



مطالعه عددی پاسخ مخازن زمینی فولادی با حرکت گهواره‌های آزاد تحت اثر تحریک افقی زلزله

حسن عالم‌زاده^۱، حمزه شکیب^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری، مهندسی عمران، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۲- استاد، مهندسی عمران، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

* تهران، صندوق پستی ۱۱۶-۱۴۱۱۵، shakib@modares.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۰/۰۹، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۲/۰۶)

چکیده

مخازن زمینی فولادی یکی از اجزای مهم مجتمع‌های صنعتی است که حفظ عملکرد آن‌ها حین و بعد از وقوع بحران‌هایی مانند زلزله اهمیت فراوانی دارد. در سال‌های اخیر به کارگیری فن‌آوری‌های کم خسارت، که توسعه خسارت غیرخطی در اعضای سازه‌ای، و نیز زمان و هزینه تعمیر را کاهش داده و رفتار لرزه‌ای را بهبود می‌بخشد، مورد توجه محققین قرار گرفته است. سازوکار گهواره‌ای از جمله این فن‌آوری‌ها است که به عنوان یک روش کاهنده تقاضا، گزینه مناسبی برای بهبود عملکرد لرزه‌ای مخازن به نظر می‌رسد. در این مقاله یک مخزن زمینی فولادی استوانه‌ای با نسبت ابعادی باریک (نسبت D/H کمتر از 0.75) مورد مطالعه قرار گرفته و پاسخ لرزه‌ای آن در دو حالت الف) مهار شده یعنی با اتصال گیردار به پی و ب) مهار نشده یعنی با آزادی حرکت گهواره‌ای از روی پی، تعیین و با هم مقایسه شده است. مدل‌سازی اندرکنش سیال-سازه با استفاده از مدل جرم متمرکز انجام و از نرم‌افزار OpenSees برای تدوین مدل عددی کمک گرفته شده است. همچنین کف مخازن صلب و در مقابل لغزش مقید فرض شده است. مخازن موردنظر تحت تحریک افقی زلزله در پایه قرار گرفته و پاسخ سیستم اندرکنش سیال-سازه، تغییر مکان بام، نیروی برشی پایه و لنگر واژگونی محاسبه شده است. نتایج بیانگر کاهش ۹ تا ۲۶ درصدی پاسخ‌های نیرویی و افزایش پاسخ‌های تغییر مکانی بام و جرم صلب سیال در مخزن مهار نشده نسبت به مخزن مهار شده است. همچنین افزایش مقدار تغییر مکان جرم نوسانی سیال در مخزن با آزادی حرکت گهواره‌ای نسبت به مخزن مهار شده ناچیز است.

واژگان کلیدی

مخزن زمینی فولادی، فن‌آوری‌های کم خسارت، حرکت گهواره‌ای، پاسخ لرزه‌ای، اندرکنش سیال-سازه

Numerical Study on the Response of Steel Ground Tanks with Free Rocking Motion under Horizontal Earthquake Excitation

H. Alemzadeh, H. Shakib

Abstract

One of the main components of industrial complexes is steel ground tanks which their performance during and after an earthquake event is of great importance. In recent years, innovative low-damage technologies have been proposed by researchers to mitigate nonlinear damage in structural elements and also to decrease time and cost of repairs needed for post-earthquake serviceability of structures. One of these technologies is rocking mechanism which, as a method for limiting seismic demands, could be employed for seismic behavior improvement of tanks. In this paper, a cylindrical steel ground tank with low aspect ratio (D/H less than 0.75), was analyzed under horizontal earthquake excitation. The seismic response of tank in two different configurations; a) anchored or fixed to the base and b) unanchored with free rocking motion over base were calculated and compared. Fluid-structure interaction was considered by using lumped mass analogy and the OpenSees software was employed for modeling and analysis. Furthermore, the bottom plate of tanks was considered rigid and restrained against sliding. The calculated responses include response of fluid-structure interaction system, roof displacement, base shear force and overturning moment. The results demonstrated that a) base shear forces and overturning moments in unanchored tank is reduced by 9% to 26%, b) displacement response of tank roof and fluid impulsive mass is increased in unanchored tank, and c) the increase in displacement response of fluid convective mass in unanchored tank is less than 3% of that in anchored tank.

Keywords

Steel ground tank, Low-damage technologies, Rocking motion, Seismic response, Fluid-structure interaction



مخازن ذخیره سازه‌هایی هستند که جهت نگهداری مایعات مختلفی مانند آب، فرآورده‌های نفتی و مواد شیمیایی از آن‌ها استفاده می‌شود. با تخریب مخازن آب، تامین آب شرب، امدادسانی و اطفای حریق با مشکل روبرو می‌شود. آسیب دیدن مخازن نفتی و مواد شیمیایی نیز سبب ایجاد آتش‌سوزی‌های گسترده و نشت مواد سمی و آلودگی در محیط‌زیست خواهد شد. تاکنون تحقیقات زیادی بر روی رفتار، تحلیل و طراحی لرزه‌ای مخازن زمینی انجام گرفته است. تجربه زلزله‌های گذشته نشان داده‌اند که به دلیل شکست سازه‌های مهمی چون مخازن با مقاومت لرزه‌ای ناکافی، اطفای حریق و دیگر تلاش‌ها برای پاسخ اضطراری پس از زلزله با تاخیر مواجه شده است. از جمله زلزله‌هایی که در آن‌ها چنین عملکرد نامناسبی از مخازن مشاهده گردیده عبارتند از: زلزله سال ۱۹۶۰ شیلی [۱]، زلزله سال ۱۹۶۴ آلاسکا [۱]، زلزله سال ۱۹۷۱ سن فرناندو [۱]، زلزله سال ۱۹۹۰ منجیل و رودبار [۲]، زلزله سال ۱۹۹۷ جبالپور [۳]، زلزله سال ۱۹۹۹ ازبکستان [۴] و زلزله سال ۲۰۰۱ بوج [۳].

