

Primljen / Received: 2.6.2021.

Ispravljen / Corrected: 1.6.2022.

Prihvaćen / Accepted: 31.7.2022.

Dostupno online / Available online: 10.11.2022.

Numeričko modeliranje plutajuće konstrukcije primjenom spregnute Euler-Lagrangeove formulacije

Autori:

Izv.prof.dr.sc. **Engin Gücüyen**, dipl.ing.građ.

Sveučilište Celal Bayar, Turska

Odjel za građevinarstvo

engin.gucuyen@cbu.edu.tr

Autor za korespondenciju

Izv.prof.dr.sc. **R. Tuğrul Erdem**, dipl.ing.građ.

Sveučilište Manisa Celal Bayar, Turska

Odjel za građevinarstvo

tugrul.erdem@cbu.edu.tr

Stručni rad

Engin Gücüyen, R. Tuğrul Erdem

Numeričko modeliranje plutajuće konstrukcije primjenom spregnute Euler-Lagrangeove formulacije

Plutajuće konstrukcije složeni su sustavi sastavljeni od platforme (pontona), priveznih elemenata i konopa. U ovom radu istražuje se ponašanje pontona koji se koristi kao plutajuća konstrukcija i četiri privezna elementa pod utjecajem različitih uvjeta opterećenja valovima. Kombinirana analiza se numerički provodi između kretanja pontona, konopa za privez i morskog okoliša. Konopi za privez modelirani su kao mrežni elementi, a ponton je modeliran kao kruto tijelo sa šest stupnjeva slobode kretanja. Stanje opterećenja valovima predstavljeno je pomoću dva različita valna spektra. Prvi se spektar (slučaj I) generira iz jednog sinusoidnog vala korištenjem Jonswapovog spektra, drugi (slučaj II) se generira iz superponiranog višesinusoidnog vala. Vremenski promjenjivo kretanje pontona i napetosti konopa za privez određeni su numeričkom analizom za slučaj I i slučaj II. Na temelju rezultata oba slučaja određene su kritične vrijednosti. U numeričkim rješenjima primijenjena je dvosmjerna analiza interakcije fluid-konstrukcija (FSI). U analizi se provodi potpuno nelinearna simulacija slobodne površine pomoću tehnike spregnute Euler-Lagrangeove formulacije. Uz to, numerički rezultati uspoređeni su s rezultatima dobivenim analitičkim rješavanjem kota slobodnih površina.

Ključne riječi:

plutajuća konstrukcija, interakcija fluida i konstrukcije, analiza konačnih elemenata, spregnuta Euler-Lagrangeova (CEL) formulacija

Professional paper

Engin Gücüyen, R. Tuğrul Erdem

Numerical modelling of floating structure with coupled Eulerian–Lagrangian technique

Floating structures are complex systems composed of superstructure, floating-mooring components, and anchors. In this study, the behaviours of a pontoon, which is used as a floating structure, and four mooring elements under different wave loading conditions were investigated. A numerical analysis of the coupled motions of the pontoon, mooring lines, and marine environment was performed. While the mooring lines were modelled as wire elements, the pontoon was modelled as a rigid body with six degrees of freedom. Wave loading conditions were represented using two different wave spectra. The first spectrum (Case I) was generated based on a single sinusoidal wave utilising the JONSWAP spectrum, whereas the second one (Case II) was generated based a superimposed multi-sinusoidal wave. Time-varying motions of the pontoon and tensions of the mooring lines were determined based on the numerical analyses for Cases I and II. Critical values were determined using the results of both cases. The numerical solutions were based on bidirectional fluid–structure interaction (FSI) analysis. A fully non-linear free surface simulation was performed using the coupled Eulerian–Lagrangian (CEL) technique. Furthermore, numerical results were compared with the results obtained from analytical solutions of free surface elevations.

Key words:

floating structure, fluid–structure interaction, finite elements analysis, coupled Eulerian–Lagrangian technique

1. Uvod

Izvanobalne konstrukcije služe kao slobodne plutajuće konstrukcije ili konstrukcije učvršćene za morsko dno. Za razliku od konstrukcija koje su usidrene za morsko dno, slobodne plutajuće konstrukcije nisu pod utjecajem dubine mora i utjecaja morskog dna. Ne sputavaju kretanje mora i ne utječu na morski okoliš. Osim tih pozitivnih svojstava, plutajuće konstrukcije se lako postavljaju i mogu se koristiti na različitim mjestima. Osim toga, ponašaju se fleksibilno, moguće ih je proširiti, vrijeme ugradnje je kratko i niži su troškovi gradnje, za razliku od usidrenih pontona postavljenih na velikim dubinama i sidrenih u mekom morskom tlu.

Plutajuće konstrukcije često se primjenjuju jer se mogu koristiti na bilo kojoj dubini. Obično se sastoje od pontona, plovaka na koje se postavlja ponton, priveza za plutače (ili za obalu) i sidara. Ponton može biti rešetkasti sustav, jednopilotni ili drugi tip konstrukcije ovisno o namjeni. Stabilnost gornjeg ustroja pontona može se osigurati na tri različita načina; bez upotrebe plutača (samo uz upotrebu konopa) te pomoću balasta i pontona. Pontoni mogu biti potpuno ili polovično uronjeni u vodu. U ova oba slučaja pontoni se mogu koristiti kao mobilne plutajuće platforme [1], lukobrani [2, 3], generatori energije valova [4, 5], plutajući mrežni kaveži za uzgoj ribe [6], mostovi [7] i morske površinske barijere [8], sletišta, prostor za zabavu i pristanište. Nepovoljni uvjeti primjene pontona objašnjeni su u [9, 10]. Pontoni imaju široku površinu i malu debljinu. Dakle, mogu biti izloženi ljuljanju i naginjanju pod utjecajem sile valova. Osim toga, mogu se pojaviti lomovi konstrukcije zbog pomaka gore - dolje tijekom jakih oluja [11].

Plutajući pontoni složene su konstrukcije na vodenoj površini na koje utječu različite vrste opterećenja. Glavno opterećenje koje utječe na plutajuće konstrukcije na moru jest sila valova. U modeliranju ponašanja valnih opterećenja koriste se pravilni i nepravilni valovi. U studiji Lima i Kima [12] modelirano je ponašanje pontona s konopima pod utjecajem nepravilnih valova. Za istraživanje nepravilnog vala primjenjuju se dvije metode; ekstremna amplituda odgovora i najvjerojatniji profil ekstremnog odgovora. Cheng i sur. [13] eksperimentalno su i numerički proučavali hidroelastično ponašanje velike konstrukcije pontonskog tipa prema parametrima poroznosti i dubine uronjenosti plutajuće konstrukcije. U numeričkom modelu primjenjuje se FSI tehnika (interakcija fluida i konstrukcije). U modelu konstrukcije primjenjuje se metoda konačnih elemenata, a metoda graničnih elemenata primjenjuje se u modelu vala za nepravilne valove. Trubac i sur. [14] su eksperimentalno i numerički istraživali val, uzdizanje i nagib te napetost priveza plutajuće konstrukcije na moru. Iako se u istraživanjima razmatraju pravilni valovi, u numeričkoj analizi ispituju se nepravilni valovi. Nepravilni valovi se tretiraju kao superpozicija pravilnih valova. Jin i sur. [15] proveli su istraživanje u kojem se zajedno ispituju pravilni i nepravilni valovi. Hidroelastičnom analizom generirana je analiza plutajuće konstrukcije prema modelima pravilnih i

nepravilnih valova te je na kraju dobiveno ponašanje pontona. Na sličan su način Howe i suradnici [16] ispitivali potpuno spregnutu dinamiku priveza i plutajuće konstrukcije simuliranu pod utjecajem pravilnih valova koji su generirani iz nepravilnih valova.

Plutajuće konstrukcije mogu se koristiti na bilo kojoj dubini zahvaljujući konopima za privez. Međutim, oni mogu puknuti. Zbog toga treba uzeti u obzir njihova svojstva. U literaturi se spominju različiti sustavi priveza kao što su sustav za privez na lančanoj mreži, napeti, poluzategnuti i hibridni sustav priveza s plutačama i konopima. Yuan i suradnici [17] istraživali su reakcije gibanja poluuronjene platforme usidrene hibridnim sustavom privezivanja, a rezultati su uspoređeni sa sustavom napetog priveza. Chung i suradnici [18] koristili su lančane priveze u analizi simulacije ponašanja spojenog sustava ponton-privez-konop primjenom softvera Abaqus. Qiao i suradnici [19] modelirali su labavo zategnuti sustav priveza kako bi istražili odziv pomicanja konopa uslijed hidrodinamičkog opterećenja primjenom softvera za analizu konačnih elemenata.

