بررسی رفتار دینامیکی سکوهای فراساحلی شابلونی مجهز به سیستم میراگر مایع تنظیم شده تحت تحریک لرزه‌ای

حسن تفاخر [۱*]، حمید احمدی [۲]، محمدعلی لطف‌اللهی‌یقین [۳]

[۱] فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران دانشگاه تبریز؛ h_tafakhor@yahoo.com
[۲] استادیار، دانشکده مهندسی عمران دانشگاه تبریز؛ h-ahmadi@tabrizu.ac.ir
[۳] استاد، دانشکده مهندسی عمران دانشگاه تبریز؛ lotfollahi@tabrizu.ac.ir

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۰۳/۰۵
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۱۲/۰۲

کلمات کلیدی:
سکوی فراساحلی شابلونی (جکت)
سکوی SPD1
تحلیل دینامیکی
کنترل غیرفعال
میراگر مایع تنظیم شده (TLD)

چکیده

در این مقاله، کارآیی سیستم میراگر مایع تنظیم شده (TLD) در کنترل پاسخ‌های دینامیکی سکوهای فراساحلی شابلونی (جکت) تحت تحریک لرزه‌ای مورد بررسی قرار می‌گیرد. این میراگر که از یک یا چند مخزن حاوی سیال (عموماً آب) تشکیل شده قابل نصب روی عرشه سکو است. نیروهای هیدرودینامیکی که از تلاطم آب داخل مخزن به وجود می‌آیند، به عنوان نیروهای مقاوم در برابر ارتعاش، به کنترل پاسخ سازه کمک می‌کنند. در این تحقیق، یک سکوی شابلونی با ابعاد متناسب برای آب‌های خلیج فارس (سکوی SPD1 به عنوان مطالعه موردی)، تحت زلزله‌های طبس، ال‌سنترو و کوبه، در دو حالت با و بدون میراگر، با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود ANSYS، مدل‌سازی شده و سپس تحت تحلیل مودال و تاریخچه زمانی قرار گرفته است. پس از صحت‌سنجی مدل اجزای محدود و طراحی بهینه میراگرها، رفتار سازه در دو حالت با و بدون TLD مقایسه شده و نتایج به دست آمده مورد بحث مورد قرار گرفته‌اند.

Investigating the Dynamic Behavior of Offshore Jacket-Type Platforms Incorporated with the Tuned Liquid Damper (TLD) under Seismic Excitation

Hassan Tafakhor[1*], Hamid Ahmadi[2], Mohammad Ali Lotfollahi-Yaghin[3]

[1] MSc Graduate, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz; h_tafakhor@yahoo.com
[2] Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz; h-ahmadi@tabrizu.ac.ir
[3] Professor, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz; lotfollahi@tabrizu.ac.ir

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 26 May. 2014
Accepted: 21 Feb. 2016

Keywords:
Offshore jacket-type platform
Dynamic analysis
Passive control
Tuned Liquid Damper (TLD)

ABSTRACT

In the present paper, the effectiveness of Tuned Liquid Damper (TLD) in controlling the dynamic responses of offshore jacket platforms under earthquake excitation is investigated. This type of dampers consisting of one or more fluid (generally water) containers can be installed on the platform's deck. Hydrodynamic actions induced by the tilting of the water surface in the container act as resistant forces against vibration controlling the structural response. In this research, using FE-based software package ANSYS, a jacket structure having dimensions appropriate for the Persian Gulf climate (case study: SPD1 platform) was modeled and then dynamically analyzed by the modal and time-history approaches subjected to the records of Tabas, El Centro, and Kobe earthquakes. The TLDs were optimally designed and after the verification of FE results, the dynamic responses of the jacket-type platform with and without TLDs were compared.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-18]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.1.7]

۱ - مقدمه

بهره‌برداری از ذخایر نفت و گاز در دریا از مهم‌ترین کاربردهای سکوهای فراساحلی[1] است. سکوهای فراساحلی ثابت از نوع شابلونی (جکت)[2] به علت طراحی، حمل و نصب نسبتاً آسان در مقایسه با انواع دیگر سکوها، به طور وسیعی در مناطق با عمق آب کمتر از ۱۰۰ متر مورد استفاده قرار می‌گیرند. البته این نوع سکوها در مناطقی با عمق بیش از ۳۰۰ متر نیز نصب شده‌اند. سکوهای فراساحلی در معرض نیروهای محیطی ناشی از امواج دریا، جریان، باد، و زلزله قرار دارند. لذا کنترل لرزه‌ای این سازه‌ها جهت صرفه-جویی در مصالح مصرفی، افزایش عمر بهره‌وری، و افزایش قابلیت اعتماد[3] سازه در مواجهه با زلزله می‌تواند مورد توجه قرار گیرد. علاوه بر این، در مناطق با لرزه‌خیزی پایین که در معرض طوفان-های شدید قرار نداشته باشند، بسیاری از سکوها در برابر زلزله و بارهای حدی ناشی از امواج طرح در حاشیه اطمینان مناسبی قرار دارند؛ و در این شرایط، خستگی مسئله تعیین کننده در طراحی است. استفاده از سیستم کنترلی از طریق محدود کردن دامنه جابجایی‌ها، می‌تواند در افزایش عمر خستگی سازه نیز مفید باشد.

متداول‌ترین روش برای کنترل سازه‌ها در برابر نیروهای لرزه‌ای، استفاده از میراگرها یا سیستم‌های افزایش دهنده میرایی است که انرژی وارد بر سازه را جذب و مستهلک می‌کنند. میراگرها بر اساس مکانیسم عملکردشان به سه دسته فعال، نیمه‌فعال و غیرفعال[4] تقسیم می‌شوند. سیستم‌های غیرفعال از طریق اصلاح و بهبود رفتار دینامیکی سازه، یک میرایی غیرمستقیم به سازه اعمال می‌کنند. یک نوع از میراگرهای غیرفعال، سیستم میراگر مایع تنظیم شده (TLD)[5] می‌باشد که به دلیل هزینه نسبتاً کم و روش اجرای آسان نسبت به سایر میراگرهای غیرفعال، مورد توجه و استفاده بیشتری قرار گرفته است.

در این تحقیق، کارآیی میراگر مایع تنظیم شده در کنترل و کاهش ارتعاشات سکوهای فراساحلی شابلونی تحت تحریک زلزله مورد بحث قرار می‌گیرد. سیستم میراگر مایع تنظیم شده در سازه‌های فراساحلی به ندرت مورد استفاده قرار گرفته است. این میراگرها را که از یک یا چند مخزن حاوی سیال (عموماً آب یا نفت) تشکیل شده‌اند، می‌توان روی عرشه سکو نصب نمود. نیروهای هیدرودینامیکی که از تلاطم سیال داخل مخزن به وجود می‌آیند، به عنوان نیروهای مقاوم در برابر ارتعاش سازه عمل می‌کنند. در اثر تحریک سازه توسط نیروهای خارجی، سیال داخل مخزن در خلاف جهت حرکت سازه نوسان می‌کند و باعث می‌شود قسمتی از سیال، به صورت مواج، حرکت نوسانی انجام دهد و قسمتی دیگر از آن که نزدیک به کف مخزن است، حرکت صلب‌گونه داشته و به دیواره مخزن فشار ضربه‌ای وارد کند. برای این که حرکت سیال داخل مخزن بتواند جابجایی سازه را به مقدار قابل توجهی کاهش دهد، می‌بایست فرکانس نوسان مایع داخل مخزن نزدیک به فرکانس طبیعی نوسان سازه باشد، که از تحلیل مودال قابل تعیین است. بنابراین تنظیم نمودن فرکانس نوسان مایع داخل مخزن با فرکانس طبیعی سازه، یا به عبارت دیگر به دست آوردن محدوده نسبت فرکانسی که به ازای آن، دامنه حرکت سازه به مقدار قابل توجهی کاهش یابد، یکی از اهداف اصلی این تحقیق می‌باشد. در این پژوهش، پس از طراحی بهینه میراگرها، یک سکوی شابلونی با ابعاد متناسب برای آب‌های خلیج فارس (سکوی SPD1 به عنوان مطالعه موردی)، تحت زلزله‌های طبس، ال‌سنترو و کوبه، با و بدون میراگر، با استفاده از نرم افزار اجزا محدود ANSYS نسخه ۱۴، تحت تحلیل مودال و تاریخچه زمانی قرار گرفته است. پس از صحت‌سنجی مدل اجزای محدود، نتایج به دست آمده مورد بحث قرار گرفته و رفتار سازه در این دو حالت مقایسه شده‌اند.

