



اثرات اندرکنش سازه- خاک- سازه بر پاسخ لرزه‌ای سازه‌های بلندمرتبه مجاور مجهز به میراگر جرمی تنظیم‌شده بهینه

امیرحسین فتح الله پور^۱، احسان تفکری^۱، سید علی اصغر ارجمندی^{۲*}

۱- دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

۲- دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۱۴

بازنگری: ۱۴۰۱/۰۶/۲۳

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۱/۰۷

ارائه آنلاین: ۱۴۰۲/۰۲/۰۱

کلمات کلیدی:

میراگر جرمی تنظیم‌شده (TMD)
اندرکنش سازه- خاک- سازه (SSSI)
روش زیرسازه
الگوریتم بهینه‌یابی ازدحام ذرات (PSO)
کنترل غیرفعال سازه‌ها

خلاصه: میراگر جرمی تنظیم‌شده یکی از ساده‌ترین و درعین حال پرکاربردترین ابزار کنترل سازه‌ها است. عواملی چون مشخصات خاک زیر سازه و نیز وجود سازه‌ی مجاور می‌تواند بر نحوه‌ی عملکرد این میراگر تأثیرگذار باشد. این مطالعه به بررسی اثرات استفاده از میراگر جرمی تنظیم‌شده بر پاسخ لرزه‌ای ساختمان‌های قاب خمشی فولادی ۲۰ طبقه با پایه ثابت و بستر انعطاف‌پذیر با دو نسبت ابعادی متفاوت و با در نظر گرفتن اثرات همسایگی دو سازه تحت عنوان اندرکنش سازه-خاک-سازه می‌پردازد. برای در نظر گرفتن این اندرکنش، ماتریس سختی کاهش‌یافته سیستم پی-خاک-پی، از تحلیل مدل کرنش مسطحه محیط خاک در آباکوس به دست آمده و با استفاده از مجموعه‌ای از فنرها و المان جدید گسترش‌یافته در این سیستم (OpenSEES) به مدل‌های دوبعدی از قاب انتهایی سازه‌ها اعمال می‌گردد. به منظور بهینه‌سازی پارامترهای مربوط به میراگر جرمی تنظیم‌شده، از الگوریتم ازدحام ذرات استفاده شده است. میانگین نتایج به دست آمده از تحلیل تاریخچه زمانی تحت اثر ده رکورد زلزله مقیاس شده حوزه دور نشان می‌دهد که استفاده از میراگر جرمی تنظیم‌شده با پارامترهای بهینه در سازه‌های ۲۰ طبقه هم در حالت پایه ثابت و هم با در نظر گرفتن اندرکنش سازه-خاک-سازه می‌تواند پاسخ سازه‌ها را کاهش دهد. با این وجود، در نظر گرفتن اندرکنش سازه-خاک-سازه سبب تغییر پاسخ‌های مربوط به سازه‌های مجهز به میراگر شده؛ به گونه‌ای که این تغییرات در سازه با نسبت ابعادی بیش‌تر (لاغرتر) افزایشی است. همچنین به منظور تعیین مشخصات میراگرهای جرمی در سازه‌های بلندمرتبه با پروپدهای ارتعاشی نزدیک به هم بهتر است اثرات اندرکنش سازه خاک سازه مدنظر قرار گیرد.

۱- مقدمه

یکی از مؤثرترین روش‌های کنترل غیرفعال^۱ سازه، استفاده از میراگرهای جرمی تنظیم‌شده^۲ است. این وسیله با جذب کردن مقداری از انرژی وارد شده ناشی از بار دینامیکی به سازه، میزان تقاضا برای استهلاک انرژی را در سازه‌ی اصلی کاهش می‌دهد. یک سیستم میراگر جرمی تنظیم‌شده، وسیله‌ای متشکل از جرم، فنر و میراگر است که به منظور کاهش پاسخ دینامیکی سازه به آن متصل می‌شود. فرکانس میراگر در فرکانس سازه‌ای مشخص تنظیم می‌شود تا در صورت تحریک این فرکانس، میراگر در فاز مخالف حرکت سازه مرتعش شود. انرژی توسط نیروی اینرسی میراگری که بر روی سازه نصب شده است، تلف می‌گردد.

۱-۱- مطالعات انجام شده در مورد میراگر جرمی تنظیم‌شونده

مفهوم میراگر جرمی تنظیم‌شده برای نخستین بار توسط فرام^۳ [۱] برای کاهش ارتعاشات ناشی از امواج دریا بر بدنه کشتی مطرح گردید. دن‌هارتوگ^۴ [۲] در کتاب ارتعاشات مکانیک، بحث مبسوطی از تنظیم بهینه و پارامترهای میرایی میراگرهای جرمی ارائه داد. نخستین تجربه موفق کاربرد میراگر جرمی تنظیم‌شده برای بارهای لرزه‌ای توسط ویرسچینگ^۵ و همکاران [۳] ارائه گشت. در این مطالعه، پاسخ مود اول و دوم سازه‌های ۵ و ۱۰ طبقه با در نظر گرفتن نسبت میرایی مودی ۲ درصد برای شتاب بستر انعطاف‌پذیر مورد بررسی قرار گرفت. ویرسچینگ و کمپبل^۶ [۴] با استفاده از یک روش بهینه‌سازی، پارامترهای بهینه میراگر جرمی تنظیم‌شده را برای دو سازه که تحت شتاب بستر نویز سفید ایستا قرار گرفته بودند، محاسبه کرد. پس از

3 Frahm
4 Den Hartog
5 Wirsching
6 Campbell

1 Passive control
2 Tuned Mass Damper (TMD)

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: arjmandi@znu.ac.ir



زیرسازه^{۱۱} یاد می‌شود، در روند انجام این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته است. در ادامه، برخی از مطالعات صورت گرفته به کمک این روش بیان شده است. لیو^{۱۲} و همکاران [۱۵] با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه، یک مدل ریاضی را برای پیش‌بینی نوسانات یک ساختمان بلندمرتبه مجهز به میراگر جرمی تحت بار باد ارائه نمودند. این مدل بر اساس تحلیل‌های حوزه زمان بود. نتایج نشان دادند که این مدل به خوبی می‌تواند رفتار خاک را منعکس و نسبت به حالت پایه ثابت، با دقت بیش‌تری می‌تواند پاسخ‌های ناشی از بار باد را محاسبه کند. علاوه بر این، مشخص شد که با صرف نظر کردن از اندرکنش خاک و سازه، نوسانات سازه‌ای و تأثیر میراگرهای جرمی به ترتیب دست بالا و دست پایین به دست می‌آیند. تأثیر مثبت میراگرهای جرمی در کاهش پاسخ سازه بلند در برابر بار باد در این مطالعه نیز تأیید شد و نشان داده شد که این تأثیر خاک‌هایی با سختی بیش‌تر افزایش می‌یابد. بکداش^{۱۳} و نیگدلی^{۱۴} [۱۶] از الگوریتم‌های جستجوی هم‌ساز^{۱۵} برای یافتن پارامترهای بهینه میراگر جرمی در یک سازه ۱۰ طبقه که تحت شتاب پایه هارمونیک قرار گرفته بود، استفاده نمودند. آن‌ها پارامترهای بهینه به دست آمده برای میراگر جرمی را برای زلزله‌های مختلف در سازه ۱۰ طبقه بررسی نمودند. گائو^{۱۶} و همکاران [۱۷] یک روش بهینه‌سازی را برای یک میراگر جرمی غیرخطی ارائه نمودند. این پژوهشگران میراگر جرمی غیرخطی را بر روی یک سازه تک‌درجه آزادی که تحت ارتعاش نویز سفید گوسی قرار داشت، قرار دادند و تأثیرپذیری این میراگر را برای نسبت‌های مختلف میرایی سازه و شدت‌های متفاوت تحریک بررسی نمودند. محبی و همکاران [۱۸] به بررسی اثربخشی میراگر جرمی برای کاهش پاسخ سازه‌هایی با رفتار غیرخطی تحت نیروی زلزله پرداختند. آن‌ها پارامترهای بهینه میراگر جرمی را با استفاده از الگوریتم‌های ژنتیک توزیع شده به دست آوردند و نتایج به دست آمده برای میراگر جرمی را در یک سازه ۸ طبقه برشی با رفتار غیرخطی بررسی نمودند. فرشیدیانفر و سهیلی [۱] با استفاده از روش کلونی مورچه‌ها^{۱۷} پارامترهای بهینه برای میراگر جرمی تنظیم‌شده را در ساختمان‌های بلندمرتبه با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه به منظور کاهش حداکثر جابه‌جایی و شتاب طبقات یافتند. در این مطالعه، به منظور بررسی نتایج، رکوردهای مربوط به زلزله‌های کوبه و طیس را به یک سازه‌ی ۴۰ طبقه با رفتار خطی

آن، میراگر جرمی با این پارامترهای بهینه بر روی سازه‌ها قرار گرفت و در نتیجه منجر به کاهش پاسخ‌ها گشت. اوهنو^۱ و همکاران [۵] در پژوهش‌های خود، فرکانس بهینه میراگر جرمی را به گونه‌ای تنظیم نمودند که بر اساس آن، مجموع مربعات شتاب سازه حداقل گردد. تسای^۲ و لین^۳ [۶] با استفاده از روش جستجوی عددی، پارامترهای بهینه میراگر جرمی را بر حسب نسبت جرم میراگر و میرایی سازه ارائه نمودند. هادی و ارفیادی^۴ [۷] برای اولین بار از الگوریتم فرا کاوشی ژنتیک^۵ برای یافتن پارامترهای بهینه میراگر جرمی استفاده نمودند. آن‌ها میراگر جرمی را بر روی یک سازه ۱۰ طبقه برشی قرار دادند و با کمینه کردن تغییر مکان بیشینه طبقات، پارامترهای بهینه این میراگر را برای بارگذاری زلزله به دست آوردند. لیونگ^۶ و همکاران [۸] با استفاده از الگوریتم فرا کاوشی ازدحام ذرات^۷ (PSO)، نسبت فرکانس بهینه و نسبت میرایی بهینه میراگر جرمی را برای یک سازه تک درجه آزادی تحت ارتعاش بستر انعطاف‌پذیر به دست آوردند. دومیزیو^۸ و همکاران [۹] با در نظر گرفتن سه پیکربندی مختلف برای میراگر جرمی، پارامترهای طراحی آن‌ها را با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات بهینه نمودند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که استفاده از دو میراگر به صورت موازی و با فرکانسی برابر با ۵۰ درصد فرکانس غالب سازه بیش‌ترین تأثیر را داشته است.