Na gibanja plutajućih elemenata može utjecati sustav privezivanja, pa je potrebno provesti spregnutu analizu gibanja plutajućih elemenata i sila priveza. Wiegard i suradnici [20] proveli su analizu interakcije plutača i konopa za privez. Kretanje tih elemenata je numerički modelirano. Dobivene su vrijednosti pomaka i naprezanja gornjeg dijela plutajuće konstrukcije. Chen i suradnici [21] proveli su analizu interakcije plutajuće konstrukcije pontonskog tipa s konopima za privez prema stupnjevima slobode. Dobivene su vremenski promjenjive vrijednosti sile na konopima za privez i smjer kretanja pontona. Ji i sur. [22] su eksperimentalno i numerički modelirali plutajući tip lukobrana i privezišta. Pokreti ljuljanja i uzdizanja lukobrana dobiveni su uslijed djelovanja različitih valova pomoću spregnute Euler-Lagrangeove formulacije.

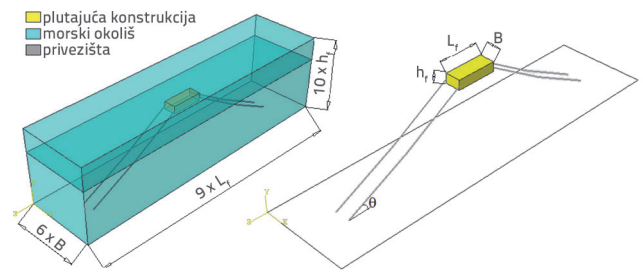
FSI analiza (analiza interakcije fluid-konstrukcija) primjenjuje se za određivanje dinamičkog ponašanja izvanobalnih konstrukcija. Analiza je jednosmjerna kada se prijenos sile odvija samo s fluida na konstrukciju. Međutim, dvosmjerna analiza je kada se sila prenosi s fluida, a pomak se prenosi s konstrukcije. Za obje analize primjenjuje se metoda konačnih elemenata. FSI analiza, uz analizu konačnih elemenata može se generirati ili Eulerovom [23] ili Langrangeovom tehnikom [24]. S druge strane, obje se tehnike također mogu primijeniti u proizvoljnoj Langrange Eulerovoj (eng. *Arbitrary Lagrange Eulerian* - ALE) formulaciji [25, 26] ili spregnutoj Euler-Lagrangeovoj (CEL) formulaciji [27]. Program konačnih elemenata Abaqus često se primjenjuje u modeliranju interakcija [28]. U ALE i CEL analizama, konstrukcija i fluid modelirani su Lagrangeovim i Eulerovim formulacijama. Prema tome, nije potrebno definirati površinu interakcije i koristiti kosimulaciju kada se Lagrangeove i Eulerove formulacije primjenjuju zajedno. Osim toga, velika izobličenja konstrukcijskih elemenata koja se javljaju u proizvoljnoj Lagrange Eulerovoj - ALE formulaciji mogu dovesti do nerealnih rezultata, pa čak i do pada simulacije

koja je u tijeku [29]. Spregnuta Euler-Lagrangeova (CEL) formulacija koja je implementirana u softver Abaqus i u kojoj je primijenjena eksplicitna shema vremenske integracije jest metoda konačnih elemenata velikih deformacija koja rješava nedostatke zasebnih Lagrangeovih i Eulerovih tehnika [30]. Spregnuta Euler-Lagrangeova (CEL) formulacija sastoji se od Eulerove mreže koja simbolizira volumen gdje Eulerov materijal teče i ulazi u interakciju s Lagrangeovim dijelom. Gibanje fluida u CEL-u definirano je primjenom tradicionalne Eulerove formulacije gdje je numerička mreža fiksirana u prostoru, a tekućina teče kroz rešetku. Međutim, plutajuća konstrukcija definirana je primjenom tradicionalnog Lagrangeovog opisa gibanja i diskretizirana pomoću Lagrangeove metode, a u tom se slučaju numeričke mreže pomiču i deformiraju s materijalom [31].

U literaturi je vidljivo to da se modeliranje dinamičkog ponašanja pontonskih izvanobalnih konstrukcija generira analitičkim [32], numeričkim [33, 34] i eksperimentalnim [35] postupcima. Cilj ovog istraživanja jest numerički istražiti dinamično ponašanje plutajuće konstrukcije (pontona) i priveza u različitim uvjetima opterećenja valovima. Softver Abaqus primjenjuje spregnutu Euler-Lagrangeovu (CEL) formulaciju u numeričkoj analizi. Konstrukcija se modelira Lagrangeovim postupkom, a morski okoliš Eulerovim postupkom. Pokreti ljuljanja, uzdizanja i nagiba konstrukcije i napetost privezišta dobiveni su na temelju različitih uvjeta opterećenja valovima. Stoga je istraženo djelovanje takvih uvjeta na plutajuću konstrukciju i pokazano je to da projektiranje plutajuće konstrukcije isključivo numeričkim modeliranjem daje kritičnije rezultate. Osim toga, za takvu vrstu plutajuće konstrukcije otkrivene su prednosti primjene spregnute Euler-Lagrangeove (CEL) formulacije u odnosu na Lagrangeovu formulaciju s obzirom na broj točki i koraka rješenja.

2. Modeli konstrukcije i okoliša

U ovom se istraživanju ispituje trodimenzionalna usidrena plutajuća konstrukcija i tanki konopi za privez u kombinaciji s morskim okolišem. Spojeni sustav prikazan je na slici 1. Sustav priveza sastoji se od četiri konopa. Gornji krajevi konopa pričvršćeni su za konstrukciju, a drugi krajevi konopa za morsko dno. Dimenzija baze (dna) numeričkog modela je 18 x 72 metra, a visina je 20 metara. Širina modela konačnih elemenata šest je puta veća od širine pontona (6 x B), a duljina modela je devet puta veća od duljine pontona (9 x L_p). Visina modela je deset puta veća od visine pontona (10 x h_p).



Slika 1. Dimenzije spregnutog modela

2.1. Model konstrukcije

Numerička analiza plutajućeg pontona provedena je kako bi se odredila gibanja modela pontona i napetosti lanaca sidara pri različitim uvjetima opterećenja valovima. Ponton i morski okoliš prikazani su na lijevom dijelu, a shematski prikaz konstrukcije s geometrijskim parametrima na desnom dijelu slike 1. Geometrijska svojstva su visina, širina i duljina pontona, gaz konstrukcije i maksimalna labavost konstrukcije koju simboliziraju oznake h_p , B, L_p , h_d i s. S druge strane, svojstva konopa za privez su nagnuti kut (θ), duljina konopa za privez (l), polumjer kružnog poprečnog presjeka (r) i omjer labavosti i zategnutosti (s/l). Vrijednosti koje se primjenjuju u istraživanju prikazane su u tablici 1.

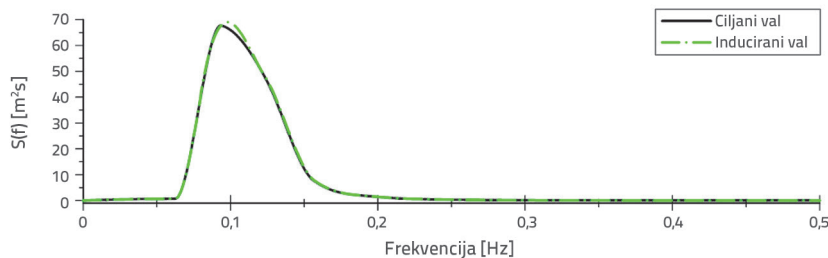
Youngov modul konopa za privez iznosi $2,1 \times 10^{11}$ N/m², gustoća je 8×10^3 kg/m³, Poissonov koeficijent 0,3, a prosječna gustoća plutajućeg pontona je 500 kg/m³. Inercija uvrtnja konopa je 26×10^3 kgm², inercija skretanja 146×10^3 kgm², a inercija nagiba je 136×10^3 kgm². Tijekom analize uzeti su u obzir učinci tromosti pri potpuno uronjenim konopima za privez.