۲- مرور پیشینه تحقیق

سیستم TLD به عنوان یک روش کنترل غیر فعال، اولین بار در سال ۱۹۰۹ مورد استفاده قرار گرفت. این سیستم شامل دو مخزن بود که تا نصف از آب پر شده و در یک کشتی قرار گرفته بودند [۱]. Sakai و همکاران [۲] پیشنهاد کردند سیستم مایع تنظیم شده به عنوان کنترل کننده نوسان در پل‌های کابلی استفاده شود. Carrier و Miles [۳] سیستم TLD را به عنوان میراکننده نوسان، در ماهواره‌ها و فضاپیماها مورد مطالعه قرار داده‌اند. این میراگرهای TLD که به میراگرهای متغیر نیز معروف شدند، به صورت یک حلقه پر از مایع بودند که به دور ماهواره‌ها و فضاپیماها قرار می‌گرفتند تا چرخش ماهواره حول محور استوانه‌ای را کاهش دهند.

اولین کاربردهای میراگر مایع تنظیم شده در سازه‌های روی خشکی در نیمه دوم دهه هشتاد و اوایل دهه نود میلادی با مطالعات افرادی همچون Modi و Welt [۴]، Kareem و Sun [۵]، و Fujino و Sun [۶] صورت گرفته است. اشکال هندسی مختلفی برای سیستم میراگر مایع تنظیم شده استفاده شده است که مهم‌ترین آن‌ها مکعب، استوانه و مخروط می‌باشند. از جمله Casciati و همکاران [۷] از یک مخزن به شکل مخروط ناقص به عنوان TLD استفاده نموده‌اند. Gao و Kwok [۸] تأثیر میراگر مایع ستونی تنظیم شده در اشکال U و Vبرای کنترل سازه‌ای و پارامترهای بهینه برای طراحی این نوع میراگر جهت حداکثر کاهش پاسخ سازه به تحریک هارمونیک را مورد مطالعه قرار دادند. Yalla و Kareem [۹] پارامترهای بهینه مشابهی برای سیستم میراگر مایع ستونی تنظیم شده در برابر تحریک تصادفی ناشی از امواج صوتی تعیین کردند. Olson و Reed [۱۰] سیستم میراگر

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.1.7]

مایع تنظیم شده با کف مخزن شیب‌دار را مورد مطالعه قرار داده‌اند. در این پژوهش، شیب کف مخزن ۳۰ درجه بوده است.

در صورتی‌که میراگر مایع تنظیم شده به صورت بهینه طراحی شده و در آن از ابزارهای افزایش میرایی استفاده گردد، میرایی ۵ تا ۱۵ درصد افزایش پیدا می‌کند. این افزایش میرایی، تأثیر بسزایی روی پاسخ دینامیکی خواهد داشت. Marvani و Hamed [۱۱] برای افزایش میرایی از شبکه‌هایی در راستای عمود بر جهت حرکت سیال داخل مخزن استفاده نموده‌اند. مزیت اصلی استفاده از این شبکه‌ها، سهولت دستیابی به میرایی بهینه مورد نیاز سازه می‌باشد که با تغییر فاصله بین شیارهای شبکه و یا تغییر ارتفاع آن میسر می‌شود. همچنین Tait [۱۲] سازه یک درجه آزادی مجهز به میراگر مایع تنظیم شده را به صورت سیستم سازه - جرم تنظیم شده معادل، تحت تحریک تصادفی و هارمونیک به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار داد. وی با استفاده از نتایج آزمایش‌های صورت گرفته روی مدل، رابطه‌ای برای میرایی ناشی از میراگر مایع تنظیم شده که در آن از سیستم‌های افزاینده میرایی برای رسیدن به میرایی مورد نیاز سازه استفاده شده بود، ارائه کرده است. رابطه ارائه شده توسط وی تطابق بسیار خوبی با روابط ارائه شده توسط سایر محققین برای میرایی ناشی از میراگر جرم تنظیم شده دارد.

Vandiver و Mitome [۱۳] برای کاهش ارتعاشات یک سکوی فراساحلی تحت اثر باد، از سیستم TLD استفاده نمودند. همچنین Yamamoto و Kawahara با استفاده از روش‌های عددی پژوهش‌هایی در زمینه تأثیر اندرکنش موج-سازه روی کنترل ارتعاش با استفاده از TLD انجام دادند [۱۴].

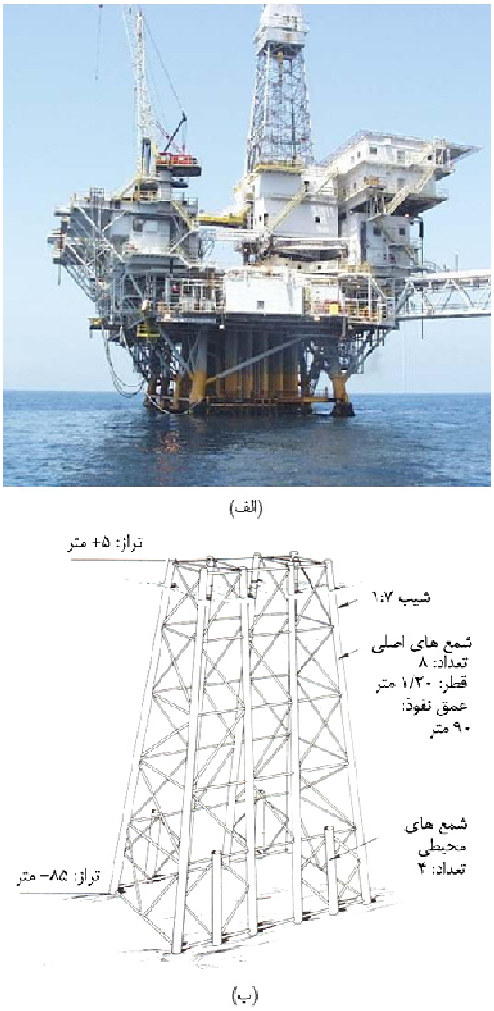
برای سایر روش‌های کنترل غیر فعال نظیر جداسازی می‌توان به عنوان مثال به مراجع [۱۵] تا [۱۷] اشاره نمود.

با توجه به مطالب اخیر، مشخص است که سیستم میراگر مایع تنظیم شده در سازه‌های فراساحلی به ندرت مورد استفاده قرار گرفته است. بنابراین بررسی طراحی میراگرهای مناسب به منظور استفاده در یک سکوی شابلونی با ابعاد متناسب برای آب‌های خلیج فارس و مقایسه پاسخ سکو در دو وضعیت با و بدون میراگر مایع تنظیم شده، حائز اهمیت بوده و می‌تواند در بر گیرنده نتایج مفیدی باشد.

۳- معرفی سکوهای شابلونی و میراگر مایع تنظیم شده

۳-۱- سکوهای شابلونی

از جمله متداول‌ترین سکوهای فولادی ثابت می‌توان به سکوی شابلونی (شکل ۱)، سکوی خود بالابر[۶] و برج مهارشده[۷] اشاره کرد. زیرسازه[۸] این سکوها، قاب‌های فضاکار بوده و از اتصال اعضائی تشکیل می‌شوند که عمدتاً از مقاطع دایروی توخالی (CHS) ساخته شده‌اند.



