

بهینه‌سازی توزیع بار لغزش میراگرهای اصطکاکی در ارتفاع قاب‌های خمشی فولادی با استفاده از الگوریتم تغییر شکل‌های یکنواخت

علیرضا عباس‌زاده (نویسنده مسئول)، عضو هیئت علمی دانشگاه ایلام،

a.abaszadeh@ilam.ac.ir

نسرین بسطامی، دانش‌آموخته کارشناسی عمران، دانشگاه ایلام

چکیده: روش معمول در طراحی سازه‌های مجهز به میراگرهای اصطکاکی توزیع یکنواخت بار لغزش محاسبه شده در ارتفاع سازه می‌باشد. در این مقاله نشان داده می‌شود، چنانچه بار لغزش میراگرها به‌عنوان کلیدی‌ترین مشخصه طراحی، در تمامی طبقات به‌طور یکنواخت توزیع شود، جابه‌جایی‌های مورد نیاز در طبقات به‌طور یکنواخت توزیع نمی‌شود؛ بنابراین الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر تغییر شکل‌های یکنواخت، بر روی مدل‌های قاب خمشی فولادی مجهز به میراگر اصطکاکی ۳، ۵ و ۱۰ طبقه اعمال شده است. با مقایسه نتایج در دو حالت توزیع یکنواخت و بهینه بار لغزش مشاهده شد که رفتار چرخه‌ای میراگرها در استهلاک انرژی زلزله بهبود یافته است. همچنین با توزیع بهینه‌ی بار لغزش در ارتفاع سازه‌ها، اندیس خرابی سازه به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد.

کلمات کلیدی: بهینه‌سازی، میراگر اصطکاکی، بار لغزش، تغییر شکل‌های یکنواخت، زلزله.

۱- مقدمه

انرژی لرزه‌ای و محافظت سازه در برابر نیروی زلزله به‌شمار می‌رود. مکانیسم اتلاف انرژی در این نوع ابزار، به‌صورت مکانیکی و با تبدیل انرژی جنبشی اعمالی به سازه به انرژی حرارتی (که طی غلبه بر نیروی اصطکاک به وجود می‌آید) و انرژی هیستریزس که ناشی از منحنی نیرو - تغییر مکان در میراگر می‌باشد. در دهه‌های اخیر انواع گوناگونی از میراگرهای اصطکاکی نظیر پال، سومیتومو، فلوردانیل، اتصالات اصطکاکی و میراگر اصطکاکی دورانی معرفی شدند. میراگر اصطکاکی پال به‌عنوان قدیمی‌ترین و معروف‌ترین ابزار در بین این نوع میراگرها است که توسط پال و مارش در سال ۱۹۸۲ معرفی شد [۱]. سایر میراگرهای اصطکاکی موجود نیز با توجه به جزئیات سطوح لغزشی و اتصالات، از

در هنگام وقوع زلزله‌های شدید مقدار زیادی انرژی جنبشی به سازه وارد می‌شود و آن را با دامنه‌ای متناسب با انرژی اعمالی به عقب و جلو می‌کشاند. امروزه فلسفه‌ی بیشتر روش‌های طراحی جهت کاهش خسارت به سازه در برابر انرژی لرزه‌ای، مستهلک کردن بخش اعظم انرژی با ایجاد تغییر شکل‌های غیر الاستیک بدون استفاده از ظرفیت الاستیک مصالح سازه می‌باشد. یکی از روش‌های دستیابی به این هدف، استفاده از میراگرهای اصطکاکی است. این نوع میراگرها با داشتن مزایایی چون قابلیت قابل‌ملاحظه در اتلاف انرژی در مقایسه با سایر میراگرها، با ایجاد چرخه‌های پایدار در برابر بارهای سیکلی و همچنین عدم حساسیت به تغییرات دما و مکانیسم ساده، ابزاری مناسب جهت اتلاف

محتوای فرکانسی و دامنه‌ی حرکت زمین نیز در توزیع بار لغزش دخیل است؛ بنابراین روش ساده شده‌ی طیف طرح بار لغزش را جهت ارزیابی سریع توزیع بهینه‌ی بار لغزش ارائه کردند که در آن توزیع بار لغزش علاوه بر پیوند سازه، تابع پیوند خاک و ناحیه‌ی لرزه‌خیزی منطقه نیز می‌باشد [۳]. این محققان در تمام روش‌های ارائه شده در مطالعات خود، توزیع یکنواخت بار لغزش میراگرهای اصطکاکی در ارتفاع سازه را به‌عنوان توزیع بهینه‌ی بار لغزش معرفی کردند.

مورسچی و سینگ [۴] در سال ۲۰۰۳ بهینه‌سازی پارامترهای طراحی میراگرهای اصطکاکی و فلزی جاری شونده را در قاب‌های خمشی ساختمانی مورد مطالعه قرار دادند. این پارامترها شامل بار لغزش، سختی سیستم میراگر و جابه‌جایی تسلیم بوده است. آنان طی تحقیقات خود دریافتند که به دلیل رفتار غیرخطی این میراگرها، استفاده از روش‌های کلاسیک بهینه‌سازی مبتنی بر گرادیان پیچیده است. لذا روش جستجوی الگوریتم ژنتیک (GA) را با تعریف تابع تک‌هدفه بر اساس حداکثر پاسخ شتاب طبقات معرفی کردند که نتایج آن منجر به توزیع بهینه‌ی مشخصات میراگرها در ارتفاع سازه و به‌تبع آن عملکرد بهینه‌ی لرزه‌ای سازه و بهبود کارایی میراگرها در طبقات در اتلاف انرژی زلزله گردید.

