

عملکرد لنگر تولیدی حاصل از مخزن مستغرق متحرک در کاهش دامنه پاسخ سکوی ثابت برجی

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

۱- کارشناسی ارشد، دانشکده فنی، دانشگاه تربیت مدرس

۲- دانشیار، دانشکده فنی، دانشگاه تربیت مدرس

۳- استاد، دانشکده فنی، دانشگاه تربیت مدرس

چکیده

در مقاله حاضر، یک طرح جدید و ابتکاری جهت کاهش پاسخ سکوهای ثابت دریایی با به کارگیری یک مخزن متحرک مستغرق مورد بررسی قرار گرفته است. این طرح شامل سکویی چهارپایه می باشد که مهاربندهای آن در قسمت تحتانی حذف شده و مخزن مستغرق متحرکی که دارای نیروی شناوری است، به آن افزوده شده است. ایجاد نیروی کششی متغیر وابسته به پاسخ مخزن در پایه ها به همراه لنگر بازگرداننده خارجی، الگوی توزیع بار داخلی را تغییر داده و موجب ایجاد سختی افزوده وابسته به زمان شده است. فرایند تحلیل استاتیکی با در نظر گرفتن اثرات غیر خطی هندسی و تغییر شکل های بزرگ انجام گرفته که برای این منظور، از برنامه ای مفصل که در محیط متلب^۱ توسعه داده شده، استفاده شده است. با انجام تحلیل های استاتیکی مشخص شد که مخزن با حرکت خود، لنگر بازگرداننده ای تولید می کند که موجب کاهش دامنه پاسخ سکو می گردد. میزان لنگر تولیدی به حجم مخزن و دامنه نوسان آن وابسته است که می تواند به درستی انتخاب گردند. البته این مطلب زمانی می تواند مفید باشد که مخزن به عمقی مناسب برده شود تا از نیروی امواج در امان باشد. شایان ذکر است که استفاده از مخزن مستغرق متحرک در سکوهای نرم تر مناسب تر است یا به عبارت دیگر با افزایش عمق آب قرارگیری سکو عملکرد سیستم بهبود می یابد.

کلمات کلیدی: سکوی ثابت، مخزن مستغرق متحرک، عملکرد شناوری، کاهش پاسخ

PERFORMANCE OF AN OSCILLATING SUBMERGED TANK IN RESPONSE REDUCTION OF FIXED OFFSHORE PLATFORMS

M.R. Moharrami Gargari¹, M. Shafieefar², A.A. Aghakouchak³

1- Research Fellow, Civil Engineering Department, Tarbiat Modares University

2- Associate Professor, Civil Engineering Department, Tarbiat Modares University

3- Professor, Civil Engineering Department, Tarbiat Modares University

Abstract

In this paper, a concept is presented for decreasing the response amplitude of fixed offshore platforms using a movable submerged tank. The idea is based on utilization of the tank's buoyancy and inertia forces to reduce the responses of the platform. In this concept, a four-legged platform is investigated in which braces are removed in lower levels, and the movable submerged tank including substantial amount of buoyancy force is added. As a result of the tank oscillation, the upward buoyancy force causes a reversible moment which depends on the tank

¹ MATLAB

* نویسنده مسئول مقاله shafiee@modares.ac.ir

position and time. Actually, tank movement changes the internal forces distribution pattern that could produce time dependent stiffness. The non-linear and large displacement effects are considered in the static analyses using a program developed by employing MATLAB software. Results of static analyses indicate the tank efficacy in decreasing the displacement amplitude of the platform. The performance of the concept can be improved by taking an appropriate volume and oscillation amplitude for the tank. It is noteworthy that the tank should be placed in enough proper depth for preventing any uncontrollable wave loads; additionally, results show that the tank usage in less stiffened platform could be more efficient, in other word, the tank efficiency will be increased by depth magnification.

Keywords: Fixed offshore platforms, Oscillating tank, Buoyancy action, Response reduction

۱- مقدمه

کم کردن امکان کمانش پایه‌های سکو، استفاده از مخازن مستغرق ثابت در سکوه‌ای تطبیقی و برقی رواج داشته- است، ولی برای کاهش نیروی موج، مخازن در اعماق زیادی قرار می‌گرفتند.

با ترکیب دو سیستم مذکور، تصمیم بر آن شد که سکویی ثابت که مهارنده‌های آن در قسمت تحتانی حذف شده‌اند و پایه‌های آن توسط مخازنی تحت کشش قرار گرفته‌اند، بررسی شود. این طرح به واقع، مشابه سکویی پایه کششی است که در پایه‌ها به جای کابل، از لوله استفاده شده‌است. تصویر شماتیکی از سیستم در شکل ۱- الف آورده شده- است.

مشکل اصلی این طرح، حجم زیاد مخزن مورد نیاز می‌باشد. با انجام آنالیزهای سازه‌ای مشخص شد که وجود مخازن بزرگ باعث اعمال نیروی بزرگتری از سوی موج به سکو می‌گردد و لذا پاسخ‌های سیستم افزایش خواهد یافت. بدین ترتیب سکو به سمت سکوی پایه کششی میل می‌کند و اثر سختی افزوده ناشی از کشش ناچیز می‌گردد تا نهایتاً ماهیت طرح زیر سوال رود.

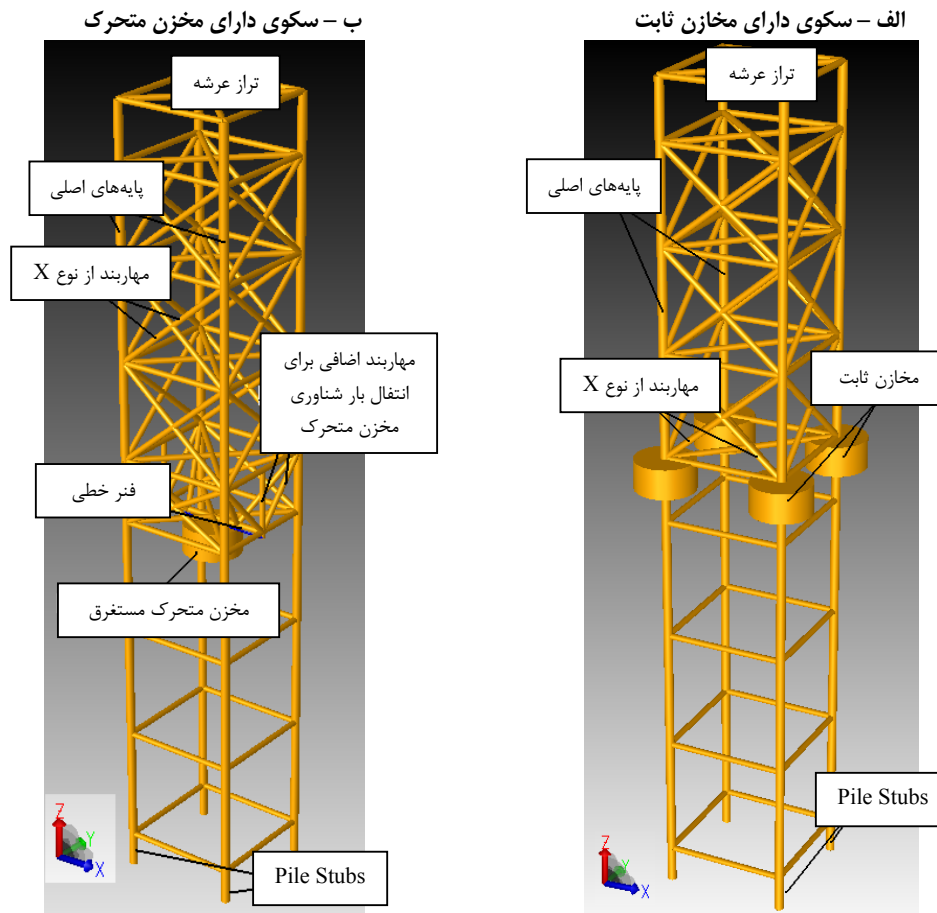
با تأمل بیشتر در طرح ارائه شده، تصمیم بر آن شد که به جای استفاده از مخازن ثابت مستغرق متصل به سکو، از مخزن متحرکی که با اتصال برشی و با دو فنر خطی به سکو متصل است، استفاده شود. طرح جدید باعث شکل‌گیری نیروی جدیدی شد به گونه‌ای که به هنگام اعمال نیروی موج به مخزن، جابجایی مخزن بیشتر از پاسخ سکو گردید و لذا لنگر بازگرداننده‌ای که ناشی از خروج از مرکزیت نیروی شناوری مخزن بود، به سکو اعمال گشت. این لنگر شرایط تغییر الگوی توزیع بار کششی در پایه‌های سکو را فراهم آورد و جابجایی سیستم را کاهش داد.

