

## Soil Structure interaction effects on optimal characteristics of Tuned Mass Dampers in suspension bridges against near field earthquakes

Behzad Haseli<sup>1</sup>, Peyman Homami<sup>2\*</sup>, Gholamreza Nouri<sup>3</sup>

1- Ms. in Earthquake Engineering, Civil Engineering dept., Faculty of Engineering, Kharazmi University, Tehran, Iran

2- Assistant Professor, Civil Engineering dept., Faculty of Engineering, Kharazmi University, Tehran, Iran

3- Associated Professor, Civil Engineering dept., Faculty of Engineering, Kharazmi University, Tehran, Iran

### ABSTRACT

Determining the optimal parameters of TMD has a great effect on improving the seismic behavior of long span bridges. Parameters such as mass, damping ratio, angular frequency of damper and geometric characteristics of the structure change the seismic performance of the bridge. The main purpose of this paper is to provide design aid formulas to determine optimal properties of the damper to reduce the seismic response along the longitudinal axis of suspension bridges, taking into account the effects of soil-structure interaction. Therefore, various models of suspension bridges with a constant total length on two types of subsoil (stiff and soft soil) considered under the effect of near field earthquake records. Different values of the ratio of the length of side span to the middle span of the bridges ( $\alpha$ ) have been assumed. The optimal characteristics of the damper for the bridge has been determined by assuming a mass ratio of 2% for the damper according to different values of  $\alpha$  and for each type of soil. Design aid formulas based on those results extracted. Then the effectiveness of the proposed formulas has been evaluated by evaluating them for designing TMD to improve the performance of three different bridge models. The results show the acceptable accuracy of the design aid formulas to determine the efficient values of damping percentage and angular frequency of TMD. Furthermore, it has been observed that by changing the soil stiffness, the optimal parameters and seismic performance of tuned mass damper will be changed to a significant extent. For instance, TMD reduces 40% and 24% the maximum deflection of the bridge deck in stiff and soft soil with respect.

### ARTICLE INFO

**Receive Date:** 20 June 2023

**Revise Date:** 02 September 2023

**Accept Date:** 06 October 2023

### Keywords:

Tuned mass damper  
Soil structure interaction  
Suspension bridge  
Span length ratio  
Near fault zone

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2023.400751.3137>

\*Corresponding author: Peyman Homami  
Email address: homami@khu.ac.ir

## اثر اندرکنش خاک-سازه در تعیین مشخصات بهینه‌ی میراگر جرمی تنظیم‌شونده در پل معلق در مقابل رکوردهای زلزله حوزه نزدیک

بهزاد حاصلی<sup>۱</sup>، پیمان همایی<sup>۲</sup>، غلامرضا نوری<sup>۳</sup>

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی زلزله، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

۲- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

۳- دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

### چکیده

کاربرد ادوات کنترل غیرفعال، نظیر میراگر جرمی تنظیم‌شونده (TMD)، برای کاهش نیاز لرزه‌ای توصیه می‌شود. در حالت کلی، جرم، درصد میرایی و فرکانس زاویه ای میراگر متناسب با مشخصات دینامیکی سازه اصلی تعیین می‌شود. با توجه به این‌که ساختار خاک بستر، می‌تواند مشخصات دینامیکی سازه و میراگر را دستخوش دستخوش تغییر کند، هدف اصلی در نوشتار حاضر، ارائه‌ی روابط کمک‌طراحی برای تعیین مشخصات بهینه‌ی میراگر جهت کاهش پاسخ لرزه‌ای در امتداد طولی پل‌های معلق با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک-سازه است. به این منظور، مدل‌های متنوعی از پل‌های معلق مستقر بر روی ۲ نوع خاک بستر (خاک سخت و نرم) با طول کلی ثابت، اما با در نظر گرفتن مقادیر مختلف نسبت طول دهانه‌ی کناری به دهانه‌ی میانی ( $\alpha$ ) تحت اثر رکوردهای زلزله‌ی حوزه نزدیک بررسی شده و مشخصات بهینه میراگر برای پل با فرض نسبت جرمی ۲٪ برای میراگر بر حسب مقادیر مختلف  $\alpha$  و برای هر نوع خاک، تعیین شده است. کارایی روابط پیشنهادی، با ارزیابی عملکرد TMD در بهبود عملکرد سه نمونه پل متفاوت بررسی شده است. نتایج به دست آمده، علاوه بر این‌که بیانگر دقت قابل قبول روابط ارائه شده جهت تعیین مقادیر بهینه‌ی درصد میرایی و فرکانس زاویه ای TMD است، نشان می‌دهند با نرم‌تر شدن خاک، عملکرد لرزه‌ای و پارامترهای بهینه میراگر جرمی تنظیم‌شونده، به ترتیب کاهش و افزایش می‌یابند، به نحوی که میراگر، حداکثر جابجایی سازه مستقر بر روی خاک سخت و نرم را به ترتیب ۴۰٪ و ۲۴٪ کاهش می‌دهد. همچنین فرکانس زاویه ای بهینه در بستر نرم با مفروضات تحقیق، بین ۵ تا ۱۰٪ بیش از خاک سخت برآورد شده است.

کلمات کلیدی: میراگر جرمی تنظیم‌شونده، پل معلق، مشخصات بهینه، نسبت طول دهانه پل، حوزه نزدیک زلزله، اندرکنش خاک-سازه.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	<a href="https://doi.org/10.22065/jsce.2023.400751.3137">https://doi.org/10.22065/jsce.2023.400751.3137</a>	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	<a href="https://doi.org/10.22065/jsce.2023.400751.3137">10.22065/jsce.2023.400751.3137</a>	۱۴۰۳/۰۳/۳۱	۱۴۰۲/۰۷/۱۴	۱۴۰۲/۰۷/۱۴	۱۴۰۲/۰۶/۱۱	۱۴۰۲/۰۳/۳۰
پیمان همایی homami@khu.ac.ir			*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:			

## ۱- مقدمه

نقش منحصربه‌فرد سازه‌ی پل، به‌عنوان زیرساختی مهم در سیستم حمل و نقل هر کشور، غیرقابل‌انکار است و خدمت‌رسانی و کارایی پل، پس از زلزله، تاثیر بسزایی در تاب‌آوری منطقه‌ی حادثه‌دیده دارد. در پل‌های با دهانه‌ی طولی، غالباً بار حاکم بر طراحی پل در راستای عرضی، بار باد است، زیرا زمان تناوب پل در جهت عرضی، بزرگ است و پدیده‌های مانند فلاتر مهم‌تر از بار لرزه‌ای می‌شوند. اما در راستای طولی پل، غالباً بار زلزله حاکم بر طراحی است. خصوصاً در نواحی نزدیک‌گسل که قدرت زلزله زیاد است و همچنین پدیده جهت‌پذیری انتشار امواج زلزله و امتداد قرارگیری پل نسبت به گسل، موجب افزایش نیاز لرزه‌ای پل می‌شود. پل‌هایی که در مناطق نزدیک‌گسل قراردارند، در معرض وقوع زلزله‌هایی هستند که علاوه بر شدت و قدرت زیاد، ممکن است، دارای ویژگی‌های وابسته به مکانیسم گسلش در حوزه نزدیک، مانند جهت‌پذیری باشند. در تعدادی از زلزله‌های پیشین، نشان داده شده است که توجه به خصوصیات حرکات شدید زمین در حوزه‌ی نزدیک‌گسل، برای طراحی پل‌ها، ضروری است [۱]. چن<sup>۱</sup> (۲۰۰۸) [۲] با دسته‌بندی خسارت پل‌ها، در زلزله سال ۲۰۰۸ ونچوان<sup>۲</sup> چین، نشان داد که در حوزه‌ی نزدیک‌گسل، جهت و امتداد قرارگیری پل نسبت به گسل بسیار حائز اهمیت است. این امر نشان می‌دهد که در حوزه‌ی نزدیک‌گسل، توجه به امتداد استقرار پل، نسبت به امتداد گسل و تقویت و یا کنترل پاسخ پل در امتداد مولفه‌ی پر قدرت زلزله، می‌تواند تا حد زیادی، آسیب‌پذیری پل را تحت تاثیر قرار دهد.

پل‌های معلق به‌عنوان یکی از انواع پل‌های بزرگ و پرهزینه در مناطق لرزه‌خیز، در معرض آسیب ناشی از اعمال بارهای زلزله هستند. مطالعات انجام شده، بیانگر تاثیر قابل توجه اندرکنش خاک-سازه در ایجاد تفاوت رفتار لرزه‌ای پل‌ها می‌باشد. به نحوی که صرف‌نظر کردن از اثرات اندرکنش خاک-سازه، منجر به دستیابی به پاسخ‌های غیرواقعی خواهد شد. تحقیقات گسترده‌ای به‌منظور تقویت یا کنترل سازه‌ها، در مقابله با نیروی زلزله صورت گرفته است. نصب سیستم‌های کنترل غیرفعال میراگر جرمی تنظیم‌شونده<sup>۳</sup> (TMD)، یکی از راه‌کارهای ارائه شده، جهت کاهش اثرات نیروی زلزله در انواع سازه به‌شمار می‌رود. میراگر جرمی تنظیم‌شونده، برای کاهش دامنه‌ی ارتعاشات مکانیکی، مورد استفاده قرار می‌گیرد. مکانیزم عملکرد این نوع میراگر بر مبنای تنظیم فرکانس میراگر نسبت به فرکانس (مود اصلی) سازه‌ی مرتعش در اثر زلزله، صورت می‌پذیرد و نیروی درخلاف جهت حرکت سازه، به سازه اعمال می‌نماید. این سیستم قابلیت زیادی در استهلاک انرژی، از خود نشان می‌دهد. در پژوهش حاضر، تاثیر قابل توجه TMDها در کاهش پاسخ طولی پل‌های کابلی با دهانه‌های بزرگ که در حوزه‌ی نزدیک‌گسل قراردارند، با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک-سازه مورد توجه قرار گرفته است. پل‌های کابلی به‌عنوان یکی از انواع پل‌های بزرگ و پرهزینه در مناطق لرزه‌خیز، در معرض آسیب ناشی از اعمال بارهای زلزله هستند. روش‌های متفاوتی برای طراحی بهینه‌ی میراگرهای جرمی تنظیم‌شونده، در سازه‌های با رفتار خطی، ارائه شده است، که از جمله آن‌ها، می‌توان به مطالعات دن هارتوگ، تسای ولین، ویلاورد، سان و فوجینو اشاره کرد.

ویژگی‌های قابل توجه سیستم میراگر جرمی تنظیم‌شونده موجب شده تا پژوهشگران متعددی عملکرد سیستم TMD را مورد بررسی قرار دهند. لین<sup>۴</sup> و همکاران (۲۰۰۵)، اثرات میراگر جرمی تنظیم‌شونده را در کاهش پاسخ‌های پیچشی و عمودی پل‌های معلق، تحت بارگذاری باد، مورد مطالعه قرار داده‌اند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد، یک TMD با نسبت جرمی ۰.۲٪، باعث کاهش ۲۵٪ و ۳۳٪ پاسخ‌های عمودی و پیچشی پل شده است [۳]. رفتار دینامیکی یک پل پیاده‌رو، قبل و بعد از نصب TMD توسط کتانو<sup>۵</sup> و همکاران (۲۰۱۰) مورد بررسی قرار گرفت. مشخصات مورد مطالعه توسط این پژوهشگران، شامل مودهای ارتعاشی، تاثیر خطاهای تنظیم مشخصات TMD و مقایسه‌ی عملکرد TMD در حالت منفرد و چندگانه بود. نتایج این مطالعه نشان داد، به دلیل وجود اصطکاک بین اعضای TMD و تقسیم جرم TMD به چند واحد جرم یکسان در تئوری، تاثیر TMDها در عمل، کمتر از چیزی است که در تئوری، حاصل می‌گردد [۴]. در پژوهشی، کاهش ارتعاشات قائم پل با بهینه‌سازی سیستم‌های TMD توسط لوو<sup>۶</sup> و همکاران (۲۰۱۲)، مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد

<sup>1</sup> Chen<sup>2</sup> Wenchuan<sup>3</sup> Tuned Mass Damper(TMD)<sup>4</sup> Lin<sup>5</sup> Caetano<sup>6</sup> Luu

