

### چکیده

با مطرح شدن طرح ذخیره سازی گاز در کشور، ساخت مخازن ذخیره گاز طبیعی مایع، در اولویت قرار گرفته است. امنیت لرزه خیزی این سازه ها نیز با توجه به خطرهای جبران ناپذیری که ممکن است در پی داشته باشد، باید به طور جدی مد نظر قرار گیرد. وجود کف بتنی قوی، امکان استفاده از سیستم های جداساز لرزه ای را به عنوان یکی از راهکارهای مؤثر در کاهش پاسخ لرزه ای این مخازن فراهم می کند. در این مطالعه، میزان اثربخشی جداسازها در بهبود رفتار دینامیکی مخازن ذخیره مایع در هنگام اعمال بارهای لرزه ای بررسی شده است. در این راستا، از شبیه سازی رایانه ای برای پیش بینی رفتار دینامیکی سیال و سازه مخزن استفاده شده است. ابتدا مدل عددی پیشنهادی با استفاده از نتایج آزمایشگاهی راستی آزمایی شده و پس از اطمینان از صحت عملکرد مدل عددی، از آن برای انجام مطالعات پارامتری بر روی مخازن واقعی گاز مایع استفاده شده است. پاسخ دینامیکی مخازن ذخیره ای گاز مایع در هنگام اعمال بارهای دینامیکی مختلف بررسی شده و میزان اثربخشی مثبت جداسازهای لرزه ای مورد بحث قرار گرفته است. نتایج مطالعات پارامتری بیان کننده ای کاهش قابل توجه پاسخ لرزه ای مخازن گاز مایع مجهز به جداسازها است؛ اما در عین حال، ارتفاع امواج سطحی، در دامنه ای معمول مخازن کاهش قابل ملاحظه ای در اثر جداسازها ندارد.

**کلمات کلیدی:** جداسازهای لرزه ای، مخازن ذخیره ای گاز مایع، تحلیل دینامیکی مخازن، مطالعات عددی

### یادداشت تحقیقی

## استفاده از جداسازها در کاهش پاسخ لرزه ای مخازن ذخیره ای گاز مایع

محمدعلی گودرزی (نویسنده مسؤل)

استادیار، پژوهشکده مهندسی سازه، پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و

مهندسی زلزله

E-mail: [m.a.goodarzi@iiees.ac.ir](mailto:m.a.goodarzi@iiees.ac.ir)

پرویز رفعتی

عضو هیأت علمی دانشگاه جامع امام حسین (ع)

سهیل رستم کلایی

فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی زلزله، پژوهشگاه بین المللی

زلزله شناسی و مهندسی زلزله

### 1- مقدمه

در حالت کلی دو نوع سیستم جداساز لرزه ای برای سازه های معمول به کار گرفته می شود:

نوع اول جداسازهای الاستومری که متشکل از لایه های به هم جوش شده فولاد و الاستومرهای پلیمری اند. این مجموعه دارای خاصیت انعطاف پذیری زیاد در راستای افقی و خاصیت صلیبیت زیاد در راستای قائم است. در صورتی که در این نوع جداسازها از هسته سربی نیز استفاده شده باشد، به آن جداساز از نوع باربر سربی - لاستیکی اطلاق می شود.

نوع دوم، نوسانگرهای اصطکاکی اند که از یک صفحه مقعر فلزی در بالا و یک گوی فلزی محدب در پایین تشکیل شده اند. ضریب اصطکاک بین صفحه و گوی محدب طوری در نظر گرفته می شود که در مقابل بار جانبی مشخصی، امکان حرکت

جداسازی لرزه ای در واقع به کارگیری یک سیستم انعطاف پذیر در زیر سازه ها است که کف سازه را از زمین جدا و با جذب انرژی زلزله، از تأثیر مستقیم حرکات زمین به سازه جلوگیری می کند. این سیستم ها در جهت افقی شکل پذیری زیاد و در جهت قائم سختی زیادی دارند. به این ترتیب، در هنگام حرکات افقی زمین، جداسازهای لرزه ای با قبول تغییر مکان های زیاد افقی با جذب انرژی ناشی از زلزله، از سازه محافظت می کنند. اگر جداساز و سازه مورد نظر به صورت یک مجموعه واحد در نظر گرفته شود، در واقع به کارگیری جداسازهای لرزه ای باعث افزایش پیروی طبیعی این مجموعه می شود. بدین وسیله پیروی طبیعی سازه، به مقدار مناسبی از پیروی غالب بار لرزه ای اعمال شده، دور می شود و در نتیجه، بارهای لرزه ای اعمال شده به سازه کاهش می یابد.



شده است. اگرچه به کارگیری این سیستم‌ها در کشور ما و کشورهای در حال توسعه مانند ترکیه و کره جنوبی محدودتر است، اما روند استفاده از آن در محافظت لرزه‌ای سازه‌ها در این کشورها نیز در حال رشد است.

در خصوص استفاده از فن جداسازی برای کاهش آثار لرزه‌ای بر روی ساختمان‌ها، تحقیقات متعددی انجام شده است؛ اما تحقیقات انجام شده در رابطه با مخازن ذخیره مایع مجهز به سیستم‌های جداساز لرزه‌ای محدود و لزوم مطالعات جامع‌تر در این حوزه کاملاً مشهود است. در ادامه به برخی از مهم‌ترین این تحقیقات اشاره شده است.

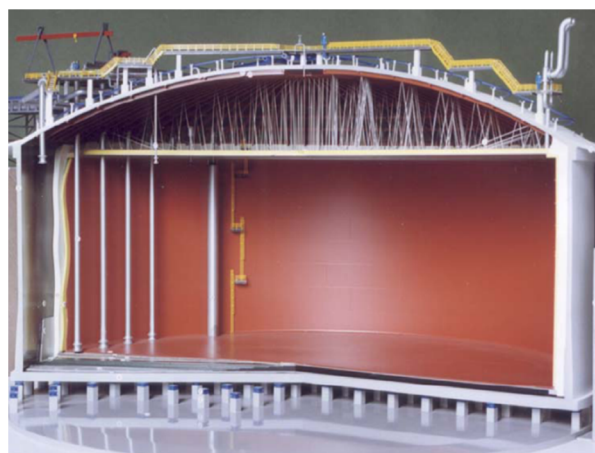
در تحقیقی در سال 1988 [1] مخازن ذخیره مایع تحت بارهای لرزه‌ای بررسی تحلیلی و آزمایشگاهی شد. در این تحقیق، برای بررسی‌های آزمایشگاهی از دو مخزن فلزی پر شده با آب استفاده شد. یکی از این مخازن بر روی یک ساختمان 9 طبقه‌ی مجهز با جداسازهای لرزه‌ای و مخزن دیگر بر روی میز لرزه قرار داده شد. با بررسی اختلاف نتایج حاصل برای فشار وارد بر روی دیواره از طرف آب و میزان ارتفاع امواج ایجاد شده در دو مخزن، نقش جداسازها در کاهش پاسخ کلی مخازن تبیین شد. در این رابطه، مشخص شد که جداسازها به شدت در کاهش نیروهای وارد بر جداره‌ی مخازن مؤثرند.

کیم و لی در سال 1995 [2] نیز به بررسی آزمایشگاهی رفتار مخازن مجهز به جداسازهای الاستومری و اصطکاک‌ی پرداختند. هدف اصلی آنها پیشنهاد روشی برای انجام آزمایش‌های استاندارد مخازن ذخیره مایع بود. در این آزمایش‌ها، پاسخ دینامیکی مخازن مجهز به جداسازها، با استفاده از آزمایش‌های شبه استاتیکی تخمین زده شد.

