



تعیین الگوی بهینه بار لغزش میراگرهای اصطکاکی پال با احتساب اندرکنش خاک و سازه

فرناز رفیع، حامد حمیدی*، جواد واثقی امیری

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، ایران .

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۷/۱۵

بازنگری: ۱۴۰۰/۰۴/۲۱

پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۰۶

ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۶/۰۹

کلمات کلیدی:

میراگر اصطکاکی پال

اندرکنش خاک و سازه

الگوی بهینه بار لغزش

روش وینکلر

تحلیل دینامیکی غیر خطی

خلاصه: در طراحی های مهندسی، تحلیل سازه ها عموماً با فرض بستر صلب انجام می شود. در حالی که وارد کردن اثر انعطاف پذیری بستر سازه در پاسخ و خصوصیات دینامیکی سازه ها حائز اهمیت است. معرفی راهکارهای مختلف برای کاهش پاسخ سازه در برابر نیروهای دینامیکی یکی دیگر از مسائل مهم در طراحی های مهندسی است که در این مقاله از سیستم غیرفعال میراگر اصطکاکی پال استفاده شده است. در تحقیقاتی که تاکنون صورت گرفته روش های بهینه سازی گوناگونی برای طراحی بهینه میراگرهای اصطکاکی استفاده شده است ولی در اکثر این روش ها برای میراگرهای اصطکاکی اثر اندرکنش خاک-سازه لحاظ نشده است در حالی که در هنگام زلزله اثرات متقابل خاک و سازه حائز اهمیت می باشد. از اهداف اصلی این پژوهش بررسی تاثیر اندرکنش خاک-سازه بر بهینه سازی میراگرهای اصطکاکی می باشد. نیروها و تغییر مکان های واقعی یک سازه تحت اثر حرکت های لرزه ای سطح آزاد را می توان با لحاظ کردن اثرات اندرکنش تعیین نمود. در این راستا در این مقاله قاب-های دو بعدی ۸،۴ و ۱۲ طبقه مجهز به میراگر در نرم افزار تحلیل غیرخطی سازه ها به روش تاریخچه زمانی غیرخطی یکبار با در نظر گرفتن اثر اندرکنش و با معرفی سه الگوی مختلف بارگذاری جانبی و بار دیگر بدون اثر آن مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان می دهد در نظر گرفتن این موضوع با لحاظ الگوی بار لغزش مثلثی تجمعی در عمده موارد سبب افزایش اتلاف انرژی ورودی زلزله توسط این نوع میراگرها گردیده است. همچنین بسته به نوع الگوی بار، رکورد اعمالی و ارتفاع سازه، کاهش هم مشاهده شده است که در بخش نتایج بدان اشاره گردیده است.

۱- مقدمه

بررسی شده است.

ساز و کار میراگر اصطکاکی پال ایجاد سطوح اصطکاک لغزشی در محل تقاطع بادبندهاست. این میراگر از چند سری ورقه های فولادی به گونه ای ساخته شده است که دارای بیشترین سطح اصطکاک بوده و به وسیله ی بولت های فولادی پر مقاومت به یکدیگر بسته شده اند. این میراگرها در تحریکات شدید لرزه ای، برای بار بهینه ای که پیش از آن برای آن طراحی شده اند، پیش از آن که اعضای سازه ای تسلیم شوند وارد عمل شده و سهم زیادی از انرژی زلزله را از بین می برند. این کار به سازه امکان می دهد که به صورت الاستیک باقی مانده و تسلیم آن تا وقوع زلزله ی شدیدتری به عقب بی افتد [۳]. دانشمندان همواره در تلاشند تا با کمترین هزینه، بیشترین بهره را از وجود میراگرها ببرند.

سازه ها باید توان پایداری در برابر بارهای متغیر را در طول عمر مفیدشان داشته باشند. با پیشرفت های انجام گرفته در زمینه علوم کامپیوتری، رشد گسترده در آنالیز غیرخطی سازه ها امکان پذیر شده است. یعنی غیر از سیستم های متداول باربر جانبی چون دیوار برشی، بادبندها و ترکیب آن ها، روش های دیگری نیز در چند دهه گذشته پیشنهاد و استفاده شده است [۱]. امروزه اتلاف انرژی وارد به سازه در اثر زمین لرزه، به سمت استفاده از وسایل کنترل سازه فعال، نیمه فعال و غیرفعال پیش رفته است [۲] ۳۲۸۲ Persian In). پرکاربردترین آن ها، میراگرهای غیرفعال می باشند که انواع مختلفی دارند مانند میراگرهای فلزی، اصطکاکی، ویسکوز و ... در میان این میراگرها، میراگرهای اصطکاکی و ویسکوالاستیک به دلیل توانایی بالا در تلف کردن انرژی زلزله، بسیار مورد توجه مهندسی قرار گرفته اند. در این پژوهش میراگرهای اصطکاکی پال که از وسایل کنترل غیرفعال می باشد،

1 Moreschi

2 Singh

* نویسنده عهده دار مکاتبات: h.hamdi@nit.ac.ir



داد که با درصد لغزشی در حدود ۱۰ تا ۱۵ درصد وزن سازه، ساختمان راندمان بهتری نشان می‌دهد [۷].

محمد نیا و واثقی (۲۰۱۲) در پژوهش خود اثر حذف میراگر اصطکاکی پال در طبقات قاب‌های فولادی با توزیع ثابت نیروی لغزش را بررسی کردند. در این مطالعه یک قاب فولادی سه دهانه ۵ طبقه با الگوهای توزیع متفاوت میراگر در طبقات و با نیروی لغزش ثابت تحت هفت زوج شتاب‌نگاشت مختلف با استفاده از نرم افزار SAP مورد آنالیز دینامیکی غیرخطی قرار می‌گیرد. برای بررسی عملکرد میراگر از شاخص کاهش برش پایه و شاخص تغییر مکان بام و حد مفاصل پلاستیک استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که با حذف میراگر در طبقه اول بیشترین کاهش تغییر مکان بام و کمترین تعداد مفاصل پلاستیک را خواهیم داشت و بار لغزش بهینه به سمت درصدهای بالاتر وزنی سازه متمایل می‌شود [۸].

میگل^۲ و همکاران (۲۰۱۴) بهینه‌سازی طراحی قوی میراگرهای اصطکاکی برای کنترل پاسخ سازه در برابر زمین لرزه را پیشنهاد کردند. به منظور در نظر گرفتن عدم اطمینان موجود در سیستم، برخی از پارامترهای آن به عنوان متغیرهای تصادفی مدل‌سازی شدند و در نتیجه پاسخ سازه‌ای تصادفی شد. برای انجام بهینه‌سازی قوی این سیستم، دو تابع هدف به طور همزمان در نظر گرفته می‌شود: میانگین و واریانس حداکثر جابجایی. یک الگوریتم ژنتیک، NSGA-II (الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی غیرممتزهره)، برای حل مسئله بهینه‌سازی چند هدفه استفاده می‌شود. برای اهداف شبیه‌سازی، یک ساختمان شش طبقه برشی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد که روش پیشنهادی قادر به کاهش میانگین حداکثر جابجایی در حدود ۷۰ درصد و واریانس حداکثر جابجایی در حدود ۹۹ درصد با تنها سه میراگر بود [۹].

حسینی و شایختی (۲۰۱۷) عملکرد قاب‌های فولادی با مهاربند فولادی همگرا تقویت شده توسط میراگرهای اصطکاکی پال بهبود یافته (IPFD^۳) و قاب‌های فولادی با مهاربند فولادی همگرا بدون میراگر را مقایسه کردند. قاب‌ها با و بدون میراگر با ۶ طبقه و ۳ دهانه در SAP2000 مدل‌سازی شده و در معرض شتاب‌نگاشت‌های زلزله قرار گرفته و تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی انجام شد. بار لغزش بهینه میراگر، به ازای حداقل کردن تغییر مکان بام تحت شتاب‌نگاشت‌های مختلف به دست آمد. نتایج نشان داد که IPFD حداکثر برش پایه و حداکثر تغییر مکان سقف را کاهش می‌دهد. برای مثال تحت زلزله کوبه حداکثر تغییر مکان سقف در حالت بدون میراگر

طراحی بهینه برای سیستم‌های میراگر فلز تسلیمی و اصطکاکی نصب شده در مکان‌های مختلف قاب‌های مهاربندی فولادی چند طبقه برای یک هدف عملکردی قابل قبول ارائه کردند. برای یک میراگر فلزی تسلیمی، پارامترهای طراحی مورد توجه سطح میرایی سیستم، سختی سیستم و سختی مهاربند است. برای سیستم اصطکاکی، پارامترها سطح بار لغزش و سختی مهاربند است. از آنجایی که دستگاه‌ها و سازه‌های نصب شده با این سیستم‌ها به شیوه‌ای بسیار غیر خطی رفتار می‌کنند و بنابراین باید با روش تاریخچه زمانی گام به گام ارزیابی شوند، الگوریتم ژنتیک برای به دست آوردن راه حل بهینه جهانی استفاده شد. این روش جستجو بهینه، انعطاف‌پذیری غیرمعمولی در انتخاب اهداف عملکردی دارد. آن‌ها همچنین برای اهداف شبیه‌سازی، مجموعه‌ای از نمونه‌های عددی از طراحی‌های بهینه میراگر با اهداف عملکردی متفاوت استفاده کردند [۴].

