

Primljen / Received: 25.8.2022.

Ispravljen / Corrected: 25.1.2023.

Prihvaćen / Accepted: 17.4.2023.

Dostupno online / Available online: 10.8.2023.

Analize učinaka oštećenja na rešetkasto postolje izvanobalne platforme

Autori:

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

Sveučilište Manisa Celal Bayar, Turska

Odjel za građevinarstvo

engin.gucuyen@cbu.edu.tr

Autor za korespondenciju



Selim Coşkun, dipl.ing.građ.

Sveučilište Manisa Celal Bayar, Turska

Odjel za građevinarstvo

selim.coskun@yahoo.comIzv.prof.dr.sc. **R. Tuğrul Erdem**, dipl.ing.građ.

Sveučilište Manisa Celal Bayar, Turska

Odjel za građevinarstvo

tugrul.erdem@cbu.edu.tr

Prethodno priopćenje

Engin Gücüyen, Selim Coşkun, R. Tuğrul Erdem

Analize učinaka oštećenja na rešetkasto postolje izvanobalne platforme

U ovom je istraživanju izvanobalna platforma, koja je podvrgnuta dinamičkom opterećenju za različite slučajeve oštećenja, modelirana analizom interakcije fluida i konstrukcije (engl. *fluid-structure interaction* - FSI). Razmatrani su različiti modeli oštećenja u slučaju kada je jedan stup bio oštećen, a Youngov modul oštećenog elementa smanjen je s četiri različita omjera intenziteta. Osim pet oštećenih konstrukcija, neoštećena je konstrukcija modelirana prema dva različita uvjeta razmaka stupova. Na taj su način oštećeni modeli uspoređivani i međusobno i s neoštećenim modelima. U ovom su radu modeli ispitivani primjenom numeričkog FSI postupka. Numerički postupak potvrđen je poluanalitičkim modeliranjem. U ovoj je fazi jednadžba gibanja jednog od konstrukcijskih modela riješena poluanalitičkom metodom temeljenom na sustavu s više stupnjeva slobode. Osim toga, numerički model okoline potvrđen je primjenom poluanalitičkog rješenja jednadžbe gibanja slobodne površine i krivulje valna brzina-valna sila. Za modeliranje konstrukcija i njihove okoline upotrijebljen je program Abaqus, utemeljen na metodi konačnih elemenata. Konstrukcije su modelirane primjenom Lagrangeova postupka, fluidno okruženje je modelirano primjenom Eulerova postupka. Modelirani su i uvjeti razmaka stupova i različiti omjeri intenziteta, te je zabilježen najnegativniji tip oštećenja.

Ključne riječi:

izvanobalne platforme s rešetkastim postoljem, oštećeni elementi, interakcija fluida i konstrukcije, numerička analiza

Research Paper

Engin Gücüyen, Selim Coşkun, R. Tuğrul Erdem

Analyses of damaged effects on jacket type offshore platform

In this paper, an offshore platform subjected to dynamic loading for different damage cases was modelled via fluid-structure interaction (FSI) analysis. Different damage models were considered in the case where one leg was broken, and the Young's modulus of the damaged member was reduced with four different severity ratios. In addition to the five damaged structures, the undamaged structure was modelled according to two different leg spacing conditions. Thus, the damaged models were compared among themselves as well as with undamaged models. In this study, models were investigated using a numerical FSI technique. The numerical technique was verified using semi-analytical modelling. At this stage, the equation of motion of one of the structural models was solved using a semi-analytical method based on a multi-degree-of-freedom system. In addition, the numerical environment model was verified using a semi-analytical solution of the free-surface motion equation and the wave velocity-wave force curve. An Abaqus finite-element analysis program was used to model the structures and their surroundings. While the structures were modelled using the Lagrangian technique, the fluid surroundings were modelled using the Eulerian technique. Both the conditions of leg spacing and different severity ratios were modelled, and the most negative damage type was revealed.

Key words:

offshore jackets, damaged members, fluid-structure interaction, numerical analysis

1. Uvod

Zbog sve veće potražnje za energijom u svijetu, za potrošnju se moraju ponuditi obnovljivi i iscrpljivi resursi. Izvanobalne energetske platforme sastoje se od platforme ispod objekta i potkonstrukcije koja nosi platformu i njen temelj. Rešetkaste konstrukcije češće se primjenjuju kao potkonstrukcije nego konstrukcije s jednim ili više pilona i gravitacijske konstrukcije [1, 2].

Izgradnja izvanobalnih konstrukcija teža je od izgradnje kopnenih, a nepovoljne situacije u okolišu, uključujući uvjete valova i vjetra te poteškoće u sastavljanju i rastavljanju, nepovoljni su scenariji koji se mogu dogoditi i treba ih uzeti u obzir tijekom faze izgradnje. Ovi negativni scenariji mogu se navesti kao situacije koje mogu prouzročiti štetu uključujući umor, koroziju, udar plovila, ispušteni predmet, pogreške u projektiranju, izradi i instalaciji te oštećenja uzrokovana ledom [3, 4]. Na temelju pregleda literature, istraživanja o situacijama oštećenja mogu se podijeliti u dvije kategorije. Prva kategorija su istraživanja prije oštećenja koja uključuju oštećenja i procjenu oštećenja, a druga su istraživanja nakon oštećenja koja ispituju ponašanje oštećene konstrukcije.

U radu [5], brzina energije signala primijenjena je za detekciju oštećenja izvanobalne platforme. Eksperimentalno izmjerena ubrzanja primijenjena su za izračunavanje brzine energije signala za udubljene elemente, što je smanjilo svojstva presjeka i eliminiralo scenarije oštećenja od primarnih elemenata. Senzori su bili smješteni na netaknutim ili oštećenim strukturnim modelima. Samo senzori oko udubljenih, uklonjenih ili oštećenih elemenata imaju željenu razinu energije signala. Na kraju istraživanja otkrivena je usklađenost između željene brzine energije signala u sensorima i mjesta oštećenja. U drugom su istraživanju eksperimentalno i numerički ispitani opseg i mjesto oštećenja [6]. Tri različite metode dubokog učenja (engl. *deep learning*) primijenjene su za otkrivanje oštećenja, lokalizaciju oštećenja i procjenu intenziteta za simulirane slučajeve oštećenja. Metode dubokog učenja za otkrivanje oštećenja potvrđene su putem numeričkih primjena i laboratorijskih ispitivanja konstrukcija. Još jedno istraživanje [7] usredotočilo se na opseg i mjesto oštećenja. U metodi procjene najprije su identificirana mjesta oštećenja, a naknadno je utvrđena težina. Iterativna metoda modalne energije deformacije koja se temelji na modalnim frekvencijama i oblicima modela konstrukcije usvojena je za lociranje i kvantificiranje oštećenja na konstrukciji. Izvedivost i učinkovitost tih metoda potvrđena je pomoću numeričkih modela. Kao i u njihovom prethodnom istraživanju, istraživači su ispitivali učinak promjene okoliša, kao što je temperatura, na mjesto oštećenja primjenom metode dekompozicije energije deformacije s modalnim parametrima [8].

Istraživanje nakon oštećenja provedeno je u radu [9]. Istraživači su ispitivali ponašanje izvanobalnih konstrukcija s rešetkastim postoljem oštećenih korozijom pod okolišnim opterećenjem. Modelirano je i neoštećeno stanje numeričkog modela pod

istim okolišnim opterećenjem. Stoga je ispitivan učinak oštećenja uzrokovanih korozijom na ponašanje konstrukcije. Učinci oštećenja uzrokovanih korozijom na cjevovodima proučavani su u radu [10]. Učinak korozije istraživanje modeliranjem ponašanja oštećenih i neoštećenih konstrukcija pod istim okolišnim opterećenjem pomoću programa Abaqus utemeljenom na metodi konačnih elemenata. Još jedno istraživanje nakon oštećenja proveo je Mozaheri sa suradnicima [11]. Ispitivali su različite metode popravka za različite slučajeve oštećenja, kao što su perforacija, udubljenje, slom i smanjenje čvrstoće, kako bi se istražila idealna rješenja za odabir alternativnih metoda popravka. U radu [12] ispitivana je raspodjela opterećenja među cijevnim elementima nakon sudara između izvanobalne platforme i broda. Različite brzine i lokacije sudara uzrokovale su različite vrste oštećenja, poput udubljenja i lomova.

Prema pregledu literature, scenariji oštećenja mogu se pojaviti kao udubljenja elemenata te smanjiti svojstva presjeka i ukloniti primarne elemente. U ovom je radu smanjenje svojstava presjeka i uklanjanje elemenata primijenjeno za modeliranje propadanja izvanobalne platforme s četiri rešetkasta stupa. Osim toga, u slučaju modela s četiri stupa koji nastavlja raditi s tri stupa zbog lokalne perforacije na jednom stupu, također su istražene promjene u ponašanju konstrukcije i uspoređene su s onima u neoštećenom modelu s tri stupa.

