

مقایسه عملکرد میراگر جرمی و مخزن متحرک مستغرق در کاهش دامنه پاسخ سکوه‌های ثابت دریایی

مهدی شفیعی فر^{۱*}، علی اکبر آفاکوچک^۲، محمدرضا محرمی گرگری^۳

۱- استاد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

۲- استاد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

۳- کارشناس ارشد سازه‌های دریایی دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

*shafiee@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۲/۹/۳۰]

تاریخ دریافت: [۱۳۹۱/۷/۲۶]

چکیده- در این مقاله تأثیر یک مخزن متحرک مستغرق برای کاهش دامنه پاسخ سکوه‌های ثابت دریایی که در عمق‌های زیاد قرار می‌گیرند، بررسی شده است. در این طرح جدید با قرار دادن یک مخزن متحرک توخالی با نیروی شناوری زیاد، کاهش دامنه پاسخ سکو به دست می‌آید. با توجه به حجم زیاد مخزن، جرم افزوده‌ای ایجاد شده ناشی از حرکات آن مقدار بزرگی را به خود اختصاص می‌دهد، پس نیروی اینرسی تولید شده قابل ملاحظه است. از طرف دیگر نیروی شناوری مخزن که نیرویی قائم و به سمت بالا است، با نوسان مخزن تولید لنگر بازگرداننده‌ای می‌کند که وابسته به مکان قرار گیری مخزن یا به عبارتی زمان است. با تلفیق این دو موضوع و انتخاب سختی مناسب جهت اتصال مخزن به سکو برای عملکرد دوگانه بهینه، موجبات کاهش دامنه‌ی پاسخ سکو فراهم می‌شود. فرآیند تحلیل دینامیکی با در نظر گرفتن آثار غیر خطی هندسی و تغییر شکل‌های بزرگ انجام شده است. برای این منظور، از برنامه‌ای مفصل که در محیط متلب توسعه داده شده، استفاده شده است. با انجام تحلیل‌های دینامیکی مشخص شد که مخزن در مقابل امواج رفتاری شبیه یک میراگر جرمی از خود نشان می‌دهد. در این حالت جرم افزوده‌ی مخزن نیز در تولید نیروی اینرسی مشارکت می‌کند، پس اینرسی زیادی تولید می‌شود. نتایج بررسی‌های انجام شده روی سیستم پیشنهادی نشانگر آن است که کارایی مخزن با عملکرد دوگانه میراگری و شناوری بیشتر از کارایی یک میراگر تنها است؛ این درحالی است که حتی میراگر، جابه‌جایی‌های به مراتب بزرگتری را نسبت به مخزن تجربه کرده است. به هنگام عملکرد دوگانه‌ی میراگری و شناوری می‌توان سختی بهینه را به گونه‌ای تعیین کرد که مخزن عملکرد مؤام مناسبی را در هر دو حالت داشته باشد. همچنین نتایج نشان می‌دهند با عبور از حالت گذرا و ورود به پاسخ‌های حالت پایا عملکرد بهتری حاصل می‌شود.

واژگان کلیدی: سکوی ثابت، مخزن مستغرق، میراگر جرمی، عملکرد دوگانه اینرسی و شناوری.

بهره‌برداری، کاهش جابه‌جایی‌های سکو و افزایش سلامت سکو، طرح‌های ابتکاری و نوین زیادی ارائه شده است. در این راستا برای کاهش نوسانات

۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر برای دستیابی به اهدافی چون کاهش هزینه‌های ساخت، کاهش زمان ساخت و

یک میراگر جرمی می‌شود. در واقع مخزن در مقابل نیروهای باد، زلزله و امواج معمولی به یک میراگر جرمی تبدیل می‌شود. از این‌رو با انتخاب سختی مناسب برای اتصال بین مخزن و سکو، مخزن می‌تواند عملکرد میراگر گونه‌ای را نیز از خود بروز دهد. پژوهش‌های گسترده‌ای در زمینه‌ی استفاده از میراگرهای جرمی صورت گرفته‌است و پروژه‌های بسیاری نیز به مرحله‌ی بهره‌برداری رسیده‌اند. در این بین می‌توان به برج ملی کانادا، برج بندر چیا و برج کریستال در ژاپن و برج تاپیه ۱۰۱ در تایلند اشاره کرد.

این میراگرها بر پایه مطالعاتی هستند که روی ضربه‌گیرهای ارتعاشات دینامیکی به وسیله‌ی فراهام انجام شد و نتایج آن در سال ۱۹۰۹ منتشر شد [۶]. اورموندروید و دن هارتوگ در سال ۱۹۲۸ مدل کامل‌تری از نگره ضربه‌گیرها را گسترش دادند [۷]. دن هارتوگ در کتاب خود با عنوان ارتعاشات مکانیکی که در سال ۱۹۵۶ منتشر شد تئوری مدون ضربه‌گیرها را در حالتی که سازه اصلی بدون میرایی باشد در قالب معادلات تحلیلی ریاضی گفته است [۸]. بیشاپ و ولبورن مسأله ضربه‌گیرهای ارتعاشی را با در نظر گرفتن اثر وجود میرایی در سازه اصلی بحث کردند [۹]. فالکن با پیروی از کارهای بیشاپ به طرح مساله بهینه‌سازی پارامترهای میراگر جرمی پرداخته [۱۰] و رندال جداولی را در خصوص طراحی پارامترهای این میراگرها منتشر نموده است [۱۱]. در این پژوهش با تلفیق دو موضوع فوق یعنی میراگر جرمی و عملکرد نیروی شناوری، مشخص شد که مخزن عملکرد دوگانه‌ای را برای کاهش دامنه‌ی پاسخ سکو ارائه می‌دهد. در این مقاله مقایسه‌ای بین عملکرد یک میراگر جرمی و مخزن در مقابل امواج انجام شده است تا اثر استفاده از مخزن با عملکرد دوگانه معلوم شود.

۲- مبانی و ویژگی‌های نرم افزار توسعه یافته

برای مدل‌سازی و تحلیل سیستم مورد نظر لازم است موارد زیر در نظر گرفته شوند:

سکوهای در معرض امواج، طرح‌های مختلفی مانند طرح‌های با عملکرد آئرو دینامیکی بیشتر [۱]، افزودن مهار برای بالابردن سختی سازه‌ای [۲]، یا استفاده از میراگرهای فعال [۳] و غیر فعال [۴]، پیشنهاد شده‌است. محرمی و همکاران [۵] با بررسی طرح‌های جدید ارائه شده برای سکوهای دریایی، ایده‌ی جدیدی برای عملکرد بهینه سکوهای ثابت دریایی در عمق‌های زیاد پیشنهاد کردند. این طرح با هدف استفاده از نیروی شناوری، به عنوان نیرویی کمک‌گر ارائه شد.

