بهسازی لرزه‌ای اسکله‌های شمع و عرشه به وسیله جداگرهای لرزه‌ای

جواد مهدوی[۱]، علی‌اکبر آقاکوچک[۲*]، علی کمک پناه[۳]

۱- کارشناس ارشد مهندسی عمران- سازه های دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
۲- استاد دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
۳- دانشیار دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

چکیده

یکی از مشکلات مشاهده شده در اسکله‌های شمع و عرشه هنگام وقوع زلزله، عملکرد نامناسب سازه‌هایی است که در آن‌ها از شمع مایل استفاده شده است. شمع‌های مایل به دلیل سختی بالا به کنترل تغییر شکل سازه کمک می‌کنند، ولی تمرکز نیروهای جانبی (به صورت نیروهای بزرگ فشاری و کششی) در آن‌ها باعث ایجاد آسیب‌های زیادی به خود شمع و عرشه‌ی متصل به آن می شود. در این مقاله استفاده از جداگرهای لرزه ای در محل اتصال شمع‌های مایل به عرشه به منظور بهبود عملکرد لرزه‌ای سازه‌های شمع و عرشه مورد بررسی قرار گرفته است.

به این منظور یک سازه شمع و عرشه نمونه دارای شمع های مایل انتخاب و مدل ۲ بعدی ازسازه و خاک با استفاده از قابلیت‌های نرم افزار OPENSEES ساخته شد. به منظور مدل سازی دقیق پدیده‌ی اندرکنش لرزه ای خاک- شمع- سازه، از مدل ۲ بعدی ستون خاک برای محاسبه ی پاسخ ساختگاه و فنرهای میانی p-y، t-z و Q-z استفاده شد. صحت سنجی مدل با استفاده از نتایج آزمایشگاهی صورت گرفت. جداگر لرزه ای لاستیکی با هسته‌ی سربی با قابلیت در نظر گرفتن تاثیر میزان بار محوری و تغییر شکل جانبی در خصوصیات جداگر مدل سازی شد. برای بررسی عملکرد لرزه ای سازه، تحلیل های تاریخچه زمانی برای ۷ زلزله و در ۲ سطح ۴۷۵ و ۲۴۷۵ ساله انجام گردید.

استفاده از جداگرهای لرزه ای در محل اتصال شمع‌های مایل باعث توزیع یکنواخت‌تر نیروهای محوری در همه‌ی شمع‌های مایل و قائم شد، همچنین به دلیل کاهش سختی و کاهش برش پایه و افزایش قابلیت جذب انرژی، مقادیر برش و لنگر در عرشه‌ی اسکله کاهش مناسبی داشت.

کلمات کلیدی: اسکله؛ شمع مایل؛ عملکرد لرزه ای؛ جداسازی لرزه ای؛ اندرکنش لرزه ای خاک-شمع-سازه

Improving Seismic Performance of Pile Supported Wharves Using Seismic Isolators

J. Mahdavy[1], A. A. Aghakouchak[2]*, A. Komakpanah[3]

1- M.Sc., Civil and Environmental Faculty, Tarbiat Modares University.
2- Prof., Civil and Environmental Faculty, Tarbiat Modares University.
3- Assoc. Prof., Civil and Environmental Faculty, Tarbiat Modares University.

Abstract

There are significant number of pile supported wharves around the world and this type of structures are commonly chosen for the construction of new waterfront port facilities. Batter piles have been used for a long time to resist large lateral loads from winds, water waves, impacts and earthquake. Their distinct advantage over vertical piles is that they transmit the applied lateral loads partly in axial compression and tension, rather than only through shear and

* نویسنده مسئول مقاله: A_agha@modares.ac.ir

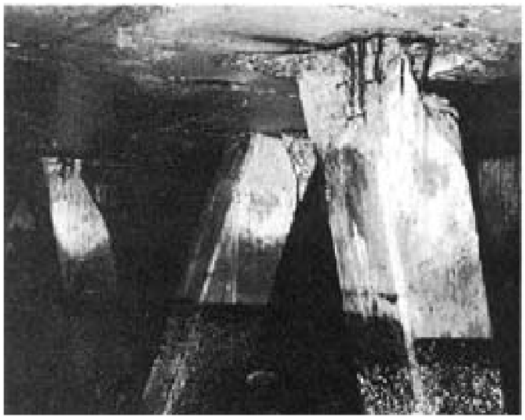
[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-05]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.16.6.9]

bending. Thus, batter piles offer larger stiffness and bearing capacity compared to vertical piles with the same diameter and depth. However, batter piles have been extensively damaged at several ports worldwide during past earthquakes.
This paper is focused on the application of seismic isolation devices for improving seismic performance of existing pile supported wharves with battered piles. To assess efficiency of this method, a structure with batter piles was selected to represent typical seismically vulnerable pile supported structures. The selected structure is analyzed using dynamic time history analysis taking into account the nonlinear behavior of structure components and soil–pile-structure interaction effects.
2D models of structure and soil are developed using OPENSEES platform. The soil is modeled using nonlinear elasto plastic elements and the soil pile structure interaction behavior is modeled using p-y, t-z and Q-z nonlinear spring elements. Models that include axial load effects in lead rubber bearing (LRB) isolator behavior are used. Time history analyses for 475 and 2475 years level have been carried out for existing and retrofitted structures.
The structures retrofitted by seismic isolators had longer period of vibration and increased damping both of which reduced the seismic base shear, axial force of battered piles for tension and compression and also moment and shear action in deck.
Keywords: seismic performance, pile supported wharves, batter pile, seismic isolation, soil-pile-structure interaction

۱- مقدمه

اسکله‌ها به عنوان مهم‌ترین اجزای پایانه‌های یک بندر در بهره‌دهی و عملکرد بنادر نقش بسیار مهمی دارند و کارایی آن‌ها در شرایط بحرانی مانند زلزله از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. زلزله‌های رخ داده در مناطق ساحلی جهان و آسیب‌های رخ داده در این سازه‌ها نشان دهنده ضعف روش‌های طراحی لرزه‌ای و لزوم بهسازی سازه‌های موجود بوده است. از میان گزینه‌های موجود برای طرح و اجرای اسکله، اسکله‌های شمع و عرشه به عنوان یکی از سازه‌های متداول در سراسر دنیا مورد استفاده قرار گرفته است.

شمع‌های مایل اغلب برای مقاومت در برابر بارهای جانبی مانند زلزله و ضربه‌ی کشتی مورد استفاده قرار می‌گرفتند. مزیت شمع‌های مایل عملکرد محوری آن‌ها در برابر عملکرد خمشی و برشی شمع‌های قائم دربارهای جانبی است. بنابراین شمع‌های مایل در مقایسه با شمع‌های هم اندازه و هم قطر قائم سختی جانبی بسیار بیشتری را ایجاد می‌کنند. علی‌رغم این مزیت، این شمع‌ها عملکرد مناسبی در زلزله از خود نشان نداده‌اند. در زلزله ی لوماپریتا، ۹۵ در صد کل شمع‌های مایل که حدود ۶۰۰ شمع را شامل می‌شدند در پایانه Street 7th اکثرا در نواحی سر شمع دچار ترک خوردگی و شکست شدند (شکل ۱). اما شمع‌های قائم، به جز تعداد محدودی، دچار خسارت نشدند. همچنین در پایانه هاوارد که به جای استفاده از شمع‌های مایل، از شمع‌های قائم و یا نزدیک به قائم استفاده شده بود، خساراتی در شمع‌ها مشاهده نشد[۱]. به همین دلیل استفاده از شمع‌های مایل در پروژه‌های جدید محدود گشته و آیین نامه‌های طراحی رویکرد محافظه کارانه‌ای در قبال استفاده از آن‌ها گرفتند.



شکل ۱- شمع های مایل آسیب دیده در پایانه 7th Street بندر اکلند[۱]

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-05]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.16.6.9]

البته مشاهداتی (هر چند محدود) وجود دارد که نشان دهنده‌ی رفتار بسیار مناسب شمع‌های مایل در زلزله در مواردی است که درست طراحی شده‌اند، می‌باشد[۱].

