

مقایسه‌ی عملکرد جداگرهای الاستومری متصل و غیرمتصل در جداسازی لرزه‌ی مخازن مایعات روزمینی

مسعود کاکه آذر (دانشجوی کارشناسی ارشد)

حمید توبیجی نژاد* (دانشیار)

دانشکده‌ی فنی و مهندسی عمران، دانشگاه رازی، کرمانشاه

مهندسی عمران شریف، (پاییز ۱۴۰۰)
دوره‌ی ۲ - ۳۷، شماره‌ی ۳/۲، ص. ۱۵-۲۵، (پژوهشی)

عملکرد جداسازهای الاستومری غیرمتصل مسلح به الیاف (UFREI) و جداگرهای الاستومری متصل مسلح به صفحات فولادی (SREI) در بهبود رفتار لرزه‌ی مخازن نگهدارنده‌ی مایعات مطالعه و مقایسه شده است. مخزن آب جداسازی شده به صورت مدل جرم و فنر با ۳ درجه‌ی آزادی، شامل: جرم موج، جرم نوسانی و جرم صلب معادل سازی شده و تحت شتاب‌نگاشت‌های تک‌محوری افقی، تحلیل تاریخی‌چهره‌ی زمانی شده است. نتایج نشان دادند که کاربرد هر دو نوع جداگرها در کاهش قابل توجه نیروی برشی در مخازن اثرگذار بوده و از طرفی موجب افزایش جابه‌جایی در جرم موج شده است. در خصوص مقایسه‌ی دو نوع جداگر مشاهده شد که جداگرهای UFREI در مخازن لاغر به طور متوسط به میزان ۳۳/۵٪ و در مخازن پهن به طور متوسط به میزان ۲۳/۹٪ نسبت به جداگرهای SREI در کاهش بیشینه‌ی نیروهای برشی مؤثرتر ظاهر شده‌اند و تفاوت معناداری در میزان بیشینه‌ی جابه‌جایی جرم موج در دو نوع جداگر مذکور وجود ندارد.

واژگان کلیدی: مخازن ذخیره‌ی مایعات، جداسازهای الاستومری، جداسازهای الیافی غیرمتصل الاستومری، سیستم دینامیکی جرم و فنر، تحلیل تاریخی‌چهره‌ی زمانی.

masoud.azar.1987@gmail.com
h.toopchinezhad@razi.ac.ir

۱. مقدمه

مخازن نگهدارنده‌ی مایعات، شامل: آب، نفت، گاز مایع و میعانات صنعتی، عمدتاً در گروه سازه‌های با اهمیت بسیار زیاد و در مواردی در رسته‌ی شریان‌های حیاتی کشورها قرار می‌گیرند. آسیب‌دیدگی مخازن مایعات در اثر زلزله می‌تواند منجر به بروز انفجار و آتش‌سوزی، انتشار مواد سمی، عدم دسترسی به آب شرب و تحمیل خسارت‌های جبران‌ناپذیر شود. از این رو، ارائه‌ی راهکارهای عملی جهت کمیته‌سازی آسیب‌دیدگی در اثر زلزله در مخازن، اهمیت ویژه‌ی دارد.

جداسازی لرزه‌ی از جمله روش‌های غیرفعال کنترل ارتعاش‌های لرزه‌ی در سازه‌هاست، که در دهه‌های اخیر در انواع سازه‌ها استفاده شده و مزایای فنی آنها به اثبات رسیده است. با وجود این، هزینه‌های قابل توجه طراحی، ساخت و نصب آنها، مانع از استفاده‌ی وسیع جداگرها در سازه‌های مختلف شده است.^[۱]

از متداول‌ترین انواع جداگرهای لرزه‌ی، جداگرهای الاستومری مسلح به صفحات فولادی هستند، که از لایه‌های متناوب و به هم پیوسته‌ی الاستومر و ورق‌های فولادی تشکیل شده‌اند. همچنین به منظور اتصال جداگر به سازه، در وجه تحتانی و فوقانی

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۹/۷/۲۸، اصلاحیه ۱۳۹۹/۱۲/۱۶، پذیرش ۱۴۰۰/۱/۲۱

DOI:10.24200/J30.2021.56788.2856

۲. مروری بر مطالعات پیشین بر روی مدل سازی و

جداسازی لرزه‌ی مخازن مایعات

با توجه به پیچیدگی نسبی موضوع ارتعاش مخازن حاوی مایعات، ایده‌ی کاربرد مدل‌های ساده‌تر به صورت مدل جرم و فنر معادل مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. مفهوم استفاده از مدل جرم و فنر معادل در تحلیل مخازن مایعات، نخستین بار توسط هازنر^[۲] (۱۹۶۳)، مطرح شده است. مدل هازنر توسط ولتسوس^۲ و یانگ^[۴] (۱۹۷۷)، تدقیق و گسترش یافته و انعطاف‌پذیری جدار مخزن با کاربرد یک روش تقریبی در مدل اصلاحی لحاظ شده است.^[۶،۵] هارون^۳ (۱۹۸۳)، به منظور ارائه‌ی یک روش عملی و ساده‌تر از نقطه‌نظر مهندسی، که بتواند در امور طراحی استفاده شود، نتایج یک گروه پژوهشی را در قالب یک نوشتار منتشر کرد، که در آن انعطاف‌پذیری جدار مخزن با استفاده از روش‌های اجزاء محدود و اجزاء مرزی محاسبه و بر مبنای نتایج حل دقیق مسئله، مدل ساده شده‌ی جرم و فنر معادل ارائه شده بود. مالهوترا^۴ و همکارانش (۲۰۰۰)^[۸] بر مبنای مطالعات ولتسوس و یانگ، روشی ساده‌تر که در مخازن صلب و انعطاف‌پذیر قابل استفاده باشد، ارائه کردند، که مورد تأیید و اقتباس آیین‌نامه‌ی طراحی یوروکد ۸،^۵ قرار گرفت. نتایج مطالعات اخیر، در طی سال‌های پیشین به عنوان مبنای روابط آیین‌نامه‌ها برای طرح لرزه‌ی مخازن استفاده شده است.

بو و ژیا - شیانگ^۶ (۱۹۹۴)^[۹] در مطالعه‌ی آثار استفاده از جداگرهای لاستیکی با هسته‌ی سربی در مخازن با جداری انعطاف‌پذیر، با لحاظ اندرکنش سازه و سیال و ارتعاش جدار مخزن و حرکت جداگر در مدل ریاضی، جدار مخزن را به صورت المان‌های اجزاء محدود در مسئله وارد کردند و دریافتند که ناپایداری تسلیمی در جدار مخزن، ارتباط نزدیکی با تلاطم^۷ مایع در مخزن دارد و کاربرد جداگرها تا حد زیادی از میزان فشار هیدرودینامیک وارد بر جدار و دامنه‌ی تلاطم جرم مواج می‌کاهد.

وانگ^۸ و همکارانش (۱۹۹۴)^[۱۰] عملکرد لرزه‌ی مخازن جداسازی شده با جداگرهای اصطکاکی FPS^۹ را تحت تحریک زلزله‌ی تک‌محوره مطالعه کردند و دریافتند که جداگرهای FPS در کاهش پاسخ لرزه‌ی ناشی از جرم سخت^{۱۰} سیال اثرگذار است. از طرفی، موجب افزایش ناچیز در پاسخ لرزه‌ی جرم مواج^{۱۱} خواهد شد. با وجود این، جداگرهای FPS در کاهش پاسخ لرزه‌ی کل سازه اثرگذار خواهند بود.

شریمالی و جانگید^{۱۲} (۲۰۰۲)^[۱۱] در مطالعاتی به مقایسه‌ی عملکرد لرزه‌ی انواع جداسازهای لرزه‌ی در مخازن مایعات تحت زمین‌لرزه‌های واقعی اقدام و از مدل ریاضی جرم و فنر استفاده کردند، که در آن مجموعه‌ی سازه و سیال در قالب ۳ جرم متمرکز، شامل: جرم مواج، جرم سخت غیرمواج و جرم صلب^{۱۳} سازه تعریف شده است. ایشان نشان دادند که کاربرد جداسازهای لرزه‌ی کلاً در کاهش چشمگیر شتاب زلزله‌ی انتقالی به سازه و تقلیل نیروی طراحی لرزه‌ی اثرگذار است. همچنین، مشاهده کردند که از میان انواع جداگرهای لرزه‌ی مورد بررسی، جداگرهای لغزشی نسبت به جداگرهای الاستومری در کنترل پاسخ لرزه‌ی مخازن مؤثرتر ظاهر می‌شوند، که از میان آنها جداگر از نوع پایه‌ی اصطکاکی پس‌جهنده (R-FBI)^{۱۴} به عنوان مؤثرترین گزینه در جداسازی لرزه‌ی مخازن معرفی شده است.

همچنین ایشان (۲۰۰۲)^[۱۲] پیرو مطالعات قبلی خود، پژوهشی در خصوص

ارزیابی جداگرهای لغزشی در مخازن تحت زلزله‌های دومحوره را به انجام رساندند، که در آن پاسخ لرزه‌ی مخزن جداسازی شده در مدل تبدیل یافته را با پاسخ حاصل از مدل هیستریزیس سیستم جداساز مقایسه کردند. و نیز یک سری مطالعات پارامتری به منظور بررسی آثار نسبت ابعاد مخزن در پاسخ لرزه‌ی مخزن جداسازی شده انجام دادند و دریافتند که سیستم‌های جداساز لغزشی در عملکرد لرزه‌ی مخازن جداسازی شده بسیار کارآمد هستند.^[۱۳،۱۴]

ایشان (۲۰۰۳)^[۱۵] در مطالعه‌ی دیگری نیز پاسخ لرزه‌ی مخازن جداسازی شده با جداگرهای لاستیکی هسته سربی را در دو دسته‌ی مخازن لاغر و پهن تحت تحریک زلزله‌ی دومحوری بررسی کردند و پارامترهای مورد نظرشان عبارت بودند از: دوره‌ی تناوب سیستم جداساز، میرایی جداگر و مقاومت تسلیم نشیمن در سیستم جداساز. نتایج نشان داد که پاسخ مخزن جداسازی شده به اندرکنش با نیروی تکیه‌گاه حساس نیست و علاوه بر آن، میزان بهیمنی از میرایی جداگرها وجود دارد که در آن مقدار نیروی برشی مخزن به مقدار کمینه‌ی خود خواهد رسید.

