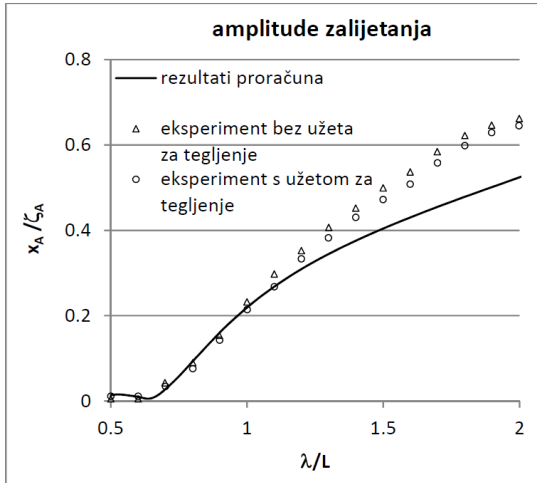
odziva ne zavise od frekvencije vala. Također izračunate prosječne vlačne sile su manje od eksperimentalnih. To je posljedica metode koja je korištena za procjenu otpora broda.



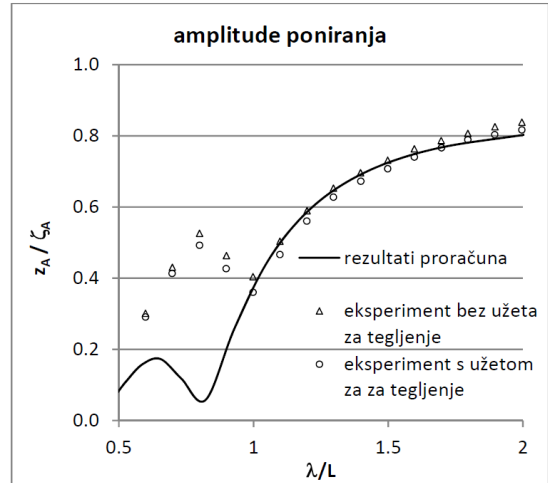
**Fig. 8.** Comparison of time history of the surge, heave and pitch motions and the towline tension for the wavelength  $\lambda/L=1.4$

**Slika 8.** Usporedba zalijetanja, poniranja i posrtanja te vlačne sile u vremenu za valnu duljinu  $\lambda/L=1,4$

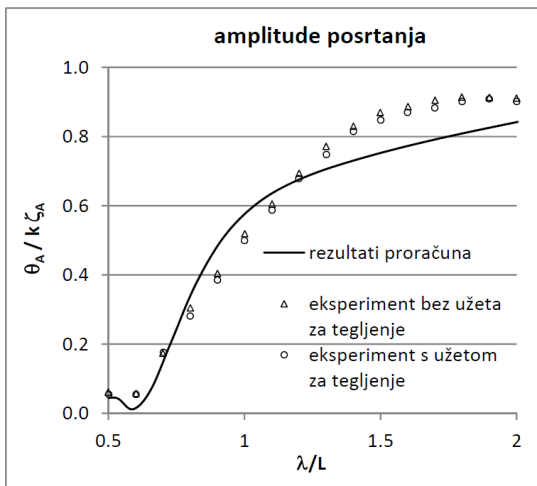
Izračunate amplitude vlačne sile za raspon valnih duljina  $\lambda/L=0,5-2,0$  su prikazane na slici 13. Zbog nedostatka eksperimentalnih podataka izračunate vrijednosti se ne mogu usporediti s izmjenjenim vrijednostima. Slike 9. i 13. su vrlo slične tj. amplitude zalijetanja i amplitude vlačne sile su na sličan način povezane s valnom duljinom. To je posljedica kvazistatičkog pristupa pri modeliranju užeta za tegljenje, gdje su inercijske sile i sile prigušenja na užu za tegljenje zanemarene. U ovom slučaju užu za tegljenje se ponaša kao nelinearna opruga i vlačna sila je gotovo proporcionalna zalijetanju.



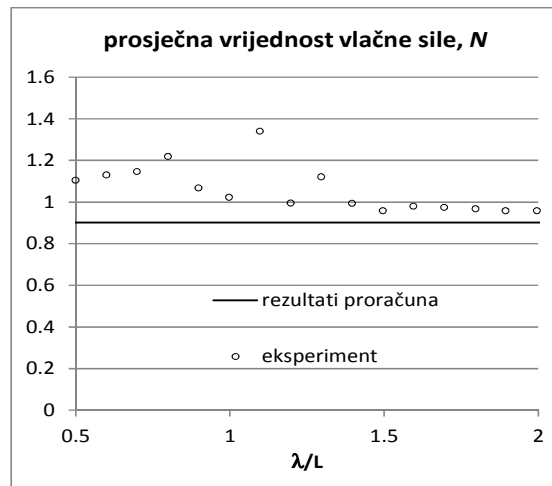
**Fig. 9.** Comparison of surge amplitudes of the towed ship  
**Slika 9.** Usporedba amplituda zalijetanja tegljenog broda



