



تحلیل دینامیکی غیر خطی سکوی شابلونی تحت اثر بار امواج

سید اشکان جهرمی مقدم^۱، محمود فغفور مغربی^۲، محمد جواد کتابداری^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه های هیدرولیکی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- استاد، گروه مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

maghrebi@um.ac.ir

خلاصه

سکوهای نفتی یکی از انواع مهم سازه‌ها می‌باشند. بارهای محیطی بر سکوهای دریایی شامل بارهای باد، جریان آب دریا، زلزله، برف یا یخ و غیره می‌باشند. باید آگاه بود که در خلیج فارس بار موج، بار غالب در طراحی این گونه سازه‌ها به شمار می‌رود. از طرف دیگر، سکوی دریایی شریان حیاتی برای اقتصاد کشورهای نفت‌خیز به شمار می‌رود؛ بنابراین ضروری است که عملکرد آن‌ها با وقوع زلزله و برخورد امواج دچار خدشه نشود. در این تحقیق، بارگذاری ناشی از امواج بر روی سکوهای ثابت شابلونی مورد بررسی قرار گرفته است. نخست الگوی سکوی دریایی فاز ۱۳ پارس جنوبی در نرم‌افزار SAP ۲۰۰۰ مدل‌سازی می‌شود. سپس به منظور آماده‌سازی مدل برای تحلیل دینامیکی از مشخصه‌های موج طراحی صدساله بهره‌جویی می‌شود و تحلیل دینامیکی سازه تحت اثر موج اعمالی انجام می‌گیرد. در ادامه با به‌کارگیری میراگر جرمی تنظیم شونده در سیستم سکو، با انجام تحلیل مجدد پاسخ‌های تغییر مکانی به دست آمده با نتایج تحلیل پیشین مورد مقایسه قرار می‌گیرد. مشاهده می‌گردد در بهترین حالت تغییر مکان عرشه بیش از ۲۲ درصد و برش پایه حداکثر بیش از ۱۶ درصد کاهش می‌یابد.

کلمات کلیدی: سکوی شابلونی، بار امواج، تحلیل غیرخطی تاریخچه زمانی، موج طراحی صدساله، میراگر جرمی تنظیم شونده

۱. مقدمه

با وابستگی روزافزون صنایع دنیای مدرن به نفت و محصولات پتروشیمی حوزه عملیات اکتشاف و استخراج این ماده ارزشمند به پهنه دریاهای اقیانوس‌ها نیز کشیده شده است. در این میان حتی اعماق دور از دسترس دریاهای نیز مصون از این فعالیت‌ها نبوده و امروز حفاری و استخراج نفت تا ورای اعماق ۱۰۰۰ متر با رشد چشمگیری رو به افزایش است. در اوایل شناخت و استخراج منابع نفتی، در مناطق کم‌عمق صورت می‌گرفت، اما امروزه به‌مرور با کاهش ذخایر نفتی و بعلاوه اثبات وجود نفت در مناطق عمیق‌تر، در نقاط مختلفی از دنیا به صنایع استخراج نفت از آب‌های عمیق اهمیت فراوانی داده می‌شود؛ اما اعماق بیشتر عملیاتی به معنی نیروهای بزرگ‌تر، ممانهای بیشتر و در نتیجه استفاده بیشتر از مواد و سنگینی سازه‌ها و در نهایت افزایش هزینه تولید است. از این رو امروزه تمایل زیادی به استفاده از انواع جدید از سازه‌های دریایی تحت عنوان سازه‌های تطبیقی ایجاد شده است.

جکت‌ها سازه‌هایی ساخته شده از لوله‌های فولادی می‌باشند که به وسیله شمع‌هایی به کف دریا متصل می‌شوند. تجهیزات حفاری، استخراج، اسکان، جرثقیل‌ها و دیگر قسمت‌ها مانند باند هلی کوپتر و وسایل نجات در قسمت بالای سکو نصب می‌شوند. معمولاً در این سکوها، نفت خام و گاز ابتدا به بالای سکو انتقال یافته و پس از عملیات اولیه تصفیه از طریق لوله به نفت کش‌ها و یا واحدهای تصفیه و توزیع ساحلی، انتقال پیدا می‌کند.

