

## تعیین محل بهینه میراگر جرمی تنظیم شونده (TMD) در ساختمان‌های بلند مرتبه بتن مسلح

علی معصومی<sup>۱\*</sup>، مهدی مرادی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی زلزله، دانشگاه علم و فرهنگ، ایران (نویسنده مسئول)

<sup>۲</sup> استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد قم، قم، ایران

### چکیده

استفاده از سیستم‌های کنترل یکی از راه‌های مناسب برای مقابله با نیروی زلزله است. سیستم‌های کنترل غیرفعال با دارا بودن مزایای عمده‌ای از قبیل عدم نیاز آن‌ها به منبع نیروی خارجی، سهولت نصب و نگهداری و همچنین ساده‌بودن ساز و کار آن‌ها نسبت به سایر روش‌های کنترلی، بیشتر مورد توجه محققان قرار گرفته است. میراگرهای جرمی تنظیم شونده (TMD) از جمله سیستم‌های کنترل غیرفعال هستند که جهت کاهش ارتعاشات لرزه‌ای به سازه‌ها متصل می‌گردند. در این مقاله سازه‌های بتن مسلح بلند مرتبه با تعداد طبقات ۱۵، ۳۰ و ۴۵ طبقه با سیستم قاب خمشی بتن مسلح ویژه در نظر گرفته شده و با جانمایی میراگر منفرد و چندگانه در ارتفاعات مختلف سازه، رفتار لرزه‌ای سازه‌ها تحت ۷ رکورد زلزله نزدیک گسل ارزیابی گردیده است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده مشاهده گردید استفاده از میراگر جرمی تنظیم شونده (TMD) باعث بهبود رفتار لرزه‌ای سازه‌ها شده و همچنین کاهش مقادیر برش پایه، تغییر مکان ماندگار بام و تغییر مکان نسبی طبقات (دریفت) را به همراه داشته است. بهترین محل برای این نوع میراگرها در ابتدا بر روی بام بوده و با توجه به افزایش تعداد طبقات لازم است این میراگرها حداقل با فاصله هر ۵ طبقه استفاده شده تا بهبود رفتار لرزه‌ای مشاهده شود. همچنین مشاهده شد که باید میراگرها به‌صورت متقارن در پلان قرار داده شوند.

**واژه‌های کلیدی:** کنترل غیر فعال، سازه بلند، میراگر جرمی تنظیم شونده، زلزله نزدیک گسل

## ۱. مقدمه

یکی از چالش‌های همیشگی در مهندسی عمران یافتن ابزاری مؤثر برای حفاظت سازه‌ها و تجهیز آن‌ها در برابر اثرات مخرب نیروهای طبیعی است. در این بین زلزله یکی از رخدادهایی است که با وجود تحقیقات زیادی که در مورد آن صورت گرفته است هنوز امکان پیش‌بینی زمان، شدت و مکان دقیق آن وجود ندارد؛ بنابراین به نظر می‌رسد روش مقابله با زلزله، ایمن‌سازی سازه‌ها در برابر آن است. به شکل سنتی برای طراحی لرزه‌ای از سیستم‌های باربر لرزه‌ای استفاده می‌شود. با این حال، در چند دهه اخیر با عنوان حفاظت لرزه‌ای (Seismic Protection Technologie) استفاده شده است [۱-۲]. این فناوری شامل مجموعه‌ای وسایل و مصالحی که هدفشان به‌جای افزایش ظرفیت جانبی ساختمان، کاهش نیازهای لرزه‌ای در اجزای سازه‌ای است [۲-۳]. حفاظت لرزه‌ای معمول با گنجانیدن جداگرها و میراگرها اجرا می‌شود. طوری که تغییر شکل‌های سازه‌ای و نیروهای داخلی در اعضا کاهش پیدا کند [۲]. یکی از روش‌های حفاظت لرزه‌ای مورد بحث و احتمالاً قدیمی‌ترین روش برای انجام جذب ارتعاش، میراگرهای جرمی تنظیم‌شده کلاسیک (TMD) است که به‌عنوان جاذب ارتعاش دینامیکی نیز شناخته می‌شود [۴-۵]. یک میراگر جرمی تنظیم‌شده ابزاری شامل جرم، فنر و یک میراگر ویسکوز است که به سازه جهت کاهش پاسخ دینامیکی آن متصل می‌شود [۵]. جرم میراگر باید بر روی سطحی صاف قرار گیرد تا نیروی اصطکاک را حداقل کند و اجازه حرکت آزاد را به سیستم بدهد. قاعده اصلی یک میراگر جرمی بر این اساس استوار است که جرم آن همیشه با حرکت سازه مخالفت کند. به طور عمومی فرکانس طبیعی این سیستم کنترلی در نزدیکی یکی از فرکانس‌های طبیعی سازه تنظیم می‌شود تا ارتعاشات سازه اصلی به‌موجب ارتعاش کردن TMD در تشدید مستهلک شود. معمولاً این فرکانس، فرکانس مود اول سازه است؛ زیرا شرکت‌پذیری مود اول در پاسخ‌های سازه‌ای بیش از ۸۰٪ پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها است [۱].

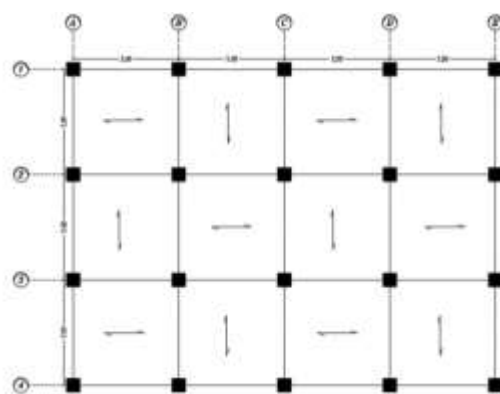
طراحی بهینه این TMD بستگی به تعیین درست متغیرهای جرم، سختی فنر، ضریب میرایی فنر و مکان اتصال سیستم به سازه دارد. برای طراحی TMD به طور عمده نیاز به حل یک سیستم خطی میرا شده غیرکلاسیک با استفاده از تکنیک‌های محاسباتی پایدار است [۶]. اولین نظریه درباره سیستم TMD به‌عنوان یک میراگر در سال ۱۹۲۸ ارائه گردید که همراه با بحث‌های مفصل‌تری راجع به تنظیمات و متغیرهای بهینه در کتاب ارتعاشات مکانیکی هارتگ [۷] در سال ۱۹۴۰ تکمیل شد. ژو و نایفه [۸] در تحقیقات خود سختی و میرایی سیستم چند درجه آزادی بین یک جسم صلب و سازه اولیه را جهت کنترل ۶ مود سازه بهینه کردند. همچنین ژو و نایفه [۹] متغیرهای بهینه سیستم‌های TMD را به‌صورت اولیه طبقه‌بندی کردند. وونگ و چی [۱۰] TMD را به‌عنوان یک سیستم اتلاف انرژی زلزله در سازه‌ها بررسی کردند و تأثیر TMD را در کاهش پاسخ سازه‌ها مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که TMD در کاهش پاسخ سازه‌هایی با دوره تناوب متوسط تا زیاد بسیار مؤثرتر از سازه‌هایی با دوره تناوب کوتاه است. آن‌ها همچنین نشان دادند که TMD در کاهش حداکثر انرژی جنبشی و انرژی کرنشی بسیار مؤثر است [۱۰]. آبهیناو و گنگادهاران [۱۱] یک سیستم یک درجه آزادی را با TMD با نرم‌افزار المان محدود Ansys طراحی کردند و نتایج به‌دست‌آمده با نتایج آزمایشگاهی تطبیق دادند. مطابق با نتایج آن‌ها این مدل در پیش‌بینی فرکانس‌های مودال صحیح و دقیق است. فرغالی [۱۲] پاسخ‌های یک ساختمان بتنی ۲۰ طبقه تحت تحریکات لرزه‌ای را با استفاده از تحلیل تاریخچه زمانی با و بدون TMD مورد مطالعه قرار داد، در این مطالعه از ۵ موقعیت قرارگیری TMD و ۴ نوع آرایش ویژه در مدل استفاده شد. نتایج نشان داد که پاسخ‌های سازه همچون تغییر مکان و نیروی برشی به طرز چشمگیری کاهش می‌یابد [۱۲]. لو و همکاران [۱۳] سازه‌های ۵ و ۲۰ طبقه را به‌عنوان سازه‌های معیار برای مقایسه میراگرهای جرمی بهینه و میراگرهای ذرات بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که میراگرهای ذرات اثرات کنترلی بهتری نسبت به میراگرهای جرمی در پاسخ‌هایی مانند حداکثر چرخش پلاستیک اتصالات، جذب انرژی و جابه‌جایی نسبی بین ارائه می‌دهند. نگدلی و بکداس [۱۴] در تحقیقات خود استفاده از چندین میراگر TMD را در پلان طبقات سازه بررسی کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که استفاده از میراگر در چندین نقطه از سازه تأثیر مطلوب‌تری نسبت به قراردادن میراگر بر روی سقف ساختمان دارد. اعتدالی و همکاران [۱۵] عملکرد TMD و FTMD را در کنترل لرزه‌ای ساختمان‌های بلند تحت زمین‌لرزه‌های میدان نزدیک، از جمله برهم‌کنش‌های خاک و سازه بررسی کردند. آن‌ها در مطالعه خود از یک سازه ۴۰ طبقه استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که FTMD از نظر

