

# The Effect of Near-Field Earthquakes on the Seismic Response of Rectangular Concrete Water Tanks, Considering the Flexibility of Walls

*Shayan Abizadeh*

*Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, Email: Shabizadeh@gmail.com*

**Mahmood Hosseini**

*Associate professor, Structural Engineering Research Center, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran, Iran, hosseini@iiees.ac.ir*

*Seyed Abbas Hosseini*

*Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, Email: abbas\_hoseyni@srbiau.ac.ir*

## Research paper

### Abstract

Constructing concrete water tanks to supply the water pressure needed in cities is inevitable. In Iran, many cities, including metropolises, are near active faults, and in some cases, the fault even passes through them; while the near-field earthquakes' effect on the seismic behavior of tanks has not been thoroughly investigated. Therefore, the effect of the vertical component of pulse-like and non-pulse-like near-fault earthquakes on the lateral hydrodynamic force acting on the tank's wall and the sloshing response of rectangular concrete tanks are numerically studied in this paper. The finite element method is used to model the tank and liquid, and the results of the numerical method employed in this study are compared and verified by the experimental results. Subsequently, eight seismic records derived from four near-field earthquakes are used for two and three-component seismic analyzes.

It is found that the maximum sloshing response occurring at the corner of the tank's wall can be higher than that of the middle of the tank's wall by up to 81.6 percent. In other words, the corner of the tank's wall is the critical point for the sloshing response in all cases studied in this paper. In addition, the vertical component of near-fault earthquakes has been indicated to have a negligible effect on the sloshing response while considering this component increases the hydrodynamic force acting on the concrete tank's wall by up to 58.2 percent. On the other hand, near-field pulse-like earthquakes may alter the dynamic force response in rectangular concrete tanks. This alteration can be seen in the force distribution pattern along the tank's wall, which changes under such ground motions.

**Keywords:** Rectangular Concrete Tanks, Near-Field Pulse-Like Earthquake, Sloshing, Hydrodynamic Force.

---

\*Corresponding Author: Mahmood Hosseini

Abizadeh, S., Hosseini, M., Hosseini, S. A. The Effect of Near-Field Earthquakes on the Seismic Response of Rectangular Concrete Water Tanks, Considering the Flexibility of Walls. *Journal of Concrete Structures and Materials*, 2022; 7(1): 238-263. <http://doi.org/10.30478/jcsm.2022.366836.1295>

2538-5828/ © 2021 The Authors. Published by Iranian Concrete Society

This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

# اثر زلزله‌های حوزه نزدیک بر پاسخ لرزه‌ای مخازن مستطیلی بتنی آب با در نظر گرفتن انعطاف‌پذیری دیوارها

شایان ابی زاده

دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

محمود حسینی

دانشیار پژوهشکده مهندسی سازه، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران  
(نویسنده مسئول)

سید عباس حسینی

استادیار گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

ساخت مخازن بتنی آب جهت تامین فشار آب مورد نیاز در شهرها اجتناب ناپذیر می‌باشد. از سوی دیگر بسیاری از شهرهای کشور، از جمله کلانشهرها، در نزدیکی گسل‌های فعال قرار دارند و چه بسا گسل از داخل شهر عبور کرده است. این در حالیست که هنوز اثر زلزله‌های حوزه نزدیک بر روی رفتار لرزه‌ای مخازن بطور کامل مورد مطالعه قرار نگرفته است. لذا در این مقاله اثر زلزله‌های حوزه نزدیک هم با پالس و هم بدون پالس بر نیروی هیدرودینامیکی ای‌جاد شده بر دیوار مخازن بتنی مستطیلی و نیز تلاطم سیال با در نظر گرفتن اندرکنش دیواره‌های مخزن بتنی به صورت عددی مورد مطالعه قرار گرفته است. به منظور مدل‌سازی مخزن و مایع از روش اجزای محدود استفاده شده و نتایج بدست آمده از روش عددی مورد استفاده در این مطالعه با نتایج آزمایشگاهی مقایسه و صحت سنجی شده است. سپس از هشت رکورد لرزه‌ای برگرفته از چهار زلزله حوزه نزدیک به صورت دو و سه مولفه‌ای برای تحلیل‌های لرزه‌ای مخزن استفاده شده است. مطالعه حاضر نشان داد بیشینه تلاطم سطحی سیال در گوشه مخزن در مواردی تا  $81/6\%$  درصد بیشتر از بیشینه تلاطم سیال در وسط دیوار است. به عبارت دیگر گوشه مخزن محل بحرانی پاسخ نوسانات سطحی سیال نسبت به وسط دیوار در تمامی تحلیل‌ها بوده است. از سوی دیگر مولفه قائم زلزله‌های حوزه نزدیک نشان داده که اثر چندانی در پاسخ تلاطم سیال ندارد در حالی که در نظر گرفتن این مولفه،  $58/2\%$  درصد افزایش را در پاسخ نیروی دینامیکی ای‌جاد شده در مخازن بتنی نسبت به این پاسخ تحت زلزله دو مولفه‌ای (بدون مولفه قائم) نشان داده است. تحلیل لرزه‌ای این مخازن همچنین نشان داده که زلزله‌های حوزه نزدیک پالس‌گونه، می‌تواند باعث تغییر پاسخ نیروی دینامیکی در مخازن بتنی مستطیلی گردد. این تغییر پاسخ به گونه‌ای است که نحوه توزیع این نیرو در ارتفاع دیوار مخازن در مواردی تغییر کرده است.

کلمات کلیدی: مخازن بتنی مستطیلی، زلزله‌های حوزه نزدیک، پالس‌گونه، تلاطم، نیروی هیدرودینامیکی

## ۱. مقدمه

خرابی‌های به وجود آمده در مخازن نگهداری سیالات تحت زلزله‌های گذشته به وضوح اهمیت مطالعه سازه‌هایی که با سیال در اندرکنش هستند را نشان داده است. گزارش منتشر شده از خرابی مخازن نگهداری مایعات تحت زلزله-های امپریال ولی (۱۹۷۹)، نورثریچ (۱۹۹۴) و چی‌چی تایوان (۱۹۹۹) به خوبی اهمیت مطالعه رفتار لرزه‌ای مخازن و اندرکنش سیال و مخزن را نشان می‌دهد [۳،۲۰۱]. دانشمندان و محققان بسیاری در طول تاریخ به مطالعه رفتار این سازه به خصوص مخازن و اثر اندرکنش سازه و سیال در آن‌ها پرداخته و مدل‌ها و روش‌های مختلفی به منظور مدل‌سازی این سازه‌ها ارائه داده‌اند. هاوزنر در سال ۱۹۶۳ از جمله اولین دانشمندانی بود که یک مدل دینامیکی به جهت مدل‌سازی مخزن و سیال درون آن ارائه داد که همچنان اساس تحلیل و طراحی مخازن در بسیاری از آیین‌نامه‌ها است [۴].

مدل دو جرمی هاوزنر سیال درون مخزن را به دو بخش موج<sup>۱</sup> و سخت<sup>۲</sup> تقسیم‌بندی کرده به صورتی که بخش سخت همراه با دیوار مخزن حرکت کرده و بخش موج نماینده‌ی پاسخ نوسانات سطحی سیال است. با آن که در مدل‌سازی و تحلیل به این روش این دو بخش به صورت مجزا مورد مطالعه قرار می‌گیرند، رفتار هر یک می‌تواند اثر قابل توجهی بر دیگری داشته باشد. به عنوان مثال مطالعات کانگ و همکارانش در سال ۲۰۱۹ نشان داد که پاسخ تلاطم سیال به وجود آمده بر اثر زلزله می‌تواند به صورت قابل توجهی باعث افزایش پاسخ فشار هیدرودینامیکی در مخازن شود [۵]. از سوی دیگر مطالعات کوبایاشی و تامورا نشان دادند که این پاسخ (تلاطم سطح سیال) خود می‌تواند عامل انفجار و آتش‌سوزی در مخازن شود [۶]. همان‌طور که اشاره شد پاسخ جرم موج می‌تواند باعث خرابی‌های جبران‌ناپذیری گردد. در نتیجه در اثر مولفه‌های مختلف باید در مطالعه پاسخ این بخش مورد بررسی قرار بگیرد. انعطاف‌پذیری دیوار و درصد آب ذخیره شده در مخازن بتنی دو مورد از این مولفه‌ها است که توسط امید تبریزی و همکارانش در سال ۲۰۲۰ مورد مطالعه قرار گرفت. آن‌ها دریافتند که اگرچه انعطاف‌پذیری دیوار مخازن اثر قابل توجهی بر پاسخ این بخش ندارد، افزایش میزان ارتفاع آب ذخیره شده در مخزن باعث افزایش چشمگیر این پاسخ می‌گردد [۷]. کیو و همکارانش نیز در سال ۲۰۲۲ مطالعاتی را بر روی اثر ارتفاع سیال ذخیره شده بر پارامترهای مختلف پاسخ بخش موج انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که پارامترهای تلاطم هیدرودینامیک شامل نیرو و فشار ایجاد شده به وسیله‌ی بخش موج با افزایش ارتفاع سیال ذخیره شده افزایش می‌یابند [۸].

پاسخ بخش موج مخازن ذخیره بتنی با تمرکز بر اختلاف مدل‌سازی دو بعدی و سه بعدی توسط توکلی و همکارانش در سال ۲۰۱۲ مورد مطالعه قرار گرفت و نشان داد که مدل‌سازی سه بعدی مخزن بتنی و سیال می‌تواند تا ۴۰ درصد باعث افزایش پاسخ بخش موج در این مخازن در مقایسه با مدل‌سازی دو بعدی شود [۹]. مطالعات آکیلدیز و اونال<sup>۳</sup> در سال ۲۰۰۶ نشان داد که افزایش دامنه بار خارجی وارد بر این مخازن نه تنها باعث افزایش پاسخ فشار شده بلکه باعث می‌شود شدت اغتشاشات، پرش هیدرولیکی و شکست موج هم در پاسخ این بخش (بخش موج) شدت بگیرد [۱۰]. حجازی و خان محمدی در سال ۲۰۱۹ نیز نشان دادند که مولفه قائم زلزله‌های حوزه نزدیک اثر قابل توجهی بر پاسخ این بخش ندارد (کمتر از ۸ درصد) [۱۱].

از سوی دیگر، مطالعات بسیاری نیز بر روی پاسخ بخش سخت صورت گرفته است. راوات و همکارانش در سال ۲۰۱۵ نشان دادند که اثر مؤلفه قائم زلزله بر پاسخ این بخش به مراتب بیشتر از اثر آن بر مؤلفه‌ی موج است [۱۲].