واثقی و همکاران (۲۰۰۹) رفتار قاب‌های فلزی مهاربندی واگرا مجهز به میراگر اصطکاکی را بررسی کردند. آن‌ها پس از مدل‌سازی دو سازه فولادی ۵ و ۱۰ طبقه، به تحلیل دینامیکی غیرخطی سازه‌ها پرداختند. طبق نتایج به دست آمده میراگر اصطکاکی موجب کاهش دررفت طبقات، برش پایه و نیروی محوری ستون‌ها در هر دو سازه شده بود [۵].

تیرکا^۱ و همکاران (۲۰۱۰) مقاوم‌سازی یک ساختمان ۱۰ طبقه با میراگر اصطکاکی را مورد بررسی قرار دادند. در ابتدا به روش بک‌تاش نیروی بهینه برای میراگر در طبقات معرفی شد. در ادامه برای تعیین محل مؤثر با در نظر گرفتن ۳ سناریوی مختلف برای جانمایی میراگرها، پاسخ‌های سازه مورد بررسی قرار گرفت. در سناریوی اول، میراگرها در تمام طبقات، در سناریو دوم میراگرها در طبقات یکی در میان و در سومین سناریو به صورت دو طبقه در میان قرار می‌گرفتند. نتایج نشان داد که در همه طبقات به میراگر نیاز نیست [۶].

واثقی و رحیمی (۲۰۱۲) به بررسی درصد لغزش بهینه میراگر اصطکاکی پال در ساختمان فولادی بهسازی شده با میراگر بر اساس مفاهیم انرژی پرداختند. هدف این مطالعه بررسی تاثیر نسبت لغزش‌های متفاوت در میراگر اصطکاکی بر مقدار جذب انرژی زلزله و توزیع آن در ساختمان و اثر آن بر سطح عملکرد ساختمان فولادی بود که با میراگر اصطکاکی پال بهسازی شده است. در این پژوهش ۴ قاب فلزی سه دهانه ۵، ۸، ۱۰ و ۱۲ طبقه تحت هفت رکورد مختلف با نرم افزار PERFORM 3D مورد تحلیل دینامیکی غیرخطی، تحت درصد لغزش‌های متفاوت قرار گرفتند. نتایج نشان

2 Miguel

3 Improved Pall Frictional Dampers

1 Tirca

SMRF می‌تواند به طور متوسط ۵۴٪، ۷۵٪ و ۹۷٪ کاهش در مقابل سازه بدون RFD نشان دهد [۱۴].

همانطور که ذکر شد در مطالعات دهه‌های اخیر برای طراحی بهینه دستگاه‌های اتلاف انرژی، روش‌های بهینه‌سازی متفاوتی استفاده شده است ولی در اکثر این روش‌ها به خصوص برای میراگرهای اصطکاکی اثر اندرکنش خاک-سازه لحاظ نشده است. در هنگام وقوع زلزله در چنین شرایطی اثرات متقابل خاک و سازه دارای اهمیت می‌باشد، که به عنوان اثرات اندرکنش دینامیکی خاک و سازه شناخته می‌شود. در این مقاله به بررسی قاب‌هایی که میراگر اصطکاکی پال به آن‌ها اضافه شده بر اساس مفاهیم اندرکنش خاک-سازه و یافتن الگوی بهینه لغزش پرداخته شده است تا مشاهده شود که میراگرهای اصطکاکی پال در سازه چگونه عمل می‌کنند و چه سهمی از اتلاف انرژی را برعهده دارند. مهم‌ترین گام در طراحی میراگرهای اصطکاکی تعیین بار لغزش بهینه می‌باشد. برای تعیین بار لغزش بهینه روش‌های متفاوتی توسط محققین معرفی شده است که در این پژوهش از روش شاخص عملکرد لرزه‌ای استفاده شده است. در این مقاله ابتدا به کمک این روش الگوهای بار لغزش تعریف می‌شوند. سپس قاب‌های ۴، ۸ و ۱۲ طبقه طراحی شده در ETABS یک بار با لحاظ اندرکنش خاک و سازه و بار دیگر بدون لحاظ آن تحت ۷ شتاب‌نگاشت در نرم افزار PERFORM 3D مورد تحلیل تاریخچه زمانی غیر خطی قرار می‌گیرند. هدف این پژوهش تعیین تاثیر اندرکنش خاک و سازه بر تعیین بار لغزش بهینه میراگرهای اصطکاکی پال می‌باشد.

۲- مشخصات کلی و توضیحات مدل

در این مقاله سه قاب ساختمانی فلزی ۴، ۸ و ۱۲ طبقه مورد بررسی قرار گرفته است. قاب‌های مذکور به صورت دو بعدی و بارهای قائم عمدتاً توسط قاب‌های ساختمانی تحمل می‌شوند. روند مدل‌سازی و تحلیل در این پژوهش در دو بخش انجام می‌گیرد. در بخش اول سازه‌های مجهز به میراگر اصطکاکی پال بدون لحاظ اندرکنش خاک و سازه تحلیل و بررسی می‌شوند. سپس با حذف میراگرها نیز مجدداً تحلیل خواهند شد. در ادامه با مقایسه نتایج تحلیل دو حالت مذکور شاخص عملکرد لرزه‌ای (S_{PI})^۱ برای سازه‌ها با تاثیر میراگر اصطکاکی پال و بدون لحاظ اندرکنش خاک و سازه به دست می‌آید. سپس از بار لغزشی که این مقدار را کمینه کند برای تعریف الگوهای بار استفاده می‌شود. در بخش دوم سازه‌های مجهز به میراگر اصطکاکی پال

۱۴۷/۵ میلی‌متر و با میراگر ۱۱۲/۳ میلی‌متر به دست آمد که ۲۳/۸٪ کاهش داشت، همچنین حداکثر برش پایه بدون میراگر ۱۶۰ تن و با میراگر ۱۲۷/۵ تن به دست آمد که ۲۰/۳٪ کاهش داشت. علاوه بر آن، میراگرها موجب اتلاف انرژی زیادی می‌شوند. در زلزله طبس، میراگرها حدود ۴۰٪ انرژی ورودی را کاهش داد [۱۰].

طیاری و همکاران (۲۰۱۹) یک روش مبتنی بر آسیب برای ارزیابی دامنه بهینه پارامترهای طراحی میراگر اصطکاکی در قاب‌های فولادی چند طبقه با مهاربند شورون پیشنهاد کردند. برای نشان دادن کارایی روش پیشنهادی، سه مدل سازه‌ای ۳، ۶ و ۹ طبقه مجهز به سیستم میراگر اصطکاکی با استفاده از روش تحلیل دینامیکی افزایشی در نرم افزار OpenSees ارزیابی شدند. تحلیل شکنندگی لرزه‌ای مدل‌های سازه‌ای با تغییر دو متغیر طراحی انجام شد: نیروی لغزش نرمال شده دستگاه میراگر F_g و نسبت سختی سیستم میراگر SR. نتایج نشان داد که محدوده مطلوب نیروی لغزش بین ۴۰٪ تا ۵۵٪ از وزن کل سازه‌ها و مقدار توصیه شده برای نسبت سختی ۲ می‌باشد [۱۱].