در ایده اولیه طرح سکویی ثابت که مهاربندهای آن در قسمت تحتانی حذف شده‌اند و پایه‌های آن به وسیله‌ی مخازنی تحت کشش قرار گرفته‌اند مد نظر قرار گرفت. این طرح در واقع، سکویی پایه کششی بود که در پایه‌ها به جای کابل، از لوله استفاده می‌شود. تصویر شماتیکی از سیستم در شکل ۱- الف آورده شده‌است. مشکل اصلی این طرح، حجم زیاد مخزن مورد نیاز است که باعث اعمال نیروی موج بزرگتری به سازه می‌شود و جابه‌جایی‌ها افزایش می‌یابد.

با بررسی ایرادات ایده اولیه، تصمیم بر آن شد که به جای استفاده از مخازن ثابت مستغرق متصل به سکو، از مخزن متحرکی که با اتصال برشی و با دو فنر خطی به سکو متصل است استفاده شود (شکل ۱-ب). طرح جدید باعث شکل‌گیری نیروی جدیدی می‌شود به گونه‌ای که به هنگام اعمال نیروی موج به مخزن، جابه‌جایی مخزن بیشتر از پاسخ سکو شده پس لنگر بازگرداننده‌ای که ناشی از خروج از مرکزیت نیروی شناوری مخزن است، به سکو اعمال می‌شود. این لنگر شرایط تغییر الگوی توزیع بار کششی در پایه‌های سکو را فراهم می‌آورد و جابه‌جایی سیستم را کاهش می‌دهد.

موضوع مطرح دیگر پاسخ سکو و مخزن در مقابل امواج معمولی دریا است. با توجه به قرارگیری مخزن در عمق، با هدف کاهش نیروی موج وارده، نیروی موج وارد بر مخزن ناشی از این امواج که امواج با ارتفاع‌های کم است، به صفر میل می‌کند پس فاز پاسخ مخزن و سکو از انطباق خارج می‌شود. این مطلب باعث تبدیل عملکرد مخزن به

مدلسازی تیزی موج هم استفاده شده است [۱۲]. در نرم‌افزار برای محاسبه نیروی موج وارد براعضای لاغر فرمول موريسون به کار گرفته شده است، به این ترتیب که با محاسبه سرعت ذرات آب و تبدیل آن به سرعت عمود بر المان و ضرب آن در سطح تصویر، و با به دست آوردن شتاب ذرات آب در مرکز هر المان و ضرب آن در حجم المان، نیروی درگ و اینرسی عمود بر المان مطابق با رابطه (۱) محاسبه شده است.

برای مخازن با توجه به آن که نسبت قطر مخزن به طول موج کمتر از ۱ است - از تئوری فشار بهره گرفته شده است، به گونه‌ای که فشار کلی موجود در مرکز هر المان، محاسبه شده و با ضرب آن در مساحت المان، نیروی عمود وارد بر هر المان، حاصل شده است. این نیرو به واقع ترم اینرسی رابطه موريسون است، پس ترم درگ نیز به‌طور جداگانه از رابطه (۱) مورد محاسبه قرار گرفته است. شایان ذکر است که تأثیر این ترم، با حجیم شدن مخزن، نسبت به ترم اینرسی، کاهش می‌یابد [۱۳].

(۱)

$$F_w = C_m \cdot \rho \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \dot{V}_n \cdot ds \quad \text{or} \quad C_m \cdot dP \cdot dA +$$

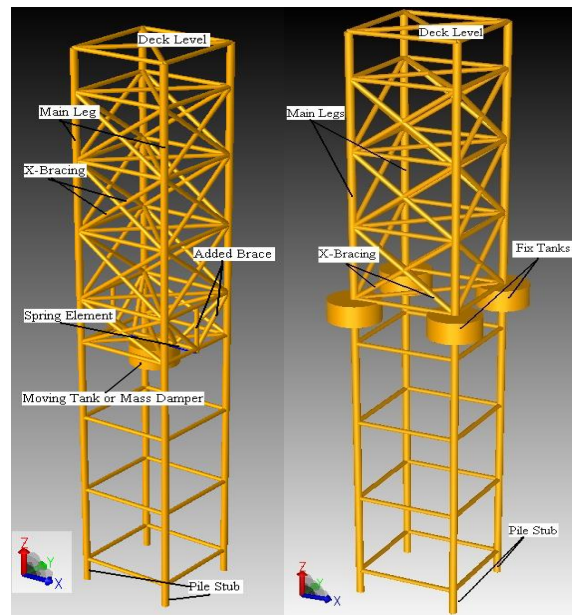
$$C_d \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot r \cdot |V_n - \dot{v}| (V_n - \dot{v}) \cdot ds$$

که در آن:

F_w نیروی موج، C_m & C_d ضرایب اینرسی و درگ r شعاع عضو لوله‌ای، V_n & \dot{v}_n شتاب و سرعت ذرات (عمود بر سطح عضو)، (\dot{v}) سرعت ارتعاش عضو dP فشار آب در مرکز هر المان، dA مساحت المان مربوطه و ds طول المان لوله‌ای است.

۲-۲- مبانی سازه‌ای

در برنامه توسعه داده شده، المان‌های سازه‌ای، به شکل المان‌های تیر با ۱۲ درجه آزادی منظور شده‌اند. ماتریس‌های سختی و جرم برای هر المان با توجه به توابع شکل [۱۴] و با انتگرال گیری در طول المان محاسبه شده و با توجه به محورهای مختصات محلی هر عضو و با محاسبه ماتریس‌های انتقال به سیستم مختصات کلی منتقل شده و در پایان ماتریس‌های مشخصات سازه‌ای تشکیل



مخزن متحرک

مخازن ثابت

شکل ۱: تصویری شماتیک از سیستم مورد مطالعه

- ۱- برآورد نیروی موج وارد بر سازه با در نظر گرفتن ترکیبی از فرمولاسیون موريسون و فرود کریلف
- ۲- در نظر گرفتن آثار اندرکنشی موج و سازه
- ۳- حل غیرخطی سیستم با منظور داشتن اثر تغییر شکل‌های بزرگ.