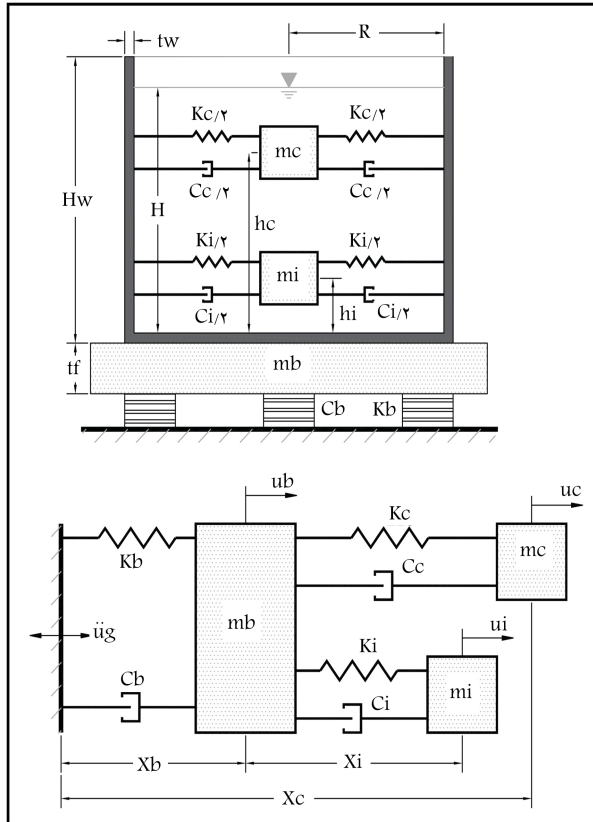
جاده‌ها و جانگید^{۱۵} و جانگید (۲۰۰۴)^[۱۶] در مطالعاتی به مقایسه‌ی پاسخ لرزه‌ی در مخازن جداسازی شده با جداگرهای الاستومری و لغزشی تحت تحریک رکوردهای زمین‌لرزه پرداختند و دریافتند هر دو نوع آنها در کاهش نیروی زلزله‌ی مخازن مؤثر هستند. با این حال، جداگرهای الاستومری با هسته‌ی سربی نسبت به سایر جداگرها عملکرد بهتری دارند. همچنین در پژوهش مذکور مدلی تقریبی جهت برآورد پاسخ لرزه‌ی مخازن جداسازی شده ارائه شده است.

آکوز^{۱۶} و همکاران (۲۰۰۷)^[۱۷] نیز مطالعاتی درخصوص بررسی پاسخ لرزه‌ی مخازن جداسازی شده با جداگرهای اصطکاکی آونگی مقعر تکی (SCFP) و دوگانه (DCFP) تحت تحریک زلزله‌های حوزه‌های دور و نزدیک گسل‌ها انجام دادند. مطالعات انجام شده نشان داد که سیستم جداساز لرزه‌ی اصطکاکی آونگی در حالت دوگانه (DCFP) نسبت به سیستم‌های یگانه (SCFP) بسیار مؤثرتر عمل می‌کند.

بخشی و حسینی‌خواه (۲۰۰۸)^[۱۸] در خصوص رفتار لرزه‌ی مخازن فولادی استوانه‌ی در دو حالت مهار شده و مهار نشده به زمین مطالعاتی انجام دادند و با استفاده از روش اجزاء محدود و انجام تحلیل تاریخچه‌ی زمانی مشاهده شد که در مخازن مهار نشده با بروز نیروی برکنش در مهارها، فشار هیدرودینامیک وارد بر جدار کاهش می‌یابد. همچنین، در مخازن پهن در حالت مهار شده و مهار نشده، تفاوتی در جابه‌جایی قائم سطح آب مشاهده نشده است.

گودرزی و همکاران (۲۰۱۵)^[۱۹] استفاده از جداسازهای الاستومری و اصطکاکی در کاهش پاسخ لرزه‌ی مخازن ذخیره‌ی گاز مایع را مطالعه کردند و در این راستا، یک مدل عددی از طریق روش اجزاء محدود تهیه و نتایج حاصل با مدل آزمایشگاهی صحت‌سنجی شد. نتایج بیانگر کاهش قابل توجه پاسخ لرزه‌ی مخازن گاز مایع مجهز به جداسازهای الاستومری و اصطکاکی بوده است. همچنین مشاهده شد که ارتفاع امواج سطحی در دامنه‌ی معمول مخازن، کاهش قابل توجهی در اثر جداسازها ندارد.

زارع (۲۰۱۵)^[۲۰] به بررسی عددی کاهش پاسخ لرزه‌ی در مخازن جداسازی شده با جداگرهای لاستیکی با هسته‌ی سربی پرداخت. علاوه بر آن، بر روی میزان دقت مدل‌های ساده شده‌ی جرم و فنر استفاده شده در آیین‌نامه‌ها بحث شد و نتایج نشان داد در بارهای لرزه‌ی شامل جابه‌جایی‌های با دوره‌ی تناوب بزرگ، آثار مثبت کاربرد جداگر ناچیز بوده و در سایر بارهای لرزه‌ی کاربرد این نوع جداگرها تا حد زیادی موجب کاهش آثار زلزله می‌شود. همچنین مدل ساده شده‌ی جرم و فنر با



شکل ۱. تصویر شماتیک از مدل جرم و فنر استفاده شده در تحلیل مخازن.^[۸]

مربوط به جرم‌های: موج، نوسانی و صلب مخزن و حروف K و C بیان‌گر سختی و میرایی هستند. نسبت میرایی مربوط به جرم موج و نوسانی به ترتیب برابر با ۵/۰ و ۲ درصد و نسبت میرایی جداگر برابر با ۱۰٪ لحاظ شده است.^[۱۱] مقادیر جرم‌های موج و نوسانی و دوره‌های تناوب مؤثر هر یک از آنها با توجه به پارامترهای نشان داده شده در شکل ۱ مطابق روابط ۱ الی ۹ محاسبه شده‌اند.^[۸]

$$m_l = R^1 \pi H \rho \quad (۱)$$

$$m_c = \lambda_{m_c} m_l \quad (۲)$$

$$m_i = \lambda_{m_i} m_l \quad (۳)$$

$$k_c = m_c \omega_c^2 \quad (۴)$$

$$k_i = m_i \omega_i^2 \quad (۵)$$

$$c_i = 2 m_i \omega_i \xi_i \quad (۶)$$

$$c_c = 2 m_c \omega_c \xi_c \quad (۷)$$

$$T_i = \lambda_{T_i} \frac{H \sqrt{\rho}}{\sqrt{t_w / R \sqrt{E}}} \quad (۸)$$

$$T_c = \lambda_{T_c} \sqrt{R} \quad (۹)$$

که در آنها، ρ چگالی سیال، m_l جرم کل سیال، t_w ضخامت جدار مخزن، E مدول کشسانی مصالح جدار مخزن و ضرایب λ در روابط اخیر از جدول ۱ و میان‌یابی بین مقادیر به دست آمده‌اند.^[۸] همچنین، دوره‌ی تناوب جداسازی T_b ، با توجه به جرم کلی مخزن جداسازی شده M و سختی سیستم جداسازی لرزه‌ی k_b از رابطه‌ی ۱۰ محاسبه شده و میرایی سیستم جداساز C_b نیز از رابطه‌ی ۱۱ به دست آمده

دقت زیادی می‌تواند رفتار لرزه‌ی مخازن را پیش‌بینی کند، به نحوی که اختلاف بیشینه‌ی مشاهده شده در دو مدل اجزاء محدود و مدل جرم و فنر کمتر از ۱۰٪ بوده است.

باقری و فرجیان (۲۰۱۶)،^[۲۱] پاسخ لرزه‌ی مخازن جداسازی شده با جداگر اصطکاکی را تحت زمین‌لرزه‌های حوزه‌ی نزدیک گسل مطالعه و مدل محاسباتی را از طریق کاربرد مدل ساده شده‌ی جرم و فنر بر پا کردند. همچنین تحلیل تاریخی‌چهی زمانی غیرخطی بر روی مدل انجام شد و نتایج، کاهش پاسخ لرزه‌ی مخازن جداسازی شده را با جداگر اصطکاکی نشان دادند.

الهان و همکاران (۲۰۱۸)،^[۲۲] به بررسی نقش مشخصات مقاومتی جداگرها در رفتار لرزه‌ی مخازن جداسازی شده پرداختند و با انجام تحلیل تاریخی‌چهی زمانی غیرخطی بر روی مخازن مجهز به جداگرهای با مشخصات مقاومتی مختلف، پاسخ لرزه‌ی سازه‌ها را در قالب جابه‌جایی جداگر و جرم موج، نیروی برشی جداگر و سازه در مدل‌های مختلف مقایسه کردند و دریافتند که در زلزله‌های نزدیک به گسل، افزایش مشخصات مقاومتی جداگرها موجب کاهش جابه‌جایی جداگر می‌شود و از سوی دیگر، در زلزله‌های دور از گسل موجب افزایش چشمگیر در مقادیر پاسخ سازه می‌شود.

