

(مقاله پژوهشی)

بررسی تاثیر فاصله بین دو استوانه شناور و ثابت بر روی نیروهای هیدرودینامیکی ناشی از تفرق موج

سینا قنبری‌نمین^۱، اتابک فیضی^۲، ابوالفتح عسکریان‌خوب^۳

a_feizi@uma.ac.ir

۱- کارشناسی ارشد مهندسی عمران-گرایش مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۲- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی

۳- استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علوم دریایی امام خمینی (ره)

چکیده

وجود یک جسم در مقابل امواج پیشرونده، بسته به ابعاد جسم در مقایسه با طول موج می‌تواند موجب تغییر در پروفیل موج برخوردشونده به سازه و تفرق آن گردد. موج متفرق شده نیز به نوبه خود نیروهای مرتبه اول و مرتبه دوم به جسم قرار گرفته در پشت جسم اول وارد می‌کند. در این مقاله ابتدا نتایج بدست آمده حاصل از شبیه‌سازی عددی یک سکوی استوانه‌ای شکل با داده‌های تجربی مقایسه گردید. سپس برای بررسی اندرکنش دو سازه شناور، با قرار دادن دو استوانه ثابت و شناور در مقابل امواج استوکس مرتبه دوم به بررسی تاثیر تغییر فاصله بین این استوانه‌ها برای بدست آوردن نیروهای وارد بر استوانه شناور پرداخته شده است. همچنین در یک فاصله ثابت تاثیر افزایش شعاع استوانه شناور بر روی نیروهای دریافت و تفرق وارد شده بر استوانه شناور مورد ارزیابی قرار گرفته است. تحلیل عددی با استفاده از نرم افزار المان مرزی انسیس آکوا بر پایه تئوری تفرق انتشار سه بعدی در حوزه فرکانس انجام شده است. نتایج بدست آمده نشان داد که با افزایش فاصله استوانه شناور از استوانه ثابت، نیروی تفرق کاهش یافته و بیشینه این نیرو در فرکانس‌های بالاتر اتفاق می‌افتد. همچنین در فرکانس‌های پایین‌تر نیروی دریافت کمتری به استوانه شناور وارد می‌گردد که با افزایش فرکانس موج این نیرو افزایش می‌یابد. در نهایت با بررسی تاثیر افزایش شعاع استوانه شناور می‌توان مشاهده نمود که هر چه شعاع استوانه افزایش یابد، مقادیر نیروی دریافت و تفرق وارد بر استوانه شناور با نرخ بیشتری افزایش می‌یابد.

واژگان کلیدی: اندرکنش سازه شناور، نیروهای هیدرودینامیکی مرتبه دوم، نیروی دریافت، موج استوکس مرتبه دوم.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۸/۰۹/۲۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۹/۰۳/۲۰

صص ۶۵-۵۲

۱- مقدمه

اگرچه نیروهای مرتبه اول موج، بخش قابل توجهی از نیروی موج را شامل می‌شوند اما در برخی شرایط، اثرات غیرخطی موج اهمیت زیادی پیدا می‌کنند که برای محاسبه این اثرات از تئوری‌های مرتبه دوم استفاده می‌شود. در این تئوری‌ها شرط نفوذ ناپذیری جریان در جسم با دقت بیشتری بر روی سطح خیس لحظه‌ای بدنه در نظر گرفته می‌شود. علاوه بر اثرات غیرخطی، سرعت ذرات سیال نیز روی سطح آزاد در نظر گرفته خواهد شد. در حل مرتبه دوم تمام ترم‌های مربوط به پتانسیل سرعت، فشار سیال و نیروهای موج که با دامنه رابطه خطی دارند و با توان دوم دامنه موج نیز رابطه دارند در نظر گرفته می‌شوند. حل مسئله مرتبه دوم شامل نیروهای متوسط، و نیروهای نوسان کننده با فرکانس‌های بیشتر یا کمتر از فرکانس موج است. به طور کلی تحقیقات انجام شده در زمینه محاسبه نیروهای مرتبه دوم موج را می‌توان در چهار دسته مجزا بررسی کرد [۱].

دسته اول روش‌های مبتنی بر تئوری پتانسیل با در نظر گرفتن قانون بقای مومنتم و انرژی در سیال اطراف شناور است. در این روش‌ها تغییرات در مومنتم سیال با نیروی متوسط سیال وارد بر شناور برابر در نظر گرفته می‌شود. به این روش‌ها روش‌های میدان دور گفته می‌شود. در دسته دوم روش‌های مبتنی بر روش تئوری پتانسیل قرار دارد که با انتگرال‌گیری مستقیم فشار سیال وارد بر بدنه شناور نیروهای متوسط مرتبه دوم موج را محاسبه می‌کنند و به روش‌های میدان نزدیک معروف می‌باشند. همچنین روش دیگری به نام روش‌های مبتنی بر تئوری پتانسیل وجود دارد که نیروهای مرتبه دوم موج را با برابر قرار دادن انرژی میرایی تشعشع و کار انجام شده توسط موج برخوردی به دست می‌آورند. این روش‌ها تقریبی بوده و با فرض بدنه سیلندری شناور نتایج مناسبی خواهد داشت.

در نهایت می‌توان روش‌های تقریبی نام برد که بر مبنای معادله موریسون و حرکت نسبی نیروهای مرتبه دوم موج را محاسبه می‌کنند که این روش‌ها برای سازه‌های نیمه مغروق لاغر کاربرد بیشتری دارند. نیروی ناشی از امواج تفرق و تشعشع، اثر مهمی بر روی اجسام شناور در آب‌های عمیق دارند. موج تفرق، ترم متفرق شده‌ای از موج برخوردی توسط جسم ثابت را نشان می‌دهد. از طرف دیگر، موج تشعشع بدین

معناست که موج به وسیله نوسان سازه در آب ساکن منتشر می‌شود. نیروهای ناشی از این پدیده‌ها را می‌توان با انتگرال‌گیری از فشار بر روی سطح سازه شناور با استفاده از پتانسیل تفرق و تشعشع تعیین نمود. گودمن [۲] با انتگرال‌گیری مستقیم فشار روی بدنه، نیروی متوسط عمودی وارد بر یک سیلندر مغروق در موج منظم جانبی و از روبرو برای طول موج‌های در محدوده قطر سیلندر را محاسبه نمود.

دالزل و همکاران [۳] مؤلفه‌های نیروهای متوسط موج را با تئوری سالوسن^۱ محاسبه کردند. مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی، دقت خوب این تئوری را نشان می‌دهد. پینکستر [۴] بر اساس انتگرال‌گیری مستقیم فشار، رابطه‌ای برای نیروی متوسط و فرکانس پایین وارد بر فشار در اثر حرکت در موج غیرمنظم استخراج کرد. پیچفرز و همکاران [۵] روابطی بر اساس معادله موریسون برای محاسبه نیروی متوسط مرتبه دوم موج روی سازه‌های نیمه مغروق استخراج کردند. در یک دریای نامنظم که متشکل از برهم نهی مولفه‌های موج منظم است، نیروهای هیدرودینامیکی مرتبه دوم فرکانس بالا و پایین در مجموع و تفاضل فرکانس‌های تشکیل شده از امواج خطی افزایش می‌یابند. این امواج غیرخطی موج می‌تواند نقش مهمی در تحریک برخی از پدیده‌های مهم مانند دریافت آهسته داشته باشد [۶ و ۷]. اندرکنش مرتبه دوم بین امواج و سازه‌ها توجه محققان زیادی را به خود جلب کرده است. فرمولاسیون نیمه تحلیلی برای نیروی مرتبه دوم موج اعمال شده بر ساختارهای هندسی بنیادی توسط ایتو تیلور [۱۰] با استفاده از روش غیرمستقیم [۸ و ۹] که مبتنی بر معرفی یک پتانسیل تابشی برای محاسبه نیروهای موج مرتبه دوم و بدون ارزیابی صریح پتانسیل تفرق مرتبه دوم موج است، ارائه شده است.

از سوی دیگر، روش‌های مستقیم‌تر، از جمله پتانسیل مرتبه دوم توسط کیم و یوای [۱۱]، چووع و ایتو تیلور [۱۲]، هانگ و تایتو تیلور [۱۳] و تنگ و کاتو [۱۴] اتخاذ شده است. وازکوئز [۱۵] روش المان مرزی و روش غیرمستقیم را به منظور بهبود یک روش برای بارهای هیدرودینامیکی مرتبه دوم در سازه‌های دریایی در امواج دوطرفه را ترکیب نمود. رنو و همکاران [۱۶] فرمول میدان متوسط را به موارد امواج برخوردی دوطرفه گسترش داده و محاسبات نیروهای رانش

¹ Salvesen

$$P(\vec{X}, t) = -\rho g a_w \quad (2)$$

$$* e^{i[-\omega t + k(X \cos \chi + Y \sin \chi) + a] + kZ} - \rho g Z$$

$$\vec{v} = a_w \omega e^{i[-\omega t + k(X \cos \chi + Y \sin \chi) + a] + kZ} \quad (3)$$

$$* (\cos \chi, \sin \chi, -i)$$

۲-۲- موج استوکس مرتبه دوم

اهمیت تئوری‌های توسعه یافته موج در مواردی که عبارات غیر خطی مورد توجه است ضروری می‌باشد [۱۷، ۱۸]. در امواج استوکس مرتبه دوم پتانسیل و ارتفاع موج به صورت معادلات ۴ و ۵ خواهند بود.