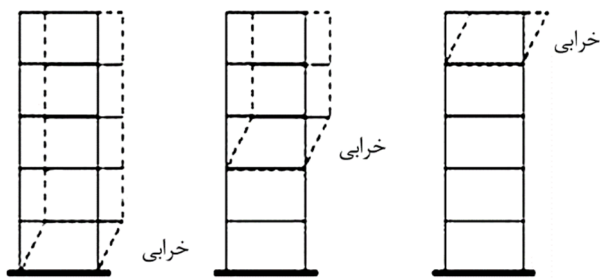
لی و همکاران [۵] در سال ۲۰۰۸ با مطالعه روی پنج قاب ساختمانی با پیوندهای مختلف، مطالعات کامل‌تری بر روی بهینه‌سازی پارامترهای سیستم میراگر اصطکاکی در سازه‌های ساختمانی الاستیک انجام دادند. آنان در این بررسی از روش‌های بهینه‌سازی مبتنی بر جستجو (GA,SSSA) به دلیل نیاز به انجام تحلیل‌های دینامیکی طولانی و زمان‌بر استفاده نکردند. بلکه روشی بر اساس نیروی برشی طبقات برای تعیین و توزیع بار لغزش و همچنین تعداد و مکان بهینه میراگرها در طبقات مختلف سازه بهره گرفتند. آنان در خلال مطالعه‌ی خود نشان دادند

هم متمایز می‌شوند. در قاب‌های ساختمانی، انواع این میراگرها در محل تقاطع مهاربندهای ضربدری، قطری تک و بالای مهاربند شورون قابل نصب می‌باشد. این میراگر شامل چند سری ورقه‌های فولادی به‌گونه‌ای ساخته شده است که دارای بیشترین سطح اصطکاک بوده و به‌وسیله‌ی پیچ‌های پر مقاومت فولادی به یکدیگر بسته شده‌اند و تحت اثر نیروی مشخصی شروع به لغزش می‌کند. عملکرد این میراگرها طوری است که حین زلزله‌های شدید، به‌محض تحمیل تغییر شکل جانبی به سازه، میراگرها قبل از وارد شدن مهاربندها و اعضای اصلی سازه به محدوده‌ی غیر ارتجاعی فعال شده و قسمت اعظم انرژی ورودی زلزله را به واسطه‌ی اصطکاک مستهلک می‌کنند و با تغییر پیوند اصلی سازه از ایجاد پدیده شدید جلوگیری می‌کند. به این ترتیب، به دلیل بالا بودن میزان اتلاف انرژی این میراگرها از طریق رفتار هیسترتیک، نیروهای وارده به سازه به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد.

در سازه‌های مجهز به میراگر اصطکاکی حتی در صورت الاستیک ماندن اعضا، رفتار سازه به‌شدت غیرخطی خواهد بود. طراحی میراگر اصطکاکی بر اساس میزان بار لغزشی است که به آن اختصاص داده می‌شود که نقش مؤثری در عملکرد لرزه‌ای و رفتار غیرخطی سازه‌ها دارد؛ در واقع سختی و مقاومت ایجاد شده در سازه به بار لغزش میراگر بستگی دارد.

فیلیاترولت و چری [۲] در سال ۱۹۸۹ با در نظر گرفتن قاب‌های گوناگون و انجام تحلیل دینامیکی تحت رکورد زلزله‌های مختلف با فرض الاستیک ماندن اعضای سازه با استفاده از یک الگوریتم بر اساس تئوری انرژی با حداقل کردن انرژی کرنشی الاستیک در اعضای اصلی سازه در حین زلزله، روشی برای توزیع بهینه‌ی بار لغزش میراگرها در طبقات سازه ارائه کردند. این محققان در سال ۱۹۹۰ با انجام مطالعات پارامتریک بر روی پیوند طبیعی و محتوای فرکانسی زلزله‌ها پی بردند که نه‌تنها خصوصیات سازه، بلکه

طبقات متمرکز گردد. به عبارت دیگر زمانی که بعضی از اعضای سازه‌ای به حداکثر ظرفیت لرزه‌ای خود رسیده‌اند، در بخش‌های دیگر سازه، جابه‌جایی‌های نیاز هنوز به مقدار ظرفیت لرزه‌ای مجاز نرسیده است. این موضوع بیانگر آن است که از تمام ظرفیت مصالح مصرفی در سازه استفاده نشده است [۸].