در سال‌های اخیر طراحی کم‌خسارت^۱ در حال تبدیل شدن به عنوان یک روش پیش‌رو در طراحی سازه‌های ساختمانی و غیر ساختمانی است به طوری که بتوان معیارهای کاهش خسارت را در طراحی لرزه‌ای گنجانند. بیشتر تحقیقات جدید بر توسعه سیستم‌های سازه‌ای یا دستگاه‌های جدیدی متمرکز گردیده که می‌توانند عملکرد ارتقا یافته‌ای از سازه را تأمین نمایند. یکی از محرک‌های اصلی این گونه تحقیقات جهت توسعه سیستم‌های کم‌خسارت، مشاهده عملکرد ساختمان‌ها در زلزله سال ۲۰۱۱ کنتربری نیوزلند بوده است [۵].

یکی از روش‌های بهبود عملکرد لرزه‌ای که با توجه به کاربرد فراوان در سازه‌های مشابه، کاربرد آن برای مخازن نیز مناسب به نظر می‌رسد، سازوکار گهواره‌ای است. این سازوکار ضمن کاهش نیاز لرزه‌ای وارد به سازه، خدمت‌رسانی بی‌وقفه یا تعمیر سریع و کم هزینه سازه را نیز ممکن می‌سازد. در این مقاله به بررسی امکان کاربرد این سازوکار برای مخازن زمینی پرداخته می‌شود.

۲- پیشینه تحقیقات

در مرور مطالعات انجام گرفته در زمینه روش‌های بهبود عملکرد لرزه‌ای مخازن مشاهده می‌گردد که تاکنون به جز دو روش جداسازی پایه و تجهیز ظرف مخزن به تیغه‌های میراگر از روش دیگری برای بهبود عملکرد لرزه‌ای استفاده نشده است [۸-۷].

علت این مسئله را می‌توان در محدودیت‌های رفتاری و هندسی خاص مخازن دانست که استفاده از سایر روش‌ها را دشوار می‌سازد.

تاکنون در تحقیقات فراوانی، کاربرد سازوکارهای گهواره‌ای جهت کاهش آسیب لرزه‌ای در ساختمان‌ها و پایه پل‌ها مورد بررسی قرار گرفته است [۹-۱۲]. رفتار گهواره‌ای می‌تواند انرژی زلزله را با فراهم کردن جداسازی لرزه‌ای و کاهش برش پایه ماکزیمم فیلتر کند. این امر می‌تواند به طور قابل ملاحظه‌ای هزینه‌های پی را با کاهش لنگری که شمع‌ها برای جلوگیری از بلندشدگی باید در برابر آن مقاومت کنند، کاهش دهد [۱۰]. پاسخ سیستم‌های با رفتار گهواره‌ای آزاد غیرخطی بوده و به طور بالقوه به تغییرات کوچک نسبت ابعادی حساس است. در سازه‌های بلند و باریک، واژگونی نیز ممکن است رخ دهد. مقاومت گهواره‌ای و ایمنی در برابر واژگونی را می‌توان توسط مهار سازه با کابل‌های پیش‌تنیده بهبود بخشید [۱۱].

با اینکه تاکنون کاربرد مستقیم این سازوکار در مخازن به عنوان یک روش بهبود عملکرد لرزه‌ای مورد توجه محققین نبوده، اما مطالعه حرکت و رفتار گهواره‌ای مخازن مهار نشده یا با اتصالات ناکافی به پی و اغلب با تمرکز بر متغیرهای رفتاری جزئی^۲ از جمله رفتار ورق کف مخزن یا اتصال آن به دیواره، موضوع تحقیقات فراوانی [۱۳ و ۱۴] بوده است.

۳- محدوده و اهداف پژوهش

در این مقاله ضمن توسعه یک روش مدل‌سازی عددی برای تحلیل دینامیکی مخازن زمینی فولادی با امکان حرکت گهواره‌ای، استفاده از این سازوکار به عنوان یک روش بهبود عملکرد لرزه‌ای مورد توجه قرار خواهد گرفت. از این رو و بر خلاف تحقیقات قبلی، تمرکز بر مشخصات رفتاری کلی^۳ و پاسخ‌های لرزه‌ای مخزن با امکان حرکت گهواره‌ای آزاد بر روی پی خواهد بود. پاسخ‌های لرزه‌ای مورد بررسی شامل تغییر مکان سیستم اندرکنش سیال-سازه، تغییر مکان بام، نیروی برشی پایه و لنگر واژگونی است و تغییرات آن نسبت به حالت مخزن با پایه گیردار یا بدون امکان حرکت گهواره‌ای مورد بررسی قرار خواهد گرفت. تمامی پاسخ‌ها تنها در وضعیت پر مخزن محاسبه شده‌اند. لازم به ذکر است که تحقیق حاضر تنها بخشی از تحقیقاتی است که توسط نویسندگان در زمینه توسعه و کاربرد سازوکار گهواره‌ای در مخازن در حال انجام است و بنابراین بررسی امکان استفاده از کابل‌ها، دستگاه‌های اتلاف انرژی یا



مطالعه متغیرهای رفتاری یا روش‌های تحلیلی دیگر در محدوده کار پژوهش حاضر نمی‌باشد.

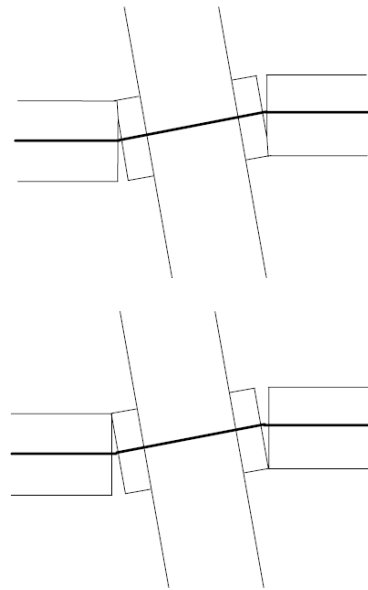
۴- مبانی پژوهش

در این قسمت به ارائه مبانی پژوهش شامل روش و ابزار مدل‌سازی، مشخصات نمونه مخزن زمینی فولادی مورد مطالعه و در نهایت روش و فرضیات تحلیل پرداخته می‌شود.