بیشتر خرابی‌های رخ داده در شمع‌های مایل مربوط به سازه‌های قدیمی است که بدون دانش و امکانات محاسباتی امروزی طراحی شده‌اند، بنابراین تعداد زیادی از سازه‌های شمع و عرشه با شمع مایل وجود دارد که احتمالا نیاز به بهسازی لرزه ای دارند. بهسازی این سازه‌ها با افزایش مقاومت اجزای آن (عرشه، اتصالات و شمع) از گزینه‌های مرسوم است. همچنین اصلاح و تغییر پاسخ‌های سازه با استفاده از روش‌های کنترل فعال، نیمه‌فعال و غیرفعال می تواند از گزینه‌های مطرح برای بهسازی این سازه‌ها باشد که در سال‌های اخیر مورد توجه محققان قرار گرفته است. هارن[۱] [۲] در پژوهش خود به بررسی دلایل ضعف روش طراحی بر اساس نیرو برای شمع‌های مایل پرداخته و مفهوم طراحی فیوز برشی بر مبنای جابجایی براساس آئین‌نامه‌ی MOTEMS را برای سیستم‌های شمع و عرشه ی شامل شمع مایل ارائه داد. کیلبورن[۲] و همکاران [۳] در پژوهش خود به ارزیابی لرزه‌ای سازه‌ی شمع و عرشه‌ی موجود با شمع‌های مایل پرداخته و به مقایسه‌ی تاثیر اضافه کردن شمع‌های مایل جدید و به‌کارگیری جداگرهای لرزه‌ای در سازه‌ی موجود به منظور بهبود عملکرد لرزه‌ای آن پرداختند. رضوی طباطبایی [۴] مشکلات شمع‌های مایل در عملکرد لرزه‌ای اسکله‌های شمع و عرشه و به کارگیری فیوز سازه‌ای جهت بهبود عملکرد لرزه‌ای اسکله‌های شمع و عرشه را مورد بررسی قرار داد. در این پژوهش به بررسی نحوه به کارگیری یک عضو شکل پذیر به عنوان فیوز سازه‌ای برای بهبود عملکرد لرزه ای و ایجاد یک خط دفاعی برای سایر اعضا پرداخته شده است. معماری و همکاران [۵] در پژوهش خود استفاده از فیوز سازه‌ای را برای بهبود عملکرد لرزه‌ای گروه‌های شمع دارای شمع مایل مورد بررسی قرار دادند. شبانکاره و همکاران [۶] در پژوهش خود به بررسی عملکرد لرزه‌ای دو اسکله‌ی موجود در بندر پتروشیمی پارس پرداخته‌اند. آن‌ها برای بهبود عملکرد لرزه‌ای سازه دارای شمع مایل از فیوز سازه‌ای پیشنهاد شده در مرجع [۴] استفاده کردند. موسوی و برگی [۷] استفاده از میراگرهای تسلیم شونده را به منظور بهبود عملکرد لرزه‌ای اسکله های شمع و عرشه مورد بررسی قرار دادند.

استفاده از جداسازهای لرزه ای به عنوان یکی از روش‌های کنترل غیر فعال سازه‌ها امروزه در ساختمان‌ها و پل‌ها کاربرد گسترده‌ای دارد، با این وجود استفاده از این روش برای بهبود عملکرد لرزه‌ای سازه‌های شمع و عرشه چندان مرسوم نیست. بیشتر ابزارهایی که تا به امروز مورد بهره برداری قرار گرفته است، سامانه‌های الاستومری، شامل الاستومرهای طبیعی و مصنوعی و همچنین سامانه‌های لغزشی با پوشش تفلونی و یا فولاد ضد زنگ می‌باشد. همچنین سامانه‌های ترکیبی از این دو سامانه نیز استفاده می‌شود.

در این مقاله کاربرد جداگرهای لرزه ای جهت بهبود عملکرد لرزه‌ای سازه‌های شمع و عرشه دارای شمع مایل مورد بررسی قرار گرفته است. به این منظور یک نمونه سازه شمع و عرشه دارای شمع مایل مدل سازی و با استفاده از تحلیل‌های تاریخچه زمانی مطالعه شده است.

۲- مدل سازی

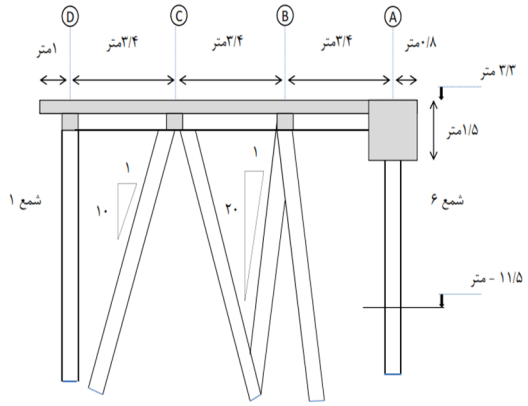
مدل سازی با استفاده از امکانات نرم افزار OPENSEES انجام گردید. برای مدل سازی سازه و خاک از اطلاعات و مشخصات سازه‌ای موجود در بندر بوشهر استفاده شد. در ادامه مشخصات و نحوه‌ی مدل سازی بخش‌های مختلف شرح داده شده است.

۲-۱- مشخصات سازه و خاک

اسکله بازرگانی مورد مطالعه با طول ۱۵۴/۸ متر و عرض ۱۲ متر، دارای ۴ پل دسترسی با طول‌های متغیر ۱۹/۲۵ تا ۲۹/۲۰ و عرض ۱۰ متر می‌باشد. ارتفاع سطح روی عرشه از تراز آب طراحی برابر ۳/۳ متر و عمق آبخور سازه برابر ۱۱/۵ متر بوده است. لایه‌بندی خاک بستر محل اسکله در جدول ۱ ارائه شده است. شمع‌ها

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-05]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.16.6.9]

از نوع فولادی با قطر خارجی ۱۸ اینچ با ضخامت ۱۲/۷ میلیمتر می‌باشند و تا عمق ۲۴ متر پایین تراز مبنا در خاک کوبیده شده‌اند (عمق نفوذ شمع‌ها برابر ۱۲/۵۰ متر است). سیستم عرشه اسکله از نوع تیر و دال بتنی می‌باشد. ضخامت دال ۳۵ سانتیمتر و ارتفاع تیرها ۸۰ سانتی متر می‌باشد. مقطع عرضی اسکله در شکل ۲ نشان داده شده است.



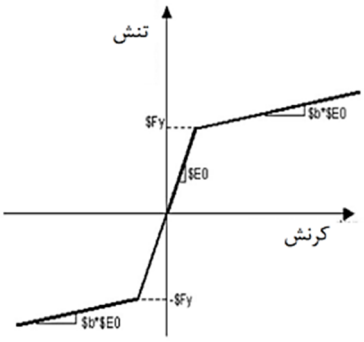
شکل ۲- مقطع عرضی اسکله بازرگانی مورد مطالعه[۸]

جدول ۱- مشخصات خاک بستر اسکله [۸]

تراز لایه خاک نسبت به C.D(متر)	چسبندگی زهکشی نشده (kg/cm2)	زاویه اصطکاک داخلی	نوع خاک	ارتفاع لایه (متر)
۰ تا ۱۰-	--	۳۰	ماسه با تراکم متوسط	۱۰
۱۰- تا ۱۵-	۰/۱	--	رس خیلی نرم	۵
۱۵- تا ۲۱-	۰/۵	--	رس سفت	۶
پایین‌تر از ۲۱-	--	۳۳	ماسه متراکم	~

۲-۲- مدل سازی سازه

به صورت کلی سازه‌ی اسکله را می‌توان به ۲ بخش روسازه بتنی (شامل تیر و دال بتنی) و شمع‌های لوله‌ای فولادی تقسیم بندی کرد. برای مدل‌سازی شمع‌های فولادی از مصالح فولادی الاستوپلاستیک که منحنی تنش کرنش آن در شکل ۳ نشان داده شده است استفاده شد. برای مدل‌سازی عرشه از نوع دال و تیر بتنی، از مصالح بتنی با مقاومت کششی صفر و قابلیت مدل سازی رفتار غیر خطی بتن و کاهش سختی در چرخه‌های بارگذاری و باربرداری استفاده شد. در شکل ۴ منحنی شماتیک تنش-کرنش برای این مصالح نشان داده شده است.



