

*Ivo Senjanović, Nikola Vladimir, Marko Tomić, Neven Hadžić
Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, I. Lučića 5, Zagreb*

HIDROELASTIČNI ODZIV VELIKOG KONTEJNERSKOG BRODA

Sažetak

Veliki kontejnerski brodovi su relativno elastični i brzi, pa su njihove prirodne frekvencije bliske susretnim frekvencijama. Za pouzdanije projektiranje takvih brodova potrebno je koristiti hidroelastične proračunske modele koji omogućuju vjerodostojnije modeliranje distribucije opterećenja i istovremeno uzimanje u obzir gibanja i elastičnih deformacija brodske konstrukcije. U ovom radu prikazane su teorijske osnove strukturnog, hidrodinamičkog i hidrostatičkog modela čijim spajanjem nastaje hidroelastični model. Razvijeni postupak temelji se na kombiniranju strukturnog 1D grednog modela konačnih elemenata i 3D hidrodinamičkog modela, što ga čini iznimno pogodnim za preliminarnu fazu osnivanja. Ukratko su opisani računalni programi izrađeni za potrebe hidroelastične analize, te je provedena analiza hidroelastičnog odziva velikog kontejnerskog broda nosivosti 7800 TEU. Valjanost 1D MKE modela provjerena je koreliranjem prirodnih frekvencija i oblika vibriranja s rezultatima 3D MKE analize. Rezultati su uspoređeni s rezultatima analize odziva krutog broda na valovima.

Ključne riječi: hidroelastičnost, kontejnerski brod, valno opterećenje, odziv, MKE

HYDROELASTIC RESPONSE OF A LARGE CONTAINER SHIP

Summary

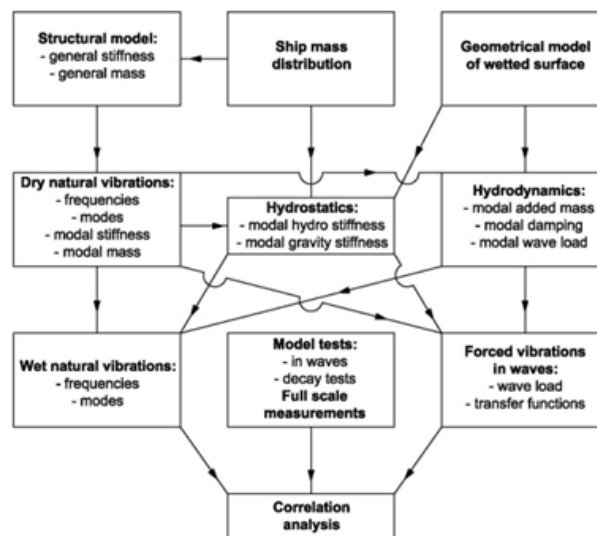
Very large container ships (VLCS) are rather flexible and fast vessels and their natural frequencies are close to encounter frequencies. Hydroelastic calculation models, which enable more realistic modeling of load distribution and taking into account ship displacements and strains at the same time, have to be used for reliable design of those kind of ships. In this paper theoretical background of structural, hydrodynamic and hydrostatic models, as constitutive parts of hydroelastic model, is given. The developed procedure is based on combining structural 1D sophisticated beam FEM model with 3D BEM hydrodynamic model, which makes it especially appropriate for preliminary design stage. Computer programs which are derived for hydroelastic analysis purposes are briefly described, and hydroelastic analysis of 7800 TEU container ship has been done. Validation of 1D FEM model is checked by correlation analysis with the vibration response of the fine 3D FEM model. The results are compared to those obtained by treating ship as a rigid body.

Key words: hydroelasticity, container ship, wave load, response, FEM

1. Uvod

Proces kontejnerizacije u pomorskom prometu započeo je 1937. godine dosegao je stupanj koji danas zahtijeva gradnju kontejnerskih brodova kapaciteta i do 15000 TEU. Takvi brodovi su razmjerno elastični što uz njihovu veću brzinu može dovesti do podudaranja prirodnih frekvencija s frekvencijama valne uzbude tj. pojave rezonantnih fenomena. Kontejnerski brodovi su ve im dijelom svoje duljine otvorenog presjeka, pa zbog razmjerno velike udaljenosti izme u centra smika i težišta njihovi najniži prirodni oblici vibriranja pripadaju spregnutim horizontalnim i torzijskim vibracijama [1]. Za pouzdanije projektiranje kontejnerskih brodova nije dovoljna primjena klasi nih teorija pomorstvenosti kao primjerice za tankere ili brodove za prijevoz rasutog tereta, ve je potrebna provedba hidroelasti ne analize koja omogu tje realniji opis distribucije optere enja i istovremeno uzimanje u obzir gibanja i deformacija [2].