مکان‌یابی، جابه‌جایی نسبی و متغیرهای شتاب بهتر از TMD عمل می‌کند. با توجه به سابقه تحقیقاتی محققان در مورد میراگرهای جرمی مشاهده می‌شود که تمرکز آن‌ها بر استفاده از میراگرهای منفرد در سقف یا توزیع میراگرها در طبقات ساختمان بوده است. اگرچه بررسی جامعی در زمینه تعیین محل TMD در سازه‌های متوسط و بلند شامل ارزیابی استفاده از یک یا چند میراگر مشاهده نشد. بر این اساس در این مقاله عملکرد سازه‌های بتن مسلح با تعداد طبقات ۱۵، ۳۰ و ۴۵ طبقه با سیستم قاب خمشی بتن مسلح ویژه با جانمایی TMD منفرد یا چندگانه در طبقات مختلف سازه بررسی می‌شود. برای اطمینان بیشتر از نتایج رفتار لرزه‌ای سازه‌ها، عملکرد آن‌ها تحت ۷ رکورد زلزله نزدیک گسل ارزیابی می‌شود.

## ۲. مشخصات مدل‌سازی

### ۱.۲. معرفی مدل‌های سازه‌ای

برای این تحقیق سازه‌های با تعداد طبقات ۱۵، ۳۰ و ۴۵ طبقه با سیستم قاب خمشی بتن مسلح ویژه استفاده شده است. تمامی سازه‌ها بر روی پهنه با خطر نسبی خیلی زیاد واقع شده و بر روی زمین نوع II قرار دارند. کاربری سازه‌ها مسکونی فرض شده‌اند و پلان سازه در جهت X دارای ۴ دهانه و در جهت Y دارای ۳ دهانه با طول ۵ متر هستند که پلان تیر ریزی سازه نیز در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱: پلان سازه و جهت تیر ریزی

### ۲.۲. مشخصات مصالح

برای سازه‌ها از دو نوع مصالح بتن و میلگرد استفاده خواهد شد که مشخصات لازم برای آنها مطابق جداول ۱ و ۲ خواهد بود.

جدول ۱: مشخصات مصالح بتن

مشخصات	وزن مخصوص	مدول الاستیسیته	نسبت پواسون	ضریب انبساط حرارتی	مقاومت فشاری بتن
واحد	$kgf/m^3$	$Mpa$	---	$1/^\circ C$	$Mpa$
مقدار	۲۵۰۰	۲۳۵۰۰	۰.۲	۰.۰۰۰۰۱	۲۵

جدول ۲: مشخصات مصالح میلگردهای طولی و عرضی

مشخصات	وزن مخصوص	مدول الاستیسیته	ضریب انبساط حرارتی	مقاومت تسلیم	مقاومت گسیختگی	مقاومت تسلیم مورد انتظار	مقاومت گسیختگی مورد انتظار
واحد	$kgf/m^3$	$Mpa$	$1/^\circ C$	$Mpa$	$Mpa$	$Mpa$	$Mpa$
عرضی	۷۸۵۰	۲۰۰۰۰	۰.۰۰۰۰۱۲	۳۴۰	۵۰۰	۴۲۵	۶۲۵
طولی	۷۸۵۰	۲۰۰۰۰	۰.۰۰۰۰۱۲	۴۰۰	۶۰۰	۵۰۰	۷۵۰

### ۳.۲. مشخصات بارگذاری

برای بارگذاری سازه‌ها الگوهای بار لازم اعم از بار مرده، بار زنده و بار زلزله تعریف شده است. بار ناشی از بارهای ثقلی در جدول ۳ و برای محاسبه بار زلزله نیاز به محاسبه ضریب زلزله (C) و ضریب توزیع برش پایه در طبقات (K) است که در جدول ۴ آورده شده است.

جدول ۳: بارهای ثقلی سازه

نوع بار	عرض بارگیر (ارتفاع)	وزن یک مترمربع	شدت بار وارده بر روی تیر
واحد	$m$	$kgf/m^2$	$kgf/m$
بار مرده ناشی از دهانه بارگیر	۲,۵	۷۰۰	۱۷۵۰
بار زنده ناشی از دهانه بارگیر	۲,۵	۲۰۰	۵۰۰
بار مرده ناشی از دیوارها	۳,۱	۳۰۰	۹۳۰

جدول ۴: محاسبه ضریب زلزله و ضریب توزیع برش پایه سازه

مشخصات	سازه ۱۵ طبقه	سازه ۳۰ طبقه	سازه ۴۵ طبقه
ارتفاع	۴۸ m	۹۶ m	۱۴۴ m
نسبت شتاب مبنا (A)	۰,۳۵	۰,۳۵	۰,۳۵
زمان تناوب سازه (T)	۲,۰۳۷	۳,۸۰۱	۵
ضریب بازتاب سازه (B)	۰,۸۰۲	۰,۵۴۶	۰,۴۲۵
ضریب اهمیت سازه (I)	۱	۱	۱
ضریب رفتار سازه (Ru)	۷,۵	۷,۵	۷,۵
ضریب زلزله (C)	۰,۰۴۲	۰,۰۴۲	۰,۰۴۲
ضریب توزیع برش پایه (K)	۱,۷۶۹	۲	۲

### ۳. تحلیل تاریخیچه زمانی

#### ۱.۳ معرفی شتابنگاشت‌ها

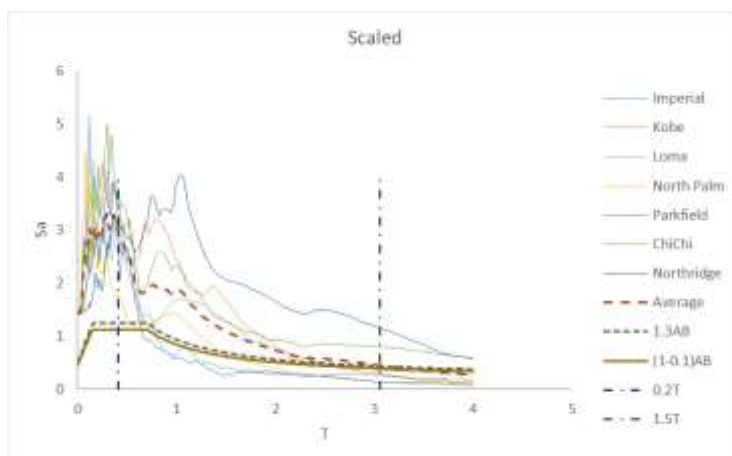
در این تحقیق به منظور انجام تحلیل تاریخیچه زمانی از هفت شتابنگاشت زلزله‌های نزدیک گسل که از سایت PEER انتخاب شده‌اند، برای ساخت زلزله‌ها استفاده شده است. مشخصات شتابنگاشت‌ها در جدول ۵ نشان داده شده است. زلزله‌های انتخابی برای خاک نوع II که سرعت متوسط موج‌برشی آنها بین ۳۷۵ تا ۷۵۰ است انتخاب شد و تمامی زلزله‌ها از حوزه نزدیک گسل انتخاب شدند که همگی فاصله کمتر از ۲۰ کیلومتر از گسل خواهند داشت و سعی شده است که زلزله‌هایی با شدت بیشتر انتخاب شوند تا اثرات خرابی سازه‌ها بیشتر مشهود باشد.

