

Primljen / Received: 23.6.2016.

Ispravljen / Corrected: 12.10.2016.

Prihvaćen / Accepted: 18.11.2016.

Dostupno online / Available online: 10.5.2017.

Utjecaji teorije valova na ponašanje izvanobalne prostorne rešetkaste konstrukcije

Autor:



Doc. dr. sc. **Mustafa Onüçyıldız**, dipl.ing.građ.
Sveučilište Selçuk
Tehnički fakultet
Odjel za građevinarstvo
m13yildiz@selcuk.edu.tr

Stručni rad

Mustafa Onüçyıldız

Utjecaji teorije valova na ponašanje izvanobalne prostorne rešetkaste konstrukcije

U radu je provedena dinamička analiza izvanobalne rešetkaste konstrukcije s četiri pojasa pod utjecajem sila valova. Konstrukcija je prostorni rešetkasti sustav s tri etaže formirana od cilindričnih elemenata, a čiji su pojasi osigurani uzdužnim spregovima s vertikalnim dijagonalama. Konstrukcija i njezin okoliš su numerički modelirani metodom konačnih elemenata uz interakciju fluida i konstrukcije. Zbog klimatskih razloga, konstrukcija može biti izložena različitim teorijama valova, pa je izvanobalni okoliš modeliran pomoću zasebnih teorija valova i to linearne, Stokes 2 i Stokes 5 teorije.

Ključne riječi:

rešetkaste konstrukcije, izvanobalni okoliš, ponašanje konstrukcije, analiza konačnih elemenata

Professional paper

Mustafa Onüçyıldız

Wave theory effects on behaviour of a 3D truss offshore structure

Dynamic analysis of a four legged offshore truss structure under the effect of wave forces is conducted in this study. The structure is a three-storey space frame system formed of cylindrical members whose legs are supported by lateral bracings and vertical diagonals. The structure and its environment are numerically modelled by the finite elements method with the fluid-structure interaction. Due to climatic reasons, various wave theories may be applied to the structure. Therefore, the offshore environment is modelled in numerical analysis by the Linear, Stokes 2, and Stokes 5 wave theories, separately.

Key words:

lattice trusses, offshore environment, structural behaviour, finite elements analysis

Fachbericht

Mustafa Onüçyıldız

Einfluss der Wellentheorie auf das Verhalten räumlicher Offshore-Fachwerkstrukturen

In dieser Arbeit werden dynamische Analysen einer Offshore-Fachwerkstruktur mit vier Bändern unter Welleneinwirkungen durchgeführt. Bei der Konstruktion handelt es sich um ein dreistöckiges räumliches Fachwerkssystem aus zylindrischen Elementen, deren Bänder durch Längsaussteifungen mit vertikalen Diagonalen gesichert sind. Das System und die Umgebung wurden mittels der Finite-Elemente-Methode als numerisches Modell unter Berücksichtigung der Fluid-Bauwerk-Interaktion dargestellt. Klimatisch bedingt kann die Konstruktion verschiedenen Wellentheorien ausgesetzt sein, so dass die Offshore-Umgebung basierend auf verschiedenen Wellentheorien, und zwar der linearen Theorie, sowie Stokes 2 und Stokes 5, modelliert wurde.

Schlüsselwörter:

Fachwerkstruktur, Offshore-Umgebung, Strukturverhalten, Finite-Elemente-Analyse

1. Uvod

S obzirom na povećanje cijena zemljišta i smanjenje dostupnoga građevinskog zemljišta, nastaje sve više posebnih izvanobalnih konstrukcija. Naftne platforme, vjetroelektrane i postrojenja u sklopu vojne industrije glavni su primjeri tih posebnih konstrukcija. Osim toga, na otvorenim morima Europe i Azije instalirani su veliki energetske projekti, a predlaže se i podizanje energetskih farmi u Sjedinjenim Američkim Državama. Sve postojeće izvanobalne energetske farme koriste potkonstrukciju platforme s učvršćenim donjim dijelom. Sustavi s prostornim okvirom najčešća su potkonstrukcija platformi zato što se one mogu izgraditi na bilo kojoj dubini otvorenog mora. Pri tomu se koristi manje materijala za njihovu izgradnju u odnosu na druge vrste konstrukcija [1-5].

Izvanobalne rešetkaste konstrukcije mogu biti projektirane kao nepravilne, s tri ili četiri pojasa. Modeli koji imaju najviše prednosti su oni s tri i četiri pojasa zbog troškova materijala i montaže te pogodnosti proizvodnje. Međutim, oštećenje pojasa tropojasne konstrukcije može dovesti tu konstrukciju u stanje neupotrebljivosti. Zbog toga, kada se uzmu u obzir različiti slučajevi oštećenja kod modela s tri pojasa [6-8], verzije rešetkastih konstrukcija s četiri pojasa imaju mnogo češću primjenu kod izvanobalnih konstrukcija unatoč većim troškovima.

