

ارزیابی رفتار دینامیکی مخازن ذخیره مایعات جداسازی شده با سیستم آونگ اصطکاکی تحت تحریکات پالس گونه

حسین حیاتی‌راد^۱ و سامان باقری^{۲*}

^۱ کارشناس ارشد مهندسی سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

^۲ دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

(دریافت: ۹۶/۹/۷، پذیرش: ۹۸/۸/۱۲، نشر آنلاین: ۹۸/۸/۱۲)

چکیده

سیستم‌های جداسازی به عنوان یکی از روش‌های مؤثر و معمول برای کاهش خسارات انواع سازه‌ها از جمله مخازن ذخیره مایعات شناخته شده است. با این وجود، این نوع سازه‌های جداسازی شده تحت تحریکات پالس گونه و پیوند بلند زلزله‌های حوزه نزدیک گسل، در معرض آسیب‌های احتمالی هستند. هدف از این تحقیق ارزیابی پارامتریک و جامع پاسخ لرزه‌ای مخازن ذخیره مایعات جداسازی شده با سیستم آونگ اصطکاکی (FPS) تحت تحریکات پالس گونه می‌باشد. برای این منظور ابتدا مخازن جداسازی شده با مدل‌های مکانیکی معادل شبیه‌سازی شده و سپس آنالیز دینامیکی غیرخطی آن‌ها تحت چنین تحریکاتی انجام می‌شود. تأثیر متغیرهای مهم پالس‌های ورودی و سیستم جداسازی مانند دامنه پالس، پیوند پالس، تعداد پالس، پیوند جداسازی، ضریب اصطکاک جداسازی و نیز تأثیر نسبت ابعادی مخزن ارزیابی می‌شود. نتایج حاصله بیانگر این است که با اضافه کردن سیستم جداسازی، می‌توان پاسخ‌های لرزه‌ای مخازن را تحت تحریکات پالس گونه معادل زلزله‌های حوزه نزدیک گسل در محدوده مطلوبی کنترل کرد. همچنین مشاهده شد که جابجایی قائم سطح آزاد سیال با توجه به بالا بودن زمان تناوب نوسانی تحت تأثیر تحریکات با پیوند بلند است؛ در صورتی که لنگر واژگونی مخزن تحت تأثیر و تشدید پالس‌های با پیوند نزدیک به پیوند جداساز هستند. با تغییر مشخصه‌های سیستم جداسازی مخزن و مشاهده تأثیر آن‌ها در حداکثر پاسخ‌های در نظر گرفته شده، توصیه‌هایی برای انتخاب مناسب آن‌ها در مجاورت گسل‌های فعال صورت گرفت.

کلیدواژه‌ها: مخازن ذخیره مایعات، جداسازی لرزه‌ای، سیستم آونگ اصطکاکی، زلزله حوزه نزدیک گسل، تحریک پالس گونه.

۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر، جداسازی لرزه‌ای به عنوان یک روش شناخته شده و محبوب برای محافظت مخازن ذخیره سیالات تحت زلزله‌های شدید شناخته شده است. Malhotra (۱۹۹۷) روشی برای جداسازی مخازن ذخیره مایعات استوانه‌ای روزمینی ارائه داد. در این روش دیواره مخزن بر روی حلقه‌ای از بالشتک‌های انعطاف‌پذیر قرار گرفته و کف مخزن مستقیماً متکی به زمین است. نتایج حاصل نشانگر کاهش واژگونی و تنش محوری فشاری مخزن در اثر جداسازی بود.

Jangid و Shrimali (۲۰۰۲) با مقایسه رفتار انواع جداسازهای لرزه‌ای در مخازن نتیجه گرفتند که جداسازهای مبتنی بر لغزش کارایی بهتری نسبت به جداسازهای لاستیکی در کنترل پاسخ‌های دینامیکی مخازن دارند. در این بین سیستم آونگ اصطکاکی^۱ به لحاظ دارا بودن مزیت‌های فراوان از جمله، وابسته نبودن پیوند جداساز به وزن روسازه، قابلیت اتلاف انرژی

مخازن ذخیره سیالات از اجزاء بسیار مهم و راهبردی در شریان‌های حیاتی و صنایع به حساب می‌آیند. اهمیت مخازن ذخیره سیال، به اندازه تأثیر سیالات مورد استفاده در زندگی روزمره از قبیل آب، مشتقات نفتی و مواد شیمیایی است. تخریب این گونه سازه‌ها تحت زلزله با توجه به کاهش دسترسی به سوخت، آب و دیگر مایعات ضروری، ممکن است عملیات مدیریت بحران و امدادرسانی را با مشکلات جدی مواجه سازد. علاوه بر موارد ذکر شده، تخریب مخازن موجب خطرات ثانویه‌ای همچون نشت مواد سمی و آلودگی محیط زیست نیز می‌شود. رفتار نامناسب و وقوع خرابی‌های فاجعه‌بار در زلزله‌های گذشته که توسط محققین مختلفی گزارش شده است (Haroun, ۱۹۸۳; Rammerstorfer و همکاران، ۱۹۹۰; Zama و همکاران، ۲۰۱۲)، نیاز به بهبود رفتار لرزه‌ای مخازن ذخیره سیالات را بیش از پیش آشکار می‌کند.

1. Friction Pendulum System

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۴۱-۳۳۳۹۲۵۷۱

آدرس ایمیل: hossein.raad.hayati@gmail.com (ح. حیاتی‌راد)، s_bagheri@tabrizu.ac.ir (س. باقری).

در مقایسه با رکوردهای واقعی نزدیک گسل در برآورد حداکثر ارتفاع امواج سطحی مایع درون مخزن نیز تأیید گردید.

Shekari و همکاران (۲۰۱۰) به بررسی تأثیر زلزله‌های با پیرو بلند بر رفتار لرزه‌ای مخزن جداسازی شده با جداگرهای لاستیکی پرداختند. نتایج آن‌ها نشانگر تأثیر قابل توجه این نوع جداسازی در کنترل پاسخ‌های لرزه‌ای مخزن بود؛ با این حال در برخی از حالات جابه‌جایی قائم سطح آزاد سیال در اثر جداسازی لرزه‌ای افزوده می‌شد. Zama و همکاران (۲۰۱۲) آسیب مخزن‌های ذخیره نفت را تحت زلزله سال ۲۰۱۱ ژاپن بررسی کردند. آن‌ها آسیب‌های جداره و سقف مخزن را در اثر نوسانات شدید موج سطحی تحت زمین لرزه‌های با پیرو بلند گزارش دادند. Bagheri و Farajian (۲۰۱۸) تأثیر خصوصیات نزدیک گسل رکورد ورودی را در رفتار غیرخطی مخزن جداسازی شده با سیستم آونگ اصطکاکی بررسی کردند و نتیجه گرفتند که کارایی جداساز در مخزن با نسبت‌های ابعادی مختلف تحت زلزله‌های دور از گسل بیشتر از زلزله‌های نزدیک گسل است. همچنین مشخص شد که برخورد لغزنده با نگه‌دارنده جانبی جداساز که فقط در برخی از زلزله‌های نزدیک گسل رخ داد، پاسخ‌های مخزن جداسازی شده را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد.

توابع تحلیلی پالس معادل برای زلزله‌های حوزه نزدیک گسل از پیچیدگی این نوع زلزله‌ها کاسته و امکان بررسی تأثیر مستقیم متغیرهای کلیدی حرکات پالس‌گونه مانند پیرو پالس، دامنه پالس، شکل پالس و تعداد آن را به طور جداگانه فراهم می‌سازد. در مطالعه حاضر رفتار لرزه‌ای مخزن استوانه‌ای شکل فولادی ذخیره مایعات جداسازی شده با سیستم آونگ اصطکاکی تحت روابط تحلیلی پالس معادل زلزله‌های حوزه نزدیک به صورت پارامتریک بررسی می‌شود. برای این منظور ابتدا مخزن در نظر گرفته شده با مدل‌های مکانیکی معادل، شبیه‌سازی گردیده و سپس تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی مخزن جداسازی شده تحت پالس‌های تحلیلی معادل زلزله‌های حوزه نزدیک انجام می‌شود. به این ترتیب برخلاف مطالعات قبلی، با تغییر هم‌زمان کلیه متغیرهای حرکت پالس‌گونه و سیستم جداساز در محدوده‌های وسیع، تأثیر آن‌ها در پاسخ‌های دینامیکی دو تیپ مخزن جداسازی شده پهن و لاغر مورد بررسی قرار می‌گیرد و بر این اساس توصیه‌هایی برای انتخاب مناسب جداساز انجام می‌شود.

۲- پالس‌های معادل برای زلزله‌های حوزه نزدیک گسل

در این تحقیق، رابطه پالس معادل زلزله حوزه نزدیک گسل براساس تحقیقات Mavroeidis و Papageorgiou (۲۰۰۳) می‌باشد. آن‌ها برای بیان ریاضی تاریخچه زمانی پالس سرعت

بالا، بازگشت به مکان اولیه بعد از تغییرشکل و ویژگی‌های دوام و قابلیت بهره‌برداری بالا، به طور گسترده در انواع سازه‌ها استفاده شده است (Mokha و همکاران، ۱۹۹۱؛ Zayas و همکاران، ۱۹۹۰؛ Su و همکاران، ۱۹۸۹).