برای مدلسازی و تحلیل ابتدا سعی شد از نرم‌افزارهای در دسترس سازه‌ای و دریایی مانند SAP, SACS استفاده شود، ولی به علت ضعف این نرم‌افزارها، تصمیم بر آن شد تا کد مورد نیاز در یک محیط برنامه‌نویسی توسعه داده شود و با توجه به مزایای محیط متلب، برنامه‌ای در محیط این نرم‌افزار توسعه داده شد. در ادامه مبانی و تئوری‌های استفاده شده در توسعه کد مورد نظر به گونه مختصر بیان می‌شوند. جزئیات بیشتر در مرجع [۵] آمده است.

۲-۱- مبانی هیدرودینامیکی

برای محاسبه سینماتیک و پارامترهای موج از تئوری موج استوکس مرتبه ۵ که برای آب‌های عمیق مناسب‌تر از سایر تئوری‌ها است و از قابلیت

۱. MATLAB

استفاده شده و در حقیقت ترم نیروی متوازن شده F^i ، که نماینده تنش‌های ایجاد شده در سیستم است، جایگزین حاصل ضرب ماتریس سختی در جابه‌جایی درجات آزادی شده است. توجه شود که ماتریس‌های جرم و میرایی در خلال تحلیل ثابت فرض می‌شوند.

۲-۳- چگونگی حل معادلات حاکم

قبل از بررسی معادلات حاکم مناسب است تا گام‌های استفاده شده در فرایند همگرایی و تحلیل معرفی شوند. به طور کلی در برنامه نویسی سه گام در نظر گرفته شده است:

- گام زمانی: معرف میزان افزایش زمان است.
 - گام همگرایی: با نام گام در این مقاله استفاده شده است که بیانگر تعداد سعی و خطای مورد نیاز در هر گام زمانی است.
 - گام میرایی: که در داخل هر گام با هدف همگرا کردن سرعت‌های نسبی برای در نظر گرفتن اثرات میرایی هیدرودینامیکی استفاده شده است.
- معادلات با تغییرات مورد نیاز، برای در نظر گرفتن اثر تغییر شکل‌های بزرگ در برنامه نویسی برای یک گام زمانی در ادامه آورده شده‌اند.

$$\ddot{v}_i = m^{-1}(P_i - c\dot{v}_i - F_i) \quad (2)$$

$$F_i = k_i \times v_i$$

در رابطه‌ی فوق F_i بیانگر نیروهای نقطه‌ای داخلی است که در خلال همگرایی دچار تغییر نمی‌شود، پس شتاب اولیه در طول همگرایی ثابت منظور می‌شود.

$${}^i\Delta P = P - F \quad (3)$$

$${}^iF = k \times {}^i u$$

iF نیروهای داخلی در گام i ام را نشان می‌دهد به گونه‌ای که iF در سعی اولیه برابر F فرض می‌شود ولی در طول فرآیند همگرایی با توجه به تغییر ماتریس سختی، دچار تغییر می‌شود. iP که بیانگر نیروهای خارجی وارد بر سازه در اولین گام است، برابر با نیروهای خارجی بدون در نظر گرفتن آثار اندرکنشی سازه و آب محاسبه می‌شود. با پیموده شدن گام‌ها

شده‌اند. ماتریس میرایی به صورت ترکیب خطی از ماتریس‌های سختی و جرم (فرض رایلی) در نظر گرفته شده است [۱۵].

ماتریس نیرویی نیز ابتدا در مختصات محلی عضو حساب شده و سپس به مختصات کلی انتقال می‌یابد. لازم به ذکر است که ماتریس نیرویی در هر گام زمانی، با توجه به پاسخ‌های سیستم در گام زمانی پیشین، محاسبه شده است. در تحلیل‌های تغییر شکل‌های بزرگ و « $P - \Delta$ »، ماتریس سختی نیز، با توجه به نتایج پاسخ در گام قبل، اصلاح شده است. برنامه توسعه داده شده قابلیت تحلیل استاتیکی و دینامیکی برای سیستم مورد بررسی را دارد. با توجه به آنکه، سیستم شامل مخزنی است که آزادی حرکت جانبی دارد و همچنین در نظر گرفتن اثر حرکت بار قائم ناشی از انتقال مخزن یا میراگر در پاسخ‌ها مؤثر است، پس انجام تحلیل غیرخطی هندسی با منظور داشتن اثر تغییر شکل‌های بزرگ و « $P - \Delta$ »، اجتناب ناپذیر است.

تحلیل استاتیکی این سیستم به صورت نمودی و گام به گام صورت گرفته به گونه‌ای که در ابتدای هر گام زمانی با وارون کردن ماتریس سختی مربوط به ابتدای گام و ضرب آن در ماتریس نیرویی، پاسخ سیستم حاصل شده است. در نظر گرفتن اثر تغییر شکل‌های بزرگ، با استفاده از روش نیوتن-رافسون میسر شده است. در واقع با بوجود آمدن تغییر شکل‌های بزرگ در سیستم، شکل هندسی و در نتیجه ماتریس سختی عوض می‌شوند، همچنین نیروهای داخلی ایجاد شده در گام قبل نیز، روی پاسخ سیستم تأثیر خواهند گذاشت [۱۴].

در تحلیل دینامیکی، موده‌های سیستم از دو روش سعی و خطا و تکرار ماتریسی به دست می‌آیند. تحلیل دینامیکی با هر دو روش ترکیب مودی و انتگرال‌گیری مستقیم (شتاب متوسط) انجام شده است، ولی روش دوم به عنوان روش برتر مورد استفاده قرار گرفته است. در این روش ماتریس جرم و سختی و میرایی محاسبه شده و در خلال تحلیل ثابت منظور می‌شود تا تحلیل کامل شود [۱۵].