<sup>1</sup> Convective Component

<sup>2</sup> Impulsive Component

<sup>3</sup> Akyildiz and Ünal

ورن و همکارانش در سال ۲۰۲۱ نشان دادند که در نظر گرفتن هر سه مؤلفه زلزله باعث افزایش چشمگیر تنش برشی به وجود آمده در مخازن می‌شود [۱۳].

مطالعات گذشته نشان داده که هرچه سازه مورد مطالعه به گسل نزدیک‌تر باشد، بیشتر متاثر از مؤلفه قائم زلزله می‌شود. در مورد مخازن نیز، مطالعاتی بر روی مخازن قرار گرفته تحت زلزله‌های حوزه نزدیک و دور صورت گرفته است. از جمله نتایج بدست آمده از این مطالعات می‌توان به اهمیت در نظر گرفتن هر سه جهت زلزله در زمان مطالعه‌ی رفتار مخازن و افزایش چشمگیر پاسخ بخش موج در مخازن قرار گرفته نزدیک گسل اشاره کرد [۱۴، ۱۵، ۱۶]. کالوگراکو<sup>۱</sup> و همکارانش نیز در سال ۲۰۱۷ بر روی اثر پالس زلزله‌های حوزه نزدیک بر روی پاسخ مخازن مطالعه کردند. مطالعات آن‌ها نشان داد که صرف نظر از موده‌های مرتبه بالاتر جرم موج می‌تواند باعث خطا در محاسبات پاسخ مخازن، به خصوص پاسخ حداکثر ارتفاع موج و برش پایه شود [۱۷]. ژو و همکارانش در سال ۲۰۲۰ مطالعاتی عددی و آزمایشگاهی بر روی یک مخزن تحت زلزله‌های حوزه نزدیک انجام دادند. مطالعات آن‌ها نشان داد که پاسخ تلاطم سطحی در مخازن ذخیره آب تحت زلزله‌های حوزه نزدیک و دوره تناوب بالا بیشتر از رکوردهای لرزه‌ای حوزه دور است [۱۸]. سامان باقری و حسین حیاتی راد در سال ۲۰۱۹ بر روی اثر پالس بر پاسخ مخازن ذخیره آب مطالعه کردند. آن‌ها دریافتند که پاسخ برش پایه و لنگر واژگونی بیشتر تحت تاثیر پیوند ضربانی با دامنه کوتاه بوده با آن که پاسخ تلاطم بیشتر متاثر از تحریکات پالس گونه با پیوند پالس بالا است [۱۹]. موضوع دیگری که در مطالعه سیستم مخزن و سیال اهمیت بسیار زیادی دارد روش مطالعه رفتار این سیستم است. در بین روش‌های عددی مورد استفاده جهت مطالعه سیستم مخزن و سیال، روش لاگرانژی-لاگرانژی یکی از روش‌هایی است که نشان داده می‌تواند به خوبی رفتار لرزه‌ای این سیستم را مدل‌سازی کند و به همین دلیل در بسیاری از مطالعات مورد استفاده قرار گرفته است [۱۳، ۲۰، ۲۱، ۲۲].

در این مقاله اثر مؤلفه قائم زلزله‌های حوزه نزدیک، با تمرکز بر وجود یا عدم وجود پالس، بر پاسخ لرزه‌ای مخازن نگهداری مایعات بتنی مستطیلی مورد مطالعه قرار گرفته است. با توجه به افزایش قابل توجه پاسخ‌های لرزه‌ای مخازن تحت زلزله‌های حوزه نزدیک، مطالعه اثر مؤلفه قائم و همچنین اثر زلزله‌های دارای پالس شدید بر پاسخ بخش هر دو بخش موج و سخت‌ضوری به نظر می‌رسد. به همین دلیل در این مقاله به اثر این مؤلفه زلزله و تاثیر زلزله‌های حوزه نزدیک با پالس اولیه بر پاسخ‌های لرزه‌ای مخازن پرداخته شده است. بدین منظور مخزن مستطیلی بتنی با ابعاد ۵×۱۴×۱۸ متر و با ارتفاع آب ذخیره شده‌ی ۴ متر به صورت عددی و با استفاده از روش لاگرانژی-لاگرانژی به روش اجزاء محدودی مدل‌سازی شده و تحت ۸ رکورد لرزه‌ای برگرفته از ۴ زلزله‌ی حوزه نزدیک که دو مورد از آن‌ها به صورت پالس گونه و دو مورد دیگر بدون پالس می‌باشند، قرار گرفته است. این چهار زلزله هم به صورت سه مؤلفه‌ای (دو مؤلفه افقی به همراه مؤلفه قائم) و هم به صورت دو مؤلفه‌ای (دو مؤلفه افقی) به مخزن وارد شده است.

## ۲. مدل‌سازی عددی سیستم مخزن و سیال

### ۲.۱. معادلات حاکم بر مدل‌سازی سیال در روش اجزاء محدود

در این مطالعه از مکانیسم لاگرانژی به منظور توصیف رفتار دینامیکی سیال استفاده شده که اساس آن بر پایه انرژی پتانسیل کل و انرژی جنبشی سیال است. در واقع انرژی کرنشی کل برابر با مجموع انرژی کرنشی و افزایش انرژی پتانسیل با در نظر گرفتن نوسانات سطحی سیال بوده که به صورت معادله‌ی ۱ تعریف می‌گردد:

$$U = \Pi_e + \Pi_s \quad (1)$$

<sup>1</sup> Kalogerakou

که در آن  $\Pi_\epsilon$  انرژی کرنشی و  $\Pi_s$  انرژی پتانسیل است. از طرف دیگر معادله‌ی انرژی جنبشی به صورت معادله ۲ تعریف می‌شود:

$$T = \frac{1}{2} \int \rho v^T v dv \quad (2)$$

در معادله‌ی ۲،  $v$  بردار سرعت است. معادله لاگرانژ که همان طور که در قسمت بالا گفته شد بر اساس انرژی جنبشی کل ( $U$ ) و انرژی جنبشی ( $T$ ) بوده به صورت معادله‌ی زیر تعریف می‌شود:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{u}_j} \right) - \frac{\partial T}{\partial u_j} + \frac{\partial U}{\partial u_j} = F_j \quad (3)$$

در معادله ۳،  $u_j$  بردار جابه‌جایی مؤلفه  $j$ ام و  $F_j$  نیروی خارجی می‌باشد.

در صورتی که ماتریس سختی اجزای<sup>۱</sup> سیال را برابر با  $K$  و ماتریس سختی اجزای سطحی سیال را برابر با  $S$  در نظر بگیریم و همچنین  $M$  را برابر با ماتریس جرم سیال در نظر بگیریم، روابط ۱ و ۲ را در روش اجزای محدود می‌توان به صورت روابط ۴ و ۵ بازنویسی کرد.

$$U = \Pi_\epsilon + \Pi_s = \frac{1}{2} u^T K u + \frac{1}{2} u_s^T S u_s \quad (4)$$

$$T = \frac{1}{2} v^T M v \quad (5)$$

در روابط بالا،  $u$ ،  $v$  به ترتیب بردارهای جابه‌جایی و سرعت هستند. با جایگذاری معادلات ۴ و ۵ در معادله لاگرانژ (رابطه ۳) معادله‌ی حاکم به صورت معادله زیر می‌شود:

$$M a + K u + S u_s = R \quad (6)$$

در معادله ۶،  $R$  بردار نیرو متغیر نسبت به زمان می‌باشد. معادلات بالا برای یک جزء بوده و در صورتی که بیش از یک جزء وجود داشته باشد باید از ماتریس‌های سختی و جرم که تک تک اجزاء در آن در نظر گرفته شده استفاده گردد.

## ۲.۲. مشخصات مدل سازی به روش اجزاء محدود

به منظور مدل‌سازی و تحلیل سیستم مخزن و سیال از روش اجزای محدود استفاده شده که به کمک نرم‌افزار ANSYS انجام گرفته است. اجزای مورد استفاده به منظور مدل‌سازی مخزن بتنی، اجزای هشت گرهی ایزوپارامتریک با سه درجه آزادی انتقالی در هر گره در راستاهای  $X$ ،  $Y$  و  $Z$  است که توسط نرم‌افزار به عنوان اجزای SOLID65 شناخته می‌شود. این اجزاء قادر هستند به خوبی رفتارهای خطی و غیرخطی مصالح جامد همانند بتن را مدل‌سازی کنند [۲۳]. به منظور مدل‌سازی سیال درون مخزن به روش لاگرانژی که در بخش قبل توضیح داده شد از اجزای هشت گره‌ای سیال با سه درجه آزادی انتقالی در هر گره استفاده شده است، که به نام اجزای FLUID80 در نرم‌افزار شناخته می‌شوند. این اجزاء به منظور مدل‌سازی سیالات محفوظ شده درون محفظه‌هایی که در آنها نرخ جریان وجود ندارد (جریانی به درون آنها وارد و یا از آنها خارج نمی‌شود) استفاده می‌شوند. این اجزاء مناسب جهت مدل‌سازی سیالات به منظور محاسبه فشار هیدرواستاتیک، اندرکنش سازه و سیال و نوسانات سطحی سیال می‌باشند [۲۴]. همچنین در تحلیل سیال از روش کاهش یافته<sup>۲</sup> استفاده شده است. در این روش به منظور محاسبه مقادیر ویژه<sup>۳</sup> و بردارهای ویژه<sup>۴</sup> از الگوریتم HBI<sup>۵</sup> استفاده می‌شود که می‌تواند به صورت قابل توجهی سرعت محاسبات را افزایش دهد. شکل ۱ اجزای مورد استفاده جهت مدل‌سازی سیال و مخزن را نشان می‌-

<sup>1</sup> Element

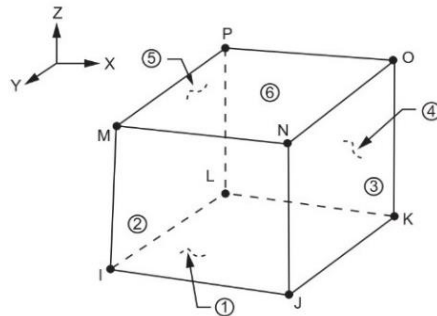
<sup>2</sup> Reduced method

<sup>3</sup> Eigenvalues

<sup>4</sup> Eigenvectors

<sup>5</sup> Householder-Bisection-Inverse iteration

دهد [۲۵]. در تعریف اندرکنش مخزن و سیال<sup>۱</sup>، تغییر مکان گرهی اجزای مخزن و سیال در محل اتصال به گونه‌ای تعریف شده که این دو نمی‌توانند از یکدیگر جدا شوند و در جهت عمود بر سطح با یکدیگر جابه‌جا می‌شوند.



