

## Investigating the Displacements in the Wall of Rectangular Concrete Tanks Considering the Interaction of Fluid and Structure in Different Earthquakes

Sajad Esmailzadeh<sup>1\*</sup>, Mohammad Javad Mahmoodi<sup>2</sup>

1-Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Sahneh Branch, Islamic Azad University, Sahneh, Iran

2- Associate Professor, Faculty of Civil, Water, and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

### ABSTRACT

Earthquake is one of the strongest natural hazards that can cause significant human and economic losses. In this study, first the validation of the developed numerical model with water-structure interaction using the ALE method was performed in the Abaqus software, and then the response of the structure, considering the nonlinear effect of materials under earthquakes with different frequency domains and maximum accelerations, was presented. In other words, three earthquakes with low, medium and high frequency domains were selected, each of which was scaled at three acceleration levels: low (0.2 g), medium (0.35 g) and high (0.5 g), and the results are presented. The results of the study indicate that increasing the earthquake frequency domain causes a decrease in the maximum displacement response of the reservoir wall, which is true for both linear and nonlinear materials, except for the case of nonlinear materials under an earthquake with a maximum acceleration of 0.5 g, in which the earthquake with a medium frequency domain has the lowest displacement of 19.4 cm. With increasing the maximum acceleration of earthquakes, the displacement changes in the linear and nonlinear models are almost constant for all three frequency domains, so that with increasing the maximum acceleration from 0.2 g to 0.35 g and 0.5 g, there is an average increase of 65% and 130% for all three frequency domains. The structural responses under an earthquake with a low frequency domain significantly produce the highest displacement in the reservoir wall, even at low intensities; So that even at an acceleration of 0.2 g and for both linear and nonlinear modes, the materials have a displacement of nearly 16 cm, which indicates the factor of creating large displacements, even at low intensities. Also, by increasing the maximum acceleration to 0.5 g, these values are equal to 36.25 and 45.46 cm in linear and nonlinear behavior, respectively. By comparing the linear and nonlinear behavior of the materials, it can be concluded that in an earthquake with a high frequency domain and an intensity of 0.5 g, the displacement of the wall in the nonlinear mode has increased by about 70% compared to its linear mode, which indicates the importance of the nonlinear behavior of materials in areas with high seismicity and also the importance of the existence of faults with the potential to cause earthquakes with high frequency content.

### ARTICLE INFO

Receive Date: 01 December 2024

Revise Date: 01 March 2025

Accept Date: 11 March 2025

### Keywords:

Rectangular Concrete Tank  
Displacement  
Fluid-Structure Interaction  
Earthquake  
Damage

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2025.471078.3484

\*Corresponding author: Sajad Esmailzadeh.  
Email address: Sa.Esmailzadehyam@iaui.ac.ir

## بررسی جابه‌جایی‌ها در دیوار مخازن بتنی مستطیلی روزمینی با لحاظ نمودن اندرکنش

### سیال و سازه تحت زلزله‌های مختلف

سجاد اسماعیل زاده<sup>۱\*</sup>، محمد جواد محمودی<sup>۲</sup>

۱- استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد صحنه، دانشگاه آزاد اسلامی، صحنه، ایران

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

#### چکیده

زلزله یکی از قوی‌ترین مخاطرات طبیعی است که می‌تواند خسارات جانی و اقتصادی قابل توجهی را ایجاد نماید. مخازن بتنی نه تنها برای تأمین آب شرب، بلکه به منظور اطفاء حریق در هنگام وقوع زلزله از اهمیت استراتژیک فراوانی برخوردار هستند. از این رو، بررسی دقیق رفتار این سازه‌ها تحت اثر زلزله دارای اهمیت فراوانی است. یکی از پاسخ‌های قابل توجه در مخازن بتنی روزمینی هنگام زلزله، جابه‌جایی در طول دیوار بلند آن است که می‌تواند سبب خرابی سازه‌گرد. با توجه به عدم قطعیت‌های فراوان زلزله‌ها، مانند حوزه فرکانسی و مقدار حداکثر شتاب هر زلزله و همچنین در نظر گرفتن رفتار خطی برای طراحی در اکثر آیین‌نامه‌ها و مطالعات پژوهشی به جای رفتار غیرخطی، به دلیل هزینه محاسباتی به‌شدت کم آن‌ها، در این مطالعه، ابتدا صحت‌سنجی مدل عددی توسعه‌یافته با اندرکنش آب و سازه به روش ALE در نرم‌افزار آباکوس انجام شده و سپس پاسخ سازه، با در نظر گرفتن اثر غیرخطی مصالح تحت زلزله‌هایی با حوزه‌های فرکانسی و حداکثر شتاب‌های مختلف ارائه شده‌است. به عبارت دیگر، سه زلزله با حوزه فرکانسی کم، متوسط و بالا انتخاب شده که هر یک در سه سطح شتاب کم (0/2g)، متوسط (0/35g) و زیاد (0/5g) مقیاس شده‌اند و نتایج آن ارائه می‌گردد. نتایج پژوهش، بیان می‌کنند که بالا رفتن حوزه فرکانسی زلزله باعث کمتر شدن پاسخ حداکثر جابه‌جایی دیوار مخزن می‌شود که این نتیجه برای هر دو مصالح خطی و غیرخطی صدق می‌کند به جز در حالت مصالح غیرخطی تحت زلزله با حداکثر شتاب 0/5g که در آن زلزله با حوزه فرکانسی متوسط کمترین جابه‌جایی را با مقدار 19/4 سانتی‌متر دارد. با افزایش حداکثر شتاب زلزله‌ها، تغییرات جابه‌جایی در مدل‌های خطی و غیرخطی برای هر سه حوزه فرکانسی تقریباً ثابت بوده، به‌طوریکه با افزایش شتاب حداکثری از 0/2g به 0/35g و 0/5g به صورت میانگین افزایشی 65٪ و 130٪ برای هر سه حوزه فرکانسی داشته‌است. پاسخهای سازه تحت زلزله با حوزه فرکانسی پایین، به‌طور قابل توجهی بیش‌ترین جابه‌جایی را، حتی در شدت‌های کم، در دیوار مخزن ایجاد می‌کنند؛ به‌طوریکه حتی در شتاب 0/2g و برای هر دو حالت خطی و غیرخطی، مصالح نزدیک به 16 سانتی‌متر جابه‌جایی دارند که نشان‌دهنده عامل ایجاد جابه‌جایی‌های بزرگ، حتی در شدت‌های کم است. همچنین با افزایش شتاب حداکثری به مقدار 0/5g نیز این مقادیر در رفتار خطی و غیرخطی به ترتیب برابر 36/25 و 45/46 سانتی‌متر هستند. با مقایسه رفتار خطی و غیرخطی مصالح نیز می‌توان نتیجه گرفت که در زلزله با حوزه فرکانسی بالا و شدت 0/5g، جابه‌جایی دیوار در حالت غیرخطی حدود 70٪ نسبت به حالت خطی آن افزایش داشته که نشانگر اهمیت رفتار غیرخطی مصالح در مناطق با لرزه‌خیزی بالا و همچنین اهمیت وجود گسل‌هایی با پتانسیل ایجاد زلزله‌های با محتوی فرکانسی بالا است.

کلمات کلیدی: مخزن بتنی مستطیلی روزمینی، جابه‌جایی، اندرکنش سیال و سازه، زلزله و آسیب.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/jsce.2025.471078.3484	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2025.471078.3484	۱۴۰۴/۰۹/۳۰	۱۴۰۳/۱۲/۲۱	۱۴۰۳/۱۲/۲۱	۱۴۰۳/۱۲/۱۱	۱۴۰۳/۰۹/۱۱
سجاد اسماعیل زاده					*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	
Sa.Esmailzadehyam@iau.ac.ir						

## ۱- مقدمه

پاسخ لرزه‌ای مخازن مایعات به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر اندرکنش بین سازه‌های منعطف و سیال درون آن‌ها قرار می‌گیرد. رفتار دینامیکی مخازن منعطف تفاوت‌های قابل توجهی با مخازن صلب مشابه دارد. این موضوع به‌طور گسترده در طراحی لرزه‌ای مخازن استوانه‌ای مطالعه شده‌است، اما بررسی‌های انجام‌شده روی مخازن مستطیلی رزمینی به‌مراتب کمتر است. علاوه بر این، در بیشتر تحقیقات مربوط به مخازن مستطیلی رزمینی، فرض شده‌است که سازه به‌صورت صلب عمل می‌کند. در برخی از تحقیقات نیز به دلیل بالا رفتن هزینه محاسباتی و پیچیدگی مدل‌سازی اندرکنش آب و مخزن تحت زلزله با رفتار غیرخطی مصالح آن، رفتار مخزن را به صورت الاستیک در نظر گرفته‌اند تا پارامترهای اثر گذار دیگر بر رفتار لرزه‌ای مخزن را بررسی کنند [۱ و ۱۳]. از سوی دیگر، ویژگی‌های حرکت زمین، از جمله مقادیر بیشینه (شتاب، سرعت و جابه‌جایی)، فرکانس‌های غالب، و مدت‌زمان حرکت شدید، نقش مهمی در تأثیرگذاری زلزله بر رفتار سازه‌ها دارند. با توجه به اینکه بخش قابل توجهی از مخازن آب شرب ایران دارای شکل مستطیلی هستند و کشور ما در منطقه‌ای با لرزه‌خیزی بالا قرار دارد، مطالعه رفتار لرزه‌ای این مخازن تحت زلزله‌هایی با محتوای فرکانسی مختلف و همچنین تأثیر این نوع از زلزله‌ها بر پاسخ‌های واقعی‌تر این سازه‌ها (رفتار غیرخطی مصالح) اهمیت ویژه‌ای پیدا می‌کند. در این پژوهش، یک مخزن بتنی مستطیلی رزمینی، تحت تأثیر زلزله‌هایی با محتوای فرکانسی پایین، متوسط و بالا در مقیاس‌های کم، متوسط و بالا تحلیل‌شده و اثر محتوای فرکانسی بر پارامترهایی نظیر تلاطم سیال و جابه‌جایی دیواره مخزن با در نظر گرفتن رفتار غیرخطی مصالح آن بررسی می‌شود. هدف این پژوهش، مقایسه تأثیر حوزه فرکانسی‌های مختلف بر رفتار خطی و غیرخطی مخازن بتنی می‌باشد. با توجه به اینکه اثر اندرکنش خاک بر سازه قابل تفکیک با اثر حوزه فرکانسی زلزله نیست، از لحاظ نمودن آن صرف‌نظر می‌گردد. همچنین، در پژوهش‌های متعددی اثر اندرکنش خاک و سازه لحاظ نگردیده‌است. یافته‌های این تحقیق می‌توانند به درک بهتر از تأثیر غیرخطی بودن مصالح نسبت به حالت خطی آن در محتوای فرکانسی‌های مختلف زلزله با شدت‌های متفاوت آن بر پاسخ لرزه‌ای مخازن ذخیره مایعات، با در نظر گرفتن اندرکنش سیال و سازه، کمک کنند.

## ۲- ادبیات مروری

صافی و همکاران [۱]، با استفاده از روش ترکیبی المان محدود و هیدرودینامیک ذرات هموار، به بررسی رفتار لرزه‌ای مخازن تحت تحریک افقی پرداختند. در این مطالعه، محیط آب به روش هیدرودینامیک ذرات هموار و سازه مخزن به روش اجزای محدود مدل‌سازی شدند. روش هیدرودینامیک ذرات هموار که یک روش بدون مش است دارای مزایای فراوانی نسبت به دیگر روش‌های سنتی بر پایه شبکه‌بندی می‌باشد. سپس مخزن مدل‌سازی شده را تحت تأثیر رکورد زلزله‌هایی با محتوای فرکانسی مختلف به‌صورت تاریخیچه‌زمانی تحلیل نمودند. نتایج نشان داد، که رکورد با محتوای فرکانسی کمتر منجر به تلاطم با ارتفاع بیشتر می‌شود؛ در حالی که رکورد با محتوای فرکانسی متوسط علیرغم ارتفاع تلاطم کمتر، باعث به وجود آمدن پاسخ‌های بزرگتر سازه مخزن می‌گردد. همچنین مشاهده شد، که فرکانسهای غالب تلاطم با کاهش محتوای فرکانسی زلزله، افزایش پیدا می‌کند.

باقری و حسینی [۲]، در پژوهشی، رفتار لرزه‌ای مخازن ذخیره سیالات را تحت تحریکات پالس‌گونه به‌صورت پارامتریک بررسی کردند. برای این منظور ابتدا، مخازن را با مدل‌های مکانیکی معادل شبیه‌سازی نموده و سپس آنالیز دینامیکی را تحت این نوع تحریکات انجام دادند. نتایج بیان کردند که پالس‌هایی با پریود بلند با توجه به بالا بودن زمان تناوب مود نوسانی، جابجایی قائم سطح آزاد سیال و پالس‌هایی با پریود کوتاه به لحاظ پایین بودن زمان تناوب ضربانی، برش پایه و ممان واژگونی را تحت تأثیر و تشدید قرار می‌دهند. همچنین با افزایش تعداد پالس، پاسخ‌ها در حوالی پریود پالس نزدیک به زمان تناوب نوسانی افزایش چشمگیری می‌یابند. در حالی که، شکل پالس از نظر متقارن یا پاد متقارن بودن تأثیر محسوسی بر نتایج حاصل ندارد.

حاتمی و امید [۳]، در پژوهش‌ای، رفتار لرزه‌ای مخازن مستطیلی رزمینی و استوانه‌ای نگهداری مایعات را تحت اثر زلزله‌های حوزه نزدیک و دور مورد مطالعه قرار دادند. در این پژوهش، با استفاده از دو رکورد زلزله حوزه نزدیک و سه رکورد زلزله حوزه دور، پاسخ نوسانات سطحی سیال، فشار و فشار هیدرودینامیکی به‌وجود آمده بر دیوار مخازن مدل‌سازی شده در نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس، مورد مطالعه قرار

گرفته‌است. دقت روش مدل‌سازی مذکور با استفاده از نتایج آزمایش‌های انجام‌گرفته بر روی مخازن در مطالعات گذشته مورد ارزیابی قرار گرفته‌است. نتایج به‌دست آمده به‌خوبی نشان دادند که شکل هندسی مخزن و مشخصات زلزله می‌تواند اثر قابل توجهی بر پاسخ لرزه‌ای مخازن بگذارد.

