

## Parametric study of the tuned liquid damper performance to control a benchmark steel building under seismic loads

Mazyar Fahimi Farzam<sup>1\*</sup>, Babak Alinejad<sup>2</sup>, Rasool Maroofiazar<sup>3</sup>, Hajar Kazemi<sup>4</sup>

1- Asst. Prof., Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Maragheh, Maragheh, Iran

2- Asst. Prof., Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Maragheh, Maragheh, Iran

3- Asst. Prof., Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Maragheh, Maragheh, Iran

4- M. Sc Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Maragheh, Maragheh, Iran

### ABSTRACT

One of the aims of structural engineers is to improve the behavior of structures and reducing their responses under dynamic lateral loads. The structural control systems are advanced techniques to reduce the structural responses against vibration, and Tuned Liquid Damper (TLD) is a well-established tool for the control of structures. In this study, the effect and behavior of TLD under 7 far-field earthquake and 7 near-field earthquake was investigated in ANSYS software. To assess the performance of TLD on the control of structural responses including displacement, acceleration, and velocity, the effect of four different design parameters i.e., tank length, water height, water ratio, and mass ratio (with 27 different designed alternatives based on closed-form relationships proposed in the literature) were studied. The results showed that when the water ratio and mass ratio of cubical container under near-fault records equal to 0.375 and 5% respectively, the structural responses reduced; also, the mass ratio 5% and water ratio 0.125 improve the responses of structure under far-fault records. The increase of the water depth is much more effective on performance of TLD than the decreases of the container length. In general, and among the considered alternatives, the performance of the damper with a lower water ratio and higher mass ratio improves all studied performance criteria. Also, the well-designed TLD could reduce the acceleration better than velocity, and velocity better than displacement.

### ARTICLE INFO

Receive Date: 11 September 2020

Revise Date: 30 November 2020

Accept Date: 20 January 2021

### Keywords:

Passive Control  
Tuned Liquid Damper  
Genetic Algorithm  
Far and near-field earthquakes  
Ansys

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.247591.2236>

\*Corresponding author: Mazyar Fahimi Farzam

Email address: [m.farzam@maragheh.ac.ir](mailto:m.farzam@maragheh.ac.ir)

## مطالعه پارامتری عملکرد میراگر مایع تنظیم شده در کنترل ساختمان فولادی معیار تحت بارهای لرزه‌ای

مازیار فهیمی فرزام<sup>۱\*</sup>، بابک علی نژاد<sup>۲</sup>، رسول معروفی آذر<sup>۳</sup>، هاجر کاظمی<sup>۴</sup>

۱- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران

۳- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران

۴- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران

### چکیده

بهبود رفتار ساختمان‌ها و کاهش پاسخ آن‌ها در برابر بارهای جانبی دینامیکی همواره یکی از اهداف مهندسی سازه می‌باشد. یکی از توسعه یافته‌ترین روش‌های کاهش پاسخ سازه‌ها تحت ارتعاشات استفاده از سیستم‌های کنترل غیرفعال است. میراگر مایع تنظیم شده (TLD) یکی از ابزارهای پرکاربرد سیستم‌های کنترلی غیرفعال می‌باشد. در این پژوهش عملکرد میراگر مایع تنظیم شده تحت ۱۴ رکورد زلزله حوزه دور و حوزه نزدیک در نرم افزار انسیس مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور بررسی عملکرد میراگر مایع تنظیم شده در کاهش پاسخ‌های جابجایی، شتاب و سرعت ساختمان معیار مورد بررسی، چهار پارامتر طول مخزن، ارتفاع آب، نسبت آب و نسبت جرم (مجموعاً در ۲۷ طراحی متفاوت براساس روابط به فرم بسته موجود در ادبیات فنی) مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نتایج بدست آمده مخزن مکعبی با نسبت آب ۰/۳۷۵ و نسبت جرم ۵ درصد تحت رکوردهای حوزه نزدیک و نسبت آب ۰/۱۲۵ و نسبت جرم ۵ درصد تحت رکوردهای حوزه دور در مقایسه با سایر حالت‌ها عملکرد بهتری داشته است. به صورت کلی هرچه نسبت جرم بیشتر باشد عملکرد میراگر در کلیه شاخص‌های مورد بررسی و در بین حالت‌های در نظر گرفته شده بهتر بوده است و همچنین کاهش پاسخ‌ها در شتاب بهتر از سرعت و در سرعت بهتر از جابجایی می‌باشد.

کلمات کلیدی: کنترل غیر فعال، میراگر مایع تنظیم شده، تحلیل پارامتری، زلزله حوزه دور و نزدیک، انسیس

سابقه مقاله:		شناسه دیجیتال:			
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	doi:
۱۳۹۹/۰۶/۲۱	۱۳۹۹/۰۹/۱۰	۱۳۹۹/۱۱/۰۱	۱۳۹۹/۱۱/۰۱	۱۴۰۰/۱۱/۳۰	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.247591.2236
*نویسنده مسئول:		مازیار فهیمی فرزام			
پست الکترونیکی:		m.farzam@maragheh.ac.ir			

<sup>1</sup> Tuned Liquid Damper

## ۱- مقدمه

با افزایش ارتفاع و انعطاف پذیری ساختمان‌ها حساسیت آن‌ها در برابر بارهای دینامیکی جانبی افزایش می‌یابد. در سالیان اخیر روش‌های متعددی برای کنترل ارتعاشات ساختمان‌ها و بهبود عملکرد آن‌ها در برابر بارهای دینامیکی توسعه یافته است. به طور کل سیستم‌های کنترلی را می‌توان به چهار دسته غیرفعال، فعال، نیمه فعال و ترکیبی تقسیم نمود [۱، ۲]. سیستم‌های کنترل غیرفعال به دلیل سادگی اجرا، قابلیت اعتماد بالا، پایداری و عدم نیاز به انرژی خارجی توسعه یافته‌ترین ابزار کنترل می‌باشند و به سه دسته اتلاف کننده‌های انرژی، میراگرهای تنظیم شده و جداسازهای لرزه‌ای تقسیم می‌شوند. میراگرهای تنظیم شده به دو نوع میراگر جرمی تنظیم شده (TMD)<sup>۲</sup> و میراگر مایع تنظیم شده دسته بندی می‌شوند [۳].

سیستم میراگر مایع تنظیم شده از یک یا چند مخزن حاوی سیال تشکیل می‌شود و با توجه به مزایای متعدد میراگرهای مایع تنظیم شده این ابزار کنترل یکی از پرکاربردترین ابزارهای کنترل غیرفعال می‌باشند. ایده استفاده از میراگرهای مایع تنظیم شده برای اولین بار در سال ۱۹۶۶ مطرح شد و توسط بوت<sup>۳</sup> و کوال<sup>۴</sup> در فضاپیماها [۴] و همچنین توسط واندیوار<sup>۵</sup> در سکوها دریایی مورد استفاده قرار گرفته است [۵]. به دلیل رفتار غیرخطی میراگرهای سیال تنظیم شده روش‌های تجربی، تحلیلی و عددی مختلفی به منظور بررسی عملکرد آن‌ها مورد استفاده قرار گرفته است.

لی<sup>۶</sup> و همکاران در سال ۲۰۰۲ مدل ساده و جدیدی از میراگر را با استفاده از معادلات ممنتوم و پیوسته سیالاتی به صورت تحلیلی بیان نموده‌اند. این مدل مسائل سه بعدی را به مسائل یک بعدی تبدیل کرده و باعث کاهش حجم محاسبات شده است، آن‌ها همچنین به بررسی نسبت عمق آب این نوع از میراگرها پرداخته‌اند [۶]. در سال ۲۰۱۰ ترکی و حلییان رفتار میراگر مایع تنظیم شده واقع بر یک ساختمان برشی ۱۰ طبقه را با معادل سازی رفتار TLD به TMD تحت ۴ رکورد زلزله مورد بررسی قرار داده‌اند [۷]. سرخابی و همکاران به بررسی رفتار دینامیکی و عملکرد یک میراگر مایع تنظیم شده با استفاده از شبیه سازی ترکیبی با بازده فوری پرداخته‌اند، همچنین پارامترهای میراگر شامل نسبت جرمی و فرکانس را مورد ارزیابی قرار داده‌اند [۸]. شکرگذار و همکاران در سال ۲۰۱۶ رفتار دو میراگر مایع تنظیم شده و میراگر جرمی تنظیم شده واقع بر بام یک ساختمان ۲۴ طبقه با سیستم قاب خمشی را مورد بررسی قرار دادند، آن‌ها سازه، TLD و TMD را تحت زلزله‌های حوزه دور و نزدیک با استفاده از نرم افزار SAP2000 مدل سازی نمودند و به بررسی و مقایسه عملکرد این دو میراگر پرداخته‌اند. با توجه به نتایج بدست آمده سازه کنترل شده با TMD عملکرد بهتری نسبت به TLD داشته است [۹]. ژانگ<sup>۷</sup> در سال ۲۰۲۰ به بررسی خصوصیات مدل تلاطم سیال یک میراگر مایع تنظیم شده با سطح شیبدار با استفاده از روش تفاضل محدود پرداخته است [۱۰]. تلاطم و حرکت سیال درون مخزن، انرژی ورودی ناشی از ارتعاشات سازه را اتلاف نموده و باعث کنترل سازه می‌شود، به همین دلیل یکی از موارد حائز اهمیت در بحث بهبود رفتار میراگرهای مایع اتلاف انرژی می‌باشد. استفاده از پره‌ها در میراگر باعث اتلاف انرژی بیشتر می‌شود به همین منظور عنایتی و زهرایی در سال ۲۰۱۸ به بررسی رفتار ساختمان کنترل شده توسط یک میراگر مایع با پره قابل تنظیم پرداخته‌اند و عملکرد لرزه‌ای ساختمان را با تغییر زوایای پره‌ها مورد مطالعه قرار داده‌اند [۱۱].