$$\Phi(\vec{X}, t) = \Phi^{(1)}(\vec{X}, t) + \Phi^{(2)}(\vec{X}, t) =$$

$$-\frac{iga_w \cosh[k(Z+d)]}{\omega \cosh(kd)} e^{i[-\omega t + kX' + a]} \quad (4)$$

$$-i \frac{3}{8} \omega a_w^2 \frac{\cosh[2k(Z+d)]}{\sinh^4(kd)} e^{i[-2\omega t + 2kX' + 2a]}$$

$$-Cgt$$

$$\zeta(X, Y, t) = \zeta^{(1)}(X, Y, t) + \zeta^{(2)}(X, Y, t)$$

$$= a_w e^{i[-\omega t + kX' + a]} + \frac{1}{4} k a_w^2 \frac{\cosh(kd)}{\sinh^3(kd)} \quad (5)$$

$$* [2 + \cosh(2kd)] e^{i[-2\omega t + 2kX' + 2a]}$$

$$+ (D + C)$$

به طوری که:

$$D = -\frac{ka_w^2}{2 \sinh(2kd)}$$

$$C = -\frac{ka_w^2}{4} \frac{[4S+1 - \tanh(kd)]}{[4S^2 kd - \tanh(kd)]} \quad (6)$$

$$S = \frac{\sinh(2kd)}{2kd + \sinh(2kd)}$$

عبارات فوق ثابت‌هایی با مقدار منفی هستند که Set-Down نامیده می‌شوند و سطح متوسط موج استوکس منظم را نشان می‌دهد. سرعت ذرات سیال در مختصات (X, Y, Z) برابر است با:

$$\vec{v}(\vec{X}, t) = \vec{v}^{(1)}(\vec{X}, t) + \vec{v}^{(2)}(\vec{X}, t) \quad (7)$$

$$k\Phi^{(1)}(\vec{X}, t)$$

$$* (i \cos \chi, i \sin \chi, \tanh[k(+d)]) + 2k\Phi^{(2)}(\vec{X}, t)$$

$$* (i \cos \chi, i \sin \chi, \tanh[2k(Z+d)])$$

فشار مرتبه دوم سیال نیز برابر است با:

$$-\frac{1}{2} \rho \{ \text{Re}(\vec{v}). \text{Re}(\vec{v}) + p = -\rho \frac{\partial \Phi(\vec{X}, t)}{\partial t}$$

$$i \text{Im}(\vec{v}). \text{Im}(\vec{v}) \} - \rho g Z$$

$$= -\rho \frac{\partial \Phi^{(1)}(\vec{X}, t)}{\partial t} - \rho \frac{\partial \Phi^{(2)}(\vec{X}, t)}{\partial t} - \rho g Z \quad (8)$$

$$-\frac{1}{2} \rho \left\{ \text{Re}(\vec{v}^{(1)}). \text{Re}(\vec{v}^{(1)}) \right\} + O(\varepsilon^3)$$

$$\left. + i \text{Im}(\vec{v}^{(1)}). \text{Im}(\vec{v}^{(1)}) \right\}$$

در آب‌های عمیق $(d \rightarrow \infty)$ موج استوکس مرتبه دوم به صورت زیر تبدیل خواهد شد.

موج و بارهای کم فرکانس را برای یک کشتی باربری^۱ انجام دادند. وجود یک جسم در مقابل امواج پیشرونده بسته به ابعاد جسم در مقایسه با طول موج می‌تواند موجب تغییر در پروفیل موج برخورد شونده به سازه گردد. موج متفرق شده نیز به نوبه خود نیروهای مرتبه اول و مرتبه دوم به جسم قرار گرفته در پشت جسم اول وارد می‌کند. در این مقاله با قرار دادن دو استوانه ثابت و شناور در مقابل امواج استوکس مرتبه دوم به تاثیر تغییر فاصله ما بین این استوانه‌ها برای بدست آوردن نیروهای وارد بر استوانه شناور پرداخته شده است. همچنین در یک فاصله ثابت تاثیر افزایش شعاع استوانه شناور بر روی نیروهای دریافت و تفرق وارد شده بر استوانه شناور مورد ارزیابی قرار گرفته شده است.

۲- معادلات اساسی حاکم

هر موجی یک معادله دارد که معادله موج گفته می‌شود. بر اساس این معادله پروفیل موج ترسیم می‌گردد. در ابتدا مشخصات و پارامترهای مربوط به موج منظم جهت بدست آوردن معادله پتانسیل سرعت توضیح داده می‌شود و سپس به معرفی موج استوکس مرتبه دوم پرداخته خواهد شد.

۲-۱- معادلات موج خطی

موج خطی ایری به عنوان ساده‌ترین موج اقیانوس در نظر گرفته می‌شود و بر فرض همگن، تراکم ناپذیر، غیرلزج و غیرچرخشی بودن سیال است. علاوه بر این، فرض می‌گردد دامنه موج در مقایسه با طول موج و عمق آب کوچک است، از این رو از شرایط سطح آزاد خطی استفاده شده است. با فرض ایده‌آل و غیرچرخشی بودن سیال، تمام رفتار سیال را می‌توان با یک پتانسیل سرعت که بتواند معادله لاپلاس را در کل دامنه سیال، شرایط سطح آزاد خطی، افقی و شرایط بستر نفوذناپذیر ارضا کند، به صورت معادله (۱) نشان داد.

$$\Phi_I(\vec{X}, t) = \varphi_I(\vec{X}) e^{-i\omega t} \quad (1)$$

$$= -\frac{iga_w}{\omega} e^{i[-\omega t + k(X \cos \chi + Y \sin \chi) + a] + kZ}$$

در این رابطه عبارت a_w : دامنه موج، ω : فرکانس موج (رادیان بر ثانیه)، k : عدد موج، χ : جهت موج و a : فاز موج، ρ چگالی آب می‌باشد.

فشار و سرعت ذرات سیال نیز با معادلات زیر بیان می‌شوند:

^۱ LNG

آشفته‌گی موج تعمیم یافته از بین می‌رود.

برای حل تابع پتانسیل سرعت سیال که توسط شرایط مرزی کنترل می‌شود یک روش انتگرال گیری مرزی در آکوا مورد استفاده قرار می‌گیرد.

روش المان مرزی در واقع یک روش برای حل معادلات دیفرانسیل بر اساس تابع گرین است که در آن نیازی به جداسازی داخل و خارج میدان نبوده و فقط معادله‌ی حاکم بر روی مرز حل می‌شود. در این روش ابعاد مسئله یک بعد کاهش یافته، بنابراین مجهولات کمتری وجود خواهد داشت. در نتیجه برای حل مسئله به حافظه و زمان محاسباتی کمتری نیاز است. این روش با تکیه بر قضیه گرین با کاهش ابعاد دامنه حل به اندازه یک واحد این امکان را ایجاد می‌نماید تا هندسه‌های سه بعدی با المان‌های سطحی و هندسه‌های دوبعدی با المان‌های خطی مدل سازی شوند.

در این روش حوزه فرکانس ضربان دار تابع گرین در آب معرفی شده است که از شرایط مرزی سطح آزاد خطی، شرایط بستر دریاها و شرایط تشعشع میدان دور پیروی می‌کند و شرایط زیر در میدان سیال ارضا می‌شود [۲۰]

$$\Delta G(\vec{X}, \vec{\xi}, \omega) = \frac{\partial^2 G}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 G}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 G}{\partial Z^2} \quad (15)$$

$$= \delta(\vec{X} - \vec{\xi}) \quad \text{where } X \in \Omega \text{ and } \xi \in \Omega$$

که $\vec{\xi} = (\xi, \eta, \zeta)$ نشان دهنده مکان یک چشمه می‌باشد، و تابع

دلتای دیراک به صورت زیر می‌باشد:

$$\delta(\vec{X} - \vec{\xi}) = \begin{cases} 0 & \text{where } \vec{X} - \vec{\xi} \neq 0 \\ \infty & \text{where } \vec{X} - \vec{\xi} = 0 \end{cases} \quad (16)$$

تابع گرین نیز به صورت رابطه (۱۷) بیان می‌گردد.

$$G(\vec{X}, \vec{\xi}, \omega) = \frac{1}{r} + \frac{1}{r_2} + \int_0^\infty \frac{2(k+v)e^{-kd} \cosh[k(Z+d)] \cosh[k(\zeta - \eta)]}{k \sinh(kd) - v \cosh(kd)} * j_0(kR) dk \quad (17)$$

$$+ i2\pi * \frac{(k_0 + v)e^{-k_0 d} \cosh[k_0(Z+d)] \cosh[k_0(\zeta - \eta)]}{\sinh(k_0 d) + k_0 d \cosh(k_0 d) - v d \sinh(k_0 d)} * j_0(k_0 R)$$

به طوری که J_0 تابع بسل نوع اول می‌باشد. همچنین داریم:

$$R = [(X - \xi)^2 + (Y - \eta)^2]^{\frac{1}{2}} \\ r = [R^2 + (Z - \zeta)^2]^{\frac{1}{2}} \\ r_2 = [R^2 + (Z + \zeta - 2d)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (18) \\ v = \frac{\omega^2}{g} \\ k_0 \tanh(k_0 d) = v$$

$$\Phi(\vec{X}, t) = \Phi^{(1)}(\vec{X}, t) + \Phi^{(2)}(\vec{X}, t) \\ = -\frac{ig\zeta a}{\omega} e^{i[-\omega t + kX' + a] + kZ} \quad (9)$$

$$\zeta(X, Y; t) = \zeta^{(1)}(X, Y; t) + \zeta^{(2)}(X, Y; t) \\ = a_w e^{-i\omega t + ikX} + \frac{1}{2} k a_w^2 e^{i[-2\omega t + 2kX' + 2a]} \quad (10)$$

۳-۲- معادلات پتانسیل

در تئوری تفرق، نیروی موج توسط محاسبه انتگرال فشار بر روی سطح خیس جسم بدست می‌آید. این روش زمانی قابل استفاده است که اولاً ابعاد جسم در مقایسه با دامنه حرکت موج بزرگ باشد و بتوان از نیروهای ناشی از ویسکوزیته سیال صرف نظر نمود،

ثانیاً جسم آنقدر بزرگ باشد که ابعاد آن در برابر طول موج دریا قابل توجه بوده و میدان موج را در اثر تفرق و انتشار موج تحت تأثیر قرار دهد. در تئوری تفرق میدان جریان سیال توسط تابع پتانسیل جریان بیان می‌شود. بنابراین باید تابع پتانسیل در معادله لاپلاس صدق نماید و همچنین شرط مرزی سطح جسم، شرط مرزی سطح آزاد و بستر دریا و شرط مرزی بی نهایت، ارضا گردد.

