

ویژه نامه نشریه مهندسی سازه و ساخت (علمی - پژوهشی)

www.jsce.ir

اثر برخورد بر رفتار لرزه‌ای مخازن جداسازی شده توسط جداساز آونگ اصطکاکی

علیرضا عبدویس^۱، علیرضا مرتضایی^{۲*}

۱- کارشناس ارشد مهندسی زلزله، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران

۲- دانشیار، مرکز تحقیقات ژئوتکنیک لرزه‌ای و بتن توانمند، گروه مهندسی عمران، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران

چکیده

مخازن نگهداری سیالات از جمله سازه‌های مهم صنعتی هستند که تحت زلزله‌های شدید نیز باید به عملکرد خود ادامه دهند. آسیب‌های وارده بر این سازه‌ها نشان دهنده عملکرد ضعیف آنها در زلزله‌های گذشته می باشد. یکی از روش‌های موثر در مقاوم سازی و کاهش نیروهای وارده بر این سازه‌ها استفاده از جداساز لرزه‌ای می باشد. از آنجا که پیوند جداساز آونگ اصطکاکی به وزن سازه روی آن وابسته نمی باشد، این نوع جداساز دارای عملکرد بهتری نسبت به سایر جداسازهای لرزه‌ای می باشد. این نوع از جداسازهای لرزه‌ای، از یک سطح مقعر شکل تشکیل شده‌اند که بر روی آن یک لغزنده قرار گرفته است و عمل لغزش توسط این لغزنده بر روی سطح مقعر شکل صورت می گیرد. آنچه در این مقاله به آن پرداخته می شود، بررسی عملکرد جداساز لرزه‌ای در کاهش پاسخ‌های مخازن، تحت تحریک زلزله‌های با سطوح خطر متفاوت (سطح خطر سرویس، طراحی و بیشترین زلزله مورد انتظار) می باشد. هم چنین، اثر ضربه بر پاسخ مخازن نیز مورد بررسی قرار گرفته شده است. برای این منظور، دو مخزن با نسبت ابعاد ظاهری متفاوت در نظر گرفته شده‌اند و پاسخ‌های آنها در سه حالت گیردار، جداسازی شده بدون در نظر گرفتن اثر ضربه و جداسازی شده با در نظر گرفتن اثر ضربه مقایسه شده‌اند. نتایج بدست آمده حاکی از آنست که با افزایش سطح خطر زلزله، عملکرد جداساز کاهش می یابد. هم چنین، احتمال وقوع برخورد در حالتی که سازه تحت تحریک زلزله‌های با سطح خطر بیشترین زلزله محتمل قرار می گیرند، بیشتر از دو سطح خطر دیگر است. پاسخ‌های بدست آمده نشان می دهند، در صورتی که برخورد رخ دهد، پاسخ‌های جابجایی جرم ضربانی، لنگر واژگونی و برش پایه نسبت به حالتی که برخورد رخ نمی دهد، افزایش می یابند.

کلمات کلیدی: مخازن نگهداری سیالات، جداساز لرزه‌ای آونگ اصطکاکی تک قوسی، زلزله، سطح خطر، اثر ضربه.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/jsce.2017.94432.1282	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	http://dx.doi.org/10.22065/jsce.2017.94432.1282	۱۳۹۷/۰۸/۳۰	۱۳۹۶/۰۸/۰۲	۱۳۹۶/۰۸/۰۲	۱۳۹۶/۰۷/۱۰	۱۳۹۶/۰۵/۱۲
علیرضا مرتضایی					*نویسنده مسئول:	
a.mortezaei@semnaniau.ac.ir					پست الکترونیکی:	

Impact effect on seismic behavior of base isolated liquid storage tanks isolated by friction pendulum bearing

A. Abdeveis¹, A. Mortezaei^{*2}

1-MSc in Earthquake Engineering, Semnan Branch, Islamic Azad university, Semnan, Iran

2-Associate Professor, Civil Engineering Department, Semnan Branch, Islamic Azad University, Semnan, Iran

ABSTRACT

Liquid storage tanks are important industrial structures that must continue their performance under severe earthquakes. The induced damages caused in the past earthquakes show the poor behavior of these structures. One of the most effective methods to retrofit and reduce the induced forces is using base isolation. Friction Pendulum System called FPS has better performance compared to other base isolation systems, for the reason that its period does not depend on the structural weight.

The aim of this paper is to investigate the effect of FPS under three different hazard level earthquakes (SLE, DBE and MCE). It is also, the impact effect due to contacting the slider with the side restrainers is investigated. For the required analysis, two different liquid storage tanks are considered and their responses are compared in Fixed, Isolated without considering impact and isolated with considering impact conditions. The obtained results show, increasing the hazard level of ground motions leads to decreasing the performance of FPS. It is also observed, compared to SLE and DBE earthquake ground motions the MCE has the maximum probability of impact. The results also show that, the impulsive mass displacement, overturning moment and base shear increases when the impact occurs, while the impact has no special effect on convective displacement.

ARTICLE INFO

Received: 03/08/2017

Revised: 02/10/2017

Accepted: 24/10/2017

Keywords:

Liquid storage tanks,
friction pendulum systems,
earthquake,
hazard level,
impact effect

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2017.94432.1282

*Corresponding author: AlirezaMortezaei.

Email address: a.mortezaei@semnaniau.ac.ir

۱- مقدمه

مخازن نگهداری سیالات دارای کاربرد فراوانی در زندگی انسان‌ها می‌باشند. از این سازه‌ها می‌توان برای مصارف آب رسانی، مقابله با آتش سوزی، نگهداری مواد نفتی و ... استفاده نمود. مطالعات انجام شده نشان می‌دهند این سازه‌ها تحت اثر زلزله‌های گذشته آسیب‌های زیادی دیده‌اند [۱ و ۲]. این آسیب‌ها می‌توانند به صورت کمانش جداره مخزن، آتش سوزی، سوراخ شدگی در محل اتصال بدنه به کف مخزن و در نتیجه از دست رفتن محتوی مخزن و ... باشند، که نشان‌دهنده عملکرد نامناسب این سازه‌ها در برابر زلزله می‌باشد. برای جلوگیری از آسیب‌های ناشی از زلزله بر مخازن دو روش کلی وجود دارد: (۱) افزایش ضخامت جداره و کف مخزن، برای جلوگیری از کاهش تنش‌های وارده بر کف و بدنه مخزن. اما، استفاده از این روش، معمولاً باعث افزایش انرژی ورودی ناشی از زلزله به سازه می‌شود. (۲) استفاده از ابزارهای کنترل سازه، خصوصاً جداسازهای لرزه‌ای و میراگرها.

