

Primljen / Received: 13.11.2019.

Ispravljen / Corrected: 23.1.2020.

Prihvaćen / Accepted: 15.3.2020.

Dostupno online / Available online: 10.12.2020.

Usporedna analiza tronožne odobalne građevine

Autori:



Izv.prof.dr.sc. **Engin Gucuyen**, dipl.ing.građ.
Sveučilište Celal Bayar, Turska
Fakultet tehničkih znanosti
Odjel za građevinarstvo
engin.gucuyen@cbu.edu.tr



Dr.sc. **M. Ensar Yiğit**, dipl.ing.građ.
Sveučilište Celal Bayar, Turska
Fakultet tehničkih znanosti
Odjel za građevinarstvo
ensar.yigit@cbu.edu.tr



Izv.prof.dr.sc. **R. Tuğrul Erdem**, dipl.ing.građ.
Sveučilište Celal Bayar, Turska
Fakultet tehničkih znanosti
Odjel za građevinarstvo
tugrul.erdem@cbu.edu.tr
Autor za korespondenciju



Prof.dr.sc. **Ümit Gökkuş**, dipl.ing.građ.
Sveučilište Celal Bayar, Turska
Fakultet tehničkih znanosti
Odjel za građevinarstvo
umit.gokkus@cbu.edu.tr

Stručni rad

Engin Gucuyen, M. Ensar Yiğit, R. Tuğrul Erdem, Ümit Gökkuş

Usporedna analiza tronožne odobalne građevine

Pomorske se konstrukcije u današnje vrijeme koriste za razne namjene. U ovom se radu analizira odobalna građevina tronožnog tipa ukupne visine šezdeset metara. Uz opterećenja vezana za samo funkcioniranje, konstrukcija građevine podvrgnuta je i opterećenjima uslijed djelovanja vjetra i valova. Za proračun sile vjetra korišten je profil brzine prema europskoj normi, a za određivanje sile valova Airyeva brzina valova. Model je izrađen pomoću programa za analizu konačnih elemenata, a sastoji se od fluidnog i konstrukcijskog dijela. Interakcija između tih dijelova postignuta je kombiniranim Euler-Lagrangeovim postupkom (CEL).

Ključne riječi:

odobalne građevine, interakcija fluida i konstrukcije, analiza konačnih elemenata, kombinirani Euler-Lagrangeov postupak

Professional paper

Engin Gucuyen, M. Ensar Yiğit, R. Tuğrul Erdem, Ümit Gökkuş

Comparative analysis of tripod offshore structure

Marine structures are nowadays used in a variety of ways. The analysis of a tripod-type offshore structure sixty m in total height is performed in this study. In addition to operation-related loads, the structure is also under the effect of wind and wave loads. While the Eurocode velocity profile is used to calculate wind forces, the Airy wave velocity profile is utilized to determine wave forces. The model is created by a finite elements analysis program, and is composed of fluid and structural parts. The interaction of the parts is ensured by Coupled Eulerian Lagrangian (CEL) technique.

Key words:

offshore structures, fluid-structure interaction, finite element analysis, Coupled Eulerian Lagrangian technique

Fachbericht

Engin Gucuyen, M. Ensar Yiğit, R. Tuğrul Erdem, Ümit Gökkuş

Vergleichende Analyse einer dreibeinigen Offshore-Struktur

Maritime Strukturen werden heutzutage für verschiedene Zwecke genutzt. In dieser Arbeit wird eine dreibeinige Offshore-Struktur mit einer Gesamthöhe von 60 Metern analysiert. Zusätzlich zu den Belastungen, die sich auf die Funktionsweise selbst beziehen, ist die Struktur des Gebäudes auch Belastungen aufgrund der Einwirkung von Wind und Wellen ausgesetzt. Das Geschwindigkeitsprofil gemäß der europäischen Norm wurde verwendet, um die Windkraft zu berechnen, und die Wellengeschwindigkeit nach Airy wurde verwendet, um die Wellenkraft zu bestimmen. Das Modell wurde mit einem Finite-Elemente-Analyseprogramm erstellt und besteht aus einem Fluid- und einem Strukturteil. Die Wechselwirkung zwischen diesen Teilen wurde durch das kombinierte Euler-Lagrange-Verfahren (CEL) erreicht.

Schlüsselwörter:

Offshore-Strukturen, Fluid-Struktur-Wechselwirkung, Finite-Elemente-Analyse, kombiniertes Euler-Lagrange-Verfahren

1. Uvod

Potrebe za energijom rastu usporedo s porastom broja stanovnika u svijetu. Danas se grade odobalni objekti za opskrbu energijom i njeno pohranjivanje zbog smanjenja količina fosilnih goriva na kopnu i zbog sve veće cijene zemljišta. U današnje se vrijeme sve češće izvode odobalne građevine kojima se iskorištavaju čisti oblici energije kao što su energija valova i vjetra. Odobalne građevine također se koriste i za potrebe zračnog i pomorskog prometa.

U novije se vrijeme na odobalnim građevinama sve češće izvode vjetroagregati. Takve se građevine koriste bilo kao plutajući objekti ili kao objekti usidreni u morsko dno. S tehničkog stajališta, primjena plutajućih turbina popraćena je mnogim poteškoćama kao što su potreba za složenijom kontrolom lopatica zbog plutajućeg kretanja, veće opterećenje tornja, te složenost i visoka cijena montaže [1]. Iako su donji dio konstrukcije i temelji financijski povoljniji, turbina je ipak skuplja kod odobalnih vjetroelektrana pričvršćenih na dno. S druge strane, donji dio konstrukcije i temelji skuplji su kod plutajućih odobalnih vjetroelektrana. Može se dakle zaključiti da je ukupna razlika u cijeni između nepomičnih i plutajućih odobalnih vjetroelektrana prilično velika [2]. Postoje i neke dodatne poteškoće u vezi s projektiranjem, izvođenjem, montažom, kontrolom i upravljanjem plutajućih odobalnih vjetroagregata. Plutajuće konstrukcije podložne su negativnim utjecajima kao što su lomovi, povlačenje i uranjanje. Sustav sidrenja značajan je u smislu pozicioniranja plutajućih odobalnih vjetroagregata u morskom okruženju [3]. Industrija takvih odobalnih konstrukcija bori se s nedostatkom iskustva zbog malog broja građevina koje su zasad u upotrebi te zbog velikih razlika u načinu projektiranja platformi [4].

Stacionarne odobalne platforme mogu biti gravitacijske, jednopilotne, tronožne i okvirne [5]. Za tronožne temelje koriste se tri čelična cijevna pilota srednjeg promjera koji se postavljaju tako da čine istostranični trokut, čiji vrh nosi gornji tronožni dio rešetkaste konstrukcije. Montažno izvedena tronožna rešetka može izdržati jača opterećenja na tornju, te prenositi naprezanja na tri čelična pilota.

Osim sile valova, na tronožne odobalne konstrukcije mogu djelovati i druge prirodne pojave kao što su utjecaj vjetra, struja, leda i potresa [6]. Pri projektiranju se u obzir uzimaju samo opterećenja valovima, tj. opterećenja masivnim valovima ili uspinjanjem valova [7, 8]. Kombinirani utjecaj vjetra i valova izražen je u slučajevima kada se izvode visoke konstrukcije iznad razine vode. Kako su sile valova nestabilne a i destruktivnije su od sile vjetra, njima se pripisuje veća važnost u dinamičkoj analizi [10]. Sile valova izračunavaju se prema teoriji difrakcije [11] ili prema Morrisonovoj jednadžbi [12].

