



مرکز ملی پژوهش‌ها و نوآوری‌های دریایی

سازمان بنادر و دریانوردی به عنوان تنها مرجع حاکمیتی کشور در امور بندری، دریایی و کشتی‌رانی بازرگانی به منظور ایفای نقش مرجعیت دانشی خود و در راستای تحقق راهبردهای کلان نقشه جامع علمی کشور مبنی بر "حمایت از توسعه شبکه‌های تحقیقاتی و تسهیل انتقال و انتشار دانش و سامان‌دهی علمی" از طریق "استانداردسازی و اصلاح فرایندهای تولید، ثبت، داوری و سنجش و ایجاد بانک‌های اطلاعاتی یکپارچه برای نشریات، اختراعات و اکتشافات پژوهشگران"، اقدام به ارایه این اثر در سایت SID می‌نماید.



سازمان بنادر و دریانوردی



تحلیل هیدرو دینامیکی مخازن شناور ذخیره نفت

کوروش رضانژاد
کارشناس ارشد سازه‌های دریایی،
دانشکده مهندسی کشتی سازی و صنایع دریایی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر
k_rezanejad@yahoo.com

محمد جواد کتابداری
استادیار، دانشکده مهندسی کشتی سازی و صنایع دریایی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر
ketabdar@cic.aut.ac.ir

احمد میرزانیان
پژوهش و توسعه شرکت نفت فلات قاره ایران
FSUSC@soroosh.iooc.ir

چکیده

در این مقاله حرکات دینامیکی مخزن شناور ذخیره نفت سورنا، واقع در منطقه نفتی بهرگان توسط مدل عددی تهیه شده، بررسی شده است. تحلیل حرکات دینامیکی مخزن شناور با در نظر گرفتن سه درجه آزادی حرکت (شامل حرکات افقی، قائم و دورانی) در حوزه فرکانس انجام شده و عملگرهای پاسخ دامنه واحد شناور ارائه شده است. به علت بزرگی بار امواج نسبت به سایر بارهای وارد بر سازه‌های دریایی، بارگذاری وارد بر مخزن شناور سورنا، بارگذاری ناشی از امواج لحاظ شده است. اندرکنش امواج دریا در فرکانس‌های مختلف با مخزن به کمک تئوری تفرق و بر اساس روش عددی المان مرزی محاسبه و تعیین شده‌اند. در این اندرکنش مهارهای متصل به مخزن شناور به صورت مهارهای مایل مدل سازی شده و ضرایب سختی معادل استخراج شده‌اند. نتایج تحلیل نشان داد مدل تهیه شده با دقت بسیار خوبی قادر به شبیه‌سازی حرکات دینامیکی مخازن شناور است.

۱. مقدمه

امروزه با گسترش روزافزون مصرف نفت و مشتقات آن، حجم بالایی از نفت و گاز مصرفی دنیا در حوزه‌های نفتی فراساحلی استخراج می‌گردد. انتقال نفت و گاز تولیدی توسط لوله به خشکی و یا به پایانه‌های نفتی شناور به منظور انتقال به تانکرها انجام می‌پذیرد. در صورت محدود بودن ظرفیت تولید در حوزه‌های نفتی به منظور کاهش زمان بارگیری تانکرها و همچنین فراهم آوردن امکان تولید مداوم در این حوزه‌های نفتی، نفت تولیدی از حوزه‌های مذکور در مخازن ذخیره نفت شناور^۱ ذخیره‌سازی شده و پس از تکمیل ظرفیت مخزن، به تانکرهای انتقال دهنده نفت منتقل می‌گردد. در کشور عزیزمان ایران و در منطقه نفتی بهرگان در خلیج فارس، مخزن شناور ذخیره نفت سورنا با ظرفیت ذخیره‌سازی حدود ۳۱۵ هزار تن وظیفه ذخیره‌سازی نفت خام تولید شده در حوزه‌های نفتی سروش و نوروز را داراست. حوزه نفتی نوروز در فاصله حدود ۵۰ کیلومتری شمال حوزه نفتی سروش قرار داشته و نفت تولیدی از این حوزه توسط لوله به حوزه نفتی سروش منتقل شده و همراه با نفت تولیدی این حوزه نفتی در مخزن ذخیره نفت شناور سورنا ذخیره‌سازی می‌گردد. با توجه به اهمیت پیش‌بینی رفتار دینامیکی مخازن شناور تحت اثر امواج دریا به منظور بررسی پایداری آنها و جلوگیری از تصادم آنها با تانکرها، در این مقاله حرکات دینامیکی مخزن شناور ذخیره نفت سورنا تحلیل شده است.

۲. معادله حاکم بر حرکت سیال و شرایط مرزی

به منظور محاسبه نیروهای ناشی از امواج برخوردی به اجسام شناور، در صورت بزرگ بودن نسبت ابعاد آنها به ارتفاع امواج می‌توان از معادله لاپلاس یا تمهیداتی جهت مدل‌سازی سیال استفاده نمود. عموماً در چنین حالتی، نیروهای اینرسی بر نیروهای لزجت غالب بوده و بزرگی نیروهای لزجت کمتر از ۱۰٪ کل نیروها است. در این صورت میزان درگ سطحی ناچیز بوده و پدیده جدایی جریان (که ناشی از اثرات گرانیروی است) که سبب افزایش چشمگیر درگ فشاری می‌گردد، رخ نمی‌دهد. بنابراین، سیال را می‌توان غیرچرخشی فرض نمود و یا به بیان دیگر معادله لاپلاس بر حرکت آن حاکم است [1]:

$$\nabla^2 \varphi = 0 \rightarrow \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

در رابطه فوق φ تابع پتانسیل جریان بوده که با میدان سرعت جریان \vec{V} رابطه ذیل را داراست:

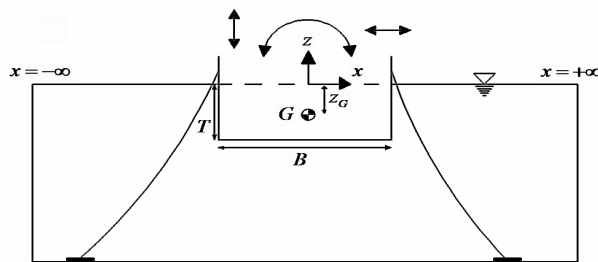
$$\vec{V}(x, y, z, t) = \nabla \varphi = \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x}, \frac{\partial \varphi}{\partial y}, \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) \quad (2)$$

پارامترهای x ، y و z بیانگر پارامترهای مکانی بوده و t پارامتر زمان است.