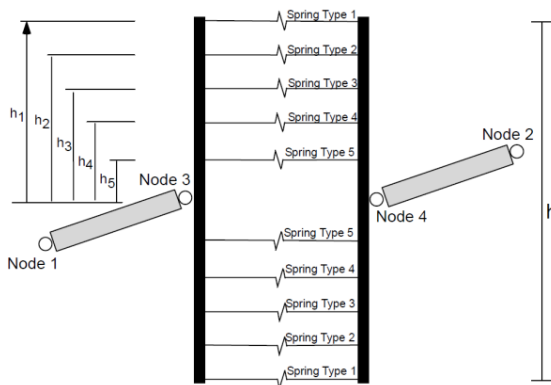
۴-۱- مدل‌سازی عددی

به منظور مدل‌سازی سطوح تماس در سازه‌های با رفتار گهواره‌ای معمولاً از دو روش (متمرکز و گسترده) استفاده می‌شود. روش نخست شامل استفاده از انواع المان‌های فنی با رفتار غیرخطی یا المان‌های گپ^۴ به همراه انواع مختلفی از میراگرها می‌باشد [۱۵]. مزیت این روش سادگی مدل‌سازی و امکان تطابق با سازه‌های با ستون‌ها یا پایه‌های با نسبت ابعادی کوچک مانند قاب‌های ساختمانی می‌باشد. در روش دوم نیز از مدل‌های رفتاری مصالح یا مقاطع با رفتار مشخص در فشار و مقاومت ناچیز یا صفر در کشش استفاده می‌گردد. از این جمله می‌توان مصالح QzSimple1 که در نرم‌افزار OpenSees^۵ به کارگرفته شده است، نام برد. لازم به ذکر است که این روش عمدتاً برای مدل‌سازی سازوکار گهواره‌ای و بلندشدگی در پی و خاک زیر آن کاربرد دارد [۱۶].

البته از آن جایی که در روش‌های متداول مدل‌سازی عددی سازه‌ها، المان سازه‌ای در مرکز (محور) ستون، دیوار یا پایه مدل می‌شود، دو روش بالا قادر به در نظر گرفتن تغییر نقطه اتکای المان در حین حرکت گهواره‌ای^۶ نمی‌باشند. به عبارت دیگر، در این روش‌ها اثر بعد ستون یا جابجایی تار خشی لحاظ نمی‌شود. مسئله اساسی این است که برخلاف مدل بلوک صلب [۱۷] که فرض می‌کند در هنگام حرکت گهواره‌ای مقطع حول پاشنه‌ها یا کنج‌ها دوران کرده و تکیه‌گاه‌ها کاملاً صلب هستند، در واقعیت و به ویژه در مورد سازه‌های بتنی با رفتار گهواره‌ای، در هنگام حرکت گهواره‌ای یک ناحیه فشاری در مقطع شکل می‌گیرد و تار خشی از بینهایت به سمت مقطع حرکت می‌کند (شکل (۱)). این موضوع در مدل‌سازی دیوارها، پایه‌ها یا پی‌های با رفتار گهواره‌ای به دلیل بزرگ بودن بعد المان نسبت به ارتفاع، اهمیت بیشتری دارد. برای این منظور از روش دیگری تحت عنوان روش چند فنی^۷ برای مدل‌سازی سطوح تماس کمک گرفته می‌شود که قابلیت اصلی این روش لحاظ کردن جابجایی تار خشی است (شکل (۲)). از روش چند فنی در مطالعات



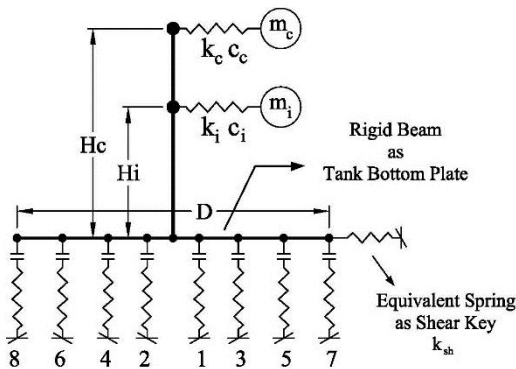
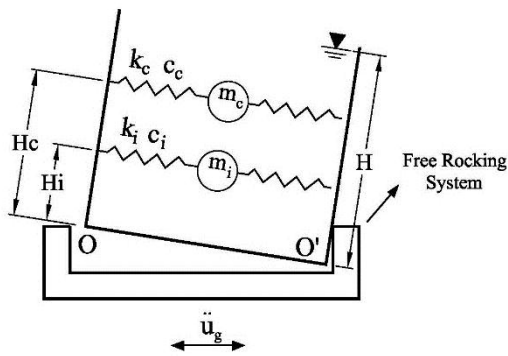
شکل ۱- (بالا) تشکیل ناحیه فشاری [۱۲] و (پایین) چرخش حول پاشنه [۱۷]



شکل ۲- اساس مدل‌سازی اتصال گهواره‌ای در روش چند فنی (۱۰ فنر) [۱۲]

در روش مدل‌سازی چند فنی تعیین دو متغیر اهمیت فراوان دارد: الف) سختی فنرها و ب) تعداد و موقعیت قرارگیری فنرها. سختی محوری (EA/L) فنرها در فشار از ضرب سطح مقطع تماسی (A_{joint}) در ضریب ارتجاعی مصالح سطوح تماس ($E_{contact}$) تقسیم بر طول مؤثر سطوح تماس تعیین می‌گردد. در تحقیقات، نشان داده شده که نتایج تحلیل، حساسیت زیادی به متغیر طول مؤثر نداشته و این طول را بسته به سازه مورد مطالعه می‌توان به طور محافظه‌کارانه بین نصف تا یک دهم ارتفاع مقطع سطح تماس انتخاب کرد. در ضمن فرض

می‌گردد که فنرها در کشش هیچگونه سختی ندارند. محققین برای تعیین تعداد و موقعیت فنرها نیز مطابق شکل (۳) از ایده موقعیت نقاط انتگرال‌گیری در روش گاوس یا گاوس اصلاح شده (گاوس-لوباتو) استفاده کرده‌اند [۱۰ و ۱۲].