شکل (۱): انواع مختلف حالت‌های ایجاد طبقه نرم [۸]

مقدم [۹] و کرمی [۱۰] در مطالعات خود نشان دادند که چنانچه توزیع عوامل مقاومت و سختی در سازه را به‌گونه‌ای تغییر داد که مصالح به تدریج از قسمت‌های بدون استفاده به قسمت‌های مورد نیاز انتقال یابد، بهینه‌ترین حالت توزیع سختی و مقاومت که در واقع رسیدن به توزیع یکنواخت تغییر شکل‌ها در طبقات می‌باشد، حاصل می‌شود. به این تئوری بهینه‌سازی «تئوری تغییر شکل‌های یکنواخت» گفته می‌شود. با توجه به سادگی و کاربردی بودن روش تئوری تغییر شکل‌های یکنواخت تاکنون تحقیقات زیادی با استفاده از این روش انجام شد. به‌عنوان نمونه مقدم و حاجی‌رسولی‌ها [۱۱]، با تغییر سطح مقطع مهاربندها به‌عنوان عامل مؤثر در سختی و مقاومت، الگوی توزیع بهینه‌ی سختی و مقاومت را در قاب‌های مهاربندی شده هم‌مرکز با استفاده کردن از این روش به دست آوردند. همچنین مقدم و عباس‌نژاد [۱۲] با رویکرد به مطالعه‌های قبلی روش بهینه‌سازی تغییر شکل‌های یکنواخت با تغییر سطح مقطع ستون‌ها، برای بهبود رفتار لرزه‌ای قاب‌های خمشی فولادی برگزیدند. روش بهینه‌سازی تغییر شکل‌های یکنواخت، پایه‌ی

که توزیع بار لغزش متناسب با نیروی برشی طبقه در کاهش گریز بین طبقه‌ای، بسیار مؤثرتر از توزیع یکنواخت بار لغزش در طبقات است.

آپوستولاکیس و دارگوش [۶] در سال ۲۰۱۰ طراحی لرزه‌ای بهینه‌ی قاب‌های خمشی با سیستم میراگرهای اصطکاکی به همراه مهاربند را مورد مطالعه قرار دادند. متغیرهای بهینه‌سازی شامل نیروی لغزش میراگرها و سختی مهاربند مد نظر قرار گرفت. آنان برای حل مسئله‌ی بهینه‌سازی از الگوریتم ژنتیک و برای ارزیابی پاسخ سازه‌ی بهینه شده از جذر مجموع مربعات گریز و شتاب طبقات استفاده کردند. نتایج حاصل از مقایسه‌ی سازه‌ها در دو حالت قبل و بعد از طراحی بهینه پارامترهای فوق‌الذکر نشان داد که علاوه بر کاهش پاسخ سازه توزیع کمیت‌های شتاب، گریز و به‌تبع آن شکل‌پذیری در طبقات نیز یکنواخت‌تر می‌گردد.

فلاح و هنرپرست [۷] در سال ۲۰۱۳ مفهوم بهینه‌سازی چند هدفه را در بهبود عملکرد میراگرهای اصطکاکی جهت کاهش پاسخ لرزه‌ای در یک قاب ساختمانی ده طبقه مورد مطالعه قرار دادند. در این بررسی توزیع بار لغزش میراگرها را با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک با چیدمان غیر مغلوب (NSGA-II) چند هدفه با به‌کارگیری سه تابع هدف مختلف مربوط به برش پایه، شتاب و جابجایی ماکزیمم طبقه بام انجام دادند. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که با توزیع بهینه‌ی نیروی لغزش در طبقات مختلف سازه، کارایی میراگرهای اصطکاکی در کاهش ارتعاشات لرزه‌ای افزایش می‌یابد.

در زلزله‌های رخ داده در سال‌های اخیر ساختمان‌هایی که دارای توزیع نامناسبی از سختی و مقاومت بودند، عملکرد ضعیفی در زلزله‌های شدید از خود نشان دادند. این توزیع نامناسب سختی و مقاومت در طبقات موجب به وجود آمدن طبقه‌ی نرم در سازه گردیده و سازه دچار خرابی کلی می‌شود (شکل ۱). نامناسب‌ترین حالت توزیع مقاومت و سختی، حالتی است که در آن نرمی و یا گریز تنها در برخی

۲- هندسه مدل‌ها و فرضیات

برای انجام پژوهش مطابق شکل (۳) از مدل‌های قاب خمشی دو بعدی فولادی ۳، ۵ و ۱۰ طبقه‌ی مجهز به میراگر اصطکاکی نصب شده بر روی مهاربندهای ۸ شکل (شورون) استفاده گردیده است. در این مدل‌ها طول دهانه، ارتفاع طبقات و عرض باربر آن‌ها مشابه مشخصات ساختمان‌های متعارف به ترتیب ۵، ۳ و ۵ متر می‌باشد.