استفاده از جداسازهای لرزه‌ای سالهاست به عنوان ابزاری برای کاهش انرژی ورودی ناشی از زلزله و مقاوم‌سازی، در صنعت ساختمان و پل مورد استفاده قرار می‌گیرد. در سال‌های اخیر استفاده از جداسازهای لرزه‌ای و میراگرها برای کاهش نیروهای ناشی از زلزله در مخازن رواج پیدا کرده‌است. چالهبوب^۱ و کلی^۲ در سال ۱۹۹۰، به بررسی تاثیر استفاده از جداساز لرزه‌ای در مخازن نگهداری آب با استفاده از میز لرزان پرداختند [۳]. نتایج نشان می‌داد، اگرچه استفاده از جداساز باعث کاهش شتاب وارده بر مخزن و در نتیجه کاهش نیروی هیدرودینامیکی می‌شود، اما جابجایی جرم نوسانی اندکی افزایش می‌یابد. زایاس^۳ و لو^۴، از جداساز آونگ اصطکاکی به عنوان روشی برای کاهش نیروهای وارده بر مخزن نگهداری گاز مایع استفاده کردند و نتیجه گرفتند استفاده از جداساز آونگ اصطکاکی باعث کاهش نیروهای وارده بر مخزن می‌شود [۴]. ملهوترا^۵ روشی برای جداسازی لرزه‌ای مخازن روی زمینی پیشنهاد داد، که در آن ورق کف مخزن بر روی سطح زمین قرار گرفته و جداره مخزن بر روی یک حلقه دایره‌ای که از جداساز لرزه‌ای تشکیل شده باشد، قرار گیرد [۵]. نتایج عددی بدست آمده نشان می‌داد، در نتیجه عمل جداسازی، تنش‌های محوری ناشی از ممان واژگونی کاهش یافتند.

شریمالی^۶ و جنگید^۷ به بررسی اثر استفاده از جداساز لرزه‌ای در مخازن تحت تحریک زلزله در دو راستا پرداختند [۶]. آنها، هم چنین به مقایسه رفتار لرزه‌ای مخازن جداسازی شده توسط انواع جداسازهای لرزه‌ای از جمله، جداساز لاستیکی-جداساز لاستیکی با میرایی زیاد-جداساز آونگ اصطکاکی-جداساز اصطکاکی خالص، پرداختند [۷]. نتایج حاکی از آن بود که جداسازهای لغزشی در مقایسه با جداسازهای لاستیکی عملکرد بهتری در کنترل و کاهش پاسخ‌های مخازن دارند. جداساز آونگ اصطکاکی، یکی از انواع جداسازهای لغزشی می‌باشد، که در سازه‌ها به وفور استفاده می‌شود. از آنجا که در هنگام وقوع زلزله سطح سیال درون مخزن مشخص نمی‌باشد، این نوع جداساز دارای عملکرد بهتری نسبت به سایر سیستم‌های جداسازی می‌باشد، زیرا زمان تناوب این سیستم به وزن سازه روی آن وابسته نمی‌باشد.

تاثیر استفاده از جداساز آونگ اصطکاکی در کاهش پاسخ‌های مخازن جداسازی شده توسط آبالی^۸ و اوکان^۹ مورد مطالعه قرار گرفت [۸]. آنها، به بررسی تاثیر مولفه قائم زلزله و ممان واژگونی پرداختند و نتیجه گرفتند که جداساز آونگ اصطکاکی ابزاری موثر در کاهش برش پایه مخازن در نظر گرفته شده بود. هم چنین در مطالعات آنها، بلندشدگی در یکی از مخازن، تحت تحریک یکی از زلزله‌های در نظر گرفته مشاهده شد.

چنگ و همکاران به بررسی اندرکنش خاک-سازه بر رفتار لرزه‌ای مخازن جداسازی شده توسط جداساز آونگ اصطکاکی پرداختند. هم چنین اثر برخورد مخزن با دیوار حائل اطراف مخزن رو مورد بررسی قرار دادند. نتیجه بدست آمده نشان می‌داد در نظر گرفتن اندرکنش باعث تشدید پاسخ جابجایی جرم نوسانی می‌شود. از طرف دیگر اندرکنش خاک-سازه، جابجایی جرم ضربانی و برش پایه را کاهش می‌دهد [۹].

هدف از این مطالعه، بررسی تاثیر استفاده از جداساز لرزه‌ای، در مخازن تحت تحریک زلزله‌های با سطوح خطر متفاوت (سطح خطر

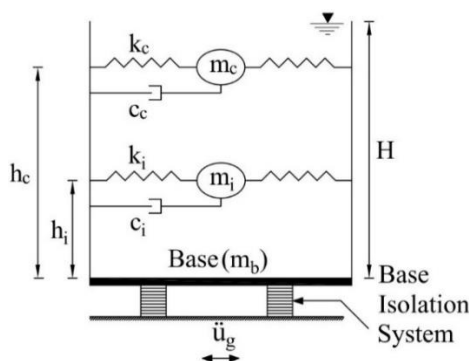
^۱Chalhoub^۲Kelly^۳Zayas^۴Low^۵Malhotra^۶Shrimali^۷Jangid^۸Abali^۹Uckan

سرویس^{۱۰}، سطح خطر طراحی^{۱۱} و سطح خطر بیشترین زلزله مورد انتظار^{۱۲} و بررسی اثر ضربه در هنگام برخورد لغزنده با حلقه‌های نگهدارنده می‌باشد. برای این منظور، دو مخزن جداسازی شده با مشخصات متفاوت در نظر گرفته شده است. سپس به بررسی عملکرد جداساز، تحت تحریک زلزله‌های در نظر گرفته شده، پرداخته می‌شود. در نهایت پاسخ‌های سازه، شامل جابجایی جرم نوسانی^{۱۳}، جرم ضربانی^{۱۴}، ممان واژگونی و برش پایه در سه حالت گیردار، جداسازی شده بدون در نظر گرفتن اثر ضربه و جداسازی شده با در نظر گرفتن اثر ضربه با یکدیگر مقایسه می‌شوند.

۲- مدل سازه‌ای سیال-مخزن

به دلیل اندرکنش سیال و سازه، مدل سه بعدی مخزن جداسازی شده دارای پیچیدگی‌های فراوانی می‌باشد. هاوسنر^{۱۵} در سال ۱۹۶۳ روش ساده‌شده و در عین حال دقیقی، برای محاسبه تاثیر نیروی دینامیکی سیال در مخازن گیردار تحت تحریک زلزله ارائه نمود [۱۰]. سپس، هارون^{۱۶} و هاوسنر به اصلاح مدل اولیه ارائه شده هاوسنر، برای در نظر گرفتن اثر انعطاف پذیری جداره مخزن پرداختند [۱۱]. در مدل هارون و هاوسنر، سیال درون مخزن به صورت سه جرم نوسانی، ضربانی و صلب نشان داده می‌شود و اندرکنش بین سیال و سازه به صورت فنر و میراگرهایی که به بدنه مخزن متصل هستند، در نظر گرفته می‌شود. در مدل هارون و هاوسنر، مولفه ضربانی نشان‌دهنده قسمتی از سیال است که به صورت شتابدار با جداره مخزن نوسان می‌کند و مولفه نوسانی نیز قسمتی از سیال است که در نزدیکی سطح سیال است و دارای حرکت نوسانی است.