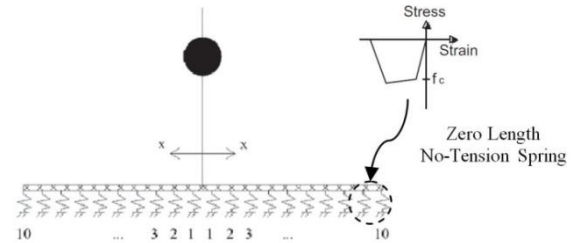


شکل ۴- (بالا) مدل مکانیکی و (پایین) شمای کلی مدل عددی سازه مخزن با امکان حرکت گهواره‌ای آزاد در نرم‌افزار OpenSees

۴-۲- مشخصات مخزن مورد مطالعه

خرن مورد مطالعه در این پژوهش، یک مخزن فولادی زمینی استوانه‌ای ذخیره اکسیژن مایع^{۱۱} به ظرفیت ۵۳۰۰ متر مکعب می‌باشد که کاربرد فراوانی در صنایع گاز و پتروشیمی داشته و نمونه‌های مشابهی از آن در زلزله‌های گذشته دچار خرابی گردیده است [۱۳]. مشخصات هندسی مخزن و مصالح به کار رفته در آن در جدول (۱) ارائه شده است. در ضمن شمای کلی هندسه مخزن و دو نمونه واقعی از خرابی مخازن مشابه در شکل (۵) نشان داده شده است.

همچنین چنانکه گفته شد مدل‌سازی سیستم اندرکنش سیال-سازه به کمک روابط و مدل پیشنهادی Housner [۱۸] انجام گرفته است. بر این اساس مقادیر و مشخصات دینامیکی هر یک از جرم‌های صلب و نوسانی به صورت جدول (۲) می‌باشد. لازم به ذکر است که در این مدل نسبت میرایی نظیر هر یک از جرم‌های صلب و نوسانی به پیشنهاد اغلب منابع و آیین‌نامه‌ها از جمله آیین‌نامه طراحی لرزه‌ای تأسیسات و سازه‌های صنعت نفت [۱۹] به ترتیب برابر ۰.۵٪ و ۰.۵٪ در نظر گرفته شده است.



شکل ۳- تعداد و موقعیت قرارگیری فنرها در مقطع اتصال براساس روش گاوس یا گاوس-لوباتو [۱۰]

در پژوهش حاضر نیز که سازه مخزن امکان حرکت گهواره‌ای از روی پی داشته و ابعاد سطوح تماس قابل توجه بوده، برای مدل‌سازی عددی سطوح تماس از همین روش چند فنری و المان‌های فنری با طول صفر^{۱۲} کمک گرفته شد. با توجه به سرعت و قابلیت‌های فراوان نرم‌افزار OpenSees [۱۶]، از این نرم‌افزار برای تدوین مدل عددی سازه استفاده شد. بر اساس آنچه گفته شد، ابتدا سختی فنرها با توجه به مساحت و قطر کف مخزن و مشخصات مصالح بتنی پی زیر آن تعیین و سپس تعداد و موقعیت فنرها نیز با توجه به دقت موردنیاز برابر ۸ عدد (۴ عدد در هر طرف) و براساس روش گاوس-لوباتو انتخاب گردید. همچنین با توجه به اهداف پژوهش حاضر، دیواره مخزن به صورت المان با رفتار خطی ارتجاعی و کف مخزن نیز به صورت صلب فرض و مدل‌سازی شد.

لازم به ذکر است که مدل‌سازی سیستم اندرکنش سیال-سازه به صورت مدل مکانیکی دو جرمی پیشنهاد شده توسط Housner [۱۸] انجام گرفته و جرم‌های نظیر هر یک از مؤلفه‌های پاسخ صلب یا ضربانی^۹ و نوسانی^{۱۰} سیال در ارتفاع موردنظر آن به المان نظیر دیواره مخزن متصل شده است. در نهایت مدل مکانیکی و همچنین شمای کلی مدل عددی سازه مخزن با امکان حرکت گهواره‌ای آزاد در نرم‌افزار اپنسیس به صورت شکل (۴) خواهد بود.

جدول ۱- مشخصات هندسی مخزن و مصالح به کار رفته در آن

مشخصات هندسی	
۱۵/۶	قطر داخلی (m)
۳۰	ارتفاع مخزن (m)
۳۵	ضخامت دیواره (mm)
۲۸	ارتفاع مایع در حالت پر (m)
۱	ضخامت پی (m)
مشخصات مصالح	
۲۰۰۰۰۰	ضریب ارتجاعی فولاد (MPa)
۲۳۵۰۰	ضریب ارتجاعی بتن (MPa)
۲۵	مقاومت فشاری بتن پی (MPa)
۱۱/۵	چگالی وزنی اکسیژن مایع (kN/m ³)
۷۸/۵	چگالی وزنی فولاد (kN/m ³)