تابع پتانسیل برای جریان تراکم ناپذیر، لزجت ثابت و غیر چرخشی از حل معادله لاپلاس به دست می‌آید که در همه جای دامنه سیال، Ω به صورت معادله (۱۱) قابل استفاده است [۱۹].

$$\nabla \varphi = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial Z^2} = 0 \quad (11)$$

شرط مرزی روی سطح آزاد از معادله (۱۲) پیروی می‌کند.

$$-\omega^2 \varphi + g \frac{\partial \varphi}{\partial Z} = 0 \quad \text{on } Z = 0 \quad (12)$$

شرط مرزی سطح بدنه در سطح خیس متوسط بدنه S_0 نیز از روابط (۱۳) استفاده می‌نماید:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial n} = \begin{cases} -i\omega n_j & \text{برای پتانسیل تشعشع} \\ -\frac{\partial \varphi}{\partial n} & \text{برای پتانسیل تفرق} \end{cases} \quad (13)$$

در عبارت بالا φ نشان دهنده تابع پتانسیل سرعت برای توصیف سیستم موج سینوسی ورودی اولیه است. شرط مرزی بستر دریا در عمق d نیز به صورت رابطه (۱۴) است:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial Z} = 0 \quad \text{on } Z = -d \quad (14)$$

شرط تشعشع مناسب باید به این معادلات اضافه گردد. به طوری که با دور شدن موج از سازه: $\sqrt{x^2 + y^2} \rightarrow \infty$

واحد می‌باشند [۱۷]. با مشخص شدن پتانسیل سرعت موج، توزیع فشار هیدرودینامیکی مرتبه اول با استفاده از معادله خطی برنولی بدست می‌آید.

$$p^{(1)} = -\rho \frac{\partial \phi(\vec{X}, t)}{\partial t} = i\omega \rho \phi(\vec{X}) e^{-i\omega t} \quad (25)$$

همچنین با استفاده از توزیع فشار، نیروهای متغیر سیال با انتگرال‌گیری از فشار بر روی سطوح خیس جسم (S_0) بدست می‌آید. در نتیجه نیرو و گشتاور هیدرودینامیکی مرتبه اول را می‌توان به صورت معادله ۲۶ بدست آورد.

$$F_j e^{-i\omega t} = - \int_{S_0} p^{(1)} n_j dS = \left[-i\omega \rho \int_{S_0} \phi(\vec{X}) n_j dS \right] e^{-i\omega t} \quad (26)$$

نیروی هیدرودینامیکی کل مرتبه اول را می‌توان به صورت معادله ۲۷ بیان نمود.

$$F_j = [(F_{Ij} + F_{Aj}) + \sum_{k=1}^6 F_{rjk} x_k] \quad (27)$$

where $j = 1, \dots, 6$

نیروی فرود-کریلف زام ناشی از موج برخوردی (F_{Ij})، نیروی تفرق زام ناشی از تفرق موج (F_{Aj})، نیروی تشعشع زام ناشی از تشعشع موج با دامنه واحد (F_{rjk}) در حرکت کلام جسم صلب به صورت رابطه ۲۸ است.

$$\begin{aligned} F_{Ij} &= -i\omega \rho \int_{S_0} \phi_I(\vec{X}) n_j dS \\ F_{Aj} &= -i\omega \rho \int_{S_0} \phi_A(\vec{X}) n_j dS \\ F_{rjk} &= -i\omega \rho \int_{S_0} \phi_{rk}(\vec{X}) n_j dS \end{aligned} \quad (28)$$

نیروهای تولید شده توسط سیال را می‌توان در قالب مؤلفه‌های عمل و عکس‌العمل شرح داد به طوری که نیروی تحریک موج به عنوان نیروی عمل، از نیروی تفرق و فرود-کریلف حاصل می‌گردد و نیروی عکس‌العمل از نیروی تشعشع بدست می‌آید که حاصل امواج انتشار یافته از حرکات جسم شناور است.

با بیان اینکه پتانسیل تفرق موج، ϕ_{rk} ، دارای دو قسمت حقیقی و موهومی است، می‌توان با جایگزینی در عبارت F_{rjk} جرم افزوده و ضریب میرایی موج را به صورت روند زیر بدست آورد.

$$\begin{aligned} F_{rjk} &= -i\omega \rho \int_{S_0} \{ \text{Re}[\phi_{rk}(\vec{X})] + \\ & i \text{Im}[\phi_{rk}(\vec{X})] \} n_j dS \\ &= \omega \rho \int_{S_0} \text{Im}[\phi_{rk}(\vec{X})] n_j dS - \\ & i\omega \rho \int_{S_0} \text{Re}[\phi_{rk}(\vec{X})] n_j dS \end{aligned} \quad (29)$$

$$\begin{aligned} A_{jk} &= \frac{\rho}{\omega} \int_{S_0} \text{Im}[\phi_{rk}(\vec{X})] n_j dS \\ B_{jk} &= -\rho \int_{S_0} \text{Re}[\phi_{rk}(\vec{X})] n_j dS \end{aligned} \quad (30)$$

با استفاده از قضیه گرین، پتانسیل سرعت امواج تفرق و تشعشع می‌تواند به صورت معادله انتگرال فردهلم نوع دوم به صورت رابطه ۱۹ بیان شود.

$$c\phi(\vec{X}) = \int_{S_0} \left\{ \phi(\vec{\xi}) \frac{\partial G(\vec{X}, \vec{\xi}, \omega)}{\partial n(\vec{\xi})} - G(\vec{X}, \vec{\xi}, \omega) \frac{\partial \phi(\vec{\xi})}{\partial n(\vec{\xi})} \right\} dS \quad (19)$$

در این رابطه مقدار c به صورت زیر می‌باشد.

$$c = \begin{cases} 0 & \vec{X} \notin \Omega \cup S_0 \\ 2\pi & \vec{X} \in S_0 \\ 4\pi & \vec{X} \in \Omega \end{cases} \quad (20)$$

با معرفی توزیع چشمه بر روی سطح خیس متوسط، پتانسیل سیال به صورت زیر بیان می‌گردد.

$$\phi(\vec{X}) = \frac{1}{4\pi} \int_{S_0} \sigma(\vec{\xi}) G(\vec{X}, \vec{\xi}, \omega) dS \quad (21)$$

where $\vec{X} \in \Omega \cup S_0$

که در آن قدرت چشمه بر روی سطح خیس متوسط بدنه را می‌توان با شرایط مرزی سطح بدنه، به صورت رابطه ۲۲ تعیین کرد.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \phi(\vec{X})}{\partial n(\vec{X})} &= -\frac{1}{2} \sigma(\vec{X}) \\ &+ \frac{1}{4\pi} \int_{S_0} \sigma(\vec{\xi}) \frac{\partial G(\vec{X}, \vec{\xi}, \omega)}{\partial n(\vec{X})} dS \quad \text{where } \vec{X} \in S_0 \end{aligned} \quad (22)$$

با استفاده از اصل برهم نهی پتانسیل‌ها می‌توان بیان داشت که پتانسیل کلی از سه ترم پتانسیل موج برخوردی، پتانسیل موج متفرق شده و پتانسیل حاصل از ۶ درجه آزادی حرکت جسم در آب ساکن به وجود می‌آید. به جمع پتانسیل حاصل از موج و پتانسیل حاصل از تفرق موج، پتانسیل فرود-کریلف می‌گویند. با در نظر گرفتن معادله لاپلاس به عنوان معادله حاکم و با فرض تراکم‌ناپذیر و ایده‌آل بودن سیال، میدان جریان سیال اطراف بدنه شناور در امواج توسط یک پتانسیل سرعت می‌توان ارائه نمود [۱۷].

$$\Phi(\vec{X}, t) = a_w \phi(\vec{X}) e^{-i\omega t} \quad (23)$$

در این رابطه، عبارت $\phi(\vec{X})$ به مؤلفه‌های تشکیل‌دهنده امواج تشعشع ناشی از شش حالت عمومی حرکت جسم، موج برخوردی و موج تفرق تفکیک می‌شوند. حال می‌توان پتانسیل ناشی از امواج تحریک، تفرق و تشعشع را به صورت معادله ۲۴ بازنویسی نمود.

$$\phi(\vec{X}) e^{-i\omega t} = [(\phi_1 + \phi_a) + \sum_{j=1}^6 \phi_{rj} x_j] e^{-i\omega t} \quad (24)$$

در این معادله، عبارت‌های ϕ_1 : پتانسیل موج برخوردی مرتبه اول با دامنه موج واحد، ϕ_a : پتانسیل موج تفرق متناظر، ϕ_{rj} : پتانسیل موج تشعشع ناشی از حرکت زام با دامنه حرکتی

شتاب $+\rho \iint_{S_0} \left[\vec{X}^{(1)} \cdot \nabla \frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial t} \right] (\vec{x} \times \vec{n}) dS$
 مومنتم $+\vec{\alpha}^{(1)} \times \vec{M}^{(1)}$
 پتانسیل $+\rho \iint_{S_0} \frac{\partial \Phi^{(2)}}{\partial t} (\vec{x} \times \vec{n}) dS$

به طوری که $\zeta_r^{(1)} = \zeta_r^{(1)} - X_{3WL}^{(1)}$ ارتفاع نسبی سطح موج در خط آب آرام. S_0 سطح خیس متوسط، $\vec{F}^{(1)}$ و $\vec{M}^{(1)}$ مجموع نیرو و گشتاور مرتبه اول سیال است که شامل تغییرات گرانشی نسبت به محور ثابت سازه، نیروها و گشتاورهای بازگردان هیدرواستاتیک، تحریک موج و تشعشع هیدرودینامیکی است.