کلاتری و همکاران (۲۰۱۸)،^[۲۳] به ارزیابی میزان مشارکت جرم‌های موج و نوسانی سیال در پاسخ لرزه‌ی مخازن جداسازی شده پرداختند. علاوه بر آن، به منظور بررسی میزان دقت مدل‌های ساده شده‌ی جرم و فنر در مخازن حاوی سیالات، نتایج حاصل از مدل‌های ساده شده‌ی جرم و فنر را با مدل‌های دقیق اجزاء محدود مقایسه کردند و دریافتند که در مخازن جداسازی شده، میزان مشارکت جرم موج در پاسخ لرزه‌ی قابل توجه است و قابل صرف‌نظر نیست. همچنین با مقایسه‌ی نتایج مدل‌های ساده شده‌ی جرم و فنر با مدل اجزاء محدود مشاهده کردند که میزان اختلاف در مقادیر نیروی برشی و لنگر واژگونی به ۱۰٪ محدود می‌شود. از این رو، مدل‌های ساده شده‌ی جرم و فنر را می‌توان با اطمینان کافی در طراحی لرزه‌ی مخازن به کار برد؛ اما از سوی دیگر، نتایج مربوط به جابه‌جایی سطح آزاد مایع مربوط به مخازن پهن در مدل‌های جرم و فنر چندان دقیق نبودند.

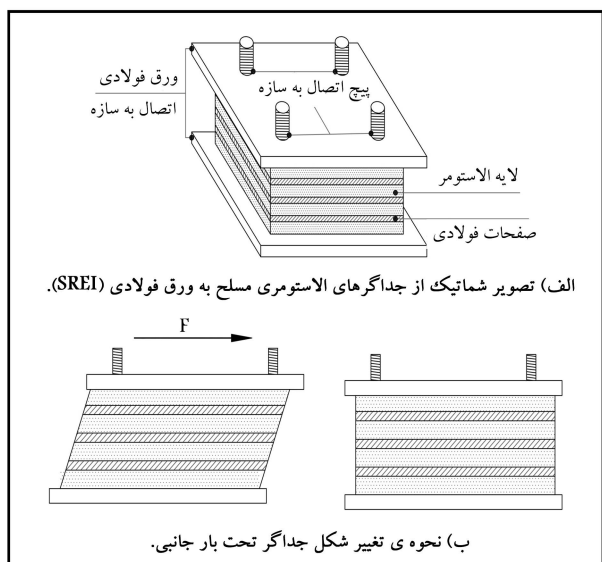
نیکومنش و همکاران (۲۰۱۹)،^[۲۴] روشی جدید به منظور جداسازی مخازن حاوی سیالات ارائه کردند و برخلاف روش‌های رایج، که در آنها جداسازی مخازن در راستای افق انجام می‌گرفت، در روش ارائه شده جداسازی در راستای قائم انجام می‌شد و نیروهای قائم ایجاد شده در اثر لنگر واژگونی جداسازی می‌شدند. با تحلیل غیرخطی در طیفی وسیعی از ابعاد رایج مخازن نشان داده شد که کاربرد روش جدید جداسازی اخیر موجب کاهش قابل توجه لنگر واژگونی مخزن می‌شود و آثار مثبت آن در مخازن لاغر بیشتر نمود می‌یابد.

۳. مدل محاسباتی

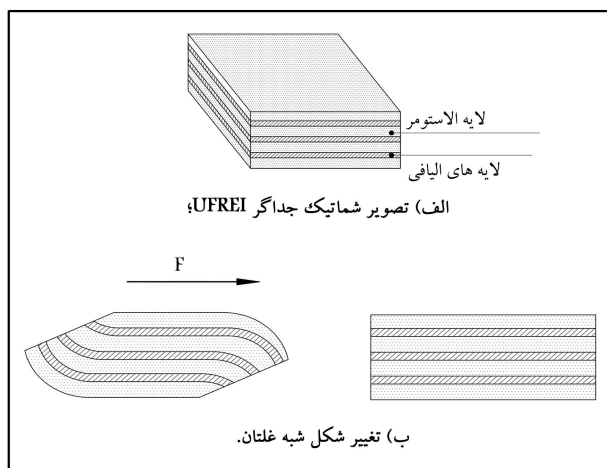
در پژوهش حاضر، مدل جرم و فنر معادل بر مبنای مدل ارائه شده از سوی مالهوترا و همکارانش (۲۰۰۰)،^[۸] بوده است. در مدل مذکور، کل جرم مایع به دو جرم متمرکز شامل: جرم موج m_i و جرم نوسانی m_c تقسیم و هر جرم متمرکز بنا به میزان سختی و میرایی متناسب، از طریق فنر و میراگرهای معادل به جدار مخزن متصل می‌شود. همچنین، وزن جدار مخزن فولادی - که کمتر از ۵٪ از وزن کل سازه است - در مدل منظور نشده است. در شکل ۱، تصویر شماتیک از مدل جرم و فنر استفاده شده در تحلیل مخازن مایعات مشاهده می‌شود، که در آن اندیس‌های c، i و b به ترتیب

جدول ۱. ضرایب مدل مالهوترا در مدل جرم و فنر.^[۸]

H/R	λ_{Ti}	λ_{Tc}	λ_{mi}	λ_{mc}	λ_{hi}	λ_{hc}
۰/۳۰	۹/۲۸	۲/۰۹	۰/۱۸	۰/۸۲	۰/۴۰	۰/۵۲
۰/۵۰	۷/۷۴	۱/۷۴	۰/۳۰	۰/۷۰	۰/۴۰	۰/۵۴
۰/۷۰	۶/۹۷	۱/۶۰	۰/۴۱	۰/۵۷	۰/۴۰	۰/۵۷
۱/۰۰	۶/۳۶	۱/۵۲	۰/۵۵	۰/۴۵	۰/۴۲	۰/۶۲
۱/۵۰	۶/۰۶	۱/۴۸	۰/۶۹	۰/۳۱	۰/۴۴	۰/۶۹
۲/۰۰	۶/۲۱	۱/۴۸	۰/۷۶	۰/۲۴	۰/۴۵	۰/۷۵
۲/۵۰	۶/۵۶	۱/۴۸	۰/۸۱	۰/۱۹	۰/۴۵	۰/۷۹
۳/۰۰	۷/۰۳	۱/۴۸	۰/۸۴	۰/۱۶	۰/۴۵	۰/۸۳



شکل ۲. جداگرهای الاستومری متصل و نحوه تغییر شکل آن‌ها.



شکل ۳. جداگرهای الاستومری غیرمتصل و نحوه تغییر شکل آن‌ها.

الیاف پلیمری (FRP)^{۱۷} استفاده می‌شود. مطالعات نشان داده است که حلقه‌های پسماند نیرو جابه‌جایی در جداگرهای UFREI با جداگرهای الاستومری مسلح به ورق‌های فولادی قابل مقایسه است و الیاف پلیمری می‌تواند سختی قائم جداگرها را تأمین کند.^[۱]

در کاربرد غیرمتصل (اتکایی) جداگرهای UFREI، نیروی برشی از طریق اصطکاک سطوح در تماس جداگر با تکیه‌گاه تأمین می‌شود. با توجه به سختی خمشی ناچیز و شرایط مرزی غیرمتصل جداگر، با افزایش نیروی برشی، وجوه فوقانی و تحتانی جداگر به طور موضعی از سطوح تکیه‌گاه بلند می‌شوند، که این تغییرشکل منحصر به فرد را تغییرشکل شبه غلتان^{۱۸} می‌نامند. با انتخاب ابعاد درست جداگرها، تغییرشکل شبه غلتان برگشت‌پذیر است و جداگر باربری خود را حفظ می‌کند. حالت نهایی تغییرشکل شبه غلتان، حالتی است که در آن وجوه قائم اولیه جداگر در تماس کامل با سطوح تکیه‌گاهی فوقانی و تحتانی قرار گیرند. مطالعات نشان داده است که در جابه‌جایی‌هایی به میزان ۵٪ فراتر از این حالت نیز جداگر می‌تواند پایداری خود را حفظ کند.^[۱] در شکل ۳، تصویر شماتیک جداگرهای UFREI و تغییرشکل شبه غلتان مشاهده می‌شود.

است، که در آنها، ω_b و ξ_b به ترتیب بسامد زاویه‌یی و نسبت میرایی جداساز هستند.

$$T_b = 2\pi \sqrt{\frac{M}{k_b}} \quad (10)$$

$$Cb = 2M\omega_b\xi_b \quad (11)$$

۴. مدل‌سازی سیستم‌های جداساز لرزه‌یی

رایج‌ترین نوع جداگرهای الاستومری، جداگرهای الاستومری مسلح به ورق‌های فولادی (SREI) هستند، که به صورت متناوب از لایه‌های به هم پیوسته‌ی ورق‌های فولادی و الاستومر تشکیل می‌شوند. در ورق‌های فولادی، در جداگرهای الاستومری مسلح به ورق‌های فولادی (SREI)، کرنش جانبی لایه‌های الاستومر ناشی از بارهای قائم فشاری را محدود می‌کنند و از این رو باعث افزایش سختی و کاهش تغییرشکل‌های قائم می‌شوند. با وجود این، صفحات فولادی تأثیر ناچیزی در سختی جانبی جداگر دارند و مدول برشی مصالح الاستومر، تعیین‌کننده‌ی سختی جانبی جداگرهای SREI است.^[۲۵] در بخش فوقانی و تحتانی جداگرهای SREI، با تعبیه‌ی ورق‌های فولادی با ضخامت بالا و ابعاد بزرگ‌تر، شرایط لازم برای اتصال جداگر به سازه از طریق پیچ و مهره ایجاد می‌شود. این نوع کاربرد جداگرها را اصطلاحاً کاربرد متصل می‌نامند. در شکل ۲، تصویر شماتیک از اجزاء جداگرهای SREI مشاهده می‌شود.