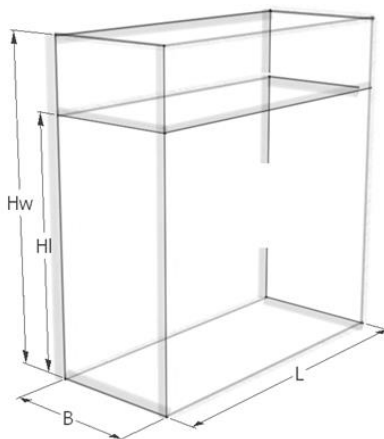
شکل ۱. هندسه اجزای مخزن بتنی و سیال در نرم افزار اجزاء محدود [۲۲].

### ۳. صحت سنجی<sup>۲</sup>

پیش از مطالعه رفتار مخازن لازم است که دقت روش مدل‌سازی و تحلیل که در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته مورد ارزیابی قرار گیرد. به این منظور یک مخزن مستطیلی که به صورت آزمایشگاهی توسط گودرزی و صباغ یزدی در سال ۲۰۱۲ مورد مطالعه قرار گرفته بود به صورت عددی و با استفاده از روش لاگرانژی-لاگرانژی مدل‌سازی شده و نتایج آن با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. شکل ۲ مدل آزمایشگاهی و شماتیک مخزن مستطیلی مذکور را نشان می‌دهد که اندازه آن برابر  $1 \times 0.4 \times 0.96$  متر به ترتیب طول، عرض و ارتفاع آن بوده که ارتفاع آب داخل آن برابر  $0.624$  متر می‌باشد که تحت یک بار هارمونیک سینوسی یک جهته به صورت رابطه ۷ قرار گرفته است [۲۶].

$$X(t) = D \sin(\omega t) \quad (7)$$

که در آن  $X(t)$  موج تحریک،  $D$  حداکثر جابه‌جایی افقی (که در اینجا برابر با ۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است) و  $\omega$  فرکانس نیروی افقی است که برابر با  $1/12$  برابر فرکانس طبیعی مود اول سیال در نظر گرفته شده است.



شکل ۲. مشخصات هندسی سیال و مخزن آزمایشگاهی مورد استفاده جهت صحت سنجی [۲۳].

مطالعات انجام شده توسط مولفان اول و دوم مقاله‌ی حاضر در سال‌های ۲۰۱۲ و ۲۰۱۳ نشان داده که با روشی مشابه آن چه در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته، در صورتی که دامنه سیال درون مخزن با اجزایی با مشخصات جدول ۱ جزءبندی شود می‌توان رفتار سیستم مخزن و سیال را با دقت قابل قبولی مدل‌سازی کرد. نتایج

<sup>1</sup> Fluid-Structure Interaction

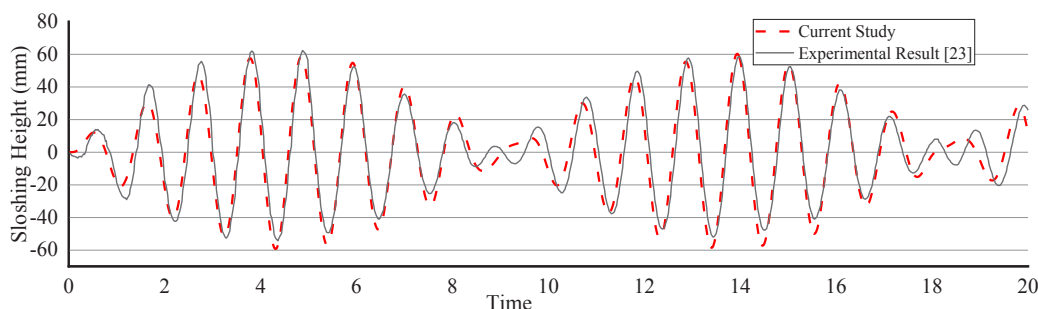
<sup>2</sup> Verification

تاریخچه زمانی تلاطم سیال تحریک هارمونیک سینوسی مخزن مدل‌سازی شده به صورت عددی که با اجزایی با نسبت ابعادی مختلف گسسته سازی شده و مقایسه نتایج بدست آمده از آن با نتایج آزمایشگاهی نشان داد که جزء-بندی‌هایی با نسبت ارتفاع به عرض بزرگتر از ۱ باعث تغییر فاز و کم تر شدن حداکثر تلاطم سطح آزاد سیال در روش عددی نسبت به روش آزمایشگاهی می‌شود؛ همین‌طور اجزایی با ابعاد بزرگ در روش عددی قادر به محاسبه مودهای بالاتر نمی‌باشند بنابراین جهت نیل به نتایج دقیق‌تر، دامنه اجزاء باید تا حدی کوچک شود تا بتوان مودهای بالاتر را نیز محاسبه و همین‌طور نتایج حداکثر تلاطم سیال را به نتایج آزمایشگاهی همگرا کرد [۲۸، ۲۷]. در نتیجه در مطالعات حاضر نیز به جهت صحت سنجی از اجزایی با مشخصات قید شده در جدول ۱ استفاده گردیده است.

جدول ۱. مشخصات هندسی اجزای استفاده شده به منظور گسسته سازی دامنه سیال [۲۵، ۲۴].

تعداد اجزاء			تعداد کل اجزای سیال	نوع اجزاء
در ارتفاع	در عرض	در طول		
۱۲	۸	۲۰	۱۹۲۰	اجزاء مکعب مستطیل ۸ گره‌ای

نتایج تاریخچه زمانی تلاطم سطح آزاد سیال مدل آزمایشگاهی [۲۳] و مدل روش اجزای محدود با مشخصات جزء بندی ذکر شده در جدول ۱ به منظور صحت سنجی روش مورد استفاده در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳. صحت سنجی مدل اجزای محدود با نتایج آزمایشگاهی مرجع [۲۳].

همان‌طور که در شکل ۳ مشخص است، مدل اجزای محدود حاضر با جزءبندی مناسب قادر است به خوبی رفتار مخزن و سیال درون آن را مدل‌سازی کند.

#### ۴. مطالعات عددی

##### ۱.۴. مدل اجزای محدود

به منظور مطالعه اثر مؤلفه قائم زلزله‌های حوزه نزدیک بر پاسخ لرزه‌ای مخازن بتنی با ابعاد واقعی، یک مخزن با طول، عرض و ارتفاع به ترتیب برابر با ۱۸، ۱۴ و ۵ متر که ۴ متر آن از آب پر شده تحت چهار زلزله حوزه نزدیک، با فاصله کمتر از ۱۰ کیلومتر نسبت به گسل، قرار گرفته است. با توجه به این‌که اکثر مخازن بتنی در اجرا به صورت دیوارهای بتنی با ضخامت متغییر باریک شونده از پایین به بالای دیوار ساخته می‌شوند، در مطالعه‌ی حاضر ضخامت پایین و بالای دیوار به ترتیب برابر با ۰/۴ و ۰/۲ متر در نظر گرفته شده که این تغییر ضخامت با شیب خطی در ارتفاع دیوار می‌باشد.

سه نقطه A، B و C (نشان داده شده در شکل ۵) به ترتیب وسط دیوار بلندتر، وسط دیوار کوتاه‌تر و گوشه مخزن در ارتفاع ۴ متری از کف مخزن در نظر گرفته شده که محل قرائت پاسخ تلاطم سیال است. مخزنی که در این مطالعه به عنوان یک نمونه مخزن مستطیلی بتنی انتخاب شده به صورت بدون سقف بوده و فرض شده مخزن به پی صلب ثابت شده است (از اثرات خاک بر رفتار مخزن صرف نظر شده است). از طرفی جداره‌های مخزن به صورت

انعطاف‌پذیر در نظر گرفته شده تا اثر انعطاف‌پذیری دیوار مخزن بر پاسخ‌های لرزه‌ای آن لحاظ شود. مشخصات مصالح استفاده شده به منظور ساخت مخزن و سیال در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲. مشخصات مصالح اختصاص داده شده به مخزن بتنی و سیال.

مصالح	$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	E (GPa)	$\nu$	$\mu$
بتن	۲۴۰۰	۲۲/۶۹	۰/۱۷	-
سیال	۱۰۰۰	۲/۱	-	۰/۰۰۱

در جدول ۲،  $\rho$ ، E،  $\nu$  و  $\mu$  به ترتیب چگالی، ضریب کشسانی، ضریب پواسون و گرانروی (لزجت) هستند.

#### ۲.۴. تحلیل حساسیت

پیش از مطالعه رفتار سیستم مخزن و سیال ضروری است که اندازه بهینه اجزای مورد استفاده جهت جزءبندی مخزن و سیال در تحلیل اجزای محدود مورد مطالعه قرار گیرد. ابعاد بهینه این اجزاء اندازه‌ای است که با حداقل تعداد اجزاء در کوتاه‌ترین زمان ممکن پاسخ‌هایی با دقت قابل قبول ارائه دهد. به این منظور مخزن مورد نظر تحت سه بار هارمونیک با فرکانس‌های زاویه برابر با فرکانس طبیعی مود اول، دوم و سوم تلاطم آن، بدست آمده با استفاده از رابطه ۸، به صورت رابطه ۹ قرار گرفته و حداکثر پاسخ نوسانات سطحی سیال به منظور بررسی همگرایی انتخاب شده است.

$$\omega_n^2 = \pi(2n - 1) \left(\frac{g}{L}\right) \tanh \left[ (2n - 1) \left(\frac{h}{L}\right) \right] \quad (۸)$$

$$f(t) = A \times \sin(\omega_n t) \quad (۹)$$

متغیرهای استفاده شده در معادلات ۸ و ۹ به ترتیب به صورت زیر تعریف می‌شوند. مقادیر بالا برای فرکانس طبیعی مود اول در جدول ۳ آورده شده است.

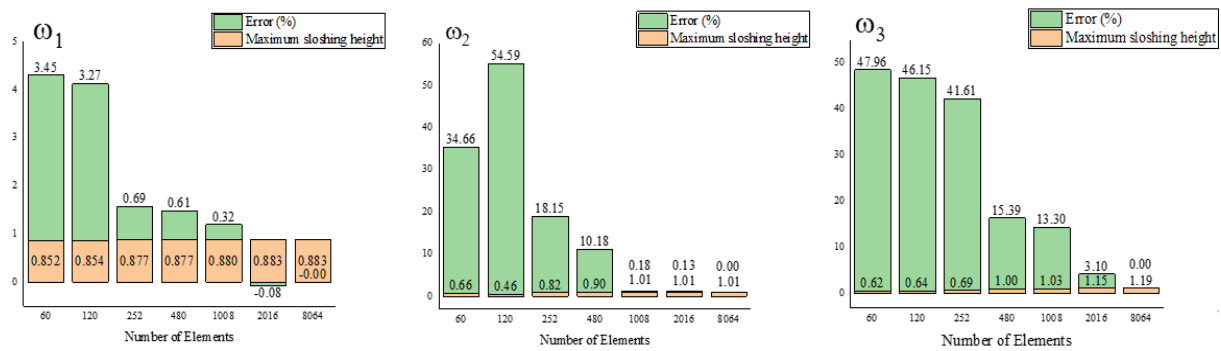
$\omega_n$ : فرکانس nام طبیعی تلاطم سیال.  $n$ : شماره مد نوسانی.  $g$ : شتاب گرانش.  
 $h$ : ارتفاع سیال ذخیره شده.  $L$ : طول مخزن.  $A$ : دامنه نوسان.

