

تحلیل دینامیکی مخازن مستطیلی بتنی با در نظر گرفتن اثر اندرکنش سیال - سازه - خاک

مهرداد خوبانی^۱، شمس‌الدین هاشمی^{۲*}، علی‌علی پور^۳

۱- کارشناس ارشد مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران

۲- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران

۳- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران

چکیده

در مقاله حاضر، رفتار دینامیکی مخازن مستطیلی بتنی با در نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک و سازه تحت حرکت ناشی از زمین‌لرزه مورد ارزیابی قرار گرفته است. اثر اندرکنش توأم خاک-سازه-مایع بر رفتار دینامیکی مخازن مستطیلی بتنی به روش اجزاء محدود در فضای سه بعدی، براساس تحلیل خطی و در حوزه‌ی زمانی مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به اینکه در بعضی از مخازن، مانند سازه‌های استخری بزرگ بتن مسلح که برای ذخیره سازی طولانی مدت خوشه‌های پسماند سوخت‌های هسته‌ای استفاده می‌گردند انعطاف‌پذیری دیواره مخزن می‌تواند اثر قابل توجهی در پاسخ‌های دینامیکی ایجاد کند، دیوارهای مخزن به صورت ورق‌های انعطاف‌پذیر در نظر گرفته شده‌اند. خاک فونداسیون به عنوان یک محیط محدود الاستیک همگن با شرایط مرزی لزج که به منظور شبیه سازی جذب انرژی امواج در نواحی بریده شده آن قرار گرفته، مدل شده است. به منظور ارزیابی دینامیکی مخزن واقع شده بر روی فونداسیون، شش نوع تیپ خاک مختلف که مورد تأیید آیین‌نامه‌ها و استانداردهای طراحی کنونی هستند مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در مدل مورد مطالعه با استفاده از روش اجزاء محدود، تأثیر تیپ‌های مختلف خاک بر روی پاسخ‌های سازه‌ای مورد ارزیابی گرفته و با تغییر خصوصیات خاک، مقایسه‌هایی بین پاسخ‌های دینامیکی از قبیل برش پایه، لنگر پایه، منحنی‌های توزیع فشار هیدرودینامیکی و پاسخ‌های تلاطمی تحت دو شتاب‌نگاشت مختلف انجام گردیده است. نتایج نشان داد خاک زیر مخزن بسته به جنس آن می‌تواند تغییرات قابل ملاحظه‌ای در پاسخ‌های سازه‌ای ایجاد کند.

کلمات کلیدی: رفتار لرزه‌ای، مخازن مستطیلی بتنی، اندرکنش خاک-سازه-مایع، ارتفاع تلاطم امواج، روش اجزاء محدود.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/jsce.2017.74970.1060	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	http://dx.doi.org/10.22065/jsce.2017.74970.1060	۱۳۹۷/۰۳/۳۰	۱۳۹۶/۰۴/۰۳	۱۳۹۶/۰۴/۰۳	۱۳۹۶/۰۳/۱۴	۱۳۹۵/۱۱/۰۹
				*نویسنده مسئول:		
				دکتر شمس‌الدین هاشمی		
				پست الکترونیکی:		
				s.hashemi@yu.ac.ir		

Dynamic analysis of concrete rectangular tanks considering the effect of soil-structure-fluid interaction

Mehrdad Khoubani¹, Shamsedin Hashemi^{2*}, Ali Alipour³

1- MSc of Structural Engineering, Department of Engineering, Yasouj University, Yasouj, Iran
2- Assistant Professor, Department of Engineering, Yasouj University, Yasouj, Iran
3- Assistant Professor, Department of Engineering, Yasouj University, Yasouj, Iran

ABSTRACT

In this paper, the dynamic behavior of concrete rectangular tanks under the effects of soil-structure interaction and motion caused by earthquakes is studied. The simultaneous effects of soil-structure-fluid interaction on the dynamic behavior of concrete rectangular tanks by the finite element method in three-dimensional space, based on linear analysis and in-time domain is discussed. Considering that, in some tanks such as large reinforced concrete pool structures used for long-term storage of nuclear spent fuel assemblies or prestressed concrete water tanks where the flexibility of the rectangular tank wall can cause a significant effect on the dynamic responses, the tank walls are considered as flexible plates. A simple model with a viscous boundary is used to include deformable foundation effects as a linear elastic medium. For dynamic evaluation of a rectangular container located on the foundation, six different types of soil approved by the current regulations and design standards are used. In the finite element model, the effects of different soil types on structural responses have been evaluated and comparisons between dynamic responses such as base shear, base moment, hydrodynamic pressure distribution and sloshing responses under different ground motions have been evaluated by changing soil properties. It is concluded that the soil under the tank, depending on its type, can cause significant changes in the dynamic responses.

ARTICLE INFO

Received: 28/01/2017
Revised: 04/06/2017
Accepted: 24/06/2017

Keywords:

*Seismic behavior
Concrete rectangular tanks
Soil-structure-fluid
interaction
Sloshing height
Finite element method*

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2017.74970.1060

*Corresponding author: Shamsedin Hashemi.
Email address: s.hashemi@yu.ac.ir

مخازن ذخیره‌ی مایعات در تأسیسات صنعتی و حیاتی اهمیت زیادی دارند. آسیب رسیدن به چنین سازه‌هایی تنها به معنای ازدست دادن ارزش اقتصادی مخازن و حتی محتویات آنها نیست زیرا بدون تدارک آب تضمین شده، خطرات مهمی همچون آتش‌سوزی‌های مه‌ار نشدنی نیز ممکن است رخ دهد. به علاوه در حالی که این سازه‌ها به طور گسترده‌ای برای ذخیره‌ی مایعات و سیالات گوناگونی مانند روغن، گاز طبیعی مایع و سیالات شیمیایی استفاده می‌شوند، خرابی آنها در هنگام وقوع زلزله، می‌تواند اثرات زیان باری برای محیط اطراف به همراه داشته باشد. نتیجه اینکه تخریب و یا آسیب وارده به این نوع از سازه‌ها ممکن است منجر به آسیب‌هایی به مراتب شدیدتر و زیان بارتر از خود زلزله شود. بررسی‌های اخیر در خصوص ارزیابی عملکرد مخازن طی زمین لرزه‌های گوناگون حاکی از آن بوده‌اند که مخازن بتنی نسبت به مخازن فولادی در سطح بالاتری از خطر پذیری قرار دارند و باید در مورد آنها تحلیل‌ها و محاسبات دقیق‌تری انجام پذیرد. با توجه به اهمیت قابل توجه این نوع از سازه‌ها، اطمینان از عملکرد رضایت‌بخش آنها طی زمین لرزه‌های قوی ضروری است. این مخازن گاهی برای ذخیره سازی طولانی مدت خوشه‌های پسماند سوخت‌های هسته‌ای استفاده می‌گردند [۱ و ۲]. در این صورت، تحت حرکت زمین ناشی از زلزله، سازه باید ضوابط مورد نیاز برای ایمنی و جلوگیری از خطرات هسته‌ای را داشته باشد. یعنی سازه باید به گونه‌ای طراحی گردد که ضوابط ایمنی لازم جهت حفظ یکپارچگی و بسته بودن منافذ را دارا باشد [۱ و ۳]. مخازن ذخیره مایعات بر حسب استقرار خود به سه دسته کلی زمینی، هوایی و مدفون و از نظر جنس عموماً به دو نوع مخازن فلزی و بتنی طبقه‌بندی می‌شوند. در این میان مخازن زمینی که معمولاً با گنجایش زیاد ساخته می‌شوند برای ذخیره‌ی مایعات متنوعی همچون تأمین آب مصرفی مردم و آبرسانی در هنگام آتش‌سوزی، فرآورده‌های نفتی و شیمیایی بکار می‌روند.

هاسکین و ژاکوبسن [۴] در سال ۱۹۳۴ اولین گزارش را در مورد مشاهدات آزمایشی و تحلیلی مخازن مستطیلی صلب تحت تحریک ناشی از یک زلزله افقی شبیه سازی شده ارائه کردند. از پژوهش‌های اولیه در زمینه تحلیل دینامیکی مخازن می‌توان به تحقیقات هاسنر [۵] که مورد تأیید و استفاده اکثر آیین‌نامه‌ها و استانداردهای کنونی نیز هست، اشاره کرد. او یک روش تقریبی برای تعیین فشار هیدرودینامیکی تحت تحریک افقی زلزله ارائه داد و با فرض صلب بودن دیواره و پی سازه از شبیه سازی جرم و فنر برای مایع درون مخزن مستطیلی استفاده کرد. او پیشنهاد کرد که یک جرم ضربه‌ای و یک جرم نوسانی معادل می‌توانند به صورت تقریبی رفتار دینامیکی سیال را نشان دهند. هارون [۶] در سال ۱۹۸۴ یک روش تحلیلی با جزئیات کامل برای انواع سیستم‌های بارگذاری در مخازن مستطیلی ارائه داد. فشارهای هیدرودینامیکی با روش جریان پتانسیل کلاسیک محاسبه شده و فرمول‌های مربوط به فشارهای هیدرودینامیک فقط برای شرط مرزی دیواره صلب در نظر گرفته شده‌اند. چن و کیانوش [۷] در سال ۲۰۰۹، یک روش ساده شده با استفاده از سیستم یک درجه آزادی تعمیم یافته جهت تعیین پاسخ دینامیکی مخازن مستطیلی ذخیره مایع ارائه دادند. آنها از رویکرد پایداری جرمی و اثر انعطاف‌پذیری دیواره بر روی فشار هیدرودینامیکی استفاده کرده و فقط اثر فشار هیدرودینامیکی ضربه‌ای را در مطالعه خود در نظر گرفتند و به این نتیجه دست یافتند که نتایج بدست آمده از سیستم یک درجه آزادی تعمیم یافته در مطالعه آنها، در مقایسه با نتایج مطالعات قبلی انجام شده با روش اجزاء محدود، به مراتب دقیق‌تر بودند. در سال ۲۰۰۹ شکاری و همکاران [۸] اثرات جداساز پایه را بر پاسخ لرزه‌ای مخازن استوانه‌ای انعطاف‌پذیر تحت تحریک لرزه‌ای افقی بررسی کردند. آنها اثرات پارامترهای مختلفی از مدل همچون هندسه‌ی مخزن، نسبت ارتفاع به شعاع مخزن، انعطاف‌پذیری سیستم جداساز، تغییرات جابجایی سطح مایع و انعطاف‌پذیری دیواره‌ی مخزن را بر کارایی سیستم جداساز پایه مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که جداساز لرزه‌ای در مخازن بلند (باریک) در مقایسه با مخازن عریض مؤثرتر بوده و پاسخ‌ها را بیشتر کاهش می‌دهد. به‌علاوه، کارایی جداساز در مخازن صلب قابل توجه‌تر بوده و جداسازهای انعطاف‌پذیر نسبت به جداسازهای سخت، پاسخ‌های لرزه‌ای را به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش دادند. یکی از نویسندگان مقاله حاضر (هاشمی و همکاران [۹ و ۱۰]) در سال ۲۰۱۳ یک روش تحلیلی برای تعیین پاسخ دینامیکی مخازن مستطیلی سه بعدی محتوی سیال با دیواره‌های انعطاف‌پذیر در معرض زلزله، ارائه دادند. آنها به کمک روش ریلی-ریتر و با استفاده از مودهای ارتعاشی صفحات انعطاف‌پذیر، اثرات اندرکنش سیال-سازه را بر پاسخ‌های دینامیکی مخازن سیال در نظر گرفتند. ولتسوس و تانگ [۱۱] پاسخ دینامیکی مخازن استوانه‌ای را در معرض حرکت گهواره‌ای بررسی کردند و مدل مکانیکی هاسنر را برای حالتی که مخزن در معرض نیروهای جانبی و حرکت گهواره‌ای باشد توسعه دادند. آنها [۱۲] از آن مدل، برای مطالعه اثرات اندرکنش خاک-سازه روی پاسخ دینامیکی