به دلیل ماهیت خطی معادله حاکم، تابع پتانسیل کل ناشی از برخورد امواج را می‌توان به صورت مجموع مؤلفه‌های پتانسیل‌های امواج پیش‌رونده^۱، متفرق شده^۲ و تشعشع یافته^۳ لحاظ نمود:

$$\varphi(x, z, t) = \varphi_I(x, z, t) + \varphi_D(x, z, t) + \varphi_R(x, z, t) \quad (3)$$

پتانسیل موج پیش‌رونده $(\varphi_I(x, z, t))$ ، ناشی از موج منتشر شده به سمت جسم شناور بدون در نظر گرفتن هیچ گونه اثر جسم روی آن است. پتانسیل موج متفرق شده $(\varphi_D(x, z, t))$ ، ناشی از وجود جسم شناور است هنگامی که هیچ گونه حرکتی نداشته باشد. پتانسیل موج تشعشع یافته $(\varphi_R(x, z, t))$ ، ناشی از امواج تولید شده به دلیل حرکات جسم شناور است. در این حالت معادله حاکم برای پتانسیل کل در هر یک از مؤلفه‌های آن نیز برقرار است [2]. با توجه به طویل بودن مخزن شناور مورد مطالعه، تحلیل هیدرودینامیکی آن در حالت دو بعدی از دقت کافی برخوردار خواهد بود. ضریب ظرافت بدنه مخزن مذکور بزرگتر از ۰.۸ بوده و بنابراین می‌توان مقطع آن را با تقریب بالایی به صورت مقطع مستطیلی لحاظ نمود. در شکل ۱، مقطع مورد تحلیل در حالت دو بعدی و پارامترهای ابعادی مخزن شناور نشان داده شده است.



شکل ۱: مقطع مورد تحلیل مخزن شناور سورنا و پارامترهای ابعادی

با توجه به تحلیل رفتار دینامیکی مخزن شناور در حوزه فرکانسی، امواج برخوردی با مخزن شناور منظم بوده و بنابراین پتانسیل موج پیش‌رونده بر اساس رابطه زیر تعیین می‌گردد [3]:

$$\varphi_I(x, z) = \frac{ia\omega}{k} \frac{\cosh(k[z+H])}{\sinh(kH)} e^{i(\omega t - kx)} \quad (4)$$

در رابطه فوق، H عمق آب، z فاصله از سطح آزاد آب، ω فرکانس موج پیش‌رونده، k عدد موج پیش‌رونده، a دامنه موج پیش‌رونده و i واحد موهومی است. بر اساس شرط غیر لغزشی سیالات بر روی اجسام صلب نفوذ ناپذیر در داخل سیال و همچنین شرط مرزی سطح آزاد و مرزهای دوردست، معادله حاکم و شرط مرزی مؤلفه پتانسیل موج متفرق شده در مسئله پیش‌رو به صورت ذیل است [2]:

$$\nabla^2 \varphi_D = 0 \quad \text{معادله حاکم} \quad (5-الف)$$

$$\frac{\partial^2 \varphi_D}{\partial t^2} + g \frac{\partial \varphi_D}{\partial z} = 0 \quad \text{شرط مرزی سطح آزاد} \quad (5-ب)$$

$$\frac{\partial \varphi_D}{\partial z} = 0 \quad \text{شرط مرزی نفوذ ناپذیری آب در بستر دریا} \quad (5-ج)$$

$$\frac{\partial \varphi_D}{\partial n} = -\frac{\partial \varphi_I}{\partial n} \quad \text{شرط مرزی نفوذ ناپذیری آب در بدنه مخزن} \quad (5-د)$$

$$\frac{\partial \varphi_D}{\partial x} \pm ik\varphi_D = 0 \quad x \rightarrow \mp\infty \quad \text{شرط مرزی در دوردست} \quad (5-ه)$$

در روابط فوق n بردار یکه عمود بر بدنه مخزن شناور بوده و سایر پارامترها در بخش‌های پیشین تعریف شده‌اند. به طور مشابه، معادله حاکم و شرط مرزی مؤلفه پتانسیل موج تشعشع یافته در مسئله پیش‌رو به صورت ذیل است [2]:

$$\nabla^2 \varphi_R = 0 \quad \text{معادله حاکم} \quad (6-الف)$$

$$\frac{\partial^2 \varphi_R}{\partial t^2} + g \frac{\partial \varphi_R}{\partial z} = 0 \quad \text{شرط مرزی سطح آزاد} \quad (6-ب)$$

$$\frac{\partial \varphi_R}{\partial z} = 0 \quad \text{شرط مرزی نفوذ ناپذیری آب در بستر دریا} \quad (6-ج)$$

1. Incident potential
2. Diffracted potential
3. Radiated potential

$$\frac{\partial \varphi_R}{\partial n} = \nabla \varphi_R \cdot \hat{n} = \vec{V}_B \cdot \hat{n} \quad \text{شرط مرزی برابری سرعت عمودی سیال و بدنه مخزن} \quad (6-د)$$

$$\frac{\partial \varphi_R}{\partial x} \pm ik\varphi_R = 0 \quad x \rightarrow \mp\infty \quad \text{شرط مرزی در دور دست} \quad (6-ی)$$

در روابط فوق \vec{V}_B بردار سرعت بدنه مخزن شناور بوده و سایر پارامترها در بخش‌های پیشین تعریف شده‌اند.

