

مطالعه پارامتریک رفتار دینامیکی مخازن ذخیره مایعات تحت تحریکات پالس گونه

سامان باقری^{۱*}، حسین حیاتی راد^۲

۱-دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۲- کارشناس ارشد مهندسی سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

چکیده

مخازن ذخیره سیالات به طور گسترده برای ذخیره مایعات مختلف همانند فرآورده‌های نفتی در صنایع استفاده می‌شوند و صدمه دیدن آنها پیامدهای خطرناکی را به همراه خواهد داشت. زلزله‌های حوزه نزدیک گسل با دارا بودن پالس‌های شدید سرعت، پتانسیل آسیب زدن به چنین سازه‌هایی را دارند. این نوع تحریکات زمین می‌توانند به صورت توابع تحلیلی پالس‌گونه ارائه شوند. در این تحقیق رفتار لرزه‌ای مخازن ذخیره سیالات تحت چنین تحریکات پالس‌گونه بصورت پارامتریک بررسی می‌شود. برای این منظور ابتدا مخازن با مدل‌های مکانیکی معادل شبیه‌سازی شده و سپس آنالیز دینامیکی آنها تحت این نوع تحریکات انجام می‌شود. مدل تحلیلی پالس انتخاب شده بر پایه توابع موجک بوده که دارای چهار ویژگی دامنه، پیرو، شکل و تعداد پالس است. تاثیر هر یک از این متغیرها در انواع پاسخ‌های دینامیکی و نیز تاثیر نسبت ابعادی مخزن ارزیابی می‌شود. نتایج حاصله بیانگر این است که پالس‌هایی با پیرو بلند با توجه به بالا بودن زمان تناوب مود نوسانی، جابجایی قائم سطح آزاد سیال و پالس‌هایی با پیرو کوتاه به لحاظ پایین بودن زمان تناوب ضربانی، برش پایه و ممان واژگونی را تحت تاثیر و تشدید قرار می‌دهند. همچنین با افزایش تعداد پالس، پاسخ‌ها در حوالی پیرو پالس نزدیک به زمان تناوب نوسانی افزایش چشمگیری می‌یابند. این در حالی است که شکل پالس از نظر متقارن یا یاد متقارن بودن تاثیر محسوسی بر نتایج حاصل ندارد.

کلمات کلیدی: مخازن ذخیره مایعات، زلزله حوزه نزدیک گسل، تحریک پالس گونه، اندرکنش سازه و سیال، پاسخ لرزه‌ای

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
10.22065/JSCE.2018.95816.1297		دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ
doi:	10.22065/JSCE.2018.95816.1297	۱۳۹۶/۰۵/۲۸	۱۳۹۶/۱۰/۱۷	۱۳۹۶/۱۱/۰۷	۱۳۹۶/۱۱/۰۷	۱۳۹۸/۰۶/۰۱
		*نویسنده مسئول: سامان باقری				
		پست الکترونیکی: s_bagheri@tabrizu.ac.ir				

Parametric Study on Dynamic Behavior of Liquid Storage Tanks Subjected to Pulse-Like Excitations

Saman Bagheri ^{1*}, Hossein Hayati Raad ²

1- Associate professor, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

2- M.Sc. in Structural Engineering, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

ABSTRACT

Liquid storage tanks are widely used to store different types of liquids such as petroleum products. Any failure of these structures may cause serious consequences. Near-fault ground motions which may have severe velocity pulses have a destructive potential on these facilities and can be represented by analytical pulse-like functions. In this paper, a parametric study is carried out to investigate the seismic behavior of liquid storage tanks under pulse-like excitations. 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 selected analytical pulse-like excitation is based on the modified Gabor Wavelet transform with four main characteristics: amplitude of the signal, period of the signal, shape (phase) of the signal, and the number of pulses. The effect of each pulse parameter as well as the effect of tank aspect ratio on the various response parameters is investigated. The obtained results indicate that the sloshing motion of the liquid near the free surface is affected more by equivalent pulses with long periods while the base shear and overturning moment are affected more by equivalent pulses with short periods. It is also seen that by increasing the number of pulses, the response parameters increase considerably when the pulse period is near the natural period of the convective mode. However, changing the phase of input signals in order to produce symmetric or anti-symmetric pulses has not any noticeable effect on the obtained results.

ARTICLE INFO

Received: 19/08/2017

Revised: 07/01/2018

Accepted: 27/01/2018

Keywords:

Liquid storage tanks,
Near-fault earthquake,
Pulse-like excitation,
Structure-fluid interaction,
Seismic response.