در چند تحقیق جداگانه در سال 2004 [3] نیز مخازن گاز مایع تحلیل شد. در این تحلیل ابتدا از مدل‌های جرم-فنر برای ساده‌سازی رفتار سیال استفاده و سپس سیستم مخزن و جداساز لرزه‌ای به صورت یک مجموعه چند درجه آزادی تحت بار دلخواه دینامیکی فرض شد. با حل معادلات مربوط به این

نسی گوی و صفحه در راستای افقی فراهم شود. به این ترتیب مقداری از انرژی بارهای دینامیکی با اصطکاک ایجاد شده بین صفحات فلزی مذکور مستهلک می‌شود.

ساخت مخازن ذخیره‌ی گاز طبیعی پیچیده و مستلزم استفاده از مصالح خاصی است. مخازن جدید مورد استفاده برای ذخیره‌ی گاز مایع دوجداره‌اند. گاز طبیعی مایع در دمای خیلی کم (بیش از 150-) و تحت فشار خیلی زیاد قابل ذخیره است؛ بنابراین مخازن ذخیره گاز مایع یک جداره‌ی فولادی داخلی دارد که گاز مایع به طور مستقیم در آن ذخیره می‌شود. جداره‌ی خارجی مخزن که به فاصله‌ی یک متر از جداره‌ی داخلی ساخته می‌شود، از جنس بتن مسلح پس کشیده است و فاصله بین دو جداره نیز با عایق حرارتی پر می‌شود تا از تبادل حرارتی گاز مایع با محیط بیرون جلوگیری کند. این نوع مخازن، بر روی یک دال بتنی ضخیم قرار می‌گیرند که در صورت ضعیف بودن خاک محل، از شمع برای استقرار در زیر دال مخزن استفاده می‌شود. ماکت یکی از این نوع مخازن در شکل (1) نشان داده شده است.



شکل (1): نمای کلی مخازن ذخیره‌ی گاز طبیعی اجرا شده در یونان (Revithoussa LNG Terminal) و محافظت‌شده با جداسازهای لرزه‌ای

## 2- مروری بر مطالعات پیشین بر روی مخازن ذخیره‌ی مجهز به جداسازهای لرزه‌ای

استفاده از سیستم‌های جداساز لرزه‌ای برای ساختمان‌ها و سازه‌های مهندسی عمران معمول‌تر است و در چند دهه‌ی اخیر در بسیاری از کشورها این روش برای ساختمان‌ها به کار گرفته

مخازن ذخیره مورد استفاده در عمل، علاوه بر ارائه مدل عددی مناسب برای انجام تحقیقات گوناگون، حوزه عملکرد جداساز در مخازن با ابعاد معمول به صورت پارامتری بررسی شده است.

### 3- معرفی مدل اجزای محدود مورد استفاده در تحلیل عددی

بررسی عملکرد لرزه‌ای مخازن ذخیره مایع مجهز به جداسازهای لرزه‌ای در محدوده ابعاد واقعی یکی از مهم‌ترین اهداف تحقیق حاضر است. در این راستا، از مدل عددی استفاده شده است. به این ترتیب، ابتدا راهبرد شبیه‌سازی رایانه‌ای مورد استفاده معرفی و سپس مدل عددی مذکور در مقایسه با نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی کالیبره شده است. در نهایت، با استفاده از مدل عددی راستی‌آزمایی شده و انتخاب نمونه‌هایی از مخازن با ابعاد هندسی معمول و انجام مطالعات پارامتری، آثار ناشی از به کارگیری جداسازهای لرزه‌ای در کاهش و یا افزایش پاسخ دینامیکی مخازن ذخیره مایع بررسی شده است.

در مدل عددی مورد استفاده، از روش اجزای محدود برای شبیه‌سازی جداره و مایع درون مخزن استفاده شده است. همچنین رفتار الاستوپلاستیک جداره مخزن، مد نظر قرار نگرفته و فرض شده که رفتار جداره مخزن به صورت الاستیک باقی می‌ماند؛ لذا در مدل عددی از اجزای چهارگره‌ای پوسته‌ای، که قابلیت مدل‌سازی رفتار غشایی و خمشی جداره مخزن را داشته باشند، استفاده شده است. محیط سیال با استفاده از روش لاگرانژی بر مبنای تغییر مکان‌های نقاط ذرات، پارامترهای محیط مایع را محاسبه می‌کند. بدین منظور، عضو سه‌بعدی مکعبی با 8 گره و 24 درجه آزادی، برای مدل‌سازی محیط مایع به کار گرفته شده است. برهم‌کنش مایع و سازه نیز با انطباق حرکت نقاط مشترک مایع و سازه در مرز تماس مخزن با مایع در مدل عددی اعمال شده است؛ به عبارت دیگر، فشار وارد بر مخزن از طرف مایع در جهت عمود بر دیوار مخزن اعمال شده است. برهم‌کنش خاک و مخزن در نظر گرفته نشده و پی، صلب

سیستم، پاسخ تقریبی مخازن ذخیره مایع به صورت روابط نظری قابل محاسبه است. رفتار غیرخطی جداسازها در هنگام اعمال بارهای لرزه‌ای باعث شد تا آنها از روش نیومارک برای پیش‌بینی زمانی پاسخ لرزه‌ای مخازن استفاده نمایند. همچنین آنها آثار برهم‌کنش مربوط به در نظر گرفتن هم‌زمان مؤلفه‌های افقی زلزله را نیز بر روی پاسخ دینامیکی مخازن لحاظ کردند. با ایجاد مدل مذکور، مطالعات پارامتری بر روی مخازن انجام و اثر عواملی نظیر میرایی، ابعاد مخزن و مشخصات مصالح مورد استفاده در پلیمرها مورد بررسی قرار گرفت.

در سال 2006 جادهاو و جانگید [4] آثار ناشی از وجود پالس‌های نزدیک به گسل بر روی پاسخ مخازن ذخیره مایع با استفاده از مدل جرم و فنر اشاره شده را بررسی کردند. در این تحقیق از جداسازهای اصطکاکی نیز در زیر مخزن استفاده و نتیجه‌گیری شد که پاسخ لرزه‌ای مخازن ذخیره مایع به نگاشت‌ها، که شامل پالس‌های بلند باشد، را می‌توان با به کارگیری جداسازها کنترل کرد. تحقیقات متعدد دیگری نیز در زمینه مخازن مجهز به جداسازهای لرزه‌ای انجام گرفته است که در این مقاله به آنها اشاره نشده است.

