

Primljen / Received: 27.12.2014.

Ispravljen / Corrected: 21.3.2015.

Prihvaćen / Accepted: 14.5.2015.

Dostupno online / Available online: 10.9.2015.

Analiza valnog opterećenja podmorskih ispusta

Autor:



Doc.dr.sc. **Engin Gücüyen**, dipl.ing.grad.
Sveučilište Celal Bayar, Turska
Fakultet tehničkih znanosti
Odjel za građevinarstvo
engin.gucuyen@cbu.edu.tr

Stručni rad

Engin Gücüyen

Analiza valnog opterećenja podmorskih ispusta

Posljednjih se godina bilježi značajan napredak u području tehnologije izvođenja podmorskih ispusta. Takav napredak doveo je do konstrukcijskih poboljšanja podmorskih ispusta, posebice difuzorskih i vertikalnih cijevi te sapnica. Rad se bavi modeliranjem jednog dijela podmorskog ispusta, točnije difuzora, izrađenih od raznih materijala te utjecajima njihovog okruženja (unutarnji i vanjski tokovi). U analizama primijenjena je tehnika interakcije fluida i konstrukcije. Provedene analize pokazuju da su naprezanja najviša na spojevima između glavne i vertikalne cijevi. Najviši se pomaci ostvaruju pri osnom nanošenju valnog opterećenja na konstrukciju.

Ključne riječi:

difuzori ispusta, domene fluida i konstrukcije, svojstva materijala, numeričke analize

Professional paper

Engin Gücüyen

Analysis of submarine outfalls subjected to wave load

Significant improvements have been made in recent years in the field of submarine outfall construction technology. Such an advancement resulted in structural improvements of submarine outfalls, especially with regard to diffuser pipes, risers, and ports. The paper focuses on the modelling of one part of submarine outfall, namely the diffuser pipes made of various materials, and on the effects of their surroundings (internal and external flows). The fluid structure interaction technique is applied in the analyses. The analyses conducted in the paper show that the highest stress values are obtained in the pipe-riser connections. Highest displacements are observed when wave load is axially applied on the structure.

Key words:

diffuser pipes, fluid and structure domains, material properties, numerical analyses

Fachbericht

Engin Gücüyen

Analyse zur Wellenbelastung für Unterwasserausläufe

In den letzten Jahren werden bedeutende Fortschritte bei der Ausführung von Unterwasserausläufen verzeichnet. Diese Fortschritte haben zu Verbesserungen der Konstruktionsqualität von Unterwasserausläufen geführt, insbesondere bei Diffusor- und Vertikalrohren, sowie Düsen. Diese Arbeit befasst sich mit der Modellierung eines Teils von Unterwasserausläufen, bzw. Diffusoren aus verschiedenen Materialien, unter Berücksichtigung von Umgebungseinflüssen (Innen- und Außenströme). Bei den Analysen wurde die Interaktion von Fluid und Konstruktion in Betracht gezogen. Die durchgeführten Analysen zeigen, dass an Verbindungen zwischen Haupt- und Vertikalrohren die größten Spannungen auftreten. Größere Verschiebungen werden erzielt, wenn die Wellenbelastung in Achsenrichtung aufgetragen wird.

Schlüsselwörter:

Auslaufdiffusoren, Fluid- und Konstruktionsdomäne, Materialeigenschaften, numerische Analysen

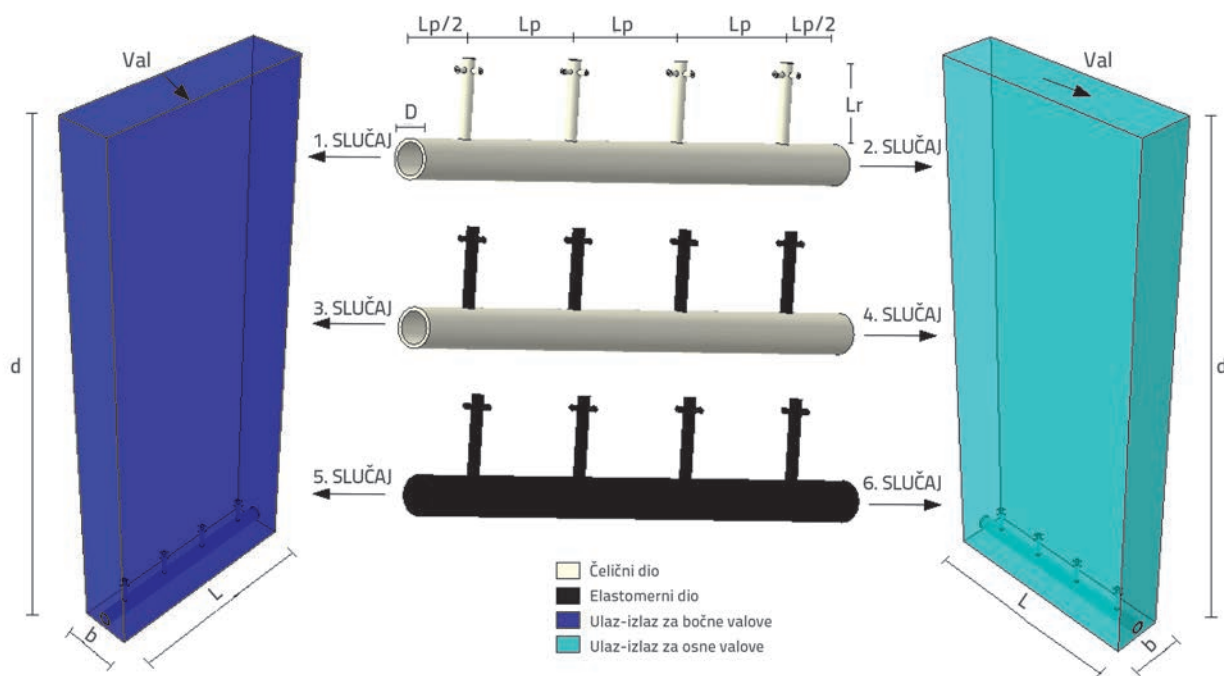
1. Uvod

Duboki izvanobalni ispusti na kojima se koriste difuzori s više sapnica smatraju se, u ekološkom smislu, najmanje agresivnom metodom ispuštanja pročišćene otpadne vode. U prijamnik se ispuštaju razne vrste otpadnih voda poput primjerice toplinski onečišćena slana voda kao izvod desalinizacijskog procesa, otpadna voda iz urbanih sredina te industrijska otpadna voda. Te otpadne supstancije razrjeđuju se u prijamniku nakon ispuštanja iz sapnica smještenih na vertikalnim cijevima koje se nalaze na kraju podmorskog ispusta. Podmorski ispusti sastoje se od obalne građevine, dovodne cijevi i difuzorske cijevi na kojoj se nalaze vertikalne cijevi i sapnice [1-5].