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2018.95816.1297

*Corresponding author: Saman Bagheri

Email address: s_bagheri@tabrizu.ac.ir

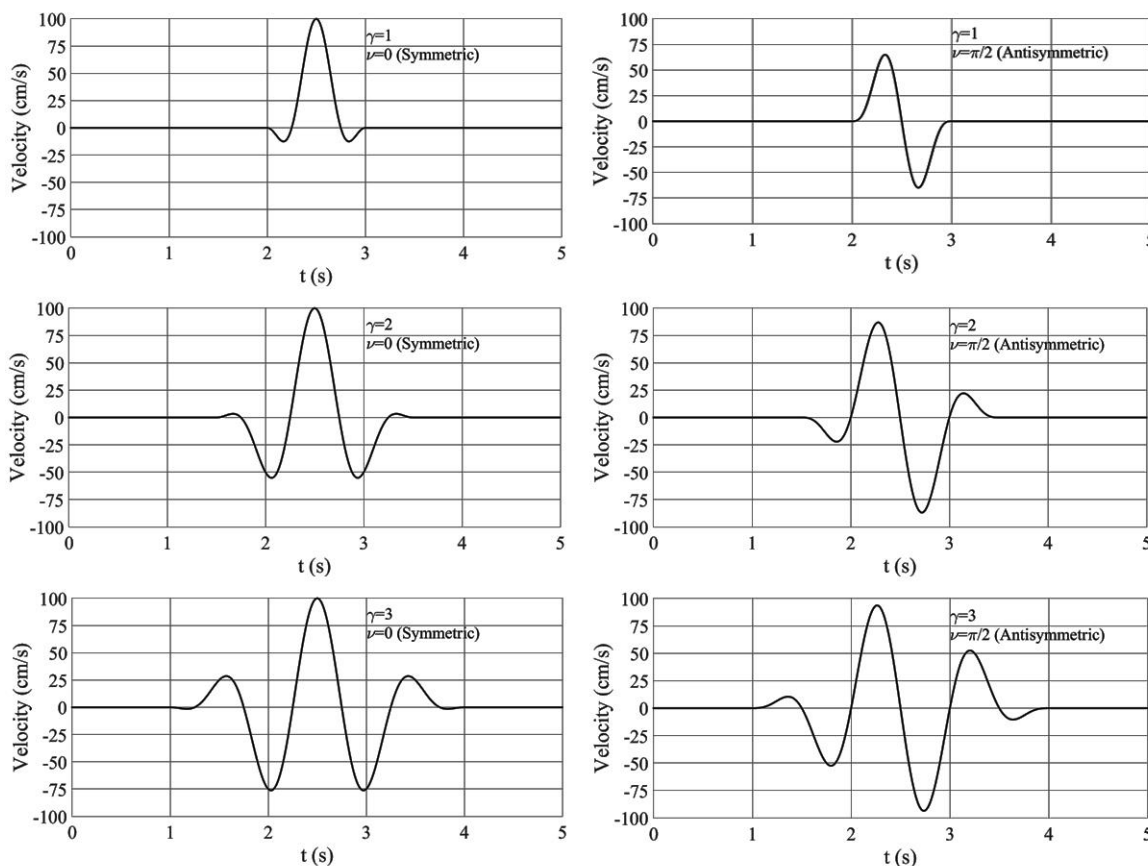
۱- مقدمه

مخازن ذخیره سیالات که به طور گسترده در صنایع مختلف به کار می‌روند، از جمله سازه‌های بسیار مهم و راهبردی به حساب می‌آیند. تخریب این مخازن هنگام زلزله علاوه بر بعد اقتصادی، ممکن است شرایط زیستی را نیز تهدید کند. با توجه به نیروی هیدرودینامیکی مایع ذخیره شده، رفتار دینامیکی مخازن متفاوت با سازه‌های متداول از جمله ساختمان‌ها و پل‌ها می‌باشد. فشار هیدرودینامیکی وارده به دیواره مخزن را می‌توان در قالب دو مولفه فشار ضربانی و نوسانی تفکیک کرد. فشار ضربانی در اثر حرکت هماهنگ سیال زیرین مخزن با جداره مخزن رخ می‌دهد که دوره تناوب آن نسبتاً کوتاه است، در صورتیکه فشار نوسانی در اثر نوسانات سیال در مجاورت سطح آزاد آن رخ می‌دهد و دارای دوره تناوب بسیار بالاتر از دوره تناوب مود ضربانی است. رفتار نامناسب و خرابی‌های فاجعه‌بار در زلزله‌های گذشته از جمله زلزله ۱۹۹۴ نورث‌ریچ و ۱۹۹۵ کوبه، نشان‌دهنده آسیب‌پذیر بودن مخازن قدیمی است. تحقیقات متعددی در رابطه با رفتار لرزه‌ای مخازن ذخیره مایعات انجام شده است. هاوسنر با فرض صلبیت جداره مخزن، یک مدل تحلیلی برای مخازن ذخیره مایع ارائه داد. در این مدل، مخزن به صورت سیستم دو درجه آزادی ایده‌آل سازی شده بود و به این ترتیب مقادیر تقریبی فرکانس سیال و نیروی هیدرودینامیکی ناشی از آن محاسبه گردید [۱-۲]. هارون و هاوسنر در سال ۱۹۸۱ مدل هاوسنر را با در نظر گرفتن انعطاف‌پذیری دیواره مخزن اصلاح کردند [۳]. در ادامه هارون رفتار مخازن ذخیره مایعات را به صورت تئوری و آزمایشگاهی بررسی کرده و روش طراحی لرزه‌ای مخازن را توسعه داد [۴]. ملهوترا و همکاران در سال ۲۰۰۰ با ترکیب مودهای بالاتر ضربانی و نوسانی با مود اول ضربانی و نوسانی، مدل مکانیکی ساده و پذیرفته شده‌ای بر اساس دو مود اصلاح یافته ضربانی و نوسانی ارائه کردند [۵]. ویرلا و همکاران مودهای اصلی ضربانی مخازن مهاربندی شده را تحت ارتعاشات افقی با استفاده از مدل المان محدود مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها نتیجه گرفتند که مودهای اصلی مخازن با نسبت ابعاد هندسی (نسبت ارتفاع به قطر مخزن) بزرگتر از $0/۶۳$ بسیار مشابه مود اول تیر طره است [۶]. اوزدمیر و همکاران در هر دو نوع مخازن مهار شده و مهار نشده، روش عددی دینامیکی غیرخطی خود را با نتایج تجربی آزمایش میز لرزه موجود اعتبارسنجی کردند [۷]. در سال ۲۰۱۴ بوراتی و توانو، منحنی‌های شکنندگی لرزه‌ای برای مخزن فولادی مهار شده را با روش جرم افزوده ارائه دادند [۸].

زلزله‌های حوزه نزدیک که در مجاورت گسل‌های فعال ثبت شده‌اند، دارای ویژگی‌های محتوای فرکانسی با پریودهای بالا و پالس شدید سرعت هستند. عامل اصلی این ویژگی‌های جنبش زمین، راستاداری رو به جلو است که معمولاً ناشی از مولفه عمود بر گسل می‌باشد [۹]. این ماهیت پالس گونه سرعت زمین با داشتن محتوای پریود بلند، می‌تواند حرکت سیال در سطح آزاد مخازن را به شدت تحت تاثیر قرار دهد [۱۰]. بنابراین به لحاظ اهمیت و آثار مخرب زلزله‌های حوزه نزدیک گسل، محققین مختلفی رفتار انواع سازه‌ها از جمله مخازن ذخیره مایعات را تحت تحریک زلزله‌های حوزه نزدیک بررسی کرده‌اند. رزاقی و عشقی پاسخ انواع مخازن فولادی مهار شده و مهار نشده را در زلزله‌های حوزه نزدیک گسل بررسی کردند و نتیجه گرفتند که اختلافات آشکار در عملکرد مخازن تحت زلزله‌های حوزه نزدیک و دور وجود دارد و مخازن تحت زلزله‌های نزدیک گسل آسیب‌پذیرترند [۱۱]. سریکالا و همکاران در سال ۲۰۱۲ یک مطالعه آزمایشگاهی بر روی مخازن مستطیلی ذخیره مایعات تحت زلزله‌های حوزه نزدیک انجام دادند. نتایج نشانگر نیروی هیدرودینامیکی بزرگ در دیواره مخزن به دلیل وجود مشخصه پالس در زلزله‌های حوزه نزدیک بود [۱۲]. زاما و همکارانش آسیب مخزن‌های ذخیره نفت را تحت زلزله سال ۲۰۱۱ توهوکو بررسی کردند. آن‌ها آسیب‌های دیوار و سقف مخزن را در اثر نوسانات شدید موج سطحی تحت زمین لرزه‌های با پریود بلند گزارش دادند [۱۳].