U fazi projektiranja, izvanobalne rešetkaste su konstrukcije imenovane slovima X, Y, K, i T s obzirom na oblik priključaka. Haselbacha i dr. [9] imenovali su priključke vertikalnih dijagonala srednjih etaža kao X, priključke krakova s vertikalnim dijagonalama na prvoj i zadnjoj etaži kao Y, a spojeve vertikalnih dijagonala kod srednjih etaža kao K. U istraživanju Wanga [10], prostorni model izvanobalne platforme s različitim slučajevima oštećenja primijenjen je kako bi se zorno prikazala učinkovitost iterativne metode modalne energije deformacija. Ovaj se rad ograničava na teorijsko i numeričko istraživanje metodologije. Dubois i dr. [11] istraživali su učinak projektiranja priključaka na konstrukcijsko ponašanje kod izvanobalnih rešetkastih konstrukcija. Utvrdili su da se vijek trajanja rešetkaste konstrukcije uslijed zamora mijenja prema projektiranju priključaka. U istraživanju Shi i dr. [12] na izvanobalnoj platformi su primijenjeni različiti načini projektiranja potkonstrukcije s jednim pilotom, više pilota te s rešetkastim tipom potkonstrukcije. Optimalna radna svojstva pod dinamičkim opterećenjem su primijećena kod konstrukcije s rešetkastim tipom potkonstrukcije. Model s više pilota daje druge po redu najbolje rezultate radnih svojstava. Dvosmjerna interakcija fluida i konstrukcije nije bila razmatrana u ovim istraživanjima [10-13]. Dok su i konstrukcija i fluid modelirani u dvosmjernoj interakciji, samo je konstrukcija modelirana, a sile strujanja su prenesene na model s jednosmjernom interakcijom. Gücüyen [14, 15] je modelirao izvanobalni difuzor i cjevovod primjenom dvosmjerne FSI analize. Surana i dr. [16] su razvili različite matematičke modele za dvosmjerne FSI analize i provjerili dobivene rezultate pomoću numeričkih modela.

Još jedan primjer dvosmjerne FSI analize napravio je Wang sa suradnicima [17] modelirajući postrojenje hidroelektrane.

Učinak sila vjetra se povećava s povećanjem visine od razine mora u odnosu na ocean. No, dinamičke sile valova djeluju puno učinkovitije na konstrukcije u odnosu na statičke sile [18]. Benitz i dr. [19] opisali su analizu interakcije fluida i konstrukcije (FSI) za izvanobalne konstrukcije prema linearnim i nelinearnim teorijama valova. Jia [20] je odredio vijek trajanja uslijed zamora materijala na izvanobalnim konstrukcijama rešetkastog tipa uzimajući u obzir samo sile valova. Iako su sile valova uzete u obzir i u ovom istraživanju, konstrukcija je pojedinačno modelirana u dijelu numeričke analize. Zhang i dr. [21] razmatrali su slučajeve opterećenja iz okoliša na izvanobalne konstrukcije, a napravljena je dinamička analiza postupnog guranja pri opterećenju valova kako bi se ustanovila posmična sila u temelju na način da se izuzme iz razmatranja interakcija fluida i konstrukcije. Istu su analizu i Golafshani i dr. [22] primijenili na izvanobalnu rešetkastu konstrukciju s četiri pojasa. Dok je konstrukcija ispitivana pod različitim modelima valova, interakcija fluida i konstrukcije bila je zapostavljena.

Računalni programi za konačne elemente imaju široku primjenu u građevinskim analizama kroz korištenje različitih materijala [16, 17]. Budući da brojni istraživači izbjegavaju dvosmjerne FSI analize zbog nekih poteškoća u programima za modeliranje fluida i konstrukcije (Abaqus/CFD i Abaqus/Explicit), uravnoteženja vremena porasta, definiranja kontaktnih površina i svojstava za svaki program i istraživanja odgovarajuće veličine mreže te obavljanja izračuna koji su vremenski zahtjevniji, ovaj bi rad mogao popuniti prazninu u FSI kosimulacijskim analizama pod učinkom opterećenja valova.

U tu svrhu, u ovom je istraživanju napravljeno modeliranje sustava rešetkastih konstrukcija uslijed dvosmjerne interakcije fluida i konstrukcije. Razmatrajući model pod utjecajem različitih teorija valova u različitim vremenskim odsjecima, primijenjene su različite teorije valova u fazi modeliranja fluida kako bi se ispitao učinak promjene teorije na ponašanje konstrukcije. Numeričke analize su provjerene pomoću poluanalitičkog modela s jednim stupnjem slobode (SDOF). Usklađenost rezultata konstrukcije i izlaznih parametara fluida dana je na kraju.

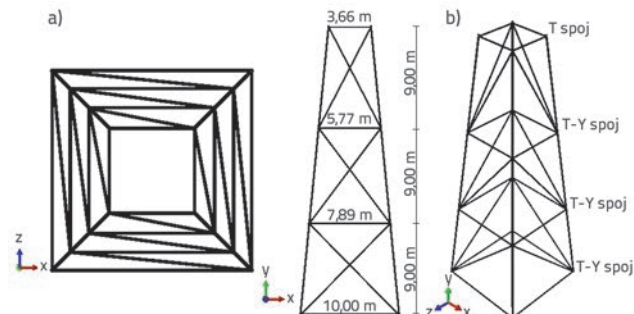
2. Numeričko istraživanje

U ovom dijelu istraživanja primijenjena je tehnika fluid-Lagragian za problem dvosmjerne interakcije fluida i konstrukcije. Model fluida (Fluid) napravljen je u CFD programu, a model konstrukcije (Lagragian) je oblikovan u eksplisnom programu u računalnom paketu Abaqus za analize konačnih elemenata [23]. Deformacije zbog sila fluida i učinci tih deformacija na fluid utječu jedno na drugo kroz kontaktne površine fluida i konstrukcije.

