

## Influence of Earthquake Vertical Excitations on Sloshing-Created $P-\Delta$ Effect in Elevated Water Tanks: Experimental Validation, Numerical Simulation and Proposing a Modification for Housner Model

Soroush Heidary<sup>1</sup>, Mahmood Hosseini<sup>2,\*</sup> and Khosrow Hosseini<sup>1</sup>

1- Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

2- Structural Engineering Research Center, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, Iran

### ABSTRACT

Seismic sloshing in elevated water tanks creates some additional base moment, which simultaneous with the effect of strong vertical acceleration of near-source earthquakes may increase the  $P-\Delta$  effect, as an important factor in seismic design of these structures. This study was performed for finding out the extent of this combined effect. First, an experiment was conducted to provide a set of results for validating the finite element analysis (FEA) modeling, conducted as the second part of the study. The test tank was cylindrical with a diameter of 60 cm, installed on an innovative simple shaking table, capable of creating simultaneous horizontal and vertical harmonic excitations. Different frequencies and water depths were used in the tests. For verification, the maximum sloshing height was measured and compared with FEA results. Several combinations of the simulation attributes, including meshing method, element size and hourglass factor, were considered to match experimental and numerical results. The verified numerical modelling process was used for simulation of elevated tanks of actual sizes for various water height to tank diameter and also tank height to tank diameter ratios. Each of these cases was dynamically analyzed using seven selected earthquakes, creating totally 126 cases. Numerical results indicate that the sloshing height and the base moment could increase in average about 20% and 10%, respectively, by considering the effect of earthquake vertical acceleration. Finally, results of FEA were compared with those obtained by a modified 3D Housner model, proposed by the authors, showing a good agreement of 80% in average.

### ARTICLE INFO

**Receive Date:** 22 June 2020

**Revise Date:** 23 July 2020

**Accept Date:** 27 July 2020

### Keywords:

Elevated water tanks  
Near-source earthquakes  
Vertical excitations  
 $P-\Delta$  effect  
Dynamic finite element analysis  
Sloshing height  
Base moment.

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.234914.2168>

\*Corresponding author: Mahmood Hosseini

Email address: [khoseini@semnan.ac.ir](mailto:khoseini@semnan.ac.ir)

## تأثیر مؤلفه قائم زلزله بر تلاطم و لنگر پایه مخازن هوایی مخروطی به کمک روش های

### عددی و آزمایشگاهی

سروش حیدری کمرودی<sup>۱</sup>، خسرو حسینی<sup>۲\*</sup>، محمود حسینی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۳- دانشیار، پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

### چکیده

در تحلیل لرزه‌ای مخازن هوایی حاوی سیال، مؤلفه قائم زلزله به علت تأثیر در سطح متلاطم سیال درون مخزن و همچنین تشدید اثر "P-delta" از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد. به منظور بررسی عملکرد نوسانی مخزن و تأثیر تلاطم سطح سیال بر آن، به یک مخزن استوانه‌ای به قطر ۶۰ سانتیمتر که در آن آب با عمق‌های مختلف قرار گرفته، فرکانسهای هارمونیک توسط ابزار ابداعی به نمونه‌های آزمایشگاهی اعمال گردید. به منظور تعیین تأثیر نوسانات بر سازه، از نرم افزار آباکوس برای مدلسازی بهره گرفته شده است. صحت سنجی و کالیبراسیون مدل عددی با مقایسه نتایج مدل آزمایشگاهی و مدل عددی از نوسانات سطح آب با ایجاد مدل متناظر در نرم‌افزار آباکوس و با ایجاد تعداد قابل ملاحظه‌ای از ترکیبات گوناگون از متغیرهای مدل‌سازی از قبیل روش شبکه‌بندی و اندازه مناسب سلولها به‌گونه‌ای انتخاب شدند تا نتایج حاصل از تحلیل عددی با نتایج آزمایشگاهی با دقت مناسبی منطبق گردد. نتایج مدلسازی عددی همبستگی ۹۸٪ با نتایج آزمایشگاهی داشت. سپس مدل عددی مخازن با ابعاد بزرگ در نرم‌افزار آباکوس ایجاد و با متغیرهای مدلسازی که در مرحله صحت سنجی نهایی گردیده بود، تحلیل گردید. مدل عددی از مخازن هوایی با سه نسبت مختلف از ارتفاع سیال درون مخزن و شعاع به مقدار ارتفاع کل مخزن در نرم‌افزار ایجاد گردیدند. همچنین زاویه کف با افق در کلیه مخازن ۴۵ درجه در نظر گرفته شده و مورد ارزیابی قرار گرفت. هرکدام از این حالت‌ها با ۷ شتاب‌نگاشت مختلف از زلزله‌های متفاوت بارگذاری گردیدند. در کلیه این مخازن، اثر مؤلفه قائم زلزله بر مقادیر ارتفاع موج و ممان ایجاد شده در پایه با حالت بدون احتساب اثر مؤلفه قائم زلزله مقایسه گردید. نتایج نشان داد که احتساب مؤلفه قائم زلزله منجر به افزایش ارتفاع موج به میزان ۳۸٪ و افزایش گشتاور در پایه به میزان ۹٪ میگردد.

کلمات کلیدی: مخزن هوایی حاوی سیال، تحلیل دینامیکی، اجزاء محدود، مؤلفه قائم زلزله، ارتفاع موج تلاطم، لنگر پایه.

| شناسه دیجیتال:  |            | سابقه مقاله: |               |            |   |
|-----------------|------------|--------------|---------------|------------|---|
| دریافت          | بازنگری    | پذیرش        | انتشار آنلاین | چاپ        | https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.234914.2168 |
| ۱۳۹۹/۰۴/۰۲      | ۱۳۹۹/۰۵/۰۲ | ۱۳۹۹/۰۵/۰۶   | ۱۴۰۰/۰۵/۰۶    | ۱۴۰۰/۰۷/۳۰ | doi: 10.22065/jsce.2020.234914.2168               |
| *نویسنده مسئول: |            |              |               |            | خسرو حسینی  |
| پست الکترونیکی: |            |              |               |            | khoseini@semnan.ac.ir                             |

## ۱- مقدمه

با توجه به رشد فزاینده جمعیت و افزایش شهرنشینی و استفاده بیشتر از مخازن هوایی برای نگهداری آب و دیگر مایعات، بررسی و بهبود بخشیدن به عملکرد آنها در شرایط بحران به جهت طراحی دقیق تر، ساخت و نگهداری بهینه تر آنها از اهمیت بسزایی برخوردار است. نگرشی اجمالی به نحوه تحلیل، طراحی و روش‌های اجرایی مخازن نگهداری مایعات مشخص می‌سازد که باید در جهت مطالعه رفتار لرزه‌ای و همچنین طراحی و اجرای این‌گونه سازه‌ها دقت بیشتری به عمل آید. از آنجایی که مخازن هوایی پس از وقوع زلزله می‌بایستی همچنان قابل استفاده باشند تا بتوانند نیازهای اولیه آبرسانی در زمان آتش سوزی و تامین آب شرب مصرفی را تامین نمایند، لذا بررسی رفتار این مخازن در هنگام وقوع زلزله و عملکرد مطلوب پس از وقوع زلزله از اهمیت بسزایی برخوردار است. بنابراین درک صحیح از رفتار لرزه‌ای این نوع سازه‌ها هم برای ایمن بودن آنها و هم برای کاهش هزینه‌های نگهداری ضروری می‌باشد.

محاسبه فشار هیدرودینامیکی مهمترین مسئله در تحلیل سیستم‌های آب و سازه است. پدیده تلاطم سطح آزاد سیال در مخازن نیمه پر، یکی از اصلی ترین عوامل ایجاد فشار هیدرودینامیکی در این نوع از سازه‌ها می‌باشد. تلاطم سطح آزاد سیال که به اسلاشینگ نیز معروف است بر اثر اعمال نیروهای دینامیکی به ظرف حاوی سیال تراکم ناپذیر مانند آب ایجاد شده و در نتیجه‌ی اندرکنش بین سیال و سازه، نیروهای هیدرودینامیکی ناشی از حرکت سیال به سازه وارد می‌شود. اثر فشار هیدرودینامیکی بر روی سازه از مدت‌ها پیش مورد بحث و مطالعه قرار گرفته است. حجم زیادی از مطالعات انجام شده در ارتباط با تخمین فشار هیدرودینامیکی در مخازن و سدها به‌گونه‌ای بوده است که از اثر اندرکنش آب و سازه صرف‌نظر شده و اثر سیال به صورت نیروها و جرم افزوده در نظر گرفته شده است. وسترگارد [۱] در سال ۱۹۳۳ اولین راه‌حل را برای تعیین فشار هیدرودینامیکی یک سد با وجه قائم در بالادست تحت شتاب افقی ارائه کرد. او نشان داد که فشار هیدرودینامیکی اعمال شده بر روی بدنه به علت زلزله ناشی از حرکت زمین، معادل نیروی اینرسی جسم آب متکی به بدنه سد است. او برای این جرم آب، سهمی‌ای را پیشنهاد نمود که پایه آن معادل  $(7/8)$  ارتفاع مایع است. پس از آن هاوسنر [۲] در سال ۱۹۵۷ جزئیات بیشتری از فشار هیدرودینامیکی را برای مخازن مستطیلی و استوانه‌ای ارائه کرد. هاوسنر یک روش تقریبی به نام روش جرم افزوده را برای تعیین فشار هیدرودینامیکی ناشی از شتاب افقی ارائه داد و فرض نمود که مایع درون مخزن تراکم ناپذیر بوده و دیواره‌های آن صلب می‌باشد. برخی از پژوهشگران با مقایسه پاسخ‌های به دست آمده از روش جرم افزوده با مدل‌سازی‌های اجزاء محدود، محافظه‌کارانه بودن روش جرم افزوده را تأیید کردند [۳، ۴]. یانگ و ولتسس [۵] در سال ۱۹۷۶ اثر انعطاف‌پذیری دیوارها را برای تعیین مقدار و نحوه توزیع فشار هیدرودینامیکی در نظر گرفتند و نشان دادند که فشارهای هیدرودینامیکی ناشی از بخش سخت مایع با در نظر گرفتن انعطاف‌پذیری دیوارها افزایش می‌یابد. در ادامه، هارون و هاوسنر [۶] پژوهش‌های تحلیلی و آزمایشگاهی متعددی را بر روی رفتار دینامیکی مخازن ذخیره مایعات انجام داده است. در اکثر تحقیقات صورت گرفته بر روی مخازن ذخیره مایعات به مخازن استوانه‌ای فولادی توجه شده است. در این میان، پژوهش‌هایی بر روی تحلیل تاریخچه زمانی مخازن مستطیلی با هدف تعیین فشارهای هیدرودینامیکی، برش پایه و لنگرهای خمشی پای دیوار انجام شده است. در شماری از این پژوهش‌ها، یک روش حل عددی برای به دست آوردن پاسخ‌های دینامیکی مخازن مستطیلی، تحت اثر تحریک افقی و قائم زمین، با ترکیبی از المان‌های محدود و اجزای مرزی ارائه شده است [۷، ۸]. در پژوهشی دیگر رفتار لرزه‌ای مخازن ذخیره مایعات به صورت دوبعدی مورد بررسی قرار گرفته که در آن اثر مایع درون مخزن به دو بخش صلب و موج تقسیم گردیده است. با استفاده از روش اجزای محدود، اثر بخش صلب و موج مایع لحاظ گردیده است [۹، ۱۰]. همچنین چن و کیانوش [۱۱] یک رابطه برای تعیین فشار دینامیکی ناشی از بخش صلب به بدنه مخزن ارائه کردند که اثر انعطاف‌پذیری دیوارها در آن وارد شده است. یکی دیگر از مهمترین موضوعات مربوط به اندرکنش آب و سازه در مخازن ذخیره مایعات، پدیده حرکت سطح آزاد مایع است که از تحریک خارجی مخزن بر اثر عواملی چون زلزله و یا حرکت و شتابگیری در مخازن متحرک از قبیل تانکرهای سوخت و امثال آن ناشی می‌شود. امواج سطحی معمولاً موجب افزایش بارهای دینامیکی بر روی سازه می‌شود که بایستی در طراحی مخزن وارد شود [۱۲، ۱۳]. دامنه این حرکت به دامنه و فرکانس تحریک مخزن، عمق مایع درون مخزن، مشخصات مایع و هندسه مخزن بستگی خواهد داشت [۱۴]. هندسه مخازن به سه دسته کلی تقسیم‌بندی می‌شود. مخازن استوانه‌ای، مخازن مستطیلی و مخازن مخروطی. اکثر مطالعات بر روی مخازن استوانه‌ای و مستطیلی انجام پذیرفته است. ساگی [۱۵] به بررسی چگونگی توزیع فشار ناشی از پدیده اسلاشینگ بر روی بدنه مخازن نیمه‌پر مستطیلی و