صافی و رسول‌پور [۴]، اهمیت اثر مؤلفه قائم زلزله را بر پاسخ تلاطم و پاسخ سازه در مخازن سیال بتنی مستطیلی رزمینی بررسی کردند. آنها سازه مخزن را به‌روش المان محدود و محیط سیال را به‌روش هیدرودینامیک ذرات هموار، که یک روش بدون‌مش و دارای مزایای زیادی نسبت به روش‌های سنتی بر پایه مش است، مدل‌سازی نمودند. به‌منظور صحت‌سنجی، مدل‌سازی را با نتایج آزمایشگاهی و عددی معتبر موجود مقایسه کردند. نتایج نشان دادند که در نظرگیری مؤلفه قائم در تحلیل، اثر نسبتاً ناچیزی بر روی پاسخ تلاطم دارد اما اثر آن بر روی پاسخ سازه بسیار زیاد است، در عین حال حداکثر تلاطم در تحلیل تحت رکورد افقی با پرید غالب بالا مشاهده می‌شود.

امیدی‌نسب و شکیب [۵]، در پژوهشی مخزن بتنی ذخیره آب پایه‌داری با ظرفیت ۹۰۰ متر مکعب و ارتفاع ۳۲ متر را مدل نمود. سپس، پارامترهای نیروی برش پایه، لنگر واژگونی، جابه‌جایی و فشار هیدرودینامیک تحت اثر رکوردهای زلزله مختلف بررسی گردید. در این آنالیز مخزن به‌صورت خالی، نیمه‌پر و پر لحاظ شده و از روش اولرین برای در نظرگرفتن اندرکنش آب و سازه استفاده گردیده‌است. آنها نتیجه گرفتند که با افزایش ارتفاع آب در مخزن، نیروهای برش پایه، لنگرهای واژگونی، جابه‌جایی‌ها و فشارهای هیدرودینامیک افزایش می‌یابند. همچنین، محتوای فرکانسی زلزله، تاثیر به‌سزایی در مقادیر نتایج مختلف در این پژوهش دارد.

مسلمی و همکاران [۶]، در پژوهشی، بر روی تلاطم آب حاصل از آنالیز غیرخطی لرزه‌ای در مخازن بتنی مستطیلی رزمینی ذخیره آب مطالعه کردند. در این مطالعه پارامتری، آنها پیشنهاد نمودند که اثرات غیرخطی تلاطم آب اثر مهمی بر رفتار سازه‌های بتنی نگهدارنده سیال دارد. آنها بیان نمودند که به‌خصوص در مخازن کم ارتفاع، تلاطم سطحی آب می‌تواند پایداری مخازن را با خطر مواجه کند. برای نمایش بهتر رفتار مخازن بتنی مستطیلی رزمینی در هنگام وقوع زلزله از هندسه سه‌بعدی برای مخزن استفاده گردیده‌است. همچنین، اثر محتوای فرکانسی رکورد زلزله در آنالیز غیرخطی مخزن لحاظ گردیده‌است. در این پژوهش، با استفاده از روش اجزاء محدود و در نظر گرفتن اندرکنش سیال و سازه صورت گرفته‌است.

لی و چو [۷] در پژوهشی، مدل تک‌درجه آزادی یک‌بعدی ساده‌شده از مخزن مستطیلی رزمینی نگهداری سیالات را به‌صورت قاب و تیر طره‌ای، با استفاده از معادلات لاگرانژی ارائه نمودند. آنها پاسخهای دینامیکی سیستم سازه‌ای، نظیر لنگر واژگونی و برش پایه را، با مدلی با کف صلب، تنها با لحاظ نمودن اندرکنش سیال و سازه استخراج و بررسی نمودند. نتایج نشان دادند که مدل ساده‌شده، دقت قابل‌قبولی نسبت به مدل‌های سه‌بعدی پیچیده و مرسوم اجزاء محدود، در آنالیز مخازن بتنی نگهداری سیالات داشته و می‌تواند به‌طور وسیع در تجزیه و تحلیل مخازن بتنی با ابعاد متفاوت تحت اثر زلزله مورد استفاده قرار گیرد.

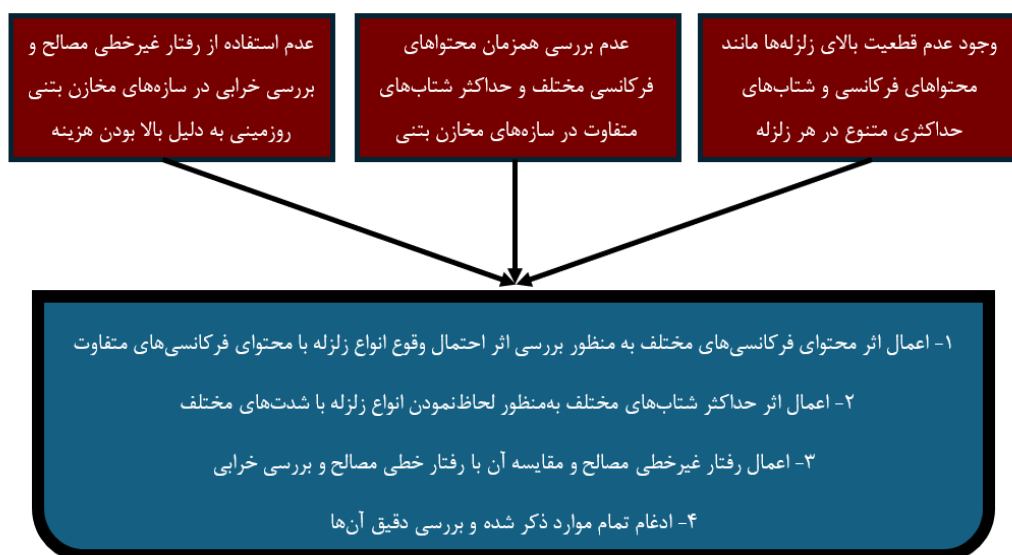
حسینی و بشرون [۸] در پژوهشی، روشهای قدیمی، نوین و اصلاح‌شده مدل‌سازی در مخازن نگهداری سیالات را با ذکر مزایا و معایب مقایسه نمودند. همچنین در ادامه، تکنیکهای کنترل لرزش و پایش سلامت سازه پیشنهادشده در جهت حمایت از این سازه‌های حیاتی در زمان رخداد زلزله بررسی می‌گردند. در انتها، مشکلات کنونی، شکافهای تحقیقاتی و موضوعات پیشنهادی در زمینه مدل‌سازی دینامیکی، حفاظت لرزه‌ای و پایش سلامت مخازن بتنی نگهداری سیالات در آینده آورده شده‌اند.

برنسی و ناسکیمینی [۹] در پژوهشی، مدلی عددی با در نظرگرفتن مصالح غیرخطی جهت اعمال فشارهای هیدرودینامیکی در مخازن ارائه نمودند. آنها نتیجه گرفتند که بین انتخاب مصالح در مخزن و رفتار مکانیکی تحت حالات بارگذاری لرزه‌ای ارتباط وجود داشته و با افزایش ارتفاع مخزن، توزیع فشار هیدرودینامیک غیریکنواخت شده که ممکن است سبب ناپایداری مخازن گردد. این نتایج به مهندسين کمک می‌کند تا در بهبود عملکرد لرزه‌ای مخازن ذخیره سیالات و کاهش خرابی فاجعه‌بار آنها در مناطق لرزه‌خیز تصمیم‌های درستی اتخاذ کنند.

مطالعه‌های رفتار لرزه‌ای مخازن بتنی رزمینی، معمولاً به بررسی محدودی از فرکانس‌های زلزله و یا شدت‌های آنها اکتفا می‌کنند [۱۳ و ۱۴]. علاوه بر این، تحلیل غیرخطی در این نوع از سازه‌ها و بررسی اثر خرابی، به دلیل بالا بودن هزینه محاسباتی و همچنین،

پیچیدگی اثر همزمانی شدت و حوزه فرکانسی زلزله‌ها با در نظر گرفتن رفتار غیرخطی مصالح و مقایسه آن با رفتار خطی، در پژوهش‌های مرتبط با مخازن بتنی مستطیلی روزمینی نادیده گرفته شده است [۱ و ۱۳]. در ادامه، در شکل شماره ۱، لزوم و روش انجام تحقیق به صورت چارتی مدون ارائه شده است.

با بررسی ادبیات مروری و پژوهش‌های صورت گرفته تاکنون، مطالعاتی در زمینه بررسی اثرهای ناشی از تحلیل‌های لرزه‌ای خطی و غیرخطی، با در نظر گرفتن اندرکنش سیال و سازه، بر روی جابه‌جایی در دیوار مخازن بتنی مستطیلی روزمینی تحت زلزله‌هایی با محتوای فرکانسی و شتاب‌های مختلف و همچنین، شناسایی ناحیه‌های بحرانی که بیانگر تشکیل و توسعه خرابی در این سازه‌های حیاتی می‌باشند، صورت نگرفته است. به منظور بررسی اثر فرکانس زلزله بر روی پاسخ غیرخطی مخازن بتنی، از پارامتر در نظر گرفته شده در پژوهش کیانوش و قائم مقامی [۱۰] استفاده شده است. این پارامتر که از نسبت  $PGA/PGV$  رکورد زلزله به دست می‌آید، مرز بین زلزله با حوزه فرکانس‌های کم، متوسط و زیاد را با مقدار این نسبت در بازه‌های کوچکتر از  $0/8$ ، بین  $0/8$  تا  $1/2$  و بزرگتر از  $1/2$  به ترتیب نشان می‌دهد. همچنین، برای بررسی اثر حداکثر شتاب زلزله بر روی پاسخ این سازه‌ها، سه بازه  $0/2g$ ،  $0/35g$  و  $0/5g$  که به ترتیب نشانگر زلزله با شدت کم، متوسط و زیاد می‌باشند، در نظر گرفته شده است. در ادامه به تاثیر پارامترهای فوق‌الذکر بر روی جابه‌جایی‌های لرزه‌ای در دیوار بلندتر مخازن بتنی با در نظر گرفتن اندرکنش آب و سازه پرداخته می‌شود.



شکل ۱: لزوم و روش انجام تحقیق

### ۳- معادلات حاکم:

حرکت یک سیال لزج و تراکم‌پذیر توسط مجموعه‌ای از معادلات حاکم توصیف می‌شود که شامل معادلات ناویر-استوکس و معادله پیوستگی هستند. این معادلات، بقای جرم و تکانه را در جریان سیال بیان می‌کنند. به طور خاص:

- **معادلات ناویر-استوکس:** بیانگر توصیف رفتار تکانه در سیال هستند. این معادلات شامل نیروهای مختلفی مانند فشار، ویسکوزیته و نیروهای خارجی می‌شوند.

- معادله پیوستگی: تضمین می‌کند که جرم در سیستم حفظ شود و به‌طور کلی تغییرات چگالی سیال در زمان را در نظر می‌گیرد.

برای شبیه‌سازی جریان‌هایی با سطح آزاد، همانند حرکت تلاطم، فرضیه‌های ساده‌کننده‌ای به کار می‌روند. یکی از این فرض‌ها، شبه هم‌دما بودن جریان است. در این حالت، تصور می‌شود که مقدار انرژی تبدیل‌شده به گرما در جریان سیال بسیار کم و قابل چشم‌پوشی است. این فرضیه امکان حذف معادله انرژی از معادلات حاکم را فراهم می‌کند و در نتیجه، معادلات ساده‌تر و محاسبات عددی کارآمدتری به دست می‌آیند. روش ALE یکی از رویکردهای پیشرفته در مدل‌سازی سیالات است که ترکیبی از ویژگی‌های دو روش اصلی لاگرانژی و اولری را ارائه می‌دهد. این روش، معادلات ناویر-استوکس و معادله پیوستگی را با انعطاف‌پذیری بیشتری نسبت به تغییرات شبکه عددی حل می‌کند. در این روش برخلاف روش لاگرانژی که شبکه به‌طور کامل با سیال حرکت می‌کند، در روش ALE، شبکه عددی می‌تواند مستقل از سیال حرکت کند. این ویژگی امکان کاهش اعوجاج مش را فراهم می‌کند. در ALE، حرکت نسبی سیال نسبت به شبکه محاسبه می‌شود. این امر باعث می‌شود که معادلات تکانه به صورت زیر اصلاح شوند:

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + (u - v) \cdot \Delta u \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 u + f \quad (1)$$

که در آن  $\rho$  چگالی سیال،  $u$  بردار سرعت سیال،  $v$  بردار سرعت شبکه یا مش،  $p$  فشار سیال،  $\mu$  و اسکوزیته دینامیکی و  $f$  نیروی حجمی اعمالی مانند گرانش می‌باشند. در جریان‌هایی که دارای تغییرات شدید مرزی هستند، روش ALE به حفظ دقت شبکه و جلوگیری از اعوجاج کمک می‌کند. این روش ترکیبی از انعطاف‌پذیری لاگرانژی برای مدل‌سازی تغییرات مرزی و قدرت روش اولری در مدل‌سازی جریان‌های پرسرعت را ارائه می‌دهد. به‌طور خلاصه، استفاده از روش ALE یک رویکرد تطبیقی و پیشرفته برای حل معادلات حاکم بر حرکت سیال است که امکان شبیه‌سازی‌های دقیق‌تر و پایدارتر در مسائل پیچیده جریان سیال را فراهم می‌کند [۱۱ و ۱۲].

### ۳-۱- تئوری موج خطی و غیرخطی

تئوری موج خطی و غیرخطی در تحلیل نوسانات سطحی مایعات مورد استفاده قرار می‌گیرد. تئوری موج خطی برای حل مسائل با نوسان سطحی پایین و در محیط آکوستیک به کار گرفته می‌شود. محیط پیوسته، هنگامی آکوستیک نامیده می‌شود که تنها قادر به توصیف و تشریح فشرده شدن و انبساط باشد و هیچ اثر برشی وجود نداشته باشد [۱۱ و ۱۲]. نیاز به تئوری غیرخطی موج در هیدرودینامیک سیستم مایع - مخزن زمانی افزایش می‌یابد که امواج نوسانی مایع با دامنه بالا بر روی سطح مایع شکل می‌گیرد که منجر به اثر غیرخطی فشار سطحی و موج نوسانی بر روی توزیع فشار روی دیواره‌ها می‌گردد. تئوری موج غیرخطی، در نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS با استفاده از "معادلات حالت" توصیف می‌شود. لازم به ذکر است که در نظر گرفتن اندرکنش سیال - مخزن در تعیین پاسخ‌های دینامیکی مخزن بتنی مستطیلی روزمینی نگهداری آب بسیار مهم است. در سیستم سیال - مخزن، آب داخلی مخزن با المان‌های پیوسته سه‌بعدی<sup>۱</sup> مدل می‌شود. همچنین، برای حل عددی پایدار، فرض می‌شود که لزجت سیال پایین و تراکم ناپذیر می‌باشد. در ادامه، پاسخ سیال، با استفاده از یک رابطه خطی حالت و یک مدل برشی ویسکوز نیوتونی مدل می‌گردد.