با توجه به پیشرفت‌های روز افزون تکنولوژی در اجرا و ساخت سکوه‌ای دریایی و برای دستیابی به اهدافی چون کاهش هزینه‌های ساخت و نگهداری، کاهش زمان ساخت و بهره‌برداری، کاهش جابجایی‌های سکو و افزایش سلامت سکو، نیاز به ارائه طرح‌های نوین افزایش یافته‌است. از این رو جهت کاهش نوسانات دائمی سکوه‌ای در معرض امواج، ارائه طرح‌هایی با عملکرد آئرودینامیکی بیشتر [۱]، افزودن مهار برای بالابردن سختی سازه‌ای [۲]، یا استفاده از میراگرهای فعال [۳] و غیر فعال [۴]، جهت نیل به اهداف مورد اشاره، رواج یافته است.

با مطالعه در مورد طرح‌های جدید ارائه شده برای سکوه‌ای دریایی، ایده‌ای جدید به نظر رسید. این طرح با هدف استفاده از نیروی شناوری به عنوان نیرویی کمک‌گر ارائه شد که حاصل از تلفیق سیستم بکار رفته در سکوه‌ای پایه کششی و برقی است.

در سکوه‌ای پایه کششی، نیروی شناوری عامل ایجاد کشش در کابل‌ها می‌باشد. با تغییر مکان جانبی سکو، جهت نیروی کششی تغییر کرده و عامل بازگرداننده‌ای ایجاد می‌شود که سکو را به حالت اول باز می‌گرداند. میزان سختی افزوده تولیدی، وابسته به جابجایی سکو و مقدار نیروی شناوری متغیر (تغییر حجم داخل آب جسم در اثر حرکت جانبی و موج برخوردی) است.

جهت حفاری در رودخانه‌های خروشان و یا آب‌های عمیق، رایزر حفاری را تحت کشش قرار می‌دهند که این کار باعث ایجاد سختی اضافی وابسته به نیروی کششی در سیستم خواهد شد و نوسانات دائمی رایزر را کاهش خواهد داد. لازم به ذکر است که در گذشته برای کاهش انتقال وزن بخش‌های بالایی سکو به پایه‌ها و یا به عبارتی



شکل ۱- تصویری شماتیک از طرح اولیه سکو و طرح بهینه

(۱) محاسبه نیروی موج وارد بر سازه با در نظر گرفتن ترکیبی از فرمولاسیون موریسون و فرود کرلیف
(۲) در نظر گرفتن اثرات اندرکنشی موج و سازه
(۳) روش حل غیر خطی سیستم با منظور داشتن اثر تغییر شکل‌های بزرگ

نرم افزار SAP قابلیت در نظر گرفتن اثرات تغییر شکل‌های بزرگ را دارا است ولی قابلیت محاسبه نیروی موج وارد بر اعضای حجیم را ندارد. از سویی نرم افزار SACS نیز بیشتر برای مقاصد طراحی سکوهایی شابلونی معمول توسعه یافته‌است و توانایی در نظر گرفتن تغییر شکل‌های بزرگ را ندارد، پس برنامه مورد نیاز باید ترکیبی از قابلیت‌های هر دو نرم‌افزار را دارا باشد.

جهت مدل سازی و تحلیل، از نرم‌افزارهای در دسترس سازه‌ای^۱ و دریایی^۲ استفاده شد، ولیکن به علت ضعف برنامه‌های مذکور در مدل سازی و تولید نتایج غلط و همچنین عدم امکان دستیابی به هسته مرکزی نرم افزارها، تصمیم بر آن شد تا کد مورد نیاز در یک محیط برنامه نویسی توسعه داده شود تا عملکرد برنامه و نتایج خروجی آن لحظه به لحظه مورد بررسی قرار گیرد. محیط متلب، محیطی ساده و در عین حال پیشرفته می‌باشد، لذا جهت ادامه کار، برنامه‌ای در محیط این نرم‌افزار تدوین شد. در واقع برای حل چنین مسئله‌ای، برنامه‌ای نیاز است که توانایی‌های زیر را نیز دارا باشد:

^۱ SAP
^۲ SACS

۲- مبانی زیربنایی

در این بخش، اشاره‌ای مختصر راجع به مبانی و تئوری‌های بکار رفته در تحلیل سیستم ترکیبی می‌شود. این تئوری‌ها به دو بخش تئوری‌های هیدرودینامیکی و تئوری‌های سازه‌ای قابل تقسیم هستند که در ادامه به آن‌ها پرداخته می‌شود.

۲-۱- مبانی هیدرودینامیکی

مبانی هیدرودینامیکی، خود به دو زیر گروه کوچکتر قابل تقسیم است:

- تئوری‌های محاسبه پارامترهای موج
 - تئوری‌های محاسبه نیروی موج وارد بر سازه
- در محاسبه پارامترهای موج، تئوری استوکس مرتبه ۵ به عنوان روش برتر انتخاب شده‌است که برای آب‌های عمیق مناسب تر از سایر تئوری‌ها می‌باشد و قابلیت مدل سازی تیزی امواج را نیز دارا است [۵].
- در محاسبه نیروی موج وارد بر اعضا، دو روش استفاده شده است:
- برای اعضای لاغر فرمول موريسون به کار گرفته شده، بدین ترتیب که با محاسبه سرعت ذرات آب و تبدیل آن به سرعت عمود بر المان و نهایتاً ضرب آن در سطح تصویر، و با بدست آوردن شتاب ذرات آب در مرکز هر المان و ضرب آن در حجم المان، به ترتیب نیروی درگ و اینرسی عمود بر المان محاسبه شده‌است.

- برای مخازن (با توجه به آن که نسبت قطر مخزن به طول موج کمتر از ۱ است) تئوری فرود-کرلیف با هدف افزایش دقت و همچنین مقایسه مقدار آن با ترم فشار دینامیک ارائه شده توسط رابطه موريسون، بهره گرفته شده، به نحوی که فشار کلی موجود در مرکز هر مش محاسبه شده و با ضرب آن در مساحت مش، نیروی عمود وارد بر هر مش حاصل گشته است. این نیرو به واقع معادل ترم اینرسی رابطه موريسون می‌باشد و با ضریب ۲ وارد محاسبات می‌شود تا اثرات مربوط به جرم افزوده را نیز در نیروها منظور کند، لذا ترم درگ نیز به‌طور جداگانه از رابطه مورد محاسبه قرار گرفته است. شایان ذکر است که تأثیر این

ترم، با حجم شدن مخزن، نسبت به ترم اینرسی کاهش می‌یابد [۶].

۲-۲- مبانی سازه‌ای

مبانی سازه‌ای در دو بخش مورد بررسی می‌باشند.

۲-۲-۱- مشخصات سازه

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 [۷] و با انتگرال‌گیری در طول المان محاسبه شده و با توجه به محورهای مختصات محلی هر عضو از طریق محاسبه ماتریس‌های انتقال به سیستم مختصات کلی منتقل شده و در نهایت ماتریس‌های مشخصات سازه‌ای تشکیل شده‌اند. ماتریس میرایی به صورت ترکیب خطی از ماتریس‌های سختی و جرم (فرض رایلی) در نظر گرفته شده است [۸].

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، با توجه به پاسخ‌های سیستم در گام پیشین، محاسبه شده‌است. در آنالیزهای تغییر شکل‌های بزرگ و $P-\Delta$ ، ماتریس سختی نیز، با توجه به نتایج پاسخ در گام قبل، اصلاح شده‌است.