جدول ۲- مشخصات متغیرهای مدل دو جرمی هاوژنر برای

مدل سازی سیستم اندرکنش سیال-سازه

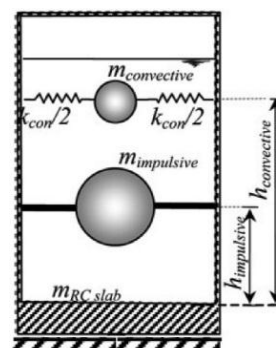
واحد	مقدار در حالت مخزن پر	متغیر یا مشخصه دینامیکی
ton	۵۵۱۱/۷	m_i - جرم صلب (Impulsive)
m	۱۲/۵	h_i - ارتفاع نظیر جرم صلب
kN/m	$۳/۸ \times ۱۰^۶$	k_i - سختی فنر نظیر جرم صلب
ton	۸۰۳/۹	m_c - جرم صلب (Convective)
m	۲۳/۸	h_c - ارتفاع نظیر جرم صلب
kN/m	۱۸۵۷/۶	k_c - سختی فنر نظیر جرم صلب

سازه‌ها در نرم‌افزارهای متداول یا به واگرایی نتایج و یا حتی عدم اجرای عملیات تحلیل منجر می‌گردد. در ضمن زمان تناوب اصلی برای سازه‌های با رفتار گهواره‌ای آزاد ثابت نبوده و در مدت زمان اعمال بار جانبی با تغییر دامنه حرکت، زمان تناوب تغییر می‌کند. بنابراین از روش‌های مبتنی بر تحلیل مقدار ویژه^{۱۲}، یا مودال^{۱۳} نیز نمی‌توان استفاده کرد. علاوه بر این و با توجه به مسئله برخورد و ضربه بین سازه و تکیه‌گاه در حین حرکت گهواره‌ای و لزوم اعمال شرایط مرزی سینماتیکی ناشی از آن در پاسخ‌های قبل و بعد از لحظه برخورد، گزینه‌ای جز انتخاب روش تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی وجود نخواهد داشت.

در این مقاله به منظور انجام تحلیل تاریخچه زمانی بر روی مخازن مورد مطالعه، از تک مؤلفه افقی شتابنگاشت مربوط به زلزله‌های ایمپریال ولی^{۱۴} سال ۱۹۷۹، لوما پریتا^{۱۵} ۱۹۸۹ و لندرز^{۱۶} سال ۱۹۹۲ استفاده شده است. عملیات مقیاس کردن شتابنگاشت‌ها براساس روش و طیف طرح آیین‌نامه 7 ASCE [۲۰] انجام گرفته و نوع زمین ساختگاه براساس دسته‌بندی فصل ۲۰ همان آیین‌نامه از نوع C (خاک سفت) فرض شده است. مشخصات و ضرایب مقیاس شتابنگاشت‌های انتخاب شده در جدول (۳) ارائه شده است. جهت مقیاس کردن شتابنگاشت‌ها از زمان تناوب اصلی سازه مخزن همراه با پاسخ صلب سیال (T_i) در حالت گیردار استفاده شده که مطابق آیین‌نامه طراحی لرزه‌ای تأسیسات و سازه‌های صنعت نفت [۱۹] این مقدار برابر ۰/۲۴۰ ثانیه می‌باشد. در ضمن میرایی کلی سازه به روش رایلی در مدل عددی لحاظ شده است.

۵- نتایج

پس از تدوین مدل عددی و انتخاب روش تحلیل، مخزن مورد مطالعه در ۲ حالت؛ الف) با اتصال گیردار به پی و ب) با امکان



شکل ۵- (بالا) شمای کلی هندسه مخزن مورد مطالعه و (پایین) دو نمونه واقعی از مخزن مورد مطالعه متعلق به مجتمع هبس پس از زلزله ۱۹۹۹ از میت [۴]

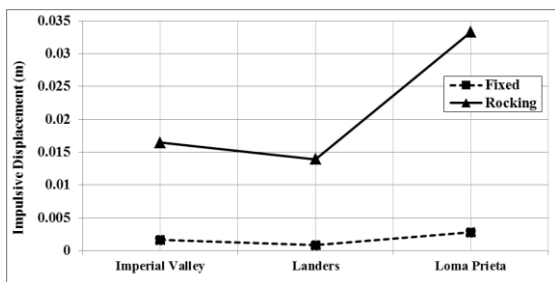
۳-۴- روش تحلیل سازه

چنانکه در بخش مقدمه بیان شد، سازه‌های با رفتار گهواره‌ای به طور ذاتی دارای رفتار غیر خطی بوده و همچنین به دلیل عدم برقراری معادلات پایداری استاتیکی در مورد آنها، استفاده از روش‌های تحلیل استاتیکی (خطی یا غیرخطی) برای این سازه‌ها غیر ممکن خواهد بود. به عبارت دیگر تحلیل استاتیکی این

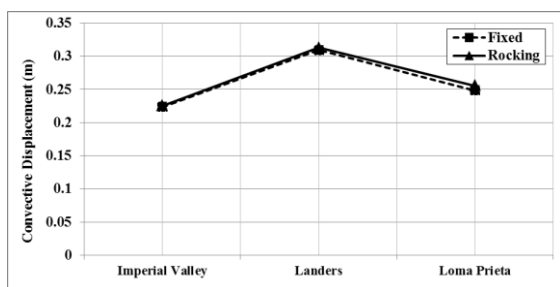
جدول ۳- مشخصات و ضرایب مقیاس شتاب‌نگاشت‌های انتخاب