مخازن استوانه‌ای در معرض مؤلفه افقی زلزله استفاده کردند. هارون و همکاران [۱۳] در سال ۱۹۹۲ مطالعه پارامتری جامع بر تأثیر شماری از پارامترهای مؤثر در پاسخ لرزه‌ای مخزن استوانه‌ای انعطاف‌پذیر واقع بر روی سطح زمین تحت اثر اندرکنش خاک و سازه در معرض ارتعاش افقی انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که اندرکنش مخزن و خاک، سبب افزایش در پاسخ مخزن شده و این افزایش به علت تأثیر دو عامل جنس خاک و خصوصیات هندسی مخزن است. در سال ۲۰۰۴ چو و همکاران [۱۴]، اثر ترکیبی سیستم جداساز پایه و اندرکنش خاک-سازه را بر پاسخ لرزه‌ای مخزن استوانه‌ای ذخیره مایع با استفاده از یک الگوریتم عددی، در فضای سه بعدی و در حوزه زمانی مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه دست یافتند که پاسخ‌های سازه‌ای سیستم ترکیبی جداساز پایه و خاک نرم، نسبت به حالتی که جداساز تنها و جداساز با خاک سخت باشد، کاهش می‌یابد اما ارتفاع تلاطم سطح آزاد مایع تقریباً بدون تغییر باقی می‌ماند. لیواگلو و دوگانگون [۱۵] در سال ۲۰۰۷، اثرات مدفون شدگی فونداسیون را بر رفتار لرزه‌ای مخازن استوانه‌ای مرتفع تحت اثر اندرکنش سیال-سازه-خاک و با استفاده از روش اجزاء محدود مورد مطالعه قرار دادند و مشاهده کردند که جابجایی‌های سقف مخزن با خاک نرم در حالت مدفون شده نسبت به حالت مدفون نشده به طور قابل توجهی تحت تأثیر قرار گرفتند (کاهش یافتند). این اثر برای خاک‌های سخت کمتر بوده و اثر مدفون شدگی فونداسیون به جز برای خاک‌های نرم، دیگر پاسخ‌های سازه‌ای را تحت تأثیر قرار نداد. همچنین لیواگلو [۱۶] در سال ۲۰۰۸، رفتار دینامیکی سیستم سیال-مخزن مستطیلی-خاک زیر فونداسیون را با یک روش تحلیل لرزه‌ای ساده در حوزه فرکانسی ارزیابی کرد. در این روش، اثر اندرکنش سیال-سازه با مدل تقریب دو جرمی هاسنر و سیستم خاک زیر فونداسیون با مدل مخروطی مدل شده‌است. او در این مدل دیواره مخزن را به صورت صلب در نظر گرفت بنابراین نتوانست پاسخ‌های دینامیکی مخزن را با دقت خوبی بدست آورد.

در هیچ یک از مطالعات گفته شده، اثر توأم اندرکنش سیال-سازه-خاک با دیوار انعطاف‌پذیر بر رفتار دینامیکی مخازن مستطیلی در نظر گرفته نشده است. در این مطالعه با لحاظ کردن اثر اندرکنش خاک-سیال-سازه و در نظر گرفتن اثر انعطاف‌پذیری دیوار، از روش اجزاء محدود جهت بررسی رفتار دینامیکی مخازن مستطیلی بتنی، در فضای سه بعدی استفاده شده است. لازم به ذکر است که این مطالعه بر اساس تحلیل خطی سیستم سیال-سازه-خاک بوده و بنابراین اثر ماده و امواج غیرخطی در نظر گرفته نشده‌است.

۲- معادلات اساسی حاکم بر سیستم سیال-سازه

توزیع فشار هیدرودینامیکی در دامنه سیال به کمک معادله فشار موج قابل محاسبه است. با فرض تراکم ناپذیری سیال و صرف‌نظر از ویسکوزیته آن، معادله سه بعدی حاکم بر حرکت غیر چرخشی با دامنه نوسانی کم، به فرم معادله (۱) می‌باشد:

$$\nabla^2 P(x, y, z, t) = 0 \quad (1)$$

P فشار هیدرودینامیکی در اثر ارتعاشات لرزه‌ای افقی و عمودی دیواره‌ها و کف مخزن، x و y و z نیز مختصات سیستم در دستگاه مختصات کارتزین هستند. شرط مرزی مناسب در فصل مشترک مایع و مخزن برای ارتعاش ناشی از زلزله، به کمک معادله (۲) ارضا می‌شود:

$$\frac{\partial P(x, y, z, t)}{\partial n} = -\rho a_n(x, y, z, t) \quad (2)$$

که در آن ρ چگالی جرمی مایع و a_n مؤلفه شتاب در جهت خارجی بردار نرمال سطح n در مرز هستند. باید به این نکته توجه کرد که مقدار a_n برای مخازن صلب برابر شتاب زمین بوده، در صورتیکه این مقدار برای مخازن انعطاف‌پذیر برابر مجموع شتاب زمین و شتاب نسبی دیوار است. شتاب نسبی دیواره مخزن به شدت به انعطاف‌پذیری آن وابسته است. به عبارت دیگر در معادله (۲)، اساساً رفتار مخازن صلب متفاوت از رفتار مخازن انعطاف‌پذیر می‌باشد.

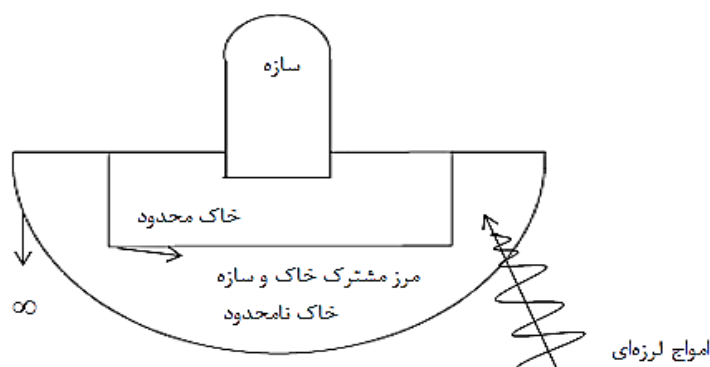
با محاسبه امواج ثقلی با دامنه کم روی سطح آزاد مایع، نتایج شرایط مرزی به صورت معادله (۳) می‌باشد:

$$\frac{1}{g} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} + \frac{\partial P}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

که در معادله (۳)، z مختصات سیستم در جهت قائم و g شتاب ثقلی هستند.

۳- مفهوم اندرکنش دینامیکی خاک و سازه

در یک سیستم خاک-سازه واقع در یک محیط نیمه بینهایت، حجم خاک در برابر حجم سازه بسیار بیشتر است. پس به طور کلی، سازه با خاک اطرافش اندرکنش دارد. بدین معنی که رفتار هر یک بر دیگری اثر دارد. بنابراین تحلیل سازه به تنهایی مجاز نیست و در بسیاری از حالات مهم (مانند ارتعاشات لرزه‌ای) که بارگذاری به خاک اطراف سازه وارد می‌شود، می‌بایست اثر خاک در نظر گرفته شود به این معنا که در هر صورت حوزه اطراف سازه باید مدل شود. از آنجا که اندرکنش لرزه‌ای خاک و سازه با ایمنی بسیاری از پروژه‌های مهندسی (مانند نیروگاه‌های هسته‌ای) در جهت مقاومت در برابر زلزله ارتباط تنگاتنگ دارد، این اندرکنش یک موضوع بسیار مهم در مهندسی زلزله تلقی شده است. همچنین به علت تأثیر بازتاب انرژی از محیط نامحدود و حرکات غیر یکنواخت زمین روی پاسخ سازه، اهمیت اندرکنش دینامیکی خاک-سازه در رفتار سازه‌های غول‌پیکر در برابر زلزله قابل توجه است. همان‌طور که در شکل (۱) نیز قابل مشاهده است، خاک یک محیط نیمه بینهایت است که به صورت حوزه نامحدود در نظر گرفته می‌شود. مرز مصنوعی در فاصله‌ای به اندازه کافی دور از سازه، جایی که انتظار می‌رود پاسخ حوزه مستهلک شود، معرفی و شرایط مرزی مناسب بر روی آن تعریف می‌گردد. مطابق با دقت تحلیل، این مرز می‌تواند دورتر یا نزدیک‌تر به سازه تعریف شود. این کار به یک محیط محدود برای خاک منجر شده که می‌تواند با سازه مدل شود. کل سیستم المان‌بندی شده، شامل خاک و سازه توسط روش‌های اجزاء محدود مدل می‌شود.



شکل ۱: مدل اندرکنش خاک و سازه تحت بار زلزله.