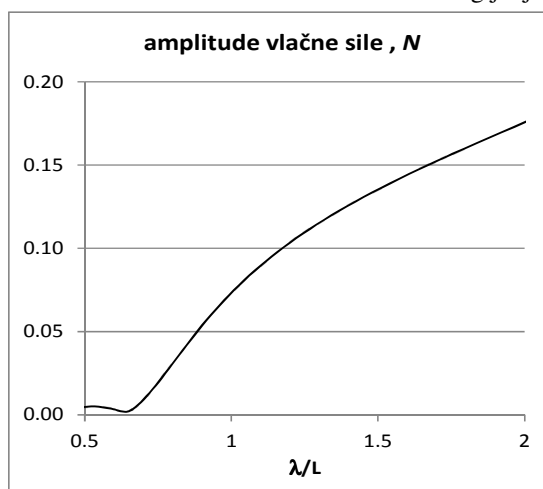
**Fig. 10.** Comparison of heave amplitudes of the towed ship  
**Slika 10.** Usporedba amplituda poniranja tegljenog broda



**Fig. 11.** Comparison of pitch amplitudes of the towed ship  
**Slika 11.** Usporedba amplituda posrtanja tegljenog broda



**Fig. 12.** Comparison of average tension acting on the towing point  
**Slika 12.** Usporedba prosječne vrijednosti vlačne sile u točki tegljenja



**Fig. 13.** Calculated tension amplitudes  
**Slika 13.** Izračunate amplitude vlačne sile

## 5. Zaključak

Razvijen je pojednostavljeni numerički model u vremenskoj domeni za predviđanje gibanja tegljenog broda i vlačne sile na pravilnim valovima u pramac. Model užeta uključuje geometrijsku i aksijalnu krutost uz zanemarenje inercijskih sila i sila prigušenja. Numerički model može predvidjeti gibanja tegljenog broda i vlačnu silu u užetu za tegljenje, koja djeluje u točki tegljenja, u vremenskoj domeni s dovoljnom točnošću za čitav raspon valnih duljina  $\lambda/L = 0,5 - 2,0$ .

Prednost razvijenog numeričkog modela je u njegovoj jednostavnosti, što ima za posljedicu kratko vrijeme proračuna i brzu procjenu gibanja tegljenog broda. Usporedba s dostupnim eksperimentalnim podacima pokazala je da prikazani pojednostavljeni model tegljenja broda s dovoljnom točnošću predviđa gibanja tegljenog broda i vlačnu silu u užetu za tegljenje. Predloženi matematički model je dobra osnova za daljnja istraživanja. Planovi za buduća istraživanja su razvijanje matematičkog modela koji uključuje inercijske sile i sile prigušenja.

## Zahvala

Ovaj rad sufinanciralo je Sveučilište u Zagrebu, kratkoročnom financijskom potporom istraživanju (Potpora istraživanju 1 za 2013./2014. godinu) pod naslovom "Sigurnost tegljenja pomorskih objekata na valovitom moru" te Hrvatska zaklada za znanost projektom 8658.

## Literatura

- [1] DESROCHES, A.S.: "Calculation of Extreme Towline Tension During Open Ocean Towing", M. Sc. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, 1997.
- [2] BHATTACHARYYA, S. K., VENDHAN C. P. "The Finite Element Method for Hydroelastic Instability of Underwater Towed Cylindrical Structures", Journal of Sound and Vibration, Vol. 237, No. 1, 2000, p. 119-143.
- [3] RAMAN-NAIR, W., POWER, J., SIMOES-RE, A.: "Numerical Model of Towing Dynamics of a Long Flexible Life Raft in Irregular Waves", Marine Technology, Vol. 46, No. 4, 2009, p. 213-218.
- [4] NAKAYAMA, Y., YASUKAWA, H., HIRATA, N., HATA, H.: "Time Domain Simulation of Wave-induced Motions of a Towed Ship in Head Seas", Proceedings of the Twenty-second (2012) International Offshore and Polar Engineering Conference, Rhodes, Greece, June 2012, p. 901-907.
- [5] ČATIPOVIĆ, I., DEGIULI, N., WERNER, A., ČORIĆ, V., RADANOVIĆ, J.: "Numerical Model of Towing Line in Sea Transport", 33<sup>rd</sup> International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE 2014, July 2014, San Francisco, USA, 2014.
- [6] KREYSZIG, E.: "Advanced Engineering Mathematics", Seventh edition, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1993.
- [7] CUMMINS, W.E.: "The Impulse Response Function and Ship Motions", Schiffstechnik, Vol.9, 1962.
- [8] OGILVIE, T. F.: "Recent Progress Towards the Understanding and Prediction of Ship Motions", Fifth Symposium on Naval Hydrodynamics, Bergen, Norway, 1964, p. 2-128.
- [9] SENJANOVIĆ, I.: "Vibracije broda 3. dio", Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 1981.
- [10] RAVEN, H.C.: "A Solution Method for the Nonlinear Ship Wave Resistance Problem", Ph.D. Thesis, Technische Universiteit Delft, The Netherlands, 1996.
- [11] WERNER, A., DEGIULI, N., SUTLOVIĆ, I. "CFD as an Engineering Tool for Design and Analysis", Strojarsstvo, Vol. 48, No. 3-4, Zagreb, 2006, p. 115-121.
- [12] KIUREGHIAN, A.D., HONG, K.J., SACKMAN, J.L.: "Further Studies on Seismic Interaction in Interconnected Electrical Substation Equipment", Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 1999.
- [13] ...: HYDROSTAR for Experts, v6.11 - User Manual, 2010 Bureau Veritas, Paris.