2.1. Razmatrani konstrukcijski model

U ovom je istraživanju korišten sličan model onom iz literature [24] kao što je prikazano na slici 1. Konstrukcija ima tri etaže

i svaka etaža je visine 9,00 m. Horizontalne duljine etaža su 10,00 m, 7,89 m, 5,77 m te 3,66 m. Promjer 36 elemenata modela iznosi 178 mm, a debljina stijenke 8,9 mm. Rešetkasti toranj služi za dubinu vode od $d = 18$ m. Nekonstrukcijska masa od $1,40 \times 10^4$ kg je primijenjena na četiri strane gornje etaže.



Slika 1. Model konstrukcije: a) pogled i visina etaža; b) vrste ispune

Model i visina etaža prikazani su na slici 1.a, a detalji priključaka konstrukcije na slici 1.b. Priključci glavnih nosivih i vertikalnih potpornih sustava nazvani su kao tip Y, a vodoravni potporni sustavi i njihovi priključci kao T tip priključaka.

2.2. Opis numeričkih izračuna i rubnih uvjeta

Kretanje neprigušenih sustava se općenito definira jednadžbom (1), gdje m predstavlja matricu mase, k je matrica krutosti, X predstavlja pomak, a F predstavlja silu. Uz to, svaka je točka derivacija po vremenu:

$$m\ddot{X} + kX = F \quad (1)$$

Sile valova koje djeluju na konstrukciju u maritimnom okolišu čine vanjske sile s desne strane jednadžbe (1). Vanjske su sile izračunane pomoću ABAQUS/CFD programa u FSI analizi prema ABAQUS kosimulacijskom modulu. Taj program je korišten za dobro poznatu Navier-Stokes jednadžbu. Računalni program konačnih elemenata određuje sile valova na osnovi jednadžbi brzine za teorije valova umjesto horizontalne brzine u Navier-Stokes jednadžbama. U ovom istraživanju, budući da su analize napravljene kroz linearnu, Stokes 2 i Stokes 5 teoriju valova, jednadžbe brzine tih teorija će se preslikati na domenu valova kao ulazna brzina. Izrazi u jednadžbama (2-4) dani su za linearnu, izraz (2), Stokes 2, izraz (3) i Stokes 5, izraz (4) teoriju valova.

$$u_L = \frac{\pi H_L \cosh(kh)}{T \sinh(kd)} \cos \theta \quad (2)$$

$$u_{s,2} = \frac{\pi H_{s,2} \cosh(kh)}{T \sinh(kd)} \cos \theta + \frac{3}{4} \frac{\pi H_{s,2}}{T} \frac{\pi H_{s,2}}{L_{s,2}} \frac{\cosh(2kh)}{\sinh^4(kd)} \cos 2\theta \quad (3)$$

$$u_{s,5} = c \left(\sum_{n=1}^5 n \phi'_n \cosh(nkh) \cos(n\theta) \right) \quad (4)$$

U navedenim jednadžbama h je okomita koordinata mjerena od morskog dna prema gore, k je broj valova, c je brzina valova, ϕ'_n je koeficijent potencijala valova, θ je kut faze. Matematički izrazi ovih parametara detaljnije su opisani u [25]. Osim toga, oznake H , T i d odnose se na visinu valova, period vala te dubinu vode. Teorija valova je izračunana iz ta tri parametra, a duljina vala (L) je određena na kraju. Teorije valova i parametri u ovom izračunu prikazani su u tablici 1.

Tablica 1. Teorije valova i parametri

Teorija	Parametar	H [m]	T [s]	d [m]	L_w [m]
Linearna		0,50	6	18	56,20
Stokes 2		2,00	6	18	56,20
Stokes 5		8,00	6	18	90,60

Sile fluida su izračunane i prenesene na konstrukciju preko kontaktnih površina. ABAQUS/Explicit program izračunava pomake primjenom jednadžbe (5) koja je varijacija jednadžbe gibanja [26]:

$$m^{NJ} \ddot{X}^N|_t = (F^J - I^J)|_t \quad (5)$$

U jednadžbi (5) t označava vrijeme, F_J je vanjski vektor sile dobiven iz CFD programa i I_J predstavlja unutarnji vektor sile koji nastaje naprezanjem u konstrukciji. Jednadžbe koje slijede korištene su prilikom rješavanja jednadžbi gibanja pomoću računalnog programa za konačne elemente. Na taj su način određeni pomaci koji su preneseni s konstrukcije na fluid:

$$\dot{X}^N_{(i+\frac{1}{2})} = \dot{X}^N_{(i-\frac{1}{2})} + \frac{\Delta t_{(i+1)} + \Delta t_{(i)}}{2} \ddot{X}^N_{(i)} \quad (6)$$

$$X^N_{(i+1)} = X^N_{(i)} + \Delta t_{(i+1)} \dot{X}^N_{(i+\frac{1}{2})} \quad (7)$$