شکل ۳- منحنی تنش-کرنش مصالح فولادی شمع ها[۹]

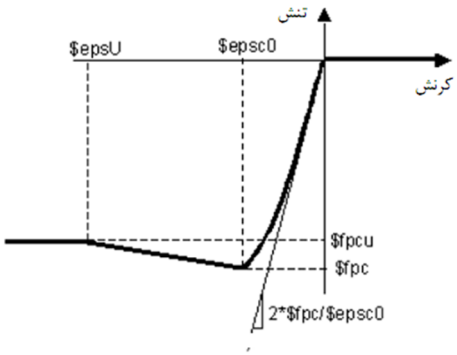
برای مدل‌سازی میلگردها از مصالح فولادی با قابلیت مدل‌سازی سخت‌شوندگی و نرم‌شوندگی فولاد استفاده شد. در شکل ۵ منحنی تنش-کرنش شماتیک این مصالح نشان داده شده است. تمامی المان‌های به کار برده شده برای مدل‌سازی سازه از نوع تیرستون غیرخطی با پلاستیسیته پیوسته و مقطع الیافی بوده‌اند. مقطع الیافی در نرم افزار OPENSEES از اجزای کوچکی که می توانند به شکل‌های ساده و منظم (دایره، مربع و مستطیل) باشند ساخته می‌شود و امکان مدل‌سازی مقاطع با اشکال مختلف را فراهم می سازد.

۲-۳- مدل سازی اندرکنش خاک-شمع-سازه

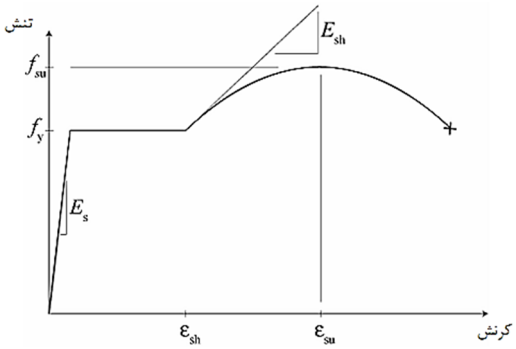
در شکل ۶ نمای شماتیکی از اجزای به کاربرده شده برای مدل‌سازی پدیده‌ی اندرکنش خاک-شمع-سازه نشان داده شده است. برای انجام تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی با در نظر گرفتن این پدیده مراحل زیر انجام شد:

- محاسبه‌ی پاسخ لایه‌های خاک تحت زلزله با استفاده از تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی ستون خاک
- اعمال پاسخ های ثبت شده در هر عمق به انتهای گیردار فنرهای میانی و تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی سازه

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-05]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.16.6.9]



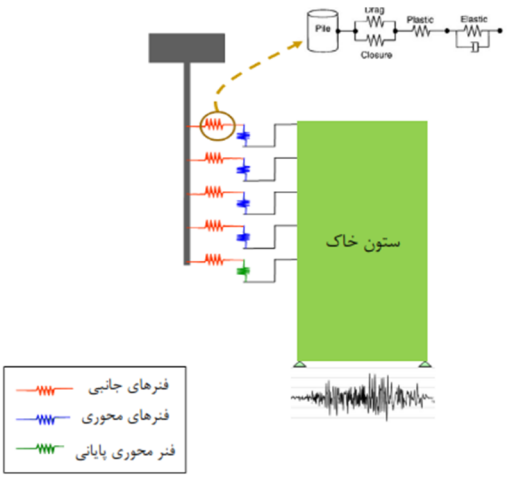
شکل ٤- منحنی تنش-کرنش مصالح بتنی عرشه[۹]



شکل ٥- منحنی تنش-کرنش مصالح فولادی میلگردهای داخل بتن[۹]

فنرهای معرف رفتار خاک را می‌توان به ۲ دسته فنرهای جانبی و فنرهای محوری تقسیم‌بندی کرد. برای مدل سازی رفتار خاک در برابر بارهای جانبی از المان Pysimple1 که بر اساس تحقیقات بولانگر[۳] در دانشگاه دیویس کالیفرنیا معرفی شده است استفاده شد [۱۰].

المان Pysimple1 که برای مدل کردن رفتار مجموعه خاک اطراف شمع و خود شمع استفاده می‌شود، مجموعه‌ای از فنرهای خطی و غیر خطی و میراگرهای غیرخطی می‌باشد. رفتار غیرخطی این المان از اتصال بخش‌های الاستیک $(p-y^e)$، پلاستیک $(p-y^p)$ و همچنین شکاف $(p-y^g)$ به‌صورت سری ناشی می‌شود. میرایی تشعشعی المان توسط یک میراگر که به صورت موازی با فنر الاستیک قرار گرفته، مدل شده است. مؤلفه شکاف نیز از یک فنر غیرخطی مانع[۲] و یک فنر غیرخطی Drag که به صورت موازی به یکدیگر متصل شده‌اند تشکیل شده است.



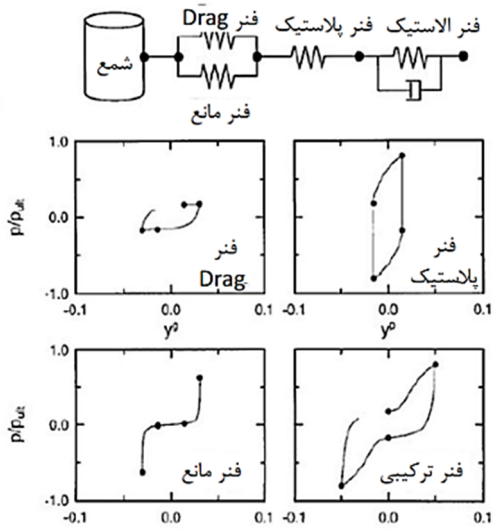
شکل ٦- اجزای به کاربرده شده برای مدل سازی پدیده‌ی اندرکنش خاک-شمع-سازه

در شکل ۷ مشخصات این اجزا نشان داده شده است. برای مدل کردن تغییر شکل‌ها و ظرفیت باربری قائم شمع که برابر مجموع اصطکاک جداره شمع[۴] و ظرفیت باربری انتهای شمع[۵] می‌باشد، از المان‌های Tzsimple و Qzsimple استفاده شد. برای اختصاص دادن نیروی اصطکاکی جداره در واحد طول شمع و مقاومت انتهایی شمع از آئین‌نامه API [۱۱] استفاده شد.

۲-۳-۱ ستون خاک

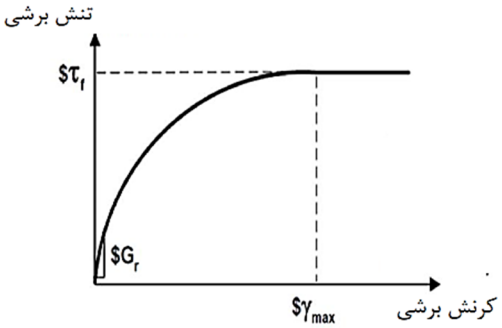
به منظور مدل‌سازی پاسخ ساختگاه، مدل ۲ بعدی از خاک محل بر مبنای کار مک‌گن[۶] [۱۲] ساخته شد. بر طبق توصیه‌های مرجع [۱۳] مدل سازی خاک‌های دانه‌ای با استفاده از مصالح با سطح تسلیم چندگانه وابسته به فشار[۷] که توانایی مدل‌کردن رفتار الاستوپلاستیک خاک‌های حساس دربرابر فشار تحت بارگذاری کلی را دارد، انجام شد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-05]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.16.6.9]



شکل ۷- اجزای تشکیل دهنده ی المان P-y [۱۰]

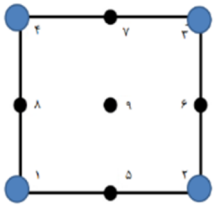
در شکل ۸ منحنی شماتیک تنش–کرنش این مصالح نشان داده شده است.



شکل ۸- نمودار شماتیک تنش-کرنش مصالح با سطح تسلیم چندگانه وابسته به فشار [۱۳]

برای مدل‌سازی خاک‌های چسبنده از مصالح با سطح تسلیم چندگانه مستقل از فشار استفاده شد. این مصالح نیز توانایی مدل سازی رفتار الاستوپلاستیک را دارد. برای مدل‌سازی لایه‌های مختلف خاک از المان ۹ نقطه ای استفاده شد. در شکل ۹ این المان نشان داده شده است. در این المان نقاط گوشه دارای سه درجه آزادی (جابجایی در دو جهت و فشار آب حفره ای) و بقیه نقاط دارای دو درجه آزادی (جابجایی در دو جهت) هستند، بنابراین این المان امکان ثبت تغییرات فشار آب حفره ای در حین بارگذاری را نیز علاوه بر تغییر شکل در دو جهت فراهم می‌کند.