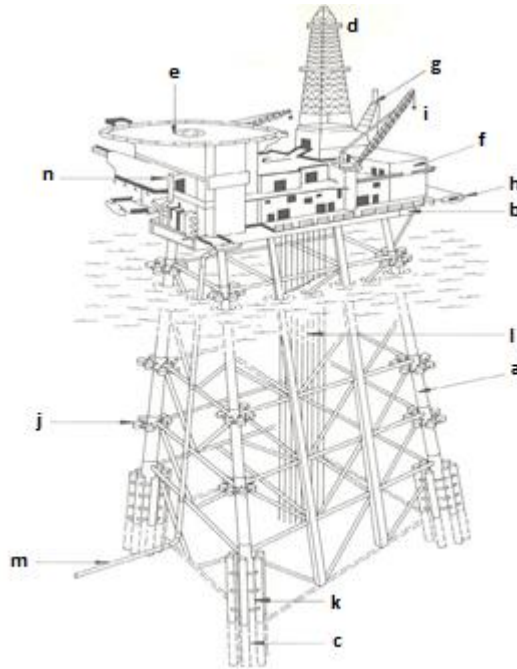
سازه جکت به صورت قاب طراحی شده و المان‌های اصلی با اندازه‌های متفاوت می‌توانند به صورت X و یا K به هم متصل گردند. نمونه‌ای از سازه چنین سکوهایی در شکل ۱ نمونه‌ای از یک سکوی ثابت شابلونی نمایش داده شده است [۱]. طراحی جزئیات چنین سکوهایی بستگی به نیازهای

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد

^۲ استاد

^۳ دانشیار

لازم از نقطه نظر مقاومت، خستگی و طریقه به آب اندازی سکو داشته و در طراحی باید محدودیت های بسیاری را که در طول عمر سکو وجود دارند، مدنظر قرار داد. طول عمر یک سکو شامل مراحل مختلف طراحی، ساخت، به آب اندازی، نصب تجهیزات، شمع کوبی و نهایتاً مرحله استخراج و بهره برداری است. مجموعه مراحل فوق معمولاً بین ۱۰ تا ۲۵ سال طول می کشد [۲]. پس از اتمام مرحله بهره برداری، از نقطه نظر اکولوژی دریایی، بهتر است که سکو برداشته شود تا لطمه ای به محیط زیست وارد نشود. جکت ها از متداول ترین سکوها ی حفاری بوده و تا به حال از آن ها تا حفاری در اعماقی در حدود ۳۵۰ متر استفاده شده است.



شکل ۱- نمونه ای از یک سکوی ثابت شابلونی (a شابلون، b اتاکنک تکیه گاهی، c شمع ها، d جرثقیل حفاری، e پد بالگرد، f تجهیزات حفاری و تولید، g مشعل، h قایق نجات، i جرثقیل گردان، j نگهدارنده شمع، k پایه ی شمع، l رایزرهای حفاری و تولید، m خط لوله استخراج، n اقامتگاه [۱]

سکوها ی ثابت نوع شابلونی مناسب ترین نوع جهت استقرار در خلیج فارس می باشند. فناوری ساخت، حمل و نصب این سکو در منطقه وجود دارد. احداث آن ها در آب کم تر از ۱۰۰ متر مقرون به صرفه است و هزینه نصب آن ها پایین است. این سکوها پایدار ی بالایی دارند و دارای تغییر مکان و نوسانات کمی هستند. سکوها ی ثابت شابلونی با توجه به شرایط جوی و شرایط آب خلیج فارس، از نظر بهره برداری، قابلیت نگه داری و تعمیر شرایط مناسبی دارند. هم چنین موجود بودن چند یارد مخصوص سکو سازی از این نوع در خلیج فارس (از جمله سکو سازی بوشهر در ایران و موجود بودن یاردهای سکو سازی شرکت های غربی در بعضی کشورهای عربی خلیج فارس) استفاده از این سکوها را ممکن می سازد. قابل ذکر است که تمامی سکوها ی نصب شده در خلیج فارس، از نوع ثابت شابلونی بوده و سکوها ی در دست احداث نیز از این نوع می باشند [۲].

در سال ۱۹۷۲ پنزین و همکاران با استفاده از روش تحلیل تصادفی به تحلیل سازه های دور از ساحل پرداختند و پاسخ ها را در برابر نیروهای زلزله و امواج دریا به دست آوردند. آن ها به این نتیجه رسیدند که برای به دست آوردن بارهای طراحی ارتعاشی زلزله انجام یک تحلیل پاسخ دینامیکی واجب است. هم چنین برای به دست آوردن بارهای طراحی امواج باید از تحلیل پاسخ دینامیکی از نوع تصادفی استفاده شود و حداقل دو مد نرمال از ارتعاش باید در تمام تحلیل ها منظور گردد [۳]. در سال ۲۰۰۹ الشافی و همکاران نمونه جکتی را در آزمایشگاه مدل سازی و پاسخ های مدل را با استفاده از شتاب سنج و کرنش سنج اندازه گیری کرده اند. آن ها پس از مدل سازی عددی، انطباق خوبی بین نتایج آزمایشگاهی و عددی مشاهده کرد و به این نتیجه رسیدند که توزیع جرم و شرایط تکیه گاهی در پاسخ سازه مؤثر بوده و نتایج با پاسخ اجباری سیستم یک درجه آزادی هماهنگی و سازگاری دارد [۴]. در سال ۲۰۱۰ ما و همکاران با استفاده از مدل آزمایشگاهی سکوی شابلونی و به کاربردن روش تحلیل اجزای محدود، نشان دادند که در صورت استفاده از مقادیر بهینه میرایی، جرم و فرکانس می توان ارتعاشات وارده به سازه را کنترل نمود [۵].