مرادی و توکلی (۲۰۲۰) با استفاده از مفاهیم بالانس انرژی در سازه، عملکرد یک ساختمان ۱۰ طبقه دارای میراگر اصطکاکی پال را تحت بارهای متعدد انفجار بررسی کردند. آن‌ها دو سازه ۱۰ طبقه را در نرم افزار Perform-3d با و بدون میراگر اصطکاکی پال در معرض ۱۲ بار انفجار قرار داده و عملکرد آن را بررسی کردند. نتایج نشان داد که دوران مفصل پلاستیک، دررفت و انرژی کرنشی پلاستیک تلف شده در سازه دارای میراگر اصطکاکی پال کمتر از سازه بدون میراگر است [۱۲].

برزگر و همکاران (۲۰۲۰) عملکرد میراگر اصطکاکی متغیر را در کاهش ارتعاش ناشی از باد و زلزله ارزیابی نمودند و نشان دادند که اصلاح و بهبود رفتارهای هیستریزس در کل سازه برای رسیدن به عملکرد مطلوب ضروری است [۱۳].

جراحی و همکاران (۲۰۲۰) طرح بهینه‌ای برای میراگر اصطکاکی دورانی (RFD)^۱ برای کنترل ارتعاش لرزه‌ای یک قاب خمشی فولادی یک طبقه‌ای (SMRF)^۲ پیشنهاد کردند. برای دستیابی به این هدف، پارامترهای RFD در معرض یک زمین لرزه مصنوعی ابتدا از طریق به حداقل رساندن نسبت انرژی ورودی لرزه‌ای به اتلاف انرژی در RFD بهینه شدند. نتایج مدل‌سازی نشان داد که RFD بهینه شده به ترتیب از نظر حداکثر و باقی‌مانده جابجایی‌های سقف و انرژی هیستریزس جمعی

1 Rotational Friction Damper
2 steel moment-resisting frame

جدول ۱. بارگذاری مرده و زنده طبقات و بام

Table 1. Dead and Live loads for the roof and stories

طبقات		بام	
LL (kN/m ²)	DL (kN/m ²)	LL (kN/m ²)	DL (kN/m ²)
۲	۵	۱/۵	۵/۵

جدول ۲. مقاطع سازه ۴ طبقه

Table 2. The 4-story structure sections

قاب ۴ طبقه		
ستون	تیر	طبقه
Box 160*160*10	IPE 200	1
Box 160*160*10	IPE 200	2
Box 140*140*10	IPE 180	3
Box 140*140*10	IPE 180	4

شد. خاک انتخابی از نوع سه و خطر لرزه خیزی منطقه خیلی زیاد در نظر گرفته شد. بارگذاری ثقلی برای سازه ها مطابق جدول ۱ می باشد. هندسه مدل به صورت زیر می باشد:

- قابها به صورت دو بعدی با ابعاد سازه های متعارف مدل سازی شده است و ارتفاع طبقات ۳/۴ متر فرض شده است (شکل ۱).
- قابهای ۴ طبقه با ابعاد ۳ دهانه ی ۴ متری است.
- قابهای ۸ طبقه با ابعاد ۳ دهانه ی ۵ متری است.
- قابهای ۱۲ طبقه با ابعاد ۴ دهانه ی ۵ متری است.

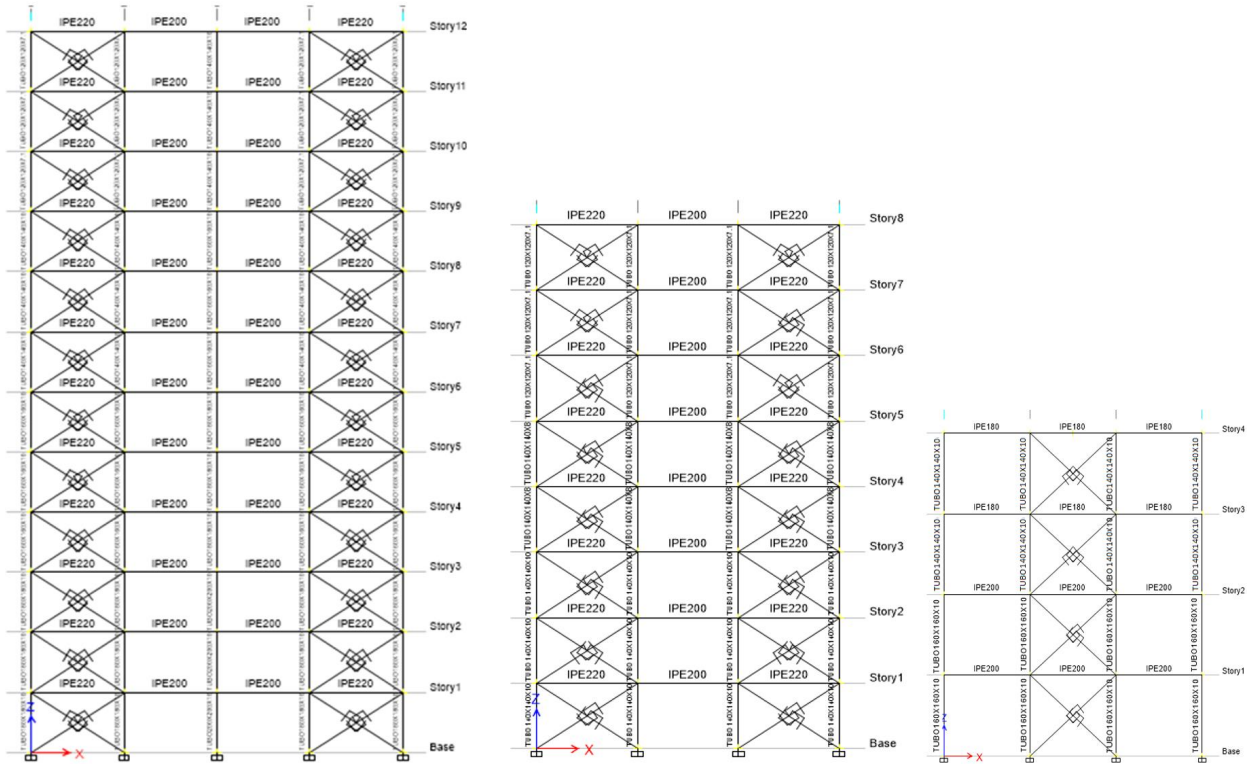
با انجام تحلیل طیفی و طراحی قابهای فلزی در نرم افزار، مقاطع حاصل از طراحی به دست آمده مطابق جدول های ۲ تا ۴ می باشد. مقاطع استفاده شده در قابهای ساختمانی برای تیرها از نوع I شکل و برای ستون ها از نوع Box می باشد.

با بار لغزشی مطابق الگوهای تعریف شده با و بدون لحاظ اندرکنش خاک و سازه تحلیل و بررسی می شوند. سپس بدون میراگر نیز تحلیل خواهند شد. با مقایسه نتایج تحلیل، الگوی بهینه بار لغزش و همچنین تاثیر اندرکنش خاک و سازه در اتلاف انرژی به دست می آید.

این قابها پس از طراحی در نرم افزار ETABS، برای تعیین الگوی بهینه بار لغزش و تاثیر اندرکنش خاک و سازه بر آن تحت ۷ رکورد زلزله که در آیین نامه FEMA-P۶۹۵ مربوط به خاک نوع D و گسل Strike-slip می باشند در نرم افزار PERFORM 3D تحت تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی قرار می گیرند.

۲-۱- بارگذاری و طراحی اولیه

قابهای دو بعدی فلزی مجهز به میراگر بدون لحاظ اندرکنش خاک و سازه ابتدا در نرم افزار با تحلیل طیفی برای ۷۵ درصد نیروی زلزله طراحی



شکل ۱. قاب های ۴، ۸ و ۱۲ طبقه

Fig. 1. Elevation of 4-, 8-, and 12-story frames

جدول ۳. مقاطع سازه ۸ طبقه

Table 3. The 8story structure sections

قاب ۸ طبقه		
ستون	تیر	طبقه
Box 180*180*10	IPE 220, IPE 200	1
Box 180*180*10	IPE 220, IPE 200	2
Box 180*180*10	IPE 220, IPE 200	3
Box 160*160*10	IPE 220, IPE 200	4
Box 160*160*10	IPE 220, IPE 200	5
Box 160*160*10	IPE 220, IPE 200	6
Box 140*140*10	IPE 220, IPE 200	7
Box 140*140*10	IPE 220, IPE 200	8