برای در نظر گرفتن آثار تغییر شکل‌های بزرگ در تحلیل دینامیکی نیز از روش نیوتن-رافسون

$${}^{i+1}u = {}^i k_c^{-1} {}^i \Delta P_c \quad (5)$$

$${}^{i+1}\dot{u} = \gamma ({}^{i+1}u - ({}^i u - {}^{i-1}u)) / \Delta t - {}^i \dot{u}$$

بعد از محاسبه مقدار جابه‌جایی و سرعت در انتهای گام همگرایی، گام میرایی وارد محاسبات می‌شود. برای حل فرض می‌شود که جابه‌جایی سیستم در یک ریزگام میرایی، کوچک است پس ماتریس سختی ثابت می‌ماند و همگرایی تاجایی ادامه می‌یابد که سرعت سازه در دو گام میرایی متوالی یکسان شود. قابل ذکر است که منظور کردن میرایی هیدرودینامیکی آثار چشمگیری در عملکرد سازه دارد. برای نمونه پاسخ‌های دینامیکی سکوی مورد بررسی (بعد از حذف هرگونه میراگر یا مخزن متحرک) که در بخش‌های بعد مطالعه شده است، در دو حالت مقایسه شده است. موج برخوردی، موجی مرتفع با ارتفاع ۱۱ متر و پریود ۱۰ ثانیه است تا جابه‌جایی تولید شده قابل ملاحظه باشد و عملکرد برنامه در همگرایی سیستم نمایان شود. با دقت در شکل ۲ مشخص است که جابه‌جایی سکو کاهش یافته و از طرفی عبور از فاز پاسخ‌های گذرا به پایدار تسریع شده است. به عبارتی دیگر دامنه پاسخ سازه با ورود آثار میرایی هیدرودینامیکی یکنواخت‌تر شده است.

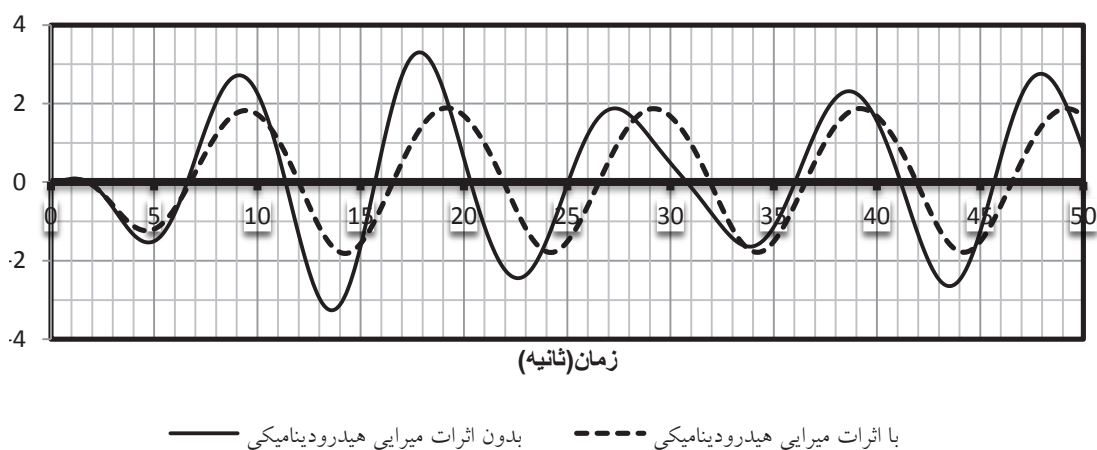
مقادیر این نیروها در هر گام و با استفاده از ریزگام‌های میرایی اصلاح می‌شود. ${}^i u$ معرف ماتریس جابه‌جایی در گام i ام است که در ابتدا برابر γ فرض می‌شود و سپس اصلاح خواهد شد. k نیز نشانگر سختی در گام مورد بررسی است که در اولین حدس برابر k فرض می‌شود و سپس با توجه به هندسه جدید اصلاح خواهد شد. (۴)

$${}^i k_c \cdot {}^{i+1}u = {}^i \Delta P_c$$

$${}^i k_c = {}^i k + \frac{\gamma c}{\Delta t} + \frac{\xi m}{\Delta t^2}$$

$${}^i \Delta P_c = {}^i \Delta P + m \left(\frac{\xi}{\Delta t^2} ({}^i u - {}^{i-1}u) + \frac{\xi}{\Delta t} {}^i \dot{u} + \ddot{v} \right) + c \left({}^i \dot{u} + \frac{\gamma}{\Delta t} ({}^i u - {}^{i-1}u) \right)$$

${}^i k_c$ & ${}^i \Delta P_c$ بیانگر ماتریس نیرویی و سختی معادل استاتیکی در گام i ام است. شایان ذکر است که در ابتدای گام ${}^i u = {}^{i-1}u = \gamma$ که با جایگزینی، معادله به شکل معروف معادله نیومارک-بتا تبدیل می‌شود.



شکل ۱: اثرات میرایی هیدرودینامیکی در پاسخ سکوی ثابت

۳- مدلسازی

در یک تقسیم بندی کلی، دو نوع مدل برای تحلیل به کار گرفته شده است:

- مدل سازه‌ای که در آن تمام المان‌ها به صورت المان‌های تیر دو نقطه‌ای با ۱۲ درجه آزادی منظور شده اند.

- مدلی که برای محاسبه نیروی موج ساخته شده که شامل المان‌های تیر سه بعدی و المان‌های صفحه ای دو بعدی است.

۳-۱- مدل سازه‌ای

برای بررسی عملکرد طرح پیشنهادی و چگونگی تاثیر مخزن شناور، مطالعه موردی روی یک سکوی فرضی ۴ پایه در عمق آب ۱۲۰ متری انجام شده است. برای بررسی عملکرد این سیستم از مدلسازی پیچیده سازه ای چشم‌پوشی شده است. جنس کلیه اعضا فولاد، با چگالی ۷۸۴۹ کیلوگرم بر متر مکعب و با مدول الاستیسیته 2×10^{11} نیوتن بر متر مربع منظور شده است.

دستگاه مختصات کلی سیستم، در تراز منطبق بر سطح آب و در مرکز سکو قرار گرفته به گونه‌ای که جهت X آن، در جهت موج قرار گیرد و محور Z نیز به سمت بالا باشد. بدیهی است که جهت Y ، از قانون دست راست، عمود بر صفحه و به سمت داخل به دست می‌آید.

دستگاه مختصات محلی نیز برای هر عضو به گونه‌ای است که جهت x در راستای عضو و از سمت ابتدا به انتهای آن باشد. از آنجا که اعضای استفاده شده لوله‌ای است، پس دو محور دیگر اهمیت چندانی ندارند و به وسیله برنامه انتخاب می‌شوند.

در مدلسازی، از آثار اندر کنشی شمع و خاک چشم‌پوشی شده پس اتصال سکو به بستر با در نظر گرفتن طولی از شمع در تراز ۱۲۶-، به صورت گیردار کامل منظور شده است. در شکل تصویر قاب سکو در دو جهت آورده شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود در زیر تراز ۶۰- کلیه مهاربندی‌ها حذف شده و فقط در سه تراز ۸۰-، ۱۰۰- و ۱۲۰-

بدین ترتیب چرخه یک گام پایان می‌یابد و گام بعدی آغاز می‌شود. بعد از همگرایی ماتریس سختی و صفر شدن نیروهای متوازن نشده، یک گام زمانی به پایان خواهد رسید.