۲-۲-۲- روش حل

با توجه به قابلیت‌های نرم‌افزار توسعه داده شده، دو نوع آنالیز برای سیستم مورد بررسی امکان پذیر است:

- آنالیز استاتیکی
- آنالیز دینامیکی

آنالیز استاتیکی این سیستم به صورت نموی و گام به گام صورت گرفته به نحوی که در ابتدای هر گام زمانی با وارون کردن ماتریس سختی مربوط به ابتدای گام و ضرب آن در ماتریس نیرویی، پاسخ سیستم حاصل شده‌است. برای در نظر گرفتن اثر تغییر شکل‌های بزرگ، از روش نیوتن-رافسون استفاده شده‌است. در

واقع با بوجود آمدن تغییر شکل‌های بزرگ در سیستم، شکل هندسی و در نتیجه ماتریس سختی کاملاً عوض می‌شوند، همچنین نیروهای داخلی ایجاد شده در گام قبل نیز، روی پاسخ سیستم تأثیر خواهند گذاشت [۷]. در آنالیز دینامیکی، مودهای سیستم از دو روش سعی و خطا و تکرار ماتریسی بدست آمدند، که پاسخ‌هایی کاملاً مشابه حاصل شده‌است. این مطلب حاکی از عملکرد صحیح برنامه می‌باشد. ولی در نهایت روش دوم به عنوان روش کارآمدتر برگزیده شده است.

آنالیز دینامیکی با هر دو روش ترکیب مودی و انتگرال‌گیری مستقیم (شتاب متوسط) انجام شده است، ولی روش دوم به عنوان روش برتر برگزیده شده‌است. در این روش ماتریس جرم و سختی و میرایی محاسبه شده و در خلال آنالیز ثابت منظور می‌گردند تا آنالیز کامل گردد [۸].

با توجه به آنکه، سیستم فوق شامل مخزنی است که آزادی حرکت جانبی دارد و همچنین در نظر گرفتن اثر حرکت بار قائم ناشی از انتقال مخزن در پاسخ‌ها مؤثر است، لذا انجام آنالیز غیرخطی هندسی با منظور داشتن اثر تغییر شکل‌های بزرگ و $P-\Delta$ ، اجتناب ناپذیر می‌باشد.

۳- برنامه نویسی

همان گونه که در بخش‌های قبل گفته شد، با توجه به ضعف نرم‌افزارهای موجود، برنامه‌ای در محیط متلب توسعه داده شد که قابلیت آنالیز سیستم ترکیبی را دارا باشد.

انجام دو نوع آنالیز در برنامه توسعه داده شده میسر است:

- آنالیز استاتیکی با زمان با در نظر گرفتن اثرات ثانویه $P-\Delta$ و تغییر شکل‌های بزرگ که در مقاله حاضر جهت بررسی عملکرد مخزن مورد استفاده واقع شده‌است.
- آنالیز دینامیکی با منظور داشتن اثرات $P-\Delta$ و تغییر شکل‌های بزرگ به همراه در نظر گرفتن اثرات میرایی هیدرو دینامیکی و جرم افزوده و تعیین پاسخ

سیستم، به همراه شکل و پیوند ارتعاش هر یک از مودها که در ادامه مورد صحت سنجی قرار گرفته‌است. لازم به ذکر است که کاربر می‌تواند، نوع آنالیز را در ابتدای کار مشخص کند و در صورت لزوم آنالیز دیگری را انجام دهد (مثلاً آنالیز استاتیکی معمولی).

۳-۱- 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. نتایج خروجی حاصل از نرم افزار با نتایج خروجی حاصل از برنامه مقایسه شده تا اطمینان از صحت کارکرد برنامه حاصل گردد. با توجه به اختلاف اندک بین نتایج برنامه و نرم‌افزارها، صحت برنامه نوشته شده آشکار شده‌است. شایان ذکر است که فرایند مقایسه در پارامترهای ممکن و اساسی صورت گرفته‌است، لذا می‌توان از عملکرد برنامه در حالت‌های ترکیبی اطمینان حاصل کرد. به عنوان نمونه در برخی موارد جابجایی معیار صحت سنجی قرار گرفته، لذا نتایج تغییر مکان چهار نقطه که در گوشه‌های سازه و در تراز ۱+ قرار داشتند (شکل ۲)، مورد مقایسه قرار گرفته‌اند.

برای مقایسه نتایج، از دو نرم افزار SAP 9.1 جهت انجام آنالیزهای سازه‌ای و SACS 5.2 برای اعمال بارهای خارجی ناشی از موج استفاده شد. چهار حالت بارگذاری مورد بررسی قرار گرفت:

(۱) بارگذاری استاتیکی

(۲) بارگذاری دینامیکی

(۳) اثرات بارهای قائم

(۴) بارگذاری موج

مدل یک سکوی ۴ پایه می‌باشد که قطر پایه های اصلی آن ۱/۵ متر و ضخامت جداره لوله تشکیل دهنده ۲ سانتیمتر است. تمامی مهاربندها دارای قطر ۵/۸ متر و ضخامت ۲ سانتیمتر می‌باشند. از مدل سازی شمع درون اعضای جکت صرف نظر شده و در انتها طولی برابر ۶ متر به پایه‌ها اضافه شده و سیستم را به کف به شکل گیردار متصل کرده‌است. دستگاه مختصات در سطح آب واقع شده به نحوی که محور X در راستای

اعمال شده است. با انجام آنالیز توسط برنامه و نرم افزار، میزان جابجایی نقاط مورد بررسی بدست آمده و نتایج خروجی از نرم افزار و برنامه در شکل ۲ آورده شده است.

برای مقایسه دقیقتر جابجایی‌های چهارنقطه مورد نظر، در راستای نیرو، بر حسب متر، به همراه درصد خطا در جدول ۱ آورده شده است. همان گونه که از جدول پیداست حداکثر خطا برابر ۳/۵٪ می باشد که قابل قبول است.

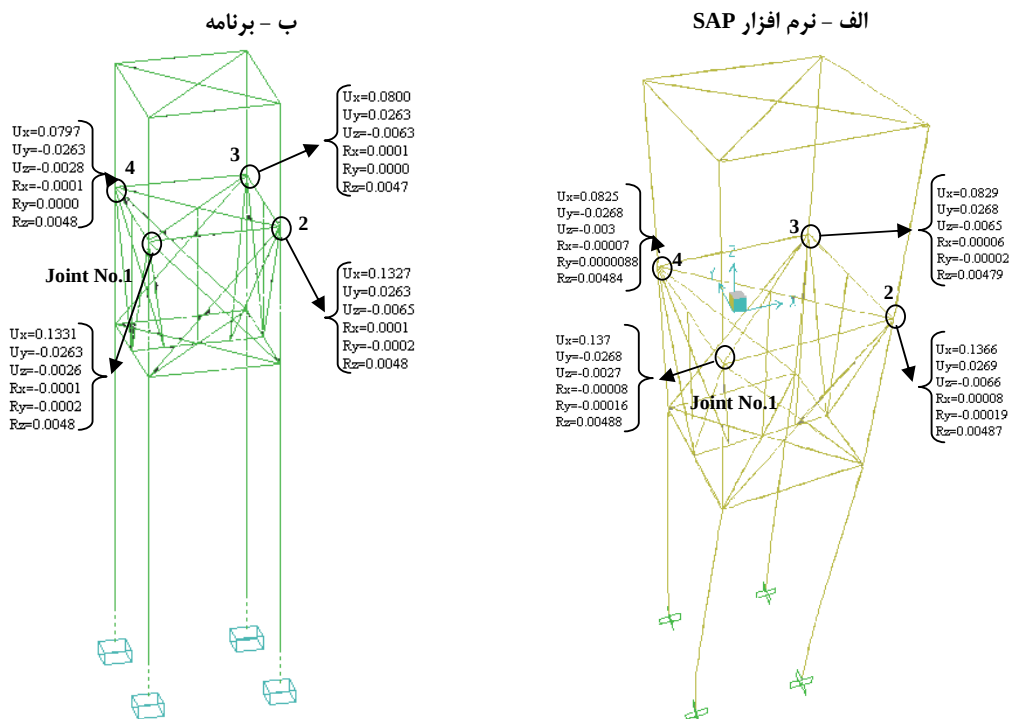
نیرو باشد (شکل ۲). تراز بستر در ۳۰- متر قرار گرفته و انتهای پایه‌ها در ۳۶- متر واقع شده است. عرشه به عنوان یک تراز در ۱۱+ متر قرار گرفته و چهار جرم نقطه ای به مقدار ۲۰۰ تن در گوشه‌های عرشه و روی پایه‌ها قرار داده شده است. سیستم مهاربندی در دو جهت متفاوت است تا این اختلاف نیز در سختی جکت بررسی گردد.