جدول ۵: مشخصات ۷ زلزله نزدیک گسل

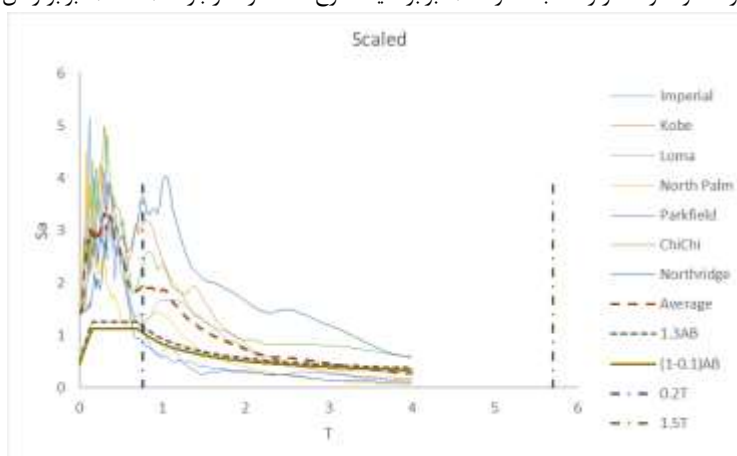
نزدیک‌ترین فاصله	اندازه	PGA (g)	محل وقوع	سال	نام زلزله	شماره
۱۰,۴۵	۶,۵۳	۰,۲۷۱۵	Calexico Fire Station	۱۹۷۹	Imperial Valley	۱
۰,۹۶	۶,۹	۰,۸۰۳۶	KJMA	۱۹۹۵	Kobe Japan	۲
۱۰,۹۷	۶,۹۳	۰,۳۳۳	Gilroy - Historic Bldg	۱۹۸۹	Loma Prieta	۳
۴,۰۴	۶,۰۶	۰,۶۵۷۶	North Palm Springs	۱۹۸۶	North Palm Spring	۴
۹,۵۸	۶,۱۹	۰,۴۴۵	Cholame - Shandon Array #5	۱۹۶۶	Parkfield	۵
۳,۲	۷,۶۲	۰,۲۸۹۱	TCU076	۱۹۹۹	ChiChi Taiwan	۶
۶,۲	۶,۶۹	۰,۴۲۸۳	Jensen Filt Plant	۱۹۹۴	Northridge	۷

### ۲.۳ مقیاس‌سازی زلزله‌ها

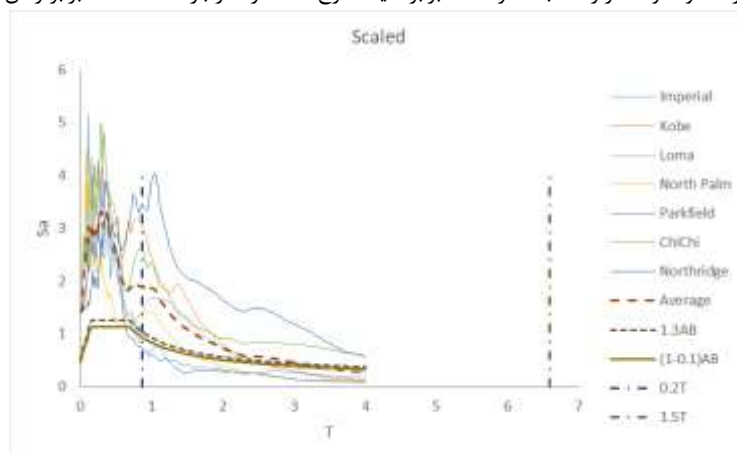
مقیاس‌سازی زلزله‌ها برحسب آئین‌نامه ۲۸۰۰ ویرایش چهارم [۱۶] صورت‌گرفته است که در اشکال ۲ تا ۴ نمودار طیف‌های مقیاس شده به ترتیب برای سازه‌های ۱۵، ۳۰ و ۴۵ طبقه نشان داده شده است.



شکل ۲: طیف واحد ترکیبی زلزله‌ها و متوسط زلزله‌ها به همراه ۱/۳ برابر طیف طرح استاندارد در بازه ۰/۲ تا ۱/۵ برابر زمان تناوب سازه ۱۵ طبقه



شکل ۳: طیف واحد ترکیبی زلزله‌ها و متوسط زلزله‌ها به همراه ۱/۳ برابر طیف طرح استاندارد در بازه ۰/۲ تا ۱/۵ برابر زمان تناوب سازه ۳۰ طبقه



شکل ۴: طیف واحد ترکیبی زلزله‌ها و متوسط زلزله‌ها به همراه ۱/۳ برابر طیف طرح استاندارد در بازه ۰/۲ تا ۱/۵ برابر زمان تناوب سازه ۴۵ طبقه

#### ۴. مدل‌سازی و تعیین متغیرهای رفتاری میراگر جرمی تنظیم شونده (TMD)

##### ۱.۴. جرم میراگر

مطالعات نشان داده است که عموماً جرم‌های بهینه میراگرهای تنظیمی بسته به شرایط می‌تواند بین ۱ تا ۵ درصد وزن سازه باشد. بایستی دقت شود در تعیین جرم بهینه محدودیت‌هایی موجود است لذا نمی‌توان جرم میراگر را از حدی بیشتر در نظر گرفت و همچنین برخی از محققین جرم میراگر را ۱ تا ۵ درصد جرم مشارکت‌کننده در مود اول ارتعاش در نظر می‌گیرند؛ زیرا

متغیرهای میراگر TMD عموماً بر روی فرکانسی نزدیک به فرکانس مود اول سازه تنظیم می‌گردد. محققین متغیری را معرفی می‌نمایند که نسبت میراگر تنظیمی به جرم سازه و یا جرم میراگر تنظیمی به جرم مشارکت‌کننده در مود اول سازه است که آن را با  $\mu$  نشان می‌دهند که در رابطه (۱) بیان شده است.

$$\mu = \frac{m_d}{m_s} \cong (1 - \gamma) \quad (1)$$

در این رابطه  $m_d$  جرم میراگر و  $m_s$  جرم سازه و یا جرم مشارکت‌کننده در مود اول ارتعاش سازه می‌باشد.

#### ۲.۴. سختی و میرایی میراگر

لازم به ذکر است برای محاسبه ضریب  $\alpha_{opt}$  و  $\xi_{opt}$  که بر مبنای آنها سختی و میرایی میراگر جرمی تنظیمی به دست می‌آید، محققین مختلفی تحقیقات متنوعی انجام داده و روابطی را در این زمینه ارائه داده‌اند. در این تحقیق از روابط ارائه شده توسط Den Hartogs استفاده نموده و متغیرهای تنظیمی میراگر را محاسبه می‌نمائیم. بدین منظور با توجه به رابطه (۲) ضریب  $\alpha_{opt}$  را به دست می‌آوریم که برای محاسبه این ضریب جرم میراگر را در این تحقیق برابر ۳٪ در نظر گرفته‌شد.

$$\alpha_{opt} = \frac{1}{1 + \mu} \quad (2)$$

$\alpha_{opt}$  نسبت فرکانس میراگر جرمی تنظیمی به فرکانس مود اول ارتعاش سازه می‌باشد. سپس با توجه به رابطه (۳) ضریب  $\xi_{opt}$  را محاسبه خواهیم نمود.

$$\xi_{opt} = \sqrt{\frac{3\mu}{1 + \mu}} \quad (3)$$

حال به توجه به محاسبه  $\mu$ ،  $\alpha_{opt}$  و  $\xi_{opt}$  می‌توان سختی میراگر را مطابق رابطه (۴) محاسبه نمود.

$$K_d = 4\pi^2 \mu \alpha_{opt}^2 \frac{M_s}{T_s^2} \quad (4)$$

در این رابطه  $M_s$  جرم سازه و یا جرم مشارکت‌کننده در مود اول ارتعاش سازه و  $T_s$  دوره تناوب مود اول ارتعاش سازه می‌باشد. برای به‌دست‌آوردن میرایی ( $C_d$ ) میراگر جرمی تنظیم شونده از رابطه (۵) به دست می‌آید.

$$C_d = 4\pi \alpha_{opt} \xi_{opt} \frac{M_s}{T_s} \quad (5)$$

حال با در نظر گرفتن ضریب  $\mu$  که نسبت جرمی است و در نظر گرفتن سختی و میرایی میراگر جرمی تنظیم شونده می‌توان این میراگر را به‌صورت یک جرم و فنر به همراه یک میرایی بر روی سازه مدل نمود. نحوه تعریف میراگر جرمی تنظیم شونده (TMD) در شکل ۵ نشان داده شده است. مشخصات میراگرها در سازه‌های ۱۵، ۳۰ و ۴۵ طبقه در جدول ۶ نشان داده شده است.