تغییرات اعمال شده در این فرمولاسیون، فقط برای برنامه نویسی ساده‌تر است و تولید پاسخ جدیدی نمی‌کند.

این مطلب با مقایسه‌ی پاسخ‌های حاصل از هر دو روش بدون وجود اثر تغییر شکل‌های بزرگ ثابت شده است. این فرمولاسیون ترکیبی از فرمولاسیون نموی و صریح موجود در کتب مرجع است. دو نوع تحلیل در برنامه‌ی توسعه داده شده امکان پذیر است:

- تحلیل دینامیکی با منظور داشتن آثار « $\Delta - P$ » و تغییر شکل‌های بزرگ به همراه در نظر گرفتن آثار میرایی هیدرو دینامیکی و جرم افزوده و تعیین پاسخ سیستم، به همراه شکل و پریود ارتعاش هر یک از مودها.

- تحلیل شبه استاتیکی با زمان با در نظر گرفتن اثرات ثانویه « $\Delta - P$ » و تغییر شکل‌های بزرگ. لازم به ذکر است که کاربر می‌تواند، نوع تحلیل را در ابتدای کار مشخص کند و در صورت لزوم تحلیل دیگری را انجام دهد.

۴-۲- صحت سنجی

برای حصول اطمینان از عملکرد صحیح برنامه توسعه داده شده، مدل ساده‌ای که قابل تحلیل با نرم افزارهای در دسترس باشد، ساخته شد و نتایج خروجی حاصل از نرم افزار با نتایج خروجی حاصل از برنامه مقایسه شد تا اطمینان از صحت کارکرد برنامه حاصل شود. در این رابطه و برای مقایسه نتایج از دو نرم افزار SAP9,1 و SACS 5,2 استفاده شده است. با توجه به اختلاف اندک بین نتایج برنامه و نرم افزار، صحت برنامه نوشته شده، آشکار شده است.

روند و مثال‌های مورد استفاده برای صحت سنجی برنامه در مرجع [۱۶] به طور مفصل ارائه شده است.

مدل در دو حالت مورد آزمون قرار گرفته است:

- مخزن الحاقی با قطر ۱۰ متر و ارتفاع ۵ متر و با ضخامت ورق ۵ سانتیمتر، با سختی فنر اتصالی برابر ۲۲۰ کیلونیوتن بر متر برای هر فنر.

- میراگر جرمی با قطر ۳ متر و ارتفاع ۵ متر و با ضخامت ۳۰ سانتیمتر که جرمی معادل جرم مخزن خواهد داشت (۱۲۲ تن)، با سختی فنر اتصالی برابر ۹۰ کیلونیوتن بر متر برای هر فنر.

در این پژوهش، فقط جرم مخزن (میراگر جرمی) مورد نیاز است، پس مخزن (میراگر جرمی) صلب فرض می‌شود و از تغییر شکل در پوسته آن چشم‌پوشی می‌شود. در واقع در مدل سازه‌ای مخزن (میراگر جرمی) به صورت یک عضو لوله‌ای با ضخامت ۱۰ (۳۷،۵) سانتی‌متر و قطر ۱۰ (۳) متر مدل شده تا اثر جرم آن در مدل به درستی وارد شود.

در هر دو حالت، جرم مصالح به کار رفته یکسان است و تفاوت اصلی در اختلاف حجم مخزن و حجم میراگر است که عامل تولید جرم افزوده متفاوت و نیروی شناوری است.

۳-۲- مدل هیدرودینامیکی

بعد از ساخت مدل سازه‌ای و تعیین المان‌بندی، مدل هیدرودینامیکی ساخته شده است. در این مدل از المان‌بندی قبل استفاده شده ولی برای برآورد هرچه دقیق‌تر نیروی موج وارد بر المان‌ها، المان‌های سازه‌ای خود به ۵ تکه المان هیدرودینامیکی تقسیم شده‌اند، از سویی دیگر مخزن المان‌بندی شده تا بتوان نیروی موج وارد بر آن را پیدا کرد. آب تراکم ناپذیر با چگالی ۱۰۳۴ کیلوگرم بر مترمکعب منظور شده است. عمق آب ۱۲۰ متر، ارتفاع موج ۴ متر و پریود آن ۶ ثانیه فرض شده است، اعضای لوله‌ای صاف فرض شده‌اند و ضریب درگ و اینرسی قائم به ترتیب ۱،۰۵ و ۱،۶ و ضریب درگ مماسی برابر ۰ فرض شده است

۴- تحلیل سکوی مورد مطالعه

به منظور مطالعه عملکرد مخزن متحرک ابتدا حالتی مورد بررسی قرار می‌گیرد که در آن با انتخاب

از مهاربندهای افقی که به صورت کمر بند اعضا را به هم متصل کردند، استفاده شده است. بین ترازهای ۶۰- و ۱+، سکو با مهاربندی کافی مدل شده و با توجه به آنکه نیروی قائم وارده از سوی مخزن متحرک به سکو زیاد است، تعدادی مهار اضافی نیز در نقاط اتصال به سیستم اضافه شده است تا مکانیزم انتقال نیرو بهبود یابد. تمام اعضای به کار رفته لوله‌ای بوده و دارای ضخامت ۲ سانتیمتر است که برای پایه‌های اصلی، قطر اعضا ۱،۵ متر و برای مهاربندی‌ها ۱ متر انتخاب شده‌اند. طول اعضا بسته به مکان قرارگیری متفاوت است و هر عضو بین دو اتصال، یک المان منظور شده ولی برای پایه‌های اصلی که طول زیادی دارند، و با هدف بالا بردن دقت، هر عضو به ۱۰ المان تقسیم شده است.

عرشه به صورت یک تراز و در ارتفاع ۱۱+ واقع شده و اتصال آن به پایه‌ها به وسیله چهار پایه اصلی صورت گرفته است. در مدل‌سازی بارهای قائم عرشه، از ۴ جرم ۲۰۰ تن استفاده شده که در بالای پایه‌های اصلی (تراز ۱۱+) اعمال می‌شوند. کلیه اتصالات بین اعضای سازه‌ای گیردار کامل فرض شده و از آثار تغییر قطر المان در نقاط اتصال، چشم‌پوشی شده است.

