



## اثر زلزله بر رفتار مخزن بتنی مدفون در خاک

امیرمحمد حسن زاده<sup>۱</sup>، سید رامتین رضائی<sup>۱</sup>، صفا پیمان<sup>۲\*</sup>، رضا حسن زاده<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده عمران، آب و انرژی دانشگاه جامع امام حسین(ع)، تهران، ایران

<sup>۲\*</sup> دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده عمران، آب و انرژی دانشگاه جامع امام حسین(ع)، تهران، ایران

<sup>۳</sup> کارشناسی ارشد، دانشگاه آیت الله بروجردی(ع)، بروجرد، ایران

(speyman@ihu.ac.ir)

(تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۹/۰۱، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۱/۱۲)

### چکیده

با توجه به خسارات ناشی از زلزله‌های گذشته بر روی مخازن و تحلیل لرزه‌ای انجام شده بر آن‌ها، طراحی مخازن مقاوم‌تر در برابر زلزله‌ها امری ضروری به نظر می‌رسد. در این پژوهش، شعاع داخلی مخزن مدل‌سازی شده ۲۴ متر و ارتفاع خارجی آن ۶ متر در نظر گرفته شده است. ضخامت کف، دیواره و سقف برابر با ۳۰۰ میلی‌متر تعیین شده است. همچنین، در این مطالعه از سه سطح مختلف سیال، به ترتیب با درصد حجمی ۵۰، ۷۵ و ۹۰ درصد از ظرفیت مخزن که با آب پر شده است، استفاده شده است. تحلیل مودال نشان می‌دهد که با افزایش سطح تراز آب در داخل مخزن، درصد جرم کلی مشارکت‌کننده در دو حالت اول و دوم افزایش می‌یابد. نتایج همچنین نشان می‌دهد که با افزایش حجم اشغال شده در مخزن، دوره تناوب نیز افزایش می‌یابد. پاسخ‌های بررسی شده شامل فشار هیدرودینامیکی ناشی از سیال به جداره مخزن و نیروهای سازه‌ای از جمله نیروی شعاعی، لنگر خمشی و نیروی برشی می‌باشد. به طوری که برای مخزنی با حجم پر شده، مقادیر فشار به ترتیب برابر با  $476 \text{ kNm}$ ،  $46/3 \text{ kNm}$  و  $3/5 \text{ kNm}$  می‌باشد. در حالت تلاطمی نیز این مقادیر به ترتیب برابر با  $1/5 \text{ kNm}$ ،  $12/9 \text{ kNm}$  و  $153$  است. تأثیر تراز سیال بر ارتفاع نوسانات نشان می‌دهد که با افزایش ارتفاع آب از ۵۰ به ۹۰ درصد، این مقدار تقریباً ۳۰ درصد افزایش می‌یابد. همچنین، با افزایش تراز سیال از ۵۰ به ۷۵ درصد، شیب منحنی به میزان ۲۲ درصد افزایش می‌یابد. تغییر تراز سیال از ۷۵ به ۹۰ درصد نیز باعث افزایش ۸۹ درصدی شیب برش پایه نسبت به حالت قبل شده است. بررسی تأثیر تراز سیال بر تغییرات نیروهای محیطی نشان می‌دهد که بین درصد حجم پر شده و نیروهای محیطی رابطه‌ای غیرخطی وجود دارد.

### کلمات کلیدی

زلزله، مخزن، تراز، حجم، سیال، بتن.



# The Effect of Earthquake on The Behavior of A Concrete Tank Buried in Soil

Amir Mohammad Hassanzadeh<sup>1</sup>, Seyed Ramtin Ramezani<sup>1</sup>, Safa Peyman<sup>2\*</sup>, Reza Hassanzadeh<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Master's degree, Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, Water and Energy, Imam Hossein University, Tehran, Iran

<sup>\*2</sup> Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Civil, Water and Energy Imam Hossein University, Tehran, Iran

<sup>3</sup> Master's degree, Ayatollah Borujerdi University, Borujerd, Iran

(speyman@ihu.ac.ir)

(Date of received: 29/11/2024, Date of accepted: 01/04/2025)

## ABSTRACT

Considering the damages caused by past earthquakes on the reservoirs and the seismic analysis performed on them, designing more earthquake-resistant reservoirs seems to be essential. In this study, the inner radius of the modeled reservoir is considered to be 24 meters and its outer height is 6 meters. The thickness of the floor, wall and roof is determined to be 300 mm. Also, in this study, three different fluid levels are used, with a volume percentage of 50, 75 and 90 percent of the reservoir capacity filled with water, respectively. Modal analysis shows that with increasing water level inside the reservoir, the percentage of total mass participating in the first and second cases increases. The results also show that with increasing volume occupied in the reservoir, the periodic period also increases. The responses studied include the hydrodynamic pressure caused by the fluid on the reservoir wall and structural forces including radial force, bending moment and shear force. So that for a tank with a filled volume, the pressure values are 473 KN/M, 3.46 KN/M, and 5.33 KN/M, respectively. In the turbulent state, these values are 153 KN/M, 9.12 KN/M, and 5.10 KN/M, respectively. The effect of the fluid level on the height of the oscillations shows that with an increase in the water height from 50 to 90 percent, this value increases by approximately 30 percent. Also, with an increase in the fluid level from 50 to 75 percent, the slope of the curve increases by 22 percent. Changing the fluid level from 75 to 90 percent also causes an 89 percent increase in the base shear slope compared to the previous state. Examining the effect of the fluid level on changes in environmental forces shows that there is a nonlinear relationship between the percentage of the filled volume and the environmental forces.

## Keywords:

Earthquake, tank, level, volume, fluid, concrete.



## ۱- مقدمه

آب یک ماده اساسی برای حیات است. انسان ها، حیوانات و نباتات همه به آب برای زندگی و رشد ضرورت دارند. کشور ایران با توجه به اقلیم گرم و خشک و کمبود آب نیاز به داشتن مخازنی برای حفظ و ذخیره آب آشامیدنی دارد. مخازن ذخیره سیال از اجزاء بسیار مهم در شرایط های حیاتی به حساب می آیند. با توجه به آسیب های وارده از طرف زمین لرزه های گذشته بر مخازن بررسی لرزه ای این مخازن و طرح مخازن مقاوم تر در برابر زمین لرزه ها ضروری می باشد.