دوزنقه‌ای حاوی سیال پرداخت و با ارائه یک مدل عددی راهکاری جهت تخمین آن معرفی نمود. او همچنین در رابطه با بررسی اسلاشینگ در مخازن نیمه پر متحرک مستطیلی و بیضوی حاوی سیال و تاثیر آن در پایداری حرکت آنها از طریق به حداقل رساندن آنترپی حاصل از پدیده تلاطم سطح آزاد سیال پژوهش‌هایی انجام داده است و پیشنهادهایی در بهینه سازی ابعاد و هندسه مخازن متحرک جهت افزایش پایداری آنها در زمان حرکت ارائه نموده است [۱۷،۱۶]. در رابطه با مخازن ثابت، هارون [۱۸] در سال ۱۹۸۳ بر روی سه مخزن استوانه‌ای با ابعاد واقعی آزمایش ارتعاشی را انجام داد و فرکانس‌ها و شکل مودهای این نمونه‌ها را تعیین نمود که این تحقیق کمک زیادی در درک پاسخ‌های دینامیکی این نوع سازه‌ها داشته است. برای تعیین فرکانس‌های طبیعی و شکل مودهای مایع درون مخازن استوانه‌ای با بدنه صلب، روابط دقیق ریاضی ارائه شده است [۱۹] اما در مسائل دیگر تا هنگامی که راه‌حل‌های تحلیلی دقیق برای حل مسائل موجود نباشد می‌توان از شیوه‌های عددی برای رسیدن به مدل‌های دقیق‌تر و مشاهدات آزمایشگاهی بهره جست. دو مورد مطالعات اشاره شده اخیر در رابطه با مخازن زمینی بحث نموده‌اند و در روند تحقیق آنها اشاره‌ای به تأثیر ارتفاع در آنها صورت نپذیرفته است. در رابطه با مطالعات انجام پذیرفته در مورد مخازن استوانه‌ای هوایی، بیشتر پژوهش‌ها به صورت دوبعدی ارائه گردیدند که نسبت به مدل‌سازی ۳ بعدی ارائه شده در این تحقیق از دقت بسیار کمتری برخوردار می‌باشند [۲۰،۲۱،۲۲]. همچنین تعداد کمی از مدل‌سازی‌های سه بعدی ارائه گردیدند، که این مدل‌ها از نظر بارگذاری شرایط بسیار محدودتری را نسبت به مدل‌سازی حاضر ارائه نموده‌اند [۲۳،۲۴،۲۵]. در مورد مخازن مستطیلی نیز تاکنون مدل‌های دوبعدی و سه بعدی مختلفی برای حل مسئله امواج سطحی در مخازن مستطیلی با دیوارهای صلب پیشنهاد شده است که در اغلب آنها از روش‌های اجزای محدود FEM و اجزای مرزی BEM و تفاضل محدود FDM استفاده شده است [۲۶،۲۷،۲۸] که با توجه به هندسه مستطیلی شکل آنها، نتایج به دست آمده از تحلیل این پژوهش‌ها اعتبار کافی برای بررسی مخازن دایره‌ای شکل را ندارد. همان‌طور که قبلاً اشاره شد، مطالعات بسیار کمی در مورد مخازن مخروطی انجام پذیرفته است. اغلب این مطالعات بر روی پاسخ مخازن مخروطی تحت اثر بار جانبی افقی انجام پذیرفته است. اولین پژوهش مربوط به رفتار لرزه‌ای مخازن هوایی مخروطی توسط سوییدان و ال داماتی [۲۹] جهت بررسی تفاوت پاسخ لرزه‌ای مخزن خالی و پر تحت اثر بار دینامیکی جانبی مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین در ادامه این پژوهش‌ها تأثیرات نوسان امواج تلاطم بر روی پاسخ جداره مخزن مورد ارزیابی قرار گرفت و تأثیر آن به اثبات رسید [۳۰،۳۱]. در هیچ یک از مطالعات فوق که در رابطه با مخازن مخروطی انجام پذیرفته، تأثیر مؤلفه قائم دیده نشده است و همچنین در مورد اثرات نیروهای دینامیکی زلزله بر روی لنگرهای ایجاد شده در پایه مخزن تحقیق نشده است. لذا در این تحقیق سعی بر آن شد تا با ارائه تحلیل سه بعدی لرزه‌ای بر روی مدل‌های مخزن مخروطی با هندسه‌ها و حالت‌های بارگذاری مختلف، به بررسی تغییرات ارتفاع امواج حاصل از تلاطم سیال و لنگرهای بوجود آمده با در نظر گرفتن تأثیر مؤلفه قائم زلزله پرداخته شود.

## ۲- مدل آزمایشگاهی

برای اطمینان از صحت عملکرد مدل عددی سیال تحت بارهای دینامیکی در نرم‌افزار المان محدود، یک سری آزمایش‌های دینامیکی توسط یک طرح ابتکاری بر روی یک مخزن استوانه‌ای با مقیاس کوچک مدنظر قرار گرفت. این آزمایش‌ها در آزمایشگاه پژوهشگاه بین‌المللی زلزله و زلزله‌شناسی انجام پذیرفت.

### ۲-۱- ساخت مدل آزمایشگاهی

مخزن آزمایش به صورت یک استوانه به قطر داخلی ۶۰ سانتیمتر ساخته شد. برای دیواره مخزن از جنس پلی‌پروپیلن استفاده شد تا از خاصیت نیمه شفافیت آن جهت مشاهده حرکات آب درون مخزن استفاده گردد. شکل ۱ نمایی از مخزن اشاره شده در بالا که بر روی یک میز لرزه ابتکاری قرار گرفته را نشان می‌دهد.

از آنجایی که میز لرزه موجود در آزمایشگاه فقط قادر به تولید حرکت‌های افقی بود و با توجه به اینکه اثر همزمان مؤلفه‌های افقی و عمودی بر روی مدل آزمایشگاهی موردنظر بود، بنابراین لازم به نظر رسید تا با ایجاد یک مکانیسم ابتکاری این مشکل را برطرف نموده و مؤلفه قائم نیرو را هم‌زمان با مؤلفه افقی در آزمایش ایجاد و اعمال نمود. به همین منظور دو عدد چهارچوب گوه‌ای شکل ساخته و از سمت وتر و به واسطه غلطک‌های نصب‌شده، روی هم قرار داده شدند به طوری که دو چارچوب گوه‌ای شکل در راستای وتر نسبت به یکدیگر قادر

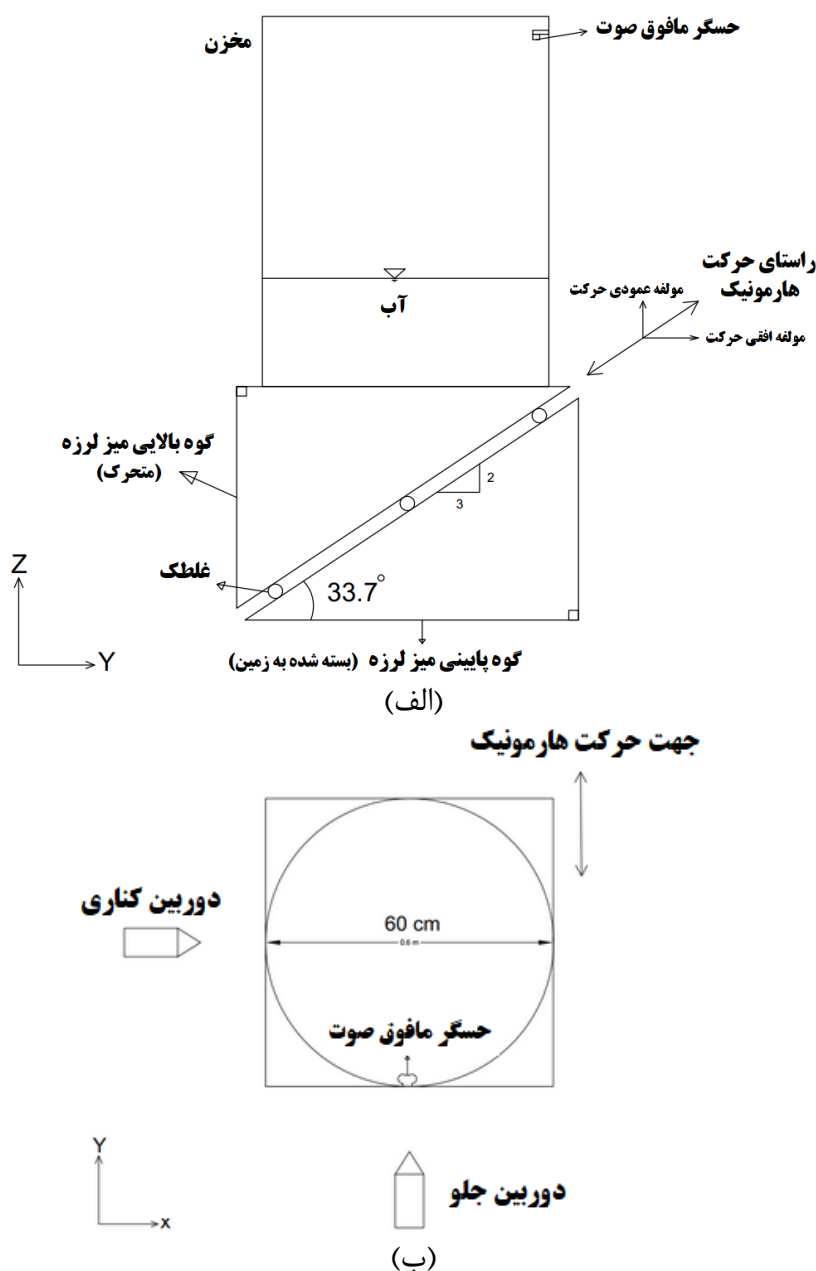
به جابجایی بودند. شکل ۲ نمایش دهنده جزئیات مربوطه می‌باشد. با افزودن یک مکانیسم الکترومکانیکی تشکیل شده از یک موتور الکتریکی و یک سیستم انتقال نیرو، حرکت چرخشی موتور الکتریکی را به یک حرکت رفت و برگشتی تبدیل نموده و این حرکت توسط چرخ‌دنده‌های نصب شده به گوه بالایی منتقل و باعث به حرکت درآمدن آن گردید. این موتور الکتریکی به یک سیستم تغییر ولتاژ کامپیوتری متصل گردیده بود که توسط کاربر قابل برنامه‌ریزی بوده و توسط آن، موتور الکتریکی با دقت بسیار بالا و در سرعت‌های موردنظر به حرکت درآورده شد.



شکل ۱: نمایی از مخزن بر روی سامانه ابتکاری حرکات نوسانی

فرکانس موردنظر برای ایجاد تحریک دینامیکی هارمونیک موردنیاز در آزمایش با تنظیم سرعت گردش موتور ایجاد گردید. همچنین دامنه حرکت برای این آزمایش (d) برابر ۳ میلی‌متر در نظر گرفته شد که با طراحی دقیق هندسی بازوهای انتقال نیرو، به گوه بالایی اعمال می‌گردید. به این ترتیب با تثبیت چهارچوب پایینی به زمین و بستن مخزن بر روی چهارچوب بالایی و به حرکت درآمدن موتور الکتریکی، چهارچوب بالایی و مخزن روی آن، در راستای وتر گوه‌ها به صورت هارمونیک سینوسی به حرکت درآمدند (شکل ۲). واضح است که این حرکت مورب، در دو راستای افقی و قائم قابل تفکیک می‌باشد و مخزن به همراه آب داخل آن به میزان  $d \sin \alpha$  در راستای قائم و  $d \cos \alpha$  در راستای افقی تحت اثر این بار دینامیکی قرار گرفته و سطح آن دچار تلاطم حاصل از این حرکت می‌شود. بر اساس آیین‌نامه ACI-350 [۳۲] شیب وتر گوه‌ها به نسبت ۲ به ۳ انتخاب گردیده که در نتیجه آن  $\alpha$  برابر  $33.7^\circ$  درجه می‌باشد. بنابراین جابجایی افقی و قائم به ترتیب  $X = 0.003 \cos 33.7 \sin(\omega t)$  و  $Y = 0.003 \sin 33.7 \sin(\omega t)$  بوده که در آن  $\omega$  سرعت زاویه‌ای چرخش موتور (فرکانس حرکت رفت و برگشتی مخزن و یا  $\omega_{test}$  در جدول ۱) برحسب rad/s و  $t$  زمان برحسب ثانیه می‌باشد.

مخزن و آب درون آن که روی این سیستم نصب شده است تحت اثر هر دو مؤلفه قائم و افقی جابجایی قرار گرفته و سطح آب دچار تلاطم حاصل از این حرکت می‌شود. حرکت موج تلاطم ایجاد شده توسط حسگر مافوق صوت نصب شده بر روی دیواره مخزن سنجیده و توسط کامپیوتر متصل به آن ثبت شده است. طی مراحل مختلف آزمایش، حرکات سطح آب در مخزن توسط ۲ دوربین در دو راستای عمود به هم فیلم‌برداری گردیده است که در پلان شماتیک شکل ۲ نمایش داده شده است.



شکل ۲: جزئیات سامانه ابتکاری تحریک دینامیکی مخزن در آزمایش: الف) برش، ب) پلان

## ۲-۲- بارگذاری دینامیکی نمونه آزمایشگاهی

آزمایش‌ها در شرایط نیمه‌پر مخزن انجام گردید. آب درون مخزن در چهار مرحله جداگانه به عمق‌های ۰/۱ متر، ۰/۱۵ متر، ۰/۲ متر و ۰/۲۵ متر پر شد. برای هر مرحله از پرشدگی مخزن، سیستم با سه نوع فرکانس با مقادیر کوچکتر، نزدیک و بالاتر از اولین فرکانس مود اصلی آب درون مخزن، با تنظیم سرعت الکتروموتور ( $\omega_{test}$ ) و به حرکت درآمدن میز لرزه به صورت هارمونیک تحریک شد. این فرکانس‌ها متناسب با شرایط مختلف شامل فرکانس‌های کمتر، نزدیک و بیشتر از فرکانس تشدید انتخاب گردیده‌اند. برای تمامی آزمایش‌ها، تغییرات ارتفاع موج حاصل از تلاطم در طول زمان آزمایش توسط حسگر فاصله‌سنج اولتراسونیک نصب شده بر روی دیواره مخزن ثبت گردید.