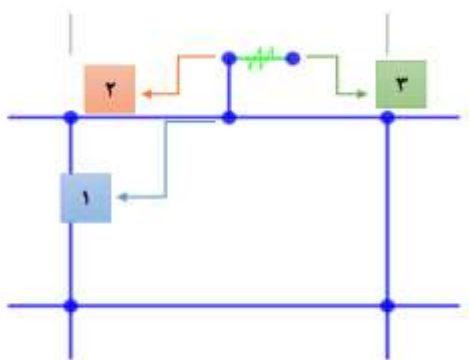
شکل ۵: تنظیم درجات آزادی میراگر جرمی تنظیم شونده (TMD)

جدول ۶: مشخصات میراگرهای جرمی سازه

سازه	نسبت جرمی ( $\mu$ )	سختی میراگر ( $kgf/s^2$ ) ( $K_d$ )	میرایی میراگر ( $kgf/s$ ) ( $K_d$ )
۱۵ طبقه	۰,۰۳	۲۴۰۶۳۱,۹	۲۹۳۴۵,۳۵
۳۰ طبقه	۰,۰۳	۵۰۰۶۹۷,۶	۶۱۰۶۰,۶۸
۴۵ طبقه	۰,۰۳	۷۲۰۳۶۹,۵	۸۷۸۴۹,۹۴

### ۳.۴. مدل سازی میراگر جرمی تنظیم شونده (TMD)

برای مدل سازی میراگر جرمی تنظیم شونده (TMD) در دهانه‌ای که قرار است میراگر گذاشته شود یک نقطه میانی مشخص می‌شود که در شکل ۶ با نقطه ۱ نشان داده شده است سپس یک نقطه با ارتفاع یک متر بالاتر از نقطه ۱ رسم می‌شود که با نقطه ۲ در شکل ۶ نشان داده شده است. بین نقطه ۱ و ۲ یک تیر صلب با سختی بسیار زیاد ترسیم می‌شود سپس یک نقطه بافاصله افقی یک متری از نقطه دوم رسم می‌شود که با نقطه ۳ در شکل ۶ نشان داده شده است. مابین نقطه ۲ و ۳ نیز با المان لینک تعریف شده برای میراگر جرمی تنظیم شونده (TMD) ترسیم می‌شود که جزئیات این مدل سازی در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶: جزئیات مدل سازی میراگر جرمی تنظیم شونده (TMD)

### ۴.۴. جانمایی میراگر جرمی تنظیم شونده (TMD)

هدف اصلی تحقیق تعیین محل بهینه برای میراگر جرمی تنظیم شونده (TMD) بوده از همین رو محل‌های متفاوتی را برای این تحقیق در نظر گرفته شده که برای همه مدل‌ها میراگرها در قاب‌های پیرامونی جانمایی شده و در ترازهای متفاوت با تعداد میراگر مختلف در نظر گرفته شده است که مطابق جدول ۷ نام گذاری شده و محل نصب میراگرها مشخص شده است. تمامی میراگرها به صورت متقارن در نظر گرفته شده و در هر جهت در قاب متقابل آن نیز تعبیه گردیده است.

## ۵. نتایج مدل سازی

به منظور ارزیابی لرزه‌ای سازه‌ها و تعیین محل بهینه نتایجی نظیر برش پایه، جابه‌جایی ماندگار بام و تغییر مکان نسبی طبقات بررسی شده است که در ادامه به آن‌ها پرداخته می‌شود.

### ۱.۵. نتایج برش پایه

مشاهده می‌شود طبق نتایج برش پایه، استفاده از میراگر باعث کاهش برش پایه شده و با افزایش تعداد میراگرها در ارتفاع ساختمان، کاهش بیشتری در برش پایه سازه‌ها ایجاد شده است. به صورت میانگین استفاده از ۴ میراگر در سازه‌های ۱۵ طبقه باعث کاهش حدوداً ۳۰ درصدی برش پایه و استفاده از ۸ میراگر باعث کاهش حدوداً ۴۵ درصدی و استفاده از ۱۲ میراگر باعث

کاهش حدوداً ۶۰ درصدی برش پایه شده است. به صورت میانگین استفاده از ۴ میراگر در سازه‌های ۳۰ طبقه باعث کاهش حدوداً ۱۸ درصدی برش پایه و استفاده از ۸ میراگر باعث کاهش حدوداً ۲۸ درصدی و استفاده از ۱۲ میراگر باعث کاهش حدوداً ۳۷ درصدی و استفاده از ۱۶ میراگر باعث کاهش حدوداً ۴۷ درصدی و استفاده از ۲۰ میراگر باعث کاهش حدوداً ۵۶ درصدی و استفاده از ۲۴ میراگر باعث کاهش حدوداً ۶۶ درصدی برش پایه شده است. به صورت میانگین استفاده از ۴ میراگر در سازه‌های ۴۵ طبقه باعث کاهش حدوداً ۱۰ درصدی برش پایه و استفاده از ۸ میراگر باعث کاهش حدوداً ۱۸ درصدی و استفاده از ۱۲ میراگر باعث کاهش حدوداً ۲۵ درصدی و استفاده از ۱۶ میراگر باعث کاهش حدوداً ۳۳ درصدی و استفاده از ۲۰ میراگر باعث کاهش حدوداً ۴۲ درصدی و استفاده از ۲۴ میراگر باعث کاهش حدوداً ۵۲ درصدی برش پایه و استفاده از ۲۸ میراگر باعث کاهش حدوداً ۶۰ درصدی و استفاده از ۳۲ میراگر باعث کاهش حدوداً ۷۰ درصدی برش پایه شده است. نتایج حاصله برای برش پایه که مقدار حداکثر آنها است در جداول ۸ تا ۱۰ برای سازه‌های ۱۵، ۳۰ و ۴۵ طبقه نشان داده شده است.

جدول ۷: نام‌گذاری مدل‌های سازه‌ای

سازه	تعداد میراگر	نام‌گذاری	محل میراگر
سازه ۱۵ طبقه	۴	۱-۱۵۰۰-۰۰۰	بام
	۸	۲-۱۵۰۰-۰۰۰	طبقه ۸ و بام
	۱۲	۳-۱۵۰۰-۰۰۰	طبقه ۵ و ۱۰ و بام
سازه ۳۰ طبقه	۴	۱-۳۰۰۰-۰۰۰	بام
	۸	۲-۳۰۰۰-۰۰۰	طبقه ۱۵ و بام
	۱۲	۳-۳۰۰۰-۰۰۰	طبقه ۱۰ و ۲۰ و بام
	۱۶	۴-۳۰۰۰-۰۰۰	طبقه ۸، ۱۵، ۲۳ و بام
	۲۰	۵-۳۰۰۰-۰۰۰	طبقه ۶، ۱۲، ۱۸، ۲۴ و بام
	۲۴	۶-۳۰۰۰-۰۰۰	طبقه ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و بام
سازه ۴۵ طبقه	۴	۱-۴۵۰۰-۰۰۰	بام
	۸	۲-۴۵۰۰-۰۰۰	طبقه ۲۳ و بام
	۱۲	۳-۴۵۰۰-۰۰۰	طبقه ۱۵، ۳۰ و بام
	۱۶	۴-۴۵۰۰-۰۰۰	طبقه ۱۱، ۲۲، ۳۳ و بام
	۲۰	۵-۴۵۰۰-۰۰۰	طبقه ۹، ۱۸، ۲۷، ۳۶ و بام
	۲۴	۶-۴۵۰۰-۰۰۰	طبقه ۸، ۱۶، ۲۴، ۳۲، ۴۰ و بام
	۲۸	۷-۴۵۰۰-۰۰۰	طبقه ۶، ۱۲، ۱۸، ۲۴، ۳۰، ۳۶ و بام
	۳۶	۸-۴۵۰۰-۰۰۰	طبقه ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵، ۴۰ و بام

جدول ۸: نتایج برش پایه سازه ۱۵ طبقه (برحسب Ton)