Polaganje, korištenje i održavanje [6] podmorskih ispusta skupe su i tehnološki zahtjevne aktivnosti koje se trebaju provoditi u skladu s odgovarajućim tehničkim i ekološkim zahtjevima. Na temelju odgovarajućih ekoloških analiza trebaju se osigurati maksimalni uvjeti razrjeđivanja i minimalni ekološki rizici tijekom čitavog radnog vijeka tih ispusnih građevina. Što se tiče sigurnosti tih konstrukcija, u projektiranju se u obzir treba uzeti opterećenje zbog utjecaja valova i morskih struja, udarno opterećenje zbog sidrenja plovila, rizici oštećenja ribarskim mrežama te propadanje zbog unutarnje i vanjske korozije [7]. Neki se dijelovi podmorskih ispusta, s izuzetkom vertikalnih cijevi i sapnica, mogu djelotvorno zaštititi od vanjskih utjecaja ukopavanjem cijevi. Kako su vertikalne cijevi i sapnice podložne agresivnom djelovanju okoline, one se izrađuju od fleksibilnijih materijala kao što su polietilen visoke gustoće (PEHD) i elastomerni materijali, iako i oni imaju određene nedostatke [8-10]. Dok je promjer vertikalne cijevi konstantan, promjer sapnica može biti ili konstantan (zvonast) ili varijabilan (kljunast). Tri modela difuzora korištena u ovoj studiji

prikazana su na slici 1. Kod prvog modela (model 1) svi su dijelovi difuzora napravljeni od čelika. Drugi model (model 2) zapravo je kombinacija čelične difuzorske cijevi i elastomernih (gumenih) vertikalnih cijevi i sapnica. Treći model (model 3) je elastomerni difuzor. Osim toga, tri različita modela difuzora smještena su u dvije domene fluida pri čemu su smjerovi djelovanja valova bočni (okolina 1) ili osni (okolina 2). Tako dobivamo šest slučajeva na kojima se mogu analizirati ne samo utjecaji materijala već i utjecaj smjera valova na ponašanje konstrukcije.

Dimenzije domena simbolički su prikazane na slici 1. Dimenzije domena s fluidom iznose 8,50 m u smjeru difuzora (L), 3 m poprečno na smjer difuzora (b), te 25 m u vertikalnom smjeru (d). Simulirani fizički modeli ispusta sastoje se od glavne cijevi promjera 0,55 m (D), koja ima četiri vertikalne cijevi. Vertikalne cijevi dužine 1 m (L_v) imaju četiri sapnice, a postavljene su na razmacima od po 2 m (L_p). Ponašanje konstrukcije podmorskog ispusta i kontrola ponašanja te građevine u toku vijeka trajanja složen je problem koji se treba detaljno analizirati i pritom se u obzir trebaju uzeti granični uvjeti okoline u podmorju. U usporedbi s građevinama na kopnu, podmorske građevine dodatno su izložene utjecaju agresivne morske sredine, pri čemu hidrodinamičke interakcije i dinamički odzivi postaju važni elementi u postupku projektiranja [11]. Numeričke se metode često primjenjuju za ispitivanje ponašanja probalnih i izvanobalnih konstrukcija upravo zbog znatnog utjecaja okoline. Te se analize obavljaju na dva načina. U prvom se slučaju hidrodinamičke sile nanose na sustav modeliranjem građevine bez domene fluida [12, 13]. U drugom se slučaju u analizi izvanobalnih konstrukcija mogu primijeniti izravne metode FSI. Kao primjere izravnih metoda FSI možemo navesti metode kao što su Fluid-Lagrangian [14, 15], Lagrangian-Eulerian (ALE)



Slika 1. Kombinacije slučajeva za modele difuzora

Tablica 1. Razni slučajevi

Domene \ Slučajevi	1. SLUČAJ	2. SLUČAJ	3. SLUČAJ	4. SLUČAJ	5. SLUČAJ	6. SLUČAJ
Domene fluida	okolina 1	okolina 2	okolina 1	okolina 2	okolina 1	okolina 2
Domene konstrukcije	model 1	model 1	model 2	model 2	model 3	model 3

[16-18] i Eulerian-Eulerian [19]. U ovom se radu za modeliranje ponašanja difuzora podmorskih ispusta primjenjuje metoda Fluid-Lagrangian.

U radu se analiziraju utjecaji materijala vertikalne cijevi-sapnice i unutarnjeg-vanjskog toka na ponašanje konstrukcije difuzora podmorskog ispusta slane vode i to kroz proračune pomoću metode FSI. Proračuni difuzora na bazi metode FSI obavljani za razne materijale i unutarnje-vanjske tokove provode se pomoću računalnog programa ABAQUS za analizu konačnih elemenata [20]. Za domene fluida primjenjuje se postupak poznat pod nazivom računalna dinamika fluida (eng. *Computational Fluid Dynamics* - CFD). Domene fluida sastoje se od unutarnjih i vanjskih domena. Dok je unutarnji tok ujednačen, vanjski tok se smatra neujednačenim, a analizira se pomoću teorije Airyjevih valova. Usmjerenost valova određuje se u dva smjera, osni i bočni, a u svrhu definiranja utjecaja na ponašanje konstrukcije modela. Obavljeno je šest analiza uspoređivanjem tri modela konstrukcije s raznim materijalima i dva modela fluida s raznim smjerovima toka. Analizom su za svaku od tih opisanih situacija određene varijacije brzina istjecanja, pomaka sapnica i difuzorskih cijevi, te vrijednosti i raspored naprezanja.

2. Numerički proračuni

Program ABAQUS kojim se znanstvenici i inženjeri često služe za analizu konačnih elemenata usvojen je za određivanje konstrukcijskog ponašanja opisanih modela. Nelinearna analiza podmorskog ispusta u izvanobalnom okruženju obavljena je postupnom tehnikom prema postupku Abaqus/CFD-Abaqus/Explicit. Sustavi analizirani u ovom radu spojeni su fizički sustavi kod kojih dolazi do interakcije između dva fizička sustava. Kao primjer spojenog sustava može se navesti interakcija između fluida i konstrukcije (FSI) pri čemu se fluid i konstrukcija smatraju sustavima. Konstrukcija može biti pokretna i/ili deformabilna a tok fluida može biti unutarnji i/ili vanjski. Sile kretajućeg fluida nanose se kao tlačno opterećenje na konstrukciju, na kojoj se zatim javlja deformacija. Unutarnje i vanjske površine difuzora u interakciji su s okolnim fluidom. Stoga se nanosi tlačno opterećenje da bi se definirala kosimulacijska interakcija s modelom Abaqus/Explicit, a isto se obavlja i za model CFD. U sljedećim su poglavljima spomenute metode opisane kako za domenu fluida tako i za domenu konstrukcije.