۱-۲- مطالعات انجام شده در مورد اثرات اندرکنش خاک و سازه بر عملکرد میراگر جرمی تنظیم‌شونده

در نظر گرفتن اثرات مربوط به وجود خاک در زیر سازه به‌طور معمول به دو روش صورت گرفته است. در روش اول، مدل محیط پیوسته خاک به طور دقیق ساخته شده و اثرات انتشار امواج زلزله در آن در نظر گرفته می‌شود. در این زمینه می‌توان به مطالعات بزرگ‌نیا و کمپیل [۱۰]، تریفوناک^۹ [۱۱] و [۱۲] و شافاک^{۱۰} [۱۳ و ۱۴] اشاره نمود. در روش دوم، محیط خاک به طور دقیق مدل‌سازی نمی‌شود؛ بلکه، از مجموعه‌ای از فنرهای افقی و قائم برای مدل‌سازی آن استفاده می‌شود. این روش که از آن تحت عنوان روش

- 1 Ohno
- 2 Tsai
- 3 Lin
- 4 Arfiadi
- 5 Genetic algorithm
- 6 Leung
- 7 Particle Swarm Optimization (PSO)
- 8 Domizio
- 9 Trifunac
- 10 Şafak

- 11 Substructure methode
- 12 Liu
- 13 Bekdaş
- 14 Nigdeli
- 15 Harmony Search (HS)
- 16 Gao
- 17 Ant Colony Optimization (ACO)

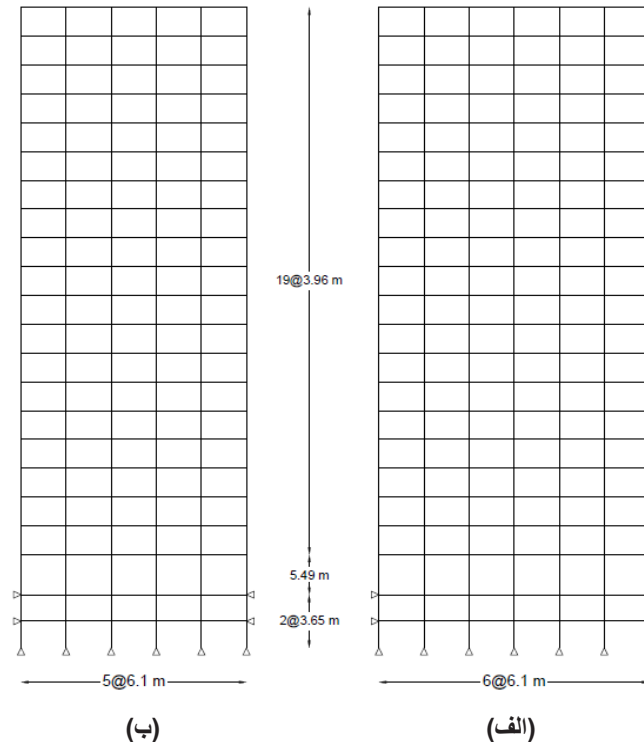
می‌تواند به منظور پی بردن به نحوه تأثیر این عوامل بر عملکرد میراگر جرمی بهینه استفاده شده در یک سازه در طراحی مناسب آن در برابر بارهایی نظیر زلزله مؤثر باشد. با وجود پیچیدگی‌های موجود در نحوه مدل‌سازی اندرکنش و رفتار دقیق خاک، به لطف توسعه‌ی فناوری و به ویژه رایانه‌ها و ابررایانه‌ها، محققین توانسته‌اند در دهه‌های اخیر نتایج قابل قبولی در این زمینه به دست آورند. بر خلاف مطالعات انجام شده بر روی اندرکنش خاک و سازه، مطالعات محدودی در مورد اثرات هم‌زمان این اندرکنش با وجود سازه‌ی مجاور بر عملکرد میراگر جرمی متمرکز شده‌اند و به نظر می‌رسد می‌توان با انجام مطالعات بیش‌تر و ارائه مدل‌های جدید به نتایج علمی و در نهایت کاربردی کردن آن‌ها در زمینه‌ی اجرایی دست یافت. از سوی دیگر، در اغلب مطالعات صورت گرفته با استفاده از روش زیرسازه، رفتار فنرهای مورد استفاده برای در نظر گرفتن رفتار خاک مستقل از هم می‌باشد. در این مطالعه، با ارائه‌ی یک روش پیشنهادی، کاپلینگ^۷ بین این فنرها نیز در نظر گرفته شده است. از این رو، هدف این مطالعه بررسی اثرات میراگر جرمی تنظیم‌شده بهینه بر پاسخ لرزه‌ای سازه‌های ۲۰ طبقه با در نظر گرفتن اندرکنش سازه-خاک-سازه و بدون آن است. بدین منظور، قاب‌های دو بعدی سازه‌های ۲۰ طبقه در نرم‌افزار اپن‌سیس^۸ [۲۵] با در نظر گرفتن رفتار ارتجاعی مدل‌سازی می‌شوند. در ادامه، ماتریس سختی کاهش‌یافته^۹ خاک با فرض رفتار ارتجاعی برای آن از طریق تحلیل استاتیکی در نرم‌افزار آباکوس [۲۶] به دست آمده و از طریق المان توسعه‌یافته در اپن‌سیس در ماتریس سختی مدل‌های قاب‌ها برهم‌گذاری می‌گردد. برای کنترل سازه‌ها در برابر بار لرزه‌ای، پارامترهای طراحی میراگر جرمی شامل فرکانس زاویه‌ای، میرایی و جرم از طریق الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات^{۱۰} و با هدف به حداقل رساندن میانگین دریفت سازه‌ها تحت اثر ۱۰ رکورد زلزله حوزه دور مقیاس شده، برای سازه‌های بر پایه ثابت به دست می‌آیند. در نهایت، اثرات این میراگرهای طراحی شده بر پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها با در نظر گرفتن اثرات هم‌زمان اندرکنش خاک و سازه و همسایگی سازه مجاور و بدون آن در حالت‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است.

اعمال و نحوه عملکرد میراگرهای بهینه شده را در کاهش پاسخ‌ها و نیز تأثیر نوع خاک را بر عملکرد این میراگرها مشخص نمودند. جباری^۱ و مدبهوشی^۲ [۲۰] با استفاده از آزمایش‌های ژئوتکنیکی سانتریفیوژ، اثرات اندرکنش سازه - خاک - سازه را برای دو ساختمان نزدیک به هم و مجهز به میراگر جرمی تنظیم‌شده در حالت داخل صفحه بررسی کردند. هدف آن‌ها بررسی اندرکنش بین قاب‌ها و هم‌چنین پیکربندی میراگر جرمی و اثرات آن بر اندرکنش بود. سالوی^۳ و ریزی^۴ [۲] مشخصات بهینه مربوط به یک میراگر جرمی تنظیم‌شده را برای ۱۶ سازه تحت اثر هجده زلزله یافتند. سپس روابط بین پارامترهای بهینه و مشخصات مودال را برای یک قاب ده طبقه تحت تعدادی زلزله معیار بررسی قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که روش ارائه شده برای تنظیم این نوع میراگر، بهترین عملکرد را داشته است. عبدالحامد^۵ و محمود [۲۲] عملکرد میراگرهای جرمی تنظیم‌شده را در کاهش پاسخ دینامیکی سازه‌ها با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه و تحت زلزله‌های حوزه دور و نزدیک بررسی نمودند. نتایج شبیه‌سازی‌های عددی برای حالت‌های مختلف نشان دادند که در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه منجر به افزایش پاسخ‌ها و نیز تغییر در نقش میراگر جرمی تنظیم‌شده در کاهندگی پاسخ‌های سازه بالایی می‌گردد. کاوه و همکاران [۲۳] از یک الگوریتم جدید با نام الگوریتم بهینه‌سازی آشوبناک^۶ برای بهینه‌سازی پارامترهای مربوط به یک میراگر جرمی تنظیم‌شده غیرفعال و فعال در یک قاب برشی ۱۰ طبقه تحت زلزله‌های شدید و یک برج اداری ۷۶ طبقه بتنی تحت بار باد پرداختند. میراگرهای طراحی شده با این الگوریتم توانستند عملکرد مناسبی را در برابر بارهای جانبی داشته باشند. وانگ و همکاران [۲۴] با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش سازه و خاک در ۴ نوع مختلف خاک، از یک میراگر جرمی پاندولی سازگار در یک سازه ۴۰ طبقه استفاده نمودند. نتایج مطالعه‌ی آن‌ها نشان داد که اثرات مربوط به این اندرکنش با توجه به تغییراتی که در فرکانس سازه ایجاد می‌کند، می‌تواند عملکرد میراگر را تحت اثر قرار دهد و لذا، در نظر گرفتن این اثرات در تعیین پارامترهای طراحی میراگر ضروری است.

با توجه به اهمیت تعیین نحوه‌ی تغییرات پاسخ یک سازه با توجه به مشخصات خاک زیر آن و نیز سازه‌های مجاور به ویژه برای سازه‌های واقع بر خاک‌های سست در مناطق متراکم شهری، انجام مطالعات با دقت کافی

7 Coupling
8 OpenSEES
9 Condensed stiffness matrix
10 Particle Swarm Optimization (PSO)

1 Jabary
2 Madabhushi
3 Salvi
4 Rizzi
5 Abd-Elhamed
6 Chaotic



شکل ۱. قاب‌های مورد مطالعه (الف) سازه در راستای X (20ZX) (ب) سازه در راستای Y (20ZY)

Fig.1. Studied frames (a) structure in X-direction (20ZX) (b) structure in Y-direction (20ZY)

۲- مدل‌های مطالعه شده

۲-۱- مشخصات سازه‌ها

در این مطالعه، مدل دوبعدی قاب‌های انتهایی سازه پنج‌مارک قاب خمشی فولادی ۲۰ طبقه در مرجع [۲۷] در دو راستا مورد استفاده قرار می‌گیرند. هندسه این قاب‌ها در شکل (۱) نشان داده شده است. فاصله‌ی تمام دهانه‌ها در هر دو سازه برابر با ۶/۱ متر و ارتفاع طبقات زیرزمین ۳/۶۵ متر، طبقه‌ی همکف ۵/۴۹ متر و سایر طبقات نیز ۳/۹۶ متر است. از مقاطع بال‌پهن برای تیرها و از مقاطع بال‌پهن و جعبه‌ای برای ستون‌ها استفاده شده است. از جزئیات مربوط به مقاطع و بارگذاری مطابق با موارد ارائه شده در مرجع [۲۷] در روند مدل‌سازی استفاده شده است. این سازه‌ها با ارضای ضوابط لرزه‌ای و برای فاز دو از پروژه ساختمان SAC توسط شرکت مشاوره‌ای شرکای براندو و جانستون^۱ طراحی شدند و نمایانگر سازه‌های رایج

بلندمرتبه در شهر لس‌آنجلس می‌باشند.

۲-۲- مشخصات خاک و پی

با توجه به ابعاد دهانه‌ها و ارتفاع سازه‌ها، از پی گسترده برای هر دو سازه‌ی ۲۰ طبقه استفاده شده و ضخامت پی گسترده در این سازه برابر ۲/۵ متر به صورت مدفون در نظر گرفته شده است. با توجه به مشخصات پی، رفتار پی به صورت صلب بوده و انعطاف‌پذیری آن تأثیر زیادی بر پاسخ سازه ندارد، با این وجود، به منظور نزدیک شدن به واقعیت از مدل‌سازی مربوط به حالت غیر صلب برای آن‌ها استفاده می‌شود. در این مطالعه، از خاک نوع ۳ (خاک متراکم تا متوسط شامل شن و ماسه متراکم تا متوسط یا رس‌های سخت با ضخامت بیش‌تر از ۳۰ متر) مطابق با استاندارد ۲۸۰۰ [۲۸] با مشخصات ارائه شده در جدول (۱) برای مدل‌سازی خاک مورد استفاده قرار می‌گیرد.

جدول ۱. مشخصات خاک زیر سازه

Table.1. Properties of soil beneath the structures

۲۰۰	سرعت موج برشی (m/s)
۱۹	وزن مخصوص خاک (KN/m ³)
۰/۴	ضریب پواسون
۷۷/۵	مدول برشی اولیه (MPa)
۲۱۷	مدول الاستیسیته خاک (MPa)

Column با مساحت معادل مقاطع تیر و ستون ارائه شده در مرجع [۲۷] تعریف می‌شوند.