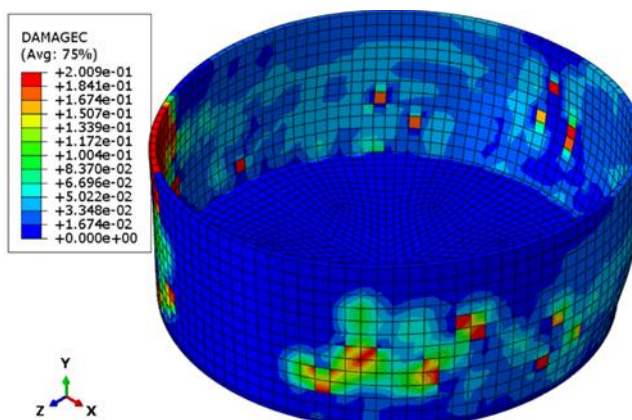
پیرسلطان و همکاران به مطالعه با ۹ تیپ مخزن و ۱۰ رکورد زلزله انجام شد. نتایج نشان داد که حداکثر ارتفاع نوسانات سیال در زلزله های حوزه نزدیک نسبت به حوزه دور در مخازن با طول ۲۰، ۴۰ و ۶۰ متر به ترتیب ۶۵، ۷۷ و ۱۰۰ درصد افزایش می یابد. افزایش عمق سیال ارتفاع نوسانات را افزایش و افزایش عرض مخزن آن را کاهش می دهد. همبستگی ارتفاع نوسانات در زلزله های حوزه دور با پارامتر **ARIAS** و در حوزه نزدیک با **PGV** قوی تر بود. این نتایج امکان ارائه ضرایب اصلاحی برای آیین نامه های طراحی را فراهم می کند [۱]. حتمی برق به بررسی رفتار لرزه ای مخازن مستطیلی و استوانه ای ذخیره مایعات را تحت زلزله های حوزه نزدیک و دور بررسی کرده است. مخازن با حجم برابر و ارتفاع سیال ثابت مقایسه شدند. دو رکورد زلزله حوزه نزدیک و سه رکورد حوزه دور اعمال شد و پاسخ هایی مانند نوسانات سطحی سیال، فشار هیدرو دینامیکی و محل بحرانی آن ها تحلیل شد. مدل سازی با روش المان محدود و فرمول بندی **ALE** در نرم افزار **Abaqus** انجام شد و دقت آن با نتایج آزمایش های پیشین تأیید شد. نتایج نشان داد که شکل هندسی مخزن و مشخصات زلزله تأثیر قابل توجهی بر پاسخ لرزه ای دارند [۲]. رضا لطفی و همکاران به بررسی تأثیر شکل هندسی مخازن مایع (مستطیلی، لوزی و بیضی) بر رفتار لرزه ای آن ها با در نظر گرفتن اندرکنش سیال-سازه و خاک-سازه بررسی کرده است. مخازن تحت زلزله های سنترو، منجیل و کیپ تحلیل دینامیکی شدند و پارامترهایی مانند ارتفاع حداکثر موج، جابه جایی دیوار، تنش کششی بتن و تنش فشاری خاک مقایسه شد. نتایج نشان داد که شکل هندسی مخزن تأثیر قابل توجهی بر رفتار لرزه ای دارد و این تأثیر بر پارامترهای مختلف لرزه ای یکسان نیست [۳]. شایان خسروی و همکاران به مطالعه خرابی لرزه ای مخازن بتنی روزمینی ذخیره آب را بررسی کرده و نشان می دهد ترک خوردگی و نشست مایع از آسیب های اصلی است. تحلیل های عددی غیرخطی با در نظر گرفتن ترک خوردگی برای سه تیپ مخزن استوانه ای با نسبت های مختلف ارتفاع به قطر انجام شد. منحنی های شکنندگی بر اساس عرض ترک بحرانی (نشریه ۱۲۳) استخراج و با تحلیل های خطی قبلی مقایسه شد. نتایج نشان داد که در نظر گرفتن رفتار غیرخطی بتن، به ویژه در مخازن بلند، ضروری است و تحلیل های خطی اعتبار کمی دارند. احتمال آسیب پذیری با افزایش نسبت ارتفاع به قطر از کوتاه به متوسط ۲۵٪ و از متوسط به بلند ۵۰٪ افزایش می یابد [۴]. جواد صادقی و همکاران به مطالعه مخزن بتنی زمین را با در نظر گرفتن اندرکنش خاک-سازه-سیال در نرم افزار **Abaqus** شبیه سازی کرده و رفتار غیرخطی بتن با مدل **Concrete Damage Plastic** بررسی شد. برای جلوگیری از انعکاس امواج لرزه ای، از المان نامحدود استفاده شد و مدل با تحلیل های حساسیت و مقایسه با مطالعه کیانوش و همکاران (۲۰۱۰) اعتبار سنجی شد. منحنی شکست با روش قابلیت اطمینان و با استفاده از ۲۰۰ شتاب نگاشت حوزه نزدیک و دور، بر اساس شاخص های کرنش ترک خوردگی (خرابی کم و شدید) و **PGA** ترسیم شد. نتایج نشان داد احتمال خرابی سطحی و شدید در زلزله های حوزه نزدیک بحرانی تر است. حد قابلیت اطمینان برای خرابی سطحی در زلزله های حوزه نزدیک و دور به ترتیب  $g_{0.4}$  و  $g_{0.6}$  (افزایش ۶۰٪ پاسخ برای حوزه دور) و برای خرابی شدید  $g_{1.3}$  و  $g_{1.3}$  (افزایش ۳۰٪ ظرفیت برای حوزه دور) است. [۵]. در طی سال های اخیر مطالعات متعددی در زمینه بررسی رفتار لرزه ای این گونه سازه ها با توجه به رفتار سیال درون مخزن انجام شده است. هاو زرنر از جمله نخستین کسانی است که به رفتار لرزه ای مخازن با توجه به اثر سیال درون آن پرداخت. وی مخزن را با توجه به سیستم دو درجه آزادی بر اساس جرم ضربه ای و جرم آشفته مدل نموده و نشان داد که فشار سیال ایجاد شده ناشی از زلزله برای طرح لرزه ای مخازن از اهمیت بالایی برخوردار است [۶]. نادری و همکاران به بررسی تأثیر نوع زلزله بر تحلیل لرزه ای مخازن مدفون بتنی استوانه ای با در نظر گرفتن اثر اندرکنش سیال و سازه پرداختند. در این پژوهش، تأثیر نوع زلزله به صورت تاریخیچه زمانی و با مدل سازی سه بعدی مخازن با نرم افزار **Abaqus** بررسی شد. نتایج نشان داد که فشارهای هیدرو دینامیکی در تحلیل لرزه ای این مخازن عواملی مهم هستند که با افزایش بزرگای زلزله، تأثیر آن ها نیز افزایش می یابد. بنابراین، توصیه می شود که در تحلیل لرزه ای مخازن مدفون، اثر اندرکنش سیال و سازه مد نظر قرار گیرد [۷]. حاجی مهربابی و همکاران به بررسی منحنی های شکنندگی لرزه ای مخازن بتنی استوانه ای ذخیره کننده مایع پرداختند. نتایج نشان می دهد که با فل ها مزایای ساختاری و هزینه ای دارند و در حالی که ارتفاع برش موج را کاهش می دهند، ممکن است عرض ترک عمودی و گشتاور خمیدگی دیواره مخزن را افزایش دهند. دنده های بتونی مسلح حلقوی به طور مؤثری برای کاهش شل شدن مایع در مخازن بزرگ استفاده می شوند، اما می توانند بر رفتار لرزه ای آن ها تأثیر منفی بگذارند. اثرات با فل ها بر رفتار لرزه ای مخازن استوانه ای بتنی را با بررسی سه نوع مخزن کوتاه، متوسط و بلند تحت ۹



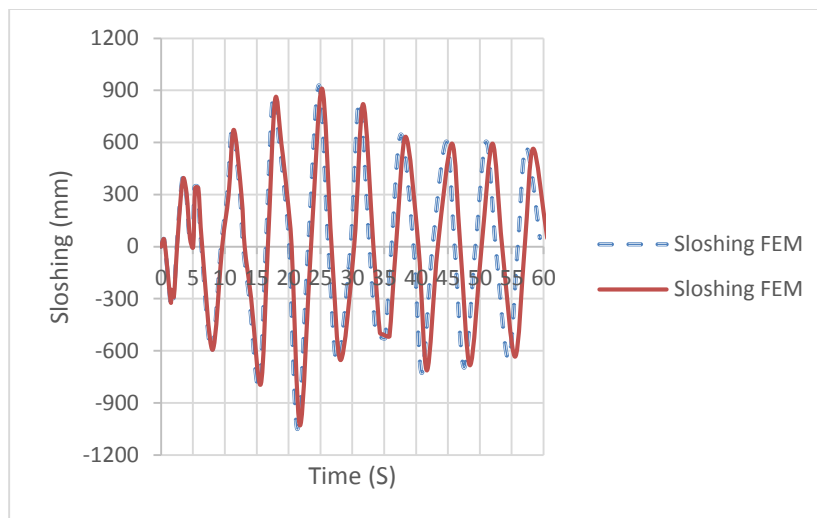
حرکت زمینی زلزله ارزیابی می‌کند و منحنی‌های شکنندگی برای شل شدن مایع، عرض ترک عمودی و گشتاور خمیدگی دیواره محاسبه می‌شود [۸]. مسلمی و کیانوش این مطالعه به بررسی پارامتریک رفتار دینامیکی مخازن استوانه‌ای پشتیبانی شده از زمین پرداخت. نتایج دینامیکی به دست آمده از روش اجزای محدود (FE) با کدهای فعلی مقایسه شد تا کفایت آن‌ها در برآورد پاسخ دینامیکی مخازن پر از مایع ارزیابی گردد. اعتبار روش FE با مقایسه نتایج روش‌های تحلیلی تأیید شد. تحلیل تاریخچه زمانی و ارتعاشات آزاد بر روی مدل‌های مختلف مخزن بتونی انجام شد و پاسخ مخازن صلب و انعطاف‌پذیر تحت تأثیر زلزله‌های افقی و عمودی به دست آمد. در نهایت، توصیه‌هایی برای طراحی لرزه‌ای مخازن مایع ارائه شد و نتیجه‌گیری شد که روش طراحی فعلی در برآورد فشار هیدرودینامیکی بیش از حد محافظه‌کارانه است [۹]. مهندیلوترکمانی و بسطامی در تحقیقی به بررسی تأثیر نوع سیال بر رفتار لرزه‌ای مخازن مدفون بتنی پرداخت. نتایج نشان داد که فشار دینامیکی سیال بر کف و دیواره مخزن به وزن مخصوص سیال وابسته است، بنابراین نوع سیال باید در طراحی مخازن مشخص باشد تا نتایج معقول و اقتصادی حاصل شود. همچنین، برای تحلیل و طراحی لرزه‌ای مخازن، باید موقعیت جغرافیایی و لرزه‌ای محل احداث مشخص و از رکوردهای زلزله متناسب استفاده شود. به علاوه، سایر ویژگی‌های سیال مانند ویسکوزیته و مدول بالک نیز بر نتایج تأثیرگذارند و تحلیل‌های بیشتری برای رکوردهای مختلف زلزله می‌تواند به نتایج دقیق‌تری منجر شود. در نهایت، ارتفاع آزاد مخزن می‌تواند بر اساس نوع سیال تعیین و با استفاده از روش‌هایی، میزان جابجایی سطح سیال کنترل شود [۱۰].