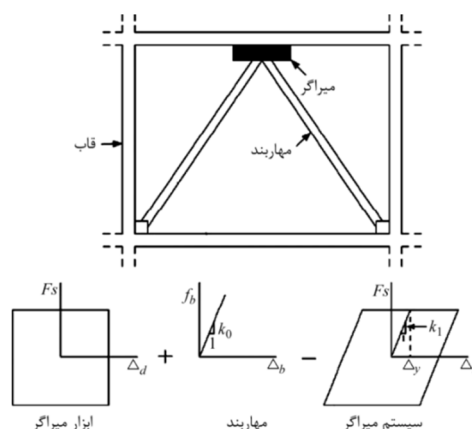
در قاب‌های خمشی مجهز به میراگر اصطکاکی، سیستم میراگر اصطکاکی خود شامل ابزار میراگر و مهاربند می‌باشد. شکل (۲) رفتار دوخطی سیستم میراگر اصطکاکی، حاصل از عمل سری رفتار پلاستیک کامل- صلب میراگر اصطکاکی و الاستیک اعضای مهاربند را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه مهاربندها نباید قبل از لغزش میراگرها وارد حوزه‌ی غیرخطی شوند، نقطه‌ی تسلیم این المان ترکیبی متناظر با بار لغزش است که میراگر اصطکاکی تحت آن نیرو شروع به استهلاک انرژی می‌کند و جابه‌جایی تسلیم که برابر نسبت بار لغزش به سختی مهاربند می‌باشد. سیستم میراگر خود نیز با قاب خمشی به صورت موازی عمل می‌کند. در حالت کلی با فرض عدم تسلیم اعضای قبل از لغزش میراگر، جابه‌جایی تسلیم طبقه معادل جابه‌جایی تسلیم سیستم میراگر (ابزار میراگر + مهاربند) خواهد بود.

رفتار تمامی اعضای سازه به‌غیر از میراگرها به‌صورت خطی فرض شده است. نحوه‌ی تعیین مشخصه‌ی بار لغزش میراگرها به ترتیبی که در ادامه می‌آید و کنترل انجام شده بر روی اعضای قاب، این فرض را برآورده می‌سازد. با تعریف و اختصاص مفاصل پلاستیک به مهاربندها، تیر و ستون‌ها در تمام مراحل بهینه‌سازی صحت این فرض کنترل می‌شود. برای مدل کردن رفتار غیر ارتجاعی میراگرهای اصطکاکی از مدل دو خطی الاستوپلاستیک استفاده شده است. سختی اولیه‌ی میراگر اصطکاکی در حالت رفتار ایده‌آل کولمب بی‌نهایت می‌باشد و بعد از وقوع لغزش نیز سختی به‌طور کامل صفر می‌شود. در عمل به‌دلیل عدم

پژوهش‌های زیادی بوده است که هر یک کاربردهای گوناگونی از آن را نشان داده است. این روش یک روش بهینه‌یابی سریع و مناسب است که کارایی خود را در حل مسئله‌ی بهینه‌سازی نشان داده است.

در این پژوهش نشان داده می‌شود که در قاب‌های خمشی فولادی مجهز به میراگرهای اصطکاکی چنانچه بار لغزش میراگرها به‌عنوان مهم‌ترین مشخصه‌ی طراحی آنها، در ارتفاع سازه به‌طور یکنواخت توزیع شود، نرمی و یا جابه‌جایی‌های نیاز در طبقات به‌طور یکنواخت توزیع نمی‌شود؛ به‌عبارت دیگر مصالح بکار رفته در میراگرها به‌صورت بهینه در ارتفاع سازه توزیع نمی‌شود. لذا با ارائه‌ی یک الگوریتم بهینه‌سازی با کمک ایده‌ی یکنواختی تغییر شکل‌ها و با متغیر در نظر گرفتن بار لغزش به‌عنوان عامل مؤثر در سختی و مقاومت سازه، توزیع بهینه‌ی بار لغزش میراگرها در ارتفاع سازه به‌گونه‌ای انجام شود که سازه به هنگام زلزله‌های مختلف با صرف مصالح یکسان عملکرد لرزه‌ای بهتری داشته باشد.

نتایج حاصل از این مطالعه برای هر نوع میراگر اصطکاکی که مطابق شکل (۲) در داخل قاب خمشی زیر تیر طبقه و بر روی مهاربند شورون قابل نصب بوده و عملکرد آن به‌گونه‌ای باشد که با ایجاد اصطکاک تحت اثر نیروی جانبی برشی منجر به حرکت میراگر و ایجاد لغزش در آن شود، صادق می‌باشد.



شکل (۲): مدل رفتاری قاب مجهز به میراگر اصطکاکی.

شده است. برای حذف اثر پارامترهای حداکثر شتاب زمین رکوردهای انتخاب شده شتاب حداکثر تمامی شتاب‌نگاشت‌ها بر اساس شتاب منطقه به شتاب حداکثر $0.35g$ مقیاس شده است. در همه‌ی تحلیل‌های تاریخچه زمانی غیر خطی، نسبت میرایی رایلی ۵ درصد منظور شده است.

جدول (۱): مشخصات شتاب‌نگاشت‌های به کار رفته در تحقیق.