اگرچه رفتار و پاسخ لرزه‌ای مخازن فلزی ذخیره سیالات تحت زلزله‌های نزدیک گسل در برخی مراجع علمی مورد بررسی قرار گرفته است (مشابه آنچه در بالا مرور گردید)، ولی استفاده از توابع تحلیلی پالس معادل برای این منظور، این مزیت را دارد که می‌توان با تغییر مشخصات محدود این توابع تحلیلی، نسبت به انجام مطالعات پارامتریک اقدام نموده و اثر طیف وسیعی از مشخصات مختلف تحریک پالس گونه و مخزن را بررسی نمود. در مطالعه حاضر رفتار لرزه‌ای مخازن استوانه‌ای شکل فولادی ذخیره سیالات تحت روابط تحلیلی پالس معادل زلزله‌های حوزه نزدیک بصورت پارامتریک بررسی می‌شود. برای این منظور با استفاده از مدل مکانیکی معادل ملهوترا [۵] اثر مودهای بالاتر ضربانی و نوسانی سیستم مخزن-سازه در نظر گرفته شده و طیف وسیعی از مخازن با نسبت‌های ابعادی مختلف ارزیابی

می‌شوند. تحلیل تاریخچه زمانی مخازن در نظر گرفته شده تحت پالس‌های تحلیلی زلزله‌های حوزه نزدیک انجام شده و تاثیر متغیرهای مهم پالس از جمله پریود پالس، شکل پالس، تعداد پالس و دامنه پالس در پاسخ‌های دینامیکی مخازن مورد بررسی قرار می‌گیرد.



شکل ۱: تاریخچه زمانی سرعت پالس با متغیرهای $t_0=2/5$ s و $A=100$ cm/s، $T_p=1$ s

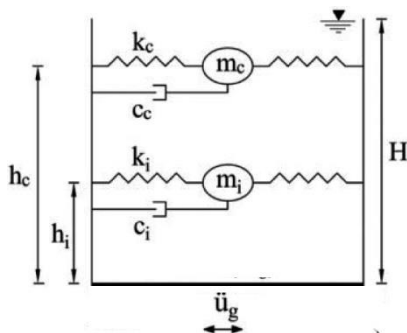
۲- پالس‌های معادل برای زلزله‌های حوزه نزدیک گسل

همان طور که قبلا بیان شد، مشخصه و محتوای فرکانسی زلزله‌های حوزه نزدیک بسیار متفاوت از زلزله‌های دور از گسل می‌باشد. اگر زلزله‌های حوزه نزدیک گسل با پالس‌های معادل بیان شوند، دارای پیچیدگی (متغیرهای) کمتر و قابلیت مقایسه پاسخ‌های سازه‌ای خواهند بود [۱۴]. به این علت محققین تحقیقات فراوانی بر روی استخراج پالس‌های غالب (معادل) انجام داده‌اند که یکی از این روش‌ها استفاده از تبدیل موجک در تاریخچه زمانی سرعت این نوع زمین‌لرزه‌ها می‌باشد [۱۵-۱۶]. در تحقیق حاضر از موجک Gabor اصلاح شده بر اساس تحقیقات ماورویدیس و همکاران [۱۶] استفاده می‌شود. آنها در فرم اصلاح شده، تابع گوسی موجک Gabor را با یک تابع متقارن زنگوله‌ای شکل دیگر که بیان تحلیلی ساده‌تر دارد، جایگزین کرده و تاریخچه زمانی پالس سرعت را به صورت رابطه (۱) بیان نمودند. با مشتق‌گیری از رابطه (۱) تاریخچه زمانی شتاب پالس معادل بصورت رابطه (۲) بدست می‌آید.

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

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

در روابط بالا 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 $\nu=\pm\pi/2$ توصیف کننده پالس پادمقارن، γ متغیری که مشخصه نوسانی سیگنال (تعداد پالس) را تعریف می کند و t_0 زمان اوج پالس می باشد. محدوده پیشنهادی ماوروییدیس و همکاران [۱۷] 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 می باشد. همچنین مرجع [۱۸] دوره تناوب پالس مشهود سرعت را در اکثر زلزله های نزدیک گسل در حدود 0.5 تا 5 ثانیه و در مواردی حتی بیشتر گزارش کرده است. شکل ۱ تاریخچه زمانی سرعت را در حالت پالس متقارن و پاد متقارن بر اساس متغیرهای $T_p=1 \text{ s}$ ، $A=100 \text{ cm/s}$ و $t_0=2/5 \text{ s}$ نشان می دهد.



شکل ۲: مدل ریاضی مخزن استفاده شده در این تحقیق

۳- مدل مکانیکی سیستم مخزن-سیال و معادلات حرکت

در این تحقیق از مدل مکانیکی ملهوترا [۵] برای تحلیل لرزه ای مخازن استفاده شده است. شکل ۲، مدل ریاضی مخزن استفاده شده را نشان می دهد. در این مدل، جرم های ضربانی و نوسانی (m_c و m_i) به ترتیب با فنرهای به سختی k_c و k_i و ضریب میرایی c_c و c_i به دیواره مخزن وصل شده است. مشخصات هندسی مخزن عبارتند از: ارتفاع مایع مخزن (H)، شعاع مخزن (R) و ضخامت جداره مخزن بصورت معادل یکنواخت (t). زمان تناوب طبیعی نوسانی (T_c) و ضربانی (T_i) از روابط (۳) و (۴) محاسبه می شوند [۵].