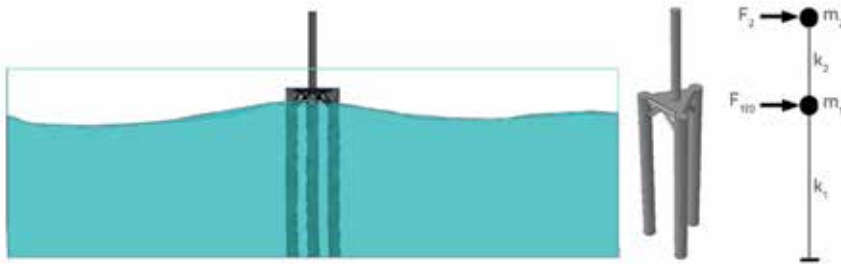
Jedna od metoda za određivanje dinamičkog ponašanja odobalnih konstrukcija jest analiza interakcije fluida i konstrukcije. Analiza je jednosmjerna kada se sila prenosi samo s fluida na konstrukciju. Međutim, kada se sila prenosi s fluida, a pomak se prenosi s konstrukcije, tada se smatra da je analiza

dvosmjerna. Za potrebe takvih analiza najčešće se primjenjuje metoda konačnih elemenata. Analiza interakcije fluida i konstrukcije podržana metodom konačnih elemenata može se provoditi pomoću samo Eulerove metode [13], ili pomoću samo Lagrangeove metode [14] ili pak pomoću proizvoljne Lagrange Eulerove metode (ALE) [15, 16] te kombinirane Euler-Lagrangeove metode (CEL) [17, 18] kada se primjenjuju obje metode. Za modeliranje interakcije obično se primjenjuje program Abaqus [19]. U analizama ALE i CEL, konstrukcija se modelira kao lagrangski dio, a fluid se modelira kao eulerski dio. Kako površina interakcije i popratne simulacije nisu definirane, te su metode pogodnije od metoda koje su ili Lagrangeove ili Eulerove. Osim toga, velike distorzije konstrukcijskih elemenata koje se javljaju u metodi ALE mogu dovesti do neprikladnih rezultata u programu [20]. Metodom CEL, koja je zapravo analiza konačnih elemenata za velike deformacije, izbjegavaju se nedostaci samo Lagrangeove ili samo Eulerove metode u programu, i to kroz primjenu eksplicitne sheme vremenske integracije [19]. CEL se sastoji od Eulerove proračunske mreže koja obuhvaća prostor u kojem struji eulerski materijal i ulazi u interakciju s lagrangskim dijelom. Kretanje fluida može se u CEL-u odrediti primjenom tradicionalnog Eulerovog opisa/mreže gdje je numerička rešetka fiksirana u prostoru u kojem voda prolazi kroz mrežu. S druge strane, inflatorna struktura se određuje kada se numeričke mreže kreću i deformiraju s materijalom u tradicionalnom Lagrangeovom opisu kretanja u Lagrangeovoj metodi [18, 21].

Prema relevantnoj literaturi, analitičke [22], numeričke [23] i eksperimentalne [24] metode danas se koriste za modeliranje dinamičkog ponašanja odobalnih konstrukcija na pilotima. U ovom se radu dinamičko ponašanje konstrukcija pod utjecajem vjetra i valova istražuje poluanalitičkim i numeričkim metodama. Poluanalitička metoda uključuje jednosmjernu interakciju između fluida i konstrukcije, a u numeričkoj analizi se koristi dvosmjerna interakcija. Pristup CEL se u numeričkoj metodi primjenjuje u okviru programa Abaqus. Konstrukcija se modelira Lagrangeovom metodom, a morska zona oko konstrukcije modelira se Eulerovom metodom. Nakon toga se konstrukcija modelira pomoću koncentriranih masa kao sustav s dva stupnja slobode. Vrijednosti pomaka i prirodne frekvencije dobivaju se numeričkim rješavanjem jednadžbe kretanja za sustav s dva stupnja slobode, a pritom se koristi Runge-Kuttaova metoda. Dakle, razlike između numeričkih i poluanalitičkih modela određene su u obliku pomaka i prirodnih frekvencija.

2. Okvirna konstrukcija i okolina

Slika 1. prikazuje numeričke i poluanalitičke modele konstrukcije. Na toj slici prikazana je konstrukcija koja predstavlja Lagrangeov model, ali i CEL model morske okoline tj. Eulerov model. Gornji dio konstrukcije sastoji se od krila, tribine i stupa koji nosi generator, a donji se dio konstrukcije sastoji od tri čelična pilota koji nose gornji dio. Piloti su međusobno povezani vertikalnim i dijagonalnim elementima.



Slika 1. Numerički i poluanalitički model

Visina donjeg dijela je 40 m, a visina u gornjem dijelu iznosi 20 m, pa tako ukupna visina konstrukcije iznosi 60 m. Promjer čeličnih pilota koji čine noge donjeg dijela konstrukcije iznosi 1,50 m s debljinom stijenke od 0,01 m. Promjer čeličnih potpornih elemenata iznosi 0,50 m, a debljina stijenke im je 0,005 m. Trideset pet metara donjeg dijela konstrukcije u kontaktu je s morem, a preostalih pet metara nalazi se iznad površine mora. Promjer čeličnog stupa na gornjem dijelu konstrukcije iznosi 1,50 m, s debljinom stijenke od 0,005 m. Međuosni razmak između stupova (b) iznosi 10 metara. Ukupna težina krila, turbine i generatora iznosi $4,00 \times 10^5$ kg, što je modelirano kao koncentrirana masa na vrhu stupa.

More oko konstrukcije modelirano je pomoću sila valova i vjetra. Za modeliranje valova korišten je profil brzina prema teoriji linearnih valova, a vjetar je modeliran profilom brzina prema europskoj normi. Profil brzina prema teoriji linearnih valova (u) prikazan je u izrazu (1).