## ۲- صحت سنجی

برای صحت سنجی از کار تحقیقاتی مسلمی و همکاران در سال ۲۰۱۲ استفاده شده است. در تحقیق مسلمی و همکاران، رفتار دینامیکی مخازن آب استوانه‌ای در سطح بالایی ارزیابی شده است. تمرکز اصلی این مطالعه شناسایی پارامترهای مهم موثر بر پاسخ دینامیکی این سازه‌ها و برای بین این پارامترها است. پارامترهای بررسی شده شامل برش در سطح آزاد مایع، انعطاف‌پذیری دیواره مخزن، شتاب عمودی زمین، نسبت ابعاد مخزن و نیروهای تکیه‌گاهی در مخزن است. علاوه بر این، نتایج دینامیکی به دست آمده از روش دقیق اجزای محدود (FE) با روش فعلی مقایسه می‌شود و در نتیجه کفایت دستورالعمل‌های فعلی در برآورد پاسخ دینامیکی مخازن استوانه‌ای پر از مایع بررسی شده است. اعتبار روش FE پیشنهادی با مقایسه نتایج محاسبه شده حاصل از روش تحلیلی به اثبات رسیده است. تجزیه و تحلیل تاریخچه زمانی و ارتعاشات آزاد مدل‌های مخزن بتونی با نسبت‌های مختلف انجام شده است. پاسخ تاریخچه زمانی مخازن با شرایط مختلف در پایه (سخت و انعطاف‌پذیر)؛ تحت اجزای افقی و عمودی زمین لرزه با استفاده از روش تلفیق مستقیم بدست آمده است. بر اساس نتایج محاسبه شده، توصیه‌هایی در طراحی لرزه‌ای مخازن مایع استوانه‌ای ارائه شده است. بر اساس تحقیق مسلمی و همکاران نتیجه‌گیری می‌شود که روش طراحی جریان در برآورد فشار هیدرودینامیکی بیش از حد محافظه‌کارانه است. در تحقیق مسلمی و همکاران از رکورد زلزله السترو برای اعمال بار لرزه‌ای به مخزن و ایجاد آشفتگی در سیال آب استفاده شده است. شکل ۱ نحوه اعمال مصالح آب به نرم افزار را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل دیده می‌شود برای مدل سازی سیال آب از مدل EOS استفاده شده است.

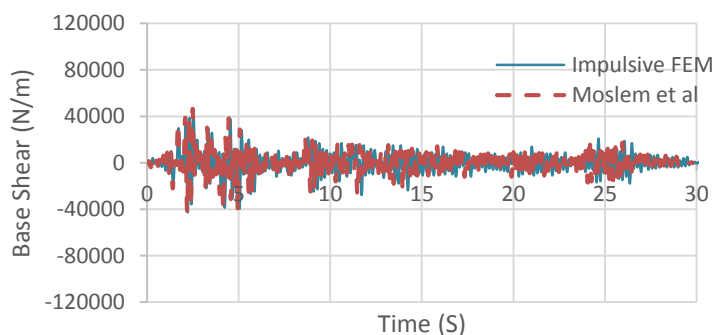


شکل ۱: آسیب‌های ایجاد شده در مخزن



شکل ۲: مقایسه تلاطم ایجاد شده در آب

شکل‌های (۲) و (۳) تطابق خوبی بین مدل عددی ساخته شده در نرم‌افزار Abaqus با مدل تحقیق مسلمی و همکاران نشان می‌دهد. شکل (۲) تلاطم و یا تغییر مکان آب در داخل مخزن را نشان می‌دهد و شکل (۳) نیز برش پایه در کف مخزن را با اعمال رکورد لرزه ای السنترو نشان می‌دهد.



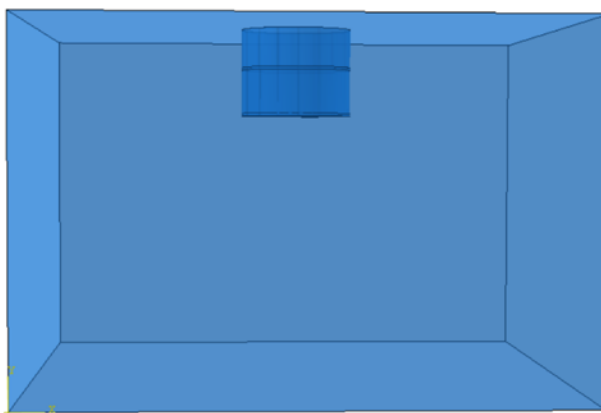
شکل ۳: مقایسه تنش برشی ایجاد شده در کف مخزن

### ۳- مواد و روش‌ها

در این پژوهش، مدل‌های مخازن استوانه‌ای بتنی برای تحلیل و بررسی رفتار لرزه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند و برای مدل‌سازی سیال، روش‌های مختلفی وجود دارد. به عنوان مثال، می‌توان سیال را با استفاده از المان‌های اجزای محدود مدل‌سازی کرد یا از مدل‌های مکانیکی معادل بهره برد. در این تحقیق، به دلیل اینکه وجود دیواره داخلی تا حد زیادی از تلاطم و نوسانات آب جلوگیری می‌کند و آب داخل مخزن آزادی عمل زیادی ندارد، از مدل هوسنر استفاده خواهد شد. در تحلیل هر یک از مدل‌ها، جابجایی‌های افزایشی در نقاط داخلی کف مخزن اعمال شده و برش پایه ناشی از آن در هر مرحله ثبت می‌شود. نمودارهای برش پایه-جابجایی برای هر یک از مخازن در حالت‌های خالی و پر به همراه نمودارهای ایده‌آل بر اساس آیین‌نامه FEMA P695 ارائه خواهد شد. وزن مخصوص، مدول الاستیسیته و ضریب پواسون بتن در سه مدل مخزنی که مدل‌سازی می‌شود، به ترتیب برابر  $2400 \text{ kg/m}^3$ ،  $2 \times 10^9 \text{ kg/m}^2$  و  $0.2$  و  $0.2$  نظر گرفته شده است. در مدل‌های فرضی، شعاع داخلی مخزن برابر ۶ متر و ارتفاع خارجی آن ۵.۶ متر در نظر گرفته شده است. ابعاد ستون میانی مدل به صورت دایره‌ای با شعاع ۰.۵ متر فرض شده و ضخامت کف، دیواره و سقف مخازن نیز برابر  $0.3$  متر لحاظ شده است.