درصد میرایی سازه‌ای در مقابل موج ۳٪ در موده‌های اول و ششم فرض شده است. باید توجه کرد که بین این دو مود، بیش از ۹۰٪ مشارکت جرمی وجود دارد. مخزن در دو حالت ثابت و متحرک قابل بررسی است. مخزن در عمق ۶۳،۵ متری قرار گرفته تا نیروی کمتری از سوی امواج به مخزن وارد شود. در حالت مخزن متحرک، اتصال مخزن به سکو توسط المان‌هایی که از برش آزاد شده‌اند، فراهم شده است. برای حفظ پایداری مخزن، از دو فنر خطی، که در طرفین مخزن قرار می‌گیرند، استفاده شده تا اتصال مخزن به سکو فراهم شود. سختی دو فنر مورد اشاره با فرایند سعی و خطا، برای بهینه سازی اختیار شده است.

باید توجه داشت که میرایی فنر اتصال مخزن یا به عبارتی میراگر جرمی مورد استفاده به سکو نیز در بهبود پاسخ‌ها تأثیر گذار است که در این مقاله بررسی نمی‌شود.

کاهش نوسانات سکو
- عملکرد نیروی شناوری میراگر که از نیروی وزن آن بیشتر است که می‌تواند اثر مثبت یا منفی داشته باشد.

برای بررسی اثر با هم این عملکرد دوگانه، نیاز به انجام تحلیل کامل با در نظر گرفتن اثر تغییر شکل‌های بزرگ انکار ناپذیر است. پس تحلیل استفاده شده یک تحلیل وقت‌گیر با منظور داشتن آثار تغییر شکل‌های بزرگ است. همچنین برای تکمیل کار، اثر مربوط به میرایی هیدرودینامیکی نیز در محاسبات وارد شده است.
پاسخ سکو برای شرایط زیر مدل مورد بررسی قرار گرفته است:

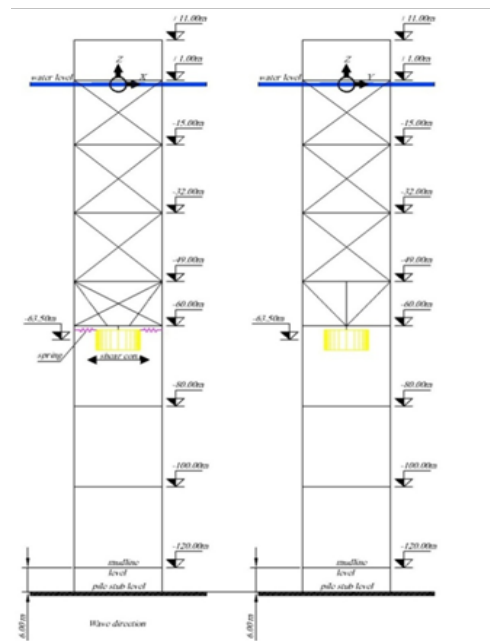
- سکوی فاقد مخزن و میراگر جرمی
- سکوی دارای میراگر جرمی
- سکوی دارای مخزن الحاقی متحرک

جرم سکو در حدود ۲۱۰۰ تن است پس این میراگر داری ۰,۰۶ از جرم سکو است. البته باید توجه داشت که جرم افزوده‌ی میراگر نیز عددی در حدود ۳۶,۵ تن را به خود اختصاص می‌دهد.

سختی فنرهای اتصال برابر ۹۰ کیلونیوتن بر متر فرض شده‌اند که در مجموع سختی جانبی ۱۸۰ کیلونیوتن بر متر را برای میراگر فراهم می‌آورند. اگر سازه‌ی مورد نظر به شکلی باشد که دوره‌ی ارتعاش اصلی آن در هر دو جهت نزدیک به هم باشد، در این صورت میراگر می‌تواند عملکرد مناسبی را در هر دو جهت از خود نشان دهد.

دوره‌ی ارتعاشات سکوی مورد بررسی و میراگر در جدول ۱ آمده است. اختلاف اصلی بین دوره‌های میراگر و مخزن متحرک در مود اول ارتعاش که مربوط به نوسانات آن دو است، روشن است. در واقع مخزن متحرک با توجه به داشتن جرم نوسان کننده بیشتر که ناشی از جرم افزوده آب است، پریود بزرگتری را در مود اول از خود بروز می‌دهد. عامل تاثیر گذار دیگر در تولید اختلاف بین سایر مودها، سختی فنرهای اتصال است. در واقع، آثار اندرکنشی بین مود اول با سایر مودهای هم راستا

مناسب سختی فنرهای اتصال، مخزن فقط به عنوان یک میراگر جرمی عمل می‌کند. در واقع مخزن با یک جرم جایگزین شده که داخل آب نیروی وزن آن از نیروی شناوری بیشتر است پس عملکرد مطرح به وسیله‌ی نیروی شناوری وجود ندارد.



شکل ۳: هندسه قاب‌های سکو

دو عملکرد زیر از این سیستم را انتظار داریم:

- عملکرد جرم میراگر در تولید نیروی اینرسی برای کاهش نوسانات سکو
- عملکرد نیروی وزن میراگر که از نیروی شناوری آن بیشتر است و پس با توجه به وجود اختلاف فاز در پاسخ سکو و میراگر تولید یک لنگر محرک می‌کند. در حالت دوم عملکرد مخزن با تلفیق دو عملکرد میراگری و شناوری برای کاهش پاسخ مورد بررسی گرفته است. جرم مخزن به همراه جرم افزوده‌ی آن مقدار بزرگی را به عنوان یک میراگر ایجاد می‌کند و پاسخ میراگر و سکو دارای اختلاف فاز است، پس دو عملکرد از این سیستم را انتظار داریم:
- عملکرد جرم میراگر در تولید نیروی اینرسی جهت

است، نیروی شناوری مخزن نیز لنگر بازگرداننده‌ای را ایجاد می‌کند. با هم سو شدن دو عامل فوق کارایی سیستم افزایش یافته و دامنه‌ی نوسانات سکو به میزان زیادی کاهش می‌یابد.