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

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

که ρ چگالی جرمی مایع درون مخزن و E مدول الاستیسیته مصالح جداره مخزن است. ضرایب C_c و C_i و جرم های نسبی نوسانی و ضربانی (m_c/m و m_i/m) و همچنین ارتفاع نسبی آنها (h_c/H و h_i/H) از مرجع [۵] به صورت تابعی از نسبت ابعادی مخزن یعنی H/R بدست می آیند. m کل جرم مایع درون مخزن و برابر $\pi R^2 H \rho$ است. با معلوم بودن زمان تناوب های نوسانی و ضربانی و جرم های مربوطه، سختی و ضرایب میرایی جرم های نوسانی و ضربانی مطابق روابط (۵) الی (۶) محاسبه می شوند.

$$k_c = m_c \times \frac{4\pi^2}{T_c^2} \quad k_i = m_i \times \frac{4\pi^2}{T_i^2} \quad (5)$$

$$c_c = 2\xi_c m_c \times \frac{2\pi}{T_c} \quad c_i = 2\xi_i m_i \times \frac{2\pi}{T_i} \quad (6)$$

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 ۰/۵٪ و ۲٪ توصیه شده است [۳، ۵ و ۱۹].

معادلات حرکت سیستم دو درجه آزاد مخزن مطابق شکل ۲ را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$m_c \ddot{u}_c + c_c \dot{u}_c + k_c u_c = -m_c \ddot{u}_g \quad (7)$$

$$m_i \ddot{u}_i + c_i \dot{u}_i + k_i u_i = -m_i \ddot{u}_g \quad (8)$$

که u_c و u_i به ترتیب جابجایی جرم نوسانی و ضربانی نسبت به پایه می‌باشند. \ddot{u}_g نیز بیانگر شتاب پایه است.

پاسخ‌های سازه‌ای در نظر گرفته شده برش پایه (F) ، لنگر واژگونی (M) و جابجایی قائم سطح آزاد سیال (dv) به ترتیب طبق روابط (۹) الی (۱۱) طبق تعریف مرجع [۱۹] است.

$$F = -\{m_c (\ddot{u}_c + \ddot{u}_g) + m_i (\ddot{u}_i + \ddot{u}_g)\} \quad (9)$$

$$M = -\{m_c h_c (\ddot{u}_c + \ddot{u}_g) + m_i h_i (\ddot{u}_i + \ddot{u}_g)\} \quad (10)$$

$$dv = 0.837 R u_c \frac{4\pi^2}{g T_c^2} \quad (11)$$

برش پایه و لنگر واژگونی طبق روابط (۱۲) و (۱۳) نرمال می‌شوند.

$$F_n = \frac{F}{W} \quad (12)$$

$$M_n = \frac{M}{\left(\frac{WH}{2}\right)} \quad (13)$$

که $W = (m_c + m_i)g$ وزن کل مدل مکانیکی و برابر است.

۴- مشخصات مخازن مورد مطالعه

برای اینکه اثرات زلزله‌های حوزه نزدیک در طیف وسیعی از مخازن استوانه‌ای شکل فولادی بررسی شود، هفت مخزن با نسبت‌های ابعادی (H/R) متفاوت از بازه ۰/۵ الی ۲/۵ مطابق با مرجع [۲۰] انتخاب شده است. در این بین، دو مخزن با نسبت ابعادی ۰/۶ و ۱/۸۵ که به ترتیب مخازن پهن و لاغر نامیده می‌شوند، جزء مخازن نمونه استاندارد که توسط محققین بسیاری استفاده شده‌اند، می‌باشد. پارامترهای مکانیکی معادل مخازن در نظر گرفته شده در جدول ۱ خلاصه شده است. قابل توجه است که مشخصات هندسی (نسبت ابعادی، ارتفاع، شعاع و ضخامت جداره) و زمان‌های تناوب طبیعی حاصل (نوسانی و ضربانی) در مدل‌های انتخابی بصورت اکیداً یکنوا می‌باشند، لذا کافی است تغییرات پاسخ‌های دینامیکی مخازن فقط با یک مشخصه بیان شود (مثلاً مشخصه زمان تناوب طبیعی نوسانی یا ضربانی مخزن) که بصورت ضمنی اثر بقیه مشخصات را نیز دارا خواهد بود.

جدول ۱: مشخصات مخازن در نظر گرفته شده با نسبت‌های ابعادی مختلف

نسبت ابعادی					
T_i (s)	T_c (s)	t (m)	R (m)	H (m)	H/R
۰/۲۶۵	۹/۵۰	۰/۰۲۸۳	۲۹/۸	۱۴/۹	۰/۵
۰/۲۵۳	۸/۱۵	۰/۰۲۰۳	۲۴/۴	۱۴/۶	۰/۶
۰/۲۳۰	۵/۵۸	۰/۰۰۹۴	۱۳/۵	۱۳/۵	۱
۰/۱۸۵	۴/۲۱	۰/۰۰۶۵	۸/۱	۱۲/۲	۱/۵
۰/۱۵۷	۳/۶۶	۰/۰۰۵۸	۶/۱	۱۱/۳	۱/۸۵
۰/۱۵۰	۳/۴۷	۰/۰۰۵۶	۵/۵	۱۰/۹	۲
۰/۱۱۹	۲/۸۹	۰/۰۰۵۳	۳/۸	۹/۶	۲/۵

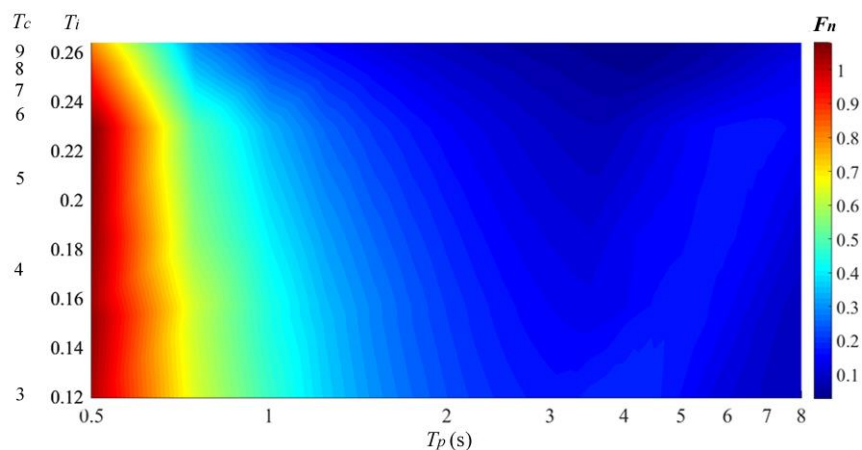
۵- نتایج و بحث

با توجه به رفتار خطی سیستم مورد مطالعه و رابطه خطی پالس معادل ورودی با A ، پاسخ‌های لرزه‌ای حاصل به ازای سطوح مختلف شدت زلزله (A های مختلف) رابطه خطی خواهند داشت و در نتیجه کافی است تحلیل‌ها فقط به ازای یک سطح شدت زلزله انجام گیرند. در اینجا تمامی پاسخ‌های گزارش شده بر اساس $A = 100 \text{ cm/s} = 1 \text{ m/s}$ می‌باشد.