2.1. Domene fluida

Tri modela difuzora smještena su na dvije različite domene fluida koje se odlikuju trodimenzionalnom geometrijom s

osnim i bočnim usmjerenjima valova. Domene fluida sastoje se od unutarnjih i vanjskih domena. Unutarnja domena fluida predstavlja kontinuiran tok, tj. istjecanje slane vode. CFD tehnika bazirana na metodi konačnih elemenata (FEM) [20] usvojena je za potrebe definiranja unutarnjeg i vanjskog toka oko krutih modela difuzora. Fizikalna svojstva tehnike CFD bazirane na metodi konačnih elemenata omogućuju definiranje jednadžbi kretanja reduciranih na nekompresibilne Navier-Stokesove jednadžbe (1-3):

$$\rho \left(\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + W \frac{\partial U}{\partial z} \right) = - \frac{\partial P}{\partial x} + \rho g_x + \mu \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

$$\rho \left(\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + W \frac{\partial V}{\partial z} \right) = - \frac{\partial P}{\partial y} + \rho g_y + \mu \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

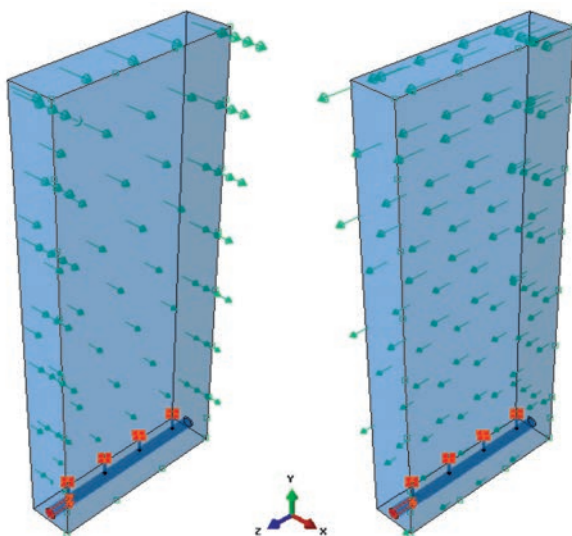
$$\rho \left(\frac{\partial W}{\partial t} + U \frac{\partial W}{\partial x} + V \frac{\partial W}{\partial y} + W \frac{\partial W}{\partial z} \right) = - \frac{\partial P}{\partial z} + \rho g_z + \mu \left(\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

gdje vrijednosti U, V i W označavaju brzinu, g_x , g_y i g_z su gravitacijske komponente u smjerovima x, y i z, a ρ , μ , i P označavaju redom gustoću, dinamičku viskoznost i tlak. Svojstva fluida odabrana su tako da predstavljaju slanu vodu za unutarnje i vanjske tokove pri temperaturi od 20 °C, s gustoćom (ρ) od 1025 kg/m³ i dinamičkom viskoznošću (μ) od 0,0015 Ns/m². Fluid je, sukladno korištenom računalnom programu, modeliran kao EOS (eng. equation of state - EOS) materijal, tj. definiran je model ponašanja fluida jednadžbama različitih stanja materijala (fluida) s brzinom zvuka u slanoj vodi od $c_0 = 1560$ m/s, dok su konstante (k , Γ_0) jednake nuli. k je nagib krivulje $U_s - U_p$, a Γ_0 je Grüneisenov parametar.

Sljedeći se rubni uvjeti primjenjuju za domenu fluida u izračunu jednadžbi (1-3) za tok oko konstantnog difuzora. Zone primjene rubnih uvjeta prikazane su na slici 2. Na toj se slici na geometriju fluida primjenjuju dva ulaza brzine. Prvi se primjenjuje za unutarnji tok, a drugi za vanjski tok. Izlazni rubni uvjet određen je pritiskom fluida za koji je usvojena vrijednost nula pri vanjskom toku. Dno vanjskog toka usvojeno kao razina zida gdje su sve komponente brzine jednake nuli. I konačno, pretpostavljeno je da je brzina na udaljenom polju jednaka ulaznoj brzini pri vanjskom toku.

Kao što proizlazi iz slike 2., za modeliranje unutarnjih i vanjskih tokova koristi se potpuno ista geometrija. Smjer vanjskog toka označen je plavim strelicama, dok je smjer unutarnjeg toka označen crvenim strelicama. Izrađene su dvije domene fluida, a jedina razlika između modela leži u smjeru valova. Nema razlike

u materijalu, mreži i geometrijskim svojstvima. Geometrijska svojstva su određena prema geometrijama difuzora i uvjetima iskazanima u [3, 21, 22].



Slika 2. Domene fluida i rubni uvjeti

Prosječna brzina od 1,00 m/s usvojena je kao normalni rubni uvjet jednolike brzine za unutarnji tok. Fluid koji prolazi kroz difuzor je morska voda koja se koristi za hlađenje. Istovremeno se za modeliranje vanjske valne okoline koriste sljedeće jednačbe prema teoriji Airyjevih valova:

$$U = \frac{H g T}{2 L_w} \frac{\cosh[2\pi(y + d) / L_w]}{\cosh(2\pi d / L_w)} \cos\left(\frac{2\pi}{L_w} x - \frac{2\pi}{T} t\right) \tag{4}$$

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

$$W = \frac{H g T}{2 L_w} \frac{\cosh[2\pi(y + d) / L_w]}{\cosh(2\pi d / L_w)} \cos\left(\frac{2\pi}{L_w} z - \frac{2\pi}{T} t\right) \tag{5}$$

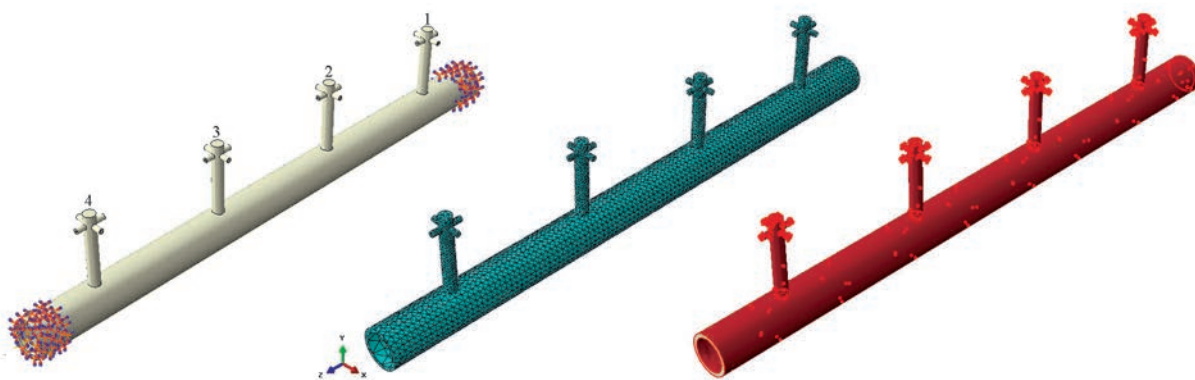
$$V = \frac{H g T}{2 L_w} \frac{\sinh(2\pi(y + d) / L_w)}{\cosh(2\pi d / L_w)} \sin\left(\frac{2\pi}{L_w} z - \frac{2\pi}{T} t\right)$$

Program za analizu konačnih elemenata [20] koristi jednačbe brzine ovisne o vremenu i lokaciji za izračunavanje hidrodinamičkih sila valova koji djeluju na difuzore, pri čemu je d dubina vode (dubina postavljana konstrukcije), H je visina valova, a T je slijed valova [23, 24]. U ovom se radu primjenjuju sljedeći parametri: d = 25 m, T = 8 s, H = 2,50 m. Valna dužina (L_w = 95,72 m) izračunava se na bazi tih parametara. Kada relativna dubina d/L_w varira između 0,05 i 0,5, tada se val svrstava u srednju dubinu vode spomenute u ovom radu. Ako val djeluje bočno u odnosu na konstrukciju, tada jednačba (4) označava granicu ulaznog vala, dok se jednačba (5) koristi kada val djeluje osno u odnosu na konstrukciju. Za domene fluida, mreža se treba projektirati za rubne uvjete. U analizama se koriste elementi tipa FC3D4 (modificirani tetraedri s četiri čvora) koji su pogodni za rješavanje FSI problema. Odabir razmaka čvorova od 0,01 m, primjenom iste vrijednosti za debljinu zida pri unutarnjem toku, te uzimanjem vrijednosti od 0,50 m za preostali dio geometrije, dolazimo do podatka da su domene sastavljene od 36641 čvora i 172364 elementa. Ista struktura mreže određena je za oba modela toka, uključujući kako bočne tako i osne smjerove valova. Promjene ispusnih brzina kod raznih modela određene su prema rezultatima dobivenima analizom CFD. Osim toga, promjene ponašanja konstrukcije modela dobivene su modeliranjem konstrukcije difuzora.