جدول ۱: مودهای مدل در حالت میراگر و مخزن متحرک

شماره مود	شرح	پریود (ثانیه)	
		میراگر	مخزن
		جرمی	متحرک
۱	نوسان مخزن/میراگر	۷٫۸۸	۸٫۳۱
۲	نوسان سکو در راستای عمود بر موج	۷٫۷۴	۸٫۰۰
۳	نوسان سکو در راستای موج	۵٫۵۲	۵٫۲۰
۴	پیچش سکو	۴٫۸۸	۴٫۸۹
۵	نوسان مرتبه دوم سکو در راستای عمود بر موج	۱٫۲۳	۱٫۳۰
۶	نوسان مرتبه دوم سکو در راستای موج	۱٫۱۷	۱٫۱۷

با مقایسه میزان جابه‌جایی مخزن متحرک و میراگر جرمی از شکل ۶ مشخص است که مخزن متحرک قابلیت بهتری را در میراگردن حرکات سکو را در آغاز ارتعاش دارد. از طرفی با جابه‌جایی‌های کمتر عملکرد بهتری را از خود نشان می‌دهد. پس هم جرم افزوده اضافی و هم نیروی شناوری موجود در مخزن در کاهش نوسانات سکو مشارکت می‌کنند.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش یک سیستم ترکیبی سکو و مخزن برای کاهش پاسخ سکوه‌های دریایی پیشنهاد و مورد بررسی قرار گرفته‌است. سیستم پیشنهاد شده در پژوهش حاضر به واقع شبیه سیستم‌های کنترل نیمه فعال است، ولی این کنترل به وسیله‌ی نیروهای طبیعت انجام می‌گیرد؛ یعنی مخزن در جهتی حرکت می‌کند که طبیعت به آن القاء می‌کند ولی اثر آن روی سکو خلاف نیروهای طبیعی است.

با افزایش جرم نوسان‌گر کاهش خواهد یافت. با توجه به این مطلب کاهش پریود ارتعاش سازه در مود سوم مشخص می‌شود. شایان ذکر است که مخزن و میراگر در جهت عمود بر موج آزادی حرکت جانبی ندارند، لذا پریودهای به دست آمده از سیستمی که دارای مخزن متحرک با جرم افزوده بیشتری است در این راستا (مودهای ۲ و ۵) بالاتر خواهد بود.

شکل شماتیک مودهای ارتعاش مخزن و سکو که حاصل از نرم‌افزار توسعه داده شده است برای توجه بیشتر در شکل ۴ آورده شده‌است. شکل پاسخ عرشه‌ی سکو و پاسخ میراگر به ترتیب در شکل ۵ و شکل ۶ آورده شده است.

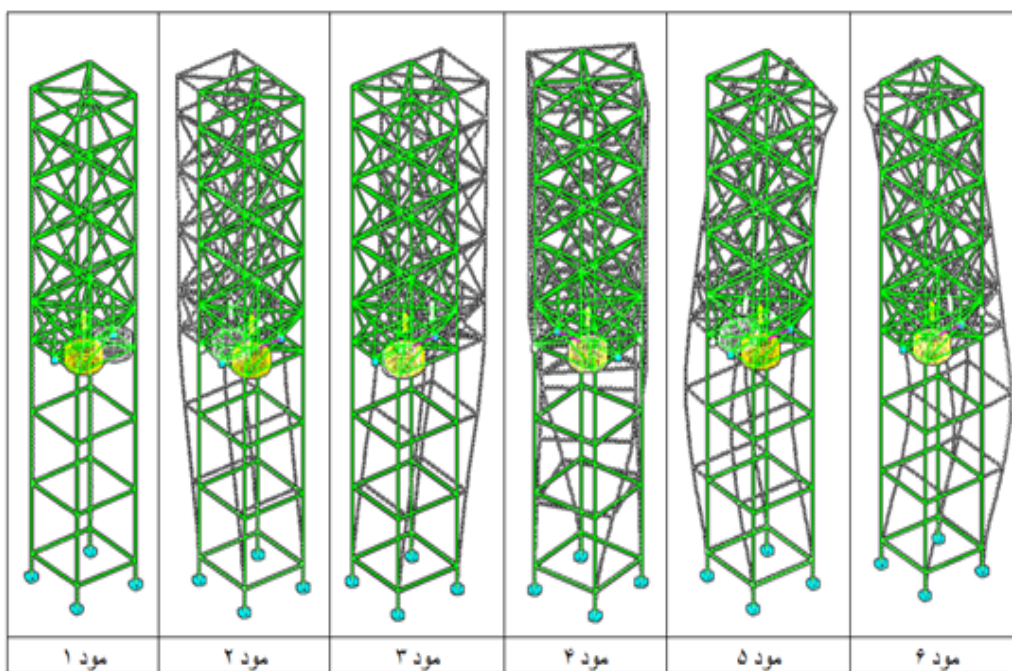
با دقت در تغییرات پاسخ عرشه سکو در شکل ۵ مشخص است که میراگر عملکرد مناسب‌تری را در پاسخ حالت پایا از خود نشان می‌دهد به گونه‌ای که بیشینه‌ی پاسخ عرشه را با حدود ۱۶ سانتی‌متر کاهش محدود کرده‌است. در واقع میراگر در مرحله پایا، عملکرد یکنواختی در حدود ۴۵ تا ۵۵ درصد از خود نشان می‌دهد.

نکته قابل توجه دیگر میزان کاهش ۳ سانتی‌متری پاسخ (معادل ۸ درصد در اولین اوج) است که بیانگر نیازمندی میراگر به فعال شدن برای کاهش دامنه پاسخ است.

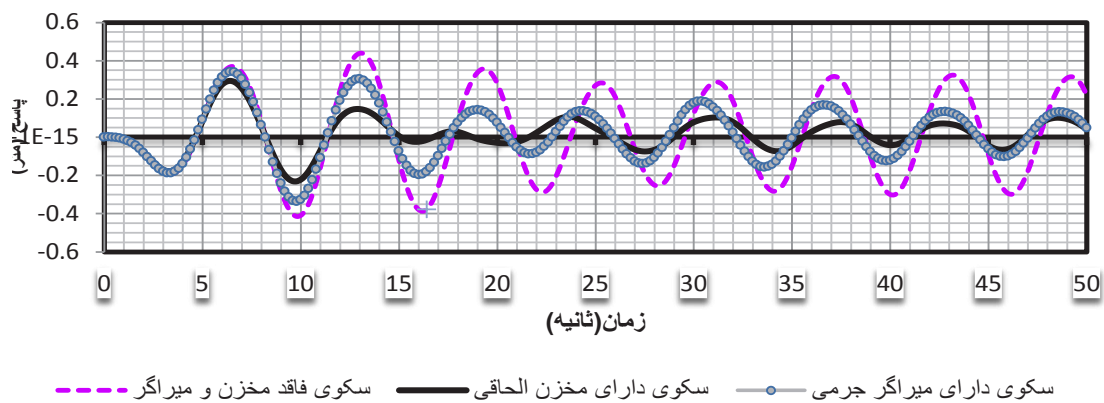
از طرفی بیشینه‌ی عملکرد میراگر در ثانیه ۱۹م رخ می‌دهد به گونه‌ای که میراگر به صورت موقتی دامنه پاسخ را ۶۱ درصد کاهش خواهد داد. میزان کاهش دامنه‌ی پاسخ در حالت بیشینه، مقداری است که در بیشتر مقالات مربوط به میراگرهای جرمی ذکر می‌شود.