معادلات حالت در مدل مایع - مخزن یک مدل مصالح هیدرودینامیک را ایجاد می‌کند، که مقاومت حجمی مصالح و فشار (مثبت در جهت فشاری) را به صورت توابعی از چگالی سیال و انرژی مشخصه (انرژی داخلی در واحد حجم) مشخص می‌سازد. آب، به عنوان یک سیال تقریباً تراکم‌ناپذیر، دارای مدول حجمی زیادی در حد  $K = 2.07 GPa$  است. با این حال، در شبیه‌سازی‌های عددی با استفاده از نرم‌افزارهای اجزای محدود مانند ABAQUS، معمولاً از مدول حجمی<sup>۲</sup> کاهش‌یافته‌ای استفاده می‌شود که دو یا سه مرتبه کوچک‌تر از مقدار واقعی است. این مقدار کاهش‌یافته، در حالی که فرض تراکم‌ناپذیری سیال را حفظ می‌کند، از بروز ناپایداری عددی جلوگیری کرده و دقت شبیه‌سازی را

<sup>1</sup> 3D continuum elements

<sup>2</sup> Bulk modulus

بهبود می‌بخشد. در این پژوهش، مدول حجمی معادل  $K = 2.07 \text{MPa}$  که سه مرتبه از نظر بزرگی (یعنی ۱۰۰۰ برابر) کوچک‌تر از مقدار واقعی مدول حجمی آب است، مورد استفاده قرار گرفته است. این مقدار، با حفظ فرض تراکم‌ناپذیری، برای شبیه‌سازی‌های عددی کافی است. در سیالات، سرعت صوت یا امواج فشاری  $C$ ، با توجه به مقادیر مدول حجمی  $K$  و چگالی  $\rho$  با استفاده از رابطه زیر تعیین می‌گردد:

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \quad (2)$$

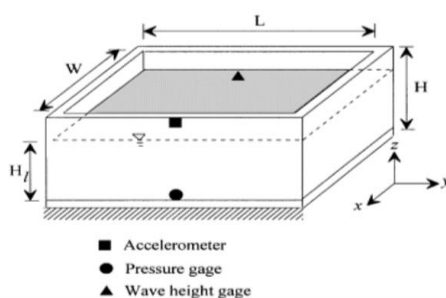
برای محاسبه مدول حجمی آب در رابطه بالا، چگالی آب به میزان  $\rho = 983 \text{kg/m}^3$  و سرعت امواج فشاری به مقدار  $c = 45 \text{m/s}$  لحاظ می‌گردد که حدود  $2 \text{Mpa}$  محاسبه می‌گردد؛ ولی در پژوهش حاضر به منظور مدل‌سازی دقیق‌تر، مقدار واقعی آن به میزان  $c = 1450 \text{m/s}$  در نظر گرفته شده است.

### ۳- صحت‌سنجی مدل

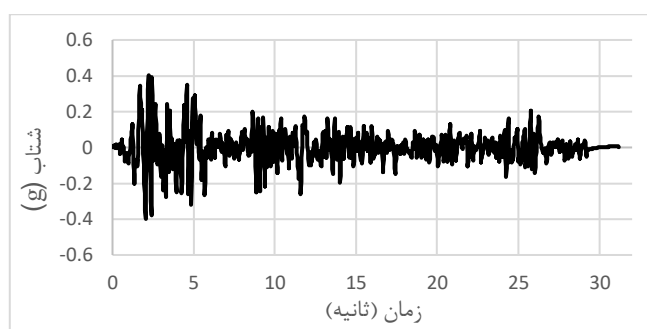
به منظور صحت‌سنجی عددی مدل اندرکنش مخزن و آب تحت بارگذاری لرزه‌ای، از مقاله کیم و همکاران با موضوع 'تحلیل اندرکنش آب و سازه مخازن مستطیلی رزمینی سه‌بعدی به وسیله روش المان محدود و المان مرزی متغیر، و مقایسه آن با نتایج آزمایشگاهی' استفاده شده است [۱۳]. در این پژوهش، ابتدا یک مخزن مقیاس شده بر روی میز لرزان که تحت زلزله مقیاس شده ال-سنتر قرار گرفته است، مورد آزمایش قرار گرفته و در نهایت یک مدل عددی با مقیاس واقعی تحت همان زلزله ارائه شده است. نتایج عددی موجود در این پژوهش شامل المان محدود و المان مرزی متغیر کوپله است که برای تحلیل پاسخ دینامیکی، شامل حرکت تلاطم سطح آزاد مخازن سیال مستطیلی رزمینی که تحت اثر تحریک افقی زمین قرار گرفته‌اند به کار می‌رود. سازه مخزن به روش المان محدود و سیال به روش المان مرزی غیرمستقیم مدل شده‌اند. با به حداقل رساندن یک تابع لاگرانژی منفرد که برای کل سیستم تعریف شده است معادله حاکم با ضرایب متقارن به دست آمد. در این پژوهش، برای بررسی صحت این روش، نتایج با داده‌های میز لرزه‌ای یک مخزن مستطیلی رزمینی سه‌بعدی مقایسه شده‌اند. در این پژوهش، به منظور صحت‌سنجی مدل‌سازی عددی، نتایج آن با نتایج مدل عددی پژوهش ذکر شده مقایسه می‌گردد. برای مدل‌سازی عددی و مقایسه نتایج از نرم‌افزار المان محدود آباکوس استفاده شده است.

در پژوهش مورد نظر، مشخصات مصالح بتنی استفاده شده برای یک مخزن بتنی مستطیلی رزمینی ذخیره پسماندهای هسته‌ای می‌باشد که خصوصیات مصالح آن به صورت خطی در نظر گرفته شده‌اند و عبارتند از: دانسیته  $\rho = 2400 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ ، مدول یانگ  $E = 2.1 \times 10^{10} \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$  و ضریب پواسون  $\nu = 0.17$ . ابعاد هندسی مدل به صورت زیر می‌باشد: ارتفاع دیوار مخزن  $H = 10 \text{m}$ ، ضخامت دیوار  $t = 1 \text{m}$ ، طول مخزن  $L = 50 \text{m}$ ، عرض مخزن  $W = 20 \text{m}$  و ارتفاع آب  $H_1 = 9 \text{m}$  در نظر گرفته شده است. همچنین به منظور در نظر گرفتن اثر میرایی ذاتی سازه به میزان ۵ درصد تحت بارهای لرزه‌ای، از میرایی رایلی با ضرایب  $\alpha = 1.311 \text{s}^{-1}$  و  $\beta = 1.685 \times 10^{-3} \text{s}$  استفاده شده است که پس از انجام تحلیل آنالیز مودال این پارامترها محاسبه می‌گردند.

این پارامترها در شکل ۲ نمایش داده شده‌اند. همچنین، در شکل ۳، زلزله ال سنتر که به منظور بررسی پاسخ‌های لرزه‌ای در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته شده است، ارائه می‌گردد. همچنین، در مسائل اندرکنش سازه و سیال به دلیل تغییر شکل‌های زیاد در آب که باعث تغییر در کیفیت مش و تغییر شکل زیاد در مشها و همچنین باعث کاهش واگرایی و کاهش سرعت در حل مدل می‌شود، از تکنیک مش‌بندی سازگار (ALE) یا المان اوپلری - لاگرانژی استفاده شده است. این روش، کیفیت مش‌ها را در طول تحلیل ثابت نگاه داشته و از بهم‌ریختگی و تغییر شکل بیش از حد مش‌ها جلوگیری می‌کند. برای مدل‌سازی بتن تنها رفتار الاستیک آن در نظر گرفته شده است.



شکل ۲: شماتیک سه بعدی مخزن [۱۳]



شکل ۳: مولفه شمالی - جنوبی زلزله ال سنتر و [۱۳]

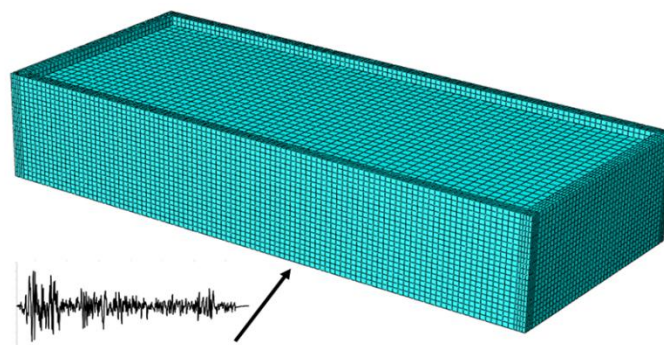
خصوصیات مصالح در نظر گرفته شده برای آب در جدول شماره ۱ ارائه شده است.

جدول ۱: مشخصات مصالح اختصاصی داده شده به سیال [۱۴]

پارامتر	$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	$C_0$ (m/s)	$\mu$ (N - S/m <sup>2</sup> )	$\Gamma_0$	s
مقدار	۱۰۰۰	۱۴۵۰	۰/۰۰۱	۰	۰

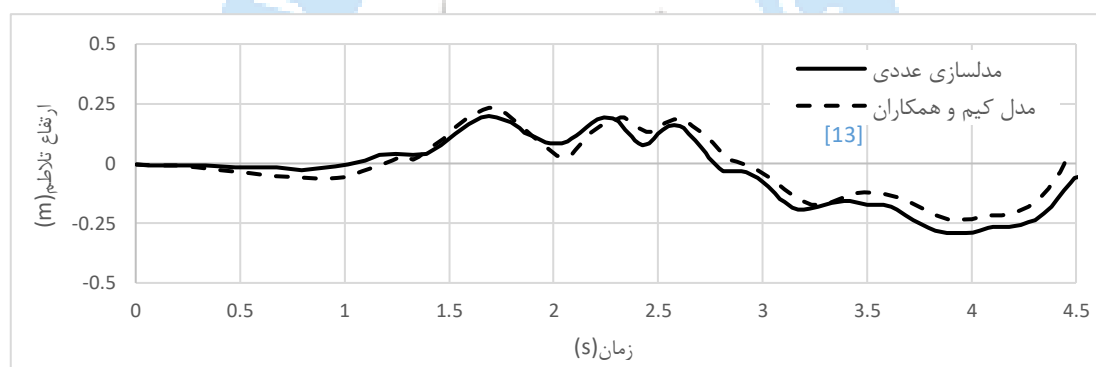
در جدول بالا،  $\rho$  چگالی سیال،  $C_0$  سرعت صوت در آب،  $\mu$  ویسکوزیته،  $\Gamma_0$  و  $S$  نیز ثابتهای ماده هستند.

به منظور مدل سازی مخزن و آب از المانهای سه بعدی در محیط پیوسته و با هشت نقطه با انتگرال کاهش یافته (C3D8R) استفاده شده است. در مسائل نوسان مایع، فرض می گردد که مایع تراکم ناپذیر و غیر لزج است زلزله نیز به پای مخزن در جهت عمود بر دیوار طولی آن وارد شده است. ضخامت دیوار مخزن ثابت، کف مخزن صلب لحاظ شده و همچنین، از مدل سازی اندرکنش خاک و سازه صرف نظر شده است. برای لحاظ نمودن تاثیر بیشتر نیروی زلزله بر روی پارامترهای دینامیکی مخزن بتنی مستطیلی روزمینی ذخیره آب از جمله جابه جایی و آسیب کششی، نیروی زلزله به کف مخزن و در راستای عمود بر دیوار بلندتر وارد شده است. شکل شماره ۴ نمایش دهنده مش بندی مدل عددی در نرم افزار آباکوس و محل اعمال نیروی زلزله است.



شکل ۴: مش بندی و محل اعمال نیروی زلزله.

برای اندرکنش بین سطوح آب و دیواره های مخزن از اندرکنش سطح به سطح<sup>۳</sup> با خصوصیات بدون اصطکاک<sup>۴</sup> برای رفتار مماسی<sup>۵</sup> و اندرکنش سخت برای رفتار قائم<sup>۶</sup> استفاده شده است. در مسائل اندرکنش سازه و سیال به دلیل تغییر شکل های زیاد در آب که باعث تغییر در کیفیت مش و تغییر شکل زیاد در مشها و همچنین باعث کاهش واگرایی و کاهش سرعت در حل مدل می شود، از تکنیک مش بندی سازگار (ALE) یا المان اویلری - لاگرانژی استفاده شده است. این روش کیفیت مشها را در طول تحلیل ثابت نگه داشته و از به هم ریختگی و تغییر شکل بیش از حد مشها جلوگیری می کند. برای مدلسازی بتن تنها رفتار الاستیک آن در نظر گرفته شده است. در نهایت نتایج حاصل از جابه جایی سطح آب و فشار بر روی دیوار با نتایج پژوهش مقایسه شده که با توجه به نمودارهای شکل های ۵ و ۶، این نتایج با خطای ناچیزی با یکدیگر مشابهت قابل قبولی به میزان اختلاف کمتر از ۱۰ درصد را دارا می باشند.



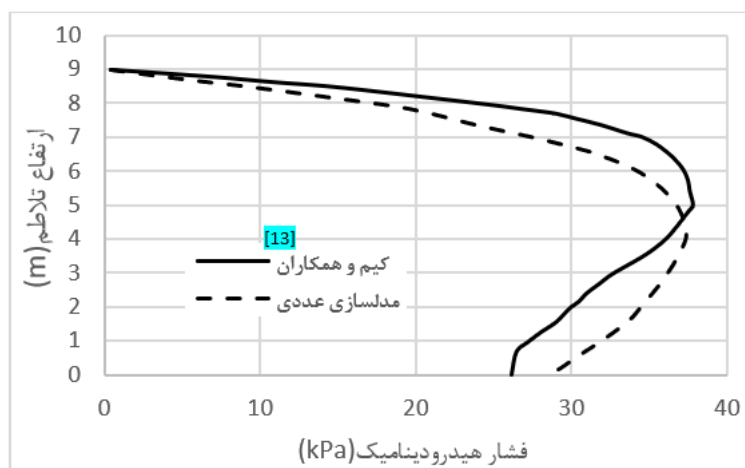
شکل ۵: نمودار مقایسه تاریخچه تلاطم سطح آب در مدل نرم افزاری و مقاله کیم و همکاران [۱۳].

<sup>3</sup> Surface to surface contact

<sup>4</sup> Frictionless

<sup>5</sup> Tangential behavior

<sup>6</sup> Normal behavior



شکل ۶: نمودار مقایسه ارتفاع تلامب سطح آب در برابر فشار هیدرودینامیک مدل نرم‌افزاری و مقاله کیم و همکاران [۱۳].