معادله موريسون برای تشریح نیروی افقی امواج وارد بر یک پایه قائم که از بستر دریا تا سطح آزاد امتداد یافته، ارائه شده است. در این معادله نیروی ناشی از امواج سطحی شکسته نشده وارد بر یک استوانه قائم که از بستر دریا تا سطح آزاد آب امتداد یافته است را می‌توان به صورت مجموع دو مولفه اینرسی و دراگ در نظر گرفت. در معادله موريسون نیروهای سیال وارد بر سطح مقطع اعضای باریک سازه بصورت رابطه ۳۶ ارائه می‌شود:

$$\begin{aligned} dF &= \frac{1}{2} \rho DC_d |u_f - u_s| (u_f - u_s) + \\ &\rho AC_m \dot{u}_f - \rho A(C_m - 1) \dot{u}_s \\ &= \frac{1}{2} \rho DC_d |u_f - u_s| (u_f - u_s) + \\ &\rho A(1 + C_a) \dot{u}_f - \rho AC_a \dot{u}_s \end{aligned} \quad (36)$$

در این رابطه: C_d : ضریب درگ، D قطر مشخصه درگ، u_f سرعت عرضی ذرات سیال، u_s سرعت عرضی سازه، $C_m = C_a + 1$ ضریب اینرسی و A مساحت سطح مقطع می‌باشد.

۴-۲- نیروی دریافت متوسط موج یک طرفه

نیروی دریافت متوسط موج در یک جسم شناور در صفحه افقی می‌تواند با در نظر گرفتن نرخ تغییر مومنتم خطی و زاویه‌ای در یک دامنه سیال محاسبه شود [۲۲]. همانطور که در شکل (۱) نشان داده شده است، $V(t)$ نشان دهنده حجم سیال است که توسط سطح خیس بدنه شناور S ، بستر دریا S_b ، یک سطح استوانه ای عمودی S_C در بی‌نهایت مطابق با مختصات محلی محور Z -بدنه شناور در همان محور عمودی، سطح آزاد S_F و با عمق آب d محدود شده است. مومنتم خطی و زاویه‌ای در سیال در این حجم به صورت زیر است.

$$\vec{G} = \rho \iiint_{V(t)} \nabla \Phi dV \quad (37)$$

مفهوم نیروهای تحریک موج مرتبه دوم بر اساس فرض پاسخ‌های هیدرودینامیکی سازه شناور یا ثابت که توسط یک سیال لزجت ثابت، غیرچرخشی، همگن و غیر قابل تراکم احاطه می‌شود، استوار است. علاوه بر این، هر دو دامنه موج و دامنه پاسخ‌های حرکت سازه مربوطه کوچک است [۱]. تحت این فرضیه، سیال پیرامون می‌تواند با تابع پتانسیل سرعت بیان شود، و روش اغتشاش^۱ برای بیان پتانسیل سیال، ارتفاع موج و موقعیت یک نقطه از سازه استفاده می‌شود. فشار سیال در یک نقطه مورد نظر از معادله برنولی اندازه‌گیری می‌شود که می‌تواند توسط سری تیلور نشان داده شود:

$$p = -\rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} - \frac{1}{2} \rho \nabla \Phi \cdot \nabla \Phi - \rho g Z = p^{(0)} + p^{(1)} + p^{(2)} + O(\varepsilon^3) \quad (31)$$

به طوری که:

$$\begin{aligned} p^{(0)} &= -\rho g X_3^{(0)} \\ p^{(1)} &= -\rho g X_3^{(1)} - \rho \frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial t} \\ p^{(2)} &= -\frac{1}{2} \rho |\nabla \Phi^{(1)}|^2 - \rho \vec{X}^{(1)} \cdot \nabla \frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial t} \\ &\quad - \rho \frac{\partial \Phi^{(2)}}{\partial t} - \rho g X_3^{(2)} \end{aligned} \quad (32)$$

در مختصات مرجع ثابت، نیرو و گشتاور کلی سیال نسبت به مرکز جرم بدنه به شکل رابطه ۳۳ است.

$$\begin{aligned} \vec{F}(t) &= -\iint_{S(t)} p \vec{N} dS \\ \vec{M}(t) &= -\iint_{S(t)} p [(\vec{X} - \vec{X}_g) \times \vec{N}] dS \end{aligned} \quad (33)$$

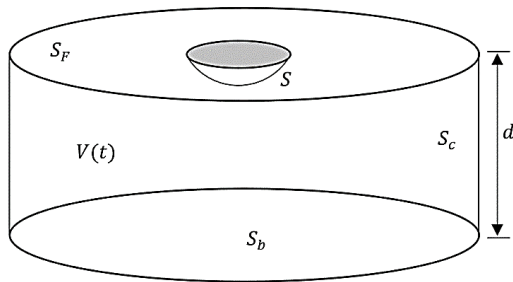
عبارت $S(t)$ سطح خیس آبی بدنه است. بعد از تحلیل اغتشاش از انتگرال بالا روی سطح خیس بدنه $S(t)$ ، نیرو و گشتاور تحریک مرتبه دوم موج می‌تواند به صورت زیر نوشته شود.

$$\begin{aligned} \vec{F}^{(2)} &= -\frac{1}{2} \rho g \oint_{WL} \zeta_r^{(1)} \cdot \zeta_r^{(1)} \vec{n} dl && \text{خط آب} \\ &+\frac{1}{2} \rho \iint_{S_0} [\nabla \Phi^{(1)} \cdot \nabla \Phi^{(1)}] \vec{n} dS && \text{برنولی} \\ &+\rho \iint_{S_0} \left[\vec{X}^{(1)} \cdot \nabla \frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial t} \right] \vec{n} dS && \text{شتاب} \\ &+\vec{\alpha}^{(1)} \times \vec{F}^{(1)} && \text{مومنتم} \\ &+\rho \iint_{S_0} \frac{\partial \Phi^{(2)}}{\partial t} \vec{n} dS && \text{پتانسیل} \end{aligned} \quad (34)$$

همچنین خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} \vec{M}^{(2)} &= -\frac{1}{2} \rho g \oint_{WL} \zeta_r^{(1)} \cdot \zeta_r^{(1)} (\vec{x} \times \vec{n}) dl && \text{خط آب} \\ &+\frac{1}{2} \rho \iint_{S_0} [\nabla \Phi^{(1)} \cdot \nabla \Phi^{(1)}] (\vec{x} \times \vec{n}) dS && \text{برنولی} \end{aligned} \quad (35)$$

¹ Perturbation



شکل (۱) بدنه شناور و سطح کنترل عمودی در بی نهایت.

حال با در نظر گرفتن $\vec{X} = (X, Y, Z)$ به عنوان نقطه‌ای در سطح استوانه‌ای S_c در بی نهایت و $\vec{\xi} = (\xi, \eta, \zeta)$ به عنوان نقطه‌ای در سطح بدنه S ، مختصات افقی آنها به صورت قطبی به طوری که مرکز آن در مرکز ثقل بدنه شناور قرار گرفته باشد، به صورت رابطه ۴۰ خواهد بود:

$$\begin{aligned} X &= r \cos \theta + X_g, \quad Y = r \sin \theta + Y_g \\ \xi &= r_q \cos \theta_q + X_g, \quad \eta = r_q \sin \theta_q + Y_g \end{aligned} \quad (40)$$

با استفاده از تعریف مشابهی از موج منظم برخوردی و بر اساس روش توزیع چشمه، قدرت چشمه کل در یک نقطه چشمه بر روی سطح خیس متوسط که ناشی از پتانسیل‌های تفرق موج و انتشار موج است، به صورت رابطه (۴۱) بیان می‌شود:

$$\sigma_t(\vec{\xi}) = a_w [\sigma_d(\vec{\xi}) + \sum_{j=1}^6 \sigma_j(\vec{\xi}) x_j] \quad (41)$$

در این رابطه، $\sigma_d(\vec{\xi})$ قدرت چشمه ناشی از پتانسیل موج تفرق، $\sigma_j(\vec{\xi})$ قدرت چشمه ناشی از پتانسیل موج تشعشع در حرکت زام است، x_j حرکت زام RAO^1 با دامنه موج برخوردی واحد است.