Za procjenu dinamičkog odziva izvanobalnih konstrukcija pod okolišnim opterećenjima, metode interakcije fluida i konstrukcije (FSI) obično se primjenjuju za istraživanje dinamičkog ponašanja konstrukcija. FSI analize kombiniranih atributa klasificirane su kao jednosmjerne ili dvosmjerne. Analiza konačnih elemenata primijenjena je na oba analizirana slučaja. FSI analiza podržana konačnim elementima može se izvesti pomoću Eulerova [13, 14] ili Lagrangeova postupka [15]. Osim toga, oba se postupka mogu primijeniti u proizvoljnim Lagrange-Eulerovim (ALE) [16, 17] i kombiniranim Euler-Lagrangeovim (CEL) [18] analizama. Istraživači svestrano primjenjuju program za analizu konačnih elemenata Abaqus za modeliranje interakcija [19].

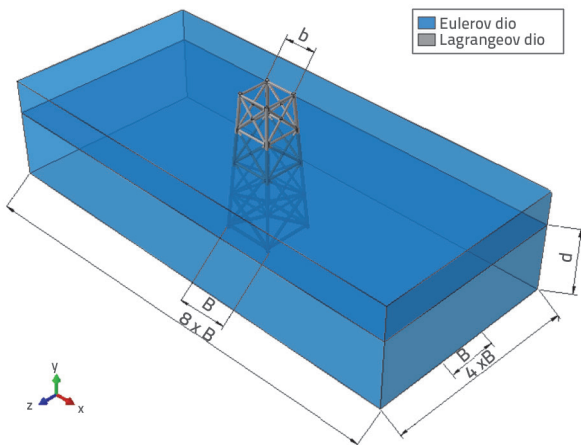
U ovom su radu trodimenzionalni modeli konačnih elemenata konstrukcija i okoline modelirani unutar okvira (ABAQUS/CAE) putem CEL-a, od kojih je jedan modeliran kao sustav s više stupnjeva slobode [20]. Jednadžba gibanja sustava s više stupnjeva slobode riješena je poluanalitičkom metodom Runge-Kutta. Stoga je izvršena konstrukcijska potvrda numeričkog modela. Protok fluida istražen je određivanjem gibanja slobodne površine vode prema CEL analizi. Osim toga, iz CEL analize dobivene su i brzine valova i sile. Ovaj je korak provjeren primjenom poluanalitičke metode izračunavanjem jednadžbi (1-4).

U fazi modeliranja oštećenja ispitano je pet scenarija. U prva četiri slučaja oštećenje je postignuto smanjenjem Youngovih modula oštećenih elemenata s različitim omjerima intenziteta kako slijedi: 5 %, 10 %, 20 % i 50 %. U petom scenariju oštećenje je nastalo zbog uklanjanja dijela stupa. U usporednim i kontrastnim fazama istraživanja, oštećene konstrukcije uspoređene su s neoštećenim konstrukcijama s četiri i tri stupa. Provedena je

usporedba na temelju ponašanja neoštećene konstrukcije s tri stupa i oštećene konstrukcije s četiri stupa, čiji je jedan stup perforiran ili oštećen u različitom omjeru.

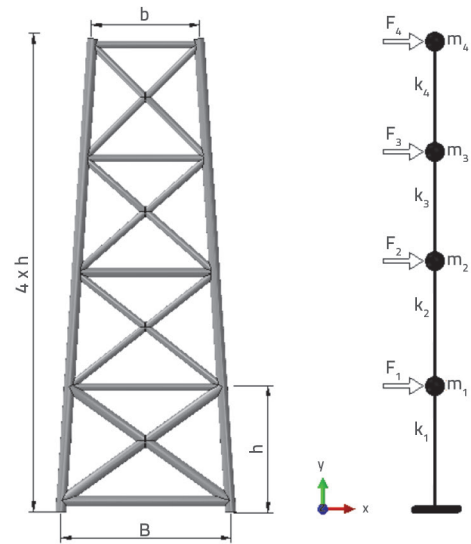
2. Konstrukcijski modeli i uvjeti okoline

U fazi modeliranja analizirano je sedam različitih rešetkastih konstrukcijskih modela, od kojih je šest s četiri stupa i jedan s tri stupa. Konstrukcija s četiri stupa modelirana Lagrangeovim postupkom i morski okoliš modeliran Eulerovim postupkom prikazani su na slici 1. Oznake B, b i d i označavaju bazu, duljinu stranice baze i dubinu vode.



Slika 1. Kombinirani model i dimenzije

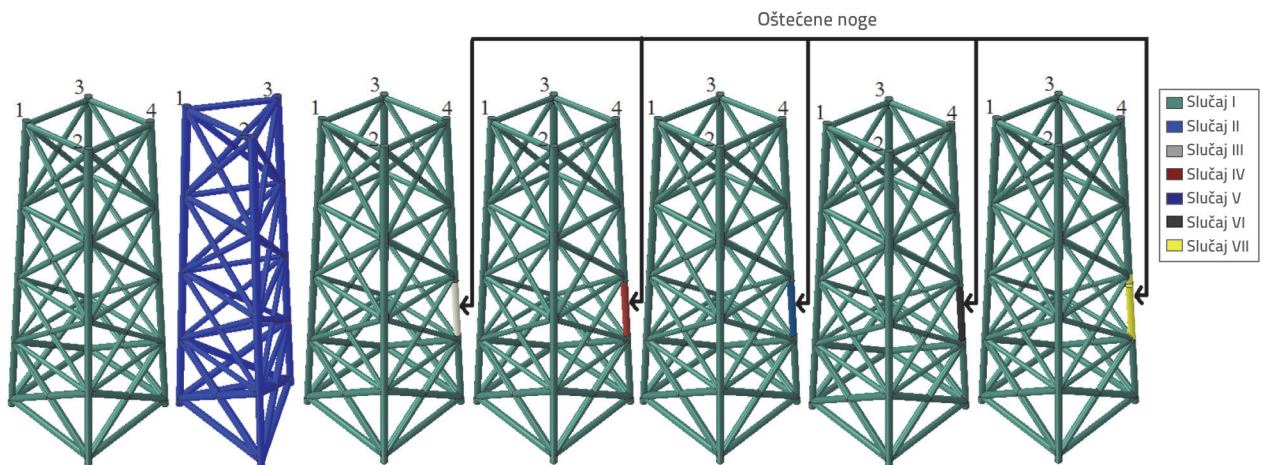
Numerički i pojednostavljeni poluanalitički modeli konstrukcije prikazani su na slici 2., pri čemu je h visina etaže, F je vanjska sila koja djeluje na etažu, m je masa etaže, a k je krutost etaže. Opterećenja valovima i vjetrom definirana su kao uvjeti okoline u numeričkim analizama.



Slika 2. Numerički i poluanalitički modeli

2.1. Konstrukcijski modeli

Rešetkasta postolja se obično sastoje od stupova u kutovima učvršćenih za morsko dno i međusobno povezanih horizontalnim i dijagonalnim ukрутama. Dimenzije baze modela konstrukcije s četiri stupa (BxB) bile su 22 m x 22 m, kao što je prikazano na slici 1. Dimenzije vrha stupa bile su 14 m x 14 m. U konstrukciji s tri stupa nastao je jednakostranični trokut, čiji su osnovni i gornji dijelovi imali iste duljine stranica kao i kod modela s četiri stupa. Konstrukcije su modelirane koristeći konstrukcijski čelik s Youngovim modulom od 210 GPa. Ova je vrijednost smanjena prema danim stopama za slučajeve III, IV i VI. Slika 3. prikazuje slučajeve razmatrane u ovom istraživanju. Iako se mjesto oštećenja nije promijenilo u oštećenim slučajevima, različite situacije oštećenja predstavljene su različitim bojama. Sedam slučajeva prikazano je na slici slijeva nadesno: četiri netaknuta



Slika 3. Konstrukcijski modeli i slučajevi

Tablica 1. Opis slučajeve

Stanje	Slučaj I	Slučaj II	Slučaj III	Slučaj IV	Slučaj V	Slučaj VI	Slučaj VII
Opis	Netaknuta s četiri stupa	Netaknuta s tri stupa	Omjer intenziteta oštećenosti 5 %	Omjer intenziteta oštećenosti 10 %	Omjer intenziteta oštećenosti 20 %	Omjer intenziteta oštećenosti 50 %	Oštećena perforirana

stupa, tri netaknuta stupa, jedan oštećen stup s omjerom intenziteta od 5 %, jedan oštećen stup s omjerom intenziteta od 10 %, jedan oštećen stup s omjerom intenziteta od 20 %, jedan oštećen stup s omjerom intenziteta od 50 % te jedan oštećen stup s perforiranim elementom. Oznake stupova prikazane su na istoj slici.

Pretpostavlja se da je Poissonov omjer 0.3, a gustoća je 7850 kg/m³. Stupovi rešetkastog postolja su 1,20 m u promjeru i 0,012 m u debljini, a ostali elementi imaju ista geometrijska svojstva s promjerom od 1,00 m i debljinom od 0,010 m za sve slučajeve.

Konstrukcije se sastoje od četiri kata, pri čemu svaki kat ima visinu (h) 15 m. Stoga je ukupna visina konstrukcija 60 m. Nasuprot tome, ukupna masa platforme je 1,50 × 10⁵ kg. Nekonstrukcijske mase definiraju se kao koncentrirane mase simetrično smještene na četiri rubna čvora. Klasifikacija slučajeva prema konstrukcijskim modelima prikazana je u tablici 1.