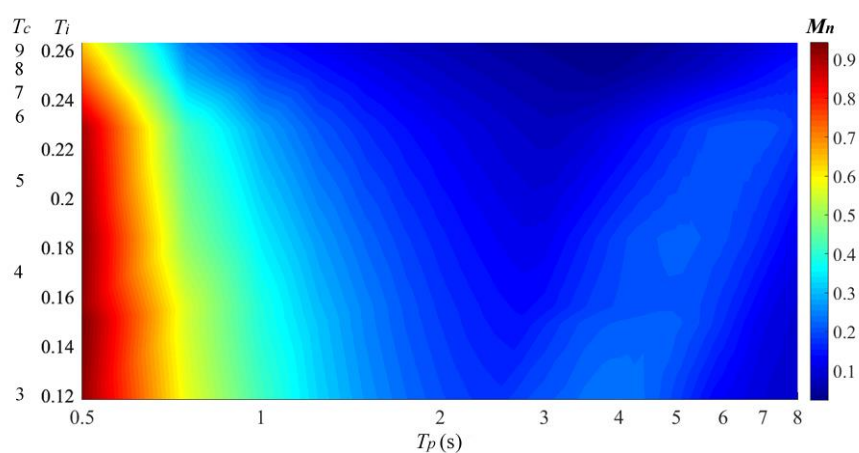
۵-۱- بررسی تاثیر پریود پالس

در این قسمت اثر پریود پالس در انواع پاسخ‌های مخازن با مشخصات مختلف مطابق جدول ۱ بررسی می‌شود. بازه در نظر گرفته شده برای پریود پالس $8-0.5$ s با گام‌های 0.25 s است. همچنین فرض شده است که شکل پالس متقارن ($V=0$) و تعداد پالس دو ($\gamma=2$) می‌باشد. نتایج حداکثر به صورت کنترهایی بر حسب مشخصه زمان تناوب نوسانی و ضربانی مخزن و نیز پریود پالس در اشکال ۳ الی ۵ نشان داده شده است. پاسخ‌های برش‌پایه و ممان‌واژگونی همان‌طور که انتظار می‌رفت، عمدتاً تحت تاثیر مود ضربانی بوده و در پریودهای پالس کوچک (نزدیک به پریود ضربانی) تشدید رخ می‌دهد. این در حالی است که بر خلاف برش‌پایه و ممان‌واژگونی و با توجه به مقدار بالای پریود نوسانی، جابجایی قائم سطح آزاد سیال که کاملاً تحت تاثیر مود نوسانی است، با افزایش پریود پالس، افزایش می‌یابد و حداکثر آن در حوالی پریود پالس نزدیک به زمان تناوب نوسانی رخ می‌دهد. بنابراین به طور خلاصه می‌توان گفت که جابجایی قائم سطح آزاد سیال و آسیب‌های ناشی از آن همانند آسیب به سقف و اجزای آن تحت پالس‌های با پریود بسیار بالا بحرانی خواهد بود و در مقابل برش‌پایه یا لنگر واژگونی و خرابی‌های محتمل از آنها همانند کماتش جداره مخزن و آسیب به اتصالات آن در تحریکات پالس‌گونه با پریودهای پایین تشدید خواهد شد.

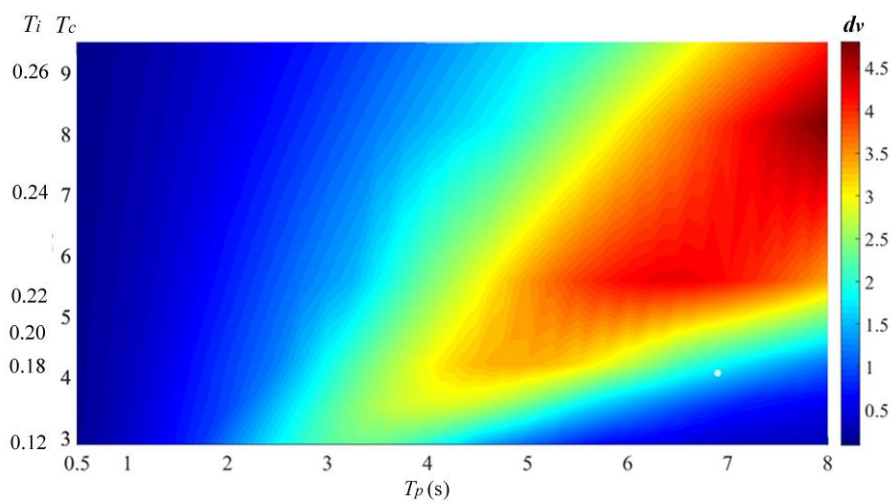
همچنین قابل توجه است که مطابق مدل‌های در نظر گرفته شده در جدول ۱، با افزایش حجم مخازن، نسبت ابعادی (H/R) کاهش و مشخصه زمان تناوب ضربانی (T_i) و نوسانی (T_c) افزایش می‌یابد. به این ترتیب مخازن پهن با نسبت ابعادی پایین‌تر نسبت به مخازن لاغر با نسبت ابعادی بالاتر دارای زمان‌های تناوب ضربانی و نوسانی بیشتری هستند. در شکل ۵ کاملاً مشخص است که جابجایی قائم سطح آزاد سیال که تحت تاثیر مشخصه زمان تناوب نوسانی است، در مخازن پهن‌تر تحت پالس‌هایی با پریودهای بالاتری نسبت به مخازن لاغرتر تشدید می‌شود. همچنین با دقت در اشکال ۳ و ۴ ملاحظه می‌شود اگرچه پاسخ برش‌پایه و لنگر واژگونی مخازن بطور عمده تحت پالس‌هایی با پریود بسیار کم و در حدود همان زمان تناوب ضربانی تشدید می‌شوند، ولی اندکی افزایش موضعی در این پاسخ‌ها تحت پالس‌هایی با پریودهای بالاتر و در حوالی زمان‌های تناوب نوسانی قابل مشاهده است که مشارکت - هر چند اندک - مود نوسانی در این پاسخ‌ها را می‌رساند.