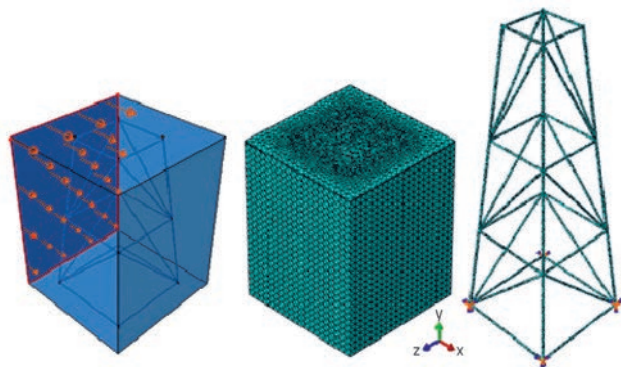
Iako N predstavlja stupanj slobode, on predstavlja i porast vremenskog razmaka za eksplicitni program u gore navedenim jednadžbama. Vrijednosti pomaka su izračunane pomoću vrijednosti $\dot{X}^n_{(i-\frac{1}{2})}$ i $\dot{X}^n_{(i+\frac{1}{2})}$ koje su dobivene prije prvog koraka porasta. Nakon toga, pomaci su preneseni na fluid preko kontaktnih površina, pa su neposredne promjene sila izračunane prema gibanju konstrukcije. Ovaj se ciklus nastavlja tijekom analize. Za provođenje analize moraju se definirati: svojstva materijala, rubni uvjeti i elementi konstrukcije. Slijedi objašnjenje postupaka analize.

Slana voda je modelirana pomoću EOS modela materijala u domeni valova. S druge strane, čelični materijal je korišten za modeliranje u domeni rešetkaste konstrukcije. Domena vala, koja ima dimenzije baze 15 m x 15 m i dubinu 18 m, prikazana je na lijevoj strani slike 2., a svojstva materijala u domeni vala i rešetkaste konstrukcije prikazani su u tablici 2.

Tablica 2. Svojstva materijala u domenama

Domena rešetkaste konstrukcije	Domena vala	
Youngov modul (210 GPa)	Brzina zvuka (1560 m/s)	Dinamična viskoznost ($1,50 \times 10^{-3}$ Ns/m ²)
Poissonov koeficijent (0,30)	Nagib ($U_s - U_p = 0$)	Gustoća mase (1250 kg/m ³)
Gustoća (7850 kg/m ³)	Grüneisenov koeficijent (0)	Temperatura (20 °C)

Da bi izračunali CFD, određeni su granični uvjeti za domenu fluida kod protoka oko fiksne rešetkaste konstrukcije. Brzina ulaza (u) paralelna je s ulaznim tokom osi x bez komponente poprečnog toka, kao što se može vidjeti na slici 2. s crvenim strelicama. Ulazne brzine za različite teorije valova dane su jednadžbama (2-4). Druga površina u smjeru x je odabrana kao domena izlaza. Kao izlazna granica postavljena je nulta vrijednost tlaka te brzine koje nemaju komponente u smjeru protoka. Donja površina zadovoljava rubne uvjete zida bez klizanja. Na preostalim površinama domene postavljeni su granični uvjeti za daleko polje, pretpostavljajući da je brzina jednaka ulaznoj brzini.



Slika 2. Rubni uvjeti i mreže konačnih elemenata za domenu konstrukcije i domenu vala

Modeli su u metodi konačnih elemenata podijeljeni u manje elemente kako bi se proveli i analizirali složeni modeli. Dok su desetočvorni modificirani tetrahedronski konačni elementi (C3D10M) korišteni u eksplicitnoj analizi [8, 14], četveročvorni modificirani tetrahedronski konačni elementi (FC3D4) koji su pogodni za FSI probleme korišteni su u CFD analizi. Model vala oblikovan s FC3D4 tipom konačnih elemenata prikazan je u sredini slike 2., a rešetkasta konstrukcija sastavljena od C3D10M konačnih elemenata na desnoj strani te slike. Brojevi priključaka i elemenata odredit će se nakon odluke o tipu elemenata. Provedeno je ispitivanje zavisnosti mreže te se pokazalo da daljnje povećanje gustoće mreže čini malu razliku u rezultatima za najveći pomak rešetkaste konstrukcije i najveću brzinu vala. Ova analiza osjetljivosti primijenjena je na situaciju gdje je konstrukcija bila pod utjecajem linearne teorije vala. Dok je veličina konačnih elemenata u domeni vala jednaka domeni rešetkaste konstrukcije u kontaktnim površinama, u ostalim dijelovima ona iznosi 0,50 m. Rješenja za analizu osjetljivosti su napravljena za 12 sekundi s duljinom intervala koraka (Δt) od 0,01s. Rezultati analize osjetljivosti prikazani su u tablici 3.

Tablica 3. Rezultati za variranje veličine konačnih elemenata

Rezultati	Veličina konačnih elemenata [m]			
	0,02	0,01	0,0075	0,005
Broj čvorova	451353	1998793	4166235	9312785
Broj konačnih elemenata	444102	1974882	4118431	9205928
Najveći pomak [m]	0,079	0,146	0,177	0,184
Najveća brzina vala [m/s]	0,126	0,238	0,289	0,302

Kao što se može vidjeti iz tablice 3., kada se veličina konačnih elemenata smanji s 0,02 m na 0,01 m, drugim riječima, kada je veličina mreže 100 % gušća, brojevi čvorova i konačnih elemenata se povećaju za približno 343 %. Primijećena su povećanja za 83,64 % u vrijednostima pomaka i 89,16 % u vrijednosti brzine vala. Kada se veličina konačnih elemenata smanji s 0,01 m na 0,0075 m, broj čvorova i konačnih elemenata se povećava za gotovo 108 %. Uz to, dobije se 20,89 % povećanja u vrijednosti pomaka i 21,15 % povećanja u vrijednosti brzine vala. Na kraju, brojevi čvorova i konačnih elemenata se povećaju za 123,75 %, vrijednost pomaka raste za 4,53 %, a vrijednost brzine vala se povećava za 4,61 % kod posljednje veličine konačnih elemenata. Dok brojevi čvorova i konačnih elemenata značajno rastu, manji je porast primijećen kod vrijednosti pomaka i brzine vala za zadnja dva pokušaja. Kao što je poznato da provođenje analiza postaje teže zbog povećanja čvorova i konačnih elemenata, veličina konačnih elemenata za domenu rešetkaste konstrukcije je postavljena na 0,0075 m. Ista je vrijednost korištena i za kontaktne površine domene vala. Tako su dobiveni rezultati neovisno o mreži. Optimalna struktura mreže je prikazana na slici 2.