به منظور مدل سازی اثر سنگ بستر لرزه ای از یک میراگر درپایین‌ترین تراز طبق پیشنهاد مرجع [۱۴] استفاده شد. ضریب میرایی (C) برای این میراگر بر طبق این رابطه محاسبه شد:



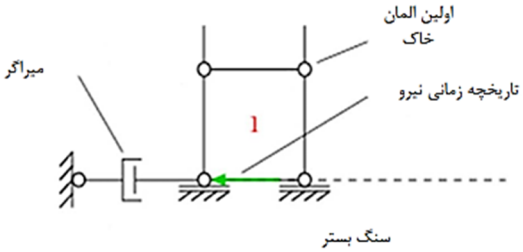
شکل ۹- المان ۹ نقطه ای خاک[۱۳]

$$C = \rho V_s \qquad (۱)$$

که در آن ρ چگالی و V_s سرعت موج برشی در سنگ بستر است. نیروی افقی ناشی از تحریک زلزله به صورت ضریبی از سرعت در پایین‌ترین تراز بر طبق روش چن و جوینر[۸] [۱۵] به صورت رابطه زیر اعمال شد:

$$f = \rho V_s \dot{y} \qquad (۲)$$

که در آن $\dot{y}$ تاریخچه زمانی سرعت زلزله در سنگ بستر است. درشکل ۱۰ نمای شماتیکی از نحوه‌ی مدل سازی اثر سنگ بستر و اعمال تحریک زلزله نشان داده شده است.



شکل ۱۰-نحوه‌ی مدل سازی اثر سنگ بستر و نیروی افقی زلزله[۱۲]

۲-۴- جداگر لرزه‌ای

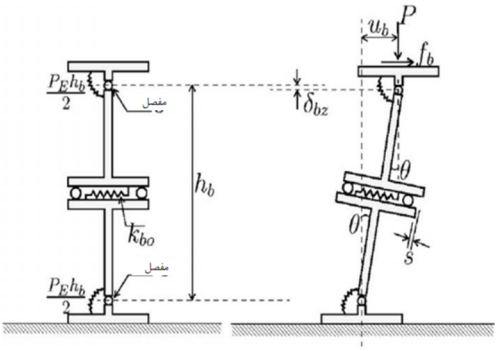
با توجه به نوع سازه و خورندگی محیط دریا جداگرهای لاستیکی برای انجام این پژوهش انتخاب گردیدند. ابزارهای پایه الاستومری به صورت کلی به دو

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-05]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.16.6.9]

دسته سامانه الاستومری با میرایی کم و میرایی زیاد دسته بندی می شوند. سامانه های الاستومری با میرایی کم دارای دو صفحه فولادی ضخیم در دو انتها می‌باشند و چندین صفحه فولادی نازک تر نیز در بین ماده الاستومری استفاده شده است.

جداسازهای هسته سربی نوع دیگر این سامانه‌ها می باشند که ساختار بسیار شبیه سامانه های الاستومری با میرایی کم دارند و یک یا چند هسته سربی برای تامین میرایی مورد نیاز در آن‌ها به کار رفته است. میزان کارآریی هسته سربی به میزان تغییر شکل سامانه بستگی دارد و هر چه تغییر شکل بیشتر باشد آن‌گاه میرایی سامانه بیشتر خواهد بود. سامانه‌های الاستومری با میرایی بالا هم نوع دیگری از این جداسازها می‌باشند و در این سامانه‌ها میرایی با کمک ویژگی الاستومر تامین می گردد و دیگر نیازی به میراگرهای جدید نمی‌باشد. مطالعات صورت گرفته روی رفتار جداگرهای لرزه‌ای نشان دهنده‌ی تأثیر میزان نیروی محوری در پاسخ آن‌ها است. در آزمایشات انجام شده روی انواع جداگرهای لرزه ای توسط کلی و دیگران[۹][۱۶] نشان داده شد که سختی سکانت جداگرها با افزایش نیروی محوری وارد برآن‌ها کاهش می‌یابد. همچنین جداگرهای لاستیکی در تغییر شکل‌های زیاد دچار کاهش سختی قائم شده و نقطه تسلیم هسته سربی در جداگرهای لاستیکی با هسته‌ی سربی نیز با نیروی محوری متناسب خواهد بود. مشاهدات نشان‌گر تسلیم زودتر هسته در مواردی است که بارگذاری محوری کمتر باشد. آزمایش انجام شده توسط سو و وانگ[۱۰] [۱۷] نشانگر تسلیم دیرتر و بنابراین جذب انرژی بالاتر به وسیله جداگرهایی بود که نیروی محوری بیشتری به آن‌ها وارد شده بود.

برای مدل‌سازی جداگرهای لرزه‌ای در نرم افزار OPENSEES از المان isolator2spring که توسط رایان[۱۱] و دیگران [۱۸] ارائه شده و توانایی مدل سازی رفتار یک جداگر لرزه‌ای را با قابلیت تاثیر میزان نیروی محوری و تغییر شکل جانبی در خصوصیات آن دارد استفاده شد. به صورت ساده این المان ترکیبی از اجزای صلب است که به وسیله فنرهای پیچشی و برشی به یکدیگر متصل شده‌اند (شکل ۱۱). رفتار محوری جداگر توسط فنر قائم (که در شکل ۱۱ نشان داده نشده است) مدل سازی می شود. رابطه ی بین نیرو و تغییر مکان افقی و قائم (طبق نامگذاری شکل ۱۱) را می توان به این صورت بیان کرد:



شکل ۱۱- مدل شماتیک المان جداگر لرزه ای [۱۸]

$$f_b - k_{bo}s + P\theta = 0 \quad (۳)$$

$$f_b h_b - P_E h_b \theta + P(h_b\theta + s) = 0 \quad (۴)$$

که در آن f_b نیروی برشی، k_{bo} سختی فنر برشی، s تغییر شکل فنر برشی، P_E نیروی محوری نهایی (بار کمانشی) جداگر و θ تغییر شکل زاویه‌ای جداگر است. رابطه‌ی نیروی محوری و تغییر شکل محوری را با استفاده از این رابطه بیان خواهد شد:

$$P - k_{bz}\vartheta = 0 \quad (۵)$$

که در آن k_{bz} سختی فنر قایم و ϑ تغییر شکل فنر قائم است. مقادیر نهایی تغییر شکل‌های قائم و برشی را می‌توان اینگونه محاسبه کرد:

$$u_b = s + h_b\theta \quad (۶)$$

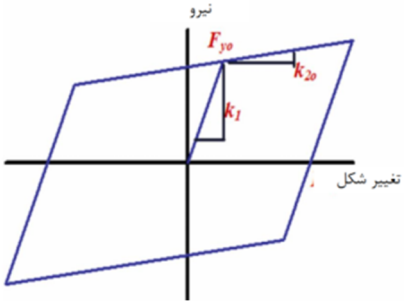
$$u_b = \vartheta + \delta_{bz} = \vartheta + s\theta + \frac{h_b}{2}\theta^2 \quad (۷)$$

که در آن u_b تغییر شکل جانبی جداگر است. مقادیر تغییر شکل‌های برشی (s) و پیچش (θ) با حل معادلات (۳) و (۴) قابل محاسبه بوده و با جایگزنی آن‌ها در معادله (۶) می توان رابطه ی نیرو و تغییر شکل در جداگر را به صورت زیر بیان کرد:

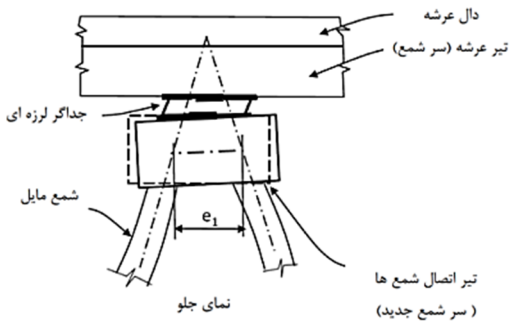
[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-05]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.16.6.9]

$$f_b=k_{bo}[1-\left(\frac{P}{P_{cr}}\right)^2]u_b \qquad (۸)$$

که در آن P_{cr} نیروی محوری کمانش جداگر است. به منظور مدل‌سازی رفتار غیر خطی جداگر، در این المان از فنر برشی با رفتار الاستو پلاستیک استفاده شده است. مقایسه ی نتایج این المان با نتایج آزمایشگاهی مرجع [۱۹] نشان دهنده‌ی دقت مناسب آن بوده است. جزئیات بیشتر در مورد این المان و چگونگی حل معادلات عددی آن در نرم افزار OPENSEES در مرجع [۱۸] در دسترس است. منحنی رفتاری شماتیک این المان در شکل ۱۲ و نحوه قرار گرفتن جداگرهای لرزه ای در محل اتصال شمع های مایل به عرشه در شکل ۱۳ نشان داده شده است.