در صورتی که بارهای قائم وارد بر جداگرها به مقدار زیادی از بار کماتشی جداگر کوچک‌تر باشند، در این حالت سختی جانبی مؤثر جداگر می‌تواند به صورت مقداری ثابت مطابق رابطه‌ی ۱۲ محاسبه شود:^[۲۵]

$$K = \frac{GA}{t_r} \quad (12)$$

که در آن، K سختی جانبی مؤثر جداگر، G مدول برشی مصالح الاستومر، A و t_r به ترتیب مساحت بارگذاری شده‌ی جداگر در پلان و ضخامت کل لایه‌های الاستومر هستند.

با استفاده از ترکیب‌های بلوک کربنی بسیار ریز، روغن‌ها، رزین‌ها و سایر پُرکننده‌های ویژه در مصالح الاستومر، میرایی تا حد بسیار زیادی بالا می‌رود، به نحوی که در کرنش برشی معادل ۱۰٪، نسبت میرایی به میزان ۱۰ تا ۲۰ درصد قابل دست‌یابی است، که در بازه‌ی اخیر، میزان میرایی با سختی جداگر نسبت مستقیم دارد.^[۱۱، ۲۵]

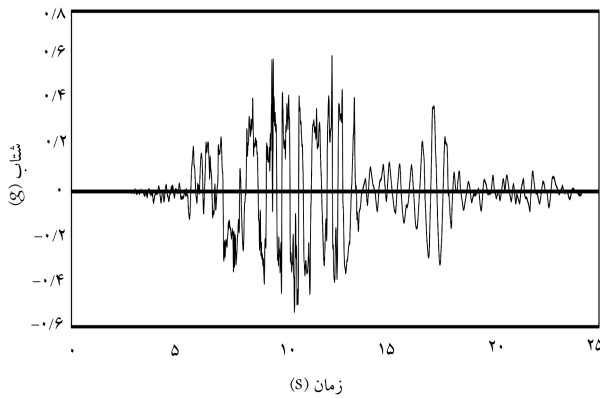
جداگرهای الاستومری مسلح به الیاف کربن (UFREI)، گونه‌یی از جداگرهای الاستومری هستند، که در آنها جهت تسلیح جداگر، به جای ورق‌های فولادی از

جدول ۳. ابعاد مخازن مدل سازی شده.

مخزن	شعاع مخزن (متر) R	ارتفاع آب (متر) H	نسبت H/R
پهن	۱۶/۶۷	۱۰	۰/۶
لاغر	۵/۴۱	۱۰	۱/۸۵

جدول ۴. مشخصات شتاب نگاشت های استفاده شده در تحلیل تاریخی زمانی.

نام زلزله	ایستگاه شتاب نگار	بیشینه ی شتاب
امپریال ولی	EL Centro	۰/۳۴۸
لوما پریتا	LGP	۰/۵۷۰
نورث ریچ	Sylmar	۰/۸۴۳



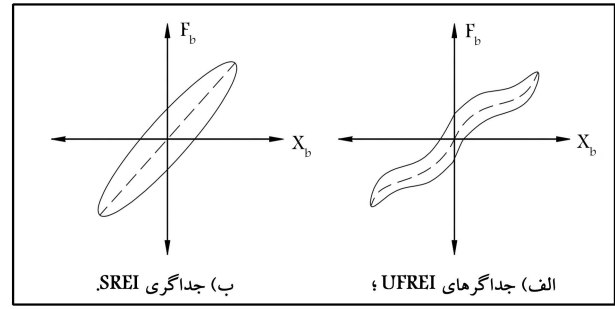
شکل ۵. شتاب نگاشت مربوط به زلزله ی لوما پریتا با $PGA=0.6$.

۷. شتاب نگاشت زلزله های اعمالی به مخازن

در پژوهش حاضر، گزینش سه شتاب نگاشت مربوط به زلزله های امپریال ولی^{۱۹}، لوما پریتا^{۲۰} و نورث ریچ^{۲۱} مطابق جدول ۴ صورت گرفته و در هر یک از آنها، بیشینه ی شتاب زمین به مقادیر ۱/۰، ۲/۰، ۳/۰، ۴/۰، ۵/۰ و ۶/۰ برابر شتاب نقل مقیاس شده است. از این رو ۱۸ شتاب نگاشت تهیه شده به مخازن لاغر و پهن در سه حالت بدون جداگر، مجهز به جداگرهای UFREI و مجهز به جداگرهای SREI اعمال و در مجموع ۱۰۸ مدل محاسباتی تشکیل و تحلیل شده اند. در شکل ۵، نیز نمودار تاریخی زمانی شتاب نگاشت مربوط به زلزله ی لوما پریتا با $PGA=0.6$ ، که بیشترین بازتاب در مدل های تحلیل شده را ایجاد کرده است، مشاهده می شود.

۸. معادلات دینامیکی حرکت

بر اساس مدل جرم و فنر معادل معرفی شده، معادله ی حرکت بر اساس تعادل اجزاء مدل در معادله های ۱۶ الی ۲۱ بیان می شود، که در آنها، پارامترهای x جابه جایی نسبی جرم ها نسبت به تراز فوقانی جداگر و u بیانگر جابه جایی مطلق جرم ها نسبت به زمین هستند. همچنین، اندیس های c، i و b به ترتیب نشانگر جرم های موج، جرم نوسانی و جرم صلب سازه مخزن هستند و u نشانگر جابه جایی زمین است. نمادهای K و C نیز به ترتیب معرف سختی و میرایی سیستم هستند. همچنین



شکل ۴. تصویر شماتیک از چرخه ی استهلاك انرژی.

جدول ۲. مشخصات مصالح استفاده شده در جداگرها.

نسبت میرایی جداگرها	۱۰٪
زمان تناوب مجموعه ی جداگرها (s)	۲
مدول برشی لاستیک (Mpa)	۰/۵
مدول کشسانی لاستیک (Mpa)	۱/۵
تنش فشاری مجاز لاستیک (Mpa)	۷/۰
تنش مجاز فولاد (Mpa)	۲۴۰

با تغییر شکل شبه غلطان جداگرهای مذکور، رابطه ی بین نیرو و تغییر شکل افقی جداگر به صورت غیرخطی خواهد بود. بر مبنای مطالعات صورت گرفته، سختی جانبی آنها در قالب رابطه های ۱۳ الی ۱۵ تعریف می شود، که در آن G مدول برشی الاستومر، a و b طول و عرض جداگر که ضلع b در جهت اعمال بار جانبی است، t_r ضخامت کل لایه های الاستومری جداگر، t ضخامت یک لایه ی الاستومر و δ تغییر مکان جانبی ایجاد شده در جداگر است.^[۲۶]

$$K = 0.64 S_1^{0.5} S_2^{0.5} \frac{Ga}{t_r} (b - \frac{3}{4}\delta) \quad (13)$$

$$S_1 = \frac{ab}{2t(a+b)} \quad (14)$$

$$S_2 = \frac{b}{t_r} \quad (15)$$

بر اساس موارد ذکر شده ی اخیر، چرخه ی استهلاك انرژی در جداگرهای UFREI و SREI مطابق شکل ۴ خواهد بود.

۵. مشخصات مصالح استفاده شده در جداگرها

در پژوهش حاضر، به منظور مدل سازی جداگرها، مقادیر پارامترهای اصلی مصالح جداگرها مطابق جدول ۲ انتخاب شده اند. مقادیر انتخاب شده برای مشخصات مصالح لاستیک در محدوده ی رایج پارامترها و با طراحی جداگر به نحوی انتخاب شده اند که اولاً ضوابط پایداری و مقاومت در جداگرها تأمین شود و ثانیاً زمان تناوب جداگر متصل، به میزان ۲ ثانیه باشد.

۶. ابعاد و مشخصات مخازن مورد مطالعه

در پژوهش حاضر، به منظور ارزیابی عملکرد مخازن جداسازی شده، مخازن استوانه یی در دو سایز با عناوین لاغر و پهن به شرح جدول ۳ در نظر گرفته شده اند. مصالح جدار مخزن از فولاد ST۳۷ با مدول کشسانی ثابت و برابر با ۲۱۰ Gpa انتخاب شده اند.

جدول ۵. مقایسه‌ی نتایج حاصل با نتایج مطالعات پیشین.