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

H je visina vala, T je perioda vala, g je sila teža, L_W je dužina vala, d je dubina vode, t je vrijeme, a x i y su horizontalne i vertikalne pozicije u jednadžbi. U ovom su radu za okolno more usvojeni sljedeći elementi: $d = 35$ m, $T = 6$ s i $H = 4$ m. Dužina vala ($L_W = 56,20$ m) izračunana je na temelju tih vrijednosti. Jednadžba (1) u numeričkoj se analizi koristi kao jednadžba početne brzine vala. S druge strane, izrazi (1) i (2) u poluanalitičkoj se analizi koriste za izračunavanje sile valova. Ubrzanje valova (\dot{u}) definirano je u izrazom (2):

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

Morrisonov izraz (3) koristi se za izračunavanje sila valova koji djeluju na konstrukciju. Prema toj jednadžbi, ukupna horizontalna sila valova (F_1) izračunava se kao suma sila otpora oblika (F_D) i inercije (F_I).

$$F_1 = F_D + F_I = \int_{-d}^{\eta} \frac{1}{2} \rho_w C_D D u(y,t) |u(y,t)| dy + \int_{-d}^{\eta} \rho_w C_M \frac{\pi D^2}{4} \dot{u}(y,t) dy \quad (3)$$

U izrazu (3), ρ_w označava gustoću slane vode, D promjer, a η je udaljenost od slobodne površine do razine mirne vode. C_D i C_M su koeficijent otpora oblika i koeficijent inercije, a njihove numeričke vrijednosti su $C_D = 0,7$ tj. $C_M = 2,0$. Sila valova koja se dobiva iz izraza (3) o vremenu je ovisna vanjska sila koja služi u analizi jednosmjernje interakcije između fluida i konstrukcije. Druga vanjska sila je o vremenu neovisna sila vjetra. Profil

brzina (u_a) prema europskoj normi za modeliranje vjetra prikazan je u izrazu (4) [25].

$$u_a = U_{BAS} k_t \ln(y/z_0) \quad (4)$$

U_{BAS} je brzina vjetra (24 m/s), k_t je faktor terena (0,17), a z_0 predstavlja dužinu hrapavosti (0,01) u izrazu (4). Odnos između brzine vjetra i opterećenja građevine vjetrom prikazan je u izrazu (5):

$$F_2 = \int_{\eta}^{L-\eta} \frac{1}{2} \rho_a u_a^2(y) C_s A(y) dy \quad (5)$$

U izrazu (5), A je poprečni presjek elementa, ρ_a je gustoća zraka a C_s predstavlja koeficijent oblika koji iznosi 0,50 za cilindrične elemente, tj. 2,0 za pravokutne elemente [25]. Sila vjetra, koja je definirana u izrazu (5), u obje se analize odnosi na vršnu točku konstrukcije.

3. Analize

Analize se opisuju u dvije zasebne podtočke, tj. u podtočki 3.1 Kombinirana Euler-Lagrangeova (CEL) analiza i u podtočki 3.2 Poluanalitička analiza.

3.1. Kombinirana Euler-Lagrangeova (CEL) analiza

Analize interakcije između fluida i konstrukcije često se provode kako bi se odredilo ponašanje odobalnih konstrukcija kada su podvrgnute djelovanju vanjskih sila. U takvim se analizama najčešće primjenjuje metoda konačnih elemenata. U numeričkom dijelu ovog rada provodi se analiza interakcije između fluida i konstrukcije pomoću programa Abaqus koji se koristi za analize konačnih elemenata. U analizi konačnih elemenata konstrukcija se modelira primjenom Lagrangeovog postupka, a fluid se modelira pomoću Eulerovog pristupa. U analizi se koristi postupak CEL. U provedbi analize konačnih elemenata, u programu se koristi kombinacija Euler-Lagrangeovog pristupa, tj. metoda CEL, a pritom se primjenjuju izrazi prikazani u nastavku. Izrazi (6) do (8) su izrazi očuvanja mase, količine gibanja i energije.

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot v = 0 \tag{6}$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \nabla \cdot \sigma + \rho b \tag{7}$$

$$\frac{DE}{Dt} = \nabla \cdot (\sigma \cdot v) + \rho b \cdot v \tag{8}$$

gdje su:
 v - brzina,
 ρ - gustoća,
 σ - Cauchyjevo naprezanje,
 b - masena sila,
 E - ukupna energija po jedinici obujma.

Lagrangeove jednadžbe očuvanja pretvorene su u eulerove prema izrazu (9). Eulerove jednadžbe imaju opći oblik očuvanja koji je prikazan u jednadžbi (10), a φ je odabrana varijabla rješenja.

$$\frac{D\phi}{Dt} = \frac{\partial \phi}{\partial t} + v \cdot (\nabla \phi) \tag{9}$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla \cdot \Phi = S \tag{10}$$

U izrazu (10), Φ je funkcija toka, a S član ponora/izvora. Ta se jednadžba može prikazati i kao dvije zasebne jednadžbe, kako slijedi u izrazima (11) i (12):

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = S \tag{11}$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla \cdot \Phi = 0 \tag{12}$$

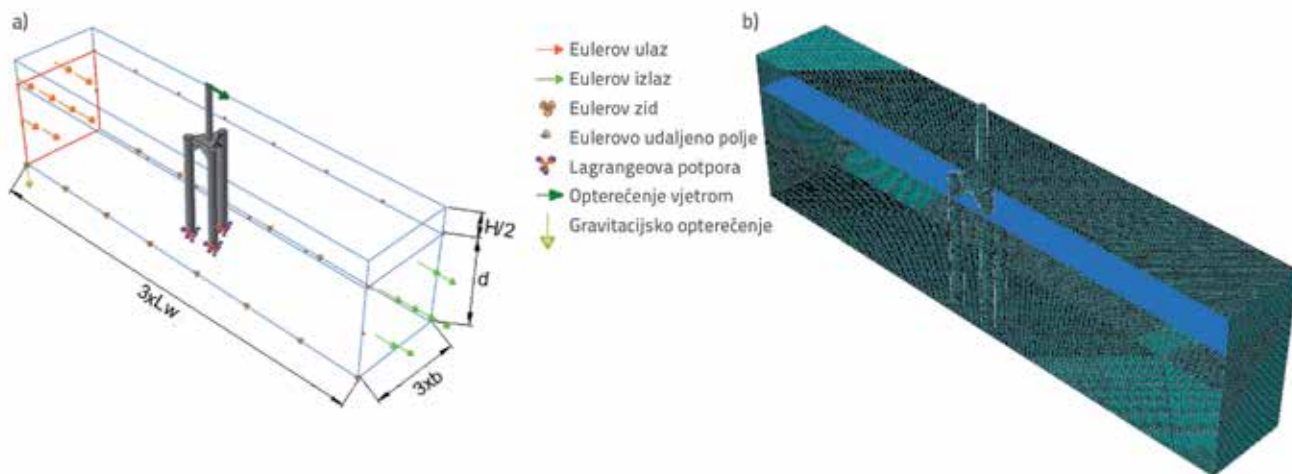
Kada se na fiksnoj mreži derivacija položaja u vremenu zamijeni s materijalnom (substancijalnom) derivacijom, tada se izraz (11) podudara sa standardnom Lagrangeovom formulacijom. Deformirana se mreža pomiče do početne fiksne mreže, a

obujam materijala prenesenog između susjednih elemenata treba se izračunati iz izraza (12). Parametri kao što su masa, energija, količina gibanja i naprezanje iz Lagrangeovog rješenja objašnjavaju se za protok materijala između susjednih elemenata putem transportnog algoritama. Uz ovo objašnjenje, detaljnije informacije o formulaciji CEL mogu se naći u [26, 27]. Postupak CEL djelotvoran je za rješavanje problema interakcije između fluida i konstrukcije, uključujući i ekstremne deformacije i strujanje fluida. Interakcija između dvije domene diskretizirana je pomoću općeg algoritma kontaktnih ploha i primjenom metode kontaktne penalizacije. Problemi distorzije mreže u vremenskim intervalima Lagrangeovih i Eulerovih faza mogu se jednostavno analizirati pomoću metode CEL. Uzima se da su čvorovi fiksni a fluid nestacionaran, te se elementi deformiraju s fluidom u Lagrangeovoj fazi. Koristi se tolerancija kako bi se definirali elementi koji su u velikoj mjeri deformirani nakon Lagrangeove faze. S druge strane, deformacija se zanemaruje i elementi s izuzetnom deformacijom ponovo se umrežavaju u Eulerovoj fazi [19, 28].