شکل ۱۲- منحنی رفتاری المان جداگر لرزه ای [۱۸]



شکل ۱۳- نحوه قرار گرفتن جداگرهای لرزه ای

۳- صحت سنجی

همانگونه که در بخش مدل سازی بیان شد، المان جداگر لرزه‌ای به وسیله ی مرجع [۱۸] بررسی و نتایج آن مورد تایید قرار گرفته است.

جهت صحت سنجی مدل اندرکنش خاک-شمع-سازه از نتایج آزمایشگاهی ویلسون[۱۲] [۲۰] در دانشگاه دیویس[۱۳] کالیفرنیا استفاده شد. آزمایش‌های ویلسون در ۵ حالت بر اساس جنس خاک و رکورد ورودی تقسیم بندی شده‌اند.

در دسته اول که CSP1 نام‌گذاری شده است، خاک متشکل از دو لایه ماسه است. لایه بالایی به ضخامت ۶/۱ متر از ماسه با تراکم ۵۵٪ و لایه پایین به ضخامت ۱۱/۴ متر از ماسه با تراکم ۸۰٪ در نظر گرفته شده است. دسته دوم که CSP2 نام دارد، لایه بالایی خاک به ضخامت ۶/۱ متر از ماسه با تراکم ۳۵٪ تا ۴۰٪ و لایه زیرین به ضخامت ۱۱/۴ متر از ماسه با تراکم ۸۰٪ تشکیل شده است. در این حالت به علت تراکم کم ماسه سطحی امکان ایجاد روانگرایی بسیار زیاد است. دسته سوم که CSP3 نام دارد، شامل مدل‌هایی است که در آن‌ها لایه بالایی از ماسه با تراکم ۵۵٪ و لایه زیرین از ماسه با تراکم ۸۰٪ تشکیل شده است. در دسته چهار و پنج که CSP4 و CSP5 نام دارند لایه بالایی به ضخامت ۶/۱ متر از جنس رس عادی تحکیم یافته و لایه زیرین از ماسه با تراکم ۸۰٪ در نظر گرفته شده است. رس در این آزمایشات در چهار لایه قرار گرفته است که بین هر لایه غشایی نفوذ ناپذیری قرار گرفته است. نتایج این آزمایشات به صورت کلی با تمامی اطلاعات بدست آمده در سایت دانشگاه در دسترس عموم قرار گرفته است. قطر دستگاه سانتریفوژ موجود در دانشگاه دیویس، ۹ متر بوده و قابلیت وارد کردن شتاب گرانشی به مقدار 30g را دارا می‌باشد. ماسه مورد استفاده در این آزمایش‌ها ماسه‌های نرم و یکنواخت نوادا[۱۴] می‌باشد. رس مورد استفاده در این آزمایش‌ها بسیار نرم بوده و از جنس لجن خلیج سانفرانسیسکو است.

با توجه به وجود دو نوع خاک دانه‌ای و چسبنده آزمایش‌های چهار و پنج با شرایط سازه مورد مطالعه در این پژوهش شباهت بیشتری داشته و بنابراین از نتایج آزمایش شماره چهار جهت صحت سنجی مدل استفاده گردید. به جهت مقایسه نتایج و صحت سنجی مدل ، مدل عددی تک شمع و خاک مطابق خصوصیات آزمایش CSP4-Event A مرجع [۲۰] ساخته شد. خصوصیات پیشنهادی ویلسون جهت مدل کردن خاک

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-05]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.16.6.9]

مورد استفاده در آزمایش در جدول ۲و خصوصیات تک شمع در جدول ۳ ارائه شده است. نتایج در دو دسته کلی خاک و سازه شامل تاریخچه زمانی‌های شتاب خروجی در عمق‌های مختلف و تاریخچه زمانی جابجایی روسازه محاسبه شد که در شکل ۱۴ نشان داده شده است. اگرچه تفاوت‌هایی بین نتایج مدل عددی و آزمایشگاهی مشاهده می‌شود، که این امر را می‌توان در پژوهش‌های مشابه نظیر مراجع شماره [۲۱] و [۲۲] نیز مشاهده کرد، به دلیل رفتار غیرخطی و تعداد زیاد پارامترهای تاثیرگذار در رفتار دینامیکی خاک این سطح از دقت نتایج، مناسب در نظر گرفته شد.

جدول ۲- خصوصیات شمع مورد استفاده در آزمایش‌های ویلسون [۲۰]

جنس خاک	ماسه با تراکم ۸۰٪	رسی عادی تحکیم یافته
$\varphi\circ$	۴۰	-
$\gamma'(KN/m^3)$	۱۰/۱	۵/۲
$C_u/\sigma'\upsilon$	-	۰/۴۵
ε_{50}	-	۰/۰۱

جدول ۳- خصوصیات شمع مورد استفاده در آزمایش‌های ویلسون [۲۰]

جرم روسازه	۵۰۹۶۸ kg	ضخامت شمع	۱/۹ cm
عمق نفوذ شمع	۱۷/۵۰ m	قطر شمع	۶۷ cm
طول شمع	۲۰/۵۷ m	جنس	فولاد

۴- حرکات زمین

برای انجام تحلیل‌ها از ۷ شتاب نگاشت حوزه دور با بزرگای بزرگ‌تر از ۶ که روی سنگ بستر ثبت شده بودند استفاده شد. در جدول ۴ مشخصات این شتاب نگاشت‌ها نشان داده شده است. برای مقیاس کردن این شتاب نگاشت‌ها از طیف ارائه شده منطقه بوشهر برای خاک نوع ۱ در آیین نامه ۲۸۰۰ ایران [۲۳] استفاده شد.

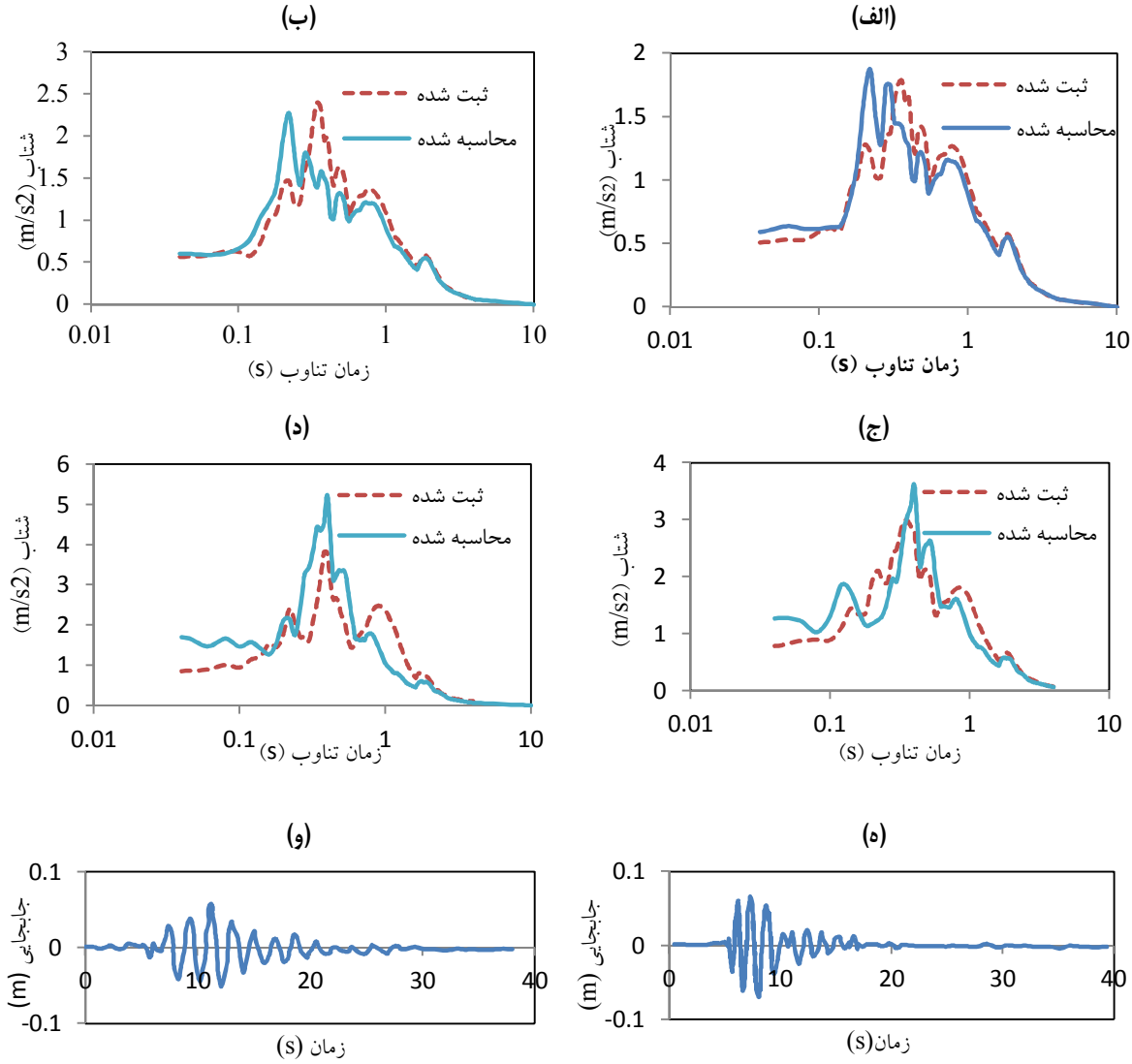
مقیاس کردن شتاب نگاشت ها بر طبق روش مرجع [۲۴] و برای تک تک شتاب نگاشت‌ها در محدوده۰/۲ برابر تا ۱/۵ برابر زمان تناوب اصلی سازه انجام شد. با توجه به اینکه طیف طراحی آیین نامه ۲۸۰۰ برای دوره بازگشت ۴۷۵ سال ارائه شده است، برای دوره بازگشت ۲۴۷۵ سال از ۱/۵ برابر طیف ۴۷۵ ساله استفاده شد.