شکل۱- یک سکوی شابلونی متداول: الف) سازه در حال بهره‌برداری، ب) زیرسازه (جکت)

در محل تلاقی این اعضا، که یک اتصال لوله‌ای[۹] نامیده می‌شود، مقاطع انتهائی یک یا چند عضو مهاری[۱۰] به سطح خارجی عضو اصلی[۱۱] جوش می‌شوند.

۳-۲- میراگر مایع تنظیم شده (TLD)

در یک سیستم TLD به عنوان یک ابزار کنترل غیر فعال، از اثرات تلاطم آب در یک مخزن برای کنترل ارتعاش سازه استفاده می‌شود. میراگر مایع تنظیم شده برای اولین بار در اوایل قرن بیستم برای کنترل ارتعاشات ناشی از امواج دریا در کشتی‌های اقیانوس‌پیما استفاده شد و سپس در نیمه دوم قرن بیستم برای کنترل نوسانات آزاد با دوره تناوب بالا در ماهواره‌ها به کار رفت. از اواسط دهه هشتاد میلادی، میراگر مایع تنظیم شده برای کنترل ارتعاشات سازه‌های عمرانی به کار گرفته شد. نحوه بکارگیری این سیستم میراگر بدین ترتیب است که تعدادی مخزن در قسمت

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-18]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.1.7]

فوقانی سازه نصب می‌شوند و تلاطم مایع درون این مخازن انرژی ارتعاشی وارد به سازه را در هنگام زلزله یا تندباد مستهلک می‌کند. چنین تلاطمی موجب ایجاد تفاوت در رقوم سطح آزاد مایع در جداره‌های انتهایی مخزن می شود و اختلاف فشار ناشی از این تفاوت در رقوم، به صورت یک نیروی برشی در کف مخزن ظاهر می‌شود [۱۸]. در شکل ۲ نمونه‌ای از یک سازه مجهز به این نوع میراگر نشان داده شده است.

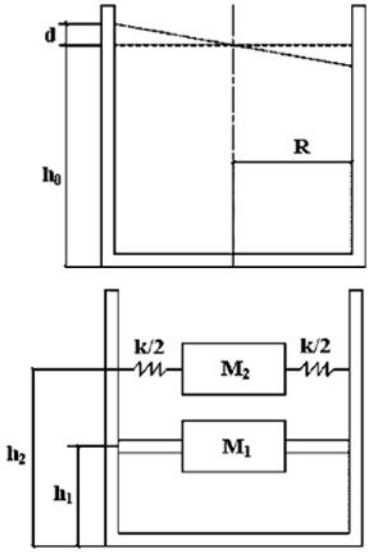
نیروی کنترلی که در این روش برای کاهش ارتعاشات سازه مورد استفاده قرار می‌گیرد، از فشار دینامیکی وارد بر سطح دیواره مخزن نشأت می‌گیرد. برای طراحی بهینه این سیستم‌ها، یعنی به منظور ایجاد کاهش قابل توجه در ارتعاشات سازه، تنظیم فرکانس میراگر باید بر اساس فرکانس مد اول ارتعاش سازه انجام شود. بنابراین مشخصات میراگر نظیر ابعاد مخزن و عمق آب داخل آن باید به گونه‌ای تعیین شوند که فرکانس تلاطم مایع درون مخزن با فرکانس ارتعاش سازه هماهنگ شود.

شکل۲- برج مسکونی One Rincon Hill مجهز به سیستم TLD

برای شبیه‌سازی رفتار میراگر مایع تنظیم شده در مدل‌های اجزا محدود، روش‌های ساده‌شده‌ای پیشنهاد گردیده که معروف‌ترین آن‌ها، روش جرم متمرکز و روش تئوری امواج خطی هستند. در روش جرم متمرکز، دیواره مخزن صلب فرض شده و فشار هیدرودینامیکی ایجاد شده در اثر تلاطم سیال داخل مخزن که ناشی از تحریک دینامیکی است، به دو صورت فشار ضربه‌ای و فشار نوسانی در نظر گرفته می‌شود. فشار ضربه‌ای متناسب با شتاب مخزن حاوی سیال ولی در جهت مخالف آن است. فشار نوسانی مربوط به ارتفاع موج تشکیل شده در سطح آزاد سیال بوده و تابع فرکانس نوسان سیال می‌باشد. فشارهای هیدرودینامیکی فوق‌الذکر به وسیله دو جرم متمرکز معادل متصل به دیوار مخزن در دو جهت مختلف، قابل جایگزینی می‌باشند [۱۹]. در شکل ۳، نمایی از این مدل پیشنهادی نشان داده شده است؛ که M_1 جرم متمرکز جهت شبیه‌سازی فشار ضربه‌ای و M_2 جرم متمرکز جهت شبیه‌سازی فشار نوسانی می‌باشد. در ادامه، روابط مربوط به محاسبه فرکانس نوسان سیال داخل مخزن به صورت خلاصه ارائه شده است [۱]:

$$M_1 = m\frac{h_0}{\sqrt{3}R}\tanh\left(\sqrt{3}\frac{R}{h_0}\right) \quad (۱)$$

$$M_2 = \frac{0.358R}{h_0}\tanh\left(\frac{1.837h_0}{R}\right) \quad (۲)$$



شکل ۳- روش جرم متمرکز برای شبیه‌سازی سیستم TLD

$$k = 5.4\frac{M_2^2 g h_0}{mR^2} \quad (۳)$$

$$h_1 = \frac{3}{8}h_0\left\{1+2\left[\frac{m}{M_2}\left(\frac{R}{h_0}\right)^2-1\right]\right\} \quad (۴)$$

$$h_2 = h_0\left[1-0.185\left(\frac{m}{M_1}\right)\left(\frac{R}{h_0}\right)^2-0.56\beta\frac{R}{h_0}\sqrt{\left(\frac{mR}{3M_1h_0}\right)^2-1}\right] \quad (۵)$$

در روابط اخیر، m جرم سیال داخل مخزن، h_0 ارتفاع سیال داخل مخزن، و R شعاع مخزن می‌باشد. برای محاسبه فرکانس نوسان سیال داخل مخزن از تئوری امواج خطی استفاده می‌شود که شامل بکارگیری معادلات پیوستگی و معادلات ناویر - استوکس مرتبه دوم می‌باشد. نتیجه نهایی به شکل زیر به دست می‌آید:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{\pi g}{a}\tanh\left(\frac{\pi h_0}{a}\right)}$$
$$f_w = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{\pi g}{a}\tanh\left(\frac{\pi h_0}{a}\right)} \quad (۶)$$

در رابطه (۶)، h_0 ارتفاع سیال داخل مخزن، g شتاب گرانش، ω_0 فرکانس زاویه‌ای بر حسب rad/s و f_w فرکانس بر حسب Hz است. مقدار a برای مخزن مستطیلی برابر طول مخزن و برای مخزن استوانه‌ای برابر قطر مخزن می‌باشد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-18]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.1.7]

۴- مدل‌سازی و تحلیل اجزای محدود

۴-۱- مشخصات مطالعه موردی

سکوی سرچاهی SPD1 که برای مطالعه موردی در این پژوهش انتخاب شده یکی از سکوهای دریایی فاز یک پارس جنوبی است. محل سرویس‌دهی این سکو که در آب به عمق ۷۰/۷ متر نصب شده است، در عرض جغرافیائی N"43 26 و طول جغرافیائی E"01 52 قرار دارد. سکوی SPD1 از سه بخش اصلی جکت، شمع‌ها و عرشه تشکیل شده است. عرشه این سکو با ابعاد ۲۸×۱۶ متر شامل سه طبقه Lower Deck با ارتفاع ۱۳ متر از سطح آب آرام، Mezzanine Deck با ارتفاع ۱۷/۵ متر از سطح آب آرام، و Top Deck با ارتفاع ۲۱ متر از سطح آب آرام است. این عرشه روی یک جکت شش پایه قرار دارد که توسط شش شمع که از داخل پایه‌ها کوبیده شده‌اند به بستر دریا متصل شده است. ابعاد پلان سکو در تراز بستر دریا ۲۳/۸×۳۸/۲۶ متر می‌باشد. حداکثر قطر پایه‌های سکو ۱/۵۳۴ متر بوده و کل جرم آن ۴۳۳۴ تن است.