هدف از این مقاله بررسی کاهش ارتعاشات وارد بر سکوی فاز ۱۳ پارس جنوبی تحت اثر موج ۱۰۰ ساله با به کارگیری میراگر جرمی تنظیم شونده بهینه است.

۲. مدل سازی سکوی شابلونی

شکل ۲ عملیات نصب سکوی شابلونی فاز ۱۳ پارس جنوبی را نشان می دهد. سکوی SPD ۱۳D یکی از چهار سکوی فاز ۱۳ پارس جنوبی، با ارتفاع ۷۰ متر در فاصله ۱۰۰ کیلومتری جنوب غربی روستای اختر واقع در استان بوشهر به مختصات جغرافیایی ۶۲۱۲۴۵ شرقی و ۲۹۷۷۴۸ شمالی قرار گرفته است. عمق آب در این منطقه ۶۱ متر می باشد. سکوی مورد مطالعه فاز ۱۳ پارس جنوبی در عمق ۶۱ متری واقع شده است و دارای دو پایه عمودی و دو پایه مایل با شیب ۷:۷:۱H می باشد. جکت فوق دارای بادبندهای ضربدری عمودی در تمام وجوه بوده و این بادبندها بین بادبندهای افقی که در سه ارتفاع سکو قرار دارند، به کار گرفته شده اند [۶].



شکل ۲- عملیات نصب سکوی شابلونی فاز ۱۳ پارس جنوبی SPD ۱۳D

ارتفاع پایین ترین عرشه از سطح آب ۱۱ متر می باشد. این سکوی فلزی متقارن شامل بخش های زیر می باشد:

- **عرشه:** شامل ۵ طبقه ساختمان و هر کدام به ارتفاع تقریبی ۴ متر می باشد. طبقه آخر دارای فرودگاهی برای استفاده ی هلی کوپتر می باشد. ابعاد طبقات عرشه ۳۱×۲۹ متر است. عرشه سکو دارای وزنی در حدود ۴۶۰۰ تن می باشد.
- **جکت:** شامل چهار پایه و چهار وجه خرابایی است که این چهار وجه دو به دو متقارن اند. تمام اعضای جکت دارای مقاطع فولادی لوله ای و به قطر $\varphi=1655 \text{ mm}$ و طول آن ها در حدود ۷۱ متر می باشد. وجه های جکت دارای بادبند و به صورت ضربدری می باشد و پایه های جکت نیز با شیب ۷:۷ طراحی شده اند. جکت سکو دارای جرم و وزنی در حدود ۱۲۵۰ تن می باشد.

از لحاظ هندسی، جکت دارای چهار سطح بادبندی افقی می باشد که این سطوح عبارت اند از:

- سطح ۱: ارتفاع +۵۹۴۰ میلی متر، از LAT^۱

- سطح ۲: ارتفاع -۱۴۸۱۰ میلی متر، از LAT

- سطح ۳: ارتفاع -۳۷۸۱۰ میلی متر، از LAT

- سطح ۴: ارتفاع -۶۱۰۱۰ میلی متر، از LAT

- **شمع ها:** شامل ۴ شمع پیرامونی یکسان بوده و فونداسیون سکو را تشکیل می دهند. هر شمع دارای مقطع لوله ای به قطر $\varphi=1524 \text{ mm}$ می باشد. طول هر شمع ۱۷۱ متر، وزن هر یک ۳۸۷ تن و عمق نفوذشان در خاک بستر، ۹۶ متر می باشد.