پریود مود اول تلاطم ( $F_c$ ) استفاده شده برای تحریک هارمونیک مخزن در این آزمایش از طریق روابط داده شده در آیین نامه [۳۲] ACI-350 مربوط به فرکانس مود اول تلاطم ( $\omega_c$ ) به عنوان تابعی از ارتفاع سیال ( $H_L$ ) و قطر مخزن ( $D$ ) به صورت زیر محاسبه گردید:

$$F_c = \frac{\sqrt{3.68g \tanh[3.68 (\frac{H_L}{D})]}}{2\pi\sqrt{D}} \quad (1)$$

$$\omega_c = 2\pi F_c \quad (2)$$

در روابط بالا  $g$  شتاب جاذبه بر حسب فوت بر مجذور ثانیه،  $H_L$  عمق سیال پر شده درون مخزن بر حسب فوت و  $D$  قطر داخلی مخزن بر حسب فوت می باشد. ذکر این نکته حائز اهمیت می باشد که مقدار  $\omega_c$  به دست آمده از رابطه (۲) بر حسب رادیان بر ثانیه محاسبه گردیده و مربوط به فرکانس نوسان سطح آزاد آب می باشد.

جدول ۱ معرف خصوصیات هندسی و فیزیکی آزمایش های انجام شده می باشد که چند نمونه از نتایج آزمایش های انجام پذیرفته در شکل شماره ۶ نمایش داده شده است.

جدول ۱: خصوصیات هندسی و فیزیکی آزمایش ها

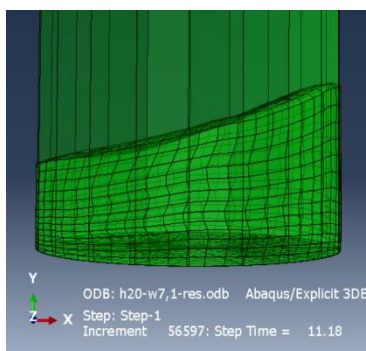
| $H_L$ (m) | $F_c$ (Hz) | $\omega_c$ (rad/sec) | $\omega_{test}/\omega_c$ | $\omega_{test}$ (rad/sec) |
|-----------|------------|----------------------|--------------------------|---------------------------|
| ۰/۱۵      | ۱/۰۵       | ۶/۶۰۸                | ۱/۰۰                     | ۶/۶۰۸                     |
| ۰/۱۵      | ۱/۰۵       | ۶/۶۰۸                | ۱/۰۵                     | ۶/۹۸۱                     |
| ۰/۱۵      | ۱/۰۵       | ۶/۶۰۸                | ۰/۹۵                     | ۶/۲۸۳                     |
| ۰/۲۰      | ۱/۱۴       | ۷/۱۱۴                | ۱/۰۰                     | ۷/۱۱۴                     |
| ۰/۲۰      | ۱/۱۴       | ۷/۱۱۴                | ۱/۰۶                     | ۷/۵۷۰                     |
| ۰/۲۰      | ۱/۱۴       | ۷/۱۱۴                | ۰/۹۵                     | ۶/۷۵۶                     |
| ۰/۲۵      | ۱/۱۹       | ۷/۴۰۵                | ۱/۰۰                     | ۷/۴۰۵                     |
| ۰/۲۵      | ۱/۱۹       | ۷/۴۰۵                | ۱/۰۶                     | ۷/۸۵۴                     |
| ۰/۲۵      | ۱/۱۹       | ۷/۴۰۵                | ۰/۹۴                     | ۶/۹۸۱                     |

### ۳- مدل سازی عددی و صحت سنجی

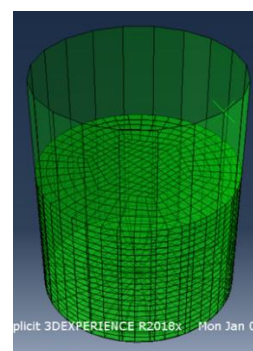
از نمونه آزمایشگاهی برای صحت سنجی مدل عددی ساخته شده در نرم افزار آباکوس بهره گرفته شده است. هندسه مدل ساخته شده در نرم افزار به همراه مدل عددی متناظر با مدل آزمایشگاهی معرفی شده قسمت ۲، در نرم افزار المان محدود آباکوس ایجاد گردید (شکل ۳).



(ج)



(ب)

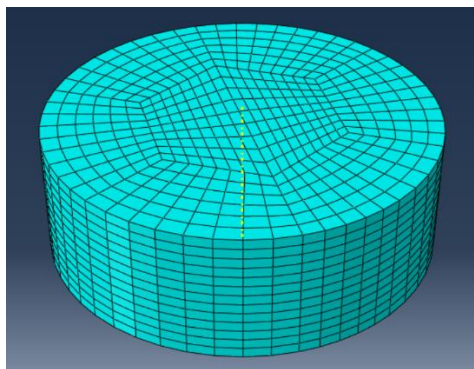


(الف)

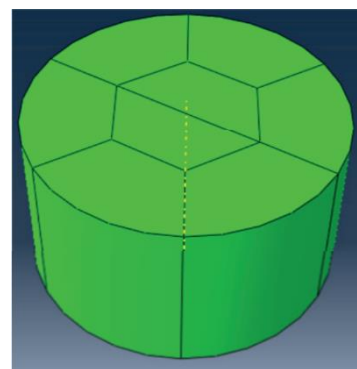
شکل ۳: (الف) هندسه ساخته شده از نمونه آزمایشگاهی در نرم افزار آباکوس، (ب) مدل عددی سطح آب برای  $H_L = 0.2$  m و شرایط نزدیک به تشدید در ثانیه ۱۱ (ج) مدل آزمایشگاهی متناظر قسمت ب در ثانیه ۱۱

شرایط مدل آزمایشگاهی از قبیل هندسه مخزن، عمق آب و شرایط تحریک دینامیکی مخزن مطابق شرایطی که در قسمت ۲ توضیح داده شده است، در نرم افزار آباکوس مدل سازی شده و بعد از هر بار تحلیل، نمودار ارتفاع موج تلاطم در موقعیت قرارگیری حسگر اولتراسونیک نصب شده بر روی دیواره مخزن آزمایش، در نرم افزار آباکوس استخراج گردید. نظر به اینکه رفتار دقیق سیال تحت بارگذاری دینامیکی در نرم افزارهای FEM بستگی به نوع و ابعاد المانها دارد، لذا طی مراحل زیادی از سعی و خطا در روند تعیین ابعاد و انواع المانها در مدل سازی عددی سیال و مقایسه نتایج هر یک از ترکیب های مدل سازی عددی با نتایج حاصل از نمونه های فیزیکی، بهترین ابعاد المان بندی و تکنیک مدل سازی عددی سیال به گونه ای انتخاب گردید که بیشترین همخوانی با نتایج آزمایشگاهی ایجاد گردد. در همین راستا روش های متفاوتی از شبکه بندی آب مورد بررسی و آزمایش قرار گرفت تا مناسب ترین روش بدست آید. با توجه به شکل دایره ای مقطع مخزن، زمانی که بدون تقسیم بندی مقطع نسبت به شبکه بندی آن اقدام شد، نوعی بی نظمی در چیدمان المانهای مرکزی مشاهده گردید که باعث بوجود آمدن حرکات غیرطبیعی در هنگام اجرای مدلسازی می شد. بنابراین نیاز بود تا با ایجاد تقسیم بندی های ویژه نسبت به هماهنگ سازی مقطع دایره ای مخزن با المانهای چهارگوش مورد استفاده در مدلسازی اقدام گردد. به همین جهت و با بکارگیری تقسیم بندی های مختلف، در نهایت مدل تقسیم بندی مناسبی یافت گردید که در آن سطح آب مطابق شکل ۴ با یک شش ضلعی برش خورده است [۳۳] که با بکارگیری آن، حرکات سیال طبیعی و مطابق مدل آزمایشگاهی شد. همانطور که در شکل ۴ مشاهده می گردد، هر تقسیم بندی به صورت مجزا المان بندی شده و این امر موجب افزایش نظم در شبکه بندی کلی مدل سیال گردیده است. در ادامه، تحلیل های متعددی جهت تعیین بهینه اندازه المان های شبکه بندی آب صورت گرفت. اندازه المان ها می بایست در محدوده قابل قبولی قرار گیرند به گونه ای که اگر اندازه المان ها از حداکثر مقدار محدوده بهینه بیشتر باشد باعث کاهش دقت در مدلسازی و حرکات غیرعادی و ایجاد شکستگی در سطح سیال می گردد. چنانچه اندازه المان ها کمتر از حداقل محدوده بهینه انتخاب گردد زمان تحلیل بیش از اندازه طولانی و دقت محاسبات چندان تغییری نمی نماید. به همین منظور ابعاد المانها در دو راستای افق و عمودی و بصورت همگن از نسبت های بزرگتر به نسبت های کوچکتر مورد آزمایش قرار گرفته و نتایج آن با نتایج آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفت. در ابتدا نسبت ۱ به ۱۰ با اندازه ۰/۰۶ متر (با توجه به قطر مخزن ۰/۶ متر) برای بعد مش انتخاب گردید که با توجه به واگرا شدن نتایج مورد قبول واقع نشد. در ادامه، اندازه مش ها به ترتیب به مقدارهای ۰/۰۵، ۰/۰۴۵، ۰/۰۴۰ و ۰/۰۳۵ متر تغییر داده شد که نتایج تحلیل در تمامی آنها واگرا شد. با انتخاب اندازه مش برابر با ۰/۰۳۵ متر نتایج همگرا شدند ولی در تغییر شکل های بزرگ، نتایج عددی با نمونه آزمایشگاهی تطابق کمی داشت. برای بالا بردن دقت و افزایش تطابق نتایج اندازه مش به مقادیر ۰/۰۳۰، ۰/۰۲۵ و ۰/۰۲۰ متر کاهش داده شد که با توجه به یکسان بودن دقت و تطابق نتایج در مش بندی با اندازه های ۰/۰۲۵ و ۰/۰۲۰ و با توجه به افزایش ۵۰ درصدی زمان تحلیل مش ۰/۰۲۰ نسبت به مش ۰/۰۲۵ متر، بعد مش به مقدار ۰/۰۲۵ متر در صفحه افقی انتخاب گردید. با توجه به اینکه بعد ماده در راستای عمودی کوچکتر و همچنین مقدار جابجایی گره های مش بندی در راستای عمود بر صفحه افقی به مراتب بیشتر از جابجایی گره ها در راستای افقی بود، نیاز بود تا با کوچکتر کردن بعد مش در راستای عمودی دقت تحلیل در این راستا افزایش یابد بنابراین با بکارگرفتن روش اشاره شده در بالا، نهایتاً مقدار ۰/۰۱۵ متر برای بعد مش در راستای عمودی به عنوان بعد مش بهینه در این راستا انتخاب گردید. با توجه به مطالب بالا نسبت مش ۱ به ۲۴ برای راستای افقی (قطر ۰/۶۰ متر) و ۱ به ۱۳ برای راستای قائم (برای عمق ۰/۲۰ متر) به عنوان نسبت مش بهینه انتخاب گردید. برای سایر هندسه ها نیز روش بدست آوردن مش بهینه مشابه روش فوق انجام پذیرفت. شکل ۵ نحوه شبکه بندی بهینه سیال براساس الگوی تقسیم بندی شش وجهی ارائه شده در شکل ۴ را نشان میدهد.