۴-۲- مدل‌سازی جکت

برای مدل‌سازی اعضای جکت باید از المان‌هایی استفاده شود که قادر باشند اثرات نیروهای هیدرودینامیکی و همین طور جرم افزوده را در نظر بگیرند. در این پژوهش از المان PIPE59 نرم‌افزار ANSYS استفاده شده است.

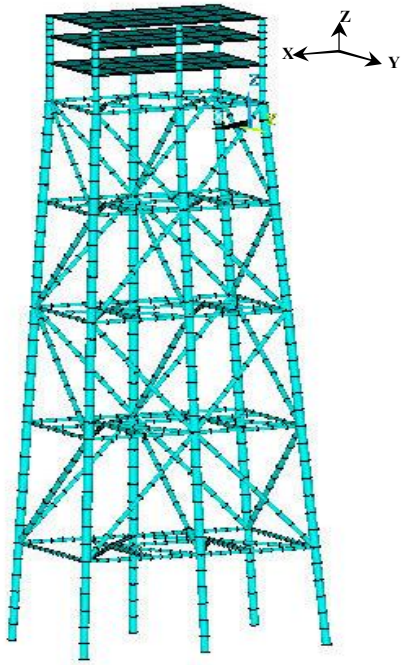
۴-۳- مدل‌سازی شمع‌ها

در تحلیل سکوهای ثابت شابلونی، اگر هدف از تحلیل، بررسی رفتار کلی سازه باشد، می‌توان از مدل‌های ساده شده جهت در نظر گرفتن اثرات متقابل شمع و خاک استفاده کرد. یکی از این روش‌های ساده‌سازی شده، روش طول معادل است. در این روش به جای مدل کردن طول کامل شمع و خاک اطراف آن، از یک شمع با طول معادل استفاده می‌شود. این شمع در انتهای خود گیردار در نظر گرفته می‌شود. به طوری که مشخصات سختی شمع معادل در تراز بستر دریا با مشخصات شمع واقعی یکسان باشند. برای سکوهای واقع در محل‌هایی که خاک آن‌ها از لایه‌های سست رسی تشکیل شده است، مقدار 8D تا 12D به عنوان طول معادل گیرداری پیشنهاد شده است که D قطر شمع می‌باشد. در این پژوهش، مقدار طول شمع نفوذ کرده در خاک برابر 12D در نظر گرفته شده که تقریباً برابر ۱۶/۵ متر می‌باشد. برای مدل‌سازی شمع‌ها از المان PIPE16 استفاده شده است. شمع‌ها در داخل پایه‌ها مدل شده‌اند و کلیه گره‌های آن‌ها با گره‌های پایه‌های سکو در راستای افقی کوپله شده‌اند. در نتیجه پایه‌ها و شمع‌ها در راستای افقی جابجایی یکسانی دارند.

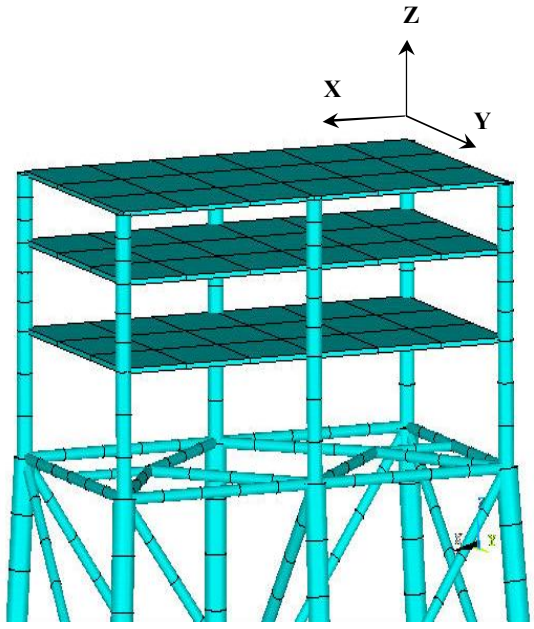
۴-۴- مدل‌سازی عرشه

برای مدل‌سازی عرشه سکو از المان‌های PIIPE16 و SHELL63 استفاده شده است. سیستم سازه‌ای عرشه، قاب پرتال بدون مهاربند می‌باشد. المان PIPE16 برای مدل‌سازی پایه‌های عرشه استفاده شده و وزن کل تجهیزات روی عرشه سکو به صورت بار گسترده سطحی با استفاده از المان SHELL63 لحاظ شده است.

در شکل‌های ۴ و ۵، به ترتیب نمایی از مدل هندسی کل سکو و نمای نزدیکی از عرشه آن ارائه شده است.



شکل۴- نمایی از مدل هندسی تولید شده برای سکوی SPD1 به وسیله نرم‌افزار ANSYS



شکل۵- نمایی از عرشه مدل هندسی سکوی SPD1 در محیط نرم‌افزار ANSYS

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-18]

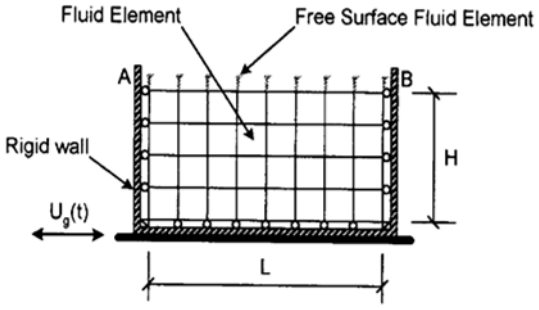
[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.1.7]

۴-۵- مدل‌سازی و طراحی بهینه میراگر مایع تنظیم شده

همان گونه که در بخش‌های قبلی بیان شد، از میراگر مایع تنظیم شده (TLD) جهت کاهش پاسخ‌های دینامیکی سکوی مورد مطالعه استفاده شده است. این میراگر از چهار مخزن مکعبی شکل فولادی با ابعاد ۲/۵×۳×۳ متر تشکیل شده است که تا ارتفاع ۱/۵ متری از آب پر شده و در عرشه‌ی فوقانی سکو قرار گرفته‌اند. علت انتخاب این ابعاد برای مخازن در ادامه این بخش تشریح خواهد شد. برای مدل‌سازی مخزن از المان SHELL63 استفاده شده است. این المان دو بعدی بوده و دارای چهار گره می‌باشد که هر گره آن سه درجه آزادی انتقالی و سه درجه آزادی دورانی دارد.

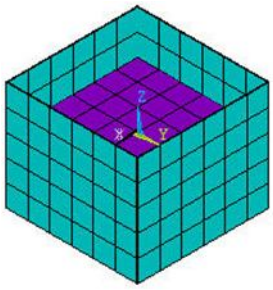
برای مدل‌سازی سیال داخل مخزن از المان FLUID80 استفاده شده است. این المان سه بعدی دارای هشت گره می‌باشد که هر گره آن دارای سه درجه آزادی انتقالی است. المان FLUID80 قابلیت در نظر گرفتن اثرات اندرکنشی سیال و جامد به وسیله محاسبه فشارهای هیدرواستاتیکی و هیدرودینامیکی را دارد. این المان، سیال را به صورت همگن، غیر ویسکوز، غیرقابل تراکم و غیرچرخشی در نظر می‌گیرد. مدول الاستیسیته در نظر گرفته شده در تعریف این المان، برابر با مدول بالک آب می‌باشد.