تغییر در ابعاد و هندسه مخازن میراگرهای مایع تنظیم شده باعث بهبود رفتاری میراگرها تحت ارتعاشات می‌شود، به همین منظور مطالعات گسترده‌ای در این خصوص صورت گرفته است. فرشیدیان فر و همکاران در سال ۲۰۰۹، میراگر مایع ستونی تنظیم شده واقع بر یک سازه ۷۵ طبقه را تحلیل پارامتری کرده‌اند، آن‌ها نسبت جرمی، نسبت آب و نسبت میرایی میراگر را در حالت‌های متفاوت مورد بررسی قرار دادند [۱۲]. گائو<sup>۸</sup> و همکاران عملکرد میراگرهای ستونی مایع تنظیم شده (TLCD)<sup>۹</sup> را مورد بررسی قرار داده‌اند، آن‌ها با تغییر در سطح مقطع میراگر و بررسی پارامترهای بهینه آن و همچنین معرفی شکل جدیدی از TLCD رفتار میراگرها را بهبود بخشیده‌اند [۱۳].

<sup>۲</sup> Tuned Mass Damper

<sup>۳</sup> Bhuta

<sup>۴</sup> Koval

<sup>۵</sup> Vandiver

<sup>۶</sup> Li

<sup>۷</sup> Zhang

<sup>۸</sup> Gao

<sup>۹</sup> Tuned Liquid Damper

همچنین در سال ۲۰۱۰، سه میراگر مایع تنظیم شده به صورت مستطیل، استوانه افقی و استوانه عمودی با استفاده از یک مدل مکانیکی معادل توسط تیت<sup>۱۰</sup> و دنگ<sup>۱۱</sup> مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نتایج بدست آمده میراگر استوانه افقی عملکرد بهتری نسبت به دو شکل دیگر داشته است [۱۴]. مخزنی با سطح شیبدار تحت شش رکورد زمین لرزه با محتوای فرکانس پایین، متوسط و زیاد به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفته است. در مطالعه ذکر شده اثر مستقیم تغییر هندسه مخزن بر پارامترهایی از قبیل لنگر پایه، توزیع فشار هیدرودینامیکی و مولفه‌های همرفتی و ضربه‌ای نیروی برشی پایه مورد مطالعه قرار گرفته است [۱۵، ۱۶]. همچنین در سال ۲۰۲۰ پاندیت<sup>۱۲</sup> و بیسوال<sup>۱۳</sup> یک سازه چند درجه آزادی را به صورت جرم و فنر و یک میراگر مایع تنظیم شده با کف شیبدار را به صورت المان محدود تحت سه رکورد با فرکانس‌های متنوع و نسبت جرم‌های متفاوت مورد بررسی قرار دادند، با توجه به نتایج بدست آمده افزایش نسبت جرم تا ۲ درصد میرایی را افزایش داده و به مراتب کارایی میراگر را بهبود می‌بخشد، همچنین پاسخ‌های سازه تحت رکوردهایی با فرکانس پایین نسبت به فرکانس‌های بالا کاهش بیشتری داشته است [۱۷]. یکی دیگر از روش‌های موثر و پرکاربرد در بهبود عملکردی میراگرها بهینه‌یابی می‌باشد، هدف از بهینه‌یابی یافتن بهترین جواب قابل قبول با توجه به محدودیت‌ها و نیازهای مسئله است.

ملک قاسمی در سال ۲۰۱۱ به بررسی پارامترهای تاثیر گذار در بهبود عملکردی میراگرهای مایع پرداخته است و همچنین پارامترهای مورد نظر را بهینه‌یابی نموده است [۱۸]. در سال ۲۰۱۶ چاکرابورتی<sup>۱۴</sup> و دبیرما<sup>۱۵</sup> با استفاده از بهینه‌یابی طراحی مقاوم (RDO)<sup>۱۶</sup> پارامترهای یک میراگر ستونی مایع تنظیم شده را بهینه‌یابی نمودند. روش پیشنهادی آن‌ها حداکثر ریشه میانگین مربع جابجایی سازه (RMSD)<sup>۱۷</sup> و پراکندگی RMSD را کاهش داده است. اثر عدم قطعیت موجود در خصوصیات سازه و میراگر بر عملکرد میراگر سیال می‌تواند قابل توجه باشد، لذا محققان بسیاری روش‌های متعددی را برای محاسبه شاخص اعتماد کلی سازه‌ها و نقش آن بر روی پاسخ‌های بدست آمده از تحلیل را مورد مطالعه قرار داده‌اند [۱۹، ۲۰]. در سال ۲۰۱۹، خانگ<sup>۱۸</sup> و همکاران از روش تاگوچی به منظور تعیین پارامترهای بهینه میراگر مایع تنظیم شده چندگانه استفاده کرده‌اند. در این مطالعه اندرکنش سازه و میراگر به صورت عددی و با استفاده از تئوری موج کم عمق آب شبیه‌سازی شده است [۲۱]. در سال ۲۰۱۹، نوع جدیدی از میراگرهای مایع تنظیم شده توسط پاندی<sup>۱۹</sup> و همکاران مورد بررسی قرار گرفت. اتصال میراگر به سازه در مطالعه پاندی به صورت یک اتصال انعطاف پذیر پیشنهاد شد [۲۲].

در مطالعات گذشته عملکرد لرزه‌ای میراگر سیال تنظیم شده با در نظر گرفتن فرضیات متعدد در مدلسازی رفتار میراگر، سازه و تحریک زلزله بررسی شده است. در این مطالعات به طور معمول مدلسازی سازه به صورت ساختمان برشی و یا تک درجه آزادی انجام شده است. همچنین پارامترهای مورد بررسی در این مطالعات محدود بوده و بررسی عملکرد کنترل تحت تعداد محدودی از رکوردهای زلزله انجام شده است. در این پژوهش یک ساختمان معیار پنج طبقه تحت ۷ رکورد زلزله حوزه دور و ۷ رکورد زلزله حوزه نزدیک مورد بررسی قرار گرفته است. مواردی که بررسی همزمان آن‌ها این پژوهش را نسبت به سایر مطالعات متمایز کرده است، عبارت‌اند از: (۱) استفاده از تعداد مناسبی رکورد از دو حوزه دور و نزدیک (۷ رکورد حوزه دور و ۷ رکورد حوزه نزدیک) و بررسی پاسخ‌های مختلف سازه معیار تحت این رکوردها. (۲) بررسی و تحلیل پارامترهای تاثیرگذار در طراحی میراگر از قبیل: نسبت آب، نسبت جرم، عمق آب و طول میراگر. (۳) مدلسازی حرکت و تلاطم غیرخطی سیال درون مخزن میراگر مایع تنظیم شده و در نظر گرفتن صریح اندرکنش سیال و سازه. در ادامه و در بخش دوم این مطالعه رکوردها و سازه معیار معرفی شده است، سپس در بخش سوم روند طراحی میراگر سیال موجود در ادبیات فنی شرح داده شده است. در بخش چهارم صحت سنجی و در بخش پنجم پارامترهای مورد مطالعه و محدوده آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته است و در نهایت سعی شده است در بخش ششم نتایج بدست آمده از ۲۷ حالت متفاوت میراگر تحت ۱۴ رکورد مطرح شده مورد بررسی قرار گیرد و نتیجه‌گیری جامعی از تحلیل‌های صورت گرفته ارائه شود.

<sup>10</sup> Tait

<sup>11</sup> Deng

<sup>12</sup> Pandit

<sup>13</sup> Biswal

<sup>14</sup> Chakraborty

<sup>15</sup> Debbarma

<sup>16</sup> Robust Design Optimization

<sup>17</sup> Root Mean Square Displacement

<sup>18</sup> Khang

<sup>19</sup> Pandey

## ۲- رکوردهای مورد استفاده و مدل سازه معیار

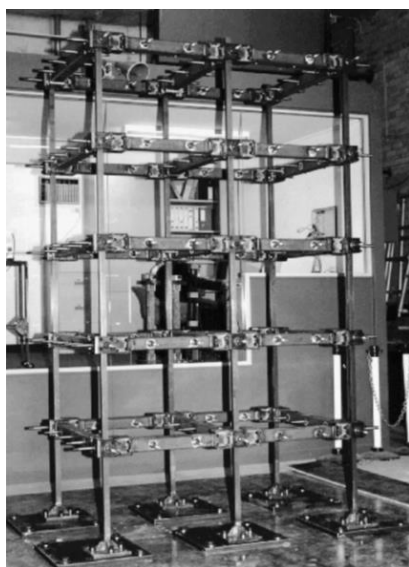
سازه در نظر گرفته شده در این مطالعه یک ساختمان معیار پنج طبقه می باشد [۲۳، ۲۴] و یکی از مدل های معیار پذیرفته شده توسط انجمن بین المللی کنترل سازه IASC<sup>۲۰</sup> است. این انجمن در اوایل دهه ۹۰ میلادی به منظور همکاری محققان بین المللی در دستیابی به مطالعات مبنا در زمینه کنترل سازه تشکیل شد. همچنین این انجمن چهار رکورد زلزله معیار را با هدف بررسی عملکرد سیستم های کنترلی تحت زمین لرزه معرفی کرده است. در این مطالعه با توجه به محدود بودن تعداد رکوردهای معیار پیشنهادی انجمن IASC، و به منظور بررسی اثر عدم قطعیت موجود در محتوی فرکانسی رکوردهای مختلف بر عملکرد میراگر از مجموعه رکوردهای با ویژگی های حوزه دور و نزدیک که در مطالعات عملکرد لرزه ای سیستم های کنترلی در ادبیات فنی موجود است نیز استفاده شده است [۲۵]. اطلاعات مربوط به شتاب نگاشت های مورد استفاده در جدول ۱ آورده شده است، تمامی رکوردها به مقدار حداکثر  $0.3g$  مقیاس شده اند.

در سازه معیار مورد بررسی [۲۴]، تیرها از قوطی فولادی به ابعاد  $75 \times 75 \times 4$  میلی متری و ستون ها از مقطع مربعی  $25 \times 25$  تشکیل شده اند. ارتفاع طبقه اول  $0.8$  متر و سایر طبقات  $0.7$  متر می باشند. تمامی اتصالات تیر-ستون به جز طبقه اول و سوم به صورت گیردار فرض شده است و اتصال تیر-ستون این دو طبقه مفصلی در نظر گرفته شده است. جرمی برابر با  $127$  کیلوگرم و  $617$  کیلوگرم به طبقات چهارم و پنجم وارد می شود و جرم کل اسکلت سازه  $352.5$  کیلوگرم می باشد (شکل ۱ پلان و نمای ۳ بعدی از سازه شاخص مورد استفاده IASC را نشان می دهد). سازه مورد بررسی به صورت آزمایشگاهی مدلسازی شده است و به منظور یک نتیجه گیری کلی از عملکرد میراگر مایع تنظیم شده و تعمیم نتایج آن به سازه با مقیاس واقعی سعی شده است در ارائه بخشی از نتیجه گیری ها، پارامترهای ورودی و پاسخ های خروجی بدست آمده به صورت بی بعد در نظر گرفته شوند.