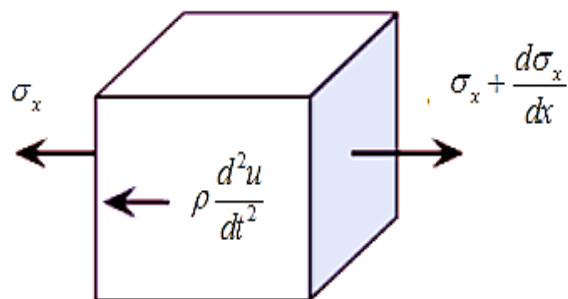
۳-۱- عملکرد مرز لزوج در روش اجزاء محدود به منظور در نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک-سازه

شبه‌سازی محیط بینهایت در روش عددی، یک موضوع مهمی در مسائل اندرکنش دینامیکی خاک و سازه است. رویکرد کلی برای رویارویی با این مسئله، تقسیم محیط بینهایت به میدان نزدیک و میدان دور است. میدان نزدیک با استفاده از المان‌های محدود و میدان دور با افزودن تعدادی مرزهای مصنوعی خاص (المان‌های اتصالی)، مدل شده‌اند. اثرات تابش و انعکاس امواج بین سازه و خاک، می‌تواند به وسیله این مرزهای لزوج (مصنوعی) دفع و خنثی شود. مدل‌های مرزی مختلفی در حوزه‌های زمانی و فرکانسی با حساسیت‌های متفاوت، وجود دارند. اولین مدل ارائه شده برای این مرزها، مدل مرزی لایزمر [۱۷] است که به وسیله تئوری یک بعدی تیر توسعه یافت و به طور معمول در روش اجزاء محدود مورد استفاده قرار گرفت. به منظور محاسبه خصوصیات این شرط مرزی، همان‌طور که در شکل (۲) هم مشخص است، انتشار

1- Viscous Boundaries (Artificial Boundaries)

موج در راستای x در یک مکعب مورد بحث قرار گرفته است. برای مکعب این شکل، معادله تعادل یک بعدی در راستای x به فرم معادله (۴) می‌باشد [۱۵]:

$$\rho \frac{d^2 u}{dt^2} - \frac{d\sigma_x}{dx} = 0 \quad (4)$$



شکل ۲: نیروهای اعمالی به مکعب واحد [۱۵].

در رابطه (۴)، ρ ، u و σ_x به ترتیب بیانگر چگالی جرمی، جابجایی و تنش در راستای x هستند. معادله دیفرانسیل با مشتقات جزئی یک بعدی در فرم انتشار کلاسیک موج، به فرم معادله (۵) قابل بیان است:

$$\frac{d^2 u}{dt^2} - v_p^2 \frac{d^2 u}{dx^2} = 0 \quad (5)$$

v_p سرعت انتشار موج ماده است و به وسیله معادله $v_p = \sqrt{E/\rho}$ که E مدول یانگ ماده می‌باشد، به دست می‌آید. توجه به این نکته ضروری است که سرعت انتشار موج تنها وابسته به خواص مصالح (سختی و چگالی آن) بوده و مستقل از دامنه و شدت امواج تنش است. حل معادله (۵) برای انتشار هارمونیک موج در راستای مثبت x یک جابجایی $u(t, x)$ و سرعت $\dot{u}(t, x)$ به فرم معادلات (۶) و (۷) نتیجه می‌دهد:

$$u(t, x) = U \left[\sin \left(\omega t - \frac{\omega x}{v_p} \right) + \cos \left(\omega t - \frac{\omega x}{v_p} \right) \right] \quad (6)$$

$$\dot{u}(t, x) = U \omega \left[\cos \left(\omega t - \frac{\omega x}{v_p} \right) - \sin \left(\omega t - \frac{\omega x}{v_p} \right) \right] \quad (7)$$

کرنش در آن راستا و تنش نظیر آن به فرم ساده شده معادلات (۸) و (۹) قابل بیان است:

$$\varepsilon(t, x) = \frac{du}{dx} = -\frac{\dot{u}(t, x)}{v_p} \quad (8)$$

$$\sigma_x = E \varepsilon(t, x) = -\rho v_p \dot{u}(t, x) \quad (9)$$

۳-۲- معادله حرکت برای سیستم سیال- سازه- خاک

مرزهای لزوج همانطور که در شکل (۳) نشان داده شده، به کمک مش بندی اجزاء محدود قابل استفاده هستند. در این شکل، A_n ، A_{11} و A_{12} حوزه های کنترلی میراگرهای لزوج می باشند و σ و τ نیز به ترتیب تنش های نرمال و برشی هستند که در مرزهای محیط رخ می دهند. اندیس های n و i به ترتیب بیانگر راستاهای نرمال و مماسی در مرز هستند. هنگامی که از مرز لزوج استفاده شود، معادله حرکت شناخته شده برای سیستم در نظر گرفته شده، به صورت معادله (۱۰) می باشد [۱۵]:

$$[M_{ss}]\{\ddot{u}(t)\} + ([C_{ss}] + [C_i^*])\{\dot{u}(t)\} + [K_{ss}]\{u(t)\} = \{R(t)\} \quad (10)$$

که C_i^* ماتریس میرائی ویژه می باشد و به صورت معادله (۱۱) بیان می گردد:

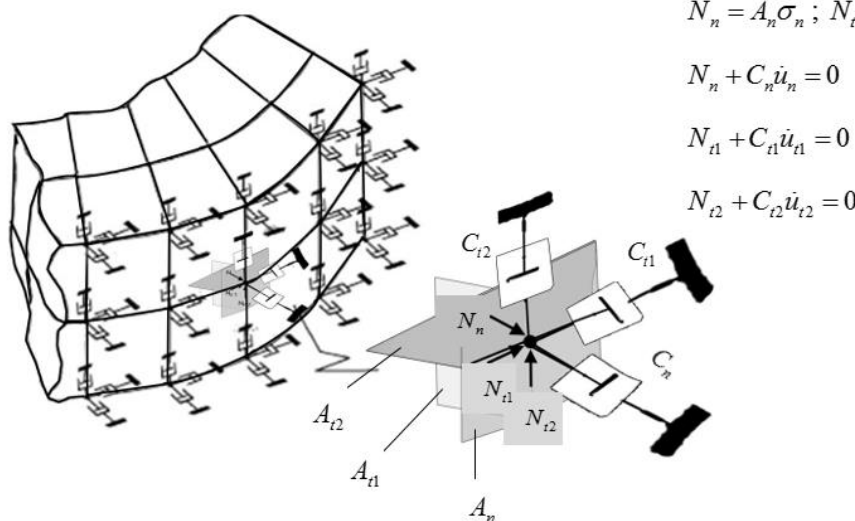
$$[C_i^*] = \begin{bmatrix} A_n \rho v_p & 0 & 0 \\ 0 & A_{11} \rho v_s & 0 \\ 0 & 0 & A_{12} \rho v_s \end{bmatrix} \quad (11)$$

در معادله (۱۱)، به ترتیب سرعت موج برشی و سرعت موج فشاری در خاک هستند.

سرانجام، معادله حرکت کلی سیستم سیال- سازه- خاک به فرم معادله (۱۲) بیان می گردد:

$$([M_f] + [M_{ss}])\{\ddot{u}(t)\} + ([C_f] + [C_{ss}] + [C_i^*])\{\dot{u}(t)\} + ([K_f] + [K_s] + [K_{ss}])\{u(t)\} = \{R(t)\} \quad (12)$$

M ، K و C به ترتیب ماتریس های جرم، سختی، میرائی و بردار نیروی خارجی اعمالی به سازه و نیز اندیس های ss ، i و s به ترتیب بیانگر خاک- سازه، سیال، سطح مشترک خاک- سازه و سطح آزاد سیال در سیستم سیال- سازه- خاک هستند.



$$N_n = A_n \sigma_n ; N_{11} = A_{11} \tau_{11} ; N_{12} = A_{12} \tau_{12}$$

$$N_n + C_n \dot{u}_n = 0$$

$$N_{11} + C_{11} \dot{u}_{11} = 0$$

$$N_{12} + C_{12} \dot{u}_{12} = 0$$

شکل ۳: مرز لزوج در نظر گرفته شده در مدل سه بعدی اجزاء محدود [۱۵].

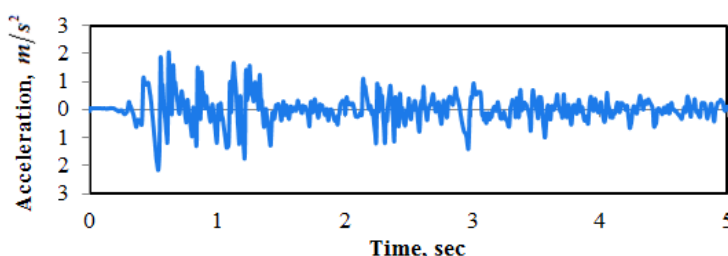
۴- مدل‌سازی به کمک روش اجزاء محدود

در این مطالعه، برای مدل‌سازی دیوارها، دال کف و خاک زیر پی به کمک نرم‌افزار مدل‌سازی اجزاء محدود انسیس از یک المان هشت گرهی ایزوپارامتریک با سه درجه آزادی انتقالی در هر گره (راستای x ، y و z) و حوزه‌ی سیال با استفاده از یک المان هشت گرهی ایزوپارامتریک سیال با سه درجه آزادی انتقالی در راستای x ، y و z در هر گره استفاده شده‌است. این المان به منظور مدل‌سازی حوزه‌ی سیال درون یک محفظه بسته که جریان سیال (شار سیال) به داخل و یا خارج از آن وجود ندارد، مناسب و مورد استفاده است. همچنین، قادر به در نظر گرفتن اندرکنش سیال-سازه و نیز اثرات شتاب مانند مسائل تلاطم سطح آزاد مایع می‌باشد. المان‌های سیال در مرزها می‌بایست با المان‌های سازه در راستای نرمال نسبت به فصل مشترک، به هم متصل (کوپلینگ) شوند. به این ترتیب حرکت المان‌های سازه و سیال در صفحه افق به یکدیگر مقید شده ولی حرکت آزادانه سیال روی سطح سازه در امتداد قائم امکان‌پذیر است. در واقع از تنش برشی سیال در محل تماس با سازه صرف‌نظر شده‌است. به منظور مدل‌سازی میراگرهای واقع بر روی مرزهای بریده شده‌ی خاک، از یک المان دو گرهی با درجه آزادی انتقالی، استفاده گردیده‌است. این المان، فشار و کشش تک محوره را در نظر گرفته ولی قادر به تحمل خمش و پیچش نیست. برای تعیین تلاطم سطح آزاد مایع، شرایط مرزی مناسب در نظر گرفته شده و اثرات میرایی به علت مؤلفه‌های ضربه‌ای و نوسانی مخزن با استفاده از روش ریلی مدل شده‌اند.