با استفاده از بیان مجانبی تابع گرین ضربان دار در دامنه فرکانس، زمانی که نقطه میدان روی سطح استوانه ای S_c در بی نهایت است، فرمول نیرو و گشتاور مرتبه دوم برای حرکات افقی ناشی از موج برخوردی با مشخصات (a_w, ω, k, χ) به صورت رابطه (۴۲) خواهد بود.

$$\begin{aligned} \vec{F}_1 &= -\frac{\rho g a_w}{v} Re[A_B^*(\chi)] \cos \chi \\ &- \frac{\rho g}{2\pi v} \cdot \frac{(1+e^{-2kd})^2}{1-e^{4kd}+4kde^{-2kd}} \int_0^{2\pi} |A_B(\theta)|^2 \cos \theta d\theta \\ \vec{F}_2 &= -\frac{\rho g a_w}{v} Re[A_B^*(\chi)] \sin \chi - \\ &\frac{\rho g}{2\pi v} \cdot \frac{(1+e^{-2kd})^2}{1-e^{4kd}+4kde^{-2kd}} \int_0^{2\pi} |A_B(\theta)|^2 \sin \theta d\theta \\ \vec{M}_6 &= \frac{2\rho g k a_w}{v[\tan(kd)+kd-vd \tanh(kd)]} Re(A_C) \\ &- \frac{\rho g k}{\pi v} \cdot \frac{1}{[\tanh(kd)+kd-vd \tanh(kd)]^2} \\ &* Re[\int_0^{2\pi} A_C(\theta) A_B^*(\theta) d\theta] \end{aligned} \quad (42)$$

$$\vec{H} = \rho \iiint_{V(t)} (\vec{X} \times \vec{X}_g) \times \nabla \Phi dV$$

در این معادله، \vec{H} ، \vec{G} ، مومنتم خطی و زاویه‌ای، ρ چگالی سیال، Φ پتانسیل سیال، \vec{X} مختصات یک نقطه از سیال و \vec{X}_g مرکز جرم بدنه شناور در مختصات کلی می‌باشد. نرخ تغییرات مومنتم خطی به صورت رابطه ۳۸ نوشته می‌شود.

$$\begin{aligned} \frac{d\vec{G}}{dt} &= \rho \frac{d}{dt} \iiint_{V(t)} \nabla \Phi dV = \\ &\rho \iiint_{V(t)} \nabla \left(\frac{\partial \Phi}{\partial t} \right) dV + \rho \iint_{S_t} \nabla \Phi \cdot u_n dS = \\ &\rho \iint_{S_t} \left[\frac{\partial \Phi}{\partial t} \vec{n} + \nabla \Phi \cdot u_n \right] dS \end{aligned} \quad (38)$$

به طوری که $S_t = S + S_F + S_c + S_b$ و u_n سرعت نرمال سطح مرزی، و \vec{n} بردار نرمال بر روی سطح مرزی است که به طور مثبت به سمت خارج از حجم سیال قرار دارد. به طور مشابه می‌توان نرخ تغییرات حرکت زاویه‌ای را استخراج نمود. وقتی که نیروهای مرتبه دوم در سطح افقی مهم باشند، پتانسیل مرتبه دوم در آن سهیم نیست، به طوری که پتانسیل سیال بعد از آن تنها شامل مولفه‌های مرتبه اول در این بخش می‌شود. با در نظر گرفتن میانگین زمانی برای یک دوره از موج برخوردی و با استفاده از معادله استوکس، نیرو و گشتاور دریافت متوسط افقی به صورت رابطه (۳۹) بیان می‌شود.

$$\begin{aligned} \vec{F}_1 &= -\frac{\rho}{2g} \int_l \left(\frac{\partial \Phi}{\partial t} \right)^2 n_1 dl \\ &- \frac{\rho \iint_{S_c} \left[\frac{\partial \Phi}{\partial x} \frac{\partial \Phi}{\partial n} - \frac{1}{2} \nabla \Phi \cdot \nabla \Phi u_1 \right] dS}{\rho \iint_{S_c} \left[\frac{\partial \Phi}{\partial y} \frac{\partial \Phi}{\partial n} - \frac{1}{2} \nabla \Phi \cdot \nabla \Phi u_2 \right] dS} \\ \vec{F}_2 &= -\frac{\rho}{2g} \int_l \left(\frac{\partial \Phi}{\partial t} \right)^2 n_2 dl \\ &- \frac{\rho \iint_{S_c} \left[\frac{\partial \Phi}{\partial y} \frac{\partial \Phi}{\partial n} - \frac{1}{2} \nabla \Phi \cdot \nabla \Phi u_2 \right] dS}{\vec{M}_6 = -\frac{\rho}{2g} \int_l \left(\frac{\partial \Phi}{\partial t} \right)^2 n_6 dl *} \\ &\rho \iint_{S_c} \left\{ \left[\begin{aligned} (X - X_g) \frac{\partial \Phi}{\partial y} - \frac{\partial \Phi}{\partial n} \\ (Y - Y_g) \frac{\partial \Phi}{\partial x} - \frac{\partial \Phi}{\partial n} \\ - \frac{1}{2} \nabla \Phi \cdot \nabla \Phi n_6 \end{aligned} \right] \right\} dS \\ n_6 &= (X - X_g)n_2 - (Y - Y_g)n_1 \end{aligned} \quad (39)$$

که در آن l تقاطع بین سطح کنترل S_c و میانگین سطح آزاد است.

¹ Response Amplitude Operator

$$[F'_{jm}] = \left[\begin{array}{c} -\omega_e^2(M_s + M'_a) - i\omega_e(C') \\ +K_{hys} + K_a \end{array} \right] [x_{jm}] \quad (48)$$

در این رابطه، عبارت M_s ماتریس جرم سازه کل، M'_a ماتریس جرم افزوده کل ناشی از پانل تفرق و المان‌های موریسون، C' ماتریس میرایی هیدرودینامیکی ناشی از پانل تفرق، K'_{hys} ماتریس سختی هیدرواستاتیک، K_a ماتریس سختی سازه و $[F'_{jm}]$ مجموع نیروها و گشتاور فرود-کریلف و تفرق است.

۳- صحت سنجی

در این تحقیق جهت صحت سنجی تحلیل صورت گرفته در نرم افزار انسیس آکوا ابتدا یک سکوی FPSO مدل سازی و تحلیل گردیده است تا از تنظیمات و نحوه تحلیل مورد استفاده اطمینان حاصل شود. به این منظور نتایج بدست آمده از تحلیل عددی در نرم‌افزار انسیس آکوا در دامنه وسیعی از امواج نسبت به دوره تناوب برای سه حرکت هیوا^۱ سرج^۲ و پیچ^۳ سکوی استوانه‌ای FPSO به دست آمده و با نتایج تست آزمایشگاهی صورت گرفته در آزمایشگاه دریایی دانشگاه صنعتی دالین چین^۴ مقایسه شده است. سکوی استوانه‌ای مدل (شکل (۲)) با مقیاس ۱:۷۰ ساخته شده است و مشخصات هندسی آن در جدول (۱) آورده شده است [۲۳].

در شکل‌های (۳) تا (۵) نتایج این صحت‌سنجی به صورت عملگر دامنه پاسخ^۵ نسبت به دوره تناوب ارائه شده است. جهت بررسی دقیق‌تر، خطای بدست آمده از نتایج شبیه سازی عددی در مقایسه با داده‌های تجربی (شکل‌های (۳) تا (۵)) محاسبه شد.

جدول (۱) مشخصات هندسی سکوی FPSO

| واحد | مقادیر | مولفه |
|----------|----------|------------------|
| متر | ۳۲,۵۷ | حداکثر شعاع |
| متر | ۳۰,۰۰ | شعاع بدنه‌ی اصلی |
| متر | ۱۸,۲۰ | آبخور اصلی |
| متر | ۲۷,۲۰ | ارتفاع استوانه |
| متر | ۱۴,۶۰ | مرکز جرم |
| متر مکعب | ۵۳۶۵۸,۵۴ | حجم استوانه |

در معادلات یاد شده بالانویس * یک مزدوج متغیر مختلط را نشان می‌دهد.

$$A_B(\theta) = -\frac{2\pi}{g} \omega(k+v) * \iint_{S_0} \sigma_t(\xi) e^{-kd} \cosh[k(\zeta + d)] e^{-ikr_q \cos(\theta - \theta_q)} dS \quad (43)$$

$$A_C(\theta) = -\frac{2\pi}{g} \omega(k+v) * \iint_{S_0} \sigma_t(\xi) e^{-kd} \cosh[k(\zeta + d)] r_q \sin(\theta - \theta_q) e^{-ikr_q \cos(\theta - \theta_q)} dSa = \frac{\sinh(2kd) + 2kd}{2k[\cosh(2kd) + 1]} \quad (44)$$

۵-۲- معادلات حرکت

مجموعه‌ای از معادلات جبری خطی در امواج منظم جهت بدست آوردن پاسخ هارمونیک جسم شناور به عنوان عملگرهای دامنه پاسخ (RAOs) شناخته می‌شود که متناسب با دامنه موج می‌باشد. در رابطه ۴۵، مجموعه‌ای از معادلات حرکت خطی از برهم‌کنش M جسم با ضرایب هیدرودینامیکی وابسته به فرکانس نشان داده شده است.

$$[\omega_e^2(M_s + M_a) - i\omega_e C + K_{hys}][x_{jm}] = [F_{jm}] \quad (45)$$

در این رابطه، عبارت M_s ماتریس جرم سازه، M_a $[A_{jm, kn}]$ و ماتریس $6M \times 6M$ جرم افزوده هیدرودینامیکی و $C = [B_{jm, kn}]$ ماتریس میرایی شامل اتصالات بین دو سازه است. همچنین K_{hys} ماتریس سختی هیدرواستاتیکی است. معادله (۴۵) را می‌توان به صورت معادله ۴۶ بازنویسی نمود:

$$[x_{jm}] = H[F_{jm}] \quad (46)$$

به طوری که نیروهای ورودی به پاسخ خروجی را می‌توان توسط تابع انتقال H تعیین نمود:

$$H = \{-\omega_e^2(M_s + M_a) - i\omega_e C + K_{hys}\}^{-1} \quad (47)$$

در معادلات ۴۵ تا ۴۷، فرض بر این بود که هر یک از جسم‌های شناور در یک سیستم در نظر گرفته شده، فقط با پانل مدل شده باشند. اما در نرم‌افزار المان مرزی انسیس آکوا، هر جسم شناور پانل‌ها می‌تواند با المان‌های موریسون ترکیب شود؛ و به معادلات حرکت جسم در حوزه فرکانس با اضافه شدن المان‌های موریسون به صورت معادله ۴۸ تبدیل شود.