2.2. Uvjeti okoline

Analizirane konstrukcije razmatrane su kao kombinacija stalnog opterećenja i opterećenja uzrokovanog vjetrom i valovima. Prve dvije etaže konstrukcije, visine 30 m, bile su u kontaktu s vodom. Međutim, ostale etaže imaju visinu 30 m i u kontaktu su sa zrakom. Sile valova utječu na konstrukcijske elemente u kontaktu s morskim okolišem. Ostali elementi koji su bili u dodiru sa zrakom bili su pod utjecajem sila vjetra. Te su sile razmatrane u FSI i poluanalitičkoj analizi.

Hydrodinamičke valne sile koje djeluju na konstrukcije izračunane su pomoću brzina čestica vode (u) i ubrzanja (ü) u skladu s valnom teorijom određenom dubinom vode gdje se konstrukcija postavlja (d), visinom vala (H) i periodom (T) [21]. U ovom istraživanju valne sile izračunane su prema d = 30 m, T = 8 s i H = 2 m. Usvajanjem ovih vrijednosti, morski okoliš je modeliran primjenom Airyjeve (linearne) valne teorije. Valna duljina (L_w) je izračunana kao 98,71 m uzimajući u obzir parametre valova. Iako je samo brzina vala, izraz (1) primijenjena kao ulazna brzina u numeričkoj analizi, brzina i ubrzanje u izrazima (1) i (2) primijenjeni su za određivanje valnih sila u ovoj poluanalitičkoj analizi.

$$u = \frac{H}{2} \frac{gT}{L_w} \frac{\cosh[2\pi(y+d)/L_w]}{\cosh(2\pi d/L_w)} \cos\left(\frac{2\pi}{L_w}x - \frac{2\pi}{T}t\right) \tag{1}$$

$$\dot{u} = \frac{g\pi H}{L_w} \frac{\cosh(2\pi(y+d)/L_w)}{\cosh(2\pi d/L_w)} \sin\left(\frac{2\pi}{L_w}x - \frac{2\pi}{T}t\right) \tag{2}$$

Ukupna horizontalna sila (F_H) je zbroj sile otpora vala (F_D) i sile inercije (F_I). Ukupna sila je dobivena nakon integriranja sila duž visine tornja u kontaktu s vodom, kako je dano u izrazu 3.

$$F_H = F_D + F_I = \int_{-d}^{\eta} \frac{1}{2} \rho_w C_D Du_{(y,t)} |u_{(y,t)}| dy + \int_{-d}^{\eta} \rho_w C_M \frac{\pi D^2}{4} \dot{u}_{(y,t)} dy \tag{3}$$

U izrazu (3), C_D = 0,7 i C_I = 2,0 su koeficijenti otpora i inercije. r_w je gustoća slane vode, D je promjer tornja, h je nadmorska visina vodene površine, t je vrijeme, a y je okomita lokacija. Jednadžba visine površine je sljedeća:

$$\eta = \frac{H}{2} \frac{gT}{L} \frac{\cosh[2\pi(y+d)/L]}{\cosh(2\pi d/L)} \tag{4}$$

Osim toga, sila vjetra, koja predstavlja još jedno okolišno opterećenje koje utječe na konstrukciju, određena je pomoću izraza (5), prema Eurokod profilu brzine (u_a) na bilo kojoj visini iznad površine vode (y). Sila vjetra (F_a) izračunana je prema brzini vjetra (u_a).

$$u_a = U_{BAS} k_T \ln(y/z_0) \tag{5}$$

pri čemu je U_{BAS} referentna brzina vjetra (24 m/s), k_T je faktor terena (0,17), i z₀ je duljina hrapavosti (0,01).

$$F_a = \int_{\eta}^{L-\eta} \frac{1}{2} \rho_a u_a^2 C_s A_{(y)} dy \tag{6}$$

U izrazu (6), A je površina poprečnog presjeka elementa, ρ_a je masena gustoća zraka, a C_s je koeficijent oblika elementa, čija je vrijednost uzeta kao 0,50 za cilindrične presjeke [22].

3. Numerička studija

3.1. Definicija CEL analize

Matematička definicija CEL pristupa koju primjenjuje program konačnih elemenata Abaqus opisana je izrazima (7) do (9). To su Lagrangeove jednadžbe očuvanja mase, impulsa i energije:

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot v = 0 \tag{7}$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \nabla \cdot \sigma + \rho b \tag{8}$$

$$\frac{De}{Dt} = \sigma : D \quad (9)$$

U izrazima (7) do (9), brzina, gustoća, Cauchyjevo naprezanje, sila teža i unutarnja energija materijala po jedinici volumena predstavljeni su oznakama v , ρ , σ , b i e .

$$\frac{D\varphi}{Dt} = \frac{\partial\varphi}{\partial t} + v \cdot (\nabla\varphi) \quad (10)$$

Primjenom izraza (10), glavne jednadžbe za Lagrangeov postupak određene su u općem obliku očuvanja za Eulerov postupak:

$$\frac{\partial\varphi}{\partial t} + \nabla \cdot \Phi = S \quad (11)$$

pri čemu je j varijabla proizvoljnog rješenja, Φ je funkcija toka, a S je izvorni član u izrazu (11). Ta se jednadžba može napisati kao dva odvojena izraza:

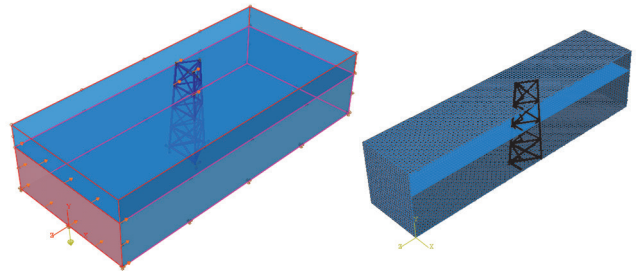
$$\frac{\partial\varphi}{\partial t} = S \quad (12)$$

$$\frac{\partial\varphi}{\partial t} + \nabla \cdot \Phi = 0 \quad (13)$$

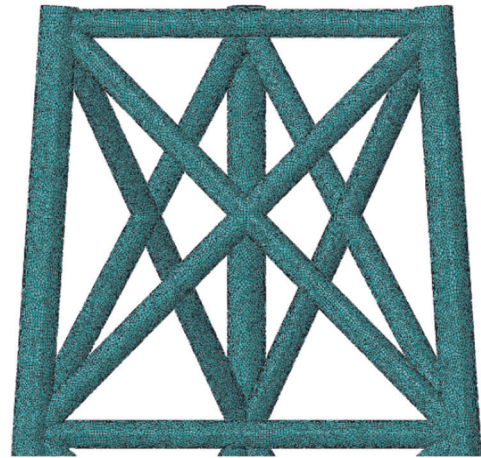
Izraz (13) je stoga isti kao standardna Lagrangeova formulacija u slučaju da se prostorna vremenska derivacija promijeni materijalnom vremenskom derivacijom na fiksnoj mreži konačnih elemenata. Deformirana mreža se zatim prenosi na originalnu fiksnu mrežu. Potom se izračunava volumen materijala koji se prenosi između susjednih elemenata kako bi se riješio izraz (13). Varijable Lagrangeove formulacije, točnije impuls, masa, naprezanje i energija zatim se raspoređuju na način da opisuju protok materijala između susjednih elemenata prema transportnim algoritmima.

3.2. Izrada modela pomoću CEL analize

Netaknuti i prazni dijelovi primijenjeni su za modeliranje morskog okoliša prema Eulerovom pristupu. Konstrukcije su modelirane pomoću Lagrangeovog pristupa, a dvosmjerna FSI rješenja dobivena su CEL analizom. Model konačnih elemenata za slučaj II koji se primjenjuje u CEL analizi prikazan je na slici 4. Dno Eulerovog dijela je praznina iznad razine morske vode koja omogućuje slobodno kretanje površine. Morsku vodu definira EOS materijal, a razmatrana svojstva materijala su sljedeća: brzina zvuka (c_0) u slanoj vodi: 1560 m/s , gustoća (μ): 1025 kg/m^3 i dinamička viskoznost (μ): 0.0015 Ns/m^2 . Karakteristike čeličnog materijala dodijeljenog Lagrangeovom dijelu opisane su u poglavlju 2.1.



Slika 4. Rubni uvjeti



Slika 5. Konfiguracija mreže konačnih elemenata

Na slici 4. dno Eulerovog dijela definirano je kao nepropusna stijenka, površine na dužoj strani definirane su kao daleko polje, a površine na kraćoj strani definirane su kao ulaz i izlaz. Jednadžba (1) primijenjena je kao ulazna brzina. Stoga su u dalekim poljima implementirani isti parametri kao i oni za ulaznu površinu. Konfiguracija mreže modela konačnih elemenata prikazana je na slici 5. U lagrangskom se dijelu primjenjuju dvostruko zakrivljena tanka ili debela ljuska sa četiri čvora, reducirana integracija, kontrola efekta pješčanog sata (engl. hourglass control) i elementi konačne membranske deformacije (S4R). U eulerskom se dijelu primjenjuje linearni Eulerov blok s osam čvorova s reduciranom integracijom i kontrolom efekta pješčanog sata (EC3D8R). Udaljenosti između čvorova iznosile su 0,01 m za lagrangski i 0,50 m za eulerski dio. Stoga su za slučaj I izrađena 19723374 čvora i 19905048 elemenata, za slučaj II 19532252 čvora i 19707492 elementa, a za slučaj III 16857356 čvorova i 16991833 elementa.