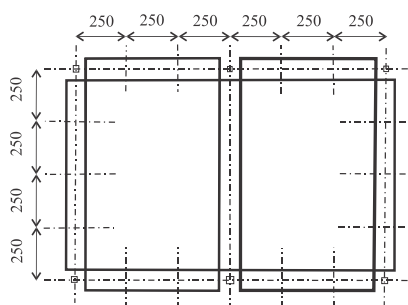
جدول ۱: مشخصات رکوردهای مورد استفاده مطالعه [۲۵].

No	Year	Earthquake	Station	PGA (g)	PGV (cm/sec)	PGD (cm)
<b>Near-Fault Records (Forward-Rupture Directivity)</b>						
1	1992	Cape Mendocino	Petrolia	0.66	90.16	28.89
2	1994	Northridge	Olive View	0.84	130.37	31.72
3	1992	Erzincan	Erzincan	0.50	64.32	21.93
4	2004	Parkfield	Fault Zone 1	0.50	64.15	12.64
5	1984	Morgan Hill	Anderson Dam	0.29	28.00	12.19
6	1979	Imperial-Valley	Brawley Airport	0.16	35.85	22.39
7	1994	Northridge	SCH	0.82	126.86	30.12
<b>Far-Fault Records</b>						
8	1952	Kern County	Taft	0.18	17.50	8.79
9	1979	Imperial Valley	Calexico	0.27	21.24	9.03
10	1989	Loma Prieta	Presidio	0.10	12.91	4.32
11	1994	Northridge	Century CCC	0.26	21.19	7.85
12	1994	Northridge	Montebello	0.18	9.41	1.51
13	1971	San Fernando	Castaic	0.27	25.90	4.87
14	1940	Elcentro	Elcentro	0.34	37.38	22.80

<sup>۲۰</sup> International Association of Structural Control



(a)



(b)

شکل ۱: (a) قاب فولادی و (b) پلان ساختمان معیار پنج طبقه (برگرفته از مطالعه سامالی و آل داوود [۲۴]).

### ۳- مدل سازی میراگر مایع تنظیم شده

حرکت سیال درون TLD را می توان با استفاده از معادله جریان و بر مبنای دو معادله زیر مدل سازی نمود. این دو معادله باید به طور همزمان حل شوند:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial(uP)}{\partial x} + g(h + \eta) \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left( \nu_t \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{gP|P|}{C^2(h + \eta)^2} = 0 \quad (2)$$

در معادله اول (معادله پیوستگی)  $\eta$  مقدار بالآمدگی آب نسبت به تراز اولیه و  $P$  میزان دبی در واحد عرض می باشد و از رابطه ۳ بدست می آید، همچنین  $h$ ،  $\nu_t$ ،  $g$  و  $C$  و  $u$  به ترتیب ارتفاع سطح اولیه آب، شتاب گرانش، ضریب پخش، ضریب شزی و سرعت در واحد عرض است.

$$P = u(h + \eta) \quad (3)$$

در مطالعه بانرجی و همکاران در سال ۲۰۰۰ و رضایی و همکاران در سال ۲۰۱۴، به منظور طراحی یک میراگر مایع تنظیم شده چهار گام به شرح زیر پیشنهاد شده است [۲۶، ۲۷]:

۱. تعیین فرکانس سازه ( $\omega_s$ ) و تعیین فرکانس پایه ای خطی تلاطم آب ( $\omega_1$ )، که به طور معمول برابر هم در نظر گرفته می شود.
۲. طول مخزن  $2a$  در مخازن مکعبی از رابطه ۴ بدست می آید:

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{\pi g}{2a} \tanh\left(\frac{\pi h}{2a}\right)} = \sqrt{\frac{\pi g}{2a} \tanh(\pi \Delta)} \quad (4)$$

همانطور که در این روابط مشاهده می شود نسبت آب (نسبت ارتفاع سیال به طول مخزن) با  $\Delta$  نشان داده می شود و مقدار مناسب آن در بازه (۰/۰۵ تا ۰/۳) می باشد [۲۶].

۳. جرم آب درون مخزن از فرمول  $m_l = 2\rho h a b$  محاسبه می شود که  $\rho$  جرم حجمی سیال می باشد. می توان با کمک جرم سیال ( $m_l$ ) و جرم سازه ( $m_s$ ) عرض مخزن ( $b$ ) را با توجه به رابطه  $\mu = \frac{m_l}{m_s}$  بدست آورد. نسبت جرمی ( $\mu$ ) به طور معمول بین ۱ الی ۴ درصد انتخاب می شود و با توجه به مقدار  $\Delta$  بدست می آید. در صورتی که نسبت آب مقداری بیش از ۰/۱۵ باشد میراگر عمیق و مقداری کمتر از ۰/۱۵ را داشته باشد میراگری کم عمق فرض می شود.

#### ۴- صحت سنجی

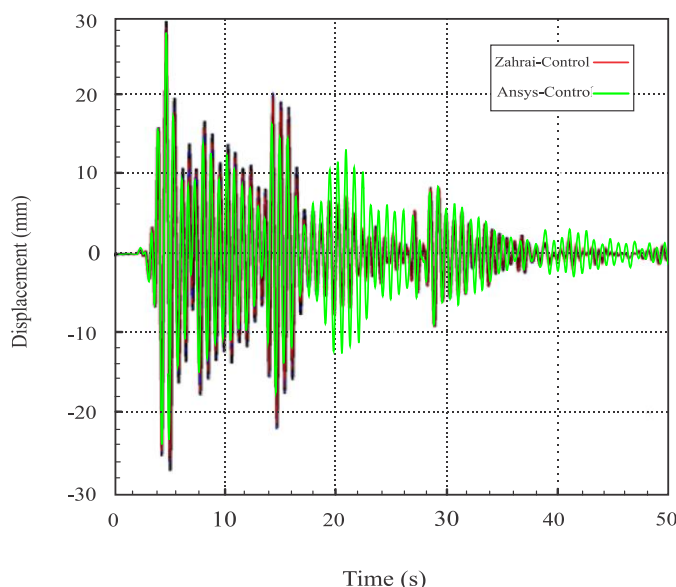
به منظور بررسی صحت مدلسازی در نرم افزار انسیس، از نتایج مقاله دکتر زهرایی و همکاران استفاده شده است [۲۴]. در مطالعه زهرایی و همکاران ساختمان معیار پنج طبقه تحت بارهای دینامیکی مورد بررسی قرار گرفته است و به منظور کنترل ارتعاشات از یک میراگر مایع تنظیم شده همراه با پره های قابل تنظیم استفاده شده است. همانطور که در بخش دوم ذکر شد سازه ی مورد بررسی در این پژوهش برگرفته از مطالعه زهرایی و همکاران می باشد و مشخصات سازه ای که در این قسمت صحت سنجی می شود کاملاً مشابه مشخصات سازه معرفی شده در بخش دوم است. شش مد اول سازه با میرایی ذاتی ۲ درصد در جدول ۲ آورده شده است. میراگر مایع تنظیم شده زهرایی و همکاران با ارتفاع آب ۶۳ میلی متر و پره هایی با زاویه صفر درجه در نرم افزار انسیس مدلسازی شد. جابجایی سازه معیار کنترل نشده و کنترل شده مطالعه زهرایی و همکاران و مطالعه حاضر (نرم افزار انسیس) و خطای موجود این دو روش تحت رکورد السنترو با مقیاس ۰/۲۸ در جدول ۳ آورده شده است، همچنین در شکل ۲ تاریخچه زمانی جابجایی بام مشاهده می شود. با توجه به نتایج بدست آمده میزان خطای موجود بین این دو روش قابل قبول می باشد.

جدول ۲: صحت سنجی فرکانس های ساختمان معیار پنج طبقه.

شماره مدها	مد ۱	مد ۲	مد ۳	مد ۴	مد ۵	مد ۶
زهرایی و همکاران	۱,۳۹۱	۲,۷۵	۲,۷۶۶	۸,۰۶	۱۲,۸۰۸	۱۳,۱۶۹
نرم افزار انسیس	۱,۳۴۷	۲,۵۴	۲,۶۴۷	۷,۷	۱۱,۷۳۷	۱۲,۸۳

جدول ۳: صحت سنجی جابجایی بام ساختمان معیار پنج طبقه تحت رکورد السنترو با مقیاس ۰/۲۸

جابجایی بام (mm)		
کنترل نشده	کنترل شده	
۲۹/۴	۲۸/۷	زهرایی و همکاران
۲۸/۹	۲۸	نرم افزار انسیس
۱/۷	۲/۴۳	خطا (درصد)



شکل ۲: صحت‌سنجی جابجایی بیشینه ساختمان معیار پنج طبقه تحت رکورد السنتر و با مقیاس ۲۸ درصد.

## ۵- تحلیل پارامتری

در این مطالعه سعی شده است با تحلیل پارامتری، اثر پارامترهای تاثیرگذار بر عملکرد لرزه‌ای میراگر سیال مورد بررسی قرار گیرد. به منظور بررسی اثر چهار پارامتر طول مخزن، ارتفاع آب، نسبت آب و نسبت جرم در عملکرد میراگرهای مایع تنظیم شده، ۲۷ نوع میراگر با هندسه‌های متفاوت مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. همانطور که در بخش سوم مطالعه بیان شده است، ابعاد میراگر مایع تنظیم شده با استفاده از دو پارامتر اصلی نسبت آب (نسبت ارتفاع سیال به طول مخزن) و نسبت جرم (نسبت جرم سیال به جرم سازه) بدست می‌آید. با توجه به مقادیر مورد نظر برای پارامتر نسبت آب، مقادیر طول مخزن با توجه به هندسه سازه برابر  $0.06$  و  $1/5$  متر در نظر گرفته شده است و به منظور ایجاد نسبت‌های آب مناسب و پیشنهاد شده در ادبیات فنی ارتفاع آب  $7/5$  و  $15$  و  $22/5$  سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. بر اساس مقادیر طول مخزن و عمق آب در نظر گرفته شده ۸ نسبت آب مختلف  $0.05$ ،  $0.075$ ،  $0.1$ ،  $0.125$ ،  $0.15$ ،  $0.225$ ،  $0.25$  و  $0.375$  بدست آمده که هر دو محدوده میراگر عمیق و کم عمق را پوشش می‌دهد. در بررسی پارامتری مورد نظر سه نسبت جرم  $0.1$ ،  $0.3$  و  $0.5$  در نظر گرفته شده است. حالت‌های مورد بررسی در جدول ۴ آورده شده است، در ضمن جنس تمامی مخازن مدل شده از پلاستیک فشرده<sup>۲۱</sup> با ضخامت ۱۶ میلی‌متر می‌باشد.