۵- ارزیابی عملکرد لرزه‌ای سازه و بررسی نتایج

به‌منظور بررسی تاثیر به‌کارگیری جداگرها در عملکرد لرزه‌ای اسکله، ابتدا سازه موجود بدون جداگر و برای ۲ سطح تحلیل شده و عملکرد لرزه‌ای آن، مورد بررسی قرار گرفت. سپس جداگرهای لرزه‌ای در محل اتصال شمع های مایل به عرشه قرار داده شده و عملکرد لرزه‌ای سازه با وجود جداگرها مورد بررسی قرار گرفت.

برای بررسی رفتار سازه در برابر زلزله‌های اعمال شده به آن و بررسی عملکرد لرزه‌ای سازه موجود، نیروی محوری شمع‌ها، جابجایی عرشه، برش و لنگر ایجاد شده در عرشه‌ی مجاور شمع‌ها و برش پایه ایجاد شده در عرشه به‌عنوان پاسخ‌های لرزه‌ای سازه انتخاب شدند. به دلیل رفتار غیرخطی شالوده (شمع‌ها)، از روش طول معادل گیرداری برای محاسبه زمان تناوب سازه‌ی موجود استفاده شد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-05]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.16.6.9]



شکل ١٤-مقایسه نتایج ثبت شده در آزمایشگاه و محاسبه شده توسط مدل عددی، (الف): طیف پاسخ الاستیک با میرایی ٠/٠٥ ثبت شده و محاسبه شده در عمق١٤/٦ متری، (ب): طیف پاسخ الاستیک با میرایی ٠/٠٥ ثبت شده و محاسبه شده در عمق ١١/٣٠ متری، (ج): طیف پاسخ الاستیک با میرایی ٠/٠٥ ثبت شده و محاسبه شده در عمق ٤/٥٦ متری، (د): طیف پاسخ الاستیک با میرایی ٠/٠٥ ثبت شده و محاسبه شده در عمق ٣/٠٠ متری، (ه): نمودار جابجایی زمان ثبت شده برای روسازه، (و): نمودار جابجایی زمان محاسبه شده برای روسازه

جدول ٤- مشخصات حرکات زمین مورد استفاده

زلزله	PGA(g)	R(km)	بزرگا	ایستگاه	جنس خاک	تاریخ وقوع
Furiuli,Italy	٠/٠۴۴	٣۶/١	۶/١	Codroipo,FRIULI	سنگ بستر	١٩٧۶
Super Stitin Hilld	٠/١٢١	٢١/٠	۶/٧	Plaster City	سنگ بستر	١٩٨٧
Whittier Narrows	٠/٠۶٠	۵٢/۴	۶/٠	Vasquez Rocks	سنگ بستر	١٩٨٧
Loma Prieta	٠/٠٨٨	۴٧/٧	۶/٩	APEEL 7-Palgas	سنگ بستر	١٩٨٩
Cupe Mendocino	٠/١۵۴	۴۴/۶	٧/١	Eureka	سنگ بستر	١٩٩٢
Landers	٠/١١٠	١۴١/۶	٧/٣	San Gabriel	سنگ بستر	١٩٩٢
Chi-Chi, Taiwan	٠/٠٧٠	٧۵/١	٧/۶	ENA	سنگ بستر	١٩٩٩

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-05]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.16.6.9]

با توجه به رفتار غیر خطی جداگرهای لرزه‌ای، جهت محاسبه زمان تناوب سازه با جداگر از سختی معادل خطی آنها (که برای هر زلزله با توجه به جابجایی نهایی جداگر متفاوت خواهد بود) استفاده شد. بدیهی است به دلیل وابسته بودن سختی خطی معادل به ضریب مقیاس، محاسبه این دو پارامتر برای هر سطح زلزله به صورت سعی و خطا انجام گردید تا برای هر زلزله همگرایی مناسب حاصل گردید.

۵-۱- انتخاب پارامترهای جداگرهای لرزه‌ای و کنترل کفایت آن‌ها

خصوصیات جداگرهای لرزه ای مطابق با جدول ۵، با توجه به مشخصات جداگرهای موجود در صنعت و در حال ساخت انتخاب گردید. جهت بررسی تاثیر خصوصیات جداگرهای مورد استفاده در پاسخ لرزه ای سازه، دو نوع جداگر با مشخصات متفاوت مورد استفاده قرار گرفت. روش پیشنهادی در مرجع [۲۴] برای کنترل کفایت جداگرهای لرزه ای لاستیکی با هسته سربی به این شرح است:

- کنترل تنش برشی موجود در صفحات لاستیکی
- کنترل بار محوری جداگر
- کنترل جابجایی جداگر
- کنترل تنش در صفحات فلزی میانی
- کنترل تنش در صفحات فلزی انتهایی

برای کنترل کفایت جداگرهای لرزه ای در این پژوهش مقادیر بار محوری و جابجایی محاسبه شده و با مقادیر مجاز در هر زلزله مقایسه گریدند. بار محوری و جابجایی نهایی برای یک جداگر به این ترتیب قابل محاسبه خواهد بود:

$$P_{cr}=0.218\frac{GD_O^4(1-{D_i}/{D_O})(1-{D_i^2}/{D_O^2})}{tT_r(1+{D_i^2}/{D_O^2})} \qquad (۹)$$

$$D_{cr}=\frac{PD_O}{K_{eff}T_r+P} \qquad (۱۰)$$

که در آن G مدول برشی لاستیک، D_i قطر هسته سربی، D_o قطر جداگر لرزه ای، t ضخامت هر یک از لایه های لاستیکی، T_r مجموع ضخامت لایه های لاستیکی، K_{eff} سختی خطی معادل جداگر و P نیروی محوری جداگر است. پس از انتخاب جداگرها و کنترل کفایت آن‌ها زمان های تناوب و ضرایب مقیاس محاسبه شد.

جدول ۵- خصوصیات جداگرهای لرزه ای در حالات مختلف

	حالت ۱	حالت ۲
نیروی تسلیم هسته (kN)	۱۰	۲۰
سختی قبل از تسلیم (kN/m)	۲۰۰۰	۳۰۰۰
سختی بعد از تسلیم (kN/m)	۲۰۰	۳۰۰
بار محوری نهایی (kN)	۴۵۰	۷۰۰
ارتفاع جداگر(m)	۰/۲	۰/۲
سختی قائم جداگر(kN/m)	۵۰۰۰	۱۰۰۰۰

۵-۲- بررسی تاثیر به کارگیری جداگرهای لرزه ای در عملکرد لرزه ای سازه

برای بررسی رفتار سازه در برابر زلزله‌های اعمال شده به آن و بررسی تاثیر به‌کارگیری جداگرهای لرزه‌ای در پاسخ سازه، مقدار میانگین نیروی محوری شمع‌ها، جابجایی عرشه، بیشترین برش و لنگر ایجاد شده در عرشه و برش پایه عرشه به عنوان پاسخ‌های لرزه‌ای سازه، در سازه موجود با سازه‌ی همراه با جداگر در حالت‌های ۱ و ۲ محاسبه و مقایسه گردید.