Jednadžba gibanja za konstrukciju razmatranu u programu konačnih elemenata pod djelovanjem vanjskih sila (F) može se izraziti na sljedeći način:

$$m^{Nl} \ddot{X}^{Nl}_t = (F^l - I^l)_t \quad (14)$$

U izrazu (14) m^{Nl} je matrica mase, F^l je vektor vanjskog opterećenja prenesenog s eulerskog dijela, a I^l predstavlja vektor unutarnje sile uzrokovan unutarnjim naprezanjima elemenata,

a je ubrzanje. \dot{I} se dobiva iz pojedinačnih elemenata tako da nije potrebno formirati matricu globalne krutosti. Kombinirane Euler-Lagrangeove analize mogu se generirati u dinamičkim, eksplicitnim koracima samo putem pravila o eksplicitnoj integraciji [19].

4. Poluanalitička analiza

U ovom dijelu istraživanja istovremeno su provedene numeričke i poluanalitičke analize. Vrijednosti pomaka i prirodne frekvencije utvrđene numeričkom analizom potvrđene su poluanalitičkom analizom za slučaj I. Kao što je prikazano na slici 2., konstrukcija je idealizirana kao toranj koncentriranih masa. Diferencijalna jednadžba koja upravlja odzivom sustava s više stupnjeva slobode izražena je izrazom (15).

$$mX + kX = F \tag{15}$$

Vrijednosti pomaka i prirodne frekvencije s četiri stupnja slobode određene su pomoću izraza (15). Provedena je transformacija koordinata kako bi se odredio izraz (15) iz izraza (16) i (17). Matrica modalnog oblika $[f]$, koja je određena razmatranjem modela konstrukcije, primijenjena je za transformaciju koordinata.

$$\{X\} = [f]\{x\} \tag{16}$$

$$[f]^T[m][f]\{x\} + [f]^T[k][f]\{x\} = [f]^T F \tag{17}$$

Matrice mase (m) i krutosti (k) izražene su izrazima (18) i (19).

$$m = \begin{bmatrix} 2.06 \cdot 10^5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1.55 \cdot 10^5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1.47 \cdot 10^5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.53 \cdot 10^5 \end{bmatrix} \tag{18}$$

$$k = \begin{bmatrix} 6.56 \cdot 10^5 & -2.49 \cdot 10^5 & 0 & 0 \\ -2.49 \cdot 10^5 & -4.49 \cdot 10^5 & -2.00 \cdot 10^5 & 0 \\ 0 & -2.00 \cdot 10^5 & 3.74 \cdot 10^5 & -1.74 \cdot 10^5 \\ 0 & 0 & -1.74 \cdot 10^5 & 1.74 \cdot 10^5 \end{bmatrix} \tag{19}$$

Ukupna valna sila na prvoj etaži, $(F_{1(t)})$, primijenjena je na čvor 1, a ukupna valna sila na drugoj etaži, $(F_{2(t)})$, primijenjena je na čvor 2. Sila vjetra koja utječe na elemente na trećoj i četvrtoj etaži postavljena je na povezane točke, slično kao sila valova. Stupovi, horizontalna ukrućenja i valne sile koje utječu na dijagonale u prve dvije etaže modela izračunane su jedna po jedna prema jednadžbi (3). Te su sile dodane u etaže. Sile vjetra koje utječu na model izračunane su pomoću jednadžbi (6) za svaki element u svim etažama. Utvrđeno je da su sile vjetra u katovima bile $F_3 =$

164800 N i $F_4 = 197537$ N. Sile vjetra i valne sile sastoje se od vanjskih sila na desnoj strani izraza (15). Osim toga, jednadžba (17) rješava se pomoću dolje navedenih početnih uvjeta Runge–Kuttovom metodom za postizanje pomaka točke.

$$\xi_{1(0)} = \xi_{2(0)} = 0, \dot{\xi}_{1(0)} = \dot{\xi}_{2(0)} = 0 \tag{20}$$

Runge–Kuttova metoda ocjenjuje jednostavne odnose na početku, u sredini i na kraju ukupnih vremenskih koraka (Δt) kao što je prikazano u nastavku [23].

$$\ddot{X}_{(t)} = m^{-1}(F_{(t)} - kX_{(t)}) \quad \dot{X}_{t+\Delta t} = \dot{X}_t + \ddot{X}_t \Delta t \quad X_{t+\Delta t} = X_t + \dot{X}_t \Delta t \tag{21}$$

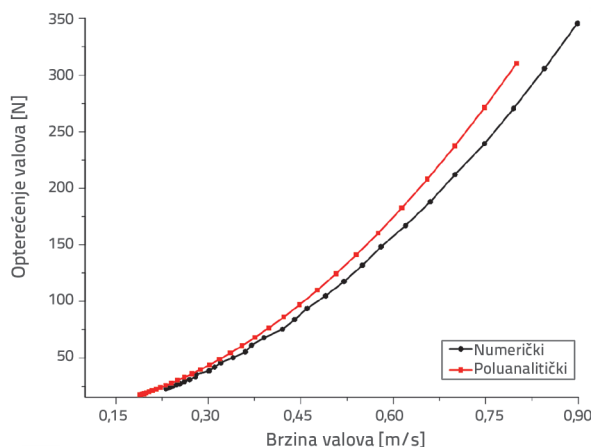
Uz vrijednosti pomaka, prirodna frekvencija konstrukcije (ω) određena je pomoću izraza (22).

$$[k] - \omega^2 [m] = 0 \tag{22}$$

Poluanalitička metoda i metoda konačnih elemenata (engl. FEM) nastavljene su 64 s intervalom koraka (Δt) od 0,01 s.

5. Rezultati

U ovom se odjeljku uspoređuju numerički i poluanalitički rezultati konstrukcije i morskog okoliša. Na taj način su potvrđeni numerički modeli. Potom su predstavljeni rezultati svakog slučaja i istraženi su učinci oštećenja na konstrukcije. Brzine valova, sile i uzvišenja slobodne površine na određenim točkama određene su pomoću izraza (1), (3) i (4) i uspoređene s numeričkim modelom (slike 6. i 7.).

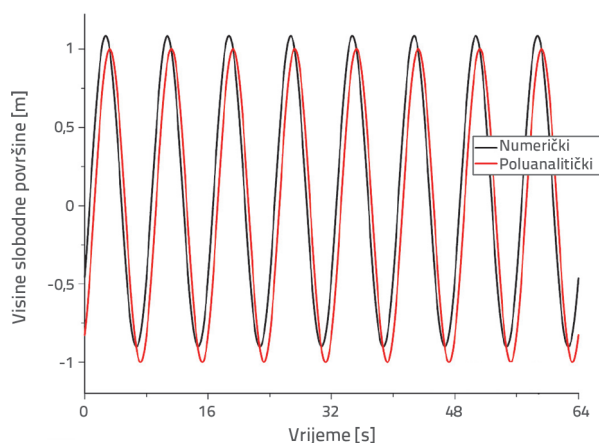


Slika 6. Varijacija valne sile s brzinom vala

Uzvišenje za položaj $z = 40$ m analitički je variralo između $-0,99$ m i $+0,99$ m, a uzvišenje za isti položaj brojčano se mijenja između $-0,90$ m i $+1,08$ m. Dok je maksimalna horizontalna brzina vala određena kao $0,89$ m/s prema izrazu (1), ova je vrijednost numerički izračunana kao $0,80$ m/s. Maksimalne horizontalne valne sile izračunane su kao $345,65$ N i $310,22$ N prema izrazu (3) i numeričkoj analizi.

