

Investigation of the effect of liquid tanks shape on their seismic behavior considering fluid – structure and soil – structure interactions

Reza Lotfi¹, Masoud Mahmoudabadi^{2*}, Ehsan Dehghani³

1-PhD student of structural engineering, Department of engineering, University of Qom, Qom, Iran

2-Assistant Professor, Department of engineering, University of Qom, Qom, Iran

3-Assistant Professor, Department of engineering, University of Qom, Qom, Iran

ABSTRACT

The effect of liquid tanks shape on their seismic behavior considering fluid – structure and soil – structure interactions has been investigated in the current study. Basically, the tank is a structure used to store different types of fluid, and it is also widely used in refineries, sewage treatment plants and factories in the form of on ground and elevated tanks made from concrete and steel. Regarding the application of the huge dynamic and hydrodynamic loads on a tank at the time of earthquake and the great importance of the structure's complete function continuity in the critical situations, it is highly important to study its seismic behavior. Among the different analyses, the seismic analysis of the tank is highly important because by investigating the results obtained from this analysis, a useful recognition of the quality of the tank's behavior at the time of a real earthquake can be obtained. The equivalent rectangular and diamond and elliptical buried liquid tanks have been dynamically analysed under Elcentro and Manjil and Cape earthquakes simultaneously in the longitudinal and transverse directions and the various seismic parameters of the system such as the wave maximum height, wall maximum drift, concrete maximum tensile stresses and soil maximum compressive stress have been compared with each other in above mentioned cases in the current research. By study of the computed results of current research, it was revealed that the liquid tanks shape has a considerable effect on their seismic behavior in the same conditions. It also was revealed that the effect type of various shapes is not same on the various seismic parameters.

ARTICLE INFO

Receive Date: 15 December 2020

Revise Date: 24 February 2021

Accept Date: 30 September 2021

Keywords: Liquid tanks
Seismic behavior
Fluid – structure interaction
Soil – structure interaction

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2021.262235.2309

*Corresponding author: Masoud Mahmoudabadi
Email address: m.mahmoudabadi@qom.ac.ir

بررسی تاثیر شکل مخازن مایع بر رفتار لرزه ای آنها با احتساب اندرکنش های سیال و سازه و خاک و سازه

رضا لطفی^۱، مسعود محمودآبادی^{۲*}، احسان دهقانی^۳

۱- دانشجوی دکتری سازه، دانشگاه قم، قم، ایران

۲- استادیار، دانشگاه قم، قم، ایران

۳- استادیار، دانشگاه قم، قم، ایران

چکیده

در این تحقیق، تاثیر شکل هندسی مخازن مایع بر رفتار لرزه ای آنها با احتساب اندرکنش های سیال و سازه و خاک و سازه مورد مطالعه قرار گرفته است. اساسا مخزن سازه ای است که برای ذخیره انواع مایع به کار می رود و در انواع زمینی و هوایی و نیز بتنی و فولادی کاربرد گسترده ای در تصفیه خانه ها و پالایشگاه ها و کارخانه ها دارد. با توجه به اعمال نیروهای دینامیکی و هیدرودینامیکی عظیم به یک مخزن بزرگ در هنگام زلزله و اهمیت زیاد تداوم عملکرد کامل سازه مذکور در شرایط بحرانی، مطالعه رفتار لرزه ای آن از اهمیت بالایی برخوردار است. در میان تحلیل های گوناگون، تحلیل لرزه ای مخزن دارای اهمیت قابل ملاحظه ای است زیرا با بررسی نتایج حاصل از آن می توان شناخت مفیدی را از کیفیت رفتار مخزن در هنگام وقوع یک زلزله واقعی به دست آورد. در این تحقیق مخازن مایع مدفون مستطیلی و لوزوی و بیضوی معادل، تحت مولفه های طولی و عرضی زلزله های السنتر و منجیل و کیپ به طور همزمان تحت تحلیل دینامیکی قرار گرفته اند و پارامترهای لرزه ای مختلف سیستم مانند ارتفاع ماکزیمم موج، جابه جایی ماکزیمم دیوار، تنش های کششی ماکزیمم بتن و تنش فشاری ماکزیمم خاک در حالت های مذکور با هم مقایسه شده اند. با بررسی نتایج حاصل از این تحقیق، مشخص گردید که در شرایط یکسان، شکل هندسی مخازن مایع بر روی رفتار لرزه ای آنها تاثیر قابل ملاحظه ای می گذارد. همچنین مشخص شد که نوع تاثیر شکل های هندسی مختلف بر روی پارامترهای لرزه ای گوناگون، یکسان نمی باشد.

کلمات کلیدی: مخازن مایع، رفتار لرزه ای، اندرکنش سیال و سازه، اندرکنش خاک و سازه.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://doi.org/10.22065/JSCE.2021.262235.2309	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/JSCE.2021.262235.2309	۱۴۰۱/۰۱/۳۱	۱۴۰۰/۰۷/۰۸	۱۴۰۰/۰۷/۰۸	۱۳۹۹/۱۲/۰۶	۱۳۹۹/۰۹/۲۵
مسعود محمودآبادی m.mahmoudabadi@qom.ac.ir					*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

مخزن سازه ای است که برای ذخیره انواع مایع به کار می رود و در انواع زمینی و هوایی و نیز بتنی و فولادی کاربرد گسترده ای در تصفیه خانه‌ها و پالایشگاهها و کارخانه‌ها دارد. از نظر شکل هندسی، مخازن زمینی شامل انواع مختلفی مانند مستطیلی و لوزوی و بیضوی می شوند.

با توجه به اعمال نیروهای دینامیکی و هیدرودینامیکی عظیم به یک مخزن بزرگ در هنگام زلزله و اهمیت زیاد تداوم عملکرد کامل سازه مذکور در شرایط بحرانی، مطالعه رفتار لرزه ای آن از اهمیت بالایی برخوردار است.

در کشورهای مختلف، آیین نامه‌های مختلفی از قبیل ACI350.3 و Eurocode8.4 برای بارگذاری لرزه ای مخازن آب دارای اشکال گوناگون، مورد استفاده قرار می گیرند. با این حال هیچ کدام از آیین نامه‌های مذکور، بارگذاری لرزه ای مخزن بیضوی را مورد بررسی قرار نداده است لذا در این تحقیق، بررسی رفتار لرزه ای مخزن بیضوی مدفون در مقایسه با مخازن متعارف دیگر به عنوان نوآوری، ارائه گردیده است.

در این تحقیق مخازن مایع مدفون مستطیلی و لوزوی و بیضوی معادل، تحت مولفه‌های طولی و عرضی زلزله‌های السنترو و منجیل و کیپ به طور همزمان تحت تحلیل دینامیکی قرار گرفته اند و پارامترهای لرزه‌ای مختلف سیستم مانند ارتفاع ماکزیمم موج، جابه جایی ماکزیمم دیوار، تنشهای کششی ماکزیمم بتن و تنش فشاری ماکزیمم خاک در حالت‌های مذکور با هم مقایسه شده اند. برای معادلسازی حالت‌های مختلف تحت مطالعه، پارامترهای ذیل در تمام حالات مذکور، یکسان در نظر گرفته شده اند:

- مشخصات فیزیکی مایع
- مشخصات فیزیکی بتن
- مشخصات فیزیکی خاک
- حجم و ارتفاع مایع
- عمق دفن مخزن
- ضخامت کف و دیوار
- میزان کشیدگی مخزن
- اندازه المانهای مدل

۲- تحقیقات گذشته

مسرول و فورتینی در سال ۱۹۸۷ دینامیک موج مایع را در یک مخزن چنبره گونی مطالعه نمودند [۱]. بائور و ایدل در سال ۱۹۸۹ نوسانات مایع را در یک مخزن بیضی گونی تحت مطالعه قرار دادند [۲]. بارنیاک در سال ۱۹۹۷ نوسانات نرمال یک مایع لزج را در یک مخزن استوانه ای مدور افقی که تا قسمتی با مایع پر شده است مورد بررسی قرار داد [۳]. بائور در سال ۱۹۹۹ نوسانات مایع غیرلزج را در مخازن استوانه ای بیضوی افقی مطالعه نمود [۴]. بائور و ایدل در سال ۲۰۰۰ نوسانات آزاد و اجباری یک مایع بی اصطکاک را در یک مخزن مستطیلی طویل با موانع سازه ای در سطح آزاد مایع بررسی نمودند [۵]. چن و کیانوش در سال ۲۰۱۰ سیستم تک درجه آزادی تعمیر یافته را برای تحلیل دینامیکی مخازن مستطیلی بتنی ذخیره مایع بررسی نمودند. آنها نتیجه گرفتند که فرکانس توصیه شده برای استفاده در طراحی دیواره مخزن فرکانسی است که پاسخ دینامیکی ماکزیمم را ایجاد می کند [۶]. شکیب و همکاران در سال ۲۰۱۰ تقاضای لرزه ای مخازن هوایی بتنی مسلح آب را مورد ارزیابی قرار دادند. آنها نتیجه گرفتند که اثرات همزمان افزایش جرم و کاهش سختی قاب