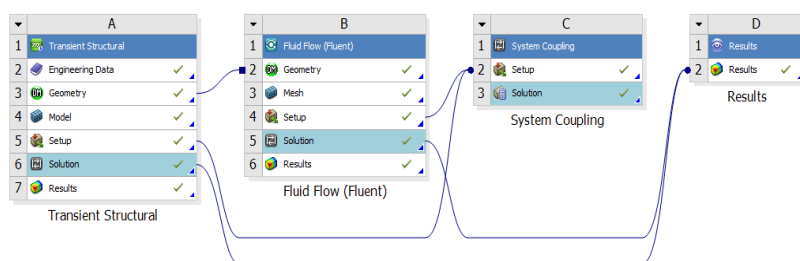
<sup>21</sup> Acrylic



جدول ۴: حالت‌های متفاوت با نسبت جرمی و نسبت آب‌های مختلف برای مخزن مکعبی.

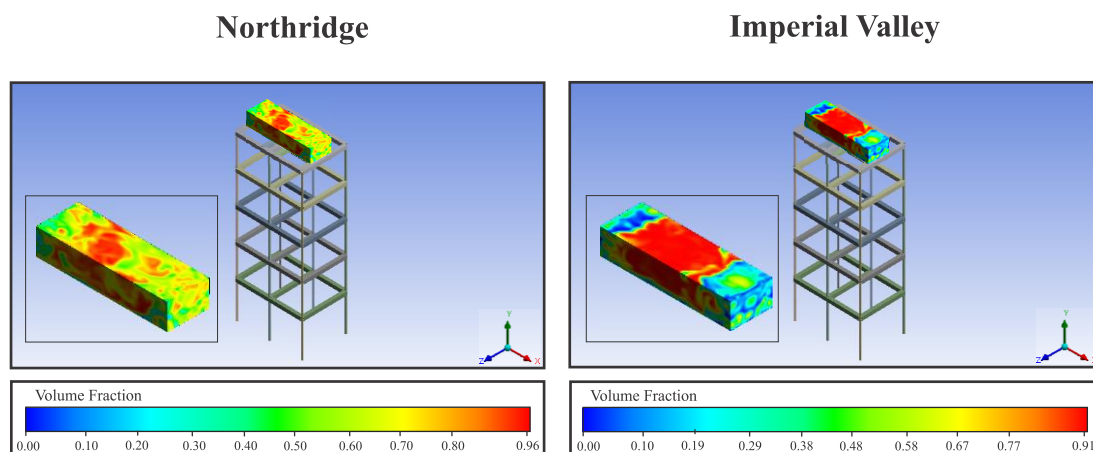
نسبت جرم ۱ درصد				نسبت جرم ۳ درصد				نسبت جرم ۵ درصد						
حالت	طول (متر)	ارتفاع آب (سانتی‌متر)	عرض (سانتی‌متر)	نسبت آب	حالت	طول (متر)	ارتفاع آب (سانتی‌متر)	عرض (سانتی‌متر)	نسبت آب	حالت	طول (متر)	ارتفاع آب (سانتی‌متر)	عرض (سانتی‌متر)	نسبت آب
۱		۷,۵	۹	۰,۰۵	۱۰		۷,۵	۲۹	۰,۰۵	۱۹		۷,۵	۴۸	۰,۰۵
۲	۱,۵	۱۵	۴	۰,۱	۱۱	۱,۵	۱۵	۱۴	۰,۱	۲۰	۱,۵	۱۵	۲۴	۰,۱
۳		۲۲,۵	۳	۰,۱۵	۱۲		۲۲,۵	۹	۰,۱۵	۲۱		۲۲,۵	۱۶	۰,۱۵
۴		۷,۵	۱۴	۰,۰۷۵	۱۳		۷,۵	۴۳	۰,۰۷۵	۲۲		۷,۵	۷۳	۰,۰۷۵
۵	۱	۱۵	۷	۰,۱۵	۱۴	۱	۱۵	۲۱	۰,۱۵	۲۳	۱	۱۵	۳۶	۰,۱۵
۶		۲۲,۵	۴	۰,۲۲۵	۱۵		۲۲,۵	۱۴	۰,۲۲۵	۲۴		۲۲,۵	۲۴	۰,۲۲۵
۷		۷,۵	۲۴	۰,۱۲۵	۱۶		۷,۵	۷۳	۰,۱۲۵	۲۵		۷,۵	۱۲۱	۰,۱۲۵
۸	۰,۶	۱۵	۱۲	۰,۲۵	۱۷	۰,۶	۱۵	۳۶	۰,۲۵	۲۶	۰,۶	۱۵	۶	۰,۲۵
۹		۲۲,۵	۸	۰,۳۷۵	۱۸		۲۲,۵	۲۴	۰,۳۷۵	۲۷		۲۲,۵	۴	۰,۳۷۵

در مطالعه ووروشکان<sup>۲۲</sup> و همکاران فاکتورهای موثر جهت بهبود عملکرد میراگرهای مایع تنظیم شده مورد بررسی قرار گرفت. آن‌ها اندرکنش سازه و سیال مورد بررسی را با استفاده از محیط نرم افزاری انسیس فلونت شبیه‌سازی کردند [۲۸]. در این مطالعه نیز سعی شده است با استفاده از قسمت‌ها و ماژول‌های مختلف نرم افزار انسیس مانند Transient Structural, Fluent و System Coupling به بررسی اندرکنش سازه و سیال مدل پرداخته شود [۲۹]. بعد از مدلسازی سازه و سیال به طور جداگانه در نرم افزار انسیس، این دو مدل با هم ترکیب شده و اندرکنش بین سازه و TLD مدل می‌شود. شکل ۳ نحوه لینک ماژول‌های مورد استفاده در مدلسازی سازه و میراگر را نشان می‌دهد.



شکل ۳: فضای ورک بنچ نرم افزار انسیس.

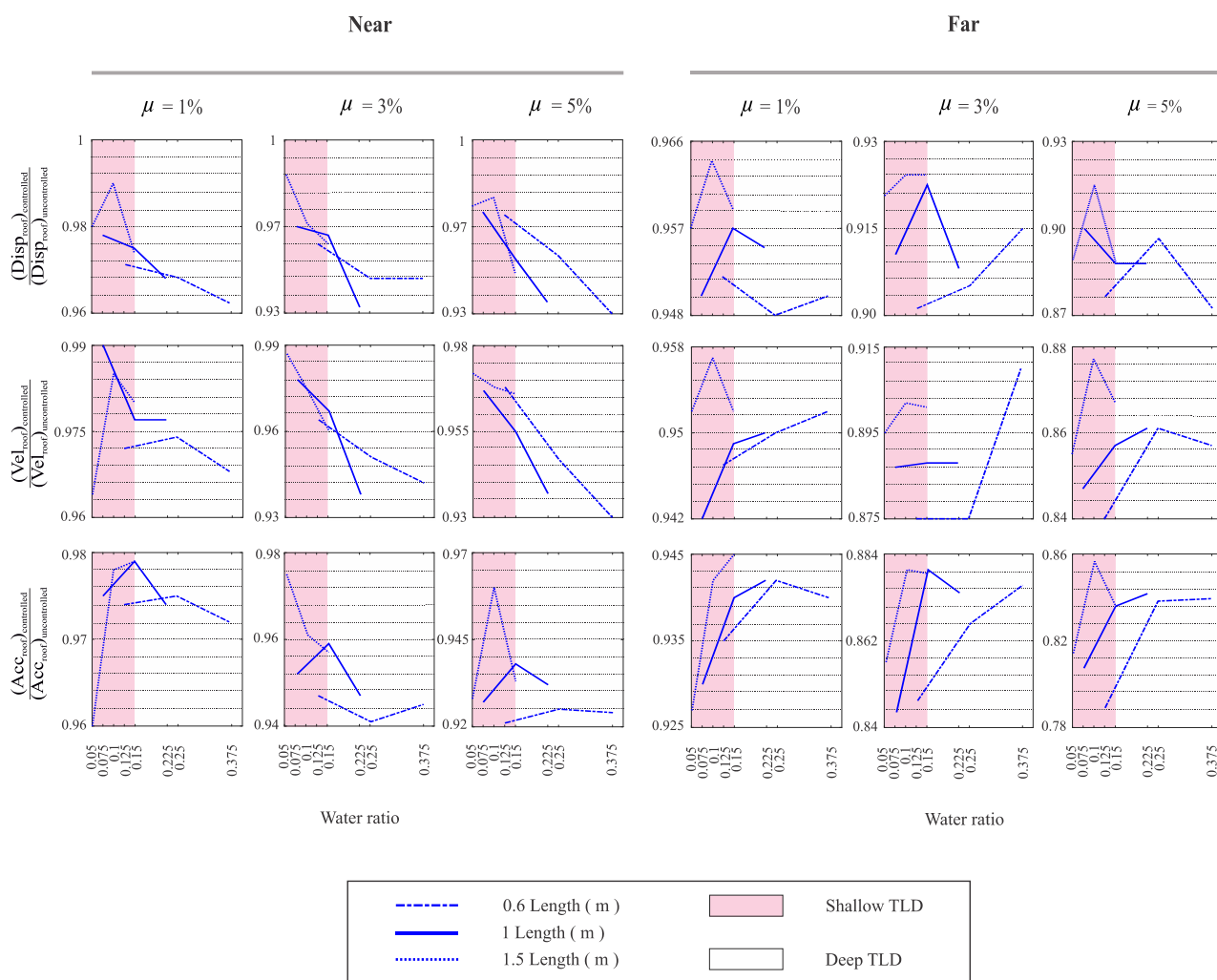
جریان متلاطم سیال مخزن مکعبی شکل تحت رکورد حوزه دور Imperial valley و رکورد حوزه نزدیک Northridge برای مخزن حالت ۱۹ در شکل ۴ نشان داده شده است. کانتورهای کسر حجمی سیال درون مخزن دو فاز (آب- هوا) و توزیع قطرات آب در مجاورت هوا در این شکل نشان داده شده است. رنگ قرمز نشان دهنده هوای درون مخزن می‌باشد، این مقدار هرچه به ۱ نزدیک شود حاکی از حضور هوا درون مخزن است. رنگ آبی، سیال به کار برده شده در شبیه‌سازی را توصیف می‌کند، مقدار کسر حجمی نشان دهنده حجم سیال نسبت به حجم کل است و هرچه به صفر نزدیکتر شود بیان کننده حضور سیال درون مخزن است. مرز بین آب و هوا توسط رنگ سبز روشن مشخص می‌شود و این رنگ نشان دهنده سطح تماس بین این دو فاز می‌باشد.