2.2. Domene konstrukcije

Analizirana su tri modela difuzora s različitim svojstvima materijala: fiksni difuzor, difuzor s jednim poljem te difuzor duljine 8 m na kraju ispusnog sustava. Promjer osnovne cijevi iznosi 0,55 m. Vertikalne cijevi duljine 1 m, od kojih svaka ima četiri sapnice postavljaju se na razmacima od po 2 m. Promjer vertikalnih cijevi iznosi 0,18 m ali se smanjuje na 0,06 m kod svake sapnice. U ovom radu koriste se zvonaste sapnice. Za modele su usvojene debljine cijevi od 0,01 m. Uvjeti toka u difuzoru ovise o geometrijskim svojstvima a kontroliraju se u skladu s [25]. Vertikalne cijevi označene su brojevima od 1 do 4, počevši od kraja difuzora.

Geometrija difuzora s mrežom ili bez mreže prikazana je na slici 3., s osloncima (jahačima) duljine 0,30 m i s vertikalnim cijevima



Slika 3. Uvjeti oslanjanja, konstrukcija mreže i zone interakcije elemenata krute geometrije

koje su označene brojevima. Za formiranje oslonaca (jahača) na početku i na kraju modela difuzora korištena su 1982 čvora. Crvenom bojom označene su zone interakcije između fluida i konstrukcije koje se trebaju odrediti u analizi. Program na bazi konačnih elemenata [20] omogućuje korisnicima izradu dva ili više materijala po istoj geometriji formiranjem zona u određenom dijelu. Tako se sapnice i vertikalne cijevi mogu modelirati raznim materijalom, osim kada se radi o glavnoj cijevi. Za elastomerni materijal definirana je gustoća od 1200 kg/m³, Youngov modul od 2,5 x 10⁷ N/m² i Poissonov koeficijent od 0,45. S druge strane, gustoća čeličnog materijala iznosi 7850 kg/m³, Youngov modul 2,1 x 10¹¹ N/m², a Poissonov koeficijent 0,30 [26, 27].

Da bi se iznašla složena rješenja, modeli se u analizi konačnih elemenata dijele na male dijelove. Modeli konstrukcija koji se koriste u programu Abaqus/Explicit sastoje se od elemenata modificiranog tetraedra s deset čvorova (C3D10M) koji su prikladni za rješavanje problema u zoni kontakta. Usvojeno je da razmaci u mreži iznose 0,01 m na sapnicama i na vertikalnoj cijevi, što odgovara vrijednosti debljine zida. Na difuzorskoj je cijevi korišten razmak od 0,05 m. Kod definiranja manjih vrijednosti javljaju se problemi trajanja i obujma. Na kraju je dobivena konačna struktura mreže formiranjem ukupno 57738 čvorova i 29135 elemenata modificiranog tetraedra tipa C3D10M, kao što se to vidi na slici 3. Sile dobivene pomoću analize CFD prodiru kroz konstrukciju preko kontaktnih površina koje su definirane na fluidu i na konstrukciji. Jednadžba koja se u programu za analizu konačnih elemenata koristi za pomak konstrukcije uslijed hidrodinamičkih sila (P) može se prikazati kako slijedi:

$$m^{NJ} \ddot{u}_{s(t)}^N = (P^J - I^J)_t \quad (6)$$

gdje m^{NJ} predstavlja matricu mase, P^J je vektor vanjskog opterećenja dobiven pomoću analize CFD, I^J je vektor unutarnjih sila koje se javljaju zbog naprezanja u elementima, \ddot{u}_s je ubrzanje, a t predstavlja vrijeme. U ovom radu se koristi pravilo eksplicitne integracije prema [20] da bi se dobili pomaci od konstrukcije do fluida. Eksplicitni dinamički postupak bazira se na provedbi pravila eksplicitne integracije te na korištenju dijagonalnih matrica mase elementa. Jednadžbe kretanja tijela integrirane su pomoću sljedećih jednadžbi.

$$\dot{u}_{s(t+\frac{1}{2})}^N = \dot{u}_{s(t-\frac{1}{2})}^N + \frac{\Delta t_{(i+1)} + \Delta t_{(i)}}{2} \ddot{u}_{s(t)}^N \quad (7)$$

Tablica 2. Brzine ispuštanja

Oznaka vertikalne cijevi	Prosječne brzine ispuštanja na sapnicama [m/s]					
	1. slučaj	2. slučaj	3. slučaj	4. slučaj	5. slučaj	6. slučaj
1	10,68	10,57	10,80	10,69	10,97	10,85
2	10,70	10,58	10,81	10,70	10,99	10,86
3	10,71	10,60	10,83	10,72	11,01	10,89
4	10,72	10,61	10,84	10,73	11,02	10,90

$$u_{s(i+1)}^N = u_{s(i)}^N + \Delta t_{(i+1)} \dot{u}_{s(i+\frac{1}{2})}^N \quad (8)$$

U jednadžbama (7-8) u_s^N i \dot{u}_s^N predstavljaju stupanj slobode (N) komponenta pomaka i brzine. Čvorno se ubrzanje može dobiti pomoću sljedeće jednadžbe:

$$\ddot{u}_{s(i)}^N = (m^{NJ})^{-1} (P_i^J - I_i^J) \quad (9)$$

Vektor unutarnjih sila sastoji se od doprinosa pojedinačnih elemenata, pa se stoga ne treba formirati matrica globalne krutosti. Spomenuta metoda ne zahtijeva iteracije u svrhu ažuriranja pomaka, brzina i ubrzanja. Objašnjenja za jednadžbe (7-9) citirana su iz izvora [20].

Iz analiza su izvedene von Misesove vrijednosti silom uzrokovanih naprezanja za krute modele, isto kao i vrijednosti pomaka. Analitičkim je programom [20] određena dobro poznata von Misesova jednadžba:

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 + 6(\sigma_{xy}^2 + \sigma_{yz}^2 + \sigma_{zx}^2)]} \quad (10)$$

gdje je σ naprezanje materijala, dok su x, y, i z odgovarajući smjerovi.