Abali و Uçkan (۲۰۱۰) به بررسی رفتار لرزه‌ای مخزن جداسازی شده با استفاده از جداساز آونگ اصطکاکی پرداختند. نتایج حاکی از آن بود که اثرات لنگر واژگونی بر روی نیروی قائم مؤثر بر جداساز به خصوص در مخزن لاغر تحت تحریکات حوزه نزدیک گسل، چشمگیر است. Saha و همکاران (۲۰۱۶) با تهیه منحنی‌های شکنندگی برای مخزن جداسازی شده و ثابت و مقایسه آن‌ها نتیجه گرفتند که جداسازی پایه می‌تواند احتمال خرابی مخزن را به شدت کاهش دهد. البته آن‌ها تأثیر نحوه انتخاب مشخصات جداساز پایه (که از نوع لاستیکی با هسته سربی بود) را در نتایج حاصل، بسیار زیاد گزارش نمودند. تحلیل اجزای محدود سه‌بعدی مدل مخزن جداسازی شده حاوی سیال در دو حالت دیواره صلب و انعطاف‌پذیر توسط Rawat و همکاران (۲۰۱۹) نیز نشانگر تأثیر مثبت جداسازی بر پاسخ‌های لرزه‌ای حاصل است.

زلزله‌های حوزه نزدیک گسل که اکثر آن‌ها دارای ویژگی پالس شدید سرعت‌اند، مخرب‌تر از آنچه مشخصه حداکثر شتاب زمین آن‌ها نشان می‌دهد، هستند (Makris و Chang، ۱۹۹۸؛ Loh، ۱۹۹۹). عامل اصلی این ویژگی جنبش زمین، راستاداری روبه‌جلو است که معمولاً ناشی از مؤلفه عمود بر گسل می‌باشد (Malhotra، ۱۹۹۹). با توجه به ویژگی ذکر شده و شباهت پاسخ سازه‌ها تحت رکوردهای حوزه نزدیک گسل و تحریکات پالس‌دار (Alavi و Krawinkler، ۲۰۰۰ و ۲۰۰۴)، محققین بسیاری مدل‌های ریاضی پالس معادل که حاوی مشخصات برجسته زمین‌لرزه‌های حوزه نزدیک هستند را ارائه داده‌اند (Hall و همکاران، ۱۹۹۵؛ Makris، ۱۹۹۷؛ Chang و Makris، ۲۰۰۰؛ Fu و Menun، ۲۰۰۲؛ Mavroeidis و Papageorgiou، ۲۰۰۳؛ He و Agrawal، ۲۰۰۸). به لحاظ اهمیت و آثار مخرب زلزله‌های حوزه نزدیک گسل، تحقیقات متعددی در مورد رفتار انواع سازه‌ها از جمله مخزن ذخیره مایعات تحت تحریک زلزله‌های حوزه نزدیک گسل وجود دارد. Bagheri و همکاران (۲۰۰۵) با استفاده از مدل‌سازی و تحلیل اجزاء محدود مخزن ذخیره سیالات تحت زلزله‌های واقعی نزدیک گسل نتیجه گرفتند که این‌گونه زلزله‌ها با داشتن محتوای پیرو بلند می‌توانند حرکت سطح آزاد سیال را که دارای پیرو بلند است، به شدت تحت تأثیر قرار دهند. اخیراً نیز تحلیل هیدرودینامیکی سیال درون مخزن ثابت تحت زلزله‌های نزدیک گسل توسط Kalogerakou و همکاران (۲۰۱۷)، مؤید نتیجه بالا می‌باشد؛ ضمن این‌که دقت قابل قبول توابع تحلیلی پالس سرعت

زمانی پالس سرعت و شتاب را به صورت روابط (۱) و (۲) ارائه دادند.

$$v(t) = \begin{cases} \frac{A}{2} \left[1 + \cos\left(\frac{2\pi f_p}{\gamma}(t - t_0)\right) \right] \cos[2\pi f_p(t - t_0) + \nu], & t_0 - \frac{\gamma}{2f_p} \leq t \leq t_0 + \frac{\gamma}{2f_p} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

$$a(t) = \begin{cases} -\frac{A\pi f_p}{\gamma} \left[\sin\left(\frac{2\pi f_p}{\gamma}(t - t_0)\right) \cos[2\pi f_p(t - t_0) + \nu] + \gamma \sin[2\pi f_p(t - t_0) + \nu] \left[1 + \cos\left(\frac{2\pi f_p}{\gamma}(t - t_0)\right) \right] \right], & t_0 - \frac{\gamma}{2f_p} \leq t \leq t_0 + \frac{\gamma}{2f_p} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

سپس Haroun و Housner (۱۹۸۱) مدل دو جرمی معادل Housner را با اضافه کردن انعطاف‌پذیری به دیواره مخزن اصلاح کردند. در ادامه، Malhotra و همکاران (۲۰۰۰) با ترکیب مودهای بالاتر ضربانی و نوسانی با مود اول ضربانی و نوسانی، مدل مکانیکی ساده و قابل قبولی برای تحلیل لرزه‌ای مخازن انعطاف‌پذیر ارائه نمودند. در این تحقیق نیز از مدل مکانیکی Malhotra و همکاران (۲۰۰۰) با اضافه کردن سیستم جداساز استفاده می‌شود. یادآور می‌شود چنین مدل‌های مکانیکی معادل مخازن بر مبنای دو مود اصلی نوسانی و ضربانی، همواره مورد استفاده آیین‌نامه‌های طراحی لرزه‌ای مخازن زمینی نظیر API-650 (۲۰۱۳) بوده است که نشانگر دقت قابل قبول آن‌هاست.

شکل (۲)، مدل ریاضی مخزن دارای جداساز را نشان می‌دهد. در این مدل، جرم‌های ضربانی و نوسانی (m_i و m_c) به ترتیب با فنرهایی به سختی k_i و k_c و ضرایب میرایی C_i و C_c مقید شده‌اند. همچنین یک درجه آزادی افقی اضافی در کف مخزن متناظر با سیستم جداساز به مدل Malhotra اضافه می‌شود. مشخصات هندسی مخزن عبارت‌اند از: ارتفاع مایع مخزن (H)، شعاع مخزن (R) و ضخامت جداره مخزن به صورت معادل یکنواخت (t). زمان تناوب طبیعی نوسانی (T_c) و ضربانی (T_i) از روابط (۳) و (۴) محاسبه می‌شوند (Malhotra و همکاران، ۲۰۰۰).

$$T_c = C_c \sqrt{R} \quad (3)$$

$$T_i = C_i \frac{H\sqrt{\rho}}{\sqrt{t/R} \times \sqrt{E}} \quad (4)$$

که چگالی جرمی مایع درون مخزن و E مدول الاستیسیته مصالح جداره مخزن است. ضرایب C_c و C_i و جرم‌های نسبی نوسانی و ضربانی (m_i/m و m_c/m) و همچنین ارتفاع نسبی آن‌ها (h_c/H) و (h_i/H) از مرجع Malhotra و همکاران (۲۰۰۰) به صورت تابعی از نسبت ابعادی مخزن یعنی H/R به دست می‌آیند. m کل جرم مایع درون مخزن و برابر $\pi R^2 H \rho$ است.

موجک Gabor اصلاح‌شده استفاده کردند. آن‌ها در حالت اصلاح‌شده، تابع گوسی موجک Gabor را با یک تابع متقارن زنگوله‌ای شکل دیگر که بیان تحلیلی ساده‌تر دارد، جایگزین کرده و تاریخچه

در روابط فوق A نشان دهنده بزرگی پالس (کنترل کننده دامنه پالس)، f_p فرکانس غالب (برابر با عکس زمان تناوب پالس: T_p)، ν فاز پالس ($\nu = 0$) توصیف کننده پالس متقارن و $\pm \pi/2$ توصیف کننده پالس پادمقارن)، γ متغیری که مشخصه نوسانی سیگنال (تعداد پالس) را تعریف می‌کند و t_0 زمان اوج پالس می‌باشد. محدوده پیشنهادی Mavroeidis و همکاران (۲۰۰۴) برای A از 70 cm/s تا 130 cm/s (برای زلزله حوزه نزدیک به فاصله 7 کیلومتر از گسل 100 cm/s توصیه شده است) و برای زمان تناوب پالس (T_p) بین 1 ثانیه تا 8 ثانیه می‌باشد. همچنین Bozorgnia و Bertero (۲۰۰۴) دوره تناوب پالس مشهود سرعت را در اکثر زلزله‌های نزدیک گسل در حدود 0.5 تا 5 ثانیه و در مواردی حتی بیشتر گزارش کرده‌اند. شکل (۱) تاریخچه زمانی سرعت و شتاب را در حالت پالس متقارن ($\nu = 0$) بر اساس متغیرهای $A=100 \text{ cm/s}$ ، $T_p=1\text{s}$ و $t_0=2/5\text{s}$ نشان می‌دهد.