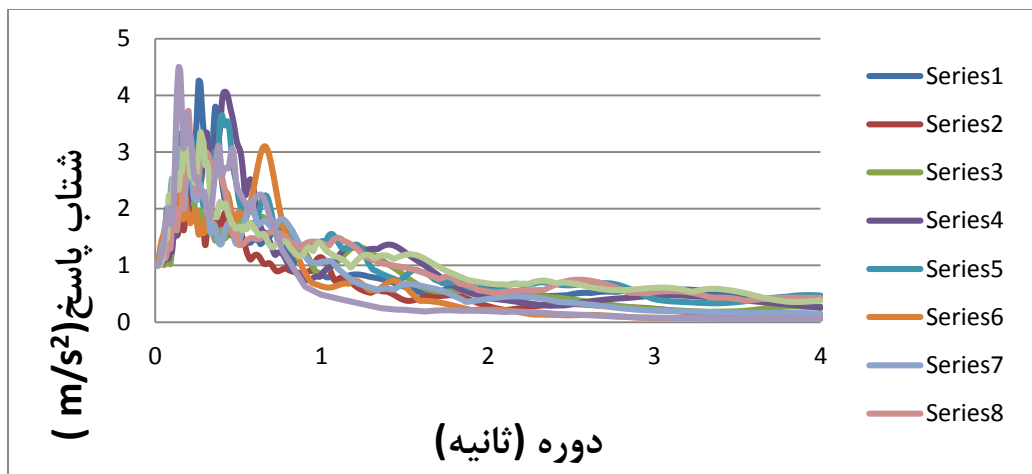


در فرایند مدلسازی، سیال درون مخزن از نوع آب با ارتفاع ۵ متر فرض شده است. خاک پیرامون مخزن به صورت تک‌لایه با طول و عرض ۴۰ متر و عمق ۴۰ متر تعریف شده که ۳۰ متر در زیر تراز کف مخزن و تقریباً ۵ متر سرپار روی مخزن قرار دارد. جرم حجمی، زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی برای خاک فرضی به ترتیب برابر  $1900 \text{ kg/m}^3$ ، ۲۶ درجه و  $1400 \text{ kg/m}^2$  در نظر گرفته شده است. همچنین، ضریب پواسون و مدول الاستیسیته خاک به ترتیب برابر  $0/25$  و  $1 \times 10^6 \text{ kg/m}^2$  منظور شده است. خاک بر روی بستر سنگی قرار دارد و رکورد زلزله از طریق مرزهای پایین به سیستم اعمال می‌شود. رکورد زلزله به صورت تاریخچه زمانی شتاب بر اساس شتاب‌نگاشت زلزله‌های السنترو، نورتریج و چی‌چی بر مدل فرضی اعمال می‌گردد. در این تحقیق، زلزله‌ها از نوع نزدیک گسل بوده و تعداد آن‌ها ۱۰ رکورد خواهد بود.



شکل ۴: نمایش مخزن مدفون در خاک

انتخاب مجموعه رکوردهای مناسب زلزله با توجه به اینکه اساس مبانی این تحقیق مطابق با کار مسلم و همکاران است [۹]. اولین مرحله در تحلیل لرزه‌ای، تهیه مجموعه‌ای از نگاشت‌های زلزله است که نمایانگر لرزه‌خیزی ناحیه مورد نظر باشد. در واقع، اگر تعداد کافی از نگاشت‌های زلزله در منطقه ثبت شده باشد، از آن مجموعه استفاده می‌شود؛ در غیر این صورت، می‌توان از نگاشت‌های مصنوعی زلزله بهره برد که بر اساس شدت زلزله، فاصله تا کانون، افت مسیر و شرایط خاک محلی طراحی می‌شوند. در گام اول، باید مجموعه‌ای از رکوردهای زلزله را که تحلیل دینامیکی سازه تحت تأثیر آن‌ها انجام می‌شود، انتخاب کنیم. در بررسی آسیب‌پذیری، همان‌طور که قبلاً اشاره شد، داشتن اطلاعاتی درباره سناریوی زلزله در ناحیه مورد مطالعه ضروری است. سناریوی زلزله به مجموعه‌ای از نگاشت‌های زلزله‌های ثبت‌شده در آن ناحیه در طول یک دوره زمانی طولانی اشاره دارد. اگر چنین اطلاعاتی برای منطقه موجود باشد، می‌توان از آن‌ها استفاده کرد؛ در غیر این صورت، باید از رکوردهای مناطق دیگر که از نظر ژئوتکنیکی مشابه آن ناحیه هستند، بهره گرفت. در این تحقیق، برای آنالیزهای مربوطه از ۱۰ رکورد زلزله استفاده شده است. این رکوردها از بانک رکوردهایی که مؤسسه SAC در کارهای تحقیقاتی خود به کار می‌برد، انتخاب گردیده‌اند. مشخصات این شتاب‌نگاشت‌ها در جدول (۱) ارائه شده است. طیف پاسخ زلزله‌های فوق با میرای 5 درصد توسط نرم افزار Seismo Signal رسم گردید. طیف زلزله‌های فوق به ترتیب شماره برای  $PGA = 1 \text{ g}$  مقیاس شده‌اند و در شکل زیر رسم شده‌اند.



شکل ۵: طیف پاسخ زلزله‌های استفاده شده با میرای ۵ درصد برای  $PGA = 1g$

نتایج رسم طیف زلزله‌ها در شکل (۵) نشان می‌دهد که برای سازه‌هایی با دوره تناوب کمتر از ۱ ثانیه، شتاب زیادی به سازه اعمال می‌شود. همچنین، سازه‌هایی با دوره تناوب بین ۱ تا ۲ ثانیه شتابی کمتر ولی نسبتاً بیشتر از سازه‌هایی با دوره تناوب بالای ۲ ثانیه دریافت می‌کنند. با توجه به اینکه سازه مورد بررسی در این تحقیق، مخزن بتنی مدفون است و دوره تناوب چنین سازه‌ای معمولاً زیر ۱ ثانیه است، مشاهده می‌شود که شتاب بسیار بالایی به سازه وارد می‌شود.

جدول ۱: مشخصات شتاب نگاشت‌های زلزله‌های منتخب

شماره رکورد	احتمال تجاوز	نام رکورد	شماره نقاط	گام (ثانیه)	مدت (ثانیه)	PGA (g)
1	10% in 50 years	Northridge 10/18/94 00:05,	8000	0.005	39.975	0.172
2	10% in 50 years	Chi Chi 11/24/99 13:16,	2221	0.01	22.11	0.155
3	10% in 50 years	SUPERSTITION HILLS 11/24/87 13:16, EL CENTRO IMP CO CENTER	8000	0.005	39.975	0.357
4	10% in 50 years	SUPERSTITION HILLS 11/24/87 13:16, PLC	2223	0.01	22.22	0.185
5	10% in 50 years	SUPERSTITION HILLS 11/24/87 13:16, WESTMORELAND FIRE STATION	8000	0.005	39.995	0.171
6	10% in 50 years	LOMA PRIETA 10/18/89 00:05, CAPITOLA	7991	0.005	39.95	0.443
7	10% in 50 years	NORTHRIDGE EQ 1/17/94, 12:31, LA - CENTINELA	2999	0.01	29.98	0.321
8	10% in 50 years	IMPERIAL VALLEY 10/15/79 2316, CALIPATRIA FIRE STATION	7905	0.005	39.52	0.078
9	10% in 50 years	IMPERIAL VALLEY 10/15/79 2316, EL CENTRO ARRAY #12	7802	0.005	39.005	0.116
10	10% in 50 years	LOMA PRIETA 10/18/89 00:05, GILROY ARRAY #7	7990	0.005	39.005	0.225

#### ۴- نتایج

##### ۴-۱- معرفی مدل عددی

در مدل مخزنی که مدلسازی می‌شود، وزن مخصوص، مدول الاستیسیته و ضریب پواسون بتن به ترتیب برابر با  $2400 \text{ kg/m}^3$ ،  $\text{kg/m}^2$  و  $2/1 \times 10^{-9}$  و  $0/2$  در نظر گرفته شده است. در مدل‌های فرضی، شعاع داخلی مخزن ۲۴ متر و ارتفاع خارجی آن ۶ متر تعیین شده است. ضخامت کف، دیواره و سقف مخزن نیز برابر با ۳۰۰ میلی‌متر لحاظ گردیده است. در این مطالعه، برای معرفی رابطه تنش- کرنش فشاری بتن، از رابطه هوگنستاد اصلاح شده در نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است.