2.2. Model morskog okoliša

Morsko okruženje u kojem se nalazi plutajuća konstrukcija modelirano je primjenom parametara vala [36]; visina vala (H) iznosi 2,54 m, a period vala (T) 7,54 s, pri dubini vode (d) od 18 m. Procjena vala na točki pontona simulirana je na dva različita načina uključujući ciljane (slučaj I) i inducirane (slučaj II) valove. Procjena ciljanog vala generirana je JONSWAP spektrom valova iz ciljanih vrijednosti H = 2,5 m i T = 7,54 s. Procjena induciranih valova mjeri se na točki pontona valovima koji su izvedeni iz ciljanog spektra valova na numerički model. Inducirani valni spektar generira se metodom brze Fourierove transformacije (FFT) iz procjene induciranih valova. Dakle, na ponton djeluju dvije različite vrste valova. Spektralna gustoća snage JONSWAP valnog spektra dana je sljedećom jednadžbom:

Tablica 1. Geometrijska svojstva plutajuće konstrukcije i konopa za privez

Svojstva plutajuće konstrukcije				Svojstva konopa za privez			
h_p [m]	B [m]	L_p [m]	h_d [m]	l [m]	θ [°]	s/l	r [m]
2	3	8	0,80	28	30	50	0,05



Slika 2. Spektar ciljanih i induciranih valova

$$S_{(f)} = \frac{H_s^2}{4\pi T_z^4 f^5} \exp\left(\frac{1}{\pi T_z^4 f^4}\right) \gamma \exp\left[\frac{(f-f_p)^2}{2\sigma^2 b^2}\right] \quad (1)$$

Spektar ciljanog vala generiran je jednadžbom (1). U toj jednadžbi, H_s je značajna valna visina, T_z je period prelaska nule, f je frekvencija, γ je faktor pojačanja vrha, f_p je vršna frekvencija, σ je širina vrha spektra. U istraživanju [37] dobivene su vrijednosti $\gamma = 1,09$, $f_p = 0,096 \text{ s}^{-1}$ i $\sigma = 0,09$ kada je $H_s = 2,54 \text{ m}$ i $T_z = 7,54 \text{ s}$. Spektar ciljnog vala prikazan je na slici 2.

Višesinusoidni valovi mogu se dobiti primjenom ciljanog spektra valova. Vrijednosti visine (H) i perioda (T) svakog pojedinačnog pravilnog vala izračunane su izrazima (2) i (3) prema vrijednostima gustoće spektra snage i frekvencije (f). Visina vala na frekvenciji dobiva se na sljedeći način:

$$H(f) = 2\sqrt{2E(f)\Delta f} \quad (2)$$

$$T = 1 / f \quad (3)$$

Vrijednosti visine i perioda nasumično odabranih 20 pravilnih valova između 256 valova dane su u tablici 2. Dakle, procjena ciljanog vala (slučaj I) dobivena je superpozicijom svakog od 256 sinusnih valova.

Procjena ciljanog vala dobiva se jednadžbom (4), primjenom visine (H), periode (T) i duljine (L) svakog sinusnog vala. Jednadžba koja

opisuje slobodnu površinu kao funkciju vremena t i horizontalne udaljenosti z za jednostavni sinusoidni val dana je u nastavku:

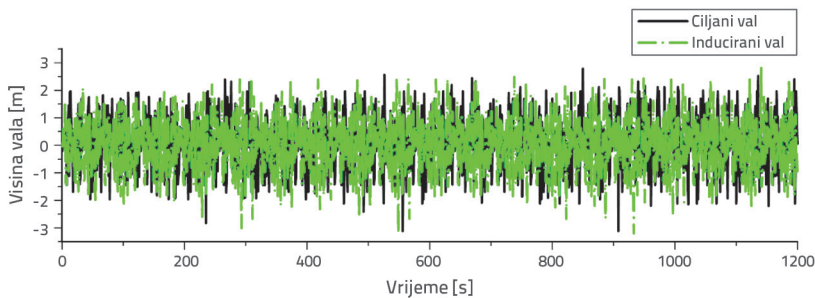
$$\eta = \frac{H}{2} \cos\left(\frac{2\pi z}{L} - \frac{2\pi t}{T}\right) \quad (4)$$

Uzvišenje slobodne površine inducirano vala postiže se podizanjem 256 valova u numeričkoj domeni jer spregnuta Euler-Lagrangeova (CEL) formulacija sprječava dobivanje uzvišenja slobodne površine vala u Eulerovoj formulaciji. Visina se procjenjuje na točki pontona, na Eulerovom dijelu bez plutajuće konstrukcije. Iako svaki od sinusnih valova ima različite periode i visine (zbog različitih teorija valova), oni se također mogu modelirati uzimajući u obzir Airyjevu teoriju valova koju je predložio Chakrabarti [38].

Spektralna gustoća snage $S(f)$ inducirano vala dobiva se izravno iz kontinuiranih vremenskih serija uzvišenja vala $\eta(t)$ primjenom Fourierove analize kao što je prikazano na slici 3. Metoda FFT usvojena je u Fourierovoj analizi putem alata za obradu signala u programu Matlab [39]. Spektralna gustoća snage inducirano vala izračunana je izrazom (5):

$$S(f) = \frac{1}{T_r} \left[\sum_{n=0}^N \eta(n\Delta t) e^{2\pi i f n \Delta t} \Delta t \right] \quad (5)$$

Duljina zapisa je predstavljena oznakom T_r , a interval uzorkovanja simboliziran je Δt . Dosljednost između inducirano vala i ciljanog vala vidi se na slikama 2. i 3. Određivanjem geometrijskih i fizičkih svojstava konstrukcije i njezine okoline



Slika 3. Procjena ciljanih i induciranih valova

Tablica 2. Visine i periodi valova

Broj	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Visina vala [m]	0,32	0,37	0,42	0,52	0,39	0,35	0,32	0,48	0,59	0,82
Period vala [s]	32,00	16,00	12,80	11,64	10,66	8,53	8,00	7,53	6,39	6,09
Broj	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Visina vala [m]	1,22	1,55	1,38	1,24	1,06	1,02	0,76	0,59	0,35	0,27
Period vala [s]	5,56	5,33	4,92	4,57	4,00	3,55	3,20	2,90	2,28	2,00

dobiva se konstrukcija u Lagrangeovom modelu i morski okoliš u spregnutom Euler-Lagrangeovom (CEL) modelu, koji čine Eulerov model.

3. Analiza interakcije fluida i konstrukcije (FSI)

Analiza interakcije fluida i konstrukcije (*fluid-structure interaction* - FSI) usidrene plutajuće konstrukcije (pontona) na moru provodi se primjenom softvera za analizu konačnih elemenata Abaqus [28]. Lagrangeov i Eulerov postupak se prati kroz spregnutu Euler-Lagrangeovu (CEL) tehniku u numeričkoj analizi. Matematička definicija te tehnike prikazana je u sljedećim potpoglavljima.

3.1. Matematička definicija spregnute Euler-Lagrangeove (CEL) tehnike

Formulacija spregnute Euler-Lagrangeove (CEL) tehnike koja se primjenjuje u programu Abaqus opisana je jednadžbama navedenima u nastavku. Izrazi (6) do (8) su Lagrangeove jednadžbe očuvanja mase, impulsa i energije.

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (6)$$

$$\rho \frac{D\mathbf{v}}{Dt} = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \rho \mathbf{b} \quad (7)$$

$$\frac{De}{Dt} = \boldsymbol{\sigma} : \mathbf{D} \quad (8)$$

U jednadžbama (6-8), brzina, gustoća, Cauchyjevo naprezanje, sila teža i unutarnja energija materijala po jedinici volumena predstavljeni su oznakama \mathbf{v} , ρ , $\boldsymbol{\sigma}$, \mathbf{b} i e .

$$\frac{D\varphi}{Dt} = \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot (\nabla \varphi) \quad (9)$$

Primjenom izraza (9), vladajuće jednadžbe za Lagrangeovu tehniku određene su u općem obliku očuvanja za Eulerov postupak:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \nabla \cdot \Phi = S \quad (10)$$

Oznaka j je varijabla proizvoljnog rješenja, Φ je funkcija toka, a S je izvorni član u jednadžbi (10). Jednadžba se može napisati kao dva odvojene izraza:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = S \quad (11)$$

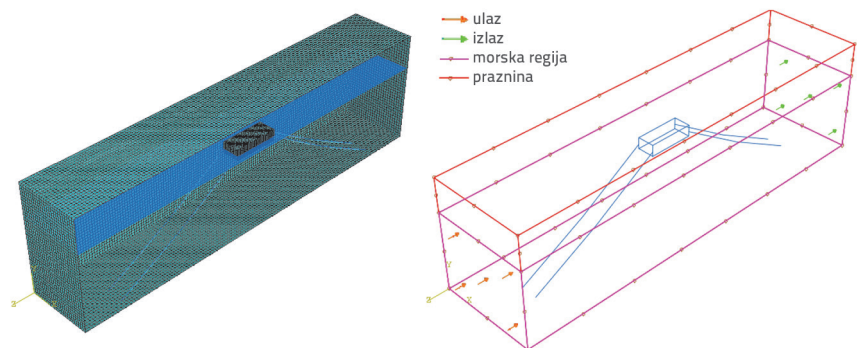
$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \nabla \cdot \Phi = 0 \quad (12)$$

Dakle, izraz (11) je ista, sa standardnom Lagrangeovom formulacijom u slučaju da se prostorna vremenska derivacija promijeni materijalnom vremenskom derivacijom na fiksnoj mreži. Izraz (11) je stoga ista sa standardnom Lagrangeovom formulacijom u slučaju da se prostorna vremenska derivacija promijeni materijalnom vremenskom derivacijom na fiksnoj mreži. Deformirana mreža se prenosi na originalnu fiksnu mrežu. Nakon toga se izračunava volumen materijala koji se prenosi između susjednih elemenata kako bi se riješio izraz (12). Varijable Lagrangeove formulacije kao zamah, masa, naprezanje i energija itd. zatim se raspoređuju na način da opisuju protok materijala između susjednih elemenata prema transportnim algoritmima.