بندی مخزن به افزایش برش پایه و گشتاور واژگونی و جابه جایی و فشار هیدرودینامیکی منجر می گردند [۷]. آلگرن و همکاران در سال ۲۰۱۱ رفتار مخزن هوایی بتنی آب را در معرض حرکت مصنوعی زمین بررسی نمودند. آنها نشان دادند که رویه ساده شده برای ارزیابی خصوصیات و پاسخ دینامیکی مخزن هوایی با استفاده از دو درجه آزادی کافیتز است و از نظر اقتصادی ممکن است قابل کاربرد باشد [۸]. گاوریلیوک و همکاران در سال ۲۰۱۱ روش چندمودی را برای تموج خطی مایع در یک مخزن مخروطی ناقص صلب ارایه نمودند. آنها دریافتند که استفاده از روش چندمودی خطی می تواند یک جایگزین موثر برای ابزار عددی و تحلیلی سنتی برای مطالعه نوسانات همبسته باشد [۹]. مسکوریس و همکاران در سال ۲۰۱۱ مخازن ذخیره مایع را تحت تحلیل لرزه ای قرار دادند. آنها با جدول بندی عوامل متفاوت روابط ریاضی پرحمت را برای محاسبه مولفه های بار قابل اجتناب نمودند [۱۰]. گراژیک و موان در سال ۲۰۱۱ پاسخ سازه ای را به تحریک تموج در مخزن غشایی گاز طبیعی مایع بررسی نمودند. آنها دریافتند که روش فرود محافظه کارانه است اما پراکندگی نتایج ممکن است بسیار زیاد باشد [۱۱]. کیانوش و قائم مقامی در سال ۲۰۱۱ اثر محتوای فرکانسی زلزله را بر رفتار لرزه ای مخازن مستطیلی بتنی مایع با استفاده از روش اجزای محدود با احتساب اندرکنش خاک و سازه بررسی نمودند. آنها نتیجه گرفتند که رفتار دینامیکی سیستم سیال و مخزن و خاک تا حد بالایی به خصوصیات فرکانسی رکورد زلزله حساس می باشد [۱۲]. چاکر و لیواغلو در سال ۲۰۱۲ مدل تحلیلی عملی سریعی را برای تحلیل سیستمهای اندرکنشی خاکریز و مخزن مستطیلی و سیال ارائه دادند. آنها نشان دادند که اندرکنش خاکریز و انعطاف دیواره و اندرکنش سیال به طور قابل ملاحظه ای جابه جاییهای جانبی را تحت تاثیر قرار می دهند [۱۳]. مسلمی و کیانوش در سال ۲۰۱۲ رفتار دینامیکی مخازن زمینی استوانه ای را مورد مطالعه پارامتریک قرار دادند. آنها نتیجه گرفتند که رویه طراحی فعلی در تخمین فشار هیدرودینامیکی بسیار محافظه کارانه می باشد [۱۴]. جبار و پاتل در سال ۲۰۱۲ رفتار لرزه ای مخازن هوایی بتنی مسلح آب را تحت الگوهای قابندی و خصوصیات زلزله متفاوت بررسی نمودند. آنها نشان دادند که پاسخهای سازه به طور فوق العاده ای توسط وجود آب و خصوصیات زلزله تحت تاثیر قرار می گیرند [۱۵]. کاظم و مهرپویا در سال ۲۰۱۲ ارتفاع موج تموج را در مخازن استوانه ای پهن ذخیره نفت با استفاده از روشهای عددی تخمین زدند. آنها با استفاده از رگرسیون آماری رابطه ای را برای ارتفاع موج بر حسب نسبت ارتفاع آب به قطر مخزن به دست آوردند [۱۶]. مادهورار و مادهوری در سال ۲۰۱۳ مقایسه ای میان تحلیلهای استاتیکی و دینامیکی مخزن هوایی آب انجام دادند. آنها نتیجه گرفتند که هنگامی که ظرفیت افزایش می یابد تفاوت میان پاسخهای استاتیکی و دینامیکی افزایش پیدا می کند [۱۷]. رنجبر و همکاران در سال ۲۰۱۳ رفتار لرزه ای مخازن هوایی بتنی آب را مورد ارزیابی قرار دادند. آنها نتیجه گرفتند که پاسخهای سیستم تا حد بالایی توسط پارامترهای سازه ای و مشخصات زلزله از قبیل محتوای فرکانس تحت تاثیر قرار می گیرند [۱۸]. یوسفی و همکاران در سال ۲۰۱۳ مخازن ذخیره را با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه تحت تحلیل استاتیکی و دینامیکی قرار دادند. آنها نتیجه گرفتند که با افزایش ضریب کشسانی و زاویه اصطکاک داخلی و وزن مخصوص خاک و کاهش چسبندگی آن فشار اعمالی بر دیواره مخزن به طور قابل ملاحظه ای افزایش می یابد [۱۹]. کلانی و همکاران در سال ۲۰۱۴ مخازن هوایی ذخیره آب را تحت مولفه های دورانی و انتقالی حرکات زمین تحت تحلیل دینامیکی قرار دادند. آنها نتیجه گرفتند که مولفه های دورانی یک حرکت زمین اثر بیشتری روی جابه جایی افقی و نیروی برشی دارند اما نیروی واکنش قائم را تحت تاثیر قرار نمی دهند [۲۰]. میتال و همکاران در سال ۲۰۱۴ مخزن ذخیره مایع را تحت انفجار با استفاده از رابطه بندی اوپلر لاگرانژ همبسته تحت تحلیل دینامیکی قرار دادند. آنها مشاهده نمودند که تنشها و ارتفاعهای تموج مایع در مخزن با کاهش فاصله مقیاس شده ماده منفجره و افزایش نسبت ارتفاع به شعاع افزایش پیدا می کنند [۲۱]. کتراسوا و همکاران در سال ۲۰۱۴ پاسخ دینامیکی تاریخچه زمانی مخزن استوانه ای را تحت زلزله با در نظر گرفتن اندرکنش سیال و سازه مورد بررسی قرار دادند. آنها دریافتند که دانستن فشارهای عمل کننده بر روی دیواره ها و کف مخازن و فشارهای درون بدنه آنها و فرایند تموج سطح مایع و ارتفاع ماکزیمم موج آن در طی یک زلزله نقشی اساسی را در طراحی مطمئن و پایای مقاوم لرزه ای مخازن بازی می کند [۲۲]. خادیرانایکار و دونداسی در سال ۲۰۱۴ دوره تناوب بنیادی را در مخزن هوایی آب با استفاده از روشهای عددی تخمین زدند. آنها با استفاده از رگرسیون آماری رابطه ای را برای دوره تناوب بنیادی بر حسب ارتفاع پایه مخزن به دست آوردند [۲۳]. تیواری و هورا در سال ۲۰۱۵ سیستم مخزن اینترزه و سیال و خاک لایه بندی شده را تحت تحلیل اندرکنشی قرار دادند. آنها دریافتند که اثر اندرکنش افزایش متغیری را در تنشهای درون اجزای مختلف مخزن ایجاد می نماید [۲۴]. وانگ و اکسیونگ در سال ۲۰۱۵ مخزن ذخیره آب به طور محوری مقید را تحت بارگذاری انفجار تحلیل نمودند. آنها نشان دادند که روش معادله لاگرانژ از روش تک درجه آزادی بهتر می باشد زیرا آن می تواند پیشگوییهای