مخزن لاغر $S = H/R = 1/85, Tb = 2s, \xi b = 1^\circ$ (Slender Tank PGA = $0/843g$) نورتریج (۱۹۹۴).			
پارامترهای مقایسه شده	شریمالی و جانگید (۲۰۰۲) ^[۱۱]	پژوهش حاضر	درصد اختلاف
مدل محاسباتی جرم و فنر معادل	مدل هارون (۱۹۸۳)	مدل مالهوتر ۲۰۰۰	-
روش حل معادله‌ی دیفرانسیل	نیومارک - بتا	رانگ - کوتا مرتبه‌ی ۴	-
نیروی برشی مخزن بدون جداگر، F/W (N/N)	۰/۸۳۲	۰/۸۴۳	-۲/۴٪
نیروی برشی مخزن با جداگر متصل، F/W (N/N)	۰/۴۳۸	۰/۴۰۹	۶/۶٪
جابه‌جایی جرم موج در مخزن بدون جداگر، Xc (Cm)	۷۶/۱۲	۷۶/۰۸	۰/۱٪
جابه‌جایی جرم موج در مخزن با جداگر متصل، Xc (Cm)	۱۲۸/۲۹	۱۲۱/۸۷	۵٪
جابه‌جایی فونداسیون در مخزن با جداگر الاستومری متصل، Xb (Cm)	۴۲/۲۵	۳۹/۳۳	۶/۶٪

پارامترهای x و u در شکل ۱ نشان داده شده‌اند.

$$x_b = u_b - u_g \Rightarrow u_b + x_b = u_g \quad (16)$$

$$x_c = u_c - u_b \Rightarrow u_c = x_c + u_b = x_c + x_b + u_g \quad (17)$$

$$x_i = u_i - u_b \Rightarrow u_i = x_i + u_b + x_i + x_b + u_g \quad (18)$$

$$k_c x_c + c_c \dot{x}_c + m_c \ddot{x}_c + m_c \ddot{x}_b = -m_c \ddot{u}_g \quad (19)$$

$$k_i x_i + c_i \dot{x}_i + m_i \ddot{x}_i + m_i \ddot{x}_b = -m_i \ddot{u}_g \quad (20)$$

$$k_b x_b + m_b \ddot{x}_b - k_c x_c - c_c \dot{x}_c - k_i x_i - c_i \dot{x}_c = -m_b \ddot{u}_g \quad (21)$$

با جای‌گذاری معادلات ۱۹ و ۲۰ در معادله‌ی ۲۱، معادله‌ی ۲۱ به شکل معادله‌ی ۲۲ بازنویسی می‌شود و پارامتر m_T مطابق رابطه‌ی ۲۳ محاسبه می‌شود:

$$k_b x_b + c_b \dot{x}_b + m_c \ddot{x}_c + m_i \ddot{x}_i + (m_T) \ddot{x}_b = -(m_T) \ddot{u}_g \quad (22)$$

$$m_T = m_c = m_i + m_b \quad (23)$$

معادلات ۱۹، ۲۰ و ۲۲ می‌توانند به شکل ماتریسی بیان شوند معادله‌های ۲۴ و ۲۵:

$$[K] = \begin{pmatrix} k_c & 0 & 0 \\ 0 & k_i & 0 \\ 0 & 0 & k_b \end{pmatrix}, [C] = \begin{pmatrix} c_c & 0 & 0 \\ 0 & c_i & 0 \\ 0 & 0 & c_b \end{pmatrix}, \quad (24)$$

$$[M] = \begin{pmatrix} m_c & 0 & m_c \\ 0 & m_i & m_i \\ m_c & m_i & m_T \end{pmatrix} \quad (24)$$

$$[K]\{X\} + [C]\{X\} + [M]\{X\} = -[K]\{r\}u_g \quad (25)$$

همچنین نیروی برشی در تراز فوقانی جداگرها، که با تقسیم بر جرم کل سازه نرمالایز شده است، به صورت رابطه‌ی ۲۶ تعریف می‌شود:

$$F = \frac{m_c u_c + m_i u_i + m_b u_b}{m_T} \quad (26)$$

۹. تبیین مسئله و روش حل آن

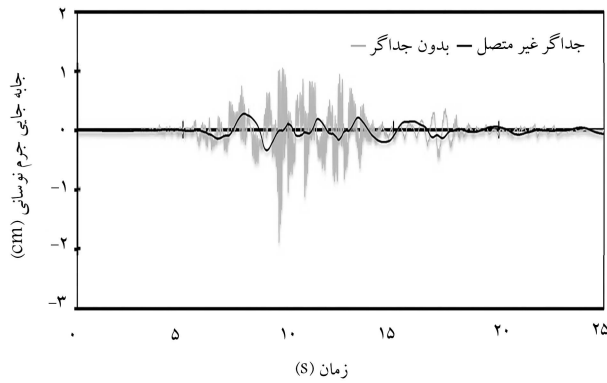
هدف اصلی نوشتار حاضر، مقایسه‌ی عملکرد جداگرهای الاستومری متصل و غیرمتصل در جداسازی لرزه‌ی مخازن مایعات روزمینی بوده است. پارامترهای

مختلفی، همانند: راندمان جداسازی یکسان و یا نوع و حجم مواد الاستومری یکسان و ... را می‌توان به عنوان مبنای مشترک در ارزیابی عملکرد جداگرهای لرزه‌ی ذکر شده در نظر گرفت. در نوشتار حاضر، یکسان بودن نوع و حجم ماده‌ی الاستومری به کار رفته در جداگرها (به عبارتی دیگر، یکسان بودن مدول برشی لاستیک و برابر بودن تعداد و ابعاد لایه‌های الاستومری در دو نوع جداگر بررسی شده) به عنوان مبنای مشترک در مقایسه و ارزیابی راندمان کاری آنها در جداسازی لرزه‌ی مخازن در نظر گرفته شده است. اولین گام در طرح جداگرهای لرزه‌ی، انتخاب دوره‌ی تناوب جداسازی هدف در قبال سطح خطر زلزله‌ی طرح بوده است، که غالباً توصیه می‌شود دوره‌ی تناوب اشاره شده، دست‌کم ۲ ثانیه در نظر گرفته شود.^[۱۲] بنابراین، ابتدا با در نظر گرفتن زمان تناوب جداسازی ۲ ثانیه و با کاربرد رابطه‌ی ۱۲، مشخصات و ابعاد جداگر متصل (از نوع SREB) شامل مساحت پلان جداگر (A)، تعداد و ضخامت کل لایه‌های تسلیح آن (tr) و مدول برشی الاستومر (G) تعیین شده است. سپس، با ثابت نگه‌داشتن مشخصات مصالح، ابعاد جداگر و تعداد لایه‌های الاستومر، با حذف ورق‌های اتصال تحتانی و فوقانی و جایگزینی صفحات تسلیح فولادی با لایه‌های الیاف پلیمری، جداگر معادل از نوع الاستومری غیرمتصل (UFREI) تشکیل یافته است. سختی جانبی مؤثر جداگر UFREI در تحلیل‌های تاریخچه‌ی زمانی با توجه به تغییر مکان‌های جانبی δ وارده بر جداگر مطابق معادله‌ی ۱۳ محاسبه شده است. در تحلیل‌های تاریخچه‌ی زمانی مدل جرم و فنر نشان داده شده در شکل ۱، معادله‌ی دیفرانسیل حرکت به روش رانگ - کوتا مرتبه‌ی چهارم،^[۲۱] حل شده و مقادیر جابه‌جایی، سرعت و شتاب مربوط به هر یک از جرم‌های متمرکز به دست آمده‌اند. مدل‌سازی و حل مسئله به روش عددی و از طریق برنامه‌نویسی در محیط نرم‌افزار متلب^{۲۲} انجام شده است. به منظور صحت‌سنجی کد متلب تهیه شده، نتایج به دست آمده از آن با نتایج مطالعات شاخص موجود در ادبیات پژوهش مقایسه شده است. به عنوان نمونه، در جدول ۵، خروجی‌های کد متلب تهیه شده در پژوهش حاضر با نتایج مطالعات شریمالی و جانگید (۲۰۰۲)،^[۱۱] مقایسه شده است. چنانچه مشاهده می‌شود، بیشینه‌ی اختلاف در نتایج به دست آمده از تحلیل به میزان ۶/۶٪ است، که با توجه به تفاوت در مدل‌های جرم و فنر استفاده شده توجیه‌پذیر است.

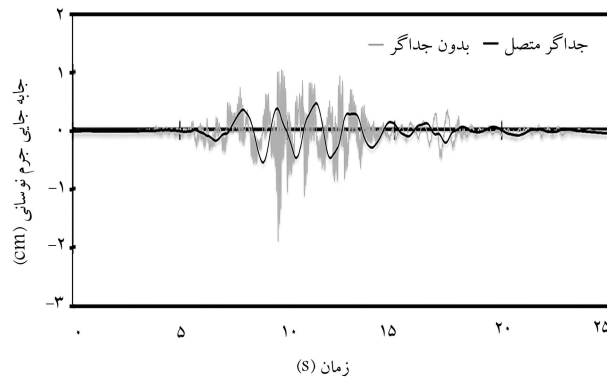
با توجه به این‌که پایداری لغزشی جداگرهای الاستومری غیرمتصل از طریق نیروی اصطکاک بین سطح فوقانی جداگر با فونداسیون سازه تأمین می‌شود، لذا از موارد حائز اهمیت در کاربرد جداگرهای الاستومری غیرمتصل، کنترل بلندشدگی سازه است، که باید الزاماً مورد توجه قرارگیرد. از این رو در کد برنامه‌نویسی شده‌ی پژوهش حاضر، بیشینه‌ی مقدار لنگر خمشی ظاهر شده در تراز فونداسیون سازه در

لاغر تحت بارگذاری زلزله‌ی لوما پریتا با $PG=0/6g$ ، که بیشترین میزان بازتاب در مدل‌های تحلیل شده را موجب شده‌اند، مشاهده می‌شوند. همچنین، در جدول‌های ۶ و ۷، میانگین بیشینه‌ی پارامترها در تمام بارهای زلزله به تفکیک مخازن لاغر و پهن ارائه شده‌اند.

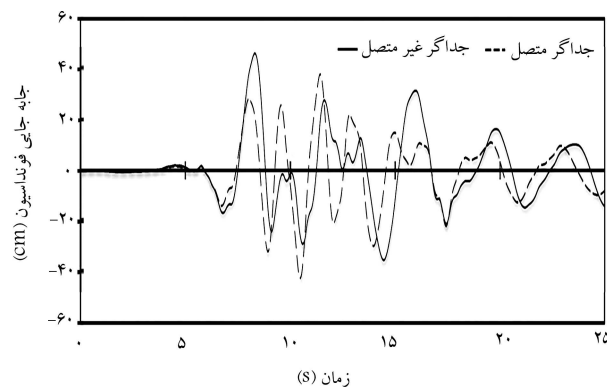
با انجام مقایسه‌ی کمی داده‌های حاصل از تحلیل مشاهده شده که به طور کلی کاربرد جداگرهای لرزه‌ی در کاهش نیروی برشی اثر چشمگیر داشته است. به نحوی که بیشینه‌ی نیروی برشی در مخازن لاغر با کاربرد جداگر متصل SREI و جداگر



شکل ۸. نمودار مقایسه‌ی تغییر مکان جرم نوسانی در حالت‌های بدون جداگر و با جداگر غیرمتصل (لوما پریتا: $PGA=0/6g$ و $H/R=1/85$).