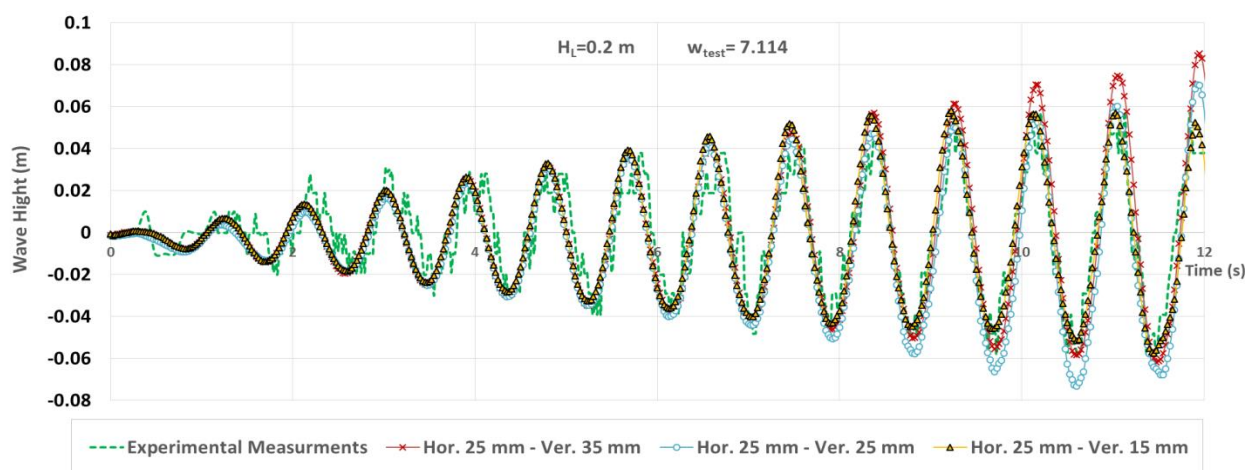


شکل ۵: یک نمونه شبکه بندی بهینه شده بر اساس تقسیم بندی ۶ وجهی



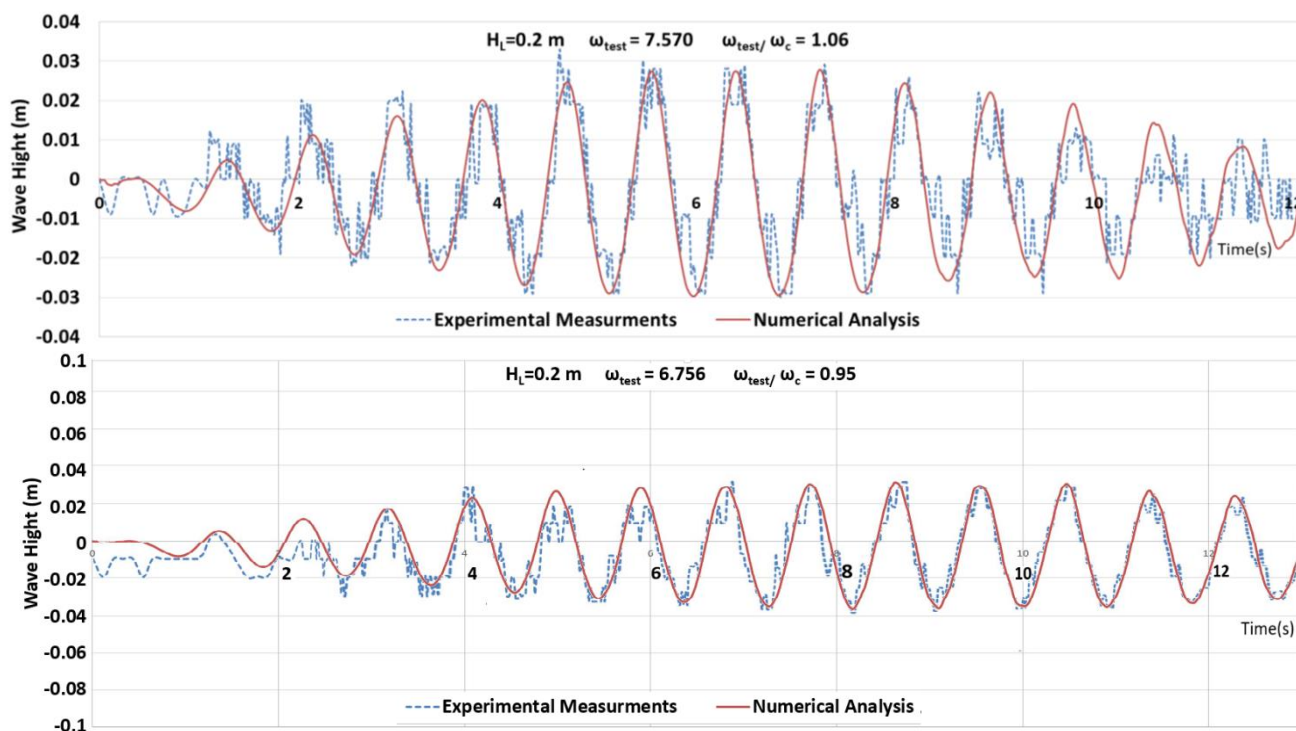
شکل ۶: تقسیم بندی ۶ وجهی سیال مدل سازی شده

در شکل ۶ حساسیت نتایج تحلیل عددی نسبت به اندازه بعد مش و مقایسه یک نمونه از مدل آزمایشگاهی و عددی با لحاظ نمودن ابعاد مختلف مش نشان داده شده است. همانگونه که در این شکل مشخص می باشد ابعاد مش افقی ۰/۰۲۵ و عمودی ۰/۰۱۵ متر بهترین تطابق را با نتایج آزمایشگاهی نمایش می دهد.



شکل ۶: حساسیت سنجی نسبت به ابعاد مش و انتخاب نسبت بهینه مش در مدل عددی

شکل ۷ نیز دو نمونه دیگر از نمودارهای مقایسه ای حاصل از ارتفاع موج تلاطم در شرایط مختلف حاصل از انجام آزمایش های فیزیکی و نتایج حاصل از تحلیل عددی را برای ابعاد بهینه مش را نشان می دهد. نتایج مدل سازی انطباق خوبی را با نتایج آزمایشگاهی نشان میدهد.



شکل ۷: مقایسه بین نتایج اندازه گیری‌های انجام شده تغییرات موج حاصل از تلاطم در مدل آزمایشگاهی و نتایج حاصل از تحلیل عددی مدل شبیه‌سازی شده تحت فرکانس‌های مختلف

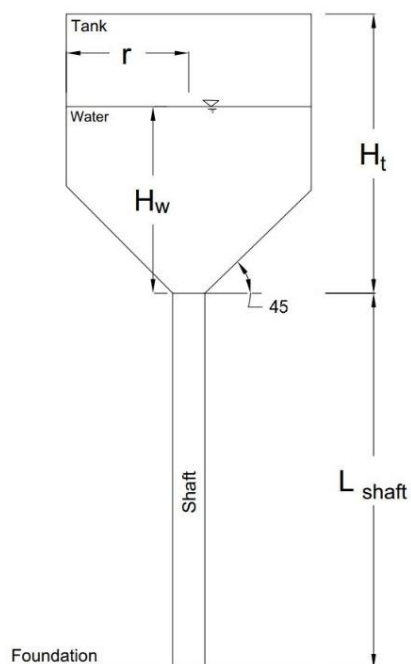
در این مدل‌سازی از المان‌های سه بعدی همراه با انتگرال گیری کاهش یافته ۶ وجهی ۸ گره ای (C 3D 8 R) برای شبیه سازی آب استفاده شده است.

#### ۴- مدل‌سازی عددی مخزن هوایی حاوی سیال

پس از اطمینان از عملکرد صحیح مدل عددی شبیه‌سازی سیال تحت بارگذاری دینامیکی، به ایجاد مدل عددی مخزن هوایی حاوی سیال در اندازه‌های بزرگ پرداخته شده است. این مدل‌سازی در نرم‌افزار آباکوس انجام پذیرفته و از همان تکنیک‌های مدل‌سازی که در مراحل قبلی بیان گردیده، استفاده شده است. انتخاب مش بندی بهینه با توجه به ابعاد و هندسه مخزن مورد نظر در این قسمت از تحقیق و با بکارگیری تکنیک ذکر شده در قسمت ۳، انجام پذیرفته شده است.

#### ۴-۱- هندسه مدل‌های عددی مخازن هوایی حاوی سیال

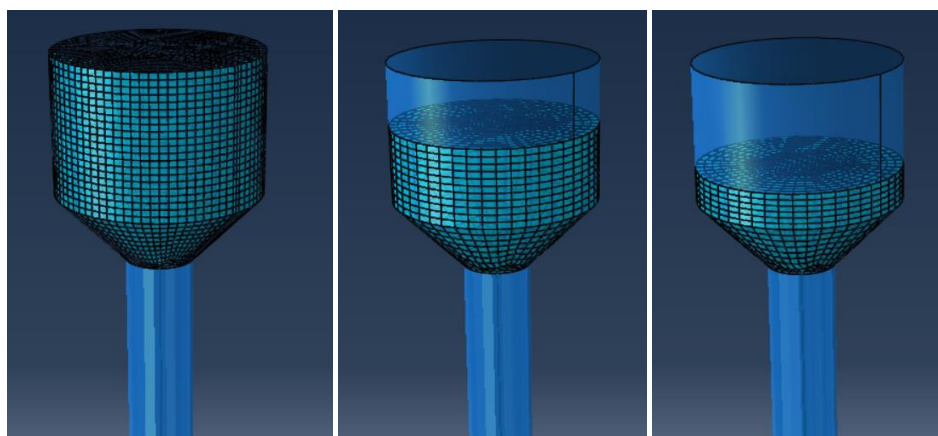
در انتخاب ابعاد سازه مخزن سعی شد که از ابعاد متعارف مخازن هوایی موجود در صنعت استفاده گردد. شکل ۸ متغیرهای ابعادی مورد استفاده در این تحقیق را نشان می‌دهد. جدول ۲ ترکیبات مختلف ابعادی انتخاب شده در این تحقیق را نمایش می‌دهد. چند نمونه از مدل‌های ساخته شده با مش بندی با نسبت بهینه نیز در شکل ۹ نشان داده شده‌اند.



شکل ۸: متغیرهای هندسی مخزن هوایی

جدول ۲: متغیرهای شبیه‌سازی عددی برای مخزن

| ترکیب هندسی | $H_w/H_t$ | $r/H_t$ | $L_{shaft}$ (m) | $H_t$ (m) | $H_w$ (m) | $R$ (m) |
|-------------|-----------|---------|-----------------|-----------|-----------|---------|
| ۱           | ۰/۵       | ۰/۵۰    | ۲۵              | ۱۸        | ۹/۰       | ۹/۰     |
| ۲           | ۰/۵       | ۰/۳۳    | ۲۵              | ۱۸        | ۹/۰       | ۶/۰     |
| ۳           | ۰/۵       | ۰/۲۰    | ۲۵              | ۱۸        | ۹/۰       | ۳/۶     |
| ۴           | ۰/۷       | ۰/۵۰    | ۲۵              | ۱۸        | ۱۲/۶      | ۹/۰     |
| ۵           | ۰/۷       | ۰/۳۳    | ۲۵              | ۱۸        | ۱۲/۶      | ۶/۰     |
| ۶           | ۰/۷       | ۰/۲۰    | ۲۵              | ۱۸        | ۱۲/۶      | ۳/۶     |
| ۷           | ۱/۰       | ۰/۵۰    | ۲۵              | ۱۸        | ۱۸/۰      | ۹/۰     |
| ۸           | ۱/۰       | ۰/۳۳    | ۲۵              | ۱۸        | ۱۸/۰      | ۶/۰     |
| ۹           | ۱/۰       | ۰/۲۰    | ۲۵              | ۱۸        | ۱۸/۰      | ۳/۶     |



شکل ۹: چند نمونه از شبیه‌سازی عددی ساخته شده در آباکوس بر مبنای اطلاعات جدول ۲

## ۴-۲- معرفی زلزله‌های مورد استفاده در شبیه‌سازی عددی مخازن

زلزله‌های مختلف برای بارگذاری دینامیکی در مدل‌های ساخته شده در این پژوهش به‌گونه‌ای انتخاب شدند تا فرکانس غالب زلزله‌ها نزدیک به فرکانس مود اصلی تلاطم سیال داخل مخزن باشد. زمین‌لرزه‌های انتخاب شده شامل شتاب‌نگاشت‌های اصلی در ۳ راستای عمود برهم هستند. مشخصات این زلزله‌ها از قبیل محل وقوع و نام شتاب‌نگار مورد استفاده به قرار زیر می‌باشد:

۱- زلزله امپریال ولی (Imperial Valley, USA (El Centro Array #1 Station) 1979

۲- زلزله امپریال ولی (Imperial Valley, USA (El Centro Array #5 Station) 1979

۳- زلزله کوبه (Kobe, Japan (Port Island station) 1995

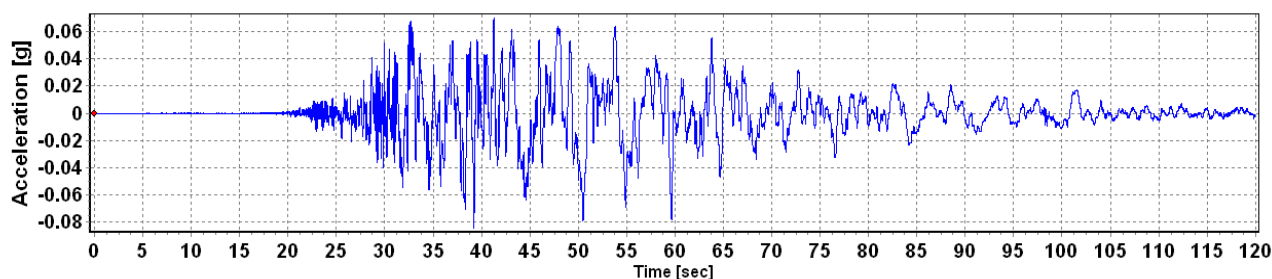
۴- زلزله منجیل (Manjil, Iran (Abbar station) 1990

۵- زلزله نورث ریج (Northridge, USA (Jensen Filter Plant Generator Building station) 1994

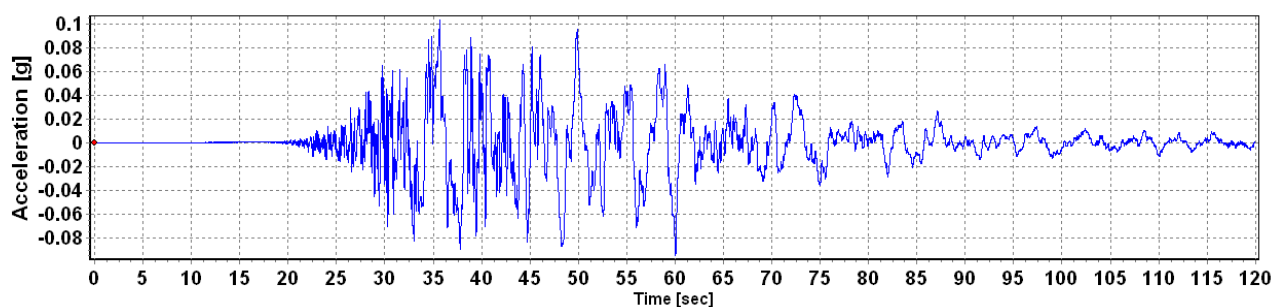
۶- زلزله طبس (Tabas, Iran (Tabas station) 1978

۷- زلزله چی چی (Chi-Chi Taiwan (CHY092 station) 1999

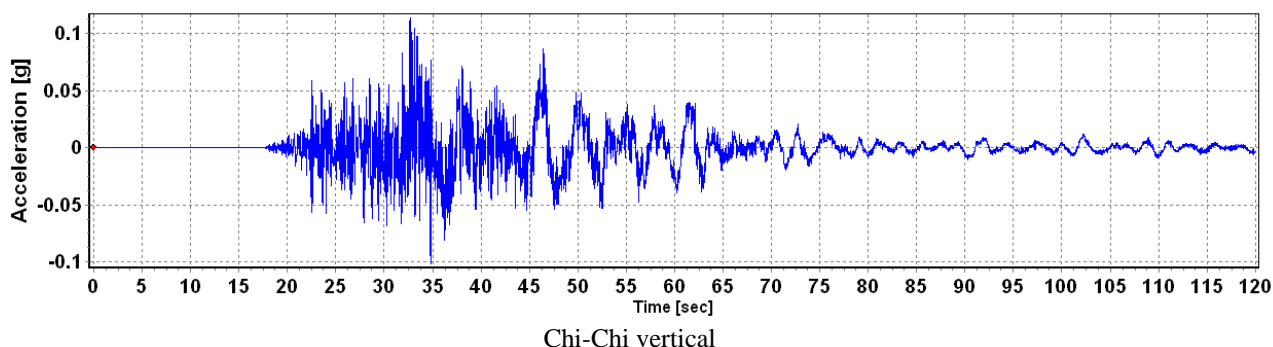
تمامی رکوردهای فوق از طریق نرم‌افزار Seismosignal به‌صورت زوج اطلاعات شتاب-زمان به نرم‌افزار آباکوس منتقل گردید. خصوصیات زلزله‌های مورد استفاده در جدول ۳ نمایش داده شده است. به‌منظور ایجاد شرایط واقعی حاصل از بارگذاری دینامیکی در این شبیه‌سازی، مقیاس رکورد زلزله‌ها بدون تغییر مورد استفاده قرار گرفتند. شکل ۱۰ نمونه‌ای از شتاب‌نگاشت‌های استفاده شده در مدل‌سازی را نشان می‌دهد. همچنین به‌منظور مقایسه شهودی زلزله‌ها، گراف‌های نرمال شده شبه سرعت تمامی زلزله‌ها در شکل ۱۱ نمایش داده شده‌اند.