۳- مدل مکانیکی سیستم مخزن-سیال

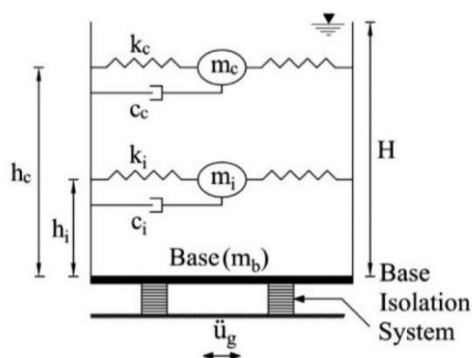
مدل‌سازی و تحلیل اجزای محدود سه‌بعدی مخازن جداسازی شده به دلیل وجود اندرکنش سیال-سازه دارای پیچیدگی محاسباتی و معمولاً زمان‌بر است. به همین علت مدل‌های مکانیکی ساده‌شده مختلفی برای تحلیل دینامیکی مخازن ذخیره مایعات ارائه شده است. در این‌گونه مدل‌های مکانیکی، رفتار هیدرودینامیکی درون مخزن به دو مؤلفه مجزا تقسیم می‌شود:

- ۱- مؤلفه ضربانی ناشی از حرکت هماهنگ سیال زیرین مخزن با جداره آن که دوره تناوب آن نسبتاً کوتاه است.
 - ۲- مؤلفه نوسانی در اثر نوسانات سیال در مجاورت سطح آزاد آن با دوره تناوب بسیار بالاتر از دوره تناوب مود ضربانی.
- یکی از اولین مدل‌های مکانیکی ساده‌شده با فرض صلبیت دیواره مخزن و سیال نامتراکم، مدل Housner (۱۹۶۳) است.

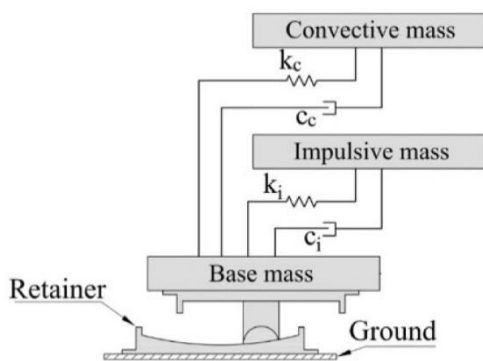
$$k_c = m_c \times \frac{4\pi^2}{T_c^2} \quad , \quad k_i = m_i \times \frac{4\pi^2}{T_i^2} \quad (۵)$$

$$c_c = 2\xi_c m_c \times \frac{2\pi}{T_c} \quad , \quad c_i = 2\xi_i m_i \times \frac{2\pi}{T_i} \quad (۶)$$

ξ_c و ξ_i به ترتیب نسبت‌های میرایی در موده‌های نوسانی و ضربانی است که برای مخازن فولادی روزمینی معمول به ترتیب برابر با نیم و دو درصد توصیه شده است (Malhotra، ۱۹۹۷؛ Haroun و Housner، ۱۹۸۱؛ Malhotra و همکاران، ۲۰۰۰).



شکل ۲- مدل ریاضی مخزن جداسازی شده مورد استفاده در این تحقیق



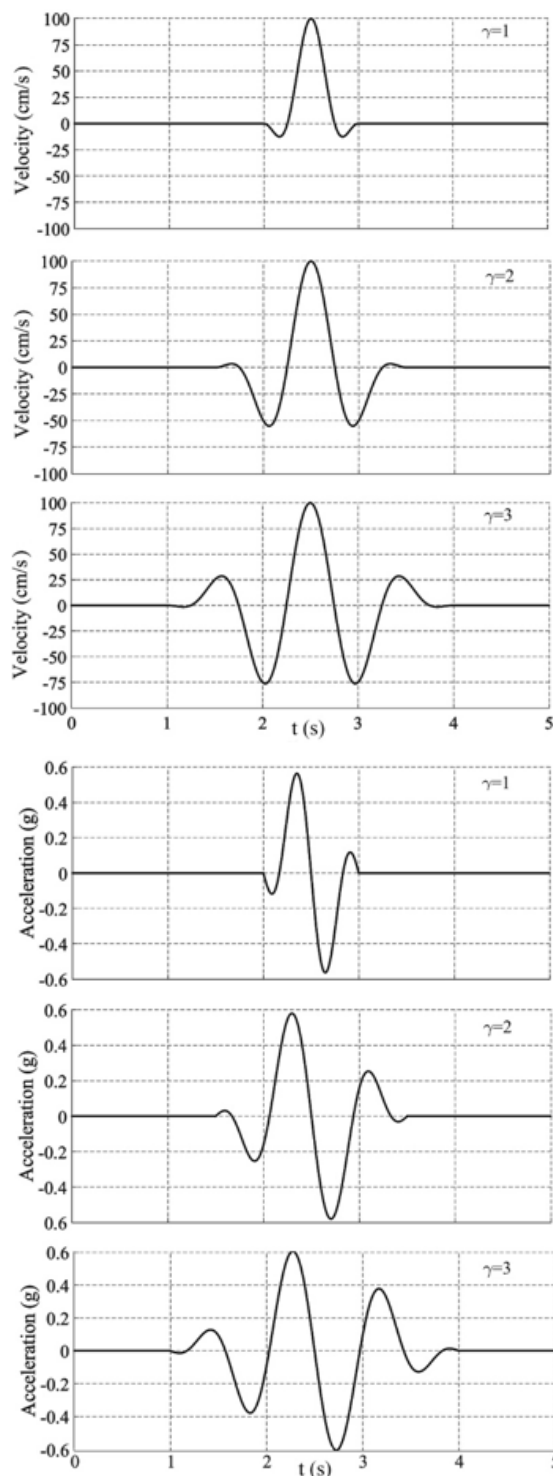
شکل ۳- سیستم سه درجه آزاد مخزن جداسازی شده

۴- معادلات حرکت مخزن جداسازی شده با سیستم آونگ اصطکاکی (FPS)

شکل (۳) سیستم سه درجه آزاد مخزن جداسازی شده را نشان می‌دهد. معادلات حرکت این سیستم را به صورت زیر می‌توان نوشت:

$$m_c \ddot{u}_c + c_c(\dot{u}_c - \dot{u}_b) + k_c(u_c - u_b) = -m_c \ddot{u}_g \quad (۷)$$

$$m_i \ddot{u}_i + c_i(\dot{u}_i - \dot{u}_b) + k_i(u_i - u_b) = -m_i \ddot{u}_g \quad (۸)$$



شکل ۱- تاریخچه زمانی سرعت و شتاب پالس با متغیرهای

$$t_0=2/5 \text{ s} \text{ و } A=100 \text{ cm/s} \text{، } \nu=0 \text{، } T_p=1 \text{ s}$$

با معلوم بودن زمان تناوب‌های نوسانی و ضربانی و جرم‌های مربوطه، سختی و ضرایب میرایی جرم‌های نوسانی و ضربانی مطابق روابط (۵) و (۶) محاسبه می‌شوند.

(Fenz و Constantinou، ۲۰۰۸). همچنین η و β ، γ ، A متغیرهای بدون بعدی هستند که شکل حلقه‌های هیستریسیس را کنترل می‌کنند و معمولاً $\eta=2$ ، $\beta=\gamma=0.5$ و $A=1$ در نظر گرفته می‌شوند (Fenz و Constantinou، ۲۰۰۸)

با تبدیل هر معادله دیفرانسیل مرتبه ۲ حرکت به دو معادله دیفرانسیل مرتبه ۱ (فضای حالت)، معادلات استخراج شده توسط نرم‌افزار MATLAB مطابق جزئیات توصیف شده در مرجع (Farajian و Bagheri، ۲۰۱۸) حل می‌شود. صحت‌سنجی کدهای تهیه شده با مقایسه نتایج حاصل از آن‌ها با آنچه از نرم‌افزار تخصصی 3D-Basis-Me به دست آمده، قبلاً انجام گرفته و در مرجع مذکور آمده است. پاسخ‌های لرزه‌ای در نظر گرفته شده، جابه‌جایی نسبی جداساز نسبت به زمین (u_b)، لنگر واژگونی (M) طبق رابطه (۱۴) و جابه‌جایی قائم سطح آزاد سیال (dx) طبق رابطه (۱۵) بر اساس تعریف Malhotra (۱۹۹۷) است.

$$M = -\{m_c h_c (\ddot{u}_c + \ddot{u}_g) + m_i h_i (\ddot{u}_i + \ddot{u}_g)\} \quad (14)$$

$$dx = 0.837 R \frac{4\pi^2(u_c - u_b)}{g T_c^2} \quad (15)$$

۵- خصوصیات مخازن مورد مطالعه

دو نمونه مخزن با نسبت‌های ابعادی H/R ۰/۶ و ۱/۸۵ که به ترتیب مخازن پهن و لاغر نامیده می‌شوند و توسط تعدادی از محققین قبلی نیز استفاده شده‌اند (به‌عنوان نمونه: Malhotra، ۱۹۹۷؛ Shrimali و Jangid، ۲۰۰۴؛ Saha و همکاران، ۲۰۱۶؛ Rawat و همکاران، ۲۰۱۹)، برای مطالعات عددی انتخاب شده‌اند. فرض شده است که مخازن با آب پر شده‌اند. مشخصات مخازن در نظر گرفته شده و پارامترهای سیستم مکانیکی معادل به ترتیب در جداول (۱) و (۲) خلاصه شده است.