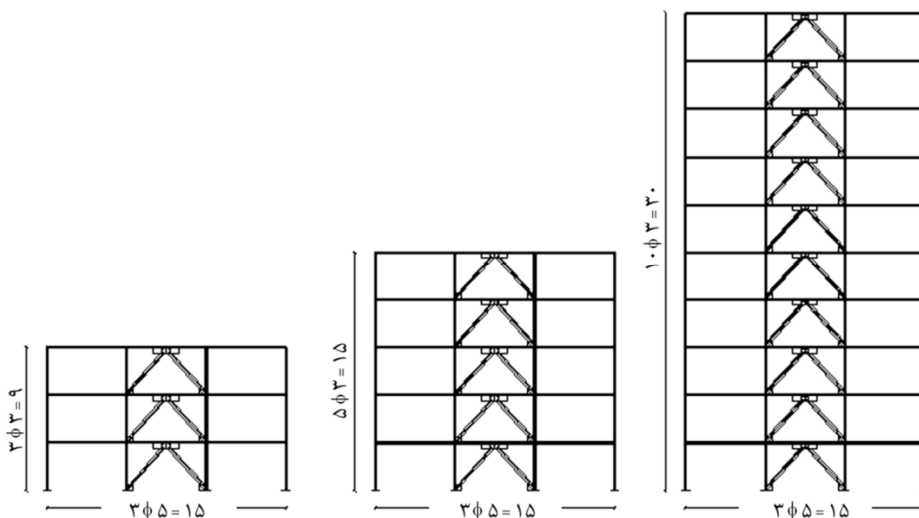
USGS	PGA	M	ایستگاه	زلزله
C	۰/۸۵g	۷/۴	TAB-TR	طیس
C	۰/۶۶g	۷/۱	PET090	کیپ موندوسینو
C	۰/۴۴g	۶/۱	C02065	پارک فیلد

۳- تعیین مقادیر اولیه بار لغزش میراگرها

همان‌گونه که پیشتر ذکر شد، مهم‌ترین پارامتر در طراحی میراگرهای اصطکاکی بار لغزش و سختی و مقاومت ایجاد شده در سازه به آن وابسته است. در این مقاله برای تخمین اولیه بار لغزش میراگرها از روش طیف طرح بار لغزش پیشنهادی توسط فیلیاترولت و چری [۳] استفاده شده است. لازم به ذکر است که این مقادیر اولیه فقط حکم نقطه‌ی شروع الگوریتم بهینه‌سازی ارائه شده را دارد و هر تخمین منطقی دیگر با الگوی توزیع یکنواخت می‌توانست به کار رود.

صلبیت اجزا و اتصالات میراگر، سختی اولیه قبل از لغزش بی‌نهایت تئوری نبوده ولی مقدار بسیار بزرگی است. در این پژوهش مطابق توصیه‌ی شرکت سازنده میراگرهای اصطکاکی پال، سختی الاستیک میراگر بر حسب واحد کیلو نیوتن بر متر در حدود ۱۰۰۰ برابر بار لغزش میراگر بر حسب کیلو نیوتن فرض شده و نسبت سختی بعد از تسلیم به سختی الاستیک نیز 0.0001 در نظر گرفته شده است. در واقع با این فرض برای سختی اولیه، تغییر شکل‌های الاستیک اجزای میراگر در آستانه‌ی لغزش یک میلی‌متر در نظر گرفته می‌شود.

در این تحقیق از نرم‌افزار SAP2000 [۱۳] برای مدل‌سازی و تحلیل و از مباحث ششم [۱۴] و دهم [۱۵] مقررات ملی ساختمان جهت بارگذاری و طراحی اولیه‌ی اعضای اصلی سازه‌ای مدل‌ها استفاده شده است. بار مرده و زنده‌ی قاب‌ها با فرض کاربری مسکونی به ترتیب ۵۰۰ و ۲۰۰ کیلوگرم بر مترمربع منظور شده است. شتاب‌نگاشت‌های انتخابی برای انجام تحلیل‌های دینامیکی تاریخچه زمانی همگی ثبت شده بر روی خاک نوع III (C) هستند، تا با فرض صورت گرفته برای نوع زمین در طراحی لرزه‌ای قاب‌ها سازگار باشند و از لحاظ محتوای فرکانسی نیز متنوع باشند. مشخصات کامل رکوردهای مورد استفاده در جدول (۱) آورده



شکل (۳): هندسه مدل‌های دو بعدی به کار رفته در این پژوهش.

نسبی لرزه‌خیزی خیلی زیاد و خاک نوع III در نظر گرفته شده است. مقادیر اولیه‌ی حاصل برای بار لغزش میراگرها با توزیع یکسان در طبقات برحسب درصدی از وزن سازه (V_0/ma_g) در جدول (۲) آورده شده است. وزن قاب سه طبقه ۱۲۶ تن، پنج طبقه ۲۱۴ تن و ده طبقه ۴۲۳ تن است. شایان ذکر است که این تخمین اولیه فقط حکم نقطه‌ی شروع را دارند. این مقادیر اولیه‌ی بار لغزش در تمام طبقات در طی فرآیند بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ارائه شده در بخش بعد در طبقات مختلف اصلاح می‌شوند تا توزیع جابه‌جایی نسبی (گریز) برشی در طبقات یکسان گردد و توزیع بهینه بار لغزش در ارتفاع سازه حاصل شود. سپس نتایج توزیع نهایی (بهینه) حاصل از الگوریتم پیشنهادی این مقاله با توزیع اولیه (توزیع یکنواخت مطابق روش طیف طرح بار لغزش) مقایسه می‌گردد.

جدول (۲): مقادیر بار لغزش اولیه بر حسب درصدی از وزن سازه.