Dodatno je, uz eksplicitnu analizu, napravljena i modalna analiza kako bi se odredila vlastita frekvencija konstrukcije. Model konačnih elemenata dan je matricama u jednadžbi (8).

$$[k]\{X\} - \lambda[m]\{X\} = 0 \quad (8)$$

Metoda Lanczos primijenjena je kod analize konačnih elemenata pomoću računalnog programa za rješavanje jednadžbe (8) [23]. U jednadžbi (8) λ je kvadrat vlastite frekvencije [27].

3. Provjera FSI analize i rezultati

U ovom je istraživanju provjera modela konačnih elemenata napravljena preko modela sustava jednog stupnja slobode

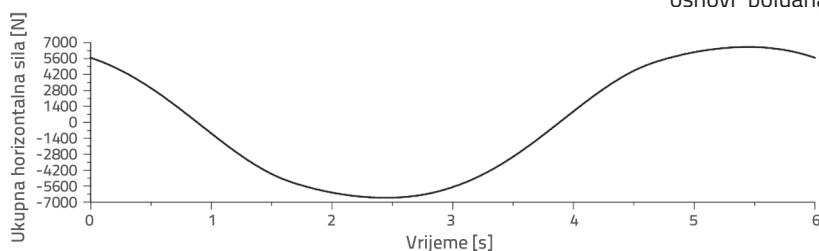
(SDOF). Dok je numerička FSI analiza korištena za tri različite teorije valova, poluanalička provjera je napravljena samo za linearnu teoriju valova. Kod SDOF analize, konstrukcija je modelirana kao obrnuto njihalo Sve se mase koncentriraju na vrhu konstrukcije i vanjska sila je primijenjena na tu masu. Jednadžba gibanja SDOF modela je prikazana jednadžbom (9). Moment inercije je izračunan kao $I = 337545,41 \text{ m}^4$, a masa je izračunana kao $m = 30184,06 \text{ kg}$.

$$\left(m \int_0^{18} (1 - \cos(\pi y / 2L))^2 dy \right) \ddot{X}(t) + \left(EI \int_0^{18} (1 - \cos(\pi y / 2L))^4 dy \right) X(t) = F(t) \quad (9)$$

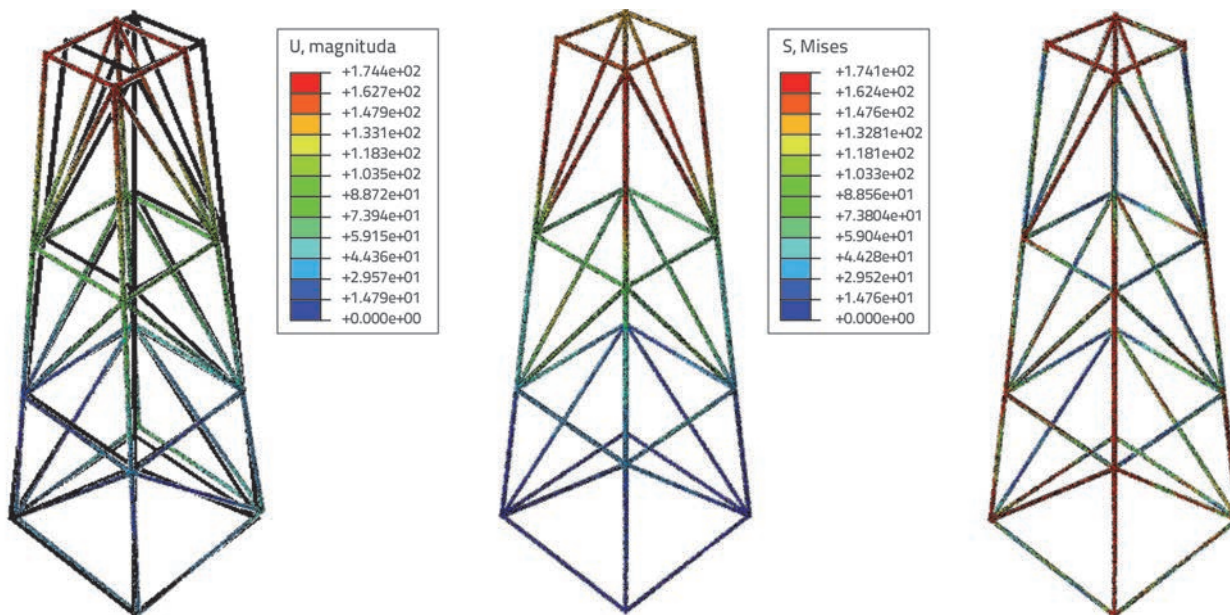
Sila povlačenja i sila inercije koje utječu na 24 elementa konstrukcije izračunane su prema Morisonovoj jednadžbi definiranoj jednadžbom (10), a ukupna vanjska sila je dobivena na kraju:

$$F(t) = \sum_{n=1}^{24} \left(\int_s^f \frac{1}{2} \rho C_D D u_n(y,t) |u_n(y,t)| dy + \int_s^f \rho C_M \frac{\pi D^2}{4} \dot{u}_n(y,t) dy \right) \quad (10)$$

Početna točka jediničnog člana je s , a f je krajnja točka. Promjena u ukupnoj sili s obzirom na vrijeme prikazana je na slici 3.