محافظه کارانه ای را در همه رژیمهای پاسخ فراهم کند [۲۵]. تیواری و هورا در سال ۲۰۱۵ سیستم مخزن هوایی آب اینترزه و سیال و خاک را تحت تحلیل گذرا قرار دادند. آنها دریافتند که فرکانس طبیعی سیستم اندرکنشی کاهش می یابد هنگامی که وزن آب در مخزن افزایش می یابد [۲۶]. لطفی و محمودآبادی در سال ۲۰۱۶ ارتعاش یک مخزن مدفون آب را با احتساب اندرکنشهای آب و سازه و خاک و سازه بررسی نمودند. آنها نتیجه گرفتند که با افزایش ضریب کشسانی و مقاومت فشاری خاک فرکانسهای طبیعی سیستم سازه و خاک و آب افزایش می یابند [۲۷]. سالونک و همکاران در سال ۲۰۱۷ دیواره توپر و توخالی مخزن نفت فولادی دایره ای را برای تنشها در استادپرو تحلیل نمودند. آنها نتیجه گرفتند که چون تنشها در مخزن توخالی کمتر از تنشها در مخزن توپر با ضخامت یکسان هستند مقاطع توپر از مقاطع توخالی موثرتر می باشند [۲۸]. یزدانیان و قاسمی در سال ۲۰۱۷ فرکانسهای بنیادی مخازن مستطیلی بتنی را با استفاده از روش اجزای محدود و آیین نامه‌های تحلیلی مورد مطالعه قرار دادند. آنها نشان دادند که افزایش ضخامت دیوار هیچ اثری روی فرکانسهای موج ندارد در حالیکه فرکانسهای ضربه ای را افزایش می دهد [۲۹]. یزدانیان و قاسمی در سال ۲۰۱۷ فرکانسهای بنیادی مخازن استوانه ای ذخیره به دست آمده از آیین نامه‌ها و روش اجزای محدود را مورد مطالعه قرار دادند. آنها نشان دادند که یک افزایش در تراز مایع به ترتیب به یک افزایش و کاهش در فرکانسهای موج و ضربه ای منجر می گردد [۳۰]. موسی و الدماتی در سال ۲۰۱۷ رویه طراحی را برای مخازن مخروطی فولادی ذخیره مایع تحت بارگذاری لرزه ای ارایه کردند. آنها نتیجه گرفتند که برش پایه ضربه ای ماکزیمم هنگامی که مخزن مایلتر می شود کاهش می یابد در حالیکه برش پایه موج برای مقادیر زاویه شیب بالاتر افزایش پیدا می کند [۳۱]. عالم زاده و شکیب در سال ۲۰۱۷ پاسخ مخازن زمینی فولادی را با حرکت گهواره ای آزاد تحت اثر تحریک افقی زلزله مورد مطالعه عددی قرار دادند. آنها نتیجه گرفتند که پاسخهای نیرویی مخزن مهارنشده نسبت به مخزن مهارشده کاهش و پاسخهای تغییرمکانی بام و جرم صلب سیال افزایش دارند [۳۲]. سن سباستیان و همکاران در سال ۲۰۱۷ مخزن هوایی آب را در یک ساختمان قاب بندی شده تحت تحلیل لرزه ای قرار دادند. آنها نتیجه گرفتند که مخزن مستطیلی آب قرار گرفته نزدیک موقعیت گوشه در ساختمان قاب بندی شده از گزینه‌های دیگر بهتر عمل می کند [۳۳]. گورکالو و همکاران در سال ۲۰۱۷ یک برج آب بتنی مسلح شکافدار ابداعی را در مناطق لرزه ای تحت تحلیل غیرخطی قرار دادند. آنها نتیجه گرفتند که با یک طراحی مناسب تبدیل یک برج آب توپر به یک برج شکافدار می تواند به طور قابل ملاحظه ای شکلپذیری آن را تحت کنش لرزه ای بدون لطمه قابل ملاحظه به ظرفیت باربری آن افزایش دهد [۳۴]. کتراسوا و همکاران در سال ۲۰۱۷ علل ممکن آسیب به مخازن بتنی را با بررسی عددی اندرکنش سیال و سازه و خاک مورد مطالعه قرار دادند. آنها نتیجه گرفتند که وقتی مخزن بتنی روی خاکهای نرم قرار داده می شود اندرکنش سیال و سازه و خاک نقش مهمی را در پاسخ لرزه ای مخازن ذخیره خواهد داشت [۳۵]. نارش در سال ۲۰۱۹ تحلیل لرزه ای مخزن آب اینترزه هوایی را تحت اثر توجع انجام داد. او نتیجه گرفت که به منظور اجتناب از گسیختگی، رجحان زیادی باید به توجع در مناطق مستعد زلزله داده شود و ارتفاع آزاد کافی باید برای کنترل حرکت توجعی سیال تامین شود [۳۶]. جوزف و همکاران در سال ۲۰۱۹ اثر اندرکنش سیال-سازه-خاک را روی رفتار دینامیکی مخازن آب دایره ای مطالعه نمودند. آنها نتیجه گرفتند که خصوصیت خاک، محتوای بسامد زلزله و میزان پرشدگی از آب اثر قابل ملاحظه ای روی رفتار لرزه ای مخازن آب دارند [۳۷]. راوات و همکاران در سال ۲۰۱۹ توجع ناشی از زلزله و فشارهای هیدرودینامیکی را در مخازن صلب ذخیره مایع تحلیل شده به وسیله روشهای سازه ای-آکوستیک همبسته و اوپلری-لاگرانژی مطالعه کردند. آنها نتیجه گرفتند که غیرخطی بودن جابه جایی موج توجع، نقش مهمی را هنگام محاسبه توزیع فشار هیدرودینامیکی روی دیوارهای مخزن صلب بازی نمی کند [۳۸]. بهنام فر و همکاران در سال ۲۰۱۹ تحلیل دینامیکی مخازن بتنی منعطف ذخیره استوانه ای را تحت حرکت افقی و قائم زمین انجام دادند. آنها نتیجه گرفتند که تخمینهای آیین نامه ای سی سی ۳-۳۵۰ متفاوت با تخمینهای روش تحلیلی آنها هستند که به واسطه احتساب ناکافی انعطاف دیوار به وسیله آیین نامه می باشد [۳۹]. اوهلیروا و همکاران در سال ۲۰۱۹ تحلیل دینامیکی مخزن مستطیلی را با استفاده از طیفهای پاسخ انجام دادند. آنها نتیجه گرفتند که هرچه رده زیرخاک یا مقدار شتاب لرزه ای بالاتر باشد، اثرات بار لرزه ای روی خود سازه بزرگتر می باشند [۴۰]. ژانگ و همکاران در سال ۲۰۲۰ اثر مولفه‌های جهتی زلزله‌ها را روی رفتار لرزه ای یک مخزن فولادی مهارنشده مطالعه نمودند. آنها نتیجه گرفتند که مولفه لرزه‌ای قائم، تنش محوری فشاری بالایی را تولید می کند و آن همچنین باعث افزایش برکنش و لغزش کف مخزن به طور قابل ملاحظه ای می گردد [۴۱]. راوات و همکاران در سال ۲۰۲۰ تحلیل لرزه ای مخزن فولادی ذخیره مایع استوانه ای را با استفاده از روش جزء محدود سازه ای-آکوستیک همبسته برای اندرکنش سیال-سازه انجام دادند. آنها نتیجه گرفتند که جابه جایی توجع به وسیله انعطاف

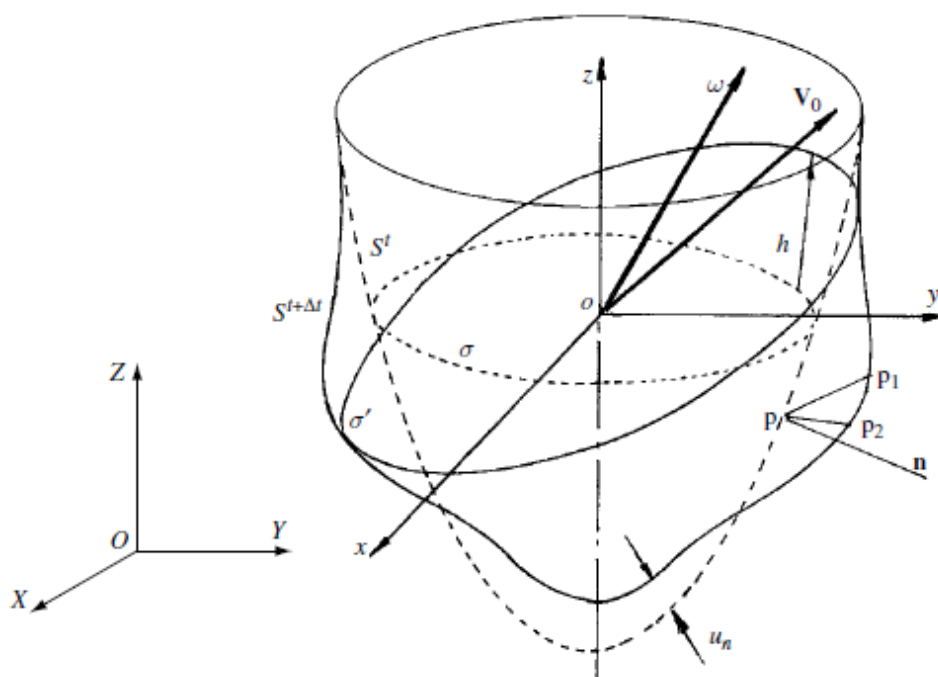
مخزن تحت تاثیر قرار نمی گیرد اما فشار هیدرودینامیکی صلب و مولفه صلب برش پایه با انعطاف مخزن افزایش می یابد [۴۲]. جانی و همکاران در سال ۲۰۲۰ اثرات وضعیت خاک را روی مخزن آب هوایی با استفاده از تحلیل تاریخچه زمانی با سامانه های اسکلت متفاوت مطالعه کردند. آنها نتیجه گرفتند که نوع خاک اثر قابل ملاحظه ای روی اندرکنش خاک و سازه دارد. خاک نرم اندرکنش بیشتری با سازه از خاک متوسط و سنگی دارد [۴۳]. دویی و همکاران در سال ۲۰۲۰ تحلیل تاریخچه زمانی مخزن آب زیرزمینی را برای شدتهای لرزه ای متفاوت انجام دادند. آنها نتیجه گرفتند که روش تاریخچه زمانی برای تضمین ایمنی در برابر نیروهای زلزله لازم می گردد [۴۴]. پاندیت و همکاران در سال ۲۰۲۰ ارزیابی ویژگیهای دینامیکی موج سیال را در مخازن با کف شیبدار انجام دادند. آنها نتیجه گرفتند که پاسخ دینامیکی مشخص می شود که با افزایش در شیب مخزن افزایش می یابد حتی اگر جرم سیال ثابت بماند [۴۵].

۳- بیان مساله

به طور کلی معادلات حاکم بر اندرکنش سیال و سازه در مخزن تحت شتاب، شامل گروههای ذیل می شوند:

- معادلات تعادل
- معادلات رفتار
- شرایط مرزی

فرض می شود که یک مخزن مایع دلخواه، مطابق شکل (۱) تحت شتاب قرار گرفته است.



شکل ۱: مخزن مایع تحت شتاب [۴۶].

معادلات تعادل سیستم مذکور در سه جهت متعامد، به شکل زیر نوشته می شوند:

$$F_x = -\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} - \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} - \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \quad (1)$$

$$F_y = -\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} - \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} - \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \quad (2)$$

$$F_z = -\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} - \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} - \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} \quad (3)$$

در روابط فوق X و Y و Z به ترتیب مختصه طولی و مختصه عرضی و مختصه قائم دستگاه مختصات دکارتی بر حسب متر هستند. F_x و F_y و F_z نیز به ترتیب مولفه طولی و مولفه عرضی و مولفه قائم نیروی حجمی بر حسب نیوتن بر متر مکعب می باشند. همچنین σ_x و σ_y و σ_z به ترتیب مولفه طولی و مولفه عرضی و مولفه قائم تنش محوری بر حسب پاسکال هستند. ضمناً τ_{xy} و τ_{xz} و τ_{yz} به ترتیب مولفه های تنش برشی روی صفحات عمود بر محورهای طولی و عرضی و قائم دستگاه مختصات دکارتی بر حسب پاسکال می باشند.