۵- مسائل عددی

۵-۱- تحلیل تاریخچه زمانی مخازن مستطیلی با کف صلب

به منظور مقایسه و صحت سنجی، از نتایج یک مدل مقیاس شده آزمایشگاهی با کف صلب در فضای سه بعدی، استفاده گردیده است [۱۸]. در نمونه آزمایشگاهی، یک مدل مقیاس شده بر روی میز لرزان تحت مؤلفه شمال-جنوب زلزله ۱۹۴۰ ال سنترو با زمان رکورد مقیاس شده با ضریب چهار و مقدار بیشینه شتاب $0.22g$ قرار گرفته‌است. این شتاب‌نگاشت در شکل (۴) نشان داده شده‌است. نتایج مورد بررسی در این قسمت عبارتند از: تاریخچه زمانی شتاب در بالای مقطع میانی دیوار بلند، تاریخچه زمانی فشار هیدرودینامیکی در فصل مشترک بین دال کف و مقطع میانی وجه بزرگ در مجاورت دیوار و تاریخچه زمانی ارتفاع تلاطم سطح آزاد مایع در مقطع میانی وجه بزرگ و در مجاورت دیوار. در شکل‌های (۵) و (۶) به ترتیب یک طرح کلی از مخزن مستطیلی و مدل اجزاء محدود آن نشان داده شده‌است.



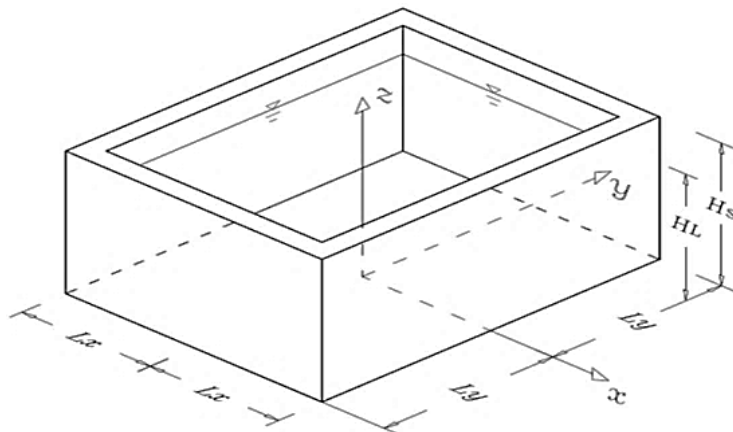
شکل ۴: تاریخچه زمانی شتاب مؤلفه شمال-جنوب زلزله ۱۹۴۰ ال سنترو (مقیاس شده).

مشخصات مکانیکی و هندسی مدل آزمایشگاهی به شرح زیر می‌باشد:

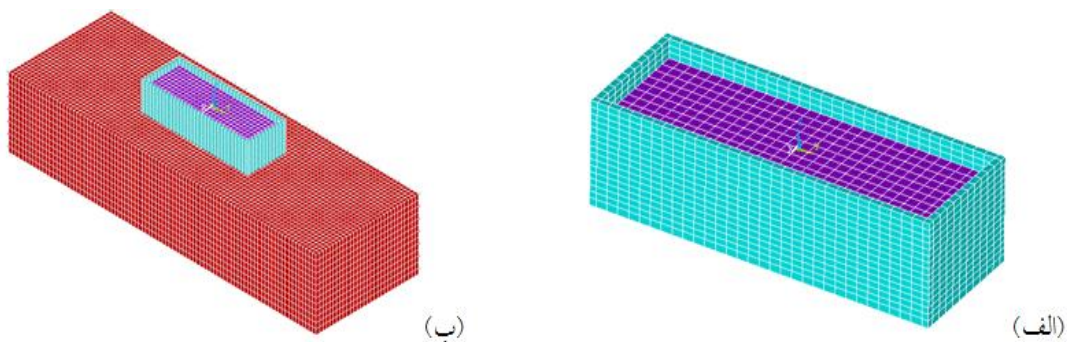
- 2- ANSYS
- 2- Solid185
- 3- Fluid80 (D-Fluid)
- 5- Coupling

$$2L_y = 2.2 \text{ m} \quad 2L_x = 1.15 \text{ m} \quad H_s = 0.9 \text{ m} \quad H_L = 0.7 \text{ m} \quad \rho_s = 1200 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_L = 1000 \text{ kg/m}^3 \quad E_s = 2.9 \times 10^9 \text{ N/m}^2 \quad \nu = 0.35 \quad t_s = 0.035 \text{ m}$$



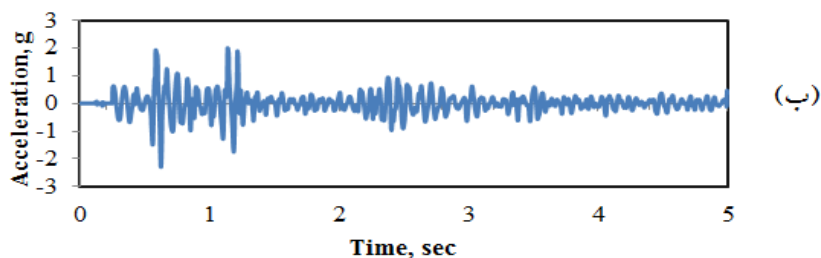
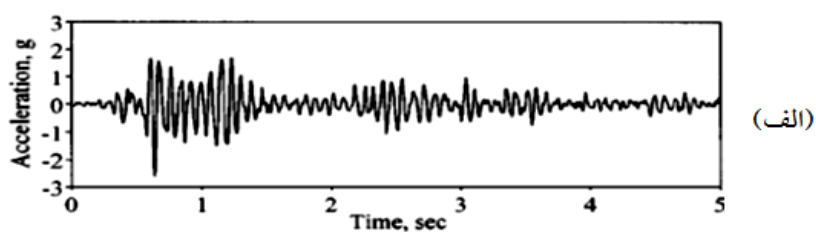
شکل ۵: طرح کلی مخزن مطالعه حاضر.



شکل ۶: مدل اجزاء محدود مخزن مورد مطالعه در فضای سه بعدی.

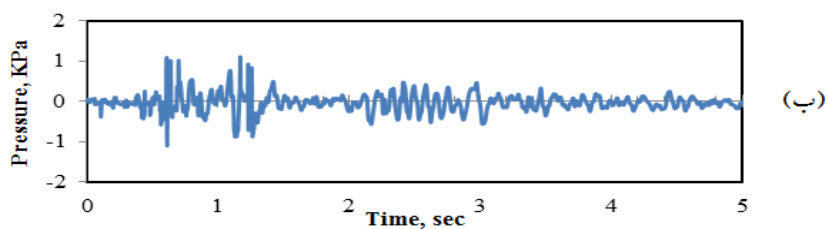
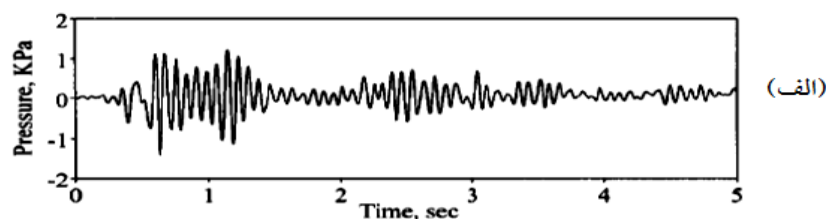
الف) مخزن با کف صلب ب) مخزن با خاک

به منظور صحت‌سنجی، نتایج حاصل از مدل اجزاء محدود و نتایج مدل آزمایشگاهی مرجع [۱۸]، در شکل‌های (۷)، (۸) و (۹) مقایسه شده‌اند. مقادیر ماکزیمم شتاب، فشار هیدرودینامیکی و ارتفاع تلاطم سطح آزاد مایع به ترتیب برای مدل آزمایشگاهی برابر 2.41 m/s^2 ، 1.4 KPa و 0.991 cm و برای مدل اجزاء محدود حاضر برابر 2.29 m/s^2 ، 1.21 KPa و 0.989 cm تحت شتاب‌نگاشت ذکر شده، بدست آمده‌اند. انطباق نسبتاً خوب نتایج، به عنوان دلیلی بر صحت مدل‌سازی در نظر گرفته شده است.



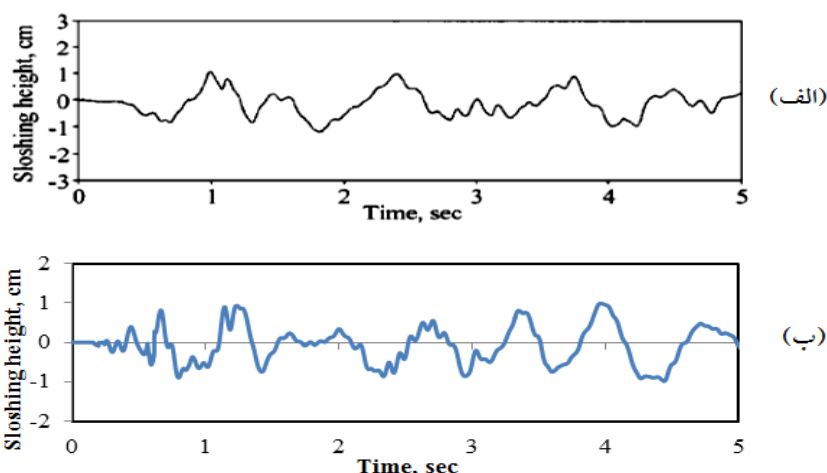
شکل ۷: تاریخچه زمانی شتاب اندازه‌گیری شده در بالای مقطع میانی وجه بزرگ و در مجاورت دیوار.

الف) مدل آزمایشگاهی (ب) مدل اجزاء محدود حاضر



شکل ۸: تاریخچه زمانی فشار هیدرودینامیکی در فصل مشترک بین دال کف و مقطع میانی وجه بزرگ و در مجاورت دیوار.