جدول ۱- مشخصات مخازن پهن و لاغر

نوع مخزن	H (m)	R (m)	H/R	t (m)	E (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 سیستم مکانیکی معادل برای مخازن پهن و لاغر

نوع مخزن	m_c/m	m_i/m	h_c/H	h_i/H	C_c (s/m ^{0.5})	C_i	T_c (s)	T_i (s)
پهن	۰/۶۰۸	۰/۳۹۲	۰/۵۵۷	۰/۴۰۰	۱/۶۵	۷/۰۸	۸/۱۵	۰/۲۵۳
لاغر	۰/۲۴۵	۰/۷۵۵	۰/۷۲۷	۰/۴۴۴	۱/۴۸	۶/۰۷	۳/۶۶	۰/۱۵۷

$$m_b \ddot{u}_b - k_c(u_c - u_b) - k_i(u_i - u_b) -$$

$$c_c(\dot{u}_c - \dot{u}_b) - c_i(\dot{u}_i - \dot{u}_b) + F = -m_b \ddot{u}_g \quad (9)$$

لازم به توضیح است که u_b و u_c ، u_i جابه‌جایی‌های نسبی نسبت به زمین برای جرم ضربانی، جرم نوسانی و جرم پایه است. \ddot{u}_g شتاب زمین، F نیروی مقاوم جداساز و m_b جرم پایه می‌باشد. جرم کل سازه (M) که عامل ایجاد بار قائم وارد بر جداساز ($W=Mg$) است، از جمع جرم کل روسازه و دال پایه به دست می‌آید، یعنی: $M=m_c+m_i+m_b$. زمان تناوب جداساز T_b و نیروی مقاوم F ، FPS از روابط (۱۰) و (۱۱) محاسبه می‌شوند:

$$T_b = 2\pi \sqrt{\frac{R_b}{g}} \quad (10)$$

$$F = \frac{W}{R_b} u_b + \mu W \operatorname{sgn}(\dot{u}_b) \quad (11)$$

جمله اول در رابطه (۱۱) نیروی الاستیک خطی ناشی از سختی سیستم است که از سطح قوسی آن سرچشمه می‌گیرد و جمله دوم نیروی اصطکاک می‌باشد. R_b شعاع انحنای جداگر و μ ضریب اصطکاک وابسته به سرعت آن است که از رابطه (۱۲) محاسبه می‌شود. برای جلوگیری از مشکلات حل عددی مربوط به وجود تابع علامت (sgn) در معادلات، تابع هیستریسیس پیوسته بوک-ون^۲ (Z) که بین ۱ و -۱ تغییر می‌کند، طبق رابطه (۱۳) با تابع علامت جایگزین می‌شود (Fenz و Constantinou، ۲۰۰۸).

$$\mu = \mu_{max} - (\mu_{max} - \mu_{min}) \exp(-\alpha |\dot{u}_b|) \quad (12)$$

$$\frac{dZ}{dt} = \frac{1}{u_y} \{A - |Z|^\eta [\gamma \operatorname{sgn}(\dot{u}_b Z) + \beta]\} \dot{u}_b \quad (13)$$

در رابطه (۱۲)، \dot{u}_b سرعت لغزش، μ_{max} و μ_{min} ضرایب اصطکاک در سرعت‌های بالا و ناچیز (نزدیک صفر) و α پارامتری است که نرخ تغییرات بین μ_{max} و μ_{min} را کنترل می‌کند. مقدار α با توجه به مطالعات آزمایشگاهی Constantinou و Fenz (۲۰۰۸) برای مصالح مورد استفاده در FPS برابر ۱۰۰ s/m در نظر گرفته می‌شود. در رابطه (۱۳)، u_y جابه‌جایی تسلیم سطح لغزش است که در مدل ایده‌آل اصطکاک به سمت صفر میل می‌کند و در اینجا یک عدد بسیار کوچک (۰/۱ میلی‌متر) فرض می‌شود

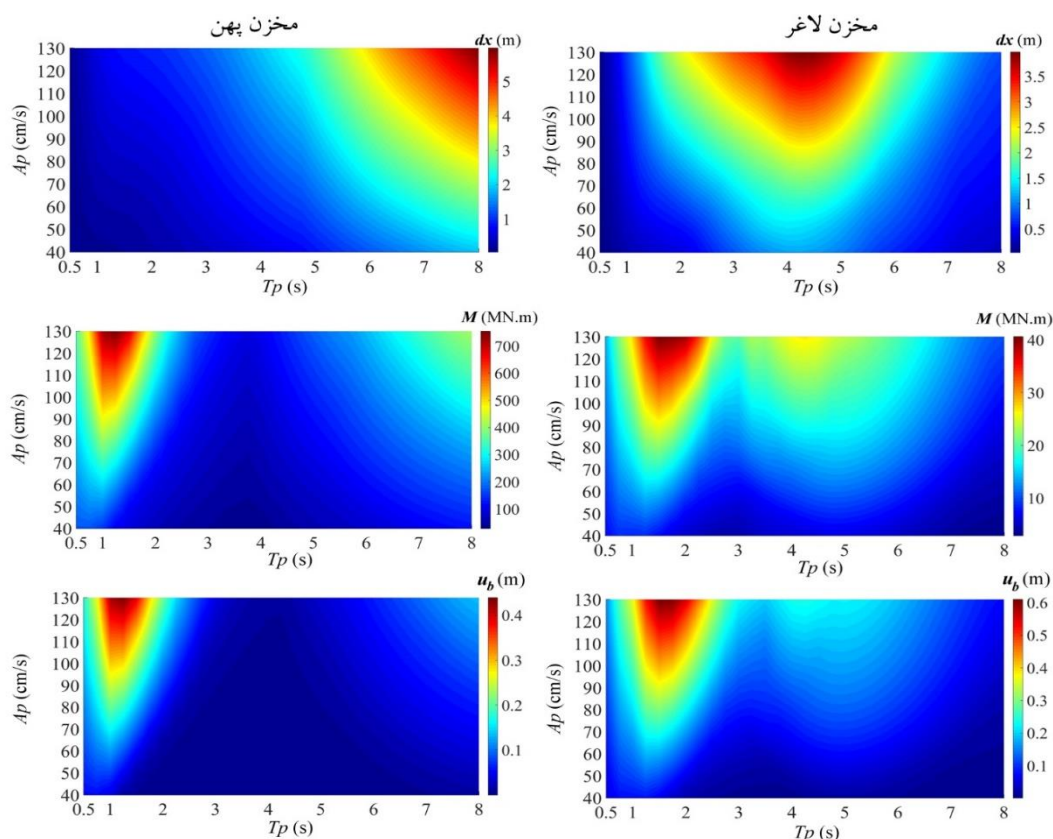
در شکل (۴) حداکثر نتایج تاریخچه زمانی پاسخ‌ها به صورت کنتورهایی بر حسب پریود پالس و دامنه پالس نشان داده شده است. در مخازن با پای ثابت، پاسخ لنگر واژگونی عمدتاً متأثر از مؤلفه ضربانی مخزن بوده و به دلیل کوتاه بودن پریود این مؤلفه، تشدید این پاسخ در پالس‌هایی با پریود نسبی کوتاه (پریود پالس کم‌تر از یک ثانیه) اتفاق می‌افتد؛ درحالی‌که به جهت متأثر بودن جابه‌جایی قائم سطح آزاد سیال از مشخصه مود نوسانی، تشدید این پاسخ تحت پالس‌هایی با پریود بالا اتفاق می‌افتد. با اضافه کردن جداساز با پریود توصیف‌شده در بالا، مشاهده می‌شود که جداسازی تأثیر چندانی در مود نوسانی ندارد و وضعیت برای پاسخ جابه‌جایی قائم سطح آزاد سیال کمابیش با حالت مخازن با پای ثابت یکسان است. برای پاسخ‌های جابه‌جایی جداساز و لنگر واژگونی در هر دو نوع مخزن چون پریود اصلی سیستم جداسازی در حدود همان پریود جداساز خواهد بود، در حوالی پریودهای پالس نزدیک به پریود جداساز تشدید رخ می‌دهد. همچنین تأثیر مود نوسانی در پاسخ‌های جابه‌جایی جداساز و لنگر واژگونی نیز با اندک افزایش این پاسخ‌ها در حوالی پریود نوسانی مشاهده می‌شود. در هر دو نوع مخزن با افزایش دامنه تحریک پالس گونه بر تمامی پاسخ‌های لرزه‌ای افزوده می‌شود.