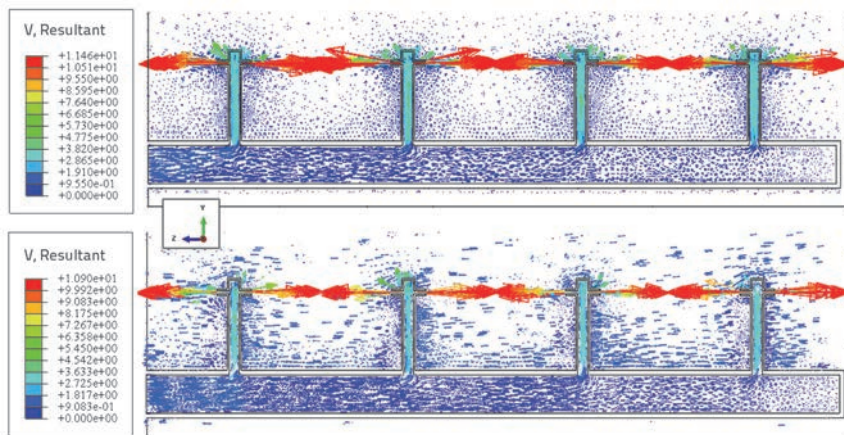
2.3. Analize interakcije fluida i konstrukcije

Tok oko difuzora određen je pomoću dva zasebna modela primjenom tehnike FSI tj. interakcije fluida i konstrukcije (eng. *Fluid-structure interaction* - FSI) i krutih i fluidnih domena. Spomenute analize izuzetno su složene i uključuju intenzivno fizičko spajanje. Domena fluida sastavljena je od unutarnjeg i vanjskog toka, a modeli difuzora predstavljaju krute domene. Interakcija između domena postiže se analizom FSI. Umjesto graničnih uvjeta bez klizanja i prodiranja na kontaktnim površinama modela fluida, granični se uvjeti određuju prema [20] u svrhu određivanja kontaktnih površina između fluida i konstrukcije. Granični uvjet za pomake mreže zadovoljen je na kontaktnim površinama modeliranjem spoja primjenom analize FSI. Određivanjem površina spoja također se određuje i prijenos sile od fluida na konstrukciju te prijenos deformacije od konstrukcije na fluid. U rješenja su uključene dvije analize. Prva je konstrukcijski model Abaqus/Explicit, a druga je model Abaqus/CFD. Analize su obavljene s vremenskim korakom od 4e⁻⁶ sekundi za ukupno vrijeme analize od 8 sekundi.

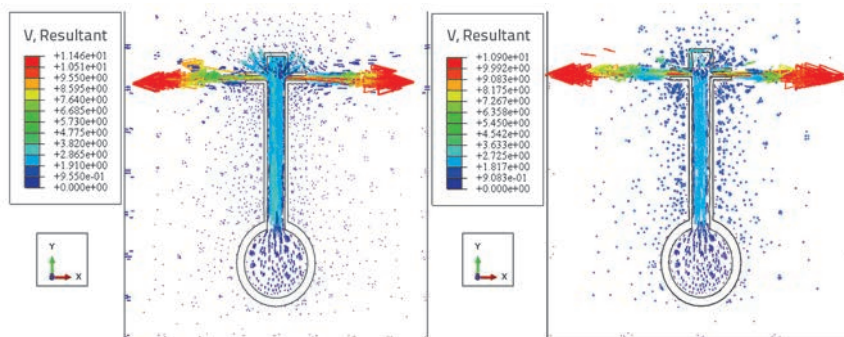
3. Analiza rezultata

Postupci Abaqus/Explicit i Abaqus/CFD trebali su se provesti zajedno da bi se mogla obaviti analiza difuzora podmorskog ispusta. U analizi su korištena dva računska modula: konstrukcijski model Abaqus/Explicit i model Abaqus/CFD. Nakon zajedničke provedbe, rezultati dijelova analize Abaqus/Explicit i Abaqus/CFD pohranjeni su u zasebne datoteke izlazne baze podataka. Kako je brzina ispuštanja osnovni parametar za djelotvorno određivanje učinkovitosti ispusta, a obzirom na to da jedna vertikalna cijev ima četiri sapnice, prosječne vrijednosti brzine prikazane su u tablici 2.

Maksimalna brzina ispuštanja od 11,02 m/s postignuta je na četvrtoj vertikalnoj cijevi u slučaju 5, dok je minimalna vrijednost od 10,57 m/s postignuta na prvoj vertikalnoj cijevi u slučaju 2. Odmah možemo zamijetiti da se te vrijednosti bitno ne razlikuju. Profili brzine za slučajeve 5-6 prikazani su na slikama 4. i 5. Te su slike



Slika 4. Bočni presjeci brzine



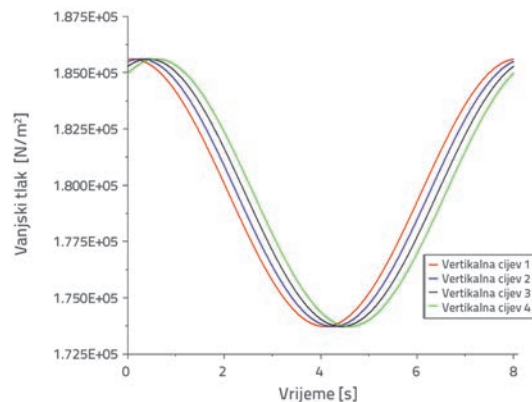
Slika 5. Poprečni presjeci brzina

Tablica 3. Maksimalni pomaci vertikalnih cijevi [$\times 10^{-3}$ m]

1. slučaj	2. slučaj	3. slučaj	4. slučaj	5. slučaj	6. slučaj
1,5	2,7	3,3	3,5	5,6	6,1

Tablica 4. Maksimalna von Misesova naprezanja [$\times 10^6$ N/m²] modela difuzora

1. slučaj	2. slučaj	3. slučaj	4. slučaj	5. slučaj	6. slučaj
1,961	2,569	1,754	2,423	1,262	1,427



Slika 6. Hidrodinamički tlak valova na vertikalne cijevi

dobivene pomoću programskog alata za pregledavanje-rezanje. Bočni profili brzine za slučaj 5 i slučaj 6 prikazani su na slici 4 odozgo prema dolje. Sve su vrijednosti na slikama 4. i 5. iskazane u m/s.

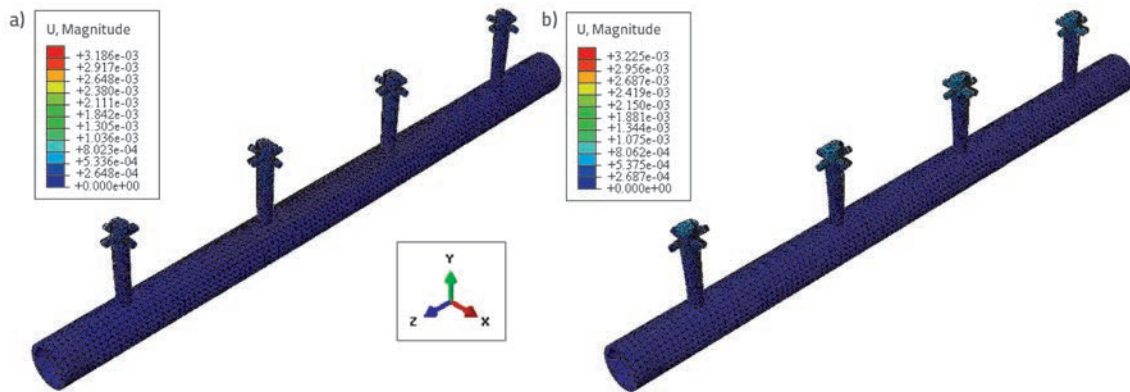
Na slici 5., poprečni presjeci brzina za slučajeve 5 i 6 iskazani su od lijeve strane prema desnoj.