جدول ۴. مقاطع سازه ۱۲ طبقه

Table 4. The 12-story structure sections

قاب ۱۲ طبقه		
ستون	تیر	طبقه
Box 180*180*10 Box 200*200*10	IPE 220, IPE 200	1
Box 180*180*10 Box 200*200*10	IPE 220, IPE 200	2
Box 180*180*10 Box 200*200*10	IPE 220, IPE 200	3
Box 180*180*10 Box 160*160*10	IPE 220, IPE 200	4
Box 180*180*10 Box 160*160*10	IPE 220, IPE 200	5
Box 180*180*10 Box 160*160*10	IPE 220, IPE 200	6
Box 140*140*10 Box 160*160*10	IPE 220, IPE 200	7
Box 140*140*10 Box 160*160*10	IPE 220, IPE 200	8
Box 140*140*10 Box 160*160*10	IPE 220, IPE 200	9
Box 140*140*10 Box 120*120*7.1	IPE 220, IPE 200	10
Box 140*140*10 Box 120*120*7.1	IPE 220, IPE 200	11
Box 140*140*10 Box 120*120*7.1	IPE 220, IPE 200	12

$$R_d = \frac{D_f}{D_p} \quad (1)$$

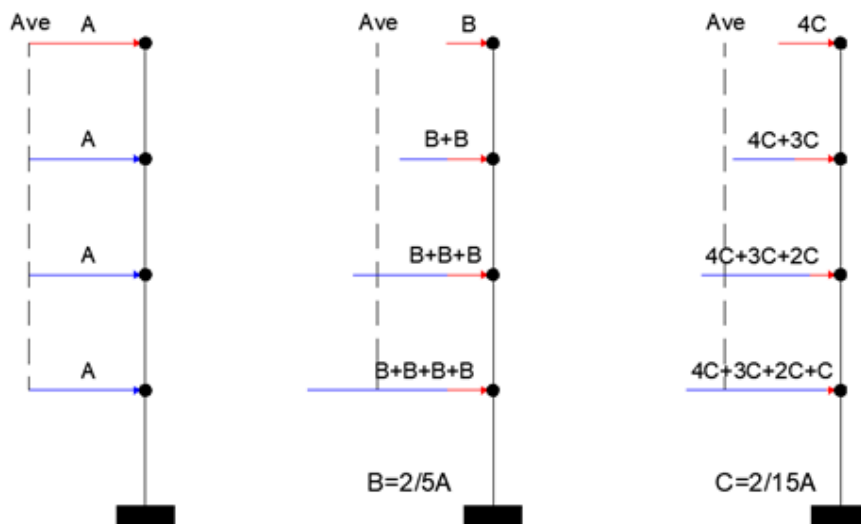
$$R_f = \frac{V_f}{V_p} \quad (2)$$

$$R_e = \frac{(E_i - E_h)}{E_i} \quad (3)$$

$$SPI = \sqrt{R_d^2 + R_f^2 + R_e^2} \quad (4)$$

۲-۲- لگوهای بار لغزش میراگر اصطکاکی پال

موالا^۱ در سال ۲۰۰۲ شاخصی را تحت عنوان شاخص SPI که ترکیبی از سایر شاخص‌های عملکردی می‌باشد را معرفی نمود که در نهایت بار لغزشی که این شاخص را کمینه نماید به عنوان بار لغزش بهینه تعیین می‌شود. در روابط (۱) تا (۴) مقادیر R_d ، R_f و R_e به ترتیب نسبت جابجایی حداکثر بام، برش پایه و انرژی تلف شده سازه با میراگر اصطکاکی به سازه اولیه بدون میراگر می‌باشد. بنابراین در این روش ابتدا بایستی میراگر را در سازه مدل‌سازی نمود و سپس تحت تحلیل‌های تاریخچه زمانی متعدد قرار داد و پاسخ‌های سازه را بررسی نمود [۱۵].



شکل ۲. الگوی بار سمت چپ: یکنواخت- وسطا: یکنواخت تجمعی- سمت راست: مثلثی تجمعی

Fig.2. Left load pattern: uniform; middle: cumulative uniform; right: cumulative triangular

جدول ۵. ترکیب بارهای A, B, C (kN)

Table 5. A, B, C load patterns (kN)

	۴ طبقه	۸ طبقه	۱۲ طبقه
A	20	25	33
B	$\frac{2}{5} A = 8$	$\frac{2}{9} A = 5.56$	$\frac{2}{13} A = 5.08$
C	$\frac{2}{15} A = 2.67$	$\frac{2}{51} A = 0.98$	$\frac{6}{325} A = 0.61$

عنوان حالت بهینه و بار لغزش اعمالی به عنوان بار لغزش بهینه در بین سه الگوی بار مورد مطالعه استخراج شد، که بار لغزش الگوی بار یکنواخت در نظر گرفته شد. در جدول ۵ مقدار این بار لغزش بهینه و همچنین محاسبات ترکیب بارهای A, B, C آمده است.

۲-۳- روش اثر اندرکنش خاک و سازه

در سال‌های گذشته محققین مدل‌های گوناگونی را برای در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه پیشنهاد نموده‌اند [۱۷] که یکی از این مدل‌ها، مدل وینکلر می‌باشد که در این مقاله نیز از این روش برای مدل‌سازی اندرکنش خاک و سازه استفاده شده است. در ادامه به توضیح این روش و پارامترهای آن پرداخته می‌شود.

در این پژوهش از سه الگوی بار استفاده شده است که به گونه‌ای مقیاس شده‌اند که برش پایه یکسانی در پاسخ مود اول سازه ایجاد کنند [۱۶]. در شکل ۲ نمونه‌ی الگوهای بار برای سازه ۴ طبقه نشان داده شده است. این الگوهای بار عبارتند از: A (یکنواخت B) یکنواخت تجمعی C) مثلثی تجمعی. برش پایه سه الگوی بار با هم برابر است، یعنی نیروی الگوهای بار به گونه توزیع شده است که مجموع نیروهای طبقات در هر سه الگو با هم برابر است.

پس از مدل‌سازی سازه‌های ۴، ۸ و ۱۲ طبقه، برای هر یک از سازه‌ها نیروی لغزش میراگر از ۵ kN تا ۲۸۰ kN اعمال و در هر حالت تحلیل غیرخطی تاریخچه زمانی انجام شد و شاخص SPI برای سازه‌ها به دست آمد. حالتی از بار لغزش که در آن شاخص SPI کمینه به دست آمد به

معادل فونداسیون برای حرکت جانبی می‌باشد که با استفاده از A_f (مساحت فونداسیون) محاسبه می‌گردد (رابطه (۷)).

$$r_x = \sqrt{\frac{A_f}{\pi}} \quad (7)$$

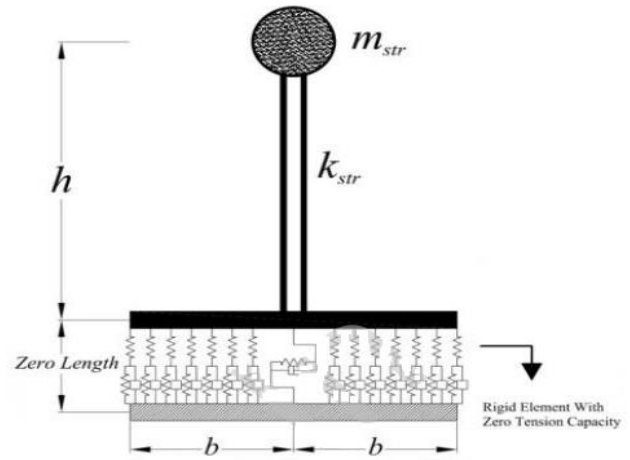
برای مدل‌سازی رفتار خاک در راستای قائم مجموعه‌ای از فنر و میراگرهای موازی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این فنر و میراگرها به گونه‌ای توزیع شده‌اند تا خصوصیات دینامیکی سیستم‌های خاک و سازه مانند پریود و میرایی قبل از بلند شدگی و ایجاد رفتار غیرخطی در خاک، با مقادیر نظیر آن‌ها در حالتی که فنر چرخشی به صورت متمرکز قرار داده می‌شود برابر باشد. مقادیر سختی چرخشی و میرایی چرخشی در نظر گرفته شده برای سیستم‌های خاک و سازه در روابط (۸) و (۹) ارائه شده است.

$$k_\theta = \frac{8}{3(1-\nu)} Gr_\theta^3 \quad (8)$$

$$c_\theta = \frac{3\pi}{16} (1-\nu) \frac{r_\theta}{V_s} k_\theta \quad (9)$$

در روابط فوق k_θ و c_θ به ترتیب سختی و میرایی چرخشی خاک می‌باشد. همچنین Γ_θ شعاع معادل فونداسیون برای حرکت چرخشی می‌باشد که با استفاده از I_f ممان اینرسی فونداسیون حول محور چرخش قابل محاسبه می‌باشد.