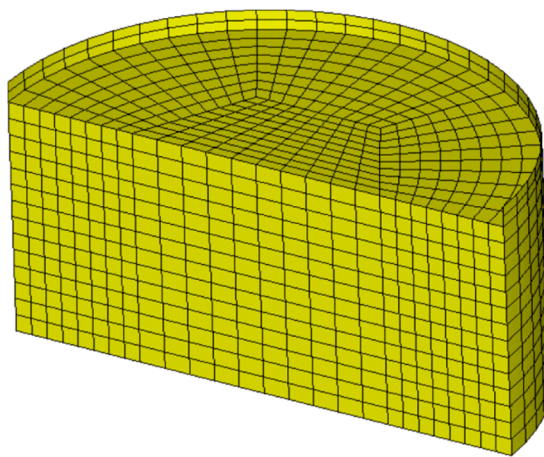
در تمامی این مطالعات بر نقش بلامنازع وجود جداسازهای الاستومری در کاهش پاسخ لرزه‌ای مخازن ذخیره مایع تأکید شده است. غالب تحقیقات مورد اشاره با به کارگیری روش‌های آزمایشگاهی و نظری به تحلیل دینامیکی مخازن مجهز به جداسازها پرداخته‌اند؛ اما تبیین وجوه مختلف رفتار دینامیکی مخازن جداسازی شده مستلزم انجام تحقیقات بسیاری در زمینه‌های مختلف است که با انجام آزمایش‌های هزینه‌بر برای انجام این تحقیقات، متناسب نیست. استفاده از روش‌های عددی به دلیل صرف هزینه اندک و قابلیت مدل‌سازی جزئیات مسأله، می‌تواند به عنوان یکی از بهترین گزینه‌ها برای تحلیل دینامیکی مخازن مجهز به جداسازهای لرزه‌ای، مورد استفاده قرار گیرد؛ به‌ویژه اینکه مطالعات پارامتری بر روی مخازن واقعی جز با استفاده از شبیه‌سازی‌های رایانه‌ای امکان‌پذیر نیست. در این تحقیق، با شبیه‌سازی رایانه‌ای پدیده مذکور در ابعاد واقعی



این مخزن با یک متر طول، یک متر ارتفاع و  $0/3$  متر عرض (شکل 3) بر روی میز لرزه پژوهشگاه قرار داده شده و با استفاده از تجهیزات آزمایشگاهی، ارتفاع آزاد مایع و تغییرات آن تحت بارهای هارمونیک و لرزه‌ای اندازه‌گیری شد. بار هارمونیک به شکل اعمال تغییر مکان سینوسی با دامنه افقی برابر با  $0/005$  متر در نظر گرفته شده است. ارتفاع آزاد مایع در مخزن برابر با  $0/624$  متر است که برابر با نسبت هندسی ارتفاع به شعاع برابر با یک سوم، در نظر گرفته شده است. این مخزن آزمایشگاهی به وسیله‌ی بارهای سینوسی با سه فرکانس مختلف تحت لرزش افقی قرار گرفته است.

این فرکانس‌ها به ترتیب برابر با فرکانس طبیعی مخزن آزمایشگاهی، بیشتر و کمتر از آن است. همین مخزن به وسیله مدل عددی معرفی شده در بخش قبل نیز در محیط رایانه شبیه‌سازی و تحت شرایط هندسی و بارهای هارمونیک مشابه تحلیل دینامیکی شده‌اند. نتایج حاصل از حل عددی و نتایج اندازه‌گیری در آزمایشگاه، برای مقادیر آزاد سطح مایع در کنار دیواره مخزن، برای هر سه مقدار فرکانس یاد شده در شکل (4) مقایسه شده‌اند. شکل مذکور نشان‌دهنده آن است که نتایج آزمایشگاهی و نتایج عددی به طرز مناسبی بر هم منطبق است که حاکی از صحت عملکرد عددی به کار رفته است.

فرض شده است؛ بنابراین مایع در محل کف مخزن فقط در جهت افقی امکان حرکت دارد و از حرکت آن در جهت قائم جلوگیری شده است. نمونه‌ای از شبکه‌بندی اجزای محدود مورد استفاده برای مخازن مورد بررسی که بر اساس شرایط مرزی اشاره شده ساخته شده، در شکل (2) نشان داده شده است.



شکل (2): شبکه‌بندی مدل اجزای محدود مورد استفاده برای مخازن مجهز به جداساز لرزه‌ای

#### 4- راستی آزمایشی نتایج مدل عددی

به منظور اطمینان از صحت عملکرد مدل عددی و راهبرد شبیه‌سازی رایانه‌ای پیشنهاد شده در بخش قبل، از نتایج آزمایشگاهی یک مخزن دوبعدی، در آزمایشگاه سازه پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، استفاده شده است.



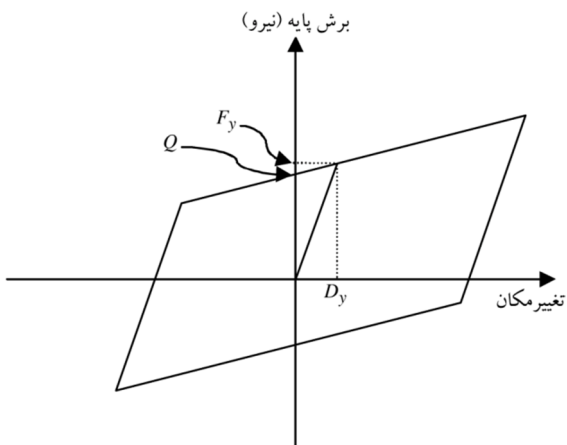
شکل (3): مخزن آزمایشگاهی مورد استفاده برای راستی آزمایشی عملکرد مدل عددی

بر روی رفتار لرزه‌ای مخازن ذخیره مایع از مدل اجزای محدود معرفی شده در قسمت قبل استفاده شده است. سه مخزن پهن ( $H/R = 0.3$ )، متوسط ( $H/R = 1$ ) و لاغر ( $H/R = 2.6$ ) به عنوان نمونه‌های مورد بررسی انتخاب شده‌اند. هر سه مخزن بر اساس آیین‌نامه‌ی API طراحی شده و از مخازن واقعی‌اند. مشخصات هندسی این مخازن در جدول (1) ارائه شده است.

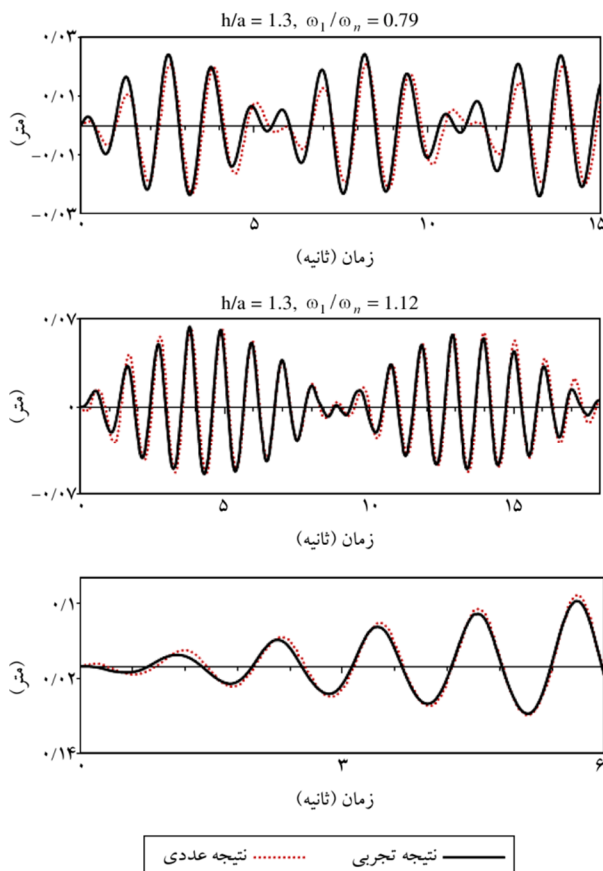
## 5-2- نحوه طراحی و محاسبه سیستم جداساز استفاده شده در مدل عددی

سیستم جداساز اعمال‌شده در مدل اجزای محدود مورد استفاده، در واقع یک سیستم غیرخطی درجه اول است که بیان‌کننده‌ی رفتار سیستم‌های جداساز الاستومری است. یک چرخه غیرخطی معرف پارامترهای مؤثر در رفتار جداساز مورد استفاده، در شکل (5) نشان داده شده است.