در این سکوها، نفت خام و گاز ابتدا به بالای سکو انتقال یافته و پس از عملیات اولیه تصفیه از طریق لوله به نفت کش ها و یا واحدهای تصفیه و توزیع ساحلی، انتقال می یابد [۶]. سازه جکت به صورت قاب طراحی شده و المان های اصلی با اندازه های متفاوت می توانند به صورت X یا k به هم متصل گردند. طراحی جزئیات چنین سکوهایی بستگی به نیازهای لازم از نقطه نظر مقاومت، خستگی و طریقه به آب اندازی سکو داشته و در طراحی باید محدودیت های بسیاری را که در طول عمر سکو وجود دارند، مدنظر قرار داد. طول عمر یک سکو شامل مراحل مختلف طراحی، ساخت، به آب اندازی، نصب تجهیزات، شمع کوبی و نهایتاً مرحله استخراج و بهره برداری است. مجموعه مراحل فوق معمولاً بین ۱۰ تا ۲۵ سال طول می کشد. پس از اتمام

^۱ - Lowest Astronomical Tide

مرحله بهره‌برداری، از نقطه نظر اکولوژی دریایی، بهتر است که سکو برداشته شود تا لطمه‌ای به محیط‌زیست وارد نشود. جکت‌ها از متداول‌ترین سکوهایی حفاری بوده و تا به حال از آن‌ها تا حفاری در اعماقی در حدود ۳۵۰ متر استفاده شده است. معمولاً در مدل‌سازی سازه‌های سکوها، به منظور مدل نمودن اتصال شمع به خاک محل یا آن را با فنرهایی به روش المان محدود مدل‌سازی می‌کنند لیکن در محاسبات تقریبی، متناسب با نوع خاک محل طولی از شمع برابر ۳ تا ۸ برابر قطر شمع، در بستر دریا در نظر گرفته و در آنجا به صورت اتصال گیردار مدل می‌نمایند و از اثر بقیه طول شمع و اندرکنش خاک اطراف صرف نظر می‌کنند [۷]. در مدل‌سازی این سکو، با توجه به مشخصات خاک و طبق محاسبات زیر مقدار طول گیرداری برابر با ۱۰ برابر قطر شمع در نظر گرفته شده است، یعنی شمع‌ها تا عمق ۷۷/۱۵- متر امتداد یافته و در آنجا به صورت تکیه‌گاه گیردار مدل شده است. برای محاسبه این طول از روابط زیر استفاده شده است:

$$L_c = 4 \left(\frac{E_p I_p}{K_h} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (1) \quad \text{برای خاک درشت‌دانه}$$

که در آن E_p مدول الاستیسیته شمع، I_p ممان اینرسی شمع و K_h برابر با $m_h Z$ است. (Z عمق شمع در خاک می‌باشد).

$$L_c = 4 \left(\frac{E_p I_p}{m_h} \right)^{\frac{1}{5}} \quad (2) \quad \text{برای خاک ریزدانه}$$

در این رابطه m_h به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$m_h = \frac{0.32 S_u (S_u + 122)}{D} \quad (3)$$

که در آن S_u چسبندگی خاک و D قطر شمع می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود K_h برای خاک ریزدانه ثابت است و برای خاک درشت‌دانه با ارتفاع افزایش می‌یابد. جنس خاک در اعماق نواحی شمع‌ها عمدتاً از نوع رس و ریزدانه می‌باشد. جدول ۱ مقدار S_u را برای انواع مختلف خاک‌های ریزدانه نشان می‌دهد.

جدول ۱- مقادیر مختلف S_u برای انواع خاک ریزدانه

SPT Penetration (blows/foot)	Estimated Consistency	S_{uc} (tons/ft ²)
<۲	Soft Soft	<۰,۲۵
۲ - ۴	Soft	۰,۲۵ - ۰,۵۰
۴ - ۸	Medium	۰,۵۰ - ۱,۰
۸ - ۱۵	Stiff	۱,۰ - ۲,۰
۱۵ - ۳۰	Very Stiff	۲,۰ - ۴,۰
>۳۰	Hard	>۴

در نتیجه داریم:

$$2 \frac{\text{tons}}{\text{ft}^2} = 222 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \approx 250 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$m_h = \frac{0.32 \times 250 \times (250 + 122)}{1.524} = 19527.6 \text{ kPa} = 19.5 \text{ MPa}$$

برای شمع‌های واقع بر روی محور ۱ داریم:



$$D_o = 1.524m$$

قطر خارجی

$$D_i = 1.524 - (2 \times 0.0889) = 1.3462m$$

قطر داخلی

$$I = \frac{\pi}{64} (D_o^4 - D_i^4) = 0.103674m$$

ممان اینرسی

$$E = 2.1 \times 10^{11} \frac{N}{m^2} = 2.1 \times 10^5 MPa$$

مدول الاستیسیته

$$L_c = 4 \times \left(\frac{2.1 \times 10^{11} \times 0.103674}{19527.6 \times 10^3} \right)^{\frac{1}{5}} = 16.27m$$