که بیشینه مقدار کاهش پاسخ دینامیکی قائم در این روش، نسبت به روش دن هارتوگ<sup>۷</sup>، حدود ۲٪، بهبود یافته است که این بهبود به دلیل لحاظ کردن مشخصات میرایی سازه، ایجاد شده است [۵]. بر اساس نتایج مطالعات، به کارگیری سیستم TMD در پل‌های دهانه بلند کابلی، تاثیر قابل توجهی در کنترل ارتعاشات پل دارد [۶]. دومانسچی<sup>۸</sup> و همکاران (۲۰۱۵)، عملکرد سیستم‌های TMD را برای کاهش ارتعاشات دینامیکی ناشی از بادهای قوی، در یک نمونه پل معلق به طول ۹۴۰ متر، مورد بررسی قرار دادند. نتایج مربوط به استفاده از یک سیستم TMD در وسط دهانه‌ی پل، نشان داد که این سیستم می‌تواند، بیشینه‌ی جابجایی قائم و ممان خمشی عرشه پل را به ترتیب به میزان ۱۹٪ و ۱۷٪ کاهش دهد [۷]. منگ<sup>۹</sup> و همکاران (۲۰۲۰)، به طراحی یک میراگر جرمی تنظیم‌شونده با دو درجه آزادی در پل‌های معلق پرداختند و با انجام مطالعات آزمایشگاهی، نشان دادند استفاده از این نوع میراگر، علاوه بر صرفه‌جویی در هزینه و زمان، تاثیر بسزایی در کاهش ارتعاش پل معلق خواهد داشت [۸]. لواسانی و همکاران (۲۰۲۰) در پژوهشی، به بررسی کنترل ارتعاش یک پل معلق، با استفاده از دو میراگر جرمی تنظیم‌شونده و میراگر جرمی تنظیم‌شونده‌ی فعال<sup>۱۰</sup> (ATMD) پرداختند. در به کارگیری ATMD، از دو کنترل‌کننده‌ی فازی نوع ۱ و ۲ استفاده شده است که نتایج نشان می‌دهد، ATMD در مقایسه با TMD عملکرد موثرتری در کنترل ارتعاش سازه داشته و همچنین عملکرد کنترل‌کننده‌ی فازی نوع ۲ بهتر از کنترل‌کننده‌ی فازی نوع ۱ است [۹]. ژانگ<sup>۱۱</sup> و همکاران در پژوهشی (۲۰۲۱)، به کنترل ارتعاش یک پل کابلی با استفاده از میراگر جرمی تنظیم‌شونده با ضربه نامتقارن<sup>۱۲</sup> (APTMD) پرداختند. در این نوع میراگر، تعیین سه مولفه‌ی شکاف سمت چپ، شکاف سمت راست و نسبت فرکانس ضروری است. نتیجه‌ی مطالعه، بیانگر عملکرد مطلوب APTMD در مقایسه با TMD در کنترل ارتعاش پل مورد مطالعه است [۱۰]. تعیین مشخصات بهینه در انواع میراگر، همواره مورد توجه محققان بوده است. روش‌های متفاوتی برای طراحی بهینه‌ی میراگرهای جرمی تنظیم‌شونده، در سازه‌های با رفتار خطی، ارائه شده است، که از جمله آن‌ها، می‌توان به مطالعات دن هارتوگ، تسای ولین، ویلاورد، سان و فوجینو اشاره کرد [۱۱]. ژو<sup>۱۳</sup> و همکاران (۲۰۱۹) در مقاله‌ای، یک سیستم میراگر جرمی تنظیم‌شونده‌ی اینترتر<sup>۱۴</sup> (TMDI) را به منظور کاهش ارتعاشات در پل‌های با دهانه‌ی بلند، ارائه کرده و مشخصات بهینه این نوع میراگر را نیز به دست آوردند. نتایج این پژوهش، بیانگر بهبود عملکرد TMDI به علت استفاده از اثر تقویت جرمی اینترتر، در مقایسه با عملکرد TMD است [۱۲]. کانگ<sup>۱۵</sup> و همکاران (۲۰۱۹)، در پژوهشی به طراحی بهینه‌ی مولفه‌های میراگر جرمی تنظیم‌شده با نسبت‌های جرم بزرگ میراگر پرداختند و براساس نتایج به دست آمده، مشخص شد، استفاده از نسبت‌های بزرگ جرم میراگر در مقایسه با نسبت کوچک جرم آن، به‌طور قابل توجهی، پاسخ دینامیکی و جابجایی نسبی سازه را، کاهش می‌دهد [۱۳]. مطالعات انجام‌شده نشان می‌دهد، استفاده از TMD بهینه‌شده، تاثیر قابل توجهی در کنترل فلاتر در پل‌های معلق با دهانه‌ی بلند و کاهش ارتعاش پیچشی در پل‌های معلق دارد [۱۴-۱۵]. مطالعات گسترده‌ای در زمینه‌ی تعیین مشخصات بهینه‌ی میراگر جرمی تنظیم‌شونده در پل، تحت بارگذاری متحرک، مانند بار وسایل نقلیه‌ی عبوری، انجام شده است. نتایج مطالعات، بیانگر عملکرد مطلوب TMD پس از تعیین مشخصات بهینه، در پل‌های شهری، تحت بارگذاری متحرک است [۱۶-۱۷]. پاچیده و همکاران (۲۰۲۰) در پژوهشی به ارزیابی عملکرد سیکلی یک سیستم مهاربندی جدید مجهز به یک مستهلک کننده‌ی انرژی لوزی شکل پرداختند، نتایج تجربی حاصل از بررسی یک نمونه آزمایشگاهی با نتایج عددی به دست آمده از نرم‌افزار آباکوس مقایسه شد که نشان دهنده‌ی انطباق قابل قبول نتایج می‌باشد [۱۸]. کافی و همکاران (۲۰۲۰) به ارزیابی آزمایشگاهی و عددی سیستم نوین مهاربندی با عضو لوزی شکل مجهز به میراگر تسلیم‌شونده پرداختند و نتیجه گرفتند، ضریب شکل‌پذیری مدل ساده نسبت به مدل سخت و نیمه‌سخت به ترتیب ۱.۱۲ و ۱.۱۷ برابر می‌باشد [۱۹]. خیرالدین و همکاران (۲۰۱۹) در پژوهشی به ارزیابی لرزه‌ای قاب‌های خمشی بتن آرمه تقویت‌شده با مهاربندهای فولادی همگرا و واگرا به کمک تحلیل دینامیکی فزاینده و پوش‌آور درحوزه نزدیک گسل پرداختند. نتایج این مطالعه نشان داد تغییر مکان بام در قاب با مهاربند واگرا در حوزه نزدیک گسل، کمتر از قاب با مهاربند همگرا می‌باشد [۲۰]. بر اساس نتایج به دست آمده از مطالعات لرزه‌شناسی مشاهده شده است، چنانچه ساختار شکست گسل به سمت محل استقرار

<sup>7</sup> Den hartog

<sup>8</sup> Domaneschi

<sup>9</sup> Meng

<sup>10</sup> Active Tuned Mass Damper

<sup>11</sup> Zhang

<sup>12</sup> Asymmetric Pounding Tuned Mass Damper

<sup>13</sup> Xu

<sup>14</sup> Tuned Mass Damper Inerter

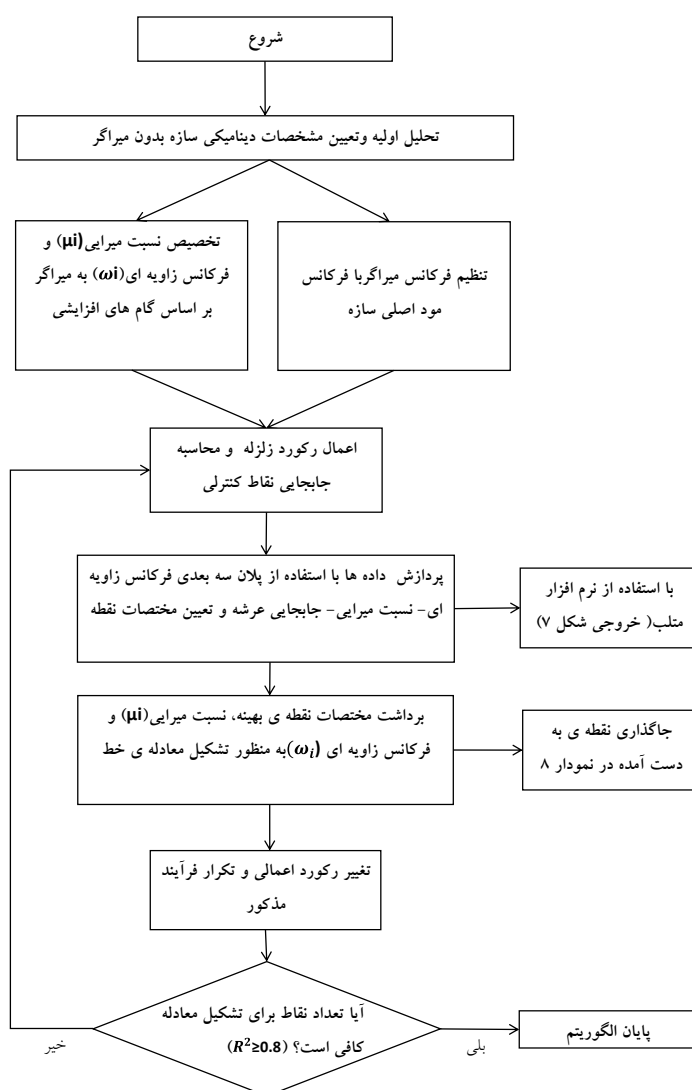
<sup>15</sup> Kang

پروژه منتشر شود، به دلیل نزدیکی سرعت گسترش گسیختگی به سرعت انتشار امواج برشی، مکانیزم شکست گسل توام با اثرات جهت‌داری پیش‌رونده و در صورتی که راستای گسترش گسیختگی در مکانیزم گسل در جهت دور شدن از پروژه باشد، انتشار شکست گسل توام با اثرات جهت‌داری پس‌رونده خواهد بود. در زلزله‌های با اثرات پیش‌رونده، قدرت دو مولفه افقی زلزله (موازی گسل یا عمود بر گسل) تفاوت زیادی دارند و نحوه استقرار پل نسبت به ساختار شکست گسل در تشدید یا کاهش نیاز لرزه‌ای پل، حائز اهمیت بسزایی است.

شریعتمدار و گل نرگسی در پژوهشی (۱۳۹۷)، با در نظر گرفتن آثار اندرکنش خاک-سازه، به کنترل لرزه‌ای سازه‌ها با میراگر جرمی فعال به همراه کنترل کننده‌ی فازی نوع ۲ بازه‌ای پرداختند. نتایج این مطالعه نشان داد منظور کردن اثرات اندرکنش خاک در محاسبات تاثیر قابل توجهی در پاسخ‌های سازه داشته است، به نحوی که پاسخ‌های سازه در خاک نرم، کاهش قابل توجهی پیدا کرده و در این حالت، تاثیر کنترل کننده افزایش یافته است [۲۱]. سلطانی و همکاران (۱۴۰۰) در پژوهشی به ارزیابی لرزه‌ای پل‌های بتن مسلح مورب تحت اثر زلزله‌های نزدیک‌گسل با در نظرگیری اندرکنش خاک-سازه پرداختند. نتایج این مطالعه، حاکی از آن است که در نظرگیری انعطاف‌پذیری فونداسیون، عمدتاً منجر به بهبود پاسخ‌های لرزه‌ای نسبت به پایه صلب شده است [۲۲]. علی‌زاده و لواسانی (۱۴۰۰) به بررسی اثر اندرکنش خاک-سازه بر عملکرد میراگر جرمی تنظیم‌شونده بهینه به منظور کنترل پاسخ‌های لرزه‌ای طولی پل‌های معلق پرداختند. نتایج به دست آمده از این مطالعه نشان داد، با نرم‌تر شدن خاک بستر، مود ابتدایی سازه نقش به مراتب مهم‌تری در پاسخ نهایی سازه، ایفا می‌کند [۲۳]. متداول‌ترین نسبت طول دهانه‌ی کناری به دهانه‌ی میانی، در پل‌های معلق برابر با یک است [۲۴] و بیشینه طول قابل طراحی برای دهانه‌ی پل معلق برابر با ۲۲۰۰ متر، ارزیابی شده است [۲۵]. اما احداث پل‌های معلق چنددهانه، با دهانه‌های نامتقارن و با طول‌های متفاوت از یک‌سو و حساس بودن پاسخ سازه به خصوصیات بار لرزه‌ای از سوی دیگر، ایجاب می‌نماید که فرآیند بهینه‌یابی مشخصات TMD برای تضمین عملکرد مناسب میراگرهای تنظیم‌شونده جرمی در جهت کاهش پاسخ پل، مورد توجه قرار گیرد.