جرم کف (m_b) برای مخزن پهن ۳۸۳ تن و برای مخزن لاغر، ۲۰ تن فرض شده است. در تمامی تحریکات ورودی فرض شده است که شکل پالس متقارن یعنی $\nu = 0$ می‌باشد.

۶- نتایج و بحث

۶-۱- بررسی تأثیر دامنه و پریود پالس

در این قسمت اثر دو متغیر دامنه و پریود پالس در انواع پاسخ‌های لرزه‌ای مخازن پهن و لاغر بررسی می‌شود. برای این منظور با توجه به توضیحات بخش ۲، بازه تغییرات دامنه پالس ورودی مابین $130-40$ cm/s با گام‌های 5 cm/s و پریود پالس ورودی، $8s-0.5s$ با گام‌های $0.5s$ در نظر گرفته شده است. همچنین فرض شده است که تعداد پالس دو ($\nu = 2$) می‌باشد. مشخصات جداسازی برای هر دو نوع مخزن عبارت است از پریود جداسازی برابر ۲ ثانیه و ضریب اصطکاک بیشینه و کمینه به ترتیب برابر 0.06 و 0.03 . مقدار عددی فرض شده برای پریود جداساز طوری است که در هر دو نوع مخزن پهن و لاغر به اندازه کافی از پریود ضربانی بزرگ‌تر بوده و به اندازه کافی از پریود نوسانی کوچک‌تر باشد.

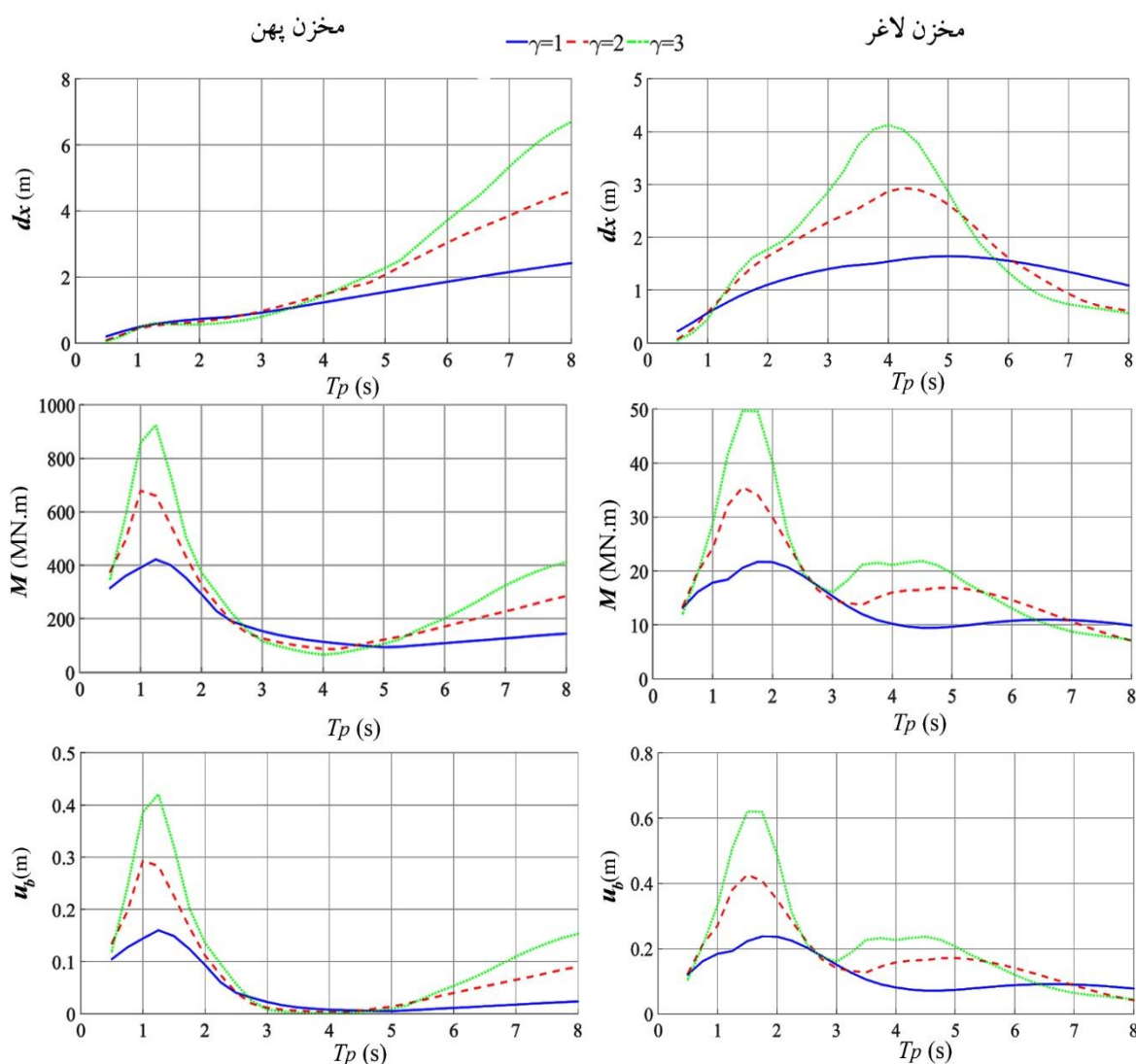


شکل ۴- تأثیر تغییرات دامنه و پریود تحریک پالس‌گونه بر پاسخ‌های جابه‌جایی قائم سطح آزاد سیال، لنگر واژگونی و جابه‌جایی نسبی جداساز در مخزن پهن و لاغر در حالت $\nu = 0$ و $\gamma = 2$

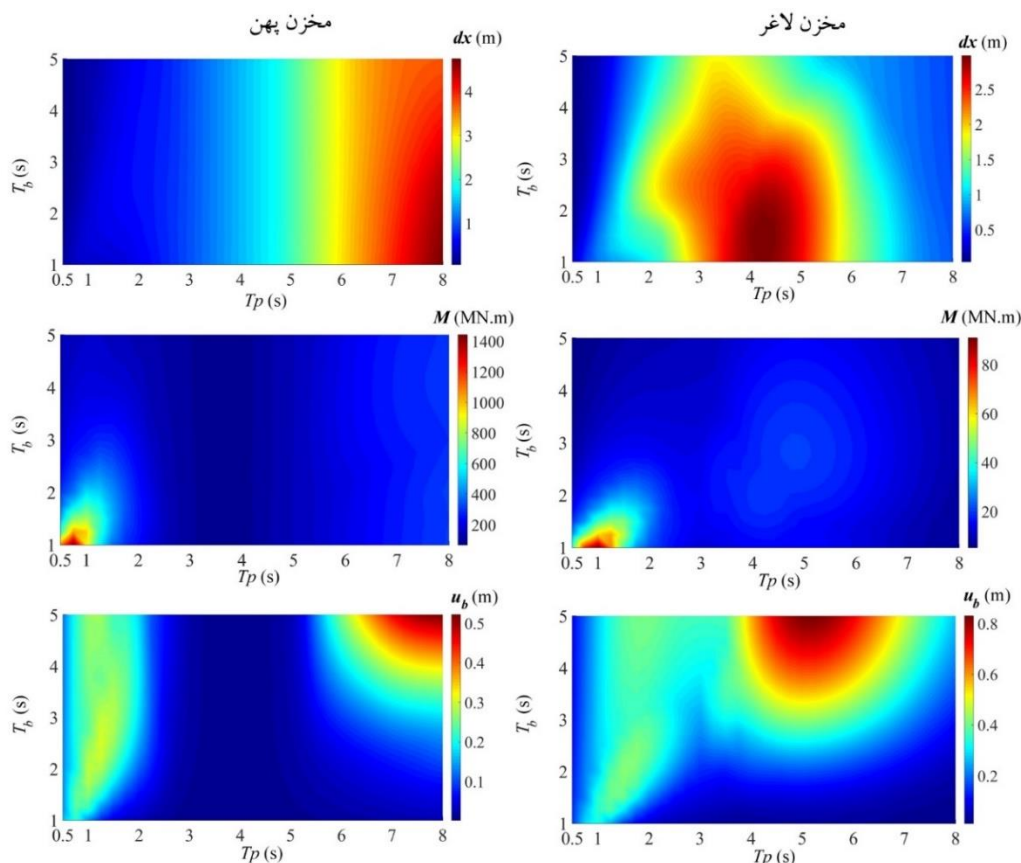
۲-۶- بررسی تأثیر تعداد پالس

برای بررسی اثر تعداد پالس، سه نوع تحریک پالس‌گونه با تعداد یک، دو و سه پالس فرض شده است. دامنه تغییرات پرپود پالس و مشخصات جداسازی مشابه زیربخش قبلی است. همچنین با توجه به توضیحات بخش ۲، مقدار دامنه پالس سرعت $A = 1 \text{ m/s}$ فرض شده است. حداکثر نتایج تاریخچه زمانی پاسخ‌ها در شکل (۵) قابل-مشاهده است. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که متغیر تعداد پالس یعنی γ در حوالی زمان تناوب مؤثر هر پاسخ، از متغیرهای بسیار تأثیرگذار است. در هر دو نوع مخزن پهن و لاغر،

در پرپوده‌های بالای پالس و نزدیک به زمان تناوب نوسانی (حدود ۸ ثانیه برای مخزن پهن و حدود ۴ ثانیه برای مخزن لاغر) با افزایش تعداد پالس، جابه‌جایی قائم سطح آزاد سیال افزایش می‌یابد. پاسخ‌های جابه‌جایی جداساز و لنگر واژگونی در پرپوده‌های پالس نزدیک به (اندکی کم‌تر از) پرپود جداساز با افزایش تعداد پالس، بیشتر می‌شود. همچنین افزایش این پاسخ‌ها را در حوالی پرپود پالس نزدیک به زمان تناوب نوسانی نیز شاهد هستیم. در هر دو نوع مخزن پهن و لاغر زمانی که پرپود پالس از پرپود غالب هر پاسخ دور شود، تعداد پالس ورودی تأثیر چندانی در پاسخ‌ها ندارد.