معادلات رفتار سیستم مذکور نیز در سه جهت متعامد، به شکل زیر نوشته می شوند:

$$\sigma_x = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \left((1-\nu) \frac{\partial u_x}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) \right) \quad (4)$$

$$\sigma_y = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \left((1-\nu) \frac{\partial u_y}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) \right) \quad (5)$$

$$\sigma_z = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \left((1-\nu) \frac{\partial u_z}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} \right) \right) \quad (6)$$

$$\tau_{xy} = \frac{E}{2(1+\nu)} \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right) \quad (7)$$

$$\tau_{xz} = \frac{E}{2(1+\nu)} \left(\frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \right) \quad (8)$$

$$\tau_{yz} = \frac{E}{2(1+\nu)} \left(\frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y} \right) \quad (9)$$

در روابط فوق E و ν به ترتیب ضریب کشسانی بر حسب پاسکال و نسبت پواسون هستند. u_x و u_y و u_z نیز به ترتیب مولفه طولی و مولفه عرضی و مولفه قائم تغییر شکل بر حسب متر می باشند.

همچنین شرایط مرزی سیستم مذکور در سه جهت متعامد، به شکل زیر نوشته می شوند:

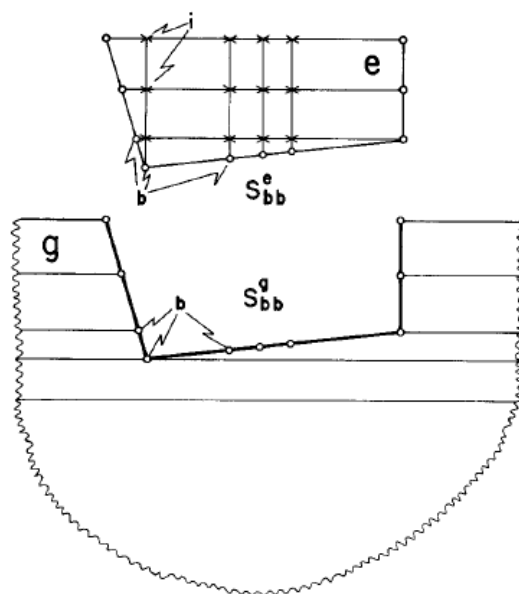
$$f_x = \sigma_x \cos \theta_x + \tau_{xy} \cos \theta_y + \tau_{xz} \cos \theta_z \quad (10)$$

$$f_y = \tau_{xy} \cos \theta_x + \sigma_y \cos \theta_y + \tau_{yz} \cos \theta_z \quad (11)$$

$$f_z = \tau_{xz} \cos \theta_x + \tau_{yz} \cos \theta_y + \sigma_z \cos \theta_z \quad (12)$$

در روابط فوق f_x و f_y و f_z به ترتیب مولفه طولی و مولفه عرضی و مولفه قائم نیروی سطحی بر حسب پاسکال هستند. θ_x و θ_y و θ_z نیز به ترتیب زوایای بردار نرمال سطح با محورهای طولی و عرضی و قائم دستگاه مختصات دکارتی بر حسب رادیان می باشند [۴۶].

برای ارائه معادله حاکم بر اندرکنش خاک و سازه فرض می شود که سیستم خاک و سازه، مطابق شکل (۲) به دو قسمت سازه و خاک تجزیه گردیده است.



شکل ۲: قسمتهای سازه و خاک سیستم [۴۷].

ماتریس سختی دینامیکی سازه از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$S_s = K(1 + 2\zeta i) - \omega^2 M \quad (13)$$

در رابطه فوق ω و ζ به ترتیب سرعت زاویه ای ارتعاش بر حسب رادیان بر ثانیه و نسبت میرایی بحرانی هستند. M و K نیز به ترتیب ماتریس سختی استاتیکی و ماتریس جرم سازه می باشند.

ماتریس سختی دینامیکی مرزی موثر از رابطه زیر تعیین می گردد:

$$S_{be} = S_{bs} - S_{cs}^T S_{is}^{-1} S_{cs} \quad (14)$$

در رابطه فوق S_{is} و S_{bs} و S_{cs} به ترتیب ماتریس سختی دینامیکی داخلی و مرزی و مختلط سازه می باشند که از تجزیه ماتریس سختی دینامیکی سازه به دست می آیند.

ماتریس سختی دینامیکی مرزی آزاد از رابطه زیر به دست می آید:

$$S_{bf} = S_{be} + S_{bg} \quad (15)$$

در رابطه فوق S_{bg} ماتریس سختی دینامیکی مرزی خاک می باشد.

معادله حرکت سیستم خاک و سازه به صورت رابطه ماتریسی زیر نوشته می شود:

$$\begin{bmatrix} S_{is} & S_{cs} \\ S_{cs}^T & S_{bs} + S_{bg} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_i \\ u_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ S_{bf} u_{bf} \end{bmatrix} \quad (16)$$

در رابطه فوق u_i و u_b و u_{bf} به ترتیب ماتریس جابه جایی داخلی و مرزی و مرزی آزاد می باشند [۴۷].

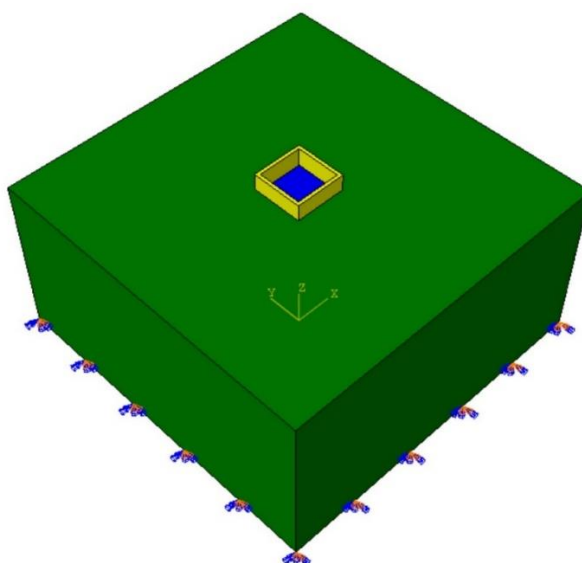
به طور کلی کارکرد یک مخزن، ذخیره حجم مشخصی از سیال در درون خود به صورت ایمن است. طبیعتاً تامین این حجم مشخص سیال با فرض ارتفاع یکسان آن، با شکلهای هندسی مختلفی برای پلان مخزن، ممکن می باشد.

با توجه به اینکه عملاً زلزله در هر جهت دلخواهی ممکن است به مخزن اعمال شود لذا تاثیر شکل هندسی مخزن بر رفتار لرزه ای آن به دلیل عدم تقارن بارگذاری، اهمیت بیشتری می یابد.

هدف این تحقیق آن است که تاثیر شکل هندسی مخازن مایع را بر رفتار لرزه ای آنها با فرض یکسان بودن سایر شرایط، با احتساب اندرکنش‌های سیال و سازه و خاک و سازه مورد مطالعه قرار دهد.

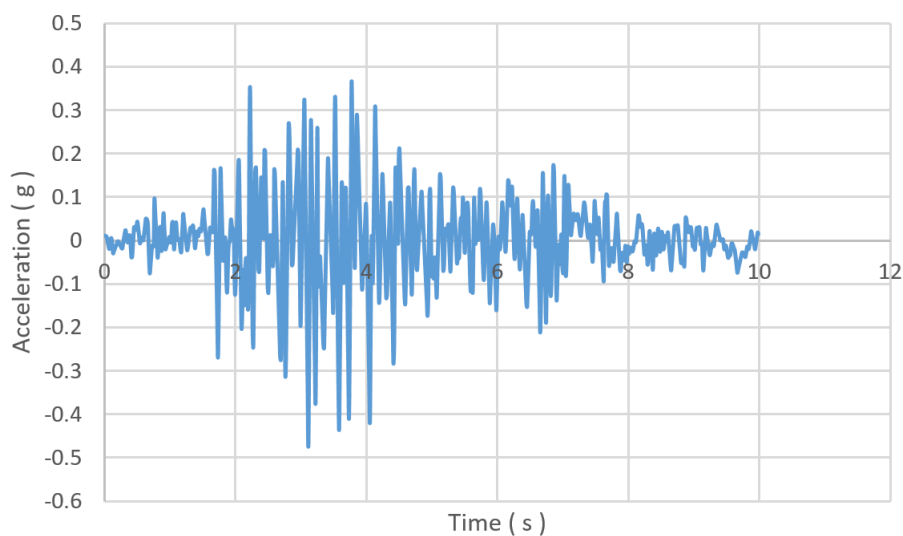
۴- صحت سنجی روش

برای صحت سنجی روش تحقیق، یک مخزن بتنی مدفون مربعی به عرض ۳ متر و ارتفاع ۴ متر با ارتفاع آب ۲/۵ متر و عمق دفن ۳ متر مطابق شکل (۳) تحت مولفه عرضی زلزله کوینا مورد تحلیل دینامیکی قرار گرفته است.