#### ۴- معرفی مدل، پارامترهای لرزه‌ای زلزله‌ها و خصوصیات غیر خطی مصالح

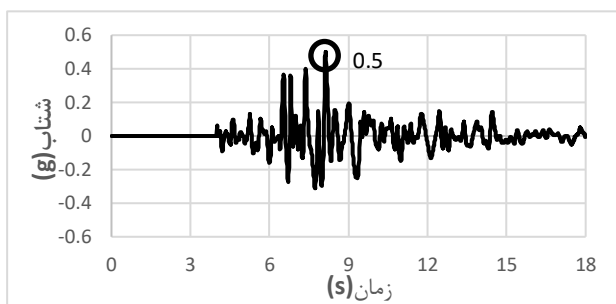
تحلیل رفتار سازه‌ها در برابر زلزله نیازمند شناخت دقیق پارامترهای لرزه‌ای و خصوصیات مصالح است. در این بخش به معرفی کلی مدل، پارامترهای لرزه‌ای در نظر گرفته شده برای تحلیل سازه مورد نظر و همچنین خصوصیات مصالح غیر خطی پرداخته می‌شود. مخزنی با ابعاد مدل عددی کیم و همکاران که در بخش صحت‌سنجی مشخصات هندسی و اندرکنش مورد استفاده در مدلسازی عددی به صورت کامل ارائه شده است، در نظر گرفته شده است. به منظور در نظر گرفتن اثر غیر خطی مصالح، از مدل همگن شده بتن با در نظر گرفتن اثر میلگرد، بدون مدل‌سازی آن استفاده شده است که در ادامه به صورت کامل شرح داده خواهد شد. همچنین، همانطور که در بخش‌های قبل اشاره شد، به منظور بررسی اثر فرکانس و شدت زلزله بر روی پاسخ لرزه‌ای مخازن بتنی از نسبت  $PGA/PGV$  و مقدار بیشینه شتاب زلزله استفاده می‌شود.

#### ۴-۱- زلزله‌ها و پارامترهای لرزه‌ای آن‌ها

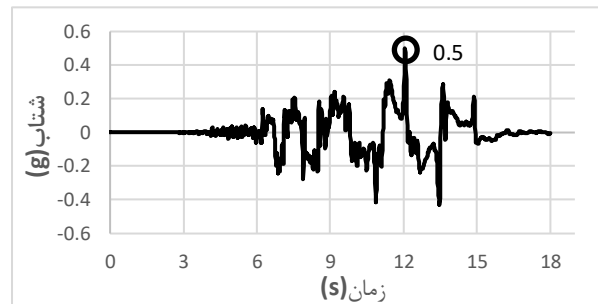
از سه رکورد چوئیتسو، نورتریج و دارفیلد به ترتیب برای زلزله با فرکانس کم، متوسط و زیاد استفاده شده است. همچنین به منظور بررسی اثر شدت بزرگای زلزله بر پاسخ لرزه‌ای این نوع از سازه‌ها، سه مقدار  $0.2$ ،  $0.35$  و  $0.5$   $g$  به ترتیب به‌عنوان بازه‌های با شدت کم، متوسط و زیاد در نظر گرفته شده‌اند. در جدول شماره ۲ مشخصات زلزله‌های انتخاب شده ارائه شده‌اند. همچنین، جدول شماره ۲ نشانگر مشخصات زلزله‌های در نظر گرفته شده با مقیاس  $0.5$  می‌باشد. در شکل ۷، نمودار تاریخچه زمانی رکوردهای زلزله چوئیتسو، نورتریج و دارفیلد با مقیاس  $0.5$  نمایش داده شده‌است.

جدول ۲: پارامترهای دامنه رکوردهای انتخاب شده پس از اعمال مقیاس

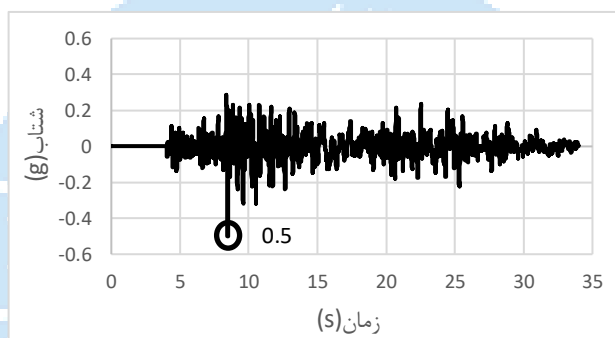
رکورد زلزله	تاریخ وقوع	ایستگاه	شتاب بیشینه (g)	سرعت بیشینه (m/s)	جابه‌جایی بیشینه (cm)	$PGA/PGV$ (g/m/s)
چوئیتسو	16/07/2007	Chuetsu-oki	0.57	1.19	12	0.48
نورتریج	17/01/1994	090 CDMG STATION	0.68	0.61	32	1.11



الف



ب



ج

شکل ۷: نمودارهای تاریخچه زمانی شتاب رکوردهای مقیاس شده (الف) چوئیتسو (ب) نور تریج (ج) دارفیلد

## ۲-۴- خصوصیات غیرخطی مصالح

در پژوهش کیم و همکاران، خصوصیات مصالح به صورت خطی در نظر گرفته شده است اما در این پژوهش سعی در مقایسه تأثیر خصوصیات مصالح غیرخطی با خطی شده است. به منظور بررسی پاسخ لرزه‌ای مخازن بتنی با در نظر گرفتن رفتار غیرخطی مصالح، باید رفتار غیرخطی میلگردهای مورد استفاده در این مخازن، اندرکنش آن‌ها با بتن و همچنین رفتار غیرخطی بتن در مدل‌سازی لحاظ گردد. در این پژوهش، از مدل رفتاری کریرا و چو [۱۵] (رابطه ۳) که یکی از رایج‌ترین مدل‌های رفتاری مورد استفاده برای بتن تحت بارهای لرزه‌ای می‌باشد، به منظور مدل‌سازی رفتار غیرخطی بتن انتخاب شده است.

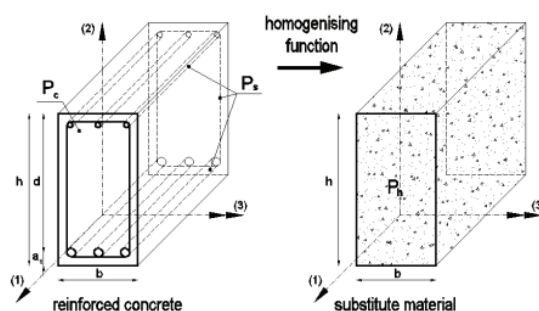
$$\frac{\sigma_c}{\sigma_{cu}} = \frac{\beta \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_c}\right)}{\beta - 1 + \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_c}\right)\beta} \quad (3)$$

در این رابطه  $\sigma_{cu}$  حداکثر مقاومت فشاری بتن،  $\epsilon_c$  کرنش متناظر با حداکثر مقاومت فشاری و  $\beta$  پارامتر مصالح که وابسته به شکل دیاگرام تنش-کرنش است. در جدول شماره ۳، خصوصیات مصالح در نظر گرفته شده برای بتن ارائه شده است.

جدول ۳- خصوصیات مصالح بتن

$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	E (Gpa)	$\nu$	$\sigma_{cu}$ (Mpa)	$\sigma_{t0}$ (Mpa)
-----------------------------	---------	-------	---------------------	---------------------

با توجه به بالا بودن مقدار میلگردهای مورد استفاده در این مخازن و همچنین به تبع آن بالا رفتن هزینه زمانی محاسبات، از پژوهش “مدل ماده جایگزین همگن برای مدل سازی بتن مسلح” [۱۷] به منظور در نظر گرفتن رفتار غیرخطی همگن بتن و میلگردهای مدفون در آن استفاده شده است. با استفاده از این روش، مصالح در المانهای بتن مسلح به صورت همگن لحاظ می گردند. در نتیجه با شبیه سازی رفتار سازه در مقیاس بزرگ، کارایی سازه در حضور بارهای مختلف مانند زلزله، ضربه و انفجار افزایش یافته و هزینه محاسباتی کاهش می یابد. بر اساس تئوری همگن سازی، بتن مسلح به عنوان ترکیبی ناهمگن از مصالح بتنی و فولاد مسلح کننده، با مصالح همگن جایگزین می شود. روند همگن سازی بتن مسلح در شکل شماره ۸ نمایش داده شده است.



شکل ۸: دیاگرام شماتیک بتن مسلح همگن سازی شده [۱۶]

در این پژوهش رابطه ای به منظور همگن سازی رفتار بتن-میلگرد ارائه شده است که به صورت زیر می باشد:

$$P_h = P_c + F_h \cdot P_s \quad (۴)$$

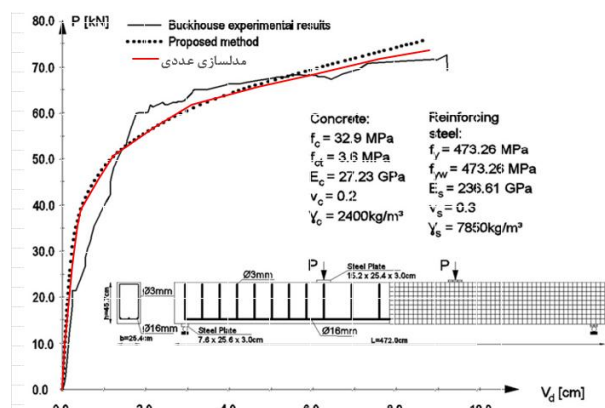
رابطه تابع همگن ساز، پارامترهای مصالح های تشکیل دهنده بتن و میلگردهای فولادی را به پارامترهای مربوط به یک مصالح همگن توسط ضریب  $F_h$  تبدیل کرده که به آن نسبت موثر میلگرد گفته می شود. این پارامتر به صورت زیر تعریف می گردد:

$$F_h = \rho_{eff} \quad (۵)$$

$$\rho_{eff} = \sqrt{(\rho_1 \cdot \phi_{y1})^2 + (\rho_2 \cdot \phi_{y2})^2 + (\rho_3 \cdot \phi_{y3})^2} \quad (۶)$$

که اعداد ۱، ۲ و ۳ نشانگر جهات میلگردگذاری در مقطع و  $\phi_{yi} = \frac{f_{yi}}{f_{ymax}}$  می باشد.  $f_{yi} = \{f_{y1}, f_{y2}, f_{y3}\}$  مقاومت تسلیم میلگردهای جهت ۱، ۲ و ۳ می باشند. همچنین مقدار  $f_{ymax}$  بزرگترین مقاومت تسلیم در ۳ جهت میلگردگذاری در مقطع است. در این پژوهش، تیری به طول ۴۷۲ سانتی متر با مقطع مستطیلی  $۲۵/۴ \times ۴۵/۷$  سانتی متر، با سه میلگرد طولی با قطر ۱۶ میلی متر در بخش تحتانی تیر در نرم افزار آباکوس مدل سازی شده است. خاموت های آن نیز با قطر ۳ میلی متر به فاصله ۱۵۰ سانتی متری در طول تیر در نظر گرفته شده اند که به منظور در نظر گرفتن مدفون شدگی تمام میلگردها در مقطع تیر بتنی، از اندرکنش ناحیه مدفون شده<sup>۷</sup>، استفاده شده است. تکیه گاه های دو انتهای تیر به صورت مفصلی و محل اعمال بار و خصوصیات مصالح بتن و میلگردها به منظور شبیه سازی صحیح آزمایش خمش چهار محوره در شکل ۹ ارائه شده است. شکل شماره ۹، نشانگر مقایسه نتایج عددی با آزمایشگاهی بوده که نمایانگر اختلافی کمتر از ۱۰ درصد می باشد.

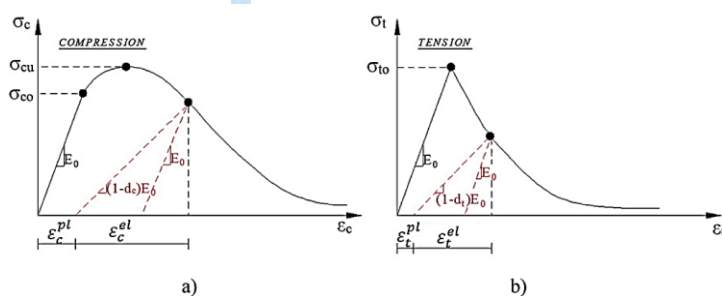
<sup>7</sup> Embedded region



شکل ۹: نمودار مقایسه مدل عددی با نتایج عددی و آزمایشگاهی [۱۶]

در پژوهش حاضر، نسبت میلگرد به مقطع بتنی مقدار  $0.022$  در نظر گرفته شده که این مقدار از نسبت میلگرد برای مقاطع مخزن مورد استفاده، معادل میلگردهای افقی و قائم به مقدار  $\phi 16 @ 200$  می‌باشد که این حجم از چیدمان میلگرد مقدار مناسبی برای این نوع از سازه‌ها است. که این مقدار از مقاله لی [۱۶]، الهام گرفته شده است که در آن از آیین‌نامه‌های Eurocode8 و ASCE 4-16 به منظور در نظر گرفتن این مقدار از میلگردهای مسلح کننده، استفاده شده است.

با در نظر گرفتن مقدار  $0.022$  برای نسبت میلگرد و با توجه به اینکه مقطع مورد مطالعه دارای مقادیر فولاد یکسان در دو جهت می‌باشد و همچنین میلگردهای در نظر گرفته شده در دو جهت یکسان و تنش تسلیم یکسانی دارند، مقدار  $\phi_{yi} = 1$  می‌باشد. با محاسبه  $\rho_{eff} = 0.003$  و اثر آن بر روی پارامترهای فشاری و کششی، میتوان مقطع بتنی را بدون مدل‌سازی میلگردهای آن و در نظر گرفتن اثر آن‌ها، مدل‌سازی و تحلیل کرد. در شکل شماره ۱۰، نمودارهای تنش-کرنش بتن در کشش و فشار تک محوره نشان داده شده است که در این نمودار، کشش تک محوره تا نقطه تنش خرابی  $\sigma_t$  به صورت خطی تغییر می‌کند که این تنش با شروع و گسترش ترک‌های ریز در بتن همراه است. پس از عبور از این تنش، همانطور که اشاره شد، خرابی‌های سطح بتن به صورت ترک‌های قابل مشاهده هستند که به صورت منحنی نرم شوندگی نمایش داده می‌شوند. تحت فشار تک محوره نیز، پاسخ تا رسیدن به نقطه جاری شدگی  $\sigma_{c0}$  به صورت الاستیک بوده و رفتار در این ناحیه پلاستیک عموماً به صورت منحنی سخت‌شدگی بیان می‌شود که در نهایت با رسیدن به نقطه تنش نهایی  $\sigma_c$  منحنی‌ها به صورت نرم‌شونده در می‌آیند.



شکل ۱۰: پاسخ بتن تحت بارگذاری تک‌محوره (a) در فشار (b) در کشش [۱۵]

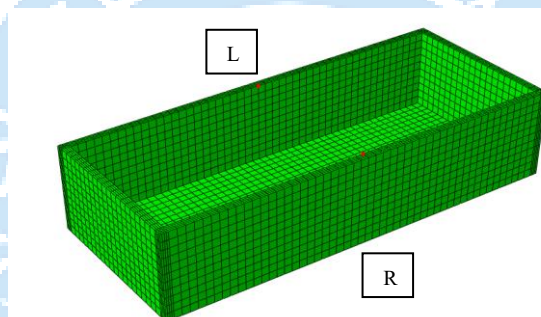
پارامترهای پیش فرض مناسب برای بتن در معادله آسیب بتن در جدول شماره ۴ زیر ارائه شده است.