شکل ۵- تأثیر تغییرات تعداد و پرپود پالس ورودی بر پاسخ‌های جابه‌جایی قائم سطح آزاد سیال، لنگر واژگونی و جابه‌جایی نسبی جداساز در مخزن پهن و لاغر در حالت $A = 1 \text{ m/s}$ و $v = 0$



شکل ۶- تأثیر تغییرات پرپود جداساز و پرپود پالس ورودی بر پاسخ‌های جابه‌جایی قائم سطح آزاد سیال، لنگر واژگونی و جابه‌جایی

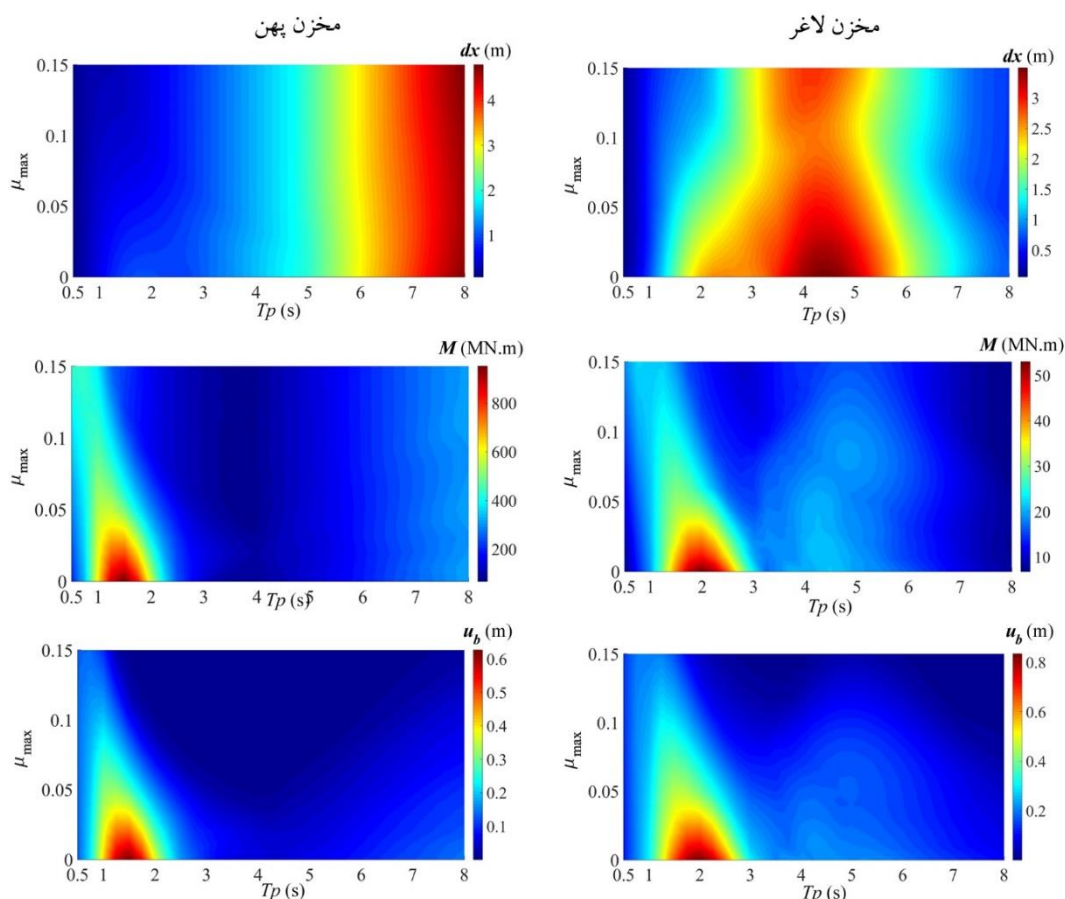
نسبی جداساز در مخزن پهن و لاغر در حالت $\nu = 0$ و $\gamma = 2$ و $A = 1 \text{ m/s}$

می‌شود و با افزایش پرپود جداسازی این پاسخ کاهش یافته و در ادامه مقدار تقریباً ثابتی خواهد داشت. بدیهی است در حالت کلی با افزایش پرپود جداسازی، سازه نرم‌تر می‌شود و نیروی کم‌تری به روسازه انتقال پیدا می‌کند، در حالی که جابه‌جایی جداساز افزایش می‌یابد. در مورد مخازن ذخیره مایعات که علاوه بر مودهای ضربانی با پرپود کوتاه، مودهای نوسانی با پرپود بسیار بلند نیز حضور دارند، تأثیر جداسازی پیچیده‌تر از سازه‌های معمول خواهد بود. جداسازهای معمول با داشتن پرپودهای بالاتر از پرپود مود ضربانی عمل شیف‌ت پرپود از پرپود ضربانی به پرپود مؤثر جداسازی را انجام داده و باعث کاهش پاسخ‌های متناظر با مود ضربانی می‌شوند ولی پاسخ‌های متناظر با مود نوسانی و پاسخ خود جداساز بستگی به مقدار نسبی پرپود جداساز در مقایسه با پرپود نوسانی خواهد داشت. به طوری که در شکل (۶) مشاهده می‌شود اگر پرپود جداساز به اندازه کافی از پرپود مود نوسانی کوچک باشد، تشدید جابه‌جایی جداساز در پرپود پالس ورودی حوالی (کمی کم‌تر از) پرپود جداساز رخ می‌دهد، در غیر این صورت، علاوه بر یک تشدید موضعی، تشدید اصلی در پرپود پالس ورودی حوالی پرپود نوسانی خواهد بود.

۳-۶- بررسی تأثیر پرپود جداساز

در این بخش اثر پرپود جداساز هم‌زمان با تغییر پرپود پالس بررسی می‌شود. برای این منظور دامنه تغییرات پرپود جداساز ۵-۱ با گام‌های ۰/۲۵s و دامنه تغییرات پرپود پالس سرعت ورودی مشابه بخش‌های قبلی ۸s-۰/۵ با گام‌های ۰/۲۵s فرض شده است. دامنه پالس سرعت ورودی $A=1 \text{ m/s}$ و تعداد پالس دو ($\gamma = 2$) فرض شده است. ضریب اصطکاک بیشینه و کمینه نیز همانند بخش‌های قبلی به ترتیب ۰/۰۶ و ۰/۰۳ در نظر گرفته شده است.

در شکل (۶) پاسخ‌های لرزه‌ای مخازن پهن و لاغر بر حسب متغیرهای ذکر شده در بالا نشان داده شده است. در این شکل مشاهده می‌شود که با تغییر پرپود جداساز در جابه‌جایی قائم سطح آزاد سیال تفاوت چشمگیری ایجاد نمی‌شود؛ مگر این که پرپود پالس ورودی در حوالی پرپود مود نوسانی باشد که در این صورت افزایش پرپود جداساز باعث کاهش این پاسخ می‌گردد. همچنین ملاحظه می‌شود که پاسخ لنگر واژگونی در هر دو نوع مخزن در حالتی که پرپود جداساز و پالس ورودی در حوالی هم باشند تشدید



شکل ۷- تأثیر تغییرات ضریب اصطکاک جداساز و پریود پالس ورودی بر پاسخ‌های جابه‌جایی قائم سطح آزاد سیال، لنگر واژگونی و جابه‌جایی نسبی جداساز در مخزن پهن و لاغر در حالت $\nu = 0$ ، $\gamma = 2$ و $A = 1 \text{ m/s}$

کمینه برابر با نصف مقادیر در نظر گرفته شده برای ضرایب اصطکاک بیشینه فرض شده است. پاسخ‌های لرزه‌ای مخازن پهن و لاغر بر حسب متغیرهای ذکر شده در بالا در شکل (۷) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که همانند تأثیر پریود جداسازی، جابه‌جایی قائم سطح آزاد سیال زمانی از ضریب اصطکاک متأثر می‌شود که پریود پالس ورودی در حوالی پریود نوسانی سیستم باشد؛ در غیر این صورت این پاسخ حساسیت چندانی به ضریب اصطکاک جداساز ندارد. همچنین در مورد لنگر واژگونی مخزن و جابه‌جایی جداساز نیز بدترین حالت زمانی است که جداساز بدون اصطکاک بوده و پریود پالس ورودی در حوالی پریود سیستم جداسازی باشد. در این حالت با افزایش ضریب اصطکاک جداساز این پاسخ‌ها کاهش می‌یابند. البته باید توجه نمود که در پالس‌های با پریود بسیار کم (که زلزله‌های معمول به این خصوصیت نزدیک‌ترند) با افزایش ضریب اصطکاک، لنگر واژگونی مخزن افزوده می‌شود.