زلزله	بدون میراگر	TMD-1	TMD-2	TMD-3
Imperial	۷۴۳/۵۵	۵۵۰/۲۳	۴۰۱/۵۲	۳۱۲/۲۹
Kobe	۶۵۳/۱۷	۴۷۰/۲۸	۳۳۳/۱۲	۲۶۱/۲۷
Loma Prieta	۷۶۱/۸۷	۵۵۶/۱۶	۳۸۸/۵۵	۳۳۵/۲۲
North Palm	۷۶۱/۸۷	۵۷۱/۴	۴۱۹/۰۳	۳۴۲/۸۴
Parkfield	۴۰۸/۳۳	۲۸۵/۸۳	۲۱۲/۳۳	۱۶۷/۴۱
ChiChi	۴۳۵/۵۵	۳۱۶/۲۱	۲۱۹/۵۲	۱۶۸/۱۲
Northridge	۱۰۱۲/۶۵	۷۳۹/۲۳	۵۲۶/۵۷	۴۰۵/۰۶
میانگین	۶۸۲/۴۳	۴۹۸/۴۸	۳۵۷/۲۳	۲۸۴/۶



جدول ۹: نتایج برش پایه سازه ۳۰ طبقه (برحسب Ton)

زلزله	بدون میراگر	TMD-1	TMD-2	TMD-3	TMD-4	TMD-5	TMD-6
Imperial	۱۶۰۹/۱۴	۱۳۹۹/۹۵	۱۲۲۲/۹۵	۱۰۷۸/۱۴	۸۶۸/۹۳	۷۵۶/۳	۵۶۳/۲
Kobe	۱۴۲۲/۱۴	۱۱۹۴/۵۹	۱۰۹۵/۰۵	۹۸۱/۲۷	۷۹۶/۴	۶۸۲/۶۳	۵۲۶/۱۹
Loma Prieta	۱۴۰۵/۹۵	۱۱۶۶/۹۴	۱۰۹۶/۶۴	۹۸۴/۱۶	۸۸۵/۷۵	۷۱۷/۰۳	۵۴۸/۳۲
North Palm	۱۶۴۶/۹	۱۳۳۳/۹۹	۱۱۶۹/۳	۱۰۵۴/۰۲	۸۵۶/۳۹	۷۰۸/۱۷	۶۵۸/۷۶
Parkfield	۱۰۷۵/۷۷	۸۶۰/۶۱	۷۷۴/۵۵	۶۸۸/۴۹	۶۹۹/۲۵	۵۹۱/۶۷	۴۵۱/۸۲
ChiChi	۹۷۴/۲	۶۸۱/۹۴	۶۷۲/۱۹	۵۸۴/۵۲	۴۹۶/۸۴	۴۲۸/۶۵	۳۶۰/۴۵
Northridge	۲۰۱۷/۳۲	۱۶۷۴/۳۸	۱۵۱۲/۹۹	۱۳۷۱/۷۸	۱۲۱۰/۳۹	۱۰۰۸/۶۶	۸۰۶/۹۳
میانگین	۱۴۵۰/۲	۱۱۸۷/۴۹	۱۰۷۷/۶۷	۹۶۳/۱۹	۸۳۰/۶۳	۶۹۹/۰۲	۵۵۹/۳۸

جدول ۱۰: نتایج برش پایه سازه ۴۵ طبقه (برحسب Ton)

زلزله	بدون میراگر	TMD-1	TMD-2	TMD-3	TMD-4	TMD-5	TMD-6	TMD-7	TMD-8
Imperial	۴۸۴۸/۷	۴۳۶۳/۸۳	۳۹۷۵/۹۳	۳۶۳۶/۵۳	۳۴۲۸/۶۳	۲۸۱۲/۲۵	۲۳۲۷/۳۸	۱۸۹۰/۹۹	۱۴۵۴/۶۱
Kobe	۴۲۰۰/۸۴	۳۷۸۰/۷۶	۳۴۴۴/۶۹	۳۱۵۰/۶۳	۲۸۱۴/۵۶	۲۴۳۶/۴۹	۲۰۱۶/۴	۱۶۳۸/۳۳	۱۲۶۰/۲۵
Loma Prieta	۴۸۲۹/۵۹	۴۳۴۶/۶۳	۳۹۶۰/۲۶	۳۶۲۲/۱۹	۳۲۳۵/۸۲	۲۸۰۱/۱۶	۲۳۱۸/۲	۱۸۸۳/۵۴	۱۴۴۸/۸۸
North Palm	۵۰۴۴/۴۱	۴۵۳۹/۹۷	۴۱۳۶/۴۱	۳۷۸۳/۳	۳۳۷۹/۷۵	۲۹۲۵/۷۶	۲۴۲۱/۳۱	۱۹۶۷/۳۲	۱۵۱۳/۳۲
Parkfield	۳۲۸۹/۴۳	۲۹۶۰/۴۹	۲۶۹۷/۳۴	۲۴۶۷/۰۸	۲۲۰۳/۹۲	۱۹۰۷/۸۷	۱۵۷۸/۹۳	۱۲۸۲/۸۸	۹۸۶/۸۳
ChiChi	۲۵۳۲/۱۹	۲۲۷۸/۹۷	۲۰۷۶/۴	۱۸۹۹/۱۴	۱۶۹۶/۵۷	۱۴۶۸/۶۷	۱۲۱۵/۴۵	۹۸۷/۵۵	۷۵۹/۶۶
Northridge	۶۳۳۲/۱۷	۵۶۹۸/۹۶	۵۱۹۲/۳۸	۴۷۴۹/۱۳	۴۲۴۲/۵۶	۳۶۷۲/۶۶	۳۰۳۹/۴۴	۲۴۶۹/۵۵	۱۸۹۹/۶۵
میانگین	۴۴۳۹/۶۲	۳۹۹۵/۶۶	۳۶۴۰/۴۹	۳۳۲۹/۷۱	۳۰۰۰/۲۶	۲۵۶۲/۱۲	۲۱۳۱/۰۲	۱۷۳۱/۴۵	۱۳۳۱/۸۸

## ۲.۵. نتایج جابه‌جایی ماندگار بام

یکی از معیارهای اصلی طراحی لرزه‌ای سازه‌ها تغییر مکان ماندگار بام است که با مشاهده مقدار این جابه‌جایی در گام آخر تحلیل می‌توان دریافت که سازه وارد فاز غیر غیرخطی شده است یا در فاز خطی باقی مانده است. مطابق نتایج حاصل شده از تحلیل‌های انجام شده مشاهده می‌شود تغییر مکان بام در سازه‌ها در حالت استفاده از میراگر جرمی تنظیم شونده کاهش یافته است و با افزایش تعداد میراگر در ارتفاع ساختمان این کاهش بیشتر بوده است و به‌صورت میانگین سازه ۳۰ طبقه در حالت استفاده از ۴ میراگر حدوداً ۱۵ درصد و در حالت استفاده از ۸ میراگر حدوداً ۲۹ درصد و در حالت استفاده از ۱۲ میراگر حدوداً ۳۸ درصد و در حالت استفاده از ۱۶ میراگر حدوداً ۴۷ درصد و در حالت استفاده از ۲۰ میراگر حدوداً ۵۳ درصد و در حالت استفاده از ۲۴ میراگر حدوداً ۶۲ درصد کاهش تغییر مکان ماندگار بام داشته است، از این رو سازه رفتار بهینه‌تری در مقابل زلزله از خود نشان داده است. نتایج حاصله برای جابه‌جایی ماندگار بام که مقدار حداکثر آنها است در جداول ۱۱ تا ۱۳ برای سازه‌های ۱۵، ۳۰ و ۴۵ طبقه نشان داده شده است.