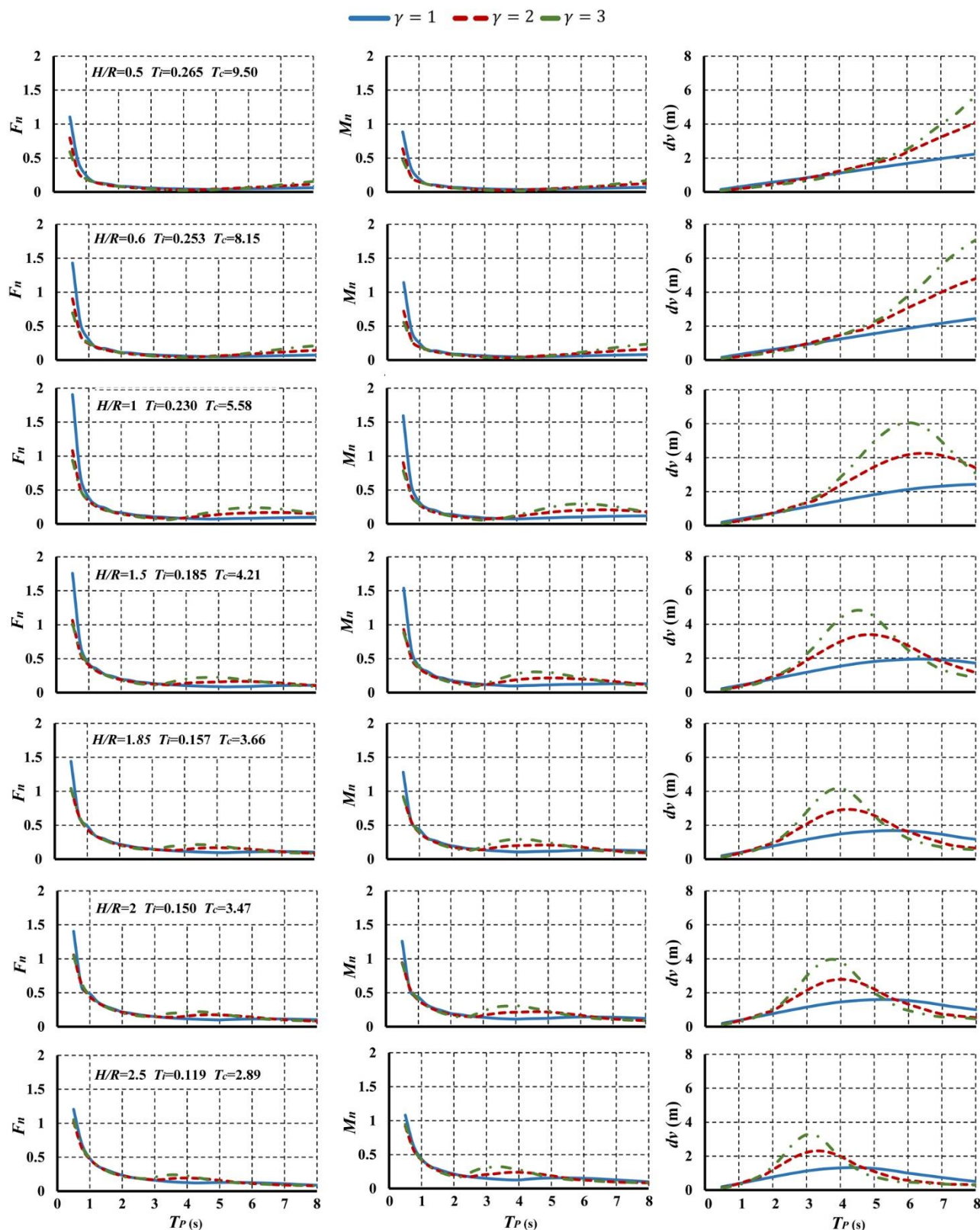
شکل ۳: برش پایه نرمال شده با تغییر مشخصات مخزن و پرپود پالس معادل در حالت $\gamma = 2, \nu = 0$ و $A = 1 \text{ m/s}$



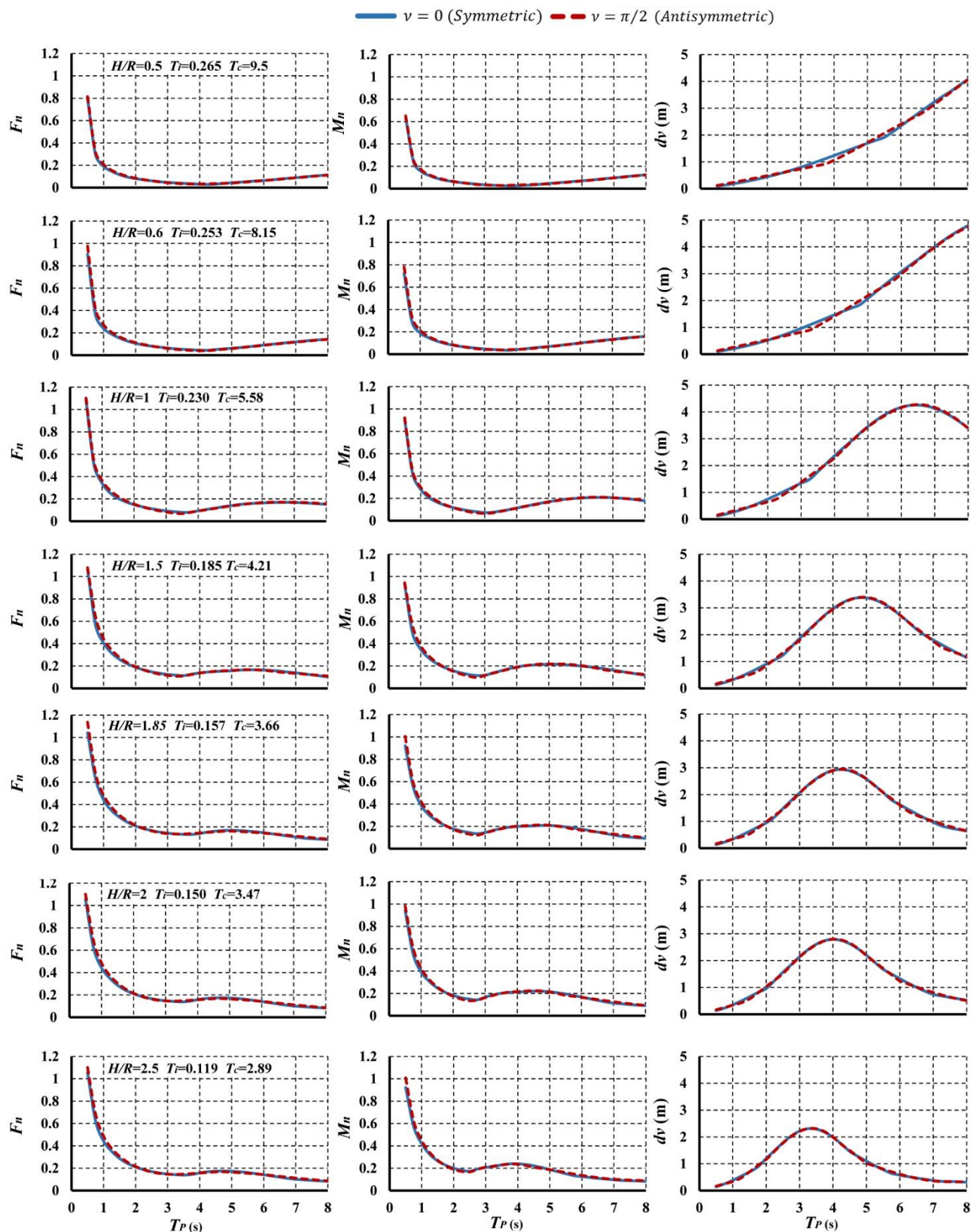
شکل ۴: ممان واژگونی نرمال شده با تغییر مشخصات مخزن و پرپود پالس معادل در حالت $\gamma = 2, \nu = 0$ و $A = 1 \text{ m/s}$