Chi-Chi horizontal-N



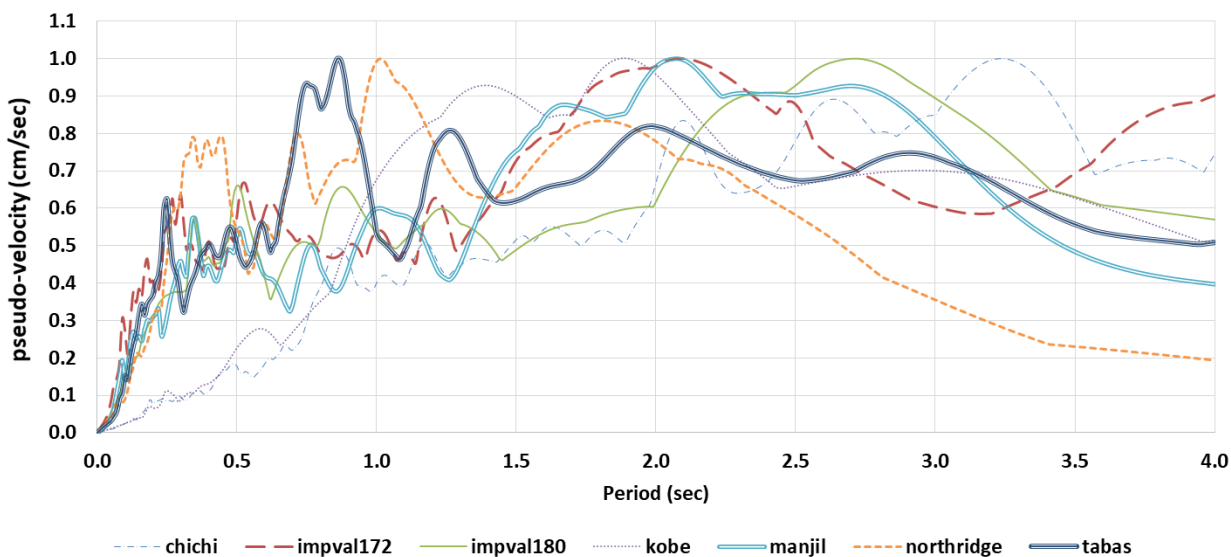
Chi-Chi horizontal-L



شکل ۱۰: یک نمونه از شتاب‌نگاشت‌های مورد استفاده در مدل‌سازی، مربوط به زلزله چی چی، تایوان ۱۹۹۹

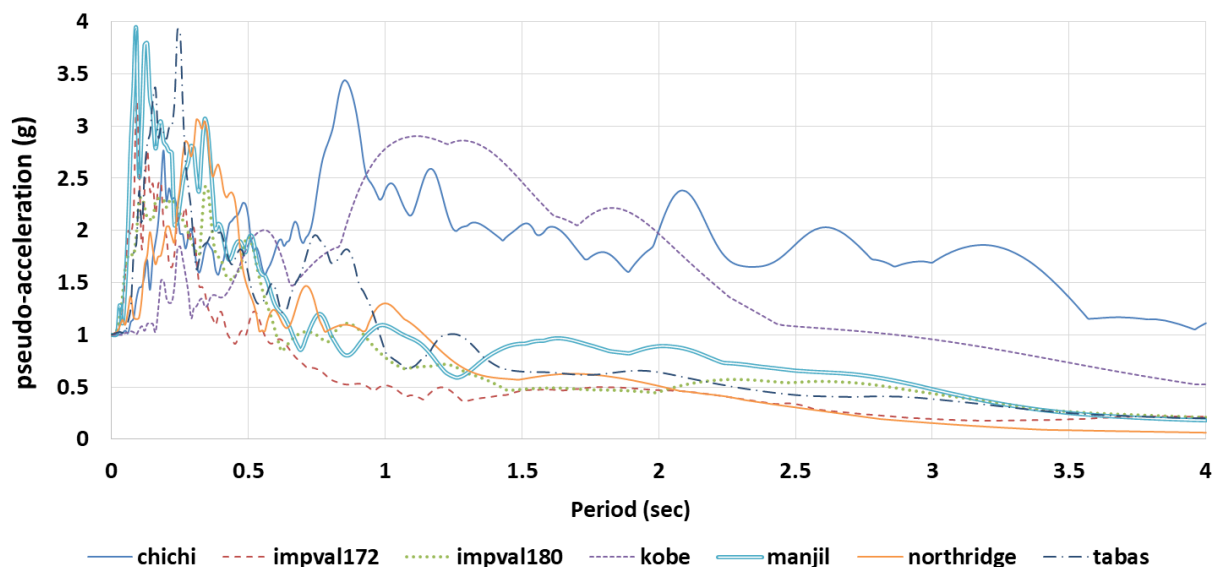
جدول ۳: خصوصیات زلزله‌های مورد استفاده در مدل‌سازی

| نام زلزله  | بیشینه شتاب افقی (g) | بیشینه شتاب عمودی (g) | فاصله شتاب‌نگار از گسل (km) | بزرگای زلزله | زمان موثر زلزله (s) |
|------------|----------------------|-----------------------|-----------------------------|--------------|---------------------|
| Chi-Chi    | ۰/۱۰                 | ۰/۱۱                  | ۲۲/۷                        | ۷/۶          | ۳۰                  |
| Imp.val.#1 | ۰/۱۴                 | ۰/۰۶                  | ۲۰/۰                        | ۶/۵          | ۱۸                  |
| Imp.val.#5 | ۰/۴۴                 | ۰/۶۰                  | ۱/۸                         | ۶/۵          | ۱۲                  |
| Kobe       | ۰/۳۵                 | ۰/۵۷                  | ۳/۳                         | ۶/۹          | ۱۶                  |
| Manjil     | ۰/۵۱                 | ۰/۵۳                  | ۱۲/۵                        | ۷/۳          | ۲۰                  |
| Northridge | ۰/۵۷                 | ۰/۷۶                  | ۰/۱                         | ۶/۷          | ۱۲                  |
| Tabas      | ۰/۸۵                 | ۰/۶۴                  | ۱/۷                         | ۷/۳          | ۱۸                  |



شکل ۱۱: گراف‌های نرمال شده "شبه سرعت-زمان"

همانگونه که در شکل ۱۱ مشخص شده است گراف‌های شبه سرعت مربوط به زلزله‌ها در محدوده پریودهای ۲ تا ۴ ثانیه دارای مقادیر بالا می‌باشند. این محدوده پریود برای رکورد زلزله‌های انتخاب شده، منطبق با پریودهای مود اصلی تلاطم سیال برای عمق‌های  $(H_w)$  موجود در جدول ۲ می‌باشند تا در این حالت، سیال درون مخزن در شرایط بحرانی نزدیک به رزونانس قرار گرفته و تاثیر اندرکنش سیال تحت اثر نیروهای زلزله به صورت حداکثری بر روی مخزن اعمال و مورد مطالعه قرار گیرد.



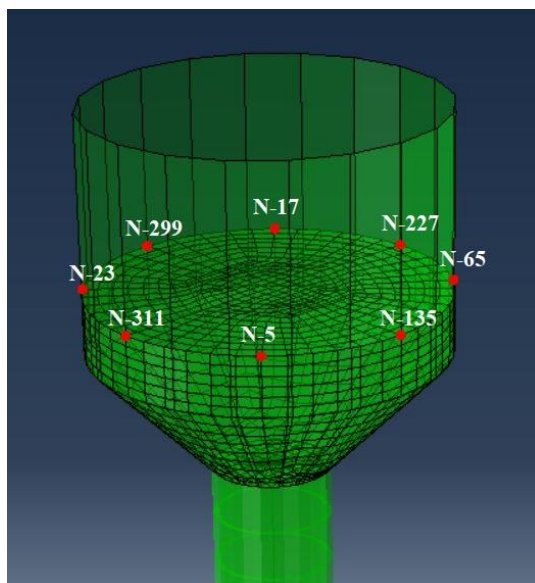
شکل ۱۲: گرافهای نرمال شده "شبه شتاب-زمان"

شکل ۱۲ گرافهای نرمال شده شبه شتاب-زمان رکورد زلزله‌های مورد استفاده در این پژوهش را به منظور مقایسه محتوای فرکانسی آنها نمایش می‌دهد. با توجه به این گرافها، براساس اینکه مقدار شتاب طیفی در چه فرکانس یا پریودهایی بیشتر باشد، فرکانس یا پریودهای غالب در هر زلزله قابل تشخیص هستند.

به منظور تحلیل دینامیکی مخازن هوایی و با استفاده از اطلاعات شتاب‌نگاشت‌های فوق، نسبت به ایجاد فایل‌های بارگذاری دینامیکی هر زلزله برای هر هندسه از مدل مخزن در نرم‌افزار آباکوس اقدام گردید. جهت بررسی مقدار و نحوه تأثیر مؤلفه قائم زلزله بر روی مدل مخزن، به ازای هر زلزله، یک‌بار بدون در نظر گرفتن مؤلفه قائم و یک‌بار با در نظر گرفتن مؤلفه قائم زلزله در بارگذاری دینامیکی، هر یک از حالت‌های مشخص شده در جدول ۲ مورد تحلیل عددی قرار گرفته شد. مدت زمان تحلیل به ازای مدت زمان مؤثر زلزله محاسبه و مورد استفاده قرار گرفت. این مدت زمان متناسب با زمان مابین مقادیر ۵٪ تا ۹۵٪ نمودار "arias intensity" هر زلزله محاسبه گردیده است.

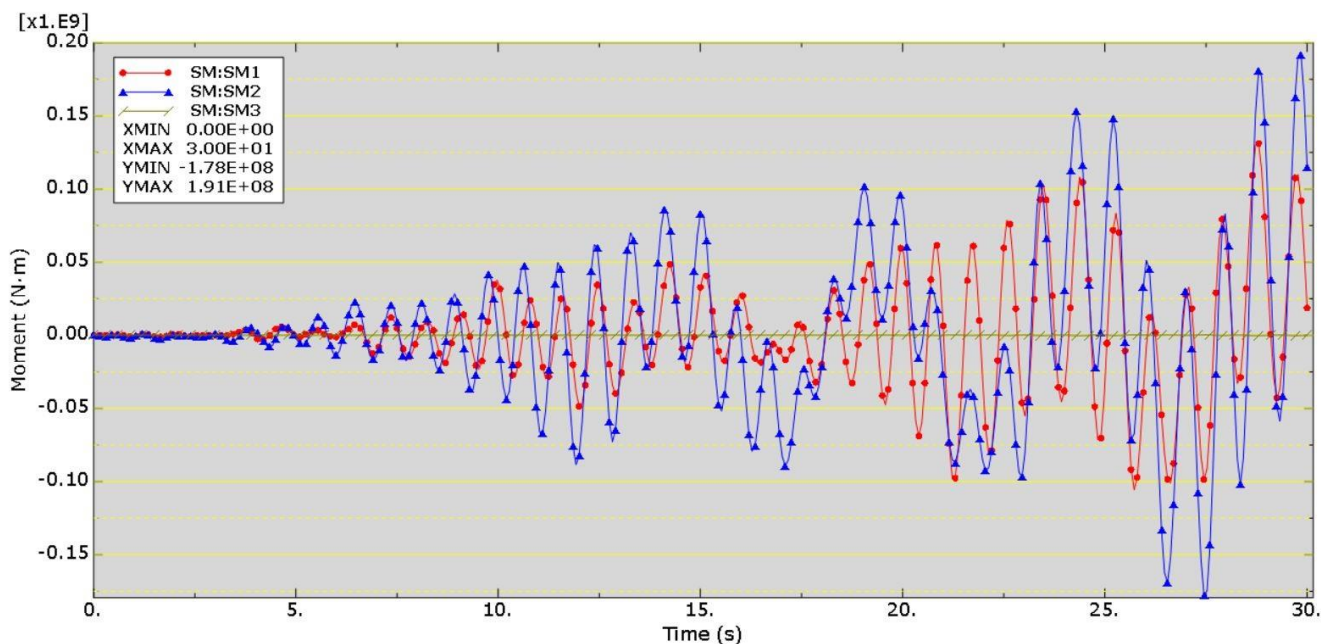
## ۵- نتایج مدل‌سازی عددی

برای دو حالت بارگذاری با و بدون تأثیر مؤلفه قائم شتاب زلزله و برای ۷ زلزله که در هر یک ۶ هندسه مختلف از شرایط مخزن و آب قرار گرفته مطابق جدول ۲ مدل‌سازی و در مجموع ۱۲۶ تحلیل با شرایط مختلف انجام گرفته است که به ازای هر تحلیل انجام گرفته مقادیر حداکثر ارتفاع موج تلاطم و لنگر ایجاد شده در محل اتصال شفت مخزن به پی محاسبه و در جدول ۴ درج گردیده است. به‌منظور استخراج نتایج تغییرات ارتفاع موج تلاطم، ۸ نقطه بر روی سطح سیال مدل‌سازی شده در نرم‌افزار آباکوس مطابق شکل ۱۳ در نظر گرفته و اندازه‌گیری‌ها در آن نقاط انجام پذیرفت. نامگذاری هر نقطه به صورت خودکار توسط نرم‌افزار انجام گرفته است.