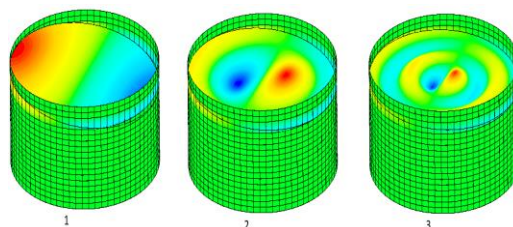


جدول ۲: مقادیر  $K_s$

$f'_c (MPa)$	15	20	25	30	$\geq 35$
$K_s$	0.92	0.93	0.95	0.97	1

#### ۴-۲- تحلیل مودال

با توجه به نتایج جدول (۳) مشخص می‌شود که با افزایش سطح تراز آب در داخل مخزن، درصد جرمی کلی مشارکت‌کننده در دو مود اول و دوم افزایش می‌یابد. به طوری که در حالتی که ۵۰ درصد از حجم مخزن با آب پر شده باشد، این میزان به ۸۹/۲ درصد می‌رسد. در حالی که در وضعیتی که حجم مخزن به ۹۰ درصد با آب پر شده باشد، این مقدار به ۹۹ درصد افزایش می‌یابد. علاوه بر این، با افزایش حجم اشغال‌شده در مخزن، دوره تناوب نیز افزایش می‌یابد، به عبارت دیگر، فرکانس ارتعاشی سازه کاهش می‌یابد. به عنوان مثال، در وضعیتی که ۵۰ درصد از حجم مخزن با آب پر شده باشد، فرکانس مود ضربه‌ای شماره ۱ برابر با ۶۴/۷۲ هرتز است. اما با افزایش سطح تراز آب به ۹۰ درصد حجم کل مخزن، این فرکانس به میزان ۲۸ درصد کاهش یافته و به ۴۰/۱۷ هرتز تنزل می‌یابد.



شکل ۶: سه مود ارتعاش مخزن با ۹۰ درصد پرشدگی

جدول ۳: نتایج تحلیل ارتعاش آزاد برای مدل‌های مخزن با تراز مختلف سیال

$R_i$ (%)		جرم موثر $s^2/m$ (kN)	فرکانس (هرتز)		مود		درصد حجمی سیال
تحلیلی	عددی		تحلیلی	عددی	شماره	نوع	
۲۰/۷	۲۱/۶	۷۸۹/۷	۶۸/۸۲	۶۴/۷۲	۱	ضربه‌ای	۵۰
۲/۲	۲/۳	۴۳/۶	۹۳/۷۴	۹۲/۶۱	۲		
۶۲/۰	۶۳/۱	۴۶۲۵/۶	۰/۲۴۶	۰/۲۳۵	۱	متلاطمی	
۲/۳	۲/۲	۴۰۲/۴	۰/۳۳۲	۰/۳۱۵	۲		
۱۹/۳	۱۸/۸	۹۹۶/۲	۵۷/۰۶	۵۵/۸۲	۱	ضربه‌ای	۷۵
۱/۶	۱/۶	۵۳/۷	۸۲/۶۶	۸۳/۳۰	۲		
۷۳/۳	۷۴/۴	۵۸۴۳/۶	۰/۱۳۵	۰/۱۱۲	۱	متلاطمی	
۲/۵	۲/۳	۴۳۸/۶	۰/۳۰۶	۰/۲۶۸	۲		
۱۴/۷	۱۴/۳	۱۳۰۶/۴	۳۹/۶۲	۴۰/۱۷	۱	ضربه‌ای	۹۰
۰/۷	۰/۶	۳۷/۶	۷۲/۶۲	۷۳/۸۲	۲		
۸۱/۲	۸۰/۷	۶۸۵۲/۶	۰/۰۹۲	۰/۰۹۳	۱	متلاطمی	
۳/۳	۳/۴	۵۲۶/۳	۰/۱۸۸	۰/۱۹۳	۲		

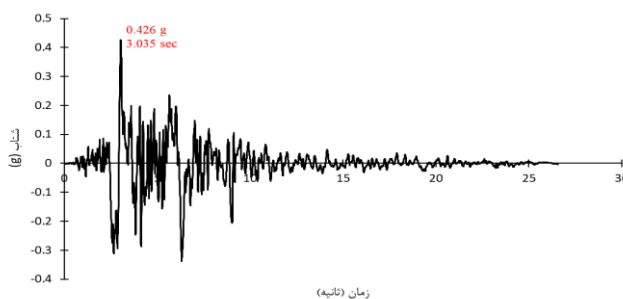


### ۳-۴- تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی

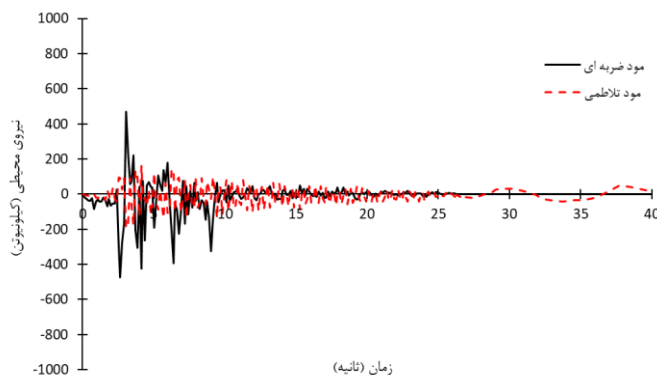
پاسخ کلی تاریخچه زمانی مخازن به صورت دو مولفه ضربه‌ای و تلاطمی به منظور مطالعه پاسخ مدل‌های مخزن در طول زمان تفکیک شده است. پاسخ‌های بررسی شده شامل فشار هیدرودینامیکی ناشی از سیال به جداره مخزن و نیروهای سازه‌ای شامل نیروی شعاعی، لنگر خمشی و نیروی برشی می‌باشند. همچنین، تغییر مکان قائم یا ارتفاع تلاطم از سطح آزاد سیال نیز به عنوان یکی دیگر از نتایج ارائه می‌شود.

### ۳-۴-۱- مخزن با حجم پر شده ۹۰ درصد

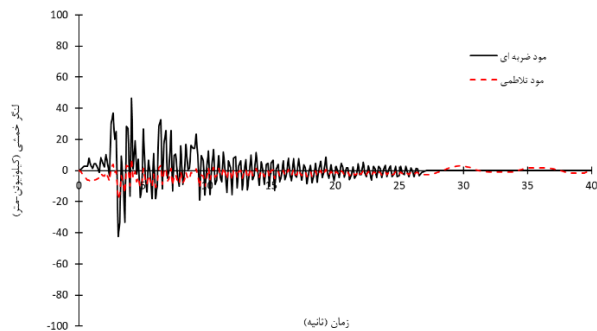
پاسخ‌های نیروی محیطی، لنگر خمشی و نیروی برشی مربوط به مخزن با ۹۰ درصد حجم پر شده تحت زلزله نورتریج در شکل (۷) ارائه شده است. پاسخ‌های سازه‌ای در شرایطی که بیشترین پاسخ ایجاد شده است، استخراج گردید. برای حالتی که پای مخزن به صورت گیردار است، پاسخ‌های لنگر خمشی و برش پایه در پایین مخزن و پاسخ نیروی محیطی در وسط ارتفاع مخزن اندازه‌گیری شد. مقادیر حداکثر مطلق برای نیروی محیطی، لنگر خمشی و نیروی برشی در مود ضربه‌ای به ترتیب برابر با  $۴۷۳ \text{ kN/m}$ ،  $۴۶,۳ \text{ kNm/m}$  و  $۳۳/۵ \text{ kN/m}$  می‌باشد. به طور مشابه، مقادیر حداکثر نیروی محوری، لنگر خمشی و نیروی برشی در مود تلاطمی به ترتیب برابر با  $۱۶۴ \text{ kN/m}$ ،  $۷/۶ \text{ kNm/m}$  و  $۱۰/۲ \text{ kNm/m}$  هستند. همان‌طور که از شکل (۷) مشاهده می‌شود، مولفه‌های پاسخ ضربه‌ای و تلاطمی در زمان یکسان به حداکثر خود نمی‌رسند. این نتیجه در تحقیقی که توسط قائم‌مقامی و کیانوش انجام شده نیز مشاهده شده است و تأییدی بر مدل عددی حاضر می‌باشد. با مقایسه پاسخ تلاطمی با پاسخ ضربه‌ای، می‌توان نتیجه گرفت که نیروهای ناشی از تلاطم سیال تأثیر کمی بر پاسخ دینامیکی سیستم مخزن-سیال دارند.