بنابراین اگرچه افزایش پریود جداساز باعث کاهش پاسخ‌های سازه‌ای مخزن همانند لنگر واژگونی می‌شود ولی اگر این افزایش به حدی باشد که به حوالی پریود نوسانی مخزن برسد، می‌تواند باعث تشدید چشم‌گیر جابه‌جایی جداساز در تحریکات ورودی با پریود بسیار بلند (در حدود پریود مود نوسانی) گردد. البته در تحریکات زمین‌لرزه معمول و حتی نزدیک گسل، شانس وجود چنین محتوای فرکانسی با پریودهای بسیار بالا، کم است.

۴-۶- بررسی تأثیر ضریب اصطکاک جداساز

یکی دیگر از متغیرهای مهم و تأثیرگذار بر رفتار سیستم‌های جداسازی بر پایه اصطکاک، ضریب اصطکاک سطح لغزنده جداساز می‌باشد؛ لذا در این قسمت اثر ضریب اصطکاک جداساز هم‌زمان با تغییر پریود پالس بررسی می‌شود. فرضیات پالس ورودی مشابه زیربخش قبلی می‌باشد. مشخصات جداسازی عبارت است از پریود جداسازی برابر ۲ ثانیه و دامنه تغییرات ضریب اصطکاک بیشینه جداساز $0.01/15$ با گام‌های $0.01/1$. همچنین ضرایب اصطکاک

۷- نتیجه‌گیری

هدف از این تحقیق، تحلیل پارامتریک رفتار دینامیکی مخازن ذخیره مایعات جداسازی شدی با سیستم آونگ اصطکاکی (FPS) تحت تحریکات پالس‌گونه به عنوان جایگزین تحلیلی زمین‌لرزه‌های نزدیک گسل می‌باشد. برای این منظور ابتدا مخازن با مدل مکانیکی معادل شبیه‌سازی گردیده و معادلات حرکت مربوطه تحت پالس‌های تحلیلی ارائه شده برای زلزله‌های حوزه نزدیک گسل به صورت تاریخچه زمانی غیرخطی حل گردید. انواع پاسخ‌های دینامیکی مخازن شامل جابه‌جایی قائم سطح آزاد سیال، لنگر واژگونی و جابه‌جایی جداساز با نسبت‌های ابعادی مختلف تحت تأثیر متغیرهای مهم پالس‌های تحریک و سیستم جداساز شامل دامنه پالس، پریود پالس، تعداد پالس، پریود جداساز و ضریب اصطکاک جداساز ارزیابی شد.

نتایج حاصل به طور خلاصه نشان داد که در هر دو نوع مخزن پهن و لاغر با افزایش دامنه تحریک پالس‌گونه بر تمامی پاسخ‌های لرزه‌ای افزوده می‌شود. همچنین مشاهده شد که متغیر تعداد پالس فقط در حوالی زمان تناوب مؤثر هر پاسخ از متغیرهای بسیار تأثیرگذار است و در این صورت پاسخ‌های لرزه‌ای مخازن پهن و لاغر با افزایش تعداد پالس بیشتر می‌شود. پریود پالس تحریک نیز هر چقدر به مشخصه پریود نوسانی مخزن نزدیک‌تر شود، جابه‌جایی قائم سطح آزاد سیال را تشدید می‌کند و هر چقدر به پریود جداسازی و یا مقادیر کم‌تر از آن میل کند، لنگر واژگونی مخزن را تشدید خواهد نمود. جابه‌جایی جداساز نیز در هر دو محدوده ذکر شده برای پریود پالس تشدید می‌گردد. با توجه به نتایج حاصل، توصیه می‌شود پریود سیستم جداساز به اندازه کافی از پریود ضربانی مخزن بزرگ‌تر انتخاب شود تا کاهش مناسبی در پاسخ‌های سازه‌ای همانند لنگر واژگونی صورت پذیرد ولی فاصله مناسبی نیز تا پریود نوسانی مخزن داشته باشد تا تشدید جابه‌جایی خود سیستم جداساز اتفاق نیفتد. در مورد ضریب اصطکاک جداساز نیز از مقادیر بسیار کوچک پرهیز گردد.

۸- مراجع

- Abali E, Uçkan E, "Parametric analysis of liquid storage tanks base isolated by curved surface sliding bearings", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2010, 30 (1), 21-31.
- Alavi B, Krawinkler H, "Consideration of near-fault ground motion effects in seismic design", In *Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering*, New Zealand, 2000.
- Alavi B, Krawinkler H, "Behavior of moment-resisting frame structures subjected to near-fault ground motions", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2004, 33 (6), 687-706.
- American Petroleum Institute (API), "Welded tanks for oil storage", API standard 650, 12th edition, Washington DC, US, 2013.
- Bagheri S, Farajian M, "The effects of input earthquake characteristics on the nonlinear dynamic behavior of FPS isolated liquid storage tanks", *Journal of Vibration and Control*, 2018, 24 (7), 1264-1282.
- Bagheri S, Rofooei F, Bozorgnia Y, "Evaluation of the seismic response of liquid storage tanks", *Proceedings of the Tenth International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing*, Rome, Italy, 2005.
- Bozorgnia Y, Bertero VV, "Earthquake engineering: from engineering seismology to performance-based engineering", CRC press, 2004.
- Fenz DM, Constantinou MC, "Development, implementation and verification of dynamic analysis models for multi-spherical sliding bearings", State University of New York at Buffalo, 2008.
- Hall JF, Heaton TH, Halling MW, Wald DJ, "Near-source ground motion and its effects on flexible buildings", *Earthquake Spectra*, 1995, 11 (4), 569-605.
- Haroun MA, "Vibration studies and tests of liquid storage tanks", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 1983, 11 (2), 179-206.
- Haroun MA, Housner GW, "Seismic design of liquid storage tanks", *Journal of the Technical Councils of ASCE*, 1981, 107 (1), 191-207.
- He WL, Agrawal AK, "Analytical model of ground motion pulses for the design and assessment of seismic protective systems", *Journal of Structural Engineering*, 2008, 134 (7), 1177-1188.
- Housner GW, "The dynamic behavior of water tanks", *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1963, 53 (2), 381-387.
- Kalogerakou ME, Maniatakis CA, Spyarakos CC, Psarropoulos PN, "Seismic response of liquid-containing tanks with emphasis on the hydrodynamic response and near-fault phenomena", *Engineering Structures*, 2017, 153, 383-403.
- Loh CH, "Interpretation of structural damage in 921 Chi-Chi earthquake", *International Workshop on 921 Chi-Chi Earthquake Reconnaissance*, Taichung, Taiwan, 1999.
- Makris N, "Rigidity-plasticity-viscosity: Can electrorheological dampers protect base-isolated structures from near-source ground motions?", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1997, 26 (5), 571-592.
- Makris N, Chang SP, "Effect of damping mechanisms on the response of seismically isolated structures", Pacific Earthquake Engineering Research Center, US, 1998.
- Makris N, Chang SP, "Effect of viscous, viscoplastic and friction damping on the response of seismic isolated structures", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2000, 29 (1), 85-107.
- Malhotra PK, "New method for seismic isolation of liquid-storage tanks", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 1997, 26(8), 839-847.
- Malhotra PK, "Response of buildings to near-field pulse-like ground motions", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1999, 28 (11), 1309-1326.