جدول ۱۱: نتایج جابه‌جایی ماندگار بام سازه ۱۵ طبقه (برحسب سانتی‌متر)

زلزله	بدون میراگر	TMD-1	TMD-2	TMD-3
Imperial	۱۳/۲۵	۹/۸	۷/۱۶	۵/۵۶
Kobe	۶۳/۸۸	۴۵/۹۹	۳۲/۵۸	۲۵/۵۵
Loma Prieta	۵۷/۲۷	۴۱/۸	۲۹/۲۱	۲۵/۲
North Palm	۲۵/۹۱	۱۹/۴۳	۱۴/۲۵	۱۱/۶۶
Parkfield	۴۰/۸۳	۲۸/۵۸	۲۱/۲۳	۱۶/۷۴
ChiChi	۶۶/۷۶	۴۸/۴۷	۳۳/۶۵	۲۵/۷۷
Northridge	۴۱/۷	۳۰/۴۴	۲۱/۶۸	۱۶/۶۸
میانگین	۴۴/۲۳	۳۲/۰۷	۲۲/۸۲	۱۸/۱۶

جدول ۱۲: نتایج جابجایی ماندگار بام سازه ۳۰ طبقه (برحسب سانتیمتر)

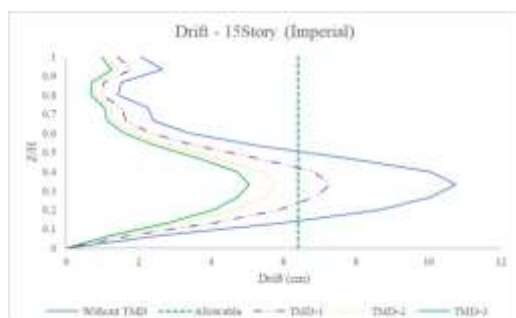
زلزله	بدون میراگر	TMD-1	TMD-2	TMD-3	TMD-4	TMD-5	TMD-6
Imperial	۲۶/۴	۲۲/۴۴	۱۸/۷۴	۱۶/۳۷	۱۳/۹۹	۱۲/۴۱	۱۰/۰۳
Kobe	۵۱/۲	۴۳/۵۲	۳۶/۳۵	۳۱/۷۵	۲۷/۱۴	۲۴/۰۶	۱۹/۴۶
Loma Prieta	۴۶/۰۸	۳۹/۱۷	۳۲/۷۲	۲۸/۵۷	۲۴/۴۲	۲۱/۶۶	۱۷/۵۱
North Palm	۲۶/۶	۲۲/۶۱	۱۸/۸۹	۱۶/۴۹	۱۴/۱	۱۲/۵	۱۰/۱۱
Parkfield	۶/۹۶	۳۱/۴۱	۲۶/۲۴	۲۲/۹۱	۱۹/۵۹	۱۷/۳۷	۱۴/۰۴
ChiChi	۸۵/۳	۷۲/۵۱	۶۰/۵۷	۵۲/۸۹	۴۵/۲۱	۴۰/۰۹	۳۲/۴۲
Northridge	۹۳/۳	۷۹/۳	۶۶/۲۴	۵۷/۸۴	۴۹/۴۵	۴۳/۸۵	۳۵/۴۵
میانگین	۵۲/۲۶	۴۴/۴۳	۳۷/۱۱	۳۲/۴	۲۷/۷	۲۴/۵۶	۱۰/۰۳

جدول ۱۳: نتایج جابجایی ماندگار بام سازه ۴۵ طبقه (برحسب سانتیمتر)

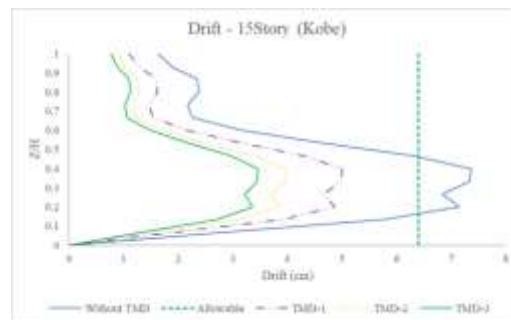
زلزله	بدون میراگر	TMD-1	TMD-2	TMD-3	TMD-4	TMD-5	TMD-6	TMD-7	TMD-8
Imperial	۳۳/۲۹	۳۱/۳	۲۹/۶۳	۲۶/۶۴	۲۳/۹۷	۲۱/۶۴	۱۹/۳۱	۱۶/۶۵	۱۳/۳۲
Kobe	۵۲/۹۵	۴۹/۷۷	۴۷/۱۳	۴۲/۳۶	۳۸/۱۲	۳۴/۴۲	۳۰/۷۱	۲۶/۴۷	۲۱/۱۸
Loma Prieta	۳۲/۳۹	۳۰/۴۴	۲۸/۸۲	۲۵/۹۱	۲۳/۳۲	۲۱/۰۵	۱۸/۷۸	۱۶/۱۹	۱۲/۹۵
North Palm	۳۶/۴۳	۳۳/۱۴	۳۰/۱۱	۲۷/۴۹	۲۴/۸۶	۲۲/۷۷	۲۰/۳۳	۱۷/۹۳	۱۴/۱۱
Parkfield	۳۷/۱۱	۳۴/۸۹	۳۳/۰۳	۲۹/۶۹	۲۶/۷۲	۲۴/۱۳	۲۱/۵۳	۱۸/۵۶	۱۴/۸۵
ChiChi	۸۹/۹۹	۸۴/۵۹	۸۰/۰۹	۷۱/۹۹	۶۴/۷۹	۵۸/۴۹	۵۲/۱۹	۴۴/۹۹	۳۵/۹۹
Northridge	۴۴/۱۸	۴۱/۵۳	۳۹/۳۲	۳۵/۳۴	۳۱/۸۱	۲۸/۷۲	۲۵/۶۲	۲۲/۰۹	۱۷/۶۷
میانگین	۴۶/۶۲	۴۳/۶۷	۴۱/۱۶	۳۷/۰۶	۳۳/۳۷	۳۰/۱۷	۲۶/۹۲	۲۳/۲۷	۱۸/۵۸

### ۳.۵. نتایج جابجایی نسبی طبقات

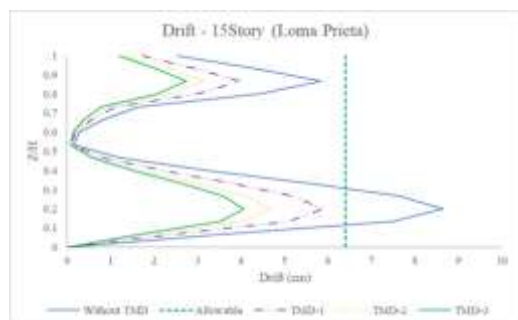
حداکثر تغییر مکان نسبی مجاز طبقات طبق آئین نامه ۲۸۰۰ ویرایش چهارم برابر ۲ درصد ارتفاع طبقات خواهد بود که برای سازه‌های ما برابر ۶/۴ سانتیمتر خواهد بود که در ادامه نتایج حاصل از تحلیل تاریخیچه زمانی برای سازه‌های ۱۵، ۳۰ و ۴۵ طبقه در حالت بدون استفاده از میراگر و با استفاده از آن با تعداد مختلف آورده شده است (شکل‌های ۷ تا ۹). مطابق نتایج مشاهده می‌شود که استفاده از میراگر جرمی تنظیم شونده باعث کاهش تغییر مکان نسبی طبقات (دریفت) سازه ۱۵ طبقه شده است و به‌طور کلی مقدار آن را کاهش می‌دهد، از طرفی نیز استفاده از تعداد کمی از میراگر هم حتی در بعضی از زلزله‌ها پاسخگوی این کنترل نبوده است؛ مثلاً در زلزله Northridge سازه تنها در حالت استفاده از ۱۲ میراگر جوابگوی این کنترل بوده است. به طور میانگین استفاده از ۴ میراگر تغییر مکان نسبی طبقات را حدوداً ۴۰ درصد، استفاده از ۸ میراگر حدوداً ۵۰ درصد و استفاده از ۱۲ میراگر حدوداً ۶۵ درصد کاهش را در تغییر مکان نسبی طبقات ایجاد کرده است که در شکل ۷ نمودارهای مربوط به سازه ۱۵ طبقه نشان داده شده است. در سازه ۳۰ طبقه نیز تقریباً وضعیتی مشابه به سازه ۱۵ طبقه داشته و به طور میانگین استفاده از ۴ میراگر تغییر مکان نسبی طبقات را حدوداً ۱۷ درصد، استفاده از ۸ میراگر حدوداً ۲۶ درصد و استفاده از ۱۲ میراگر حدوداً ۳۵ درصد، استفاده از ۱۶ میراگر حدوداً ۴۶ درصد، استفاده از ۲۰ میراگر حدوداً ۵۵ درصد و استفاده از ۲۴ میراگر حدوداً ۶۲ درصد کاهش را در تغییر مکان نسبی طبقات ایجاد کرده است.