Vrijednosti vanjskog hidrodinamičkog tlaka na vertikalne cijevi, dobivene tijekom analize CFD prikazane su na slici 6. Te se vrijednosti javljaju kada valovi djeluju osno. Kada valovi djeluju bočno, ista vrijednost u rasponu od $1,851 \times 10^5$ N/m² i $1,837 \times 10^5$ N/m² određena je za sve vertikalne cijevi. Hidrostatički unutarnji tlak iznosi $1,973 \times 10^5$ N/m².

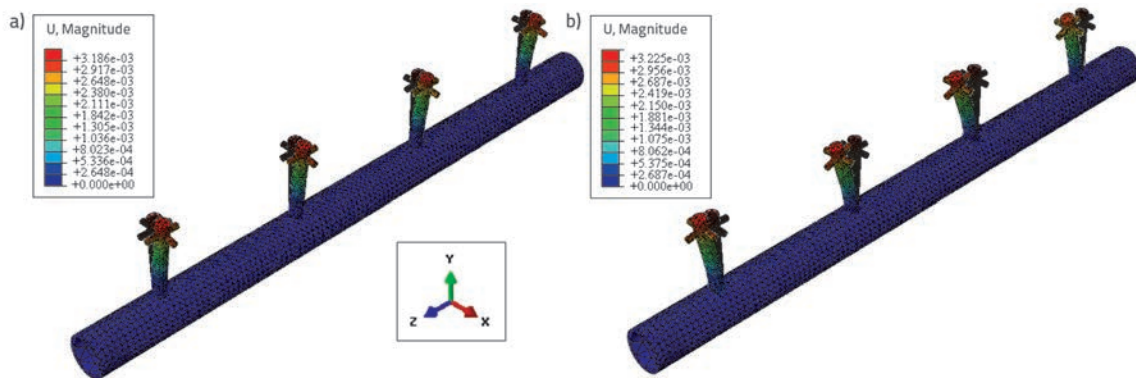
Vrijednosti hidrodinamičkog tlaka određene analitičkim programom prema broju vertikalnih cijevi, kako je prikazano na slici 3, dobivene su u vršnim točkama vertikalnih cijevi. Rezultati za fluid i konstrukciju mogu se dobiti iz analize FSI. Maksimalne vrijednosti pomaka vertikalnih cijevi uslijed toka fluida prikazane su u tablici 3.

Kada usporedimo slučajeve 2 i 3, vidimo da se maksimalni pomak povećao s $1,50 \times 10^{-3}$ m na $2,70 \times 10^{-3}$ m, dok se kod slučaja 3 i 4 ta vrijednost povećala s $3,3 \times 10^{-3}$ m na $3,5 \times 10^{-3}$ m. Vizualni prikaz vrijednosti iz tablice 3. iskazan je na slikama 7. do 9. za deformirane i nedeformirane oblike krutih modela. Na tim su slikama dimenzije iskazane u metrima.

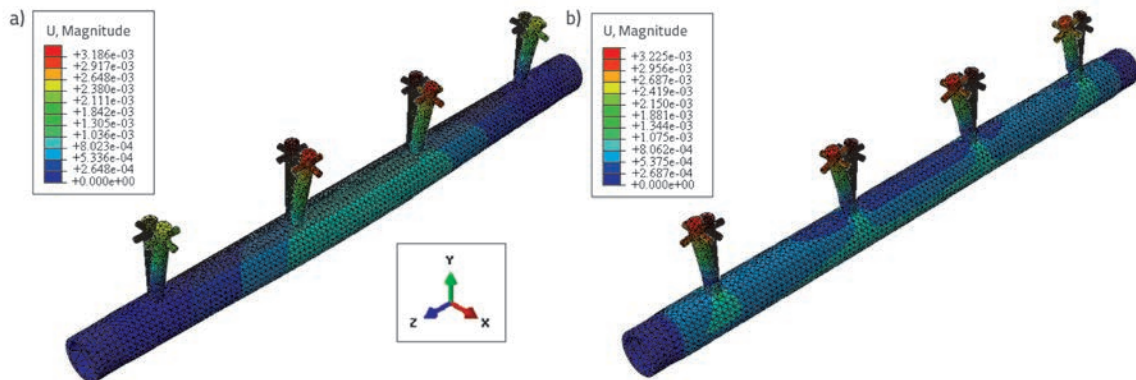
Nakon određivanja vrijednosti pomaka, definirane su i vrijednosti von Misesova naprezanja. Te su vrijednosti iskazane numerički u tablici 4., a grafički na slikama 10., 11. i 12. Vrijednosti prikazane na tim slikama iskazane su u N/m².



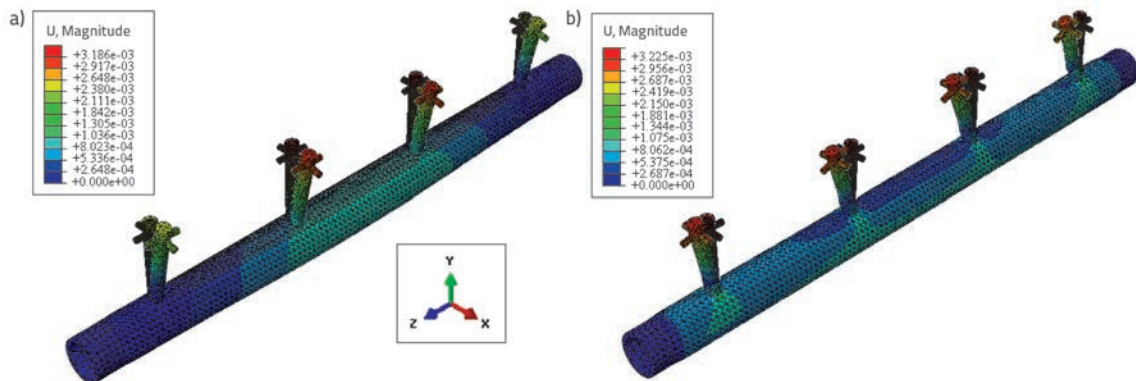
Slika 7. Vrijednosti pomaka za: a) 1. slučaj; b) 2. slučaj



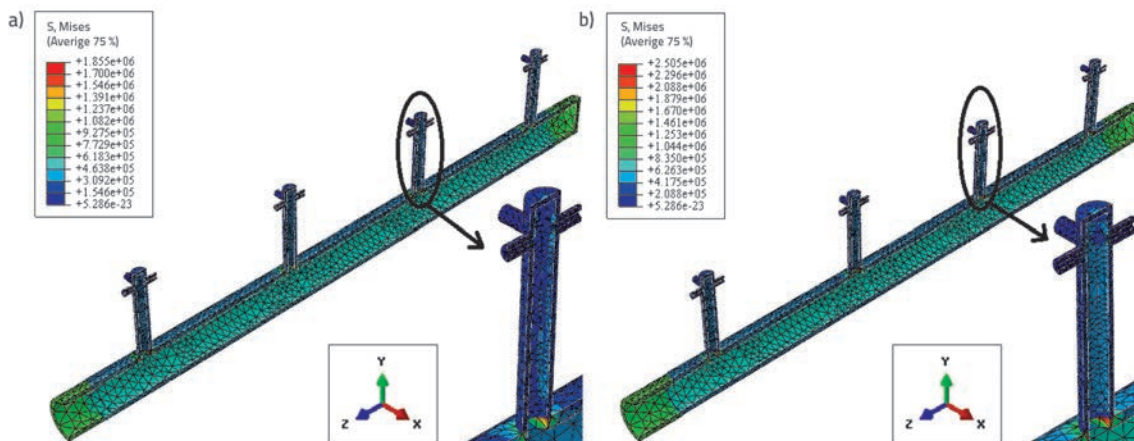
Slika 8. Vrijednosti pomaka za: a) 3. slučaj; b) 4. slučaj