جدول ۴: پارامترهای مدل آسیب بتن [۱۵]

$\psi$	Kc	$f_{b0}/f_{c0}$	$\epsilon$
--------	----	-----------------	------------

همچنین پارامتر ویسکوزیته<sup>۸</sup> برای بتن صفر می‌باشد که به منظور جلوگیری از عدم همگرایی در محاسبات این مقدار ۰/۰۰۱ در نظر گرفته شده است. در ادامه به بررسی نتایج پاسخ جابه‌جایی دیوار مخزن بتنی مستطیلی روزمینی تحت زلزله‌های با حوزه فرکانس‌های زیاد، متوسط و کم با مقایسه رفتار خطی و غیرخطی مصالح تحت این زلزله‌ها پرداخته می‌شود. ابعاد، خصوصیات مصالح بتن و سیال، شرایط مرزی، نحوه اعمال اندرکنش آب و سازه، مقدار ضرایب میرایی ذاتی سازه، اندازه مش‌ها و همچنین محل اعمال بار لرزه‌ای عیناً شبیه به مدل صحت‌سنجی می‌باشد که در بخش ۳ پژوهش جزئیات آن به صورت کامل ذکر شده است؛ با این تفاوت که برای مدل‌های غیرخطی مصالح، از مصالح غیرخطی محاسبه شده در بخش قبل استفاده شده است.

همچنین مقدار حداکثر شتاب کم، متوسط و زیاد برای این زلزله‌ها در نظر گرفته شده است. به منظور بررسی پارامترهای فوق‌الذکر بر روی پاسخ این نوع از سازه‌ها، پاسخ جابه‌جایی دیواره بیرونی مخزن (به علت بحرانی بودن آن نسبت به دیواره داخلی) به عنوان پاسخ مرجع انتخاب شده است. بحرانی‌ترین بخش مخزن مستطیلی روزمینی برای پاسخ جابه‌جایی، وسط و بالای دیوار بیرونی بلند مخزن می‌باشد (شکل شماره ۱۱) که نتایج جابه‌جایی برای هر دو دیوار در ادامه ارائه می‌گردد. همچنین به دلیل عدم قطعیت‌های زلزله، پاسخ هر دو دیوار با نام‌های L و R که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، ارائه می‌گردد.



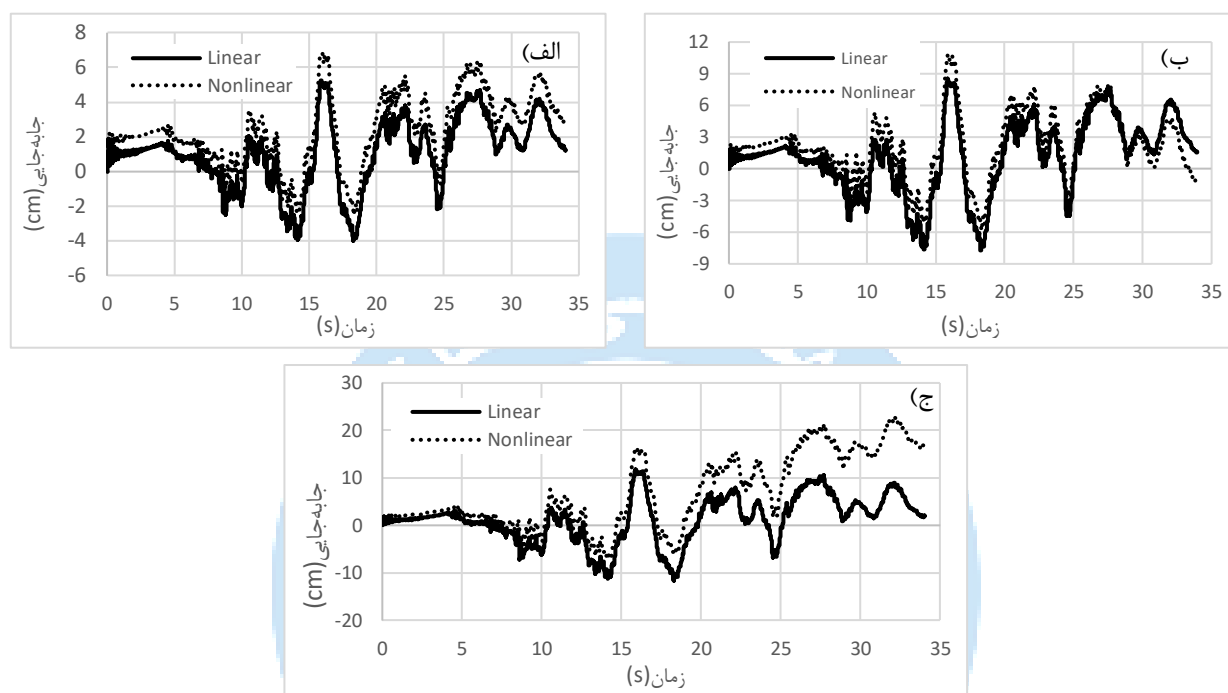
شکل ۱۱: نقاط پاسخ جابه‌جایی در لبه بیرونی وسط و بالای دیوارهای بلند مخزن

#### ۴ - ۱ مقایسه پاسخ جابه‌جایی دیوار با در نظر گرفتن رفتار خطی و غیرخطی مصالح تحت زلزله دارفیلد (محتوای فرکانسی بالا)

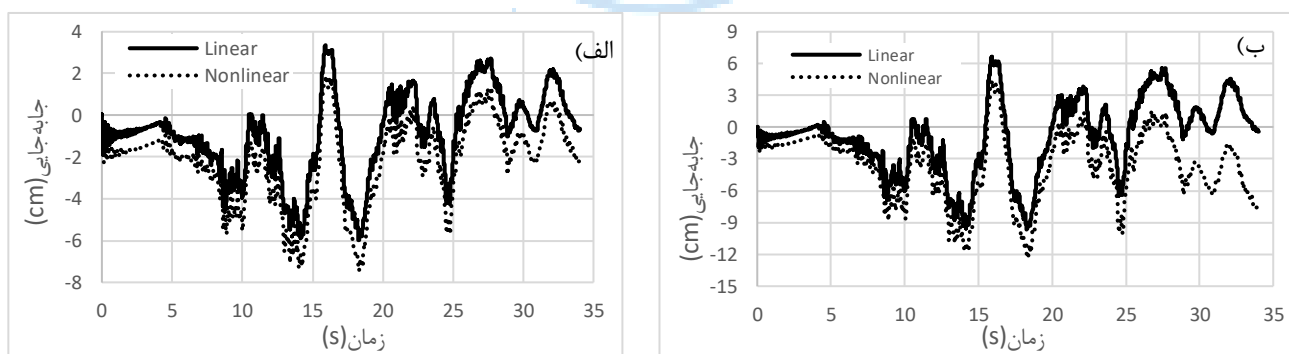
در این بخش به بررسی و مقایسه جابه‌جایی خطی و غیرخطی مصالح مخزن تحت زلزله با حوزه فرکانسی بالا (زلزله دارفیلد) پرداخته می‌شود. همچنین زلزله در مقیاس ۰/۲g، ۰/۳۵g و ۰/۵g برای بررسی شدت زلزله و اثر آن بر روی رفتار خطی و غیرخطی نیز در نظر گرفته شده است. در شکل شماره ۱۲، پاسخ جابه‌جایی برای زلزله با شدت ۰/۲g، ۰/۳۵g و ۰/۵g به ترتیب برای دیوار L و R ارائه شده است. زمان رخداد حداکثر جابه‌جایی برای زلزله‌های ۰/۲ و ۰/۳۵ تقریباً یکسان بوده و برای بخش L تقریباً در ۱۶/۵ ثانیه بوده و برای بخش L، حدود ۱۹ ثانیه از زمان زلزله رخ می‌دهد. این مقادیر به ترتیب برای بخش L و R، برای زلزله با شدت حداکثری ۰/۲، ۵/۲۶ و ۵/۹۷ سانتی‌متر برای حالت خطی ۶/۷۷ و ۷/۵۴ برای حالت غیرخطی است. همچنین، این مقادیر برای زلزله با شدت ۰/۳۵، ۸/۵ و ۹/۶۵ سانتی‌متر برای حالت خطی و ۱۰/۸۷ و ۱۲/۴ سانتی‌متر برای حالت غیرخطی می‌باشد. مقادیر ارائه شده حالت قدرمطلق مقادیر جابه‌جایی هستند. همانطور که از مقادیر جابه‌جایی و روند کلی نمودار برای این دو حالت زلزله مشاهده می‌گردد، حداکثر شتاب ۰/۲ و ۰/۳۵ روند کلی در پاسخ جابه‌جایی دارند و با در نظر گرفتن مصالح غیرخطی تنها ۲۱ الی ۲۲ درصد اختلاف در مقادیر پاسخ مشاهده می‌گردد و روند کلی جابه‌جایی برای هر دو سمت دیوار تقریباً یک شکل است. با افزایش مقدار شتاب حداکثری به میزان ۰.۵g، تغییر مصالح از خطی به

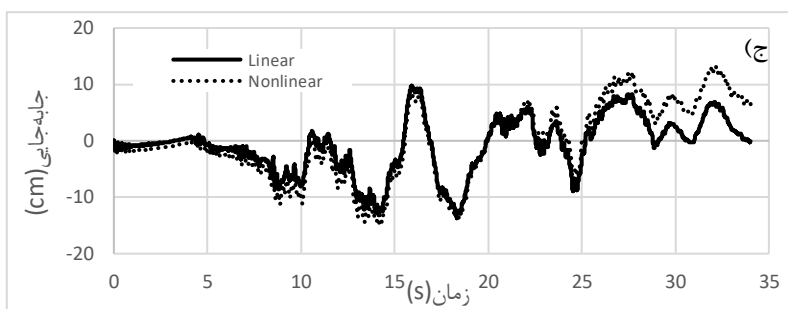
<sup>8</sup> Viscosity parameter

غیرخطی مشهود می‌گردد، به طوری که هم زمان رخداد حداکثر جابه‌جایی نسبت به مدل‌های دیگر تغییر می‌کند و هم روند کلی نمودار جابه‌جایی در یکی از دیوارها از ثانیه تقریباً ۱۹، کاملاً تغییر می‌کند به طوری‌که حداکثر جابه‌جایی در این دیوار در ثانیه ۳۲ و به مقدار ۲۲.۹ سانتی‌متر می‌باشد. زمان رخداد جابه‌جایی حداکثری در همین شدت برای مدل خطی، مانند مدل‌های قبل بوده و میزان آن نیز ۱۱/۷ سانتی‌متر می‌باشد، که با توجه به مقدار آن، تغییر حدوداً ۵۰ درصدی را به همراه دارد. همچنین به دلیل غیرخطی شدن دیوار R و جذب بیشتر انرژی زلزله توسط این دیوار، حداکثر جابه‌جایی در دیوار L برای حالت خطی و غیرخطی به ترتیب ۱۳ و ۱۴ سانتی‌متر باشد. این بدین معنی است که با بالاتر رفتن میزان حداکثر شتاب زلزله، تاثیر غیرخطی بودن مصالح در این سازه‌ها بیشتر می‌شود.



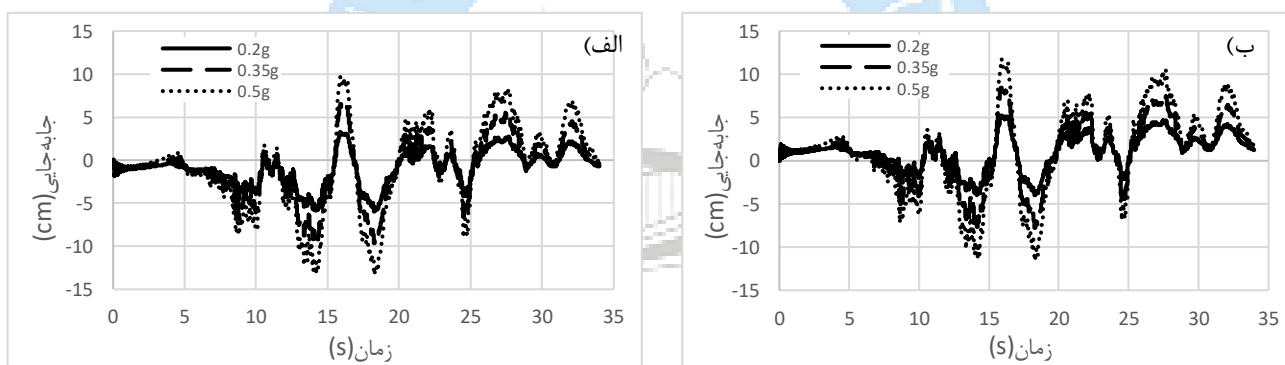
شکل ۱۲: مقایسه پاسخ تاریخی زمانی جابه‌جایی دیوار R برای مصالح خطی و غیر خطی تحت زلزله دارفیلد: الف) ۰/۲، ب) ۰/۳۵، ج) ۰/۵



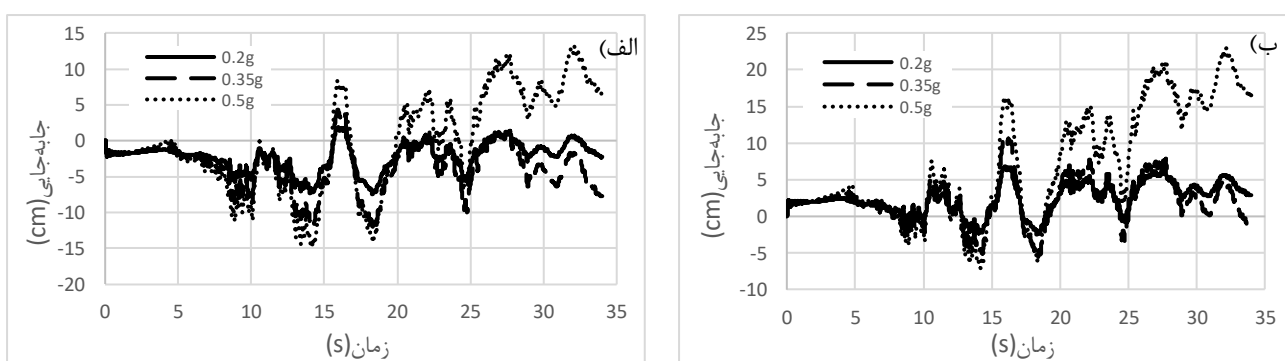


شکل ۱۳: مقایسه پاسخ تاریخیچه زمانی جابه‌جایی دیوار L برای مصالح خطی و غیر خطی تحت زلزله دارفیلد: الف) ۰/۲، ب) ۰/۳۵، ج) ۰/۵

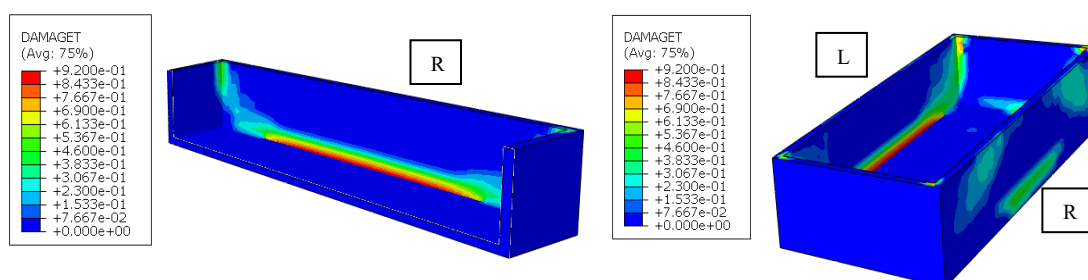
همچنین برای بررسی بهتر تاثیر شدت بزرگای زلزله بر روی پاسخ مدل‌های خطی و غیرخطی، در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ به ترتیب برای مدل‌های خطی و غیرخطی برای شتاب‌های مختلف، پاسخ جابه‌جایی ارائه شده‌است که در این نمودارها تاثیر غیرخطی شدن مصالح تحت زلزله‌های بزرگتر کاملاً مشهود است. روند خرابی مخزن تحت زلزله با حداکثر شتاب ۰/۵g (آسیب کششی) در شکل ۱۶ نشان داده شده‌است که با توجه به توضیحات ارائه شده، در این شکل نیز مشاهده می‌گردد که تا ثانیه حدوداً ۱۹، تنها بخش داخلی و پایه دیوار بلند سازه آسیب جدی دیده‌است؛ به طوریکه با گذشت زلزله از این زمان، آسیب در نواحی بیرونی دیوار R نیز مشاهده می‌گردد که در نهایت در پایان زلزله آسیب به این نواحی می‌رسد.