۳-۲- مدل‌سازی اندرکنش خاک و سازه

در این مطالعه، از روش زیرسازه برای مدل‌سازی اثرات مربوط به حضور خاک استفاده شده است. بدین منظور، از روند ارائه شده در مطالعه فتح الله پور و همکاران [۲۹] استفاده شده است. مطابق این روند، برای مدل کردن خاک زیر سازه‌ها از فنرهایی با سختی معادل خاک در مرز بین خاک، پی و سازه استفاده شده است. در حقیقت، ماتریس سختی کاهش یافته محیط خاک در درجات آزادی مشترک بین خاک و پی و زیرزمین از تحلیل استاتیکی مدل اجزا محدودی خاک در نرم‌افزار آباکوس^۲ به دست می‌آید. این روش برای حذف بخشی از درجات آزادی که در روند مدل‌سازی موردنیاز نیست، از ماتریس سختی استفاده می‌شود. این روش در سال ۱۹۶۵ توسط گویان^۳ و آیرنز^۴ [۳۰ و ۳۱] ارائه شد و در مراجع مختلفی [۳۲-۳۵] به آن پرداخته شده است. مدل دوبعدی المان محدود با در نظر گرفتن هندسه‌ی پی‌ها و عمق مدفونی آن‌ها بدون در نظر گرفتن سازه‌ها برای لایه‌ی یکپارچه ۳۰ متری از خاک زیرسازه در این نرم‌افزار ساخته می‌شوند. رفتار خاک به صورت ارتجاعی و مدول الاستیسته خاک (E) برابر $2/17 \times 10^2$ MPa می‌باشند. با صرف نظر از تغییرات پاسخ در عرض برای محیط خاک، مسئله موردنظر به صورت یک مسئله کرنش مسطحه^۵ تحلیل شده است. طول مدل‌ها نیز به اندازه کافی بزرگ در نظر گرفته شده تا بر تغییر مکان‌های نقاط موردنظر تاثیر نداشته باشند. از المان‌های ایزوپارامتریک کرنش مستوی ۸ گرهی (Q8) با تابع

۳-۲- مشخصات میراگر جرمی تنظیم شده

در این مطالعه از سیستم کنترلی غیرفعال میراگر جرمی تنظیم شده انتقالی افقی در سازه‌های ۲۰ طبقه استفاده شده است. پارامترهای بهینه طراحی این میراگر شامل جرم (m_d)، فرکانس زاویه‌ای (ω_d) و میرایی (ξ_d) می‌باشند که با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات به دست می‌آیند. با تعیین این پارامترها، سختی و ضریب میرایی مربوط به میراگر به ترتیب از طریق روابط (۱) و (۲) محاسبه می‌گردد.

$$k_d = m_d \omega_d^2 \quad (1)$$

$$c_d = 2m_d \times \omega_d \times \xi_d \quad (2)$$

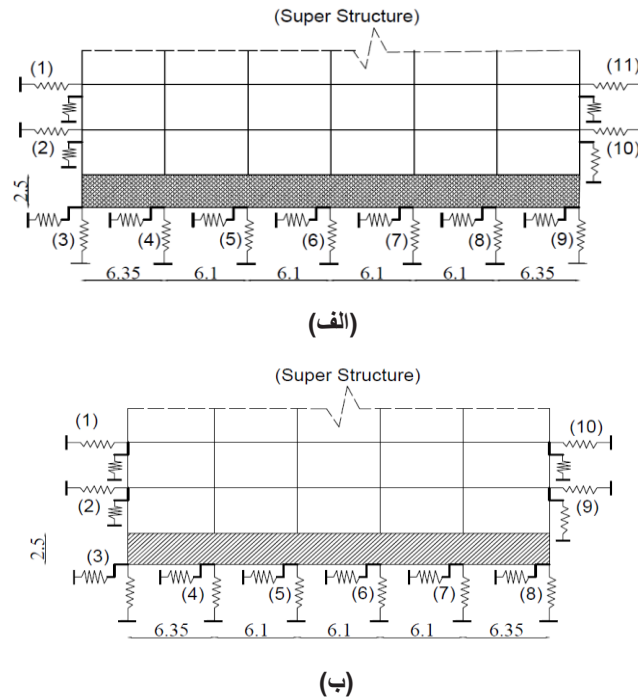
۳-۳- مدل‌سازی

۳-۳-۱- مدل‌سازی سازه‌ها

هر دو سازه معرفی شده در این مطالعه در نرم‌افزار این سیس^۱ مدل می‌شوند. رفتار سازه‌ها به صورت خطی در نظر گرفته شده است. لذا، در نرم‌افزار این سیس از مصالح و مقاطع Elastic با مدول الاستیسیته‌ای برابر با مدول الاستیسیته‌ی فولاد استفاده شده که مقدار آن 2×10^5 MPa است، استفاده می‌گردد. در تمام سازه‌ها، گره‌ها در هر طبقه در محل اتصال تیر به ستون تعریف می‌شوند. جرم‌های لرزه‌ای مقادیر مربوط به هر طبقه به صورت یکنواخت میان گره‌های طبقه مربوطه توزیع می‌گردد. بارگذاری ثقلی نیز به صورت بارهای متمرکز در گره‌های هر طبقه اعمال شده است. به علاوه، مقاطع تیر و ستون در نرم‌افزار نیز با استفاده از المان elasticBeam-

2 Abaqus
3 Guyan
4 Irons
5 Plain Strain

1 OpenSEES



شکل ۲. طرح شماتیک مدل سازی خاک و پی در سازه ۲۰ طبقه (الف) در راستای X (۲۰ZX) (ب) در راستای Y (۲۰ZY)

Fig. 2. Schematic models of soil-structure interaction in 20-story structures (a) in X-direction (20ZX) (b) in Y-direction (20ZY)

حرکت‌های افقی و قائم گره‌های مشترک را به هم مرتبط می‌کند، از طریق المان توسعه‌یافته در این سیستم به مدل اضافه می‌شود. این المان در حقیقت بخش دوم ماتریس سختی کاهش یافته را از یک فایل متنی خوانده و در درجات آزادی مشترک اسمبل می‌کند. تجزیه ماتریس سختی کاهش یافته به دو قسمت و روش اضافه کردن متفاوت هر قسمت به مدل سازه و پی، به این دلیل مورد استفاده قرار گرفته است که، بخش اول ماتریس را می‌توان با المان‌های دقیق‌تر این سیستم که مخصوص خاک توسعه یافته‌اند مدل کرد. طرح شماتیک مدل سیستم خاک و پی در نرم‌افزار این سیستم در شکل (۲) نشان داده شده است.

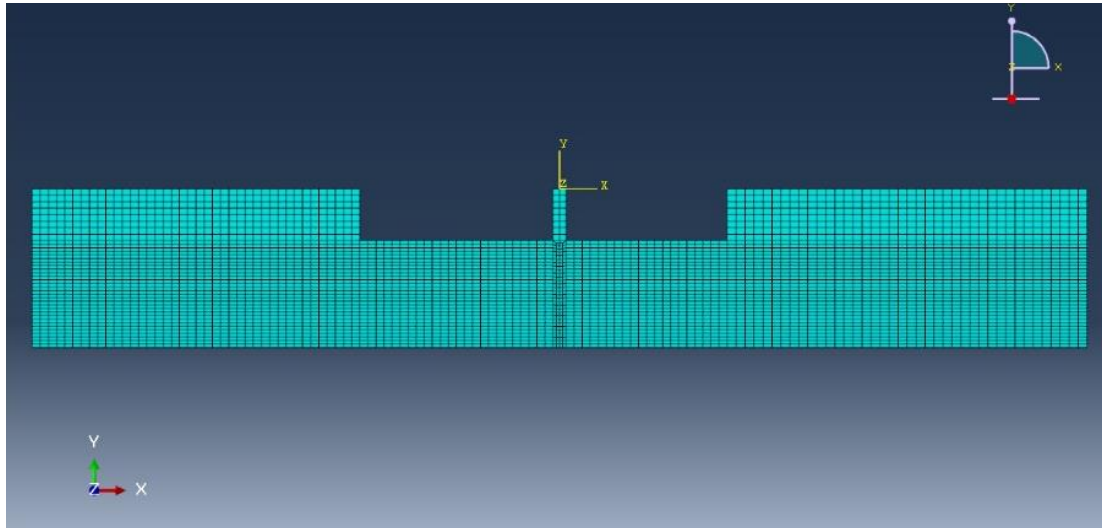
۳-۳- مدل سازی اندرکنش سازه - خاک - سازه

دو قاب انتهایی سازه ۲۰ طبقه به عنوان سازه‌های مجاور با خاک زیر آن‌ها به منظور بررسی اثرات اندرکنش سازه-خاک-سازه مدل شده است. برای افزایش اثرات ناشی از مجاورت دو سازه و نیز مطابقت با شرایط موجود در نواحی متراکم شهری، فاصله‌ی بین سازه‌ها نصف فاصله مینا در نظر گرفته شده است. فاصله مینا (a) به صورت نصف بعد پی مربعی که مساحت آن برابر میانگین مساحت سهم ستون‌های انتهایی از پی در دو سازه مجاور

شکل درجه ۲ با انتگرال کاهش یافته (CPE8R) به منظور مش بندی مدل بهره گرفته شده است. برای ایجاد سازگاری تغییر شکل‌ها، جابجایی‌های افقی و قائم گره‌های غیر مشترک، با معادلات مقیدکننده^۱ خطی به جابجایی دو گره مشترک طرفین وابسته می‌شوند. مقادیر هر سطر یا ستون از ماتریس سختی خاک برابر مقادیر نیروهای عکس‌العمل به دست آمده در گره‌های موردنظر در اثر اعمال تغییرشکل واحد در درجه آزادی مربوط به این سطر یا ستون و مقید نمودن سایر درجات آزادی می‌باشند. لازم به ذکر است که با توجه به فرض مسئله کرنش مسطحه، سختی‌های به دست آمده از آباکوس به منظور محاسبه ماتریس سختی موردنظر باید در مقدار عرض هر پی ضرب گردند. تعداد گره‌های مشترک در محل طبقات زیرزمین و زیر پی در سازه‌ی ۲۰ طبقه در راستای X و Y به ترتیب، ۱۱ و ۱۰ گره می‌باشند.

برای اضافه کردن ماتریس سختی به دست آمده از آباکوس به مدل غیرخطی سازه‌ها در این سیستم، بخش اول ماتریس سختی، به صورت فنرهای انتقالی در راستای افقی و قائم در گره‌های مشترک مدل می‌شوند. بدین منظور، از المان‌های با طول صفر (zeroLength) این سیستم استفاده شده است. بخش دوم ماتریس سختی کاهش یافته که در حقیقت

1 Constraint Equation (CE)



شکل ۳. مدل اجزای محدود خاک برای دو سازه ۲۰ طبقه

Fig.3. Finite element model of soil for two adjacent 20-story structures

درجات آزادی افقی و قائم نقاط تعریف شده در دو پی مجاور است، با استفاده از المان توسعه یافته و در قالب یک فایل متنی شامل این مقادیر سختی اعمال می گردند. در این حالت، بر خلاف روش معمول زیرسازه، ارتباط بین پاسخ های افقی و قائم دو پی مجاور نیز به طور دقیق در نظر گرفته می شود. برای رسیدن به سختی واقعی با توجه به مسئله کرنش مسطحه، مقادیر سختی محاسبه شده باید در عرض واقعی پی هر سازه ضرب شود. بدین منظور، درایه های ماتریس سختی کاهش یافته که درجات آزادی پی یک سازه را به هم مربوط می کنند، به مقدار عرض آن پی ضرب می شوند. در مدل های مربوط به اندرکنش سازه - خاک - سازه در این سیس بخش اول ماتریس سختی به صورت فنرهای انتقالی افقی و قائم، با امکان مدل سازی خصوصیات دقیق تر خاک، در گره های مشترک در مرز خاک، سازه و پی وارد می شوند. بخش دوم ماتریس سختی نیز که مربوط به سختی نسبی بین درجات آزادی مشترک در هر دو پی مجاور است، با استفاده از المان توسعه یافته در این سیس در مطالعه [۲۹] اعمال می گردند.