ملهوترا و همکاران مدل ساده شده جرم و فنری ارائه کردند که در آن موده‌های بالاتر جرم‌های نوسانی و ضربانی در نظر گرفته شده بود [۱۲]. در این مقاله، از مدل ارائه شده ملهوترا و همکاران که در شکل شماره ۱ نشان داده شده، استفاده شده است. مشخصات مخزن عبارتند از: ارتفاع مخزن (H)، شعاع مخزن (R) و ضخامت مخزن (t). جرم‌های نوسانی و ضربانی (m_i و m_c) با استفاده از فنرهایی با سختی k_i و k_c به بدنه مخزن متصل شده‌اند. هم‌چنین میرایی متناسب با جرم‌های نوسانی و ضربانی با استفاده از c_i و c_c نشان داده شده‌اند.



شکل ۱: مدل ریاضی جرم و فنر مخزن جداسازی شده مورد مطالعه

زمان تناوب متناسب با جرم‌های نوسانی و ضربانی عبارتند از:

$$T_c = C_c \sqrt{R} \quad (1)$$

$$T_i = C_i \frac{H \sqrt{\rho}}{\sqrt{t/R} \times \sqrt{E}} \quad (2)$$

¹⁰Service Level Earthquake (SLE)

¹¹Design Based Earthquake (DBE)

¹²Maximum Credible Earthquake (MCE)

¹³Convective

¹⁴Impulsive

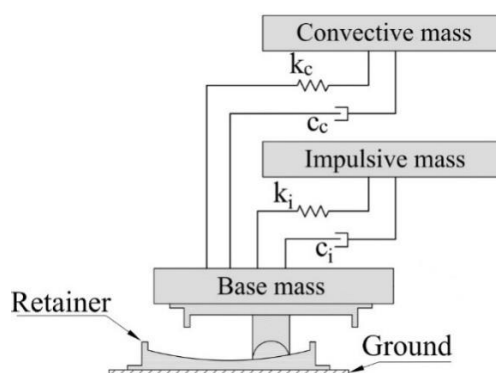
¹⁵Housner

¹⁶Haroun

که ρ چگالی جرمی سیال و E نیز مدول الاستیسیته مخزن می‌باشد. ضرایب C_c ، C_i ، نسبت جرم‌های نوسانی و ضربانی به جرم کل مخزن (m_i/m) و (m_c/m) و همچنین نسبت‌های (h_i/H) و (h_c/H) توسط ملهوترا و همکاران ارائه شده‌اند [۱۲].

۳- معادلات حرکت حاکم بر مخزن جداسازی شده

شکل ۲ نشان دهنده سیستم سه درجه آزادی در نظر گرفته شده مخزن جداسازی شده می‌باشد.



شکل ۲: سیستم سه درجه آزادی مخزن جداسازی شده

معادلات حرکت حاکم بر این سیستم را میتوان به صورت روابط ۳ تا ۵ نوشت:

$$m_c \ddot{u}_c + c_c (\dot{u}_c - \dot{u}_b) + k_c (u_c - u_b) = -m_c \ddot{u}_g \quad (۳)$$

$$m_i \ddot{u}_i + c_i (\dot{u}_i - \dot{u}_b) + k_i (u_i - u_b) = -m_i \ddot{u}_g \quad (۴)$$

$$m_b \ddot{u}_b - k_c (u_c - u_b) - k_i (u_i - u_b) - c_c (\dot{u}_c - \dot{u}_b) - c_i (\dot{u}_i - \dot{u}_b) + F = -m_b \ddot{u}_g \quad (۵)$$

که u_b و u_i به ترتیب جابجایی جرم نوسانی، جرم ضربانی و جداساز لرزه‌ای نسبت به زمین می‌باشند. \ddot{u}_g شتاب وارده ناشی از زلزله، m_b وزن کف و F نیروی اعمال شده توسط جداساز می‌باشد که توسط رابطه ۶ بیان می‌شود [۱۳].

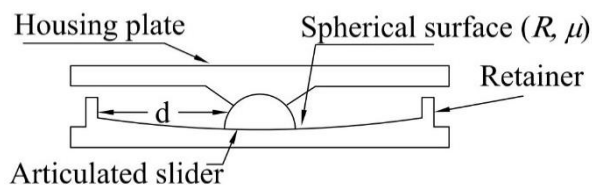
$$F = \frac{W}{R} u_b + \mu W Z + k_r (|u_b| - d) \operatorname{sgn}(u_b) H(|u_b| - d) \quad (۶)$$

در رابطه ۶، W وزن روسازه، R شعاع جداساز، k_r میزان سختی حلقه‌های نگهدارنده، d ظرفیت جابجایی سطح جداساز، H تابع پله‌ای هویساید^{۱۷} و μ ضریب اصطکاک می‌باشد که توسط رابطه ۷ بیان می‌شود. هم چنین Z متغیر هیسترتیکی است که دارای مقادیر بین ۱- و ۱ می‌باشد و با استفاده از رابطه ۸ ارائه می‌شود [۱۳]. ضریب اصطکاک (μ) عبارت است از:

$$\mu = \mu_{\max} - (\mu_{\max} - \mu_{\min}) \exp(-a |\dot{u}_b|) \quad (۷)$$

که، \dot{u}_b سرعت لغزش، μ_{\max} و μ_{\min} ضرایب لغزش در سرعت زیاد و سرعت نزدیک به صفر می‌باشند. هم چنین a پارامتری است برای انتقال از μ_{\max} به μ_{\min} مقدار a برای در جداسازهای آونگ اصطکاکی برابر با 100 s/m در نظر گرفته می‌شود. شکل ۳ نشان دهنده مقطع عرضی از جداساز آونگ اصطکاکی می‌باشد.

^{۱۷}Heaviside step function



شکل ۳: مقطع عرضی از جداساز آونگ اصطکاکی تک قوسی

متغیر هیستریک Z با استفاده از معادله دیفرانسیل ۸ تعریف می‌شود:

$$\frac{dZ}{dt} = \frac{1}{u_y} \left\{ A - |Z|^n [\gamma \operatorname{sgn}(\dot{u}_b Z) + \beta] \right\} \dot{u}_b \quad (۸)$$

که در رابطه ۸، u_y جابجایی نقطه تسلیم جداساز بوده و مقدار آن برابر است با 0.1 m ، β و η ضرایب بدون بعدی هستند که شکل حلقه هیستریک را کنترل می‌کنند [۱۳]. مقادیر این ضرایب عبارتند از: $A=1$ ، $\beta=\eta=0.5$ و $\eta=2$. برای حل معادلات حرکت نوشته شده و محاسبه پاسخ‌های بدست آمده، از برنامه MATLAB و روش فضای حالت استفاده شده است. پاسخ‌های در نظر گرفته شده عبارتند از: جابجایی جداساز نسبت به زمین (u_b)، جابجایی جرم‌های نوسانی و ضربانی نسبت به جداساز (x_i و x_c)، لنگر واژگونی نرمالایز شده و برش پایه نرمالایز شده که توسط روابط ۹ و ۱۰ ارائه شده‌اند:

$$F_s n = (-\{m_c(\ddot{u}_c + \ddot{u}_g) + m_i(\ddot{u}_i + \ddot{u}_g)\}) / W \quad (۹)$$

$$Mn = (-\{m_c h_c(\ddot{u}_c + \ddot{u}_g) + m_i h_i(\ddot{u}_i + \ddot{u}_g)\}) / (WH / 2) \quad (۱۰)$$