برای محاسبات سختی و میرایی خاک، مدول برشی $136,125 \text{ t/cm}^2$ و سرعت موج برشی 275 متر بر ثانیه در نظر گرفته شد. همچنین ضخامت و عرض پی سازه‌های ۴، ۸ و ۱۲ طبقه به ترتیب 120×60 ، 200×100 و 280×140 سانتی‌متر مربع لحاظ شد. سختی و میرایی برای خاک هر یک از سازه‌ها طبق فرمول‌های فوق محاسبه شده و در زیر سازه به صورت فنرها و میراگرهای افقی و قائم مدل‌سازی شد و در نرم افزار تحلیل تاریخچه زمانی گردید.



شکل ۳. مدل در نظر گرفته شده برای سیستم خاک و سازه [۱۸]

Fig. 3. Considered model for soil and structure system

در این مدل (شکل ۳) جهت بررسی رفتار سیستم‌های خاک و سازه در زیر فونداسیون فنر و میراگرهای خاک به صورت گسترده (وینکلر) قرار گرفته‌اند. جهت مدل‌سازی سختی افقی خاک یک فنر و میراگر موازی به صورت متمرکز در وسط فونداسیون قرار داده شده است. مقادیر محاسبه شده برای سختی فنر و میرایی میراگرها با استفاده از روابط ارائه شده برای فونداسیون سطحی محاسبه شده است. این مقادیر برای سختی جانبی خاک از روابط (۵) و (۶) به دست می‌آید [۱۸]:

$$k_x = \frac{8}{2-\nu} Gr_x \quad (5)$$

$$c_x = \frac{\pi}{8} (2-\nu) \frac{r_x}{V_s} k_x \quad (6)$$

که در آن‌ها k_x ، c_x ، G ، V_s و ν به ترتیب سختی جانبی، میرایی جانبی، مدول برشی، سرعت موج برشی و ضریب پواسون خاک می‌باشند. Γ_x شعاع

جدول ۶. شتاب‌نگاشت‌های مورد استفاده در تحلیل سازه‌ها.

Table 6. Accelerograms used in structural analysis

زلزله	سال	ایستگاه ثبت	M	منبع (نوع گسل)	PGA max(g)	فاصله سایت از منبع (km)
1 Duzce, Turkey	1999	Bolu	7.1	Strike-slip	0.82	41.3
2 Imperial Valley	1979	Delta	6.5	Strike-slip	0.35	33.7
3 Kobe, Japan	1995	Shin-Osaka	6.9	Strike-slip	0.24	46
4 Landers	1992	Yermo Fire Station	7.3	Strike-slip	0.24	86
5 Loma Prieta	1989	Gilroy Array #3	6.9	Strike-slip	0.24	31.4
6 Superstition Hills	1987	El Centro Imp. Co.	6.5	Strike-slip	0.36	35.8
7 Superstition Hills	1987	Poe Road (temp)	6.5	Strike-slip	0.45	11.2

جدول ۷. ضرایب مقیاس شتاب‌نگاشت‌ها.

Table 7. Scale factors of the used accelerograms

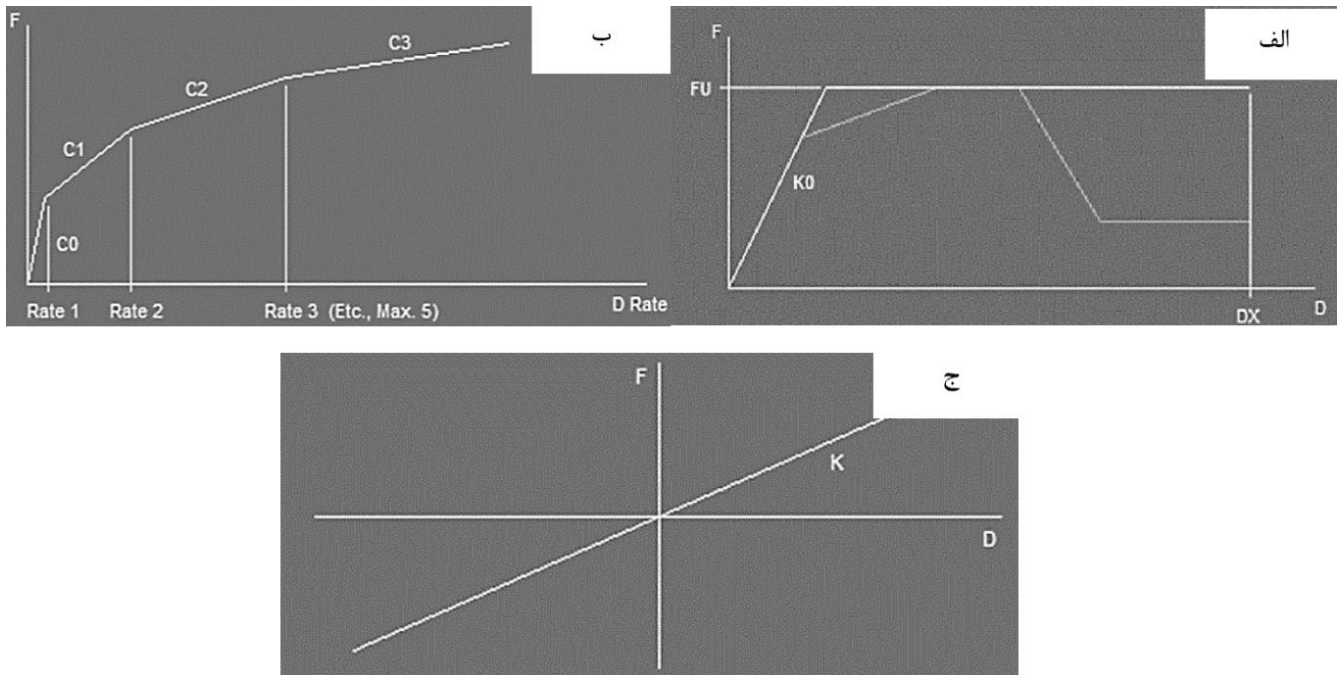
زلزله	ایستگاه ثبت	ضریب مقیاس		
		۴ طبقه	۸ طبقه	۱۲ طبقه
1 Duzce, Turkey	Bolu	0.3176	0.191	0.267
2 Imperial Valley	Delta	0.8177	0.449	0.583
3 Kobe, Japan	Shin-Osaka	0.9054	0.503	0.428
4 Landers	Yermo Fire Station	1.0155	0.531	0.363
5 Loma Prieta	Gilroy Array #3	0.5649	0.559	0.526
6 Superstition Hills	El Centro Imp. Co.	0.8413	0.647	0.391
7 Superstition Hills	Poe Road (temp)	0.5116	0.641	0.582

۲-۵- مدل‌سازی در نرم افزار 3D PERFORM

مدل‌سازی میراگر اصطکاکی پال در نرم افزار 3D-PERFORM با استفاده از المان Inelastic Bar انجام گردید. در خصوص اندرکنش خاک و سازه نیز از ترکیب دو المان Fluid Damper برای شبیه‌سازی رفتار میرایی خاک و همچنین المان Linear Elastic Bar جهت مدل‌سازی رفتار سختی خاک استفاده گردید (شکل ۴). مقادیر میرایی و سختی طبق روابطی که در بخش‌های قبل برای اندرکنش خاک و سازه شرح داده شد محاسبه و در نرم افزار اعمال گردید.

۲-۴- انتخاب رکورد زلزله و مقیاس آن‌ها

در این مقاله برای تحلیل‌های تاریخچه زمانی به منظور تعیین بار بهینه لغزش، از ۷ نوع شتاب‌نگاشت زلزله مندرج در دستورالعمل FEMA-P695 که مشخصات آن در جدول ۶ آمده است، استفاده شده است. این شتاب‌نگاشت‌ها ابتدا بر مبنای آیین نامه ۱۶-۰۷-ASCE به طیف طراحی (Design Based Earthquake) مقیاس شدند (سطح خطر ۱ مد نظر بوده است). پس از مقیاس‌سازی هر رکورد در سایت Peer با توجه به پریود مود اول سازه و به دست آوردن ضریب مقیاس متناظر با هر سازه (جدول ۷) مقادیر ضریب مقیاس و شتاب‌نگاشت مرتبط با هر زلزله در نرم افزار تعریف گردید.