Tablica 2. Prirodna frekvencija i vrijednosti pomaka

Analiza	Prirodna frekvencija [rad/s]				Maksimalni pomak [m]			
	ω_1	ω_2	ω_3	ω_4	X_1	X_2	X_3	X_4
Numerička	2,759	2,769	2,775	6,262	0,103	0,252	0,421	0,611
Poluanalitička	2,979	3,031	3,055	6,922	0,112	0,276	0,468	0,688



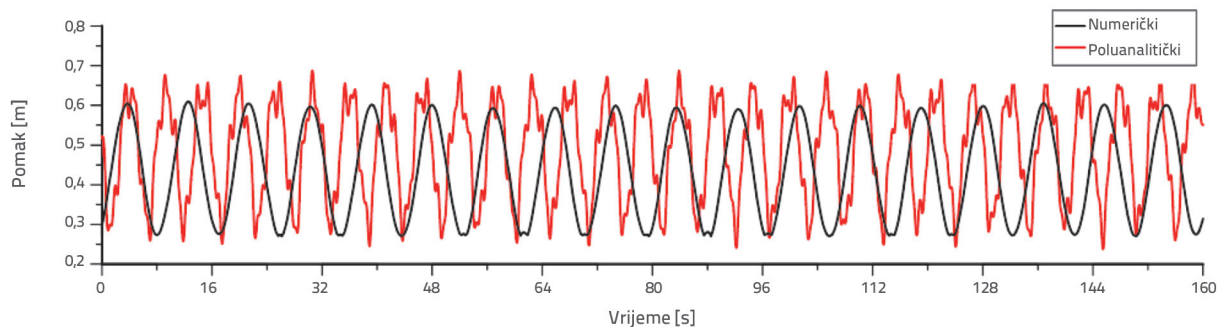
Slika 7. Uzvišenja vala

Prve četiri prirodne frekvencije i vrijednosti pomaka četiri etaže dobivene numeričkim i poluanalitičkim modeliranjem konstrukcije koja pripada slučaju I navedene su u tablici 2. Vremenski promjenjive vrijednosti pomaka četvrte etaže

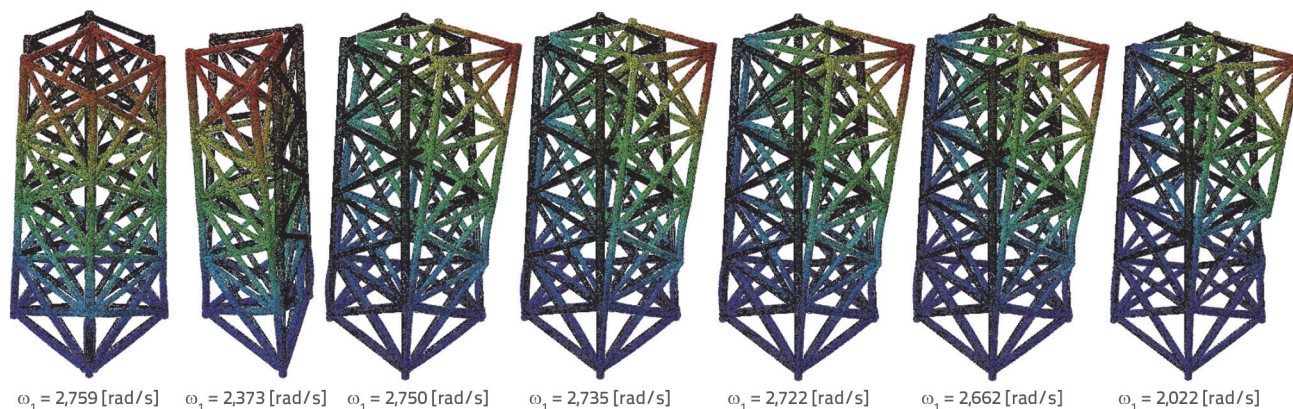
navedene u tablici 2 prikazane su na slici 8. Stoga je pomoću poluanalitičke i numeričke analize utvrđen sklad između okolišnih rezultata i rezultata konstrukcije.

Pomak oscilira između minimuma od 0,270 m i maksimuma od 0,611 m za numeričku analizu te minimuma od 0,238 m i maksimuma od 0,688 m za poluanalitičku analizu. Srednje vrijednosti bile su 0,440 za numeričku i 0,485 za poluanalitičku analizu. Potom su numerički modeli uspoređeni. U tu svrhu, oblici modela konstrukcije i odgovarajuće vrijednosti prirodne frekvencije u različitim slučajevima dobiveni su numeričkom analizom primjenom Lanczosove metode [18]. Rezultati su prikazani na slici 9.

Dok je maksimalna vrijednost prirodne frekvencije dobivena u slučaju I za neoštećenu konstrukciju, minimalna vrijednost je određena u slučaju VII. Kad su se uspoređivale prirodne frekvencije modela s četiri stupa, došlo je do 3,51 postotnog smanjenja između slučajeva I i VI te 26,71 postotnog smanjenja između slučajeva I i VII. Osim toga, uočeno je smanjenje od 13,99 % između slučajeva I i II kada su se uspoređivali modeli s tri stupa.

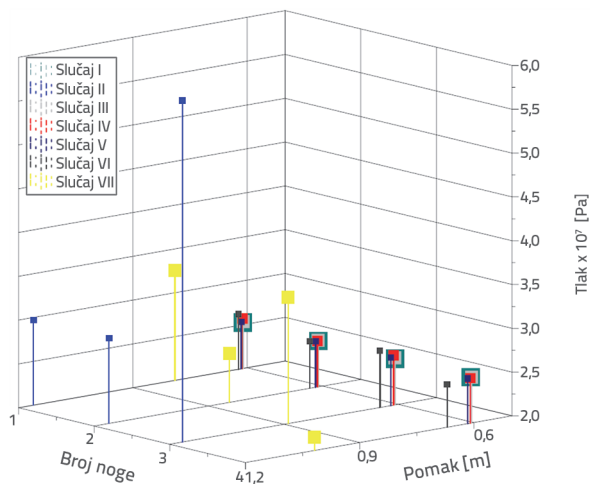


Slika 8. Povijest gibanja konstrukcije i maksimalne napetosti priveza

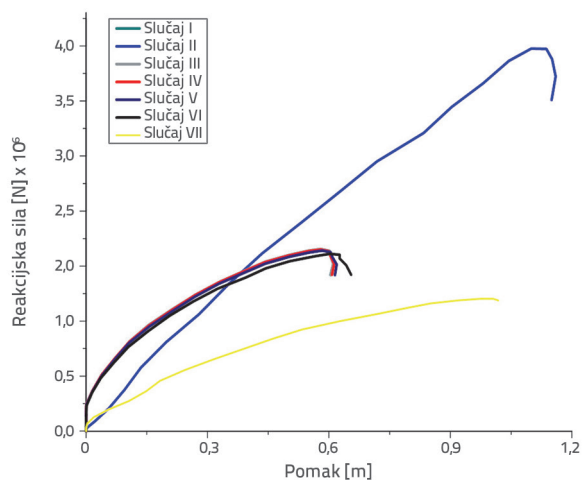


Slika 9. Oblici titranja konstrukcije i pripadajuće prirodne frekvencije

Maksimalne vrijednosti pomaka i sile reakcije za svaki stup u ispitivanim slučajevima prikazane su na slici 10. Dok je treći stup prikazan za slučaj II, promjena sile reakcije s pomakom za ostale slučajeve u četvrtom stupu prikazana je na slici 11.



Slika 10. Vrijednosti naprezanja i pomaka po stupovima

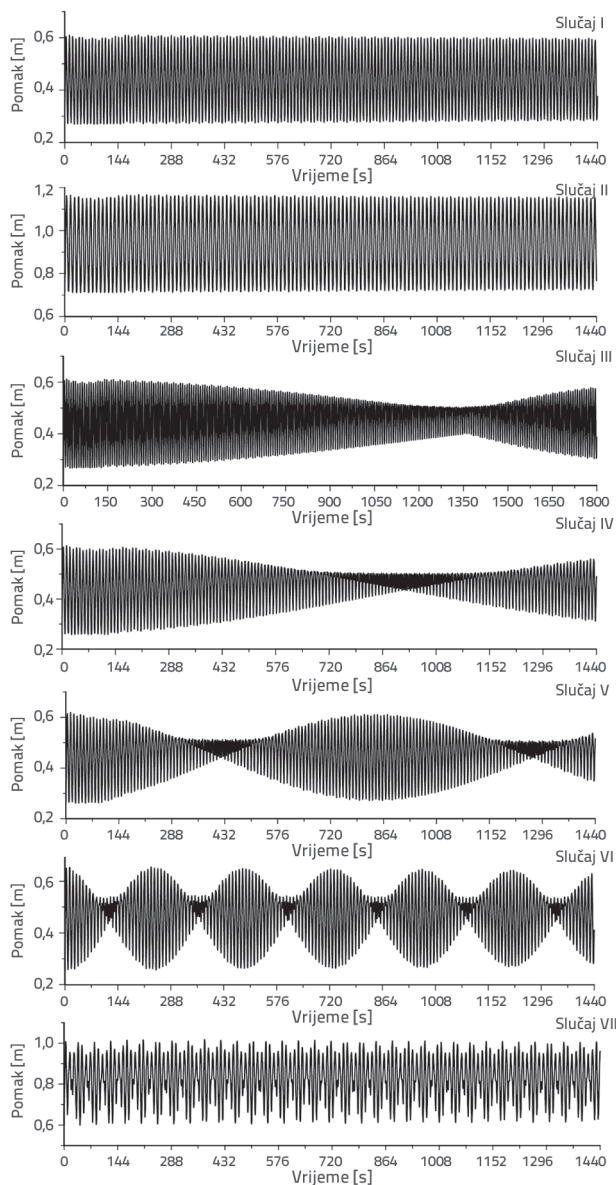


Slika 11. Krivulje reakcijska sila-pomak

Pri analizi modela s četiri stupa, maksimalna vrijednost pomaka uočena se u slučaju VII, a minimalna vrijednost u slučaju I. Između tih slučajeva došlo je do razlike od 67,45 %. Međutim, minimalne i maksimalne vrijednosti naprezanja zabilježene su u slučaju VII. Kada su slučajevi I i VII uspoređeni na temelju maksimalnih naprezanja, uočena je razlika od 36,45 % između numeričkih vrijednosti. Kada su ispitivana naprezanja u oštećenim stupovima, ustanovljena je razlika od 0,18 % između slučaja I i slučaja III, razlika od 0,31 % između slučaja I i slučaja IV, razlika od 0,45 % zabilježena je između slučaja I i slučaja V, razlika od 1,28 % zabilježena je između slučaja I i slučaja VII, a između slučaja I i slučaja VII zabilježena je razlika od 17,01 %. Maksimalna vrijednost naprezanja u svim modelima dobivena je u slučaju II. Kada su se ispitivale sile reakcije u oštećenim