رفتار پیچیده سطح آزاد سیال، در المان FLUID80 با استفاده از تئوری امواج غیرخطی مدل شده و جهت حفظ پیوستگی سطح سیال، روی هر گره در سطح سیال یک فنر ثقلی در نظر گرفته شده است. برای لحاظ کردن اندرکنش مخزن و سیال، گره‌های سیال و مخزن که روی هم منطبق هستند، در راستای عمود بر یکدیگر کوپله شده‌اند (شکل ۶).



شکل۶- تصویر شماتیک مدل اجزای محدود دو بعدی مخزن حاوی سیال

همان طور که قبلاً اشاره شد، جهت افزایش تأثیر TLD در کاهش ارتعاش سازه، فرکانس مود اول نوسان سیال داخل مخزن می‌بایست مساوی فرکانس اصلی ارتعاش سازه باشد. در این پژوهش، برای طراحی میراگر مایع تنظیم شده و به دست آوردن مقادیر پارامترهای موثر در کارکرد آن، در ابتدا تحلیل مودال روی سکوی SPD1 انجام شد و فرکانس مود اول ارتعاش سازه برابر ۰/۴۸۸ هرتز به دست آمد. جهت به دست آوردن ابعاد مخزن حاوی سیال، نسبت ارتفاع آب داخل مخزن به طول آن برابر ۰/۵ فرض شد. سپس با استفاده رابطه (۶)، با قرار دادن فرکانس نوسان سیال برابر ۰/۴۸۸ هرتز، طول مخزن برابر ۳ متر به دست آمد. با استفاده از مقدار به دست آمده برای طول مخزن حاوی سیال، ارتفاع آب داخل آن نیز برابر ۱/۵ متر تعیین شد. سپس مخزنی با ابعاد ۲/۵×۳×۳ متر در نرم‌افزار ANSYS مدل شد که تا ارتفاع ۱/۵ متری از آب پر شده است. در شکل (۷)، نمایی از مدل اجزای محدود مخزن نشان داده شده است. با لحاظ کردن اندرکنش سیال و جامد به وسیله کوپله کردن گره‌هایی از سیال و جامد که روی هم قرار گرفته‌اند و همچنین انتخاب درجات آزادی اصلی برای سیال، مخزن حاوی سیال تحلیل مودال شد. مود اول نوسان سیال داخل مخزن برابر ۰/۴۷۸ به دست آمد که انطباق خوبی با مقدار به‌دست آمده از رابطه (۶) دارد. از آن جا که در نرم‌افزار ANSYS، برای المان FLUID80 تنها ماتریس جرم متمرکز در دسترس می‌باشد، لذا فقط روش Reduced برای تحلیل مودال مدل‌های ساخته شده با این المان قابل استفاده است. کارکرد روش Reduced مبتنی بر درجات آزادی اصلی است. این درجات آزادی در سطح سیال و جداره‌های مخزن انتخاب می‌شوند. استفاده از درجات آزادی اصلی باعث می‌شود ماتریس سختی دقیق و ماتریس جرم تقریبی باشد. برای سطح سیال، درجات آزادی اصلی تنها در راستای قائم در نظر گرفته شده و برای جداره مخزن نیز درجات آزادی اصلی تنها در راستای ارتعاش سازه انتخاب شده‌اند. تعداد درجات آزادی اصلی انتخابی، باید حداقل دو برابر تعداد مودهای مورد نظر در تحلیل مودال باشد [۲۰].



شکل ۷- مدل اجزای محدود میراگر مایع تنظیم شده

۴-۶- خصوصیات مصالح

مشخصات فولاد برای مدل‌سازی جکت و همچنین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی آب برای مدل‌سازی میراگر مایع تنظیم شده در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.1.7]

۴-۷- شتاب‌نگاشت‌های انتخابی و هم‌پایه کردن آن‌ها

برای تحلیل تاریخچه زمانی لازم است از یک سری رکوردهای زلزله متناسب با محل احداث سازه استفاده شود؛ که به عنوان بار جانبی در تراز پایه به سازه اعمال می‌شوند. این رکوردها می‌توانند جابجایی، سرعت و یا شتاب زلزله باشند. در این پژوهش، رکوردهای زلزله از وب‌سایت دانشگاه برکلی و به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که از لحاظ محتوای فرکانسی، مدت زمان تداوم زلزله، و خاک محل احداث، با ویژگی‌های محیطی محل نصب سکو سازگاری داشته باشند. توصیه می‌شود برای انجام تحلیل تاریخچه زمانی، حداقل سه شتاب‌نگاشت استفاده شود تا پاسخ‌های دقیق‌تری به دست آیند. شتاب‌نگاشت‌های مورد استفاده در این تحقیق، مربوط به زلزله‌های ال‌سنترو آمریکا (۱۹۴۰)، طبس ایران (۱۹۷۸)، و کوبه ژاپن (۱۹۹۵) می‌باشند.

اگر شتاب‌نگاشت‌ها هم‌پایه نگردند، با هر شتاب‌نگاشت پاسخ بسیار متفاوتی گرفته می‌شود که نتیجه‌گیری از تحلیل را مشکل خواهد کرد. در واقع، هم‌پایه کردن شتاب‌نگاشت‌ها پراکندگی پاسخ‌ها را محدودتر کرده و نتایج تقریباً سازگاری را به دست خواهد داد. از آن جا که در این تحقیق، هدف مقایسه مقادیر نسبی پاسخ‌ها می‌باشد، رکوردهای مذکور با مقادیر حداکثر خود هم‌پایه می‌شوند. بدین صورت که همه این رکوردها با مقدار شتاب بیشینه سطح شکل‌پذیری سکو یعنی 0.35g هم‌پایه شده‌اند.

جدول۱- خصوصیات فولاد و آب برای مدل‌سازی

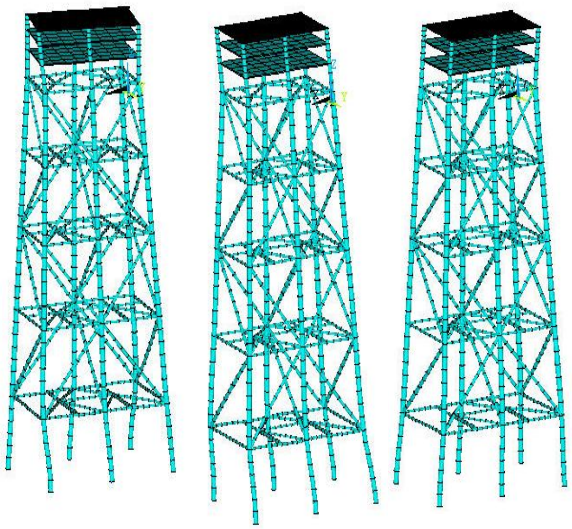
فولاد	
چگالی	kg/m3 ۷۸۵۰
مدول الاستیسیته	GPa ۲۱۰
نسبت پواسون	۰/۳
آب	
چگالی	kg/m3 ۱۰۰۰
مدول بالک	GPa ۲/۰۶۸

جدول۲- خصوصیات شتاب‌نگاشت‌های مورد استفاده

زلزله	بزرگی (M)	PGA (g)	گام زمانی (s)	مدت (s)
ال‌سنترو	۶/۹۵	۰/۲۱۵	۰/۰۱	۴۰
طبس	۶/۹	۰/۵۰۳	۰/۰۱	۴۰/۹۵
کوبه	۷/۴	۰/۸۵۲	۰/۰۲	۳۲/۸

۴-۸- تحلیل مودال

برای تعیین مودشکل‌ها و فرکانس‌های طبیعی ارتعاش آزاد سکو، روی مدل اجزای محدود سکوی SPD1 فاقد تانک‌های TLD، تحلیل مودال صورت گرفته است. از فرکانس‌های به دست آمده به منظور صحت‌سنجی مدل اجزای محدود، طراحی بهینه سیستم میراگر، و همچنین تعریف میرایی رایلی در تحلیل تاریخچه زمانی استفاده شده است. با مقایسه ده فرکانس اول مدل تولیدی با فرکانس‌های سکوی SPD1، که از مقاله Bargi و همکاران [۲۱] استخراج شده است، مشخص گردید که مدل اجزای محدود تولید شده از دقت کافی برخوردار است. برای این صحت‌سنجی، بیش از ۵۰ تحلیل برای سکو انجام شد. در شکل ۸ مودهای اول تا سوم ارتعاش سازه نشان داده شده‌اند. نتایج تحلیل مودال سکو و مقایسه آن با فرکانس‌های سازه واقعی در جدول ۳ ارائه شده است.