۳-۱-۱- بارگذاری استاتیکی

برای بررسی پاسخ ها و مقایسه نتایج، از نرم افزار SAP استفاده شده و بار استاتیکی ۱۰۰ تن در نقطه‌ای به مختصات (۱، ۵، -۵) و در جهت X به سازه سکو

جدول ۱- نتایج تغییر مکان استاتیکی چهار نقطه مورد بررسی در جهت نیرو

شماره نقطه	نتایج برنامه (متر)	نتایج SAP (متر)	اختلاف (متر)	درصد خطا %
۱	۰/۱۳۳۱	۰/۱۳۷۰	۰/۰۰۳۹	۲/۸
۲	۰/۱۳۲۷	۰/۱۳۶۶	۰/۰۰۳۹	۲/۸
۳	۰/۰۸۰۰	۰/۰۸۲۹	۰/۰۰۲۹	۳/۵
۴	۰/۰۷۹۷	۰/۰۸۲۵	۰/۰۰۲۸	۳/۴



۳-۱-۲- بار گذاری دینامیکی

برای بررسی پاسخ‌های حاصل از بارگذاری دینامیکی، یک بار سینوسی با دامنه ۱۰۰ تن و پریود ۱۱ ثانیه در نقطه‌ای مشابه با بارگذاری استاتیکی به سکو اعمال شد. در این بخش نیز از نرم افزار SAP برای مقایسه استفاده شده است.

برای صحت سنجی ابتدا شکل مودهای حاصله از نرم‌افزار با مودهای حاصل از برنامه مقایسه شدند که از تطابق کاملی برخوردار بودند. سپس مقدار عددی پریودهای حاصل مورد بررسی قرار گرفتند که نتایج مربوط به ۳ مود اصلی ارتعاش در جدول ۲ آورده شده‌اند. جدول ۲ حاکی از خطای ۲/۲٪ در پریود مودهای حاصله می‌باشد، که قابل قبول است.

در مرحله بعدی نتایج پاسخ چهار نقطه مورد نظر بر حسب تاریخچه زمانی در ۱۰۰ ثانیه اول ارتعاش با هم

مقایسه شدند. نتایج برای نقطه ۱ به عنوان نمونه در شکل ۳ آورده شده‌است که تطابق بسیار خوب نتایج را نشان می‌دهد.

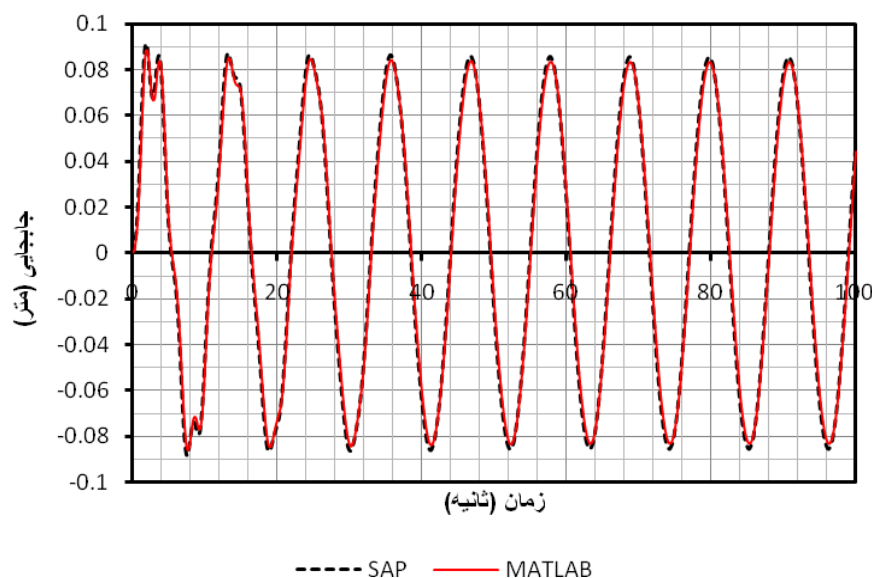
۳-۱-۳- اثر بارهای قائم

برای این منظور از مدل موجود در آنالیز استاتیکی استفاده شده‌است. مقادیر جابجایی چهار نقطه مورد بررسی در راستای x از برنامه و نرم افزار SAP در جدول آورده شده‌است که حاصل از انجام آنالیز استاتیکی با فرض وجود تغییر شکل‌های بزرگ است.

همان‌گونه که از جدول پیدا است، حداکثر خطا در حدود ۱٪ است که قابل قبول می‌باشد، همچنین مشخص است که با در نظر گرفتن اثرات $P-\Delta$ و تغییر شکل‌های بزرگ، پاسخ سیستم در اثر ایجاد لنگرهای ثانویه ناشی از تغییر شکل کلی سازه افزایش می‌یابد.

جدول ۲- پریودهای حاصله برای مدل صحت سنجی

شماره مود	نتایج برنامه (ثانیه)	نتایج SAP (ثانیه)	اختلاف (ثانیه)	درصد خطا٪
۱	۲/۲۵۸۴۰	۲/۳۰۳۳۷	۰/۰۴۴۹۷	۱/۹۵
۲	۲/۱۹۳۷۰	۲/۲۳۶۲۹	۰/۰۴۲۵۹	۱/۹۰
۳	۱/۵۴۲۰۰	۱/۵۷۶۸۵	۰/۰۳۴۸۵	۲/۲۱



شکل ۳- تاریخچه جابجایی نقطه ۱ (متر)، بر حسب زمان (ثانیه)

جدول ۳- جابجایی استاتیکی چهار نقطه مورد بررسی در جهت نیرو (X) با منظور داشتن اثرات بارهای قائم

شماره نقطه	نتایج برنامه (متر)	نتایج SAP (متر)	اختلاف (متر)	درصد خطا %
۱	۰/۱۳۸۱	۰/۱۳۷۲	۰/۰۰۰۹	۰/۶۵
۲	۰/۱۳۷۴	۰/۱۳۶۸	۰/۰۰۰۶	۰/۴۵
۳	۰/۰۸۳۳	۰/۰۸۲۷	۰/۰۰۰۶	۰/۷۰
۴	۰/۰۸۳۲	۰/۰۸۲۴	۰/۰۰۰۷	۰/۹۰

۳-۱-۴- بارگذاری موج

برای بررسی صحت عمل کرد برنامه نوشته شده در بارگذاری موج، از نرم افزار SACS 5.2 استفاده شده- است. برای این منظور موجی با ارتفاع ۱۱ متر و پریود ۱۰ ثانیه به سازه اعمال شده است. پارامترهای موج در هر دو سیستم با تئوری موج استوکس مرتبه پنج محاسبه شدند:

- طول موج از نرم افزار SACS : ۱۴۶/۳۲۳ متر
- طول موج از برنامه : ۱۴۵/۸۱۳۴ متر
- میزان اختلاف : ۵۰/۹۶ متر
- درصد خطا: ۰/۳۵

در بررسی نیروی وارد بر المان‌ها در هر دو روش از رابطه موريسون استفاده گردیده و فرض شده که ضریب درگ عمودی برابر ۰/۶۵ و ضریب درگ مماسی برابر صفر و همچنین ضریب اینرسی عمودی برابر ۱/۶ و ضریب اینرسی مماسی برابر صفر باشد. در محاسبات المان‌ها به ده قسمت تقسیم شدند تا مدل هیدرودینامیکی حاصل گردد.

حداکثر برش پایه محاسبه شده از نرم افزار SACS برابر ۱۴۲۰/۸ کیلونیوتن و در نقطه ۳۴۰ درجه یا به عبارتی بعد از عبور ۱۳۸/۲ متر از طول موج، حاصل شده است، این در حالی است که حداکثر این نیرو از برنامه ۱۴۶۱ کیلونیوتن برآورد گشته است که اختلاف بین دو مقدار برابر ۴۰/۷ کیلونیوتن می شود و لذا خطایی در حدود ۲/۸٪ وارد محاسبات شده است، که پذیرفتنی است.

حداکثر پاسخ سیستم حاصل از هر دو برنامه، که با روش شبه استاتیکی بدست آمده اند، برابر ۱۳/۵ سانتیمتر (SACS) و ۱۴ سانتیمتر (برنامه) تخمین زده شد.