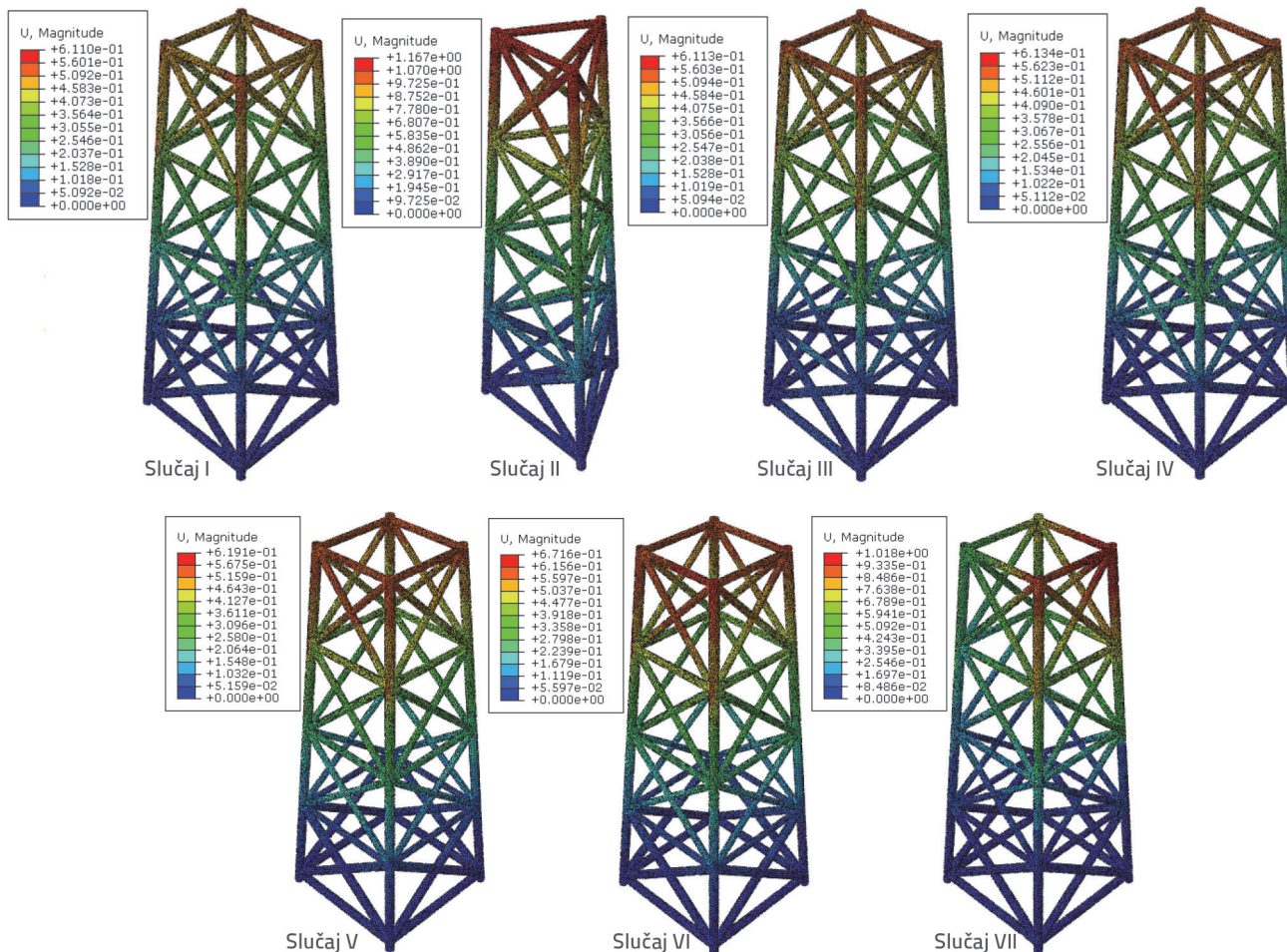
stupovima, razlike su iznosile 0,05 %, 0,20 %, 0,80 %, 2,64 %, i 37,49 % između slučajeva I i III, slučajeva I i IV, slučajeva I i V, slučajeva I i VI, odnosno slučajeva I i VII. Ne iznenađuje da je maksimalna sila reakcije zabilježena je u slučaju II.

Vremenski promjenjive vrijednosti pomaka trećeg stupa za slučaj II i četvrtog stupa za preostale slučajeve prikazane su na slici 12.

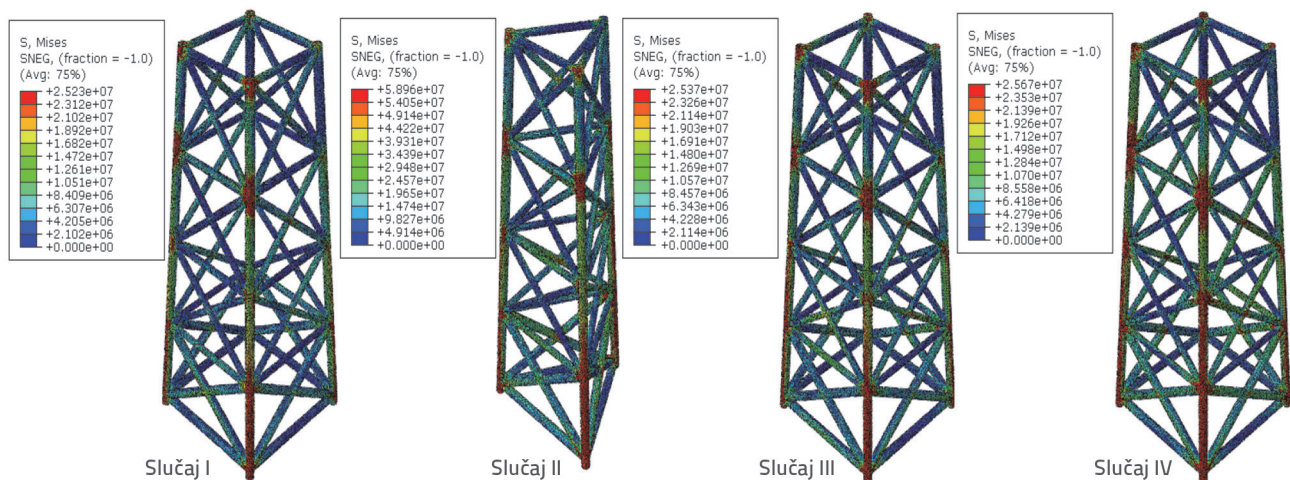


Slika 12. Vremenski promjenjive vrijednosti pomaka za svaki slučaj

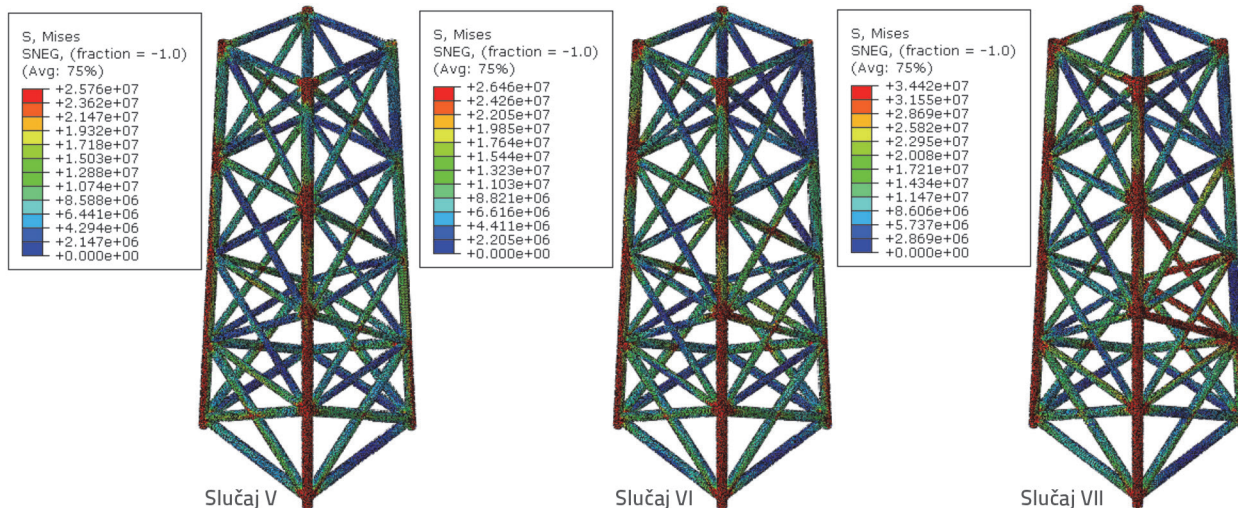
Kada su analizirani pomaci oštećenih stupova, razlike od 0,06 %, 0,18 %, 1,32 %, 10,16 % i 67,45 % zabilježene su između slučajeva I i III, slučajeva I i IV, slučajeva I i V, slučajeva I i VI, odnosno slučajeva I i VII. Kao što je i očekivano, najveći pomak među oštećenim stupovima zabilježen je u slučaju VII. Distribucije pomaka i naprezanja za svaki slučaj prikazane su na slikama 13, odnosno 14.