- Malhotra PK, Wenk T, Wieland M, "Simple procedure for seismic analysis of liquid storage tanks", *Structural Engineering International*, 2000, 10 (3), 197-201.
- Mavroeidis GP, Dong G, Papageorgiou AS, "Near-fault ground motions, and the response of elastic and inelastic single-degree-of-freedom (SDOF) systems", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2004, 33 (9), 1023-1049.
- Mavroeidis GP, Papageorgiou AS, "A mathematical representation of near-fault ground motions", *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2003, 93 (3), 1099-1131.
- Menun C, Fu Q, "An analytical model for near-fault ground motions and the response of SDOF systems", *Proceedings, 7th US National Conference on Earthquake Engineering*, Massachusetts, Boston, 2002.
- Mokha A, Constantinou MC, Reinhorn AM, Zayas VA, "Experimental study of friction-pendulum isolation system", *Journal of Structural Engineering*, 1991, 117 (4), 1201-1217.
- Rammerstorfer FG, Scharf K, Fischer FD, "Storage tanks under earthquake loading", *Applied Mechanics Reviews*, 1990, 43 (11), 261-283.
- Rawat A, Matsagar VA, Nagpal AK, "Numerical study of base-isolated cylindrical liquid storage tanks using coupled acoustic-structural approach", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2019, 119, 196-219.
- Saha SK, Matsagar VA, Jain AK, "Seismic fragility of base-isolated water storage tanks under non-stationary earthquakes", *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2016, 14 (4), 1153-1175.
- Shekari MR, Khaji N, Ahmadi MT, "On the seismic behavior of cylindrical base-isolated liquid storage tanks excited by long-period ground motions", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2010, 30 (10), 968-980.
- Shrimali MK, Jangid RS, "A comparative study of performance of various isolation systems for liquid storage tanks", *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 2002, 2 (4), 573-591.
- Shrimali MK, Jangid RS, "Seismic analysis of base-isolated liquid storage tanks", *Journal of Sound and Vibration*, 2004, 275 (1-2), 59-75.
- Su L, Ahmadi G, Tadjbakhsh IG, "Comparative study of base isolation systems", *Journal of Engineering Mechanics*, 1989, 115 (9), 1976-1992.
- Zama S, Nishi H, Hatayama K, Yamada M, Yoshihara H, Ogawa Y, "On damage of oil storage tanks due to the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake (Mw 9.0), Japan", *15th World Conference on Earthquake Engineering*, Lisboa, Portugal, 2012.
- Zayas VA, Low SS, Mahin SA, "A simple pendulum technique for achieving seismic isolation", *Earthquake Spectra*, 1990, 6 (2), 317-333.

EXTENDED ABSTRACT

Dynamic Behavior Evaluation of FPS Isolated Liquid Storage Tanks Subjected to Pulse- like Excitations

Hossein Hayati Raad, Saman Bagheri *

Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz 5166616471, Iran

Received: 29 November 2017; Accepted: 04 November 2019

Keywords:

Liquid storage tanks, Base isolation, Friction pendulum system, Near-fault earthquake, Pulse-like excitation.

1. Introduction

On-grade liquid storage tanks are vulnerable to strong ground motions, as some recent major earthquakes have demonstrated. Seismic base isolation is one of the most efficient techniques to mitigate earthquake damage in these structures. Among the various base isolation devices, the Friction Pendulum System (FPS) provides several benefits: the independence of isolation period from superstructure mass/weight which can be varied in some structures such as liquid storage tanks, re- centering related to the spherical surface, and high energy dissipation based on velocity-dependent friction (Mokha et al., 1991; Zayas et al., 1990). Although the base isolation has been known as an efficient technique to protect civil structures, the performance of base-isolated structures under near-fault ground motions containing long- period pulses has been questioned in recent years. In this paper, a parametric study is carried out to investigate the seismic behavior of FPS isolated liquid storage tanks under near- fault ground motions represented by analytical pulse-like functions. For this purpose, the liquid storage tanks are modeled using equivalent mechanical models and then dynamic analyses of the models are done using pulse-like excitations. The effects of the tank type, isolator specifications and the input excitation characteristics on the various response parameters are investigated.

2. Methodology

2.1. Simplified representation of pulse-type excitations

In this study, a mathematical representation of the near-fault ground velocity pulses proposed by Mavroeidis and Papageorgiou (2003) is used for nonlinear dynamic analyses. It is based on a modified Gabor wavelet transform and is expressed as:

$$v(t) = \begin{cases} \frac{A}{2} \left[1 + \cos\left(\frac{2\pi f_p}{\gamma}(t - t_0)\right) \right] \cos[2\pi f_p(t - t_0) + \nu], & t_0 - \frac{\gamma}{2f_p} \leq t \leq t_0 + \frac{\gamma}{2f_p} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

where parameter A controls the amplitude of the signal, f_p is the prevailing frequency of the signal, ν is the phase of the signal, γ is a parameter that defines the oscillatory character of the signal, and t_0 specifies the epoch of the envelope's peak.

2.2. Simplified model of isolated tanks

The mathematical model of the isolated tank used in the present study is the simple, yet accurate, and more generally applicable equivalent mechanical model of the tank- liquid system proposed by Malhotra et al. (2000)

* Corresponding Author

E-mail addresses: hossein.raad.hayati@gmail.com (Hossein Hayati Raad), s_bagheri@tabrizu.ac.ir (Saman Bagheri).

which is resting on a base isolation system. Two cylindrical steel tanks with different aspect ratios, one broad and one slender, have been used for numerical studies. Nonlinear dynamic analyses of the models are done by solving the governing equations of motion with a provided MATLAB routine. The numerical results are presented in terms of the overturning moment (M), vertical displacement of the liquid surface due to the sloshing motion (dx), and the bearing displacement (u_b).

3. Results and conclusions

The obtained results indicate that by increasing the number of input pulses in both broad and slender tanks, the response parameters increase considerably when the pulse period is near to the effective periods of each response. It is also seen that when the input pulse period is near the convective (sloshing) period, the vertical sloshing displacement of the liquid near the free surface is affected more and when it tends to the isolation period or even less, the overturning moment are affected more (Fig. 1). The isolation displacement is affected in both aforementioned ranges of the pulse period. Therefore, it is recommended that the isolation period is chosen enough longer than the impulsive period yet not close to the convective period. It will lead to a considerable reduction in the overturning moment response of the tank due to the isolation while the bearing displacement is controlled in a reasonable range. It is also recommended to avoid very small values of friction coefficient.

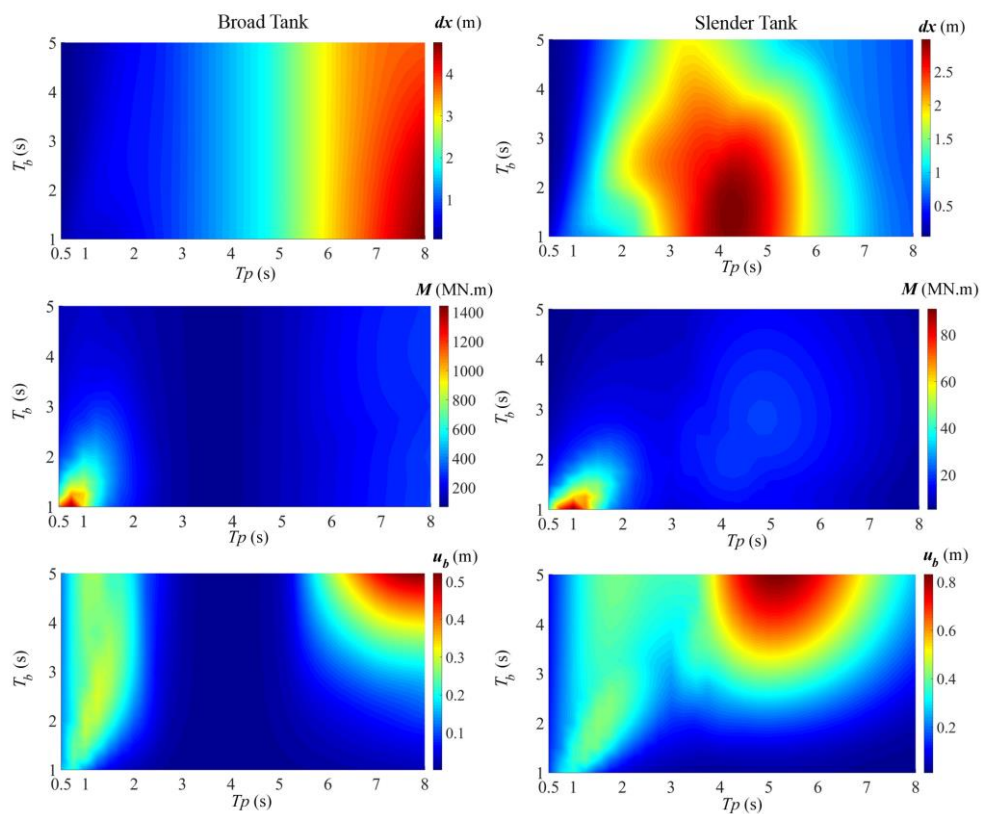


Fig. 1. Variation of selected response parameters with isolation period and input pulse period

4. References

- Malhotra PK, Wenk T, Wieland M, "Simple procedure for seismic analysis of liquid storage tanks", Structural Engineering International, 2000, 10 (3), 197-201.
- Mavroeidis GP, Papageorgiou AS, "A mathematical representation of near-fault ground motions", Bulletin of the Seismological Society of America, 2003, 93 (3), 1099-1131.
- Mokha A, Constantinou MC, Reinhorn AM, Zayas VA, "Experimental study of friction-pendulum isolation system", Journal of Structural Engineering, 1991, 117 (4), 1201-1217.
- Zayas VA, Low SS, Mahin SA, "A simple pendulum technique for achieving seismic isolation", Earthquake Spectra, 1990, 6 (2), 317-333.