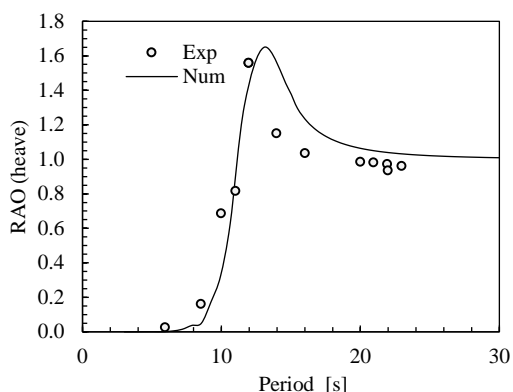
⁴ Dalian University of Technology

⁵ RAO

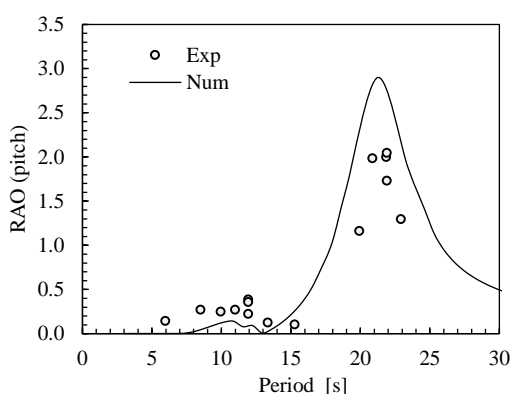
¹ Heave

² Serge

³ Pitch



شکل (۴) مقایسه نتایج تجربی و عددی حرکت هیو.



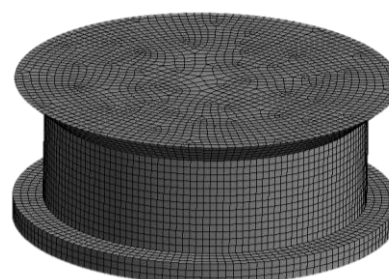
شکل (۵) مقایسه نتایج تجربی و عددی حرکت پیچ (Pitch).

علت چنین اختلافی به خاطر در نظر نگرفتن لزجت در نرم افزار المان مرزی انسیس آکوا می‌باشد. بنابراین نتایج بدست آمده دارای مقادیر قابل قبولی نسبت به داده‌های ارائه شده تست تجربی سکوی استوانه‌ای FPSO برای هر سه حرکت حرکت هیو سرج و پیچ است.

پس از صحت‌سنجی مدل به بررسی اندرکنش میان دو استوانه‌ای ثابت و شناور تحت تاثیر امواج استوکس مرتبه دوم پرداخته شده است. استوانه ثابت دارای قطر ۲ متر است در حالی که استوانه شناور دارای قطر ۱ متر و آب‌خور ۴ متر است. جهت برخورد امواج از سمت استوانه ثابت به سمت استوانه شناور در نظر گرفته شده است به طوری که با برخورد امواج به استوانه ثابت تاثیر نیروهای حاصل از امواج متفرق شده بر استوانه شناور محاسبه گردد. شرایط مرزی مورد استفاده برای تحلیل، توسط نرم افزار لحاظ می‌گردد که در معادلات (۱۲) تا (۱۴) به آن اشاره شده است. از آنجایی که این نرم افزار از روش المان مرزی استفاده می‌نماید شبکه‌بندی مورد استفاده در این نرم افزار به صورت پانل‌های چند وجهی



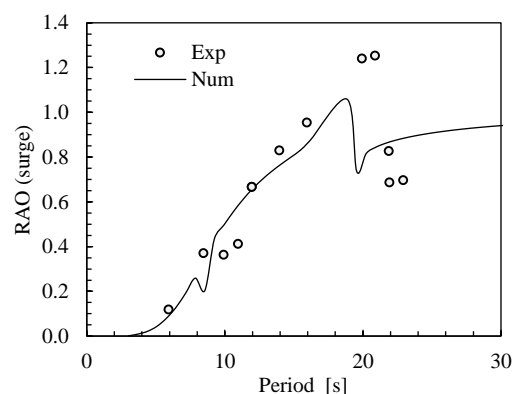
(الف)



(ب)

شکل (۲) سکوی استوانه‌ای FPSO (الف) نمای شماتیک. (ب)

نمای شبکه بندی.

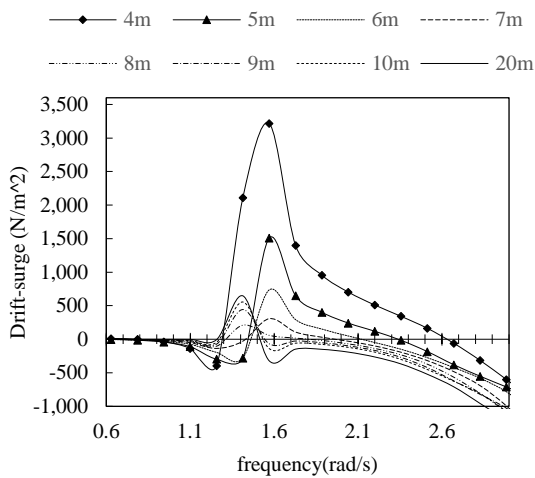


شکل (۳) مقایسه نتایج تجربی و عددی حرکت سرج.

نتایج بدست آمده حاکی از این بود که میانگین خطای حاصله بین مدل عددی و داده‌های اندازه‌گیری شده در حرکت سرج، هیو و پیچ به ترتیب ۱۴/۸، ۲۹ و ۱۵/۱ درصد بوده است. بیشینه خطای بدست آمده در پریود ۱۴ ثانیه برای حرکت هیو و پریود ۲۰ ثانیه مربوط به دو حرکت پیچ و سرج بوده است.



شکل (۷) نمایش شماتیک استوانه ثابت و شناور در امواج استوکس.



شکل (۸) نیروی دریفت سرچ با در نظر گرفتن فواصل مختلف بین دو استوانه ثابت و شناور

شکل (۸) نیروی دریفت سرچ مربوط به استوانه شناور در فواصل مختلف بین این دو استوانه را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۸) مشاهده می‌شود با افزایش فاصله قرارگیری استوانه شناور از استوانه ثابت، ابتدا مقدار نیروی دریفت مرتبه دوم کاهش می‌یابد به طوری که در روند این کاهش نیرو، فرکانس تشدید تقریباً ثابت مانده است. اما با افزایش بیشتر این فاصله یعنی در فاصله ۸ متری و بیشتر از آن، فرکانس تشدید تغییر می‌یابد و از مقدار آن کاسته می‌شود. در صورتی که نیروی مرتبه دوم با شدت کمتری تغییر یافته و این تغییر به صورت افزایشی است.

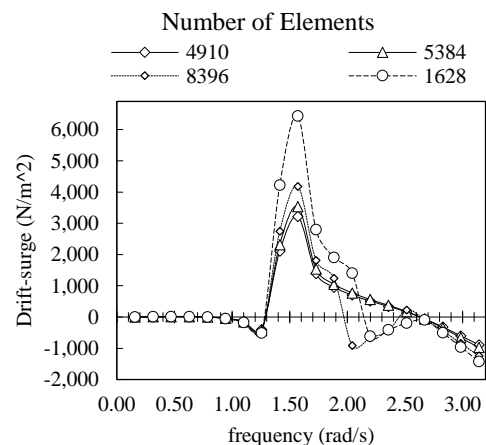
بیشترین مقدار نیروی دریفت در حالت فاصله ۴ متر بین دو استوانه رخ داده است که دارای مقدار ۳۲۱۶ نیوتن بر متر مربع است و همچنین در بیشترین فاصله بین دو استوانه یعنی فاصله ۲۰ متری مقدار این نیرو ۶۴۷ نیوتن بر متر مربع محاسبه شده است که این مقدار تقریباً ۲۰ درصد کمتر از مقدار ماکزیمم است.

مسطح می‌باشد که فقط سطح جسم را در بر می‌گیرد. این نرم افزار حساسیت کمتری بر روی اندازه شبکه‌بندی دارد و با چند بار ریزتر کردن اندازه المان‌ها، می‌توان به اندازه مناسب رسید به طوری که پس از کاهش ابعاد این المان‌ها دیگر شاهد تغییر محسوس در جواب‌های مسئله نباشد. از آنجایی که در این مقاله تحلیل‌های مختلفی صورت گرفته شده است می‌توان به عنوان نمونه برای استوانه شناور با قطر ۱ متر و آب‌خور ۴ متر و همچنین استوانه ثابت با قطر ۲ متر و آب‌خور ۱۰ متر تعداد المان‌ها به ۴۹۱۰ عدد رسیده است که از این تعداد ۳۴۱۹ عدد المان به عنوان المان‌های تفرق توسط نرم‌افزار در نظر گرفته شده است.

همان‌طور که در شکل (۶) مشاهده می‌شود با کمتر شدن اندازه المان‌ها و یا افزایش تعداد المان‌های سطح سازه، روند تغییرات حرکت دریفت سرچ پس از سه مرحله به مقدار تقریباً ثابت می‌رسد که نشان‌دهنده عدم تغییر محسوس جواب‌ها در صورت ریزتر نمودن شبکه‌بندی است بنابراین تعداد شبکه بندی ۴۹۱۰ برای شبیه سازی مسئله کافی می‌باشد. شکل (۷) بیانگر برخورد یک موج استوکس مرتبه دوم به یک استوانه ثابت و ادامه حرکت موج به سمت یک استوانه شناور دیگر است.

۴- نتایج و بحث

با توجه به حل عددی انجام شده در نرم افزار انسیس آکوا به روش المان مرزی برای دو استوانه ثابت و شناور که فاصله بین آنها در هر آزمایش تغییر پیدا می‌کند می‌توان نتایج مربوطه را به صورت نمودارهای زیر مشاهده نمود.