شکل ۹. نمودار مقایسه‌ی تغییر مکان جرم نوسانی در حالت‌های بدون جداگر و با جداگر متصل (لوما پریتا: $PGA=0/6g$ و $H/R=1/85$).



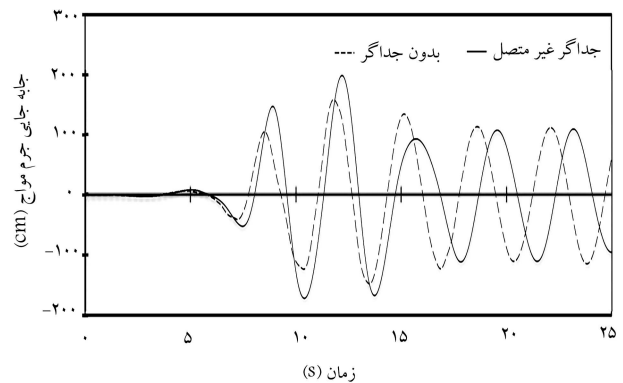
شکل ۱۰. نمودار مقایسه‌ی تغییر مکان جرم صلب در حالت‌های جداگر غیرمتصل و متصل (لوما پریتا: $PGA=0/6g$ و $H/R=1/85$).

تحلیل تاریخی‌ی زمانی برداشت شده و با فرض صلب بودن فونداسیون مخزن، تنش‌های فشاری بر روی کلیه‌ی جداگرها محاسبه شده است. در صورت بروز تنش فشاری منفی بر روی هر یک از جداگرها، که به عنوان وقوع بلندشدگی سازه تلقی می‌شود، محاسبات با پیام اخطار متوقف می‌شود. این موضوع در تمامی مدل‌های محاسباتی کنترل شده و در هیچ‌کدام از آنها، سازه با پدیده‌ی بلندشدگی مواجه نبوده است.

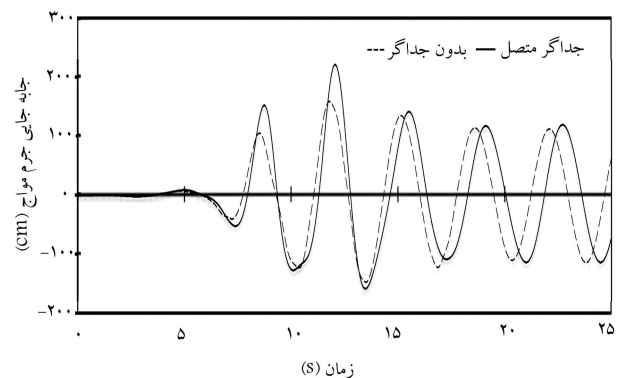
لازم به ذکر است با توجه به این‌که مخازن حاوی سیالات در تراز تحتانی خود به لوله‌های خروجی و تأسیسات مکانیکی متصل می‌شوند، از نقطه نظر اهداف طراحی، اساساً مخازن با یا بدون جداگرها باید به نحوی طراحی شوند که با پدیده‌ی بلندشدگی مواجه نشوند. از این رو آیین‌نامه‌های طراحی غالباً ضرایب ایمنی بالایی را در کنترل واژگونی و بلندشدگی مخازن الزام می‌کنند. همچنین در غالب مخازن حاوی سیال‌ها با ابعاد متعارف، با توجه به وزن مخصوص بالای سیال‌ها، کنترل واژگونی و بلندشدگی با ضرایب اطمینان بالا قابل تأمین است.

۱۰. نتایج تحلیل‌های عددی

نتایج حاصل از تحلیل‌های تاریخی‌ی زمانی که عبارت‌اند از: جابه‌جایی‌ها و شتاب‌های وارده بر جرم‌های موج و نوسانی و نیز نیروی برشی وارده بر تراز فوقانی جداگرها محاسبه و با مقادیر متناظر در مخازن با پایه‌ی ثابت (فاقد جداسازی) مقایسه شده است. به عنوان نمونه، در شکل‌های ۶ الی ۱۲، نتایج تحلیل مربوط به مخزن



شکل ۶. نمودار مقایسه‌ی تغییر مکان جرم موج در حالت‌های بدون جداگر و با جداگر غیرمتصل (لوما پریتا: $PGA=0/6g$ و $H/R=1/85$).



شکل ۷. نمودار مقایسه‌ی تغییر مکان جرم موج در حالت‌های بدون جداگر و با جداگر متصل (لوما پریتا: $PGA=0/6g$ و $H/R=1/85$).

جدول ۶. میانگین بیشینه‌ی پارامترها در مدل‌های تحلیل شده در مخازن پهن.

نیروی برشی نرمالایز شده	جابه‌جایی جداگر (سانتی متر)	جابه‌جایی جرم نوسانی (سانتی متر)	جابه‌جایی جرم مواج (سانتی متر)	
۰/۳۳	-	۰/۱۷	۲۳/۲۸	مخزن بدون جداگر
۰/۱۳	۱۷/۷۷	۰/۰۵	۳۷/۹۶	مخزن جداسازی شده با جداگرهای غیرمتصل (درصد تغییر نسبت به مخزن بدون جداگر)
(-۰/۶۲/۱)	-	(-۰/۷۰/۷)	(۰/۶۳/۰)	
۰/۱۷	۱۵/۸۰	۰/۰۶	۳۶/۵۲	مخزن جداسازی شده با جداگرهای متصل (درصد تغییر نسبت به مخزن بدون جداگر)
(-۰/۵۰/۱)	-	(-۰/۶۴/۱)	(۰/۵۶/۸)	
-۰/۲۳/۹	۰/۱۲/۵	-۰/۱۸/۳	۰/۳/۹	درصد تغییر در پاسخ جداگر غیرمتصل در مقایسه با جداگر متصل

جدول ۷. میانگین بیشینه‌ی پارامترها در مدل‌های تحلیل شده در مخازن لاغر.

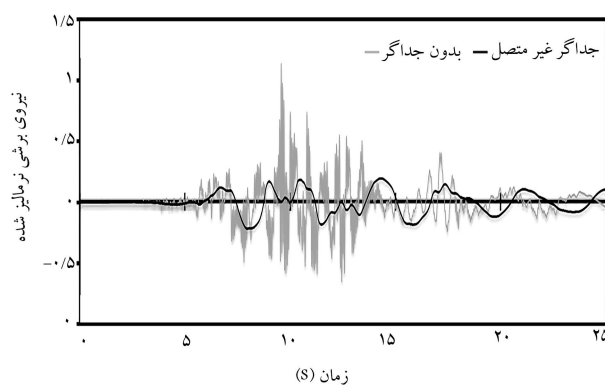
نیروی برشی نرمالایز شده	جابه‌جایی جداگر (سانتی متر)	جابه‌جایی جرم نوسانی (سانتی متر)	جابه‌جایی جرم مواج (سانتی متر)	
۰/۵۷	-	۰/۰۹	۶۴/۸۴	مخزن بدون جداگر
۰/۱۵	۲۴/۴۱	۰/۰۲	۸۹/۵۱	مخزن جداسازی شده با جداگرهای غیرمتصل (درصد تغییر نسبت به مخزن بدون جداگر)
(-۰/۷۲/۸)	-	(-۰/۷۳/۲)	(۰/۳۸/۰)	
۰/۲۳	۲۲/۲۷	۰/۰۳	۹۳/۳۲	مخزن جداسازی شده با جداگرهای متصل (درصد تغییر نسبت به مخزن بدون جداگر)
(-۰/۵۹/۱)	-	(۰/۶۵/۰)	(۰/۴۳/۹)	
-۰/۳۳/۵	۰/۹/۶	-۰/۲۳/۲	-۰/۴/۱	درصد تغییر در پاسخ جداگر غیرمتصل در مقایسه با جداگر متصل

غیرمتصل UFREI به ترتیب به طور متوسط با ۵۹/۱ و ۷۲/۸ درصد کاهش و در مخازن پهن با ۵۰/۱ و ۶۲/۱ درصد کاهش مواجه بوده است.

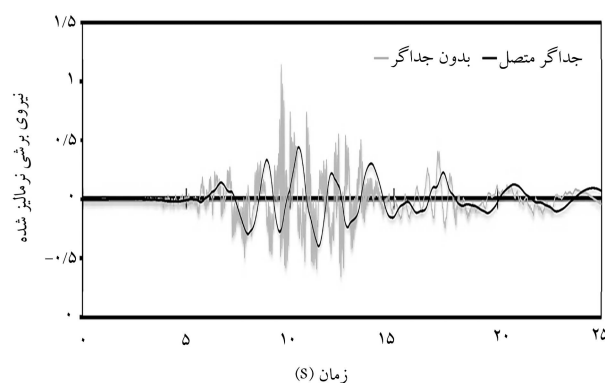
کاربرد جداگرها در تمامی مدل‌ها موجب کاهش جابه‌جایی جرم نوسانی شده است. بیشینه‌ی پارامتر اخیر در مخازن لاغر در کاربرد جداگرهای متصل و غیرمتصل به ترتیب به طور متوسط با ۶۵/۰ و ۷۳/۲ درصد کاهش همراه بوده است. میزان کاهش پارامتر جرم نوسانی در مخازن پهن در جداگرهای متصل و غیرمتصل به ترتیب برابر با ۶۴/۱ و ۷۰/۷ درصد بوده است.