شده برای تحلیل دینامیکی سازه

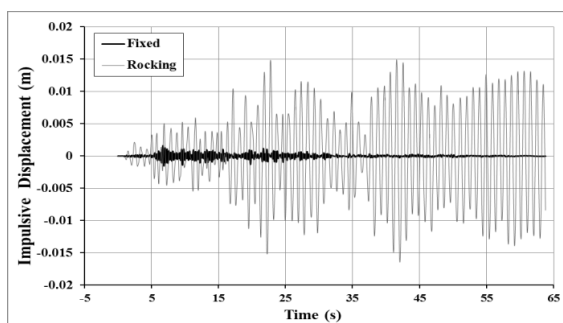
زلزله (1979) Imperial Valley	
ایستگاه	Cerro Prieto
بزرگا M_w	۶/۵۳
فاصله از مرکز زلزله (km)	۱۵/۱۶
ضریب مقیاس	۱/۵۵۲۵
زلزله (1989) Loma Prieta	
ایستگاه	090 CDMG STATION 47381
بزرگا M_w	۷/۱۰
فاصله از مرکز زلزله (km)	۱۴/۴۰
ضریب مقیاس	۱/۵۹۷۶
زلزله (1992) Landers	
ایستگاه	North Palm Springs Fire Sta #36
بزرگا M_w	۷/۵۰
فاصله از مرکز زلزله (km)	۱۲/۵۵
ضریب مقیاس	۱/۸۸۴۳



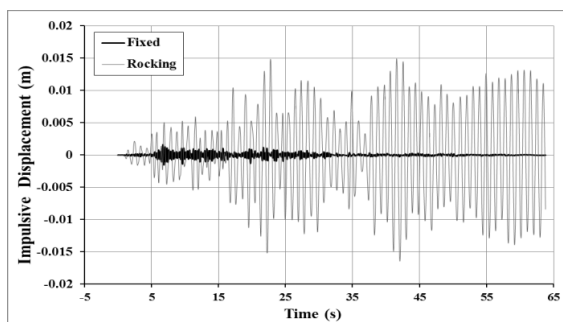
شکل ۶- مقایسه بیشینه تغییر مکان جرم صلب مخزن مهار شده و مخزن با رفتار گهواره‌ای تحت اثر شتاب‌نگاشت‌های مختلف



شکل ۷- مقایسه بیشینه تغییر مکان جرم نوسانی مخزن مهار شده و مخزن با رفتار گهواره‌ای تحت اثر شتاب‌نگاشت‌های مختلف



شکل ۸- مقایسه تاریخچه تغییر مکان جرم صلب مخزن مهار شده و مخزن با رفتار گهواره‌ای تحت اثر شتاب‌نگاشت زلزله ایمپریال ولی سال ۱۹۷۹



شکل ۹- مقایسه تاریخچه تغییر مکان جرم نوسانی مخزن مهار شده و مخزن با رفتار گهواره‌ای تحت اثر شتاب‌نگاشت زلزله ایمپریال ولی سال ۱۹۷۹

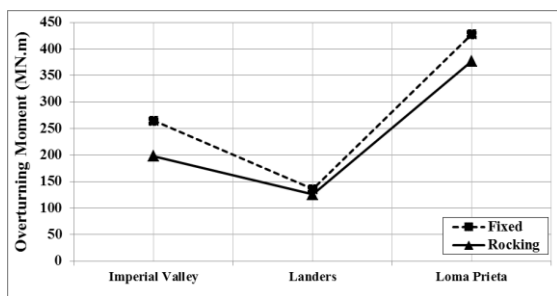
حرکت گهواره‌ای آزاد از روی پی، تحت تحریک افقی پایه قرار گرفته و سپس تحلیل تاریخچه زمانی در وضعیت پر مخزن انجام گرفته است. بنابراین در مجموع ۶ تحلیل تاریخچه زمانی انجام گرفته که در ادامه خلاصه نتایج آن‌ها ارائه می‌گردد.

۱-۵- پاسخ سیستم اندرکنش سیال-سازه و تغییر مکان بام

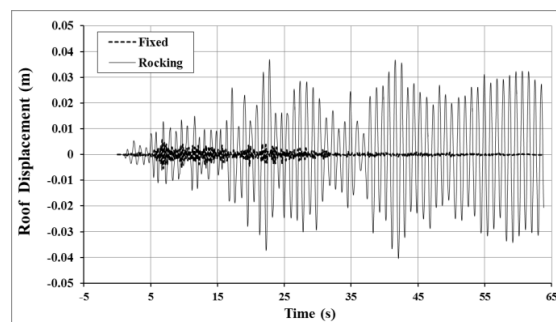
پاسخ سیستم اندرکنش شامل تغییر مکان جرم‌های صلب و نوسانی داخل مخزن بوده که تنها در حالت پر مخزن مطرح می‌گردد. تغییر مکان جرم صلب از جهت بیانگر تغییر مکان کلی سازه مخزن بوده و پاسخ جرم نوسانی از جهت بررسی امکان تولید موج و اثرات تلاطم در داخل مخزن قابل توجه هستند. بیشینه مقادیر تغییر مکان جرم‌های صلب و نوسانی در دو حالت مهار شده و با امکان حرکت گهواره‌ای، به ترتیب در شکل‌های (۶) و (۷) ارائه شده است. یک نمونه از تاریخچه تغییر مکان جرم‌های صلب و نوسانی تحت اثر شتاب‌نگاشت مربوط به زلزله ایمپریال ولی سال ۱۹۷۹ نیز به ترتیب در شکل‌های (۸) و (۹) ارائه شده است.

مقایسه تاریخچه تغییر مکان بام مخازن نیز در دو حالت مهار شده و با امکان حرکت گهواره‌ای آزاد تحت زلزله ایمپریال ولی سال ۱۹۷۹ به صورت شکل (۱۰) می‌باشد.