3.1.1. Primjena CEL-a za okvirne konstrukcije

Analiza dvosmjerne interakcije između fluida i konstrukcije u ovom je radu provedena pomoću metode CEL. Eulerski je dio formiran sa zadavanjem i bez zadavanja materijala. Slika 2. prikazuje dimenzije, granične uvjete i strukturu mreže modela konačnih elemenata. Osnovne dimenzije numeričkog modela su 30 x 170 m. Širina modela konačnih elemenata određena je kao 3 x udaljenost između stupova (3 x b), a dužina modela iznosi tri valne dužine (3 x Lw). Osim toga, vrijednost visine jednaka je sumi dubine vode (d) i polovice visine vala (H/2).

Metoda CEL podržava više materijala sa šupljinama u elementu. Eulerske frakcije obujma (eng. *Eulerian Volume Fractions* - EVF), koje označavaju ispunjenost materijala eulerskim elementima, koriste se za praćenje toka materijala (fluida-vode) u mreži. Kada je element ispunjen vodom, EVF je jednak broju jedan. Međutim, EVF je nula kada u elementu nema vode. Nakon konstituiranja eulerskog dijela i lagrangskog dijela, tim se dijelovima pripisuju odgovarajući materijali. U modelu



Slika 2. a) Granični uvjeti i dimenzije; b) Konfiguracija mreže

konstrukcije koriste se karakteristike čeličnog materijala dok se karakteristike morske vode koriste u modeliranju morske okoline. Morska je voda u programu definirana kao EOS materijal. Svojstva materijala korištenih u modelu konačnih elemenata prikazana su u tablici 1.

Tablica 1. Svojstva materijala za eulerski dio i lagrangski dio

Lagrangsko svojstvo (čelik)		Eulersko svojstvo (slana voda)	
Gustoća [kg/m ³]	7850	Gustoća [kg/m ³]	1025
Modul elastičnosti [N/m ²]	2,1 × 10 ¹¹	Dinamička viskoznost [Ns/m ²]	1,50 × 10 ⁻³
Poissonov koeficijent	0,3	Brzina zvuka u vodi [m/s]	1560

Opterećenje i rubni uvjeti koji se koriste u analizi određuju se nakon što se u modelu zadaju svojstva materijala. Smjer tečenja eulerskog dijela prikazan je na slici 2.a. Profil brzine prema teoriji linearnih valova, prikazan u jednadžbi 1, definiran je na ulaznoj površini. Parametri isti kao i oni za ulaznu površinu pripisuju se i udaljenim poljima. S druge strane, za izlaznu površinu ništa nije definirano te parametre određuje sam program.

Definiranje proračunske mreže zadnji je korak u modeliranju konačnih elemenata. Struktura mreže eulerskog dijela i lagrangskog dijela prikazana je na slici 2.b. U lagrangskom dijelu koristi se dvostruko zakrivljena tanka ili debela ljuska s četiri čvora, smanjena integracija, kontrola efekta pješčanog sata (engl. *hourglass control*) te elementi deformacije konačne membrane (S4R). U eulerskom se dijelu koristi linearni Eulerov blok, smanjena integracija i kontrola efekta pješčanog sata (EC3D8R).

Modeli su podijeljeni u čvorove kako bi se pojednostavnile složene analize, tj. kako bi se omogućila analiza složenih modela pomoću programa za analizu konačnih elemenata. U lagrangskom dijelu, udaljenost između čvorova iznosi 0,01 m. U eulerskom dijelu, ta udaljenost iznosi 0,50 m. Ukupan model konačnih elemenata sastavljen je od 154446 čvorova i 1555456 elemenata u lagrangskom dijelu, tj. od 2073981 čvora i 2016000 elemenata u eulerskom dijelu.

Jednadžba gibanja za strukturu koju program konačnih elemenata koristi za utjecaj vanjskih sila (F) može se izraziti kako slijedi u izrazu (13):

$$m^{NJ} \ddot{X}_t^N = (F^J + I^J)_t \quad (13)$$

U izrazu (13) m^N je matrica mase, F^J je vektor vanjskog opterećenja prenesenog s eulerskog dijela, I^J je vektor unutarnjih sila koje se javljaju zbog unutarnjih naprezanja elemenata, a \ddot{X} simbolizira ubrzanje. I^J dobiva se iz pojedinačnih elemenata tako da se ne treba formirati matrica globalne krutosti. Kombinirane

Euler-Lagrangeove analize mogu se provesti samo u dinamičkim eksplicitnim koracima [19]. Pravilo o eksplicitnoj integraciji primijenjeno u sljedećim jednadžbama primjenjuje se za dobivanje pomaka koji se prenose s konstrukcije na fluid.

$$\dot{X}_{(i+\frac{1}{2})}^N = \ddot{X}_{(i-\frac{1}{2})}^N + \frac{\Delta t_{(i+1)} + \Delta t_{(i)}}{2} \ddot{X}_{(i)}^N \quad (14)$$

$$X_{(i+1)}^N = X_{(i)}^N + \Delta t_{(i+1)} \dot{X}_{(i+\frac{1}{2})}^N \quad (15)$$

X^N je stupanj slobode komponente pomaka, a indeks i je broj povećanja eksplicitnih dinamičkih koraka. Operator za integriranje središnje razlike eksplicitan je u odnosu na napredovanje kinetičkog stanja prema dobro poznatim vrijednostima $X_{(i-\frac{1}{2})}^N$ i $\dot{X}_{(i-\frac{1}{2})}^N$ koje su preuzete iz prethodnog pomaka. Ubrzanja u čvorovima određuju se prema jednadžbi (16) kako slijedi:

$$\ddot{X}_{(i)}^N = (m^{NJ})^{-1} (F_i^J - I_i^J) \quad (16)$$

U spomenutoj metodi, iteracije nisu potrebne za ažuriranje vrijednosti pomaka, brzine i ubrzanja. Osim eksplicitne analize, istovremeno se provode i modalne analize kako bi se odredile prirodne frekvencije. Konačni element modela prikazan je pomoću matrica u jednadžbi (17). Za rješavanje matrica koristi se Lanczosova metoda [19] u kojoj je λ kvadrat prirodne frekvencije [29].

$$[k]\{X\} - \lambda[m]\{X\} = 0 \quad (17)$$

3.2. Poluanalitička analiza

Numerička analiza i poluanalitička analiza istovremeno se razmatraju u ovom dijelu rada. Vrijednosti pomaka i prirodne frekvencije dobivene na temelju numeričke analize uspoređuju se s rezultatima poluanalitičke analize. Konstrukcija je idealizirana kao toranj koncentriranih masa. Sile koje djeluju na konstrukciju, ne uključujući model fluida, nanose se na reducirani sustav. Ovaj model i točke nanošenja sile prikazani su na slici 1. Ukupne mase u pojedinim katovima postavljene su u odgovarajuće točke kao koncentrirane mase. U izrazu (18) provodi se analiza sustava s dva stupnja slobode na koji djeluju sile okoline:

$$m\ddot{X} + c\dot{X} + kX = F \quad (18)$$

Jednadžba (18) koristi se za izračunavanje vrijednosti pomaka i prirodne frekvencije modela s dva stupnja slobode. Provedena je transformacija koordinata iz jednadžbe (19) u jednadžbu (18) te je na kraju dobivena jednadžba (20). Za transformaciju koordinata korištena je matrica modalnog oblika $[\phi]$, određena na temelju oblika konstrukcije.