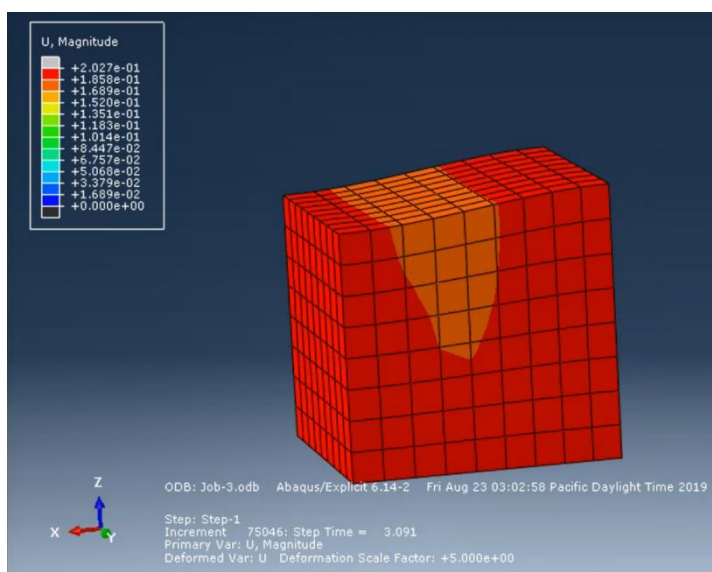
شکل ۳: مخزن بتنی مربعی مدفون.

شتابنگاشت مولفه عرضی زلزله کوینا در شکل (۴) نمایش داده شده است.



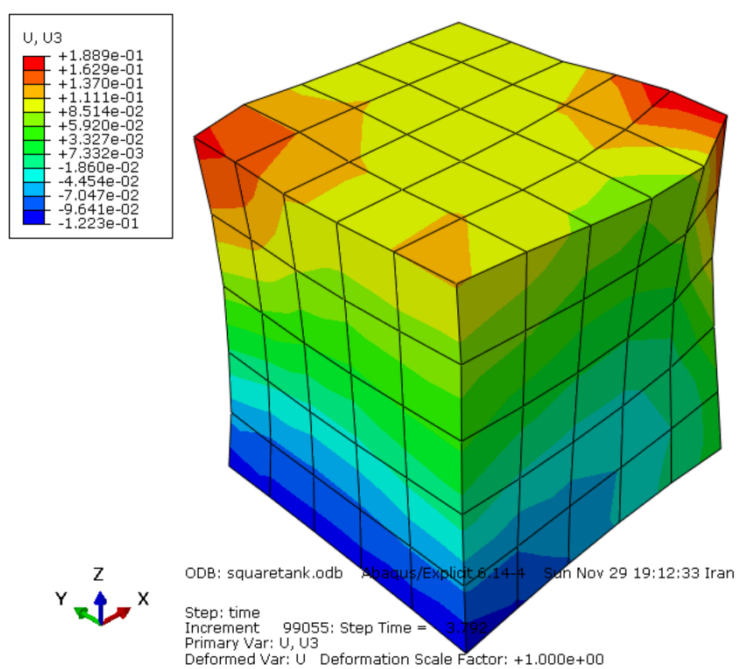
شکل ۴: شتابنگاشت مولفه عرضی زلزله کوینا.

کرم پور در سال ۲۰۱۹ مطابق شکل (۵) ارتفاع ماکزیمم موج مخزن مذکور را تحت زلزله فوق الذکر برابر با ۲۰ سانتیمتر به دست آورده است [۴۸].



شکل ۵: نمودار ارتفاع ماکزیمم موج تحت مولفه عرضی زلزله کوبینا [۴۸].

در تحقیق حاضر با استفاده از نرم افزار ABAQUS، نمودار تموج سطح آزاد آب در مخزن مذکور تحت زلزله فوق الذکر مطابق شکل (۶) به دست آمده است.



شکل ۶: نمودار تموج سطح آزاد آب.

در تحقیق حاضر، مطابق شکل (۶) ارتفاع ماکزیمم موج برابر با ۱۹ سانتیمتر به دست آمده است که با دقت مناسبی برابر با مقدار ۲۰ سانتیمتر مرجع (۴۸) می باشد.

۵- روش تحقیق

برای مدلسازی رفتار مصالح آب و خاک و بتن در نرم افزار ABAQUS به ترتیب از مدل‌های حالت خطی و پلاستیک موهر کلمب و پلاستیک آسیب دیده استفاده شده است.

در این تحقیق چگالی و سرعت صوتی و لزجت دینامیکی آب درون مخزن به ترتیب برابر با ۱۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب و ۱۵۰۰ متر بر ثانیه و ۰/۰۰۱ پاسکال ثانیه فرض گردیده اند.

همچنین چگالی و چسبندگی و ضریب کشسانی و نسبت پواسون خاک اطراف مخزن به ترتیب برابر با ۲۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب و ۵۰۰۰۰ پاسکال و ۱۰۰ مگاپاسکال و ۰/۳ در نظر گرفته شده اند. زاویه اصطکاک داخلی و زاویه اتساع خاک نیز به ترتیب برابر با ۳۰ درجه و ۱۰ درجه فرض گردیده اند.

ضمناً چگالی و ضریب کشسانی و نسبت پواسون بتن مخزن به ترتیب برابر با ۲۵۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب و ۲۸۳۰۵ مگاپاسکال و ۰/۲ در نظر گرفته شده اند. زاویه اتساع و پارامتر لزجت و ضریب شکل و ضریب گسیختگی و برون محوری بتن نیز به ترتیب برابر با ۳۰ درجه و ۰/۰۰۱ و ۰/۶۶۷ و ۱/۱۶ و ۰/۱ فرض گردیده اند.

برای مطالعه تاثیر شکل هندسی مخازن مایع بر رفتار لرزه ای آنها، سه مخزن مدفون معادل با شکل‌های مستطیلی و لوزوی و بیضوی در نظر گرفته شده اند که مشخصات آنها در جدول (۱) درج گردیده اند.

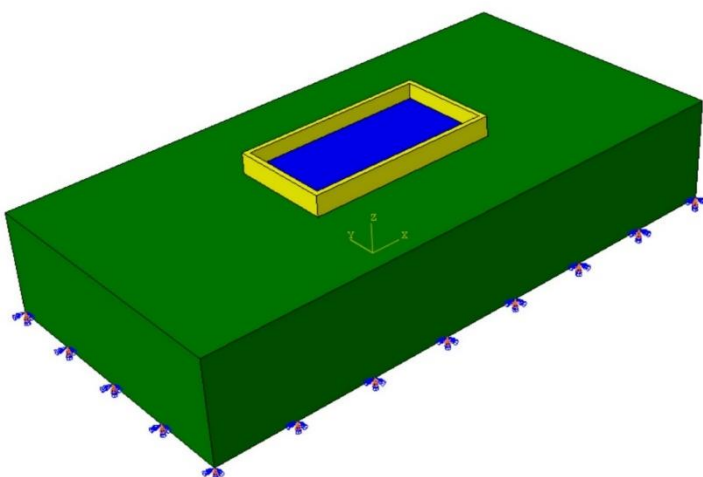
جدول ۱: مشخصات مخازن تحت مطالعه.

مخزن	طول آب (متر)	عرض آب (متر)	طول خاک (متر)	عرض خاک (متر)
مستطیلی	۱۷/۸	۸/۹	۵۴/۴	۲۷/۷
لوزوی	۲۵/۲	۱۲/۶	۷۷/۸۳۶	۳۸/۹۱۸
بیضوی	۲۰	۱۰	۶۱	۳۱

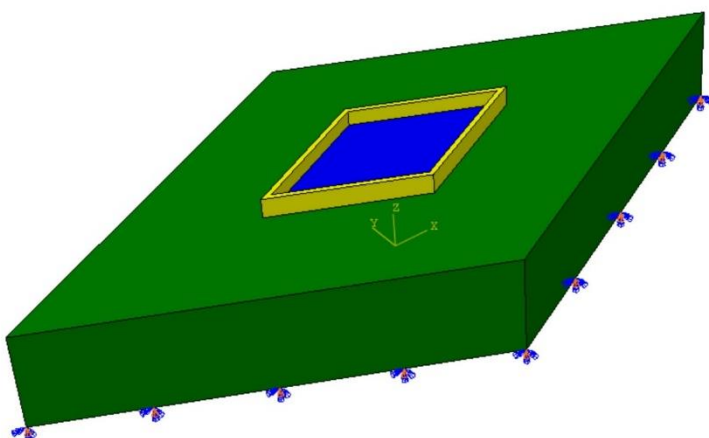
لازم به ذکر است که معمولاً در مدلسازی اندرکنش خاک و مخزن روباز، طول و عرض و ارتفاع خاک به ترتیب برابر با سه برابر طول آب و سه برابر عرض آب و دو برابر ارتفاع آب در نظر گرفته می شوند.

در همه حالات، ارتفاع آب و ارتفاع خاک و عمق دفن و ارتفاع آزاد به ترتیب برابر با ۵ متر و ۱۰ متر و ۵ متر و ۱/۵ متر فرض گردیده اند. همچنین ارتفاع و ضخامت دیوار و ضخامت کف مخزن به ترتیب برابر با ۷ متر و ۰/۵ متر و ۰/۵ متر در نظر گرفته شده اند.