۴- مدلسازی

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

- مدلی که جهت محاسبه نیروی موج ساخته شده شامل المان‌های تیر سه بعدی و المان‌های صفحه ای دو بعدی می باشد و مدل هیدرودینامیکی نامیده شده است.
- مدل سازه‌ای که در آن تمام المان‌ها به صورت المان‌های تیر دو نقطه‌ای با ۱۲ درجه آزادی منظور شده اند.

۴-۱-۱- مدل سازه‌ای

سکوی مورد بررسی، یک سکوی فرضی ۴ پایه منظور گشته که در عمق آب ۱۲۰ متری واقع شده- است. برای بررسی عملکرد سیستم مذکور از مدل سازی‌های پیچیده سازه‌ای صرف نظر شده است. با تغییر عمق آب (۱۸۰ و ۲۴۰) در سایر مدل‌ها فقط طول پایه‌ها و تعداد ترازهای دارای مهاربند افقی افزایش می یابد و تغییری در ابعاد اعضا ایجاد نمی شود.

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 نحوی 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 بدست می آید.

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 تماماً لوله‌ای می‌باشند، لذا دو محور دیگر اهمیت چندانی ندارند و توسط برنامه انتخاب می‌شوند.

در مدل‌سازی، از اثرات اندر کنشی شمع و خاک صرف نظر شده‌است، لذا اتصال سکو به بستر با در نظر گرفتن طولی از شمع، به صورت گیردار کامل منظور شده‌است. همچنین شمع درون پایه‌های اصلی مدل نشده‌است. در شکل ۴، تصویر قاب سکو در عمق‌های مختلف آورده شده‌است.

در زیر تراز ۶۰- متر کلیه مهاربندی‌ها حذف گشته و فقط از مهاربندهای افقی که به صورت کمر بند اعضا را به هم متصل کردند، استفاده شده‌است. بین ترازهای ۶۰- و ۱+ متر، سکو با مهاربندی کافی مدل شده و با توجه به آنکه نیروی قائم وارده از سوی مخزن متحرک به سکو زیاد می‌باشد، تعدادی مهار اضافی نیز در نقاط اتصال به سیستم اضافه شده‌است تا مکانیزم انتقال نیرو بهبود یابد.

عرشه به صورت یک تراز و در ارتفاع ۱۱+ متر واقع شده و اتصال آن به جکت توسط 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+ متر) اعمال می‌شوند.

کلیه اتصالات بین اعضای سازه‌ای گیردار کامل فرض شده و از اثرات تغییر قطر المان در نقاط اتصال، صرف نظر شده است.

اعضای به کار رفته، تماماً لوله‌ای بوده و دارای ضخامت ۲ سانتیمتر می‌باشند که برای پایه‌های اصلی، قطر اعضا ۱/۵ متر و برای مهاربندی‌ها ۱ متر انتخاب شده‌اند. طول اعضا بسته به مکان قرارگیری متفاوت می‌باشد و هر عضو بین دو اتصال، یک المان منظور شده ولی برای پایه‌های اصلی که دارای طول زیادی اند، برای بالا بردن دقت، هر عضو به ۱۰ المان کوچکتر تقسیم شده‌است.

برای اثبات وجود لنگر بازگرداننده ناشی از حرکت مخزن، ابتدا مخزن در عمق ۱۳/۵ متری قرار گرفته و سپس به عمق مناسب یعنی ۶۳/۵ متری برده شده تا نیروی کمتری از سوی امواج به مخزن وارد شود. اتصال مخزن به سکو توسط المان‌های که از برش آزاد شده‌اند،

فراهم گشته‌است. همچنین برای حفظ پایداری مخزن، از دو فنر خطی که در طرفین مخزن قرار می‌گیرند، استفاده شده تا اتصال مخزن به سکو فراهم‌گردد. سختی دو فنر مطرحه با فرایند سعی و خطا، جهت بهینه سازی اختیار شده‌است.

مخزن الحاقی مورد استفاده دارای قطر ۱۰ متر و ارتفاع ۵ متر و با ضخامت ورق ۵ سانتیمتر می‌باشد که توسط دو فنر خطی بهینه با سختی ۲۰ کیلونیوتن بر متر به سکو متصل شده‌است.

در تحقیق حاضر، فقط جرم مخزن مورد نیاز است لذا مخزن صلب فرض می‌شود و از تغییر شکل در پوسته مخزن صرف نظر شده‌است.

اعضای به کار رفته، تماماً لوله‌ای بوده و دارای ضخامت ۲ سانتیمتر می‌باشند که برای پایه‌های اصلی، قطر اعضا ۱/۵ متر و برای مهاربندی‌ها ۱ متر انتخاب شده‌اند. طول اعضا بسته به مکان قرارگیری متفاوت می‌باشد و هر عضو بین دو اتصال، یک المان منظور شده ولی برای پایه‌های اصلی که دارای طول زیادی اند، برای بالا بردن دقت، هر عضو به ۱۰ المان کوچکتر تقسیم شده‌است.

برای اثبات وجود لنگر بازگرداننده ناشی از حرکت مخزن، ابتدا مخزن در عمق ۱۳/۵ متری قرار گرفته و سپس به عمق مناسب یعنی ۶۳/۵ متری برده شده تا نیروی کمتری از سوی امواج به مخزن وارد شود. اتصال مخزن به سکو توسط المان‌های که از برش آزاد شده‌اند، فراهم گشته‌است. همچنین برای حفظ پایداری مخزن، از دو فنر خطی که در طرفین مخزن قرار می‌گیرند، استفاده شده تا اتصال مخزن به سکو فراهم‌گردد. سختی دو فنر مطرحه با فرایند سعی و خطا، جهت بهینه سازی اختیار شده‌است.

مخزن الحاقی مورد استفاده دارای قطر ۱۰ متر و ارتفاع ۵ متر و با ضخامت ورق ۵ سانتیمتر می‌باشد که توسط دو فنر خطی بهینه با سختی ۲۰ کیلونیوتن بر متر به سکو متصل شده‌است.

در تحقیق حاضر، فقط جرم مخزن مورد نیاز است لذا مخزن صلب فرض می‌شود و از تغییر شکل در پوسته مخزن صرف نظر شده‌است.

۴-۲- مدل هیدرودینامیکی

بعد از ساخت مدل سازه‌ای و تعیین المان بندی، مدل هیدرودینامیکی ساخته شده است. در این مدل از المان بندی 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 مش بندی شده تا بتوان نیروی موج وارد بر آن را محاسبه کرد.

آب تراکم ناپذیر با چگالی ۱۰۳۴ کیلوگرم بر مترمکعب منظور شده است. عمق آب ۱۲۰ متر، ارتفاع موج ۱۱ متر و پریود آن ۱۰ ثانیه فرض شده است، اعضای لوله‌ای صاف فرض شده‌اند و ضریب درگ و اینرسی قائم به ترتیب ۱/۰۵ و ۱/۶ و مماسی برابر ۰/۰ فرض شده است.

۵- تحلیل سکو

۵-۱- بررسی عملکرد سیستم

برای بررسی عملکرد سیستم ترکیبی و اثبات وجود اثر لنگر بازگرداننده، مدل در سه حالت مورد آنالیز قرار می‌گیرند. آنالیز مورد استفاده یک آنالیز استاتیکی با منظور داشتن اثرات تغییر شکل‌های بزرگ است و برای تمامی مدل‌ها از یک نوع آنالیز استفاده می‌شود. در هر سه حالت مخزن در عمق ۱۳/۵- قرار گرفته و موجی به ارتفاع ۱۱ متر و پریود ۱۰ ثانیه به سیستم اعمال می‌گردد.

- سکویی فاقد مخزن

- سکویی دارای مخزن ثابت

- سکویی با مخزن متحرک

در شکل ۵، پاسخ عرشه سکو حاصل از هر آنالیز به تصویر کشیده شده است.