معمولاً پیوند طبیعی غیرخطی سیستم بین  $1/5$  تا  $3$  ثانیه در نظر گرفته می‌شود. در این مطالعه مقدار میانگینی برابر با  $2/5$  ثانیه



شکل (5): چرخه مستهلک شدن انرژی به‌وسیله‌ی به‌کارگیری جداساز لرزه‌ای مورد استفاده



شکل (4): مقایسه نتایج حاصل از اندازه‌گیری آزمایشگاهی و نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی تحت بارهای هارمونیک

## 5-5- تحلیل‌های عددی انجام‌شده بر روی مخازن با ابعاد واقعی

پس از راستی‌آزمایی مدل عددی با استفاده از نتایج آزمایشگاهی، در این بخش به استفاده از مدل عددی برای انجام مطالعات پارامتری پرداخته شده است.

### 5-5-1- ابعاد مخازن واقعی انتخاب‌شده برای انجام مطالعات پارامتری

به منظور برآورد عملکرد دینامیکی سیستم جداساز لرزه‌ای

جدول (1): مشخصات مخازن مورد بررسی در تحلیل‌های اجزای محدود

شعاع مخزن (متر)	ارتفاع جداره مخزن (متر)	ارتفاع مایع (متر)	ضخامت پایین جداره مخزن (متر)	ضخامت بالای جداره مخزن (متر)	جرم حجمی سیال (کیلوگرم بر متر مربع)	نوع سیال	مدول ارتجاعی سیال (نیوتن بر متر مربع)
54/5	17/5	15/85	0/03	0/03	885	نفت	1/65E+09
37	40/6	37/4	0/033	0/033	480	گاز مایع	2/00E+09
5/2	8	6/5	0/006	0/006	1000	آب	2/10E+09

مشابه چرخه معادلی نظیر چرخه نشان داده شده در شکل (5) ایجاد می‌کند.

### 5-3- بارهای لرزه‌ای اعمال شده به مخازن

مدل عددی هر یک از مخازن مورد بررسی، تحت پنج نگاهت مختلف زلزله قرار داده شده است. پریود مدهای طبیعی ارتعاش مایع موجود در مخازن، به مقدار قابل توجهی بیشتر از سازه‌های معمول مهندسی است (پریود مد اصلی ارتعاش مایع در مخازن ذخیره معمولاً بین 2 تا 10 ثانیه بوده و بعضاً تا 15 ثانیه نیز می‌رسد)؛ اما پریود مد ارتعاش جرم سخت مایع (مدهای اندرکنشی)، بر خلاف جرم موج، در حد سایر سازه‌های مهندسی است (کمتر از 1 ثانیه). از طرفی تحریک مدهای ارتعاشی با پریود زیاد، نیاز به نگاهت‌هایی دارد که در آنها پالس‌های با حرکت طولانی زمین رخ داده باشد. به عبارت دیگر، مدهای اصلی ارتعاش مایع، که مسبب ایجاد امواج سطحی است، بیشتر متأثر از جابه‌جایی زمین‌اند تا شتاب زمین. این خصوصیت باعث می‌شود که تحریک جرم موج، بیشتر به پریودهای حرکتی زمین وابسته باشد تا مقدار سایر پارامترهایی نظیر بیشینه شتاب زمین. با این توضیحات، نگاهت‌های مورد استفاده در تحلیل‌های وابسته به زمان، طوری انتخاب شده‌اند که دارای پریود غالب بیشتری (برای تحریک مدهای نوسانی مایع) نیز باشند. مشخصات زلزله‌های ورودی در جدول (3) و نمودارهای تاریخچه زمانی شتاب مربوط به این نگاهت‌ها در شکل (6) نشان داده شده است. این زلزله‌ها به عنوان بار لرزه‌ای افقی وارد شده به نمونه‌های مورد بررسی، در نظر گرفته شده‌اند. شتاب بیشینه این زلزله‌ها از 2/8 تا 8/3 متر بر مجذور ثانیه متفاوت است.

به عنوان پریود طبیعی سیستم جداساز مورد استفاده لحاظ شده است؛ بنابراین،  $T_{iso} = 2.5 \text{ sec}$  در نظر گرفته شده است.

مقدار مقاومت مشخصه سیال با توجه به مشارکت عمده جرم نوسانی در پاسخ مخزن تعیین می‌شود و جرم موج با توجه به پریود زیاد آن تأثیر چندانی ندارد. تعیین مقدار سختی متناظر با جداساز را می‌توان از رابطه (1) محاسبه نمود:

$$K_p = M_{imp} (2\pi/T_{iso})^2 \quad (1)$$

در این رابطه،  $E_p =$  سختی متناظر با سیستم جداساز،  $T_{iso} =$  پریود جداساز مورد استفاده و  $M_{imp} =$  جرم نوسانی سیال است؛ بنابراین مقدار سختی الاستیک سیستم مورد استفاده (شکل 5) را می‌توان از رابطه (2) محاسبه نمود:

$$K_e = (D_y K_p + Q) / T_{iso}^2 \quad (2)$$

در این رابطه،  $D_y =$  مقدار جابه‌جایی متناظر با جاری شدن سیستم جداساز لرزه‌ای  $K_e =$  سختی بخش الاستیک جداساز و  $Q =$  مقاومت مشخصه سیال است؛ بنابراین، مقدار نیروی جاری شدن کلی سیستم جداساز را نیز می‌توان از رابطه (3) به دست آورد:

$$F_y = K_e D_y \quad (3)$$

در این رابطه،  $F_y =$  نیروی جاری شدن کلی سیستم جداساز است. با استفاده از مقادیر ذکر شده و استفاده از روابط مذکور، مقدار پارامترهای طراحی شده برای سیستم جداساز برای مخازن ذخیره مایع مورد استفاده در تحلیل‌های عددی با جدول (2) قابل محاسبه است.

سیستم جداساز مذکور به صورت مدل فنرهای غیرخطی که مابین مخزن و زمین قرار گرفته‌اند، در مدل اجزای محدود در نظر گرفته شده است. این فنر غیرخطی چرخه استهلاک انرژی

جدول (2): پارامترهای مورد نیاز برای طراحی سیستم جداساز برای مخازن مورد بررسی در تحلیل‌های اجزای محدود

مخزن	$T_{iso}$ (ثانیه)	$W_{imp}$ (کیلو نیوتن)	$Q$ (نیوتن)	$K_e$ (کیلو نیوتن بر متر)	$K_p$ (کیلو نیوتن بر متر)	$F_y$ (کیلو نیوتن)
مخزن 1	2/5	225992	18079362	1953449	145513	19534
مخزن 2	2/5	407281	32582487	3520492	262243	35204
مخزن 3	2/5	1014	81131	8766	652	87

مخازن جداسازی شده و بدون جداساز معرفی شده در بخش قبل، شامل لنگر خمشی، نیروی برشی و ارتفاع امواج سطحی مایع ارائه شده است.