Slika 3. Promjena ukupne vanjske sile s obzirom na vrijeme



Slika 4. Prvi modalni oblik, distribucije pomaka i naprezanja

Jednadžba gibanja je riješena pomoću Runge-Kuttove metode. Uvjet dinamičkog starta je određen u trenutku $t = 0$, kada su pomak i brzina jednaki nuli. Funkcija pomaka, dobivena rješavanjem jednadžbe (9), prikazana je jednadžbom (11):

$$x_{(t)} = 2,12\sin(1,12t+1,03)+1,49\sin(2,32t-0,43)+0,25\sin(2,01t+0,75) \quad (11)$$

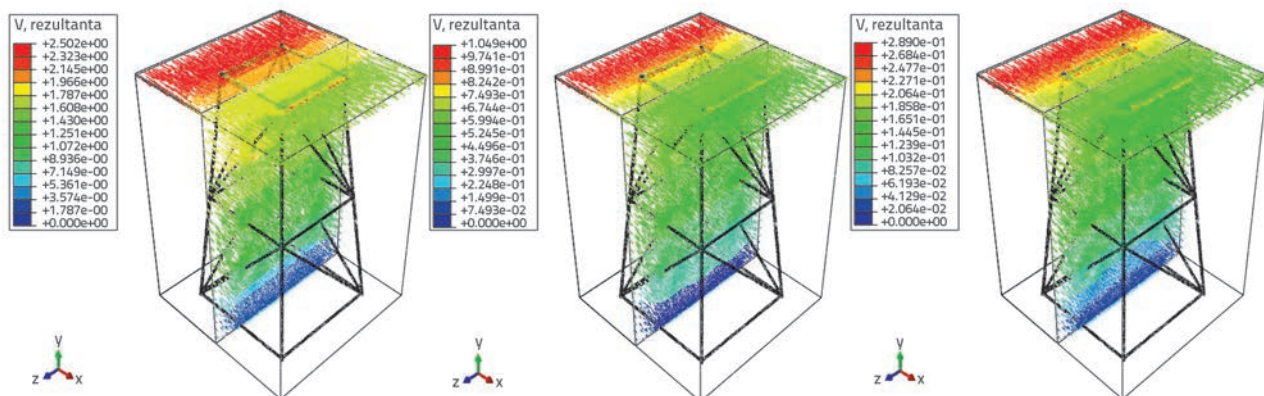
U poluanaličkom rješenju vlastita je frekvencija konstrukcije ω_0 određena jednadžbom (12):

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (12)$$

Tablica 4. Prve vrijednosti vlastite frekvencije i najveće vrijednosti pomaka za etaže

Vrsta analize	ω_0 (s ⁻¹)	X ₁ [mm]	X ₂ [mm]	X ₃ [mm]
MKE	7,63	44	123	177
SDOF	7,38	43	118	169

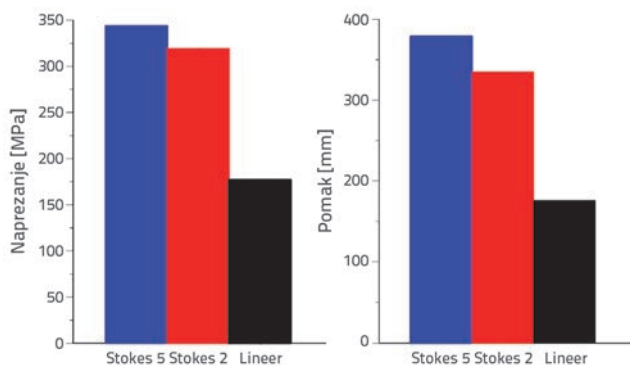
U tablici 4. dane su usporedbe vrijednosti za vlastitu frekvenciju i vrijednosti pomaka dobivene iz poluanaličkog rješenja i numeričke analize. Numerički model je provjeren na osnovi doluanaličkog modela prema prethodno prikazanim rezultatima. Nakon provjere modela, primijenjene su Stokes 2 i Stokes 5 teorije valova s ciljem nalaženja učinaka teorije na ponašanje konstrukcije. Vizualni rezultati za linearnu teoriju valova prikazani su slikom 4. Uz to, prvi modalni oblik, distribucije pomaka i naprezanja dobiveni su iz numeričke analize prema grafičkim prikazima na slici 4.



Slika 5. Obrisi grafikona i vektori brzina oko modela za teorije valova

Brzina vala iznosi 2,502 m/s kod Stokes 5, 1,049 m/s kod Stokes 2, a 0,289 m/s kod linearne teorije prema računalnom programu konačnih elemenata. Vektori brzina koje pripadaju tim vrijednostima su prikazani su na slici 5.

Najveće vrijednosti naprezanja i pomaka na konstrukciji uslijed vektora brzine sa slike 5. prikazane su na slici 6. u obliku jediničnih stupaca.



Slika 6. Najveće vrijednosti naprezanja i pomaka na konstrukciji pod različitim valovima

Najprije su ispitane vrijednosti vlastite frekvencije. Vrijednosti frekvencije za prvi modalni oblik prikazane su u tablici 4. Ističe se razlika od 3,38 % između dvije vrste analiza. Zamijećeno je pomicanje na prvom modalnom obliku kao što je to bilo očekivano (slika 4.).