شکل۸- سه مود اول ارتعاش آزاد سکوی SPD1 غیر مجهز به TLD

به منظور صحت‌سنجی مدل تولید شده برای میراگر مایع تنظیم شده، پس از به دست آوردن ابعاد مخزن و همچنین ارتفاع آب داخل آن (طبق توضیحات بخش (۴-۵))، تحلیل مودال به روش Reduced روی مخزن حاوی سیال انجام گرفت. فرکانس مود اول نوسان سیال داخل مخزن برابر ۰/۴۷۸ هرتز به دست آمد که انطباق بسیار خوبی با فرکانس حاصل از رابطه تئوری (۶) دارد.

جدول۳- نتایج تحلیل مودال سکو

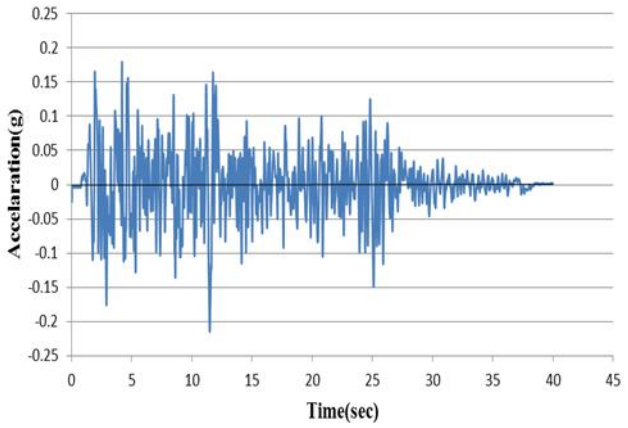
شماره مود	فرکانس مدل اجزای محدود (Hz)	فرکانس سکوی SPD1 [۲۱] (Hz)	اختلاف (٪)
۱	۰/۴۸۸	۰/۴۸۸	۰
۲	۰/۵۲۵	۰/۵۲۶	۰/۲
۳	۰/۷۹۵	۰/۶۵۸	۱۷
۴	۱/۴۶	۱/۲۲	۱۶
۵	۱/۴۹	۱/۳۳	۱۰
۶	۱/۷۹	۱/۸۹	۵
۷	۲/۳۹	۲/۰۰	۱۶
۸	۲/۶۹	۲/۰۴	۲۴
۹	۲/۸۹	۲/۱۳	۲۶
۱۰	۳/۰۵	۲/۱۷	۲۹

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-18]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.1.7]

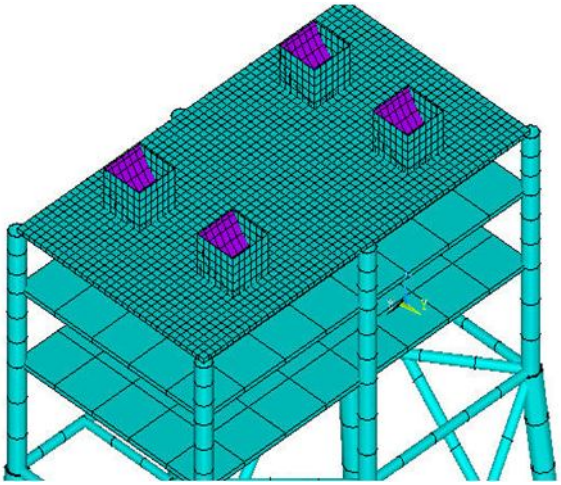
۴-۹- تحلیل تاریخچه زمانی

برای استفاده از شتاب‌نگاشت‌های انتخابی در تحلیل تاریخچه زمانی، این رکوردها توسط نرم‌افزار MATLAB به صورت یک فایل ستونی تنظیم شدند. از آن جا که مود اول نوسان TLD استفاده شده در این تحقیق، همانند مود اول نوسان سکو، در راستای محور Y است، بنابراین از مؤلفه‌های جهت Y سه زلزله انتخابی استفاده شده است. برای تحلیل تاریخچه زمانی سکو، رکوردهای مذکور به صورت تاریخچه شتاب در سطح گیرداری شمع‌های معادل به صورت تک مؤلفه افقی، از طریق یک فایل ماکرو، در راستای محور Y دستگاه مختصات مدل اعمال شده‌اند. به عنوان نمونه، مؤلفه عرضی شتاب‌نگاشت زلزله ال‌سنترو در شکل ۹ نشان داده شده است.

برای بررسی تأثیر میراگر مایع تنظیم شده روی پاسخ‌های دینامیکی سکوی SPD1، تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی در مقایسه با سایر روش‌ها، مناسب‌تر به نظر می‌رسد. در این تحقیق، سکوی مورد مطالعه در دو حالت با و بدون میراگر تحت تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی قرار گرفته است. در سکوی مجهز به میراگر مایع تنظیم شده، از چهار میراگر استفاده شده است که همه میراگرها در عرشه فوقانی سکو به طور متقارن قرار گرفته‌اند. در شکل ۱۰ سکوی SPD1 مجهز به میراگر مایع تنظیم شده نشان داده شده است. همان گونه که در این شکل دیده می‌شود، مود اول نوسان سیال داخل مخزن در جهت محور Y دستگاه مختصات سکو می‌باشد. در شکل ۱۰ سازه به سمت چپ حرکت کرده و سیال داخل مخزن به سمت راست نوسان نموده است. در واقع مطابق این شکل، سیال داخل مخزن در هر لحظه در خلاف جهت حرکت سازه نوسان کرده و باعث کاهش پاسخ‌های دینامیکی سکو می‌شود.



شکل۹- مؤلفه عرضی شتاب‌نگاشت زلزله ال‌سنترو

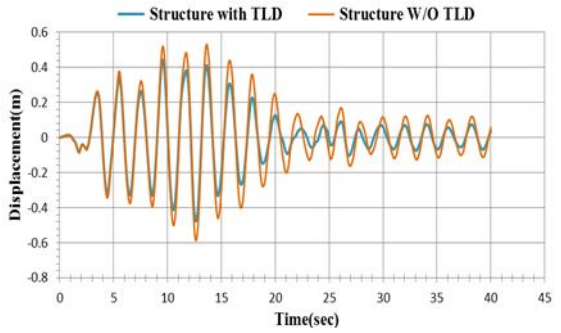


شکل ۱۰- ارتعاش سکوی SPD1 مجهز به TLD

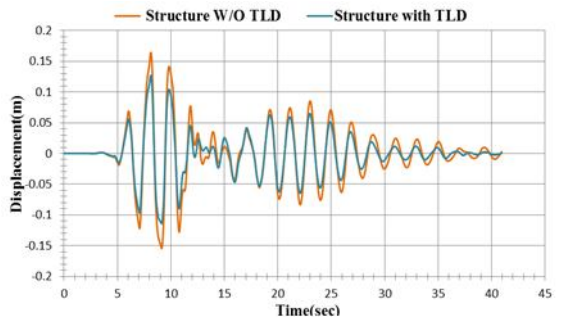
۵- نتایج و بحث

۵-۱- بررسی تأثیر TLD روی جابجایی عرشه فوقانی

تاریخچه زمانی جابجایی عرشه فوقانی سکو تحت تحریک اعمالی توسط شتاب‌نگاشت‌های زلزله‌های ال‌سنترو، کوبه، و طبس در شکل۱۱ برای سکو با و بدون میراگر مایع تنظیم شده ارائه شده است. مقادیر بیشینه جابجایی در دو وضعیت با و بدون میراگر نیز در جدول ۴ مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. همان طور که از شکل ۱۱ و جدول ۴ قابل مشاهده است، استفاده از سیستم میراگر مایع تنظیم شده می‌تواند منجر به کاهش قابل توجهی در میزان جابجایی عرشه فوقانی سکو گردد. با توجه به جدول ۴، میزان این کاهش در سکوی SPD1 بیش از ۲۰٪ بوده است.