۴- مطالعات عددی انجام گرفته

برای انجام مطالعات عددی، دو مخزن استوانه‌ای فولادی با نسبت ابعاد متفاوت در نظر گرفته شده است: مخزن پهن که در آن نسبت ارتفاع به شعاع مخزن (H/R) کمتر از یک و مخزن لاغر با نسبت ارتفاع به شعاع (H/R) بیشتر از یک. سیال درون مخزن آب در نظر گرفته شده است. جدول ۱ نشان‌دهنده مشخصات مخازن پهن و لاغر می‌باشد. پارامترهای مربوط به جرم‌های نوسانی و ضربانی هر دو مخزن پهن و لاغر در جدول ۲ به صورت خلاصه آورده شده است. نسبت‌های میرایی برای جرم‌های نوسانی و ضربانی به ترتیب برابر با ۵٪ و ۲٪ در نظر گرفته شده‌اند [۱۴].

برای بررسی عملکرد جداساز در سطوح خطر متفاوت، نیاز به زلزله‌های با سطوح خطر متفاوت می‌باشد. برای این منظور از زلزله‌های معرفی شده توسط سامرویل^{۱۸} و همکاران استفاده شده است [۱۴]. آنها به مقیاس‌سازی و تولید زلزله‌هایی برای استفاده در طراحی بر اساس عملکرد پرداختند. این زلزله‌ها، برای سه سطح عملکرد تولید شده‌اند: سطح عملکرد سرویس با احتمال وقوع ۵۰٪ در ۵۰ سال، سطح عملکرد طراحی با احتمال وقوع ۱۰٪ در ۵۰ سال و سطح عملکرد بیشترین زلزله مورد انتظار با احتمال وقوع ۲٪ در ۵۰ سال [۱۵]. از آن جهت که این زلزله‌ها دارای محتوی فرکانسی و شدت متفاوت هستند، لذا می‌توانند روشی موثر در مطالعه میزان عملکرد سیستم جداساز در سطوح مختلف خطر زلزله را فراهم آورند. بنابراین، در این مطالعه، از تعداد ۶۰ رکورد زلزله به عنوان تحریک زلزله استفاده شده است [۱۶]. جدول ۳ نشان‌دهنده مشخصات زلزله‌های در نظر گرفته می‌باشد.

جدول ۱: مشخصات مخازن در نظر گرفته شده

نوع مخزن	ارتفاع (متر)	شعاع (متر)	نسبت ارتفاع به شعاع	ضخامت (متر)	مدول الاستیسیته (GPA)	ρ (KG/M ³)
پهن	۱۴/۶	۲۴/۴	۰/۶	۰/۰۲۰۳	۲۰۰	۱۰۰۰
لاغر	۱۱/۳	۶/۱	۱/۸۵	۰/۰۰۵۸	۲۰۰	۱۰۰۰

جدول ۲: پارامترهای حاصل از مدل مکانیکی معادل ارائه شده برای مخازن پهن و لاغر

نوع مخزن	$T_c(S)$	C_t	$C_c (S/M^{0.5})$	H_i/H	H_c/H	M_i/M	M_c/M
پهن	۰/۲۵۳	۸/۱۵	۷/۰۸	۱/۶۵	۰/۴۰۰	۰/۱۵۵۷	۰/۳۹۲
لاغر	۰/۱۵۷	۳/۶۶	۶/۰۷	۱/۴۸	۰/۴۴۴	۰/۷۲۷	۰/۲۴۵

جدول ۳: مشخصات زلزله های در نظر گرفته شده

MCE			DBE			SLE		
ضریب مقیاس	زلزله	شماره زلزله	ضریب مقیاس	زلزله	شماره زلزله	ضریب مقیاس	زلزله	شماره زلزله
۱/۲۸۳	Artificial	LA21	۰/۴۶۱	Imperial Valley	LA01	۰/۵۹۰	Coyote Lake	LA41
۰/۹۲۱	Artificial	LA22	۰/۶۷۶	Imperial Valley	LA02	۰/۳۳۳	Coyote Lake	LA42
۰/۴۱۸	Artificial	LA23	۰/۳۹۳	Imperial Valley	LA03	۰/۱۴۳	Imperial Valley	LA43
۰/۴۷۳	Artificial	LA24	۰/۴۸۸	Imperial Valley	LA04	۰/۱۱۲	Imperial Valley	LA44
۰/۸۶۸	Northridge	LA25	۰/۳۰۲	Imperial Valley	LA05	۰/۱۴۴	Kern County	LA45
۰/۹۴۴	Northridge	LA26	۰/۲۳۴	Imperial Valley	LA06	۰/۱۵۹	Kern County	LA46
۰/۹۲۷	Northridge	LA27	۰/۴۲۱	Landers	LA07	۰/۳۳۷	Landers	LA47
۱/۳۳۰	Northridge	LA28	۰/۴۲۶	Landers	LA08	۰/۳۰۸	Landers	LA48
۰/۸۰۹	Tabas	LA29	۰/۵۲۰	Landers	LA09	۰/۳۱۸	Morgan Hill	LA49
۰/۹۹۲	Tabas	LA30	۰/۳۶۰	Landers	LA10	۰/۵۴۶	Morgan Hill	LA50
۱/۲۹۷	Artificial	LA31	۰/۶۶۵	Loma Prieta	LA11	۰/۷۸۱	Park field	LA51
۱/۲۹۷	Artificial	LA32	۰/۹۷۰	Loma Prieta	LA12	۰/۶۳۲	Park field	LA52
۰/۷۸۲	Artificial	LA33	۰/۶۷۸	Northridge	LA13	۰/۶۹۴	Park field	LA53
۰/۶۸۱	Artificial	LA34	۰/۶۵۷	Northridge	LA14	۰/۷۹۱	Park field	LA54
۰/۹۹۲	Artificial	LA35	۰/۵۳۳	Northridge	LA15	۰/۵۱۸	North Palm	LA55
۰/۱۰۱	Artificial	LA36	۰/۵۸۰	Northridge	LA16	۰/۳۷۹	North Palm	LA56
۰/۷۱۲	Artificial	LA37	۰/۵۶۹	Northridge	LA17	۰/۲۵۳	San Fernando	LA57
۰/۷۷۶	Artificial	LA38	۰/۸۱۷	Northridge	LA18	۰/۲۳۱	San Fernando	LA58
۰/۵۰۰	Artificial	LA39	۱/۰۱۹	North Palm	LA19	۰/۷۶۹	Whittier	LA59
۰/۶۵۷	Artificial	LA40	۰/۹۸۷	North Palm	LA20	۰/۴۷۸	Whittier	LA60