شکل ۱۲- مقایسه بیشینه لنگر واژگونی مخزن مهار شده و مخزن با رفتار گهواره‌ای تحت اثر شتاب‌نگاشت‌های مختلف



شکل ۱۰- مقایسه تاریخچه تغییر مکان بام مخزن مهار شده و مخزن با رفتار گهواره‌ای تحت اثر شتاب‌نگاشت زلزله ایمپریال ولی سال ۱۹۷۹

۶- بحث و نتیجه‌گیری

چنانکه در ابتدا نیز گفته شد، سازوکار گهواره‌ای یک سیستم کاهنده تقاضای لرزه‌ای است که از طریق جداسازی سازه و افزایش زمان تناوب مؤثر بر رفتار و پاسخ لرزه‌ای سازه تأثیر می‌گذارد. بر این اساس و با توجه به نمودارهایی که در بخش قبل ارائه گردید، در مورد مخازن زمینی با رفتار گهواره‌ای نکات زیر قابل توجه است:

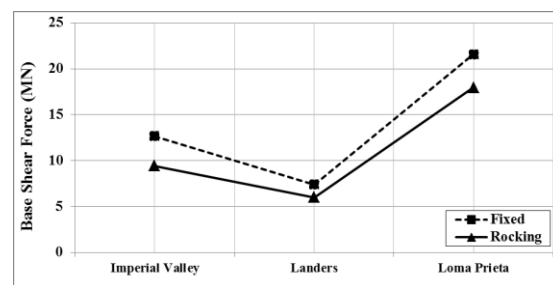
۱- جداسازی مخزن از روی پی و ایجاد امکان حرکت گهواره‌ای، به طور کلی باعث افزایش پاسخ تغییرمکانی سازه شامل پاسخ سیستم اندرکنش سیال-سازه و پاسخ بام گردیده است. مقایسه نتایج مخزن در دو حالت مفروض نشان می‌دهد که پاسخ نظیر جرم صلب سیال در مخزن با رفتار گهواره‌ای تحت ۳ شتاب‌نگاشت تا حداکثر ۱۶ برابر گردیده و در یک مورد از ۲/۷ تا ۳۳ میلیمتر افزایش یافته که البته با توجه به ابعاد کلی مخزن قابل توجه نمی‌باشد. مشابه سایر سازه‌های جداسازی شده این افزایش مقدار به دلیل آزادی حرکت گهواره‌ای قابل پیش‌بینی می‌باشد.

۲- بر خلاف پاسخ نظیر جرم صلب، پاسخ نظیر جرم نوسانی در مخزن با رفتار گهواره‌ای نسبت به مخزن با پایه گیردار افزایش قابل توجهی نیافته و حداکثر ۳٪ افزایش یافته است. از آنجایی که مشابه این بحث در سایر مطالعات از جمله مخازن جداسازی شده نیز مشاهده شده است [۶]، در نتیجه تا انجام مطالعات تکمیلی‌تر، می‌توان برای مدل‌سازی سیستم اندرکنش سیال-سازه در مخازن تحت ارتعاشات ترکیبی (افقی و قائم) از مدل Housner استفاده کرد.

۳- بررسی پاسخ بام مخزن به عنوان یک نقطه نمونه از سازه اصلی، نتایجی مشابه جرم صلب به دست می‌دهد.

۵-۲- نیروی برشی پایه

یکی از متغیرهای اصلی در طراحی لرزه‌ای سازه‌ها نیروی برشی پایه است. مقایسه بیشینه نیروی برشی پایه مخزن در دو حالت مهار شده و با امکان حرکت گهواره‌ای در شکل (۱۱) ارائه شده است.



شکل ۱۱- مقایسه بیشینه نیروی برشی پایه مخزن مهار شده و مخزن با رفتار گهواره‌ای تحت اثر شتاب‌نگاشت‌های مختلف

۵-۳- لنگر واژگونی

یکی دیگر از متغیرهای اصلی در طراحی لرزه‌ای سازه‌ها که در کنترل پایداری، طراحی پی و اتصالات سازه به پی اهمیت زیادی داشته و بسیاری از خسارات و خرابی‌های مخازن زمینی در زلزله‌های گذشته [۱] و [۴] مربوط به عدم برآورد صحیح آن است، لنگر واژگونی در پای سازه است. مقایسه بیشینه لنگر واژگونی مخزن در دو حالت مهار شده و با امکان حرکت گهواره‌ای، در شکل (۱۲) ارائه شده است. لازم به ذکر است که در حالت مخزن با رفتار گهواره‌ای مقدار لنگر واژگونی به طور مستقیم از مدل عددی قابل استخراج نبوده و مقدار مؤثر آن به کمک بیشینه نیروی برشی پایه تحت هر شتاب‌نگاشت محاسبه گردیده است.