جدول ۳. مقادیر متغیرهای روابط ۱۱ و ۱۲ برای فرکانس زوایه‌ای مودهای اول تا سوم

متغیر	$L$ (m)	$h$ (m)	$g$ (m s <sup>-2</sup> )	$A$ (m)	$\omega_1$ (Hz)	$\omega_2$ (Hz)	$\omega_3$ (Hz)	$f(t)$ (mm)
مقدار	۱۸	۴	۹/۸۱	۰/۰۱۵	۱/۰۱۶	۲/۲۳۲	۲/۹۲۳	$15 \times \sin(\omega_n \times t)$

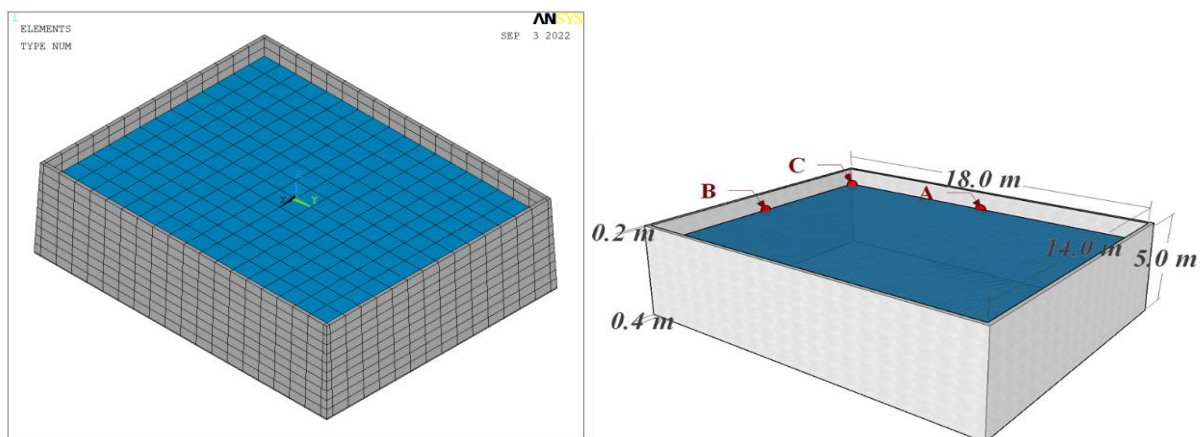
به منظور یافتن اندازه بهینه اجزاء سیال مورد مطالعه ۷ مرتبه با اجزای مکعبی هشت گره‌ای با ابعاد مختلف تحت بار هارمونیک  $f(t)$  قرار گرفته است. ابعاد اجزاء به صورتی در نظر گرفته شده که در هر مرحله تعداد اجزای سیال افزایش می‌یابد. این تعداد از ۶۰ جزء مکعبی در مرحله اول تا ۸۰۶۴ جزء مکعبی در مرحله ۷ تغییر کرده است. نتایج حداکثر پاسخ تلاطم سطحی سیال در مراحل مختلف و اختلاف حداکثر پاسخ تلاطم در هر مرحله نسبت به مرحله آخر (هفتم) با هم مقایسه شده است. همگرایی پاسخ‌ها برای هر سه فرکانس مورد بررسی قرار گرفته تا اثرات مودهای بالاتر نیز در انتخاب اندازه‌ی بهینه‌ی اجزا مورد مطالعه قرار گیرد. شکل ۴ نتایج بدست آمده برای هر سه فرکانس و اختلاف بین نتیجه‌ی بدست آمده در هر مرحله با نتیجه‌ی بدست آمده از مرحله‌ی آخر را نشان می‌دهد.





شکل ۴. تحلیل حساسیت (مقایسه حداکثر پاسخ تلاطم سیال)

همان طور که در شکل ۴ نشان داده شده است، اختلاف ماکزیمم تلاطم جزبندی‌های مختلف بر اساس ارتعاش هارمونیک سینوسی بدست آمده از مود اول ناچیز بوده در حالیکه این تفاوت تحت ارتعاش هارمونیک دوم و سوم اثر قابل توجهی دارند که نشان از اهمیت در نظر گرفتن مودهای بالاتر در ابعاد جزبندی به روش اجزای محدود می باشد. همینطور نتایج بدست آمده از جزبندی مختلف نشان داد، کمتر کردن ارتفاع اجزا نسبت به عرض و طول آن، نتایج حداکثر تلاطم تحت هر ۳ بار هارمونیک سینوسی به حالتی که کل ابعاد اجزا کوچکتر شده است همگرا می شود لذا جهت کم کردن تعداد اجزا و به تبع آن زمان تحلیل عددی می توان از ابعاد اجزا بزرگتر در عرض و طول با ارتفاع کوچکتر استفاده کرد اختلاف گسسته‌سازی دامنه سیال با ۲۰۱۶ جز (با نسبت کمتر ارتفاع اجزا به عرض و طول) و ۸۰۶۴ جز (با نسبت برابر اجزا در ارتفاع و عرض و طول) در فرکانس‌های اول، دوم و سوم به ترتیب برابر با ۰/۸، ۰/۱۳ و ۳/۱ درصد بوده که نشان می‌دهد این تعداد اجزا (۲۰۱۶) مناسب جهت استفاده در تحلیل رفتار مخزن مذکور است. مدل اجزای محدود مخزن و آب به صورت گسسته‌سازی شده با اندازه بهینه اجزا، مشخص شده در بالا، در نرم افزار ANSYS [۲۹] در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵. مشخصات ابعادی و مدل اجزای محدود مخزن و آب [۲۶].

### ۳.۴. زلزله‌های وارد شده به مخزن

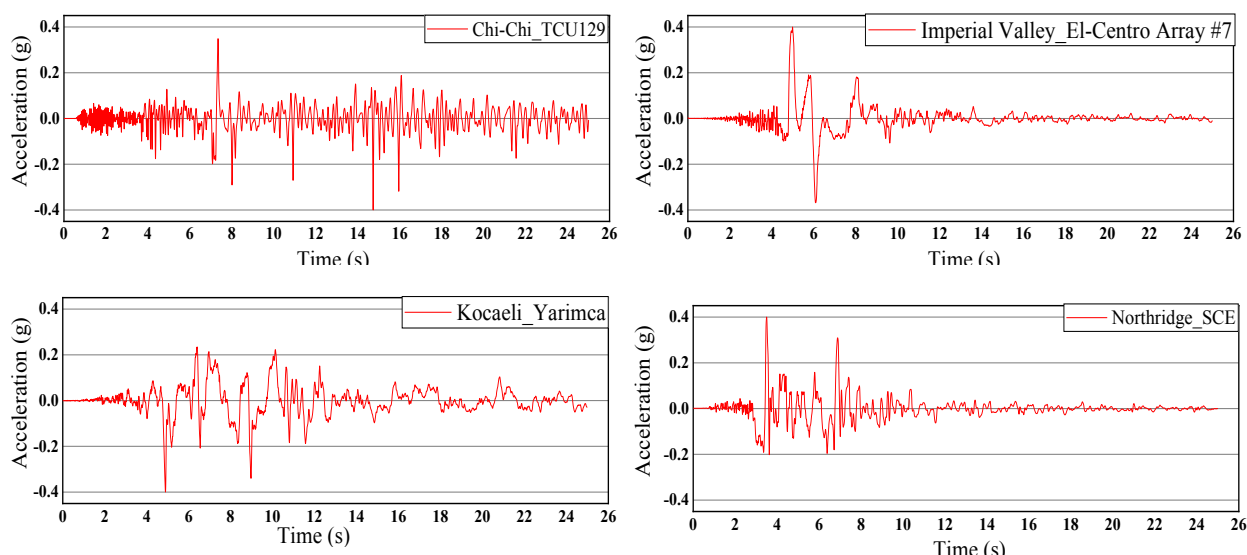
همان طور که در بخش قبل بیان شد، به منظور مطالعه اثر مولفه قائم زلزله‌های حوزه نزدیک بر مخازن نگهداری مایعات، چهار رکورد زلزله ثبت شده در ایستگاه‌هایی با فاصله کم‌تر از ۱۰ کیلومتر نسبت به گسل به مخزن مذکور به صورت دو مولفه‌ای، دو مؤلفه‌ای افقی (طولی و عرضی)، و سه مولفه‌ای، دو مولفه افقی به همراه مولفه قائم زلزله، اعمال شده است. زلزله‌ها به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که دو مورد از آن‌ها به صورت پالس گونه و دو مورد دیگر بدون

پالس باشد. تمامی زلزله‌های مذکور از پایگاه داده های لرزه‌ای مرکز تحقیقات مهندسی زلزله دانشگاه برکلی [۳۰] گرفته شده است. جدول ۴، زلزله‌های اعمال شده و مشخصات آن‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۴. زلزله‌های اعمال شده به مخزن بتنی

نام رویداد	محل رویداد	زمان رویداد	ایستگاه	بزرگا ( Richter scale)	فاصله از گسل (km)	پالس اولیه
Chi-Chi	تایوان	۱۹۹۹	TCU129	۷/۶۰	۱/۸۳	ندارد
Imperial Valley	آمریکا	۱۹۷۹	5028 El-Centro Array #7 (H-E07)	۶/۵۳	۰/۵۶	دارد
Kocaeli	ترکیه	۱۹۹۹	Yarimca	۷/۵۱	۱/۳۸	دارد
Northridge	آمریکا	۱۹۹۴	SCE	۶/۶۰	۷/۴۶	ندارد

زلزله‌های نشان داده شده در جدول ۴ همگی به صورتی مقیاس شده‌اند که بیشینه شتاب در راستای مؤلفه اصلی هر یک از آن‌ها برابر با ۰/۴ شتاب گرانش زمین باشد. سایر مولفه‌ها نیز بر اساس ضریب مقیاس بدست آمده از مقیاس مولفه اصلی مقیاس شده‌اند. راستای اعمال مؤلفه اصلی مقیاس شده زلزله‌ی عمود بر دیوار بلندتر در نظر گرفته شده است. شکل ۶ نمودارهای تاریخچه زمانی مؤلفه اصلی زلزله‌های مذکور در ۲۵ ثانیه اول به صورت مقیاس شده را نشان می‌دهد.