شکل ۴. مدل سازی المان‌ها مدل: الف) المان Inelastic Bar (ب) المان Fluid Damper (ج) المان Linear Elastic Bar

Fig.4. a) Inelastic Bar element b) Fluid Damper element c) Linear Elastic Bar element

۳- نتایج و تفسیر آن‌ها

در این مقاله جهت بررسی اثر اندرکنش خاک و سازه بر الگوی بهینه بار لغزش میراگرهای اصطکاکی پال، پارامترهای تغییر مکان جانبی بام، حداکثر دررفت سازه و اتلاف انرژی در نظر گرفته شده است. این پارامترها به جهت مقایسه بهتر به سازه بدون میراگر مقیاس شده اند. متغیرها در این بررسی شامل بارگذاری لرزه‌ای، بار لغزش میراگر و اندرکنش خاک و سازه می‌باشد.

۳-۱- نرخ تغییر مکان جانبی بام

نسبت تغییر مکان جانبی بام در سازه مجهز به میراگر نسبت به سازه بدون میراگر با و بدون لحاظ اندرکنش خاک و سازه برای الگوهای مختلف بار لغزش در شکل ۵ برای سازه‌های ۴، ۸ و ۱۲ طبقه آمده است.

اندرکنش خاک و سازه با افزایش تعداد طبقات باعث افزایش بیشتر تغییر مکان بام شده است. برای هر دو حالت با و بدون اندرکنش الگوی بار لغزش A بهینه می‌باشد و نرخ تغییر مکان را به طور یکنواخت‌تری کاهش می‌دهد.

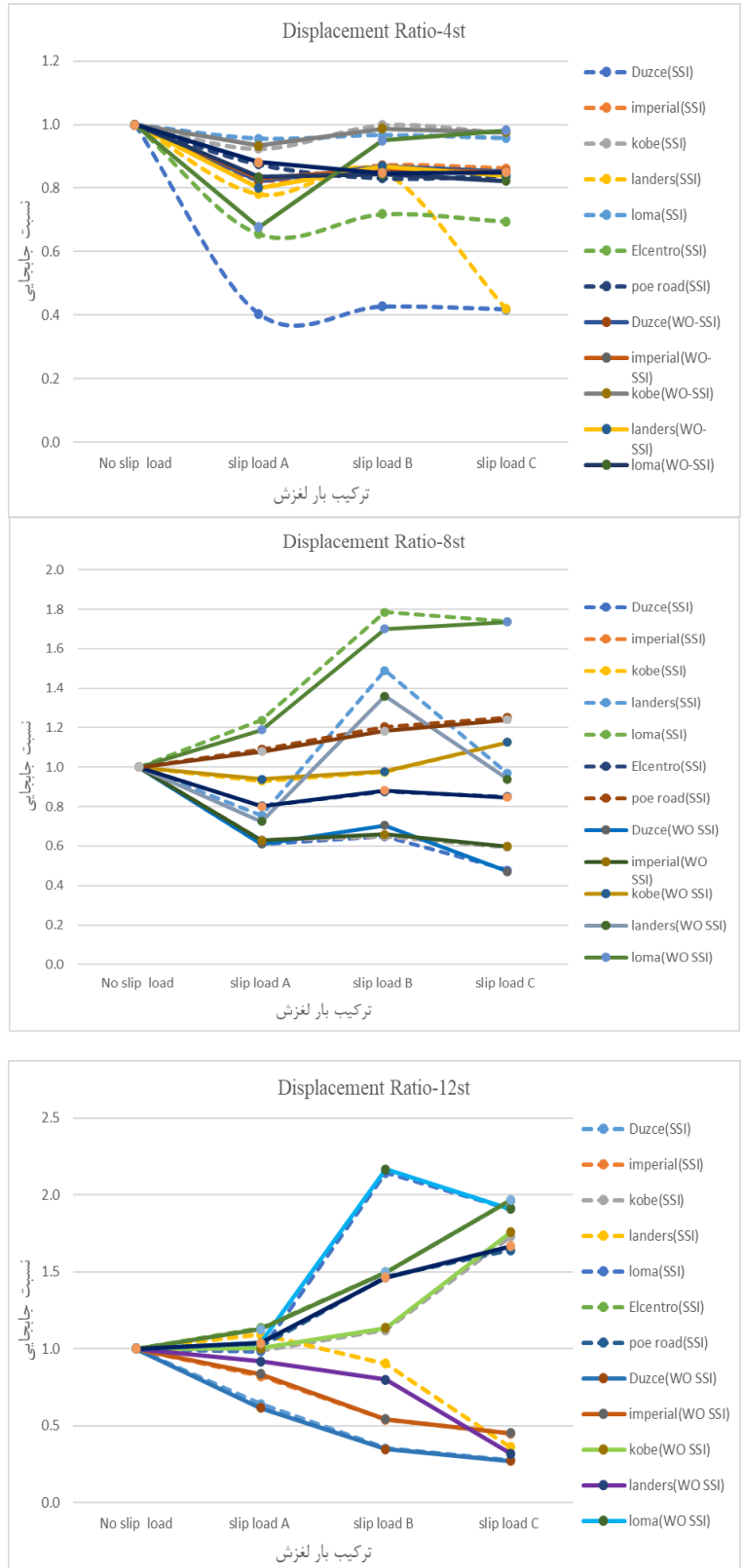
۳-۲- نرخ حداکثر دررفت سازه

نسبت حداکثر دررفت سازه مجهز به میراگر نسبت به سازه بدون میراگر با و بدون لحاظ اندرکنش خاک و سازه برای الگوهای مختلف بار لغزش در شکل ۶ برای سازه‌های ۴، ۸ و ۱۲ طبقه آمده است.

تغییرات نسبت دررفت با افزایش تعداد طبقات محسوس‌تر می‌باشد ولی به طور کلی ترکیب بار لغزش A نسبت‌های نزدیک‌تر دررفت را نتیجه می‌دهد و بهینه‌تر می‌باشد. اندرکنش خاک و سازه در برخی ترکیب بارها باعث افزایش نسبت دررفت و در برخی دیگر باعث کاهش دررفت می‌شود ولی به طور کلی الگوی بار لغزشی مشابه با حالت بدون لحاظ اندرکنش را نتیجه می‌دهد.