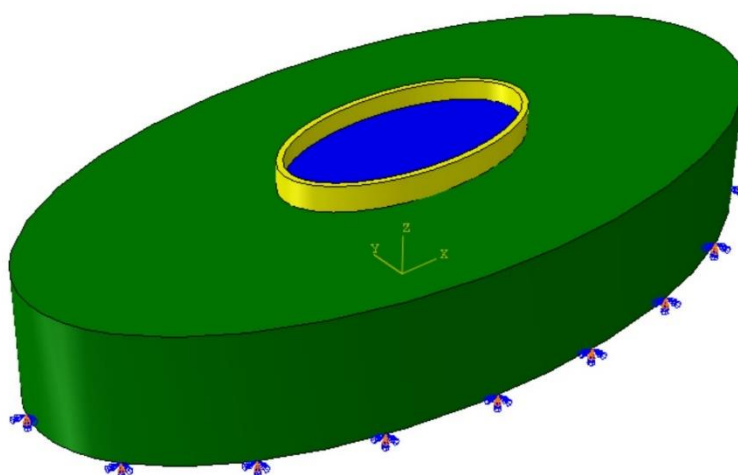
سیستم‌های مستطیلی و لوزوی و بیضوی تحت مطالعه به ترتیب در شکل‌های (۷) و (۸) و (۹) نمایش داده شده اند.



شکل ۷: سیستم مستطیلی.



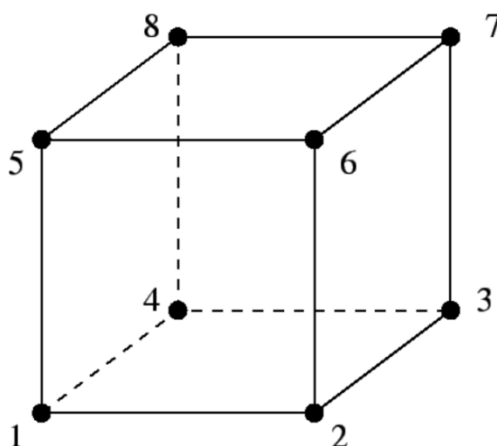
شکل ۸: سیستم لوزوی.



شکل ۹: سیستم بیضوی.

برای تعریف شرایط تکیه گاهی در سطح زیرین خاک، دوران حول همه محورهای مختصات و نیز جابه جایی در جهت قائم گیردار شده اند. رفتار اندرکنشی سطوح تماس آب و بتن از نوع بی اصطکاک تعریف شده است. همچنین رفتار اندرکنشی سطوح تماس خاک و بتن از نوع با اصطکاک با ضریب اصطکاک برابر با $0/2$ تعریف گردیده است.

برای مدلسازی سیستم تحت مطالعه با روش اجزای محدود، مطابق شکل (۱۰) از المان C3D8R استفاده شده است.



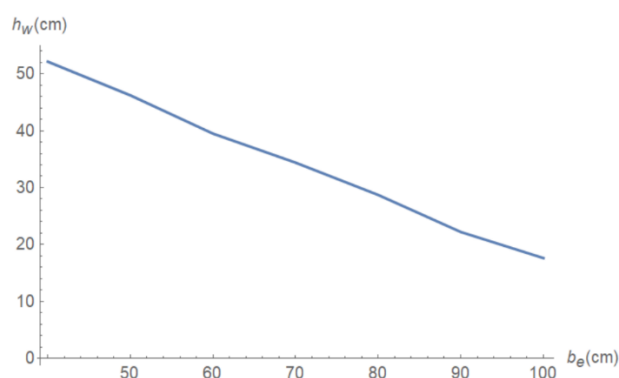
شکل ۱۰: المان C3D8R نرم افزار آباکوس [۴۹].

این المان مکعبی هشت گرهی، در هر گره دارای سه درجه آزادی انتقالی در جهت محورهای مختصات و سه درجه آزادی دورانی حول محورهای مختصات می باشد. المان مذکور خطی یا مرتبه اول است یعنی در هر جهت با درون یابی خطی از جابه جاییها و دورانیهای گرهی، جابه جاییها و دورانیهای سایر نقاط آن محاسبه می گردند.

المان C3D8R برای انتگرال گیری مقادیر گوناگون در حجم هر المان از روش انتگرال گیری کاهش یافته استفاده می نماید. در این تحقیق برای مش بندی سیستم از رابطه بندی انطباقی استفاده شده است. مش بندی انطباقی ویژگیهای تحلیلهای لاگرانژی و اویلری خالص را ترکیب می کند و اجازه استقلال حرکت المان را از ماده می دهد [۴۹].

معمولاً در مدلسازی مخازن با روش اجزای محدود، جهت نیل به دقت کافی، اندازه المان برابر با مینیمم مقادیر کوچکترین ضخامت بتن و $0/1$ کوچکترین بعد آب در نظر گرفته می شود. در تحقیق حاضر بر اساس معیار مذکور، اندازه المان برابر با $0/5$ متر در نظر گرفته شده است.

آنالیز حساسیت مش بندی برای سیستم مستطیلی، تحت اعمال همزمان مولفه‌های طولی و عرضی زلزله‌سنجی انجام گردیده است. در شکل (۱۱) نمودار ارتفاع ماکزیمم موج بر حسب اندازه المان، در حالت مذکور نمایش داده شده است.



شکل ۱۱: نمودار ارتفاع ماکزیمم موج بر حسب اندازه المان در سیستم مستطیلی.

نمودار شکل (۱۱) به صورت خطی درآمده است که می توان علت آن را وجود رفتار پلاستیک و غیر خطی در اجزای تشکیل دهنده سیستمهای مورد مطالعه برشمرد.

فشار استاتیکی آب بر دیوار مخزن از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$q_w = \gamma_w d_w \quad (17)$$

در رابطه فوق γ_w و d_w به ترتیب وزن مخصوص آب بر حسب نیوتن بر متر مکعب و فاصله از سطح آزاد آب بر حسب متر هستند. همچنین فشار استاتیکی خاک بر دیوار مخزن از رابطه زیر تعیین می گردد:

$$q_s = \gamma_s d_s (1 - \sin \varphi) \quad (18)$$

در رابطه فوق γ_s و d_s و φ به ترتیب وزن مخصوص خاک بر حسب نیوتن بر متر مکعب و فاصله از سطح آزاد خاک بر حسب متر و زاویه اصطکاک داخلی خاک بر حسب رادیان می باشند [۵۰].

برای بارگذاری دینامیکی سیستمها، شتابنگاشت مولفه های طولی و عرضی زلزله های السنتر و منجیل و کیپ به طور همزمان به خاک اطراف مخازن اعمال شده اند. شایان ذکر است که مولفه طولی هر زلزله در جهت X و مولفه عرضی آن در جهت Y به سیستم اعمال گردیده است.

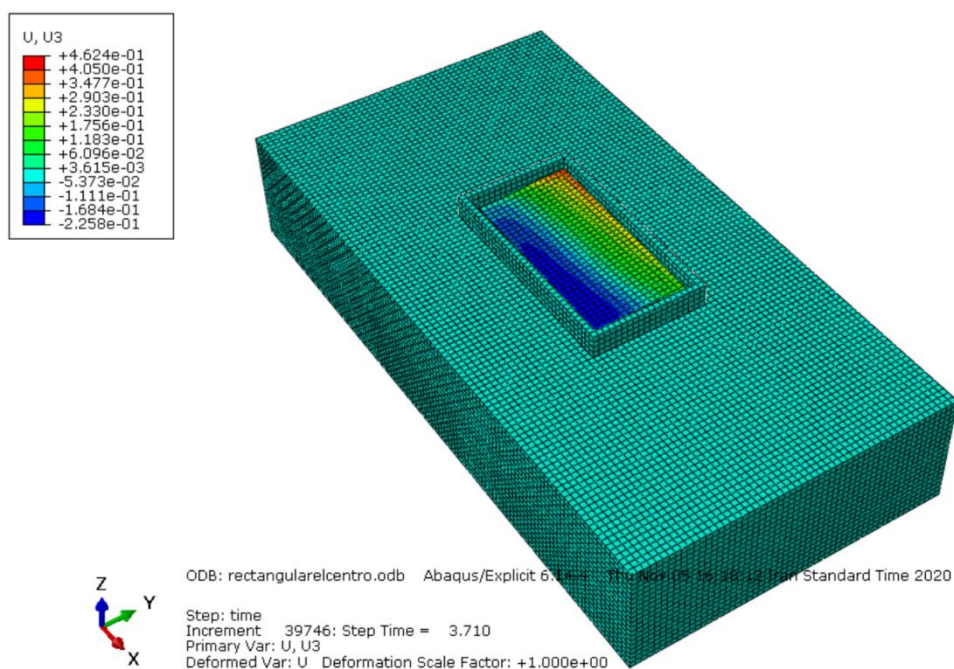
مشخصات زلزله های اعمالی به مخازن تحت مطالعه در جدول (۲) درج گردیده اند.

جدول ۲: مشخصات زلزله های اعمالی به مخازن تحت مطالعه.