طول گیرداری

هم چنین برای شمع‌های واقع بر روی محور ۲ داریم:

$$D_o = 1.524m$$

قطر خارجی

$$D_i = 1.524 - (2 \times 0.0762) = 1.3716m$$

قطر داخلی

$$I = \frac{\pi}{64} (D_o^4 - D_i^4) = 0.091063m$$

ممان اینرسی

$$E = 2.1 \times 10^{11} \frac{N}{m^2} = 2.1 \times 10^8 kPa$$

مدول الاستیسیته

$$L_c = 4 \times \left(\frac{2.1 \times 10^{11} \times 0.091063}{19527.6 \times 10^3} \right)^{\frac{1}{5}} = 16.07m$$

طول گیرداری

از اینرو طول گیرداری شمع‌های ۱ و ۲ به ترتیب ۱۶/۲۷ و ۱۶/۰۷ متر بوده که مقدار ۱۶/۱۷ متر در نظر گرفته می‌شود، بنابراین تراز بستر دریا

۶۱/۰۱- متر و تراز کف شمع‌ها برابر با ۷۷/۱۸- متر خواهد بود.

۳. اعمال نیروی موج به صورت متمرکز

در آنالیز استاتیکی سازه‌های دریایی نیروی گرهی موج فقط برای لحظه‌ای که کل نیروی افقی وارد بر سازه حداکثر است، بررسی می‌شود. اگر نیروی اینرسی دینامیکی ناچیز باشد این روش مناسب است زیرا پاسخ کلی سازه به طور خطی با کل نیروی وارد تغییر می‌کند؛ بنابراین حداکثر جابجایی سازه تقریباً در لحظه‌ای پیش می‌آید که کل نیروی افقی حداکثر باشد، اما هنگامی که اثر دینامیکی قابل توجه باشد از آنجا که جرم سازه‌ای نمی‌تواند بلافاصله در مقابل نیروی وارده عکس‌العمل نشان دهد، این استدلال صحیح نیست. بنابراین در آنالیز دینامیکی، نیروی گرهی را نه تنها در لحظه حداکثر نیروی وارده بلکه برای سایر لحظات یک موج کامل نیز باید محاسبه نمود. از آنجا که انجام آنالیز به این روش بسیار پیچیده می‌شود، معمولاً نیروی موج را به روش ساده‌تری نسبت به آنالیز استاتیکی مدل می‌کنند. در این روش مساحت و حجم اعضای مختلف سازه را در گره‌های مربوطه متمرکز نموده و نیروهای افقی موج بر این جسم‌های متمرکز محاسبه می‌شوند. همچنین برای سهولت کار فقط از تئوری خطی ایری در تعیین میدان حرکت سیال برای محاسبه نیروی موج استفاده می‌شود. پس از متمرکز کردن مساحت و حجم اعضا به روش فوق می‌توان نیروی موج F_P وارد بر گره فرضی P را با معادله موریسون بامنظور نمودن حرکت نسبی محاسبه نمود [۸].

$$F_P = \frac{1}{2} \rho C_D A_P |u'_P| u'_P + \rho C_I B_P a_{P_x} - \rho (C_I - 1) B_P \dot{U}_P \quad (۴)$$

که در آن u'_P نماینده سرعت افقی سیال نسبت به گره است که بر مبنای سرعت افقی سیال u_P و سرعت افقی گره \dot{U}_P به صورت رابطه (۵) بیان

می‌شود:

$$u'_P = u_P - \dot{U}_P \quad (۵)$$



در رابطه (۴) a_{px} شتاب افقی سیال در محل گره و \ddot{U}_p شتاب گره است. همچنین ρ دانسیته آب و C_D و C_I ضرایب رانش و اینرسی هستند. با فرض اینکه سرعت گره در مقایسه با سرعت آب ناچیز باشد می توان از مجذور آن صرف نظر نمود:

$$|u'_p|u'_p = |u_p|u_p - 2|u_p|\dot{U}_p \quad (6)$$

در تقریب دوم پس از جایگزینی $|u_p|$ با مقدار متوسط مستقل از زمان \hat{u}_p معادله نیرو بر حسب سرعت واقعی سیال u_p به صورت زیر بیان می شود:

$$F_p = \frac{1}{2} \rho C_D A_p \hat{u}_p u_p + \rho C_I B_p a_{px} - \rho C_D A_p \hat{u}_p \dot{U}_p - \rho(C_I - 1) B_p \ddot{U}_p \quad (7)$$