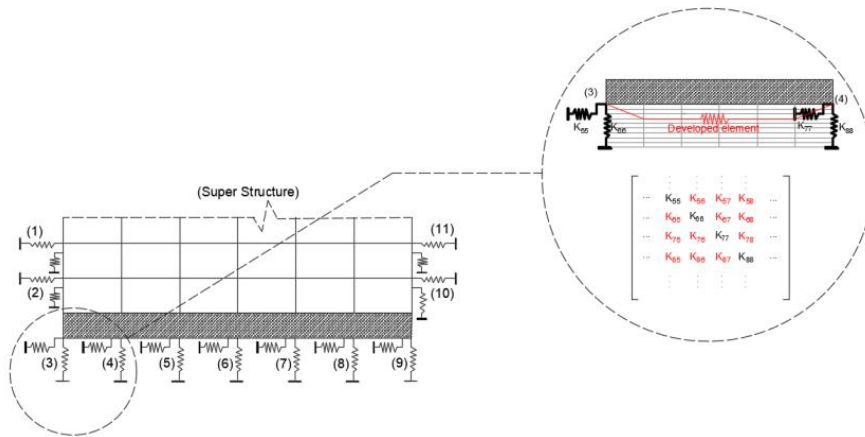
در شکل (۴) طرح شماتیک مربوط به روند مدل سازی اندرکنش نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود قسمت هایی که با رنگ سیاه مشخص شده است، با استفاده از فنرهای افقی و قائم و کاپلینگ بین درجات آزادی گره ها که با رنگ قرمز مشخص شده است، با استفاده از المان توسعه یافته در این سیس اعمال می گردد.

است، تعریف می شود، که از رابطه (۲) به دست می آید [۲۹]:

$$a = \sqrt{\frac{L_1 B_1 + L_2 B_2}{8}} \quad (3)$$

در این رابطه L_1 و L_2 به ترتیب طول سهم ستون انتهایی سازه های اول و دوم از پی این سازه ها و B_1 و B_2 به ترتیب عرض پی های سازه های اول و دوم می باشند. در نهایت، فاصله بین دو سازه مجاور با استفاده از رابطه بالا برابر با ۰/۸۲۵ متر به دست آمده است.

پس از تعیین این فاصله، مطابق با آنچه که در مدل سازی اندرکنش خاک و سازه انجام شد، مدل اجزای محدود خاک با در نظر گرفتن هندسه پی های مجاور هم در نرم افزار آباکوس ساخته می شود. فرضیات و روند مدل سازی همانند موارد مربوط به حالت اندرکنش خاک و سازه می باشند. در شکل (۳)، مدل سازی محیط خاک در حالت همسایگی پی های مربوط به دو سازه مجاور ۲۰ طبقه نشان داده شده است. در مدل مربوط به اندرکنش سازه - خاک - سازه در این سیس نیز مقادیر مربوط به قطر اصلی ماتریس سختی به صورت فنرهای انتقالی افقی و قائم در گره های مورد نظر در مرز خاک، سازه و پی وارد می شوند. سایر مقادیر ماتریس سختی نیز که مربوط به



شکل ۴. طرح شماییک مربوط به روش پیشنهادی در مقاله

Fig. 4. Schematic diagram of proposed modeling method in this article

C ضریب میرایی و V سرعت نسبی دو سر میراگر ویسکوز می‌باشد. همچنین، مقدار α نیز برابر با یک انتخاب شده است. در نرم‌افزار این‌سیس، برای مدل‌سازی میرایی میراگر از مصالح تک‌محوره Viscous و برای مدل‌سازی سختی آن از مصالح تک‌محوره Elastic استفاده شده است. تخصیص میرایی و سختی میراگر جرمی در بام سازه نیز با استفاده از المان با طول صفر صورت می‌گیرد که به صورت موازی، سختی و میرایی میراگر جرمی را بین طبقه موردنظر از سازه و جرم آن متصل کرده است. لازم به ذکر است که مقادیر، سختی، میرایی و جرم میراگر جرمی تنظیم‌شده با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی در حالت پایه ثابت به دست می‌آید.

۳-۵- صحت‌سنجی مدل‌سازی

در این بخش، صحت‌سنجی مدل خطی سازه صورت می‌گیرد. لازم به ذکر است که روند مدل‌سازی اندرکنش خاک و سازه پیش‌تر به طور مبسوط در مطالعه [۲۹] توضیح داده شده است.

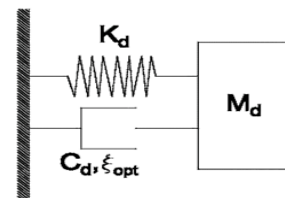
۳-۵-۱- مدل خطی سازه

به منظور صحت‌سنجی مدل‌های سازه‌های ۲۰ طبقه، نتایج مربوط به زمان‌های تناوب سه مود اول این دو سازه در مرجع [۲۷] و نیز مقادیر به دست آمده از تحلیل مودال در نرم‌افزار این‌سیس بدون در نظر گرفتن اندرکنش، یعنی حالت پایه ثابت، با یکدیگر مقایسه می‌شوند. نتایج مربوط به این مقایسه در جدول (۲) ذکر شده است. همانطور که مشاهده می‌شود،

۳-۴- مدل‌سازی میراگر جرمی تنظیم‌شده

به منظور مدل‌سازی میراگر جرمی تنظیم‌شده در نرم‌افزار این‌سیس از یک جرم متمرکز که در بام سازه ۲۰ طبقه قرار دارد، استفاده شده است. میراگر جرمی به وسیله‌ی فنر از یک طرف به سازه و از طرف دیگر به جرم متمرکز متصل می‌گردد. به منظور مدل‌سازی میرایی میراگر جرمی تنظیم‌شده در نرم‌افزار این‌سیس، از المان میرایی ویسکوز و برای مدل‌سازی سختی آن از یک المان با سختی الاستیک استفاده شده است، که مقادیر آن طی فرآیند تحلیل ثابت می‌باشند. در شکل (۵) شمایی از یک میراگر جرمی نشان داده شده است. در مدل‌سازی نیروی میرایی ویسکوز از رابطه (۵) بهره گرفته می‌شود.

$$F = CV^\alpha \quad (4)$$



شکل ۵. شماییک مدل میراگر جرمی

Fig. 5. Schematic model of TMD

جدول ۲. مقایسه نتایج مربوط به زمان‌های تناوب سه مود اول سازه‌ها

Table 2. Comparison of three first modal periods of structures

مدل	زمان تناوب مود اول (sec)		زمان تناوب مود دوم (sec)		زمان تناوب مود سوم (sec)	
	مدل این‌سیس	مطالعه [۲۷]	مدل این‌سیس	مطالعه [۲۷]	مدل این‌سیس	مطالعه [۲۷]
20ZX	۳/۲۹	۳/۲۹	۱/۱۲	۱/۱۴	۰/۶۳	۰/۶۶
20ZY	۳/۶۵	۳/۶۵	۱/۲۲	۱/۲۶	۰/۶۹	۰/۷۲

ضریب W ، ضریب اینرسی است و معمولاً بین $0/4$ تا $0/9$ متغیر است. هر چه مقدار W بیش‌تر باشد، توانایی الگوریتم در ایجاد پاسخ‌های جدید^۱ افزایش می‌یابد و هر چه مقدار آن کم‌تر شود، توانایی پروراندن پاسخ‌های موجود^۲ افزایش می‌یابد. در مسئله‌ی بهینه‌سازی، بهتر است در تکرارهای اول، پاسخ‌های متنوعی ایجاد (W بزرگ‌تر) و با گذشت زمان، پاسخ‌های موجود پرورانده شوند (W کم‌تر). از این رو، مقدار W در تکرارهای اول، $0/9$ در نظر گرفته شده و برای تکرارهای بعدی یک ضریب کاهنده در آن ضرب می‌شود. ضرایب r_1 و r_2 اعداد تصادفی با توزیع یکنواخت بین 0 و 1 می‌باشند. ضریب c_1 ، ضریب یادگیری شخصی و ضریب c_2 ، ضریب یادگیری جمعی هستند که عددی بین 0 و 2 را شامل می‌شوند و مقدار آن‌ها معمولاً برابر با 2 در نظر گرفته می‌شود. مراحل کلی الگوریتم PSO در تمام مسائل مطابق با گام‌های زیر می‌باشد:

گام اول: ایجاد جمعیت اولیه (ذرات) و ارزیابی آن‌ها

گام دوم: تعیین بهترین خاطره شخصی^۳ و بهترین خاطره جمعی^۴.

گام سوم: به‌روزرسانی سرعت و موقعیت ذرات با استفاده از روابط بالا و ارزیابی پاسخ‌های جدید

گام چهارم: بررسی شرایط توقف (در صورت برآورده شدن، پایان و در غیر این صورت مراحل از گام دوم تکرار می‌شوند).

به‌منظور به‌کارگیری این الگوریتم، کد مربوط به آن با استفاده از زبان برنامه‌نویسی متلب^۵ [۳۶] نوشته شده است. هدف از بهینه‌سازی، کاهش میانگین بیشینه دریفت سازه‌ها تحت اثر ده رکورد زلزله حوزه دور می‌باشد. بدین منظور، هر مرحله از تحلیل سازه با لینک کردن بین متلب و این‌سیس صورت می‌گیرد. در الگوریتم بهینه‌سازی، 300 ذره و برای هر ذره، 10 بار

اختلاف بین دو حالت در نظر گرفته شده بسیار ناچیز است و لذا می‌توان از مدل‌های ساخته شده در ادامه روند کار استفاده نمود.

۴- روند بهینه‌سازی

در این مطالعه، از الگوریتم ازدحام ذرات (PSO) برای بهینه‌سازی پارامترهای طراحی مربوط به میراگر جرمی یعنی سرعت زاویه‌ای (یا فرکانس)، نسبت میرایی و جرم استفاده شده است. این الگوریتم، یک الگوریتم مبتنی بر هوش ازدحامی است که با الگو قرار دادن رفتار جمعی پرندگان و ماهی‌ها به وجود آمده است. اصل PSO بر اشتراک گذاشتن اطلاعات و خاطره‌های هر ذره و درنهایت یافتن بهترین خاطره‌ی جمعی می‌باشد. در این الگوریتم، هر ذره در فضای جستجو از یک قانون حرکتی یکسان پیروی می‌نماید که این قانون، استفاده از تجارب (خاطره‌های) شخصی و نیز تجارب (خاطره‌های) جمعی به‌منظور رسیدن به جواب بهینه با توجه به تابع هدف دلخواه است. هر ذره دارای سه ویژگی است: ۱- موقعیت هر ذره (x^i) و مقدار تابع هدف در این موقعیت، ۲- سرعت (v^i) که بیانگر راستای حرکت ذره می‌باشد، ۳- بهترین موقعیت تجربه‌شده توسط ذره ($x^{i,best}$) و مقدار تابع هدف مربوط به آن. سرعت و موقعیت هر ذره به ترتیب با استفاده از روابط (۵) و (۶) به‌روزرسانی می‌گردد:

$$v^i[t+1] = wv^i[t] + c_1r_1(x^{i,best}[t] - x^i[t]) + c_2r_2(x^{gbest}[t] - x^i[t]) \quad (5)$$

$$x^i[t+1] = x^i[t] + v^i[t+1] \quad (6)$$

- 1 Exploration
- 2 Exploitation
- 3 Personal best
- 4 Global best
- 5 Matlab

جدول ۳. پارامترهای طراحی بهینه بر اساس روابط تجربی دن هارتوگ

Table 3. Optimized design parameters of TMD based on Den Hartog's empirical relations

مدل	ω (rad / sec)	ξ	m (kg)
20ZX	۱/۸۱	۰/۱۰۳	۷۴۰۰۰
20ZY	۱/۶۳	۰/۱۱۸	۷۱۷۰۰

جدول ۴. پارامترهای طراحی بهینه میراگر جرمی با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی

Table 4. Optimized design parameters of TMD using optimization algorithm

مدل	ω (rad / sec)	ξ	m (kg)
20ZX	۱/۶۴۹	۰/۰۶۱۸	۱۰۳۵۹۹/۴۷
20ZY	۱/۲۹	۰/۰۷۰۸	۱۰۰۳۸۰

در این رابطه، اندیس j بیانگر شماره مود موردنظر و بردار بردار مودال هستند. m_j و M نیز به ترتیب جرم مؤثر مودی مربوط به مود j ام و ماتریس جرم کل سازه می‌باشند. مقادیر مربوط به پارامترهای طراحی بهینه بر اساس روابط تجربی در جدول (۳) ارائه شده است. در نهایت، پس از اتمام فرآیند بهینه‌سازی برای سازه‌های ۲۰ طبقه، پارامترهای طراحی بهینه میراگر جرمی برای این دو سازه مطابق با مقادیر ارائه شده در جدول (۴) به دست می‌آیند.