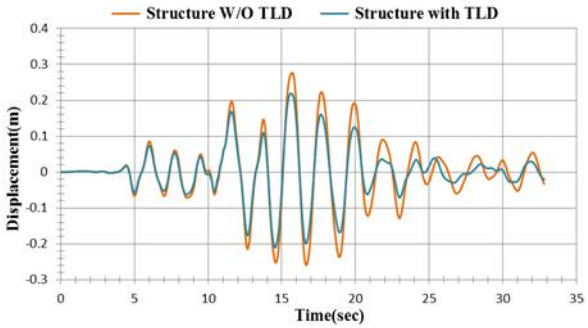
(الف)



(ب)

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.1.7]



(پ)

شکل۱۱- تاریخچه زمانی جابجایی عرشه فوقانی سکو برای حالت‌های با و بدون TLD تحت زلزله‌های:
الف) ال‌سنترو، ب) کوبه، و پ) طبس

جدول ۴- میزان تأثیرگذاری سیستم TLD روی مقدار جابجایی عرشه فوقانی سکو

زلزله	بیشینه جابجایی عرشه (m)		اختلاف (٪)
	بدون TLD	با TLD	
ال‌سنترو	۰/۵۳۰	۰/۴۱۲	۲۲
کوبه	۰/۱۶۴	۰/۱۲۷	۲۱
طبس	۰/۲۷۶	۰/۲۱۷	۲۱

۵-۲- بررسی تأثیر TLD روی برش پایه

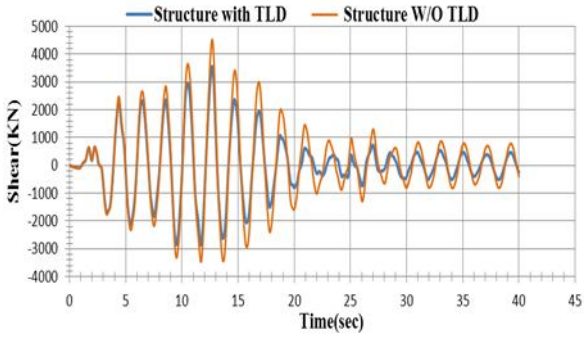
برش پایه سکو در تراز بستر دریا یکی از پارامترهای مؤثر در بررسی ایمنی و یکپارچگی سکو است. برش پایه زیاد در تراز بستر دریا باعث آسیب‌هایی همچون خرابی جانبی شمع‌ها در اثر تشکیل مفاصل پلاستیک و جاری شدن خاک اطراف شمع می‌شود.

تاریخچه زمانی برش پایه سکو تحت تحریک اعمالی توسط شتاب-نگاشت‌های زلزله‌های ال‌سنترو، کوبه، و طبس برای سکو با و بدون میراگر مایع تنظیم شده، استخراج و مقایسه شدند (شکل ۱۲). مقادیر بیشینه برش پایه در دو وضعیت با و بدون میراگر نیز در جدول ۵ مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. همان طور که از شکل ۱۲ و جدول ۵ قابل مشاهده است، استفاده از سیستم میراگر مایع تنظیم شده می‌تواند منجر به کاهش قابل توجهی در میزان برش پایه سکو گردد. با توجه به جدول ۵، میزان این کاهش در سکوی SPD1 بین ۱۰٪ تا ۲۱٪ متغیر بوده است.

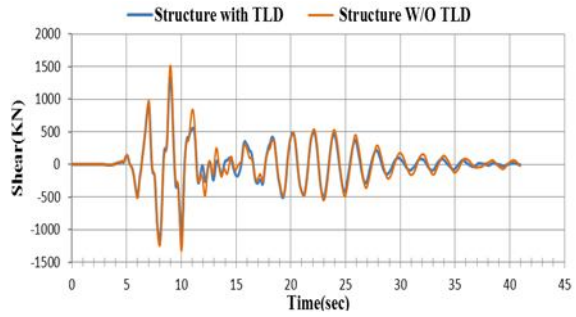
۵-۳- بررسی تأثیر TLD روی شتاب عرشه فوقانی

شتاب زیاد عرشه عمدتاً باعث تخریب قسمت‌های غیرسازه‌ای عرشه از قبیل تجهیزات و تأسیسات مختلف می‌شود. چنین خرابی‌هایی ممکن است باعث آسیب‌دیدگی پرسنل و همچنین نشت مواد مضر و آلودگی‌های زیست‌محیطی شوند.

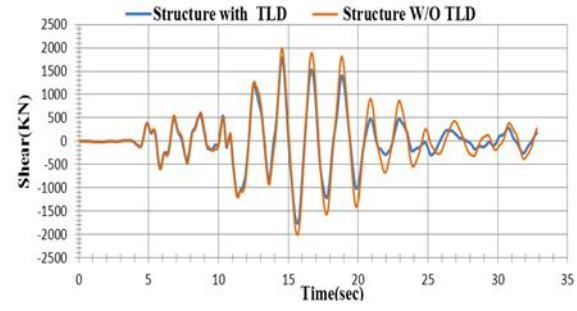
تاریخچه زمانی شتاب عرشه فوقانی سکو تحت تحریک اعمالی توسط شتاب‌نگاشت‌های زلزله‌های ال‌سنترو، کوبه، و طبس برای سکو با و بدون میراگر مایع تنظیم شده استخراج و مقایسه شدند. این تاریخچه‌های زمانی به علت رعایت محدودیت حجم مقاله ارائه نشده‌اند. مقادیر بیشینه شتاب عرشه فوقانی در دو وضعیت با و بدون میراگر نیز در جدول ۶ مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. همان طور که از این جدول قابل مشاهده است، استفاده از سیستم میراگر مایع تنظیم شده می‌تواند منجر به کاهش قابل توجهی در شتاب عرشه فوقانی سکو گردد. با توجه به جدول ۶، میزان این کاهش در سکوی SPD1 بین ۱۸٪ تا ۲۷٪ متغیر بوده است.