با استفاده از تئوری ایری و برای موجی به ارتفاع H ، تواتر ω و عدد موج k در آبی به عمق h سرعت افقی و شتاب در گره P به صورت زیر بیان می شود:

$$u_p = E_p \cos(kx_p - \omega t) \quad (8)$$

$$a_{px} = \omega E_p \sin(kx_p - \omega t) \quad (9)$$

$$E_p = \frac{\omega H \cosh(ky_p)}{2 \sinh(kh)} \quad (10)$$

x_p و y_p مختصات گره P را نشان می دهند. مبدا مختصات در کف دریا قرار دارد. در گره های بالاتر از سطح آب ($y > h$) برای اینکه به طور تقریبی نیروی موج وارده بر بخش مستغرق اعضا منظور شود، می توان $y = h$ قرار داد. با جاگذاری روابط فوق در فرمول نیرو می توان رابطه نهایی را به صورت زیر نوشت:

$$F_p = F_{0p} \sin(kx_p - \omega t + \phi_p) - \rho C_D A_p \hat{u}_p \dot{U}_p - \rho(C_I - 1) B_p \ddot{U}_p \quad (11)$$

$$F_p = F_{0p} \sin(kx_p - \omega t + \phi_p) - \rho C_D A_p \hat{u}_p \dot{U}_p - \rho(C_I - 1) B_p \ddot{U}_p \quad (12)$$

$$\tan \phi_p = \frac{C_D A_p \hat{u}_p}{2 C_I B_p \omega}, \quad 0 \leq \phi_p \leq \frac{\pi}{2} \quad (13)$$

فقط باید مقدار مناسبی برای \hat{u}_p تعیین شود. برای موج ایری مقدار \hat{u}_p به نحوی تعیین می شود که اختلاف $|u_p|u_p$ و $\hat{u}_p u_p$ بر مبنای انتگرال کمینه مربعات حداقل شود. در این حال انتگرال:

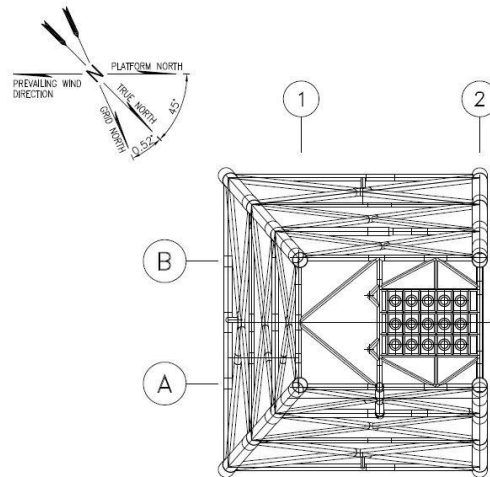
$$I = \int_0^{2\pi} \left(|u_p|u_p - \hat{u}_p u_p \right)^2 d\omega t \quad (14)$$

کمینه می شود. با استفاده از رابطه (۸) می توان دریافت که:

$$\hat{u}_p = \frac{8}{3\pi} E_p = 0.849 E_p \quad (15)$$

خلاصه مشخصات موج صدساله در خلیج فارس به قرار زیر می باشد. بحرانی ترین راستای موج غالب طراحی در جهت شمال غربی می باشد (شکل ۴). مشخصات امواج در این جهت عبارتند از:

ارتفاع موج برابر با ۱۲/۲ متر، دوره تناوب موج برابر با ۱۱/۰ ثانیه و طول موج برابر با ۱۹۰/۱ متر می باشد.



شکل ۳- پلان سکوی شابلونی فاز ۱۳ پارس جنوبی

۴. میراگر جرمی تنظیم شونده (TMD)

میراگر جرمی از سه بخش اصلی یعنی جرم، فنر و میراگر تشکیل می‌شود. این میراگر از طریق نوسان در حین اعمال بار دینامیکی بخشی از انرژی وارده را تلف می‌کند و به این ترتیب موجب کاهش نوسانات و تغییر شکل‌های سازه اصلی می‌شود. در واقع اساس کار میراگر جرمی بر مبنای استهلاک انرژی ارتعاشی سازه از طریق حرکت نوسانی جرم میراگر می‌باشد. معادله دیفرانسیل حرکت سازه یک درجه آزادی با جرم M ، سختی K و میرایی C که تحت یک نیروی متغیر در زمان مانند $P(t)$ قرار گیرد، به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = P(t) \quad (16)$$