شکل ۴: تلاطم سیال درون مخزن میراگر تحت تحریک حوزه دور و نزدیک.

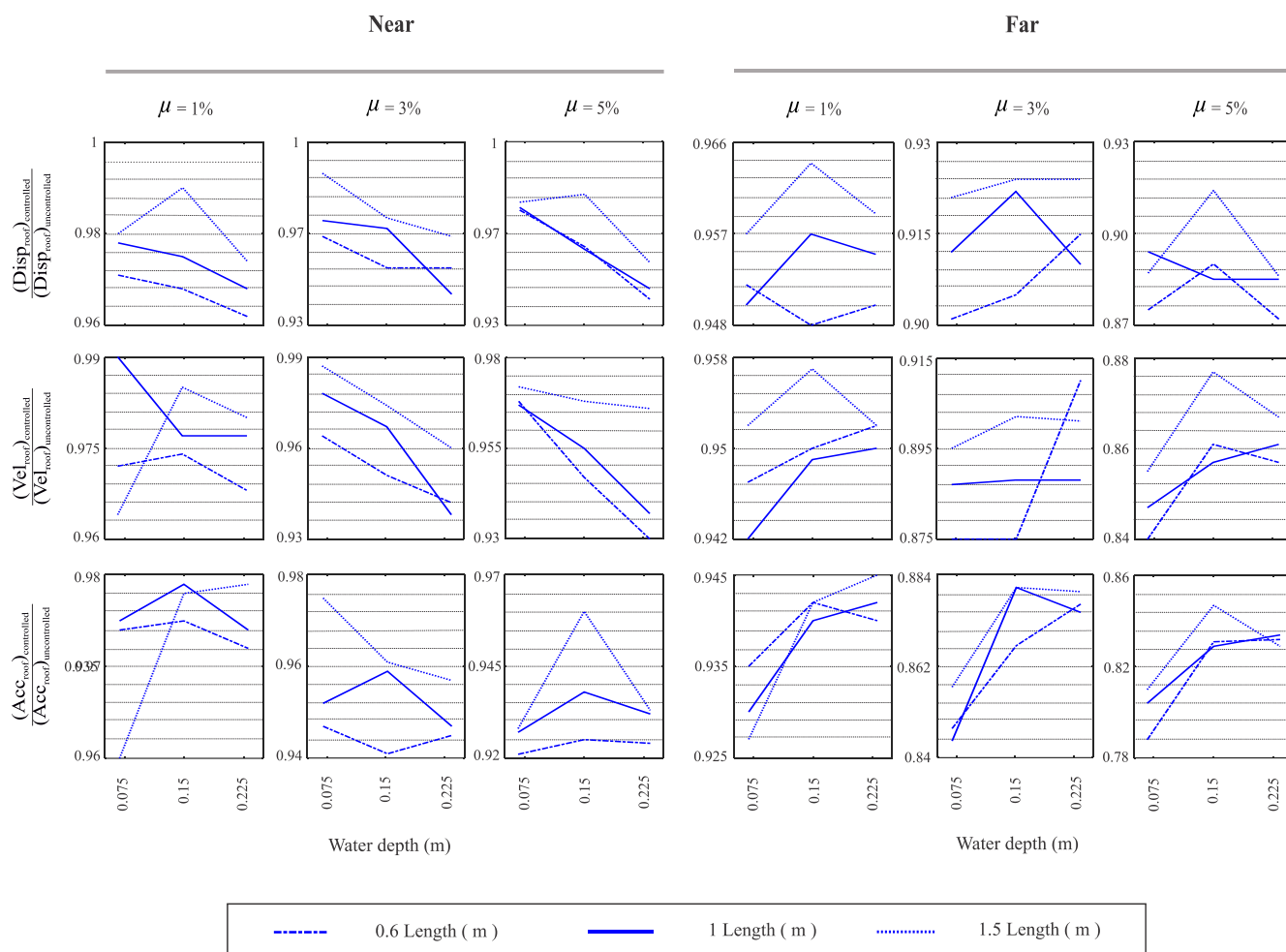
## ۶- بررسی نتایج

به منظور بررسی پارامترهای تاثیرگذار در عملکرد میراگر مایع تنظیم شده، میانگین پاسخ هر مجموعه ۷ تایی از رکوردهای حوزه دور و نزدیک در قالب نمودارهایی ارائه شده است. در شکل ۵ عملکرد طراحی‌های مختلف میراگر در کاهش جابجایی، سرعت و شتاب بام سازه تحت ۱۴ رکورد حوزه دور و نزدیک و برای سه نسبت جرمی مختلف نشان داده شده است. در این شکل محور افقی معرف نسبت‌های آب مختلف و محور قائم معرف نسبت میانگین پاسخ کنترل شده به کنترل نشده است. اگر نسبت آب مقداری بیش از ۰/۱۵ باشد میراگر عمیق و اگر مقداری کمتر از ۰/۱۵ را داشته باشد میراگری کم عمق فرض می‌شود، به همین منظور ناحیه مربوط به دو نوع میراگر کم عمق و عمیق به ترتیب با دو رنگ متفاوت صورتی و سفید بر روی نمودارهای شکل ۵ و ۷ مشخص شده است. در هر شکل عملکرد میراگر با سه طول مختلف ۰/۶، ۱ و ۱/۵ متر مورد بررسی قرار گرفته است. به صورت کلی و در هر سه معیار بررسی عملکرد، کلیه طراحی‌های مورد بررسی عملکرد مناسبی داشته‌اند البته عملکرد میراگر در کاهش پاسخ شتاب به مراتب بهتر از کاهش پاسخ سرعت و جابجایی می‌باشد. به طور کلی هرچه نسبت جرم افزایش می‌یابد، عملکرد میراگر بهتر می‌شود. همچنین تحت زلزله‌های حوزه دور و نزدیک به ترتیب کاهش افزایش نسبت آب برای میراگر با طول ثابت عملکرد آن را به صورت محسوسی بهبود داده است. هرچند در مواردی و به خصوص در کاهش پاسخ جابجایی تحت رکوردهای حوزه دور این روند کلی مشاهده نمی‌شود.



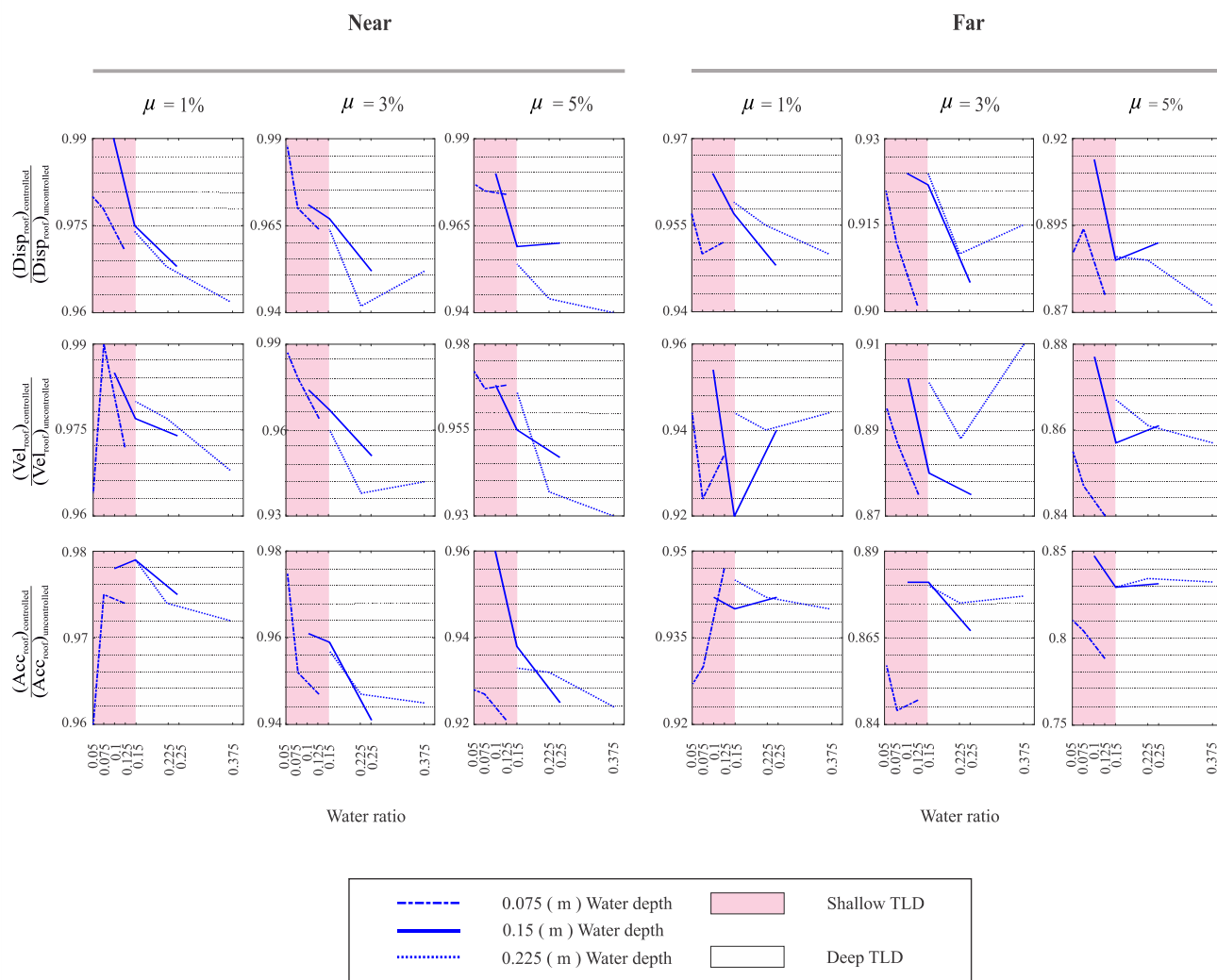
شکل ۵: نمودار پاسخ‌ها (جابجایی، سرعت و شتاب بام) - نسبت آب سازه معیار تحت رکوردهای دور و نزدیک.