ده طبقه	پنج طبقه	سه طبقه	
۴۰٪	۵۰٪	۵۳٪	کل میراگرها
۴٪	۱۰٪	۱۷٪	هر میراگر

۴- اعمال الگوریتم بهینه‌سازی تغییر شکل یکنواخت

هدف اصلی در این پژوهش ارائه‌ی روشی جهت توزیع بهینه سختی و مقاومت در ارتفاع قاب‌های خمشی فولادی مجهز میراگرهای اصطکاکی برای دستیابی به تغییر شکل‌های برشی یکنواخت است. در این مقاله بار لغزش میراگرها به‌عنوان متغیر مؤثر در حجم مصالح مصرفی، سختی و مقاومت و گریز (جابه‌جایی نسبی) برشی طبقات مورد توجه قرار گرفته است. به‌عبارت‌دیگر تغییر در سختی و مقاومت فقط با تغییر بار لغزش میراگرها در طبقات انجام می‌گیرد. برای رسیدن به این هدف الگوریتم بهینه‌سازی پیشنهادی مبتنی بر تغییر شکل‌های یکنواخت به‌صورت زیر گام‌به‌گام انجام می‌شود. باید توجه نمود که در تمام مراحل اجرای الگوریتم مهاربندها وارد حوزه‌ی غیر ارتجاعی نشوند.

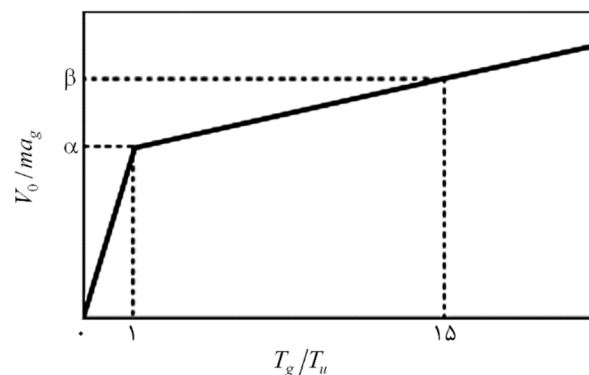
در این روش دو پارامتر بی‌بعد α و β مطابق روابط (۱) و (۲) تعریف می‌شود.

$$\alpha = (-1.24N_s - 0.31)T_b/T_u + 1.04N_s + 0.43 \quad (1)$$

$$\beta = (-1.07N_s - 0.1)T_b/T_u + 1.01N_s + 0.45 \quad (2)$$

در روابط بالا، N_s تعداد طبقات، T_u پریود غالب قاب خمشی اولیه و T_b پریود اصلی قاب خمشی مهاربندی شده است. با تعیین پارامترهای بی‌بعد فوق‌الذکر، نمودار طیف طرح بار لغزش مطابق شکل (۴) به‌صورت دو خطی خواهد بود. بدیهی است که بخش اول این نمودار مطابق رابطه‌ی ساده شده‌ی زیر خواهد بود:

$$V_0/ma_g = T_g/T_u \times \alpha \quad T_g/T_u \leq 1 \quad (3)$$



شکل (۴): نمودار طیف طرح بار لغزش [۳].

در شکل (۴) و رابطه (۳) m جرم سازه، a_g حداکثر شتاب زمین، T_g پریود غالب زمین و V_0 کل برش لغزش میراگرهاست. این برش کل به‌طور یکنواخت بین طبقات توزیع می‌شود تا سهم نیروی لغزش هر طبقه V_s به‌دست آید:

$$V_s = V_0/N_s \quad (4)$$

با توجه به زاویه‌ی قرارگیری میراگرها و تعداد آنها در هر طبقه، بار لغزش هر میراگر از توزیع V_s به‌دست می‌آید. برای یک میراگر نصب شده روی مهاربند شورون و زیر تیر طبقه، بار لغزش آن میراگر همان V_s خواهد بود.

برای مدل‌های سازه‌ای مورد تحلیل در این مقاله a_g برابر $0.35g$ و T_g برابر $0.17s$ (بر اساس مشخصات منطقه با خطر

$$[(F_s)_i]_{n+1} = [(F_s)_i]_n \left[\frac{(\Delta_{shi})_i}{\Delta_{avg}} \right]^\alpha \quad (6)$$

در رابطه‌ی (۶)، $(F_s)_i$ بار لغزش میراگر در طبقه i ام و n شماره گام مورد نظر می‌باشد. α توان تکرار که کمتر از واحد بوده و تنظیم‌کننده‌ی سرعت همگرایی می‌باشد. در این مطالعه برای توان α از مقدار 0.5 استفاده می‌شود تا همگرایی سریع و مطمئن صورت گیرد. لازم به ذکر است که برای مقایسه‌ی منطقی، مجموع کل بار لغزش در میراگرها در ارتفاع در توزیع اولیه (توزیع یکنواخت) و سازه‌ی جدید (توزیع بهینه) یکسان است.

۵- سازه با مشخصه‌های بار لغزش جدید در طبقات مختلف، دوباره تحت همان شتاب‌نگاشت تحلیل تاریخچه زمانی شده و به گام ۳ می‌رویم.

با انجام و تکرار مراحل بالا، در نهایت همگرایی حاصل شده و توزیع بهینه‌ی نیروی لغزش میراگر در طبقات مختلف سازه‌ی مورد نظر به دست می‌آید.