Vrijednosti pomaka pod linearnom teorijom valova za svaku od etaža prikazane su u tablici 4. Razlike u vrijednostima pomaka od prve do zadnje etaže izračunane su kao 2,32 % za prvu, 4,23 % za drugu i 4,73 % za treću etažu. Model konačnih elemenata je ispitivan usporedbom vrijednosti pomaka i vlastitih frekvencija dobivenih tijekom dviju analiza. Modalni oblik, distribucija pomaka i distribucija Von Misesovih naprezanja konstrukcije dani su na slici 4. Najveće vrijednosti za pomak dobivene su za zadnju etažu, kako se i očekivalo. Vrijednost Von Misesovih naprezanja izračunana je u iznosu od 177 MPa u osloncima. Iako je vrijednost naprezanja veća za zadnju etažu, povećanje je manje u usporedbi s vrijednostima na osloncima.

Vektori brzine oko konstrukcije prikazani su na slici 5. Vrijednosti koje opisuju ponašanje fluida također su određeni primjenom CFD analize, uz FEM analizu u analitičkom računalnom programu. Najveće brzine vala na vodenoj površini su iznosile 0,289 m/s kod linearne teorije, 1,049 m/s za Stokes 2 i 2,502 m/s za Stokes 5 teoriju. Na taj je način zamijećen učinak nelinearnih uvjeta koji određuje karakteristična svojstva teorija.

Distribucije pomaka i naprezanja, prema linearnoj teoriji na slici 4., predočene su kao stupci u grafikonu na slici 6. za sve tri teorije valova. Vrijednosti pomaka iznose 177 mm za linearnu, 335 mm za Stokes 2 i 379 mm za Stokes 5 teoriju valova. Osim toga, vrijednosti naprezanja za te tri teorije su određene kao 177 MPa (linearna), 3,19 MPa (Stokes 2) i 3,44 MPa (Stokes 5).

4. Zaključak

Izvanobalne konstrukcije rešetkastog tipa osjetljivije su i skuplje u usporedbi s takvim konstrukcijama na tlu, i to u smislu projektiranja, montaže i održivosti. Zato je nužno razmotriti negativne slučajeve tijekom faze projektiranja. Jedan od negativnih slučajeva unutar sila okoliša jest i učinak sila valova na konstrukciju. Konstrukcija može biti pod utjecajem raznih teorija valova u različito vrijeme u oceanu. Prema tome je u sklopu ovog rada izvanobalna konstrukcija rešetkastog tipa istraživana pod utjecajem raznih teorija valova i vlastitih frekvencija, modalnih oblika i vrijednosti pomaka te naprezanja. Konstrukcija je pritom modelirana pomoću eksplisitnog programa, a model valova oko konstrukcije modeliran je pomoću CFD programa unutar analitičkog računalnog programa konačnih elemenata. Provjera modela je napravljena na osnovi sustava jednog stupnja slobode pod linearnom teorijom valova. Budući da se redoviti valovi ponavljaju tijekom jednog perioda vala ili valne duljine, analiza je provedena za jedan period vala. Veličine modela konačnih elemenata fluida se povećavaju kada je analiza napravljena za duljinu vala, što bi moglo, drukčije složeno, omogućiti završetak analize. Povećavanje trajanja analize za vrijeme perioda vala umjesto povećanja modela između valne duljine omogućit će da se analiza provede na jednostavniji način, uzimajući u obzir broj konačnih elemenata i čvorova.

Okolišna opterećenja, izračunana preko CFD modula računalnog programa analize konačnih elemenata, prenesena su na konstrukciju preko FSI te je na kraju napravljena analiza konstrukcije. Kada je model ispitan u uvjetima teorija valova, najkritičnije vrijednosti su dobivene kod Stokes 5 teorije. Iako su dobiveni različiti rezultati za Stokes 2 i linearnu teoriju čiji su granični učinci vrlo blizu jedan drugoga, navodi se da te vrijednosti ne predstavljaju rizik za sustav konstrukcije. Poznato je da se linearna teorija valova može primijeniti kod plitkih, srednje dubokih i dubokih vodenih površina. Tako ona sadrži sve teorije valova. No, i ostale se teorije trebaju uzeti

u obzir u izračunima. Kao zaključak, određena je usklađenost analiza SDOF i konačnih elemenata. Složena rješenja su potrebna kako bi se dobili konstrukcijski parametri, osim za vrijednosti pomaka i frekvencija iz SDOF analize. Osim toga, nije bilo moguće doseći parametre toka zbog poluanalitičke analize. No, FEM analiza postaje sve teža kako se povećava broj priključaka i elemenata zbog veličine konstrukcije. Iz toga bi razloga SDOF analiza mogla biti opcija u slučaju da nisu potrebni parametri fluida poput profila brzine i ubrzanja ili parametri konstrukcije kao što su to reakcije i vrijednosti naprezanja.