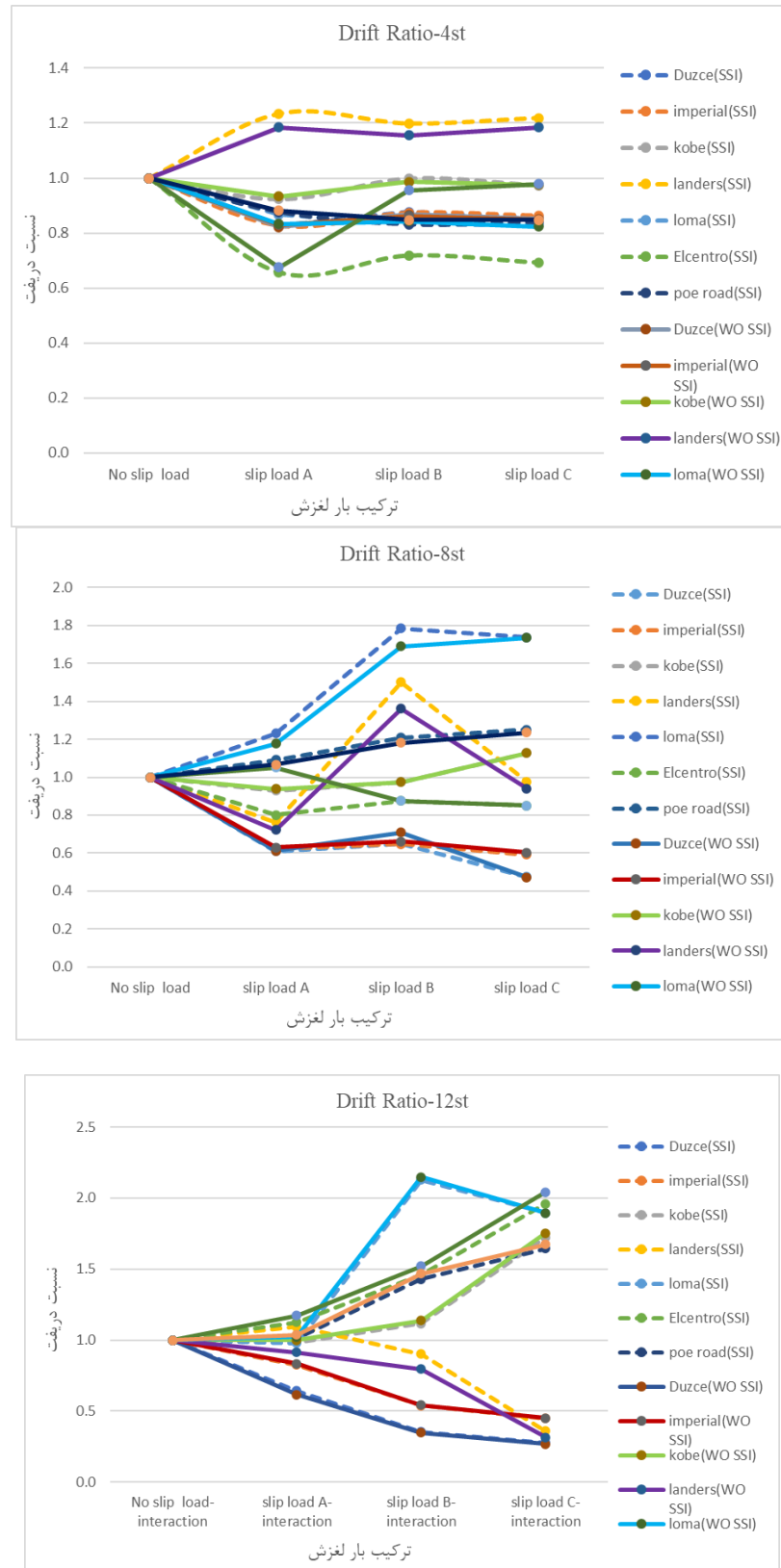
۳-۳- نرخ اتلاف انرژی

نرخ اتلاف انرژی نیز یکی از پارامترهای موثر در بررسی رفتار لرزه‌ای سازه در شرایط گوناگون است. در این تحقیق مقدار انرژی ورودی سازه و مقدار انرژی تلف شده توسط میراگر اصطکاکی پال در شرایط با و بدون



شکل ۵. نرخ تغییر مکان جانبی بام سازه ۴، ۸ و ۱۲ طبقه

Fig. 5. Roof lateral displacement ratios of the 4-, 8-, and 12-story structures



شکل ۶. نرخ حداکثر دررفت سازه ۴، ۸ و ۱۲ طبقه

Fig.6. Maximum drift ratio of the 4-, 8-, and 12-story structures

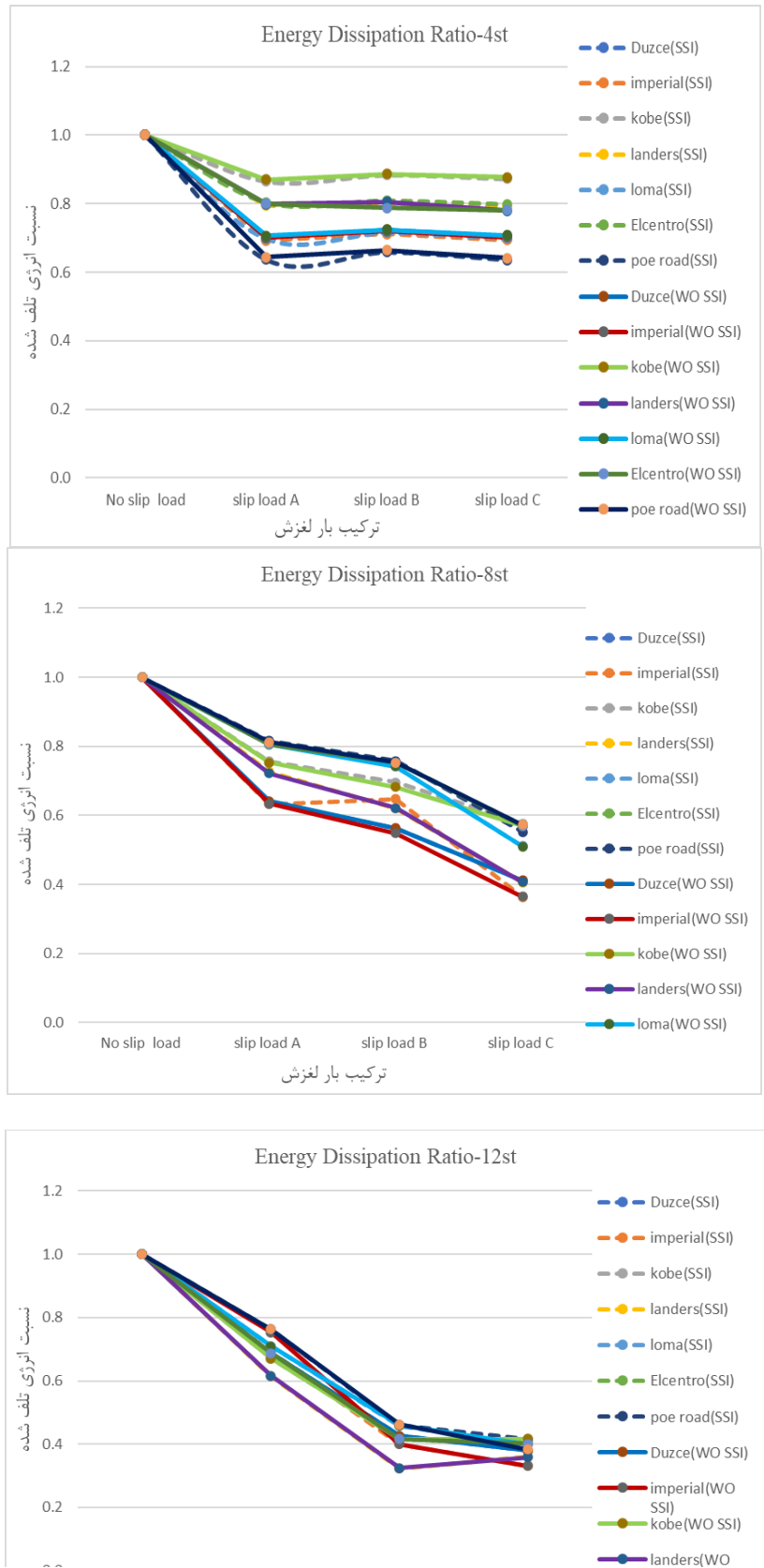
- با افزایش تعداد طبقات تاثیر مستقیم اندرکنش خاک و سازه بر افزایش میزان جابجایی طبقه بام تا ۲۷ درصد در شتاب‌نگاشت‌ها وجود دارد.
- برای تعیین نیروی لغزش بهینه ارتفاع سازه پارامتر تاثیرگذار است. به طوری که در سازه ۴ طبقه نسبت جابجایی بام برای ترکیب بارها تقریباً یکسان می‌باشد.
- در خصوص نسبت دریافت پایه در کلیه سازه‌ها تاثیرپذیری نسبت دریافت از ترکیب بار انتخابی بیشتر شده و در ترکیب بار A بهینه‌ترین حالت ممکن برای نسبت دریافت رخ داده است. همچنین اثر اندرکنش خاک و سازه در زلزله‌های Loma, Landers و Poeroad سبب افزایش نسبت دریافت سازه تا ۵ درصد و در سایر شتاب‌نگاشت‌ها سبب کاهش نسبت دریافت سازه تا ۱۵ درصد گردیده است. در سازه ۱۲ طبقه در شتاب‌نگاشت‌های Poeroad, Kobe, Elcentro, Loma و ترکیب بار لغزش A سبب کمینه شدن نسبت دریافت و در سایر شتاب‌نگاشت‌ها ترکیب بار لغزش C سبب کمینه شدن این نسبت شده است.
- در ترکیب بار لغزش A با افزایش ارتفاع سازه نوعی ثبات و نزدیکی نسبت‌های دریافت در همه شتاب‌نگاشت‌ها ملاحظه می‌شود و پراکندگی نسبت دریافت، حداقل است که نشان می‌دهد سازه تحت این بار لغزش در شرایط زلزله‌های مختلف رفتار تقریباً یکسانی بروز می‌دهد و قابل پیش‌بینی‌تر خواهد بود.
- سازه‌های ۸ و ۱۲ طبقه تحت ترکیب بار لغزش C بیشترین اتلاف انرژی (کمترین نسبت انرژی) به ترتیب ۳۸ و ۵۱ درصد را ثبت کرده‌اند که نشان می‌دهد این سازه‌ها تحت کلیه شتاب‌نگاشت‌ها با ترکیب بار لغزش C به خوبی عمل می‌کنند و حالتی بهینه برای بار لغزش میراگر اصطکاکی می‌باشد.
- در حالتی که اندرکنش خاک و سازه در نظر گرفته شود نسبت‌های انرژی کاهش یافته و طبیعتاً به علت انعطاف‌پذیر بودن تکیه گاه سازه در حالت اندرکنش خاک و سازه مقداری از انرژی ورودی علاوه بر اثر میراگرها به علت اندرکنش خاک و سازه تلف می‌شود و به ظرفیت لرزه‌ای سازه کمک می‌کند.
- نتایج به دست آمده برای قاب‌ها و زلزله‌های انتخاب شده صادق است ولی توصیه می‌شود که در تحقیقات آینده جامعه آماری بزرگ‌تری اتخاذ شود تا بتوان نتیجه جامع‌تری به دست آورد.