۵- نتایج و بحث

۵-۱- توزیع بهینه‌ی بار لغزش میراگرها

الگوریتم پیشنهادی بر روی مدل‌های در نظر گرفته شده در بخش ۲ اجرا شد تا بتوان کارایی آن را ارزیابی کرد. شکل (۵) مراحل همگرایی الگوریتم بهینه‌سازی و نحوه‌ی توزیع بار لغزش گام اول تا گام نهایی جهت دستیابی به گریز جانبی برشی یکنواخت در قاب خمشی ۱۰ طبقه تحت اثر زلزله کیپ موندوسینو را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود، برای رسیدن به توزیع بهینه‌ی بار لغزش در ارتفاع، به تدریج بار لغزش میراگرها در طبقات بالایی و پایینی که گریز برشی کمتر از مقدار میانگین دارند، کاسته شده و به طبقات میانی که این پارامتر بیشتر از میانگین است، افزوده می‌شود. این روند تا زمانی که حداکثر گریز برشی طبقات تا حد امکان یکنواخت گردد، ادامه می‌یابد. میزان یکنواختی گریز برشی طبقات با معیار ضریب تغییرات (COV) سنجیده می‌شود.

در صورت بروز این حالت عمل بهینه‌سازی متوقف شده و الگوی مربوط به آن گام به‌عنوان الگوی توزیع بهینه بار لغزش محسوب می‌شود.

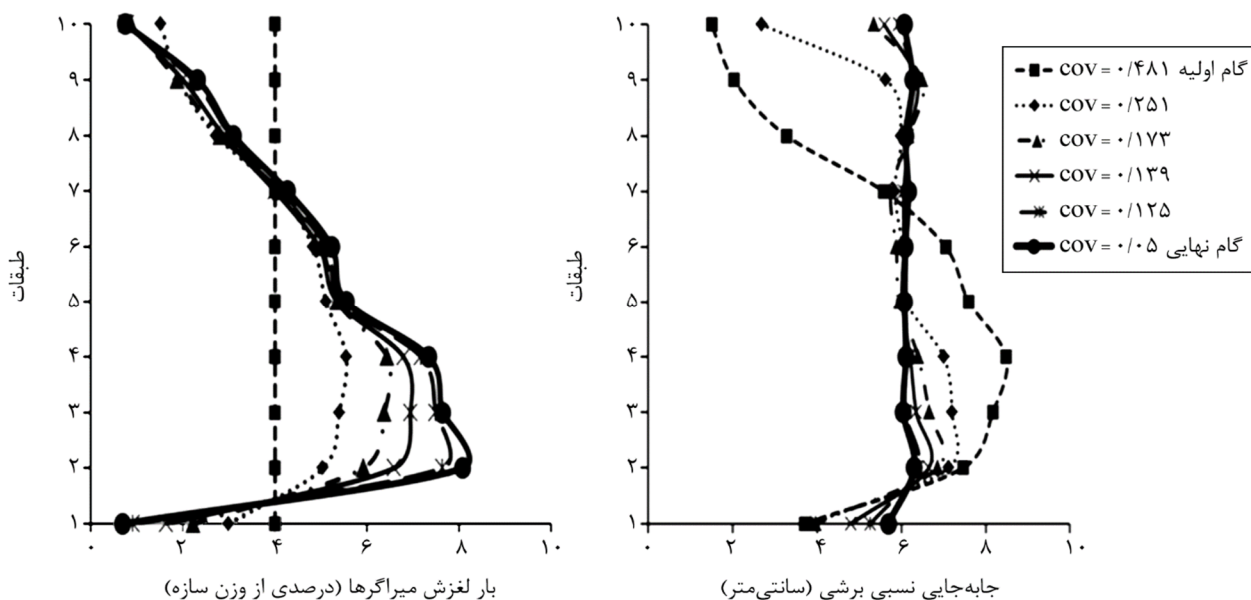
۱- ابتدا سازه‌ی مورد نظر به‌گونه‌ای طراحی می‌شود که بر اساس مبحث ششم مقررات ملی ساختمان [۱۴] و مبحث دهم مقررات ملی ساختمان [۱۵] برای ترکیب بارهای گرانشی و لرزه‌ای جوابگو باشد.

۲- مقادیر اولیه‌ی بار لغزش میراگر با استفاده از روش ساده شده‌ی طیف طرح بار لغزش مطابق توضیحات بخش ۳ و یا با هر روش منطقی دیگر انتخاب می‌شود. برای حل مثال‌های در نظر گرفته در این مقاله، مقادیر مذکور در جدول (۲) آورده شده است. مطابق روش فوق‌الذکر، بار لغزش اولیه میراگرها در تمامی طبقات یکسان است.