1-4-5- نتایج عددی حاصل برای لنگر واژگونی و نیروی برشی پایه مخزن

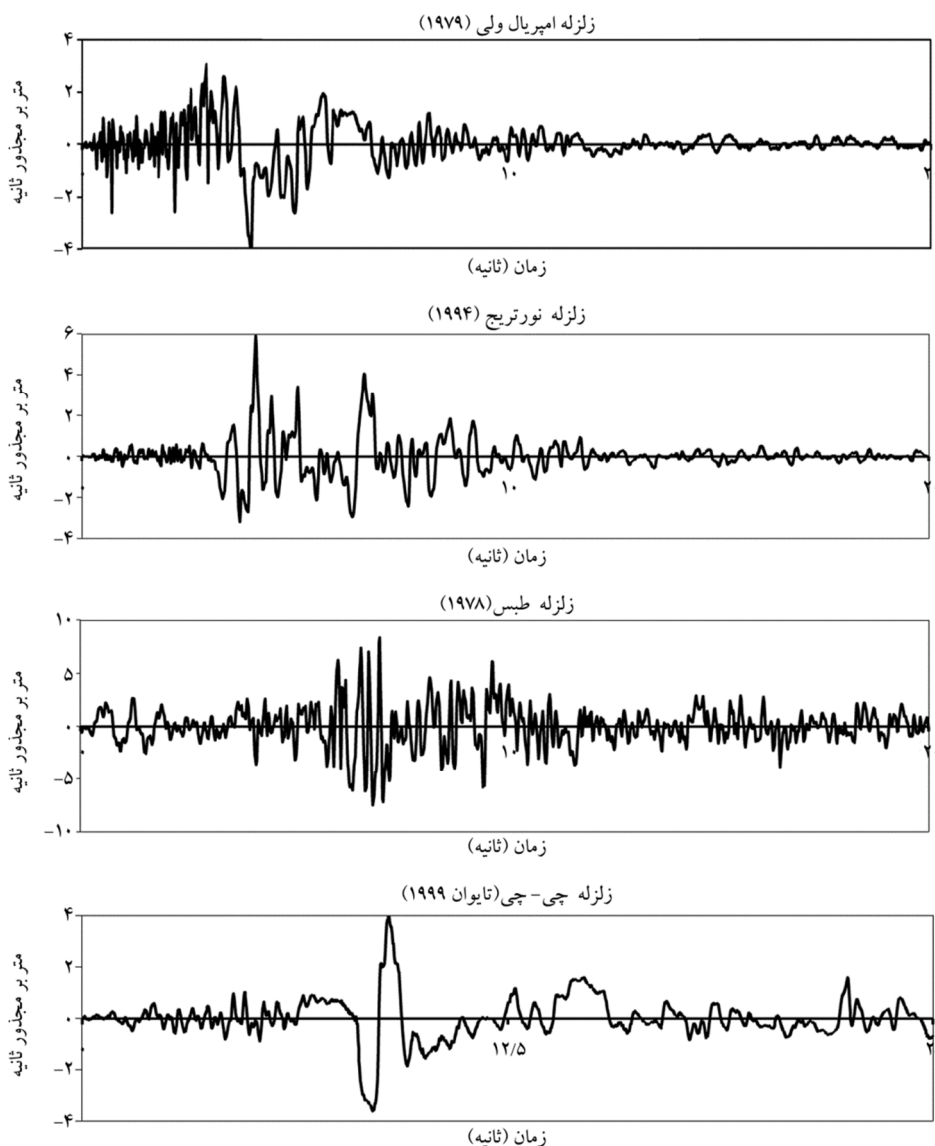
تاریخچه زمانی تغییرات لنگر واژگونی برای مخازن لاغر، متوسط و پهن به تفکیک برای سیستم‌های با و بدون سیستم جداساز لرزه‌ای به عنوان نمونه برای دو زلزله چی - چی و طیس در شکل‌های (7) تا (9) ارائه شده است. همچنین نتایج کمی بیشینه نیروی برشی و لنگر واژگونی برای همه نمونه‌ها در جداول (4) و (5) آورده شده است.

جدول (3): مشخصات زلزله‌های مورد استفاده در تحلیل‌های عددی وابسته به زمان

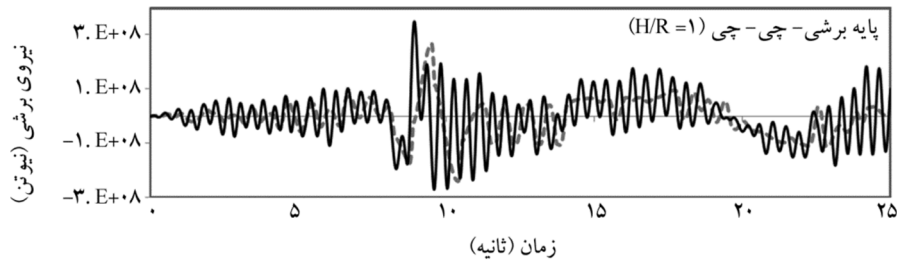
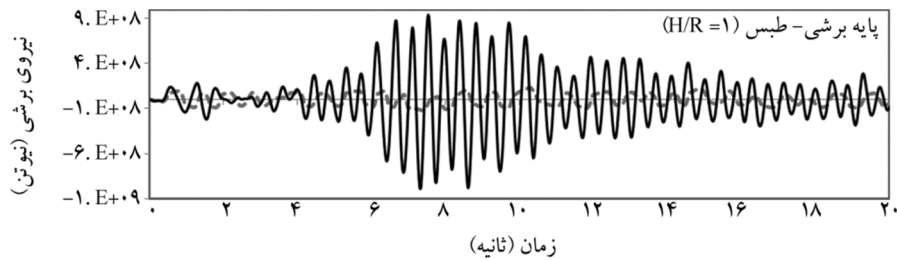
نام زلزله	سال وقوع	شتاب بیشینه زمین (g)	پریود غالب زلزله (ثانیه)	علامت اختصاصی زلزله
ال سنترو	1940	4/1	.5	EL
امپریال ولی	1979	2/9	0/23	IV
چی - چی	1999	3/03	1/14	CHI
طیس	1978	8/3	0/2	TAB
نورتریج	1994	5/9	0/54	NOR

4-5- تحلیل نتایج حاصل از انجام تحلیل‌های عددی

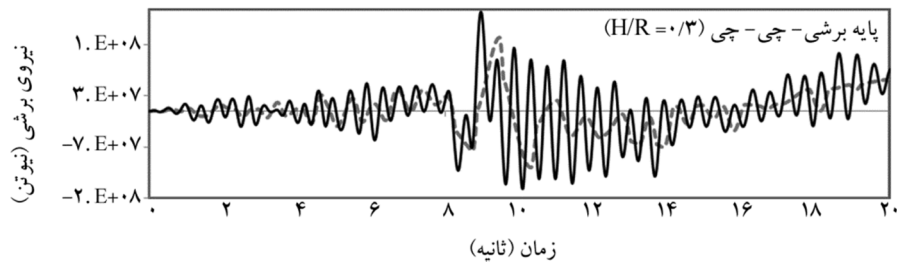
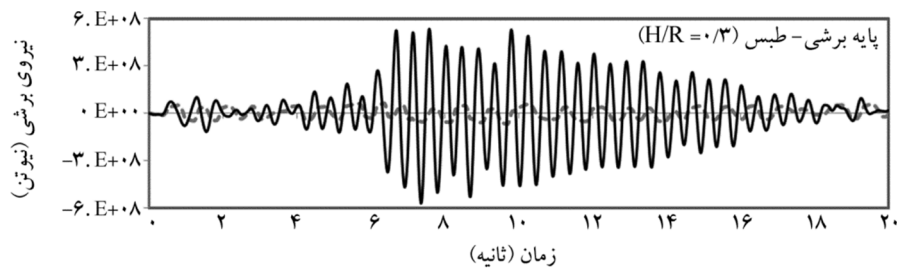
در این بخش نتایج حاصل از تحلیل تاریخچه زمانی برای