Numerički postupak za hidroelasti nu analizu zahtijeva definiciju strukturnog modela, distribuciju mase tereta i broda, kao i definiciju oplakane površine broda [3, 4, 5]. Nakon toga slijedi prora un prirodnih vibracija u zraku te prora un modalne hidrostatske krutosti, modalne pridružene mase, prigušenja i valnog optere enja. Na kraju se mogu odrediti prijenosne funkcije odziva na valovima, kao i prirodne frekvencije i oblici vibriranja broda u vodi. Dobivene rezultate poželjno je korelirati s rezultatima modelskih testova ili ispitivanja u naravi [3, 4], Slika 1.



Slika 1. Metodologija hidroelastične analize

Fig. 1 Methodology of hydroelastic analysis

Ovaj rad prikazuje hidroelasti nu analizu velikog kontejnerskog broda nosivosti 7800 TEU, provedenu na temelju postupka razvijenog kroz višegodišnju suradnju FSB Zagreb i Bureau Veritas Pariz, koji kombinira sprežanje strukturnog 1D greznog modela kona nih elemenata s 3D hidrodinami kim modelom. Osim teorijskih osnova koje uklju uju opis strukturnog, hidrodinami kog i hidrostati kog modela ukratko su opisani razvijeni ra analni programi. Valjanost 1D MKE modela provjerena je koreliranjem prirodnih frekvencija i oblika vibriranja s rezultatima 3D MKE analize, a rezultati su uspoređeni s rezultatima analize odziva krutog broda na valovima.

2. Teorijske osnove

2.1. Strukturni model

Gredni model temelji se na teoriji tankostijenih nosača i uzima u obzir utjecaj smičnih sila na torziju te doprinos poprečnih pregrada ukupnoj krutosti broskog trupa. Ukupni progib grede, w , sastoji se od savojnog dijela i doprinosa uslijed utjecaja smičnih sila

$$w = w_b + w_s = w_b - \frac{EI_b}{GA_s} \frac{d^2 w_b}{dx^2} \quad (1)$$

gdje su E i G modul elastičnosti i modul smika, a I_b i A_s predstavljaju moment tromosti poprečnog presjeka i smičnu površinu. Imajući u vidu analogiju između smika i torzije, ukupni kut zakreta se može zapisati preko kuta čiste torzije i doprinosa smičnih sila [6, 7]

$$\psi = \psi_t + \psi_s = \psi_t - \frac{EI_w}{GA_s} \frac{d^2 \psi_t}{dx^2}, \quad (2)$$

gdje je I_w modul vitoperenja, a I_s modul tromosti na smicanje. Presječne sile uključuju ukupni moment, T koji se sastoji od dijela koji se odnosi na čistu torziju T_t i smičnog doprinosa T_w i bimoment B_w .

$$T = T_t + T_w \quad (3)$$

$$T_t = GI_t \frac{\partial \psi_t}{\partial x}, \quad T_w = GI_s \frac{\partial \psi_s}{\partial x} = -EI_w \frac{\partial^3 \psi_t}{\partial x^3} \quad (4)$$

$$B_w = EI_w \frac{\partial^2 \psi_t}{\partial x^2}. \quad (5)$$

Doprinos pregrada ukupnoj krutosti broskog trupa uzet je u obzir povećanjem torzijske krutosti poprečnog presjeka broda proporcionalno energiji deformacije pregrade i energiji deformacije pripadnog dijela trupa [8]. Pregrada se aproksimira ortotropnom pločom s krutim stool-om [9]. Ekvivalentni modul torzije pritom je jednak:

$$I_t^* = \left[1 + \frac{a}{l_1} + \frac{4(1+\nu)C}{I_t l_0} \right] I_t, \quad (6)$$

gdje je a visina ukrepa pregrade, l_0 je razmak pregrada Slika 2, a C predstavlja koeficijent koji se dobije prema:

$$C = \frac{U_g + U_s}{E\psi'^2}. \quad (7)$$

Energija deformacije roštilja pregrade sastoji se od energije vertikalnog i horizontalnog savijanja s kontrakcijom i torzije [8]:

$$U_g = \frac{1}{1-\nu^2} \left[\frac{116H^3}{35b} i_y + \frac{32b^3}{105H} i_z + \frac{8Hb}{75} \nu (i_y + i_z) + \frac{143Hb}{75} (1-\nu) i_t \right] E\psi'^2, \quad (8)$$

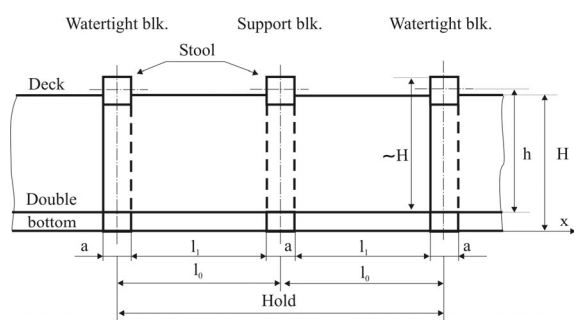
pri čemu i_y , i_z i i_t predstavljaju prosječne momente tromosti i modul torzije presjeka. Energija deformacije stool-a sastoji se od doprinosa savijanja, smicanja i torzije:

$$U_s = \left[\frac{12h^2 I_{sb}}{b} + 72(1+\nu) \frac{h^2}{b^3} \frac{I_{sb}^2}{A_s} + \frac{9bI_{st}}{10(1+\nu)} \right] E\psi'^2, \quad (9)$$

gdje je I_{sb} moment tromosti presjeka, A_s predstavlja smičnu površinu, I_{st} modul torzije, a h je udaljenost stool-a od dvodna, Slika 3. Sama deformacija pregrade (aksijalni pomak) može se opisati izrazom, Slika 3:

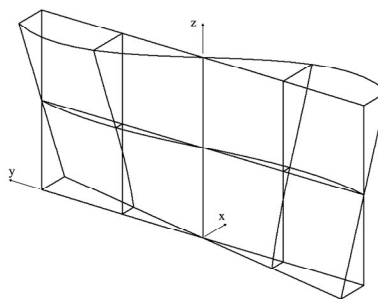
$$u(y,z) = -y \left\{ (z-d) + \left[1 - \left(\frac{y}{b} \right)^2 \right] \frac{z^2}{H} \left(2 - \frac{z}{H} \right) \right\} \psi'. \quad (10)$$

U izrazu (10) H je visina broda, b predstavlja polovinu širine pregrade, d je udaljenost centra vitoperenja od neutralne linije dvodna, y i z su poprečna i vertikalna koordinata, a ψ' a predstavlja promjenu kuta zakreta.



Slika 2. Uzdužni presjek kroz skladište broda

Fig. 2 Longitudinal section of ship hold



Slika 3. Deformacija pregrade

Fig. 3 Shape of bulkhead deformation

Matrična jednadžba „suhih“ prirodnih vibracija, za MKE analizu glasi [10]:

$$(\mathbf{K} - \Omega^2 \mathbf{M}) \boldsymbol{\delta} = \mathbf{0}, \quad (11)$$

gdje je \mathbf{K} matrica krutosti, \mathbf{M} je matrica mase, Ω je prirodna frekvencija, a $\boldsymbol{\delta}$ prirodni oblik vibriranja. Kao rješenje problema svojstvenih vrijednosti (11) dobiju se vrijednosti Ω_i i $\boldsymbol{\delta}_i$ za svaki i -ti oblik, pri čemu je $i=1,2,\dots,N$, gdje je N ukupni broj stupnjeva slobode. Prvih šest prirodnih frekvencija jednake su nuli i s odgovarajućim vrijednostima vlastitih vektora predstavljaju krute oblike vibriranja. Ukoliko se koristi 1D analiza, potrebno je „raspršiti“ pomake točaka konačnih elemenata na točke oplakane površine, pri čemu za vertikalne, odnosno spregnute horizontalne i torzijske vibracije vrijedi:

$$\mathbf{h}_i = -\frac{dw_{vi}}{dx} (z - z_N) \mathbf{i} + w_{vi} \mathbf{k} \quad (12)$$

$$\mathbf{h}_i = \left(-\frac{dw_{hi}}{dx} y + \frac{d\psi_i}{dx} \bar{u} \right) \mathbf{i} + [w_{hi} + \psi_i (z - z_S)] \mathbf{j} - \psi_i y \mathbf{k},$$

gdje w predstavlja progib trupa, ψ je kut uvijanja, a y i z koordinate točke na oplakanoj površini.

2.2. Hidrodinamički model

U općem slučaju postupak sprezanja strukturnog i hidrodinamičkog modela ne ovisi o korištenom hidrodinamičkom modelu, i ovdje je prikazan za slučaj bez brzine napredovanja kao najjednostavniji. Hidroelastični problem razmatra se u frekvencijskom području pa se operira s amplitudama sila i pomaka. Za sprezanje strukturnog i hidrodinamičkog modela potrebno je sile vanjskog tlaka izraziti na pogodan način [11]. Ukupna hidrodinamička sila F^h se razdvoji na dio F^R , ovisan o deformacijama konstrukcije, i dio F^{DI} , koji predstavlja čistu uzбудu. Moguće je koristiti metodu modalne superpozicije, a vektor deformacije oplakane površine $\mathbf{H}(x, y, z)$ može se izraziti preko „suhih“ prirodnih oblika $\mathbf{h}_i(x, y, z)$. Za hidrodinamički dio problema koristi se teorija potencijalnog strujanja, pa je u slučaju bez brzine napredovanja ukupni potencijal brzine φ definiran Laplaceovom diferencijalnom jednačbom i zadanim rubnim vrijednostima. U okviru linearne valne teorije može se izvršiti dekompozicija ukupnog potencijala na potencijal nailaznog vala φ_I , te difrakcijsku φ_D i radijacijsku φ_{Rj} komponentu.