زمان تداوم (ثانیه)	جابه جایی بیشینه (متر)	سرعت بیشینه (متر بر ثانیه)	شتاب بیشینه (متر بر مجذور ثانیه)	تاریخ	ایستگاه	زلزله
۳۹/۹۹	۰/۱۳	۰/۲۹۷	۳/۱۲۹	۱۹۴۰/۵/۱۹	امپریال ولی	السنتر و طولی
۳۹/۹۷	۰/۲۷۵	۰/۲۹۲	۲/۱۴۸	۱۹۴۰/۵/۱۹	امپریال ولی	السنتر و عرضی
۵۳/۴۶	۰/۱۴۹	۰/۴۲۵	۵/۱۴۶	۱۹۹۰/۶/۲۰	آب بر	منجیل طولی
۴۵/۹۴	۰/۲۲۳	۰/۵۰۸	۴/۹۶۹	۱۹۹۰/۶/۲۰	آب بر	منجیل عرضی
۲۹/۹۴	۰/۳۹۷	۱/۲۵۱	۱۴/۹۷۳	۱۹۹۲/۴/۲۵	کیپ مندوسینو	کیپ طولی
۲۹/۹۴	۰/۱۲۶	۰/۴۱۳	۱۰/۳۹۵	۱۹۹۲/۴/۲۵	کیپ مندوسینو	کیپ عرضی

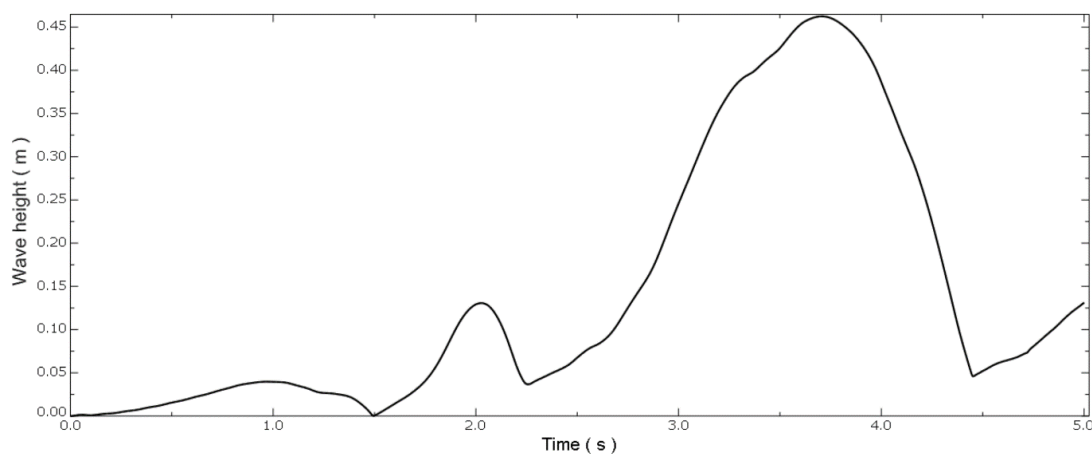
پس از اعمال بارهای استاتیکی و دینامیکی به سیستمها، آنها در نرم افزار ABAQUS تحت تحلیل صریح دینامیکی قرار گرفته اند و نتایجی از قبیل جابه جایی ماکزیمم و تنش ماکزیمم در نقاط مختلف سیستم استخراج گردیده اند.

به عنوان نمونه، توج آب درون مخزن مستطیلی تحت مولفه های طولی و عرضی زلزله السنتر در شکل (۱۲) نمایش داده شده است.



شکل ۱۲: موج آب درون مخزن مستطیلی.

همچنین به عنوان نمونه، نمودار تاریخچه زمانی ارتفاع موج در مخزن مستطیلی، تحت اعمال همزمان مولفه‌های طولی و عرضی زلزله السنترو در شکل (۱۳) نمایش داده شده است.



شکل ۱۳: نمودار تاریخچه زمانی ارتفاع موج در مخزن مستطیلی تحت مولفه‌های همزمان زلزله السنترو.

برای مقایسه، نتایج مهم تحلیل دینامیکی سیستمهای مستطیلی و لوزوی و بیضوی تحت مولفه‌های طولی و عرضی زلزله‌های السنترو و منجیل و کیپ به ترتیب در جداول (۳) و (۴) و (۵) درج گردیده اند.

جدول ۳: نتایج مهم تحلیل دینامیکی سیستمهای مختلف تحت مولفه‌های طولی و عرضی زلزله السنترو.

نوع سیستم	ارتفاع ماکزیمم موج (سانتیمتر)	جابه جایی ماکزیمم دیوار (میلیمتر)	تنش کششی افقی ماکزیمم بتن (مگاپاسکال)	تنش کششی قائم ماکزیمم بتن (مگاپاسکال)	تنش افقی ماکزیمم خاک (مگاپاسکال)
مستطیلی	۴۶/۲	۱۳/۲	۰/۵۴۷	۰/۲۵۱	۰/۱۰۳
لوزوی	۴۲/۷	۶/۷	۲/۳۴۷	۱/۰۷۴	۰/۱۰۹
بیضوی	۳۷/۲	۲/۵	۲/۵۸۶	۱/۸۷۲	۰/۱۰۲

جدول ۴: نتایج مهم تحلیل دینامیکی سیستمهای مختلف تحت مولفه‌های طولی و عرضی زلزله منجیل.

نوع سیستم	ارتفاع ماکزیمم موج (سانتیمتر)	جابه جایی ماکزیمم دیوار (میلیمتر)	تنش کششی افقی ماکزیمم بتن (مگاپاسکال)	تنش کششی قائم ماکزیمم بتن (مگاپاسکال)	تنش افقی ماکزیمم خاک (مگاپاسکال)
مستطیلی	۸۰/۸۶	۱۳/۱۳	۰/۸۹۲	۰/۳۰۵	۰/۱۰۳
لوزوی	۶۵/۳۵	۱۰/۴۶	۲/۳۴۲	۱/۰۴	۰/۱۰۹
بیضوی	۵۸/۵	۸/۲	۲/۷۴۴	۲/۵۳۹	۰/۱۰۲

جدول ۵: نتایج مهم تحلیل دینامیکی سیستمهای مختلف تحت مولفه‌های طولی و عرضی زلزله کیپ.

نوع سیستم	ارتفاع ماکزیمم موج (سانتیمتر)	جابه جایی ماکزیمم دیوار (میلیمتر)	تنش کششی افقی ماکزیمم بتن (مگاپاسکال)	تنش کششی قائم ماکزیمم بتن (مگاپاسکال)	تنش افقی ماکزیمم خاک (مگاپاسکال)
مستطیلی	۹۴/۶۷	۱۸/۶۲	۱/۰۹۶	۱/۴۹۷	۰/۱۰۳
لوزوی	۷۰/۴۲	۱۲/۹۴	۲/۳۲۶	۱/۸۰۸	۰/۱۰۹
بیضوی	۷۰/۷۱	۵/۷۳	۲/۶۱۳	۲/۰۷۸	۰/۱۰۲

۹- نتیجه گیری

با بررسی نتایج حاصل از این تحقیق، مشخص گردید که در شرایط یکسان، شکل هندسی مخازن مایع بر روی رفتار لرزه‌ای آنها تاثیر قابل ملاحظه‌ای می‌گذارد. همچنین مشخص شد که نوع تاثیر شکل‌های هندسی مختلف بر روی پارامترهای لرزه‌ای گوناگون، یکسان نمی‌باشد.

با بررسی نتایج متناظر مندرج در جداول (۳) و (۴) و (۵)، نتایج زیر به دست آمده‌اند:

- ارتفاع ماکزیمم موج، به طور میانگین، برای مخازن مستطیلی و لوزوی و بیضوی به ترتیب برابر با ۷۳/۹۱ سانتیمتر و ۵۹/۴۹ سانتیمتر و ۵۵/۴۷ سانتیمتر محاسبه شد لذا از دیدگاه کنترل ارتفاع موج، مخزن بیضوی بهترین عملکرد را دارد.
- جابه جایی ماکزیمم دیوار، به طور میانگین، برای مخازن مستطیلی و لوزوی و بیضوی به ترتیب برابر با ۱۴/۹۸۳ میلیمتر و ۱۰/۳۳۳ میلیمتر و ۵/۴۷۷ میلیمتر تعیین گردید لذا از دیدگاه کنترل جابه جایی دیوار، مخزن بیضوی بهترین عملکرد را دارد.
- تنش کششی افقی ماکزیمم بتن، به طور میانگین، برای مخازن مستطیلی و لوزوی و بیضوی به ترتیب برابر با ۰/۸۴۵ مگاپاسکال و ۲/۳۳۸ مگاپاسکال و ۲/۶۴۸ مگاپاسکال به دست آمد لذا از دیدگاه کنترل تنش کششی افقی بتن، مخزن مستطیلی بهترین عملکرد را دارد.
- تنش کششی قائم ماکزیمم بتن، به طور میانگین، برای مخازن مستطیلی و لوزوی و بیضوی به ترتیب برابر با ۰/۶۸۴ مگاپاسکال و ۱/۳۰۷ مگاپاسکال و ۲/۱۶۳ مگاپاسکال به دست آمد لذا از دیدگاه کنترل تنش کششی قائم بتن، مخزن مستطیلی بهترین عملکرد را دارد.

۵) تنش افقی ماکزیمم خاک، به طور میانگین، برای مخازن مستطیلی و لوزوی و بیضوی به ترتیب برابر با 0.103 مگاپاسکال و 0.109 مگاپاسکال و 0.102 مگاپاسکال به دست آمد لذا از دیدگاه کنترل تنش افقی خاک، مخازن مستطیلی و لوزوی و بیضوی، تقریباً عملکرد مشابهی دارند.