3.2. Primjena spregnute Euler-Lagrangeove (CEL) formulacije na modelu

Model konačnog elementa pontona i morskog okoliša prikazan je na slici 4. Morski okoliš (Eulerov dio modela) i kompozitna konstrukcija (Lagrangeov dio modela) vidljivi su na desnom dijelu slike. Eulerov dio modela sastoji se od praznih dijelova sa i bez pridruženog materijala kao što se može vidjeti na slici 4. Primjena spregnute Euler-Lagrangeove (CEL) tehnike prikladna je za razne materijale (s uključenim šupljinama) u pojedinačnom elementu. Materijal koji teče duž mreže prati Eulerov volumenski udio (engl. *Eulerian Volume Fractions* - EVF) koji simbolizira omjer jer je materijal ispunjen Eulerovim elementima. Ako materijal u potpunosti ispunjava element, EVF je jednak 1; ako u elementu nema materijala, EVF se smatra 0.

Nakon generiranja Eulerovih i Lagrangeovih dijelova modela u softveru, dodjeljuju im se svojstva. Materijalna svojstva Lagrangeova dijela modela prikazana su u potpoglavljju 2.1. Morski okoliš modeliran je kao EOS materijal, brzine zvuka u slanoj vodi $c_0 = 1560$ m/s, gustoće $\rho_0 = 1025$ kg/m³ i dinamičke viskoznosti $\mu = 0,0015$ Ns/m². Dubina šupljine iznosi 2 m, a dubina mora d je 18 m. Slučaj opterećenja i rubni uvjeti definiraju se u sljedećem koraku numeričke analize. Smjer toka koji



Slika 4. Struktura mreže i shematski prikaz modela

pripada Eulerovom dijelu modela prikazan je na slici 4. Ciljano uzvišenje vala definirano je za slučaj I, a uzvišenje induciranog vala definirano je za slučaj II.

Rubni uvjet izlaza naveden je na suprotnoj strani pontona, a rub morskog okoliša postavljen je na rubni uvjet zida pontona gdje su sve komponente brzine jednake nuli. Rubni uvjet dalekog polja dodijeljen je bočnim zidovima pontona gdje se pretpostavlja da je brzina jednaka ulaznoj brzini. Granice dalekog polja su prenosive na način da protok nije pod utjecajem pontona na tim granicama.

3.2.1. Oblikovanje mreže

Broj čvorova i elemenata mijenja se zbog veličine točke. Provedeno je nekoliko pokusa kako bi se odredila najprikladnija veličina točke pomoću vrijednosti prirodne frekvencije u softveru primjenom Lanczosovog postupka. Od pojave modela konačnih elemenata, problem svojstvenih vrijednosti konstrukcije privukao je veliko zanimanje istraživača. Lanczosova metoda smatra se značajnim postupkom za problem svojstvenih vrijednosti. U softver su implementirani Lanczosova metoda i Q-R algoritam za reducirani svojstveni problem. Lanczosov postupak u softveru proizlazi iz skupine Lanczosovih "pokretanja", u svakom od kojih se generira skupina iteracija koje se nazivaju koraci. Za svako Lanczosovo pokretanje, koje prati spektralna transformacija, izraz (13) koristi se u izrazu (14) u kojoj oznake k i m označavaju matrice krutosti i mase. Osim toga, l predstavlja kvadrat prirodne frekvencije, σ je pomak, θ simbolizira svojstvenu vrijednost, a ξ je svojstveni vektor [30]. Ta transformacija dopušta brzu konvergenciju do željenih svojstvenih vrijednosti. Istraživači koriste Lanczosov postupak za slične svrhe [27, 40].

$$[m]([k] - \sigma[m])^{-1}[m]\{\xi\} = \theta[m]\{\xi\} \tag{13}$$

$$(-\lambda[m] + [k])\{\xi\} = 0 \tag{14}$$

Kao što se vidi na slici 4., u fazi modeliranja primjenjuju se trodimenzionalna linearna opeka s 8 čvorova, heksaedarski tip elementa (C3D8R) i linearni linijski elementi tipa B31 koji su prikladni za spregnutu Euler-Lagrangeovu (CEL) formulaciju. Prirodne frekvencije vrijednosti ljuljanja različitog broja čvorova i elemenata prikazane su u tablici 3.

Tablica 3. Rezultati osjetljivosti veličine mreže

Veličina točke [m]	Broj čvora	Broj elementa		Prirodna frekvencija [rad/s]	Promjena između redaka [%]
		Konopi za privez	Plutajuća konstrukcija		
0,15	16624	748	13780	0,550	17,02
0,10	53851	1120	48000	0,470	14,91
0,075	125480	1496	115560	0,409	3,28
0,05	404901	2240	384000	0,396	1,02
0,025	3150605	4484	3072000	0,392	

Nakon analize osjetljivosti, različite vrijednosti broja čvorova i elemenata prikazane su u tablici 3. Kada se vrijednost veličine točke smanji s 0,075 na 0,025, razlika između vrijednosti prirodne frekvencije iznosi 4,33 %. Zbog toga veličina točke iznosi 0,075 m na kraju za Lagrangeov dio modela. Dakle, primijenjeno je 125480 čvorova i ukupno 117056 elemenata. Među tim elementima, B31 tip 1496 pripada privezu, a C3D8R tip 115560 pripada pontonu. S druge strane, u morskome okruženju koristi se 1708857 čvorova i 1658880 elemenata tipa EC3D8R s veličinama točki od 0,075 m i 0,25 m. Veličina točke je 0,075 m u kontaktnim točkama pontona i mora, a 0,25 m u ostatku modela morskog okoliša.

3.2.2. Metoda rješavanja

Spregnuta Euler-Lagrangeova (CEL) tehnika često se primjenjuje u rješavanju problema interakcije fluida i konstrukcije s velikim deformacijama. Eulerova analiza je učinkovita za ekstremne deformacije modela i protok fluida. U takvim primjenama, tradicionalni Lagrangeovi elementi postaju jako izobličeni i gube preciznost. Eulerov-Lagrangeov postupak omogućuje kombiniranje Eulerovih materijala s tradicionalnom nelinearnom Lagrangeovom analizom. Kontakti između dviju domena diskretizirani su primjenom općeg algoritma kontakta temeljenog na penalty metodi kontakta. Eksplicitna analiza u kojoj se vrijednosti prenose na tekućinu spregnutom Euler-Lagrangeovom tehnikom koristi se za određivanje vrijednosti pomaka, pomoću izraza (15):

$$m^{NJ} \ddot{Z}^N |_t = (F^J - I^J) |_t \tag{15}$$

U tom izrazu, m^{NJ} je matrica mase, \ddot{Z} predstavlja ubrzanje, t označava vrijeme, F^J simbolizira vanjski primijenjeni vektor opterećenja prenesen iz protoka tekućine, a I^J je vektor unutarnje sile koji nastaje zbog naprezanja u elementima. Analiza konačnih elemenata provodi se s vremenskim intervalom od 0,01 s (Δt) tijekom 600 sekundi. Jednadžbe gibanja modela integrirane su jednadžbama koje su prikazane u nastavku:

$$\dot{Z}^N_{(i+\frac{1}{2})} = \dot{Z}^N_{(i-\frac{1}{2})} + \frac{\Delta t_{(i+1)} + \Delta t_{(i)}}{2} \ddot{Z}^N_i \tag{16}$$

$$Z_{(i+1)}^N = Z_{(i)}^N + \Delta t_{(i+1)} \dot{Z}_{(i+\frac{1}{2})}^N \quad (17)$$