در این مطالعه، روابطی جهت تعیین فرکانس زاویه ای و نسبت میرایی مربوط به میراگر جرمی تنظیم‌شونده، جهت کاهش پاسخ لرزه‌ای در امتداد طولی پل‌های معلق با توجه به تنوع مشخصات هندسی پل (نسبت طول دهانه‌ها) و همچنین با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک-سازه ارائه شده است. به منظور استخراج این روابط، مدل‌های متنوعی از پل‌های معلق با طول کل ثابت (بعبارت دیگر، با جرم مشابه) اما با در نظر گرفتن مقادیر مختلف نسبت طول دهانه کناری به دهانه میانی ( $\alpha$ ) تحت اثر رکوردهای زلزله‌ی حوزه نزدیک بررسی و مشخصات بهینه میراگر جرمی تنظیم‌شونده با کمک ترسیم سطح (رویه) سه‌بعدی بصورت تابعی از فرکانس زاویه ای-نسبت میرایی- حداکثر جابجایی و با معیار کمینه شدن  $RMS^{16}$  جابجایی در نقاط کنترلی به ازای حالت‌های مختلف خاک بستر تعیین شده است. در نهایت روابط کمک‌طراحی، جهت تعیین مشخصات بهینه TMD، بر اساس نسبت  $\alpha$  و با توجه به نوع خاک ارائه شده است. روند کلی کار به نحوی است که پس از تعیین مشخصات میراگر و تشریح هندسه‌ی پل مورد مطالعه، ۱۰ رکورد زلزله جهت انجام تحلیل معرفی و بهینه‌سازی مشخصات میراگر با تکنیک کمینه‌سازی RMS جابجایی عرشه، در پلان‌های سه‌بعدی، انجام شده است. در صورت وجود میرایی، به منظور تعیین مشخصات بهینه میراگر، روابط تحلیلی وجود ندارد، به همین دلیل در این حالت تعیین مشخصات بهینه میراگر جرمی تنظیم‌شونده با کمینه‌سازی نوسان سازه، صورت گرفته است. به همین منظور، مشخصات بهینه میراگر در پژوهش حاضر، بر اساس دستیابی به حداقل RMS جابجایی عرشه‌ی پل در پلان‌های سه‌بعدی فرکانس زاویه‌ای-نسبت میرایی- جابجایی عرشه، تعیین شده است. در ادامه، روابط کمک‌طراحی به منظور تعیین فرکانس زاویه ای و نسبت میرایی بهینه‌ی پل معلق، بر اساس نسبت طول دهانه‌ی کناری به دهانه‌ی میانی پل و با توجه به نوع خاک بستر ارائه و در پایان کارایی روابط پیشنهادی با بررسی دو نمونه پل معلق واقعی، نشان داده شده است. در شکل ۱ فلوچارت هدفمند از روند انجام پژوهش ارائه شده است.

<sup>16</sup> Root Mean Square



شکل ۱: فلوچارت روند انجام مقاله در پژوهش حاضر

## ۲- معرفی مدل میراگر جرمی تنظیم شونده و پل معلق

### ۲-۱- مشخصات و هندسه‌ی میراگر

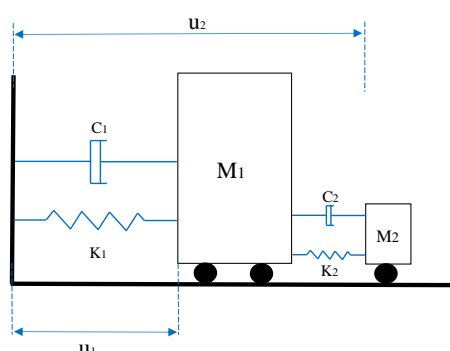
میراگر جرمی تنظیم شونده، دارای یک جرم، یک فنر و یک میراگر می‌باشد. برای مدل‌سازی TMD از المان‌های پیوند خطی فنر و میراگر استفاده شده‌است و جرم ثابت TMD به وسیله‌ی المان‌های فنر و میراگر به سازه پل، متصل شده و برای جلوگیری از حرکت‌های قائم و چرخشی TMD، با استفاده از قیدهایی، درجات آزادی غیر از جهت طولی پل، به محل نصب TMD به نحوی مقید شده که TMD تنها در جهت طولی پل، می‌تواند حرکت کند. با توجه به شکل ۲،  $M_2$ ،  $K_2$  و  $C_2$  به ترتیب جرم، سختی و میرایی TMD و  $M_1$ ،  $K_1$  و  $C_1$  به ترتیب جرم، سختی و میرایی سازه اصلی می‌باشد که TMD به آن متصل می‌شود. مطابق با رابطه ۱، جرم میراگر برابر با مقدار ثابت ۲٪ جرم سازه‌ی پل انتخاب شده و سایر متغیرهای مستقل TMD عبارتند از میرایی و سختی میراگر [۲۶]. با ثابت فرض کردن جرم کلی پل (طول دهانه وسط و کنار تغییر داده شده است تا نسبت‌های مختلف  $\alpha$  حاصل شود اما طول کل ثابت در نظر گرفته شده و در نتیجه جرم کل پل ثابت است) و همچنین با فرض نسبت ثابت جرمی برای میراگر (۲٪) این امکان فراهم شده است که تعداد متغیرهای طراحی، کاهش داده شود و بدون تغییر جرم کل و جرم میراگر، نسبت طول دهانه‌های میانی و کناری بعنوان متغیر اصلی در نظر گرفته شود و بتوان نتایج

مطالعه را در قالب روابط تعیین درصد میرایی و فرکانس زاویه‌ای بهینه TMD، بر اساس نسبت  $\alpha$  ارائه نمود. لازم به ذکر است بر اساس توصیه مراجع مختلف، نسبت جرم مناسب برای میراگر در حدود ۱ تا ۲ درصد جرم سازه است. [۳-۲۶-۲۷] بنابراین، پیش فرض نسبت جرمی ۰.۰۲٪ برای میراگر ضمن این که مقداری متعارف است، موجب تسهیل محاسبه شده است. جهت دستیابی به مقادیر بهینه، لازم است پاسخ سازه، تحت بارگذاری خاص (اعمال رکوردهای زلزله)، برای مقادیر مختلف میرایی و سختی میراگر محاسبه و نقطه بهینه پیداشود. میرایی و سختی میراگر جرمی تنظیم‌شونده بر اساس روابط (۱)، (۲) و (۳) حاصل می‌شود [۲۸]. در این روابط  $\omega_2$  و  $\mu_2$  به ترتیب فرکانس زاویه‌ای و نسبت میرایی در میراگر هستند.

$$M_2 = 0.02M_1 \quad (1)$$

$$K_2 = M_2\omega_2^2 \quad (2)$$

$$C_2 = 2M_2\omega_2\mu_2 \quad (3)$$

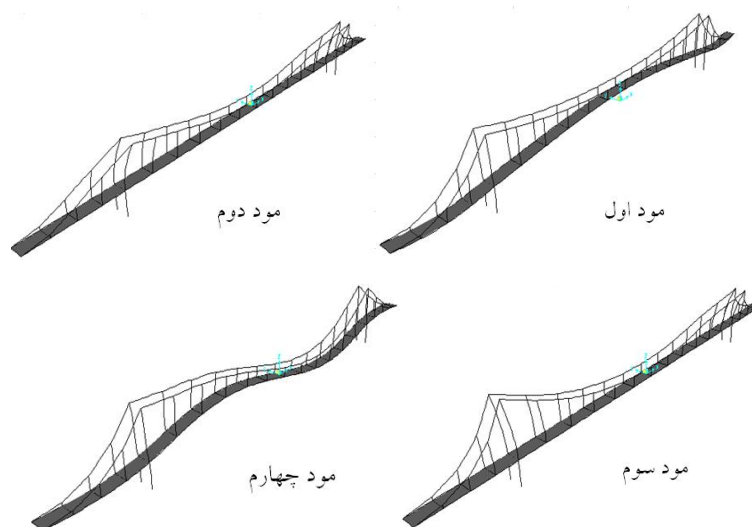


شکل ۲: مکانیزم سیستم خطی میراگر جرمی تنظیم‌شونده

## ۲- مشخصات و هندسه‌ی پل

برای انجام مطالعات پارامتریک در این تحقیق از یک پل معلق استفاده شده‌است. این پل بر اساس آیین نامه آبا و آیین نامه آشتو [۲۹] بارگذاری و طراحی شده‌است. وزن اجزای سازه‌ای به صورت بارگسترده بر روی المان‌ها تعریف شده و ضریب زلزله با استفاده از روش استاتیکی معادل، در نظر گرفته شده‌است. این پل دارای ۷۷۰ متر طول، ۱۸ متر عرض و سه دهانه‌ی ۱۵۴+۴۶۲+۱۵۴ متری است. ۳۶ کابل قائم، که به فواصل ۳۸.۵ متری از یکدیگر مستقر شده‌اند، وزن عرشه‌ی پل را تحمل می‌کنند. ارتفاع بلندترین کابل قائم ۵۵ متر و ارتفاع ستون‌های میانی پل ۵۶ متر است. شاهتیر و تیرهای طولی (روسازه پل)، با استفاده از المان‌های تیرستون الاستیک و ستون‌های پل (زیرسازه) با استفاده از المان‌های تیرستون غیرخطی با تعریف ۵۸ گره و کابل‌های پل با بهره‌گیری از المان‌های خرابایی در محیط نرم‌افزار [۳۰] OpenSees مدل‌سازی شده‌است. در واقع روسازه دارای رفتار خطی و زیرسازه دارای رفتار غیرخطی می‌باشد. مصالح بتنی و مصالح فولادی به ترتیب با استفاده از المان‌های Concrete01 و Steel01 مدل شده‌اند [۳۱]. عرشه‌ی پل به صورت یک دال بتنی به ضخامت ۴۰ سانتی‌متر در محیط نرم‌افزار SAP2000 [۳۲] مدل شده و مشخصات به صورت عددی به نرم‌افزار OpenSees منتقل شده‌است. پایه‌های میانی به صورت گیردار و دو کوله‌ی انتهایی پل به صورت غلتکی فرض شده‌است. در جدول ۱ پی‌بند چهار مود اول پل معلق مورد مطالعه، ارائه شده‌است. همچنین در شکل ۳، شکل مودی مربوط به چهار مود اول پل معلق مورد مطالعه، نمایش داده شده‌است. مشاهده می‌شود، حداکثر درصد مشارکت جرمی در مودهای پل مورد مطالعه، مربوط به مودهای خمشی چهارم و اول به ترتیب با ۰.۱۷٪ و ۰.۱۱٪ مشارکت می‌باشد. بنابراین فرکانس میراگر جرمی تنظیم‌شونده در پژوهش حاضر، با استفاده از رابطه‌ی (۲)، با فرکانس مود چهارم (مود

اصلی) پل تنظیم شده است. در شکل ۴ جزئیات مدل سه بعدی پل معلق مورد مطالعه، نمایش داده شده است. با توجه به مقطع عرضی پل، مشاهده می شود، از حرکت عرضی و قائم عرشه جلوگیری شده است، به نحوی که عرشه پل، تنها در راستای طولی، قابلیت جابجایی دارد.



شکل ۳: شکل مودی مربوط به چهار مود اول پل کابلی مورد مطالعه

جدول ۱: مشخصات دینامیکی چهار مود اول پل کابلی مستقر بر روی خاک سخت

فرکانس زاویه‌ای (rad/s)	پریود (s)	درصد جذب	سه مود اصلی
جرم			
۱/۴۵	۴/۳۳	٪۱۲	مود ۱
۱/۷۵	۳/۵۹	٪۷	مود ۲
۱/۸۳	۳/۴۳	٪۱۱	مود ۳
۲/۱۱	۲/۹۷	٪۱۷	مود ۴