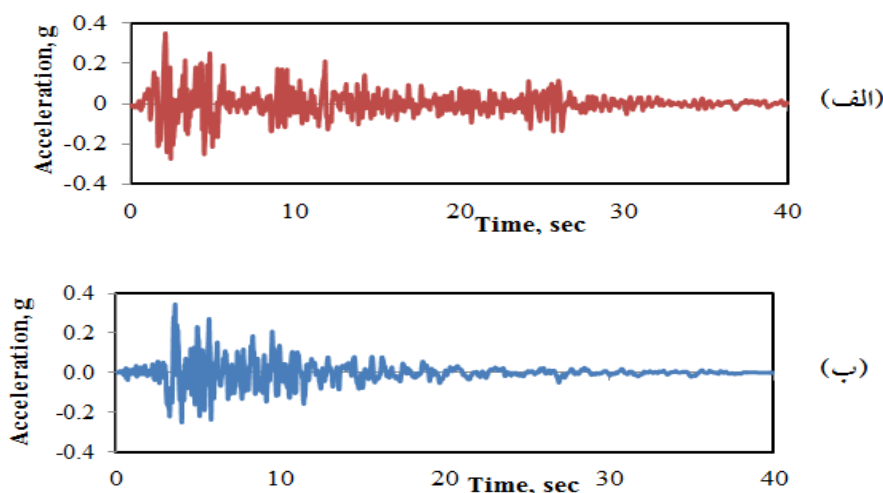
الف) مدل آزمایشگاهی (ب) مدل اجزاء محدود حاضر



شکل ۹: تاریخچه زمانی ارتفاع تلاطمی سطح آزاد مایع در مقطع میانی وجه بزرگ و در مجاورت دیوار.

الف) مدل آزمایشگاهی (ب) مدل اجزاء محدود حاضر

در این تحقیق، همچنین یک مخزن با مشخصات ذکر شده در زیر در دو حالت با کف صلب و خاک انعطاف پذیر زیر فونداسیون تحت مؤلفه‌های شمال- جنوب زلزله‌های ۱۹۴۰ ال سنتر و ۱۹۹۴ نورتریج با مقادیر اوج $0.34g$ مورد مطالعه قرار گرفته است. این شتاب نگاشت‌ها در شکل (۱۰) نشان داده شده‌اند.



شکل ۱۰: مؤلفه زلزله‌های مطالعه حاضر. الف) مؤلفه شمال- جنوب زلزله ۱۹۴۰ ال سنتر و ب) مؤلفه شمال- جنوب زلزله ۱۹۹۴ نورتریج

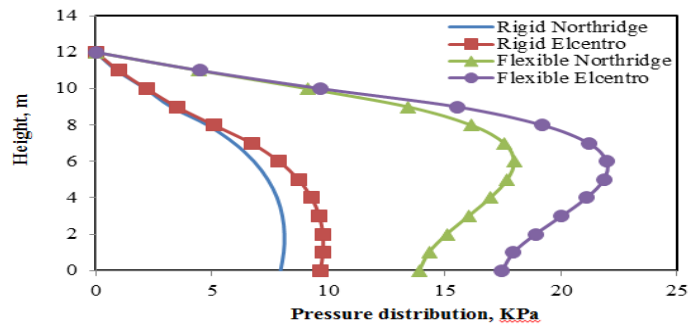
چون می‌توان از مخازن مستطیلی بتنی برای نگهداری پسماندهای خوشه‌های سوخت هسته‌ای استفاده کرد، ابعاد و خصوصیات که برای این مخازن مناسب است، در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفته است.

$$\rho_s = 2400 \text{ kg/m}^3 \quad \rho_L = 1000 \text{ kg/m}^3 \quad E_s = 21 \text{ GPa} \quad \nu = 0.17$$

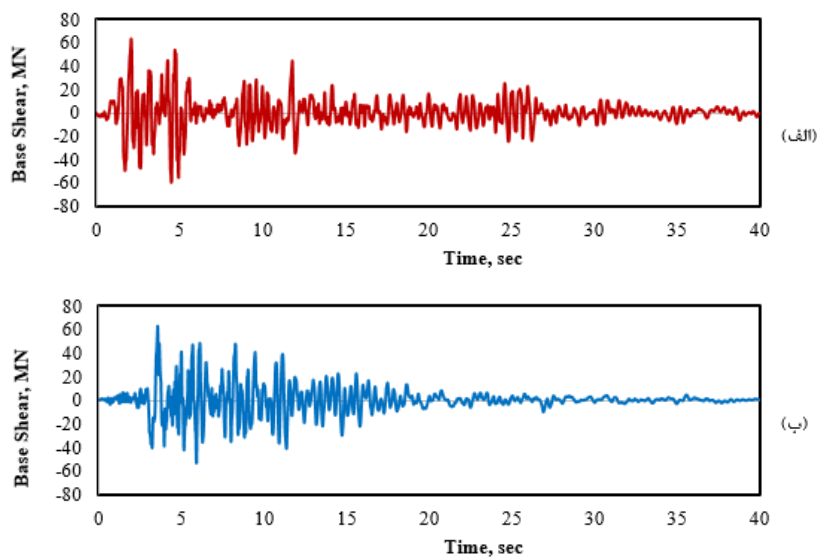
$$L_x = 10 \text{ m} \quad L_y = 30 \text{ m} \quad H_s = 15 \text{ m} \quad H_L = 12 \text{ m} \quad t_s = 1.2 \text{ m}$$

به منظور بررسی اثر انعطاف پذیری دیوار بر روی پاسخ‌های دینامیکی مخزن، یک مدل اجزاء محدود با شرط مرزی دیوار انعطاف پذیر در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفته است. ابتدا، یک مقایسه بین منحنی توزیع فشار هیدرودینامیکی اعمالی به دیواره در حالت دیوار صلب

و انعطاف‌پذیر تحت زلزله‌های ال‌سنتر و نورتریج برای مخزن مورد مطالعه در شکل (۱۱) انجام گردیده است. نتایج نشان داد که انعطاف‌پذیری دیواره مخزن می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر پاسخ‌های دینامیکی سازه داشته باشد. پاسخ دینامیکی مخزن در ترم برش پایه و لنگر پایه در وضعیت دیوار انعطاف‌پذیر و کف صلب، در شکل‌های (۱۲) و (۱۳) نشان داده شده‌اند. تحت تحریک افقی، مقادیر ماکزیمم برش پایه $62.74MN$ و نیز لنگر پایه $430.22MN.m$ ، $483.55MN.m$ به ترتیب تحت زلزله‌های ال‌سنتر و نورتریج بدست آمده‌اند.

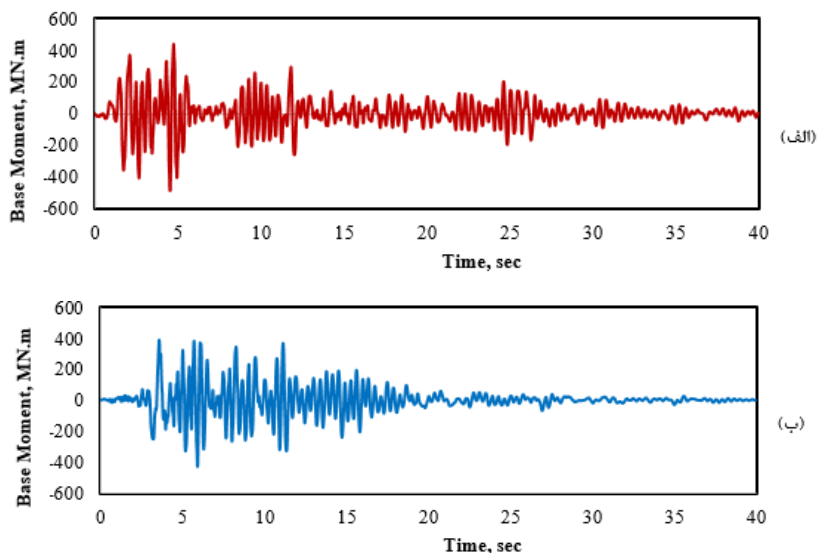


شکل ۱۱: منحنی توزیع فشار هیدرودینامیکی در امتداد ارتفاع مقطع میانی وجه بزرگتر مخزن با کف صلب تحت زلزله‌های ال‌سنتر و نورتریج در وضعیت دیوار انعطاف‌پذیر و صلب.



شکل ۱۲: تاریخچه زمانی برش پایه مخزن در وضعیت دیوار انعطاف‌پذیر.

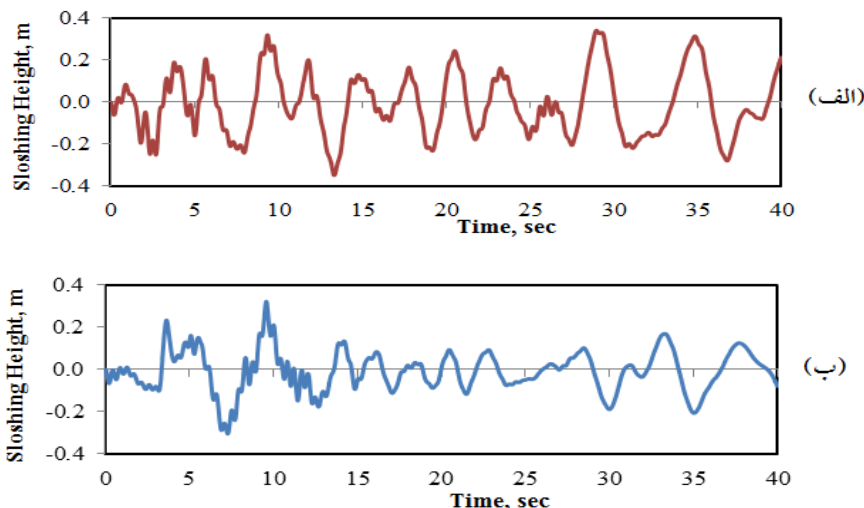
(الف) تحت زلزله ال‌سنتر و (ب) تحت زلزله نورتریج



شکل ۱۳: تاریخچه زمانی لنگر پایه مخزن در وضعیت دیوار انعطاف پذیر.

الف) تحت زلزله ال سنتر و ب) تحت زلزله نورتریج

همچنین، تاریخچه زمانی ارتفاع تلاطمی سطح آزاد مایع در مقطع میانی وجه بزرگ و در مجاورت دیوار در وضعیت دیوار انعطاف پذیر و کف صلب در شکل (۱۴) نشان داده شده است. تحت زلزله های اعمالی، مقادیر ماکزیمم این ارتفاع برای زلزله های ال سنتر و نورتریج به ترتیب 349 mm در زمان 28.98 sec و 322 mm در زمان 9.58 sec حاصل گردیده است.



شکل ۱۴: تاریخچه زمانی ارتفاع تلاطمی سطح آزاد مایع در مقطع میانی وجه بزرگ و در مجاورت دیوار مخزن در وضعیت دیوار انعطاف پذیر.