در شکل ۶ عملکرد طرح‌های مختلف میراگر در کاهش پاسخ میانگین جابجایی، میانگین سرعت و میانگین شتاب بام سازه در ۱۸ نمودار تحت هر دسته ۷ تایی از زلزله‌های حوزه دور و نزدیک مورد بررسی قرار گرفته و برای ۳ نسبت جرمی ۱، ۳ و ۵ درصد نشان داده شده است. محور افقی نمودارها عمق آب و محور قائم معرف نسبت میانگین پاسخ کنترل شده به کنترل نشده می‌باشد. در هر شکل ۳ منحنی که هر کدام نشان دهنده یک طول مشخص برای میراگر می‌باشند مورد بررسی قرار گرفته است. همانطور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود برای میراگر با طول ثابت عملکرد میراگر تحت رکورد حوزه دور و نزدیک در کاهش پاسخ‌ها به ترتیب با کاهش و افزایش عمق آب بهتر شده است. با توجه به شکل ۶ و پاسخ‌های بدست آمده، در اکثر حالت‌های مورد بررسی کاهش طول در میراگرهایی با عمق آب ثابت باعث بهبود عملکرد میراگر می‌شود.



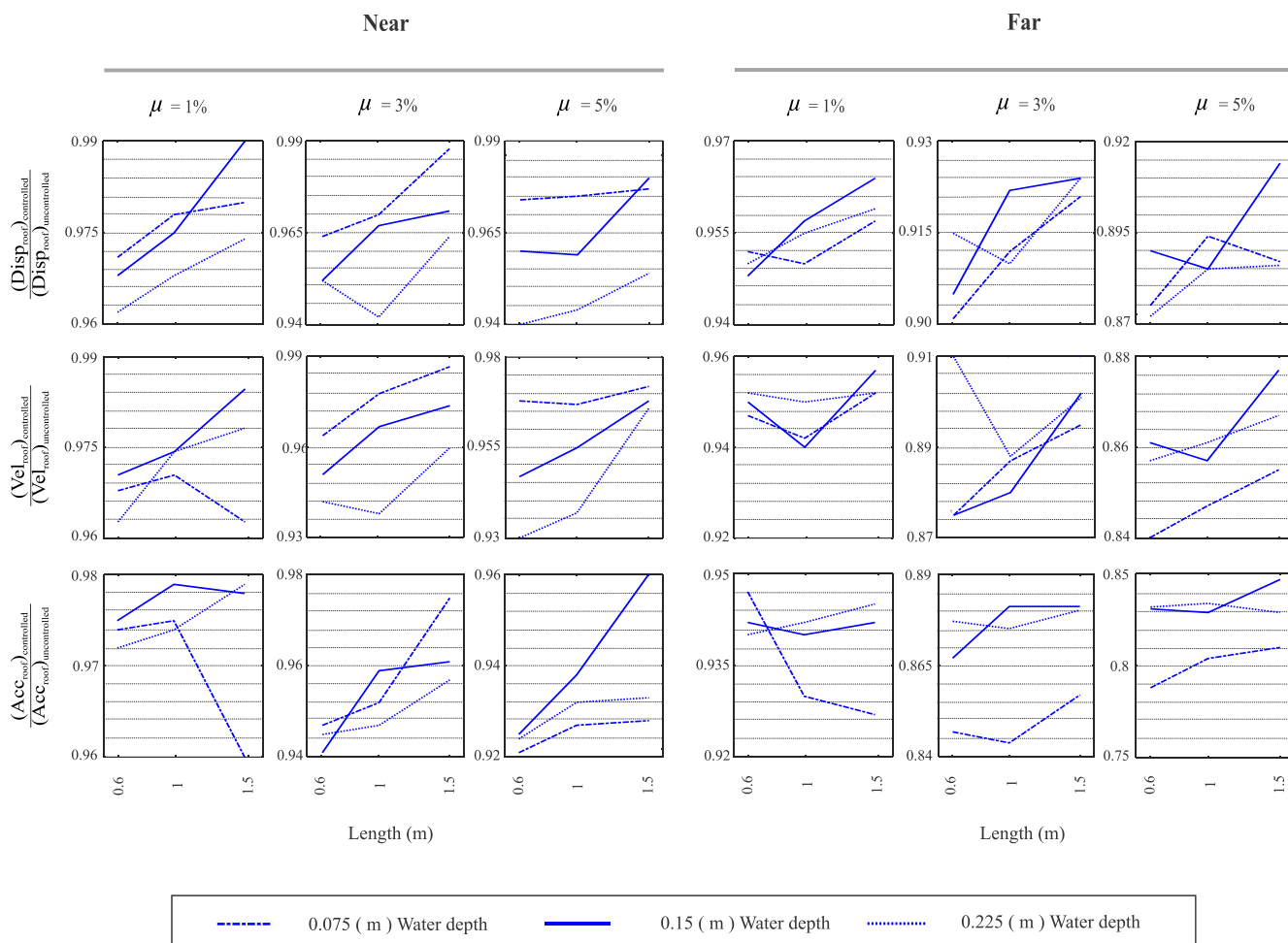
شکل ۶: نمودار پاسخ‌ها (جابجایی، سرعت و شتاب بام) - عمق آب سازه معیار تحت رکوردهای دور و نزدیک.

محور افقی نمودارها در شکل ۷ معرف نسبت آب و محور قائم معرف نسبت میانگین پاسخ کنترل شده به کنترل نشده می‌باشد. برای بررسی اثر مستقیم عمق آب بر عملکرد میراگر در این شکل در هر نمودار سه منحنی متناظر با سه عمق آب متفاوت ۰٫۷۵، ۱٫۵ و ۲٫۵ سانتی‌متری به ترتیب با خط-نقطه، خط توپر و خط چین نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود به صورت کلی و برای نسبت آب ثابت در اکثر حالت‌های مورد بررسی، کاهش عمق آب تحت رکوردهای حوزه دور و افزایش عمق آب تحت رکوردهای حوزه نزدیک باعث کاهش پاسخ‌های سازه می‌شود.



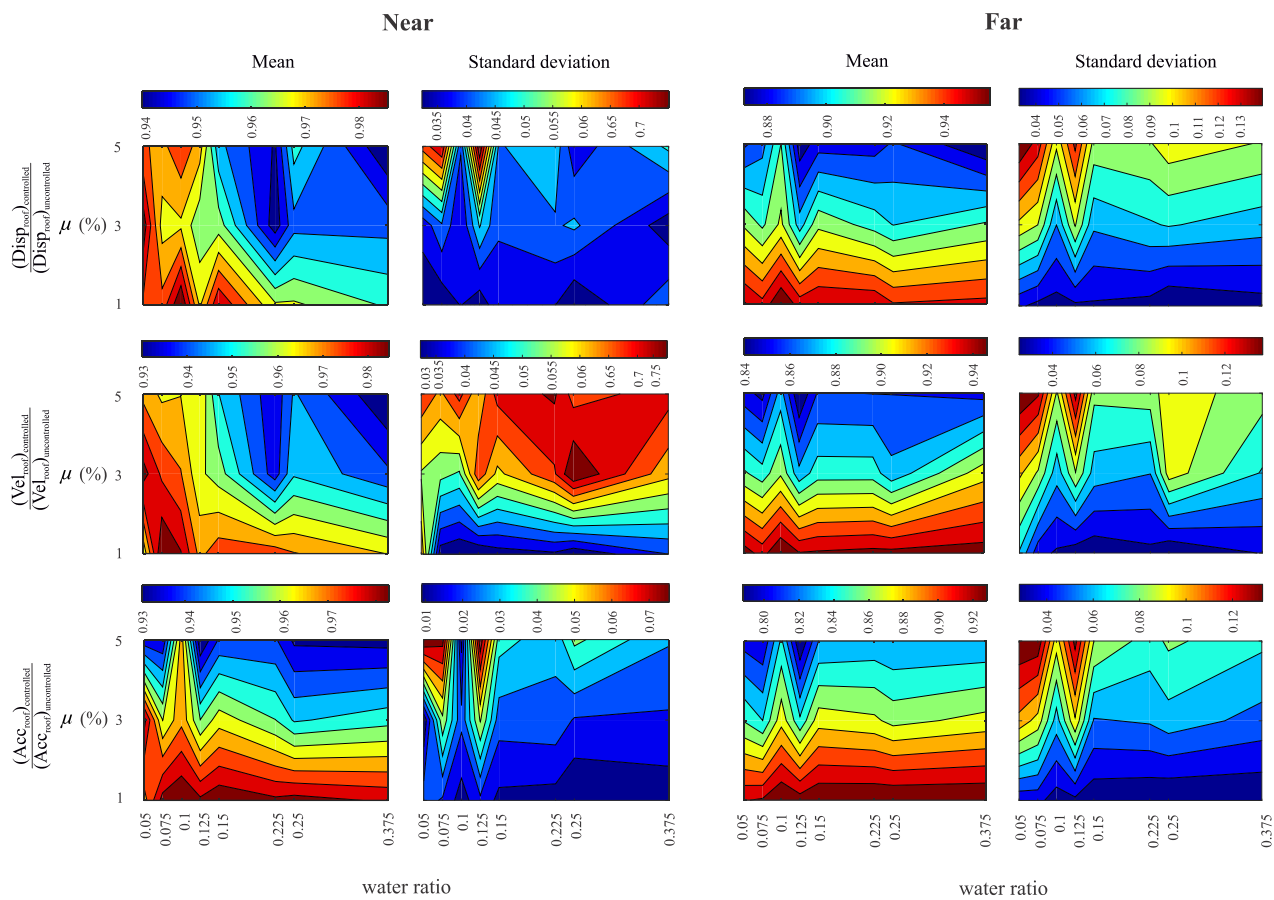
شکل ۷: نمودار پاسخها (جابجایی، سرعت و شتاب بام) -نسبت آب سازه معیار تحت رکوردهای دور و نزدیک.