۳. حل عددی معادله حاکم

با توجه به فرض هارمونیک بودن امواج برخوردی به مخزن شناور، پاسخ پایدار آن در اثر برخورد این امواج نیز هارمونیک بوده و یا به بیان دیگر کلیه مؤلفه‌های پتانسیل جریان نیز هارمونیک هستند. بنابراین به منظور تحلیل حرکات دینامیکی مخزن شناور در حوزه فرکانس، مؤلفه‌های پتانسیل جریان به صورت ذیل بازنویسی می‌گردند [2]:

$$\varphi_I = a \hat{\varphi}_I e^{i\alpha x} \quad (7-الف)$$

$$\varphi_D = a \hat{\varphi}_D e^{i\alpha x} \quad (7-ب)$$

$$\varphi_{RS} = a_S \hat{\varphi}_1 e^{i\alpha x} \quad \varphi_{RH} = a_H \hat{\varphi}_2 e^{i\alpha x} \quad \varphi_{RR} = a_R \hat{\varphi}_3 e^{i\alpha x} \quad (7-ج)$$

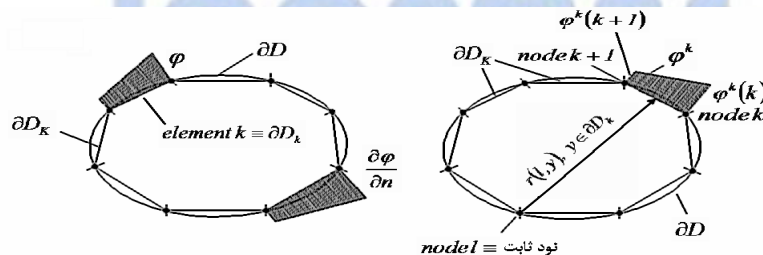
در روابط فوق، a دامنه موج پیش‌رونده، a_S و φ_{RS} به ترتیب دامنه حرکات افقی مخزن شناور و پتانسیل تشعشی جریان سیال ایجاد شده در اثر حرکات افقی، a_H و φ_{RH} به ترتیب دامنه حرکات قائم مخزن شناور و پتانسیل تشعشی جریان سیال ایجاد شده در اثر آن، a_R و φ_{RR} به ترتیب دامنه حرکات دورانی مخزن شناور و پتانسیل تشعشی جریان سیال ایجاد شده در اثر آن در دو بعد هستند. پارامترهای $\hat{\varphi}_1$ ، $\hat{\varphi}_2$ ، $\hat{\varphi}_3$ ، $\hat{\varphi}_D$ و $\hat{\varphi}_I$ مقدار مؤلفه‌های پتانسیل به ازای دامنه واحد و مستقل از زمان هستند. با توجه روابط ۵ - الف و ۶ - الف، معادله حاکم برای کلیه مؤلفه‌های پتانسیل نیز صادق بوده و بنابراین به منظور تحلیل حرکات دینامیکی مخزن، شرایط مرزی اشاره شده در روابط ۵ و ۶ بر حسب مؤلفه‌های پتانسیل $\hat{\varphi}$ بازنویسی شده و از حل معادله حاکم و شرایط مرزی بازنویسی شده مقادیر مؤلفه‌های پتانسیل $\hat{\varphi}$ تعیین می‌شوند. در این مقاله، به منظور حل معادله دیفرانسیل حاکم و اعمال شرایط مرزی در حوزه فرکانس از روش عددی المان مرزی استفاده شده است. در صورتی که پارامتر D ، بیانگر ناحیه سیال اطراف مخزن شناور بوده و x نقطه ثابت دلخواه روی مرز ناحیه مذکور باشد، بر اساس معادله دیفرانسیل حاکم (روابط ۵ - الف و ۶ - الف) معادله انتگرال اولیه نقاط مرزی به صورت ذیل تعیین می‌گردد [4]:

$$c(x)\varphi(x) + \int_{\partial D} \varphi(y) \frac{\partial \psi}{\partial n}(x, y) ds(y) = \int_{\partial D} \psi(x, y) \frac{\partial \varphi}{\partial n}(y) ds(y) \quad x, y \in \partial D \quad (8)$$

که در آن، $\psi = -\ln r / 2\pi$ است. در رابطه فوق φ مؤلفه پتانسیل مجهول و $\frac{\partial \varphi}{\partial n}$ مشتق آن نسبت به بردار عمود بر مرز و به سمت خارج ناحیه بوده و ψ حل بنیادی معادله لاپلاس است. پارامتر ∂D بیانگر مرز ناحیه D بوده و y نقاط مختلف روی آن هستند. پارامتر r فاصله نقطه ثابت x از نقطه دلخواه y بوده و $c(x)$ تنها به هندسه مرز در نقطه ثابت x وابسته بوده و بر اساس رابطه ذیل تعیین می‌گردد:

$$c(x) = \frac{\alpha(x)}{2\pi} \quad (9)$$

$\alpha(x)$ در رابطه فوق زاویه بین دو مماس بر مرز ناحیه D در سمت چپ و راست نقطه ثابت x است.