۵- بحث و نتایج

۵-۱- تاثیر محتوای فرکانسی زلزله بر عملکرد جداساز

در این قسمت به بررسی عملکرد لرزه‌ای هر دو مخزن پهن و لاغر جداسازی شده توسط جداساز آونگ اصطکاکی تحت تحریک زلزله‌های در نظر گرفته شده پرداخته می‌شود. پارامترهای در نظر گرفته شده برای جداساز عبارتند از: $\mu_{min} = 0.03$ و $\mu_{max} = 0.06$, $T_b = 2s$ و میانگین پاسخ‌های مخازن پهن و لاغر در دو حالت گیردار و جداسازی شده در جداول ۴ و ۵ آمده است. همانطور که مشاهده می‌شود، استفاده از جداساز لرزه‌ای باعث کاهش شدید جابجایی جرم ضربانی (x_i) ، ممان واژگونی نرمالایز شده (M_n) و برش پایه نرمالایز شده (F_s/n) می‌شود. در نتیجه‌ی کاهش پاسخ‌ها، نیروی وارده بر جداره مخزن نیز کاهش یافته و در نتیجه طراحی مطمئن‌تری خواهیم داشت. در مورد جابجایی جرم نوسانی، نتایج بدست آمده حاکی از آنست که بسته به محتوای فرکانسی زلزله، نوع مخزن و سطح خطر زلزله پاسخ می‌تواند افزایش یا کاهش یابد.

جدول ۴: میانگین پاسخ‌های در نظر گرفته شده مخزن پهن

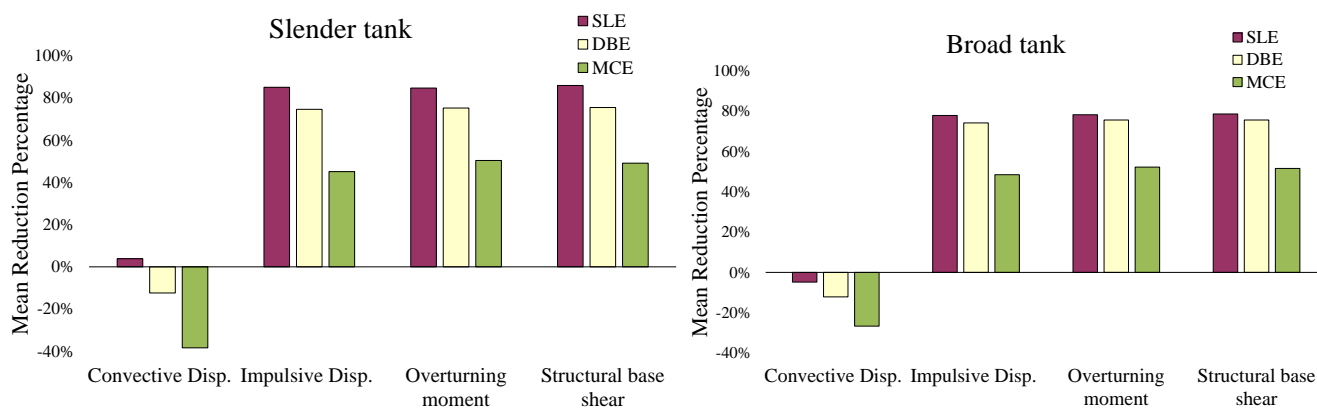
F _s N		MN		X _I (M)			X _c (M)		حالت
MCE	DBE	SLE	MCE	DBE	SLE	MCE	DBE	SLE	
۰/۹۹۲	۰/۶۸۵	۰/۴۷۹	۰/۷۹۳	۰/۵۴۷	۰/۳۸۲	۰/۰۴۰۳	۰/۰۲۷۹	۰/۰۱۹۵	گیردار
۰/۳۵۶	۰/۱۵۱	۰/۰۹۴۴	۰/۲۸۲	۰/۱۲۰	۰/۰۷۶۰	۰/۰۱۵۲	۰/۰۰۶۵۳	۰/۰۰۳۹۶	جداسازی شده

جدول ۵: میانگین پاسخ‌های در نظر گرفته شده مخزن لاغر

F _s N		MN		X _I (M)			X _c (M)		حالت
MCE	DBE	SLE	MCE	DBE	SLE	MCE	DBE	SLE	
۱/۴۸۱	۱/۱۵۴	۱/۰۶۷	۱/۳۳۲	۱/۰۳۱	۰/۹۴۹	۰/۰۱۱۹	۰/۰۰۹۳۱	۰/۰۰۸۶۴	گیردار
۰/۶۰۶	۰/۲۲۲	۰/۱۰۶	۰/۵۳۸	۰/۱۹۹	۰/۰۹۸۴	۰/۰۰۵۲۲	۰/۰۰۱۹	۰/۰۰۰۸۹۷	جداسازی شده

شکل ۴ نشان دهنده میانگین کاهش پاسخ‌های در نظر گرفته شده مخازن پهن و لاغر در سه سطح عملکردی می‌باشند. نتایج عددی نشان می‌دهند، برای مخزن پهن، پاسخ جابجایی جرم ضربانی تحت رکوردهای سطح خطر سرویس، طراحی و بیشترین زلزله مورد انتظار به ترتیب به میزان ۷۸٪، ۷۴٪ و ۴۸٪ نسبت به حالت گیردار کاهش یافته است. برای مخزن لاغر و تحت رکوردهای فوق پاسخ جرم ضربانی به صورت میانگین به ترتیب به میزان ۷۸٪، ۶۰٪ و ۲۳٪ نسبت به حالتی که کاهش یافته است. لنگر واژگونی و برش پایه نرمالایز شده نیز شرایط مشابهی دارند به گونه‌ای که بهترین عملکرد جداساز تحت تحریک رکوردهای با سطح خطر سرویس بدست می‌آید. برای مخزن پهن لنگر واژگونی به صورت میانگین ۷۸٪، ۷۶٪ و ۵۲٪ و برش پایه نرمالایز شده به صورت میانگین ۷۹٪، ۷۶٪ و ۵۲٪ تحت زلزله های SLE، DBE و MCE کاهش یافته‌اند. برای مخزن لاغر میانگین درصد کاهش پاسخ لنگر واژگونی برابر با ۵۶٪، ۴۵٪ و ۲۳٪ و میانگین درصد کاهش پاسخ برش پایه نرمالایز شده برابر با ۴۵٪، ۳۴٪ و ۲۳٪ می‌باشد. این نتایج نشان می‌دهند که با افزایش سطح خطر زلزله از SLE به MCE عملکرد جداساز نیز کاهش یافته است. این نتایج در مورد جابجایی جداساز به نحو دیگری، صادق است. بدین صورت که با افزایش سطح خطر زلزله باعث افزایش جابجایی جداساز شده و در نتیجه احتمال وقوع برخورد لغزنده با حلقه‌های نگهدارنده افزایش پیدا می‌کند. در بخش بعد به بررسی تاثیر پدیده برخورد بر پاسخ لرزه‌ای مخازن پرداخته می‌شود.