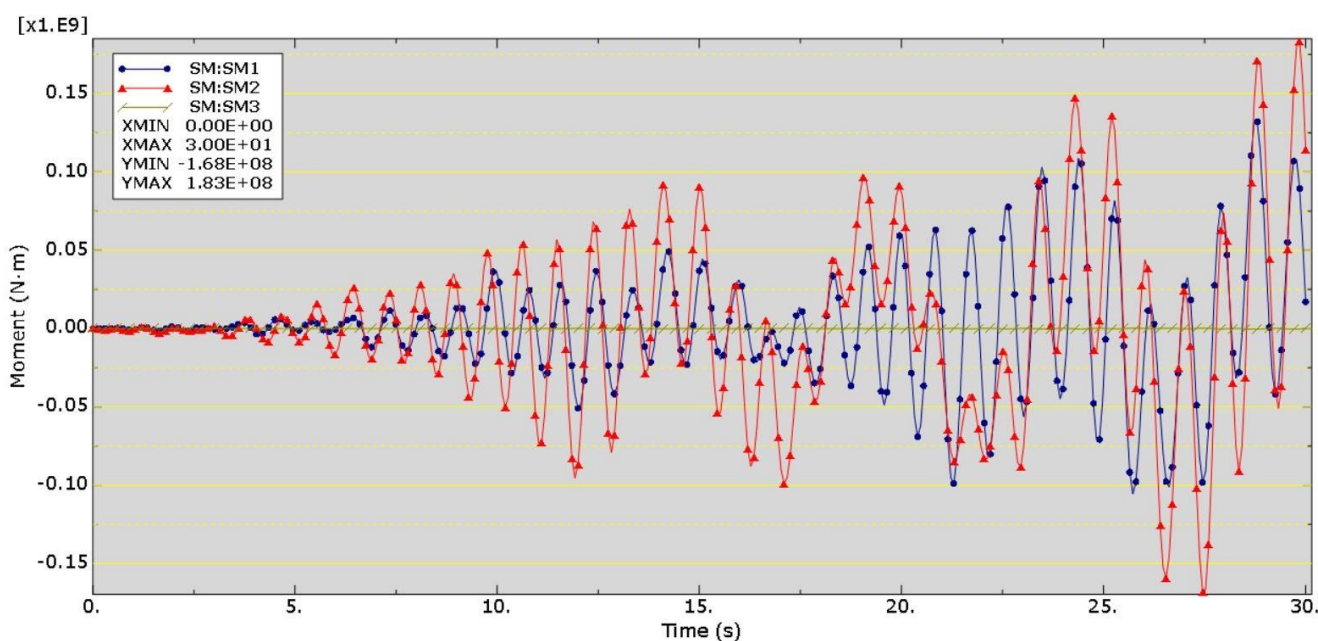


شکل ۱۳: محل نقاط مشخص شده بر روی سطح سیال شبیه‌سازی شده به منظور اندازه‌گیری ارتفاع موج تلاطم

شکل‌های ۱۴ و ۱۵ یک نمونه از نمودارهای استخراج شده از خروجی نرم‌افزار آباکوس می‌باشند. شکل ۱۴ نمودار لنگرهای ایجاد شده در پایه مخزن را نمایش می‌دهد که دارای ۳ منحنی متفاوت می‌باشد. هر یک از این منحنی‌ها لنگر ایجاد شده در یکی از ۳ راستای محورهای مختصات منطبق با شفت مخزن بر حسب  $N.m$  را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است منحنی‌هایی که در شکل ۱۴-الف و ۱۴-ب به صورت خط تقریباً صاف ترسیم شده‌اند (SM3) مربوط به مقدار لنگر در راستای محور طولی (Z) پایه مخزن بوده و بیانگر این نکته می‌باشند که مقدار ممان در این راستا بسیار کم و نزدیک به صفر می‌باشد و به اصطلاح پایه مخزن دچار پیچش قابل توجه نگردیده است. همچنین منحنی‌های (SM1) و (SM2) مربوط به مقادیر تاریخچه زمانی لنگر حول محورهای افقی (X و Y) پایه مخزن می‌باشند. برای مثال، بر اساس شکل ۱۴ و شرایط ذکر شده در توضیحات آن، مشخص است که بر اثر اعمال مولفه قائم زلزله، حداکثر مقدار ثبت شده در تاریخچه زمانی لنگر پایه مخزن، از  $1/83e8$  نیوتن متر به مقدار  $1/91e8$  نیوتن متر (۴/۲ درصد) افزایش پیدا کرده است. مثال اشاره شده فوق (به صورت ذکر مقادیر) در ردیف اول جدول ۴ که به صورت حروف ضخیم نسبت به سایر ردیف‌ها متمایز گردیده نیز قابل مشاهده می‌باشد.



الف- با اعمال مؤلفه قائم زلزله

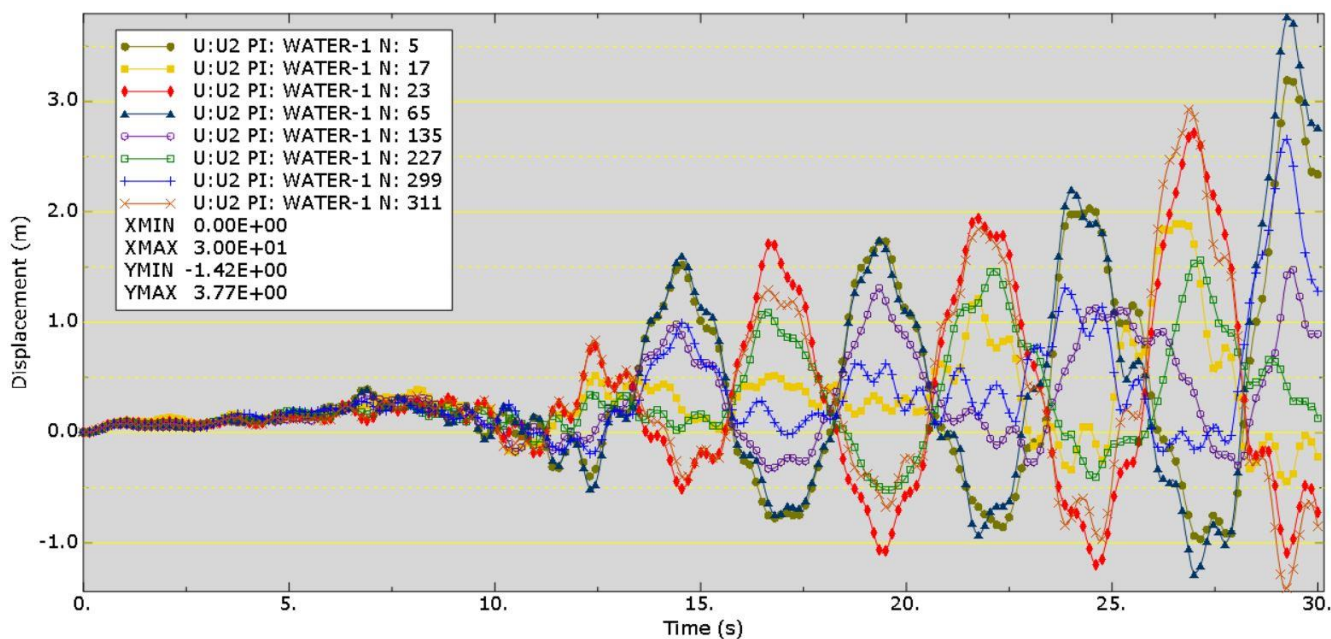


ب- بدون اعمال مؤلفه قائم زلزله

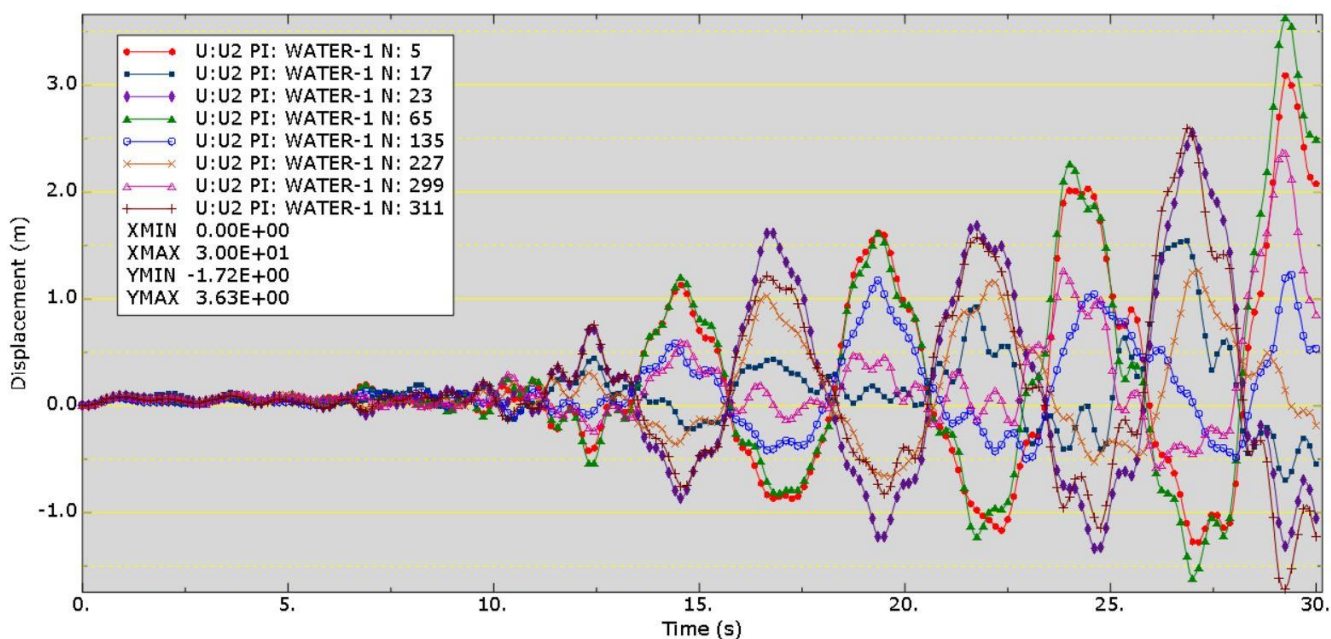
شکل ۱۴: یک نمونه از نمودار تغییرات ممان ایجاد شده در پایه شفت مخزن مربوط به زلزله چی چی ( $H_w/H_t=0.5$ ,  $r/H_t=0.5$ )

شکل ۱۵ نمودار ارتفاع موج تلاطم سیال برحسب متر در طول زمان برحسب ثانیه را نشان میدهد. این نمودار دارای ۸ منحنی متفاوت بوده که هر منحنی با توجه راهنمای درج شده در کنار نمودار، مربوط به یکی از نقاط در نظر گرفته شده بر روی سطح سیال مشخص شده در شکل ۱۳ می باشد. همانطور که در شکل ۱۵ مشاهده می گردد، بر اثر اعمال مؤلفه قائم زلزله، حداکثر مقدار ثابت شده در تاریخچه زمانی ارتفاع موج اسلاشینگ، از  $3/63$  متر به مقدار  $3/77$  متر ( $3/9$  درصد) افزایش پیدا کرده است. این مورد نیز در ردیف اول جدول ۴ که به صورت پررنگ متمایز گردیده، قابل مشاهده می باشد.





الف- با اعمال مؤلفه قائم زلزله



ب- بدون اعمال مؤلفه قائم زلزله

شکل ۱۵: یک نمونه از نمودار تغییرات ارتفاع موج تلاطم سیال شبیه سازی شده مربوط به زلزله چی چی ( $H_w/H_t=0.5$ ,  $r/H_t=0.5$ )

با توجه به محدودیت فضا، نمایش سایر نتایج مشابه با شکل های ۱۴ و ۱۵ در این مقاله مقدور نبوده ولی خلاصه مقادیر حداکثر برای ممان پایه و ارتفاع موج اسلاشینگ در تمامی حالت های تحلیل، در جدول ۴ به نمایش درآمده است.