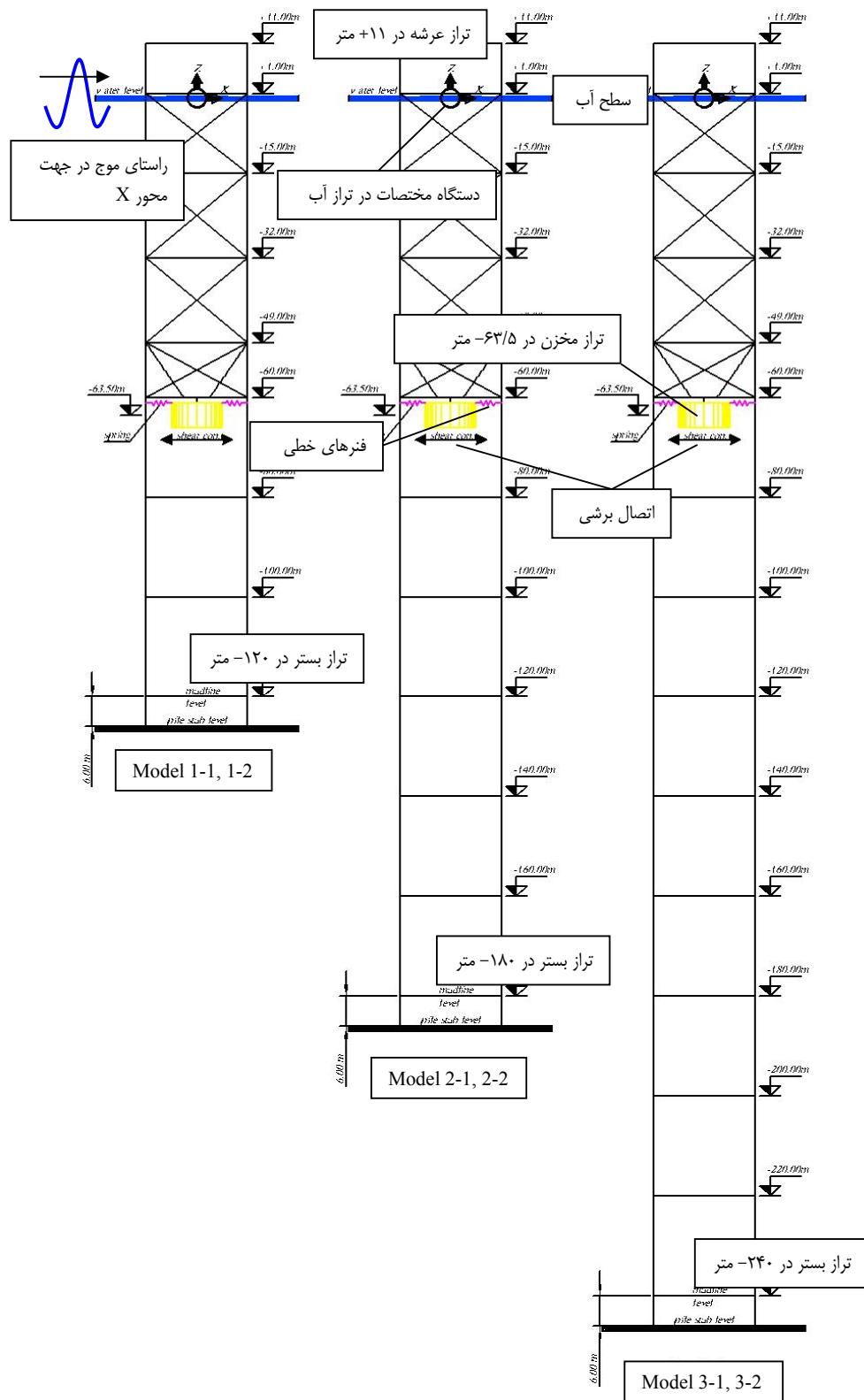
با دقت در نمودار مشخص است که در حالت سوم، جابجایی مخزن چشم‌گیر می‌باشد. حال برای بررسی اثر نیروی جدید تولید شده توسط جابجایی مخزن متحرک، روی سکو می‌توان پاسخ مخزن سکو را در هر حالت و یا به عبارتی جابجایی محل اتصال مخزن را در حالتی که مخزن وجود ندارد، از نمودار شکل ۶ یافت.

سکوی فاقد مخزن دارای کمترین جابجایی می‌باشد، اما سکوی دارای مخزن متحرک دارای دامنه پاسخی بین دو حالت دیگر است، پس می‌توان گفت که سیستم سکوی دارای مخزن متحرک پاسخ سکو را نسبت به حالت مخزن ثابت، کاهش داده است. در واقع مخزن ۵ متر جابجایی بیشتری را نسبت به سکو تجربه کرده است و به جای آن پاسخ عرشه سکو را نسبت به حالتی که این مخزن ثابت است ۴۰ سانتیمتر کاهش داده است یعنی چیزی در حدود ۱۵ درصد بهبود در پاسخ ایجاد کرده است.

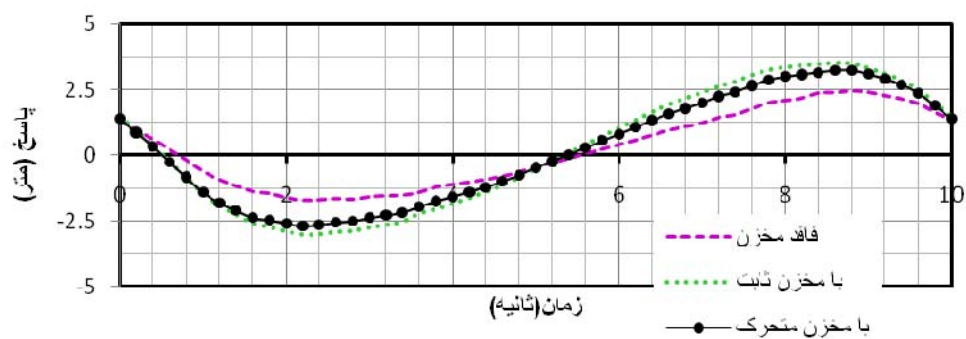
نیروی جدید تولید شده، لنگری است که از حاصل ضرب نیروی شناوری مخزن در جابجایی مخزن حاصل می‌شود. این اثر شبیه اثرات بارهای قائم یا $P=\Delta$ در افزایش دامنه پاسخ است ولی این بار در جهت عکس کار می‌کند و دامنه پاسخ را کاهش می‌دهد زیرا نیروی قائم در جهت بالا است و خلاف نیروی وزن است. این اثر اگر مخزن ثابت به سکو متصل شده باشد نیز وجود دارد ولی چون جابجایی آن کمتر خواهد بود، لنگر کوچکتری را تولید می‌کند، پس اثر کمتری دارد. ولی با آزاد سازی این اتصال بازوی اعمال بار بزرگتر می‌شود و لنگر افزایش می‌یابد، پس اثرات آن نیز افزایش می‌یابد.

باید توجه داشت که نیروی موج وارد بر مخزن در این دو حالت تغییر نمی‌کند، لذا با توجه به نیاز به برقراری تعادل نیروهای گره‌ای در محل اتصال مخزن به سکو، در هر دو حالت مخزن ثابت و متحرک نیروی یکسانی از سوی موج به سکو اعمال می‌گردد. پس عامل تغییر در دامنه پاسخ، اثر لنگر بازگرداننده ناشی از نیروی شناوری است. با بررسی‌های بیشتر مشخص شد که اگر مخزن به اعماق بیشتری برده شود، می‌تواند پاسخ سکو را نسبت به حالتی که مخزن وجود ندارد نیز کاهش دهد. در مقاله حاضر عمق مناسب ۶۳/۵- متر فرض شده است [۹].

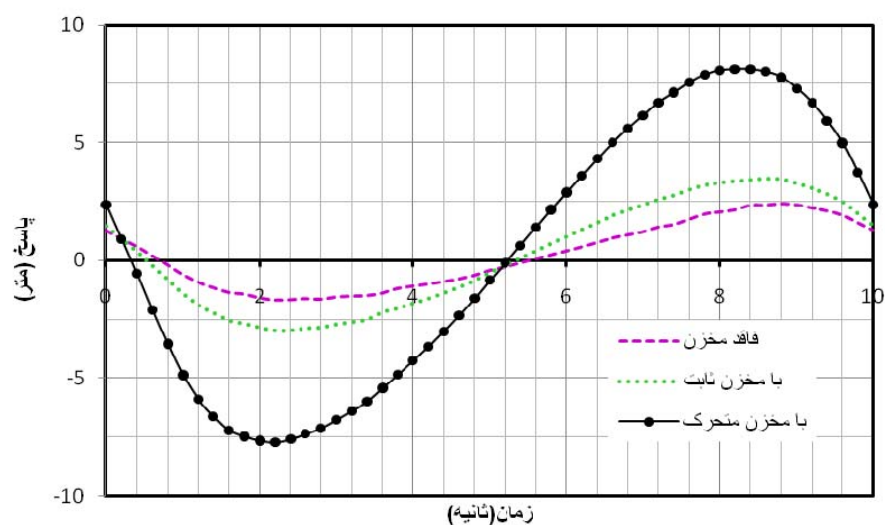
پاسخ عرشه سیستم با قرارگیری مخزن در عمق مناسب در شکل ۷، آمده است.