شکل ۸ به منظور بررسی اثر مستقیم و همزمان طولهای مختلف مخزن و عمق آبهای متفاوت در کاهش میانگین جابجایی، سرعت و شتاب بام سازه ارائه شده است در این شکل محور افقی معرف سه طول متفاوت برای مخزن و محور قائم معرف نسبت میانگین پاسخ کنترل شده به کنترل نشده می باشد. در هر شکل سه منحنی برای سه عمق آب متفاوت رسم شده است. با توجه به شکل و همانطور که قبلا هم ذکر شد در زلزله های حوزه نزدیک کاهش طول و افزایش عمق آب باعث افزایش نسبت آب در مخازن می شود و در نهایت عملکرد میراگر را بهبود می بخشد.

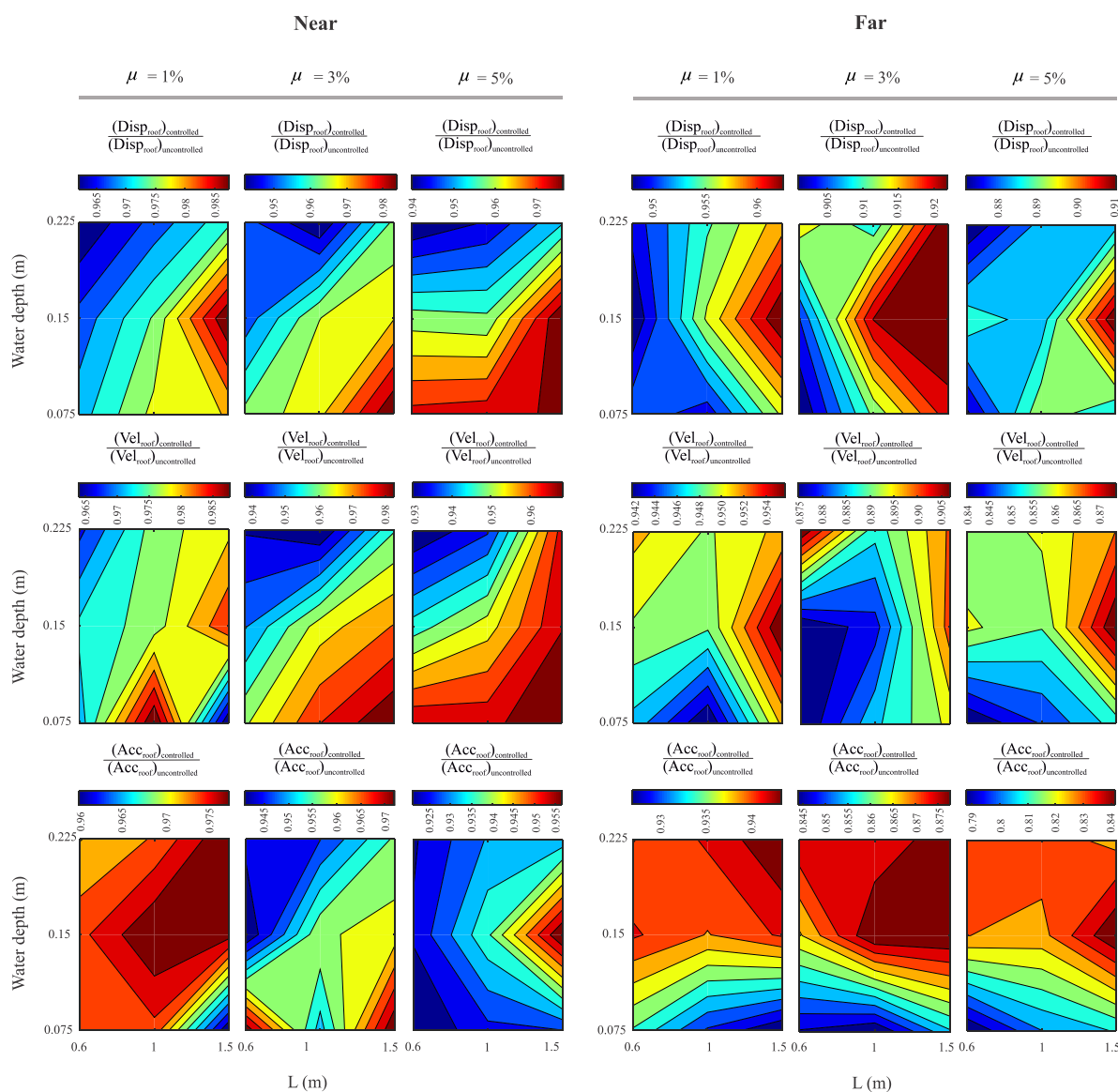


شکل ۸: نمودار پاسخ‌ها (جابجایی، سرعت و شتاب بام) - طول سازه معیار تحت رکوردهای دور و نزدیک.

به منظور ارائه نمودارهایی جهت بررسی همزمان اثر نسبت جرم و نسبت آب بر عملکرد میراگر سیال تنظیم شده و ارائه یک دید کامل از عملکرد میراگر در فضای مورد بررسی در شکل ۹ کانتورهای عملکرد میراگر به صورت میانگین و انحراف معیار پاسخ هر دسته ۷ تایی از رکوردهای حوزه دور و نزدیک در برابر نسبت آب (محور افقی) و نسبت جرم (محور قائم) نشان داده شده است. رنگ هر قسمت معرف نسبت میانگین پاسخ کنترل شده به کنترل نشده می‌باشد که مقدار این نسبت بی‌بعد بر روی هر نمودار نشان داده شده است، بی‌بعد کردن پارامترهای ورودی و پاسخ‌های خروجی‌های به منظور فراهم نمودن امکان تعمیم نتایج بدست آمده در مطالعه سازه‌های واقعی انجام شده است. به همین منظور در شکل ۹ تمامی پارامترهای ورودی و پاسخ‌های خروجی به صورت بی‌بعد ارائه شده است. همان‌طور که مشخص است بهترین عملکرد میراگر در محدوده بیشترین نسبت جرمی رخ داده است، همچنین نسبت آب ۰/۳۷۵ در زلزله‌های حوزه نزدیک و نسبت آب ۰/۱۲۵ برای زلزله‌های حوزه دور باعث کاهش بیشتر پاسخ‌ها می‌شود. با توجه به شکل ۹ انحراف معیار پاسخ‌های بی‌بعد شده و پراکندگی حداقل آن‌ها در همه حالت‌ها مشاهده می‌شود. به صورت مشابه و در شکل ۱۰ تغییر عملکرد میراگر با طول و عمق آب‌های متفاوت تحت رکوردهای حوزه نزدیک و دور نشان داده شده است. در این نمودار به صورت کلی و به خصوص تحت رکورد حوزه نزدیک افزایش عمق آب بر عملکرد میراگر تاثیر مثبت داشته و کاهش طول مخزن باعث بهبود عملکرد میراگر می‌شود. در رکوردهای حوزه دور نیز بهترین عملکرد به صورت کلی برای مخازن با کمترین عمق آب و کمترین طول مخزن به دست آمده است. هرچند در برخی از موارد و به خصوص برای پاسخ جابجایی تحت رکورد حوزه دور این روند کلی مشاهده نمی‌شود.



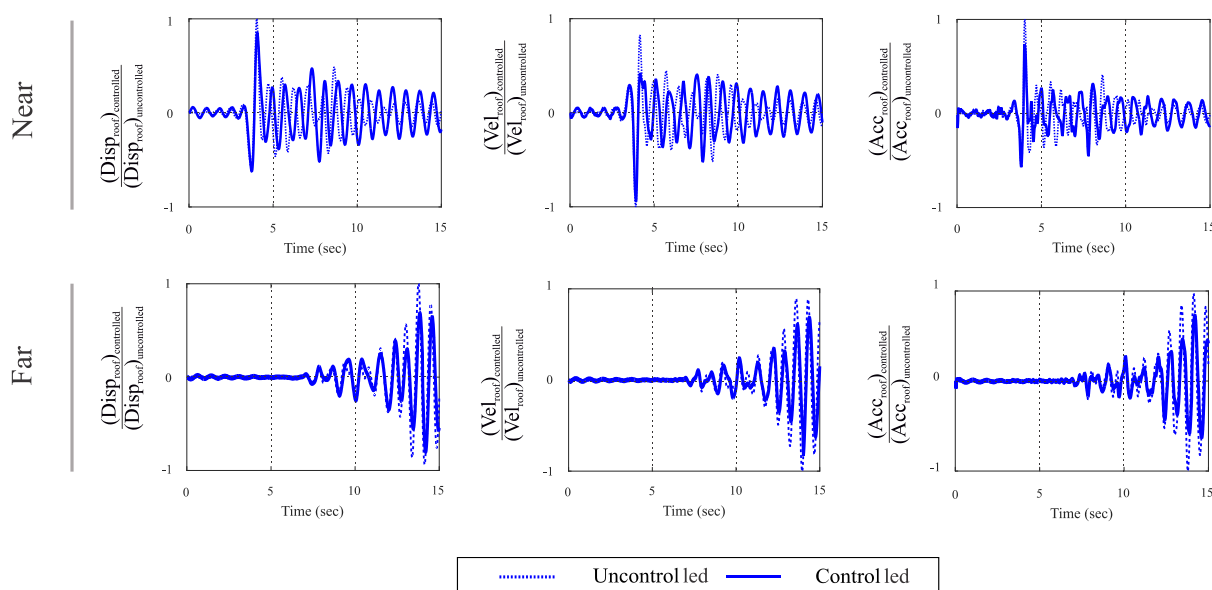
شکل ۹: کانتورهای عملکرد میراگر بر حسب نسبت آب و نسبت جرم مخزن برای سازه معیار تحت رکوردهای دور و نزدیک.



شکل ۱۰: کانتورهای عملکرد میراگر بر حسب طول مخزن و عمق آب برای سازه معیار تحت رکوردهای دور و نزدیک.

به منظور بررسی عملکرد میراگر در طول مدت زمان زلزله، تاریخچه زمانی جابجایی، سرعت و شتاب بام ساختمان معیار برای میراگری با نسبت آب ۰/۰۵ و نسبت جرمی ۵ درصد (حالت ۱۹ جدول ۳) تحت ۱۵ ثانیه اول رکورد حوزه دور Imperial valley و حوزه نزدیک Northridge در شکل ۱۱ نشان داده شده است.