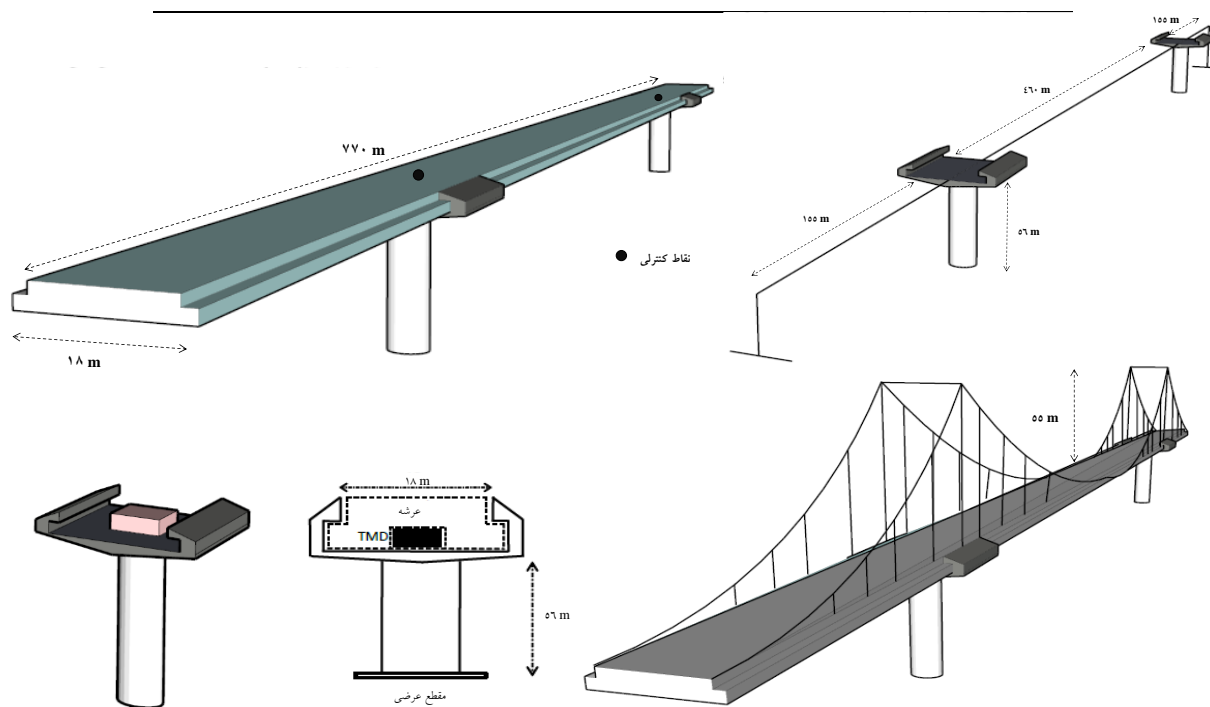
### ۳-۲- راستی آزمایی پل مدل شده

در پژوهش حاضر، به منظور راستی آزمایی پل مدل شده در نرم افزار، پل ارائه شده توسط عبدالغفار (پل Vincent Thomas) مورد ارزیابی، قرار گرفته است. مشخصات این پل مطابق با جدول ۲ قابل مشاهده است [۳۳]. با مقایسه فرکانس محاسبه شده مربوط به شش مود اول این پل، مشاهده می شود، حداکثر اختلاف در محاسبه فرکانس های این پل در پژوهش حاضر با مقادیر ارائه شده در رفرنس [۳۳] ۰/۷٪ است. برای پل مجهز به میراگر TMD، انتظار این است که رفتار سازه در محدوده خطی باقی بماند. پس از تحلیل تاریخچه زمانی نیز، نتایج محاسبه حداکثر جابجایی نسبی پایه (دریفت) موید این امر بوده و رفتار پل در محدوده بدون خسارت و خطی باقی مانده است. عملکرد غیر خطی هندسی کابل ها با امکانات در نرم افزار وارد محاسبات شده و با مقایسه مدهای نوسانی، صحت سنجی انجام شده است.



جدول ۲: مقایسه فرکانس (rad/s) مودهای اول پل Vincent Thomas

شماره مد	فرکانس در پژوهش حاضر	فرکانس بر اساس مطالعات عبدالغفار [۳۳]	درصد اختلاف
۱	۱/۳۷	۱/۳۸	۰/۷
۲	۲/۱۸	۲/۱۸	۰
۳	۲/۲۰	۲/۲۰	۰
۴	۲/۸۹	۲/۸۸	۰/۳۴
۵	۳/۴۶	۳/۴۶	۰
۶	۵/۰۷	۵/۰۷	۰



شکل ۴: نمایش الف) نقاط کنترلی ب) چیدمان میراگر در طول پل، ج) ساختار میراگر جرمی تنظیم شونده د) مدل سه بعدی پل کابلی مورد مطالعه

## ۴-۲- اندرکنش خاک سازه

در تحلیل دینامیکی سازه غالباً فرض می‌شود که خاک زیر پی صلب بوده و از انعطاف‌پذیری خاک، صرف نظر می‌شود. در این شرایط پاسخ نهایی، متأثر از خواص دینامیکی سازه است و خواص خاک زیر پی تأثیری در پاسخ سازه ندارد، در حالی که اگر خاک زیر پی نیز در تحلیل‌ها لحاظ شود، سیستم جدیدی ناشی از اندرکنش خاک و سازه تشکیل خواهد شد، که رفتار آن متفاوت از رفتار اشاره شده در حالت قبل خواهد شد. در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک و سازه موجب می‌شود تا شرایط شبیه سازی، تطابق بالاتری با شرایط واقعی داشته باشد و در نهایت منجر به دستیابی به پاسخ‌های با دقت بالا و نزدیک به واقعیت خواهد شد. اندرکنش خاک و سازه با استفاده از سه روش مستقیم، مختلط و زیرسازه (مدلی شامل چند فنر و میراگر) قابل مدل‌سازی می‌باشد [۳۴-۳۵]. در نوشتار حاضر، به منظور بررسی اثرات اندرکنش خاک-سازه، برای خاک بستر، دو حالت کلی بر اساس سرعت موج برشی در نظر گرفته شده است. در حالت اول سرعت موج برشی در خاک بستر بسیار زیاد در نظر گرفته شده و در این حالت خاک زیر تکیه گاه‌های پل، به صورت خاک سخت و شرایط تکیه‌گاهی گیردار در نظر گرفته شده است (Fixed Base). در حالت دوم، سرعت موج برشی در خاک بستر حدود ۳۷۵ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده و در این شرایط خاک زیر تکیه‌گاه‌ها بصورت نسبی از نوع نرم فرض شده است (Soft).

جدول ۳: مشخصات خاک بستر

نوع خاک بستر	نماد	E(kN/m <sup>2</sup> )	G(kN/m <sup>2</sup> )
سخت	Fixed Base	۵۰۰۰۰۰	۱۸۵۱۸۵۱/۸
نرم	Soft	۳۵۰۰۰۰	۱۲۹۶۲۹/۶

## ۵-۲- مشخصات رکوردهای زلزله جهت انجام تحلیل تاریخچه زمانی

به منظور ایجاد تحریک لرزه‌ای و دستیابی به نتایج مدنظر در این مطالعه، از یک گروه ده تایی شتاب‌نگاشت، مطابق با مشخصات ارائه شده در جدول ۴ استفاده شده است. شاپان ذکر است که در تاریخچه زمانی رکوردهای انتخابی حوزه نزدیک در پژوهش حاضر، پالس‌های بزرگ و دوره تناوب غالباً، بلند سرعت وجود دارد. رکوردهای زلزله‌ی انتخابی بر اساس دو معیار انتخاب شده‌اند. در معیار اول تلاش شده تا رکوردهای متناسب با خاک تپ یک و دو مطابق با استاندارد ۲۸۰۰ (محدوده‌ی سرعت موج برشی از ۳۷۵ تا ۷۵۰ متر بر ثانیه) انتخاب شوند. معیار دوم احتراز از وقوع تشدید در سازه‌ی پل مورد بررسی بوده است. در شرایطی که فرکانس مود اصلی سازه بر فرکانس غالب رکوردهای زلزله منطبق شود، افزایش دامنه پاسخ‌ها و پدیده‌ی تشدید رخ می‌دهد، در این حالت نتایج بزرگ‌نمایی شده و ممکن است به ناپایداری منجر شود. لذا رکوردهای زلزله به نحوی انتخاب شده‌اند که تا حد امکان، در هیچ یک از مدل‌های مورد مطالعه، تشدید رخ نداده باشد. با توجه به مقید نمودن پل در راستای عرضی، شتاب‌نگاشت مربوط به هریک از رکوردهای زلزله، تنها در راستای طولی بر پل اعمال شده و از اثر مولفه‌ی قائم نیز صرف‌نظر شده است، زیرا کاهش پاسخ مولفه‌ی طولی حرکت پل در نقاط کنترلی، با توجه به تنها درجه‌ی آزادی پل در راستای طولی، متأثر از مولفه‌ی طولی رکورد زلزله است و مولفه‌ی قائم در پاسخ وسط دهانه موثر است که در این پژوهش مورد توجه نیست. با توجه به موقعیت استقرار میراگر، نقاط کنترلی، بر روی عرشه و در محل اتصال پایه‌های میانی با عرشه‌ی پل انتخاب شده است. همچنین رکورد آزمایشی حوزه نزدیک (T<sub>1</sub>) مطابق با مشخصات جدول ۴، به منظور بررسی دقت روش ارائه شده در تعیین معادله‌ی خط مولفه‌های بهینه میراگر به ازای نسبت ثابت طول دهانه‌ی کناری به میانی پل، ارائه شده است.

## ۳- نحوه‌ی تعیین مشخصات بهینه میراگر جرمی تنظیم‌شونده

روش‌های متفاوتی جهت بهینه‌سازی TMDها در انواع سازه وجود دارد. در نوشتار حاضر، با استفاده از پردازش داده‌ها در محیط نرم‌افزار متلب، پلان‌های سه‌بعدی فرکانس زاویه‌ای- نسبت میرایی- حداکثر جابجایی، برای حالت‌های مختلف پل معلق مدل شده با میراگر جرمی تنظیم‌شونده ارائه شده است. لذا با استفاده از کد نوشته شده در نرم‌افزار Matlab [۳۶] و با فرض ثابت ماندن جرم میراگر، مشخصات

نقطه‌ای در فضای سه‌بعدی یادشده که کمترین جابجایی ایجادشده را نشان دهد، معرف مقادیر عددی مولفه‌های بهینه‌ی میراگر جرمی تنظیم‌شونده، خواهد بود. در این مطالعه، مشخصات بهینه TMD با انجام مطالعه پارامتریک تحت اثر رکوردهای زلزله اعمالی، بدست خواهد آمد. با توجه به شکل ۷ محورهای افقی در پلان‌های سه‌بعدی معرف فرکانس زاویه ای و نسبت میرایی بوده و محور قائم بیانگر حداکثر RMS جابجایی ثبت شده در نقاط کنترلی پل معلق است. با توجه به تعداد بالای درجات آزادی پل، امکان گرفتار شدن فرآیند بهینه‌سازی در بهینه‌یابی محلی زیاد است، به همین منظور، در این مطالعه، بهینه‌یابی در حالت کلی (و نه محلی) انجام شده است. روش مورد استفاده برای یافتن مشخصات بهینه میراگر در این تحقیق، روش Robust Optimization است که روشی رایج در مسائل طراحی مهندسی است. همچنین، محل نصب TMDها، واقع بر روی عرشه‌ی پل، در تلاقی با ستون‌های میانی و در جهت طولی پل است (شکل ۴). با توجه به این‌که هدف از این مطالعه، کاهش ارتعاشات طولی پل است، از نمودارهای مربوط به جابجایی عرشه استفاده شده و نتایج مربوط به RMS جابجایی در نقاط کنترلی به منظور ارزیابی عملکرد میراگر در طول زمان پاسخ، بررسی شده است. لازم به ذکر است، تابع هدف در پژوهش حاضر، کمینه‌ی RMS جابجایی ثبت شده در نقاط کنترلی می‌باشد. معیار جذرمیانگین مربعات در رابطه‌ی (۴) معرفی شده است، که در آن  $y_i$  جابجایی عرشه پل و  $n$  تعداد نمونه‌ها (تعداد لحظه‌های ثبت پاسخ) است [۳۷]. معیار انتخاب نقاط بهینه، حداقل شدن RMS جابجایی در نقاط کنترلی می‌باشد. با توجه به اینکه تحلیل از نوع تاریخچه زمانی بوده، لذا به منظور بررسی عملکرد میراگر در طول زمان پاسخ، از معیار جذرمیانگین مربعات (RMS) برای ارزیابی پاسخ سازه در طول مدت زمان انجام تحلیل استفاده شده است.