شکل ۲: ناحیه دلخواه حل عددی معادله لاپلاس و پارامترهای المانهای خطی

به منظور حل عددی معادله حاکم، با توجه به شکل ۲ مرز ناحیه دلخواه D را با المان‌های خطی تقریب زده و مرز تقریبی تشکیل یافته را ∂D_K می‌نامیم. تغییرات توابع مجهول که همان مؤلفه‌های پتانسیل در مسئله پیش‌رو بوده و همچنین تغییرات مشتقات آنها را در طول هر المان خطی فرض می‌نماییم. بنابراین بر اساس رابطه ۸، رابطه انتگرالی ناشی از تجزیه معادله حاکم به منظور حل عددی آن بر اساس روش عددی المان مرزی به صورت ذیل تعیین می‌شود [4]:

$$c(l)\varphi(l) + \sum_{k=1}^K (A_1(l,k) \quad A_2(l,k)) \begin{bmatrix} \varphi^k(k) \\ \varphi^k(k+1) \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^K (B_1(l,k) \quad B_2(l,k)) \begin{bmatrix} q^k(k) \\ q^k(k+1) \end{bmatrix} \quad (10)$$

که در آن:

$$A_\alpha(l,k) = \int_{\partial D_k} N_\alpha(\zeta) q^\psi(l, \zeta) \frac{L_k}{2} d\zeta \quad \alpha=1,2 \quad B_\alpha(l,k) = \int_{\partial D_k} N_\alpha(\zeta) \psi(l, \zeta) \frac{L_k}{2} d\zeta \quad \alpha=1,2$$

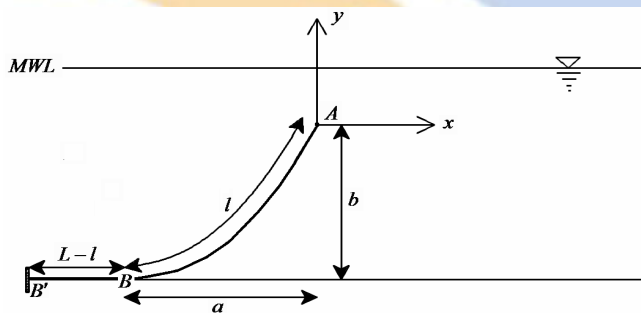
در رابطه فوق، l گره ثابتی است که انتگرال اولیه نسبت به آن ارائه شده، q مشتق مؤلفه پتانسیل نسبت به بردار عمود بر سطح مرز ناحیه D ، q^ψ مشتق تابع ψ نسبت به بردار عمود بر سطح مرز ناحیه D ، K تعداد المان‌های مرز و K متغیر مکان در مختصات محلی هر المان است که در میانه آن مقدار صفر و در دو انتهای آن مقادیر ۱ و -۱ را اختیار می‌نماید. N_α توابع شکلی خطی در مختصات محلی المان بوده و برابرند با:

$$N_1(\zeta) = -\frac{1}{2}(\zeta - 1) \quad N_2(\zeta) = \frac{1}{2}(\zeta + 1) \quad (11)$$

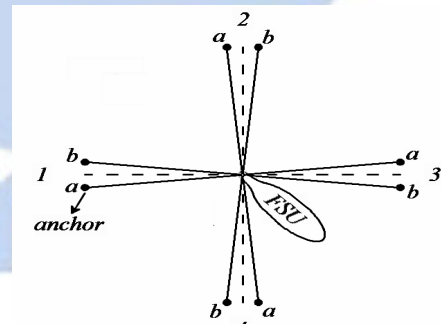
اندیس‌های نشان داده شده در بالای پارامترهای مؤلفه‌های پتانسیل و مشتقات آن بیانگر شماره المان بوده و مقادیر داخل پرانتز بیانگر شماره گره هستند. در صورتی که رابطه ۱۰ برای کلیه گره‌های المان‌های تشکیل دهنده ناحیه حل بسط داده شود، به تعداد گره‌های مرز معادلات جبری تشکیل خواهد شد. مجهولات پیش‌رو در این حالت مؤلفه‌های پتانسیل و مشتقات آنها هستند که تعداد آنها دو برابر تعداد معادلات جبری حاصله است. به منظور حل دستگاه معادلات جبری حاصله، کافی است شرایط مرزی حاکم بر حوزه حل (روابط ۵ و ۶) را که عموماً از نوع شرط مرزی نیومن و یا ترکیب شروط مرزی نیومن و دریکله هستند در معادلات جبری مذکور اعمال نموده و با برابر شدن تعداد معادلات و مجهولات، دستگاه معادلات جبری حاصله را حل نمود [5].

۴. مدل‌سازی مهارهای متصل به مخزن شناور

حرکات دینامیکی مخزن شناور سورنا توسط هشت عدد مهار مایل که به صورت جفت در چهار سوی آن متصل شده‌اند، مهار می‌گردد. در شکل ۳- الف جانمایی مهارهای متصل به مخزن شناور سورنا نشان داده شده است. در حالتی که مخزن در آب آرام قرار دارد، همواره بخشی از کل طول مهارها بر روی بستر دریا قرار دارد. مقدار طول مهار برخاسته از بستر (l)، فاصله افقی و قائم محل اتصال مهار به مخزن تا محل برخاستن از بستر (a, b) و وزن مغروق واحد طول مهار (w) مهمترین عوامل تعیین کننده بزرگی نیروهای استاتیکی مهارهای مایل هستند. در این مقاله از اثر حرکات دینامیکی مهارها در برآورد بزرگی نیروهایشان صرف‌نظر شده است. در شکل ۳- ب پارامترهای اصلی در تحلیل نیروهای مهار نشان داده شده است.