LITERATURA

- [1] Thomsen, K.E.: *A Comprehensive Guide to Successful Offshore Wind Farm Installation*, Offshore Wind 2nd Edition, Elsevier, 2014.
- [2] Erdem, R.T.: Analysis of The Guyed Steel Lattice Tower Due To Environmental Loads, *GRADEVINAR*, 67 (2015) 7, pp. 681-689, <https://doi.org/10.14256/JCE.1181.2014>
- [3] Zwick, D., Muskulus, M., Moe, G.: Iterative Optimization Approach For The Design Of Full-Height Lattice Towers For Oshore Wind Turbines, *Energy Procedia*, 24 (2012), pp. 297-304, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.06.112>
- [4] Muskulus, M.: The Full-Height Lattice Tower Concept, *Energy Procedia*, 24 (2012), pp. 371-377, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.06.120>
- [5] Gücüyen, E., Erdem, R.T., Gökkuş, Ü.: Effect of Changes on Joint Connections of Steel Lattice Towers due to Environmental Loads, *International Journal of Engineering and Industries*, 2 (2011) 1, pp. 30-36, <https://doi.org/10.4156/ijei.vol2.issue1.4>
- [6] Travanca, J., Hao H.: Energy Dissipation In High-Energy Ship-Offshore Jacket Platform Collisions, *Marine Structures*, 40 (2015), pp. 1-37, <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2014.10.008>
- [7] Li, H., Wang, J., James Hu, S.L.: Using Incomplete Modal Data For Damage Detection In Offshore Jacket Structures, *Ocean Engineering*, 35 (2008), pp. 1793-1799, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2008.08.020>
- [8] Gücüyen, E., Erdem, R.T.: Corrosion Effects On Structural Behavior Of Jacket Type Offshore Structures, *GRADEVINAR*, 66 (2014) 11, pp. 981-986, <https://doi.org/10.14256/JCE.1126.2014>
- [9] Haselbacha, P., Natarajana, A., Jiwinanguna, R.G., Branner, K.: Comparison of Coupled and Uncoupled Load Simulations on a Jacket Support Structure, *Energy Procedia*, 35 (2013), pp. 244-252, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.07.177>
- [10] Wang, S.: Damage Detection in Offshore Platform Structures from Limited Modal Data, *Applied Ocean Research*, 41 (2013), pp. 48-56, <https://doi.org/10.1016/j.apor.2013.02.004>
- [11] Dubois, J., Muskulus, M., Schaumann, P.: Advanced Representation of Tubular Joints in Jacket Models for Offshore Wind Turbine Simulation, *Energy Procedia*, 35 (2013), pp. 234-243, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.07.176>
- [12] 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, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.08.039>
- [13] Gücüyen, E., Erdem, R.T., Gökkuş, Ü.: Irregular Wave Effects on Dynamic Behavior of Piles, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 38 (2013), pp. 1047-1057, <https://doi.org/10.1007/s13369-012-0428-6>
- [14] Gücüyen, E.: Analysis of Submarine Outfalls Subjected to Wave Load, *GRADEVINAR*, 67 (2015) 8, pp. 799-808, <https://doi.org/10.14256/JCE.1204.2014>
- [15] Gücüyen, E.: Numerical Analysis of Deteriorated Sub-sea Pipelines under Environmental Loads, *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 28 (2015) 6, pp. 1163-1170, <https://doi.org/10.3901/CJME.2015.0909.111>
- [16] Surana, K.S., Blackwell, B., Powell, M., Reddy, J.N.: Mathematical Models for Fluid-Solid Interaction and Their Numerical Solutions, *Journal of Fluids and Structures*, 50 (2014), pp. 184-216, <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2014.06.023>
- [17] Wang, X., Sun, R., Ao, X., Zhou, Z., Lang, J.: Eulerian-Eulerian Solid-Liquid Two-Phase Flow of Sandstone Wastewater in a Hydropower Station Rectangular Sedimentation Tank, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 17 (2013) 8, pp.700-719, <https://doi.org/10.1080/19648189.2013.814551>
- [18] Li, M., Zhang, H., Guan, H.: Study Of Offshore Monopile Behaviour Due To Ocean Waves, *Ocean Engineering*, 38 (2011) 17-18, pp. 1946-1956, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2011.09.022>
- [19] Benitz, M.A., Lackner, M.A., Schmidt, D.P.: Hydrodynamics of Offshore Structures with Specific Focus on Wind Energy Applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 44 (2015), pp. 692-716, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.021>
- [20] Jia, J.: An Efficient Nonlinear Dynamic Approach for Calculating Wave Induced Fatigue Damage of Offshore Structures and Its Industrial Applications for Lifetime Extension, *Applied Ocean Research*, 30 (2008), pp. 189-198, <https://doi.org/10.1016/j.apor.2008.09.003>

- [21] Zhang, Y., Beer, M., Quek, S.T.: Long-Term Performance Assessment and Design of Offshore Structures, *Computers and Structures*, 154 (2015), 101–115, <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2015.02.029>
- [22] Golafshani, A.A., Bagheri, V.H., Holmas, E.T.: Incremental Wave Analysis and Its Application to Performance-Based Assessment of Jacket Platforms, *Journal of Constructional Steel Research*, 67 (2011), pp. 1649–1657, <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2011.04.008>
- [23] ABAQUS/CAE 6.10, 2010.
- [24] Wang, S.: Damage Detection in Offshore Platform Structures from Limited Modal Data, *Applied Ocean Research*, 41 (2013), pp. 48–56.
- [25] Sarpkaya, T., Isaacson, M.: *Mechanics of Wave Forces on Offshore Structures*, Van Nostrand Reinhold Company, Newyork, USA, 1981.
- [26] *Introduction to Abaqus/Explicit*, Dassault Systèmes, 2010.
- [27] Reddy, J.N.: *An introduction to the finite element analysis*, Oxford University Press, USA, 2004.