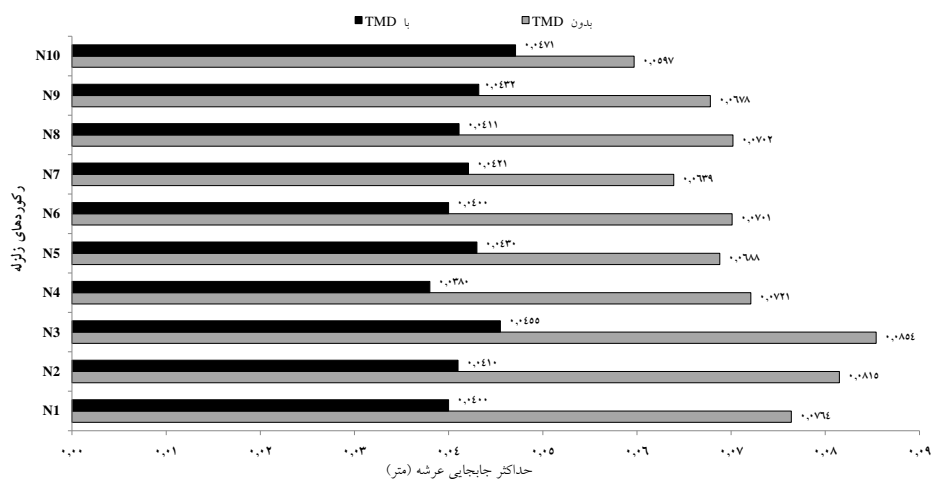
$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2} \quad (4)$$

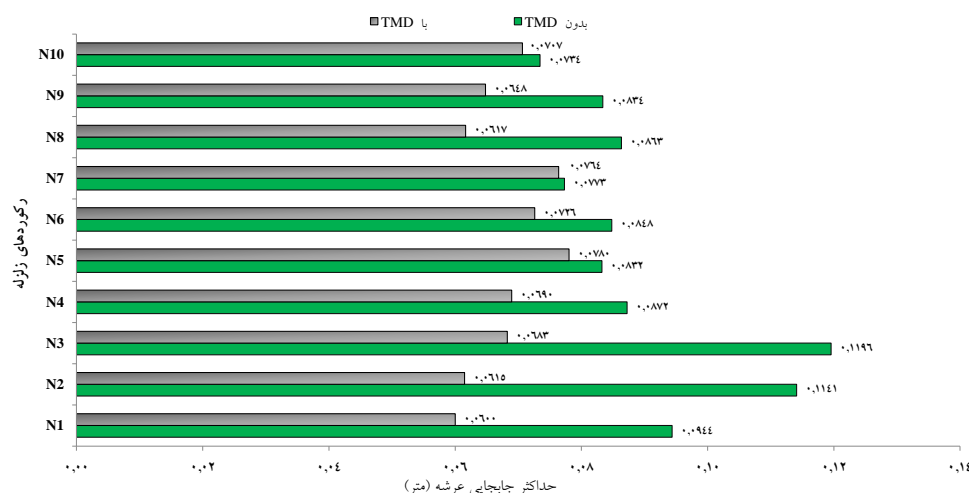
پس از مدل‌سازی پل در محیط نرم‌افزار اپنسیس و تنظیم فرکانس میراگر با فرکانس اصلی سازه و تخصیص جرم به میراگر، مدل آماده‌ی تحلیل با استفاده از رکورد زلزله شد. جهت دستیابی به مشخصات بهینه میراگر جرمی تنظیم‌شونده تحت اثر رکوردهای مورد مطالعه، ۷۷۰ تحلیل انجام شده است. دامنه‌ی تغییرات فرکانس زاویه‌ای ( $\omega_{TMD}$ ) در بازه‌ی ۴۴ تا ۵۳ رادیان بر ثانیه با گام‌های ۰/۱ و دامنه‌ی تغییرات نسبت میرایی ( $\mu_{TMD}$ ) نیز در بازه‌ی ۰ تا ۰/۱۲ قرار گرفت. در ادامه با استفاده از پردازش داده‌ها در محیط نرم‌افزار متلب، سطح رویه سه‌بعدی تابعی از متغیرهای فرکانس زاویه‌ای- نسبت میرایی- حداکثر جابجایی، برای حالت‌های مختلف پل معلق مدل‌شده با میراگر جرمی تنظیم‌شونده استخراج شده است. فضای پلان‌های سه‌بعدی فرکانس زاویه‌ای- نسبت میرایی- حداکثر تغییر مکان، مناسب‌ترین پاسخ (مقدار کمینه‌ی RMS جابجایی در نقاط کنترلی) [۳۸] استخراج شده است. بنابراین با استفاده از کد نوشته‌شده در نرم‌افزار متلب و با فرض ثابت ماندن جرم میراگر، مختصات نقطه‌ای در فضای سه‌بعدی یادشده که کمترین RMS جابجایی ایجادشده در نقاط کنترلی را نشان دهد، معرف مقادیر عددی مشخصات بهینه‌ی (کارآ) میراگر جرمی تنظیم‌شونده، در نظر گرفته شده است.

شکل‌های ۵ و ۶ مقایسه بین نتایج پاسخ پل نمونه با نسبت طول دهانه‌ی کناری به دهانه‌ی میانی ( $\alpha=0/7$ ) قبل و بعد از نصب TMD به‌ازای مقادیر بهینه میرایی و فرکانس زاویه‌ای را به‌ازای استقرار پل بر روی بستر خاک سخت و نرم نشان می‌دهد. جابجایی ایجاد شده در پل بدون میراگر، به‌ازای اعمال رکورد N3(ELC07) برابر با ۴/۵۵ سانتی‌متر حاصل شده است. توجه این امر، انطباق فرکانس غالب رکورد زلزله‌ی السنترو (۲/۱۹ رادیان بر ثانیه) با فرکانس مود اصلی پل (۲/۱۱ رادیان بر ثانیه- مطابق با جدول ۱) است. بنابراین هرچه نسبت فرکانس مود اصلی پل به فرکانس غالب رکوردهای زلزله نزدیک‌تر باشد، جابجایی ایجاد شده در راستای طولی پل، بیشتر خواهد بود و در این حالت، پدیده‌ی تشدید در پل رخ خواهد داد. میراگر، جابجایی سازه مستقر بر روی خاک سخت و نرم را تحت اثر رکوردهای حوزه نزدیک، به ترتیب و به صورت میانگین ۴۷/۴۰٪ و ۲۴/۴٪ کاهش داده است. مشاهده می‌شود، میراگر جرمی تنظیم‌شونده، عملکرد بهتری در خاک سخت دارد. شایان ذکر است، ماکزیمم تغییر مکان پایه در امتداد طولی پل مستقر بر روی خاک سخت بدون میراگر برابر با ۸ سانتی‌متر است (مطابق با شکل ۵) و با توجه به طول ۵۶ متری پایه، نسبت دررفت در حدود ۰/۰۱۵ حاصل می‌شود. با توجه به مقادیر حدود خرابی تعیین شده برای پل‌ها بر اساس معیارهای مندر و دوتا [۳۹] علی‌رغم دررفت ایجادشده برابر با ۰/۰۱۵، در پایه‌های میانی پل (بدون TMD)، در هیچ‌یک از اجزای پل، آسیب لرزه‌ای ایجاد نشده است. بر اساس معیارهای مندر و دوتا، مقدار میانگین دررفت برای حالات خرابی محدود، کم، متوسط، زیاد و کامل به ترتیب برابر با ۰/۰۰۵، ۰/۰۰۷، ۰/۰۱۵، ۰/۰۲۵ و ۰/۰۵ گزارش شده است.

جدول ۴: مشخصات رکوردهای زلزله [۴۰-۴۱]

نوع زمین	فاصله از گسل (km)	PGA(g)	بزرگا	سرعت موج برشی (m/s)	نماد	نام رکورد
امتداد لغز	۱۰	۰/۸۳۶	۷/۴	۷۳۶/۷۷	N <sub>1</sub>	Tabas, 1978
امتداد لغز	۷	۰/۶۳۵	۶/۶	۴۸۷/۴	N <sub>2</sub>	Bam, 2003
امتداد لغز	۱۵	۰/۶۱۴	۶/۹	۴۱۰/۵	N <sub>3</sub>	ELC07, 1979
معکوس	۶/۴	۰/۸۴۰	۶/۷	۳۷۸/۵۲	N <sub>4</sub>	Northridge(Sylmar), 1994
معکوس	۶/۵	۰/۴۶۳	۶/۷	۳۹۰/۵۱	N <sub>5</sub>	Northridge(Rinaldi), 1994
معکوس	۱۱/۴	۰/۳۰۸	۶/۷	۴۲۶/۵۲	N <sub>6</sub>	Northridge(Arleta), 1994
معکوس	۶/۱	۰/۵۹۳	۶/۷	۵۰۱/۳	N <sub>7</sub>	Northridge(JFP), 1994
معکوس	۷/۵	۰/۴۲۷	۶/۷	۴۳۱/۱۷	N <sub>8</sub>	Northridge(Pacoima Dam) , 1994
امتداد لغز	۱۳	۰/۱۴۳	۶/۶	۳۹۴/۸	N <sub>9</sub>	San Fernando(Pacoima Dam) , 1971
امتداد لغز	۸/۸	۰/۳۹۶	۶/۲	۶۳۲/۱	N <sub>10</sub>	Morgan Hill(Coyote Lake Dam), 1984
معکوس	۱۷/۶	۰/۲۳۸	۶/۵	۵۱۵/۶	T <sub>1</sub>	Friuli (Italy), 1976

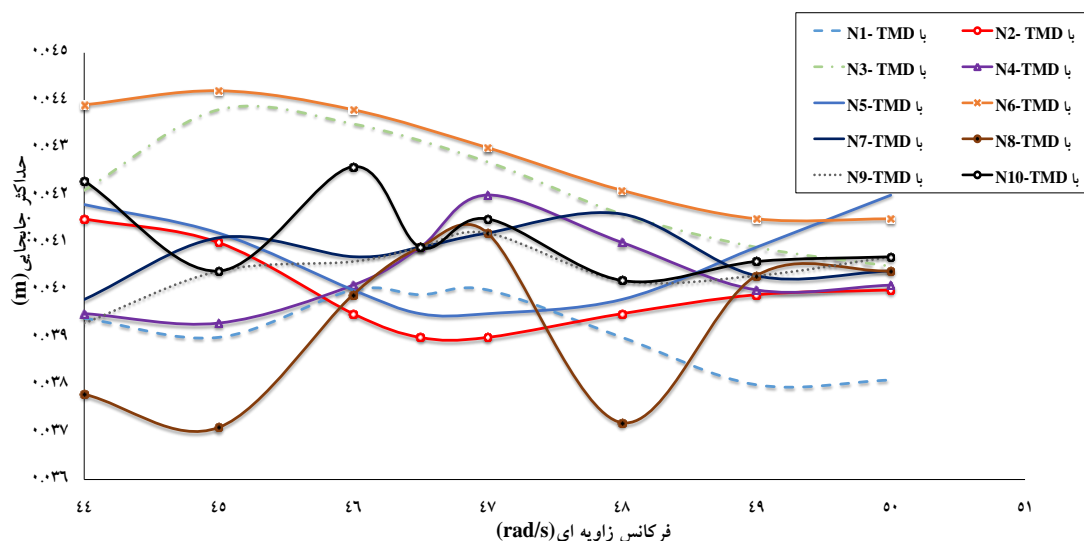
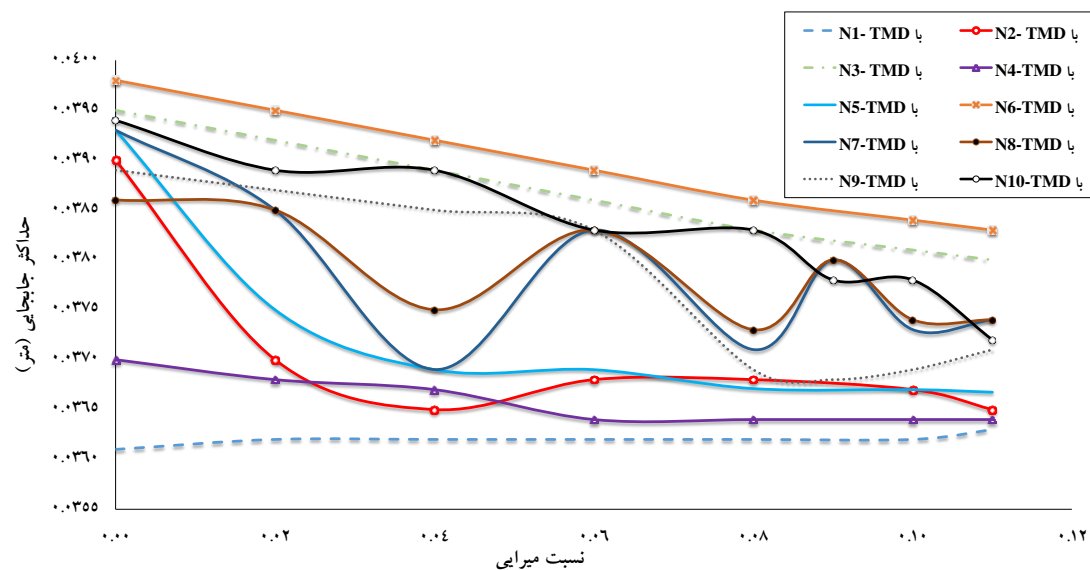
شکل ۵: بررسی تاثیر عملکرد TMD در کاهش ارتعاشات سازه مستقر بر روی بستر سخت تحت اثر رکوردهای زلزله در راستای طولی به ازای  $\alpha=0.7$



شکل ۶: بررسی تاثیر عملکرد TMD در کاهش ارتعاشات سازه مستقر بر روی بستر نرم تحت اثر رکوردهای زلزله در راستای طولی به ازای  $\alpha=0.7$

در شکل ۱، فلوجارت تعیین مشخصات بهینه ی میراگر جرمی تنظیم شونده برای یک رکورد ارائه شده است. فرآیند قیدشده در شکل ۱، تحت ۱۰ رکورد منتخب حوزه نزدیک و به ازای دو خاک بستر سخت و نرم تکرار شده است. نتایج حاصل از این تحلیل‌ها، بر اساس معیار RMS برای پاسخ جابجایی عرشه پل در شکل ۷ ارائه شده است. لازم به ذکر است، شکل ۷ تصویر دو بعدی برداشت شده از شکل ۸ می‌باشد. در واقع تغییرات همزمان فرکانس زاویه‌ای و نسبت میرایی با جابجایی نقطه‌ی کنترلی در شکل ۸ نمایش داده شده است، در حالی که در شکل ۷ تغییرات فرکانس زاویه‌ای-جابجایی عرشه و تغییرات نسبت میرایی-جابجایی عرشه به ازای استقرار پل بر روی خاک سخت نمایش داده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده، مشاهده می‌شود، در حالت الحاق TMD بر روی پل، حداقل RMS جابجایی عرشه در مقطع مورد نظر، تحت اثر اعمال ده رکورد زلزله حوزه نزدیک به ازای نسبت‌های میرایی و فرکانس‌های زاویه‌ای مشخصی، به دست آمده است و در این حالت در فضای سه بعدی با این مختصات، پاسخ بهینه در سازه پل حاصل می‌شود. بر اساس نتایج به دست آمده، مشاهده می‌شود، صرف نظر از نوع خاک بستر، با افزایش نسبت میرایی، پاسخ ارتعاش سازه کاهش می‌یابد. به منظور دستیابی به مقادیر بهینه‌ی دو مولفه‌ی فرکانس زاویه‌ای و نسبت میرایی، لازم است حداقل جابجایی عرشه، تحت اثر همزمان دو مولفه‌ی یادشده، مورد بررسی و مطالعه قرار گیرد. به همین منظور، پلان‌های سه بعدی حداکثر جابجایی عرشه-فرکانس زاویه‌ای-نسبت میرایی، تحت اثر یک دسته ده تایی رکورد حوزه نزدیک در نرم افزار متلب استخراج شده است.