(ب)



(الف)

شکل ۳: (الف) جانمایی مهارهای مخزن شناور سورنا (نمای پلان)، (ب) مهار مایل و پارامترهای آن

در صورتی که از اثرات دینامیکی حرکت مهارها به دلیل حرکات مخزن متصل به آنها و برخورد امواج دریا صرف‌نظر نماییم، بزرگی مؤلفه قائم نیروی مهار در محل اتصال به مخزن شناور برابر است با [1]:

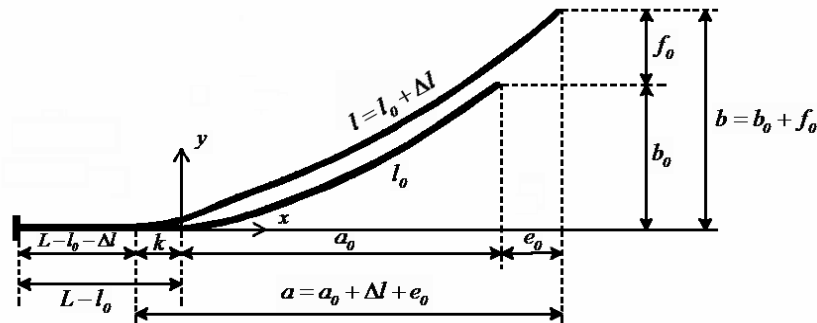
$$Y = \frac{w}{2}(b \coth \lambda + l) \quad (12)$$

که در آن $\lambda = wa/2X$ است. همچنین در روابط ارائه شده، Y مؤلفه قائم نیروی مهار در انتهای متصل به مخزن و X مؤلفه افقی نیروی مهار بوده که در طول آن ثابت است. سایر پارامترها در بندهای پیشین تعریف شده‌اند. با توجه به مجهول بودن مقدار مؤلفه افقی نیروی مهار، مقدار کمیت λ بر اساس رابطه ذیل تعیین می‌گردد [1]:

$$l^2 = b^2 + \frac{a^2 \sinh^2 \lambda}{\lambda^2} \quad (13)$$

در تحلیل نیروهای مهارهای متصل به مخزن شناور فرض شده است که همواره بخشی از طول مهار بر روی بستر دریا قرار دارد، بنابراین رابطه ذیل بین پارامترهای مهار برقرار است:

$$\frac{l}{b} = \coth(\lambda) \quad (14)$$



شکل ۴: مهار مایل در حالت قرارگیری در آب آرام و در حالت جابه‌جایی مخزن شناور

در صورت جابه‌جا شدن مخزن شناور تحت اثر امواج دریا، انتهای مهارهای متصل به آن نیز جابه‌جا شده و سبب تغییر مقدار نیروهای مهار می‌گردد. در صورتی که جابه‌جایی افقی و عمودی انتهای مهارها در محل اتصال به مخزن برابر با e_0 و f_0 باشد، با توجه به شکل ۴، مقدار افزایش طول مهار برخاسته از زمین (Δl) برابر با میزان کاهش طول مهار قرار گرفته بر روی بستر دریا (k) است. اندیس صفر در پارامترهای نشان داده شده در شکل ۴ بیانگر مقدار آنها در حالتی است که مخزن در تعادل استاتیکی در آب آرام قرار داشته و پارامترهای فاقد اندیس بیانگر مقدار آنها در حالتی است که انتهای مهار به صورت افقی و قائم جابه‌جا شده است. به منظور محاسبه بزرگی نیروهای مهار در حالتی که انتهای آنها جابه‌جا شده و با فرض اینکه کلیه پارامترهای مجهول مهار بر اساس روابط ۱۲، ۱۳ و ۱۴ در حالت قرارگیری مخزن در آب آرام تعیین شده‌اند، بر اساس شکل ۴ و رابطه ۱۴ داریم:

$$l = b \coth(\lambda) \rightarrow l_0 + \Delta l = (b_0 + f_0) \coth(\lambda) \quad (15)$$

بر اساس روابط ۱۳ و ۱۵، مقدار پارامتر λ در حالتی که انتهای مهار به صورت افقی و قائم جابه‌جا شده است، محاسبه می‌گردد. بنابراین با مشخص شدن پارامتر مذکور در این حالت و با استفاده از رابطه ۱۲، نیروهای مهار در محل اتصال به مخزن تعیین می‌شوند [5].

۵. مدل‌سازی حرکات دینامیکی مخزن شناور

حرکات دینامیکی مخزن شناور، در دو بعد و با در نظر گرفتن درجات آزادی حرکت افقی^۱، عمودی^۲ و دوران^۳ در صفحه مدل‌سازی شده است. با در نظر گرفتن مبدا مختصات بر مرکز شناوری مخزن و راستای محورهای مختصات بر اساس شکل ۱، معادلات حرکت دینامیکی به صورت ذیل تعیین می‌شود:

$$\sum F_x = ma_x \quad (16)$$

$$\sum F_z = ma_z \quad (17)$$

$$\sum \bar{M}_{C.F} = I_G \bar{\alpha} + m \bar{\rho} \times \bar{a}_G \quad (18)$$

در روابط فوق، $\sum F_x$ برآیند نیروهای وارد بر مخزن در راستای افقی، $\sum F_z$ برآیند نیروهای وارد بر مخزن در راستای قائم، $\sum \bar{M}_{C.F}$ برآیند گشتاورهای وارد بر مخزن حول مرکز شناوری آن، a_x و a_z شتاب افقی و قائم مخزن در محل مرکز ثقلش، $\bar{\alpha}$ بردار شتاب دورانی مخزن، \bar{a}_G بردار شتاب مخزن در محل مرکز ثقلش، $\bar{\rho}$ بردار انتقال که ابتدای آن مبدأ مختصات و انتهای آن مرکز ثقل است، m جرم مخزن شناور و I_G گشتاور دوم اینرسی جرمی حول مرکز ثقل هستند. با توجه به اثر متقابل حرکت افقی و دوران، روابط پیشین به صورت ذیل بازنویسی می‌شوند:

1. Sway motion
2. Heave motion
3. Roll motion

$$\sum F_x = m(\ddot{x} + z_G \ddot{\theta}) \quad (19)$$

$$\sum F_z = m\ddot{z} \quad (20)$$

$$\sum M_{C.F} = I_{C.F} \ddot{\theta} + m z_G \ddot{x} \quad (21)$$

در روابط فوق، z_G مختصات قائم مرکز ثقل مخزن شناور و \ddot{x} ، \ddot{z} و $\ddot{\theta}$ مشتق دوم زمانی پارامترهای نظیر هستند. با توجه به فرض غیر چرخشی بودن سیال، رابطه برنولی به صورت ذیل در تمامی حوزه سیال برقرار است:

$$p(t) + \rho \frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \rho |\nabla \phi|^2 + \rho g z = cont \quad (22)$$

در رابطه فوق، p فشار سیال، ρ چگالی سیال، g شتاب ثقل هستند. با محاسبه شدن مؤلفه‌های پتانسیل جریان، برآیند نیروها و گشتاورهای وارده از طرف سیال بر مخزن شناور، با انتگرال‌گیری فشار سیال بر روی سطح بدنه که بر اساس رابطه ۲۲ تعیین شده است، محاسبه می‌شوند. با توجه به رابطه ۲۲ و با صرف‌نظر از ترم‌های غیرخطی آن که سبب اعمال نیروی دررفت به مخزن شناور می‌شوند و با حذف ترم فشار استاتیکی، رابطه فشار دینامیکی به صورت ذیل تعیین می‌شود:

$$p(t) \cong -\rho \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (23)$$

اثر فشار هیدرواستاتیک به صورت جداگانه در تعیین نیروهای وارد بر مخزن لحاظ می‌شود. بر اساس رابطه ۲۳، برآیند نیروها و گشتاورهای وارد بر مخزن شناور به صورت ذیل تعیین می‌گردد:

$$\sum \vec{F} = \int_A \rho \frac{\partial \phi}{\partial t} \vec{n}_{out} dA + \vec{F}_h + \vec{F}_M \quad (24)$$

$$\sum \vec{M} = \int_A \rho \frac{\partial \phi}{\partial t} \vec{r} \times \vec{n}_{out} dA + \vec{M}_h + \vec{M}_M \quad (25)$$

در روابط فوق، \vec{n}_{out} بردار یکه عمود بر بدنه مخزن و به سمت بیرون، \vec{F}_h و \vec{M}_h برآیند نیروها و گشتاورهای هیدرواستاتیکی، \vec{F}_M و \vec{M}_M برآیند نیروها و گشتاورهای وارده از طرف سیستم مهاربندی و A و dA سطح و المان سطح مخزن شناور هستند [6]. با محاسبه برآیند نیروها و گشتاورهای وارده بر مخزن بر اساس روابط فوق و اعمال آنها در روابط تعادل دینامیکی (روابط ۱۹ الی ۲۱)، معادلات تعادل مخزن به صورت ذیل تدوین می‌یابند:

$$([M] + [m]).\ddot{X} + [C].\dot{X} + [K].X = F \quad (26)$$

در رابطه فوق، $[M]$ ماتریس جرم مخزن شناور، $[m]$ و $[C]$ ماتریس جرم اضافه و میرایی مخزن شناور بوده که بر اساس مؤلفه پتانسیل جریان ناشی از تشعشع تعیین شده‌اند، $[K]$ ماتریس سختی که بر اساس نیروهای مهارها و فشارهای هیدرواستاتیکی محاسبه شده‌اند، F ماتریس نیروهای وارد بر مخزن شناور که بر اساس مؤلفه پتانسیل‌های جریان پیش‌رونده و متفرق شده تعیین می‌شوند و X ماتریس جابه‌جایی مخزن شناور هستند.

۶. معتبرسازی مدل

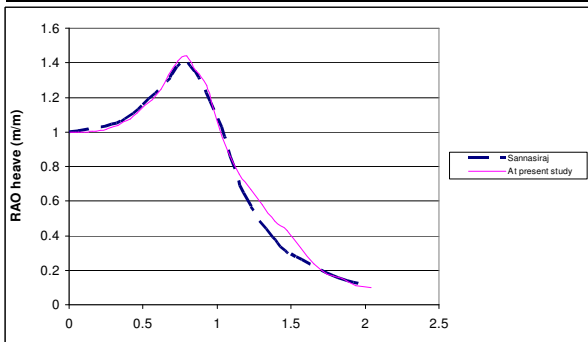
به منظور حصول اطمینان از صحت نتایج حاصل شده در این مقاله، ابعاد و مشخصات موج‌شکن شناور در مرجع شماره [2] به عنوان ورودی‌های مدل عددی تدوین شده به منظور تحلیل حرکات دینامیکی موج‌شکن شناور لحاظ شد. طیف پاسخ موج‌شکن شناور در اثر برخورد امواج با دامنه واحد با آن در فرکانس‌های مختلف (RAO) محاسبه و مورد مقایسه قرار گرفته است. بر اساس مقایسه نتایج در اشکال ۵ الی ۷ که نشان دهنده عملگرهای پاسخ موج‌شکن شناور در هر دو مورد هستند، انطباق مناسبی بین نتایج حاصله برقرار است.

۷. عملگر پاسخ مخزن شناور به ازای دامنه واحد امواج

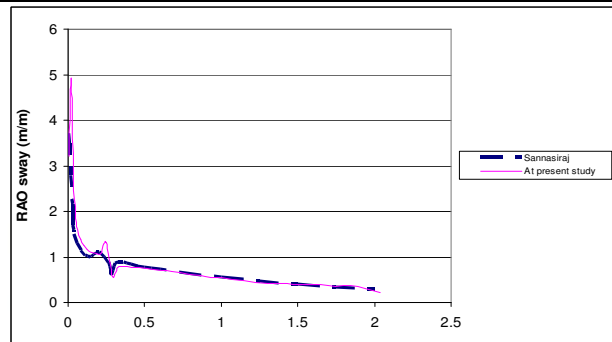
مخزن شناور سورنا در حالتی که ۲۰ درصد از مخازن ذخیره آن توسط نفت تولیدی اشغال شده، و مشخصات آن در جدول ۱ آمده است توسط مدل تهیه شده مورد تحلیل قرار گرفت. به منظور تحلیل حرکات دینامیکی مخزن شناور، معادله تعادل دینامیکی ارائه شده در رابطه ۲۶ در حوزه فرکانس تحلیل گردید. با توجه به خطی بودن پاسخ سازه مخزن شناور در اثر امواج برخوردی، تحلیل‌های انجام گرفته بر اساس برخورد امواج با دامنه واحد می‌باشند. طیف پاسخ شناور توسط مدل به دست آمده و در اشکال ۸ الی ۱۰ نتایج RAO مخزن که توسط مدل برآورد گردیده نشان داده شده است.