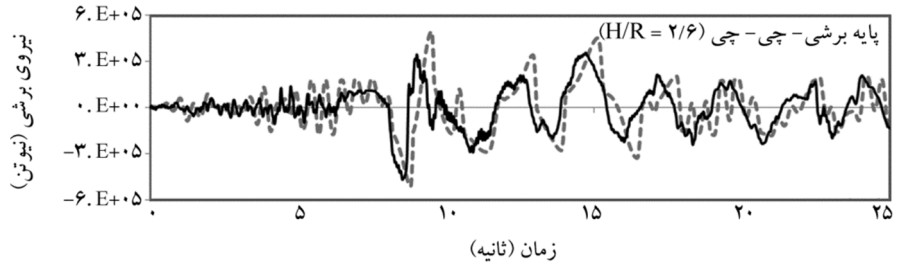
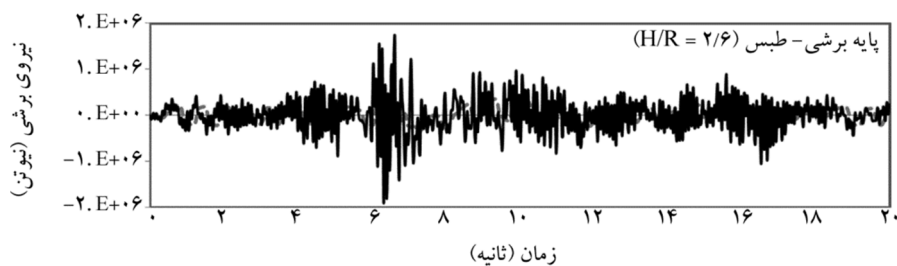
شکل (6): نمودار تاریخچه زمانی نکاشت‌های شتاب مورد استفاده در تحلیل‌های عددی



شکل (7): نمودار تاریخچه زمانی نیروی برشی مربوط به مخزن با ابعاد متوسط



شکل (8): نمودار تاریخچه زمانی نیروی برشی مربوط به مخزن پهن



شکل (9): نمودار تاریخچه زمانی نیروی برشی مربوط به مخزن لاغر



**جدول (4): بیشینه نیروهای برشی محاسبه شده در مخازن (نتایج مدل عددی) بر حسب کیلو نیوتن**

$$\text{Differences (\%)} = 100 \times (\text{Fixed-BS}) / \text{Fixed}$$

مخزن	نوع مخزن	چی - چی	ال سنتر	امپریال ولی	نورتریج	طبس
مخزن 1 (R=53m)	BS Fixed	143444	47616	58236	80272	69841
	Differences (%)	193341	221551	179155	331382	570033
		26	79	67	76	88
مخزن 2 (R=37m)	BS Fixed	267464	88015	125548	153873	129854
	Differences (%)	348148	415368	412825	684681	984647
		23	79	70	78	87
مخزن 3 (R = 6/2m)	BS Fixed	511	223	350	307	353
	Differences (%)	467	516	636	722	1863
		9	57	45	57	81

**جدول (5): بیشینه لنگر خمشی محاسبه شده در مخازن (نتایج مدل عددی) بر حسب کیلو نیوتن بر متر**

$$\text{Differences (\%)} = 100 \times (\text{Fixed-BS}) / \text{Fixed}$$

مخزن	نوع مخزن	چی - چی	ال سنتر	امپریال ولی	نورتریج	طبس
مخزن 1 (R=53m)	BS Fixed	895820	3044099	353485	501234	498131
	Differences (%)	1286895	1496733	1186925	2217541	3875070
		30	80	70	77	87
مخزن 2 (R=37m)	BS Fixed	4162672	1363830	1805626	2308497	2029499
	Differences (%)	5731904	6571204	7021780	11158885	17179562
		27	79	74	79	88
مخزن 3 (R = 6/2m)	BS Fixed	1686	736	1218	1102	1161
	Differences (%)	1282	1439	1807	1774	5375
		32	49	33	38	78

نصف مقدار بدون جداساز، در کاهش پارامترهای اصلی طراحی تأثیر داشته باشد. مشاهده می‌شود، درصد متوسط کاهش نیروی برشی برای مخازن مجهز به جداسازهای لرزه‌ای برای مخازن لاغر، متوسط و پهن به ترتیب برابر با 47%، 70% و 71% و درصدها برای مقدار لنگر خمشی نیز به ترتیب برای سه مخزن مورد بررسی برابر با 50%، 69% و 71% است.

در مخازن پهن و متوسط، تقریباً آثار به کارگیری جداسازی لرزه‌ای یکسان است؛ اما در مورد مخزن لاغر، به کارگیری جداسازی لرزه‌ای نتوانسته است به مقدار بقیه مخازن در کاهش پارامترهای طراحی مؤثر باشد. دلیل این موضوع را می‌توان در نحوه تأثیر جرم‌های مختلف سیال جستجو نمود. به این معنی

لنگر خمشی ارائه شده در جداول مذکور، نسبت به خط مرکزی مخازن محاسبه شده است. در این جداول، نتایج مربوط به تحلیل مدل اجزای محدود مخازن مجهز به جداساز لرزه‌ای به اختصار با BS نشان داده شده است و نتایج حاصل برای مخازن مشابه ولی بدون سیستم جداساز با علامت Fixed نشان داده شده است. در این جداول، مقدار درصد تفاوت نتایج حاصل از مخازن با و بدون سیستم جداساز نیز به صورت جداگانه محاسبه و ارائه شده است تا امکان مقایسه نتایج وجود داشته باشد.

بر اساس نمودارها و جداول ارائه شده، به کارگیری جداسازی لرزه‌ای می‌تواند به طور چشمگیری نیروهای مهم طراحی لرزه‌ای مخازن را کاهش دهد و حتی تا مقدار بیش از



طبیعی جرم موج به مقدار قابل توجهی بیشتر از پریرود جرم نوسانی است و استفاده از جداسازها معمولاً در بسیاری از موارد به اندازه مورد انتظار در کاهش پاسخ دینامیکی مخازن مؤثر واقع می‌شوند؛ اما این نکته را نیز باید توجه کرد که مؤثر بودن جداسازها به شدت به پارامترهای هندسی و شرایط بار اعمال شده، بستگی دارد.

#### 5-4-2- نتایج تحلیل عددی برای بیشینه ارتفاع آزاد مایع

حداکثر ارتفاع آزاد مایع ایجاد شده در محل سطح آزاد، یکی از پارامترهای مؤثر در طراحی مخازن ذخیره مایع است. اگر ارتفاع آزاد مایع از مقدار مشخصی بیشتر شود، با سقف مخزن برخورد می‌کند و باعث اعمال خساراتی بر روی سقف مخزن می‌شود. برای این منظور، باید ارتفاع بیشینه امواج سطحی را در حد معینی نگه داشت. در غیر این صورت، باید مقدار اضافی فشار احتمالی سیال بر اثر برخورد با سقف را در محاسبات لحاظ نمود.

در مورد نمونه‌های مورد بررسی در این تحقیق، نتایج حاصل برای بیشینه ارتفاع آزاد مایع در جدول (6) آورده شده است. همچنین تغییرات تاریخچه زمانی ارتفاع آزاد مایع در کناره دیواره مخازن مورد بررسی تحت زلزله چی - چی در شکل (10) نشان داده شده است. در اکثر نمونه‌های مورد بررسی، اختلاف ارتفاع آزاد مایع گزارش شده بین مقدار محاسبه شده برای مخازن با و بدون جداساز لرزه‌ای، کمتر از 10 درصد است. این موضوع نشان می‌دهد که جداسازی لرزه‌ای به دلیل آنکه ارتفاع آزاد امواج سطحی، بیش از هر عاملی، به حرکت جرم موج سیال بستگی دارد، در کاهش ارتفاع آزاد مایع نقش چندانی ندارد. از آنجا که پریرود جرم موج به مقدار قابل توجهی با پریرود طبیعی جداسازها فاصله دارد، در نتیجه، آثار جداسازی لرزه‌ای بر روی ارتفاع آزاد مایع و تغییرات زمانی آن بسیار اندک است؛ حتی در برخی موارد، ارتفاع آزاد مایع افزایش جزئی نیز نشان می‌دهد که این موضوع هم با توجه به پریرود زیاد ایجاد شده توسط جداساز، کاملاً قابل توجیه است. به عبارت دیگر، با به کارگیری جداسازها، پریرود طبیعی سازه افزایش یافته است.