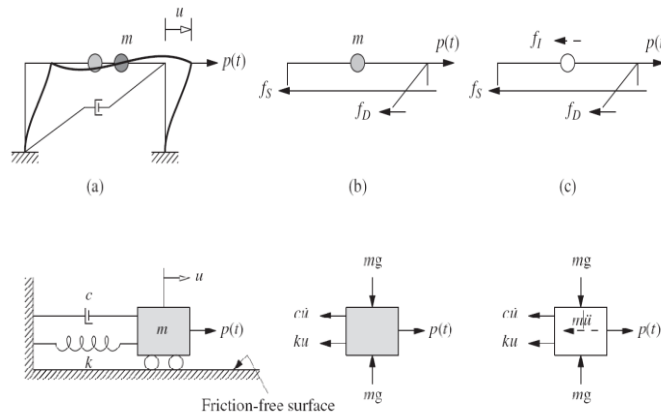
که در آن u تابع تغییر مکان نظیر درجه آزادی u و \ddot{u} مشتقات اول و دوم آن نسبت به زمان و بیانگر سرعت و شتاب جرم متمرکز در راستای درجه آزادی هستند. در شکل ۴ سازه یک درجه آزادی و مدل جرم و فنر آن و همچنین نیروهای اعمالی به آن‌ها نمایش داده شده‌اند. در صورتی که نیروی اعمالی به سازه ناشی از تحریک پایه (زلزله) باشد، تابع تغییر مکان کل درجه آزادی به صورت زیر خواهد بود:

$$u^i(t) = u_g(t) + u(t) \quad (17)$$

بنابراین معادله دیفرانسیل به صورت زیر نوشته خواهد شد:

$$M\ddot{u} + c\dot{u} + ku = -M\ddot{u}_g \quad (18)$$

پس از به کارگیری معادلات حاکم بر میراگر جرمی و مدلسازی میراگرهای مختلف، میراگر جرمی تنظیم شونده با درصد جرمی ۷ درصد و سختی ۲۷۱۳۶ کیلو نیوتون بر متر بهترین عملکرد را نسبت به سایر میراگرها داشته است.



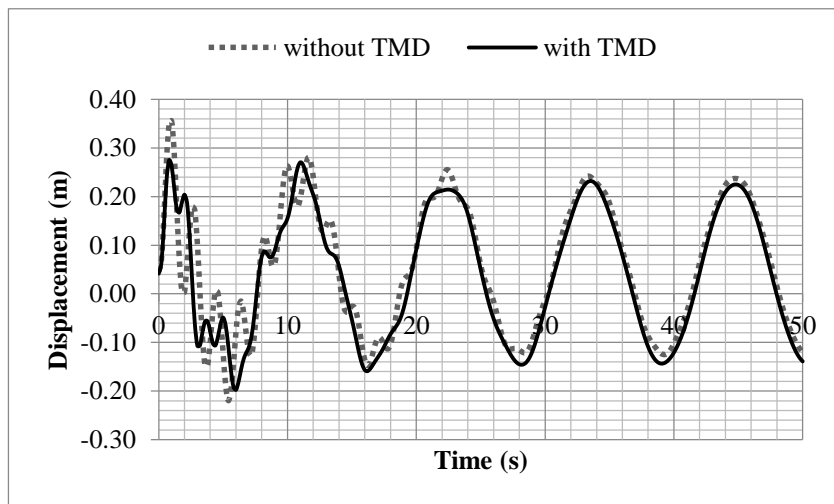
شکل ۴- نیروهای دینامیکی وارد بر سیستم یک درجه آزادی و مدلسازی آن با سیستم جرم-فنر-میراگر [۹]

۵. بحث و نتیجه‌گیری

در این بخش به طور کامل به ارائه و بررسی نتایج حاصل از تحلیل غیر خطی تاریخچه زمانی سکو تحت اثر موج طراحی ۱۰۰ ساله پرداخته می‌شود. هدف بررسی سکوی شابلونی تحت اثر امواج دریا می‌باشد. در ابتدا به تحلیل مودال سکو پرداخته که هدف تعیین فرکانس طبیعی و پریود طبیعی سازه‌ی سکو می‌باشد. با توجه به تحلیل‌های انجام‌شده، اولین مود با پریود طبیعی $T=1,770,174$ s مود غالب بر سازه می‌باشد. در ادامه با به-گارگیری میراگر جرمی تنظیم شونده مجدداً سکو تحلیل می‌شود و نتایج مورد مقایسه قرار می‌گیرد.