(الف)



(ب)



(پ)

شکل۱۲- تاریخچه زمانی برش پایه سکو برای حالت‌های با و بدون TLD تحت زلزله‌های:
الف) ال‌سنترو، ب) کوبه، و پ) طبس

جدول۵- میزان تأثیرگذاری سیستم TLD روی مقدار بیشینه برش پایه سکو

زلزله	بیشینه برش پایه (kN)		اختلاف (٪)
	بدون TLD	با TLD	
ال‌سنترو	۴۵۲۰	۳۵۵۶	۲۱
کوبه	۱۳۳۱	۱۱۷۱	۱۲
طبس	۱۷۸۶	۱۶۰۷	۱۰

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.1.7]

جدول۶- میزان تأثیرگذاری سیستم TLD روی شتاب بیشینه عرشه فوقانی سکو

زلزله	بیشینه شتاب عرشه (m/s2)		اختلاف (٪)
	بدون TLD	با TLD	
ال‌سنترو	۶/۱۹	۴/۵۱	۲۷
کوبه	۴/۳۵	۳/۵۷	۱۸
طبس	۳/۸۳	۳/۰۷	۲۰

۶- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این تحقیق، یک سکوی شابلونی با ابعاد متناسب برای آب‌های خلیج فارس (سکوی SPD1 به عنوان مطالعه موردی)، تحت زلزله‌های ال‌سنترو، کوبه، و طبس، در دو حالت با و بدون میراگر مایع تنظیم شده (TLD)، با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود ANSYS، مدل‌سازی شد و تحت تحلیل مودال و تحلیل تاریخچه زمانی قرار گرفت. پس از صحت‌سنجی مدل اجزای محدود و طراحی بهینه میراگرها، رفتار سازه در دو حالت با و بدون TLD مقایسه شد. نتایج به دست آمده می‌توانند در طراحی سکوهای جدید و همچنین بهسازی لرزه‌ای سکوهای موجود مفید باشند.

جهت افزایش تأثیر میراگر مایع تنظیم شده در کاهش ارتعاش سازه، فرکانس مود اول نوسان سیال داخل مخزن می‌بایست مساوی فرکانس اصلی ارتعاش سازه باشد. با توجه به این اصل، سیستم TLD بهینه پیشنهادی برای مطالعه موردی سکوی SPD1، مخزنی با ابعاد ۲/۵×۳×۳ متر است که تا ارتفاع ۱/۵ متری از آب پر شده است.

با توجه به نتایج به دست آمده، میزان تأثیرگذاری سیستم TLD روی پاسخ دینامیکی سکو تحت تحریک اعمالی توسط شتاب-نگاشت‌های زلزله‌های ال‌سنترو، کوبه، و طبس متفاوت است. در نتیجه می‌توان گفت میزان تأثیرگذاری سیستم میراگر مایع تنظیم شده روی پاسخ‌های دینامیکی، بستگی به محتوای فرکانسی زلزله دارد.

نتایج نشان می‌دهند استفاده از سیستم میراگر مایع تنظیم شده می‌تواند منجر به کاهش قابل توجهی در پاسخ‌های دینامیکی سکو گردد. میزان این کاهش در سکوی SPD1 برای بیشینه جابجایی عرشه فوقانی سکو، بیشینه برش پایه سکو، و بیشینه شتاب عرشه فوقانی سکو، به ترتیب حدود ۲۱٪، بین ۱۰٪ تا ۲۱٪ ، و بین ۱۸٪ تا ۲۷٪ به دست آمد.

۷- موضوعات پیشنهادی برای تحقیقات آتی

- با توجه به این که در عرشه فوقانی محدودیت فضا وجود دارد، قرار دادن TLD ها در عرشه تحتانی برای مقاصد عملی می‌تواند بسیار مفید باشد. پیشنهاد می‌شود تحقیق حاضر برای وضعیت نصب TLD ها در عرشه تحتانی تکرار گردد.
- در این پژوهش، از روش طول معادل برای مدل‌سازی شمع‌ها استفاده شده است. پیشنهاد می‌شود پژوهش حاضر، با لحاظ نمودن اندرکنش شمع و خاک تکرار گردد.
- پیشنهاد می‌شود اثر متقابل مخازن فراوری موجود در سکو با مخازن TLD نصب شده مورد بررسی قرار گیرد.

کلید واژگان

1. Offshore platform
2. Jacket-type platform
3. Reliability
4. Passive
5. Tuned liquid damper
6. Jack-up platform
7. Guyed tower
8. Substructure
9. Tubular joint
10. Brace
11. Chord

۷- مراجع

[1] Den Hartog, J.P. (1956), *Mechanical vibration*, 4th Edition, McGraw-Hill, New York, US.

[2] Sakai, F., Takaeda, S., Tamaki, T. (1989), *Tuned liquid column damper; new type device suppression building vibrations*, International Conference on High-Rise Buildings, Nanjing, China.

[3] Carrier, G.F., Miles, J.W. (1960), *On the annular damper for a freely precessing gyroscope*, Journal of Applied Mechanics, Vol. 27, 237-240.

[4] Modi, V.J., Welt, F. (1987), *Vibration control using nutation damper*, International Conference on Flow Induced Vibration, UK.

[5] Kareem, A., Sun, W.J. (1987), *Stochastic response of structures with fluid–containing appendages*, Journal of Sound and Vibration, Vol. 21, 389-408.

[6] Fujino, Y., Sun, L.M. (1992), *Tuned liquid dampers (TLD) for suppressing horizontal motion of structures*, ASCE Journal of Engineering Mechanics, Vol. 118, No. 10, 2017-2030.

[7] Casciati, F., De Stefano, F., Matta, E. (2003), *Simulating a conical tuned liquid damper*, Simulation Modeling Practice and Theory, Vol. 11, 353-370.

[8] Gao, H., Kwok, K.C.S. (1987), *Optimization of tuned liquid column dampers*, Engineering Structures, Vol. 19, No. 6, 476-486.

[9] Yalla, S.K., Kareem A. (2000), *Optimum absorber parameters for tuned liquid column*

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.1.7]

dampers, ASCE Journal of Structural Engineering, Vol. 125, No. 8, 906-915.

[10] Olson, D.E., Reed, D.A. (2001), *A nonlinear numerical model for sloped-bottom tuned liquid dampers*, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 30, 731-743.

[11] Maravani, M., Hamed, M.S. (2011), *Numerical modeling of sloshing motion in a tuned liquid damper outfitted with a submerged slat screen*, International Journal for Numerical Methods in Fluids, Vol. 65, 834-855.

[12] Tait, M.J. (2008), *Modeling and preliminary design of structure-TLD system*", Engineering Structures, Vol. 30, 2644-2655.

[13] Vandiver, J.K., Mitome, S. (1987), *Effect of liquid storage tank on the dynamic response of offshore platform*, Department of Ocean Engineering, Massachusetts Institute of Technology, US.

[14] Yamamoto, K., Kawahara, M., (1999), *Structural oscillation control using tuned liquid damper*, Computers and Structures, Vol. 71, 435-446.

[15] Malekzadeh, M., Taghikhany, T. (2010), *Adaptive behavior of double concave friction pendulum bearing and its advantages over friction pendulum systems*, Scientia Iranica, Transaction A: Civil Engineering, Vol. 17, No. 2, 81-88.

[16] Malekzadeh, M., Taghikhany, T. (2012), *Multi-stage performance of seismically isolated bridge using triple pendulum bearings*, Advances in Structural Engineering, Vol. 15, No. 7, 1181-1196.

[17] Moeindarbari, H., Malekzadeh, M., Taghikhany, T. (2014), *Probabilistic analysis of seismically isolated elevated liquid storage tank using multi-phase friction bearing*, Earthquakes and Structures, Vol. 6, No. 1, 111-125.

[۱۸] حیدرزاده، م.، زهرائی، س.م. (۱۳۸۳)، "بررسی تحلیلی میراگرهای مایع تنظیم شده برای کاهش ارتعاشات لرزه‌ای سازه‌ها"، اولین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران.

[19] Qiao, J., Xin, L., Ning, S., Jing Z., Jiong, G., (2007), *Experimental and numerical study on tuned liquid damper for controlling earthquake response of jacket offshore platform*, Marine Structures, Vol. 20, 238-254.

[20] Swanson Analysis Systems Inc. (2009), *ANSYS user manual*, Canonsburg (PA), US.

[21] Bargi, K., Hosseini, S.R., Tadayon, M.H., Sharifian, H. (2011), *Seismic response of a typical fixed jacket-type offshore platform (SPD1) under sea wave*, Open Journal of Marine Science, Vol. 1, 36-42.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1394.11.22.1.7]