$$\varphi = \varphi_I + \varphi_D - i\omega \sum_{j=1}^N \xi_j \varphi_{Rj}, \quad \varphi_I = -i \frac{gA}{\omega} e^{\nu(z+ix)} \quad (13)$$

U izrazu (13) A predstavlja valnu amplitudu, a ω valnu frekvenciju. Nakon što su potencijali određeni, modalne hidrodinamičke sile se određuju integracijom rada tlaka preko oplakane površine, S . Ukupni linearizirani tlak određuje se iz Bernoullijeve jednačbe

$$p = i\omega\rho\varphi - \rho gz. \quad (14)$$

Najprije se razmatra član vezan za potencijal brzine φ i njegovom podijelom na uzbudni i radijacijski dio dobivamo:

$$F_i^{DI} = i\omega\rho \iint_S (\varphi_I + \varphi_D) \mathbf{h}_i \mathbf{n} dS, \quad F_i^R = \rho \omega^2 \sum_{j=1}^N \xi_j \iint_S \varphi_{Rj} \mathbf{h}_i \mathbf{n} dS \quad (15)$$

Zatim je moguće razdvojiti (15) na modalnu inercijsku silu vezanu s ubrzanjem, odnosno modalnu prigušnu silu vezanu s brzinom:

$$F_i^a = \text{Re}(F_i^R) = \omega^2 \sum_{j=1}^N \xi_j A_{ij}, \quad A_{ij} = \rho \text{Re} \iint_S \varphi_{Rj} \mathbf{h}_i \mathbf{n} dS \quad (16)$$

$$F_i^v = \text{Im}(F_i^R) = \omega \sum_{j=1}^N \xi_j B_{ij}, \quad B_{ij} = \rho \omega \text{Im} \iint_S \varphi_{Rj} \mathbf{h}_i \mathbf{n} dS. \quad (17)$$

gdje su A_{ij} i B_{ij} elementi matrice pridružene mase, odnosno prigušenja. Određivanje pridružene mase i prigušenja za krute oblike je u hidrodinamici dobro poznato, a isti postupak je proširen za proračun tih veličina i za elastične oblike. Hidrostatički dio ukupnog tlaka u Bernoullijevoj jednačbi razmatra se u okviru hidrostatičkog modela.

2.3. Hidrostatički model

U konstituiranju hidrostatičkog modela dominantnu ulogu ima povratna krutost, za koju u literaturi ne postoji jedinstvena formulacija. Općenito, pristup njenom konstituiranju može biti hidromehanički ili strukturni. Prvu važniju formulaciju povratne krutosti izveli su Price i

Wu 1985. godine [12], u kojoj su uzimali samo član hidrostatičkog tlaka. Njihovu formulaciju proširuje Newman 1994. godine dodajući utjecaj volumenske deformacije na hidrostatičke sile [13], a zatim Riggs dodaje utjecaj težine 1996. [14]. 2000. Huang i Riggs u okviru strukturnog pristupa objavljuju revidiranu formulaciju povratne krutosti u koju je uvedena i geometrijska krutost [15]. Ona daje simetričnu matricu povratne krutosti i temelji se na uvođenju volumenskog integrala početnog naprezanja i parcijalnih derivacija prirodnih oblika. Malenica i drugi [11, 16], te Senjanović i drugi [17] prezentirali su različite formulacije povratne krutosti temeljene na varijacijskom principu. U ovom radu korištena je konzistentna matrica krutosti, čija formulacija je dostupna u literaturi samo u sažetom obliku [5, 18]. Povratna krutost sastoji se od hidrostatičkog i gravitacijskog dijela, a rad hidrostatičkog tlaka, koji predstavlja poopćenu silu, može se izraziti na sljedeći način [5, 18]:

$$F^h = -\rho g \iint_S [H_z + Z(\nabla \mathbf{H})] \mathbf{H} \mathbf{n} dS, \quad (18)$$

gdje je ∇ Hamiltonov diferencijalni operator, \mathbf{H} predstavlja vektor pomaka, dS je diferencijal oplakane površine, dok su Z i \mathbf{n} dubina i jedinični vektor normale. Prema definiciji, krutost je relacija između inkrementalne sile i pomaka, i može se odrediti iz varijacijske jednadžbe

$$\delta F^h = -\rho g \iint_S [H_z + Z(\nabla \mathbf{H})] \delta \mathbf{H} \mathbf{n} dS. \quad (19)$$

Budući da se koristi metoda superpozicije prirodnih oblika, varijaciju je potrebno prenijeti na oblike, odnosno modalne sile i pomake

$$\delta F^h = \sum_{j=1}^N \delta F_j^h, \quad \mathbf{H} = \sum_{j=1}^N \xi_j \mathbf{h}_j, \quad \delta \mathbf{H} = \sum_{j=1}^N \mathbf{h}_j \delta \xi_j, \quad (20)$$

pa se jednadžba (19) može razložiti na modalne jednadžbe:

$$\begin{aligned} \delta F_i^h &= -\sum_{j=1}^N [(C_{ij}^p + C_{ij}^{nh}) \xi_j] \delta \xi_i, \\ C_{ij}^p &= \rho g \iint_S \mathbf{h}_i h_z^j \mathbf{n} dS, \quad C_{ij}^{nh} = \rho g \iint_S Z \mathbf{h}_i (\nabla \mathbf{h}_j) \mathbf{n} dS \end{aligned} \quad (21)$$