شکل ۶. مؤلفه طولی زلزله‌های اعمال شده به مخزن به صورت مقیاس شده.

همان طور که در قسمت‌های قبلی بیان شد، در مجموع ۸ سری بار لرزه‌ای، شامل ۴ سری زلزله دو جهته و ۴ سری زلزله سه جهته، به مخزن مورد مطالعه وارد شده است. جدول ۵ زلزله‌های مذکور را به صورت نامگذاری شده نشان می‌دهد.

جدول ۵. نامگذاری رکوردهای اعمال شده به مخزن

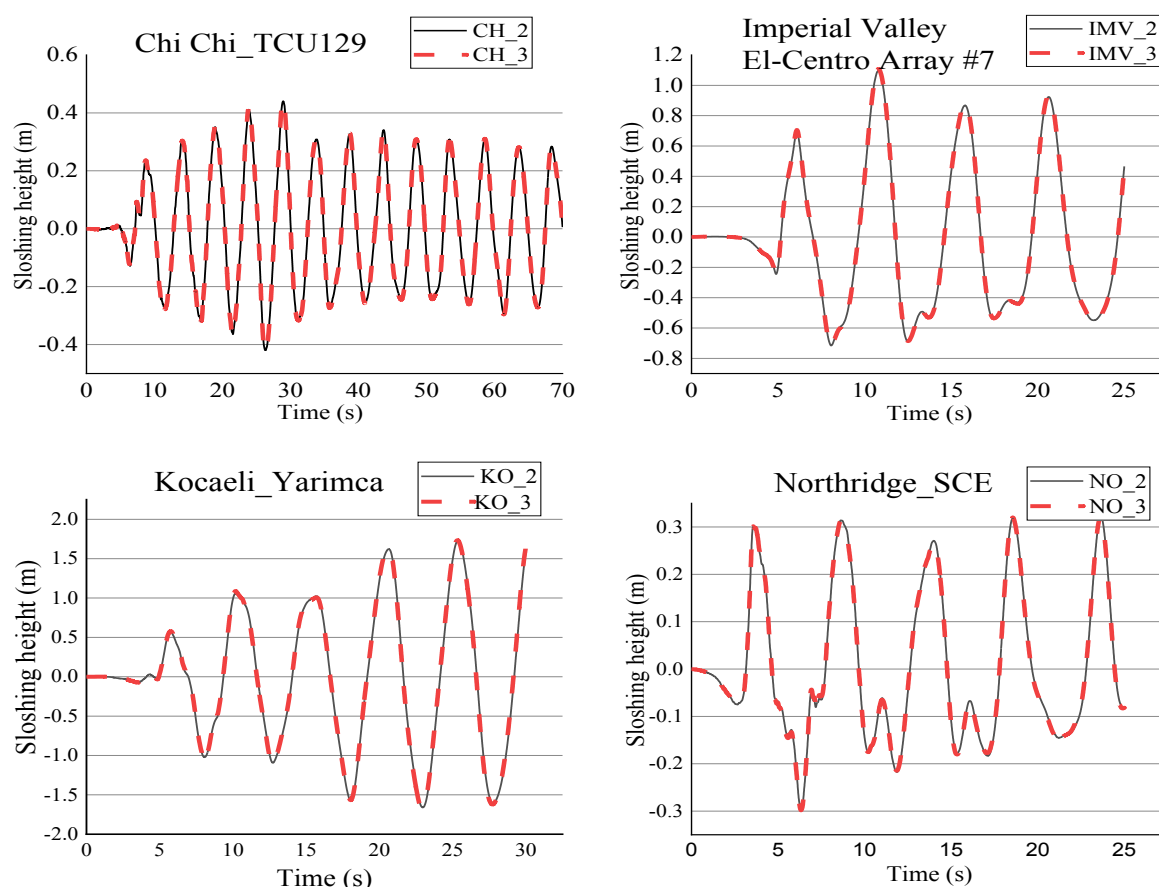
نورثریج	کوجاییلی	امپریال ولی	چی چی	تعداد مولفه‌های زلزله	نام رکورد مورد استفاده در مطالعات
NO_2	KO_2	IM_2	CH_2	دو مولفه‌ای	
NO_3	KO_3	IM_3	CH_3	سه مولفه‌ای	

#### ۴.۴. تحلیل نتایج

در این بخش پاسخ‌های لرزه‌ای مخزن بتنی در شرایطی که تحت زلزله‌های حوزه نزدیک، نشان داده شده در جدول ۴، به صورت دو مؤلفه‌ای (بدون در نظر گرفتن مؤلفه قائم) و سه مؤلفه‌ای (با در نظر گرفتن مؤلفه قائم) قرار گرفته، با هم مقایسه شده است. همچنین رفتار دینامیکی مخزن تحت زلزله‌های با پالس اولیه (امپریال ولی و کوچایلی) و زلزله‌های بدون پالس اولیه (چی چی و نورتریج) مورد بررسی قرار گرفته و مقایسه شده است.

#### ۱.۴.۴. نوسانات سطحی سیال

شکل ۷ پاسخ تاریخیچه زمانی نوسانات سطحی سیال در راستای عرضی مخزن (عمود بر دیوار بلندتر) تحت رکوردهای دو و سه مؤلفه‌ای چی چی، امپریال ولی، کوچایلی و نورتریج را نشان می‌دهد. محل اندازه‌گیری این پاسخ وسط دیوار بلندتر مخزن (در راستای اصلی زلزله) است (نقطه A)



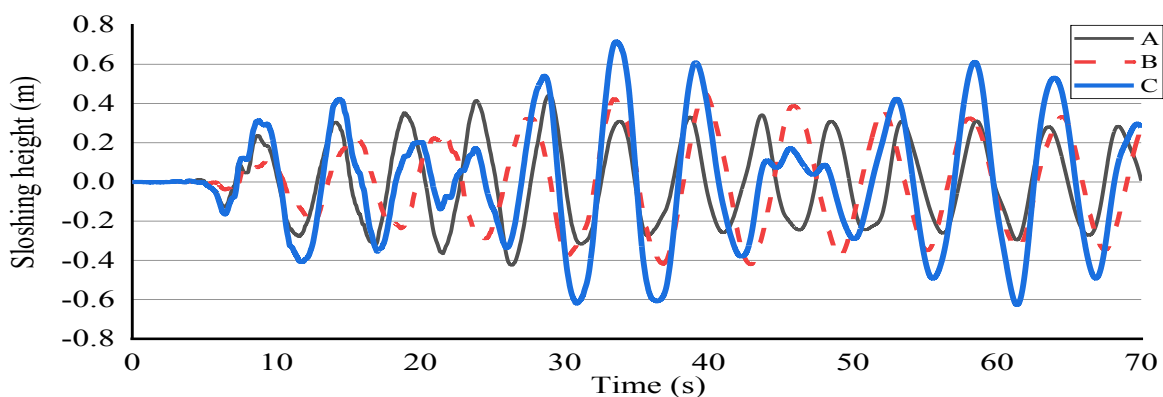
شکل ۷. پاسخ تاریخیچه زمانی نوسانات سطحی سیال وسط دیوار بلندتر تحت زلزله‌های حوزه نزدیک به صورت دو و سه مؤلفه‌ای.

همان طور که در شکل ۷ مشخص است، اثرات مؤلفه قائم زلزله حوزه نزدیک در مطالعه پاسخ نوسانات سطحی سیال تغییرات چندانی نداشته است. با در نظر گرفتن نتایج بدست آمده از مطالعات پیشین می‌توان نتیجه گرفت که صرف نظر از موقعیت مخزن نسبت به گسل، مؤلفه قائم اثر قابل ملاحظه‌ای بر این پاسخ ندارد. نتایج بدست آمده از دو زلزله کوچایلی و امپریال ولی نشان می‌دهد که این موضوع در مورد زلزله‌های پالس گونه نیز صدق می‌کند. از سوی دیگر محل حداکثر این پاسخ در مخازن، به خصوص مخازن مستطیلی همواره مورد بحث بوده است. به همین دلیل در مطالعات حاضر محل بحرانی این پاسخ در این مخزن نیز مورد مطالعه قرار گرفته است. جدول ۶

حداکثر پاسخ تلاطم سطحی سیال در مخزن مورد نظر در وسط دیوار بلند (A)، وسط دیوار کوتاه (B) و کنج مخزن (C) تحت رکوردهای لرزه‌ای سه مولفه‌ای (جدول ۴) را نشان می‌دهد. شکل ۸ نیز پاسخ تلاطم سطحی مخزن تحت زلزله چی چی در سه نقطه مذکور را نشان می‌دهد.

جدول ۶. حداکثر پاسخ نوسانات سطحی سیال در نقاط مختلف مخزن.

حداکثر پاسخ تلاطم سطحی سیال (متر)			
C	B	A	زلزله
۰/۷۲	۰/۴۵	۰/۴۴	چی چی
۱/۳۸	۰/۵۷	۱/۱۱	امپریال ولی
۳/۱۶	۱/۷۳	۱/۷۴	کوجایلی
۰/۵۵	۰/۲۶	۰/۳۲	نورثریج



شکل ۸. تفاوت پاسخ تلاطم مخزن تحت زلزله چی چی در نقاط مختلف مخزن.

بر اساس مقادیر نشان داده شده در جدول ۶، تحت چهار زلزله حوزه نزدیک حداکثر پاسخ نوسانات سطحی سیال با اختلاف زیادی در گوشه مخزن نسبت به وسط دیوار ایجاد شده است. حداکثر تفاوت تلاطم سیال در کنج مخزن نسبت به وسط دیوار بلندتر تحت زلزله کوجایلی اتفاق افتاده که مقدار تلاطم سیال در کنج دیوار ۸۱/۶ درصد بیشتر از مقدار آن در وسط دیوار است. بعد از کوجایلی، نورثریج، چی چی، و امپریال ولی به ترتیب با ۷۱/۸، ۶۳/۶ و ۲۴/۳ درصد ارتفاع تلاطم بیشتر نسبت به دو محل دیگر در جایگاه‌های بعدی هستند. ضمن آنکه مقایسه نتایج تاریخچه زمانی تلاطم سیال نشان می‌دهد که در دو زلزله امپریال ولی و کجایلی که زلزله‌های حوزه نزدیک پالس گونه می‌باشند ماکزیمم تلاطم بیشتری نسبت به دو زلزله چی چی و نورثریج را نشان داده است این امر به دلیل وجود پریود بلند در مولفه افقی زلزله‌های حوزه نزدیک دارای پالس بوده که به علت نزدیک بودن به دوره تناوب قسمت موج سیال موجب تلاطم‌های بزرگتری می‌شود و اهمیت بررسی رفتار مخازن تحت زلزله‌های حوزه نزدیک پالس گونه را نشان می‌دهد.