$$\dot{Z}_{(i)}^N = (m^{NJ})^{-1} (F_i^J - I_i^J) \quad (18)$$

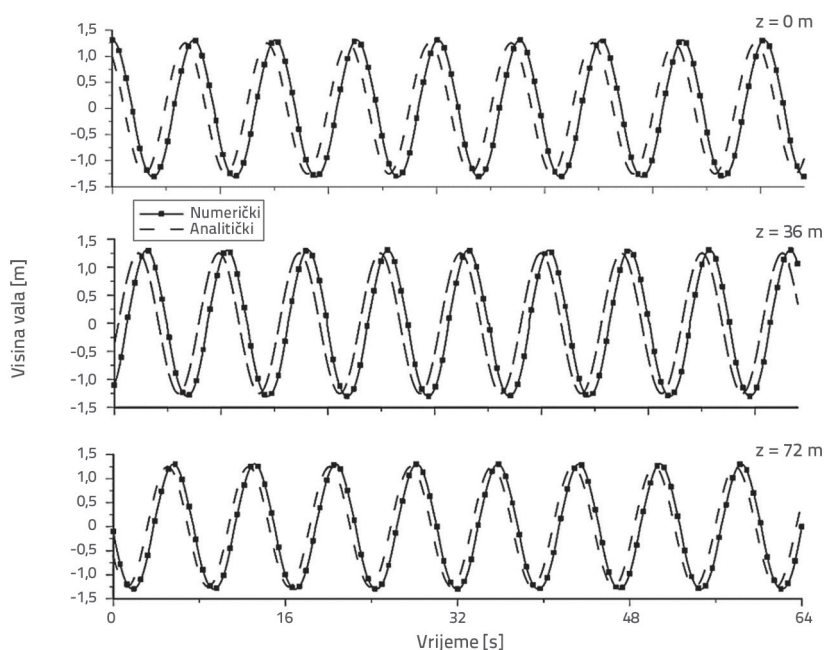
gdje su Z^N , \dot{Z}^N i \ddot{Z}^N stupnjevi slobode, a N je komponenta pomaka, brzine i ubrzanja. Vrijednosti brzine i pomaka mogu se dobiti nakon određivanja ubrzanja. Validacija numeričkog modela provjerava se pomoću kota slobodnih površina. Budući da spregnuta Euler-Lagrangeova (CEL) tehnika sprječava dobivanje uzvišenja slobodne površine Eulerovog dijela modela, taj rezultat analize uspoređuje se s analitičkim rezultatima izraza (4).

4. Rezultati

Najprije je izračunano uzvišenje vala ($H = 2,54$, $T = 7,54$ s) i uspoređeno s analitičkim rezultatima, kao što je prikazano na slici 5.

Ulazna točka modela za poziciju $z = 0$, uzvišenje vala koje je izračunano analitičkim putem oscilira između raspona od $-1,25$ m do $+1,25$ m. Numeričke vrijednosti za istu poziciju kreću se između $-1,34$ m i $+1,35$ m. S druge strane, kota pozicije $z = 36$ m analitički varira između $-1,25$ m i $+1,25$ m, a kota za istu poziciju se mijenja između $-1,31$ m i $+1,32$ m. Za izlaznu točku modela, poziciju $z = 72$ m, analitičke vrijednosti osciliraju između istih vrijednosti drugih pozicija. Međutim, brojčane vrijednosti su između $-1,33$ m

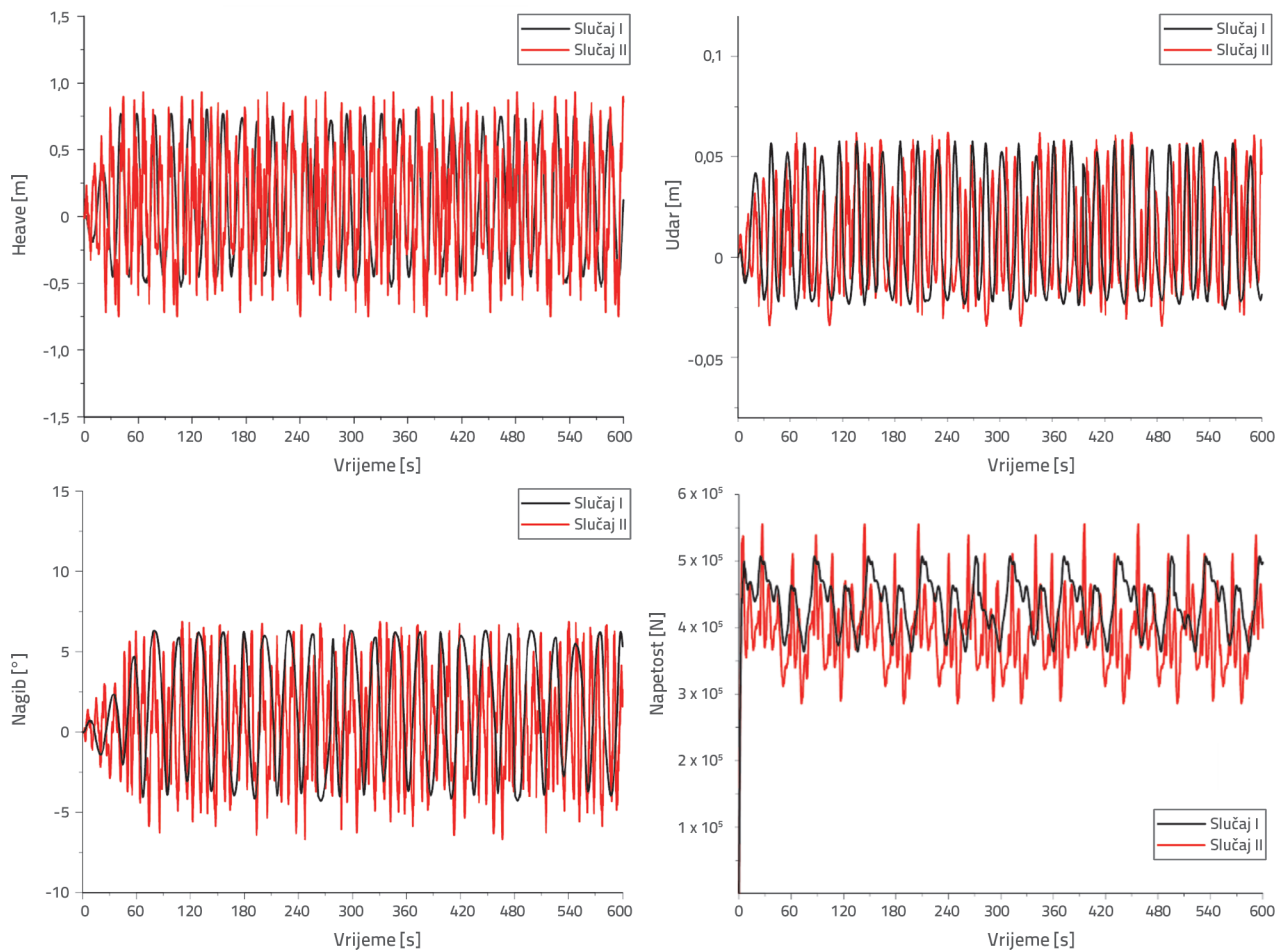
i $+1,33$ za ovu poziciju. Najveća razlika javlja se kao postotak između numeričkih i analitičkih rezultata na poziciji $z = 0$. Pokreti uzdizanja valova i nagiba konstrukcije te maksimalna napetost konopa za privez dobiveni su usporedno za slučaj I i slučaj II, a prikazani su na slici 6. Pomicanje modela u vertikalnom smjeru je veće zbog fluktuacija nagiba vala i sile okomitog vala. Val djeluje aksijalno na ponton. Bočno kretanje u ovom smjeru je ograničeno zbog konopa za privez. Budući da val ne utječe na ponton pod kutom, translacijsko kretanje u smjeru x može se zanemariti. Gibanje pod kutom opaža se u podizanju pontona kroz smjer vala. Budući da val ne utječe na ponton pod kutom, a simetrični privezi se koriste na četiri kraja pontona, kretanje pontona pod kutom se ne uzima u obzir u drugim smjerovima. Statističke vrijednosti uzdizanja valova, progiba i napetosti priveznih konopa prikazane su u tablici 4.