که جرم نوسانی سیال، معمولاً تأثیر عمده‌ای در پاسخ دینامیکی مخازن به عهده دارد؛ به طوری که در بسیاری از موارد، پاسخ نهایی مخزن را می‌توان با تقریب مناسبی برابر با پاسخ جرم نوسانی فرض نمود؛ اما در مواقعی که جرم موج سیال به وسیله بار وارد بر آن تشدید می‌شود، نقش این جرم نیز در پاسخ نهایی مخزن قابل توجه می‌شود.

مخزن لاغر مورد بررسی در این تحقیق نیز پریرود طبیعی جرم انتقالی سیال برابر با  $2/34$  ثانیه دارد که به مقدار پریرود طبیعی جداساز لرزه‌ای ( $2/54$  ثانیه) بسیار نزدیک است؛ بنابراین واضح است که در مورد مخزن لاغر جرم انتقالی در آستانه تشدید قرار گرفته و سهم آن در پاسخ نهایی مخزن به طرز چشمگیری افزایش یافته است. به عبارت دیگر، آثار جداسازی لرزه‌ای برای مخزن لاغر نتوانسته است همانند بقیه مخازن به کاهش نیروی برشی و لنگر خمشی بیانجامد.

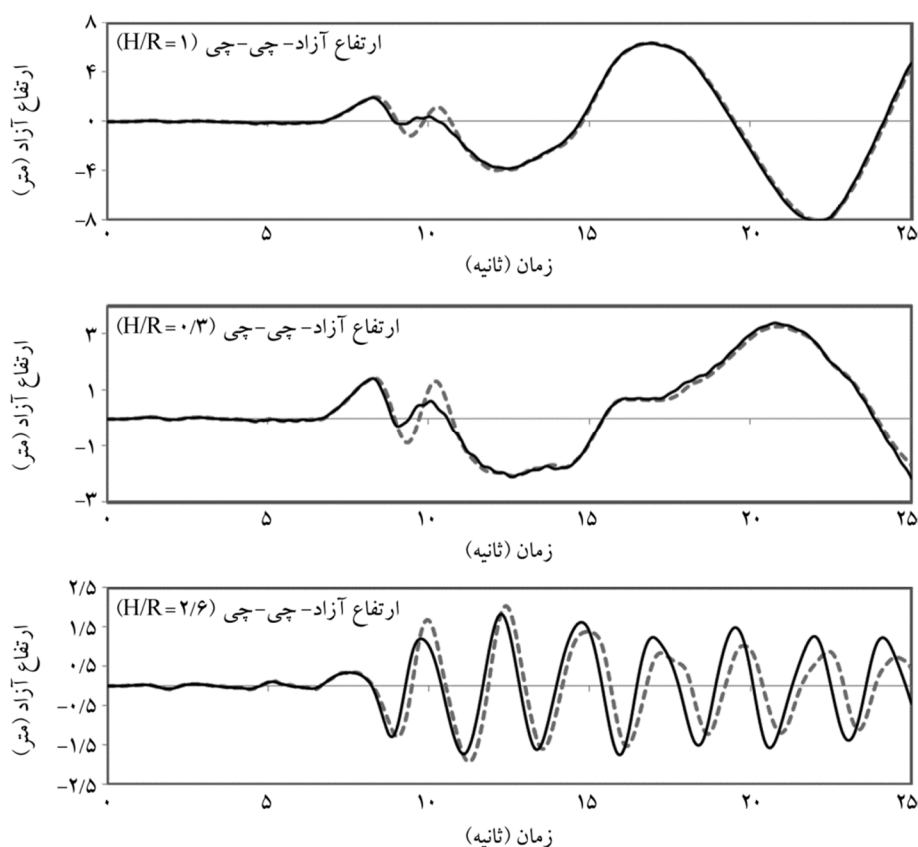
در مورد هر یک از مخازن به صورت جداگانه، کمترین تأثیر جداسازها تحت اعمال زلزله چی - چی رخ داده است (شکل 7 تا 9). این زلزله خاص از نوع زلزله‌های با پریرود غالب زیاد است که در حرکت‌های بزرگ زمین قابل مشاهده است. معمولاً سازه‌های با پریرود طبیعی زیاد در این نوع زلزله‌ها مورد تحریک جدی‌تر قرار می‌گیرند. از آنجا که جرم انتقالی سیال نیز در مخازن ذخیره مایع، معمولاً پریرود طبیعی بسیار زیادی دارد، سهم جرم موج در پاسخ دینامیکی نهایی مخزن افزایش می‌یابد؛ بنابراین در تمام مخازن هنگام اعمال زلزله چی - چی، به دلیل پررنگ‌تر شدن نقش جرم موج، پاسخ نهایی مخزن مجهز با جداسازها نتوانسته است به طرز قابل انتظاری کاهش نشان دهد. در مورد مخزن لاغر تحت زلزله مذکور، استفاده از جداساز لرزه‌ای باعث بدتر شدن اوضاع شده است و مقدار لنگر خمشی کلی حاصل از حل عددی، به جای کاهش، افزایش یافته است. این موضوع به خاطر نزدیک بودن پریرود غالب زلزله‌ی اعمالی و پریرود غالب سیستم جداساز لرزه‌ای به پریرود طبیعی جرم انتقالی مخزن لاغرتر می‌باشد.

البته باید اشاره کرد که معمولاً در بسیاری از مخازن، پریرود

جدول (6): مقادیر بیشینه ارتفاع آزاد مایع بر حسب متر در مخازن با و بدون جداساز لرزه‌ای

$$\text{Differences (\%)} = 100 \times (\text{Fixed-BS}) / \text{Fixed}$$

مخزن	نوع مخزن	چی - چی	ال سنترو	امپریال ولی	نورتریج	طیس
مخزن 37	BS	8/02	0/57	2/11	1/03	3/14
	Fixed	8/06	0/56	1/97	0/94	3/09
	Percent	0/51	2/26	6/97	10/52	1/65
مخزن 53	BS	3/27	0/350	1/51	0/78	1/76
	Fixed	3/39	0/35	1/45	0/71	1/76
	Percent	3/59	1/86	4/50	9/75	0/21
مخزن 28	BS	2/03	0/48	1/10	1/20	0/95
	Fixed	1/82	0/46	1/10	1/35	1/26
	Percent	11/33	3/75	0/01	11/07	24/55



شکل (10): نمودار تاریخچه زمانی ارتفاع آزاد مایع در کنار جداره مخزن تحت زلزله چی - چی

### 6- نتیجه گیری

در این پژوهش برای بررسی رفتار دینامیکی مخازن مجهز به جداسازهای لرزه‌ای از شبیه‌سازی رایانه‌ای و برای مدل‌سازی عددی مخازن از روش اجزای محدود استفاده شد. مدل عددی برپا شده با راهبرد حل مورد استفاده، با نتایج آزمایشگاهی در

این موضوع اگر چه باعث می‌شود که پاسخ جرم نوسانی در محدوده قابل قبولی قرار گیرد، اما در مورد جرم موج، در اکثر موارد این افزایش پیروی طبیعی مخزن، به نزدیک شدن پیروی جرم انتقالی و پیروی سیستم جداساز مورد استفاده، کمک می‌کند و از این طریق باعث افزایش ارتفاع آزاد مایع می‌شود.