از طرف دیگر در شکل ۸ می‌توان به وضوح مشاهده کرد که پاسخ تاریخچه زمانی تلاطم ایجاد شده در گوشه مخزن تقریباً در تمامی طول مدت بارگذاری اختلافش را با نقاط A و B حفظ کرده است. این موضوع می‌تواند گواه بر اهمیت این نقطه از مخزن در مطالعه پاسخ تلاطم و همچنین در نظر گرفتن ارتفاع سطح آزاد (فاصله سطح سیال تا بالای دیوار مخزن) در طراحی مخازن باشد.

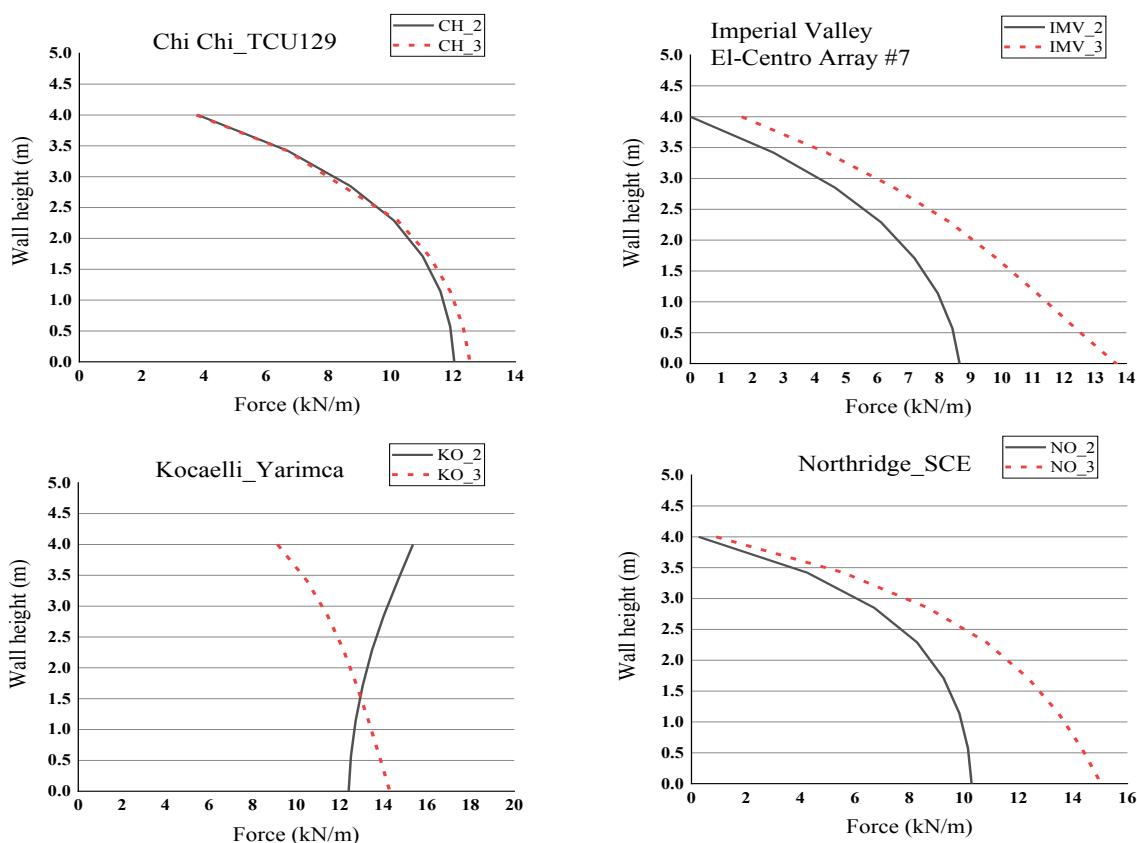
#### ۲.۴.۴. نیروی دینامیکی وارد بر دیوار مخزن

از آنجاییکه عدم محاسبه دقیق نیروهای هیدرودینامیکی که به دیوار بتنی مخزن در کف و در ارتفاع دیوار وارد می‌شود می‌تواند باعث خرابی و شکست آن‌ها که گاه منجر به خسارات جبران ناپذیری می‌شود گردد، در این قسمت

به بررسی نیروهای هیدرودینامیکی وارد به دیوارهای مخزن تحت زلزله‌های حوزه نزدیک و اثر مولفه قائم زمین لرزه و تاثیر وجود پالس در این نوع زلزله‌ها پرداخته شده است.

#### ۱.۲.۴.۴. توزیع نیروی دینامیکی در ارتفاع دیوار

به منظور مطالعه اثر مولفه قائم بر پاسخ نیروی‌های دینامیکی وارد بر مخزن، توزیع این نیرو در ارتفاع مخزن در وسط دیوار بلندتر که در اثر سیال ذخیره شده به دیوار بتنی مخزن وارد می‌شود تحت رکوردهای دو و سه مؤلفه‌ای چهار زلزله‌ای اعمال شده (در لحظه ماکزیمم تاریخچه زمانی نیروی دینامیکی در پای دیوار) با یکدیگر مقایسه شده است (شکل ۹).



شکل ۹. توزیع نیروی دینامیکی وارد بر واحد عرض دیوار مخزن حاصل از جمع نیروهای دینامیکی قسمت سخت و قسمت موج تحت چهار زلزله‌ی چی‌چی، امپریال ولی، کوجاییلی و نورتریج به صورت دو و سه مؤلفه‌ای.

نمودارهای نشان داده شده در شکل ۹ به وضوح اهمیت مولفه قائم زلزله بر پاسخ نیروهای دینامیکی وارد بر مخازن را نشان می‌دهد. در بین رکوردهای انتخاب شده بیشترین اختلاف حداکثر نیروی‌های ایجاد شده در پای دیوار بتنی مخزن توسط مولفه قائم را می‌توان به ترتیب تحت زلزله امپریال ولی با ۵۸/۲ درصد اختلاف، زلزله نورتریج ۴۶/۴، زلزله کوجاییلی ۱۵/۲ و کمترین اختلاف را می‌توان تحت زلزله چی‌چی با ۴ درصد اختلاف مشاهده کرد. از طرف دیگر بررسی توزیع نیروی دینامیکی در ارتفاع دیوار تحت رکورد دو مؤلفه‌ای و سه مؤلفه‌ای زلزله کوجاییلی در لحظه ماکزیمم این نیرو در کف مخزن نشان می‌دهد وقتی مخزن تحت رکورد سه مؤلفه‌ای این زلزله قرار می‌گیرد مقدار

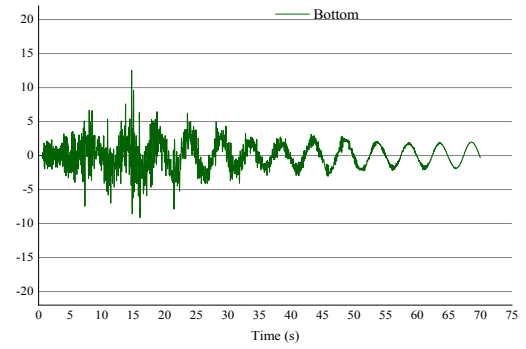
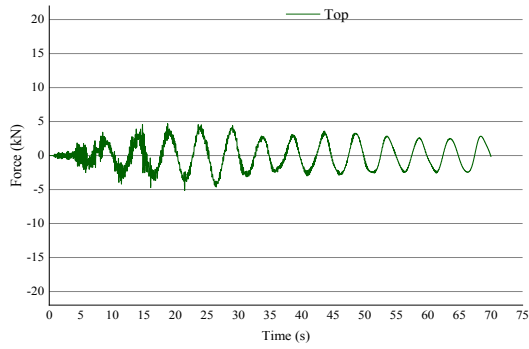
نیروی ایجاد شده در پایین دیوار بیشتر از بالای دیوار می باشد که در زلزله های چی چی، امپریال ولی و نورث ریچ نیز همین نتایج بدست آمده است در حالیکه وقتی مخزن تحت زلزله دو مؤلفه ای این زلزله قرار می گیرد نیروی دینامیکی در بالای دیوار بیشتر از پایین دیوار بوده و بطور کلی توزیع نیروی دینامیکی در ارتفاع دیوار مخزن تغییر یافته است. این موضوع از آن جا حائز اهمیت است که در شیوه مرسوم طراحی و ساخت مخازن بتنی نگهداری مایعات، با فرض اینکه نیروی دینامیکی وارد شده در کف به دیوار بتنی بیشتر از مقدار ایجاد شده در بالای دیوار است ضخامت دیوار مخزن را معمولا طوری در نظر می گیرند که هر چه به کف مخزن نزدیک تر می شویم ضخامت افزایش می یابد (مانند آن چه در طراحی این مخزن لحاظ شد). دلیل این شیوه مرسوم آن است که مطابق آن چه تحت سه رکورد لرزه ای چی چی، امپریال ولی و نورث ریچ شاهد هستیم نیروی دینامیکی ایجاد شده در پای دیوار معمولا به طور قابل توجهی بیشتر از مقدار ایجاد شده در بالای دیوار است. با این حال تحت زلزله کوچائلی بدلیل پالس بلند زلزله که باعث تلاطم های بزرگی می شود شاهد آن هستیم که اگر چه تحت رکورد سه مؤلفه ای این زلزله توزیع نیرو در ارتفاع دیوار رفتاری مشابه با سه زلزله دیگر دارد، در حالت دو مؤلفه ای تغییر توزیع نیرو در ارتفاع دیوار را نشان داده است و نیروی ایجاد شده در بالای دیوار از مقدار به وجود آمده در پای دیوار پیشی گرفته است. ذکر این نکته ضروری است که توزیع نیروی نشان داده شده تحت هر یک از رکوردهای لرزه ای دو و سه مؤلفه ای برای زمانی است که نیروی هیدرودینامیکی در پای دیوار حداکثر شده است. در نتیجه این توزیع می تواند در لحظات دیگر از الگوهای متفاوتی تبعیت کند.