جدول ۱: مشخصات اصلی شناور سورنا در حالت پرشدگی به میزان ۲۰٪

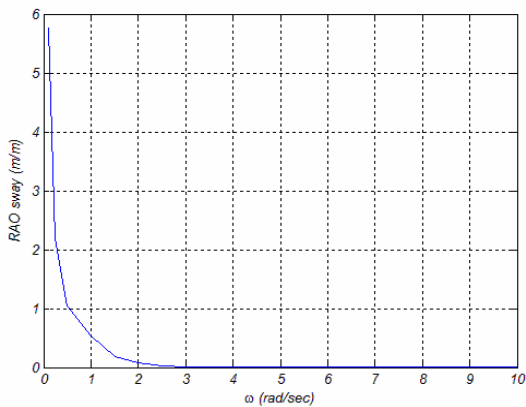
مشخصات شناور	نماد	واحد	کمیت
طول	L	m	۳۳۰
عرض	B	m	۵۶
آبخور (پرشدگی ۲۰٪)	T	m	۷/۶
جرم شناور به همراه جرم سیال داخل مخازن	M	ton	۱۱۱۰۹۵/۵
جرم سبک شناور	M_{light}	ton	۴۸۰۱۷/۵
ممان اینرسی جرمی	I	ton×m ²	$۳/۱۳۵۵۵۹۳ \times 10^{-۷}$
مختصات مرکز ثقل از سطح آزاد	z_G	m	۱۸/۵
فاصله مرکز ثقل تا متاستر	\overline{GM}	m	۲۲



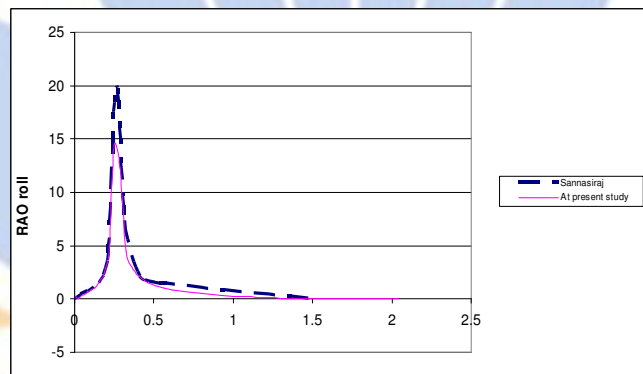
شکل ۶: مقایسه عملگر پاسخ حرکات قائم موج شکن شناور به ازای دامنه واحد امواج بر حسب فرکانس



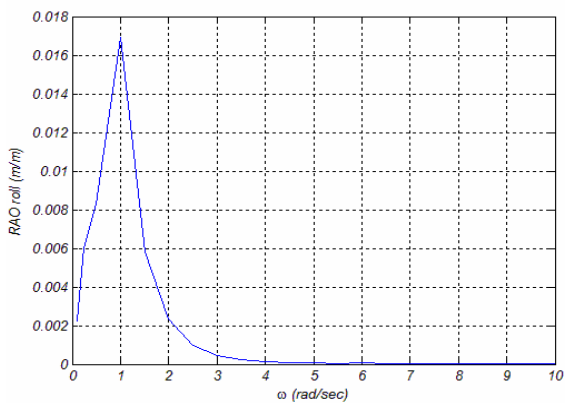
شکل ۵: مقایسه عملگر پاسخ حرکات افقی موج شکن شناور به ازای دامنه واحد امواج بر حسب فرکانس



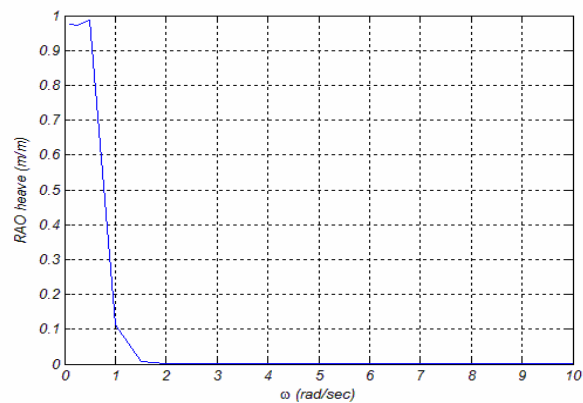
شکل ۸: عملگر پاسخ حرکات افقی مخزن شناور سورنا به ازای دامنه واحد امواج بر حسب فرکانس



شکل ۷: مقایسه عملگر پاسخ حرکات دورانی موج شکن شناور به ازای دامنه واحد امواج بر حسب فرکانس



شکل ۱۰: عملگر پاسخ حرکات دورانی مخزن شناور سورنا به ازای دامنه واحد امواج بر حسب فرکانس



شکل ۹: عملگر پاسخ حرکات قائم مخزن شناور سورنا به ازای دامنه واحد امواج بر حسب فرکانس