در شکل ۷ اثر همزمان دو مولفه‌ی فرکانس زاویه‌ای و نسبت میرایی در تعیین حداقل RMS جابجایی ایجادشده در عرشه‌ی پل مستقر بر روی خاک سخت، در حالت الحاق TMD به پل معلق با نسبت طول دهانه‌های  $\alpha=0.7$ ، نمایش داده شده است. همچنین در جدول ۵ اثر همزمان دو مولفه‌ی فرکانس زاویه‌ای و نسبت میرایی در تعیین حداقل RMS جابجایی ایجادشده در عرشه‌ی پل مستقر بر روی خاک سخت و نرم قابل مشاهده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد، با نرم شدن خاک، بیشینه جابجایی ایجادشده در سازه افزایش یافته است. لازم به یادآوری است، همانطور که پیش تر اشاره شد، دامنه ی تغییرات فرکانس زاویه‌ای ( $\omega_{TMD}$ ) در بازه ی ۴۴ تا ۵۳ رادیان بر ثانیه با گام‌های ۰/۱ و دامنه ی تغییرات نسبت میرایی ( $\mu_{TMD}$ ) نیز در بازه ی ۰ تا ۰/۱۲ در نظر قرار داده شده است و مقادیر بهینه در این بازه استخراج شده اند. همچنین مقادیر فرکانس در جدول ۱ مربوط به هندسه اصلی پل می باشد که در آن  $\alpha=0.33$  است، اما مقادیر جدول ۵ مربوط به یکی دیگر از مدل های پل با نسبت طول دهانه های  $\alpha=0.7$  است. لذا مقادیر عددی فرکانس ارائه شده در جدول های ۱ و ۵، با یکدیگر تفاوت خواهد داشت.

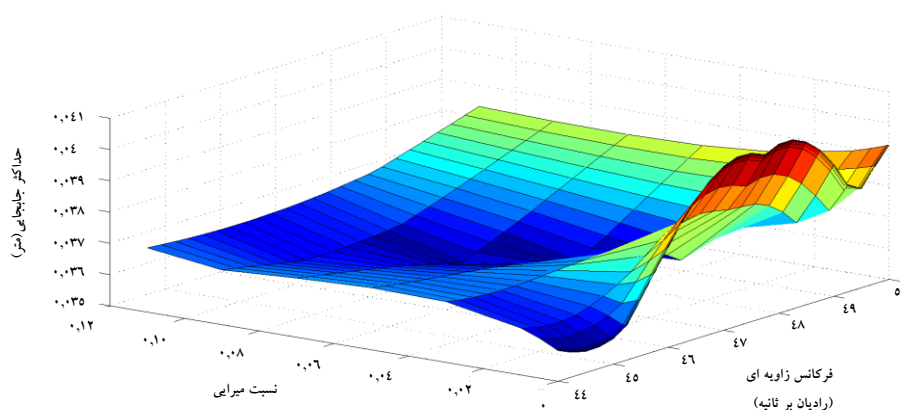


شکل ۷: تغییرات RMS حداکثر جابجایی طولی عرشه با تغییرات نسبت میرایی (بالا) فرکانس زاویه ای (پایین) با TMD تحت اثر رکوردهای حوزه نزدیک به ازای  $\alpha=0/7$  (پل مستقر بر روی خاک سخت)

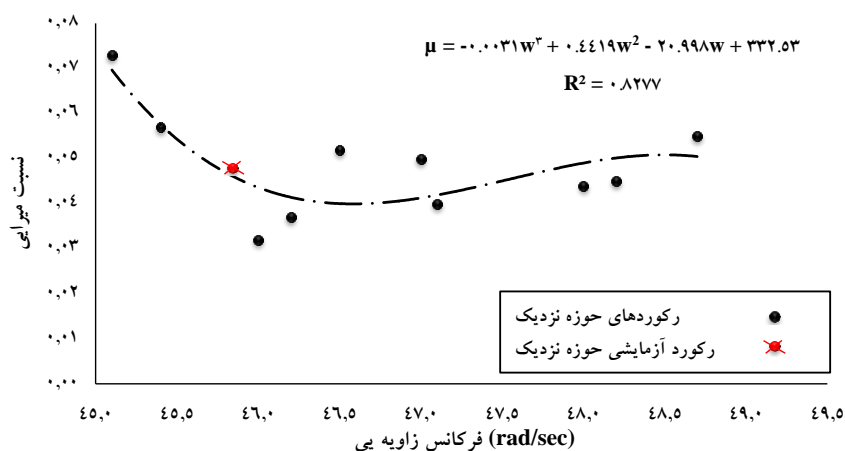
جدول ۵: تعیین مولفه‌های بهینه میراگر جرمی تنظیم‌شونده تحت اثر رکوردهای زلزله حوزه نزدیک به ازای  $\alpha=0.7$

نوع بستر خاک	ID	مولفه‌های بهینه	
		نسبت $(\mu_{opt})$ میرایی بهینه	فرکانس $(\omega_{opt})$ زاویه‌ای بهینه
سخت	N <sub>1</sub>	۰/۰۵	۴۷
	N <sub>2</sub>	۰/۰۳۲	۴۶
	N <sub>3</sub>	۰/۰۳۷	۴۶/۲
	N <sub>4</sub>	۰/۰۵۵	۴۸/۷
	N <sub>5</sub>	۰/۰۵۷	۴۵/۴
	N <sub>6</sub>	۰/۰۴۴	۴۸
	N <sub>7</sub>	۰/۰۴	۴۷/۱
	N <sub>8</sub>	۰/۰۴۵	۴۸/۲
	N <sub>9</sub>	۰/۰۷۳	۴۵/۱
	N <sub>10</sub>	۰/۰۵۲	۴۶/۵
نرم	N <sub>1</sub>	۰/۰۶۱	۵۱
	N <sub>2</sub>	۰/۰۴۳	۴۸.۴
	N <sub>3</sub>	۰/۰۵۱	۴۹
	N <sub>4</sub>	۰/۰۶۷	۵۲.۷
	N <sub>5</sub>	۰/۰۶	۴۹.۴
	N <sub>6</sub>	۰/۰۵۶	۵۱.۳
	N <sub>7</sub>	۰/۰۴۷	۵۰.۴
	N <sub>8</sub>	۰/۰۵۱	۵۲
	N <sub>9</sub>	۰/۰۶۳	۴۷.۱
	N <sub>10</sub>	۰/۰۵۸	۴۷.۸

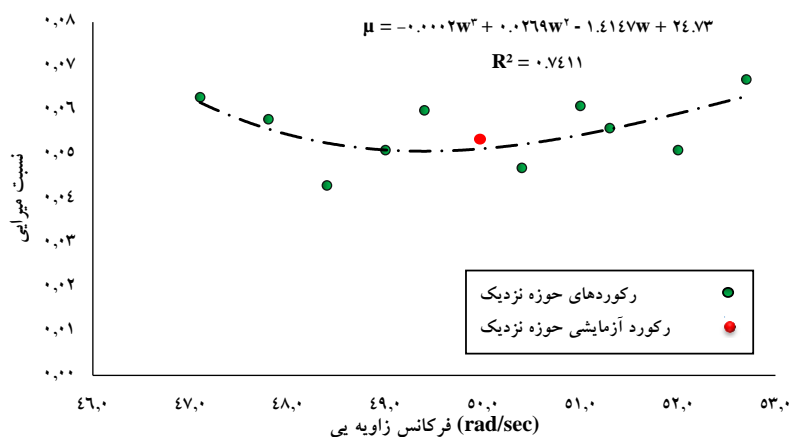
برای تعیین مشخصات بهینه میراگر، تحت اثر تعداد رکوردهای بیشتر زلزله در حالت تعمیم‌یافته، رگرسیون معادلاتی که در آن به ازای جرم ثابت، مقادیر بهینه‌ی دو مولفه‌ی فرکانس زاویه‌ای  $(\omega_{opt})$  و نسبت میرایی  $(\mu_{opt})$  حاصل شده، در شکل ۸ قابل مشاهده است. شایان ذکر است روابط یادشده، در حالتی حاصل شده که نسبت طول دهانه‌ی کناری به دهانه‌ی میانی پل  $(\alpha)$  برابر با ۰/۷ است.



شکل ۸: تعیین مشخصات بهینه میراگر جرمی تنظیم شونده تحت اثر رکورد حوزه نزدیک  $N_1$  به ازای  $\alpha = 0.7$  (پل مستقر بر روی خاک سخت)



شکل ۹: تعیین معادله خط جهت تعیین مولفه‌های بهینه TMD با فرض جرم ثابت تحت اثر رکوردهای حوزه نزدیک به ازای  $\alpha = 0.7$  و بستر سخت



شکل ۱۰: تعیین معادله خط جهت تعیین مولفه‌های بهینه TMD با فرض جرم ثابت تحت اثر رکوردهای حوزه نزدیک به ازای  $\alpha = 0.7$  و بستر نرم

مطابق با شکل ۹ و ۱۰ مشاهده می‌شود، ضریب همبستگی ( $R^2$ ) در مورد معادله مربوط به رکوردهای حوزه نزدیک، به ازای ضریب  $\alpha = 0.7$  در دو حالت استقرار سازه بر روی بستر سخت و نرم به ترتیب برابر با  $0.8277$  و  $0.7411$  به دست آمده است. توجه به این نکته ضروری است که هرچه ضریب همبستگی به عدد ۱ نزدیکتر باشد، بیانگر برازش مناسب نقاط، بر روی معادله ارائه شده است و دقت و صحت رابطه‌ی ارائه شده افزایش می‌یابد. به دلیل این که طراحی میراگر وابسته به بارگذاری است، مقادیر بهینه‌ی مشخصات میراگر با برازش رابطه مناسب بر نتایج حاصل در مقابل ۱۰ رکورد زلزله استخراج شده است تا بطور نسبی پاسخ در مقابل همه بارگذاری‌ها بهبود یابد. آنچه در شکل ۹ و ۱۰ دیده می‌شود، معادله خط جهت تعیین مشخصات بهینه TMD با فرض جرم ثابت تحت اثر رکوردهای حوزه نزدیک به ازای  $\alpha = 0.7$  در



دو حالت استقرار سازه بر روی بستر سخت و نرم می‌باشد. به منظور دستیابی به روابط کلی جهت تعیین مقادیر بهینه میراگر جرمی تنظیم‌شونده، بر حسب نسبت طول دهانه‌ی کناری به دهانه‌ی میانی پل، محاسبات به‌ازای نسبت‌های دیگری از ضریب  $\alpha$  (نسبت‌های ۰، ۱/۴، ۲/۸۵ و ۱/۳۴)، به صورت مشابه با آن چه تاکنون بیان شد، انجام شده که با توجه به حجم بالای داده‌ها، از بیان مطالب تکراری اجتناب شده است. مطابق با شکل‌های ۹ و ۱۰ می‌توان پارامترهای بهینه میراگر را به ازای رکوردهای مختلف زلزله بر اساس پارامتر  $\alpha=0.7$  بیان کرد، این روند به ازای سایر مقادیر عددی ضریب  $\alpha$  محاسبه شده است. به عنوان نمونه در جدول ۶ مشخصات بهینه TMD تحت اثر رکورد آزمایشی (T<sub>1</sub>) به ازای نسبت‌های مختلف  $\alpha$  در دو حالت بستر سخت و نرم ارائه شده است. در ادامه با محاسبه‌ی مشخصات بهینه میراگر تحت اثر ده رکورد حوزه نزدیک، پارامترهای فرکانس زاویه‌ای بهینه و نسبت میرایی بهینه بر اساس ضریب  $\alpha$  قابل ارائه هستند که در ادامه با استفاده از رگرسیون غیرخطی، معادله‌ی فرکانس زاویه‌ای بهینه و نسبت میرایی بهینه، تحت اثر رکوردهای مورد مطالعه، بر اساس نسبت طول دهانه‌ی کناری به دهانه‌ی میانی ( $\alpha$ )، به صورت فرم کلی ارائه شده در روابط (۵) و (۶) قابل بیان است. مقادیر عددی ضرایب معرفی شده در روابط اخیر، در جدول ۷ به ازای حالت‌های مختلف قابل مشاهده است. لازم به ذکر است کاربرد روابط (۵) و (۶) در جدول ۸ نمایش داده شده است.