۵- فرآیند تحلیل تاریخچه زمانی

پس از تعریف تمام مدل‌های مربوط به سازه‌های ۲۰ طبقه در حالت پایه ثابت و نیز مدل مربوط به حالت همسایگی این سازه‌ها در نرم‌افزار این سیس، این مدل‌ها تحت اثر شتاب‌نگاشت‌های مربوط به ده زلزله حوزه دور مختلف قرار گرفت. در نظر گرفتن زلزله‌های متعدد به دلیل عدم قطعیت‌های موجود و انجام تحلیل دینامیکی مناسب مطابق با منابعی چون [۳۷ و ۳۸] است. به‌منظور ارائه و بحث بر روی نتایج بررسی صورت گرفته در این مطالعه، بیشینه‌ی میانگین نسبت‌های دررفت طبقات و میانگین بیشینه جابجایی طبقات حاصل از تحلیل تاریخچه زمانی تحت این زلزله‌ها در حالت‌های مختلف با هم مقایسه می‌شوند. بدین منظور، زلزله‌های مورد استفاده در این کار تحقیقاتی، بر اساس نوع خاک، بزرگای زلزله و فاصله از گسل از بانک اطلاعاتی زمین‌لرزه (PEER) انتخاب می‌گردند. معیار انتخاب این زلزله‌ها، در نظر گرفتن سرعت موج برشی ۲۰۰ تا ۳۷۵ متر بر ثانیه در عمق ۳۰ متری

تکرار در نظر گرفته شده است. به عبارت دیگر، در طول روند بهینه‌سازی ۳۰۰۰۰ تحلیل تاریخچه زمانی تحت اثر زلزله‌های مذکور صورت می‌گیرد. مقادیر اولیه برای پارامترهای میراگر جرمی نیز با استفاده از روابط تجربی ارائه شده توسط دن هارتوگ [۲] به‌دست آمده است. مطابق با این مرجع، فرکانس و نسبت میرایی بهینه به ترتیب با استفاده از روابط (۷) و (۸) محاسبه می‌گردند.

$$f_{opt} = \frac{\sqrt{1-0.5\mu}}{1+\mu} f_1 \quad (7)$$

$$\xi_{d,opt} = \sqrt{\frac{\mu(3-\sqrt{0.5\mu})}{8(1+\mu)(1-0.5\mu)}} \quad (8)$$

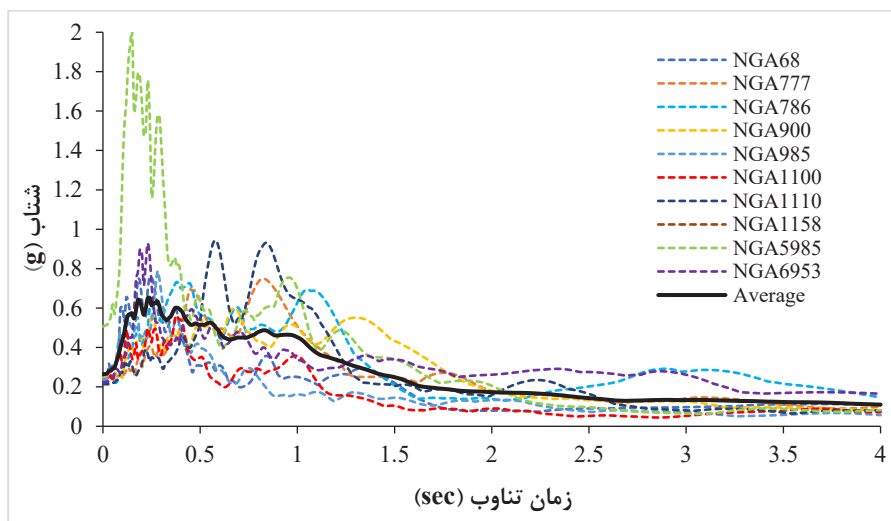
در این روابط، μ نسبت جرمی میراگر و f_1 فرکانس مود اول سازه (مود غالب) می‌باشند. نسبت جرمی برابر با نسبت جرم میراگر به جرم سازه است و معمولاً بین ۱ تا ۵ درصد در نظر گرفته می‌شود. در این مطالعه، جرم میراگر جرم تنظیم‌شده برابر با ۳ درصد جرم مود اول سازه‌های ۲۰ طبقه در نظر گرفته شده است که مقدار جرم مودی از رابطه‌ی (۹) محاسبه می‌شود.

$$m_j = \phi_j^T M \phi_j \quad (9)$$

جدول ۱. مشخصات زلزله‌های مورد استفاده در این مطالعه [۲۹]

Table 5. Characteristics of earthquakes used in this study [29]

نام رویداد زلزله	شماره رکورد در PEER	نام ایستگاه	بیشینه شتاب زمین (PGA) (g)	زمان تناوب غالب (sec)
سن فرناندو - آمریکا	NGA68	L.A. - Hollywood Stor FF	۰/۲۲۵	۰/۲۴
لما پریتا - آمریکا	NGA777	Hollister City Hall	۰/۲۴۶	۰/۸۲
لما پریتا - آمریکا	NGA786	Palo Alto - 1900 Embarc.	۰/۲۱۵	۰/۳۸
لاندرز - آمریکا	NGA900	Yermo Fire Station	۰/۲۴۵	۰/۶۸
نرثریج - آمریکا	NGA985	L.A. - Baldwin Hills	۰/۲۳۹	۰/۲۸
کوبه - ژاپن	NGA1100	Abeno	۰/۲۲۱	۰/۳۸
کوبه - ژاپن	NGA1110	Morigawachi	۰/۲۱۴	۰/۵۸
کوچالی - ترکیه	NGA1158	"Duzce"	۰/۳۱۲	۰/۳۸
ال مایور - کواکاپا - مکزیک	NGA5985	El Centro Differential Array	۰/۵۰۷	۰/۱۴
دارفیلد - نیوزلند	NGA6953	Pages Road Pumping Station	۰/۲۲۳	۰/۲



شکل ۶. طیف‌های شتاب زلزله‌ها و طیف میانگین آن‌ها [۲۹]

Fig. 6. Acceleration spectrum of earthquakes and their average spectra

میانگین حاصل از آن‌ها در شکل (۶) نشان داده می‌شوند. رکوردهای زلزله انتخاب شده بر اساس طیف ۷-ASCE [۳۹] برای خاک نوع D در منطقه‌ی لس‌آنجلس هم‌پایه شدند. ضرایب هم‌پایه‌سازی رکوردها برای هر مدل در جدول (۶) ارائه شده است [۲۹].

خاک، بزرگای بین ۶/۵ تا ۷/۵ ریشتر و فاصله از گسل ۲۰ تا ۵۰ کیلومتر (حوزه دور) می‌باشد. نام و مشخصات این زلزله‌ها در جدول (۵) گردآوری شده است.

به‌علاوه، منحنی‌های مربوط به طیف شتاب این زلزله‌ها و نیز طیف

جدول ۶. ضرایب هم‌پایه‌سازی زلزله‌ها

Table 6. Scaling factors of earthquakes

مقدار ضریب	رکورد
۲/۸۹	NGA68
۱/۲۳۳۳	NGA777
۱/۴۵۶۹	NGA786
۱/۷۲۹۵	NGA900
۳/۱۹۳۳	NGA985
۲/۸۷۱	NGA1100
۱/۸۷۳	NGA1110
۱/۱۲۸۷	NGA1158
۰/۷۴۱۳	NGA5985
۱/۸۴۵	NGA6953

جدول ۷. بیشینه دریفت سازه ۲۰ZX تحت اثر ۱۰ شتاب‌نگاشت در حالت‌های مختلف

Table 7. Maximum drift of 20ZX structure under ten seismic records in different cases

بیشینه دریفت سازه با SSSI		بیشینه دریفت سازه با پایه ثابت		شناسه زلزله
با میراگر	بدون میراگر	با میراگر	بدون میراگر	
۰/۰۲۹۶	۰/۰۴۲	۰/۰۳۴	۰/۰۴۳	EQ1
۰/۰۲	۰/۰۱۶۵	۰/۰۱۹	۰/۰۲۶	EQ2
۰/۰۳۲	۰/۰۳۹۵	۰/۰۱۷۳	۰/۰۲	EQ3
۰/۰۱۹۴	۰/۰۱۹۵	۰/۰۲۷۶	۰/۰۳۲	EQ4
۰/۰۱۷۵	۰/۰۲۴	۰/۰۱۸۳	۰/۰۱۹	EQ5
۰/۰۱۴۴	۰/۰۲۳	۰/۰۱۵۹	۰/۰۱۸	EQ6
۰/۰۱۳۹	۰/۰۱۹۹	۰/۰۱۹	۰/۰۲	EQ7
۰/۰۱۹۶	۰/۰۳۵	۰/۰۲۱	۰/۰۲۵	EQ8
۰/۰۰۸۷	۰/۰۰۸۹	۰/۰۰۶۹	۰/۰۰۸	EQ9
۰/۰۲۳۳	۰/۰۲۸۸	۰/۰۳۳	۰/۰۴۱	EQ10

۶- نتایج و بحث

۶-۱- بیشینه دریفت سازه

نسبت دریفت سازه در حقیقت بیانگر متوسط دورانی است که تیر و ستون در یک طبقه متحمل می‌گردند. از طرفی دیگر، با افزایش نسبت دریفت اجزای غیرسازه‌ای در یک طبقه از سازه دچار خرابی می‌شوند. در این مطالعه، بیشینه دریفت سازه 20ZY و 20ZX تحت زلزله‌های حوزه دور ارائه شده در جدول (۵) در چهار حالت مختلف شامل سازه بر پایه ثابت با و بدون میراگر جرمی و نیز سازه با در نظر گرفتن اندرکنش سازه- خاک- سازه (SSSI) با و بدون میراگر جرمی محاسبه شده است. در نهایت، از نتایج به دست آمده،

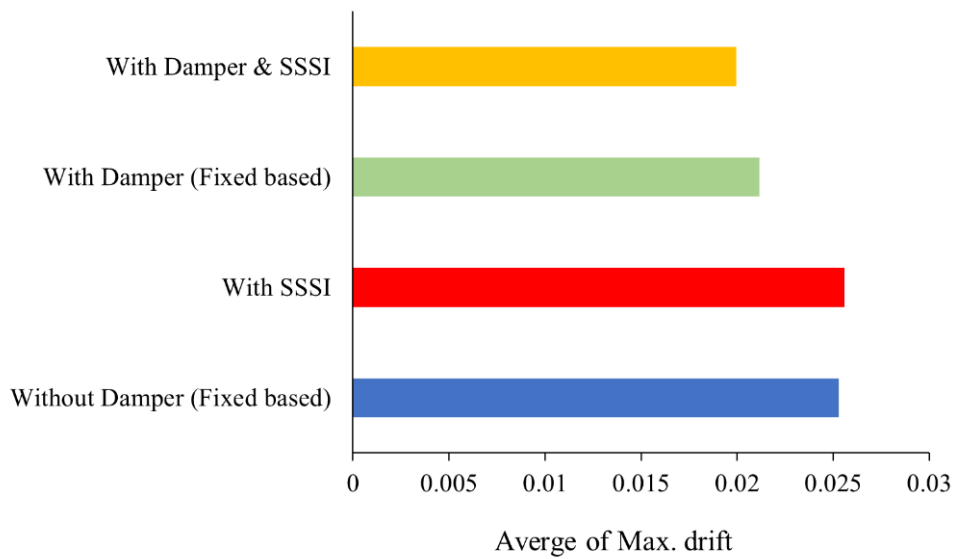
اولاً برای تعیین اثرات میراگر جرمی تنظیم‌شده در کاهش پاسخ لرزه‌ای سازه و ثانیاً برای تفسیر اثرات اندرکنش سازه- خاک- سازه بر روی عملکرد این نوع از میراگر استفاده شده است.