با توجه به موارد بیان شده در بالا و نمودارهای نشان داده شده در شکل ۹ می توان نتیجه گرفت که عدم در نظر گرفتن مؤلفه قائم در تحلیل مخزن می تواند باعث بروز خطا در محاسبات گردد. با توجه به این که حداکثر اختلاف به وجود آمده و تغییر الگوی توزیع نیرو در ارتفاع دیوار هر دو تحت زلزله های حوزه نزدیک پالس گونه بودند و زلزله های حوزه نزدیک بدلیل اثر مؤلفه قائم زلزله باعث افزایش نیروی دینامیکی در پای دیوار گردیده ضمن آنکه وجود پالس در اینگونه زلزله ها می تواند باعث افزایش تلاطم و افزایش نیروی دینامیکی در بالای دیوار ناشی از بخش موج سیال شده و الگوی توزیع این نیروها را در ارتفاع دیوار تغییر دهد.

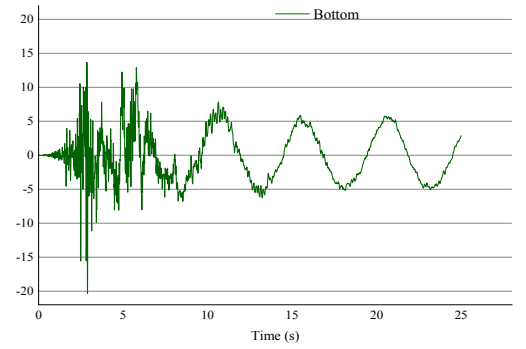
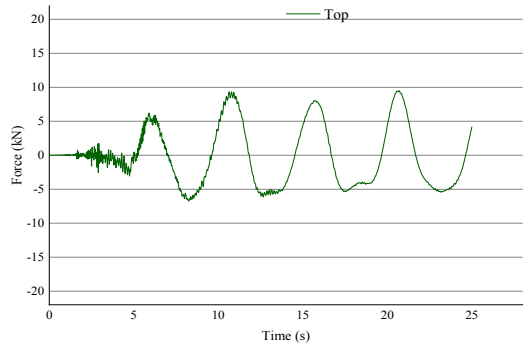
#### ۲.۲.۴.۴. مقایسه پاسخ تاریخیچه زمانی نیروی هیدرودینامیکی وارد بر دیوار مخزن در بالا و پایین دیوار

اثرات قابل ملاحظه ای مؤلفه قائم زلزله در پاسخ توزیع نیروی هیدرودینامیکی در ارتفاع دیوار مخزن و تغییرات به وجود آمده این پاسخ خصوصا تحت زلزله ی کوچائلی، که نه تنها مقدار پاسخ بلکه الگوی توزیع پاسخ نیز در ارتفاع دیوار تغییر کرده، باعث شد که در این قسمت به صورت جداگانه به مطالعه ی پاسخ تاریخیچه زمانی نیروی هیدرودینامیکی سیال در قسمت بالا و پایینی دیوار مخزن (ارتفاع صفر و چهار متری از کف مخزن) پرداخته شود. شکل ۱۰ پاسخ تاریخیچه زمانی نیروی هیدرودینامیکی به وجود آمده توسط سیال تحت چهار زلزله ی مورد مطالعه به صورت سه مؤلفه ای را در بالا (ارتفاع ۴ متری از کف مخزن) و پای دیوار مخزن نشان می دهد.

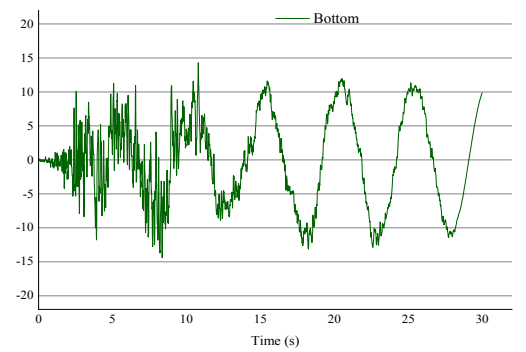
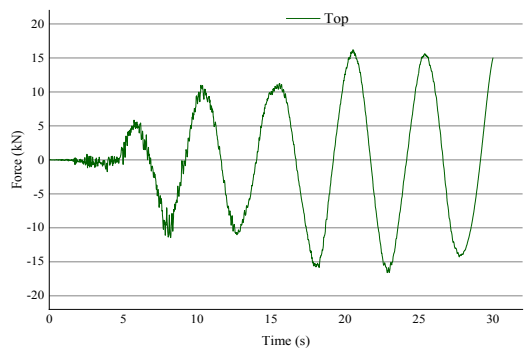
Chi Chi\_TCU129



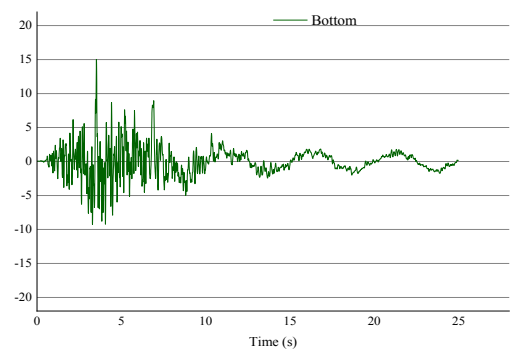
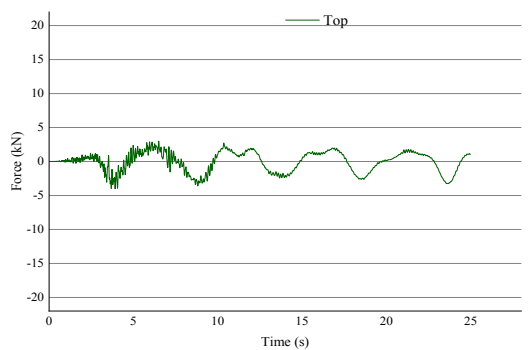
Imperial Valley\_EI-Centro Array #7



Kocaeli\_Yarimca



Northridge\_SCE



شکل ۱۰. نمودار تاریخچه زمانی نیروی دینامیکی در کف و ارتفاع چهار متری از کف مخزن (سطح آب) در تحلیل های ۳ مؤلفه‌ای.

همانطور که در نمودارهای شکل ۱۰ دیده می شود در کف مخزن اثر فرکانس های بالا بیشتر از سطح سیال است در واقع اثر مؤلفه ضربانی جرم سیال غالب بر جرم تلاطمی بوده است و تغییرات این نیرو در بالای دیواره مخزن با پیرویی نزدیک به پیرو مود تلاطم رخ داده است. نمودارهای شکل ۱۰ نشان می دهد که علاوه بر فاصله مخزن از گسل، مشخصات دیگر زلزله نیز باید در بررسی اهمیت مولفه قائم در پاسخ نیروی دینامیکی مخزن وارد شود. همان طور که در شکل مربوط به زلزله ی کوچایلی مشخص است نه تنها در لحظه ی ماکزیمم نیرو، بلکه در چند ماکزیمم محلی دیگر مقدار بیشینه نیروی هیدرو دینامیکی در بالای دیوار از کف دیوار بیشی گرفته است.

جدول ۷. مقایسه حداکثر نیروی ایجاد شده در کف و بالای دیوار مخزن (ارتفاع چهار متری از کف مخزن) و زمان متناظر با آن.

زلزله	نیرو در کف مخزن		نیرو در بالای مخزن	
	بیشینه (kN)	زمان (s)	بیشینه (kN)	زمان (s)
چی چی	۱۲/۵۴	۱۴/۷۴	۴/۶۷	۱۸/۷۶
امپریال ولی	۱۳/۶۷	۲/۸۶	۹/۵۱	۲۰/۶۹
کوجالی	۱۴/۲۹	۱۰/۷۹	۱۶/۲۳	۲۰/۵۳
نورثریج	۱۵/۰۳	۳/۵۲	۲/۹۸	۶/۵۰

مقایسه نیروی ایجاد شده در بالا و پایین دیوار مخزن تحت زلزله کوچایلی که در شکل ۱۰ و جدول ۷ نشان داده شده با توزیع نیروی هیدرو دینامیکی در ارتفاع دیوار در لحظه ی ماکزیمم این نیرو (شکل ۹) نشان می دهد که اگرچه توزیع این نیرو در لحظه ی ماکزیمم از پایین به بالای دیوار مخزن تحت زلزله ی سه مولفه ای کاهش یافته است، مقایسه نمودار پاسخ تاریخچه زمانی نیرو نشان از بیشتر بودن حداکثر نیروی هیدرو دینامیکی ایجاد شده در بالای دیوار مخزن نسبت به پایین دیوار تحت رکورد سه مولفه ای همین زلزله بوده که همانند نتایج توزیع نیروی دینامیکی تحت رکورد دو مولفه ای این زلزله در شکل ۹ می باشد. از این موضوع می توان نتیجه گرفت که تحت زلزله حوزه نزدیک کوچایلی به عنوان یک زلزله حوزه نزدیک پالس گونه، در هر دو صورت دو و سه مولفه ای غالباً توزیع نیروی هیدرو دینامیکی بیشینه ناشی از سیال ذخیره شده از بالا به پایین کاهش یافته است همینطور در هر دو زلزله امپریال و کوچایلی که زلزله پالس گونه می باشند مقدار نیروی هیدرو دینامیکی در بالای مخزن بطور چشمگیری بیشتر از دو زلزله دیگر می باشد. این موضوع می تواند نشان از اهمیت مطالعه ساختگاه و زلزله های حوزه نزدیک بالاخص زلزله های حوزه نزدیک با پالس بوده که می تواند در طراحی ضخامت دیوار مخزن تاثیر گذار باشد، دلیل این موضوع می تواند ارتفاع زیاد موج تلاطمی که منجر به نیروی دینامیکی ناشی از قسمت موج سیال در بالای مخزن می گردد باشد.

## ۵. نتیجه گیری

مقاله ی حاضر به تغییرات به وجود آمده در پاسخ تلاطم و فشار هیدرو دینامیکی مخازن مستطیلی قرار گرفته روی پی صلب (صرف نظر از اثرات اندرکنش خاک و سازه) با در نظر گرفتن اثر مؤلفه قائم در زلزله های حوزه نزدیک دارای پالس و بدون پالس پرداخته است. برای این منظور ابتدا مخزن بتنی مستطیلی آب با دیواره های انعطاف پذیر با در نظر گرفتن اندرکنش سازه بتنی و آب به روش اجزاء محدودی مدل سازی شده و دامنه سیال با اندازه اجزای مختلف گسسته سازی شده و تحلیل های مودال و تاریخچه زمانی تحت ارتعاش هارمونیک سینوسی جهت انتخاب اندازه جزء بندی بهینه انجام شده است. سپس ۸ رکورد زلزله بصورت دو و سه مولفه ای به مخزن مدل سازی شده



بصورت تاریخیچه زمانی اعمال گردیده است. نتایج بدست آمده از مطالعه حاضر بطور خلاصه در ادامه آورده شده است.