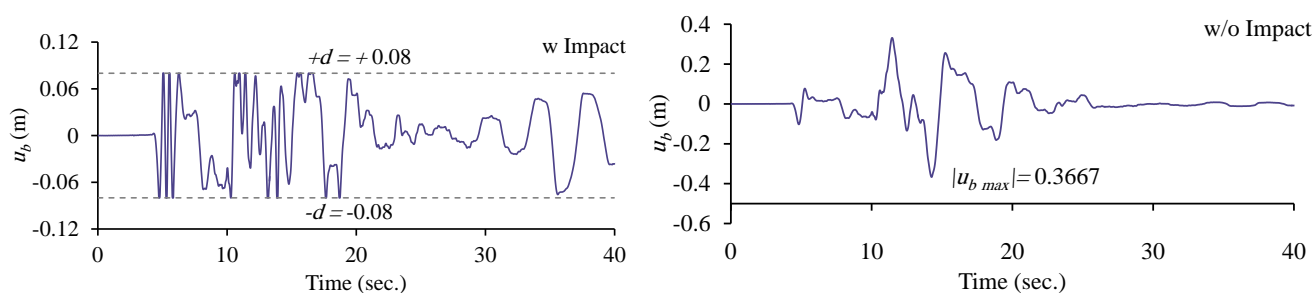
همانطور که گفته شد، بسته به محتوای فرکانسی زلزله، نوع مخزن و سطح خطر زلزله، جابجایی جرم نوسانی کاهش یا افزایش می‌یابد. نتایج عددی حاکی از آن است که با افزایش سطح خطر زلزله در هر دو مخزن پهن و لاغر جداساز عملکرد خود را از دست می‌دهد و به صورت کلی باعث افزایش پاسخ می‌شود. جابجایی جرم نوسانی در مخزن پهن تحت زلزله‌های SLE، DBE و MCE به صورت میانگین ۵٪، ۱۲٪ و ۲۷٪ افزایش پیدا کرده است. برای مخزن لاغر، جابجایی جرم نوسانی تحت زلزله‌های SLE پاسخ به طور میانگین به میزان ۴٪ کاهش داشته است. از طرف دیگر تحت زلزله‌های DBE و MCE پاسخ جابجایی جرم نوسانی به صورت میانگین به میزان ۱۲٪ و ۳۸٪ افزایش پیدا کرده است. این امر نشان می‌دهد در صورتی که از جداساز لرزه‌ای استفاده شود، باید فاصله‌ای بین سطح سیال و سقف مخزن به منظور جلوگیری از برخورد سیال با سقف مخزن در نظر گرفته شود.



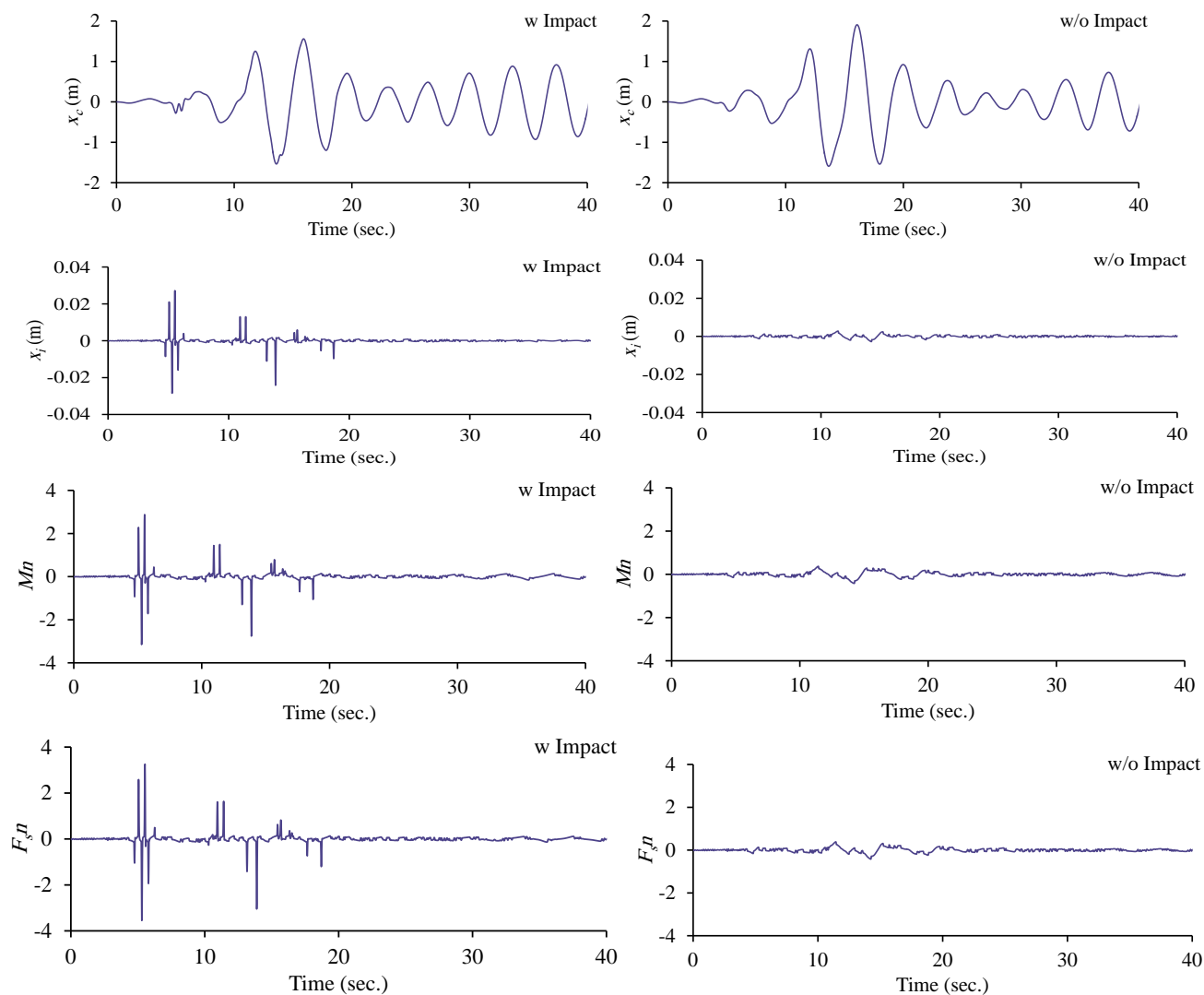
شکل ۴: میانگین درصد کاهش پاسخ‌های در نظر گرفته شده در مخازن پهن و لاغر تحت زلزله های در نظر گرفته شده

۵-۲- اثر برخورد

در این بخش به بررسی تاثیر برخورد لغزنده با حلقه‌های نگهدارنده پرداخته می‌شود. پارامترهای جداسازی، همان پارامترهای در نظر گرفته شده در بخش قبل می‌باشند. ظرفیت جابجایی (d) برابر با ۸ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است [۱۶]. برای در نظر گرفتن اثر رفتار صلب حلقه‌های نگهدارنده، سختی آن‌ها باید به اندازه کافی زیاد باشد.