الف) تحت زلزله ال سنتر و ب) تحت زلزله نورتریج

۵-۲- اثر اندرکنش خاک و سازه بر رفتار دینامیکی مخازن مایع

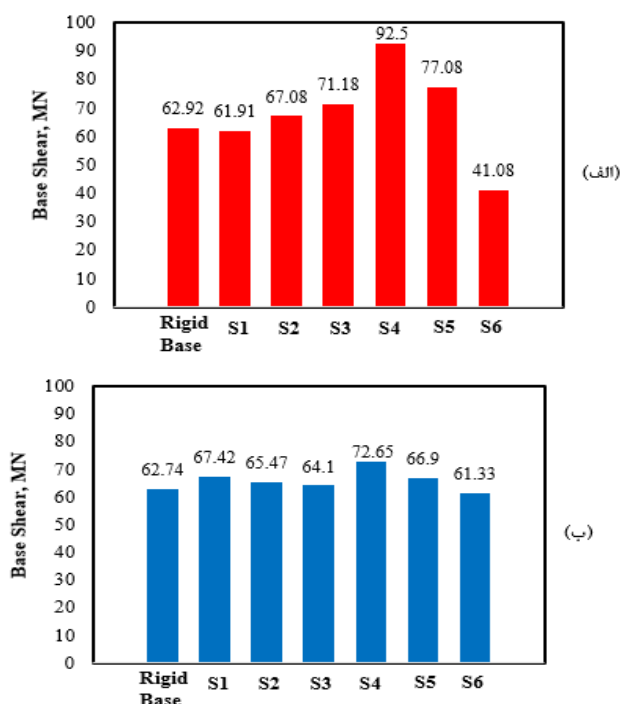
به منظور در نظر گرفتن اثرات شکل پذیری فونداسیون مخزن بر پاسخ سازه، یک مدل اجزاء محدود با شرط مرزی فونداسیون انعطاف پذیر مورد بررسی قرار گرفته است. برای ارزیابی پاسخ دینامیکی مخزن واقع شده بر روی فونداسیون انعطاف پذیر، از شش نوع تیپ

خاک که مورد تأیید آیین‌نامه‌ها و استانداردهای کنونی نیز هستند، استفاده گردیده است. خصوصیات این خاک‌ها در جدول (۱) نشان داده شده‌است.

جدول ۱: خصوصیات تپ خاک‌های در نظر گرفته شده در مطالعه حاضر [۱۵]

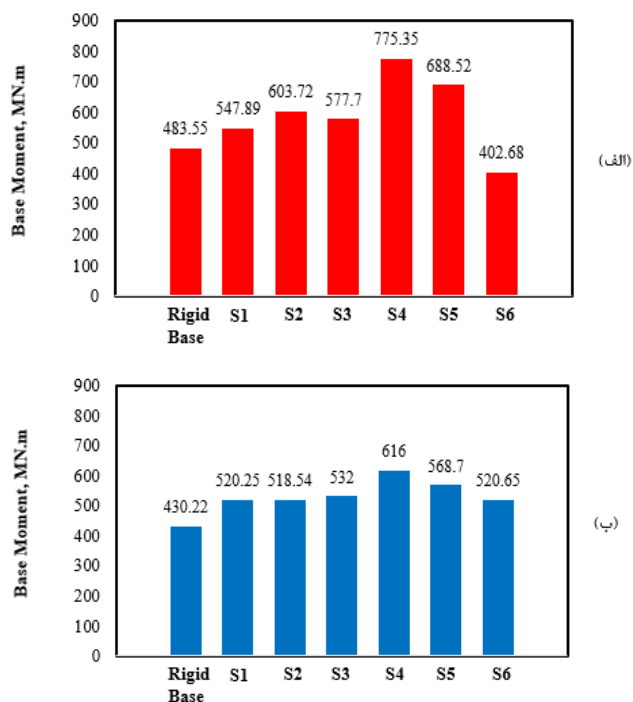
$V_s (m/s)$	$V_p (m/s)$	ν	$\rho (Kg/m^3)$	$E_c (KN/m^2)$	$G (KN/m^2)$	$E (KN/m^2)$	
1149.10	2149.89	0.30	2000	9423077	2692310	7000000	S1
614.25	1149.16	0.30	2000	2692308	769230	2000000	S2
309.22	643.68	0.35	1900	673077	192310	500000	S3
169.36	352.56	0.35	1900	201923	57690	150000	S4
120.82	295.95	0.40	1800	160714	26790	75000	S5
82.54	202.18	0.40	1800	75000	12500	35000	S6

یک مقایسه بین مقادیر اوج برش پایه و لنگر پایه مخزن واقع شده بر روی این خاک‌ها تحت زلزله‌های نامبرده در شکل‌های (۱۵) و (۱۶) ارائه شده‌است. همانطور که از مقایسه‌های انجام شده هم مشخص است، اثر اندرکنش خاک-سازه منجر به یک افزایش یا کاهش در مقادیر ماکزیمم برش پایه و لنگر پایه در مقایسه با وضعیت کف صلب تحت زلزله‌های ال‌سنتر و نورتریج گردیده است. واضح است که اثر اندرکنش خاک-سازه بر پاسخ سازه‌ای مخازن مایع بسیار وابسته به محتوای فرکانسی زلزله است. در ادامه نیز دیگر پاسخ‌های دینامیکی مخزن تحت اثر تپ‌های مختلف خاک ارائه شده است.



شکل ۱۵: مقایسه پاسخ‌های اوج برش پایه در حالت کف صلب و تحت تپ خاک‌های مورد مطالعه.

(الف) زلزله ال‌سنتر و (ب) زلزله نورتریج



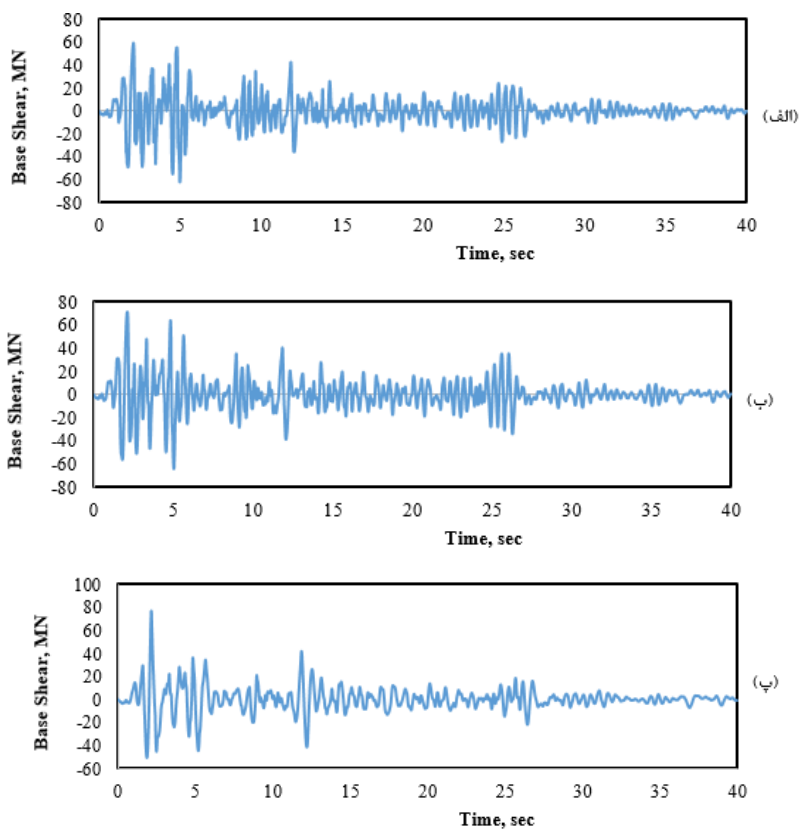
شکل ۱۶: مقایسه پاسخ‌های اوج لنگر پایه در حالت کف صلب و تحت تیپ خاک‌های مورد مطالعه.

الف) زلزله ال سسترو و ب) زلزله نورتریج

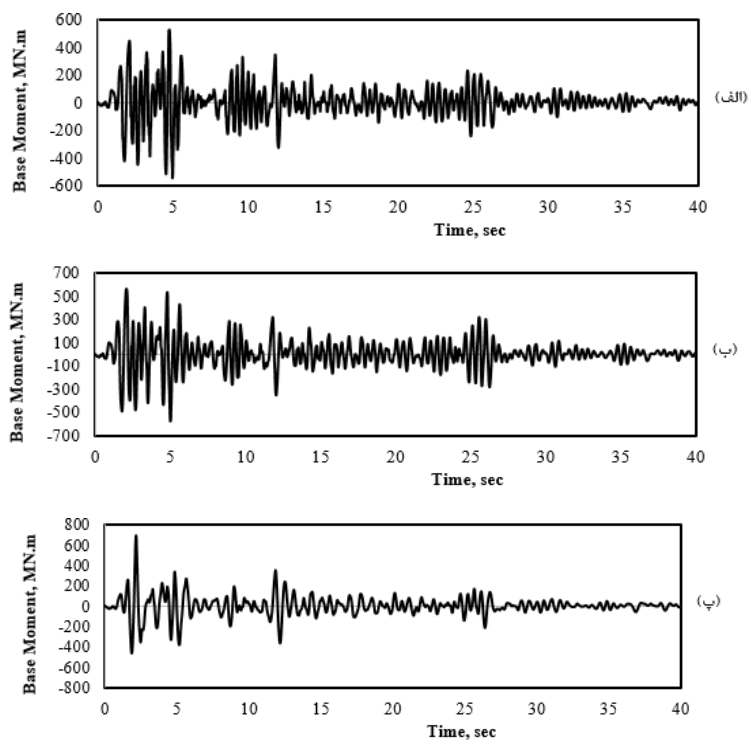
در جدول (۲)، خلاصه‌ی مقایسه‌های مقادیر اوج برش پایه و لنگر پایه مخزن مورد مطالعه نشان داده شده در شکل‌های (۱۵) و (۱۶)، ارائه شده‌اند.

جدول ۲: مقایسه مقادیر اوج برش پایه و لنگر پایه مخزن مورد مطالعه تحت تیپ خاک‌های مورد مطالعه.