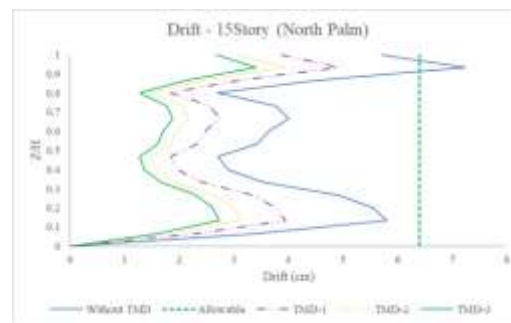
(ب)



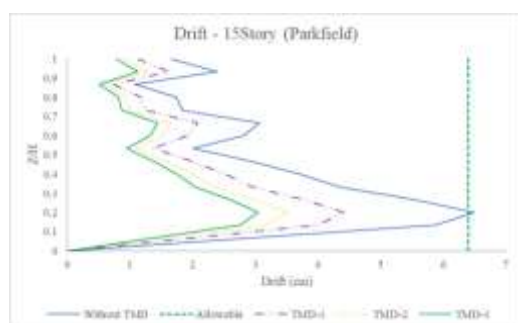
(الف)



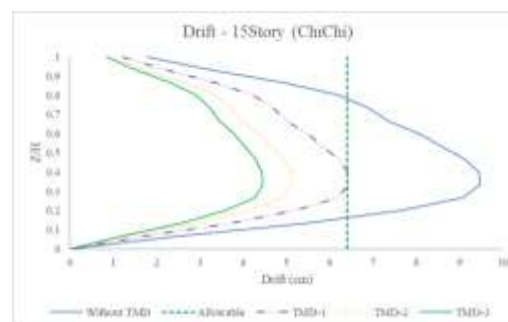
(د)



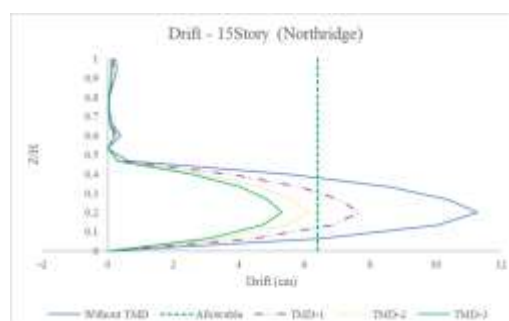
(ج)



(و)



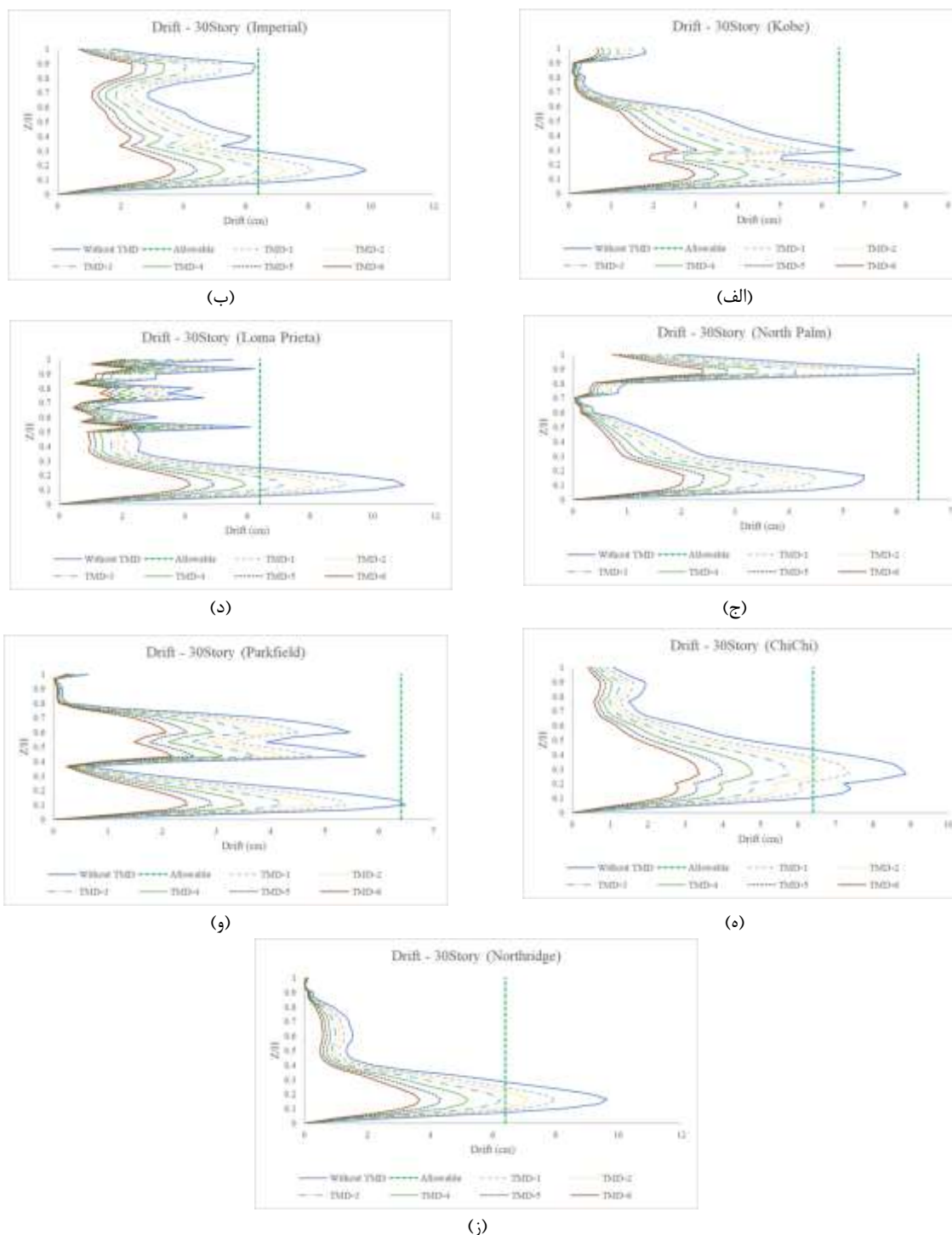
(ه)



(ز)

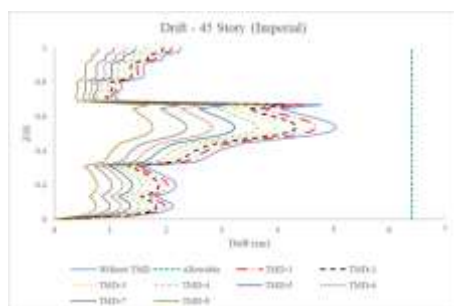
شکل ۷: تغییر مکان نسبی طبقات سازه ۱۵ طبقه

در شکل ۸ نمودارهای مربوط به سازه ۳۰ طبقه نشان داده شده است. در سازه ۴۵ طبقه نیز به طور میانگین استفاده از ۴ میراگر تغییر مکان نسبی طبقات را حدوداً ۷ درصد، استفاده از ۸ میراگر حدوداً ۱۴ درصد و استفاده از ۱۲ میراگر حدوداً ۲۱ درصد، استفاده از ۱۶ میراگر حدوداً ۲۸ درصد، استفاده از ۲۰ میراگر حدوداً ۳۶ درصد و استفاده از ۲۴ میراگر حدوداً ۴۴ درصد، استفاده از ۲۸ میراگر حدوداً ۵۳ درصد و استفاده از ۳۲ میراگر حدوداً ۶۵ درصد کاهش را در تغییر مکان نسبی طبقات ایجاد کرده است. نمودارهای مربوط به سازه ۴۵ طبقه نیز در شکل ۹ نشان داده شده است.

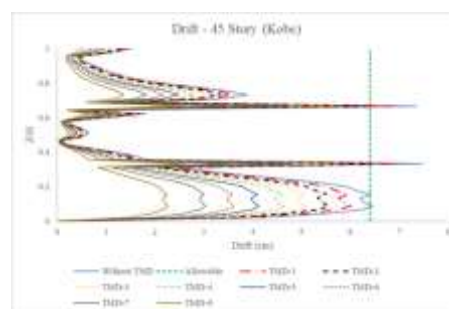


شکل ۸: تغییر مکان نسبی طبقات سازه ۳۰ طبقه

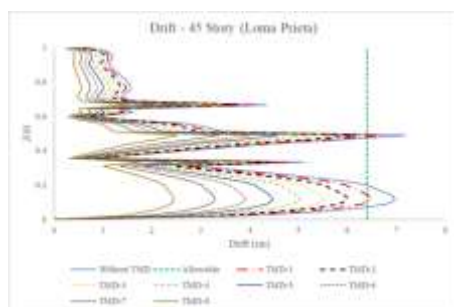
با جمع‌بندی نتایج می‌توان گفت که بهترین محل مناسب برای جانمایی میراگرهای جرمی تنظیم شونده (TMD) در ابتدا بام سازه‌ها بوده و در سازه‌های بلند مرتبه توصیه می‌شود از این میراگر حداقل به فاصله هر ۵ طبقه استفاده گردد تا بتوان بهبود رفتار لرزه‌ای اعم از کاهش برش پایه، تغییر مکان نسبی طبقات و مفاصل پلاستیک تشکیل شده را مشاهده نمود. توصیه می‌شود میراگرها در هر دو جهت سازه و به صورت متقارن جانمایی گردد تا مشکلاتی نظیر پیچش در سازه به دلیل اختلاف در مرکز جرم و سختی وجود نداشته باشد.