همچنین نتایج نشان می‌دهند که کاربرد جداگرها در کاهش جابه‌جایی جرم مواج اثرگذار نبوده و حتی موجب افزایش آن شده است. جداگرهای متصل و غیرمتصل در مخازن لاغر به طور متوسط به ترتیب موجب افزایش ۴۳/۹ و ۳۸/۰ درصد و در مخازن پهن، به ترتیب باعث افزایش ۵۶/۸ و ۶۳/۰ درصد در بیشینه‌ی جابه‌جایی جرم مواج شده‌اند. زیرا با کاربرد جداگرها، زمان تناوب سازه افزایش می‌یابد و با نزدیک شدن به زمان تناوب جرم مواج، جرم مواج در آستانه‌ی پدیده‌ی تشدید قرار می‌گیرد. [۱۹-۲۱]

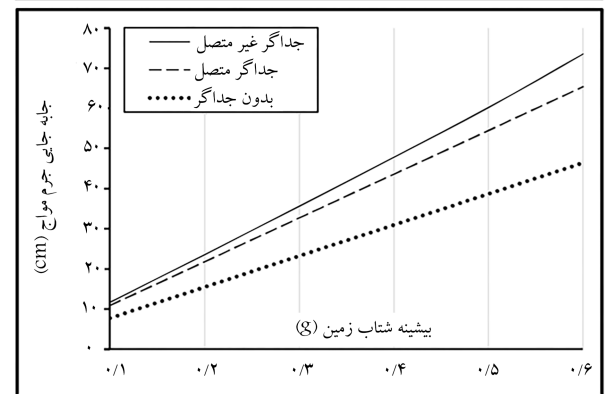
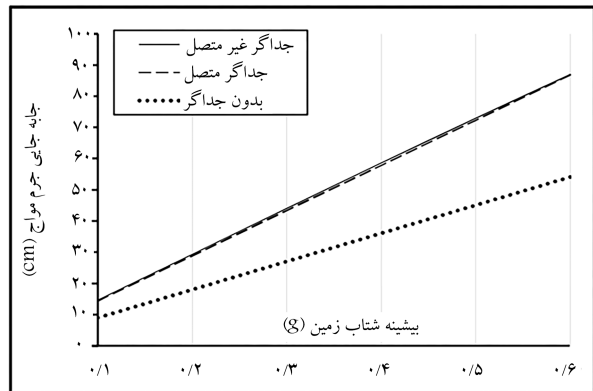
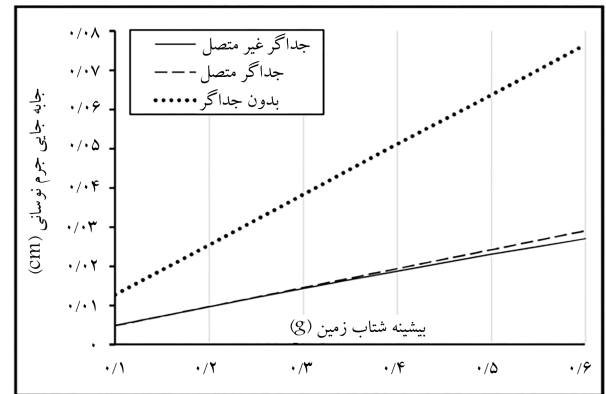
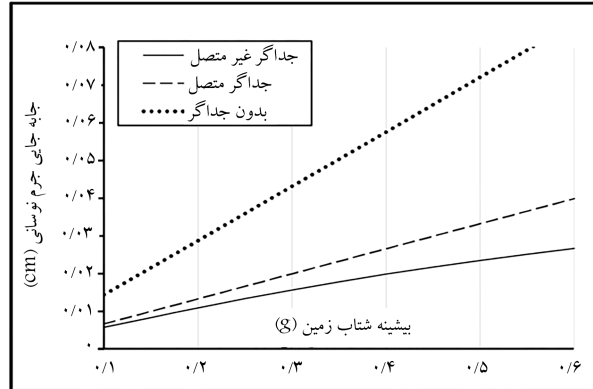
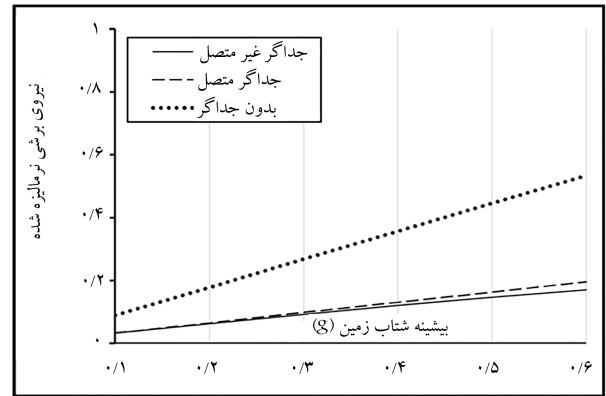
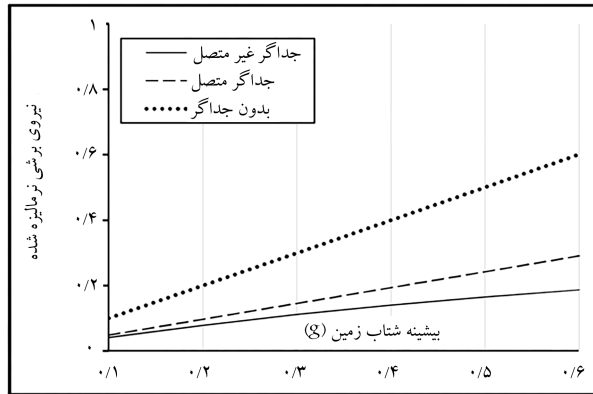
از دیگر موضوعات بررسی شده در پژوهش حاضر، تغییرات پارامترهای جابه‌جایی جرم‌ها و نیروی برشی با بیشینه‌ی شتاب زمین لرزه است. در شکل‌های ۱۳ الی ۱۵، نمودار تغییرات بیشینه‌ی جابه‌جایی جرم مواج، جرم نوسانی و نیروی برشی در مخازن لاغر بر حسب بیشینه‌ی شتاب زمین (PGA) مشاهده می‌شوند. چنانچه انتظار می‌رفت، به استثناء نمودارهای مربوط به جابه‌جایی جرم مواج، در تمامی نمودارهای مربوط به جابه‌جایی جرم نوسانی و نیروی برشی، نمودار مربوط به جداگر غیرمتصل الیافی در سطح پایین‌تری نسبت به حالت‌های جداگر متصل و بدون جداگر قرار گرفته است. همچنین نمودارها نشان می‌دهند حساسیت به تغییرات بیشینه‌ی شتاب زمین در مخازن مجهز به سیستم جداگر الیافی غیرمتصل نسبت به سایر حالت‌ها کمتر است.



شکل ۱۱. نمودار مقایسه‌ی نیروی برشی در حالت‌های بدون جداگر غیرمتصل و متصل (لوما پرتا: $PGA=0/6g$ و $H/R=1/85$).



شکل ۱۲. نمودار مقایسه‌ی نیروی برشی در حالت‌های بدون جداگر متصل (لوما پرتا: $PGA=0/6g$ و $H/R=1/85$).



شکل ۱۴. نمودار بیشینه‌ی جابه‌جایی جرم موج و نوسانی و نیروی برشی بر حسب مقادیر PGA در زلزله‌ی نورث‌ریج.

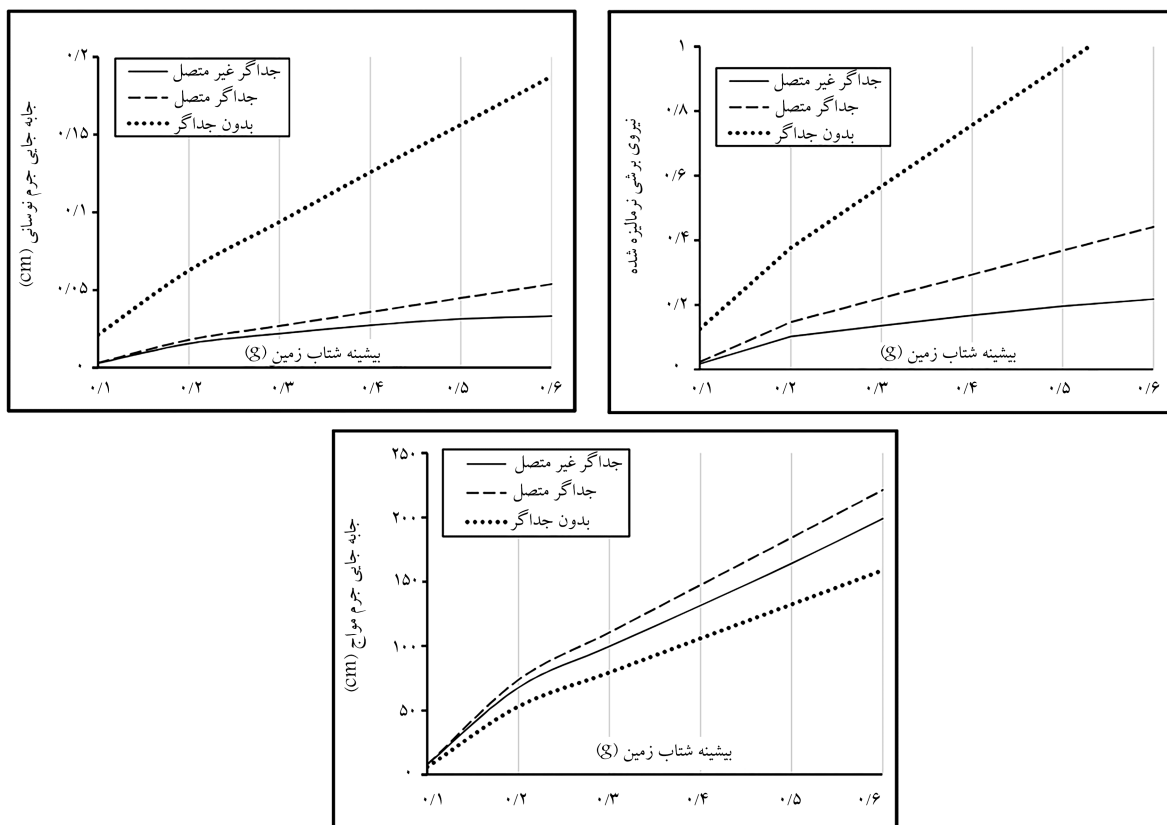
شکل ۱۳. نمودار بیشینه‌ی جابه‌جایی جرم موج و نوسانی و نیروی برشی بر حسب مقادیر PGA در زلزله‌ی امیربال ولی.