$$\{X\} = \{\phi\}\{\xi\} \tag{19}$$

$$[\phi]^T[M] \{\phi\}\ddot{X} + [\phi]^T[C] \{\phi\}\dot{X} + [\phi]^T[K] \{\phi\}X = \tag{20}$$

$$= [\phi]^T\{F(t)\}$$

Jednadžba se rješava prema sljedećim početnim uvjetima, a u skladu s Runge–Kuttaovom metodom kako bi se dobili pomaci u točkama.

$$\xi_{1(0)} = \xi_{2(0)} = \dot{\xi}_{1(0)} = \dot{\xi}_{2(0)} \tag{21}$$

U nastavku je opisana Runge–Kuttaova metoda koja se koristi za ocjenjivanje jednostavnih odnosa na početku, u sredini i na kraju ukupnih vremenskih koraka (Δt) [30].

$$\ddot{X}_{(t)} = m^{-1}(F_{(t)} - c\dot{X}_{(t)} - kX_{(t)})\dot{X}_{t+\Delta t} \tag{22}$$

$$= \dot{X}_t + \ddot{X}_{t+\Delta t} \cdot X_{t+\Delta t} = X_t + \dot{X}_{t+\Delta t}$$

Uz pomake, u jednadžbi (23) određuje se i prirodna frekvencija konstrukcije (ω).

$$[K] - \omega^2[m] = 0 \tag{23}$$

Prirodna frekvencija prigušenog sustava uvijek je niža od prirodne frekvencije neprigušenog sustava. Osim toga, vrijednost frekvencije smanjuje se s povećanjem koeficijenta prigušenja. Vrijednost prigušene frekvencije sustava izračunava se pomoću koeficijenta prigušenja (ξ) prema izrazu (24).

$$\omega_d = \omega\sqrt{1-\xi^2} \tag{24}$$

3.2.1. Primjena poluanalitičke analize za okvirnu konstrukciju

Vrijednosti mase, prigušenja i krutosti prvog kata, koje služe za definiranje matrica mase, prigušenja i krutost iznose $m_1 = 55,05 \times 10^3$ kg, $c_1 = 11,65 \times 10^3$ Ns/m i $k_1 = 2060,97 \times 10^3$ N/m. Vrijednosti mase, prigušenja i krutosti drugog kata iznose $m_2 = 44,52 \times 10^3$ kg, $c_2 = 6,08 \times 10^3$ Ns/m i $k_2 = 519,12 \times 10^3$ N/m. Vrijednosti mase, prigušenja i krutosti utemeljene na definiranim vrijednostima iskazane su u jednadžbama (25-27). Za potrebe ovog istraživanja usvojeno je da koeficijent prigušenja (ξ) iznosi 0,02 [31].

$$m = \begin{bmatrix} 55.05 \times 10^3 & 0 \\ 0 & 44.52 \times 10^3 \end{bmatrix} \tag{25}$$

$$c = \begin{bmatrix} 17.73 \times 10^3 & -6.08 \times 10^3 \\ -6.08 \times 10^3 & 6.08 \times 10^3 \end{bmatrix} \tag{26}$$

$$k = \begin{bmatrix} 2060.97 \times 10^3 & -519.12 \times 10^3 \\ -519.12 \times 10^3 & 519.12 \times 10^3 \end{bmatrix} \tag{27}$$

Osim toga, matrica modalnog oblika pretvorena je u matricni oblik kako slijedi.

$$\phi = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 3.12 & -0.39 \end{bmatrix} \tag{28}$$

Pojedinačna ukupna opterećenja koncentrirana u čvorovima izračunavaju se integriranjem u odgovarajuće elemente konstrukcije. Ukupna sila valova ($F_{1(t)}$) dodijeljena je točki 1. Sile valova koje djeluju na pilote, horizontalne potpore i dijagonale na prvom katu konstrukcije označene su kao $F_1(t)$ a izračunavaju se pojedinačno prema jednadžbi (3). Izračunana sila vjetra (F_2) koja utječe na model iznosi $F_2 = 218701$ N za toranj u drugoj točki (jednadžba 5). Sile vjetra i valova predstavljaju vanjske sile i uvrštene su u desnu stranu jednadžbe kretanja. Jednadžbe (24-26) uvrštene su u jednadžbu gibanja (13), a time je omogućeno njeno rješavanje. Poluanalitička metoda i metoda konačnih elemenata provedene su u vremenu od deset perioda valova, tj. u vremenu od 60 sekundi, u koracima od po (Δt) 0,01s.

4. Rezultati

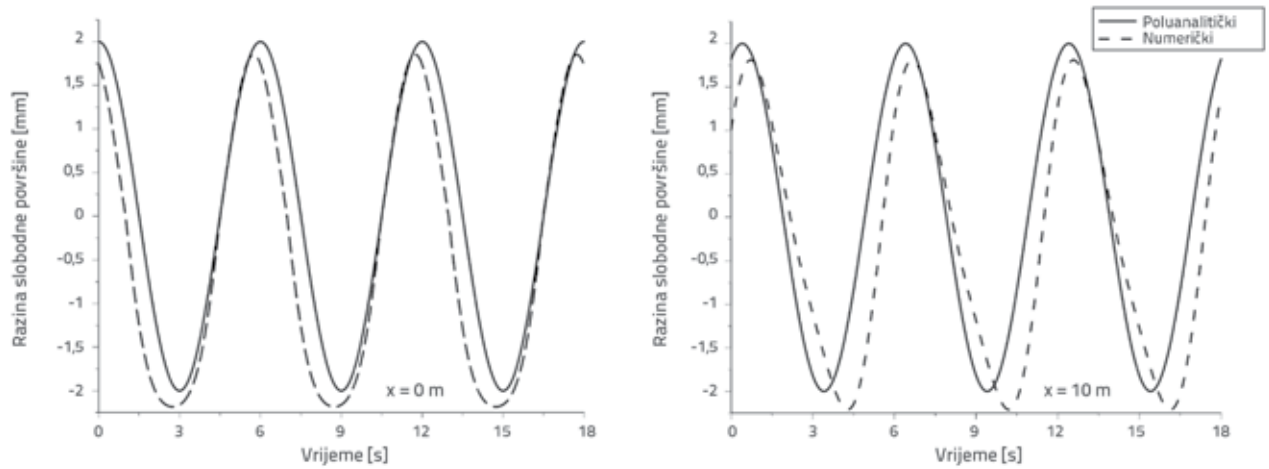
U ovom dijelu rada daje se usporedni prikaz vrijednosti razine slobodne površine, pomaka i frekvencije koje su dobivene na temelju raznih analiza. Prikazani su i programom određeni modalni oblici i rasporedi naprezanja.