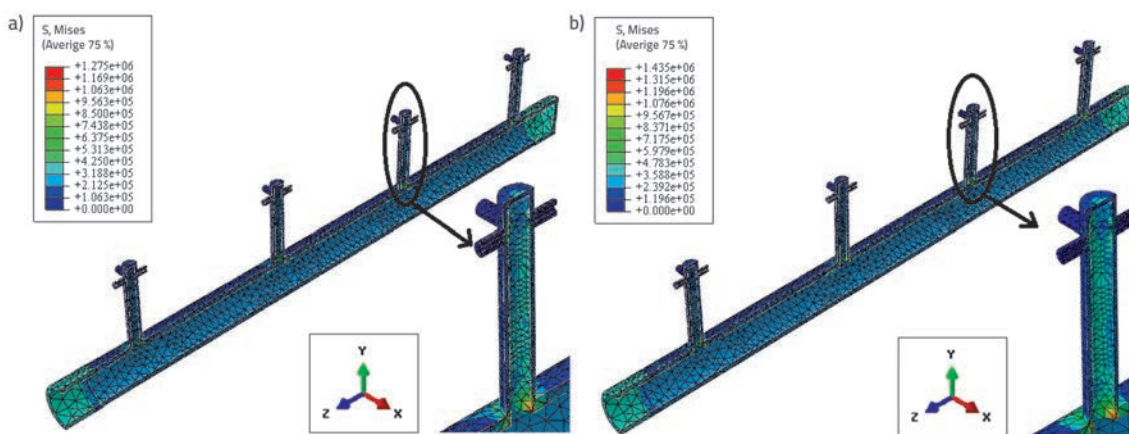
Slika 9. Vrijednosti pomaka za: a) 5. slučaj; b) 6. slučaj



Slika 10. Vrijednosti po naprezanja maka za: a) 1. slučaj; b) 2. slučaj



Slika 11. Vrijednosti po naprezanja maka za: a) 3. slučaj; b) 4. slučaj



Slika 12. Vrijednosti po naprezanja maka za: a) 5. slučaj; b) 6. slučaj

4. Zaključak

Ovo istraživanje provedeno je u svrhu numeričkog određivanja utjecaja materijala i smjera valova na brzinu ispuštanja i ponašanje konstrukcije difuzora podmorskog ispusta uređaja za desalinizaciju. Numeričke su analize obavljene pomoću programa FEM (ABAQUS) i pritom su zajednički primijenjeni postupci CFD i Explicit. Obradeno je šest slučajeva povezivanja dvaju različitih usmjerenja valova s tri difuzora izrađenih od različitih materijala. Da bi se ustanovili djelotvorni uvjeti ispuštanja, uz konstrukcijske karakteristike difuzora trebale su se potvrditi i karakteristike okolnog toka. Utjecaji konstrukcije na ispuštanje određeni su geometrijom sapnica (zvonast oblik) i svojstvima materijala od kojeg se sastoji konstrukcija. S aspekta okolnog toka, difuzor je smješten poprečno i paralelno na smjer rasprostiranja vala tako da se mogu odrediti utjecaji okolnog toka na deformaciju sapnica.

Kao što je navedeno u literaturi, manje razlike u brzini zbog pada protoka u vertikalnim cijevima smatraju se prihvatljivima kada se radi o istom slučaju. U ovom radu su difuzori zasebno podvrgnuti bočnom i osnom opterećenju valovima. Bočno valno opterećenje za otprilike 1 % manje utječe na brzinu ispuštanja

od osnog opterećenja. Sljedeći parametar za analizu bio je materijal. Razlika između modela 1 i modela 2, kod koji se glavna cijev sastoji od istog materijala, iznosi otprilike 1,1 %. Ta razlika raste na 2,76 % kod modela 1 i 3, jer se tu radi o drugačijim svojstvima materijala.

S aspekta brzine ispuštanja, potrebno je napomenuti da je utjecaj svojstava materijala veći od utjecaja smjera valova. Utjecaj smjera valova smanjen je usvajanjem rasporeda s četiri sapnice po vertikalnoj cijevi. Najvažniji rezultat je sposobnost ispusnog sustava da udovolji uvjetima djelotvornog ispuštanja izbjegavanjem prodora vode u sapnice, i to primjenom uvjeta prema kojem je Froudeov broj (Fr) veći od 1 ($Fr > 1$) u svim slučajevima. Nakon što je vrijednostima brzine potvrđena djelotvornost ispuštanja, ispitano je ponašanje konstrukcije modela u odnosu na pomak i naprezanje, kao što se to vidi na slikama 7. do 12. i u tablicama 3. i 4.

Kada su difuzori bili analizirani s aspekta maksimalnog pomaka, najveći su rezultati dobiveni za slučaj 6. U tom slučaju, osnovna cijev i vertikalne cijevi izrađene su od elastomernog materijala, a opterećenje valovima nanosi se osno. U svim je slučajevima povećanje krutosti zbog vrste materijala osnovni razlog za promjenu vrijednosti pomaka. Dok maksimalna vrijednost

pomaka iznosi $6,1 \times 10^{-3}$ u slučaju 6, ona se smanjuje na $5,6 \times 10^{-3}$ u slučaju 5 gdje je isti difuzor izložen opterećenju bočnim valovima. Kod elastomernog difuzora, vrijednosti pomaka za osne valove su za 7,20 % veće od vrijednosti koje su dobivene za utjecaj bočnim valovima.

U slučajevima 3 i 5 korišteno je bočno opterećenje, dok je u slučajevima 4 i 6 korišteno opterećenje osnim valovima. Tako je ustanovljeno da su rezultati pomaka kritičniji pri opterećenju osnim valovima negoli pri djelovanju bočnih valova. Osim toga, gotovo isti pomak uočen je kod svih vertikalnih cijevi u istom modelu kada je konstrukcija izložena djelovanju osnih valova. Međutim, slične vrijednosti pomaka dobivene su i kod bočnog opterećenja valovima za Slučaj 3 u kojem je glavna cijev izvedena od čelika, dok su vertikalne cijevi izrađene od gume.