C_{ij}^p i C_{ij}^{nh} su povratni koeficijenti uslijed tlaka i doprinosa vektora normale i oblika vibriranja. Na sličan način kao sila tlaka, može se izraziti poopćena gravitacijska sila

$$F^m = -g \iiint_V \rho_s (\mathbf{H} \nabla) H_z dV, \quad (22)$$

gdje ρ_s i V predstavljaju gustoću, odnosno volumen konstrukcije. Slično kao jednadžba (19) može se pisati

$$\delta F^m = -g \iiint_V \rho_s (\delta \mathbf{H} \nabla) H_z dV, \quad (23)$$

odnosno uz primjenu modalne superpozicije:

$$\delta F_i^m = -\sum_{j=1}^N C_{ij}^m \xi_j \delta \xi_i, \quad C_{ij}^m = g \iiint_V \rho_s (\mathbf{h}_i \nabla) h_z^j dV. \quad (23)$$

C_{ij}^m su koeficijenti gravitacijskog dijela povratne krutosti. Potpuni koeficijenti povratne krutosti dobiju se sumiranjem njihovih konstitutivnih dijelova, $C_{ij} = C_{ij}^p + C_{ij}^{nh} + C_{ij}^m$.

2.4. Hidroelastični model

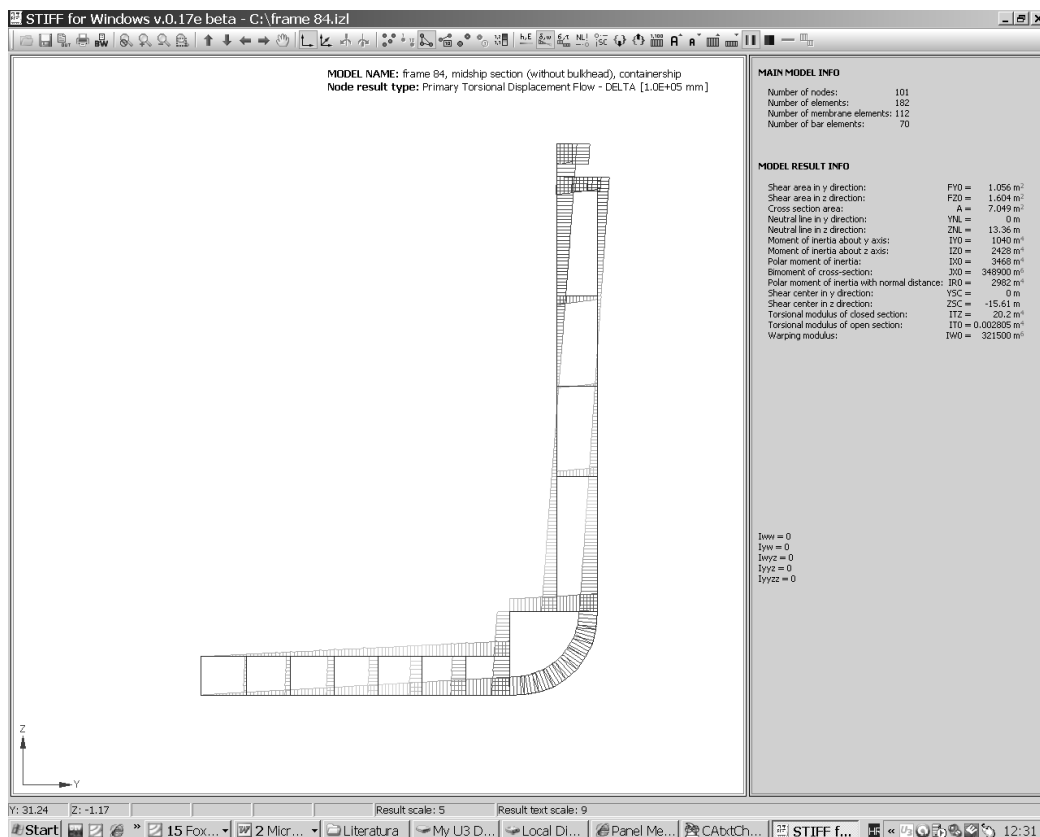
Nakon što su definirani strukturni, hidrodinamički i hidrostatički model, može se konstituirati hidroelastični model u frekventnoj domeni, koji je predstavljen jednadžbom

$$[\mathbf{k} + \mathbf{C} - i\omega(\mathbf{d} + \mathbf{B}(\omega)) - \omega^2(\mathbf{m} + \mathbf{A}(\omega))] \boldsymbol{\xi} = \mathbf{F}, \quad (24)$$

gdje su \mathbf{k} , \mathbf{d} i \mathbf{m} matrice krutosti, prigušenja i mase konstrukcije. \mathbf{C} je povratna krutost, dok su $\mathbf{B}(\omega)$, $\mathbf{A}(\omega)$ hidrodinamičko prigušenje i pridružena masa. $\boldsymbol{\xi}$ su modalne amplitude, \mathbf{F} je valna uzbuda, dok ω predstavlja susretnu frekvenciju.