۵-۲-۱- بررسی تاثیر به‌کارگیری جداگرها بر روی نیروی محوری شمع‌ها

مقادیر میانگین بیشترین نیروهای محوری شمع‌ها در جدول‌های شماره ۷ و ۸ نشان داده شده است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-05]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.16.6.9]

جدول ٦- زمان‌های تناوب و ضرایب مقیاس شتاب نگاشت‌ها

زلزله	سازه موجود		سازه با جداگر							
	زلزله ۲۴۷۵ ساله	زلزله ۴۷۵ ساله	زلزله ۲۴۷۵ ساله				زلزله ۴۷۵ ساله			
	ضریب مقیاس	ضریب مقیاس	زمان تناوب سازه		ضریب مقیاس		زمان تناوب سازه		ضریب مقیاس	
			حالت۲	حالت۱	حالت۲	حالت۱	حالت۲	حالت۱	حالت۲	حالت۱
Chi-Chi, Taiwan	۶/۴۵	۴/۳۰	۱/۷۵	۲/۶۲	۷/۷۰	۱۰/۰۰	۱/۶۶	۲/۵۰	۴/۸۵	۶/۳۰
Whittier Narrows	۱۷/۲۵	۱۱/۵۰	۱/۵۳	۲/۰۶	۳۳/۰۰	۴۷/۵۰	۱/۳۵	۱/۹۷	۱۸/۵۰	۲۹/۵۰
Cupe Mendocino	۸/۷۰	۵/۸۰	۱/۶۵	۲/۵۶	۱۴/۳۰	۲۶/۵۰	۱/۵۰	۲/۳۰	۹/۰۰	۱۴/۸۰
Loma Prieta	۴/۹۵	۳/۳۰	۱/۸۰	۲/۵۴	۶/۴۰	۷/۲۵	۱/۶۹	۲/۴۰	۴/۰۵	۴/۸۰
Landers	۲/۷۳	۱/۸۲	۱/۷۵	۲/۴۵	۳/۱۸	۳/۲۵	۱/۶۸	۲/۲۳	۲/۱۰	۲.۱۵
Furiuli,Italy	۱۵/۰۰	۱۰/۰۰	۱/۸۳	۲/۶۰	۱۶/۵۰	۱۵/۵۰	۱/۷۷	۲/۴۰	۱۱/۰۰	۱۰/۶۰
Super Stitin Hilld	۱۵/۴۰	۳/۶۰	۱/۵۶	۲/۴۰	۹/۲۰	۱۳/۲۰	۱/۴۵	۲/۲۰	۵/۸۵	۸/۰۰

در سازه موجود، بیشترین نیروی محوری شمع‌های مایل و قائم به ترتیب برابر با ۸۹۰ و ۲۳۱ کیلونیوتن در فشار و ۳۲۲ و ۴۸ کیلونیوتن در کشش بوده است. همانگونه که انتظار می‌رفت نیروهای جانبی در شمع‌های مایل متمرکز شده و شمع‌های قائم سهم چندانی از نیروهای جانبی ایجاد شده در اثر زلزله نداشته‌اند. با بررسی اعداد مربوط به نیروهای محوری در حالت‌های با جداگر می‌توان دریافت که کاربرد جداگرهای لرزه‌ای باعث توزیع بسیار مناسب‌تر نیروها در تمام شمع‌ها شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود در سازه با جداگر بیشترین نیروهای فشاری در شمع قائم شماره ۱ ایجاد شده و نیروی محوری شمع‌های مایل کاهش قابل ملاحظه‌ای داشته است. در این حالت بیشترین نیروی محوری شمع‌های مایل و قائم به ترتیب برابر با ۳۷۶ و ۴۳۷ کیلونیوتن در فشار و ۲۷۰ و صفر کیلونیوتن در کشش بوده است. افزایش سختی جانبی و قائم جداگر در حالت ۲ نسبت به حالت ۱، باعث افزایش نیروی محوری در شمع‌های مایل و کاهش نیروی محوری در شمع‌های قائم شده است.

جدول ۷- میانکین بیشترین نیروی محوری فشاری شمع‌ها (بر حسب کیلونیوتن)

		شمع۱	شمع۲	شمع ۳	شمع ۴	شمع ۵	شمع ۶
زلزله ۲۷۴۵ساله	سازه موجود	۲۳۱	۸۹۰	۷۹۹	۳۷۰	۴۲۱	۱۸۷
	سازه با جداگر- حالت۱	۴۳۷	۳۷۶	۳۲۰	۳۴۷	۳۲۷	۳۱۹
	سازه با جداگر- حالت۲	۳۵۳	۴۱۰	۳۵۶	۴۱۷	۳۹۹	۲۲۲
زلزله ۴۷۵ ساله	سازه موجود	۲۲۴	۷۳۰	۶۸۳	۳۴۱	۳۶۹	۱۷۰
	سازه با جداگر- حالت۱	۳۹۲	۲۷۱	۲۶۱	۲۹۷	۲۸۳	۲۷۵
	سازه با جداگر- حالت۲	۳۴۰	۳۳۱	۳۲۰	۳۵۱	۳۴۵	۲۱۳

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-05]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.16.6.9]

جدول ۸- میانگین بیشترین نیروی محوری کششی شمع‌ها (بر حسب کیلونیوتن)

		شمع۱	شمع۲	شمع ۳	شمع ۴	شمع ۵	شمع ۶
زلزله ۲۷۴۵ساله	سازه موجود	۴۸	۳۲۲	۲۷۷	۲۳۹	۲۵۶	۳۴
	سازه با جداگر- حالت۱	۰	۲۱۴	۲۷۰	۲۱۲	۲۲۷	۰
	سازه با جداگر- حالت۲	۰	۱۹۹	۲۴۳	۱۹۰	۲۲۳	۰
زلزله ۴۷۵ ساله	سازه موجود	۲۲	۲۸۰	۲۷۶	۱۸۵	۱۷۲	۱۳
	سازه با جداگر- حالت۱	۰	۱۳۴	۱۶۲	۱۳۲	۱۶۵	۰
	سازه با جداگر- حالت۲	۲	۱۵۶	۱۸۴	۱۵۳	۱۷۱	۰

۵-۲-۲- بررسی تاثیر به کارگیری جداگرها بر روی لنگر خمشی، نیروی برشی، جابجایی و برش پایه در عرشه

مقادیر میانگین بیشترین لنگر خمشی، نیروی برشی، جابجایی و برش پایه عرشه در جدول شماره ۹ نشان داده شده است.

در سازه موجود، بیشترین لنگر خمشی و نیروی برشی در عرشه به ترتیب برابر ۷۶۵ کیلونیوتن-متر و ۳۵۲ کیلو نیوتن بوده است. در سازه با جداگر این مقادیر به ترتیب برابر ۶۳۰ کیلونیوتن-متر و ۲۱۸ کیلو نیوتن در حالت ۱ و ۳۳۳ کیلونیوتن-متر و ۱۵۵ کیلو نیوتن در حالت ۲ بوده است. همانگونه که مشاهده می‌شود پاسخ های سازه با جداگر کاهش مناسبی داشته‌اند و در حالت ۲ و با افزایش سختی جانبی و قائم جداگرهای لرزه ای لنگر خمشی و نیروی برشی در عرشه به میزان قابل توجهی کاهش یافته است

بیشترین برش پایه در سازه موجود برابر با ۱۳۳ کیلونیوتن و در سازه با جداگر برابر ۶۹ کیلونیوتن در حالت ۱ و ۷۷ کیلونیوتن در حالت ۲ بوده است. کاربرد جداگرها باعث کاهش مناسب برش پایه سازه شده و همانگونه که انتظار می رود، افزایش سختی جانبی جداگرها در حالت ۲ نسبت به حالت ۱، موجب افزایش سختی جانبی سازه و به طبع آن، افزایش برش پایه سازه شده است. مقدار بیشترین جابجایی عرشه در سازه موجود برابر ۲۸ سانتی متر و در سازه با جداگر برابر۳۵ سانتی متر در حالت ۱ و ۳۳ سانتی متر در حالت ۲ بوده است. همانگونه که مشاهده می‌شود افزایش میزان جابجایی عرشه در حد قابل قبولی بوده است.