لنگر پایه (MN.m)							برش پایه (MN)						
S6	S5	S4	S3	S2	S1	کف صلب	S6	S5	S4	S3	S2	S1	کف صلب
ال سسترو													
402.68	688.52	775.35	577.7	603.72	547.89	483.55	41.08	77.08	92.5	71.18	67.08	61.91	62.92
نورتریج													
520.65	568.7	616	532.49	518.54	520.25	430.22	61.33	66.9	72.65	64.1	65.47	67.42	62.74

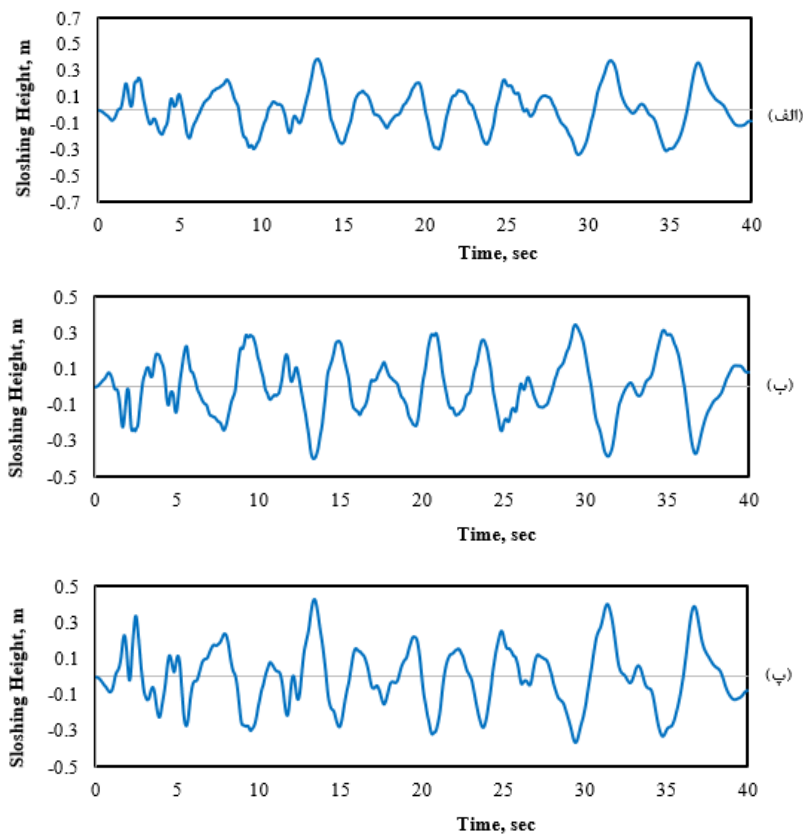


شکل ۱۷: تاریخچه زمانی برش پایه با فونداسیون انعطاف پذیر تحت زلزله ال سنترو برای تیپ خاک‌های مختلف. الف) $S1$ ب) $S3$ پ) $S5$



شکل ۱۸: تاریخچه زمانی لنگر پایه با فونداسیون انعطاف پذیر تحت زلزله ال سنترو برای تیپ خاک‌های مختلف.

الف) $S1$ ب) $S3$ پ) $S5$

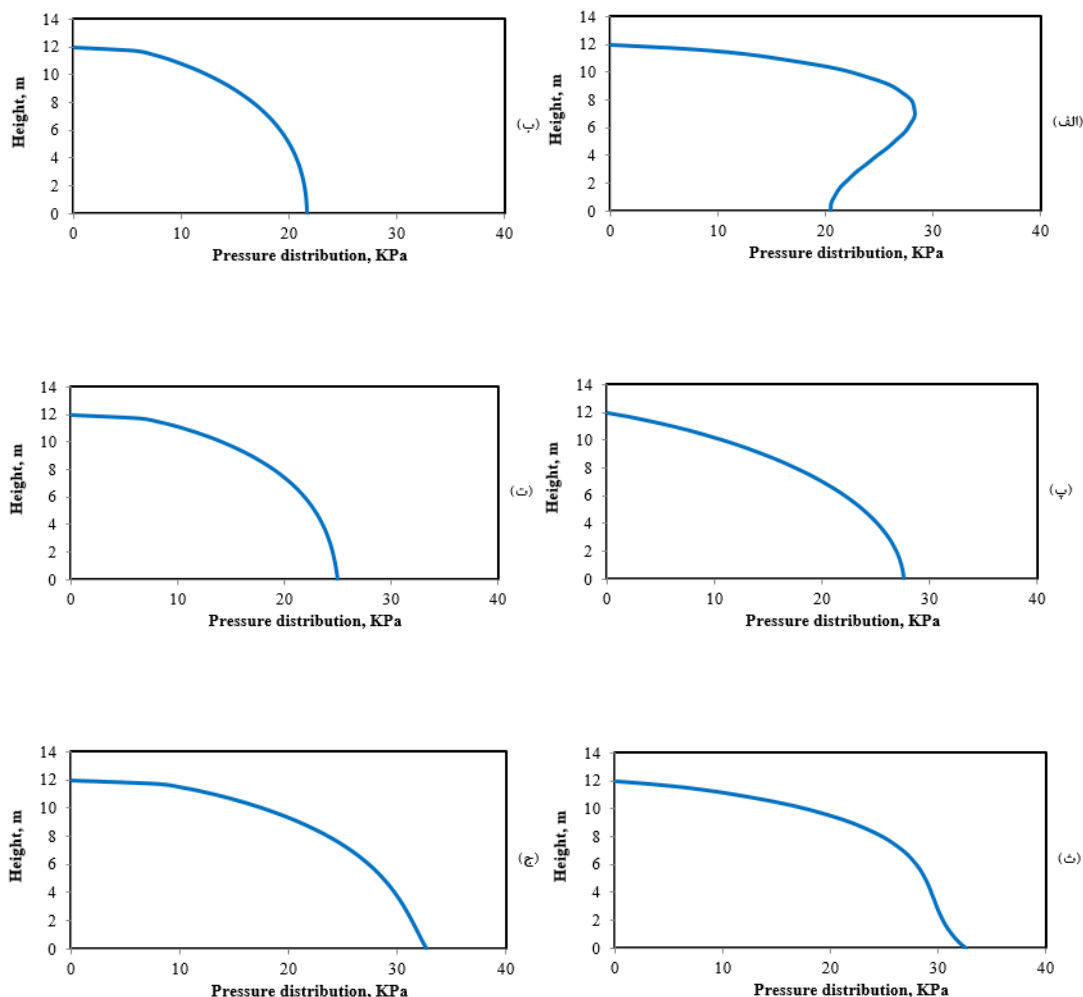


شکل ۱۹: تاریخچه زمانی ارتفاع تلاطمی سطح آزاد مایع در مقطع میانی وجه بزرگ و در مجاورت دیوار مخزن در وضعیت فونداسیون انعطاف پذیر تحت زلزله ال سنترو برای تیپ خاک‌های مختلف. الف) S1 ب) S3 پ) S5

در جدول (۳) مقادیر حداکثر فشار هیدرودینامیکی اعمالی به وجه بزرگتر دیوار مخزن و نیز ارتفاع تلاطم سطح آزاد مایع تحت زلزله ال سنترو و برای تیپ خاک‌های مورد بررسی در مطالعه حاضر، ارائه گردیده است.

جدول ۳: مقایسه مقادیر حداکثر فشار هیدرودینامیکی و ارتفاع تلاطم سطح آزاد مایع مخزن مورد مطالعه برای تیپ خاک‌های مورد بررسی تحت زلزله ال سنترو.

ارتفاع تلاطم سطح آزاد مایع (mm)			فشار هیدرودینامیکی (KPa)					
S5	S3	S1	S6	S5	S4	S3	S2	S1
431	395	391	32.68	32.58	25.03	27.64	21.72	28.36



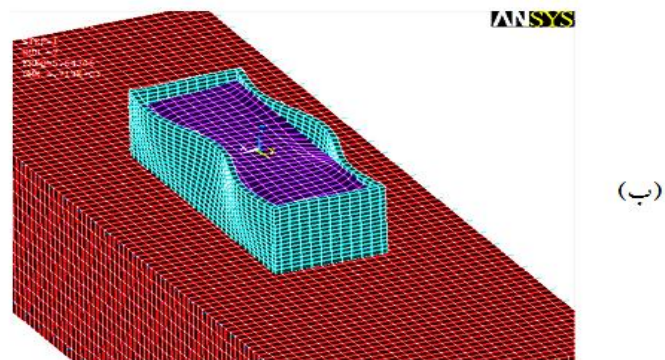
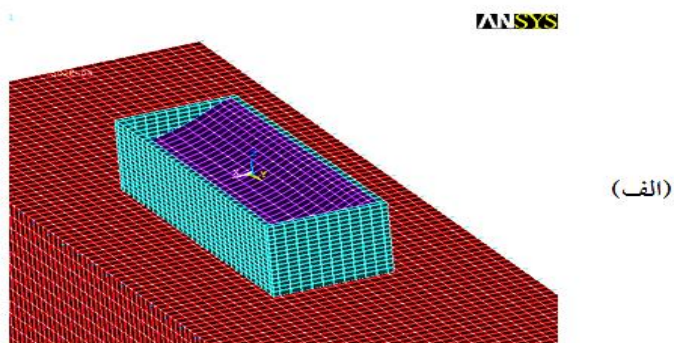
شکل ۲۰: منحنی توزیع فشار هیدرودینامیکی در امتداد ارتفاع مقطع میانی وجه بزرگتر دیوار مخزن، تحت اثر زلزله ال سنتر و در وضعیت دیوار و فونداسیون انعطاف پذیر. الف) S1 ب) S2 پ) S3 ت) S4 ث) S5 ج) S6

۶- تحلیل مودال

در جدول (۴)، نتایج تحلیل مودال سیستم مایع-مخزن-خاک برای مخزن مورد مطالعه و در شکل (۲۱)، شکل مودهای اصلی ضربه‌ای و نوسانی مدل مورد مطالعه نشان داده شده‌اند. اندرکنش خاک و سازه، زمان‌های تناوب اصلی ضربه‌ای را تحت تأثیر قرار داده است. به عبارت دیگر، با کاهش سختی خاک، زمان تناوب ضربه‌ای افزایش یافته است. با این وجود، زمان‌های تناوب اصلی نوسانی تقریباً مستقل از انعطاف‌پذیری فونداسیون هستند که این، بیانگر غیر حساس بودن ارتفاع تلاطمی سطح آزاد مایع نسبت به خصوصیات خاک زیر فونداسیون است. دلیل آن است که در مخازن، زمان‌های تناوب نوسانی در مقایسه با زمان تناوب ضربه‌ای به مراتب بزرگتر می‌باشند. به همین دلیل همانطور که در جدول ۳ نیز نشان داده شده، اثر تغییرات نوع خاک روی ارتفاع تلاطم سطح آزاد مایع برای تیپ‌های مختلف خاک، بسیار محدود بوده است. در شکل ۲۲ طیف پاسخ شتاب زلزله ال سنتر و برای میرایی ۵ درصد نشان داده شده است. محاسبه طیف پاسخ شتاب نظیر زمان تناوب اصلی ضربه‌ای برای تیپ‌های مختلف خاک و مقایسه کیفی نتایج با جدول ۲، می‌تواند به عنوان دلیلی بر صحت نتایج برش پایه و لنگر پایه ماکزیمم تعیین شده در نظر گرفته شود.