Slika 5. Uzvišenja vala

Tablica 4. Statističke vrijednosti gibanja pontona

Vrijednosti \ Svojstva	Uzdizanje [m]		Spuštanje [m]		Nagib [°]		Naprezanje [N]	
	Slučaj I	Slučaj II	Slučaj I	Slučaj II	Slučaj I	Slučaj II	Slučaj I	Slučaj II
Minimum	-0,53	-0,56	-0,026	-0,029	-4,36	-5,02	$3,69 \times 10^5$	4,04
Maksimum	+0,82	0,88	0,058	0,062	6,30	6,81	$5,13 \times 10^5$	5,59
Srednja vrijednost	0,116	0,123	0,013	0,016	1,490	1,607	$4,37 \times 10^5$	4,76
Standardna devijacija	0,427	0,454	0,027	0,030	3,50	3,762	$4,63 \times 10^4$	5,04



Slika 6. Povijest gibanja konstrukcije i maksimalne napetosti priveza tijekom vremena

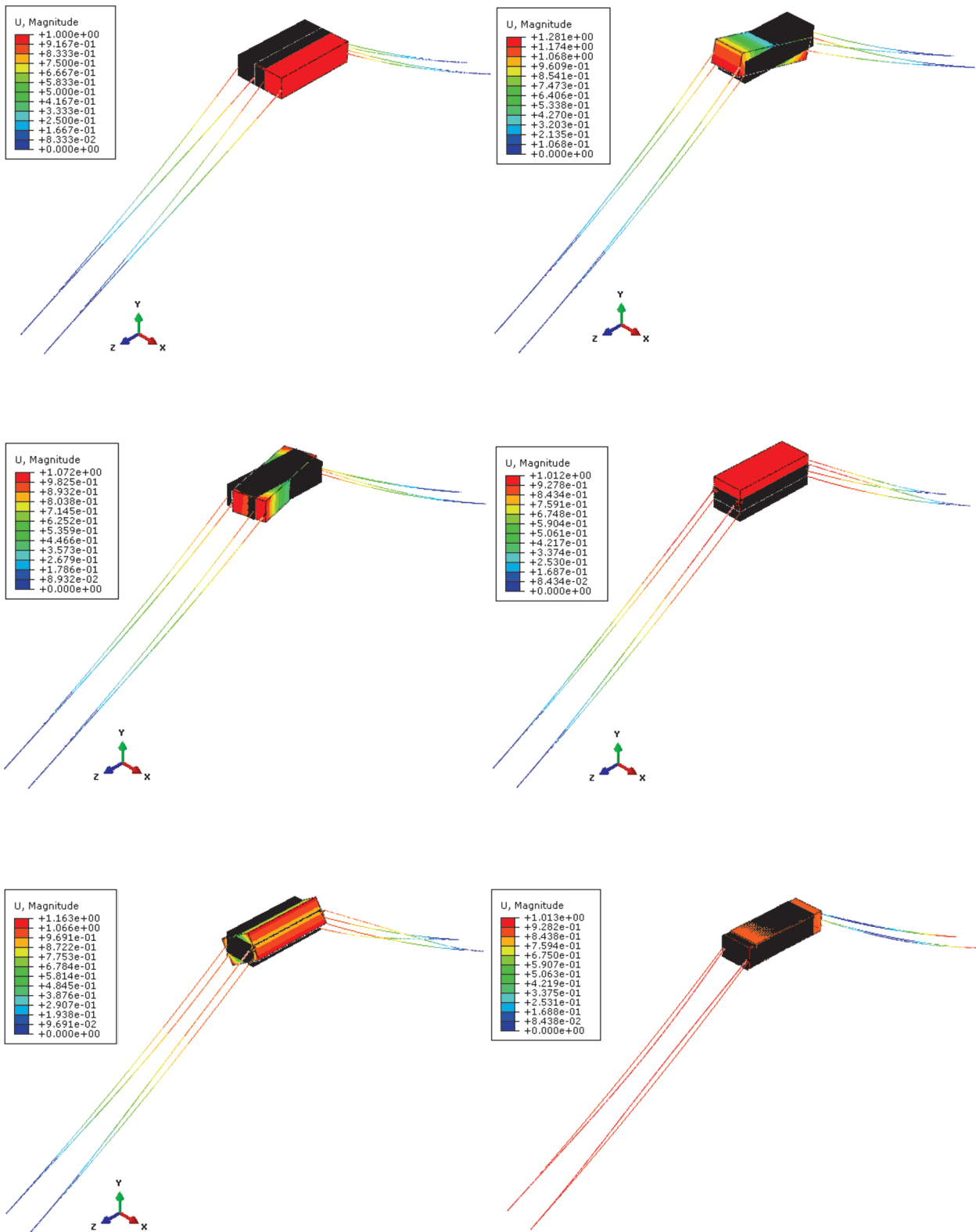
Oblici modela konstrukcije i odgovarajuće vrijednosti vlastite frekvencije dobiveni su numeričkom analizom primjenom Lanczosove metode. Rezultati su prikazani u tablici 5. Dominantni načini gibanja plutajućih konstrukcija proizlaze iz modalne analize. Osim toga, vrijednosti prirodne frekvencije rastu počevši od prvog načina gibanja koji je očekivan. Njihanje, uzdizanje i uzburkanje valova dobivaju se kao translacijska gibanja, a kotrljanje, uzdizanje i skretanje dobivaju

se kao rotacijska gibanja zbog vizualnih rezultata modalnog ponašanja. Šest vizualnih oblika konstrukcije prikazano je na slici 7. Translacijski pomaci izraženi su u metrima, a rotacijski pomaci u stupnjevima.

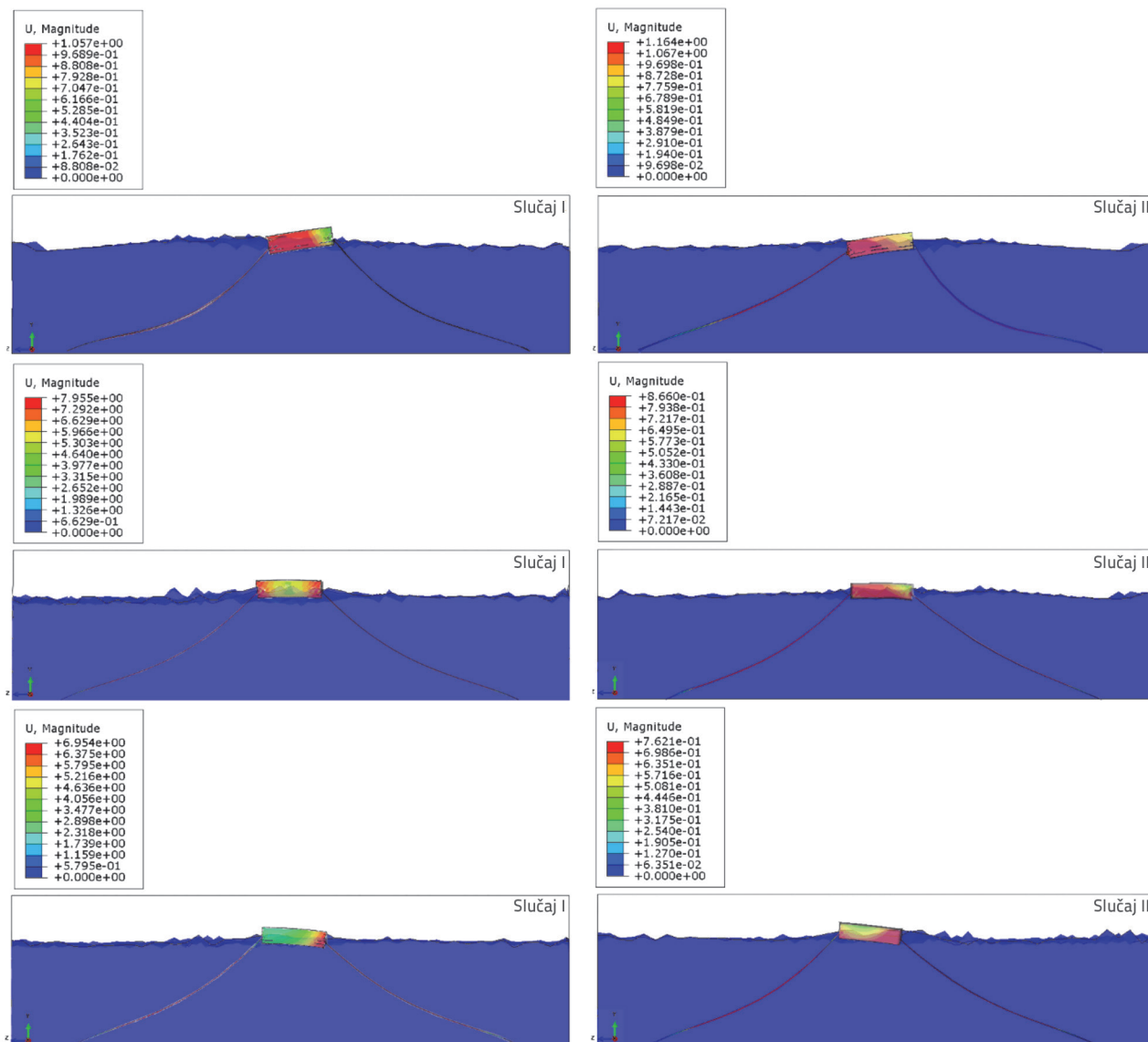
Spregnuta gibanja sustava za oba slučaja prikazana su na slici 8. Simulacija slučaja I prikazana je u lijevom dijelu slike, a simulacija slučaja II u desnom dijelu slike za različite vremenske periode.