$$\omega_{opt} = A\alpha^2 + B\alpha + P \quad (5)$$

$$\mu_{opt} = A'\alpha^2 + B'\alpha + P' \quad (6)$$

جدول ۶: تعیین ضرایب منحنی جهت تعیین مشخصات بهینه میراگر بر اساس مولفه‌ی  $\alpha$

نوع خاک بستر	$\alpha$	مولفه‌های بهینه		حداکثر جابجایی عرشه (cm)	
		( $\mu_{opt}$ ) نسبت میرایی بهینه	( $\omega_{opt}$ ) فرکانس زاویه‌ای بهینه	بدون TMD	با TMD
T <sub>1</sub> بستر سخت	۰/۳۴	۰/۰۴۲	۴۵/۱	۴/۲	۷/۵۸
	۰/۷	۰/۰۴۹	۴۵/۸	۴/۴	۷/۶
	۱	۰/۰۵	۴۷/۱	۴/۸	۷/۶۳
	۱/۴	۰/۰۵۱	۴۸	۴/۹	۷/۷
	۲/۸۵	۰/۰۵۴	۴۸/۳	۴/۹۵	۷/۷۸
T <sub>1</sub> بستر نرم	۰/۳۴	۰/۰۴۸	۴۹/۶	۶/۳	۱۰/۴
	۰/۷	۰/۰۵۴	۵۰/۱	۶/۸	۱۰/۵
	۱	۰/۰۵۸	۵۲/۹	۷/۱	۱۰/۶
	۱/۴	۰/۰۶	۵۳/۲	۷/۳	۱۰/۸
	۲/۸۵	۰/۰۶۶	۵۴/۴	۷/۴۱	۱۰/۸۸

\*برداشت شده از شکل ۹ و ۱۰

با توجه به بالا بودن هزینه محاسباتی به منظور یافتن مقادیر بهینه مشخصات میراگر، در این مطالعه از ۱۰ رکورد استفاده شد که بیش از تعداد حداقل ۷ رکورد زلزله توصیه شده در دستورالعمل‌های رایج طراحی لرزه‌ای است. خوشبختانه، در برازش منحنی و استخراج روابط، مقدار ضریب  $R^2$  به ازای استقرار سازه بر روی بستر سخت و نرم به ترتیب برابر با ۰/۸۲ و ۰/۷۴ بدست آمد که بیانگر دقت خوب و تطابق نسبی روابط نهایی با نتایج همه رکوردهای مورد استفاده بود. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد با نرم‌تر شدن خاک بستر، مقادیر عددی فرکانس بهینه و میرایی بهینه افزایش پیدا کرده است، به نحوی که بازه‌ی عددی فرکانس زاویه‌ای بهینه در بستر سخت در محدوده‌ی ۴۵-۴۹ رادیان بر ثانیه و در بستر نرم در محدوده‌ی ۴۷-۵۳ رادیان بر ثانیه قرار دارد. در ادامه، دقت نتایج طراحی با روابط مذکور در مقابل رکورد آزمایشی، با موفقیت ارزیابی شد. با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان، به ازای مقادیر عددی متفاوتی از نسبت طول دهانه‌ی کناری به دهانه میانی پل، می‌توان مولفه‌های بهینه میراگر را تحت اثر رکوردهای حوزه نزدیک، تعیین نمود. عملکرد TMD تحت اثر رکورد آزمایشی (T1) به ازای مقادیر متفاوتی از ضریب  $\alpha$  در جدول ۶ قابل مشاهده می‌باشد. به منظور راستی‌آزمایی معادله‌ی به دست آمده، تحت اثر رکوردهای مورد مطالعه در این پژوهش، با استفاده از رکورد حوزه نزدیک (T1) مطابق با مشخصات جدول ۳، دقت روش ارائه شده، بررسی شده است. در شکل‌های ۹ و ۱۰ به ازای نسبت طول دهانه‌ی کناری به میانی برابر با ۰/۷، مقادیر عددی مولفه‌های بهینه تحت اثر رکورد آزمایشی مدنظر نمایش داده شده است. انطباق نتایج حاصل از رکورد آزمایشی بر روی معادله‌ی به دست آمده، بیانگر دقت قابل قبول معادله‌ی خط مربوط به رکورد حوزه نزدیک است. مقادیر عددی مولفه‌های بهینه، به ازای سایر نسبت‌های طول دهانه‌ی کناری به دهانه‌ی میانی پل در جدول ۶ ارائه شده است. بر اساس نتایج به دست آمده در جدول ۶ و با مقایسه حداکثر جابجایی ثبت شده در عرشه، مشاهده می‌شود با افزایش نسبت طول دهانه‌ی کناری به دهانه‌ی میانی (با افزایش طول دهانه‌ی پل)، عملکرد میراگر کاهش می‌یابد، به نحوی که بهترین عملکرد میراگر تحت اثر رکورد آزمایشی حوزه نزدیک مربوط به سازه مستقر بر روی بستر سخت به ازای ضریب  $\alpha$  برابر با ۰/۳۴ حاصل شده است. در این حالت، میراگر ۴۴٪ جابجایی عرشه پل را کاهش داده است، در حالی که با افزایش نسبت طول دهانه‌ی پل به ۲/۸۵، میراگر ۳۶٪ جابجایی عرشه را کاهش می‌دهد. همچنین در حالت استقرار سازه بر روی بستر نرم، بهترین عملکرد میراگر نیز به ازای ضریب  $\alpha$  برابر با ۰/۳۴ حاصل شده است. در این حالت، میراگر ۳۹/۴٪ جابجایی عرشه پل را کاهش داده است، در حالی که با افزایش نسبت طول دهانه‌ی پل به ۲/۸۵، میراگر ۳۱/۹٪ جابجایی عرشه را کاهش می‌دهد. لذا مشاهده می‌شود، با نرم‌تر شدن خاک بستر، کارایی میراگر جرمی تنظیم شونده در سازه، کاهش می‌یابد. در نوشتار حاضر، میراگرهای TMD درست بر روی پایه‌های پل نصب شده‌اند تا در پاسخ عرضی عرشه تداخل نکنند. همچنین TMD ها به نحوی مهار شده‌اند که فقط در جهت طولی پل آزادی حرکت داشته باشند و در جهت عرضی حرکت آن‌ها مقید شده است. در مطالعات پیشین درصد کاهش پاسخ سازه بر اساس استفاده از TMD تا ۴۰٪ گزارش شده است [۳-۴۲]. به منظور بررسی کاربردی بودن روابط کمک طراحی ارائه شده در این پژوهش، دو نمونه پل معلق، مورد مطالعه‌ی پارامتریک قرار گرفته است. مدل اول، یک نمونه پل معلق سه دهانه است که طول دهانه‌ی میانی برابر ۲۸۵/۶ متر و طول دهانه‌ی کناری آن ۱۲۸/۱ متر است [۳۶]. مدل دوم بر اساس مطالعات مارتینز و همکاران (۲۰۱۵) انتخاب شده است. در این پل نیز طول دهانه‌ی میانی ۱۰۴ متر و طول دهانه‌ی کناری ۴۶ متر می‌باشد [۳۷]. هر دو نمونه‌ی پل، مجهز به TMD شده و تحت اثر رکوردهای مختلف زلزله تحریک شده‌اند. به منظور تحریک مدل اول از رکورد پارکفیلد (۲۰۰۴) که یک رکورد حوزه نزدیک و دارای اثرات جهت‌پذیری پیش‌رونده می‌باشد، استفاده شده است. برای تحریک مدل دوم از رکورد سوپراستیشن هیلز (۱۹۸۷) که یک زلزله نزدیک گسل و فاقد پالس می‌باشد، استفاده شده است.

جدول ۷: تعیین ضرایب معادلات منحنی جهت تعیین مولفه‌های بهینه‌ی میراگر بر اساس مولفه‌ی  $\alpha$ 

نوع خاک بستر	فرکانس زاویه‌ای بهینه			نسبت میرایی بهینه		
	A	B	P	A'	B'	P'
بستر سخت	-۱/۰۱۲۲	۴/۵۹۹	۴۳/۴۳۳	-۰/۰۰۳	۰/۰۱۳۸	۰/۰۳۸۸
بستر نرم	-۱/۲۲۹	۵/۹۵۳	۴۷/۴۲۴	-۰/۰۰۳۳	۰/۰۱۷۵	۰/۰۴۲۹

جدول ۸: تعیین ضرایب معادلات منحنی جهت تعیین مولفه‌های بهینه‌ی میراگر بر اساس مولفه‌ی  $\alpha$ 

مدل‌های بررسی شده	معادلات ۵ و ۶			
	روش مرسوم بهینه‌ی یایی <sup>[۴۳]</sup> *	$(\omega_{opt})$	$(\mu_{opt})$	$(\omega_{opt})$
		نسبت فرکانس	نسبت میرایی	نسبت فرکانس
	$\alpha$	میرایی بهینه	زاویه‌ای بهینه	زاویه‌ای بهینه
پل مدل اول <sup>[۴۳]</sup> مستقر بر بستر سخت	۰/۴۵	۰/۰۴۵۲	۴۵/۶	۴۵/۲۹
پل مدل دوم <sup>[۴۴]</sup> مستقر بر بستر سخت	۰/۴۴	۰/۰۴۴۸	۴۵/۵	۴۵/۲۶
پل مدل اول <sup>[۴۳]</sup> مستقر بر بستر نرم	۰/۴۵	۰/۰۵۱۲	۵۰/۳۴	۴۹/۸۵
پل مدل دوم <sup>[۴۴]</sup> مستقر بر بستر نرم	۰/۴۴	۰/۰۵۱۸	۵۰/۲۱	۴۹/۸۱

\* الگوریتم زنتیک

مشخصات بهینه میراگر ( $\omega_{opt}$  و  $\mu_{opt}$ ) با استفاده از روش مرسوم بهینه‌یایی (الگوریتم‌های فراابتکاری)، برای هر دو نمونه پل، برداشت و در جدول ۸ مقادیر عددی استخراج شده با مشخصات بهینه‌ی محاسبه‌شده از روابط ۵ و ۶ به ازای دو حالت استقرار سازه بر روی بستر سخت و نرم مقایسه شده‌است. نتایج نشان می‌دهد، دقت روابط ارائه‌شده در تعیین مشخصات بهینه‌ی میراگر نصب شده بر روی پل‌های مختلف، مطلوب بوده، اما با نرم‌شدن خاک بستر، این دقت کاهش می‌یابد، به‌نحوی که حداکثر اختلاف مربوط به تعیین پارامترهای بهینه TMD بین روش مرسوم و روابط پیشنهادی پژوهش حاضر در حالت استقرار پل بر روی خاک بستر سخت، به‌ترتیب در نمونه اول و دوم ۱/۱٪ و ۱/۱٪ و در حالت استقرار سازه بر روی خاک بستر نرم به‌ترتیب در نمونه اول و دوم ۲/۱٪ و ۳/۷٪ حاصل شده‌است.