اندرکنش خاک و سازه محاسبه شده است. از مفهوم نیرو-جابجایی (کار و انرژی) و چرخه هیستریزیس مربوط به هر میراگر برای محاسبه این انرژی استفاده شده است. نسبت انرژی تلف شده در سازه مجهز به میراگر نسبت به سازه بدون میراگر با و بدون لحاظ اندرکنش خاک و سازه برای الگوهای مختلف بار لغزش در شکل ۷ برای سازه‌های ۴، ۸ و ۱۲ طبقه آمده است. با افزایش تعداد طبقات تاثیر الگوهای بار لغزش بر افزایش اتلاف انرژی مشاهده می‌شود. در سازه ۴ طبقه نسبت اتلاف انرژی تقریباً ثابت می‌باشد ولی در سازه‌های ۸ و ۱۲ طبقه الگوی مثلثی تجمعی C بیشترین اتلاف انرژی را نتیجه داده است و برای هر دو حالت با و بدون لحاظ اندرکنش خاک و سازه بهینه می‌باشد.

۴- نتیجه‌گیری

عموماً زلزله‌های شدید صدمات جبران‌ناپذیری به سازه‌ها وارد می‌کنند و انرژی ورودی بالایی را به سازه‌ها در مدت زمان مشخصی اعمال می‌کنند. این نیروها در سازه‌ها باید توسط سیستم‌هایی مهار و جذب شوند که سیستم‌های کنترل لرزه‌ای نامیده می‌شوند که در این مقاله از سیستم غیرفعال میراگر اصطکاکی پال استفاده شد. مهم‌ترین عامل در طراحی و استفاده از این میراگرها تعیین نیروی لغزش بهینه آن می‌باشد. برای عملکرد بهینه میراگرها این نیرو نباید خیلی کم یا زیاد انتخاب شود. روش‌های مختلفی برای محاسبه این نیرو ارائه شده است که دقیق‌ترین آن‌ها روش‌های بر پایه تحلیل‌های غیرخطی هستند. در این مقاله برای تعیین نیروی لغزش بهینه میراگرهای اصطکاکی از شاخص عملکرد لرزه‌ای که ترکیبی از شاخص‌های جابجایی بام، برش پایه و اتلاف انرژی میراگر می‌باشد، استفاده شده است که سه ترکیب بار مختلف برای بار لغزش میراگر به کمک آن لحاظ شد. در این پژوهش سه قاب ۴، ۸ و ۱۲ طبقه مجهز به میراگر اصطکاکی پال با و بدون لحاظ اندرکنش خاک و سازه تحت ۷ شتاب‌نگاشت تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی شد و با در نظر گرفتن پارامترهای تغییر مکان جانبی بام، حداکثر دریافت سازه و اتلاف انرژی، تأثیر اندرکنش خاک و سازه بر الگوی بهینه بار لغزش میراگر اصطکاکی بررسی شد، که خلاصه نتایج به دست آمده به شرح زیر می‌باشد:

- در خصوص نسبت جابجایی بام در سازه مجهز به میراگر به سازه بدون میراگر، نسبت جابجایی در کلیه گروه‌های سازه‌ای تحت ترکیب بار A کمترین نسبت را داراست.



شکل ۷. نرخ اتلاف انرژی در سازه ۴، ۸ و ۱۲ طبقه.

Fig. 7. Energy dissipation rate in the 4-, 8-, and 12-story structures

- [10] P.H. Sarjou, N. Shabakhty, Effect of the improved pall friction damper on the seismic response of steel frames, *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 7(4) (2017) 1833-1837.
- [11] F. Taiyari, F.M. Mazzolani, S. Bagheri, Damage-based optimal design of friction dampers in multistory chevron braced steel frames, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 119 (2019) 11-20.
- [12] M. Moradi, H. Tavakoli, Assessment of Energy Balance on Steel Structure with Pall Damper under Blast Loading, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 52(10) (2019) 2-2.
- [13] V. Barzegar, S. Laflamme, A. Downey, M. Li, C. Hu, Numerical evaluation of a novel passive variable friction damper for vibration mitigation, *Engineering Structures*, 220 (2020) 110920-110920.
- [14] H. Jarrahi, A. Asadi, M. Khatibinia, S. Etedali, Optimal design of rotational friction dampers for improving seismic performance of inelastic structures, *Journal of Building Engineering*, 27 (2020) 100960-100960.
- [15] I.H. Mualla, Parameters influencing the behavior of a new friction damper device, in, *International Society for Optics and Photonics*, 2000, pp. 64-74.
- [16] N. Nabid, I. Hajirasouliha, M. Petkovski, A practical method for optimum seismic design of friction wall dampers, *Earthquake Spectra*, 33(3) (2017) 1033-1052.
- [17] E. Zamani Beydokhti, A.M. Taghavi, H. Kouhestanian, Probabilistic seismic Assessment of RC buildings with considering the effect of soil structure interaction, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 53(5) (2021) 21-21.
- [18] A.H. Jafarieh, M.A. Ghannad, The Effects of Nonlinear Behavior of Soil and Foundation Uplift on Seismic Response of Inelastic SDOF Structures, *Journal of Structural and Construction Engineering*, (2019).
- [1] B.A. Bolt, Seismic input motions for nonlinear structural analysis, *ISET journal of earthquake technology*, 41(2) (2004) 223-232.
- [2] S. Akhondzade, A.H. Hasaniye, M.R. Mashayekhi, Investigation of active algorithm in structures equipped with tuned mass damper (TMD), in, *Pardisan Higher Education Institute*, 3282 (In Persian), Babolsar, 1391.
- [3] C. Pasquin, N. Leboeuf, R.T. Pall, A. Pall, Friction dampers for seismic rehabilitation of Eaton's building, Montreal, in, 2004, pp. 1-2.
- [4] L.M. Moreschi, M.P. Singh, Design of yielding metallic and friction dampers for optimal seismic performance, *Earthquake engineering & structural dynamics*, 32(8) (2003) 1291-1311.
- [5] J. Vaseghi, S. Navaei, B. Navayinia, F. Roshantabari, A parametric assessment of friction damper in eccentric braced frame, *International Journal of Civil and Environmental Engineering*, 3(10) (2009) 361-365.
- [6] L. Tirca, J.D. Morales, G.L. Guo, L. Chen, Optimal design of friction dampers for multistorey buildings, in, 2010.
- [7] J. Vaseghi Amiri, H. Rahimi, Investigation of Optimal Slip Percentage of Pall Friction Dampers in Steel Buildings Improved with Dampers Based on Energy Concepts, in, *Iranian Association of Steel Structures (In Persian)*, Tehran, 1391.
- [8] M. Mohamadniya, J. Vaseghi Amiri, Investigation of the effect of removing Pall friction dampers in steel frame floors with cross bracing with constant slip force distribution, in, *Tabriz Association of Architects (In Persian)*, Tabriz, 1391.
- [9] L.F.F. Miguel, L.F.F. Miguel, R.H. Lopez, Robust design optimization of friction dampers for structural response control, *Structural Control and Health Monitoring*, 21(9) (2014) 1240-1251.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

F. Rafie, H. Hamidi, J. Vaseghi Amiri, *Determining the Optimal Slip Load Pattern of Pall Friction Dampers considering Soil-Structure interaction*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 54(2) (2022) 793-808.

DOI: 10.22060/ceej.2021.19102.7068