Tablica 5. Prirodne frekvencije i pripadajući oblici modela

Svojstva \ Model	1	2	3	4	5	6
Oblik modela	Ljuljanje	Naginjanje	Skretanje	Uzdizanje	Okretanje	Uzburkanje
Prirodna frekvencija [rad/s]	0,409	0,468	1,129	1,381	1,489	2,105



Slika 7. Oblici gibanja konstrukcije i pripadajuće prirodne frekvencije



Slika 8. Spregnuta gibanja konopa za privez, pontona i morskog okoliša

5. Zaključak

Plutajuće konstrukcije mogu se koristiti na bilo kojoj dubini, pa je njihova primjena učestala. Za razliku od konstrukcija koje su izravno pričvršćene na morsko dno, na slobodne plutajuće konstrukcije ne utječu različite dubine mora i morsko dno. Međutim, debljina konstrukcije je znatno manja od njene površine. Zbog toga se može pojaviti ljuljanje i savijanje konstrukcije pod silom valova, dok se pri olujnom vjetru može pojaviti iznenadno pomicanje pontona. Dakle, morski okoliš mora biti realno modeliran u fazi projektiranja, kako ponton ne bi bio osjetljiv na te negativne učinke opterećenja valovima. U okviru ovog istraživanja morski je okoliš modeliran u različitim uvjetima opterećenja valovima kako bi se otkrile razlike između dvaju slučajeva (slučaj I i slučaj II). Model vala koji se odnosi na

protok fluida generiran je Eulerovim postupkom. S druge strane, plutajuća konstrukcija modelirana je primjenom Lagrangeovog postupka. Njihova interakcija modelirana je spregnutom Euler-Lagrangeovom (CEL) formulacijom. Numerička analiza ponajviše se provodi kroz profil valne površine. Eulerov postupak koji omogućuje slobodno kretanje mora primijenjen je u modeliranju morskog okoliša. Osim toga, kretanje slobodne površine Eulerovog dijela modela analitički je dobiveno jednadžbom profila površine koja pripada teoriji linearnih valova. Maksimalna razlika između numeričkih i analitičkih rezultata iznosi 8,5 %. Dakle, potvrđena je usklađenost profila vodene površine. Generira se samo model vala, a plutajuća konstrukcija ne uzima se u obzir pri validaciji valnih profila. Za odabrane dvije točke određeni su profili vodene površine. Smatra se da usporedba numeričke metode s

analitičkom metodom ne bi dala pouzdane rezultate kada bi se uzela u obzir plutajuća konstrukcija zbog propadanja strukture toka.

Uzdizanje, ljuljanje i nagib konstrukcije usporedno su dobiveni prema slučaju I i slučaju II. Maksimalna razlika između ta dva slučaja je 7,92 % za uzdizanje, 7,13 % za ljuljanje i 8,46 % za nagib konstrukcije. Nadalje, prema maksimalnoj vrijednosti napetosti priveza, razlika između slučaja I i II iznosi 9,42 %. Kada se te razlike usporede, može se zaključiti to da slučaj II ima kritičnije rezultate. Spregnuti pokreti priveza, pontona i morskog okoliša prikazani su na slici 8. U takvoj situaciji, ukupni pomak plutajuće konstrukcije za slučaj I je 10,11 % veći od pomaka konstrukcije u slučaju II. Prvih šest modova i pripadajuće vrijednosti frekvencije dobivene su numeričkom analizom. Ljuljanje i naginjanje konstrukcije dobivaju se kao translacijska gibanja, a skretanje, uzdizanje i okretanje konstrukcije dobivaju se kao rotacijska gibanja zbog vizualnih rezultata ponašanja modela. Analiza osjetljivosti provodi se primjenom modalne analize. Dobro je poznato to da broj čvorova i elemenata ima značajan utjecaj na numeričke rezultate i vrijeme izračuna analize. Dakle, najprije se donosi odluka o najprikladnijem broju čvorova i elemenata. Elementi tipa C3D8R koriste su za plutajuću konstrukciju. S druge strane, elementi tipa EC3D8R koji imaju ista svojstva kao elementi tipa C3D8R koriste se za fluid. Broj čvorova i elemenata prikazan je u tablici 3. Ako se fizički problem rješava samo Lagrangeovim postupkom umjesto spregnutog Euler-Lagrangeova postupka, tip elementa bit će C3D10M. Osim toga, kada veličina točke ostane konstantna, koristit će se 660171 čvora i 471446 elemenata za plutajuću konstrukciju i privez. Uz povećanje broja čvorova i elemenata, konstrukcija i fluid će

se modelirati u različitim interakcijama. Interakcija se provodi preko kontaktnih površina.

Vrijeme dobivanja rješenja se produljuje i potrebna je računalna tehnologija visokih performansi za izvođenje numeričke analize zbog različitih interakcija i povećanja broja čvorova i elemenata. Zbog toga se rezultati analize dobivaju brže kada se spregnuta Euler-Lagrangeova formulacija primjenjuje u problemima interakcije fluida i konstrukcije. Također je poznato da udruživanje tih postupaka daje pouzdanije rezultate u analizi interakcija u kojima se pojavljuju velike deformacije.

U ovom istraživanju utvrđeni su učinci različitih modeliranja valova na ponašanje plutajuće konstrukcije. Ti se učinci pojavljuju tijekom uzdizanja, ljuljanja i naginjanja kada val djeluje na os konstrukcije. Cilj istraživanja bio je istražiti ljuljanje, uzdizanje i naginjanje konstrukcije pod utjecajem različitih modeliranja valova promjenom upadnog kuta vala u daljnjim istraživanjima. Osim toga, predlaže se proučavanje promjene broja višesinusoidnih valova na ponašanje plutajuće konstrukcije. Može se zaključiti to da je slučaj II, čija je kota plohe dobivena iz numeričkog modela, kritičniji od slučaja I, kod kojeg je uzdizanje površine plutajuće konstrukcije plohe dobiveno iz jednadžbe slobodne površine. Stoga su se veće vrijednosti gibanja pojavile na konstrukciji u slučaju II. Isto ponašanje se opaža i kod vrijednosti naprezanja plutajuće konstrukcije. Također je zaključeno da oblikovanje plutajuće konstrukcije u slučaju II daje pouzdanije rezultate jer spregnuta Euler-Lagrangeova (CEL) formulacija omogućuje modeliranje slobodne površine. Stoga se smatra da će ovo istraživanje potaknuti daljnja istraživanja numeričkog ponašanja konstrukcija pontonskog tipa pod utjecajem različitih uvjeta opterećenja valovima primjenom različitih postupaka.

LITERATURA

- [1] Xu, S., Murai, M., Wang, X., Takahashi, K.: A novel conceptual design of a dynamically positioned floating wind turbine, *Ocean Engineering*, 221 (2021), <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108528>.
- [2] Ji, C.Y., Chen, X., Cui, J., Gaidai, O., Incecik, A.: Experimental study on configuration optimization of floating breakwaters, *Ocean Engineering*, 117 (2016), pp. 302–310. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2016.03.002>.
- [3] Liu, Z., Wang, Y.: Numerical investigations and optimizations of typical submerged box-type floating breakwaters using SPH, *Ocean Engineering*, 209 (2020), <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107475>.
- [4] Gomes, R.P.F., Gato, L.M.C., Henriques, J.C.C., Portillo, J.C.C., Howey, B.D., Collins, K.M., Hann, M.R., Greaves, D.M.: Compact floating wave energy converters arrays: Mooring loads and survivability through scale physical modelling, *Applied Energy*, 280 (2020), <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115982>.
- [5] Chandrasekaran, S., Sricharan, V.V.S.: Numerical analysis of a new multi-body floating wave energy converter with a linear power take-off system, *Renewable Energy*, 159 (2020), pp. 250–271. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.06.007>.
- [6] Tang, H.J., Huang, C.C., Chen, W.M.: Dynamics of dual pontoon floating structure for cage aquaculture in a two-dimensional numerical wave tank, *Journal of Fluids and Structures*, 27 (2011), pp. 918–936. <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2011.06.009>.
- [7] Viuffa, T., Xiang, X., Øiseth, O., Leira, B.J.: Model uncertainty assessment for wave- and current-induced global response of a curved floating pontoon bridge, *Applied Ocean Research*, 105 (2020), <https://doi.org/10.1016/j.apor.2020.102368>.
- [8] Aboshio, A., Ye, J.: Numerical study of the dynamic response of Infiatable Offshore Fender Barrier Structures using the Coupled Eulerian–Lagrangian discretization technique, *Ocean Engineering*, 112 (2016), pp. 265–<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.12.020>.
- [9] Gao, R.P., Wang, C.M., Koh, C.G.: Reducing hydroelastic response of pontoon-type very large floating structures using flexible connector and gill cells, *Engineering Structures*, 52 (2013), pp. 372–383. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.03.002>.
- [10] Loukogeorgaki, E., Yagci, O., Kabdasli, M.S.: 3D Experimental investigation of the structural response and the effectiveness of a moored floating breakwater with flexibly connected modules, *Coastal Engineering*, 91 (2014), pp. 164–180, <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2014.05.008>.