Vremenske varijacije razine slobodne površine prikazane su za razne položaje na slici 3. Na toj su slici također prikazane vrijednosti dobivene za dvije različite lokacije, prema veličini numeričkog modela.

Razina slobodne površine analitički dobivena za položaj $x = 0$ oscilira između -2,00 do +2,00. Numerička vrijednost za isti položaj varira od -2,18 do +1,85. S druge strane, analitički

Tablica 2. Vrijednosti prirodne frekvencije i pomaka

Analiza	Prirodna frekvencija [rad/s]		Maksimalni pomak [m]	
	ω_{d1}	ω_{d2}	X_1	X_2
Numerička	2,5692	5,4821	0,3789	0,5912
Poluanalitička	2,8159	6,4146	0,4247	0,6813



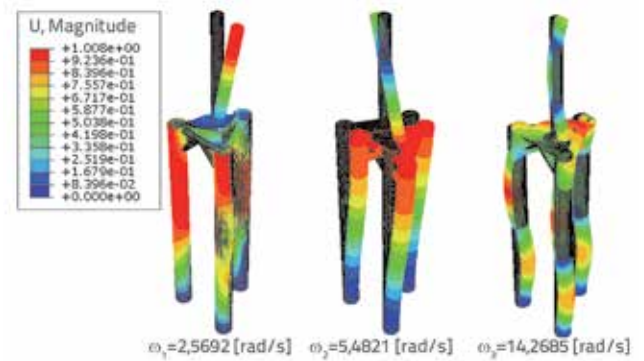
Slika 3. Razine slobodnih površina

izražena oscilacija za $x = 60$ m varira od $-2,00$ do $+2,00$ a numerički iskaz oscilacije za isti položaj iznosi od $-2,12$ do $+1,81$. Maksimalna razlika između analitičkih i numeričkih rezultata iznosi 9,75 %.

Modalni oblici konstrukcije i odgovarajuće vrijednosti prirodne frekvencije dobiveni su numeričkom analizom. Rezultati su prikazani na slici 4.

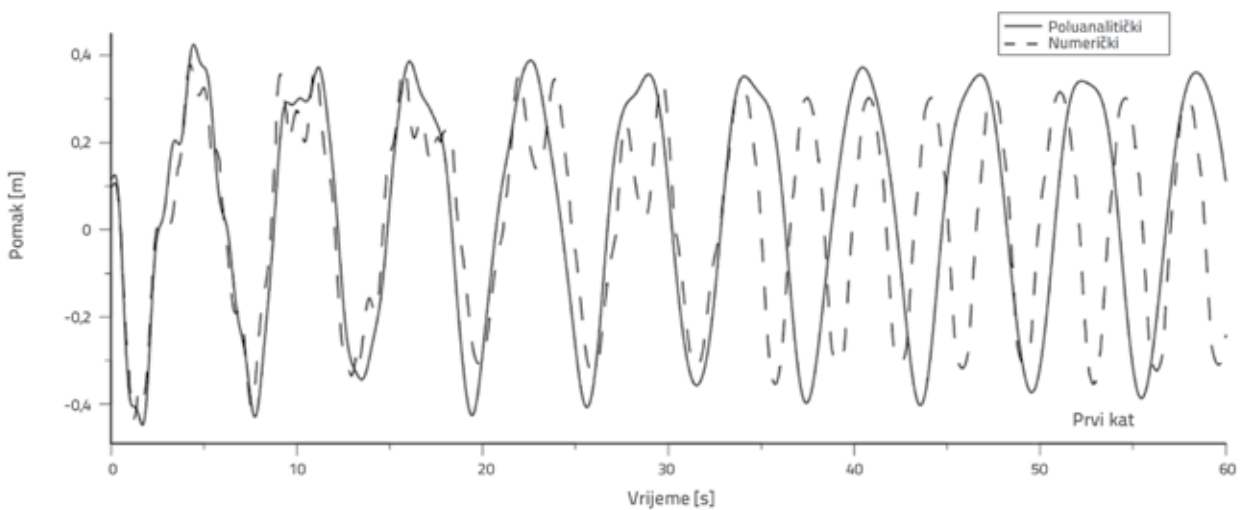
Vrijednosti prirodne frekvencije dobivene numeričkom analizom također su određene pomoću jednadžbe (24). Prva prirodna frekvencija sustava s dva stupnja slobode iznosi $2,8159$ rad/s, a vrijednost druge prirodne frekvencije iznosi $6,4146$ rad/s. Može se uočiti da razlika između tih dviju vrsta analize varira od 12,08 % do 15,24 %. Vrijednosti prirodne frekvencije modalnih oblika prikazane su u tablici 2.

O vremenu ovisni pomaci iskazani u tablici 2. prikazani su na slici 5. Razlika između pomaka u prvoj točki iznosi 9,68 % a razlika u drugoj točki iznosi 14,58 %. Definirano je i strujanje oko konstrukcije i to zajedno s rezultatima za konstrukciju.