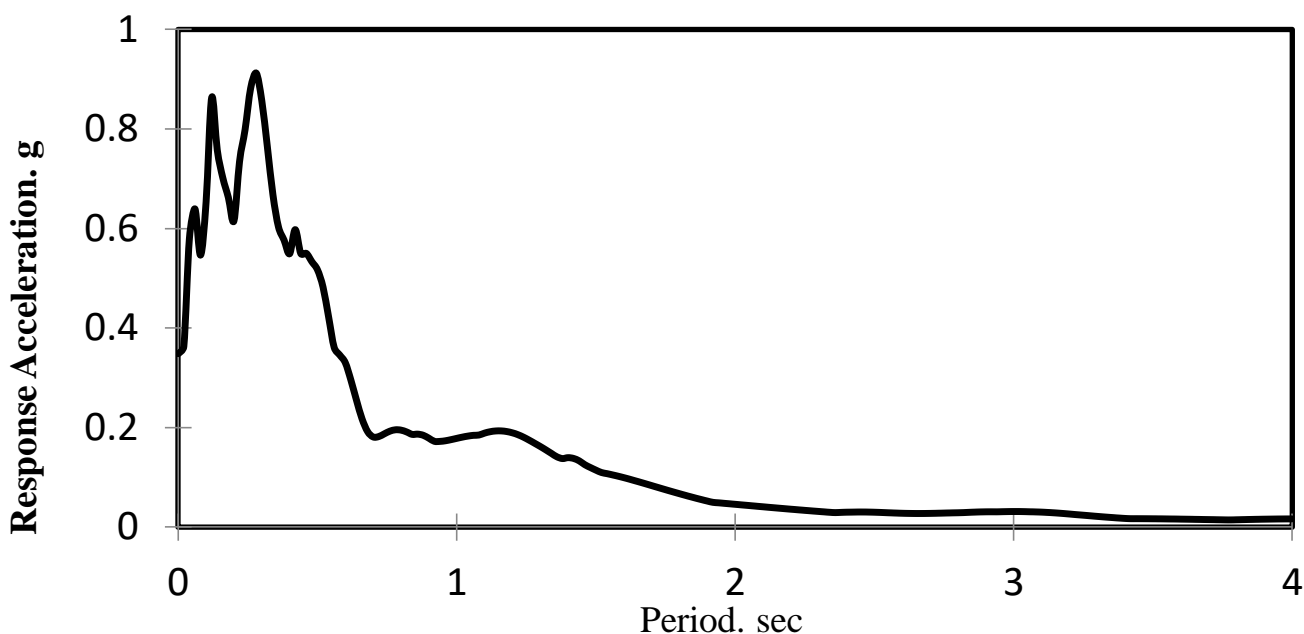
جدول ۴: نتایج تحلیل مودال سیستم مایع-سازه-خاک.

زمان تناوب اصلی نوسانی (sec)			زمان تناوب اصلی ضربه‌ای (sec)					
S5	S3	S1	S6	S5	S4	S3	S2	S1
5.21	5.19	5.19	0.957	0.682	0.522	0.408	0.378	0.371



شکل ۲۱: شکل‌های مود اصلی مخزن مورد مطالعه در وضعیت فونداسیون انعطاف پذیر.

(الف) مود نوسانی (ب) مود ضربه‌ای



شکل ۲۲: طیف پاسخ شتاب زلزله الاسترو برای میرایی ۵ درصد

۷- نتیجه گیری

در این مطالعه، از روش اجزاء محدود برای تحلیل رفتار دینامیکی مخزن مستطیلی نسبتاً پر از سیال تحت تحریک افقی زمین در فضای سه بعدی استفاده شده است. برای تعیین تلاطم سطح آزاد مایع، شرایط مرزی مناسب در نظر گرفته شده و اثرات میرایی به علت مؤلفه‌های ضربه‌ای و نوسانی مخزن با استفاده از روش ریلی در نظر گرفته شده است. خاک فونداسیون به عنوان یک محیط همگن الاستیک با شرایط مرزی لزوج که به منظور شبیه سازی جذب انرژی امواج در نواحی بریده شده آن قرار گرفته، مدل شده است. اثر انعطاف‌پذیری دیواره مخزن بر روی پاسخ دینامیکی سیستم نیز در لحاظ شده است. دو تحریک لرزه‌ای مختلف زمین با شتاب اوج یکسان به منظور بررسی اثر محتوای فرکانسی زلزله بر رفتار لرزه‌ای سیستم مخزن-مایع-خاک، اعمال شده‌اند. اثر شکل‌پذیری خاک زیر فونداسیون بر پاسخ دینامیکی سیستم برای شش نوع تپ خاک مختلف مورد بررسی قرار گرفته است.

برای مدل مورد مطالعه روی تپ‌های مختلف خاک نتایجی از قبیل ماکزیمم برش پایه و لنگر پایه، ارتفاع تلاطم سطح آزاد مایع، منحنی‌های توزیع فشار هیدرودینامیکی اعمالی به دیواره و نیز زمان‌های تناوب اصلی نوسانی و ضربه‌ای به همراه شکل‌های مودی آنها ارائه گردیده‌اند. چون ماکزیمم فشار به علت انعطاف‌پذیری دیوارهای کناری در میانه دیوار رخ می‌دهد، توزیع فشار هیدرودینامیکی در میانه دیوار نشان داده شده است.

نتایج نشان داده‌اند، اندرکنش خاک و سازه، زمان‌های تناوب اصلی ضربه‌ای را تحت تأثیر قرار داده است. به عبارت دیگر با کاهش سختی خاک، زمان تناوب ضربه‌ای سیستم افزایش یافته است. با این وجود، نتایج تحلیل مودال بیانگر این امر بودند که زمان‌های تناوب اصلی نوسانی تقریباً مستقل از انعطاف‌پذیری خاک هستند که این امر، بیانگر غیر حساس بودن ارتفاع تلاطمی سطح آزاد مایع نسبت به خصوصیات خاک زیر فونداسیون است. چون زمان‌های تناوب نوسانی در مقایسه با زمان تناوب ضربه‌ای به مراتب بزرگتر می‌باشند، اثر تغییرات نوع خاک روی ارتفاع تلاطم سطح آزاد مایع برای تپ‌های مختلف خاک، بسیار محدود بوده است.

همچنین نتایج نشان داده‌اند، در نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک-سازه، با تغییر در سختی خاک، ماکزیمم برش پایه و لنگر پایه ممکن است افزایش یا کاهش یابد که این پدیده بسیار وابسته به محتوای فرکانسی زلزله است. شتاب‌نگاشت‌های با محتوای فرکانسی نزدیک به فرکانس اصلی ضربه‌ای مخزن، منجر به افزایش پاسخ‌های ضربه‌ای سیستم شده‌اند.

مراجع

- [1] Luft, R.W. (1984). Vertical accelerations in prestressed concrete tanks. *Journal of Structural Engineering*, Volume (110), Page(706-714).
- [2] Kim, J.K. Koh, H.M. and Kwahk, I.J. (1996). Dynamic response of rectangular flexible fluid containers. *Journal of Engineering Mechanics*, Volume(122), Page(807-817).
- [3] Park, J.H. Koh, H.M. and Kim, J.K. (2000). Seismic isolation of pool-type tanks for the storage of nuclear spent fuel assemblies. *Nuclear Engineering and Design*, Volume(199), Page(143-154).
- [4] Hoskins, L.M. and Jacobsen, L.S. (1934). Water pressure in a tank caused by simulated earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Volume (24), Page(1-32).
- [5] Housner, G.W. The Dynamic behavior of water tanks. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Volume (53), Page(381-387).
- [6] Haroun, M.A. (1984). Stress analysis of rectangular walls under seismically induced hydrodynamic loads. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Volume (74), Page(1031-1041).
- [7] Chen, J.Z. and Kianoush, M.R. (2009). Generalized SDOF system for seismic analysis of concrete rectangular liquid storage tanks. *Engineering Structure*, Volume (31), Page(2426-2435).
- [8] Shekari, M.R. Khaji, N. and Ahmadi, M.T. (2009). A coupled BE-FE study for evaluation of seismically isolated cylindrical liquid storage tanks considering fluid-structure interaction. *Journal of Fluids and Structures*, Volume (25), Page(567-585).
- [9] Hashemi, S. Saadatpour, M.M. and Kianoush, M.R. (2013). Dynamic behavior of flexible rectangular fluid containers. *Thin-Walled Structures*, Volume (66), Page(23-38).
- [10] Hashemi, S. Saadatpour, M.M. and Kianoush, M.R. (2013). Dynamic analysis of flexible rectangular fluid containers subjected to horizontal ground motion. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Volume (42), Page(1637-1656).
- [11] Veletsos, A.S. Tang, Y. (1987). Rocking response of liquid storage tanks. *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, Volume (113), Page(1774-1792).
- [12] Veletsos, A.S. Tang, Y. (1990). Soil-structure interaction effects for laterally excited liquid storage tanks. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Volume(19), Page(473-496).
- [13] Haroun, M.A. and Abou-Izzeddine, W. (1992). Parametric study of seismic soil-tank interaction. I: Horizontal excitation. *ASCE Journal of Structural Engineering*, Volume (118), Page(783-797).
- [14] Cho, K.H. Kim, M.K. Lim, Y.M. and Cho, S.Y. (2004). Seismic response of base-isolated liquid storage tanks considering fluid-structure-soil interaction in time domain. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Volume (24), Page(839-852).
- [15] Livaoglu, R. and Dogangun, A. (2007). Effect of foundation embedment on seismic behavior of elevated tanks considering fluid-structure-soil interaction. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Volume (27), Page(855-863).
- [16] Livaoglu, R. (2008). Investigation of seismic behavior of fluid-rectangular tank-soil/foundation systems in frequency domain. *Soil Dynamic and Earthquake Engineering*, Volume (28), Page(132-146).
- [17] Lysmer, J. and Kuhlmeyer, R.L. (1969). Finite dynamic model for infinite media. *ASCE Journal of Mechanical Engineering*, Volume (95), Page(859-77).
- [18] Koh, H.M. Kim, J.K. and Park, J.H. (1998). Fluid-structure interaction analysis of 3-D rectangular tanks by a variationally coupled BEM-FEM and comparison with test results. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Volume (27), Page(109-124).