شکل ۱۴: مقایسه پاسخ تاریخیچه زمانی جابه‌جایی دیوار برای مصالح خطی تحت زلزله دارفیلد با مقیاس‌های ۰/۲، ۰/۳۵ و ۰/۵: الف) دیوار R، ب) دیوار L



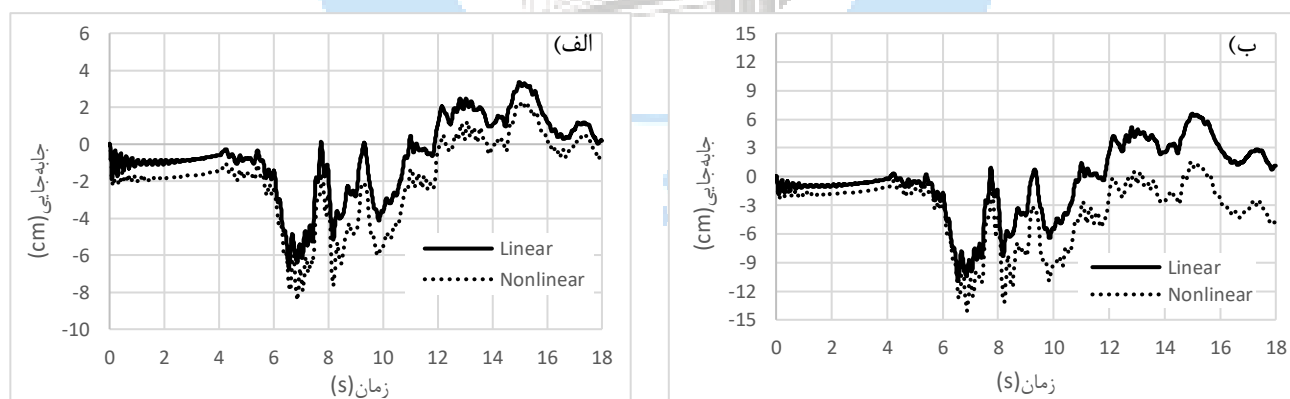
شکل ۱۵: مقایسه پاسخ تاریخیچه زمانی جابه‌جایی دیوار برای مصالح غیر خطی تحت زلزله دارفیلد با مقیاس‌های ۰/۲، ۰/۳۵ و ۰/۵: الف) دیوار R، ب) دیوار L

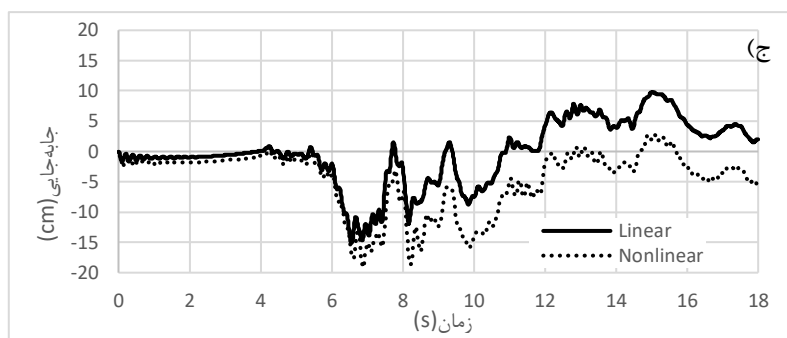


شکل ۱۶: آسیب کششی در زمان شروع آسیب جدی مخزن (ثانیه ۱۹ زلزله دارفیلد)

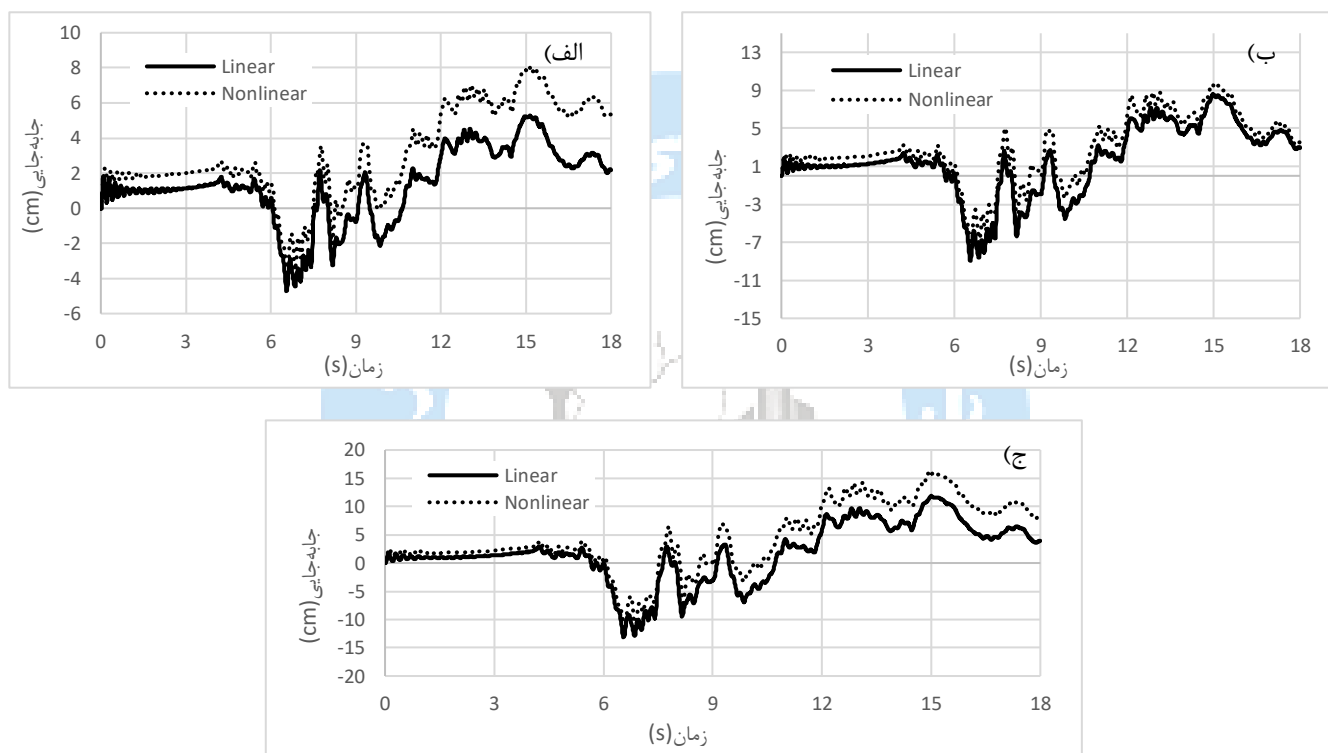
#### ۴-۲ مقایسه پاسخ جابه‌جایی دیوار با در نظر گرفتن رفتار خطی و غیرخطی مصالح تحت زلزله نورتریج (محتوای فرکانسی متوسط)

پاسخ جابه‌جایی دیواره بلند مخزن تحت زلزله زلزله نورتریج (محتوای فرکانسی متوسط) در شکل‌های ۱۷ و ۱۸ برای حالت‌های خطی و غیرخطی در شدت‌های مختلف زلزله نشان داده شده است. با توجه به این نمودارها، حداکثر جابه‌جایی برای زلزله با بزرگای حداکثری  $0.2g$  برای دیوار بخش L می‌باشد که به ترتیب برای مدل‌های خطی و غیرخطی  $5/83$  و  $8/1$  سانتی‌متر است که اختلاف حدود ۲۷ درصدی دارند. همچنین این مقادیر برای زلزله با شدت  $0.35g$  به میزان  $10/5$  و  $14/1$  سانتی‌متر برای بخش R است. این مقادیر حدود ۲۴ درصد اختلاف دارند. این اختلاف پاسخ در مدل خطی و غیرخطی نیز برای همین زلزله با شدت  $0.5g$  تقریباً نزدیک به مقادیر در شدت‌های قبل بوده و به میزان ۲۳ درصد می‌باشد که به ترتیب برای مدل خطی و غیرخطی  $14/9$  و  $19/4$  سانتی‌متر برای بخش R است. همچنین از نمودارها قابل مشاهده است که، کلیه پاسخ‌های حداکثری مدل‌های خطی و غیرخطی برای هر سه شدت زلزله، در یک زمان از زلزله رخ داده و نشان دهنده آن است که در زلزله با محتوای فرکانسی متوسط، اختلاف تنها در مقدار جابه‌جایی ایجاد شده در دیوار مخزن می‌باشد و شدت زلزله تاثیر چندانی بر روی تغییر روند پاسخ سازه ندارد.



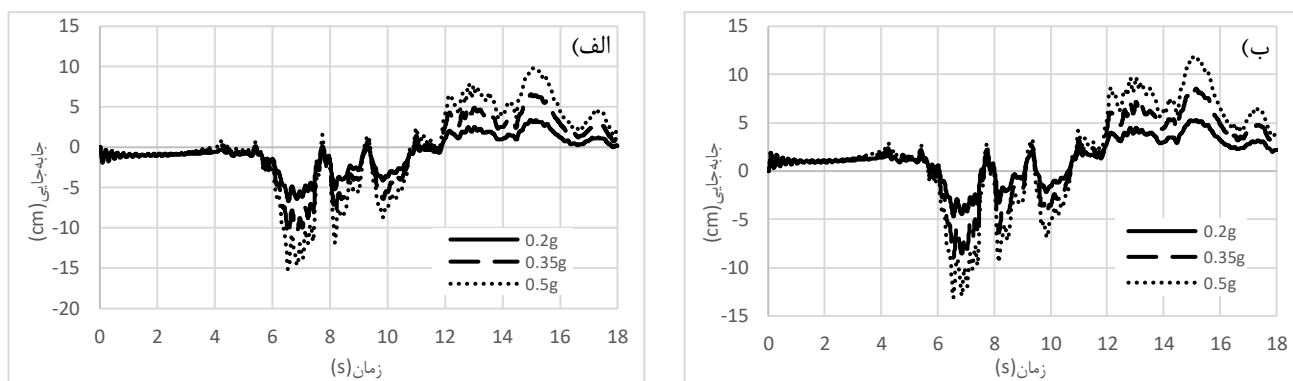


شکل ۱۷: مقایسه پاسخ تاریخیچه زمانی جابه‌جایی دیوار R برای مصالح خطی و غیر خطی تحت زلزله نورتریج: الف) ۰/۲، ب) ۰/۳۵، ج) ۰/۵

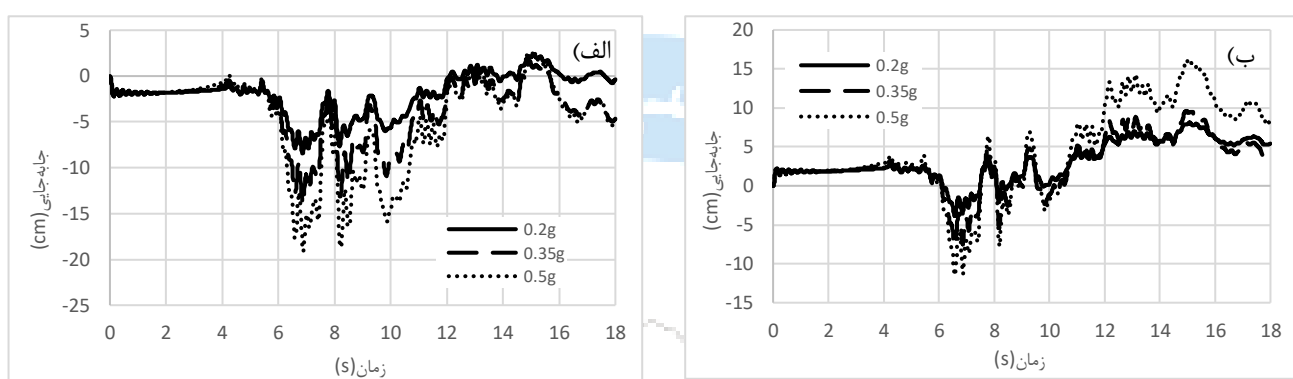


شکل ۱۸: مقایسه پاسخ تاریخیچه زمانی جابه‌جایی دیوار L برای مصالح خطی و غیر خطی تحت زلزله نورتریج: الف) ۰/۲، ب) ۰/۳۵، ج) ۰/۵

به منظور بررسی تاثیر شدت بزرگای زلزله بر روی پاسخ مدل‌های خطی و غیرخطی و مقایسه آن‌ها با یکدیگر، نتایج حاصل از آن در شکل‌های ۱۹ و ۲۰ به ترتیب برای مدل‌های خطی و غیرخطی برای شتاب‌های مختلف ارائه شده‌است که نشانگر تغییر تنها در مقادیر جابه‌جایی با افزایش مقدار شتاب حداکثری در این نوع از زلزله دارد و تغییری در روند پاسخ سازه مشهود نیست.