شکل ۱۱: تغییر مکان، سرعت و شتاب طبقه بام ساختمان معیار پنج طبقه تحت زلزله Northridge و Imperial valley (حالت ۱۹).

نسبت ماکزیمم و ریشه میانگین مربعات (RMS)<sup>۲۳</sup> پاسخ‌های کنترل شده به کنترل نشده طبقه بام سازه تحت دو رکورد در جدول ۵ آورده شده است. جدول ۵ براساس بهترین طراحی تحت زلزله‌های معرفی شده بدست آمده است.

جدول ۵: ماکزیمم و میانگین مربعات پاسخ‌های سازه.

Records	Northridge						Imperial valley					
	Max Disp.	Max Vel.	Max Acc.	RMS Disp.	RMS Vel.	RMS Acc.	Max Disp.	Max Vel.	Max Acc.	RMS Disp.	RMS Vel.	RMS Acc.
Controlled	0.96	0.97	0.90	1.1	1	0.93	0.64	0.60	0.58	0.78	0.71	0.69
UnControlled												

## ۷- نتیجه گیری

در این مطالعه اثر چهار پارامتر نسبت جرم، نسبت آب، عمق آب و طول مخزن بر عملکرد میراگر مایع تنظیم شده با روابط طراحی موجود در ادبیات فنی تحت ۱۴ رکورد زلزله حوزه دور و نزدیک مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به نتایج بدست آمده از پاسخ‌های سازه در محدوده پارامترهای مورد بررسی در این مطالعه می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- سیستم کنترلی میراگر مایع تنظیم شده بر اساس روابط ارائه شده در مطالعه بانرجی و همکاران توانایی کنترل رفتار سازه‌ها تحت هر ۱۴ زلزله دور و نزدیک مورد بررسی را دارد و علاوه بر کاهش حداکثر پاسخ‌ها در طبقات، پاسخ سازه را در کل تحریک کنترل می‌کند. البته تحت زلزله نزدیک گسل و در برخی از حالات طراحی مقادیر پاسخ کنترل شده بیشتر از حالت کنترل نشده بوده است و در

<sup>23</sup> Root Mean Square

نتیجه برای کنترل رفتار سازه تحت زلزله‌های نزدیک گسل باید عملکرد میراگر سیال تنظیم شده با استفاده از این روابط بیشتر مورد بررسی قرار گیرد.

- به صورت کلی هرچه نسبت جرم بیشتر باشد عملکرد میراگر در کاهش میانگین پاسخ‌های سازه (جابجایی، سرعت و شتاب) بهتر است و کاهش پاسخ‌ها در شتاب بهتر از سرعت و در سرعت بهتر از جابجایی می‌باشد. البته برای زلزله‌های نزدیک گسل و در محدوده پارامترهای مورد بررسی در این مطالعه حداکثر کاهش پاسخ در بیشترین نسبت آب (۰/۳۷۵) و بیشترین نسبت جرمی (۰/۰۵) بدست آمده است. در زلزله‌های دور از گسل نیز میراگر با نسبت آب ۰/۱۲۵ و بیشترین نسبت جرمی (۰/۰۵) بهترین عملکرد را در کاهش میانگین پاسخ‌های مورد بررسی داشته است. مقدار کاهش پاسخ برای حداکثر شتاب، سرعت و جابجایی بام در این حالت به ترتیب برابر ۸، ۷ و ۶ درصد تحت زلزله‌های حوزه نزدیک و ۱۶، ۲۲ و ۱۳ درصد تحت زلزله‌های حوزه دور بدست آمده است.
- به صورت کلی و در محدوده پارامترهای مورد بررسی در این مطالعه با کاهش طول مخزن هر سه پاسخ شتاب، سرعت و جابجایی تحت هر دو رکورد حوزه دور و نزدیک کاهش یافته است. همچنین کاهش و افزایش عمق آب به ترتیب تحت رکوردهای حوزه دور و نزدیک در کاهش پاسخ‌های سازه نقش موثری داشته است، البته این روند کلی در مواردی به خصوص تحت زلزله حوزه دور به طور کامل برقرار نبوده است.

## مراجع

- [1] El-Khoury, O. and Adeli, H. (2013). Recent advances on vibration control of structures under dynamic loading. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 20(4), 353-360 .
- [2] Ghaedi, Kh. Ibrahim, Z. Adeli, H. and Javanmardi, A. (2017). Invited Review: Recent developments in vibration control of building and bridge structures. *Journal of Vibroengineering*, 19(5), 3564-3580 .
- [3] Parulekar, Y. and Reddy, G. (2009). Passive response control systems for seismic response reduction: A state-of-the-art review. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 9(01), 151-177 .
- [4] Bhuta, P. G. and Koval, L. R. (1966). A viscous ring damper for a freely precessing satellite. *International Journal of Mechanical Sciences*, 8(5), 383-395 .
- [5] Vandiver, J. Kim. and Mitome, Sh. (1979). Effect of liquid storage tanks on the dynamic response of offshore platforms. *Applied Ocean Research*, 1(2), 67-74 .
- [6] Li, S. J. Li, G. Q. Tang, J. and Li, Q. S. (2002). Shallow rectangular TLD for structural control implementation. *Applied Acoustics*, 63(10), 1125-1135 .
- [7] Toriki, M. and Halabian, A. M. (2010). Effects of Tuned Liquid Dampers (TLD) on Damping Shear-type Building Vibrations. *Numerical Methods in Engineering (Esteghlal)*, 28(2), 15-34 .
- [8] Sorkhabi, A. A. Malekghasemi, H. and Mercan, O. (2012). Dynamic behaviour and performance evaluation of tuned liquid dampers (TLDs) using real-time hybrid simulation. In: *Structures Congress 2012*. Chicago, IL, 2153-2162 .
- [9] Shokrgozar, H. R. Naeim, K. and Imani Kalasar, H. (2016). Comparison of the Efficiency of Tuned Mass and Tuned Liquid Dampers at High-Rise Structures under Near and Far Fault Earthquakes. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 3(4), 105-119 .
- [10] Zhang, Z. (2020). Numerical and experimental investigations of the sloshing modal properties of sloped-bottom tuned liquid dampers for structural vibration control. *Engineering Structures*, 204.
- [11] Enayati, H. and Zahrai, S. M. (2018). A variably baffled tuned liquid damper to reduce seismic response of a five-storey building. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Structures and Buildings*, 171(4), 306-315 .
- [12] Farshidianfar, A. Oliazadeh, P. and Farivar, H. R. (2009). Optimal parameter's design in tuned liquid column damper. In: *17th. Annual (International) Conference on Mechanical Engineering-ISME* . Iran: Mechanical Engineering.
- [13] Gao, H. Kwok, K. C. S. and Samali, B. (1997). Optimization of tuned liquid column dampers. *Engineering Structures*, 19(6), 476-486 .
- [14] Tait, M. J. and Deng, X. (2010). The performance of structure-tuned liquid damper systems with different tank geometries. *Structural Control and Health Monitoring*, 17(3), 254-277 .
- [15] Pandit, A. R. and Biswal, K. C. (2019). Evaluation of dynamic characteristics of liquid sloshing in sloped bottom tanks. *International Journal of Dynamics and Control*, 187.

- [16] Pandit, A. R. and Chandra Biswal, K. (2019). Seismic behavior of partially filled liquid tank with sloped walls. *Ocean Engineering*, 187 .
- [17] Pandit, A. R. and Biswal, K. C. (2020). Seismic control of multi degree of freedom structure outfitted with sloped bottom tuned liquid damper. *Structures*, 25, 229-240 .
- [18] Malekghasemi, H. (2011). *Experimental and Analytical Investigations of Rectangular Tuned Liquid Dampers (TLDs)*. Master of Applied Science, University of Toronto, Department of Civil Engineering.
- [19] Chakraborty, S. and Debbarma, R. (2016). Robust optimum design of tuned liquid column damper in seismic vibration control of structures under uncertain bounded system parameters. *Structure and Infrastructure Engineering*, 12(5), 592-602.
- [20] Shoaee, P. and Oromi, H. T. (2019). A combined control strategy using tuned liquid dampers to reduce displacement demands of base-isolated structures: a probabilistic approach. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 13(4), 890-903.
- [21] Debbarma, R. Chakraborty, S. (2015). Tuned Liquid Column Damper in Seismic Vibration Control Considering Random Parameters: A Reliability Based Approach. in *Advances in Structural Engineering*, 1491-1504 .
- [22] Khang, N. V. Duong, D. T. Huong, N. T. V. Dinh, N. D. T. T. and Phuc, V. D. (2019). Optimal control of vibration by multiple tuned liquid dampers using Taguchi method. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 33(4), 1563-1572 .
- [23] Pandey, D. K. Sharma, M. K. and Mishra, S. K. (2019). A compliant tuned liquid damper for controlling seismic vibration of short period structures. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 132, 405-428 .
- [24] Zahrai, S. M. Abbasi, S. Samali, B. and Vrcelj, Z. (2012). Experimental investigation of utilizing TLD with baffles in a scaled down 5-story benchmark building. *Journal of Fluids and Structures*, 28, 194-210 .
- [25] Samali, B. and Al-Dawod, M. (2003). Performance of a five-storey benchmark model using an active tuned mass damper and a fuzzy controller. *Engineering Structures*, 25(13), 1597-1610 .
- [26] Haseli, S. and Puorsha, M. (2018). Investigation of the Seismic Responses of Base-isolated Buildings Under the Influence of Near-field Round Motions. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 50(3), 579-596 .
- [27] Banerji, P. Murudi, M. Shah, A. H. and Popplewell, N. (2000). Tuned liquid dampers for controlling earthquake response of structures. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 29(5), 587-602 .
- [28] Rezaei, S. Elmi, M. Montazerinamin, M. and Zahrai, S. M. (2014). Design of Tuned Liquid Damper adjusted to reduce the vibrations of semi-high-rise structures. In: *8th National Congress of Civil Engineering* . Iran.
- [29] Vuruşkan, I. Sert, C. and Özer, M. B. (2014). Simulation of fluid sloshing for decreasing the response of structural systems. In: *ASME 2014 12th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis, ESDA 2014*. American: American Society of Mechanical Engineers, V002T11A011.
- [30] Chimakurthi, S. K. Reuss, S. Tooley, M. and Scampoli, S. (2018). ANSYS Workbench System Coupling: a state-of-the-art computational framework for analyzing multiphysics problems. *Engineering with Computers*, 34(2), 385-411 .