3. Računalni programi

Geometrijske značajke presjeka brodskog trupa određuju se pomoću programa STIFF, koji se temelji na teoriji tankostijenih nosača [19], Slika 4. Moguće je odrediti površinu poprečnog presjeka, momente tromosti presjeka, smične površine, kao i module torzije, vitoperenja i smika, za zatvorene i otvorene poprečne presjeke. Također, mogu se odrediti i njihove efektivne vrijednosti za pretpostavljene sinusoidalne oblike deformacije.



Slika 4. Vitoperenje poprečnog presjeka, program STIFF

Fig. 4 Warping of ship cross-section, program STIFF

Za provedbu hidroelastične analize korišten je program DYANA koji kombinira teoriju tankostijenih nosača i metodu konačnih elemenata, uzimajući u obzir smicanje, savijanje, torziju i vitoperenje presjeka [20]. Hidrodinamički dio u programu DYANA preuzet je iz HYDROSTAR-a i prilagođen potrebama hidroelastične analize [21].

4. Hidroelastična analiza kontejnerskog broda

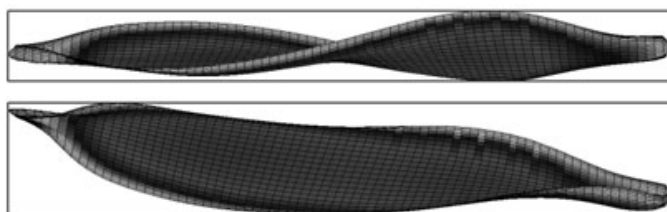
Provedena je analiza hidroelastičnog odziva velikog kontejnerskog broda nosivosti 7800 TEU i dimenzija $L_{pp} \times B \times H = 319,0 \times 42,8 \times 24,6$ m, Slika 5. Ekvivalentni modul torzije uslijed doprinosa poprečnih pregrada ukupnoj krutosti jednak je $I_t^* = 2,4I_t$.



Slika 5. Kontejnerski brod nosivosti 7800 TEU

Fig. 5 7800 TEU container ship

Valjanost grednog modela provjerena je koreliranjem prirodnih frekvencija i oblika vibriranja s rezultatima 3D MKE modalne analize za laki brod, provedene u komercijalnom paketu NASTRAN, Slike 6 i 7, pri čemu je postignuto dobro podudaranje, posebice za niže oblike vibriranja. Vrijednosti prirodnih frekvencija određene 1D i 3D MKE analizom su uspoređene u Tablici 1.

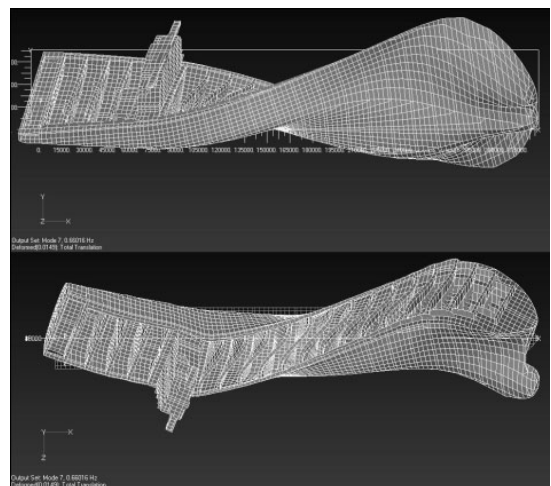


Slika 6. Prvi dominantno torzijski oblik, 1D model

Fig. 6 The first dominantly torsional mode, 1D model

Slika 7. Prvi dominantno torzijski oblik, 3D model

Fig. 7 The first dominantly torsional mode, 3D model

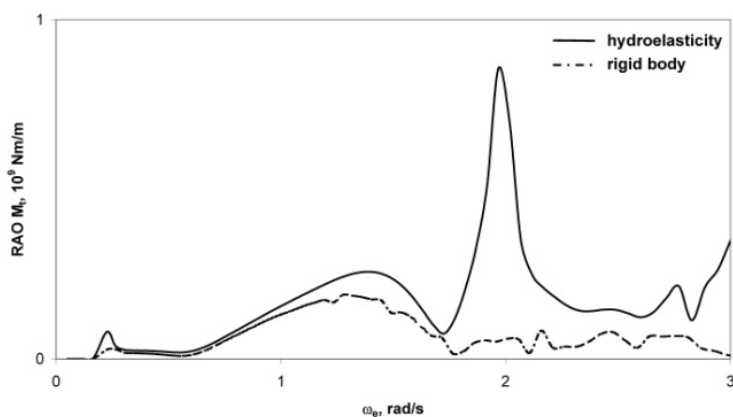


Tablica 1. Prirodne frekvencije vibriranja lakog broda, ω_i [rad/s]