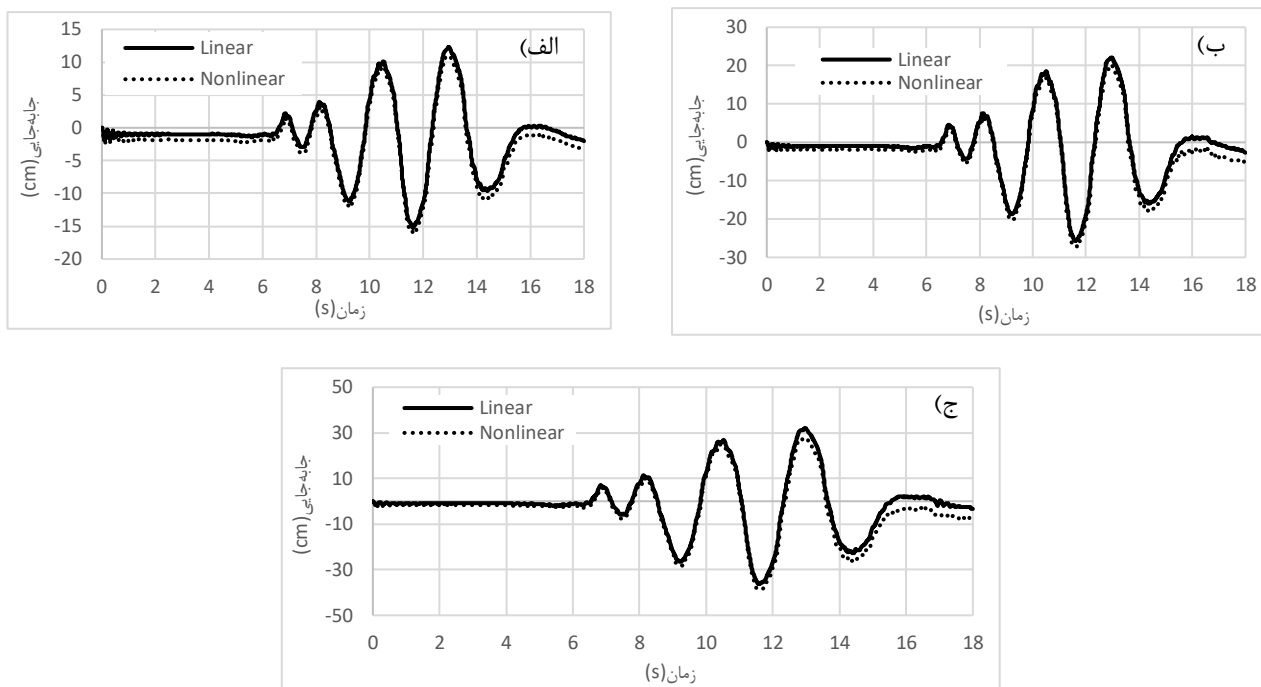
شکل ۱۹: مقایسه پاسخ تاریخیچه زمانی جابه‌جایی دیوار برای مصالح خطی تحت زلزله نورتریج با مقیاس‌های ۰/۲، ۰/۳۵ و ۰/۵ (الف: دیوار R ب) دیوار L



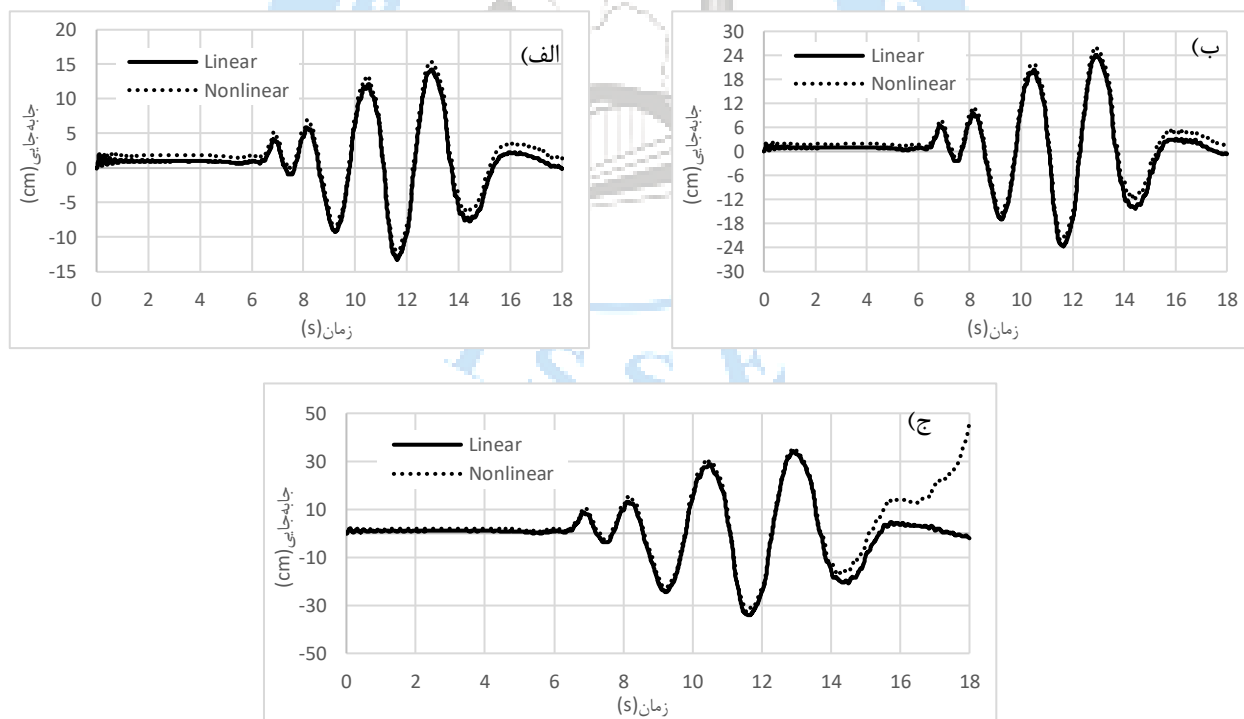
شکل ۲۰: مقایسه پاسخ تاریخیچه زمانی جابه‌جایی دیوار برای مصالح غیرخطی تحت زلزله نورتریج با مقیاس‌های ۰/۲، ۰/۳۵ و ۰/۵ (الف: دیوار R ب) دیوار L

### ۳-۴ مقایسه پاسخ جابه‌جایی دیوار با در نظر گرفتن رفتار خطی و غیرخطی مصالح تحت زلزله چوئیتسو (محتوای فرکانسی پایین)

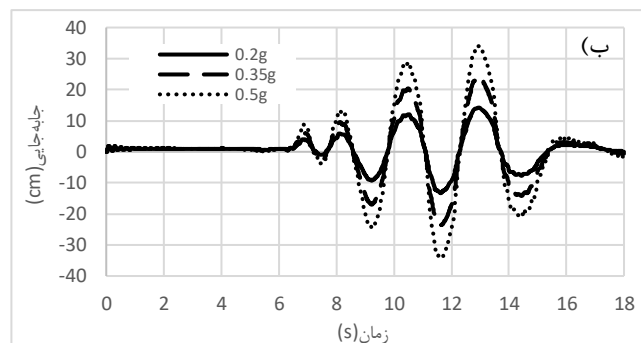
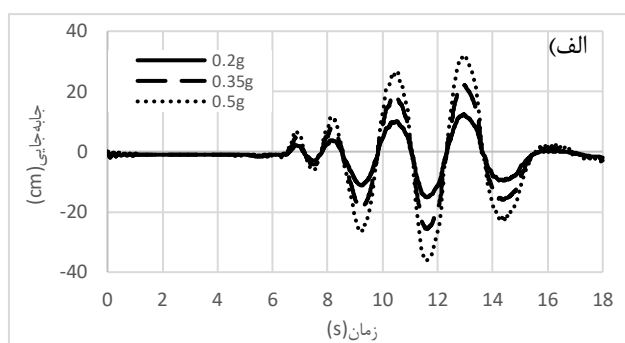
در تحلیل مخزن تحت زلزله چوئیتسو با فرکانس پایین، پاسخ جابه‌جایی برای حالت‌های خطی و غیرخطی در شدت‌های ۰/۲g و ۰/۳۵g تقریباً یکسان بوده و نشان‌دهنده عدم تاثیر رفتار غیرخطی بر روی پاسخ‌های جابه‌جایی در هر دو بخش L و R مخزن، در این مقادیر حداکثری شتاب تحت این زلزله است (شکل ۲۱ و ۲۲) با توجه به شکل، برای حداکثر شتاب ۰/۵g، این مقادیر تا ثانیه ۱۴ زلزله نیز تقریباً یکسان بوده و در ثانیه‌های پایانی زلزله (۱۴ الی ۱۸ ثانیه)، یکی از دیوارها (دیوار بخش L) کاملاً آسیب دیده و حداکثر جابه‌جایی و همچنین روند نمودار کاملاً تغییر می‌کند. با این تفاسیر، حداکثر جابه‌جایی در کلیه مدل‌ها در ثانیه حدوداً ۱۱/۵ از زلزله رخ داده، که این مقدار برای زلزله با شتاب ۰/۵g در حالت الاستیک در دیوار L و به میزان ۳۸ سانتی‌متر می‌باشد. مقدار حداکثری در مدل غیرخطی و شتاب حداکثری ۰/۵g، در ثانیه ۱۸ و جابه‌جایی آن ۴۴ سانتی‌متر می‌باشد که برخلاف مدل‌های قبل که حداکثر جابه‌جایی در دیوار R رخ داده است، این پاسخ برای مدل ذکر شده در دیوار L اتفاق می‌افتد که نشان‌دهنده تغییر کلی روند پاسخ سازه است. همچنین در نمودارهای ۲۱ و ۲۲ به منظور مقایسه نتایج جابه‌جایی با تغییر مقدار شدت زلزله در مدل‌های خطی و غیرخطی برای هر دو دیوار بلند مخزن (L و R)، نتایج ارائه شده‌اند. میزان جابه‌جایی برای مدل خطی تحت زلزله با حداکثر شتاب ۰/۲g، ۰/۳۵g و ۰/۵g به ترتیب ۱۵، ۲۶ و ۳۵ سانتی‌متر می‌باشد. این مقادیر نیز برای مدل‌های غیرخطی به ترتیب برابر ۱۶، ۲۷ و ۴۴ سانتی‌متر است.



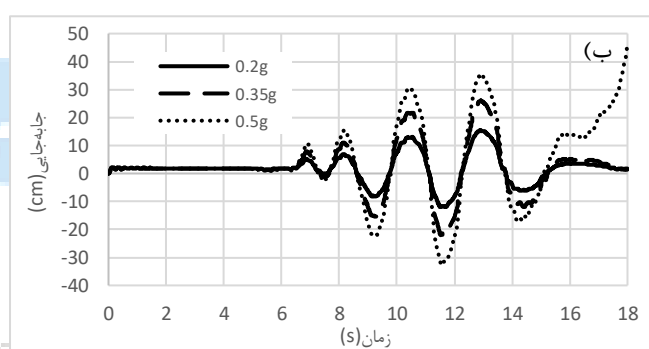
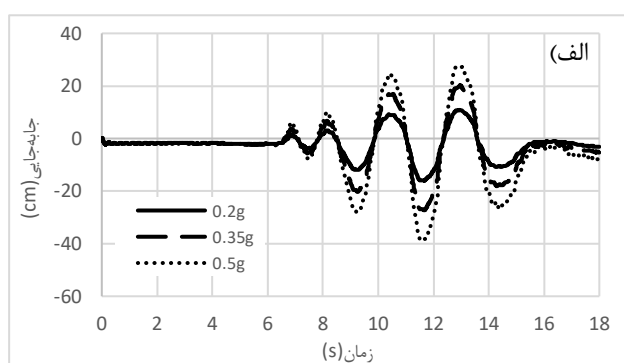
شکل ۲۱: مقایسه پاسخ تاریخیچه زمانی جابه‌جایی دیوار R برای مصالح خطی و غیر خطی تحت زلزله چوئیتسو: الف) ۰٫۲، ب) ۰٫۳۵، ج) ۰٫۵



شکل ۲۲: مقایسه پاسخ تاریخیچه زمانی جابه‌جایی دیوار L برای مصالح خطی و غیر خطی تحت زلزله چوئیتسو: الف) ۰٫۲، ب) ۰٫۳۵، ج) ۰٫۵



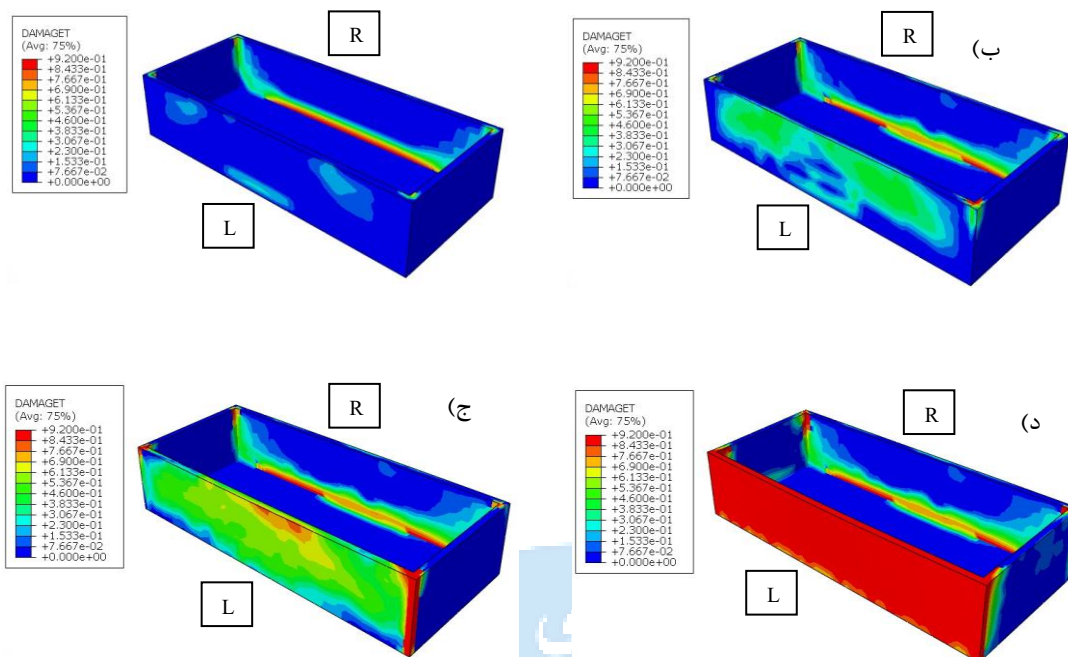
شکل ۲۳: مقایسه پاسخ تاریخیچه زمانی جابه‌جایی دیوار برای مصالح خطی تحت زلزله چوئیتسو با مقیاس‌های ۰/۲، ۰/۳۵ و ۰/۵ (الف) دیوار R (ب) دیوار L



شکل ۲۴: مقایسه پاسخ تاریخیچه زمانی جابه‌جایی دیوار برای مصالح غیرخطی تحت زلزله چوئیتسو با مقیاس‌های ۰/۲، ۰/۳۵ و ۰/۵ (الف) دیوار R (ب) دیوار L

در دیوار L، مقدار آسیب کششی برای مدل غیرخطی تحت زلزله با شدت ۰/۵g در شکل شماره ۲۵ برای ثانیه‌های ۱۴ (قبل از شروع آسیب دیوار در محل جداره بیرونی دیوار)، ۱۵ (زمان آسیب جزئی بر روی جداره بیرونی دیوار)، ۱۷ (آسیب جدی در کناره‌ها و جداره بیرونی دیوار) و ۱۸ (آسیب کلی دیواره) نشان داده شده است. همانطور که از شکل مشاهده می‌گردد، تا ثانیه ۱۴ (قبل از شروع آسیب در نواحی جداره بیرونی و کناره‌های آن) آسیب جزئی تنها در کف مخزن و در کناره دیواره‌های بلند سازه رخ داده است. پس از آن در ثانیه ۱۵، آسیب در کناره‌های دیواره بلند و محل اتصال آن به دیواره‌های کوتاه و همچنین گسترش اولیه آسیب در جداره بیرونی دیوار مشاهده می‌گردد. سپس با عبور تا ثانیه ۱۷، آسیب در محل اتصال دیواره بلند با کوتاه جدی شده و گستردگی آسیب در این ناحیه به شدت زیاد می‌شود و همچنین در نواحی بالای مخزن شروع خرابی مشاهده می‌گردد. در همین ثانیه، مقادیر آسیب کششی و گستردگی آن نسبت به ثانیه ۱۵ به شدت بیشتر شده اما کل دیواره تخریب نشده است. در ثانیه نهایی زلزله (۱۸ ثانیه)، دیوار کاملاً آسیب دیده و کل دیواره تحت آسیب کششی و ترک خوردگی شدید است که تغییر روند نمودار جابه‌جایی و افزایش بیش از حد حداکثر جابه‌جایی در این ثانیه از زلزله به این علت می‌باشد.