میزان مورد انتظار کاهش دامنه‌ی پاسخ به وسیله‌ی یک میراگر جرمی، عددی بین ۱۵ تا ۲۵ درصد است که طرح داده شده در این مقاله نیز از همین روند پیروی می‌کند.

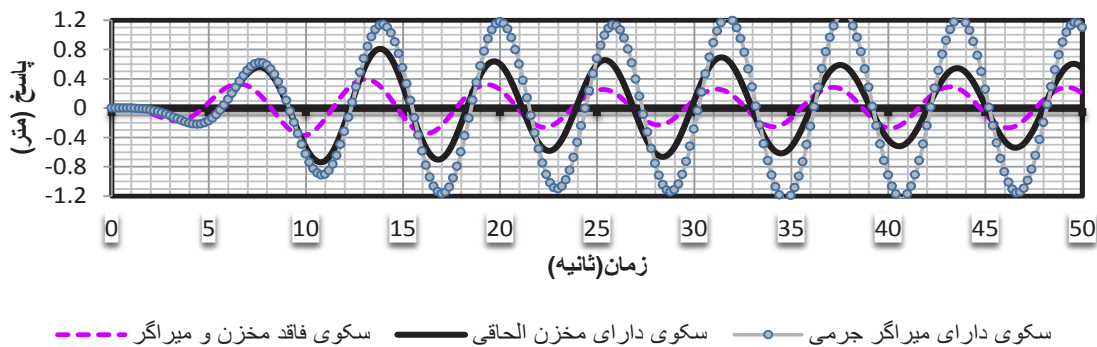
نکته‌ی قابل توجه دیگر اختلاف اندک فاز بین پاسخ مخزن و عرشه‌ی سکو است. در واقع مخزن اندکی دیرتر از سکو به مقادیر بیشینه پاسخ خود می‌رسد و پس نیروی اینرسی آن، حرکات سکو را کاهش می‌دهد، از طرفی چون اختلاف فازها کم



شکل ۴: مودهای ارتعاش سکوی دارای مخزن متحرک



شکل ۵: پاسخ دینامیکی عرشه سیستم در سه حالت مدل‌سازی شده



شکل ۶: پاسخ دینامیکی مخزن با میراگر الحاقی در سه حالت مدل‌سازی شده

- [6] Frahm, H., 1909, "Device for damping vibrations of bodies", US patent #989958, Oct. 30.
- [7] Ormondroyd, J. and Den Hartog, J. P., 1928, "The theory of dynamic vibration absorber", Trans. ASME, APM50-7,9-22.
- [8] Den Hartog, J. P., 1956, "Mechanical Vibration", McGraw-Hill, New York.
- [9] Bishop, R. E. D., Welbourn, D. B., 1952, "The Problem of the Dynamic Vibration Absorber" Engineering, Lond. ,174,769.
- [10] Falcon, K. C., Stone, B. J., Simcock, W. D. and Andrew, C., 1967, "Optimization of vibration absorbers: a graphical method for use on idealized systems with restricted damping", J. Mech. Engng. Sci, 9, 374-381
- [11] Randall, S. E., Halsted, D. M. and Taylor, D. L., 1981, "Optimum vibration absorbers for linear damped systems" , J. Mech. Des. ASME, 103, 908-913
- [12] Sarpkaya, T., Isaacson, M., Mechanics Of Wave Force on offshore structures. 1981.
- [13] Sorensen, Robert.M., Basic Wave Mechanics, John Wiley & sons, Inc. 1993.
- [14] Bathe, Klaus-jurgen. Finite Element Procedures. Prentice Hall of India, 2005.
- [15] Clough, Ray. W., and Penzien, Joseph., Dynamics of Structures. McGRAW-HILL, 1982.

[۱۶] محرمی.م. «تحلیل سکوی ثابت دارای مخازن شناور اضافی» پایان نامه کارشناسی ارشد دانشگاه تربیت مدرس، بخش عمران ۱۳۸۷.

با انجام تحلیل‌های دینامیکی مشخص شد که مخزن در مقابل امواج رفتاری شبیه یک میراگر جرمی از خود نشان می‌دهد. در این حالت جرم افزوده‌ی مخزن نیز در تولید نیروی اینرسی مشارکت می‌کند، پس اینرسی زیادی تولید می‌شود. نتایج بررسی‌های انجام شده روی سیستم پیشنهادی نشانگر آن است که کارایی مخزن با عملکرد دوگانه بیشتر از کارایی یک میراگر تنها است؛ این درحالی است که حتی میراگر جابه‌جایی‌های به مراتب بزرگتری را نسبت به مخزن تجربه کرده‌است.

۵- مراجع

- [1] Chandrasekaran, S., Jain, A.K., 2002, "Dynamic behaviour of square and triangular offshore tension leg platforms under regular wave loads". Ocean Engineering 29, 279-313.
- [2] Sreekumar, S., Bhattacharyya, S.K., Idichandy, V.G., 2001a. "Coupled dynamics of SeaStar mini tension leg platform using linear diffraction-radiation theory". Offshore Mechanics and Arctic Engineering Conf (OMAE '01) 1074.
- [3] Lee, H.H., Wong, S.-H., Lee, R.-S., 2006, "Response mitigation on the offshore floating platform system with tuned liquid column damper", Ocean Engineering 33, 1118-1142.
- [4] Patil, K.C., Jangid, R.S., 2005, "Passive control of offshore jacket platforms" . Ocean Engineering 32, 1933-1949.
- [۵] محرمی گرگری، م.ر.، شفیع‌فر، م.، آفاکوچک، ع.ا. «عملکرد لنگر تولیدی حاصل از مخزن مستغرق متحرک در کاهش دامنه پاسخ سکوی ثابت برجی» مهندسی دریا، شماره ۶ ص ۵۷-۷۲ پاییز و زمستان ۱۳۸۹.