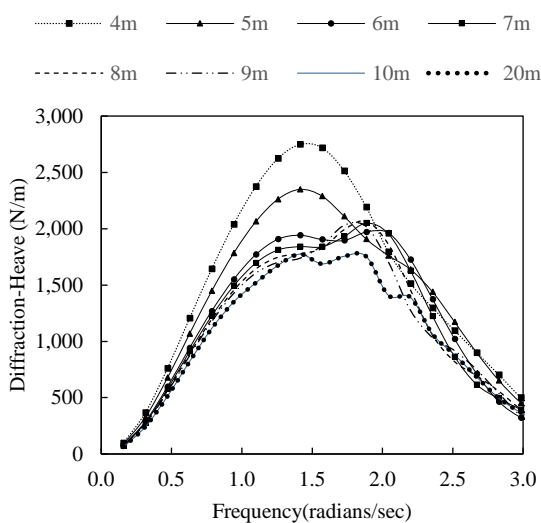


شکل (۶) بررسی استقلال از شبکه با در نظر گرفتن تعداد مختلف المان در حرکت دریفت سرچ

همچنین در فاصله ۲۰ متری بین دو استوانه، کمترین مقدار این نیرو یعنی ۳۰۰۰ نیوتن بر متر بدست آمده است. در فاصله ۶ متری بین دو استوانه نیز مقدار محاسبه شده برابر با ۳۱۰۰۰ نیوتن بر متر است که پس از افت ماکزیمم مقدار نیرو در این فاصله دوباره افزایش مقدار ماکزیمم نیرو وجود دارد و پس از مقدار ماکزیمم دوم در فاصله ۷ متری مجددا کاهش نیرو مشاهده می‌شود.

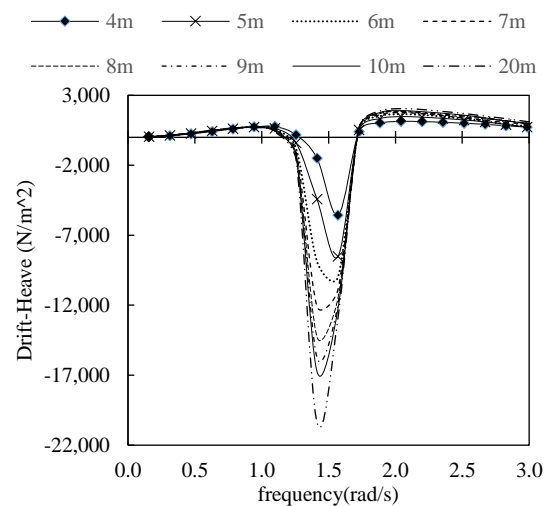
در حرکت هیو مشاهده می‌شود که با افزایش فاصله استوانه‌ها نیروی تفرق وارده کاهش یافته است (شکل (۱۱)). نتایج بدست آمده از این شکل بیانگر آن است که در فاصله ۴ متری دو استوانه، نیروی تفرق دارای مقدار ۲۷۴۰ نیوتن بر متر است. همچنین بیشینه نیروی تفرق هیو وارد بر استوانه با افزایش فاصله در فرکانس‌های بالاتر رخ می‌دهد و محدوده وجود نیروی بیشینه هیو، بیشتر از حالت‌های ابتدایی حل، یعنی فاصله کمتر استوانه‌ها است.

در صورت افزایش فاصله بین استوانه‌ها ابتدا نیروی تفرق وارد بر استوانه شناور در حرکت سرچ کاهش می‌یابد که با کاهش فرکانس تشدید نیز روبرو است. اما با افزایش بیشتر این فاصله، نمودار نیروهای تفرق وارد بر استوانه دارای فرکانس‌های تشدید بیشتری می‌شوند و می‌توان مشاهده نمود که با افزایش فاصله فرکانس پایین‌تر هر موج وارد بر استوانه نیروی کمتری بر جسم وارد می‌کند اما در فرکانس بالاتر این نیرو بیشتر می‌باشد. قابل ذکر است بیشترین مقدار نیروی تفرق استوانه شناور تقریباً ۴۴۰۰۰ نیوتن و مربوط به فاصله ۴ متری دو استوانه است.

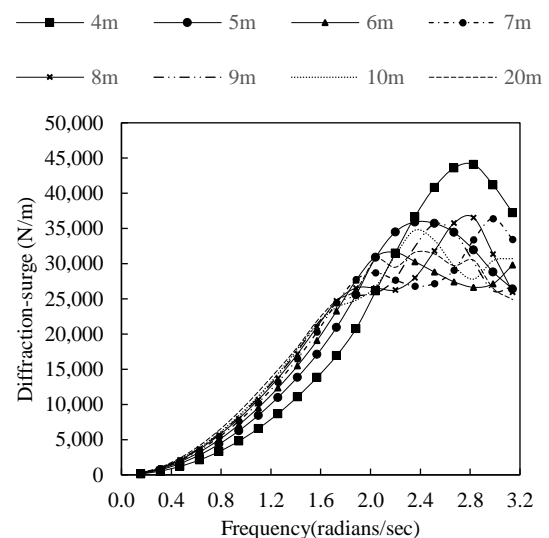


شکل (۱۱) نیروی تفرق هیو (فواصل مختلف بین دو سازه)

شکل (۹) حرکت دریافت مرتبه دوم در حالت هیو برای یک استوانه شناور را نشان می‌دهد. نتایج بدست آمده از شکل (۹) بیانگر آن است که با افزایش فاصله قرارگیری استوانه شناور از استوانه ثابت، فرکانس تشدید استوانه شناور به آرامی و مقدار اندک کاسته می‌شود ولی دامنه فرکانس تشدید یک روند افزایشی را طی نموده است. در این حرکت مقدار بیشینه نیروی وارد بر استوانه شناور از فاصله ۴ متری بین دو استوانه تا فاصله ۲۰ متری حدود ۱۸۰ درصد کاهش داشته است. در شکل (۱۰) نیروی تفرق سرچ وارد بر یک استوانه شناور در حالتی که تاثیر فواصل مختلف بین دو استوانه ثابت و شناور مد نظر است نشان داده شده است.

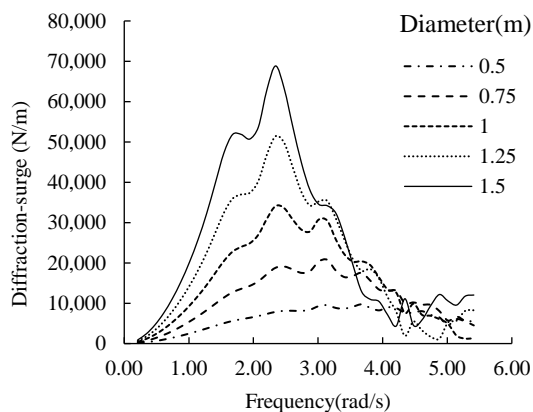


شکل (۹) نیروی دریافت حرکت هیو با در نظر گرفتن فواصل مختلف بین دو استوانه ثابت و شناور.

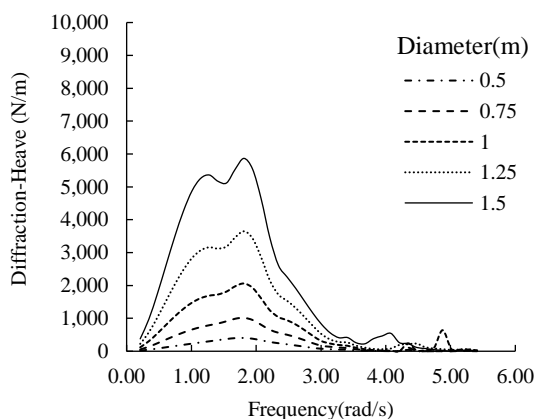


شکل (۱۰) نیروی تفرق سرچ با در نظر گرفتن فواصل مختلف بین دو استوانه ثابت و شناور.

در فرکانس ۱/۵ رادیان بر ثانیه بیشترین مقدار نیروی دریافت سرج در استوانه با شعاع ۱/۵ متر و برابر با مقدار ۳۰۰۰۰ نیوتن بر متر مربع بدست آمده است. اما در فرکانس‌ها بالاتر نیز استوانه با شعاع ۱/۵ متر دارای بیشترین مقدار این نیرو است و کمترین مقدار مربوط به شعاع ۰/۵ متری با کاهش ۸۰ درصدی است. در شکل (۱۳) نیروی دریافت مربوط به حرکت هیو نشان داده شده است. در این شکل می‌توان مشاهده نمود که با افزایش شعاع استوانه مقادیر تشدید نیروی دریافت با افزایش ناگهانی روبرو شده است. همچنین فرکانسی که در آن پدیده تشدید رخ داده است، در تمامی شعاع‌های اعمال شده برای شناور یکسان بوده است. نتایج بدست آمده برای نیروی تفرق سرج وارد بر استوانه شناور در شکل (۱۴) نشان داده است.

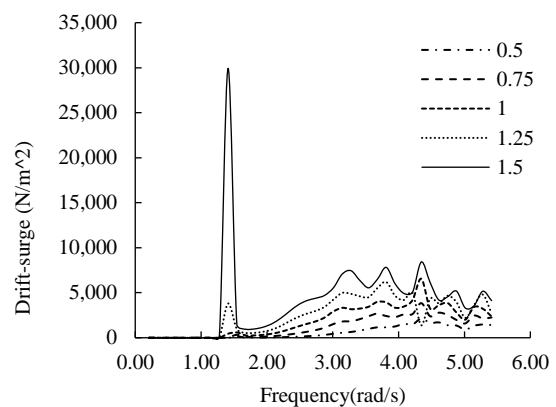


شکل (۱۴) نیروی تفرق سرج با در نظر گرفتن مقادیر مختلف شعاع استوانه شناور.