Kada su difuzori analizirani primjenom von Misesova naprezanja, vrijednosti naprezanja bile su u svim slučajevima najveće na spojevima između glavne cijevi i vertikalnih cijevi. Dobivene vrijednosti prikazane su u tablici 4. Najveće vrijednosti naprezanja dobivene su za slučaj 2 u kojem su glavna cijev i vertikalne cijevi izrađene od čelika. U slučajevima 3 i 4,

naprezanje na spoju glavne cijevi i vertikalne cijevi ne može se zbog različitih svojstava materijala prenijeti s glavne na vertikalnu cijev. Dakle, u tom se slučaju naprezanja akumuliraju u glavnoj cijevi. Najniže vrijednosti naprezanja dobivene su za slučaj 5. Vrijednosti naprezanja i pomaka veće su kod osnog nego kod bočnog opterećenja valovima. Rezultati su kritičniji kod pomaka i naprezanja zbog utjecaja osnog opterećenja valovima. Tome je uglavnom razlog veća udaljenost koju valovi moraju prijeći u slučaju osnog opterećenja nego što je to slučaj kod bočnog opterećenja.

U ovom je radu pomoću odgovarajućeg numeričkog računalnog programa modeliran difuzor dužine 8 m. Utjecaj osnog opterećenja valovima može se bolje uočiti kada se za duljinu difuzora usvoji samo dužina valova. U konačnici je ustanovljeno da je slučaj 5 najprikladniji u smislu fleksibilnosti vertikalnih cijevi pri utjecajima kao što su udar valova i utjecaj morskih struja, te u pogledu pogodnosti s obzirom na bočno opterećenje. Da bi se izbjegla moguća oštećenja uslijed vanjskih opterećenja, može se u slučaju znatnih opterećenja tog tipa primijeniti metoda zatrpavanja.

LITERATURA

- [1] Bleninger, T., Jirka G.H.: User's Manual for Corhyd: An Internal Diffuser Hydraulics Model, Version 1.0, *University of Karlsruhe*, 2005.
- [2] Grace, R.A.: Marine Outfall Construction Background, Techniques, and Case Studies, *American Society of Civil Engineers*, 2009., <http://dx.doi.org/10.1061/9780784409848>
- [3] Ludwig, R.G.: Environmental Impact Assessment, Siting and Design of Submarine Outfalls, *An EIA Guidance Document*, 1988.
- [4] Hunt, C.D., Mansfield, A.D., Mickelson, M.J., Albro, C.S., Geyer, W.R., Roberts, P.J.W.: Plume Tracking and Dilution of Effluent from The Boston Sewage Outfall, *Marine Environmental Research*, 70, pp. 150-161, 2010., <http://dx.doi.org/10.1016/j.marenvres.2010.04.005>
- [5] Bleninger, T., Perez, L.M., Milli H., Jirka G.H.: Internal Hydraulic Design of A Long Diffuser in Shallow Water: Buenos Aires Sewage Disposal in Rio De La Plata Estuary, *Proceedings of XXXI IAHR Congresses*, Seoul, S.Korea, 2005.
- [6] Ahmad, N., Baddour, R.E.: A Review of Sources, Effects, Disposal Methods, and Regulations of Brine into Marine Environments, *Ocean&Coastal Management*, 87, pp. 1-7, 2014., <http://dx.doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2013.10.020>
- [7] Mendonça, A., Losada, M.Á., Reis, M.T., Neves, M.G.: Risk Assessment in Submarine Outfall Projects: The Case of Portuga, *Journal of Environmental Management*, 116, pp. 186-195, 2013., <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.12.003>
- [8] Reiff, F.M.: Small Diameter (HDPE) Submarine Outfalls, *Pan American Center for Sanitary Engineering and Environmental Sciences (CEPIS)*, 2002.
- [9] Creek, D.: WPCP Outfall EA-Variable Port Opening Technology-Technical Review, *CH2M HILL*, 2012.
- [10] Duer, M.J.: Use of Elastomeric "Duckbill" Valves for Long-Term Hydraulic and Dilution Efficiency of Marine Diffusers, *Marine Waste Water Discharges*, Genova, Italy, 2000.
- [11] Grace, R.A.: Marine Outfall Systems: Planning, Design and Construction. *Prentice-Hall Inc.*, New Jersey, USA, 1978.
- [12] Gücüyen, E., Erdem, R.T., Gökkuş, Ü.: Irregular Wave Effects on Dynamic Behavior of Piles, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 38, pp. 1047-1057, 2013., <http://dx.doi.org/10.1007/s13369-012-0428-6>
- [13] Gong, S-f, Ni, X-y, Bao, S., Bai, Y.: Asymmetric Collapse of Offshore Pipelines under External Pressure, *Ships and Offshore Structures*, 8 (2), pp. 176-188, 2013., <http://dx.doi.org/10.1080/17445302.2012.691273>
- [14] Bai, Y., Ruan, W., Yuan, S., He, X., Fu, J.: 3D Mechanical Analysis of Subsea Manifold Installation By Drill Pipe in Deep Water, *Ships and Offshore Structures*, 9 (3), pp. 333-343, 2014., <http://dx.doi.org/10.1080/17445302.2013.783538>
- [15] Lee, J.S., Lee, S.H.: Fluid-Structure Interaction for The Propulsive Velocity of A Flapping Flexible Plate at Low Reynolds Number, *Computers & Fluids*, 71, pp. 348-374, 2013., <http://dx.doi.org/10.1016/j.compfluid.2012.10.029>
- [16] Namkoong, K., Choi, H.G., Yoo, J.Y.: Computation of Dynamic Fluid-Structure Interaction in Two-Dimensional Laminar Flows Using Combined Formulation, *Journal of Fluids and Structures*, 20, pp. 51-69, 2005., <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2004.06.008>
- [17] Liu, Z.G., Liu, Y., Lu, J.: Numerical Simulation of The Fluid-Structure Interaction for An Elastic Cylinder Subjected to Tubular Fluid Flow, *Computers & Fluids*, 68, pp. 192-202, 2012., <http://dx.doi.org/10.1016/j.compfluid.2012.08.010>

- [18] 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, pp. 184-216, 2014., <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2014.06.023>
- [19] 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 (8), pp. 700-719, 2013., <http://dx.doi.org/10.1080/19648189.2013.814551>
- [20] ABAQUS/CAE 6.10, 2010.
- [21] Agudo, E.G., Amaral, R., Berzin, G.: Evaluation of The Efficiency of Santo/Sao Vicente Preconditioning Station for an Oceanic Submarine Outfall, *Water Science & Technology*, 18 (11), pp. 83-91, 1986.
- [22] Roberts, P.J.W., Salas, H.J., Reiff, F.M., Libhaber, M., Labbe, A. Thomson, J.C.: *Marine Wastewater Outfalls and Treatment Systems*, IWA Publishing, 2010.
- [23] Chakrabarti, S.K.: *Handbook of Offshore Engineering*, Offshore Structure Analysis Inc., Volume II, 2005.
- [24] Vukovic, Z., Kuspilic, N.: Load Exerted on Undersea Pipelines by Irregular Waves and Sea Currents, *GRADEVINAR* 49 (6), pp. 317-323, 1997.
- [25] Fischer H.B., List E.J., Koh, R.C., Imberger, J., Brooks, N.H.: *Mixing in Inland and Coastal Waters*, Academic Press, 1979.
- [26] *Materials Data Book*, Cambridge University Engineering Department, 2003.
- [27] Koblar, D., Škofic, J., Boltežar, M.: Evaluation of the Young's Modulus of Rubber-Like Materials Bonded to Rigid Surfaces with Respect to Poisson's Ratio, *Journal of Mechanical Engineering*, 60 (7-8), pp. 506-511, 2014., <http://dx.doi.org/10.5545/sv-jme.2013.1510>