#### ۴- نتیجه گیری

نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش حاضر را می‌توان به شرح زیر معرفی و دسته‌بندی نمود:

۱. میراگر جرمی تنظیم‌شونده، در کاهش ارتعاشات سازه تحت اثر رکوردهای حوزه‌نزدیک، در هر دو حالت استقرار سازه بر روی خاک سخت و نرم عملکرد مطلوبی دارد. به‌نحوی که به‌صورت میانگین، ارتعاشات سازه با نصب TMD تحت اثر رکوردهای حوزه‌نزدیک، به ازای نسبت جرمی میراگر به جرم سازه برابر با ۰/۰۲، در شرایط استقرار سازه بر روی خاک سخت بیش از ۴۰ درصد کاهش یافته‌است، درحالی که با نرم شدن خاک بستر، این روند کاهشی به ۲۴٪ تنزل پیدا کرده‌است.
۲. عملکرد میراگر در اثر تغییر نوع خاک بستر و تغییر طول دهانه‌ی پل، دستخوش تغییر می‌شود. به‌نحوی که تحت اثر رکوردهای حوزه‌نزدیک و در شرایط استقرار پل بر روی بستر سخت، به‌ازای  $\alpha = ۰/۳۴$ ، بالاترین عملکرد میراگر با ۴۴٪ کاهش جابجایی عرشه پل و ضعیف‌ترین عملکرد میراگر به ازای  $\alpha = ۲/۸۵$  با ۳۶٪ کاهش جابجایی عرشه پل، حاصل شده‌است. در حالی که در شرایط استقرار پل بر روی بستر نرم، بهترین عملکرد میراگر نیز به‌ازای ضریب  $\alpha$  برابر با ۰/۳۴ حاصل شده‌است. در این حالت، میراگر ۳۹/۴٪ جابجایی

عرشه پل را کاهش داده است، در حالی که با افزایش نسبت طول دهانه‌ی پل به  $2/85$ ، میراگر  $31/9\%$  جابجایی عرشه را کاهش می‌دهد. لذا مشاهده می‌شود، با نرم‌تر شدن خاک بستر، کارایی میراگر جرمی تنظیم شونده در سازه، کاهش می‌یابد.

۳. با فرض ثابت ماندن جرم میراگر، روابط کمک‌طراحی جهت تعیین مولفه‌های بهینه میراگر جرمی تنظیم‌شونده، به‌ازای مقادیر متفاوتی از نسبت طول دهانه‌ی پل تحت اثر رکوردهای حوزه نزدیک تعیین شد. بررسی کارایی روابط در تخمین مقادیر بهینه‌ی میراگر، روی دو نمونه پل کابلی، نشان‌دهنده‌ی دقت قابل‌قبول روابط پیشنهادی است.

۴. با نرم‌تر شدن خاک بستر، مقادیر عددی فرکانس بهینه و میرایی بهینه مربوط به میراگر، افزایش پیدا کرده است، به نحوی که بازه‌ی عددی فرکانس زاویه‌ای بهینه در بستر سخت در محدوده‌ی  $45-49$  رادیان بر ثانیه و در بستر نرم در محدوده‌ی  $47-53$  رادیان بر ثانیه قرار دارد.

۵. لازم بذکر است که هزینه محاسباتی یافتن مقادیر بهینه مشخصات میراگر، بسیار زیاد است. در این مطالعه از ۱۰ رکورد استفاده شده است که بیش از تعداد حداقل ۷ رکورد زلزله توصیه شده در دستورالعمل‌های رایج طراحی لرزه‌ای است و خوشبختانه، در برآزش منحنی و استخراج روابط، مقدار ضریب  $R^2$  در دو حالت استقرار سازه بر روی بستر سخت و نرم به ترتیب برابر با  $0/82$  و  $0/74$  حاصل شده است که این موضوع، بیانگر دقت خوب و تطابق نسبی روابط نهایی با نتایج همه رکوردهای مورد استفاده است. علاوه بر این، دقت نتایج طراحی با روابط مذکور در مقابل رکورد آزمایشی، با موفقیت ارزیابی شد. توجه به این نکته ضروری است که دقت معادلات پیشنهادی به منظور برآورد پارامترهای بهینه میراگر، با نرم‌شدن خاک بستر، کاهش می‌یابد. بدیهی است استفاده از تعداد زلزله بیشتر برای توسعه تحقیق، توصیه می‌شود.

## مراجع

- [1] Soureshjani, O.K. and Massumi, A.(2019) Effect of near and far-field earthquakes on RC bridge with and without damper, *Earthquakes and Structures*, 17(6), pp. 533-543.
- [2] G, Chen.(2018). May 12, 2008, Wenchuan Earthquake in China, *New Madrid Seismic Zone Conference*, Rolla, Missouri, August 12-14.
- [3] CC, Lin., JF, Wang, and BL, Chen.(2005). Train-Induced Vibration Control of High-Speed Railway Bridges Equipped with Multiple Tuned Mass Dampers, *Journal of Bridge Engineering*, 10(4).
- [4] E, Caetano.(2010). Studies for controlling human-induced vibration of the Pedro e Inês footbridge, Portugal. Part 2: Implementation of tuned mass dampers, *Engineering Structures*, 32(4), pp 1082-1091.
- [5] M, Luu., V, Zabel, and C, Konke.(2012). An optimization method of multi-resonant response of high-speed train bridges using TMDs, *Finite Elements in Analysis and Design*, 53, pp13-23.
- [6] B, Han., W. T. Yan., V. H. Cu., L, Zhu., and H. B. Xie.(2019). H-TMD with hybrid control method for vibration control of long span cable-stayed bridge. *Earthquakes and Structures*, 16(3), pp 349-358.
- [7] M, Domaneschi., L, Martinelli., and E, Po.(2015). Control of wind buffeting vibrations in a suspension bridge by TMD: Hybridization and robustness issues, *Computers & Structures*, 155, pp3-17.
- [8] F, Meng., J, Wan., Y. Xia., Y, Ma., and J, Yu.(2020). A Multi-Degree of Freedom Tuned Mass Damper Design for Vibration Mitigation of a Suspension Bridge, *applied sciences*, 10(457).
- [9] S.H, Hosseini Lavassani., H, Alizadeh., R, Doroudi., and P, Homami. (2020). Vibration control of suspension bridge due to vertical ground motions, *Advances in Structural Engineering*, pp 1-16.
- [10] P, Zhang., J, Tan., H, Liu., Y, Yang., and C, Cui. (2021). Seismic Vibration Mitigation of a Cable-Stayed Bridge with Asymmetric Pounding Tuned Mass Damper, *Mathematical Problems in Engineering*, Article ID 6647303.

- [11] Connor, J.J. (2002). Introduction to Structural Motion Control, *Prentice Hall PTR*.
- [12] Kun, X., Kaiming, B., Qiang, H., Xiaopeng, L., and Xiuli, D.(2019). Using tuned mass damper inerter to mitigate vortex-induced vibration of long-span bridges: Analytical study, *Engineering Structures* 182, pp. 101-111.
- [13] Y, Kang., and L, Peng.(2019). Optimisation Design and Damping Effect Analysis of Large Mass Ratio Tuned Mass Dampers, *Shock and Vibration*, Article ID8376781.
- [14] H, Alizadeh., and, S.H, Hosseini Lavassani. (2021). Flutter Control of Long Span Suspension Bridge in Time Domain Using Optimized TMD, *International Journal of Steel Structures*, 21(2), pp 731-742 .
- [15] S.H, Hosseini Lavassani., H, Alizadeh. and P, Homami.(2019). Optimizing tuned mass damper parameters to mitigate the torsional vibration of a suspension bridge under pulse-type ground motion: A sensitivity analysis, *Journal of Vibration and Control*, 0(0), pp. 1-14.
- [16] J, Li., H, Zhang., Sh, Chen., and D, Zhu.(2020). Optimization and sensitivity of TMD parameters for mitigating bridge maximum vibration response under moving forces, *Structures* 28, pp. 512-520.
- [17] L.F.F, Miguel., and G.P, Santos.(2021). Optimization of Multiple Tuned Mass Dampers for Road Bridges Taking into Account Bridge-Vehicle Interaction, Random Pavement Roughness, and Uncertainties, *Shock and Vibration*.
- [18] Gh, Pachide., M, Kafi., and M, Gholhaki.(2020). Evaluation of cyclic performance of a novel bracing system equipped with a circular energy dissipater, *Structure*, 28, pp 467-481.
- [19] Gh, Pachide., M, Gholhaki., and M, Kafi.(2020). Experimental and Numerical Evaluation of an Innovative Diamond-Scheme Bracing System Equipped with a Yielding Damper, *Steel and Composite Structures*, 36(2), pp 197-211.
- [20] A, Kheyroddin., M, Gholhaki., and Gh, Pachideh.(2019). Seismic evaluation of reinforced concrete moment frames retrofitted with steel braces using IDA and pushover methods in the near-fault field, *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*, 7(1), pp 159-173.
- [21] H, Shariatmadar., and S, Golnargesi.(2015). Structural Control with Active Tuned Mass Damper by Type 2 Fuzzy Logic Controller for Seismic Excitation, *Sharif Journal of Civil Engineering*, 31.2(1.2), pp 21-32.
- [22] H, Soltani., F, Emami., and P, Javadi.(2022). Seismic Assessment of Reinforced Concrete Skewed Bridges under Near-Fault Ground Motions with Considering Soil-Structure Interaction- Case Study of Jack Tone Road On-Ramp Overcrossing Located in California, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 53(10), pp 4433-4458.
- [23] H, Alizadeh., and, S.H, Hosseini Lavassani. (2021). Effects of the Soil-Structure Interaction on the Performance of TMD Used to Control the Seismic Longitudinal Response of Suspension Bridges, *Journal of Structural and Construction Engineering*, 8(4), pp 439-458.
- [24] N.J, Gimsing., and C.T, Georgakis. (2012). Cable Supported Bridges: Concept and Design, *A Wiley-Interscience Publication*, John Wiley&Sons.
- [25] Z, Xinwei., X, Rucheng., and S, Bin.(2019). Span limit and parametric analysis of cable-stayed bridge, *Structural Engineering and Mechanics*, 71(3), pp. 271-282.
- [26] L.D, Viet., and N. B, Nghi.(2014). On a nonlinear single –mass two-frequency pendulum tuned mass damper to reduce horizontal vibration, *Engineering Structures* 81(15), pp 175-180.
- [27] R.K, Mohammadi., and A.S, Ziarani.(2016). Passive Control using Optimum Tuned Mass Damper and its Effectiveness in a Nonlinear Structure, *Sharif Journal Civil Engineering*, 32.2(2.2), pp. 107-115.
- [28] Q, Wu., W, Zhao., W, Zhu., R, Zheng., and X, Zhao, (2019). A bufferrable tuned mass damper of an offshore platform against stroke and response delay problems under earthquake loads, *Shock and Vibration*.

- [29] A.A.o.S.H.a.T Officials.(2008). AASHTO LRFD bridge design specifications, customary U.S units.
- [30] OpenSees, (2016). Open System for Earthquake Engineering Simulation, Berkeley: Pacific Earthquake Eng. Research Center, Univ. of California, <http://opensees.berkeley.edu>.
- [31] P, Brzeski., P, Perlikowski.(2017). Effects of play and inerter nonlinearities on the performance of tuned mass damper, *Nonlinear Dyn*, 88: 1027.
- [32] CSI.(2005). SAP2000-Linear and Nonlinear Static and Dynamic Analysis and Design of Three-Dimensional Structures, 12-17 Beijing, China.
- [33] AM, Abdel-Ghaffar. (1983).Nonlinear free vibrations of suspension bridges: application, *Engineering Mechanics* 109(1), pp 330–331.
- [34] J, Khazaei., and A,Amiri. (2017). Evaluation of the dynamic responses of high rise buildings with respect to the direct methods for soil-foundation-structure interaction effects and comparison with the approximate methods, *Journal of structural and construction*, 4(2), pp 106-122.
- [35]F,Etetadi Aliabadi., and M.M, Memarpour.(2019). Investigation of the Seismic Behavior of Framed Tube Buildings Considering Soil Structure Interaction, *Journal of structural and construction*, 6(2), pp 119-140.
- [36] MATLAB,(2014). The MathWorks. Version7.6.
- [37] Q, Wu., W, Zhao., W, Zhu., R, Zheng., and X, Zhao.(2018). A Tuned Mass Damper with Nonlinear Magnetic Force for Vibration Suppression with Wide Frequency Range of Offshore Platform under Earthquake Loads, *Shock and Vibration*, pp. 1-18.
- [38] S.V, Bakre., and R.S, Jangid. (2007). Optimum parameters of tuned mass damper for damped main system, *Struct Control Health Monitoring*, 14(3), pp. 448-470.
- [39] A,Dutta.,and J.B, Mander. (1999). Seismic fragility analysis of highway bridges, *Center-to-Center Project Workshop on Earthquake Engineering in Transportation Systems*.
- [40]S.J, Kim., and A.S, Elnashai. (2008).Seismic Assessment of Rc Structures Considering Vertical Ground Motion, *Department of Civil and Environmental Engineering University of Illinois at Urbana-Champaign Urbana, Illinois*.
- [41] J.W, Baker.(2007).Quantitative classification of near-fault ground motions using wavelet analysis, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 97(5), pp1486-1501.
- [42] M, Khatibinia., H, Gholami., and R, Kamgar.(2017).Optimal design of tuned mass dampers subjected to continuous stationary critical excitation, *International Journal of Dynamics and Control*.
- [43] M.M, Hassan.(2013). Optimization of stay cables in cable-stayed bridges using finite element, genetic algorithm, and B-spline combined technique, *Engineering Structures* 49, pp 643-654.
- [44] A.M.B, Martins., L.M.C, Simoes., and J.H.J.O, Negro.(2015). Optimization of cable forces on concrete cable-stayed bridges including geometrical nonlinearities, *Computers and Structures*.