(الف)



شکل ۲۵: مقایسه آسیب کششی تحت زلزله دارفیلد در با مقیاس ۰/۵ برای ثانیه‌های: الف) ۱۴، ب) ۱۵، ج) ۱۷، د) ۱۸

## ۵- نتیجه گیری

در این پژوهش، به منظور بررسی تغییر مکانهای دینامیکی خطی و غیرخطی در مخازن بتنی مستطیلی روزمینی ذخیره آب، مخزنی با طول ۵۰، عرض ۲۰ و ارتفاع ۱۰ متر با حجم ۱۰۰۰۰ مترمکعب مدل گردید. پس از اعمال رکوردهای زلزله چوئیتسو، نورتریج و دارفیلد و انجام آنالیزهای خطی و غیرخطی مقادیر جابه‌جاییها در دیوار بلند مخزن بررسی شد. در جدول شماره ۵، نتایج حداکثر جابه‌جایی دیوار بلند، در مطالعات انجام‌شده در حالت‌های خطی و غیرخطی، تحت حوزه‌های فرکانسی و حداکثر شتابهای مختلف ارائه شده‌است و نتایج و پیشنهادات، در ادامه ارائه می‌گردند:

جدول ۵: حداکثر جابه‌جایی دیوار بلند در حالت‌های مختلف

فرکانس	حداکثر شتاب زلزله (g)	حداکثر جابه‌جایی دیوار در حالت مصالح خطی (cm)	حداکثر جابه‌جایی دیوار در حالت مصالح غیر خطی (cm)	درصد افزایش از حالت خطی به غیر خطی
	۰/۲	۱۵/۱۶	۱۶	۵.۵٪
پایین	۰/۳۵	۲۵/۷۳	۲۷/۱۶	۵.۶٪
	۰/۵	۳۶/۲۵	۴۵/۶۴	۲۶٪
متوسط	۰/۲	۶/۶۸	۸/۴۴	۲۶/۳٪
	۰/۳۵	۱۰/۹۱	۱۴	۲۸/۳٪

	۰/۵	۱۵/۱۱	۱۹/۴	۲۸/۴٪
	۰/۲	۵/۹۷	۷/۴۵	۲۸/۴٪
بالا	۰/۳۵	۹/۶۵	۱۲/۴	۲۸/۵٪
	۰/۵	۱۳/۳۴	۲۲/۹۱	۷۱/۷٪

۱- واکنش مخزن روزمینی بتنی مستطیلی رزمینی، به شدت وابسته به فرکانس زلزله می‌باشد. تغییرمکانهای دیوار بلند مخزن در زلزله‌های فرکانس پایین بیشترین مقدار را نشان می‌دهند به طوری که کمترین مقدار برای زلزله‌های فرکانس بالا است. در حالت الاستیک و در شدت ۰/۵g، مقدار تغییرمکان در زلزله‌های فرکانس پایین ۳۶/۲۵ سانتی‌متر است، در حالی که این مقدار برای زلزله‌های فرکانس متوسط و بالا به ترتیب به مقادیر ۱۵/۱۱ سانتی‌متر و ۱۳/۳۴ سانتی‌متر کاهش می‌یابد. در حالت پلاستیک، حداکثر تغییرمکان برای زلزله‌های فرکانس پایین به ۴۵/۶۴ سانتی‌متر می‌رسد، در حالی که برای زلزله‌های فرکانس متوسط و بالا به ترتیب ۱۹/۴ سانتی‌متر و ۲۲/۹۱ سانتی‌متر کاهش می‌یابد. این نتایج نشان می‌دهد که زلزله‌های با فرکانس پایین، بیشترین میزان تقاضای سازه‌ای را بر روی مخازن بتنی مستطیلی رزمینی روزمینی اعمال می‌کنند.

۲- پاسخ غیرخطی سازه در مقایسه با حالت خطی، به طور قابل توجهی باعث افزایش تغییرمکان می‌شود، به ویژه در زلزله‌های فرکانس بالا. در این حوزه فرکانسی با شدت ۰/۵g، مقدار تغییرمکان در حالت پلاستیک (۲۲/۹۱ سانتی‌متر) نسبت به حالت الاستیک (۱۳/۳۴ سانتی‌متر) ۷۲٪ بیشتر است. برای زلزله‌های فرکانس پایین، اگرچه این افزایش کمتر می‌باشد، اما همچنان قابل توجه است. به طوری که تغییرمکان از ۳۶/۲۵ سانتی‌متر در حالت خطی به ۴۵/۶۴ سانتی‌متر در حالت غیرخطی افزایش می‌یابد که نشانگر ۲۶٪ افزایش است. این موضوع اهمیت در نظر گرفتن رفتار غیرخطی در تحلیل این نوع از سازه‌ها را نشان می‌دهد.

۳- زلزله با حوزه فرکانسی متوسط رفتاری بینابینی با زلزله‌های با حوزه فرکانسی پایین و بالا دارد. نتایج نشان می‌دهد که، تغییرات جابه‌جایی از حالت خطی به غیرخطی تحت سه حالت حداکثر شتاب ۰/۲g، ۰/۳۵g و ۰/۵g برای زلزله با حوزه فرکانسی متوسط تقریباً افزایشی یکسان به میزان ۲۸ درصد را دارد. این مقادیر به ترتیب برای حالت خطی برابر ۶/۷، ۱۰/۹ و ۱۵/۱ سانتی‌متر و برای حالت غیرخطی نیز ۸/۴، ۱۴ و ۱۹/۴ سانتی‌متر می‌باشند.

۴- اگرچه حداکثر پاسخ‌های سازه، مربوط به زلزله با حوزه فرکانس پایین، در حالت حداکثر شتاب ۰/۵g و رفتار غیرخطی مصالح به میزان ۴۵/۶۴ سانتی‌متر می‌باشد، بیشترین تغییر پاسخ جابه‌جایی با تغییر رفتار مصالح خطی به غیرخطی، مربوط به زلزله با حوزه فرکانسی بالا با مقادیر ۱۳/۳۴ برای حالت خطی و ۲۲/۹۱ برای حالت غیرخطی است که اختلافی حدوداً ۷۲ درصدی دارند، بدین صورت که حداقل جابه‌جایی‌ها مربوط به زلزله‌های با فرکانس بالا می‌باشند.

۵- با افزایش حداکثر شتاب زلزله‌ها، تغییرات جابه‌جایی در مدل‌های خطی و غیرخطی برای هر سه حوزه فرکانسی، تقریباً ثابت بوده، به طوری که با افزایش شتاب حداکثری از ۰/۲g به ۰/۳۵g و ۰/۵g به صورت میانگین افزایشی ۶۵٪ و ۱۳۰٪ برای هر سه حوزه فرکانسی داشته‌است.

۶- در زلزله‌های با فرکانس بالا، میزان جابه‌جایی حداکثری دیواره مخزن نسبت به زلزله‌های با فرکانس متوسط و پایین کمتر است. با این حال، در زلزله چوئیتسو با شتاب حداکثری ۰/۵g، در چهار ثانیه نهایی رخداد زلزله، ابتدا بخش بیرونی دیواره بلند مخزن دچار آسیب شده و وارد ناحیه پلاستیک می‌شود. سپس، پس از دو ثانیه، محل اتصال دیوار بلند به دیوارهای کوتاه‌تر به شدت آسیب دیده و دچار

تغییر شکل‌های شدید می‌شوند. این یافته نشان می‌دهد که، در زلزله‌های با محتوای فرکانسی بالا، تا زمانی که سازه دچار آسیب جدی نشود، اثرات رفتار غیرخطی مصالح بر پاسخ لرزه‌ای سازه ناچیز خواهد بود.

۷- با توجه به نتایج ذکر شده، در صورت طراحی و یا ارزیابی لرزه‌ای مخازنی که احتمال تجربه زلزله‌های بزرگ با حوزه فرکانسی پایین را دارند، باید حتماً رفتار غیرخطی مصالح برای آن‌ها در نظر گرفته شود. همچنین، به منظور ارزیابی لرزه‌ای و یا طراحی سازه‌های مخزن مستطیلی رزمینی بتنی تحت زلزله‌های با حوزه فرکانسی بالا با هر مقدار توان لرزه‌ای منطقه، بهتر است که رفتار غیرخطی مصالح در نظر لحاظ گردد، زیرا، نتایج نشان می‌دهد که، حتی در زلزله‌های با شدت پایین ( $0.2g$ ) نیز رفتار غیرخطی می‌تواند تا حدی روند پاسخ جابه‌جایی را تغییر دهد.

۸- مخازن بتنی مستطیلی رزمینی در معرض زلزله‌های با حوزه فرکانسی متوسط را، می‌توان به صورت خطی با در نظر گرفتن یک ضریب بزرگنمایی، جهت طراحی و یا ارزیابی لرزه‌ای بررسی کرد. به این دلیل که با غیرخطی در نظر گرفتن این مخازن تحت این نوع از زلزله‌ها، تغییر چندانی در روند پاسخ تاریخیچه زمان جابه‌جایی دیواره بلند مخزن ندارد.

۹- به منظور بررسی گسترده‌تر این پژوهش می‌توان زلزله‌ها با حوزه فرکانسی و شدت مختلف را به مخازن بتنی و فولادی مدفون و هوایی نیز اعمال و نتایج را برای این نوع از سازه‌ها بسط داد. همچنین، پاسخ‌های مهم دیگر این نوع سازه‌ها مانند: ارتفاع تالطم آب، برش پایه و فشار هیدرودینامیک وارد بر دیواره‌های مخزن را نیز تحت این نوع از زلزله‌ها بررسی کرد.

## مراجع

- [1] Safi ,M and Rasoulpour,S (2020). *The effect of earthquake frequency content on the dynamic response of rectangular concrete tanks using the combined finite element method and smooth particle hydrodynamics*. Journal of Structural and Construction Engineering, Volume (3), Pages (87-102).
- [2] Bagheri,S and Hosseini,R (2019). *Parametric study on the dynamic behavior of liquid storage tanks subjected to pulse-like excitations*. Journal of Structural and Construction Engineering, Volume (2), Pages (75-86).
- [3] Hatami, F and Omid,F (2022). *Seismic response of rectangular and cylindrical concrete tanks under near-fault and far-fault ground motions*. Asas Journal, Volume (65), Pages (5-14).
- [4] Safi,M and Rasoulpour,S (2021). *The effect of the vertical component of the earthquake on concrete tanks with flexible walls by combined finite element method Smooth particle hydrodynamics*. Amir Kabir journal of civil Engineering, Volume (4), Pages (873-888).
- [5] Omidinasab,F and Shakib,H, (2012). *Seismic response evaluation of the RC elevated water tank with fluid-structure interaction and earthquake ensemble*. KSCE journal of civil Engineering, Volume (16), Pages (366-376).
- [6] Moslemi,M and Farzin,A.(2019). *Nonlinear sloshing response of liquid-filled rectangular concrete tanks under seismic excitation*. Engineering Structures, Volume (188), Pages (564-577).
- [7] Lee, J and Cho, J, (2024), *Simplified earthquake response analysis of rectangular liquid storage tanks considering fluid-structure interactions*, Engineering Structures, Volume 300, pages (117-157), doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.117157.
- [8] Hosseini, S and Beskhyroun, S, (2023), *Fluid storage tanks: A review on dynamic behavior modeling, seismic energy-dissipating devices, structural control, and structural health monitoring techniques*, Structures, Volume 49, Pages (537-556), doi.org/10.1016/j.istruc.2023.01.146.
- [9] Brunesi, E and Nascimbene, R, (2024), *Evaluating the Seismic Resilience of Above-Ground Liquid Storage Tanks*, Building Structures, Volume 14, page (10), doi.org/10.3390/buildings14103212.
- [10] Kianoush, M. and Ghaemmaghani 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, Engineering Structures, Volume 33, Pages (2186-2200).
- [11] Streeter, V and Wylie E, (1985), McGraw-Hill College; Subsequent edition, chapters (5,6).
- [12] Shames, I, (2002), McGraw-Hill Science/Engineering/Math; 4th edition, chapters (4, 8, 9).
- [13] Kim JK, Koh HM, Park JH. (1998). *Fluid-structure interaction analysis of 3D rectangular tanks by a variationally coupled BEM-FEM and comparison with test results*. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Volume (27), Pages (109-124)
- [14] Dassault Systèmes, *ABAQUS Documentation*, 2017. [Online]. Available: <https://help.3ds.com>

- [15] Carreira D. and Chu K-H. (1985). *Stress-strain relationship for plain concrete in compression*. ACI journal Pages (72-82).
- [16] Lee.B and Lee J,(2021), *Nonlinear Dynamic Response of a Concrete Rectangular Liquid Storage Tank on Rigid Soil Subjected to Three-Directional Ground Motion*, Applied sciences, Volume (11), 4688, <https://doi.org/10.3390/app11104688>.
- [17] Siwinski J and Stolarski A, (2018), *Homogeneous substitute material model for reinforced concrete modeling*. De Gruyter, Volume (LXIV), Pages (87-99).