مراجع

- [1] Meserole, J., Fortini, A. (1987). Slosh dynamics in a toroidal tank, *J. Spacecraft*, Volume (24), Page (523–531).
- [2] Bauer, H., Eidel, W. (1989). Liquid oscillations in a prolate spheroidal container, *Ing. Archiv.*, Volume (59), Page (371–381).
- [3] Barnyak, O. (1997). Normal oscillations of a viscous liquid partially filling a circular horizontal channel, *Int. Appl. Mech.*, Volume (33), Page (335–343).
- [4] Bauer, H. (1999). Oscillations of non-viscous liquid in various container geometries, *Forschungsbericht LRT-WE*, Volume (), Page ().
- [5] Bauer, H., Eidel, W. (2000). Free and forced oscillations of a frictionless liquid in a long rectangular tank with structural obstructions at the free liquid surface, *Arch. Appl. Mech.*, Volume (70), Page (550–560).
- [6] Chen, J., Kianoush, M. (2010). Generalized sdof system for dynamic analysis of concrete rectangular liquid storage tanks effect of tank parameters on response, *Canadian journal of civil engineering*, Volume (37), Page (262-272).
- [7] Shakib, H., Omidinasab, F., Ahmadi, M. (2010). Seismic demand evaluation of elevated reinforced concrete water tanks, *Journal of civil engineering*, Volume (8), Page (204-220).
- [8] Algreane, G., Osman, S., Karim, O., Kasa, A. (2011). Behaviour of elevated concrete water tank subjected to artificial ground motion, *Journal of geotechnical engineering*, Volume (16), Page (387-406).
- [9] Gavriluk, I., Hermann, M., Lukovsky, I., Solodun, O., Timokha, A. (2012). Multimodal method for linear liquid sloshing in a rigid tapered conical tank, *Engineering computations journal*, Volume (29), Page (198-220).
- [10] Meskouris, K., Holtschoppen, B., Butenweg, C., Rosin, J. (2011). Seismic analysis of liquid storage tanks, *International workshop on active tectonics and earthquake geology and archaeology and engineering*, Corinth.
- [11] Graczyk, M., Moan, T. (2011). Structural response to sloshing excitation in membrane lng tank, *Journal of offshore mechanics and arctic engineering*, Volume (133), Page (1-9).
- [12] Kianoush, M., Ghaemmaghami, A. (2011). The effect of earthquake frequency content on the seismic behavior of concrete rectangular liquid tanks using the finite element method incorporating soil structure interaction, *Engineering structures journal*, Volume (33), Page (2186-2200).
- [13] Cakir, T., Livaoglu, R. (2012). Fast practical analytical model for analysis of backfill rectangular tank fluid interaction systems, *Soil dynamics and earthquake engineering journal*, Volume (37), Page (24-37).
- [14] Moslemi, M., Kianoush, M. (2012). Parametric study on dynamic behaviour of cylindrical ground supported tanks, *Engineering structures journal*, Volume (42), Page (214-230).
- [15] Jabar, A., Patel, H. (2012). Seismic behaviour of rc elevated water tank under different staging pattern and earthquake characteristics, *Journal of advanced engineering research and studies*, Volume (1), Page (293-296).
- [16] Kazem, H., Mehrpouya, S. (2012). Estimation of sloshing wave height in broad cylindrical oil storage tanks using numerical methods, *Journal of structural engineering and geotechnics*, Volume (2), Page (55-59).
- [17] Madhurar, G., Madhuri, M. (2013). Comparison between static and dynamic analysis of elevated water tank, *Journal of scientific and engineering research*, Volume (4), Page (2043-2052).
- [18] Ranjbar, M., Bozorgmehrnia, S., Madandoust, R. (2013). Seismic behaviour evaluation of concrete elevated water tanks, *Civil engineering infrastructures journal*, Volume (46), Page (175-188).
- [19] Yosefi, A., Naderi, R., Talebpur, M., Shahabifar, H. (2013). Static and dynamic analysis of storage tanks considering soil structure interaction, *Journal of applied and basic sciences*, Volume (6), Page (515-532).
- [20] Kalani, L., Navayineya, B., Tavakoli, H., Vaseghi, J. (2014). Dynamic analysis of elevated water storage tanks due to ground motions rotational and translational components, *Journal of science and engineering*, Volume (39), Page (4391-4403).
- [21] Mittal, V., Chakraborty, T., Matsagar, V. (2014). Dynamic analysis of liquid storage tank under blast using coupled euler lagrange formulation, *Thin walled structures journal*, Volume (84), Page (91-111).
- [22] Kotrasova, K., Grajciar, I., Kormanikova, E. (2014). Dynamic time history response of cylindrical tank considering fluid structure interaction due to earthquake, *Applied mechanics and materials journal*, Volume (617), Page (66-69).
- [23] Khadiranaikar, R., Dhundasi, A. (2014). Equation for estimation of fundamental time period for elevated water tank, *International journal of civil engineering and technology*, Volume (5), Page (266-275).

- [24] Tiwari, N., Hora, M. (2015). Interaction analysis of intze tank fluid layered soil system, *Journal of engineering and applied sciences*, Volume (10), Page (940-953).
- [25] Wang, Y., Xiong, M. (2015). Analysis of axially restrained water storage tank under blast loading, *Journal of impact engineering*, Volume (86), Page (167-178).
- [26] Tiwari, N., Hora, M. (2015). Transient analysis of elevated intze water tank fluid soil system, *Journal of engineering and applied sciences*, Volume (10), Page (869-882).
- [27] Lotfi, R., Mahmoudabadi, M. (2016). Investigation of vibration of buried water tank considering fluid structure and soil structure interactions, *Fourth international conference of civil and architectural engineering and urban development*, Tehran.
- [28] Salunke, S., Kulkarni, S., Kadlag, V. (2017). Analysis of solid and hollow wall of circular steel petroleum tank for stresses in staad pro, *Journal of engineering and technology*, Volume (4), Page (1716-1719).
- [29] Yazdani, M., Ghasemi, S. (2017). Study on the fundamental frequencies of rectangular concrete tanks using fem and analytical codes, *Journal of optimization in civil engineering*, Volume (7), Page (617-632).
- [30] Yazdani, M., Ghasemi, S. (2017). Study on fundamental frequencies of cylindrical storage tanks obtained from codes and finite element method, *Civil engineering infrastructures journal*, Volume (50), Page (135-149).
- [31] Musa, A., Eldamatty, A. (2017). Design procedure for liquid storage steel conical tanks under seismic loading, *Journal of civil engineering*, Volume (), Page (1-53).
- [32] Alemzade, H., Shakib, H. (2016). Numerical study of the response of ground steel tanks with free rocking motion under effect of horizontal excitation of earthquake, *Structure and steel journal*, Volume (13), Page (71-79).
- [33] Sensebastian, N., Thomas, A., Kurian, J. (2017). Seismic analysis of elevated water tank in a framed building, *Journal of engineering and technology*, Volume (4), Page (1629-1632).
- [34] Gurkalo, F., Du, Y., Poutos, K., Bescos, C. (2017). The nonlinear analysis of an innovative slit reinforced concrete water tower in seismic regions, *Engineering structures journal*, Volume (134), Page (138-149).
- [35] Kotrasova, K., Hegedusova, I., Harabinova, S., Panulinova, E., Kormanikova, E. (2017). The possible causes of damage to concrete tanks numerical experiment of fluid structure soil interaction, *Key engineering materials journal*, Volume (738), Page (227-237).
- [36] Naresh, K. (2019). Seismic analysis of over head INTZE water tank subjected to sloshing effect, *International journal of innovative research in technology*, Volume (6), Page (105-112).
- [37] Joseph, A. and Joseph, G. (2019). Fluid structure soil interaction effect on dynamic behaviour of circular water tanks, *International journal of structural engineering*, Volume (10).
- [38] Rawat, A., Mittal, V., Chakraborty, T. and Matsagar, V. (2019). Earthquake induced sloshing and hydrodynamic pressures in rigid liquid storage tanks analyzed by coupled acoustic structural and Euler Lagrange methods, *Thin walled structures journal*, Volume (134), Page (333-346).
- [39] Behnamfar, F., Moradi, R. and Hashemi, S. (2019). Dynamic analysis of flexible concrete cylindrical storage tanks subjected to horizontal and vertical ground motion, *Journal of concrete research*, Volume (12), Page (39-57).
- [40] Uhlirova, L. and Jendzelovsky, N. (2019). Dynamic analysis of rectangular tank using response spectra, *Vibroengineering procedia journal*, Volume (23), Page (99-104).
- [41] Zhang, R., Chu, S., Sun, K., Zhang, Z. and Wang, H. (2020). Effect of the directional components of earthquakes on the seismic behavior of an unanchored steel tank, *Applied sciences journal*, Volume (10).
- [42] Rawat, A., Matsagar, V. and Nagpal, A. (2020). Seismic analysis of steel cylindrical liquid storage tank using coupled acoustic-structural finite element method for fluid-structure interaction, *International journal of acoustics and vibration*, Volume (25), Page (27-40).
- [43] Jani, B., Agrawal, V. and Patel, V. (2020). Effects of soil condition on elevated water tank using time history analysis with different staging systems, *International journal of civil engineering*, Volume (7), Page (41-47).
- [44] Dubey, A., Maurya, M. and Tripathi, S. (2020). Time history analysis of underground water tank for different seismic intensities, *International journal of science and research*, Volume (9), Page (963-967).
- [45] Pandit, A. and Biswal, K. (2020). Evaluation of dynamic characteristics of liquid sloshing in sloped bottom tanks, *International journal of dynamics and control*, Volume (8), Page (162-177).
- [46] Ibrahim, R. (2005). Liquid sloshing dynamics, *Cambridge university press*, New York, USA.
- [47] Wolf, J. (1985). Dynamic soil structure interaction, *Prentice Hall international series in civil engineering and engineering mechanics*, New Jersey, USA.
- [48] Karampour, P. (2019). Seismic analysis of buried concrete square tank, *www.abaqusfem.com*, Tehran, Iran.
- [49] Simulia. (2014). ABAQUS analysis user's manual, *ABAQUS documentation*, Providence, USA.
- [50] Bowles, J. (1997). Foundation analysis and design, *Mc Graw Hill book companies*, Singapore, Singapore.