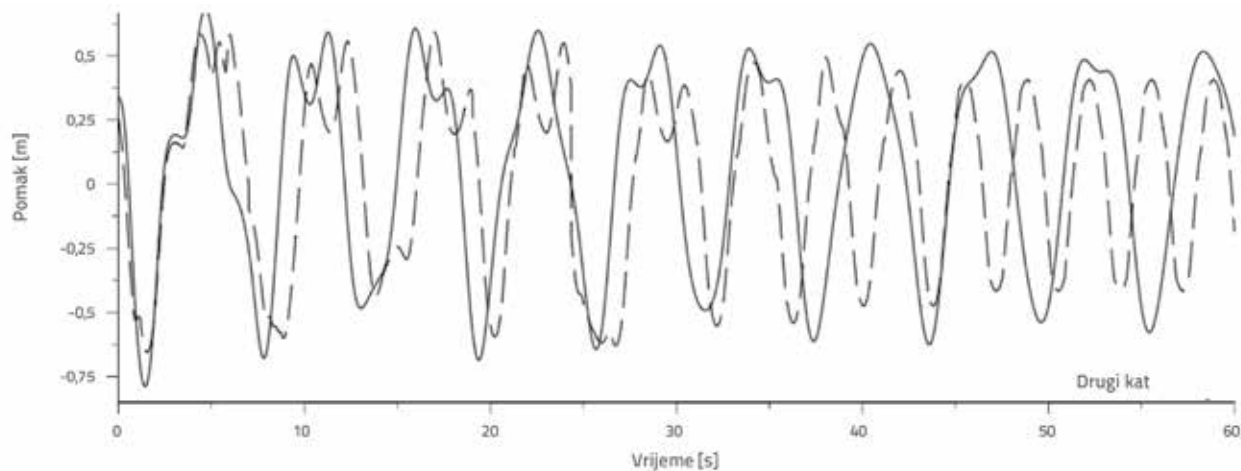


Slika 4. Modalni oblici i odgovarajuće prirodne frekvencije konstrukcije

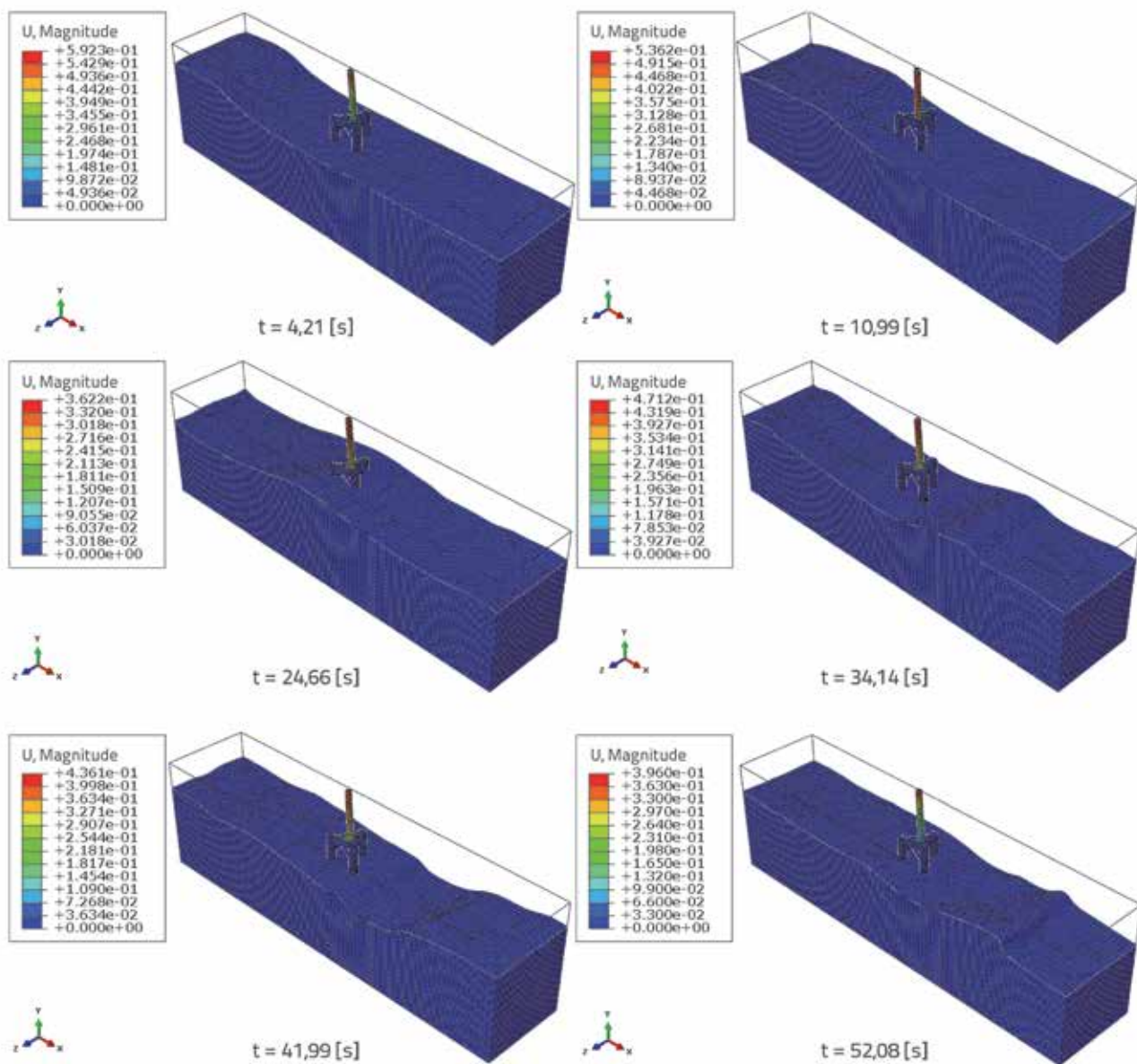
Pomak konstrukcije koji varira ovisno o kretanju valova i visinama slobodne površine valova prikazan je na slici 6. za različita vremenska razdoblja.



Slika 5. a) Vrijednosti pomaka u različitim vremenskim intervalima (prvi kat)



Slika 5. b) Vrijednosti pomaka u različitim vremenskim intervalima (drugi kat)



Slika 6. Povezivanje fluida i konstrukcije

5. Zaključak

U ovom je radu provedena analiza interakcije fluida i konstrukcije odobalnog vjetroagregata. U istraživanju su korištene dvije vrste analiza. Najprije je izvršena provjera numeričkog modela kroz razinu slobodne površine. Kretanje na razini slobodne površine, modelirano pristupom CEL, iskazano je i numeričkim postupkom. Nakon toga je kretanje određeno analitički pomoću jednadžbe razine slobodne površine, a na temelju linearne teorije valova. Prikazani su rezultati analize razine slobodne površine. Podudarnost dinamike razina slobodne površine definirana je numeričkim putem i vizualno. Tijekom određivanja podudarnosti dinamike razina slobodnih površina, formiran je isključivo model valova, tj. konstrukcija nije uzeta u obzir. Naime, usporedba s analitičkom metodom ne bi bila pouzdana jer bi se, u slučaju uključivanja konstrukcije, poremetila struktura toka.

Rezultati prirodne frekvencije analizirani su nakon provjere dinamike slobodnih površina. Dobivene su vrijednosti frekvencije za prva dva oblika. Prikazani su odgovarajući modalni oblici. Tijekom analize modalnih oblika utvrđeno je da je samo treći oblik torzijskog tipa. Može se uočiti dobra podudarnost vrijednosti prirodnih frekvencija dobivenih numeričkim i poluanalitičkim postupcima.

Na slikama su prikazani vremenski pomaci dobiveni primjenom dviju različitih analiza. U tablicama su prikazane maksimalne vrijednosti pomaka točkaka. Kao što se moglo i očekivati, maksimalne vrijednosti pomaka dobivene su u vršnoj točki. Ustanovljeno je da su vrijednosti pomaka u vremenu dobivene primjenom dviju različitih analiza međusobno kompatibilne te da te vrijednosti predstavljaju utjecaj kretanja valova na konstrukciju. Iskazana je i promjena kretanja konstrukcije uslijed kretanja valova. Utvrđena je podudarnost između konstrukcije i perioda valova.

Sile valova izračunane programom za analizu konačnih elemenata prebačene su na konstrukciju primjenom postupka CEL, nakon čega je proveden statički proračun. Na kraju je

utvrđena preciznost poluanalitičkih analiza i analiza pomoću konačnih elemenata. S obzirom na to da, zbog povećanja broja čvorova i elemenata, složenost analize konačnih elemenata raste usporedo s povećanjem visine konstrukcije, poluanalitičke se analize mogu provoditi kao alternativna metoda kada izlazni podaci o fluidu nisu potrebni.

Postupak CEL prikazan u ovom radu omogućuje određivanje interakcije između fluida i konstrukcije preko jednog kontakta. Ako se isti fizikalni problem rješava samo Lagrangeovom metodom umjesto kombinacijom Eulerove i Lagrangeove metode, tada su u isto vrijeme potrebna dva različita kontakta. Jedan kontakt odnosi se na model fluida, a drugi na model konstrukcije. Interakcija između površina se u tom slučaju postiže pomoću kontaktnih površina. Zato se u odgovarajućim područjima treba uspostaviti gušća mreža. U toj se situaciji u analizi također treba povećati potreban broj čvorova i elemenata. Zbog toga su veličine mreža koje se analiziraju u lagrangskom i eulerskom dijelu različite. Rezultati prikazani na slici 3. upućuju na podudarnost veličina mreža korištenih u analizama. U programu za analizu konačnih elemenata, kontaktne se površine definiraju kao kosimulacijski rubni uvjeti. Na taj se način zasebno prenose sile s fluida na konstrukciju te pomaci s konstrukcije na fluid. U analizama CEL nije potrebno definirati kontaktne površine i interakciju jer se analize provode kroz samo jedan kontakt. Taj se kontakt dobiva definiranjem penalizirajućeg kontakta.