۶- نتیجه گیری

با توجه به رفتار نامناسب شمع های مایل در زلزله های گذشته، در این مقاله تلاش شد که با ارائه‌ی مدلی دقیق با در نظر گرفتن رفتار غیر خطی اجزا و اندرکنش خاک-شمع-سازه ایده‌ی به کارگیری جداگرهای لرزه‌ای جهت بهبود عملکرد لرزه‌ای این

جدول۹- میانگین بیشترین جابجایی عرشه، برش پایه ی عرشه، لنگر در عرشه و برش در عرشه

		نیروی برشی (کیلونیوتن)	لنگرخمشی (کیلونیوتن-متر)	برش پایه (کیلونیوتن)	جابجایی عرشه(سانتی‌متر)
زلزله ۲۷۴۵ساله	سازه موجود	۳۵۲	۷۶۵	۱۳۳	۲۸
	سازه با جداگر-حالت۱	۲۱۸	۶۳۰	۶۹	۳۵
	سازه با جداگر-حالت۲	۱۵۵	۳۳۳	۷۷	۳۳
زلزله ۴۷۵ ساله	سازه موجود	۲۸۵	۵۳۹	۱۰۹	۱۹
	سازه با جداگر-حالت۱	۱۸۱	۴۹۹	۵۳	۲۳
	سازه با جداگر-حالت۲	۱۵۶	۳۲۶	۶۰	۲۲

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-05]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.16.6.9]

سازه‌ها مورد بررسی قرار گیرد. با توجه به نتایج این پژوهش که بر روی یک نمونه از این سازه‌ها انجام شد، می توان بیان نمود که در این نوع سازه‌ها پاسخ شمع‌های مایل در زلزله به صورت ایجاد نیروهای بزرگ محوری کششی و فشاری خواهد بود. این نتیجه که با تحقیقات مشابه صورت گرفته کاملا هم خوانی دارد عمده ترین دلیلی است که باعث ایجاد خرابی‌های برشی در این نوع از سازه‌ها در زلزله‌های گذشته شده است.

کاربرد جداگرهای لرزه‌ای در محل اتصال شمع‌های مایل به عرشه باعث کاهش سختی جانبی، افزایش زمان تناوب سازه و بنابراین کاهش نیروی وارده از طرف زلزله به آن شده است. همچنین نتایج این پژوهش به خوبی نشان دهنده توزیع مناسب نیروهای محوری در تمامی شمع‌ها(مایل یا قائم) و جلوگیری از تمرکز نیروهای جانبی در شمع‌های مایل در سازه بهسازی شده هستند.

با نصب جداگرهای لرزه‌ای، به دلیل کاهش سختی سازه و افزایش قابلیت جذب انرژی در آن میزان برش پایه‌ی عرشه به مقدار قابل توجهی کاهش یافته و همچنین برش و لنگر ایجاد شده در عرشه نیز به میزان مناسبی کاهش یافته است، همچنین با افزایش سختی جداگرها، میزان جابجایی عرشه کاهش و میزان برش پایه‌ی سازه افزایش یافته و نیروهای محوری شمع‌های مایل افزایش پیدا کرده‌اند.

با توجه به نتایج می‌توان عنوان کرد که کاربرد جداگرهای لرزه‌ای در اسکله‌های شمع و عرشه می‌تواند به عنوان یک روش مناسب برای بهبود عملکرد لرزه‌ای سازه‌های موجود و برای به کارگیری در طراحی سازه‌های جدیدی که روسازه‌ی آنها کوتاه محسوب می شود، شناخته شود.

کلید واژگان

1- Harn
2- Kilborn
3- Boulanger
4- Skin Friction Capacity
5- End Bearing Capacity
6- McGann
7- Pressure Depend Multi Yield
8- Joyner
9- Kelly
10- Hwang and Hsu
11- Ryan
12- Wilson
13- Davis
14- Nevada

۷- مراجع

1-Gerolymos, N., Giannakou, A., Anastapoulos, I. and Gazetas, G., (2008), Evidence of beneficial role of inclined piles: observations and summary of numerical analyses, Bulletin of Earthquake Engineering, vol. 6, p. 705-722.

2-Harn, R., (2004), Have batter piles gotten a bad rap in seismic zones, Proceedings ASCE Ports, p. 23-26.

3-Kilborn, J., Harn, R., Firat, Yeliz, (2010), Seismic retrofit of piers supported on batterd piles using lead-rubber bearings, 12th Triannual International Conference-Ports: Building on the Past, Respecting the Future, p. 25-28.

4-Razavi, S.A., (2005), A study on the implementation of structural fuses for improving seismic performance of pile supported wharves, M.Sc thesis, Tehran (Iran): Tehran University. (in Persian)

5-Memari, M., Fakher, A. and Mirghaderi, S.R., (2010), Improving seismic performance of pile groups using fuses, Fourth International Conference of Geotechnical Engineering, Tehran. (in Persian)

6-Shabankare, M.A., Ketabdari, M.J., and Arabzade, H., (2010), Seismic evaluation of pile supported wharves, 9th International Conference on Coasts, Ports and Marine Structures (ICOPMAS), Tehran. (in Persian)

7-Mosavi, S.M., and Bargi, Kh., (2010), Metalic dampers for retrofit of pile-supported wharves, 9th International Conference on Coasts, Ports and Marine Structures (ICOPMAS), Tehran.

8-Mahdavi, J., (2012), A study on the implementation of seismic isolators in battered pile to deck connections for improving seismic performance of pile supported wharves, M.Sc thesis, Tehran

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-05]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.16.6.9]

(Iran): Tarbiyat Modares University. (in Persian).
9-Mazzoni, S., McKenna, F., Scott, M. H., and Fenves, G.L, (2006), OPNESEES command language manual, Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) Center, Richmond, California.
10-Boulanger, R. W, (2003), the Py simple material, http://opensees.berkely.edu.
11-American Petroleum Institute (API), (2000), Recommended practice for planning, designing, and constructing fixed offshore platforms. American Petroleum Institute.
12-McGann, Ch., Site response analysis of a layered soil column, http://opensees.berkely.edu.
13-Yang, Z and Lu, J and Elgamal, A, (2008), OPENSEES soil models and solid fluid fully coupled elements user manual, University of California, San Diego, San Diego, California.
14-Lysmer, J, (1978), Analytical procedures in soil dynamics, Report No. UCB/EERC-78/29, University of California at Berkeley, Earthquake Engineering Research Center, Richmond, California.
15-Joyner, W.B, and Chen, A.T.F, (1975), Calculation of nonlinear ground response in earthquakes, Bulletin of the Seismological Society of America, vol. 65, p. 1315-36.
16-Kelly, J. M., Buckle, I. G., and Koh, C. G, (1987), Mechanical characteristics of base isolation bearings for a bridge deck model test, Report No. UCB/ EERC-86/11, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California.
17-Hwang, J.-S., and Hsu, T. Y, (2000), Experimental study of isolated building under triaxial ground excitations, Journal of Structural Engineering, vol .126, p. 879-886.
18-Ryan, K. L., Kelly, J. M., and Chopra, A. K, (2005), Nonlinear model for lead–rubber bearings including axial-load effects, Journal of Engineering Mechanics, Vol. 131, p.1270-78.
19-Ryan, K. L., Kelly, J. M., and Chopra, A. K, (2004), Experimental observation of axial-load effects in isolation bearings, Proc., 13thWorld Conf. on Earthquake Engineering, Paper No. 1707, Canadian Association for Earthquake Engineering, Vancouver, British Columbia, Canada.
20-Wilson D. W, (1998), Soil-pile-superstructure interaction in liquefying sand and soft clay, Ph.D. thesis, University of Davis. Davis.
21-Kimiaei, M., Shayanfar, M. A., El Naggar, M. H., and Aghakouchak, A. A, (2004), Nonlinear response analysis of offshore piles under seismic loads, 13th World Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 3056, Vancouver, B.C., Canada.
22-Asgarian, B., Assareh, M. A., and Alanjari, P., (2008), Nonlinear behavior of single piles in jacket type offshore platforms using incremental dynamic analysis, American Journal of Applied Sciences, vol. 5, no.12, p. 1793-03.
23-Building and Housing Research Center, (2005), Iranian code of practice for seismic resistant design of buildings (standard no. 2800), Tehran, Iran.
24-Constantinou, M. C., Kalpakidis, I., Filiatrault, A., and Ecker Lay, R.A., (2011), LRFD-Based analysis and design procedures for bridge bearings and seismic isolators, Technical Report, University of California at Berkeley, Earthquake Engineering Research Center, Richmond, California.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-12-05]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1391.8.16.6.9]