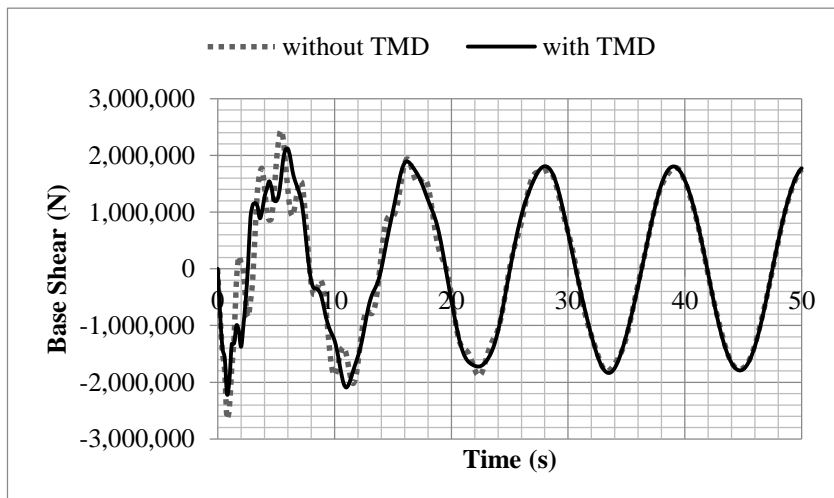
حال به بررسی نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی غیر خطی سکوی شابلونی فاز ۱۳ پارس جنوبی تحت اثر موج طراحی ۱۰۰ ساله در دو حالت با و بدون میراگر جرمی تنظیم شونده پرداخته و نتایج حاصله در شکل‌های ۶ و ۷ به صورت مقایسه‌ای آورده شده‌اند.

شکل ۵ تغییر مکان عرشه‌ی سکو در $+5/94$ متر در جهت امواج ۱۰۰ ساله را در حالت با و بدون میراگر نشان می‌دهد.



شکل ۵- تغییرات جابجایی عرشه سکو در جهت امواج ۱۰۰ ساله در تراز $+5/94$ میلی‌متر از LAT در برابر زمان در حالت با و بدون میراگر

شکل ۶ برش پایه سکو در طول بازه زمانی صفر تا ۵۰ ثانیه را در حالت با و بدون میراگر نشان می‌دهد.



شکل ۶- تغییرات برش پایه سکو در برابر زمان برای امواج ۱۰۰ ساله در حالت با و بدون میراگر



همانطور که مشاهده می شود نتایج به شرح زیر می باشد:

حداکثر جابجایی عرشه قبل از جاگذاری میراگر جرمی تنظیم شونده ۳۵/۲۶ سانتی متر اندازه گیری شده است و تمام جابجایی ها نسبت به این مقدار مقایسه می شود. اثرگذاری مربوط به میراگر جرمی تنظیم شونده با درصد جرمی ۷٪ و سختی ۲۷۱۳۶ کیلو نیوتون بر متر بهترین عملکرد را نسبت به سایر میراگرها داشته است و در بهترین حالت بیش از ۲۲ درصد حداکثر تغییر مکان عرشه را کاهش داده است. استفاده از میراگر جرمی بهینه می تواند برش پایه‌ی حداکثر سکوی فاز ۱۳ پارس جنوبی را به میزان ۱۶٪ کاهش داده و عملکرد سازه را بهبود بخشد.

۶. مراجع

۱. M. H. Patel. (۲۰۱۳) , “Dynamics of Offshore Structures,” Butterworths.
۲. صادقی، کبیر. (۱۳۶۸)، “ طرح و محاسبات سازه‌های دریایی، ” تهران: انتشارات جهاد دانشگاهی دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی.
۳. J. Penzien, M. K. Kaul and B. Berge. (۱۹۷۲), “ Stochastic response of offshore towers to random sea waves and strong motion earthquakes,” Journal of Computers and Structures, vol. ۲, pp ۷۳۳-۷۵۶.
۴. A. Elshafey, M. Haddara and H. Marzouk . (۲۰۰۹), “ Dynamic response of offshore jacket structures under random loads, ” Journal of Marine Structures, vol. ۲۲, pp ۵۰۴-۵۲۱.
۵. R. Ma, H. Zhang and D. Zhao. (۲۰۱۰), “Study on the anti-vibration devices for a model jacket platform, ” Journal of Marine Structures, vol. ۲۳, pp ۴۳۴-۴۴۳.
۶. National Iranian Oil Company. “Structural Design Premise and Brief of South Pars Gas Field Development Phase ۱۳ Offshore Platforms,”
۷. M. Budhu. (۲۰۰۸), “Foundations and earth retaining structures,” John Wiley & Sons
۸. Dawson, T. H. (۱۹۸۳), “ Offshore structural engineering, ”
۹. A. K. Chopra. . (۲۰۱۲) , “Dynamics of Structures: Theory and Application to Earthquake Engineering ,” Prentice Hall, ۴th Edition.