۱. جهت گسسته سازی دامنه سیال در روش اجزاء محدود باید اندازه ابعاد جزءبندی به قدری کوچک انتخاب شوند تا توانایی محاسبه مودهای بالاتر تلاطم را داشته باشد، ضمن آنکه می توان از جزءبندی با نسبت ابعادی ارتفاع به عرض و طول کوچکتر از ۱ بجای کوچکتر کردن کل ابعاد اجزاء، جهت کم کردن تعداد اجزاء و کم شدن زمان تحلیل های عددی با پاسخ های مطلوب استفاده کرد.

۲. مشابه نتایج بدست آمده در مطالعات گذشته در مورد زلزله های حوزه دور، مولفه قائم زلزله اثر قابل ملاحظه ای بر پاسخ تلاطم سطحی سیال تحت زلزله های حوزه نزدیک ندارد. وجود یا عدم وجود پالس در زلزله ها نیز تغییری در آن چه گفته شد به وجود نمی آورد.

۳. مقایسه نتایج پاسخ نوسانات سطحی سیال در وسط دیواره ها و کنج مخزن، افزایش تا ۸۱/۶ درصدی بیشینه تلاطم سیال در کنج مخزن نسبت به وسط دیوار را نشان می دهد و تحت هر هشت رکورد مورد مطالعه گوشه مخزن محل بحرانی پاسخ نوسانات سطحی سیال بوده است که باید در تحلیل ها و طراحی های مخازن جهت در نظر گرفتن مقدار ارتفاع آزاد و همچنین در مخازن دارای سقف، فشار ناشی از تلاطم سیال به سقف در محل بحرانی تلاطم در کنج مخزن در نظر گرفته شود.

۴. مطالعه اثر مولفه قائم بر پاسخ توزیع نیروی دینامیکی ناشی از سیال در ارتفاع دیوار مخازن بتنی نشان داد اگرچه در مواردی این مولفه اثر ناچیزی بر پاسخ نیروی دینامیکی وارد شده به دیواره بتنی مخزن دارد، در مواردی باعث افزایش نیروی دینامیکی به میزان ۵۸/۲ درصد تحت زلزله های سه مؤلفه ای (با در نظر گرفتن مؤلفه قائم) نسبت به زلزله های دو مؤلفه ای می شود، در نتیجه طراحی مخازن بتنی باید با در نظر گرفتن مؤلفه قائم و بصورت سه مؤلفه ای تحلیل و طراحی گردد.

۵. مطالعه پاسخ توزیع نیرو در ارتفاع دیواره مخزن تحت زلزله کوجایلی و بیشتر بودن نیروی دینامیکی بیشینه در بالای دیوار نسبت به بیشینه این نیرو در پایین دیوار، نشان از اهمیت مشخصات ساختگاه در رفتار لرزه ای مخزن و طراحی مخازن دارد. به عبارت دیگر افزایش ضخامت دیوار مخازن بتنی در نزدیکی کف مخزن در تمام موارد روش مناسبی جهت مقابله با نیروی به وجود آمده در دیوارهای مخزن تحت زلزله نیست چرا که این نیرو لزوماً از بالا به پایین افزایش نیافته و مشخصات زلزله می تواند در نحوه توزیع آن در ارتفاع دیوار اثرگذار باشد. بنابراین تحلیل و بررسی رفتار دینامیکی مخازن تحت زلزله های حوزه نزدیک پالس گونه جهت طراحی ضخامت دیوارهای مخازن بتنی ضروری می باشد.

۶. در مورد اثر مولفه قائم زلزله بر رفتار مخزن، تنها فاصله مخزن از گسل و وجود پالس نمی تواند معیار قرار گیرد. تفاوت پاسخ توزیع نیروی دینامیکی در ارتفاع دیوار مخزن تحت چهار زلزله حوزه نزدیک و تفاوت پاسخها تحت رکوردهای دو و سه مؤلفه ای به خوبی اهمیت لحاظ نمودن سایر پارامترها را نشان می دهد.

- [1] Gates, W. E. (1980). *Elevated and ground-supported steel storage tanks. Reconnaissance report, Imperial County, California Earthquake of October 15, 1979. Earthquake Engineering Research Institute, Oakland.*
- [2] Hall, J. F., Holmes, W. T., & Somers, P. (1995). *Northridge earthquake of January 17, 1994: reconnaissance report (Vol. 11). Earthquake Engineering Research Institute.*
- [3] Yoshida, S. (2001). *Report on damage and failure of oil storage tanks due to the 1999 Chi-Chi Earthquake in Taiwan. In ASME PVP Conference, Vol. 428, No. 2, pp. 11-19.*
- [4] Housner, G.W. (1963) *The Dynamic behavior of water tanks. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 53, pp. 381-387.*
- [5] Kang, T W, Yang, H I, and Jeon, J S. (2019). "Earthquake-induced sloshing effects on the hydrodynamic pressure response of rigid cylindrical liquid storage tanks using CFD simulation." *Engineering Structures, Vol. 197*
- [6] Kobayashi M, Tamura M. (2022). *Case Details: fire of a floating roof tank of crude oil caused due to a large earthquake and fullface fire of another floating roof tank two days later. Retrieved from, <http://www.shippai.org/fkd/en/cfen/CC1300013.html>. (Accessed March 2022).*
- [7] امیدتبریزی، فرید؛ سالاری، معین الدین؛ حاتمی برق، فرزاد؛ شاهوردیانی، کورش. (۱۳۹۹). اثر شکل هندسی و صلبیت دیوار مخازن بتنی زمینی بر تلاطم سطح مایع. سومین کنفرانس عمران، معماری و مدیریت توسعه شهری در ایران.
- [8] Qiu, Y., Bai, M., Liu, Y., Lei, G., & Liu, Z. (2022). *Effect of liquid filling level on sloshing hydrodynamic characteristic under the first natural frequency. Journal of Energy Storage, Vol. 55, 105452.*
- [9] Avval, I. T., Kianoush, M. R., & Ghaemmaghami, A. R. (2012). *Effect of Three-Dimensional Geometry on the Sloshing Behavior of Rectangular Concrete Tanks. In 15th WCEE conf, Lisbon, Portugal.*
- [10] Akyildiz, H., & Ünal, N. E. (2006). *Sloshing in a three-dimensional rectangular tank: numerical simulation and experimental validation. Ocean engineering, Vol.33(16), pp.2135-2149.*
- [11] 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, Vol.116, pp.637-653.*
- [12] Rawat, A., Matsagar, V., & Nagpal, A. K. (2015). *Finite element simulation of cylindrical liquid storage tank under tri-directional components of earthquake. Journal of Structural Engineering, Structural Engineering Research Centre (SERC), Vol.42(1), pp.28-39.*
- [13] Vern, S., Shrimali, M. K., Bharti, S. D., & Datta, T. K. (2021). *Behavior of liquid storage tank under multidirectional excitation. In Advances in structural technologies, pp.203-217. Springer, Singapore.*
- [14] Tarinejad, R., & Hosseini, A. (2021). *Evaluation of the Seismic Behavior of Steel Liquid Storage Tanks under Near and Far Fault Earthquakes. Journal of Structural and Construction Engineering, Vol.8(6), pp.204-220.*
- [15] مردی پیرسلطان، محمد رضا؛ کیلانتهئی، فواد؛ محبی، بنیامین. (۱۳۹۸). تاثیر زلزله های حوزه نزدیک بر رفتار امواج سطحی مخازن ذخیره مایعات بتنی مستطیلی. نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، ش ۵۱(۳)، ص ۴۰۱ - ۴۱۴.
- [16] Hatami, F., & Omidtabrizi, F. (2022). *Seismic response of rectangular and cylindrical concrete tanks under near-fault and far-fault ground motions. Asas Journal, Vol.23(65), pp.5-14.*
- [17] Kalogerakou, M. E., Maniatakis, C. A., Spyrakos, C. C., & Psarropoulos, P. N. (2017). *Seismic response of liquid-containing tanks with emphasis on the hydrodynamic response and near-fault phenomena. Engineering Structures, Vol.153, pp.383-403.*
- [18] Zhou, L., Xu, T., Lu, Z., & Zhang, D. (2020). *A Study on the Sloshing Problem of Vertical Storage Tanks under the Action of Near-Fault Earthquakes. Advances in Civil Engineering, Vol 2020, pp.10*

- [19] Bagheri, S., & Hayati Raad, H. (2019). Parametric study on dynamic behavior of liquid storage tanks subjected to pulse-like excitations. *Journal of Structural and Construction Engineering*, Vol. 6(2), pp.75-86.
- [20] Doğangün, A., Durmuş, A., and Ayyaz, Y. (1996). Static and dynamic analysis of rectangular tanks by using the Lagrangian fluid finite element. *Computers & Structures*, Vol. 59(3), pp.547-552.
- [21] Dogangun, A., & Livaoglu, R. (2004). Hydrodynamic pressures acting on the walls of rectangular fluid containers. *Structural engineering and mechanics: An international journal*, Vol. 17(2), pp. 203-214.
- [22] Yazdani, M.Razavi, S.V. and Mashal, M. (2016). Seismic analysis of rectangular concrete tanks by considering fluid and tank interaction, *Journal of Solid Mechanics*, Vol. 8(2), pp. 435-445
- [23] Sivakumar, S., Suresh, S., Pradeep, P., Rajesh, S., & Kumar, R.S. (2017). Finite element analysis of landing grid ship assembly for 6.5 tonnes in vertical loading conditions. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, Vol.8(9), pp. 255-261.
- [24] Kangda, M. Z. (2021). An approach to finite element modeling of liquid storage tanks in ANSYS: A review. *Innovative Infrastructure Solutions*, Vol.6(4), pp. 1-20.
- [25] Ansys® Academic Research Mechanical, Release 14, Help System, Coupled Field Analysis Guide, ANSYS, Inc.
- [26] Goudarzi, M. A., & Sabbagh-Yazdi, S. R. (2012). Investigation of nonlinear sloshing effects in seismically excited tanks. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.43, pp.355-365.
- [27] حسینی، محمود و وثوقی فر، حمیدرضا و ابی زاده، شایان. (۱۳۹۳). رفتار دینامیکی مخازن ذخیره سازی مایعات با بهینه سازی ابعادی المان ها. نشریه سد و نیروگاه برق آبی ایران، ش ۱۱(۱)، ص ۱۳ - ۲۱
- [28] Hosseini, M. Abizadeh, Sh. (2013). Behavior of reinforced concrete rectangular aboveground tanks subjected to near-source seismic excitations, *American Environmentalism: Philosophy, History, and Public Policy*, pp. 449-454.
- [29] Ansys® Academic Research Mechanical, Release 14.
- [30] <https://ngawest2.berkeley.edu>, (downloaded, 2022).