نتایج مربوط به بیشینه دریفت سازه‌های 20ZY و 20ZX تحت اثر ده شتاب‌نگاشت مختلف EQ1 تا EQ10 در حالت‌های مختلف به ترتیب در جدول (۷) و (۸) ارائه شده است. به علاوه، نمودارهای میله‌ای مربوط به میانگین این پاسخ‌ها برای این دو سازه نیز به ترتیب در شکل‌های (۷) و (۸) نشان داده می‌شود. همچنین، بیشینه دریفت طبقات سازه‌های 20ZX و 20ZY به ترتیب در شکل‌های (۹) و (۱۰) نشان داده شده است.

جدول ۸. بیشینه دریفت سازه ۲۰ZY تحت اثر ۱۰ شتابنگاشت در حالت‌های مختلف

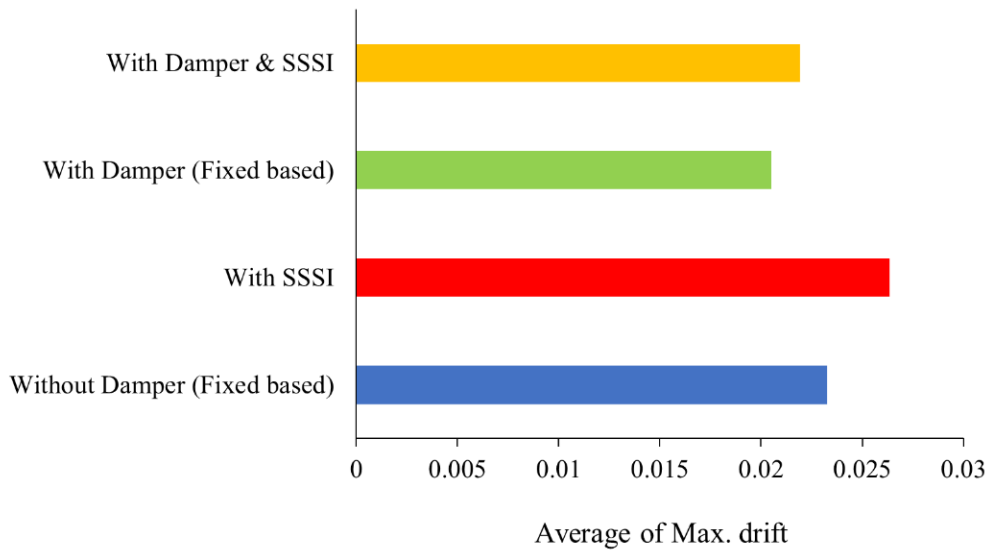
Table 8. Maximum drift of 20ZY structure under ten seismic records in different cases

بیشینه دریفت سازه با SSSI		بیشینه دریفت سازه با پایه ثابت		شناسه زلزله
با میراگر	بدون میراگر	با میراگر	بدون میراگر	
۰/۰۳۵۸	۰/۰۴۷۵	۰/۰۲۹۱	۰/۰۳۴	EQ1
۰/۰۱۳	۰/۰۱۷	۰/۰۲۲۴	۰/۰۲۵۶	EQ2
۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۱۴۶	۰/۰۱۶۵	EQ3
۰/۰۳۱۱	۰/۰۳۸۹	۰/۰۳۱۱	۰/۰۳۵۱	EQ4
۰/۰۲۷۱	۰/۰۲۸۱	۰/۰۱۲۶	۰/۰۱۴۴	EQ5
۰/۰۱۸۷	۰/۰۲۸	۰/۰۱۵۶	۰/۰۱۶۹	EQ6
۰/۰۱۴۱	۰/۰۱۴۸	۰/۰۲	۰/۰۳۱۷	EQ7
۰/۰۲۱۶	۰/۰۲۲۹	۰/۰۲	۰/۰۱۸۶	EQ8
۰/۰۰۸۳	۰/۰۰۹۴	۰/۰۰۵۷	۰/۰۰۵۷	EQ9
۰/۰۲۹۴	۰/۰۳۵۵	۰/۰۳۳	۰/۰۳۴۱	EQ10



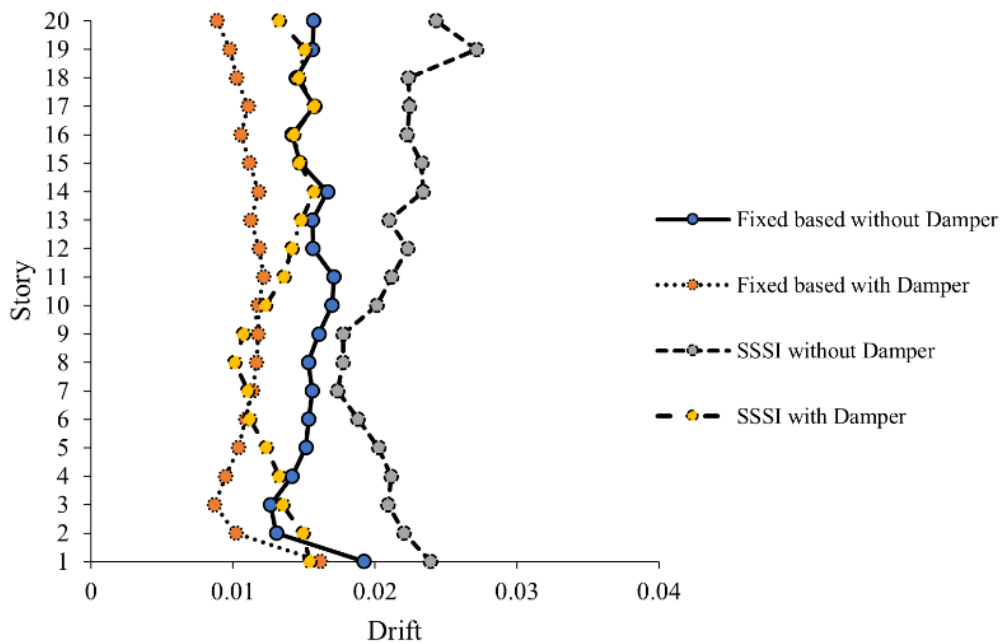
شکل ۸. میانگین بیشینه دریفت سازه ۲۰ZY در حالت‌های مختلف

Fig. 8. Average of maximum drift of 20ZY structure in different cases



شکل ۸. میانگین بیشینه دررفت سازه ۲۰ZY در حالت‌های مختلف

Fig. 8. Average of maximum drift of 20ZY structure in different cases



شکل ۹. بیشینه دررفت سازه ۲۰ZX تحت اثر زلزله EQ6

Fig. 9. Maximum drift of 20ZX structure under EQ6 earthquake

کاهش در زلزله EQ7 و برابر با ۳۶/۷۱ درصد و مقدار افزایش در زلزله EQ8 نیز ۹/۶ درصد می‌باشد. این میراگر با در نظر گرفتن اندرکنش سازه-خاک- سازه نیز در تمام زلزله‌ها منجر به کاهش پاسخ لرزه‌ای مربوط به بیشینه دریافت شده است. بیش‌ترین اثر کاهشی برابر با ۳۳/۲۳ درصد در زلزله EQ6 است. با بررسی نتایج مربوط جدول (۷) می‌توان بیان کرد که در اغلب موارد، در نظر گرفتن اندرکنش سازه-خاک- سازه در سازه 20ZY منجر به کاهش عملکرد میراگر جرمی شده است. این موضوع در شکل (۸) و در قالب میانگین بیشینه دریافت این سازه نیز قابل مشاهده است. به‌طوری‌که استفاده از میراگر جرمی تنظیم‌شده در حالت صلب و با در نظر گرفتن اثرات هم‌زمان خاک زیر سازه و سازه مجاور به ترتیب منجر به کاهش ۱۱/۸۳ و ۵/۸ درصدی میانگین بیشینه دریافت سازه نسبت به حالت پایه ثابت و بدون میراگر شده است. همچنین، در نظر گرفتن اندرکنش سازه-خاک- سازه میانگین بیشینه دریافت سازه 20ZX را در ۱۳/۲۵ درصد افزایش داده است. لذا می‌توان گفت که وجود سازه مجاور 20ZX با نسبت ابعادی کم‌تر می‌تواند منجر به کاهش عملکرد میراگر جرمی در سازه 20ZY با نسبت ابعادی بیش‌تر گردد. به‌علاوه، در نظر گرفتن اثرات اندرکنش سازه-خاک- سازه منجر به افزایش قابل‌توجه میانگین بیشینه دریافت در این سازه شده است. شکل‌های (۹) و (۱۰) نیز روند تغییرات دریافت سازه‌ها در حالت‌های مختلف تحت اثر زلزله EQ6 را نشان می‌دهند.

۶-۲- بیشینه جابجایی سازه

در این قسمت، بیشینه جابجایی سازه (جابجایی بام) به عنوان یکی از دیگر از پاسخ‌های لرزه‌ای مهم و تأثیرگذار در سازه مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور، بیشینه جابجایی دو سازه 20ZX و 20ZY تحت اثر زلزله‌های حوزه دور ارائه شده در جدول (۵) در چهار حالت مختلف شامل سازه با پایه ثابت با و بدون میراگر جرمی و نیز سازه با در نظر گرفتن اندرکنش سازه-خاک- سازه (SSSI) با و بدون میراگر جرمی محاسبه شده است.

نتایج مربوط به بیشینه جابجایی سازه‌های 20ZX و 20ZY تحت اثر ده شتاب‌نگاشت مختلف EQ1 تا EQ10 در حالت‌های مختلف به ترتیب در جدول (۹) و (۱۰) ارائه شده است. به‌علاوه، نمودارهای میله‌ای مربوط به میانگین این پاسخ‌ها برای این دو سازه نیز به ترتیب در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) نشان داده می‌شود.

با توجه به مقادیر بیشینه دریافت ارائه شده در جدول (۷)، در نظر گرفتن اندرکنش سازه-خاک- سازه در سازه 20ZX در بدترین حالت تحت اثر زلزله EQ3 منجر به افزایش ۹۵/۷ درصدی بیشینه دریافت نسبت به حالت پایه ثابت و در بهترین حالت تحت شتاب ورودی مربوط به زلزله EQ4 منجر به کاهش ۳۸/۳۸ درصدی این مقدار شده است. به‌علاوه، استفاده از میراگر جرمی تنظیم‌شده با پارامترهای بهینه در حالت پایه ثابت در تمام زلزله‌ها منجر به کاهش بیشینه دریافت سازه شده است؛ به طوری که، بیش‌ترین کاهش تحت اثر زلزله EQ2 و برابر با ۲۵/۳۳ درصد می‌باشد. این میراگر با در نظر گرفتن اندرکنش سازه-خاک- سازه نیز تحت اثر تمام زلزله‌ها به غیر از زلزله EQ2 منجر به کاهش پاسخ لرزه‌ای مربوط به بیشینه دریافت شده است. بیش‌ترین اثر کاهشی برابر با ۴۳/۱ درصد تحت اثر زلزله EQ8 و تنها اثر افزایشی تحت اثر زلزله EQ2 و برابر با ۲۶/۲۹ درصد است. با بررسی نتایج مربوط جدول (۷) می‌توان بیان کرد که در اغلب موارد، در نظر گرفتن اندرکنش سازه-خاک- سازه در سازه 20ZX منجر به بهبود عملکرد میراگر جرمی شده است. این موضوع در شکل (۷) و در قالب میانگین بیشینه دریافت این سازه نیز قابل مشاهده است. به طوری که استفاده از میراگر جرمی تنظیم‌شده در حالت صلب و با در نظر گرفتن اثرات هم‌زمان خاک زیر سازه و سازه مجاور به ترتیب منجر به کاهش ۱۶/۳۶ و ۲۱/۱۵ درصدی میانگین بیشینه دریافت سازه نسبت به حالت پایه ثابت و بدون میراگر شده است. همچنین، در نظر گرفتن اندرکنش سازه-خاک- سازه میانگین بیشینه دریافت سازه 20ZX را در حدود ۱/۱ درصد افزایش داده است که مقدار قابل‌توجهی نیست. لذا می‌توان گفت که وجود سازه مجاور 20ZY با نسبت ابعادی^۱ (نسبت ارتفاع به عرض سازه) بیش‌تر می‌تواند منجر به بهبود عملکرد میراگر جرمی در سازه 20ZX با نسبت ابعادی گردد. مطابق با جدول (۸)، در نظر گرفتن اندرکنش سازه-خاک- سازه در سازه 20ZY در بدترین حالت و در زلزله EQ5 منجر به افزایش ۹۴/۵۶ درصدی بیشینه دریافت نسبت به حالت پایه ثابت و در بهترین حالت و در زلزله EQ7 منجر به کاهش ۵۳/۳ درصدی این مقدار شده است. در این سازه، بر خلاف سازه 20ZX، در نظر گرفتن این اندرکنش تأثیر افزایشی قابل‌توجه‌تری داشته است. به‌علاوه، استفاده از میراگر جرمی تنظیم‌شده با پارامترهای بهینه در حالت پایه ثابت در تمام زلزله‌ها به غیر از زلزله EQ8 منجر به کاهش بیشینه دریافت سازه شده است؛ به طوری که، بیش‌ترین