Table 1 Lightship natural frequencies, ω_i [rad/s]

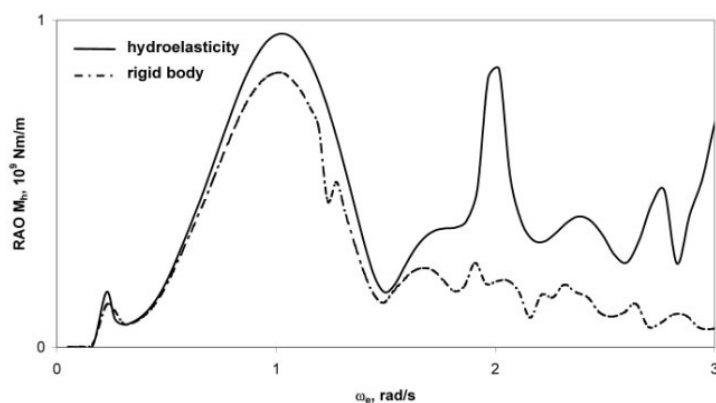
Oblik	Vertikalne vibracije		Horizontalne + torzijske vibracije		Oblik
	1D	3D	1D	3D	
1	7.35	7.33	4.17	4.15	1(H0 + T1)
2	15.00	14.95	7.34	7.40	2(H1 + T2)
3	24.04	22.99	12.22	12.09	3(H2 + T3)
4	35.08	34.21	15.02	16.22	4(H3 + T4)

Slike 8 i 9 prikazuju prijenosne funkcije momenta torzije i horizontalnog savijanja na sredini broda, koje su uspoređene s onima za kruti brod, dobivenim pomoću programa HYDROSTAR. U niskofrekventnom području, gdje se brod ponaša kao kruto tijelo, postignuto je dobro podudaranje, dok su veće razlike u rezonantnom području što je u skladu s očekivanjem.



Slika 8. Prijenosna funkcija momenta torzije, $\chi=120^\circ$, $U=25$ kn, $x=155.75$ m od A.P.

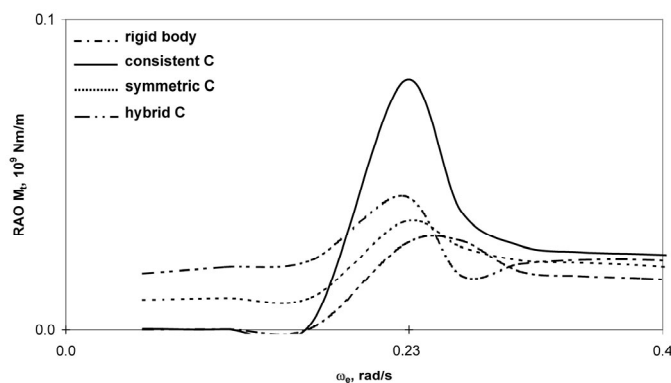
Fig. 8 Transfer function of torsional moment, $\chi=120^\circ$, $U=25$ kn, $x=155.75$ m from AP



Slika 9. Prijenosna funkcija horizontalnog momenta savijanja, $\chi=120^\circ$, $U=25$ kn, $x=155.75$ m od A.P.

Fig. 9 Transfer function of horizontal bending moment, $\chi=120^\circ$, $U=25$ kn, $x=155.75$ m from AP

Potrebno je istaknuti daje samo korištenjem konzistentne formulacije povratne krutosti moguće postići konvergenciju presječnih sila u nultu vrijednost s približavanjem valne frekvencije nuli, kao što pokazuje detaljan pogled prikazan na Slici 10.



Slika 10. Detaljan pogled na prijenosnu funkciju momenta torzije, $\chi=120^\circ$, $U=25$ kn, $x=155.75$ m od A.P.

Fig. 10 Zoomed transfer function of torsional moment, $\chi=120^\circ$, $U=25$ kn, $x=155.75$ m from AP

5. Zaključak

Veliki kontejnerski brodovi su na granici primjenjivosti pravila klasifikacijskih društava za njihovo pouzdano projektiranje, odnosno izvan granica primjenjivosti klasičnih teorija pomorstvenosti za pouzdano određivanje njihova odziva na valovima.