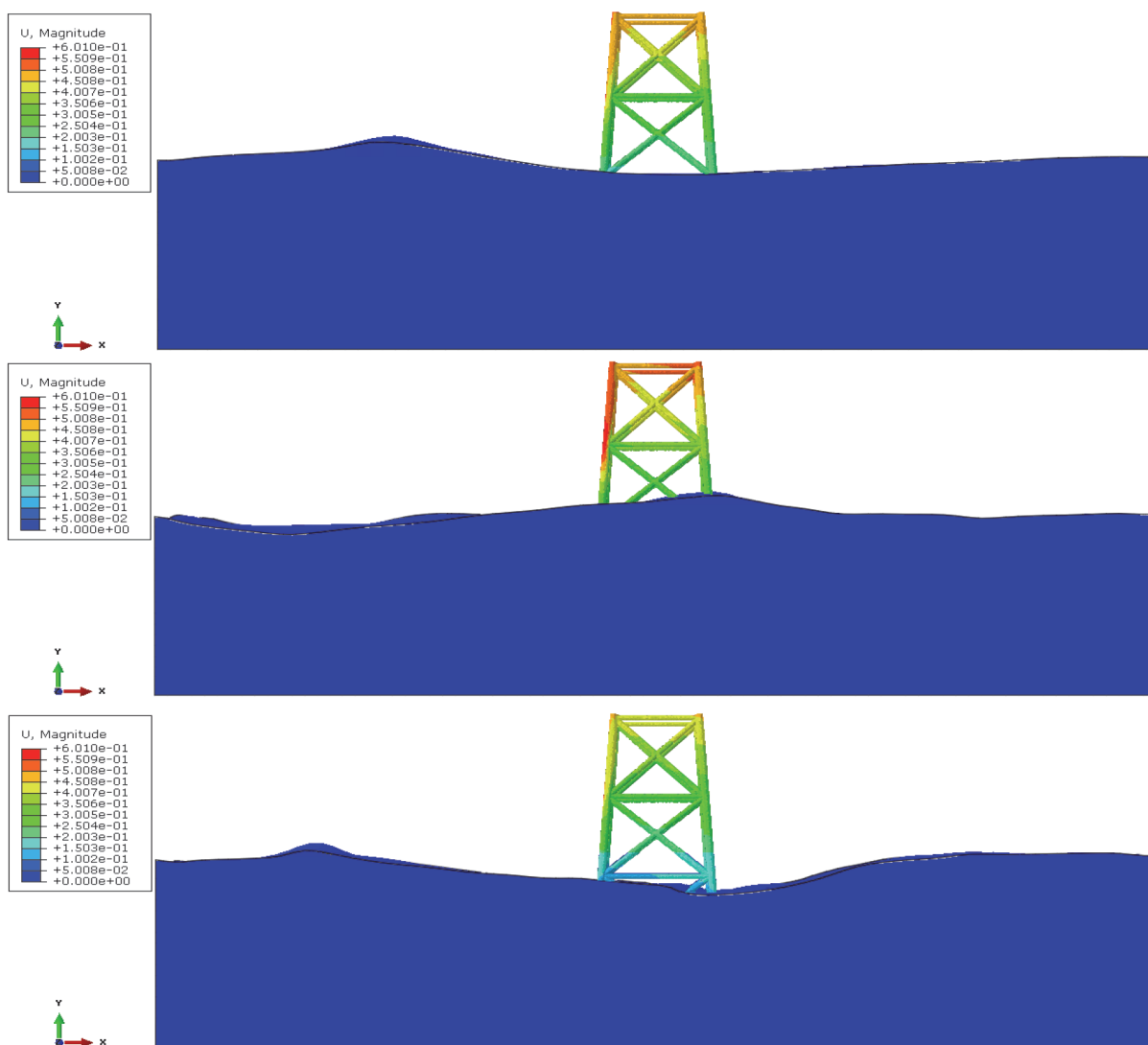
Slika 13. Distribucije pomaka za svaki slučaj



Slika 14. Distribucije naprezanja za svaki slučaj, slučajevi I do IV



Slika 14. Distribucije naprezanja za svaki slučaj, slučajevi V do VII



Slika 15. Kombiniranje Eulerove i Langrangove domene

Kombiniranje Eulerovog i Lagrangeovog dijela za slučaj I prikazano je na slici 15. Na taj se način može promatrati kretanje površine vode u različitim trenucima, a ovisno o tom kretanju može se promatrati i pomak konstrukcije.

6. Zaključak

Rešetkasti sustavi koji čine infrastrukturu važnih sustava koji djeluju na otvorenom moru, uključujući energetske, transportne i obrambene sustave, imaju skuplje i složenije strukture od svojih ekvivalenata na kopnu. Stoga je održivost ključna. Kako bi se osigurala održivost, treba uzeti u obzir oštećenja koja mogu nastati tijekom izgradnje. Stoga je u ovom radu analizirano pet slučajeva iste konstrukcije s različitim vrstama i omjerima oštećenja, kao i neoštećena konstrukcija i druga neoštećena konstrukcija s različitim razmacima stupova. U analizama interakcije fluida i konstrukcije primijenjen je CEL postupak.

Najprije su numeričko okruženje i konstrukcijski modeli potvrđeni primjenom poluanalitičkih modela. Dok se provjera numeričkog modela okruženja izvodi pomoću površinskog gibanja i krivulje valna brzina-valna sila, za provjeru numeričkog modela konstrukcije primjenjuju se vrijednosti pomaka i prirodne frekvencije. Kada se analizira usklađenost uzvišenja slobodnih površina, uzima se u obzir samo valni model bez uključivanja konstrukcije. Osim toga, struktura protoka se pogoršava pri uključivanju konstrukcije; stoga usporedba s analitičkom metodom ne bi dala odgovarajuće rezultate. Prema uzvišenjima slobodne površine, brzini vala i sili vala, najveće razlike između analitičkih i numeričkih rezultata iznosile su 10,50 %, 10,11 %, i 10,25 %. Stoga je usklađenost uzvišenja slobodnih površina ispitana numerički i vizualno.

Potom su numerički rezultati konstrukcije potvrđeni rješenjem diferencijalnih jednadžbi koje se odnose na sustav s više stupnjeva slobode u slučaju I. Određene su frekvencije prve četiri konstrukcije. Iz tablice 2 može se primijetiti da je razlika između dvije vrste analize varirala između 8,01 % i 10,54 %. Vremenski promjenjive vrijednosti pomaka za dvije analize prikazane su na slici 8. Maksimalni pomaci u tim točkama navedeni su u tablici 2. Razlika između pomaka prve točke iznosila je 9,11 %, a u četvrtoj točki iznosila je 12,60 %. Kao što je i očekivano, najveće vrijednosti pomaka zabilježene su u vršnoj točki. Vremenski promjenjive vrijednosti pomaka dobivene iz dviju različitih analiza bile su u skladu jedna s drugom. Osim toga, te vrijednosti predstavljaju učinke gibanja valova na konstrukciju. Prikazane su i promjene u gibanju konstrukcije uslijed gibanja valova.

Slika 9 pokazuje da u usporedbi sa slučajevima I i III–VI, oštećenje utječe na modalno ponašanje, uključujući različite situacije oštećenja istog modela preko prirodne frekvencije. Smanjenje modula elastičnosti također je smanjilo prirodnu frekvenciju sa slučaja III na slučaj VI. Međutim, ova situacija nije uzrokovala nikakvu promjenu u modalnom ponašanju. Kada su analizirani oblici titranja modela konstrukcije, uočeno je da su prvi oblici titranja konstrukcije bili torzijski modeli. U slučaju VII, u kojem se vrsta oštećenja promijenila, vrijednost

prirodne frekvencije nastavila se smanjivati, dok je isto modalno ponašanje primijećeno za druge vrste oštećenja. S obzirom na to da je slučaj VII imao tri stupa u usporedbi sa slučajem II, puknuće stupa imalo je negativan učinak na vrijednost prirodne frekvencije, uzrokujući smanjenje od 17,35 %.

Kada su slučajevi analizirani prema von Misesovim vrijednostima naprezanja, najveće naprezanje zabilježeno je u slučaju II. U tom slučaju, vrijednosti naprezanja su se razlikovale između stupova, kao što je prikazano na slici 10. Naprezanje je bilo koncentrirano u trećem stupu. Iznenađna oštećenja stupova mogu biti razorna. Iako nije izražena u istoj mjeri kao u slučaju II, uočena je razlika u vrijednostima naprezanja stupova u slučaju VII. Najmanja vrijednost naprezanja zabilježena je u četvrtom napuknutom stupu. Međutim, razlika između distribucija naprezanja stupova smanjila se u slučaju VI i činilo se da pokazuje homogenu distribuciju u usporedbi sa slučajem VII. U slučaju V, u kojem je modul elastičnosti oštećenog stupa smanjen za 20 %, raspodjela naprezanja u stupovima postala je homogena. Osim toga, raspodjela naprezanja u stupovima bila je homogena u slučajevima I, III i IV. Među oštećenim modelima, najkritičnija situacija uočena je u slučaju VII zbog ukupne vrijednosti naprezanja u sva četiri stupa i razlike u vrijednostima naprezanja između stupova. Raspodjela naprezanja u slučajevima prikazana je na slici 14.