۱۱. نتیجه‌گیری

و بیشینه‌ی آن در مخازن لاغر در کاربرد جداگرهای متصل و غیرمتصل به ترتیب به طور متوسط با ۶۵/۰ و ۷۳/۲ درصد کاهش همراه بوده است. و میزان کاهش آن در مخازن پهن در جداگرهای متصل و غیرمتصل به ترتیب برابر با ۶۴/۱ و ۷۰/۷ درصد بوده است.

اما از سوی دیگر، در تمامی مدل‌های مطالعه شده، جداسازی مخازن موجب افزایش بیشینه‌ی جابه‌جایی جرم موج شده است. این موضوع در مطالعات پیشین مبنی بر افزایش جابه‌جایی جرم موج در اثر استفاده از انواع جداگرها مشاهده شده است. در مدل‌های مطالعه شده در پژوهش حاضر، جداگرهای متصل و غیرمتصل به طور متوسط در مخازن لاغر به ترتیب موجب افزایش ۴۳/۹ و ۳۸/۰ درصد و در مخازن پهن به ترتیب باعث افزایش ۵۶/۸ و ۶۳/۰ درصد در بیشینه‌ی جابه‌جایی جرم موج شده‌اند.

در پژوهش حاضر، عملکرد جداسازهای الاستومری غیرمتصل مسلح به الیاف (UFREI) و جداگرهای الاستومری متصل مسلح به صفحات فولادی (SREI) در بهبود رفتار لرزه‌ی مخازن نگهدارنده‌ی مایعات در دو دسته‌ی مخازن لاغر و پهن مطالعه و مقایسه شده است. نتایج نشان داد که کاربرد هر دو نوع جداگر در تمامی مخازن مطالعه شده موجب کاهش چشمگیر نیروی برشی ناشی از زلزله شده است. به نحوی که بیشینه‌ی نیروی برشی در مخازن لاغر با کاربرد جداگرهای متصل SREI و غیرمتصل UFREI به ترتیب به طور متوسط با ۵۹/۱ و ۷۲/۸ درصد کاهش و در مخازن پهن با ۵۰/۱ و ۶۲/۱ درصد کاهش مواجه بوده است. جداسازی مخازن در کاهش بیشینه‌ی جابه‌جایی جرم نوسانی مایع اثرگذار بوده



شکل ۱۵. نمودار بیشینه‌ی جابه‌جایی جرم موج و نوسانی و نیروی برشی بر حسب مقادیر PGA در زلزله‌ی لوما پریتا.

نظر به موارد ذکر شده می‌توان نتیجه گرفت که جداگرهای الاستومری مسلح به الیاف در کاربرد غیرمتصل در جداسازی مخازن مایعات رو زمینی عملکرد مناسب و نسبت به جداگرهای متداول الاستومری، عملکرد موثرتر و بهتری داشته‌اند.

همچنین نتایج نشان می‌دهند که حساسیت به تغییرات بیشینه‌ی شتاب زمین در مخازن مجهز به سیستم جداگر الیافی غیرمتصل نسبت به سایر حالت‌ها کمتر بوده است.

پانوشتها

1. Housner
2. Veletsos
3. Haroun
4. Malhotra
5. EuroCode8
6. Bo & Jia-Xiang
7. sloshing
8. Wang
9. friction pendulum system
10. impulsive mass
11. convective mass
12. Shrimali & Jangid
13. rigid mass
14. resilient-friction base isolation
15. Jadhav
16. Akk ose
17. fiber reinforced polymer
18. rollover deformation

19. Imperial Valley
20. Loma Prieta
21. Northridge
22. MATLAB

منابع (References)

1. Toopchi-Nezhad, H. "Unbonded fiber reinforced isolators with stable rollover deformation as a new generation of elastomeric seismic isolators", *2th National Conference on New Materials and Structures in Civil Engineering* (2013) (in Persian).
2. Toopchi-Nezhad, H., Tait, M.J. and Drysdale, R.G. "Shake table study on an ordinary low-rise building seismically isolated with SU-FREIs", *Earthquake Engineering Structural Dynamics*, **38**(11), pp.1335-1357 (2009).

3. Housner, G. "The dynamic behavior of water tanks", *Bulletin of the Seismological Society of America*, **53**(2), pp. 381-387 (1963).
4. Veletsos, A.S. "Seismic response and design of liquid storage tanks", *Proceedings of the Technical Council on Life Line Earthquake Engineering, Guidelines for the Seismic Design of Oil and Gas Pipeline Systems, ASCE, New York*, pp. 255-370 and 443-461 (1984).
5. Veletsos, A.S. "Seismic effects in flexible liquid storage tanks", *Proceedings of the 5th World Conference on Earthquake Engineering, Rome, Italy*, **1**, pp. 630-639 (1974).
6. Veletsos, A.S. and Yang, J.Y. "Earthquake response of liquid storage tanks", *Proceedings of the EMD Specialty Conference, ASCE, Raleigh, N.C.*, pp.1-24 (1977).
7. Haroun, M.A. "Vibration studies and tests of liquid storage tanks", *Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **11**(2), pp. 179-206 (1983).
8. Malhotra, P.K., Wenk, T. and Wieland, M. "Simple procedure for seismic analysis of liquid storage tanks", *Structural Engineering, IABSE*, **10**(3), pp. 197-201 (2000).
9. Bo, L. and Jia-xiang, T. "Vibration studies of base-isolated liquid storage tanks", *Computers and Structures*, **52**(5), pp. 1051-1059 (1994).
10. Wang, Y.P., Teng, M.C. and Chung, K.W. "Seismic isolation of rigid cylindrical tanks using friction pendulum bearings", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **30**(7), pp. 1083-1099 (1994).
11. Shrimali, M.K. and Jangid, R.S. "A comparative study of performance of various isolation systems for liquid storage tanks", *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, **2**(4), pp. 573-591 (2002).
12. Shrimali, M.K. and Jangid, R.S. "Nonlinear seismic response of base-isolated liquid storage tanks to bi-directional excitation", *Nuclear Engineering and design*, **217**(1), pp. 1-20 (2002).
13. Shrimali, M.K. and Jangid, R.S. "Seismic response of liquid storage tanks by sliding bearings", *Engineering Structures*, **24**(7), pp. 909-921 (2002).
14. Shrimali, M.K. and Jangid, R.S. "Dynamic analysis of liquid storage tanks with sliding systems", *Advances in Structural Engineering*, **6**(2), pp. 145-158 (2003).
15. Shrimali, M.K. and Jangid, R.S. "Seismic response of base isolated liquid storage tanks", *Journal of Vibration and Control*, **9**(10), pp. 1201-1218 (2003).
16. Jadhav, M.B. and Jangid, R S. "Response of base-isolated liquid storage tanks", *Shock and Vibration*, **11**, pp. 33-45 (2004).
17. Akkose, M., Ate, S., Bayraktar, A. and t al. "The seismic response of liquid storage tanks isolated by double concave friction pendulum bearings to near-fault ground motions", *10th World Conference on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibrations Control of Structures, Istanbul, Turkey* (2007).
18. Bakhshi, A. and Hassanikhah, A. "Comparison between seismic responses of anchored and unanchored cylindrical steel tanks", *Proc. of the 13th World Conference on Earthquake Eng., Beijing, China* (2008).
19. Goodarzi, M., Rafati, P. and Rostamkalayi, S. "Application of separators in reducing the seismic response of liquefied gas storage tanks", *Quarterly Journal of Earthquake Science and Engineering*, **2**(4) (2015), (in Persian).
20. Zare, H. "Numerical study of reducing the seismic response of steel water storage tanks by using lead rubber isolator", *15th Iranian Hydraulic Conference, Imam Khomeini International University* (2016) (in Persian).
21. Bagheri, S. and Farajian, M. "Seismic response of base isolated liquid storage tanks under near fault ground motions", *Athens Journal of Technology & Engineering* (2016).
22. Alhan, C., Gazi, H. and Guler, E. "Influence of isolation system characteristic strength on the earthquake behavior of base-isolated liquid storage tanks", *Indian journal of Engineering & Materials Sciences*, **25**(4), pp. 346-352 (2018).
23. Kalantari, A., Nikoomanesh, M.R. and Goudarzi, M.A. "Applicability of mass-spring models for seismically isolated liquid storage tanks", *Journal of Earthquake and Tsunami*, **13**(01), pp. 1950002 (2019).
24. Nikoomanesh, R., Moeini, M. and Goudarzi, M.A. "An innovative isolation system for improving the seismic behavior of liquid storage tanks", *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, **173**, pp. 1-10 (2019).
25. Kelly, J.M. and Naeem, F. "Design of seismic isolated structures: from theory of practice", *3rd Ed. Of International Institute of Seismology and Earthquake Engineering*, pp 61-68, Iran (2002), (in Persian).
26. Ghotb, M.R. and Toopchi-Nezhad, H. "A feasibility study on pre-compressed partially bonded viscoelastic dampers", *Engineering Structures*, **201**, pp. 109796 (2019).