شکل ۵: جایجایی قائم سطح آزاد سیال با تغییر مشخصات مخزن و پرپود پالس معادل در حالت $\gamma = 2, \nu = 0$ و $A = 1 \text{ m/s}$



شکل ۶: تاثیر تغییرات تعداد پالس و پررود پالس در پاسخهای مخازن در نظر گرفته شده در حالت $V = 0$ و $A = 1$ m/s



شکل ۷: تاثیر شکل پالس و پریود پالس (متقارن و پادمتقارن) در پاسخ‌های انواع مخازن در نظر گرفته شده در حالت $\gamma = 2$ و $A = 1 \text{ m/s}$

۵-۲- بررسی تاثیر تعداد پالس

برای بررسی تاثیر تعداد پالس، کلیه مخازن جدول ۱ با نسبت‌های ابعادی مختلف در نظر گرفته شد. تعداد پالس‌ها یک، دو و سه فرض شده و دامنه تغییرات پریود پالس و شکل پالس مشابه زیربخش قبلی است. نتایج حاصل در شکل ۶ قابل مشاهده است. با توجه به این شکل استنباط می‌شود که متغیر γ در حوالی زمان تناوب موثر هر پاسخ، از متغیرهای تاثیرگذار می‌باشد. به عبارت دیگر در تمامی مخازن و در پریودهای پالس نزدیک به زمان تناوب ضربانی، برش پایه و ممان واژگونی با افزایش تعداد پالس کاهش می‌یابد ولی در پریودهای پالس نزدیک به زمان تناوب نوسانی رویه برعکس می‌شود. در پریودهای پالس دور از زمان‌های تناوب ضربانی و نوسانی، تعداد پالس تغییر محسوسی در برش پایه و ممان واژگونی ایجاد نمی‌کند.

جابجایی قائم سطح آزاد سیال عمدتاً تحت تاثیر مود نوسانی بوده و در پریودهای بالای پالس و نزدیک به زمان تناوب نوسانی، با افزایش تعداد پالس جابجایی قائم سطح آزاد سیال افزایش می‌یابد. بنابراین در مخازن پهن‌تر با نسبت ابعادی پایین، پریود پالس ورودی باید بسیار بالا باشد تا تعداد پالس ورودی اثر قابل توجهی بر جابجایی قائم سطح آزاد سیال داشته باشد ولی در مخازن لاغرتر با نسبت ابعادی بالا، تحت تحریکات پالس‌گونه با پریودهای میانی نیز افزایش تعداد پالس باعث افزایش چشمگیر نوسانات سطح آزاد سیال درون مخزن می‌شود.

البته ذکر این نکته ضروری است که ماهیت تحریک پالس‌گونه مورد استفاده طبق روابط (۱) و (۲) همانگونه که در شکل ۱ نیز مشاهده می‌شود به گونه‌ای است که همزمان با افزایش تعداد پالس، مدت زمان تداوم حرکت شدید ورودی نیز خودبخود افزایش می‌یابد. در نتیجه نتایج حاصل از تغییر تعداد پالس، به طور ضمنی ناشی از تغییر زمان تداوم بارگذاری نیز می‌باشد.

۵-۳- بررسی تاثیر شکل پالس

در این بخش کلیه مخازن جدول ۱ تحت پالس‌هایی با شکل متقارن ($U=0$) و پادمقارن ($U=\pm\pi/2$) تحلیل و مقایسه می‌شوند. همانند بخش‌های قبل پریود پالس در بازه $8-0.5$ s با گام‌های 0.25 s و تعداد پالس دو فرض شده است. نتایج حاصل در شکل ۷ قابل مشاهده است. ملاحظه می‌شود که در کلیه مخازن مورد بررسی با تغییر شکل پالس در پاسخ‌های اخذ شده شامل برش پایه، لنگر واژگونی و جابجایی قائم سطح آزاد سیال درون مخزن تفاوت محسوسی ایجاد نمی‌شود. بنابراین در حالت کلی پاسخ دینامیکی مخازن مورد مطالعه بیشتر تحت تاثیر سه ویژگی دیگر تحریک پالس‌گونه یعنی دامنه، پریود و تعداد پالس می‌باشد.