شکل ۵: اثر ضربه بر جابجایی جداساز مخزن لاغر تحت تحریک زلزله LA30



شکل ۶: تاریخچه زمانی پاسخ‌های در نظر گرفته شده مخزن لاغر در دو حالت در نظر گرفتن اثر ضربه و بدون در نظر گرفتن اثر ضربه تحت تحریک زلزله LA30

برای این منظور، سختی حلقه‌های نگهدارنده برابر با $k_r = 100 \times k_i$ فرض شده است. پدیده ضربه هنگامی رخ می‌دهد که لغزنده با حلقه‌های نگهدارنده تماس پیدا کند، یا به عبارت دیگر جابجایی جداساز برابر با میزان ظرفیت جابجایی (d) جداساز شود. شکل ۵ نشان دهنده تاریخچه زمانی جابجایی جداساز مخزن لاغر تحت زلزله LA30 در دو حالت جداسازی شده بدون در نظر گرفتن اثر جداسازی و با در نظر گرفتن اثر جداسازی می‌باشد. در صورتی که از تاثیر ضربه صرفنظر شود، جابجایی جداساز ۳۶/۶۷ سانتی متر می‌باشد، این درحالیست که با در نظر

گرفتن اثر ضربه، جابجایی جداساز به ۸ سانتی متر محدود می‌شود.

شکل ۶ نشان دهنده پاسخ جابجایی جرم نوسانی، جابجایی جرم ضربانی، لنگر واژگونی و برش پایه نرمالایز شده در مخزن لاغر در حالات جداسازی شده بدون در نظر گرفتن اثر ضربه و با در نظر گرفتن اثر ضربه تحت تحریک زلزله LA30 می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود، وقوع ضربه تاثیر چندانی در جابجایی جرم نوسانی نخواهد داشت.

از طرف دیگر، جابجایی جرم ضربانی، لنگر واژگونی و برش پایه به پدیده ضربه بسیار حساس می‌باشند و در لحظه وقوع برخورد این پاسخها مقادیر زیادی پیدا می‌کنند. لذا در صورتی که ضربه رخ دهد، ممکن است سیستم جداسازی دچار خرابی یا شکست شود و در این صورت سازه دچار آسیب فراوان شود. میانگین بیشینه پاسخهای مخازن پهن و لاغر تحت سه سطح خطر زلزله، در هر سه حالت گیردار، جداسازی شده بدون اثر ضربه و جداسازی شده با در نظر گرفتن اثر ضربه در جداول ۶ و ۷ آورده شده است.

جدول ۶: میانگین پاسخهای در نظر گرفته شده مخزن پهن در حالات گیردار، جداسازی شده با اثر ضربه و بدون اثر ضربه

F _S N			MN			X _I (M)			X _C (M)			حالت
MCE	DBE	SLE	MCE	DBE	SLE	MCE	DBE	SLE	MCE	DBE	SLE	
۰/۹۹۲	۰/۶۸۵	۰/۴۷۹	۰/۷۹۳	۰/۵۴۷	۰/۳۸۲	۰/۰۴۰۳	۰/۰۲۷۹	۰/۰۱۹۵	۰/۸۳۹	۰/۶۳۰	۰/۲۴۹	گیردار
۰/۳۵۶	۰/۱۵۱	۰/۰۹۴۴	۰/۲۸۲	۰/۱۲۰	۰/۰۷۶۰	۰/۰۱۵۲	۰/۰۰۶۵۳	۰/۰۰۳۹۶	۰/۹۸۶	۰/۶۵۰	۰/۲۵۰	جداسازی شده بدون اثر ضربه
۱/۳۸۳	۰/۴۷۵	۰/۲۱۲	۱/۱۰۱	۰/۳۸۰	۰/۱۷۰	۰/۰۵۷۵	۰/۰۱۹۷	۰/۰۰۸۸۳	۰/۸۷۹	۰/۶۴۰	۰/۲۵۱	جداسازی شده با اثر ضربه

جدول ۷: میانگین پاسخهای در نظر گرفته شده مخزن لاغر در حالت گیردار، جداسازی شده با اثر ضربه و بدون اثر ضربه

F _S N			MN			X _I (M)			X _C (M)			حالت
MCE	DBE	SLE	MCE	DBE	SLE	MCE	DBE	SLE	MCE	DBE	SLE	
۱/۴۸۱	۱/۱۵۴	۱/۰۶۷	۱/۳۳۲	۱/۰۳۱	۰/۹۴۹	۰/۰۱۱۹	۰/۰۰۹۳۱	۰/۰۰۸۶۴	۱/۲۵۵	۰/۷۴۰	۰/۲۹۶	گیردار
۰/۶۰۶	۰/۲۲۲	۰/۱۰۶	۰/۵۳۸	۰/۱۹۹	۰/۰۹۸۴	۰/۰۰۵۲۲	۰/۰۰۱۹	۰/۰۰۰۸۹۷	۱/۷۵۸	۰/۷۷۹	۰/۲۷۹	جداسازی شده بدون ضربه
۴/۲۴۳	۲/۳۰۱	۰/۶۲۸	۳/۷۶۱	۱/۹۵۰	۰/۵۶۱	۰/۰۳۵۰	۰/۰۱۸۱	۰/۰۰۵۲۰	۱/۲۷۰	۰/۷۱۱	۰/۲۸۵	جداسازی شده با ضربه

همانطور که مشاهده می‌شود، در صورتی که پدیده ضربه رخ دهد، پاسخ جابجایی جرم ضربانی، ممان واژگونی و برش پایه به صورت چشمگیری افزایش پیدا می‌کنند. لذا، برای جلوگیری از وقوع این پدیده ظرفیت جابجایی جداساز به اندازه کافی زیاد در نظر گرفته شود. برای مخازن پهن جابجایی جرم ضربانی تحت زلزله‌های SLE و DBE به طور میانگین در قیاس با حالت گیردار ۶۳٪ و ۳۳٪ کاهش پیدا کرده است، در حالیکه تحت زلزله‌های MCE به طور میانگین ۸۸٪ افزایش پیدا کرده است. برای مخزن لاغر جابجایی جرم ضربانی تحت زلزله‌های SLE به طور میانگین ۴۲٪ کاهش و برای زلزله‌های با سطح خطر DBE و MCE به ترتیب ۱۳۳٪ و ۲۴۷٪ افزایش پاسخ وجود داشته است.