جدول ۹. بیشینه جابجایی سازه ۲۰ZX تحت اثر ۱۰ شتاب‌نگاشت در حالت‌های مختلف

Table 9. Maximum displacement of 20ZX structure under ten seismic records in different cases

بیشینه جابجایی سازه با SSSI (m)		بیشینه جابجایی سازه با پایه ثابت (m)		شناسه زلزله
با میراگر	بدون میراگر	با میراگر	بدون میراگر	
۱/۴۷۸	۲/۲۸۶	۱/۸۲۲	۲/۲۳	EQ1
۰/۷۲۲	۰/۷۶۶	۱/۱۴۶	۱/۳۹	EQ2
۱/۲۵۹	۱/۷۴۸	۰/۹۹۹	۱/۱۳	EQ3
۰/۹۷۶	۱/۰۴۶	۱/۶۶۹	۱/۶۳۴	EQ4
۰/۶۵۵	۱/۱۷۵	۱/۰۵۶	۱/۲۷۳	EQ5
۰/۶۷۹	۱/۲۵	۰/۸۵۸	۰/۹۸۳	EQ6
۰/۵۸۸	۱/۰۸	۱/۰۱۶	۰/۸۰۹	EQ7
۱/۲۶۵	۲/۳۱۵	۱/۰۲	۱/۱۹۹	EQ8
۰/۳۱۶	۰/۳۱۲	۰/۲۸۲	۰/۳۲۴	EQ9
۱/۵۵۴	۱/۸۳	۱/۸۵	۲/۱۷۳	EQ10

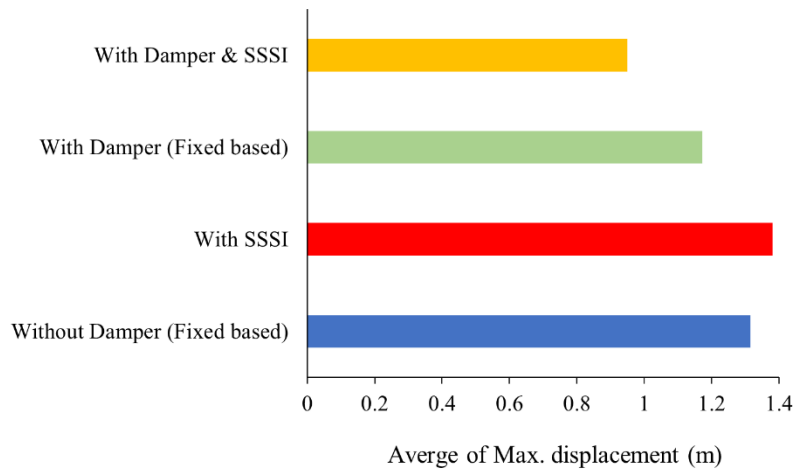
جدول ۱۰. بیشینه جابجایی سازه ۲۰ZY تحت اثر ۱۰ شتاب‌نگاشت در حالت‌های مختلف

Table 10. Maximum displacement of 20ZY structure under ten seismic records in different cases

بیشینه جابجایی سازه با SSSI (m)		بیشینه جابجایی سازه با پایه ثابت (m)		شناسه زلزله
با میراگر	بدون میراگر	با میراگر	بدون میراگر	
۲/۳۹۲	۲/۸۶۸	۱/۶۳۷	۱/۹	EQ1
۰/۷۵۴	۱/۱۰۹	۰/۹۲۹	۱/۱۳۳	EQ2
۱/۲۹۳	۱/۴۲۷	۰/۸۳	۰/۹۴۶	EQ3
۱/۲۸۷	۱/۴۸۸	۱/۴۵۱	۱/۸۹۳	EQ4
۱/۲۸۵	۱/۲۵۳	۰/۶۶۳	۰/۸۸۹	EQ5
۱/۲۹۶	۱/۹۶۲	۰/۸۰۸	۰/۹۲۱	EQ6
۰/۶۲۳	۰/۶۳۸	۰/۹۳۷	۱/۵۶	EQ7
۱/۵۳۹	۱/۷	۱/۲	۱/۰۸۲	EQ8
۰/۲۶۲	۰/۳۱۹	۰/۳۳۶	۰/۳۱۷	EQ9
۱/۸	۲/۰۵	۱/۹۳۹	۰/۹۷۹	EQ10

کاهش با شتاب پایه‌ی ورودی مربوط به زلزله EQ1 و برابر با ۱۸/۳۶ درصد و بیش‌ترین مقدار افزایش تحت اثر زلزله EQ7 و برابر با ۲۵/۶۲ درصد می‌باشد. این میراگر با در نظر گرفتن اندرکنش سازه- خاک- سازه نیز تحت اثر تمام زلزله‌ها به غیر از زلزله EQ9 منجر به کاهش پاسخ لرزه‌ای مربوط به بیشینه جابجایی شده است. بیش‌ترین اثر کاهش برابر با ۴۵/۷۳ درصد مربوط به زلزله EQ6 و تنها اثر افزایشی تحت اثر زلزله EQ9 و برابر با ۱/۳۶ درصد است. مطابق روند مشاهده شده در بیشینه دریافت سازه،

مطابق با جدول (۹)، در نظر گرفتن اندرکنش سازه- خاک- سازه در سازه 20ZX در بدترین حالت و تحت اثر زلزله EQ8 منجر به افزایش ۹۳/۰۶ درصدی بیشینه جابجایی نسبت به حالت پایه ثابت و در بهترین حالت و تحت اثر زلزله EQ2 منجر به کاهش ۴۵ درصدی این مقدار شده است. به‌علاوه، استفاده از میراگر جرمی تنظیم‌شده با پارامترهای بهینه در حالت پایه ثابت تحت اثر تمام زلزله‌ها به غیر از زلزله‌های EQ4 و EQ7 منجر به کاهش بیشینه جابجایی سازه شده است؛ به‌طوری‌که، بیش‌ترین



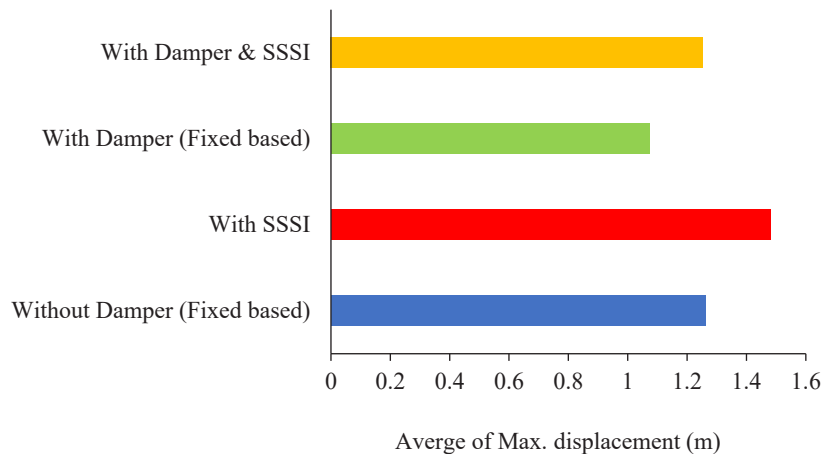
شکل ۱۱. میانگین بیشینه جابجایی سازه ۲۰ZX در حالت‌های مختلف

Fig 11. Average of maximum displacement of 20ZX structure in different cases

منجر به کاهش بیشینه جابجایی سازه شده است؛ به طوری که، بیش‌ترین کاهش مربوط به شتاب ورودی ناشی از زلزله EQ7 و برابر با ۳۹/۹۶ درصد و بیش‌ترین مقدار افزایش تحت اثر زلزله EQ8 نیز ۱۰/۸۸ درصد می‌باشد. این میراگر با در نظر گرفتن اندرکنش سازه- خاک- سازه نیز تحت اثر تمام زلزله‌ها به غیر از زلزله EQ5 منجر به کاهش پاسخ لرزه‌ای مربوط به بیشینه دریفت شده است. بیش‌ترین اثر کاهشی برابر با ۳۳/۹۵ درصد تحت اثر زلزله EQ6 و مقدار افزایش در زلزله EQ5 برابر با ۲/۵۵ درصد است. با بررسی نتایج مربوط جدول (۱۰) می‌توان بیان کرد که در اغلب موارد، در نظر گرفتن اندرکنش سازه- خاک- سازه در سازه 20ZY منجر به کاهش عملکرد میراگر جرمی شده است. این موضوع در شکل (۱۲) و در قالب میانگین بیشینه دریفت این سازه نیز قابل مشاهده است؛ به طوری که، استفاده از میراگر جرمی تنظیم‌شده در حالت صلب و با در نظر گرفتن اثرات هم‌زمان خاک زیر سازه و سازه مجاور به ترتیب منجر به کاهش ۱۵ و ۰/۷۱ درصدی میانگین بیشینه جابجایی سازه نسبت به حالت پایه ثابت و بدون میراگر شده است. همچنین، در نظر گرفتن اندرکنش سازه- خاک- سازه میانگین بیشینه دریفت سازه 20ZX را در ۱۷/۴۱ درصد افزایش داده است که نسبت به سازه 20ZX عدد قابل توجه‌تری است. لذا، روند مشاهده شده در این حالت نیز دقیقاً مشابه با روند مربوط به بیشینه دریفت سازه می‌باشد.

با بررسی نتایج مربوط جدول (۹) می‌توان بیان کرد که در اغلب موارد، در نظر گرفتن اندرکنش سازه- خاک- سازه در سازه 20ZX منجر به بهبود عملکرد میراگر جرمی شده است. این موضوع در شکل (۱۱) و در قالب میانگین بیشینه جابجایی این سازه نیز قابل مشاهده است؛ به طوری که، استفاده از میراگر جرمی تنظیم‌شده در حالت صلب و با در نظر گرفتن اثرات هم‌زمان خاک زیر سازه و سازه مجاور به ترتیب منجر به کاهش ۱۰/۸۹ و ۲۷/۸۴ درصدی میانگین بیشینه جابجایی سازه نسبت به حالت پایه ثابت و بدون میراگر شده است. همچنین، در نظر گرفتن اندرکنش سازه- خاک- سازه میانگین بیشینه دریفت سازه 20ZX را در ۴/۹۸۵ درصد افزایش داده است. لذا می‌توان گفت که در مورد بیشینه جابجایی سازه نیز، وجود سازه مجاور 20ZY با نسبت ابعادی بیش‌تر می‌تواند منجر به بهبود عملکرد میراگر جرمی در سازه 20ZX با نسبت ابعادی کم‌تر گردد.