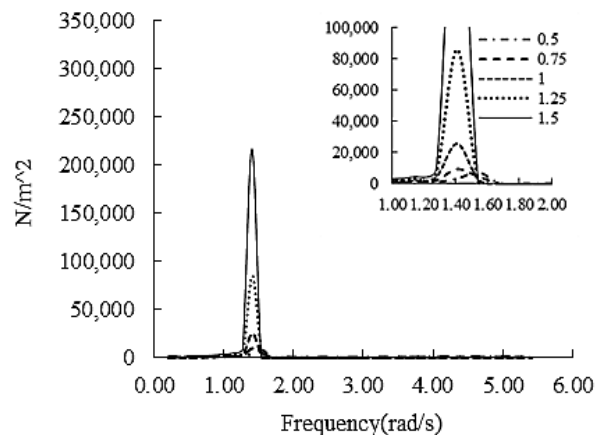


شکل (۱۵) نیروی تفرق هیو با در نظر گرفتن مقادیر مختلف شعاع استوانه شناور.

به منظور بررسی اندازه شعاع استوانه در تحلیل اندرکنش هیدرودینامیکی دو سازه شناور و ثابت که با فاصله ثابت ۱۰ متر از یکدیگر قرار گرفته اند، استوانه شناور با شعاع‌های ۰/۵ تا ۱/۵ متر و با گام ۰/۵ متر در نرم افزار انسیس آکوا تحلیل شده است و نتایج تحلیل با بررسی نیروی تفرق و نیروی مرتبه دوم در اشکال (۱۲) تا (۱۵) ارائه شده است. همان طور که در شکل (۱۲) مشاهده می‌شود با افزایش شعاع استوانه شناور، نیروی دریافت در حرکت سرج به طور کلی افزایش یافته است. به طوری که در فرکانس‌های بالاتر مقادیر نیروی دریافت برای تمامی حالت‌ها روند افزایشی داشته است. باید توجه نمود که در صورت افزایش شعاع به بیش از یک متر، در فرکانس ۱/۵ رادیان بر ثانیه پدیده تشدید رخ داده است و مقدار این تشدید با افزایش شعاع شناور با تغییرات شدید مواجه شده است.



شکل (۱۲) نیروی دریافت سرج با در نظر گرفتن مقادیر مختلف شعاع استوانه شناور.



شکل (۱۳) نیروی دریافت هیو با در نظر گرفتن مقادیر مختلف شعاع استوانه شناور.

با افزایش شعاع استوانه شناور نیروی های مرتبط به حرکت دریافت و تفرق برای هر دو نیروی سرچ و هیو در حال افزایش است که این افزایش در شعاع های بیشتر نرخ بیشتری به خود گرفته است.

۶- مراجع

- [1] Pinkster, J.A. "Low Frequency Second Order Wave Exciting Forces On Floating Structures", 1980.
- [2] Goodman, T.R. "Forces on a Hovering Slender Body of Revolution Submerged under Waves of Moderate Wavelength GTH ", 1962.
- [3] Dalzell, J.F., Kim, C.H. "Analytical Investigation of the Quadratic Frequency Response for Added Resistance", Journal of Ship Research, Vol. 23(03), pp.198-208, 1979.
- [4] Pinkster, J.A. "Low Frequency Second Order Wave Forces on Vessels Moored at Sea", Proc. 11th Symp Naval Hydrodyn, 1976.
- [5] Pijfers, J., Brink, A. "Calculated Drift Forces of Two Semisubmersible Platform Types in Regular and Irregular Waves", Offshore Technology Conference, 1977.
- [6] Petrauskas, C., Liu, Sv. "Springing Force Response of a Tension Leg Platform", Offshore Technology Conference, 1987.
- [7] Taylor, R.E., Kernot, M.P. "On Second Order Wave Loading and Response in Irregular Seas" Advances in Coastal and Ocean Engineering, pp. 155-212, 1999.
- [8] Lighthill, M.J. "Waves and Hydrodynamic Loading", Proceedings of The 2nd International Conference on the Behaviour of Offshore Structures, 1979.
- [9] Molin, B. "Second-Order Diffraction Loads Upon Three-Dimensional Bodies", Applied Ocean Research, Vol.1(4), pp.197-202, 1979.
- [10] Taylor, R.E. "Second Order Diffraction Force on a Vertical Cylinder in Regular Waves", Applied Ocean Research, Vol.9, pp.19-30, 1987.
- [11] Kim, M.H., Yue, D.K.P. "The Complete Second-Order Diffraction Solution for an Axisymmetric Body Part 2. Bichromatic Incident Waves and Body Motions", Journal of Fluid Mechanics, Vol.211, pp.557-93, 1990.
- [12] Chau, F.P., Taylor, R.E. "Second-Order Wave Diffraction by a Vertical Cylinder", Journal of Fluid Mechanics, Vol. 240, pp.571-599, 1992.
- [13] Huang, J.B., Taylor, R.E. "Semi-Analytical Solution for Second-Order Wave Diffraction by a Truncated Circular Cylinder in Monochromatic Waves", Journal of Fluid Mechanics, Vol. 319, pp.171-196, 1996.

مقادیر بدست آمده بیانگر آن بوده است که با افزایش شعاع استوانه نیروی تفرق در حرکت سرچ افزایش یافته و فرکانس مربوط به ماکزیمم نیروی اعمال شده به صورت آهسته در حال کاهش بوده است.

مقدار بیشینه نیروی تفرق سرچ وارد بر استوانه شناور برابر با ۶۸۰۰۰ نیوتن بر متر در شعاع ۱/۵ متر و کمترین این نیرو مربوط به شعاع ۰/۵ متر و برابر با ۱۲۸۰۰ نیوتن بر متر بوده است. مطابق شکل (۱۵)، نتایج تحلیل اندرکنش دو استوانه ثابت و شناور نشان می‌دهد که در حرکت هیو استوانه شناور با افزایش شعاع استوانه شناور مقادیر نیروی اعمال شده نیز افزایش یافته است به طوری که هرچه شعاع افزایش یابد نرخ افزایش نیروی هیو نیز شدت بیشتری می‌یابد. بیشترین مقدار نیروی تفرق هیو مربوط به شعاع ۱/۵ متر و برابر با ۵۸۷۰ نیوتن بر متر و کمترین این نیرو مربوط به شعاع ۰/۵ متر با مقدار ۳۳۳ نیوتن بر متر است.

۵- نتیجه‌گیری

با توجه به حل عددی انجام شده در نرم افزار انسیس آکوا به روش المان مرزی برای دو استوانه ثابت و شناور که فاصله بین آنها در هر آزمایش افزایش پیدا می‌کند، می‌توان نتایج مربوطه را به صورت خلاصه به صورت زیر بیان کرد. در حرکت هیو مشاهده می‌شود که با افزایش فاصله استوانه‌ها نیروی تفرق وارده کاهش یافته است. بیشینه نیروی تفرق هیو وارد بر استوانه با افزایش فاصله در فرکانس‌های بالاتر رخ می‌دهد و فرکانس تشدید به آرامی و مقدار اندک کاسته می‌گردد ولی دامنه فرکانس تشدید یک روند افزایشی را طی نموده است.

در حرکت سرچ، نیروی تفرق وارد بر استوانه شناور ابتدا کاهش می‌یابد که با کاهش فرکانس تشدید نیز روبرو می‌باشد اما با افزایش بیشتر این فاصله، نمودار نیروهای تفرق وارد بر استوانه دارای فرکانس‌های تشدید بیشتری است. با افزایش فاصله فرکانس پایین‌تر هر موج وارد بر استوانه نیروی کمتری بر جسم وارد می‌کند اما در فرکانس بالاتر این نیرو بیشتر می‌باشد. ابتدا مقدار نیروی دریافت مرتبه دوم کاهش پیدا می‌کند، به طوری که در روند این کاهش نیرو، فرکانس تشدید تقریباً ثابت مانده است. اما با افزایش بیشتر این فاصله از مقدار آن کاسته می‌گردد. همچنین با بررسی های به عمل آمده از تغییر شعاع استوانه شناور می‌توان استدلال نمود که

- [14] Teng, B., Kato, S. "A Method for Second-Order Diffraction Potential from an Axisymmetric Body", *Ocean Engineering*, Vol. 26(12), pp.1359-1387, 1999.
- [15] Vazquez, J.H. "Hydrodynamic Loads on Offshore Structures in Bichromatic Bidirectional Seas, Doctoral Thesis, University of Houston, 1995.
- [16] Renaud, M., Rezende, F., Waals, O., Chen, X.B., Van Dijk, R. "Second-Order Wave Loads on a LNG Carrier in Multi-Directional Waves", *Offshore Technology*, Vol. 1, pp. 363-370, 2008.
- [17] Barltrop N.D. "Floating Structures: A Guide for Design and Analysis", Oilfield Pubns Inc; 1998.
- [18] Chen, X.B. "The Set-Down in the Second-Order Stokes' Waves", International Conference On Hydrodynamics, Italy, 2006.
- [19] Newman, J.N. "The Theory of Ship Motions", *Advances in Applied Mechanics*. Vol. 18, pp. 221-283, 1979.
- [20] Anon, "Waves Due to a Floating Sphere Making Periodic Heaving Oscillations", *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, Vol. 231(1184), pp.1-7, 1995.
- [21] Kreyszig, E. "Advanced Engineering Mathematics", John Wiley & Sons, 2010.
- [22] Newman, J.N. "The Drift Force and Moment on Ships in Waves", *Journal of Ship Research*, Vol. 11(01), pp.51-60, 1967.
- [23] Saad, A.C., Joao, L.V., Loureiro, R.R., De Brandao, R., Filho, R.Z.M., Lopes, C., Gioppo, H.L. "Motion Behaviour of the Mono-Column FPSO Sevan Piranema in Brazilian Waters", *Offshore Technology Conference*, 2009.