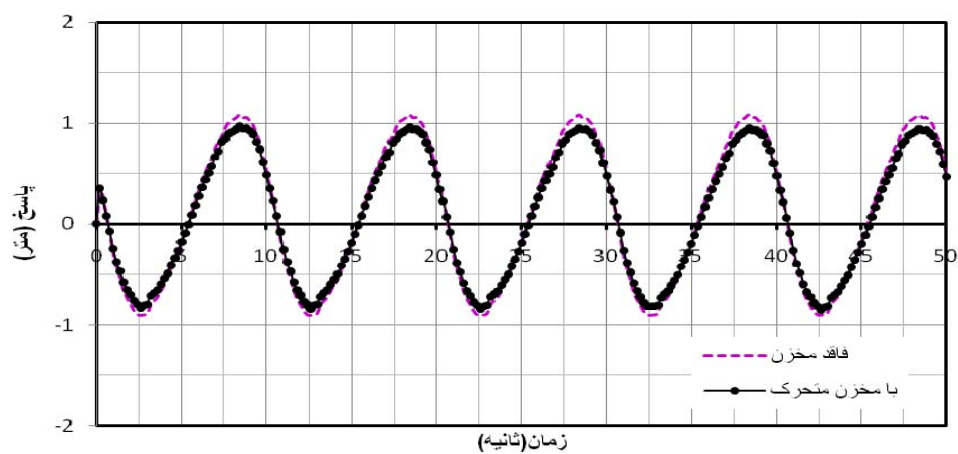
شکل ۴- هندسه قاب‌های سکو در سه عمق



شکل ۵- مقایسه پاسخ استاتیکی عرشه سکو در سه حالت



شکل ۶- مقایسه پاسخ استاتیکی مخزن/محل اتصال آن در سه حالت



شکل ۷- پاسخ استاتیکی عرشه با قرارگیری مخزن در عمق مناسب به همراه بررسی عملکرد آن

همان گونه که از شکل پیدا است، استفاده از مخزن متحرک ۸ سانتیمتر پاسخ سکو را نسبت به حالتی که مخزن وجود ندارد کاهش داده که خود گویای مفید بودن مخزن متحرک است.

۵-۲- بررسی اثر نرم تر شدن سکو

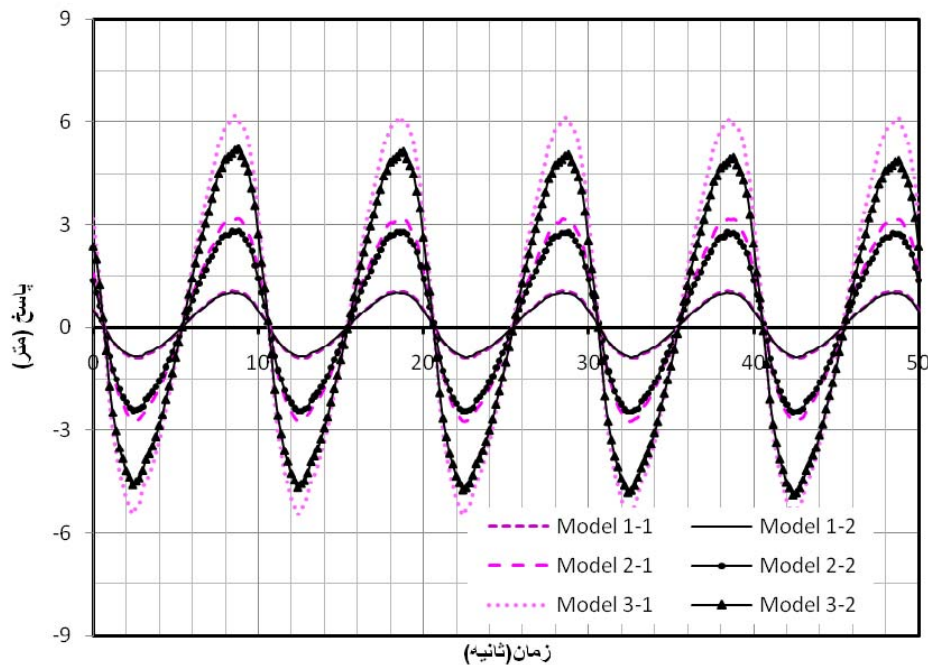
برای بررسی اثر استفاده از مخزن متحرک با نرم تر شدن سکو و یافتن رابطه منطقی، سه مدل اصلی که در شکل ۴ به تصویر کشیده شده‌اند مورد تحقیق قرار گرفتند که هر یک به ترتیب در شرایطی که مخزن وجود ندارد و همچنین در شرایطی که سکو مجهز به مخزن متحرک شده‌است، بررسی شده‌اند.

- مدل ۱: سکویی در عمق آب ۱۲۰ متری
- مدل ۲: سکویی در عمق آب ۱۸۰ متری
- مدل ۳: سکویی در عمق آب ۲۴۰ متری

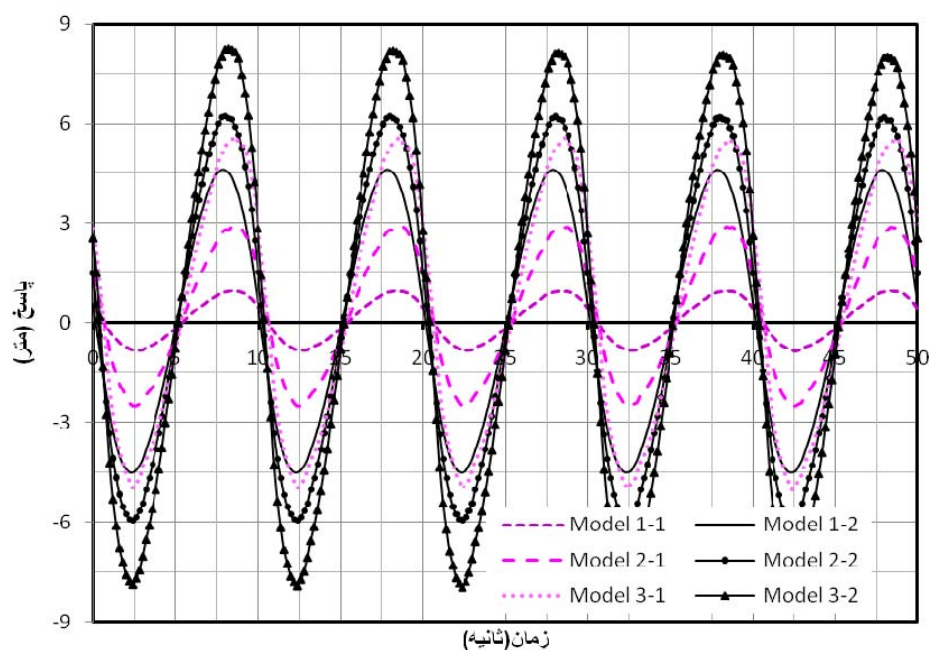
شرایط مخزن در تمام این مدل‌ها مشابه است و فقط عمق آب و به عبارتی ارتفاع سکو تغییر یافته‌است. جهت تحلیل از یک آنالیز استاتیکی با در نظر گرفتن اثرات بارهای قائم و تغییر شکل‌های بزرگ استفاده شده‌است.

لازم به ذکر است که سختی فنر اتصال در تمام مدل‌ها مشابه و برابر ۲۰ کیلونیوتن بر متر برای هر فنر فرض شده‌است که در مجموع سختی جانبی ۴۰ کیلونیوتن بر متر را برای مخزن فراهم می‌آورند. با توجه به انتخاب سختی یکسان برای فنرهای اتصال و استفاده از مخزن مشابه برای تمامی مدل‌ها و قرار دادن مخزن در عمق ثابت ۶۳/۵ متری، به نظر می‌رسد مخزن جابجایی مشابه-ای را نسبت به سکو در تمام مدل‌ها تجربه کند لذا اثر بازگرداندن مخزن روی سکو در تمام حالات یکسان است. پس می‌توان نتیجه گرفت که اختلاف موجود بین پاسخ‌ها، فقط تحت اثر نرم تر شدن سکوها مورد بررسی می‌باشد. نیروی جانبی وارده، حاصل از یک موج ۱۱ متری با پریود ۱۰ ثانیه می‌باشد که پی در پی به سکو برخورد می‌کند. چنین امواجی برای شرایط خلیج فارس در دسته امواج بلند دریایی قرار می‌گیرند و معمولاً برای مقاصد طراحی به کار می‌روند.