Kada su slučajevi analizirani prema vrijednostima pomaka, kao što je prikazano na slici 10., za razliku od vrijednosti naprezanja, postojala je jednaka raspodjela između stupova u slučaju II. U tom je slučaju postignuto maksimalno naprezanje. Iako je vrijednost pomaka u slučaju VII bila manja od one u slučaju II, vrijednosti pomaka razlikovale su se između stupova. Kao što je i očekivano, uočeno je smanjenje vrijednosti pomaka u ostalim slučajevima, a vrijednosti pomaka između stupova su se međusobno su se približile. Slika 13. prikazuje raspodjelu naprezanja za svaki slučaj. Vrijednosti pomaka i naprezanja u svakom stupu prikazane su na slici 10., a varijacije u silama reakcije s pomakom u stupovima gdje dolazi do najvećeg pomaka prikazane su na slici 11. Minimalna sila reakcije pojavila se u napuknutom stupu u slučaju VII u usporedbi s drugim modelima s četiri stupa. Nasuprot tome, maksimalna sila reakcije dobivena je u odnosu na maksimalni pomak u slučaju II.

Kao što se na slici 12. može vidjeti iz vrijednosti pomaka koje su se tijekom vremena mijenjale, oštećenje stupa promijenilo je oblik pomaka. Pomak u slučajevima I i II, uključujući neoštećene slučajeve, bio je sličan gibanju vala, kao što je prikazano na slici 7., a vrijednosti u pojasu su ostale konstantne. Pri smanjenju modula elastičnosti u slučajevima III–VI, uočeno je prigušenje u pomaku. S povećanjem omjera oštećenja, frekvencija pomaka se smanjuje. Stoga je vrijeme analize u slučaju III, prikazanom na slici 12., održano dulje nego u ostalim slučajevima, a primijećeno je prigušenje pomaka. Međutim, za razliku od ostalih vrsta oštećenja, pomak nije bio prigušen u slučaju VII.

U ovom su radu također dobiveni rezultati protoka okoliša koji okružuje konstrukciju i rezultati konstrukcije. Pomaci konstrukcije koji se mijenjaju zbog kretanja i uzvišenja slobodne

površine vala u različitim vremenskim intervalima prikazani su na slici 15. Primjenom modela slobodne vodene površine razmatran je i utjecaj gibanja valova na nepromjenjivu razinu vode na konstrukciji. Da nije primijenjen CEL postupak, kretanje iznad nefluktirajuće razine vode bilo bi zanemareno.

Kao što je i očekivano, ovo je istraživanje pokazalo da su najkritičniji rezultati zabilježeni u slučaju II zbog ograničenog broja stupova. Osim toga, na brojčani i vizualni način otkriven je učinak različitih situacija oštećenja koje se mogu dogoditi na jednom stupu modela s četiri stupa i utjecati na ponašanje konstrukcije. Otkrivanje učinka prigušenja uzrokovanog smanjenjem modula elastičnosti na pomak konstrukcije, kao i

promjena u naprezanju, prirodnoj frekvenciji i ponašanju modela, također se može dodati ograničenjima ovog istraživanja. Predstavljanje ovih zaključaka pomoći će i proporcionalno i vizualno budućim istraživačima koji proučavaju slične objekte. Također je uključena usporedba dviju vrsta oštećenja koja se mogu pojaviti u jednom području. Uz različite modele oštećenja, kao što su pojava točkastih pukotina (engl. *pitting*) i smanjenje debljine stijenke, u budućim će se istraživanjima raspravljati o slučajevima oštećenja više od jednog područja. Osim toga, da bi se detaljno ispitali učinci na okoliš, teorije valova i učinak promjena u smjeru dolaska valova na oštećene konstrukcije, ostat će obveza budućih istraživanja.

LITERATURA

- [1] Zhang, P., Li, J., Gan, Y., Zhang, J., Qi X., Le, C., Ding, H.: Bearing capacity and load transfer of brace topological in offshore wind turbine jacket structure, *Ocean Engineering*, 199 (2020), doi: 10.1016/j.oceaneng.2020.107037.
- [2] Xie, Y., Huang, J., Li, X., Tian, X., Liu, G., Leng, D.: Experimental study on hydrodynamic characteristics of three truss-type legs of jack-up offshore platform, *Ocean Engineering*, 234 (2021). doi: 10.1016/j.oceaneng.2021.109305.
- [3] Zhu, B., Sun, C., Jahangiri, V.: Characterizing and mitigating ice-induced vibration of monopile offshore wind turbines, *Ocean Engineering*, 219 (2021). doi: 10.1016/j.oceaneng.2020.108406.
- [4] Dehghania, A., Aslani, F.: A review on defects in steel offshore structures and developed strengthening techniques, *Structures*, 20 (2019), pp. 635–657. doi: 10.1016/j.istruc.2019.06.002.
- [5] Asgarian, B., Shokrgozar, H.R.: A new bracing system for improvement of seismic performance of steel jacket type offshore platforms with float-over dec, *Petroleum Science*, 10 (2013), pp. 373–384. doi: 10.1007/s12182-013-0285-2.
- [6] Bao, X., Fan, T., Shi C., Yang, G.: One-dimensional convolutional neural network for damage detection of jacket-type offshore platforms, *Ocean Engineering* 219 (2021). doi: 10.1016/j.oceaneng.2020.108293.
- [7] Wang, S.: Damage detection in offshore platform structures from limited modal data, *Applied Ocean Research*, 41 (2013), pp. 48–56. doi: 10.1016/j.apor.2013.02.004.
- [8] Wang, S., Zhang, M., Li, H.: Damage localization of an offshore platform considering temperature variations, *Mathematical Problems in Engineering*, (2015), p. 954926. doi: 10.1155/2015/954926.
- [9] Gücüyen, E., Erdem, R.T.: Corrosion effects on structural behavior of jacket type offshore structures, *Građevinar*, 66 (2014) 11, pp. 981–986. doi: 10.14256/JCE.11262014.
- [10] Gücüyen, E.: Numerical analysis of deteriorated sub-sea pipelines under environmental loads, *Chinese Journal Of Mechanical Engineering*, 28 (2015) 6, pp. 1163–1170. doi: 10.3901/CJME.2015.0909.111.
- [11] Mazaheri, P., Asgarian, B., Gholami, H.: Assessment of strengthening, modification, and repair techniques for aging fixed offshore steel platforms, *Applied Ocean Research*, 110 (2021), 102612. doi: 10.1016/j.apor.2021.102612.
- [12] Mujeeb-Ahmed, M.P., Ince, S.T., Paik, J.K.: Computational models for the structural crashworthiness analysis of a fixed-type offshore platform in collisions with an offshore supply vessel, *Thin-Walled Structures*, 154 (2020), 106868. doi: 10.1016/j.tws.2020.106868.
- [13] 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. doi: 10.1016/S1570-7946(09)70114-2.
- [14] Leder, T. D., Leder, N., Hećimović, Z.: Split Metropolitan area surface temperature assessment with remote sensing method, *Građevinar*, 68 (2016) 11, pp. 895–905. doi: 10.14256/JCE.1661.2016.
- [15] Gücüyen, E., Erdem, R.T., Gökkuş, Ü.: FSI analysis of submarine outfall, *Brodogradnja/Shipbuilding*, 67 (2016) 2, pp. 67–80. doi: 10.21278/brod67205.
- [16] 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. doi: 10.1016/j.compfluid.2017.05.010.
- [17] 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. doi: 10.1016/j.jcp.2015.10.015.
- [18] Gücüyen, E., Yiğit, M.E., Erdem, R.T., Gökkuş, Ü.: Comparative analysis of tripod offshore structure, *Građevinar*, 72 (2020) 11, pp. 1021–1030. doi: 10.14256/JCE.2848.2019.
- [19] ABAQUS User's Manual, Version 6.12, SIMULIA, Dassault Systèmes Simulia Corp., 2015.
- [20] Jalbi, S., Nikitas, G., Bhattacharya, S., Alexander, N.: Dynamic design considerations for offshore wind turbine jackets supported on multiple foundations, *Marine Structures*, 67 (2019), 102631. doi: 10.1016/j.marstruc.2019.05.009.
- [21] Chakrabarti, S.: *Handbook of Offshore Engineering*, Elsevier Ltd, Illinois, USA, 2005.
- [22] Dyrbye, C., Hansen, S.O.: *Wind loads on structures*, John Wiley & Sons, Ltd. United Kingdom, 2004.
- [23] Barltrop, N.D.P., Adams, A.J.: *Dynamics of Fixed Marine Structures*, 3rd edition, Atkins Oil and Gas Engineering Limited, 1991.