- [11] Chuang, Z., Chang, X., Li, C., Lu, Y., Liu, S.: Performance change of a semi-submersible production platform system with broken mooring line or riser, *Engineering Failure Analysis*, 118 (2020), <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104819>.
- [12] Lim, D.H., Kim, Y.: Design wave method for the extreme horizontal slow-drift motion of moored floating platforms, *Applied Ocean Research*, 71 (2018), pp. 48–58, <https://doi.org/10.1016/j.apor.2017.12.004>.
- [13] Cheng, Y., Ji, C., Zhai, G., Gaidai, O.: Hydroelastic analysis of oblique irregular waves with a pontoon-type VLFS edged with dual inclined perforated plates, *Marine Structures*, 49 (2016), pp. 31–57, <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2016.05.008>.
- [14] Trubat, P., Molins, C., Gironella, X.: Wave hydrodynamic forces over mooring lines on floating offshore wind turbines, *Ocean Engineering*, 195 (2020), <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106730>.
- [15] Jin, C., Bakti, F.P., Kim, M.H.: Multi-floater-mooring coupled time-domain hydro-elastic analysis in regular and irregular waves, *Applied Ocean Research*, 101 (2020), <https://doi.org/10.1016/j.apor.2020.102276>.
- [16] Howe, D., Nader, J.R., Macfarlane, G.: Performance analysis of a floating breakwater integrated with multiple oscillating water column wave energy converters in regular and irregular seas, *Applied Ocean Research*, 99 (2020), <https://doi.org/10.1016/j.apor.2020.102147>.
- [17] Yuan, Z.M., Incecik, A., Ji, C.: Numerical study on a hybrid mooring system with clump weights and buoys, *Ocean Engineering*, 88 (2014), pp. 1–11, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2014.06.002>.
- [18] Chung, W.C., Kang, H.Y., Kim, M.H.: Multi-scale approach for chain-mooring OPB-induced failure considering time-varying interlink bending stiffness and fairlead condition, *Applied Ocean Research*, 98 (2020), <https://doi.org/10.1016/j.apor.2020.102128>.
- [19] Qiao, D., Yan, J., Liang, H., Ning, D., Li, B., Ou, J.: Analysis on snap load characteristics of mooring line in slack-taut process, *Ocean Engineering*, 196 (2020), <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106807>.
- [20] Wiegard, B., Radtke, L., König, M., Moustafa, A. M., Düster, A.: Simulation of the fluid-structure interaction of a floating wind turbine, *Ships and Offshore Structures*, 14 (2019), pp. 207–218, <https://doi.org/10.1080/17445302.2019.1565295>.
- [21] Chen, X., Miao, Y., Tang, X., Liu, J.: Numerical and experimental analysis of a moored pontoon under regular wave in water of finite depth, *Ships and Offshore Structures*, 12 (2017) 3, pp. 412–423, <https://doi.org/10.1080/17445302.2016.1172831>.
- [22] Ji, C., Cheng, Y., Yang, K., Oleg, G.: Numerical and experimental investigation of hydrodynamic performance of a cylindrical dual pontoon-net floating breakwater, *Coastal Engineering*, 129 (2017), pp. 1–16, <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2017.08.013>.
- [23] Martínez, E.L., Quiroga, A.G., Jardini, A.L., Filho, R.M.: Computational fluid dynamics simulation of the water – sugar cane bagasse suspension in pipe with internal static mixer, *Computer Aided Chemical Engineering*, 26 (2009), pp. 683–688, [https://doi.org/10.1016/S1570-7946\(09\)70114-2](https://doi.org/10.1016/S1570-7946(09)70114-2).
- [24] Gücüyen, E., Erdem, R.T., Gökkuş, Ü.: FSI analysis of submarine outfall, *Brodogradnja/Shipbuilding*, 67 (2016) 2, pp. 67–80, <https://doi.org/10.21278/brod67205>.
- [25] Korobenko, A., Yan, J., Gohari, S. M.I., Sarkar, S., Bazilevs, Y.: FSI Simulation of two back-to-back wind turbines in atmospheric boundary layer flow, *Computers and Fluids*, 158 (2017), pp. 167–175, <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2017.05.010>.
- [26] Liu, J.: A second-order changing-connectivity ALE scheme and its application to FSI with large convection of fluids and near contact of structures, *Journal of Computational Physics*, 304 (2016), pp. 380–423, <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2015.10.015>.
- [27] Gücüyen, E., Yiğit, M.E., Erdem, R.T., Gökkuş, Ü.: Comparative analysis of tripod offshore structure, *Građevinar*, 72 (2020) 11, pp. 1021–1030, <https://doi.org/10.14256/JCE.2848.2019>.
- [28] ABAQUS User's Manual, Version 6.12, SIMULIA, Dassault Systèmes Simulia Corp., 2015.
- [29] Aquelet, N., Souli, M., Olovsson, L.: Euler–Lagrange coupling with damping effects: application to slamming problems, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 195 (2006), pp. 110–132, <https://doi.org/10.1016/j.cma.2005.01.010>.
- [30] ABAQUS Documentation, Version 6.12. SIMULIA, Dassault Systèmes Simulia Corp., 2015.
- [31] Ducobu, F., Riviere-Lorphevre, E., Filippi, E.: Application of the Coupled Eulerian-Lagrangian (CEL) method to the modeling of orthogonal cutting, *European Journal of Mechanics A/ Solids*, 59 (2016), pp. 58–66, <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2016.03.008>.
- [32] Ning, D. Z., Zhao, X. L., Zhao, M., Hann, M., Kang, H.G.: Analytical investigation of hydrodynamic performance of a dual pontoon WEC-type breakwater, *Applied Ocean Research*, 65 (2017), pp. 102–111, <https://doi.org/10.1016/j.apor.2017.03.012>.
- [33] Zhan, J.M., Chen, X.B., Gong, Y.J., Hu, W.Q.: Numerical investigation of the interaction between an inverse T-type fixed/ floating breakwater and regular/irregular waves, *Ocean Engineering*, 137 (2017), pp. 110–119, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.03.058>.
- [34] Haicheng, Z., Daolin, X., Huai, Z., Shuyan, X., Yousheng, W.: Energy extraction of wave energy converters embedded in a very large modularized floating platform, *Energy*, 158 (2018), pp. 317–329, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.06.031>.
- [35] Ji, C., Cheng, Y., Cui, J., Yuan, Z., Gaidai, O.: Hydrodynamic performance of floating breakwaters in long wave regime: An experimental study, *Ocean Engineering*, 152 (2018), pp. 154–166, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.01.055>.
- [36] Gücüyen, E., Erdem, R. T., Gökkuş, Ü.: Irregular wave effects on dynamic behaviour of piles, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 38 (2013) 5, pp. 1047–1057, <https://doi.org/10.1007/s13369-012-0428-6>.
- [37] Houmb, O.G., Overvik, T., Parameterization of wave spectra and long term joint distribution of wave height and period, *Behaviour Of Off-Shore Structures Proceedings Of The First International Conference VOLUME ONE*, August 2nd - 5th 1976
- [38] Chakrabarti, S.: *Handbook of Offshore Engineering*, Elsevier Ltd, 2005.
- [39] Matlab Users Manuel, Version 6.5, The MathWorks, Inc, 2006.
- [40] Coutinho, A.L.G.A., Alves, J.L.D., Landau, L., Prates de Lima, E.C.: On the application of an element-by-element Lanczos solver to large offshore structural engineering problems, *Computers & Structures*, 27 (1987) 1, pp. 27–37, [https://doi.org/10.1016/0045-7949\(87\)90179-9](https://doi.org/10.1016/0045-7949(87)90179-9).