مطابق با جدول (۱۰)، در نظر گرفتن اندرکنش سازه- خاک- سازه در سازه 20ZY در بدترین حالت و تحت اثر زلزله EQ6 منجر به افزایش ۱۱۳ درصدی بیشینه جابجایی نسبت به حالت پایه ثابت و در بهترین حالت و تحت اثر زلزله EQ7 منجر به کاهش ۵۹/۱۳ درصدی این مقدار شده است. به علاوه، استفاده از میراگر جرمی تنظیم‌شده با پارامترهای بهینه در حالت پایه ثابت تحت اثر تمام زلزله‌ها به غیر از زلزله‌های EQ8 و EQ9



شکل ۱۲. میانگین بیشینه جابجایی سازه ۲۰ZY در حالت‌های مختلف

Fig 12. Average of maximum displacement of 20ZY structure in different cases

۷- نتیجه گیری

این پژوهش به بررسی اثرات میراگر جرمی تنظیم شده بهینه بر پاسخ لرزه‌ای دو سازه‌ی بلندمرتبه ۲۰ طبقه مجاور با در نظر گرفتن اندرکنش سازه- خاک- سازه پرداخته است. مدل‌های خطی قاب انتهایی ساختمان پنج‌مترک ۲۰ طبقه در دو راستا با در نظر گرفتن پایه ثابت و نیز حالت همسایگی میان آن‌ها و با فرض رفتار الاستیک برای خاک در نرم‌افزار اپن‌سیس مدل‌سازی می‌شوند. بدین منظور، ماتریس‌های سختی کاهش یافته مربوط به سیستم پی - خاک - پی با تحلیل استاتیکی مدل دقیق اجزا محدود در نرم‌افزار آباکوس به دست آمدند. به منظور انتقال این ماتریس به مدل اپن‌سیس از ترکیب فنرهای انتقالی افقی و قائم و المان توسعه یافته در این نرم‌افزار استفاده شده است. همچنین، برای یافتن پارامترهای طراحی بهینه مربوط به میراگر جرمی تنظیم شده شامل سرعت زاویه‌ای، نسبت میرایی و جرم آن از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) با هدف حداقل رساندن میانگین بیشینه دررفت سازه‌های ۲۰ طبقه در حالت پایه ثابت تحت اثر ده شتاب‌نگاشت مقیاس شده حوزه دور استفاده شده است. در نهایت، پاسخ‌های لرزه‌ای سازه‌ها در قالب بیشینه دررفت و بیشینه جابجایی در حالت پایه ثابت و نیز با در نظر گرفتن اثرات هم‌زمان وجود خاک و مجاورت دو سازه با وجود میراگر جرمی و بدون آن تحت زلزله‌های فوق‌الذکر مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج به دست آمده از تحلیل‌های تاریخچه‌ی زمانی نشان دادند که استفاده از میراگر جرمی با پارامترهای طراحی بهینه شده در هر دو حالت

پایه ثابت و با در نظر گرفتن اندرکنش سازه- خاک- سازه منجر به کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای شده است. با این وجود، در نظر گرفتن اثرات مربوط به اندرکنش سازه- خاک- سازه در سازه 20ZX با نسبت ارتفاع به بعد کم‌تر (سازه چاق‌تر) منجر به بهبود عملکرد میراگر جرمی نسبت به حالت پایه ثابت و در سازه 20ZY با نسبت ارتفاع به بعد بیش‌تر (سازه لاغرتر) منجر به کاهش عملکرد میراگر جرمی نسبت به حالت پایه ثابت شده است. به‌طوری‌که، میانگین بیشینه دررفت و جابجایی سازه 20ZX با میراگر و با وجود اندرکنش سازه- خاک- سازه نسبت به همین پارامترها در حالت با میراگر و پایه ثابت به ترتیب ۴/۷۹ و ۱۶/۹۵ درصد بیش‌تر کاهش یافته است. در نظر گرفتن این اندرکنش در سازه 20ZY بر عکس روند مشاهده شده در سازه 20ZX، منجر به کاهش عملکردی ۶ و ۱۴/۲۹ درصدی میراگر جرمی به ترتیب در مورد میانگین بیشینه دررفت و جابجایی شده است. همچنین، در نظر گرفتن اندرکنش سازه- خاک- سازه سبب افزایش ۱/۱ و ۱۳/۲۵ درصدی میانگین بیشینه دررفت و نیز، افزایش ۴/۹۸ و ۱۷/۴۱ درصدی میانگین بیشینه جابجایی سازه به ترتیب در سازه‌های 20ZY و 20ZX می‌شود. به‌طور کلی، روند مشاهده شده نشان می‌دهد که انرژی زلزله از سمت سازه با نسبت ابعادی کوچک‌تر (20ZX) به سمت سازه با نسبت ابعادی کوچک‌تر (20ZY) حرکت نموده و منجر به افزایش پاسخ‌های مربوط به این سازه شده است. با این وجود، میراگر جرمی بهینه‌شده در حالت پایه ثابت همچنان اثرات کاهش‌دهنده در پاسخ سازه داشته است.

- incident plane SH waves, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 62(1) (1972) 63-83.
- [13] E. Şafak, Wave-propagation formulation of seismic response of multistory buildings, *Journal of Structural Engineering*, 125(4) (1999) 426-437.
- [14] E. Şafak, Local site effects and dynamic soil behavior, *Soil dynamics and earthquake engineering*, 21(5) (2001) 453-458.
- [15] M.-Y. Liu, W.-L. Chiang, J.-H. Hwang, C.-R. Chu, Wind-induced vibration of high-rise building with tuned mass damper including soil–structure interaction, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96(6-7) (2008) 1092-1102.
- [16] G. Bekdaş, S.M. Nigdeli. Estimating optimum parameters of tuned mass dampers using harmony search, *Engineering Structures*, 33(9) (2011) 2716-2723.
- [17] W. Guo, H.N. Li, G.H. Liu, Z.W. Yu, A simplified optimization strategy for nonlinear tuned mass damper in structural vibration control, *Asian Journal of Control*, 14(4) (2012) 1059-1069.
- [18] M. Mohebbi, A. Joghataie, Designing optimal tuned mass dampers for nonlinear frames by distributed genetic algorithms, *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 21(1) (2012) 57-76.
- [19] A. Farshidianfar, S. Soheili, Ant colony optimization of tuned mass dampers for earthquake oscillations of high-rise structures including soil–structure interaction, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 51 (2013) 14-22.
- [20] R. Jabary, S. Madabhushi, Structure-soil-structure interaction effects on structures retrofitted with tuned mass dampers, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 100 (2017) 301-315.
- [21] J. Salvi, E. Rizzi, Optimum earthquake-tuned TMDs: seismic performance and new design concept of balance of split effective modal masses, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 101 (2017) 67-80.
- [22] A. Abd-Elhamed, S. Mahmoud, Simulation analysis of TMD controlled building subjected to far-and near-fault records considering soil-structure interaction, *Journal of*
- [1] H. Frahm, Device for damping vibrations of bodies, in, *Google Patents*, 1911.
- [2] J. Den Hartog, *Mechanical Vibrations (2nd Edition., p. 436)*, in, New York: McGraw Hill, 1940.
- [3] P.H. Wirsching, J.T. Yao, Safety design concepts for seismic structures, *Computers & structures*, 3(4) (1973) 809-826.
- [4] P.H. Wirsching, G.W. Campbell, Minimal structural response under random excitation using the vibration absorber, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2(4) (1973) 303-312.
- [5] S. Ohno, Optimum tuning of the dynamic damper to control response of structures to earthquake ground motion, *Proc. 6WCEE*, (1977).
- [6] H.C. Tsai, G.C. Lin, Optimum tuned-mass dampers for minimizing steady-state response of support-excited and damped systems, *Earthquake engineering & structural dynamics*, 22(11) (1993) 957-973.
- [7] M.N. Hadi, Y. Arfiadi, Optimum design of absorber for MDOF structures, *Journal of Structural Engineering*, 124(11) (1998) 1272-1280.
- [8] A.Y. Leung, H. Zhang, C. Cheng, Y. Lee, Particle swarm optimization of TMD by non-stationary base excitation during earthquake, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 37(9) (2008) 1223-1246.
- [9] M. Domizio, H. Garrido, D. Ambrosini, Single and multiple TMD optimization to control seismic response of nonlinear structures, *Engineering Structures*, 252 (2022) 113667.
- [10] Y. Bozorgnia, K.W. Campbell. The vertical-to-horizontal response spectral ratio and tentative procedures for developing simplified V/H and vertical design spectra, *Journal of Earthquake Engineering*, 8(02) (2004) 175-207.
- [11] M. Trifunac, Scattering of plane SH waves by a semi-cylindrical canyon, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 1(3) (1972) 267-281.
- [12] M. Trifunac, Interaction of a shear wall with the soil for

- [31] B. Irons, Structural eigenvalue problems-elimination of unwanted variables, AIAA journal, 3(5) (1965) 961-962.
- [32] M. Paz, Practical reduction of structural eigenproblems, Journal of Structural Engineering, 109(11) (1983) 2591-2599.
- [33] M. Paz, W. Leigh, Integrated matrix analysis of structures: theory and computation, Springer Science & Business Media, 2012.
- [34] A.Y.T. Leung, A simple dynamic substructure method, Earthquake engineering & structural dynamics, 16(6) (1988) 827-837.
- [35] Y.K. Cheung, A.Y. Leung, Finite element methods in dynamics, Springer Science & Business Media, 1992.
- [36] Matlab, Mathworks Inc, CA, USA. (<https://www.mathworks.com/>)
- [37] H. Krawinkler, Importance of good nonlinear analysis, The structural design of tall and special buildings, 15(5) (2006) 515-531.
- [38] D. Vamvatsikos, M. Fragiadakis, Incremental dynamic analysis for estimating seismic performance sensitivity and uncertainty, Earthquake engineering & structural dynamics, 39(2) (2010) 141-163.
- [39] American Society of Civil Engineers (ASCE). Minimum design loads for buildings and other structures. ASCE/SEI 2016;7-10. Reston, VA.
- Building Engineering, 26 (2019) 100930.
- [23] A. Kaveh, S. Javadi, R.M. Moghanni, Optimal structural control of tall buildings using tuned mass dampers via chaotic optimization algorithm, in: Structures, Elsevier, 2020, pp. 2704-2713.
- [24] L. Wang, W. Shi, Y. Zhou, Adaptive-passive tuned mass damper for structural aseismic protection including soil-structure interaction, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 158 (2022) 107298.
- [25] F. McKenna, OpenSees: a framework for earthquake engineering simulation, Computing in Science & Engineering, 13(4) (2011) 58-66.
- [26] Abaqus, Dassault Systems Simulia Corporation, Providence, RI, USA. (www.3ds.com)
- [27] A. Gupta, H. Krawinkler, Seismic demands for performance evaluation of steel moment resisting frame structures (SAC Task 5.4. 3), John A. Blume Earthquake Engineering Center, 1999.
- [28] ISIR 2800, Seismic resistant design of buildings-Code of practice, Standards and Industrial Research of Iran, 2014 (in Persian).
- [29] A. Fatollahpour, S.A. Arjmandi, E. Tafakori, Structure-Soil-Structure Interaction (SSSI) effects on seismic response of low-, mid-and high-rise steel moment resisting frame structures, Amirkabir Journal of Civil Engineering, 54(2) (2022) 605-630.
- [30] R.J. Guyan, Reduction of stiffness and mass matrices, AIAA journal, 3(2) (1965) 380-380.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. h. Fatollahpour, E. Tafakori, S. A. A. Arjmandi, Structure-Soil-Structure Interaction effects on Seismic Response of Adjacent High-Rise Structures Equipped with Optimized Tuned Mass Damper, Amirkabir J. Civil Eng., 55(5) (2023) 985-1004.

DOI: 10.22060/ceej.2023.20855.7546