Rezultati analize pokazuju da je hidroelastični model koji je nastao kombiniranjem 1D MKE strukturnog i 3D BEM hidrodinamičkog modela učinkovit numerički alat za provedbu hidroelastičnih analiza brodskih konstrukcija. Prijenosne funkcije odziva u rezonantnom području pokazuju značajno više vrijednosti nego u slučaju odziva krutog broda, što naglašava važnost korištenja hidroelastičnih proračunskih modela. Opisani numerički alat osobito je pogodan za ranu fazu osnivanja, gdje dolaze do izražaja prednosti aproksimacije konstrukcije grednim modelom. Naime, umjesto dugotrajne izrade 3D MKE modela, dovoljno je za dvadesetak presjeka izračunati parametre krutosti, primjerice programom STIFF [19], i s njima provesti hidroelastičnu analizu kojom se pouzdanu određuju globalna opterećenja i odzivi. Budući da su hidroelastični proračunski modeli još uvijek u fazi razvoja, aproksimiranje konstrukcije grednim modelom nudi bolji uvid u vjerodostojnost opisa fizikalne pozadine problema. Kada je riječ o lokalnim odzivima, nužnim primjerice za određivanje koncentracije naprezanja, te detaljnim provjerama zadovoljavanja projektnih kriterija, potrebno je osloniti se na 3D MKE model.

Rezultate analize potrebno je dodatno provjeravati modelskim testovima i ispitivanjima u naravi, u svrhu poboljšanja pravila za gradnju broda, a sve u cilju povećanja sigurnosti broda i pomorskog prometa.

LITERATURA

- [1] S. Tomašević: Hidroelastični model dinamičkog odziva kontejnerskih brodova na valovima, Doktorska disertacija, FSB Zagreb, 2007.
- [2] RED Bishop, WG. Price: Hydroelasticity of Ships, Cambridge University Press, 1979.
- [3] I. Senjanović, Š. Malenica, S. Tomašević, S. Rudan: Methodology of ship hydroelastic investigation, Brodogradnja, 58 (2), 2007, 133-145.
- [4] I. Senjanović, S. Tomašević, M. Tomić, S. Rudan, N. Vladimir: Hydroelasticity of very large container ships, Design and Operation of Container Ships Conference, RINA, London, 2008, 51-70.
- [5] I. Senjanović, S. Tomašević, N. Vladimir, Š. Malenica: Numerical procedure for ship hydroelastic analysis, Third International Conference on Computational Methods in Marine Engineering, CIMNE, Barcelona, 2009, 259-264.

- [6] R. Pavazza: Torsion of thin-walled beams of open cross-sections with influence of shear, *International Journal of Mechanical Sciences*, 47, 2005, 1099-1122.
- [7] I. Senjanović, S. Tomašević, N. Vladimir: An advanced theory of thin-walled girders with application to ship vibrations, *Marine Structures*, 22 (3), 2009, 387-437.
- [8] I. Senjanović, S. Tomašević, S. Rudan, T. Senjanović: Role of transverse bulkheads in hull stiffness of large container ships, *Engineering Structures*, 30, 2008, 2492-2509.
- [9] R. Szilard: *Theories and Applications of Plate analysis*, John Wiley & Sons, New York, 2004.
- [10] K.J. Bathe: *Finite Element Procedures*, Prentice Hall, 1996.
- [11] Š. Malenica, B. Molin, F. Remy, I. Senjanović: Hydroelastic response of a barge to impulsive and non-impulsive wave load, *Hydroelasticity in Marine Technology*, Oxford, UK, 2003, 107-115.
- [12] WG. Price, Y. Wu: *Hydroelasticity of Marine Structures, Theoretical and Applied Mechanics*, F.I. Niordson and N. Olhoff, eds. Elsevier Science Publishers B.V., 1985, 311-337.
- [13] JN. Newman: Wave effects on deformable bodies, *Applied Ocean Research*, 16, 1994, 47-59.
- [14] HR. Riggs: Hydrostatic stiffness of flexible floating structure. *Proceedings of the International Workshop on Very large floating structures*, Hayama, Japan, 1996, 229-234.
- [15] LL. Huang, HR. Riggs: The hydrostatic stiffness of flexible floating structure for linear hydroelasticity, *Marine Structures*, 13, 2000, 91-106.
- [16] Š. Malenica: Some aspects of hydrostatic calculations in linear seakeeping, In: *Proceedings of the 14th NAV Conference*, Palermo, Italija, 2003.
- [17] I. Senjanović, M. Tomić, S. Tomašević: An explicit formulation for restoring stiffness and its performance in ship hydroelasticity. *Ocean Engineering*, 2008, 35, 1322-1338.
- [18] I. Senjanović, S. Tomašević, N. Vladimir, M. Tomić, Š. Malenica: Ship hydroelastic analysis with sophisticated beam model and consistent restoring stiffness, *International Conference on Hydroelasticity in Marine Technology*, Southampton, UK, 2009, 69-80.
- [19] STIFF, *Korisnički priručnik*, FSB Zagreb, 1990.
- [20] DYANA, *Korisnički priručnik*, FSB Zagreb, 2007.
- [21] HYDROSTAR, *User's manual*, Bureau Veritas, Pariz, 2006.