۸. بحث و نتیجه‌گیری

در این مقاله مدلی به روش المان مرزی تهیه شد که می‌تواند حرکات یک جسم شناور مهار شده در آب را در ۳ درجه آزادی مورد تحلیل قرار دهد. صحت این مدل ابتدا برای یک موج‌شکن شناور که مشخصات آن از مراجع استخراج گردید با مقایسه RAO مدل با مرجع مذکور بررسی گردید. سپس حرکات دینامیکی مخزن شناور سورنا تحت اثر امواج دریا در دو بعد و در حوزه فرکانس تحلیل شد. مهارهای متصل به مخزن به صورت مهارهای مایل و با صرف‌نظر از اثرات دینامیکی حرکت آنها مدل‌سازی شده و نیروهای وارد بر مخزن محاسبه گردید. نتایج مدل عددی اجرا شده بر اساس روش المان مرزی نشان داد که حل عددی معادله حاکم بر اساس روش مذکور نسبت به محل مرزهای دوردست حساس بوده و در صورتیکه این مرزها نزدیک به محل بدنه مخزن شناور اتخاذ گردند، خطاهای عددی به وجود آمده بزرگ خواهند بود. فاصله مناسب قرارگیری محل مرزهای دوردست از مخزن شناور بر اساس آنالیز حساسیت انجام گرفته، در حدود دو برابر طول موج برخوردی به آن به دست آمد. بر اساس شکل ۸، دامنه حرکات افقی مخزن شناور سورنا به ازای دامنه واحد امواج، با افزایش فرکانس کاهش می‌یابد. میزان کاهش دامنه حرکات افقی در محدوده فرکانسهای کوچکتر از فرکانس تشدید حرکت دورانی بسیار شدید بوده و در محدوده فرکانسهای بزرگتر از آن کند است. همچنین بر اساس شکل ۹، دامنه حرکات قائم مخزن شناور سورنا به ازای برخورد امواج منظم با دامنه واحد با آن، به ازای فرکانس حدود ۰/۵ رادیان بر ثانیه به بیشینه مقدار نزدیک می‌شود. در محدوده قبل از فرکانس مذکور دامنه حرکات عمودی به آهستگی با افزایش فرکانس افزایش یافته و بعد از فرکانس مذکور با افزایش فرکانس به شدت کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود که بیشینه مقدار دامنه حرکات عمودی از بیشینه مقدار دامنه حرکات افقی کمتر است. علت پدیده مذکور، وجود نیروی بازگرداننده هیدرواستاتیکی علاوه بر نیروی بازگرداننده مهارها در حرکات عمودی مخزن است. تنها نیروی بازگرداننده در راستای افقی حرکات مخزن، نیروی مهارها هستند. بر اساس شکل ۱۰، دامنه حرکات دورانی مخزن شناور سورنا به ازای برخورد امواج منظم با دامنه واحد با آن در محدوده فرکانس ۱ رادیان بر ثانیه به بیشینه مقدار نزدیک می‌شود. افزایش بسیار زیاد دامنه حرکات دوران در فرکانس تشدید ۱ رادیان بر ثانیه که با واقعیت فیزیکی تطابق چندانی ندارد، به آن دلیل است که در محدوده فرکانس تشدید، میرایی لزج سیال اثرات بسیار چشمگیر در مستهلک کردن حرکات دورانی شناور دارد. با توجه به مدل‌سازی سیال به صورت غیرلزج اثرات میرایی مذکور لحاظ نشده و سبب برآورد جواب‌های غیرواقعی در محدوده فرکانس تشدید شده است.

تشکر و قدردانی

تهیه‌کنندگان تحقیق حاضر بر خود لازم می‌دانند از حمایت‌های علمی و مالی واحد پژوهش و توسعه شرکت نفت فلات قاره ایران کمال تشکر و قدردانی را به عمل آورند.

مراجع

- 1-Patel M. H., (1989), Dynamics of Offshore Structures, London: Butterworth Co.
- 2- Sannasiraj S. A., Sundar V., Sundaravadevelu R., (1998), Mooring Forces and Motion Responses of Pontoon-Type Floating Breakwaters, *Ocean Eng.*, Vol. 25, No. 1, 27-8.
- 3- Dean R. G., Dalrymple R. A., (1991), Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists, London: Word Scientific Publishing Co. pte. ltd.
- 4-Paris F., Canas J., (1977), Boundary Element Method Fundamentals and Application, New York: Oxford University Press.
- 5-Rezanejad, K. (2008), Hydrodynamic analysis of floating storage tanks due to sea waves, MSc Thesis (Distinct), Faculty of Marine Technology, Amirkabir University of Technology.
- 6-Kim Y., Nam B. W., Kim D. W., Kim Y. S., (2007), Study on Coupling Effects of Ship Motion and Sloshing, *Ocean Eng.*, Vol. 34, , 2176-2187.

Hydrodynamic Analysis of Oil Storage Tanks

K. R. Nejad, MSc in Marine Structures, Faculty of naval architects and marine industries

M. J. Ketabdari, Associate Professor, Faculty of naval architects and marine industries, Amir Kabir University of Technology

A. Mirzaian, Research and development Iranian Offshore Oil Company

Abstract

Today, with the increasing use of oil and petroleum products, high volumes of world's oil and gas are extracted in offshore oil fields. In order to deliver oil and gas to the tankers, they are transported via pipelines. Using a numerical model, this study investigates the dynamic movement of Sorna, which is a floating oil storage tanks and located in Bahregan oil-rich area. Dynamic movement of the float tank in the frequency domain is analyzed by taking 3 degrees of freedom of motion (including motion horizontal, vertical and rotational). Because of the great wave load towards (in comparison with other loads imposed on the offshore structures), this study considers the wave load on Sorna beside other loads. Interactions of sea waves and Sorna at different frequencies are assessed using diffraction theory and the finite element method.

Keywords: dynamic movement, Sorna, floating oil storage tanks, Bahregan oil-rich area, interactions