لنگر واژگونی و برش پایه نرمالایز شده نیز شرایط مشابهی را تجربه نموده‌اند. بدین نحو که در مخزن پهن تحت زلزله‌های با سطح خطر SLE و DBE لنگر واژگونی به میزان ۶۳٪ و ۳۴٪ کاهش و برش پایه به میزان ۶۴٪ و ۳۴٪ کاهش داشته است. هم چنین تحت زلزله‌های MCE، افزایش پاسخ لنگر واژگونی و برش پایه به میزان ۸۱٪ و ۸۲٪ مشاهده شد. برای مخزن لاغر لنگر واژگونی و برش پایه تحت زلزله‌های SLE به طور میانگین ۴۲٪ و ۴۳٪ کاهش داشته است. از طرف دیگر نتایج نشان می‌دهد، با افزایش سطح خطر زلزله احتمال وقوع برخورد لغزنده با حلقه‌های نگهدارنده نیز بیشتر شده و در نتیجه پاسخ افزایش می‌یابد. لنگر واژگونی و برش پایه در مخزن لاغر تحت زلزله‌های DBE به طور میانگین ۱۲۳٪ و ۱۲۷٪ و تحت زلزله‌های MCE، ۲۳۲٪ و ۲۳۹٪ افزایش داشته‌اند. بر اساس پاسخ‌های بدست آمده، برای هر دو مخزن پهن و لاغر، تحت تمامی زلزله‌های با سطح خطر MCE پدیده ضربه مشاهده شد. در سطح خطر SLE و برای هر دو مخزن پهن و لاغر، به جز زلزله‌های LA41، LA59 و LA60، پدیده ضربه برای هیچ یک از زلزله‌های دیگر مشاهده نشد. در سطح خطر DBE و در مخزن پهن پدیده ضربه در تمامی زلزله‌ها به جز زلزله‌های LA03، LA04، LA05، LA06، LA07، LA08، LA10 و LA12 به وقوع پیوست. این پدیده در مخزن لاغر و در سطح خطر گفته شده در تمامی زلزله‌ها به جز LA06 و LA12 به وقوع پیوست.

هم چنین پاسخ‌های عددی بدست آمده نشان می‌دهند برای زلزله‌های با سطح خطر سرویس، جابجایی جداساز به صورت میانگین کمتر از ۸ سانتی متر می‌باشد، هر چند که در برخی از زلزله‌ها، در هر دو مخزن پهن و لاغر ضربه مشاهده شده است. برای زلزله‌های با سطح خطر

طراحی میانگین جابجایی جداساز در مخزن پهن و لاغر به ترتیب ۹ سانتی‌متر و ۱۶ سانتی‌متر می‌باشد و برای سطح خطر بیشترین زلزله محتمل نیز میانگین جابجایی در مخزن پهن ۳۰ سانتی‌متر و در مخزن لاغر ۵۰ سانتی‌متر می‌باشد. لذا در صورتی که اثر ضربه در نظر گرفته نشود، احتمال آسیب به مخزن در اثر زلزله‌های طراحی و بیشترین زلزله مورد انتظار، زیاد است.

۶- نتیجه گیری

در این مقاله به بررسی تاثیر جداساز لرزه ای در کاهش پاسخ های مخازن تحت تحریک زلزله های با سطوح خطر مختلف زلزله پرداخته شد. نتایج بدست آمده نشان دهنده موثر بودن عمل جداسازی در کاهش پاسخ های مخازن از جمله جابجایی جرم ضربانی، ممان واژگونی و برش پایه می باشد. با این وجود میزان موثر بودن عملکرد جداساز، بسته به محتوی فرکانسی زلزله، نوع مخزن و سطح خطر زلزله تحریک کننده دارد. به گونه‌ای که با افزایش سطح خطر زلزله عملکرد جداساز نیز کاهش می‌یابد. از طرف دیگر، با توجه به اینکه جرم نوسانی ماهیتا دارای پیوند طولانی می‌باشد، بسته به محتوی فرکانسی زلزله، جابجایی جرم نوسانی می‌تواند کاهش یا افزایش یابد. هم‌چنین در این مقاله به بررسی احتمال وقوع برخورد لغزنده با حلقه‌های نگهدارنده و تاثیر آن بر پاسخ مخازن جداسازی شده پرداخته شد. بر اساس نتایج بدست آمده، برای ظرفیت جابجایی ۸ سانتی‌متر و در سطح خطر MCE، در هر دو مخزن پهن و لاغر پدیده ضربه مشاهده شد. وقوع پدیده برخورد باعث افزایش چشمگیر جابجایی جرم ضربانی، لنگر واژگونی و برش پایه می‌شود، در حالیکه جابجایی جرم نوسانی تاثیر چشمگیری نمی‌پذیرد.

مراجع

- [1] Cooper, T.W. (1997). "A study of the performance of petroleum storage tanks during earthquakes 1933-1995.", Report for US Department of Commerce: NIST GCR 97-720
- [2] Hamdan, F.H. (2000). Seismic behaviour of cylindrical steel liquid storage tanks. *Journal of Constructional steel Research*, 53(3): 307-333.
- [3] Chalhoub, M.S., Kelly, J.M. (1990). Shake table test of cylindrical water tanks in base-isolated structures. *Journal of engineering mechanics*, 116(7): 1451-1472.
- [4] Zayas, V.A., Low, S.S. (1995). Application of seismic isolation to industrial tanks. *ASME/JSME Proceedings of Pressure Vessels and Piping Conference*, Hawaii, USA, 319: 273-286
- [5] Malhotra, P.K. (1997). New method for seismic isolation of liquid storage tanks. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 26(8): 839-847.
- [6] Shrimali, M.K., Jangid, R.S. (2002). Seismic response of liquid storage tanks isolated by sliding bearings. *Engineering Structures*, 24(7): 909-921.
- [7] Shrimali, M.K., Jangid, R.S. (2002). A comparative study of performance of various isolation systems for liquid storage tanks. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 2(4): 573-591.
- [8] Abali, E., Uçkan, E. (2010). Parametric analysis of liquid storage tanks base isolated by curved surface sliding bearings. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30(1): 21-31.
- [9] Cheng, X, Jing, W., Chen, J., Zhang, X. (2017). Pounding dynamic responses of sliding base-isolated rectangular liquid-storage structure considering soil-structure interactions. *Shock and Vibration*, <https://doi.org/10.1155/2017/8594051>.
- [10] Housner, G. W.; "The dynamic behavior of water tanks.", *Bulletin of the Seismology Society of America* 53, No. 2. (1963) 381-387.
- [11] Haroun, M.A., Housner, G.W. (1981). Seismic design of liquid storage tanks. *Journal of the Technical Councils of ASCE*, 107(1): 191-207.
- [12] Malhotra, P.K., Wenk, T., Wieland, M. (2000). Simple procedure for seismic analysis of liquid-storage tanks. *Structural Engineering International*, 10(3): 197-201.
- [13] Fenz, D.M., Constantinou, M.C. (2008). *Development, implementation and verification of dynamic analysis models for multi-spherical sliding bearings*. Technical Report MCEER-08-0018, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, University at Buffalo, State University of New York
- [14] Somerville, P., Anderson, D., Sun, J., Punyamurthula, S., Smith, N. (1998). "Generation of ground motion time histories for performance-based seismic engineering", *Proc., 6th national Earthq. Eng. Conf.*, Seattle, Washington.

- [15] Mortezaei, A., Zahrai, S.M. (2009). Seismic response of reinforced concrete building with viscoelastic damper under near field earthquake, *Asian Journal of Civil Engineering*, 9(3), 347-359.
- [16] Van De Lindt, J.W., Liu, H., Symans, M.D., Shinde, J. K. (2011). Seismic performance and modeling of a half-scale base-isolated wood frame building. *Journal of Earthquake Engineering*, 15: 469-490