نتایج حاصل از تحلیل صورت گرفته توسط برنامه نوشته شده در محیط متلب، در شکل ۸ و شکل ۹ آورده شده-است که به ترتیب بیان گر پاسخ عرشه و مخزن یا نقطه اتصال مخزن می‌باشند.



شکل ۸- پاسخ عرشه سیستم در سه مدل بیان شده هر یک در دو حالت



شکل ۹- پاسخ مخزن / محل اتصال مخزن در سه مدل مورد بررسی هر یک در دو حالت

جدول ۴- مقایسه کارایی مخزن در سه مدل

شماره مدل	مخزن	پاسخ بیشینه (متر)	کارایی (%)
۱	ندارد	۱/۰۸	۷/۷
	دارد	۱/۰۰	
۲	ندارد	۳/۱۷	۱۲
	دارد	۲/۸۱	
۳	ندارد	۶/۱۸	۱۶/۸
	دارد	۵/۲۲	

جهت بررسی میزان تأثیر گذاری مخزن، پارامتری با نام کارایی تعریف می‌شود، که مقادیر کارایی برای سه مدل مورد بررسی در جدول ۴، آورده شده‌اند.

کارایی =

$$100 \times (\text{میانگین جابجایی‌ها} / \text{تفاضل جابجایی‌ها})$$

از جدول مشخص است که با افزایش عمق سکو و رفتن به سمت آب‌های عمیق تر یا به عبارتی نرم شدن سکو، کارایی سیستم فوق افزایش یافته‌است. بدین ترتیب می‌توان گفت سیستم ترکیبی استفاده از مخزن

از نمودارها مشخص است که با نرم‌تر شدن سکو، یا به عبارتی افزایش عمق آب، دامنه پاسخ عرشه افزایش یافته‌است که امری طبیعی است زیرا دامنه پاسخ با سختی سازه رابطه معکوس دارد، لذا با کاهش سختی دامنه پاسخ سازه افزایش می‌یابد. نکته مهم افزایش کارایی مخزن با نرم‌تر شدن سکو است. به عبارتی با نرم‌تر شدن سکو اثر لنگر بازگرداننده ناشی از حرکت مخزن افزایش می‌یابد، لذا ایده مطرح می‌تواند در سکوه‌های آب‌های عمیق نیز مورد بررسی قرار گیرد.

متحرک متصل به سکو، برای سکوهایی نرم‌تر کارایی بهتری از خود نشان می‌دهد. این مطلب نتیجه‌ای است که می‌تواند توجیه کننده انجام تحقیقات بعدی در زمینه استفاده از مخزن مستغرق متحرک در سکوهایی متکی بر بستر نظیر سکوهایی پایه کششی باشد. نمودار حداکثر پاسخ عرشه و کارایی مخزن مستغرق متحرک بر حسب عمق آب در

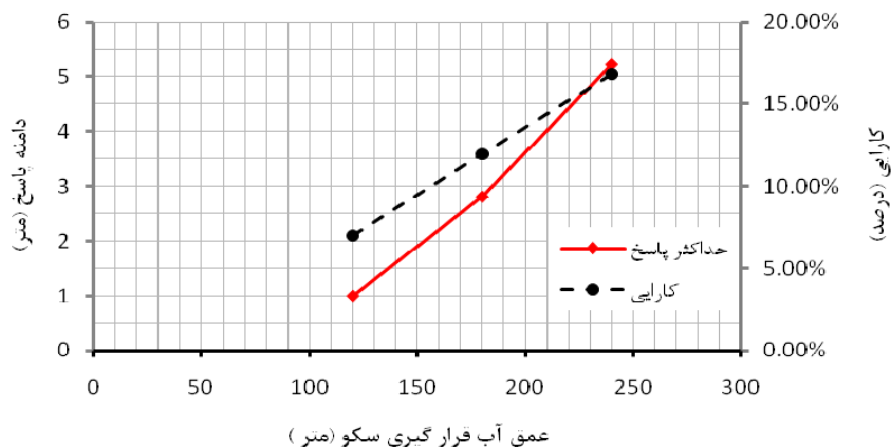
شکل نمایش داده شده است. با دقت در شکل مشخص است که با افزایش عمق آب و به عبارتی نرم‌تر شدن سکو، جابجایی‌های عرشه و کارایی مخزن افزایش یافته است که در قبل نیز بیان شد. نکته دیگر آن است که تغییرات کارایی بر حسب عمق، تقریباً خطی است، در واقع با توجه به ثابت بودن تمامی پارامترها و ایجاد تغییرات در سختی سیستم و همچنین انجام آنالیز استاتیکی، کارایی رابطه خطی با عمق برقرار می‌کند. با تغییر نوع آنالیز و ورود پارامترهای دیگر ممکن است رابطه خطی حاصل نگردد.

۶- نتیجه گیری

در این تحقیق، سیستم ترکیبی سکو و مخزن مورد بررسی قرار گرفته است. استفاده از مخازن ثابت در سکوهایی برجی در اعماق زیاد، برای کاهش بار قائم انتقالی از قسمت‌های فوقانی و لذا جلوگیری از کمانش پایه‌های اصلی سکو، از مسائلی است که در گذشته مورد بررسی قرار گرفته-

است، این در حالی است که امروزه انواع کنترل‌های فعال در سکوهایی دریایی مورد مطالعه‌اند. سیستم ارائه شده، به واقع شبیه سیستم‌های کنترل فعال است، ولی این کنترل توسط نیروهای طبیعت انجام می‌گیرد، یعنی مخزن در جهتی حرکت می‌کند که طبیعت به آن القاء می‌کند ولی اثر آن روی سکو خلاف خواست نیروهای طبیعی است. هرچه نیروی طبیعی بزرگتر گردد، اثر لنگر مخزن روی سکو زیاده‌تر می‌شود، پس مقاومت سیستم نیز افزایش می‌یابد. نتایج حاصله، عملکرد صحیح سیستم ترکیبی را اثبات می‌کنند، از این رو به نظر می‌رسد، ایده مطرح شده می‌تواند در بهبود پاسخ سکوهایی مستقر در آب‌های عمیق مؤثرتر باشد، لذا بررسی بیشتر و انجام آنالیزهای دقیق‌تر ضرورت دارد.

مشخص است که با ایجاد جابجایی‌های بیشتر یا افزایش حجم مخزن، می‌توان نیروی جانبی بزرگتری را به سیستم اعمال کرد، پس مسائلی مانند، سختی فرها، حجم مخزن، جرم مخزن و عمق قرار گیری آن، از دسته موضوعاتی هستند که روی عملکرد سیستم تأثیر می‌گذارند. همچنین با نرم‌تر شدن سکو نیز کارایی مخزن متحرک افزایش می‌یابد لذا استفاده از این سیستم در سکوهایی آب‌های عمیق مانند سکوهایی پایه کششی نیز میسر است.



شکل ۱۰- مقایسه میزان کارایی و حداکثر پاسخ با تغییر سختی سکو

۷- مراجع

- 4-Patil, K.C., Jangid, R.S., 2005, "Passive control of offshore jacket platforms". Ocean Engineering 32, 1933-1949.
- 5-Sarpkaya, T., Isacson, M., "Mechanics of Wave Force on offshore structures". 1981
- 6-Sorensen, Robert.M., Basic Wave Mechanics, John Wiley & sons, Inc. 1993.
- 7-Bathe, Klaus-jurgen. "Finite Element Procedures". Prentice Hall of India, 2005.
- 8-Clough, Ray. W., and Penzien, Joseph., "Dynamics of Structures". McGRAW-HILL INTERNATIONAL BOOK COMPANY, 1982.
- ۹- محرمی گرگری. م.، شفیع‌فر. م. (راهنما)، آقا کوچک. ع. (مشاور)، "تحلیل سکوی ثابت دارای مخازن شناور"، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۷۸.
- 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.