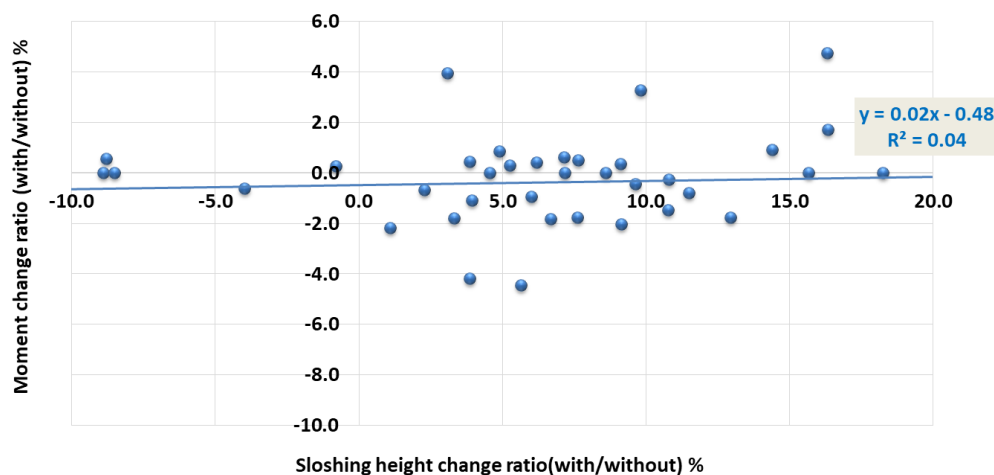
جدول ۴: نتایج تحلیل عددی استخراج شده از آباکوس

|                           | حداکثر ارتفاع<br>تلاطم (متر)<br>با مولفه قائم | حداکثر ارتفاع<br>تلاطم (متر)<br>بدون مولفه قائم | نسبت تلاطم<br>% (با/بدون) | حداکثر ممان<br>(نیوتن متر)<br>با مولفه قائم | حداکثر ممان<br>(نیوتن متر)<br>بدون مولفه قائم | نسبت ممان<br>% (با/بدون) |
|---------------------------|---|---|---------------------------|---|---|--------------------------|
| $r/Ht=0.5$ & $Hw/Ht=0.5$  |   |   |                           |   |   |                          |
| Chi-Chi                   | ۳/۷۷  | ۳/۶۳  | ۳/۹                       | ۱/۹۱E+۸                                     | ۱/۸۳E+۸                                       | ۴/۲                      |
| Imp.val.#1                | ۰/۵۴  | ۰/۵۲  | ۳/۸                       | ۴/۳۶E+۷                                     | ۴/۳۴E+۷                                       | ۰/۵                      |
| Imp.val.#5                | ۲/۲۵  | ۲/۱۳  | ۵/۶                       | ۱/۹۴E+۸                                     | ۲/۰۳E+۸                                       | -۴/۴                     |
| Kobe                      | ۱/۹۷  | ۲/۱۶  | -۸/۸                      | ۱/۸۰E+۸                                     | ۱/۷۹E+۸                                       | ۰/۶                      |
| Manjil                    | ۰/۹۶  | ۱/۰۰  | -۴/۰                      | ۱/۶۶E+۸                                     | ۱/۶۷E+۸                                       | -۰/۶                     |
| Northridge                | ۲/۰۱  | ۱/۷۰  | ۱۸/۲                      | ۲/۸۴E+۸                                     | ۲/۸۴E+۸                                       | ۰/۰                      |
| Tabas                     | ۷/۹۹  | ۶/۸۷  | ۱۶/۳                      | ۴/۴۲E+۸                                     | ۴/۲۲E+۸                                       | ۴/۷                      |
| $r/Ht=0.5$ & $Hw/Ht=0.7$  |   |   |                           |   |   |                          |
| Chi-Chi                   | ۵/۷۹  | ۴/۱۹  | ۳۸/۲                      | ۲/۴۷E+۸                                     | ۲/۴۰E+۸                                       | ۲/۹                      |
| Imp.val.#1                | ۰/۷۲  | ۰/۹۹  | -۲۷/۳                     | ۳/۶۹E+۷                                     | ۳/۶۷E+۷                                       | ۰/۵                      |
| Imp.val.#5                | ۳/۳۰  | ۲/۹۶  | ۱۱/۵                      | ۲/۵۶E+۸                                     | ۲/۵۸E+۸                                       | -۰/۸                     |
| Kobe                      | ۵/۸۳  | ۷/۱۱  | -۱۸/۰                     | ۵/۳۸E+۸                                     | ۵/۳۵E+۸                                       | ۰/۶                      |
| Manjil                    | ۱/۸۷  | ۱/۸۵  | ۱/۱                       | ۲/۲۶E+۸                                     | ۲/۳۱E+۸                                       | -۲/۲                     |
| Northridge                | ۲/۶۶  | ۲/۳۰  | ۱۵/۷                      | ۳/۰۰E+۸                                     | ۳/۰۰E+۸                                       | ۰/۰                      |
| Tabas                     | ۹/۸۰  | ۹/۴۳  | ۳/۹                       | ۵/۴۳E+۸                                     | ۵/۴۹E+۸                                       | -۱/۱                     |
| $r/Ht=0.5$ & $Hw/Ht=1.0$  |   |   |                           |   |   |                          |
| Chi-Chi                   | N/A*  | N/A   | N/A                       | ۳/۰۱E+۸                                     | ۴/۰۶E+۸                                       | -۲۵/۹                    |
| Imp.val.#1                | N/A   | N/A   | N/A                       | ۹/۵۲E+۷                                     | ۹/۲۸E+۷                                       | ۲/۶                      |
| Imp.val.#5                | N/A   | N/A   | N/A                       | ۶/۸۵E+۸                                     | ۶/۹۹E+۸                                       | -۲/۰                     |
| Kobe                      | N/A   | N/A   | N/A                       | ۷/۵۷E+۸                                     | ۷/۹۵E+۸                                       | -۴/۸                     |
| Manjil                    | N/A   | N/A   | N/A                       | ۵/۷۴E+۸                                     | ۶/۹۱E+۸                                       | -۱۶/۹                    |
| Northridge                | N/A   | N/A   | N/A                       | ۹/۰۳E+۸                                     | ۹/۲۰E+۸                                       | -۱/۸                     |
| Tabas                     | N/A   | N/A   | N/A                       | ۸/۳۶E+۸                                     | ۸/۵۶E+۸                                       | -۲/۳                     |
| $r/Ht=0.33$ & $Hw/Ht=0.5$ |   |   |                           |   |   |                          |
| Chi-Chi                   | ۳/۱۸  | ۲/۷۸  | ۱۴/۴                      | ۱/۰۸E+۸                                     | ۱/۰۷E+۸                                       | ۰/۹                      |
| Imp.val.#1                | ۰/۴۶  | ۰/۴۴  | ۴/۵                       | ۳/۸۳E+۷                                     | ۳/۸۳E+۷                                       | ۰/۰                      |
| Imp.val.#5                | ۳/۶۷  | ۳/۴۱  | ۷/۶                       | ۱/۹۵E+۸                                     | ۱/۹۴E+۸                                       | ۰/۵                      |
| Kobe                      | ۵/۶۹  | ۵/۳۴  | ۸/۶                       | ۲/۴۷E+۸                                     | ۲/۴۷E+۸                                       | ۰/۰                      |
| Manjil                    | ۱/۰۶  | ۱/۰۰  | ۶/۰                       | ۱/۰۵E+۸                                     | ۱/۰۶E+۸                                       | -۰/۹                     |
| Northridge                | ۵/۰۲  | ۴/۷۷  | ۵/۲                       | ۳/۴۶E+۸                                     | ۳/۴۵E+۸                                       | ۰/۳                      |
| Tabas                     | ۷/۳۳  | ۶/۴۹  | ۱۲/۹                      | ۳/۳۵E+۸                                     | ۳/۴۱E+۸                                       | -۱/۸                     |
| $r/Ht=0.33$ & $Hw/Ht=0.7$ |   |   |                           |   |   |                          |
| Chi-Chi                   | ۴/۰۸  | ۳/۸۹  | ۴/۹                       | ۱/۱۷E+۸                                     | ۱/۱۶E+۸                                       | ۰/۹                      |
| Imp.val.#1                | ۰/۵۷  | ۰/۵۲  | ۹/۶                       | ۲/۳۶E+۷                                     | ۲/۳۷E+۷                                       | -۰/۴                     |
| Imp.val.#5                | ۴/۳۳  | ۴/۰۴  | ۷/۲                       | ۱/۰۹E+۸                                     | ۱/۰۹E+۸                                       | ۰/۰                      |
| Kobe                      | ۶/۱۱  | ۶/۱۶  | -۰/۸                      | ۳/۶۴E+۸                                     | ۳/۶۳E+۸                                       | ۰/۳                      |
| Manjil                    | ۱/۸۰  | ۱/۷۶  | ۲/۳                       | ۱/۴۹E+۸                                     | ۱/۵۰E+۸                                       | -۰/۷                     |
| Northridge                | ۴/۱۰  | ۳/۸۱  | ۷/۶                       | ۱/۶۸E+۸                                     | ۱/۷۱E+۸                                       | -۱/۸                     |
| Tabas                     | ۵/۹۷  | ۵/۴۷  | ۹/۱                       | ۱/۹۴E+۸                                     | ۱/۹۸E+۸                                       | -۲/۰                     |
| $r/Ht=0.33$ & $Hw/Ht=1.0$ |   |   |                           |   |   |                          |
| Chi-Chi                   | N/A   | N/A   | N/A                       | ۱/۶۷E+۸                                     | ۱/۸۲E+۸                                       | -۸/۲                     |
| Imp.val.#1                | N/A   | N/A   | N/A                       | ۴/۲۴E+۷                                     | ۴/۲۱E+۷                                       | ۰/۷                      |
| Imp.val.#5                | N/A   | N/A   | N/A                       | ۳/۳۵E+۸                                     | ۳/۳۱E+۸                                       | ۱/۲                      |
| Kobe                      | N/A   | N/A   | N/A                       | ۴/۰۴E+۸                                     | ۴/۰۵E+۸                                       | -۰/۲                     |

|                        |      |      |       |         |         |      |
|------------------------|------|------|-------|---------|---------|------|
| Manjil                 | N/A  | N/A  | N/A   | ۳/۱۲E+۸ | ۳/۱۶E+۸ | -۱/۳ |
| Northridge             | N/A  | N/A  | N/A   | ۳/۹۸E+۸ | ۴/۰۱E+۸ | -۰/۷ |
| Tabas                  | N/A  | N/A  | N/A   | ۴/۲۴E+۸ | ۳/۹۰E+۸ | ۸/۷  |
| r/Ht= ۰/۲ & Hw/Ht= ۰/۵ |      |      |       |         |         |      |
| Chi-Chi                | ۲/۳۶ | ۲/۱۳ | ۱۰/۸  | ۳/۹۳E+۷ | ۳/۹۴E+۷ | -۰/۳ |
| Imp.val.#1             | ۰/۳۰ | ۰/۲۸ | ۷/۱   | ۱/۵۸E+۷ | ۱/۵۷E+۷ | ۰/۶  |
| Imp.val.#5             | ۴/۴۶ | ۴/۲۰ | ۶/۲   | ۷/۲۳E+۷ | ۷/۲۰E+۷ | ۰/۴  |
| Kobe                   | ۳/۸۷ | ۴/۲۳ | -۸/۵  | ۱/۱۶E+۸ | ۱/۱۶E+۸ | ۰/۰  |
| Manjil                 | ۲/۵۰ | ۲/۴۲ | ۳/۳   | ۴/۹۴E+۷ | ۵/۰۳E+۷ | -۱/۸ |
| Northridge             | ۶/۱۸ | ۵/۵۸ | ۱۰/۸  | ۱/۳۵E+۸ | ۱/۳۷E+۸ | -۱/۵ |
| Tabas                  | ۵/۳۵ | ۴/۳۹ | ۲۱/۹  | ۸/۹۹E+۷ | ۹/۸۸E+۷ | -۹/۰ |
| r/Ht= ۰/۲ & Hw/Ht= ۰/۷ |      |      |       |         |         |      |
| Chi-Chi                | ۲/۹۲ | ۲/۵۱ | ۱۶/۳  | ۵/۹۶E+۷ | ۵/۸۶E+۷ | ۱/۷  |
| Imp.val.#1             | ۰/۳۲ | ۰/۳۰ | ۶/۷   | ۱/۰۸E+۷ | ۱/۱۰E+۷ | -۱/۸ |
| Imp.val.#5             | ۳/۴۷ | ۳/۱۸ | ۹/۱   | ۵/۶۹E+۷ | ۵/۶۷E+۷ | ۰/۴  |
| Kobe                   | ۷/۰۵ | ۷/۷۴ | -۸/۹  | ۱/۵۷E+۸ | ۱/۵۷E+۸ | ۰/۰  |
| Manjil                 | ۱/۷۷ | ۲/۰۹ | -۱۵/۳ | ۷/۴۳E+۷ | ۷/۶۳E+۷ | -۲/۶ |
| Northridge             | ۵/۰۴ | ۴/۵۹ | ۹/۸   | ۷/۸۹E+۷ | ۷/۶۴E+۷ | ۳/۳  |
| Tabas                  | ۵/۰۳ | ۴/۸۸ | ۳/۱   | ۱/۰۵E+۸ | ۱/۰۱E+۸ | ۴/۰  |
| r/Ht= ۰/۲ & Hw/Ht= ۱/۰ |      |      |       |         |         |      |
| Chi-Chi                | N/A  | N/A  | N/A   | ۸/۶۶E+۷ | ۹/۳۲E+۷ | -۷/۱ |
| Imp.val.#1             | N/A  | N/A  | N/A   | ۲/۸۱E+۷ | ۲/۹۶E+۷ | -۵/۱ |
| Imp.val.#5             | N/A  | N/A  | N/A   | ۱/۲۰E+۸ | ۱/۱۹E+۸ | ۰/۸  |
| Kobe                   | N/A  | N/A  | N/A   | ۱/۹۲E+۸ | ۱/۹۲E+۸ | ۰/۰  |
| Manjil                 | N/A  | N/A  | N/A   | ۱/۵۲E+۸ | ۱/۵۴E+۸ | -۱/۳ |
| Northridge             | N/A  | N/A  | N/A   | ۱/۸۲E+۸ | ۱/۸۳E+۸ | -۰/۵ |
| Tabas                  | N/A  | N/A  | N/A   | ۱/۸۱E+۸ | ۱/۸۹E+۸ | -۴/۲ |

\* (N/A) به این معنی است که برای حالت‌های مخزن پر ( $Hw/Ht=1$ ) تلاطم وجود نداشته و ارتفاع موج تلاطم متصور نمی باشد.