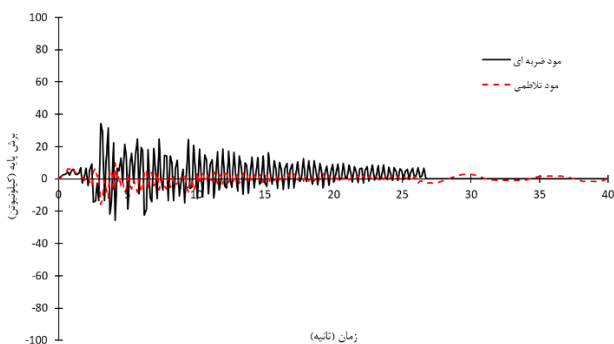
(الف) مولفه افقی زلزله نورتریج



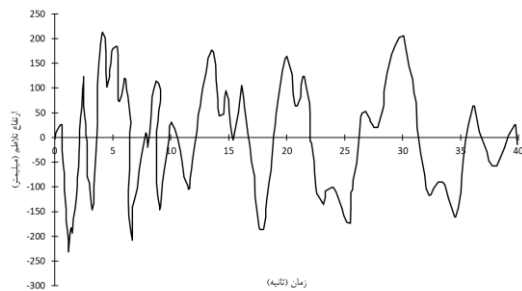
(ب) تاریخچه نیروی محیطی



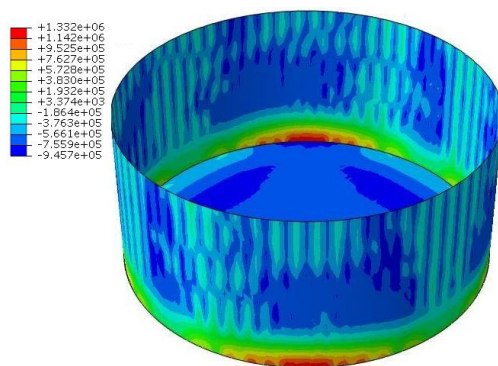
(ج) تاریخچه لنگر خمشی



(د) تاریخچه نیروی برش پایه



(ه) تاریخچه ارتفاع تالاب سیال



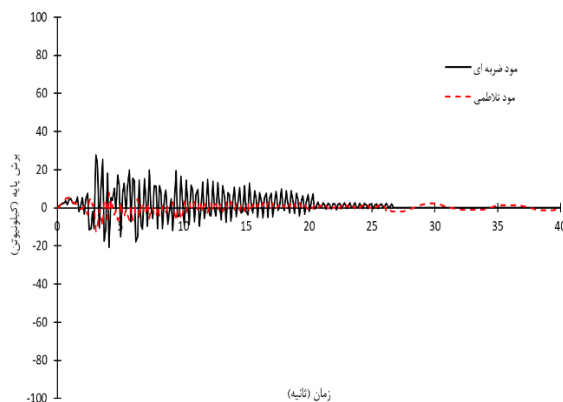
(و) توزیع تنش فون-میسز

شکل ۷: تغییرات پاسخهای سازه‌ای مخزن با ۹۰ درصد حجم پر شده از سیال



### ۴-۳-۲- مخزن با حجم پر شده ۷۵ درصد

در این بخش، نتایج مربوط به مخزنی که ۷۵ درصد حجم کلی آن با سیال پر شده است، ارائه شده است. پاسخ‌های سازه‌ای در شرایطی که بیشترین پاسخ ایجاد شده است، استخراج گردیده‌اند. پاسخ‌های لنگر خمشی و برش پایه در پایین مخزن و پاسخ نیروی محیطی در وسط ارتفاع مخزن اندازه‌گیری شده است. مقادیر حداکثر مطلق برای نیروی محیطی، لنگر خمشی و نیروی برشی در مود ضربه‌ای به ترتیب برابر با  $311/5 \text{ kN/m}$ ،  $26/3 \text{ kNm/m}$  و  $21/4 \text{ kN/m}$  می‌باشد. به طور مشابه، مقادیر حداکثر نیروی محوری، لنگر خمشی و نیروی برشی در مود تلاطمی به ترتیب برابر با  $146/4 \text{ kN/m}$ ،  $12/4 \text{ kNm/m}$  و  $10/1 \text{ kN/m}$  هستند. مولفه‌های پاسخ ضربه‌ای و تلاطمی در زمان یکسان به حداکثر خود نمی‌رسند. این نتیجه در تحقیقی که توسط قائم‌مقامی و کیانوش انجام شده نیز مشاهده شده و تأییدی بر مدل عددی حاضر می‌باشد. با مقایسه پاسخ تلاطمی با پاسخ ضربه‌ای، می‌توان نتیجه گرفت که نیروهای ناشی از تلاطم سیال تأثیر کمی بر پاسخ دینامیکی سیستم مخزن-سیال دارند.

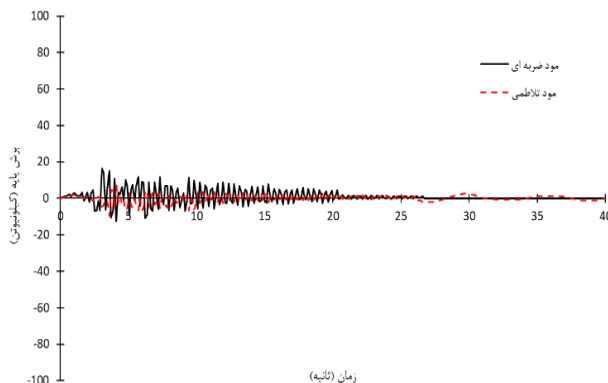


تاریخچه نیروی برش پایه

شکل ۸: تغییرات پاسخ‌های سازه‌ای مخزن با ۷۵ درصد حجم پر شده از سیال

### ۴-۳-۳- مخزن با حجم پر شده ۵۰ درصد

در این بخش، نتایج مربوط به مخزنی که ۵۰ درصد حجم کلی آن با سیال پر شده است، ارائه شده است. پاسخ‌های سازه‌ای در شرایطی که بیشترین پاسخ ایجاد شده است، استخراج گردیده‌اند. پاسخ‌های لنگر خمشی و برش پایه در پایین مخزن و پاسخ نیروی محیطی در وسط ارتفاع مخزن اندازه‌گیری شده است. مقادیر حداکثر مطلق برای نیروی محیطی، لنگر خمشی و نیروی برشی در مود ضربه‌ای به ترتیب برابر با  $229 \text{ kNm/m}$ ،  $19/4 \text{ kNm/m}$  و  $15/7 \text{ kNm/m}$  می‌باشد. به طور مشابه، مقادیر حداکثر نیروی محوری، لنگر خمشی و نیروی برشی در مود تلاطمی به ترتیب برابر با  $153 \text{ kNm/m}$ ،  $12/9 \text{ kNm/m}$  و  $10/5 \text{ kNm/m}$  هستند. مولفه‌های پاسخ ضربه‌ای و تلاطمی در زمان یکسان به حداکثر خود نمی‌رسند. این نتیجه در تحقیقی که توسط قائم‌مقامی و کیانوش انجام شده نیز مشاهده شده و تأییدی بر مدل عددی حاضر می‌باشد. با مقایسه پاسخ تلاطمی با پاسخ ضربه‌ای، می‌توان نتیجه گرفت که نیروهای ناشی از تلاطم سیال تأثیر کمی بر پاسخ دینامیکی سیستم مخزن-سیال دارند.



تاریخچه نیروی برش پایه

شکل ۹: تغییرات پاسخ‌های سازه‌ای مخزن با ۵۰ درصد حجم پر شده از سیال

#### ۴-۴- تأثیر تراز سیال بر ارتفاع نوسانات

رفتار نوسانات مخزن آب تحت تأثیر عواملی مانند ارتفاع سطح آب و همچنین پارامترهای رکورد زلزله قرار دارد. این بخش به بررسی عوامل مؤثر بر ارتفاع نوسانات اختصاص دارد. به این منظور، رکوردهای ۱۰ زلزله به مدل مخزن مذکور که مشخصات آن در بخش پیشین ارائه گردید، وارد شده است. پس از انجام تجزیه و تحلیل تاریخچه زمانی، مقادیر حداکثر ارتفاع نوسانات سطح سیال که مربوط به یکی از گوشه‌های مخزن می‌باشد، در جدول (۴) برحسب میلیمتر آمده است. این داده‌ها نشان‌دهنده تأثیر زلزله‌ها بر نوسانات سطح سیال در مخزن هستند و می‌توانند به درک بهتر رفتار دینامیکی مخازن در شرایط زلزله کمک کنند. جدول (۴) شامل مقادیر حداکثر نوسانات سطح سیال در پاسخ به هر یک از زلزله‌های ورودی است و می‌تواند به عنوان مبنایی برای تحلیل‌های آینده و طراحی‌های مقاوم در برابر زلزله مورد استفاده قرار گیرد.