۸- مراجع

- [1] Cooper, T.W., (1997), "A Study of the Performance of Petroleum Storage Tanks during Earthquakes, 1933-1995", US National Institute of Standards and Technology.
- [2] Astaneh, A. and Ghafory-Ashtiany, M. (1990), "The Manjil, Iran, Earthquake of June 21, 1990", Earthquake Engineering Research Institute Newsletter, Vol. 24, No. 12, pp. 5-12.
- [3] Rai, D.C. (2002). "Elevated Tanks", Earthquake spectra, Vol. 18, No. S1, pp. 279-295.
- [4] Sezen, H. and Whittaker, A.S. (2006), "Seismic Performance of Industrial Facilities Affected by the 1999 Turkey Earthquake", Journal of Performance of Constructed Facilities, Vol. 20, No. 1, pp. 28-36.
- [5] Canterbury Earthquakes Royal Commission, (2012), "Low-damage Building Technologies", Final report, ISBN: 978-0-478-39558-7.
- [6] Shrimali, M.K. and Jangid, R.S. (2003), "Earthquake Response of Isolated Elevated Liquid Storage Steel Tanks", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 59, No. 10, pp. 1267-1288.
- [7] Moslemi, M. and Kianoush, M.R. (2016), "Application of Seismic Isolation Technique to Partially Filled Conical Elevated Tanks", Engineering Structures, Vol. 127, pp. 663-675.
- [8] عرب، م.ح. و خاجی، ن. (۱۳۹۱)، "تحلیل لرزه‌ای مخازن ذخیره سیال مجهز به تیغه میراگر حلقوی با استفاده از روش المان مرزی"، مجله عمران مدرس، دوره دوازدهم، شماره ۲، ص. ۱۱-۲۲.
- [9] Chen, Y.H., Liao, W.H., Lee, C.L. and Wang, Y.P. (2006), "Seismic Isolation of Viaduct Piers by means of a Rocking Mechanism", Earthquake engineering & structural dynamics, Vol. 35, No. 6, pp. 713-736.
- [10] Pennucci, D., Calvi, G.M. and Sullivan, T.J. (2009), "Displacement Based Design of Precast Walls with Additional Dampers", Journal of Earthquake Engineering, Vol. 13, No. S1, 40-65.
- [11] Aslam, M., Scalise, D.T., and Godden, W.G. (1980), "Earthquake Rocking Response of Rigid Bodies", Journal of the Structural Division, Vol. 106, No. 2, pp. 377-392.
- [12] Spieth, H.A., Carr, A.J., Murahidy, A.G., Arnolds, D., Davies, M. and Mander, J.B. (2004), "Modelling of Post-tensioned Precast Reinforced Concrete Frame Structures with Rocking Beam-column Connections", In 2004 NZSEE Conference.
- [13] Taniguchi, T. (2004), "Rocking Behavior of Unanchored Flat-bottom Cylindrical Shell Tanks under Action of Horizontal Base Excitation", Engineering structures, Vol. 26, No. 4, pp. 415-426.
- [14] Ahari, M.N., Eshghi, S. and Ashtiany, M.G. (2009), "The Tapered Beam Model for Bottom Plate Uplift Analysis of Unanchored Cylindrical Steel Storage Tanks", Engineering Structures, Vol. 31, No. 3, pp. 623-632.
- [15] Zibaei, H. and Mokari, J. (2014), "Evaluation of Seismic Behavior Improvement in RC MRFs Retrofitted by Controlled Rocking Wall Systems", The Structural Design of Tall and Special Buildings, Vol. 23, No. 13, pp. 995-1006.
- [16] McKenna, F., Fenves, G.L. and Scott, M.H. (2000), "Open System for Earthquake Engineering Simulation", University of California, Berkeley, CA.

۴- کاهش مقادیر نیروی برشی پایه و لنگر واژگونی در مخزن با رفتار گهواره‌ای تنها به علت افزایش زمان تناوب مؤثر سازه بوده و بسته به محتوای فرکانسی شتاب‌نگاشت، حداقل ۹٪ و حداکثر ۲۶٪ کاهش یافته‌اند. با توجه به این نکته، استفاده از سازوکار گهواره‌ای را به عنوان یک روش بهبود عملکرد لرزه‌ای می‌توان در کنار سایر روش‌ها مورد توجه قرار داد.

۵- براساس نتایج به دست آمده، می‌توان دریافت که مدل عددی ارائه شده تا حد زیادی قابلیت پیش‌بینی رفتار کلی و پاسخ لرزه‌ای مخازن با رفتار گهواره‌ای را دارد.

همچنین در راستای تکمیل یافته‌های این پژوهش، نکات و پیشنهاد‌های زیر را می‌توان مورد توجه قرار داد:

۱- نتایج به دست آمده تا حد زیادی تابع تعداد و مشخصات مجموعه شتاب‌نگاشت‌های انتخاب شده است. افزایش تعداد و دامنه مشخصات شتاب‌نگاشت‌های مورد استفاده می‌توان عدم قطعیت نتایج فوق را تا حد زیادی کاهش دهد.

۲- میرایی ذاتی در سازه‌های با رفتار گهواره‌ای آزاد تا حد زیادی به علت اتلاف انرژی جنبشی سازه است که در برخوردها و ضربه‌های به تکیه‌گاه اتفاق می‌افتد و خود سازه به دلیل اینکه الاستیک باقی می‌ماند میرایی چندانی نخواهد داشت. در این پژوهش درصد میرایی ذاتی براساس محاسبات ضریب بازگشت (r) که در پژوهش‌های قبلی نویسندگان انجام گرفته، برابر ۱/۵٪ فرض شده است. استفاده از روش‌های تحلیلی یا عددی دیگر می‌تواند برای برآورد این متغیر مورد توجه قرار گیرد.

۳- بررسی دیگر پاسخ‌های سازه از جمله تنش‌های حلقوی و قائم در دیواره و نیز ملزومات طراحی ورق کف در مخزن با رفتار گهواره‌ای می‌تواند در توسعه مطالعات این دسته از مخازن راهگشا باشد.

۷- تشکر و قدردانی

بدینوسیله از مرکز تحقیقات مهندسی زلزله اقیانوس آرام (PEER) که از پایگاه‌های داده آن مرکز برای انتخاب شتاب‌نگاشت‌های مورد استفاده در این پژوهش استفاده گردید، قدردانی به عمل می‌آوریم.



[۱۹] آیین نامه طراحی لرزه‌ای تأسیسات و سازه‌های صنعت نفت (نشریه شماره ۰۳۸، ۱۳۹۵)، ویرایش سوم، وزارت نفت، معاونت مهندسی، پژوهش و فناوری، تهران.

[20] ASCE/SEI-7, (2010), Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, American Society of Civil Engineers.

[17] Housner, G.W. (1963), "The Behavior of Inverted Pendulum Structures during Earthquakes", Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 53, No. 2, pp. 403-417.

[18] Housner, G.W. (1963), "The Dynamic Behavior of Water Tanks", Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 53, No. 2, pp. 381-387.

پی نوشت

- ¹ Damage avoidance design - DAD
- ² Micro
- ³ Macro
- ⁴ Gap
- ⁵ OpenSees: Open system for earthquake engineering simulation
- ⁶ Tilting or rocking
- ⁷ Multi-spring
- ⁸ Zero length elements
- ⁹ Impulsive
- ¹⁰ Convective
- ¹¹ Liquefied oxygen
- ¹² Eigen value analysis
- ¹³ Modal
- ¹⁴ Imperial Valley
- ¹⁵ Loma Prieta
- ¹⁶ Landers