۶- نتیجه گیری

هدف این تحقیق، تحلیل پارامتریک رفتار دینامیکی مخازن رو زمینی ذخیره سیالات تحت تحریکات پالس‌گونه به عنوان جایگزین تحلیلی زمین‌لرزه‌های نزدیک گسل می‌باشد. برای این منظور هفت مدل مخزن با احجام متفاوت و نسبت ابعادی بین 0.5 تا $2/5$ در نظر گرفته شد. مخازن پهن‌تر با نسبت‌های ابعادی پایین‌تر نسبت به مخازن لاغرتر با نسبت‌های ابعادی بالاتر، مشخصه‌های زمان تناوب ضربانی و نوسانی بزرگتری نتیجه می‌دهند. در ادامه مخازن با مدل مکانیکی معادل شبیه‌سازی گردیده و معادلات حرکت آنها تحت پالس‌های تحلیلی ارائه شده برای زلزله‌های حوزه نزدیک گسل به صورت تاریخچه زمانی حل گردید. انواع پاسخ‌های دینامیکی مخازن شامل برش پایه، لنگر واژگونی و ارتفاع موج سطحی سیال درون مخزن با نسبت‌های ابعادی مختلف تحت تاثیر متغیرهای مهم پالس‌های تحریک شامل دامنه پالس، پریود پالس، تعداد پالس و شکل پالس ارزیابی شد. با توجه به معادله تحریک پالس‌گونه مورد استفاده، اثر پارامتر دامنه پالس ورودی بر روی رفتار مدل مکانیکی معادل مخزن بصورت خطی بوده و با افزایش آن تمامی پاسخ‌ها به همان نسبت افزوده می‌شوند؛ درحالیکه تغییر سه پارامتر دیگر (پریود، تعداد و شکل پالس) بصورت غیرخطی پاسخ‌های حاصل را تحت تاثیر قرار می‌دهد.

نتایج حاصل به طور خلاصه نشان داد که پاسخ‌های برش پایه و ممان واژگونی عمدتاً متأثر از مشخصه پریود ضربانی مخزن بوده و به جهت کوتاه بودن این مشخصه، تشدید این پاسخ‌ها در پالس‌هایی با پریود نسبی کوتاه صورت می‌پذیرد؛ درحالیکه جابجایی قائم سطح آزاد سیال درون مخزن متأثر از مود نوسانی سیستم با پریود نسبی بالا می‌باشد و در نتیجه تحت تحریکات پالس‌گونه با پریود پالس بالا

تشدید می‌شوند. البته با توجه به نسبت ابعادی مخازن، مشخصه پریود کوتاه (ضربانی) بین حدود ۰/۱۲ تا ۰/۲۶ ثانیه و مشخصه پریود بلند (نوسانی) بین تقریباً ۳ تا ۹ ثانیه متغیر است. در حوالی تشدید پاسخ‌های برش پایه و لنگر واژگونی (پریود پالس کمتر از یک ثانیه) تعداد پالس کمتر منجر به افزایش این پاسخ‌ها می‌گردد، درحالی‌که در حوالی تشدید پاسخ نوسان سطح آزاد سیال یعنی پریود پالس بالا، تعداد پالس بیشتر منجر به افزایش این پاسخ می‌شود. همچنین ملاحظه گردید که شکل پالس متقارن یا پادمقارن تاثیر محسوسی بر نتایج حاصل در این تحقیق نداشت. با توجه به اینکه طیف وسیعی از مخازن با نسبت‌های ابعادی مختلف و همینطور طیف وسیعی از خصوصیات تحریکات پالس‌گونه در این تحقیق مورد ارزیابی قرار گرفت، از نتایج حاصل می‌توان در طراحی لرزه‌ای مخازن ذخیره سیالات در مجاورت گسل‌های فعال بهره برد.

مراجع

- [1] Housner GW (1957). Dynamic pressures on accelerated fluid containers. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 47(1): 15-35
- [2] Housner GW (1963). The dynamic behaviour of water tanks. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 53(2): 381-387.
- [3] Haroun MA, Housner GW (1981). Seismic design of liquid storage tanks. *Journal of the Technical Councils of ASCE*, 107(1):191-207.
- [4] Haroun MA (1983). Vibration studies and test of liquid storage tanks. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 11(2): 179-206.
- [5] Malhotra PK, Wenk T, Wieland M (2000). Simple procedure for seismic analysis of liquid storage tanks. *Structural Engineering International*, 10(3): 197-201.
- [6] Virella JC, Godoy LA, Suarez LE (2006). Fundamental modes of tank-liquid systems under horizontal motions. *Engineering Structures*, 28(10): 1450-1461.
- [7] Ozdemir Z, Souli M, Fahjan YM (2010). Application of nonlinear fluid-structure interaction methods to seismic analysis of anchored and unanchored tanks. *Engineering Structures*, 32(2): 409-423.
- [8] Buratti N, Tavano M (2014). Dynamic buckling and seismic fragility of anchored steel tanks by the added mass method. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 43(1): 1-21.
- [9] Malhotra PK (1999). Response of buildings to near-field pulse-like ground motions. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 28(11): 1309-1326.
- [10] Bagheri S, Rofooei FR, Bozorgnia Y (2005). Evaluation of the seismic response of liquid storage tanks. In: *10th International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing*, Rome, Italy.
- [11] Razzaghi MS, Eshghi S (2004). Behaviour of steel oil tanks due to near-fault ground motion. In: *13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, British Columbia.
- [12] Sreekala R, Prasad AM, Muthumani K, Lakshmanan N, Iyer NR (2012). Dynamic response of liquid tanks during near fault earthquakes. In: *15th World Conference on Earthquake Engineering*, Lisboa, Portugal.
- [13] Zama S, Nishi H, Hatayama K, Yamada M, Yoshihara H, Ogawa Y (2012). On damage of oil storage tanks due to the 2011 off the pacific coast of tohoku earthquake (Mw 9.0). Japan, In: *15th World Conference on Earthquake Engineering*, Lisboa, Portugal.
- [14] Alavi B, Krawinkler H (2004). Behaviour of moment-resisting frame structures subjected to near-fault ground motions. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 33(6): 687-706.
- [15] Baker JW (2007). Quantitative classification of near-fault ground motions using wavelet analysis. *Bulletin of Seismological Society of America*, 97(5): 1486-1501.
- [16] Mavroeidis GP, Papageorgiou AS (2003). A mathematical representation of near-fault ground motions. *Bulletin of The Seismological Society of America*, 93(3): 1099-1131.
- [17] Mavroeidis GP, Dong G, Papageorgiou AS (2004). Near-fault ground motions, and the response of elastic and inelastic single-degree-of-freedom (SDOF) systems. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 33(9): 1023-1049.
- [18] Bozorgnia Y, Bertero V (2004). *Earthquake Engineering: From Engineering Seismology to Performance-Based Engineering*. Boca Raton, CRC Press.
- [19] Malhotra PK (1997). New method for seismic isolation of liquid storage tanks. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 26(8): 839-847.
- [20] Bagheri S, Farajian M (2016). The effects of input earthquake characteristics on the nonlinear dynamic behaviour of FPS isolated liquid storage tanks. *Journal of Vibration and Control*, published online before print June 20, 2016, doi: 10.1177/1077546316655914.