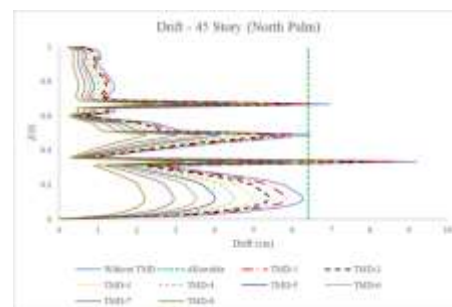
(ب)



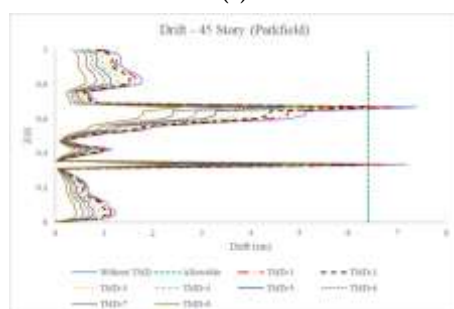
(الف)



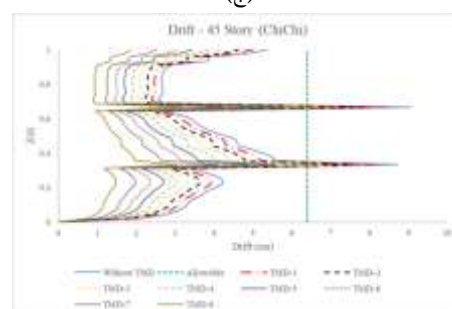
(د)



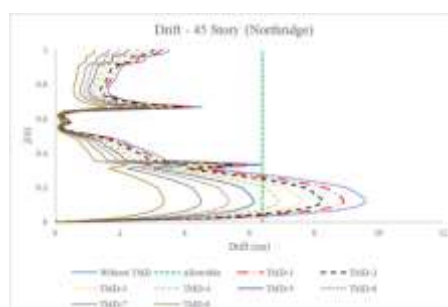
(ج)



(و)



(ه)



(ز)

شکل ۹: تغییر مکان نسبی طبقات سازه ۴۵ طبقه

## ۶. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

هدف از این پژوهش، تعیین محل بهینه میراگر جرمی تنظیم شونده (TMD) منفرد و چندگانه در ساختمان‌های بلند مرتبه بتن مسلح و بررسی عملکرد این میراگر است. در این تحقیق سازه‌های ۱۵، ۳۰ و ۴۵ طبقه با سیستم قاب خمشی بتن مسلح انتخاب شده و میراگر با تعداد مختلف که معرفی و جانمایی گردید. سپس سازه‌ها تحت ۷ زلزله نزدیک گسل تحت تحلیل تاریخچه زمانی فرار گرفتند. در ادامه جمع‌بندی نتایج حاصل از این پژوهش ارائه می‌شوند.

- استفاده از میراگر جرمی تنظیم شونده (TMD) برش پایه سازه را کاهش می‌دهد. با استفاده از این میراگر در سازه‌های ۱۵ طبقه با تعداد میراگر ۴، ۸ و ۱۲ به ترتیب ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درصد، در سازه‌های ۳۰ طبقه با تعداد میراگر ۴، ۸، ۱۲، ۱۶، ۲۰

- و ۲۴ به ترتیب ۱۸، ۲۸، ۳۷، ۴۷، ۵۶ و ۶۶ درصد و در سازه‌های ۴۵ طبقه با تعداد میراگر ۴، ۸، ۱۲، ۱۶، ۲۰، ۲۴، ۲۸ و ۳۲ به ترتیب ۱۰، ۱۸، ۲۵، ۳۳، ۴۲، ۵۲، ۶۰ و ۷۰ درصد کاهش برش پایه را مشاهده شد.
- کاهش برش پایه معمولاً در تعداد کم TMD محسوس نبود. به‌خصوص با افزایش تعداد طبقات استفاده از تعداد میراگر مناسب بسیار پراهمیت است و استفاده از این میراگر در طبقات فوقانی سازه بسیار مهم و ضروری می‌باشد.
  - کاهش تغییر مکان ماندگار بام سازه معمولاً در تعداد کم میراگر محسوس نبوده و به‌خصوص با افزایش تعداد طبقات استفاده از تعداد میراگر مناسب در این حالت نیز بسیار مهم بوده مشاهده شد که بهتر است این میراگرها در طبقات فوقانی جانمایی شوند.
  - بهترین محل برای جانمایی میراگرهای جرمی تنظیم شونده (TMD) در ابتدا بام سازه‌ها است. در سازه‌های بلند مرتبه توصیه می‌شود از این میراگر حداقل به فاصله هر ۵ طبقه استفاده گردد تا بتوان بهبود رفتار لرزه‌ای اعم از کاهش برش پایه، تغییر مکان نسبی طبقات و مفاصل پلاستیک تشکیل شده را مشاهده نمود.
  - توصیه می‌شود میراگرها در هر دو جهت سازه و به‌صورت متقارن جانمایی گردد تا مشکلاتی نظیر پیچش در سازه به دلیل اختلاف در مرکز جرم و سختی وجود نداشته باشد.

## مراجع

- [1] Richiedei, D., Tamellin, I., & Trevisani, A. (2022). Beyond the tuned mass damper: a comparative study of passive approaches to vibration absorption through antiresonance assignment. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 29(1), 519-544.
- [2] Ugalde, D., Almazán, J. L., Santa María, H., & Guindos, P. (2019). Seismic protection technologies for timber structures: a review. *European journal of wood and wood products*, 77, 173-194.
- [3] Zhang, S., Wang, G., & Sa, W. (2013). Damage evaluation of concrete gravity dams under mainshock-aftershock seismic sequences. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 50, ۱۶-۲۷.
- [4] Rahimi, F., Aghayari, R., & Samali, B. (2020). Application of tuned mass dampers for structural vibration control: a state-of-the-art review. *Civil Engineering Journal*, 1622-1651.
- [5] Kalra, M., Bajpai, P., & Singh, D. (2016). Effect of Wind on Multi Storey Buildings of Different Shapes. *Indian Journal of Science and Technology*, 9(48).
- [6] Nanda, B. (2010). Application of tuned liquid damper for controlling structural vibration (Doctoral dissertation).
- [7] Den Hartog, J. P. (1985). *Mechanical vibrations*. Courier Corporation.
- [8] Zuo, L., & Nayfeh, S. A. (2004). Minimax optimization of multi-degree-of-freedom tuned-mass dampers. *Journal of Sound and Vibration*, 272(3-5), 893-908.
- [9] Zuo, L., & Nayfeh, S. A. (2005). Optimization of the individual stiffness and damping parameters in multiple-tuned-mass-damper systems. *J. Vib. Acoust.*, 127(1), 77-83.
- [10] Wong, K. K. F., & Chee, Y. L. (2004). Energy dissipation of tuned mass dampers during earthquake excitations. *The structural design of tall and special buildings*, 13(2), 105-121.
- [11] Abhinav, A., & Gangadharan, K. V. (2011). Experimental and finite elements analysis of a tuned mass absorber for vibration isolation.

- [12] Farghaly, A. A., & Salem Ahmed, M. (2012). Optimum design of TMD system for tall buildings. *International Scholarly Research Notices*, 2012.
- [13] Lu, Z., Li, K., & Zhou, Y. (2018). Comparative studies on structures with a tuned mass damper and a particle damper. *Journal of Aerospace Engineering*, 31(6), 04018090.
- [14] Nigdeli, S. M., & Bekdaş, G. (2019). Optimum design of multiple positioned tuned mass dampers for structures constrained with axial force capacity. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 28(5), e1593.
- [15] Etedali, S., Akbari, M., & Seifi, M. (2019). MOCS-based optimum design of TMD and FTMD for tall buildings under near-field earthquakes including SSI effects. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 119, 36-50.

[۱۶] استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش چهارم، آیین نامه طراحی ساختمان ها در برابر زلزله (۱۳۹۳).