جدول ۴: حداکثر ارتفاع نوسانات بر حسب میلیمتر در مخازن با حجم سیال متغیر

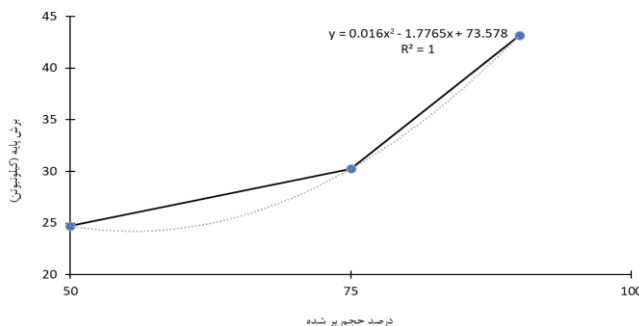
شماره رکورد	حجم ۵۰ درصد	حجم ۷۵ درصد	حجم ۹۰ درصد
۱	۲۳۰	۲۷۲	۲۱۸
۲	۲۲۲	۲۵۶	۲۲۶
۳	۴۵۳	۳۶۷	۳۷۶
۴	۲۴۴	۲۷۴	۲۹۸
۵	۲۲۶	۲۷۴	۲۷۰
۶	۶۵۴	۵۳۶	۵۵۶
۷	۲۸۹	۴۴۳	۵۳۶
۸	۱۵۵	۱۶۷	۲۶۷
۹	۱۷۸	۱۸۹	۲۳۹
۱۰	۲۵۹	۳۴۹	۴۲۷
میانگین	۲۷۱	۳۱۲	۳۵۱

دقت در نتایج ارائه شده در جدول (۴) مویید این مهم است که میانگین مقادیر حداکثر ارتفاع نوسانات سطح سیال در زلزله‌های مختلف مقادیر متفاوتی را ایجاد می‌کند. با این وجود، میانگین مقادیر حداکثر ارتفاع نوسانات با افزایش حجم سیال در مخزن بیشتر می‌شود. به طوری که با افزایش ارتفاع آب سیال از ۵۰ درصد به ۹۰ درصد، این مقدار تقریباً ۳۰ درصد بیشتر شده است.



#### ۴-۵- تأثیر تراز سیال بر برش پایه

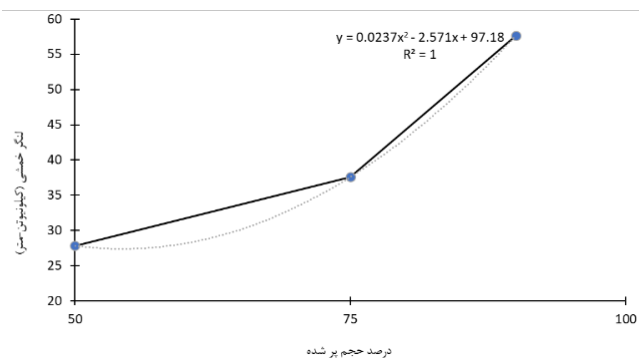
در شکل (۱۰) ارتباط بین تراز سیال و میانگین برش پایه برای مخزن مورد نظر نشان داده شده است. با توجه به شکل (۱۰) مشاهده می‌شود که با افزایش تراز سیال از ۵۰ درصد به ۷۵ درصد، شیب منحنی ۲۲ درصد می‌شود. با تغییر تراز سیال از ۷۵ درصد به ۹۰ درصد، شیب برش پایه نسبت به حالت قبل، ۸۹ درصد افزایش یافت.



شکل ۱۰: ارتباط بین برش پایه و تراز سیال

#### ۴-۶- تأثیر تراز سیال بر تغییرات لنگر خمشی

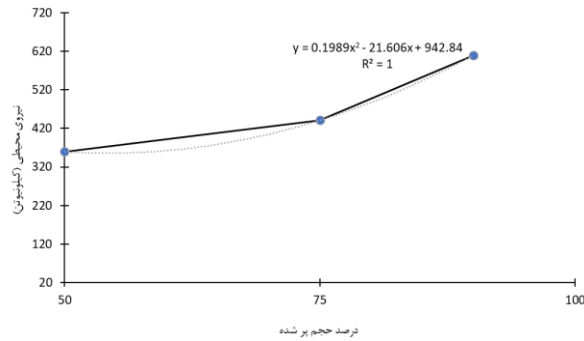
در شکل (۱۱) ارتباط بین تراز سیال و تغییرات لنگر خمشی در پای مخزن نشان داده شده است. هر نقطه روی منحنی مربوط به میانگین جذر مجموع مربعات دو مود ضربه‌ای و متلاطمی هر رکورد می‌باشد که در نهایت به صورت یک مقدار محاسبه شده است. بر این اساس، مشاهده می‌شود که شیب ناحیه دوم منحنی تقریباً ۳/۵ برابر شیب ناحیه اول است. به عبارتی دیگر، با افزایش سطح تراز سیال از ۵۰ درصد به ۹۰ درصد، لنگر خمشی افزایش ۱۰۷ درصدی را تجربه کرده است.



شکل ۱۱: ارتباط بین لنگر خمشی و تراز سیال

#### ۴-۷- تأثیر تراز سیال بر تغییرات نیروی محیطی

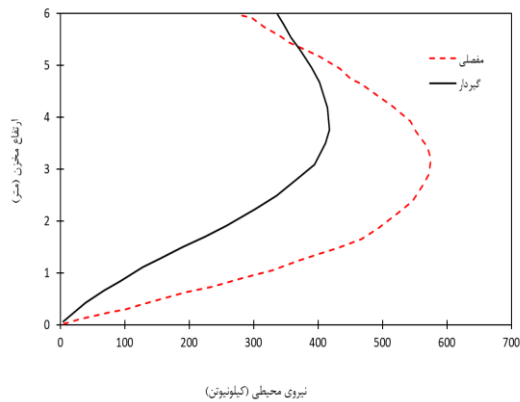
در شکل (۱۲) ارتباط بین تراز سیال و نیروی محیطی در مخزن با سه تراز سیال مختلف ارائه شده است. با افزایش سطح تراز سیال از ۵۰ درصد به ۹۰ درصد، نیروی محیطی به میزان تقریباً ۷۰ درصد افزایش یافت.



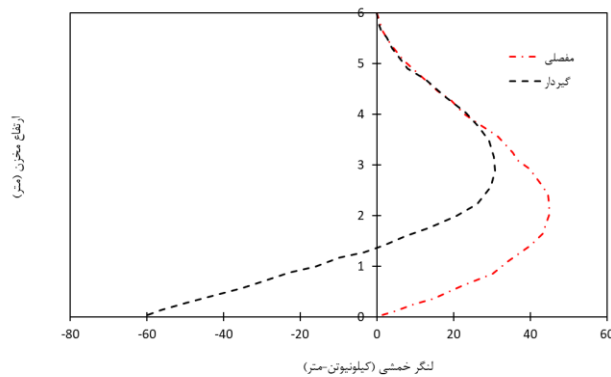
شکل ۱۲: ارتباط بین تراز سیال و نیروی محیطی

#### ۸-۴- اثر گیرداری بر رفتار مخزن

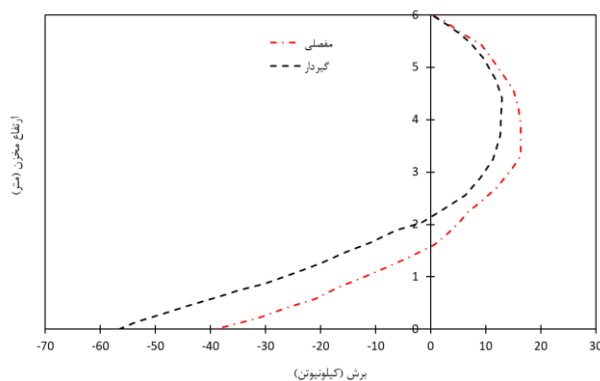
به منظور بررسی اثر گیرداری پایه روی رفتار دینامیکی مخازن استوانه‌ای، مدل‌ها با دو وضعیت مفصلی و گیردار تحت تحریک افقی زلزله نورتریج قرار داده شد و رفتار دینامیکی آن‌ها تعیین شد. در شکل (۱۳) مقایسه‌ای بین پاسخ‌های حداکثر نیروی محیطی، لنگر خمشی و برش در دو وضعیت مفصلی و گیردار انجام شده است. مطابق با شکل مشاهده می‌شود که حداکثر نیروی محیطی در ارتفاع ۳ متر و ۳/۴ متر از کف مخزن برای وضعیت‌های مفصلی و گیردار رخ می‌دهد. همچنین حداکثر نیروی برشی و لنگر خمشی در پای سازه در هر دو حالت مفصلی و گیردار رخ می‌دهد.