همانطور که از نتایج استخراج شده از تحلیل عددی درج شده در جدول ۴ مشخص است، تأثیر مؤلفه قائم زلزله بر روی مقادیر حداکثر ارتفاع موج تلاطم و لنگرهای ایجاد شده در پایه مخزن از روند ثابت و مشخصی پیروی نمی کند که در شکل ۱۶ به روشنی قابل مشاهده می باشد. یکی از مهمترین و اصلی ترین دلایل آن تفاوت در مشخصات ذاتی هر زلزله می باشد. به بیان دیگر، اشاره به این واقعیت دارد که در طبیعت، هیچ زلزله‌ای دقیقاً مانند زلزله دیگر اتفاق نمی افتد و هر زلزله دارای ماهیت کاملاً مشخص و متفاوت نسبت به سایر زلزله‌ها می باشد. از جمله این مشخصات منحصر به فرد می توان به ماهیت فرکانسی و فرکانس غالب هر زلزله اشاره نمود. این تفاوت باعث می شود تا با توجه به هندسه و سختی متفاوت در هر سازه، پاسخ دینامیکی سازه در هر زلزله به صورت متفاوت نمایان گردد.



شکل ۱۶: تغییرات نسبت حداکثر ممان پایه بر مبنای تغییرات نسبت حداکثر ارتفاع موج تلاطم (براساس جدول ۴)

شکل ۱۶ نشان دهنده تغییرات "نسبت حداکثر ممان" پایه (با اعمال مولفه قائم/بدون اعمال مولفه قائم) بر مبنای تغییرات "نسبت حداکثر ارتفاع" موج تلاطم (با اعمال مولفه قائم/بدون اعمال مولفه قائم) بر اساس اطلاعات استخراج شده از جدول ۴ (ستون ۱۷ نسبت به ستون ۱۴) می باشد. همانطور که در این شکل دیده می شود، بهترین خط برازش برای نقاط موجود رسم شده است و مقدار ضریب همبستگی آن به میزان ۰/۰۴ محاسبه و در شکل درج گردیده که بیانگر همبستگی بسیار کم نقاط می باشد که همانگونه که در بالا به آن اشاره گردید، علت آن اساساً به خاطر ماهیت تصادفی بار دینامیکی هر زلزله می باشد که در نهایت منجر به پاسخ دینامیکی متفاوت در هر حالت از تحلیل شده است. ولی در عین حال و با توجه به نتایج جدول ۴، افزایش ۸/۷٪ حداکثر ممان پایه که بر اثر اعمال مولفه قائم زلزله رخ داده است قابل توجه بوده و در زمان طراحی باید مدنظر قرار گیرد.

با گزینش هدفمند رکوردهای مختلف زلزله‌های واقعی در این تحقیق شامل رکوردهای حوزه دور از قبیل زلزله‌های Chi-Chi و Imp.val.#5 و رکوردهای زلزله حوزه نزدیک مانند Kobe و Tabas، تلاش گردیده تا طیف های مختلف زلزله با رفتارهای لرزه‌ای و محتوای فرکانسی مختلف جهت ایجاد شرایط متفاوت تحلیل دینامیکی در نظر گرفته شود. همچنین با توجه به تاکید این پژوهش بر تاثیر مولفه قائم، سعی بر آن شده تا با توجه به جدول ۳، در انتخاب رکوردهای زلزله، از طیف‌های متفاوتی از شتاب قائم حداکثر (Ver. PGA)، از مقادیر کم مانند رکوردهای زلزله‌های Chi-Chi و Imp.val.#5 تا مقادیر بسیار قابل توجه نظیر رکورد زلزله Northridge بکار گرفته شود. با توجه به توضیحات فوق و دقت در نتایج مندرج در جدول ۴ می توان بیان نمود که بیشترین مقدار افزایش حداکثر لنگر پایه در هر دو حالت پر و نیمه پر مربوط به رکورد زلزله Tabas با بیشترین مقدار حداکثر شتاب افقی زمین (Hor. PGA) در بین بقیه رکوردها می باشد. همچنین رکورد این زلزله بالاترین مقدار حداکثر شتاب قائم زمین (Ver. PGA) بعد از زلزله Northridge را دارا می باشد. همانطور که مشخص است با توجه به فاصله شتاب‌نگار این زمین‌لرزه که در جدول ۳ مشخص گردیده است، این زلزله از نوع حوزه نزدیک بوده و بیانگر این موضوع می باشد که در زلزله‌های حوزه نزدیک تاثیر مولفه قائم در افزایش لنگر پایه بیشتر از زلزله‌های حوزه دور می باشد. از طرفی بیشترین مقدار افزایش حداکثر ارتفاع موج تلاطم مربوط به زلزله Chi-Chi با کمترین مقدار حداکثر شتاب افقی زمین (Hor. PGA) در بین بقیه رکوردها می باشد. همچنین رکورد این زلزله کمترین مقدار حداکثر شتاب قائم زمین (Ver. PGA) بعد از رکورد زلزله Imp.val.#1 را نیز دارا می باشد. با توجه به فاصله شتاب‌نگار این زمین‌لرزه که در جدول ۳ مشخص گردیده است، این زلزله از نوع حوزه دور می باشد و نشان دهنده تاثیر بیشتر مولفه قائم زلزله در تشدید پدیده تلاطم در اینگونه زلزله‌هاست.

## ۶- بحث و نتیجه گیری

هدف از این تحقیق پیدا نمودن تغییرات لنگرهای اضافی بوجود آمده در پایه مخازن هوایی حاوی سیال بر اثر پدیده P-delta است که به واسطه‌ی عدم تقارن وزنی ایجاد شده حاصل از تلاطم سیال در ترکیب با مولفه قائم زلزله پدید آمده است. نتیجه گیری‌های تحقیق به صورت خلاصه در زیر بیان شده است:

(۱) بر اساس نتایج بدست آمده از تحلیل عددی اجزای محدود، با اعمال مؤلفه قائم زلزله، مقدار حداکثر ارتفاع موج تلاطم تا ۳۸٪ و لنگر ایجاد شده در پایه تا ۹٪ افزایش را نسبت به نتایج تحلیل بدون در نظر گرفتن مؤلفه قائم زلزله نشان می دهد. این امر بیانگر تاثیر قابل توجه مولفه قائم زلزله بر روی نتایج تحلیل و ضرورت در نظر گرفتن این پارامتر در محاسبات و طراحی مخازن هوایی حاوی سیال می باشد.

(۲) مشاهده گردید که با افزایش "نسبت حداکثر ارتفاع" موج تلاطم، مقادیر "نسبت حداکثر لنگر" پایه از روند مشخصی پیروی نمی کنند که علت آن می تواند به خاطر ماهیت تصادفی بار دینامیکی هر زلزله نسبت به سایر زلزله‌ها می باشد که نهایتاً منجر به پاسخ دینامیکی متفاوت در هر حالت از تحلیل شده است.

در پایان ذکر این نکته ضروری است که این پژوهش فقط محدود به مخازن مخروطی با مقطع استوانه‌ای انجام پذیرفته و لذا برای بدست آوردن نتایج جامع تر نیاز به بررسی مخازن با سایر هندسه‌ها از قبیل مخازن مکعبی، کروی و دیگر اشکال متداول می باشد.

## منابع و مراجع

- [1] Westergaard, H.M. (1933). Water Pressure on Dams during Earthquakes. *Transaction American Society of Civil Engineering*, 98.
- [2] Housner, G.W. (1957). Dynamic Pressure on Accelerated Fluid Containers. *Bulletin of the Seismological Society of American*, 47, 15-37.
- [3] Singhal, A.C. (1991). Comparison of Computer Code for Seismic Analysis of Dams. *Computers and Structures*, 38, 107-112.
- [4] Mays J.R., & Roehm, L.H. (1991). Hydrodynamic Pressure in a Dam Reservoir System. *Computers and Structures*, 40, 281-291.
- [5] Yang, J. (1976). *Dynamic Behavior of Fluid-Tank System*. Ph.D. Thesis, Civil Engineering, Rice University Houston, Texas.
- [6] Haroun, M.A., & Housner, G.W. (1981). Seismic Design of Liquid Storage Tanks. *Journal of the Technical Councils of ASCE*, 191-207.
- [7] Park, J.H., Koh, H.M., & Kim, J. (1990). Liquid-Structure Interaction Analysis by Coupled Boundary Element-Finite Element Method in Time Domain. *Proceedings of the 7th International Conference on Boundary Element Technology*, Southampton, England, 89-92.
- [8] Kim, J., & Koh, K.I. (1996). Dynamic Response of Rectangular Flexible Fluid Containers. *Journal of Eng. Mechanics, ASCE*, 122(9), 807-816.
- [9] Ghaemmaghami, A.R., & Kianoush, M.R. (2010). Effect of Wall Flexibility on Dynamic Response of Concrete Rectangular Liquid Storage Tanks under Horizontal and Vertical Ground Motions. *Journal of Structural Engineering*, 136(4).
- [10] Kianoush, M.R., Mirzabozorg, H., & Ghaemian, M. (2006). Dynamic Analysis of Rectangular Liquid Containers in Three-Dimensional Space. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 33, 501-507.
- [11] Chen, J.Z., & Kianoush, M.R. (2005). Seismic Response of Concrete Rectangular Tanks for Liquid Containing Structures. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 32, 739-752.
- [12] Ibrahim, AR. (2005). *Liquid Sloshing Dynamics, Theory and Applications*. Wayne State University, Michigan: Department of Mechanical Engineering, Cambridge University Press.
- [13] Souto-Iglesias, A., Delorme L., Perez-Rojas L., & Abril-Perez S. (2006). Liquid Moment Amplitude Assessment in Sloshing Type Problems with Smooth Particle Hydrodynamics. *Ocean Engineering*, 33, 1462-1484.
- [14] Akyildiz, H., & Unal, NE. (2006). Sloshing in a Three-Dimensional Rectangular Tank: Numerical Simulation and Experimental Validation. *Ocean Engineering*, 33, 2135-2149.
- [15] Saghi, H. (2016). The pressure distribution on the rectangular and trapezoidal storage tanks' perimeters due to liquid sloshing phenomenon. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 8(2), 153-168.
- [16] Saghi, H., & Lakzian, E. (2017). Optimization of the rectangular storage tanks for the sloshing phenomena based on the entropy generation minimization. *Energy*, 128, 564-574.
- [17] Saghi, H. (2018). Entropy generation minimization for the sloshing phenomenon in half-full elliptical storage tanks. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 491, 972-983.
- [18] Haroun, M.A. (1983). Vibration Studies and Test of Liquid Storage Tanks. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 11, 190-206.
- [19] Chantasiriwan, S. (2009). Modal Analysis of Free Vibration of Liquid in Rigid Container by the Method of Fundamental Solutions. *Engineering analysis with boundary elements*, 33(5), 726-730.
- [20] Godderidge, B., Turnock, S., Tan, M., & Earl, C. (2009). AN Investigation of Multiphase CFD Modeling of a Lateral Sloshing Tank. *Computers & Fluids*, 38, 183-93.
- [21] Sriram, V., Sannasiraj, S.A., & Sundar, V. (2006). Numerical Simulation of 2D Sloshing Waves Due to Horizontal and Vertical Random Excitation. *Apple Ocean Res*, 28, 19-32.
- [22] Chen, Y.G., Djidje, K., & Price, W.G. (2009). Numerical Simulation of Liquid Sloshing Phenomena in Partially Filled Containers. *Computers & Fluids*, 38, 830-842.
- [23] Kalyani, A.P., Panchal, V.R., & Soni, D.P. (2015). Seismic Response of Elevated Liquid Storage Steel Tanks Isolated by VCFPS at Top of Tower under Near-Fault Ground Motions. *International Journal of Emerging Trends in Electrical and Electronics*, 11(2).
- [24] Upadhyay, S., & Patel, C. (2016). Response of Elevated Water Tank subjected to near-fault and far-field earthquakes. *Multi-disciplinary Sustainable Engineering: Current and Future Trends: Proceedings of the 5th Nirma University International Conference on Engineering*, Ahmedabad: India, ISBN: 978-1-138-02845-6, 35-40.

- [25] Soleymani, K., & Hosseini, M. (2013). Effects of Near-Field Earthquakes on Elevated Cylindrical Water Tanks. Proceedings of the *Thirteenth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction (EASEC-13)*, Hokkaido: Japan, Hokkaido University, 1-4.
- [26] Rebouillat, S., & Liksonov D. (2010). Fluid-Structure Interaction in Partially Filled Liquid Containers: A Comparative Review of Numerical Approaches. *Computers & Fluids*, 39, 739-746.
- [27] Moslemi, M., Farzin, A., & Kianoush, M. R. (2019). Nonlinear sloshing response of liquid-filled rectangular concrete tanks under seismic excitation. *Engineering Structures*, 188, 564-577.
- [28] Hejazi, F. S. A., & Mohammadi, M. K. (2019). Investigation on sloshing response of water rectangular tanks under horizontal and vertical near-fault seismic excitations. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 116, 637-653.
- [29] Sweedan, A. M. I., & El Damatty, A. A. (2000). Shake table testing of conical tank models. In Proceeding of the *third structural specialty conference*, 177-84.
- [30] El Damatty, A. A., Saafan, M. S., & Sweedan, A. M. I. (2005). Dynamic characteristics of combined conical-cylindrical shells. *Thin-Walled Structures*, 43(9), 1380-1397.
- [31] El Damatty, A. A., Saafan, M. S., & Sweedan, A. M. I. (2005). Experimental study conducted on a liquid-filled combined conical tank model. *Thin-Walled Structures*, 43(9), 1398-1417.
- [32] ACI Committee 350, (2001), *Seismic Design of Liquid-Containing Concrete Structures (ACI 350.3-01) and Commentary (ACI 350.3R-01)*, Farmington Hills: American Concrete Institute.
- [33] Goudarzi, M. A., & Sabbagh-Yazdi, S. R. (2008). Evaluating 3D earthquake effects on sloshing wave height of liquid storage tanks using finite element method. *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, 10(3), 123-136.