ارتفاع آزاد مایع ندارد. بر اساس تحلیل‌های انجام‌شده در این تحقیق، بیشینه ارتفاع آزاد مایع در بیشتر نمونه‌های مورد بررسی، اختلافی کمتر از 10 درصد را برای مخازن با و بدون جداساز لرزه‌ای نشان داد.

### مراجع

1. Chalhoub, M.S. and Kelly, J.M. (1988) *Theoretical and Experimental Studies of Cylindrical Water Tanks in Base Isolated Structures*, Report No. UCB/EERC-88/07, CA. Berkeley.
2. Kim, N.S. and Lee, D.G. (1995) Pseudo-dynamic test for evaluation of earthquake performance of base-isolated liquid storage tanks. *Engineering Structures*, **17**(3), 198-208.
3. Shrimali, M.K. and Jangid, R.S. (2004) Seismic analysis of base-isolated liquid storage tank. *Journal of Sound and Vibration*, **275**, 59-75.
4. Jadhav, M.B. and Jangid, R.S. (2006) Response of base-isolated liquid storage tanks to near-fault motion. *Structural Engineering and Mechanics*, **23**, 615-634.

حالت اعمال بارهای هارمونیک و لرزه‌ای مورد راستی‌آزمایی قرار گرفت. پس از اطمینان از صحت عملکرد مدل، از آن برای انجام مطالعات پارامتری و ارزیابی تأثیر جداسازها در مخازن ذخیره مایعات استفاده شد. برای این کار سه مخزن با ابعاد پهن، متوسط و لاغر انتخاب و در حالت با و بدون جداساز لرزه‌ای تحلیل شد. برای در نظر گرفتن رفتار غیرخطی حاصل از عملکرد افقی جداسازها، از فنرهای با رفتار غیرخطی در مدل عددی استفاده شد.

نتایج حاصل از این تحلیل‌ها را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

1. مقایسه مقادیر محاسبه‌شده در مدل عددی با نتایج حاصل از آزمایش‌ها، نشان داد که مدل عددی مذکور با دقت بسیار مناسبی می‌تواند رفتار دینامیکی مخزن را پیش‌بینی کند.
2. مقایسه نتایج حاصل از مدل عددی بر روی مخازن با و بدون جداساز لرزه‌ای، نشان داد که به کارگیری سیستم جداسازی لرزه‌ای، می‌تواند به طور بسیار چشمگیری در کاهش آثار ناشی از اعمال بارهای لرزه‌ای مؤثر باشد؛ به طوری که برای مخازن مجهز به جداسازهای لرزه‌ای، نیروی برشی ایجاد شده توسط بارهای دینامیکی به ترتیب مقادیر میانگین 70%، 71% و 50% برای مخازن پهن، متوسط و لاغر، نسبت به مخازن مشابه بدون سیستم جداساز، کاهش یافت.
3. در رابطه با مقدار لنگر خمشی کلی ایجاد شده بر اثر اعمال بارهای دینامیکی وارد بر مخزن، مقدار میانگین کاهش حاصل از به کارگیری جداسازها برابر با 71%، 69% و 47% به ترتیب برای مخازن پهن، متوسط و لاغر است.
4. تأثیر جداسازهای لرزه‌ای به طور قابل توجهی به خصوصیات بار لرزه‌ای اعمال شده و ابعاد هندسی مخازن حساس است؛ به طوری که در هنگام اعمال بارهای لرزه‌ای، که شامل پالس‌های با پیوند بزرگ جابه‌جایی زمین می‌باشند، عملکرد جداسازها در کاهش نیروهای طراحی چندان چشمگیر نیست.
5. در رابطه با امواج سطحی ایجاد شده در بالای مخزن، به کارگیری جداسازها در بسیاری موارد تأثیر چندانی بر مقدار

## Using Base Isolation Method to Mitigate the Seismic Response of Liquefied Natural Gas

Mohammad Ali Goudarzi<sup>1</sup>, Parviz Rafati<sup>2</sup>, and Soheil Rostam Kolaei<sup>3</sup>

1. Assistant Professor, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, Iran, Corresponding Author, e-mail: [m.a.goudarzi@iiees.ac.ir](mailto:m.a.goudarzi@iiees.ac.ir)
2. Faculty Member, Imam Hossein Comprehensive University, Tehran, Iran
3. M.Sc. Graduate, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, Iran

During the last 20 years, part of the research work has focused on the seismic analysis of Liquefied Natural Gas (LNG) tanks, due mainly to (1) the increasing number of LNG tanks constructed in seismically active regions, resulting from the adoption of LNG as an environmentally friendly fossil fuel, and (2) the catastrophic environmental impact, associated with a potential local or total failure of such tanks, caused by the earthquake motion.

Seismic isolation is a well-known method to mitigate the earthquake effects on the structures by increasing their fundamental natural periods at the expense of larger displacements in the structural system. In this study, the seismic response of isolated and fixed base vertical, cylindrical, liquid storage tanks is investigated using a numerical model, taking into account the fluid-structure interaction effects. The numerical model is validated by the comparison of its results with the experimental measurements of small-scale tank under harmonic and seismic excitations. The comparison reveals that the use of the considered model provides enough accuracy for evaluating the seismic behavior of nonlinear isolated and non-isolated tanks.

Three vertical, cylindrical tanks with different ratios of height to radius ( $H/R = 2.6, 1.0$  and  $0.3$  as the representatives of slender, medium and broad tanks) are analyzed and the results of response-history analysis, including base shear, overturning moment and free surface displacement are reported for isolated and non-isolated tanks. The isolated tanks are equipped with lead rubber bearings isolators, and the bearings are modeled by using a non-linear spring in numerical model. Long period ground motion is the main parameter that can significantly affect the seismic response of isolated tank.

It is observed that the seismic isolation of liquid storage tanks is quite effective and the response of isolated tanks is significantly influenced by the system parameters such as their fundamental frequencies and the aspect ratio of the tanks. The average reductions of base shear forces of isolated tanks are 71%, 70% and 50% for broad, medium and slender isolated tanks. It seems that the effectiveness of base isolation system to mitigate the base shear force is not significantly affected by changing of tank aspect ratio. In terms of overturning moment, the average reductions of the order of 71%, 69% and 47% for broad, medium and slender tanks is obtained due to applying of isolation system. Therefore, overturning moment is considerably mitigated by the reduction of the tank aspect ratio. The effectiveness of base isolation considerably reduces for exerted earthquake records including long period motion. Especially for slender tanks, base isolation may even increase the overturning moment.

However, the base isolation does not significantly affect the surface wave height, and even it can cause adverse effects on the free surface sloshing motion. The results of free surface displacement for both isolated and non-isolated tanks have quite similar trends for considered tanks. The errors between the maximum sloshing wave height of fixed base and isolated tank are less than 8% for most of the considered cases. Even, the sloshing height is slightly amplified in some cases. Therefore, the base isolation system can cause adverse effects on the free surface sloshing motion.

It can be concluded that the effectiveness of the base isolation method is very sensitive to the physical and geometrical parameters of the considered tanks. This suggests that a careful selection of isolators with a certain limit on the mechanical properties of the isolators is required for the optimal seismic isolation design of liquid storage tanks.

**Keywords:** LNG; Storage Tanks; Numerical Model; Base Isolation