Primjena različitih kontakata i povećanje broja čvorova i elemenata dovodi do većih zahtjeva u pogledu računalne memorije. Time se produžuje i vrijeme analize. Zbog toga bi se za rješavanje sličnih problema interakcije između fluida i konstrukcije prednost mogla dati zajedničkoj primjeni Eulerove i Lagrangeove metode. Također je poznato da se kod interakcija povezanih s velikim deformacijama pouzdaniji rezultati postižu ako se za njihovo rješavanje koristi kombinacija Eulerove i Lagrangeove metode. Smatra se da bi rezultati ovog rada mogli biti korisni u budućim istraživanjima utjecaja teorije valova na ponašanje konstrukcije.

LITERATURA

- [1] Tran, T.T., Kim, D.H.: The coupled dynamic response computation for a semi-submersible platform of floating offshore wind turbine, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 147 (2015), pp. 104-119.
- [2] Wu, X., Hu, Y., Li, Y., Yang, J., Duan, L., Wang, T., Adcock, T., Jiang, Z., Gao, Z., Lin, Z., Borthwick, A., Liao, S.: Foundations of offshore wind turbines: A review, *Renewable Energy*, 104 (2019), pp. 379-393.
- [3] Ishihara, T., Zhang, S.: Prediction of dynamic response of semi-submersible floating offshore wind turbine using augmented Morison's equation with frequency dependent hydrodynamic coefficients, *Renewable Energy*, 131 (2019), pp. 1186-1207.
- [4] Uzunoglu, E., Soares, C.G.: A system for the hydrodynamic design of tension leg platforms of floating wind turbines, *Ocean Engineering*, 171 (2019), pp. 78-92.
- [5] Shi, W., Han, J., Kim, C., Lee, D., Shin, H., Park, H.: Feasibility study of offshore wind turbine substructures for southwest offshore wind farm project in Korea, *Renewable Energy*, 74 (2015), pp. 406-413.
- [6] Ma, H., Yang, J., Chen, L.: Effect of scour on the structural response of an offshore wind turbine supported on tripod foundation, *Applied Ocean Research*, 73 (2018), pp. 179-189.
- [7] Chella, M.A., Bihs, H., Myrhaug, D.: Wave impact pressure and kinematics due to breaking wave impingement on a monopole, *Journal of Fluids and Structures*, 86 (2019), pp. 94-123.
- [8] Lin, Y.H., Chen, J.F., Lu, P.Y.: A CFD model for simulating wave run-ups and wave loads in case of different wind turbine foundations influenced by nonlinear waves, *Ocean Engineering*, 129 (2017), pp. 428-440.

- [9] Ma, P., Liu, R., Lian, J., Zhu, B.: An investigation into the lateral loading response of shallow bucket foundations for offshore wind turbines through centrifuge modelling in sand, *Applied Ocean Research*, 87 (2019), pp.192-203.
- [10] Li, M., Zhang, H., Guan, H.: Study of offshore monopile behaviour due to ocean waves, *Ocean Engineering*, 38 (2011) 17-18, pp. 1946-1956.
- [11] Luengo, J., Negrob, V., García-Barba, J., Lopez-Gutierrez, J.S., Esteban, M.D.: New detected uncertainties in the design of foundations for offshore wind turbines, *Renewable Energy*, 131 (2019), pp. 667-677.
- [12] Lupieri, G., Contento, G.: A numerical study on the viscous effects of waves travelling past a weakly submerged cylinder, *Brodogradnja/Shipbuilding*, 67 (2017) 4, pp. 61-79.
- [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 (2019), pp. 683-688.
- [14] Gücüyen, E., Erdem, R.T., Gökkuş, Ü.: FSI analysis of submarine outfall, *Brodogradnja/Shipbuilding*, 67 (2016) 2, pp. 67-80.
- [15] 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.
- [16] Hao, W., Yuan-Sheng, C., Da-Ming, P., Wei-Wei, H., Lin, G.: Water entry hydroelasticity analysis of lattice sandwich panel with imperfection: simulation and engineering model, *Brodogradnja/Shipbuilding*, 70 (2019) 2, pp. 33-59.
- [17] Kreuzer, E., Solowjow, E., Qiu, G., Hamann, T., Grabe, J.: *Leg-Seabed Interactions of Jack-Up Vessels Due to Motions in Irregular Waves*, ASME 33rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE), San Francisco, 2014.
- [18] Aboshio, A., Ye, J.: Numerical study of the dynamic response of inflatable offshore fender barrier structures using the Coupled Eulerian–Lagrangian discretization technique, *Ocean Engineering*, 112 (2016), pp. 265-276.
- [19] ABAQUS User's Manual, Version 6.12, SIMULIA, Dassault Systèmes Simulia Corp., 2015.
- [20] 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.
- [21] Ducobu, F., Riviere-Lorphevre, E., Filippi, E.: Application of the Coupled Eulerian-Lagrangian (CEL) method to the modelling of orthogonal cutting, *European Journal of Mechanics A/Solids*, 59 (2016), pp. 58-66.
- [22] 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.
- [23] Hao, E., Liu, C.: Evaluation and comparison of anti-impact performance to offshore wind turbine foundations: Monopile, tripod, and jacket, *Ocean Engineering*, 130 (2017), pp. 218-227.
- [24] Luczak, M.M., Telega, J., Zagato, N., Mucchi, E.: On the damage detection of a laboratory scale model of a tripod supporting structure by vibration-based methods, *Marine Structures*, 64 (2019), pp. 146-160.
- [25] Dyrbye, C., Hansen, S.O.: *Wind loads on structures*, John Wiley & Sons, Ltd. UK., 2004.
- [26] Benson, D.J., Okazawa, S.: Contact in a multi-material Eulerian finite element formulation, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 193 (2004), pp. 4277-4298.
- [27] Reddy, J.N.: *Principles of continuum mechanics*, Cambridge University Press, New York, USA, 2010.
- [28] Liu, H., Xu, K., Zhao, Y.: Numerical investigation on the penetration of gravity installed anchors by a coupled Eulerian–Lagrangian approach, *Applied Ocean Research*, 60 (2016), pp. 94-108.
- [29] Reddy, J.N.: *An Introduction to the Finite Element Analysis*, Oxford University Press, 2004.
- [30] Barltrop, N.D.P., Adams, A.J.: *Dynamics of Fixed Marine Structures*, 3rd edition, Atkins Oil and Gas Engineering Limited, 1991.
- [31] Bisoi, S., Haldar, S.: Dynamic analysis of offshore wind turbine in clay considering soil–monopile–tower interaction; *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 63 (2014), pp. 19-35.