(الف) حداکثر نیروی محیطی



(ب) حداکثر لنگر خمشی



شکل ۱۳: دیاگرام‌های پوش برای مخزن

## ۵- جمع بندی و نتیجه گیری

مخازن آب به دلیل اهمیت بهداشتی و خدماتی خود در حوادث غیرمترقبه نظیر زلزله، در آئین‌نامه ۲۸۰۰ ایران به عنوان سازه‌های با اهمیت زیاد شناخته می‌شوند. در فرآیند مدلسازی آب داخل مخزن، سه تراز مختلف سیال درون مخزن در نظر گرفته شده است: ۵۰ درصد، ۷۵ درصد و ۹۰ درصد از حجم مخزن پر شده با آب برای مطالعات پارامتریک. نتایج آنالیز مودال نشان می‌دهد که با افزایش سطح تراز آب در داخل مخزن، درصد جرمی کلی مشارکت‌کننده در دو مود اول و دوم افزایش می‌یابد. به طوری که در حالتی که ۵۰ درصد از حجم مخزن با آب پر شده باشد، این میزان به ۸۹/۲ درصد می‌رسد. در حالی که در وضعیتی که حجم مخزن به ۹۰ درصد با آب پر شده باشد، این مقدار به ۹۹ درصد افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش میزان حجم اشغال شده مخزن، دوره تناوب نیز افزایش می‌یابد و به عبارت دیگر، فرکانس ارتعاشی سازه کاهش می‌یابد. پاسخ کلی تاریخچه زمانی مخازن به صورت دو مولفه ضربه‌ای و تلاطمی به منظور مطالعه پاسخ مدل‌های مخزن در طول زمان تفکیک شده است. پاسخ‌های بررسی شده شامل فشار هیدرودینامیکی ناشی از سیال به جداره مخزن و نیروهای سازه‌ای شامل نیروی شعاعی، لنگر خمشی و نیروی برشی می‌باشند. به عنوان مثال، در مخزن با حجم پر شده ۹۰ درصد، مقادیر حداکثر مطلق برای نیروی محیطی، لنگر خمشی و نیروی برشی در مود ضربه‌ای به ترتیب برابر با  $473 \text{ kN/m}$ ،  $46/3 \text{ kN/m}$  و  $33/5 \text{ kN/m}$  می‌باشند. به طور مشابه، مقادیر حداکثر نیروی محوری، لنگر خمشی و نیروی برشی در مود تلاطمی به ترتیب برابر با  $164 \text{ kN/m}$ ،  $7/6 \text{ kN/m}$  و  $10/2 \text{ kN/m}$  هستند. در مخزن حاوی ۷۵ درصد آب، مقادیر حداکثر مطلق برای نیروی محیطی، لنگر خمشی و نیروی برشی در مود ضربه‌ای به ترتیب برابر با  $311/5 \text{ kN/m}$ ،  $26/3 \text{ kN/m}$  و  $21/4 \text{ kN/m}$  می‌باشند. به طور مشابه، مقادیر حداکثر نیروی محوری، لنگر خمشی و نیروی برشی در مود تلاطمی به ترتیب برابر با  $146/4 \text{ kN/m}$ ،  $12/4 \text{ kN/m}$  و  $10/1 \text{ kN/m}$  هستند. همچنین در مخزن حاوی ۵۰ درصد آب، مقادیر حداکثر مطلق برای نیروی محیطی، لنگر خمشی و نیروی برشی در مود ضربه‌ای به ترتیب برابر با  $229 \text{ kN/m}$ ،  $19/4 \text{ kN/m}$  و  $15/7 \text{ kN/m}$  می‌باشند. تأثیر تراز سیال بر ارتفاع نوسانات نشان داده شده است که میانگین مقادیر حداکثر ارتفاع نوسانات با افزایش حجم سیال در مخزن بیشتر می‌شود. به طوری که با افزایش ارتفاع آب سیال از ۵۰ درصد به ۹۰ درصد، این مقدار تقریباً ۳۰ درصد بیشتر شده است. همچنین با افزایش تراز سیال از ۵۰ درصد به ۷۵ درصد، شیب منحنی ۲۲ درصد می‌شود. با تغییر تراز سیال از ۷۵ درصد به ۹۰ درصد، شیب برش پایه نسبت به حالت قبل ۸۹ درصد افزایش یافت. همچنین بررسی تراز سیال بر تغییرات نیروهای محیطی نشان می‌دهد که بین درصد حجم پر شده و نیروهای محیطی رابطه غیرخطی وجود دارد.

## ۶- مراجع

- ۱- مردی پیرسلطان، محمدرضا، کیلانه ئی، فواد و محبی، بنیامین. (۱۳۹۸). تأثیر زلزله های حوزه نزدیک بر رفتار امواج سطحی مخازن ذخیره مایعات بتنی مستطیلی. نشریه مهندسی عمران امیرکبیر. doi: 10.22034/1398.51(3), 401-414.
- ۲- حاتمی برق، فرزاد و امیدتبریزی، فرید. (۱۴۰۰). پاسخ لرزه‌ای مخازن مستطیلی و استوانه‌ای بتنی تحت زلزله‌های حوزه نزدیک و دور. فصلنامه علمی پژوهشی اساس. 23(65), 5-14.



- ۳- لطفی، رضا، محمودآبادی، مسعود و دهقانی، احسان. (۱۴۰۱). بررسی تاثیر شکل مخازن مایع بر رفتار لرزه ای آنها با احتساب اندرکنشهای سیال و سازه و خاک و سازه. مهندسی سازه و ساخت.
- ۴- خسروی، شایان، یوسفی، محمدمهدی، و گودرزی، محمدعلی. (۱۴۰۰). توسعه منحنی های شکنندگی لرزه ای مخازن بتنی استوانه ای با استفاده از تحلیل غیرخطی. مهندسی عمران امیرکبیر (امیرکبیر)، ۵۳(۱)، ۸۸-۷۱.
- ۵- صادقی، ج. و رزاقی، ح. (۱۴۰۳). ارزیابی عملکرد لرزه ای مخازن بتنی زمینی در حالت سه بعدی تحت تحریکات لرزه ای گسل دور و نزدیک و اندرکنش خاک-سازه-سیال. مطالعات علوم کاربردی در مهندسی، ۳۴(۱۰)، ۵۷-۳۵.
- 6-Housner, G.W., "Dynamic pressure on accelerated fluid containers", Bulletin of the seismological society of America 47, 1957. pp.15-35.
- ۷- نادری، رضا و یوسفی سمنگانی، علی و طالب پور، محمدحسین، ۱۳۹۰، بررسی تاثیر نوع زلزله در تحلیل لرزه ای مخازن مدفون بتنی استوانه ای با توجه به اثر اندرکنش سیال و سازه، کنفرانس ملی مدیریت بحران، زلزله و آسیب پذیری اماکن و شریانهای حیاتی، تهران
- 8-Hajimehrabi, H. Behnamfar, F. Samani, A. Goudarzi, M.A. 2019. Fragility curves for baffled concrete cylindrical liquid-storage tanks, Soil Dynamics and Earthquake Engineering 119, 187–195.
- 10-Moslemi, M. Kianoush, M.R. 2012. Parametric study on dynamic behavior of cylindrical ground-supported tanks, Engineering Structures 42, 214–230.
- ۱۰- مهدیلوترکمانی، حامد و بسطامی، مرتضی، ۱۳۸۸، بررسی اثر نوع سیال در رفتار لرزه ای مخازن مدفون بتنی، اولین کنفرانس ملی مهندسی و مدیریت زیرساختها، تهران