۳- از نتایج تحلیل دینامیکی غیرخطی سازه تحت شتاب‌نگاشت موردنظر، مقادیر حداکثر گریز برشی طبقات (Δ_{shi}) و میانگین گریز برشی طبقات (Δ_{avg}) به دست آمده و ضریب تغییرات (COV) گریز برشی طبقات از رابطه (۷) محاسبه می‌شود. چنانچه ضریب تغییرات به اندازه کافی کوچک نباشد ($COV \geq 0.05$)، روند بهینه‌سازی توزیع بار لغزش با رفتن به گام بعدی ادامه می‌یابد.

$$COV = \frac{1}{\Delta_{avg}} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta_{shi} - \Delta_{avg})^2} \quad (5)$$

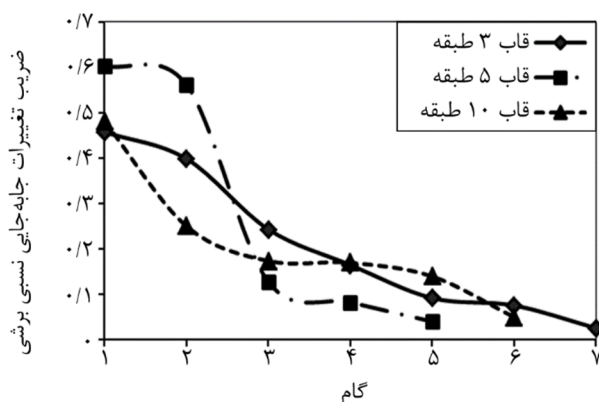
۴- در این گام بدون تغییر در سطح مقطع اعضای سازه، بار لغزش میراگرها از طبقاتی که گریز برشی آنها کمتر از مقدار میانگین است، کاسته و به طبقاتی که گریز برشی آنها بیشتر از مقدار میانگین دارند، افزوده می‌شود. به این ترتیب که بار لغزش و یا در حقیقت حجم مصالح مصرفی در کل میراگرهای ساختمان ثابت باقی می‌ماند و می‌توان ارزیابی منطقی‌تری صورت گیرد. برای همگرایی در محاسبات، این تغییرات باید به صورت تدریجی و با استفاده از رابطه (۶) انجام گیرد:



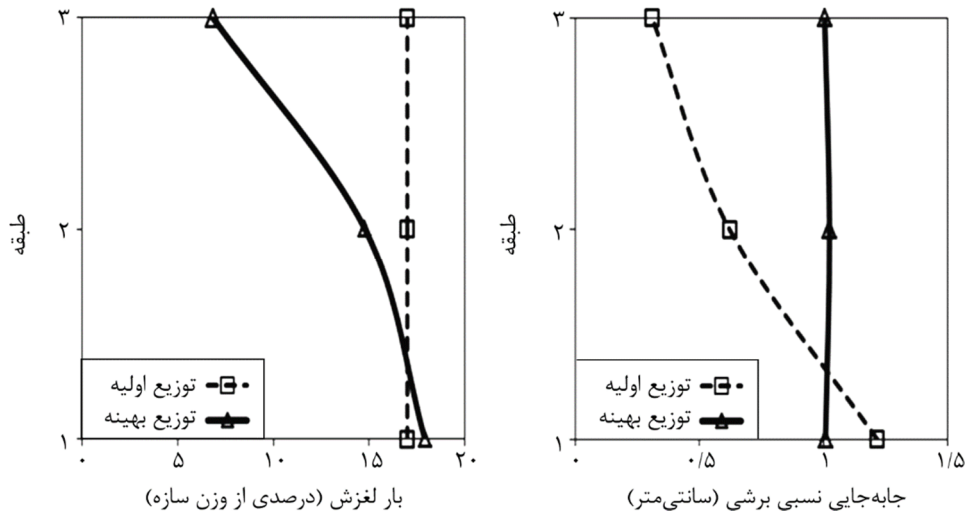
شکل (۵): نحوه‌ی همگرایی الگوریتم بهینه‌سازی و توزیع بار لغزش در قاب خمشی ۱۰ طبقه تحت اثر زلزله کیپ موندوسینو.

برای بررسی عملکرد و مقایسه‌ی بهتر فرآیند بهینه‌سازی، در شکل‌های (۷) تا (۹) نمودارهای گریز برشی طبقات و نحوه‌ی توزیع بار لغزش میراگرهای اصطکاکی بر حسب درصدی از وزن سازه برای قاب‌های خمشی فولادی ۳، ۵ و ۱۰ طبقه، در دو حالت توزیع اولیه مطابق روش طیف طرح با بار لغزش یکسان در طبقات مختلف و توزیع بهینه بار لغزش مطابق الگوریتم بهینه‌سازی پیشنهادی، آورده شده است. این نمودارها از متوسط‌گیری نتایج حاصل از تحلیل تاریخچه زمانی مدل‌ها، تحت سه شتاب‌نگاشت ذکر شده در بخش ۲ به‌دست آمده‌اند. با مشاهده‌ی نمودارهای شکل‌های یاد شده ملاحظه می‌شود، توزیع یکسان بار لغزش میراگرها در طبقات، موجب به وجود آمدن توزیع غیریکنواخت نرمی و گریز برشی در طبقات شده است؛ به‌طوری‌که برای قاب‌های خمشی ۳ و ۵ طبقه، گریز برشی در طبقات پایینی بیشتر و در طبقات بالایی کمتر از مقدار میانگین است و برای قاب خمشی ۱۰ طبقه گریز برشی، در طبقات میانی بیشتر و در طبقات بالایی و پایینی کمتر از مقدار میانگین است؛ اما بعد از اعمال الگوریتم بهینه‌سازی پیشنهادی گریز برشی در تمام طبقات یکنواخت شده و نحوه‌ی توزیع بهینه بار لغزش میراگرها در ارتفاع سازه متفاوت است.

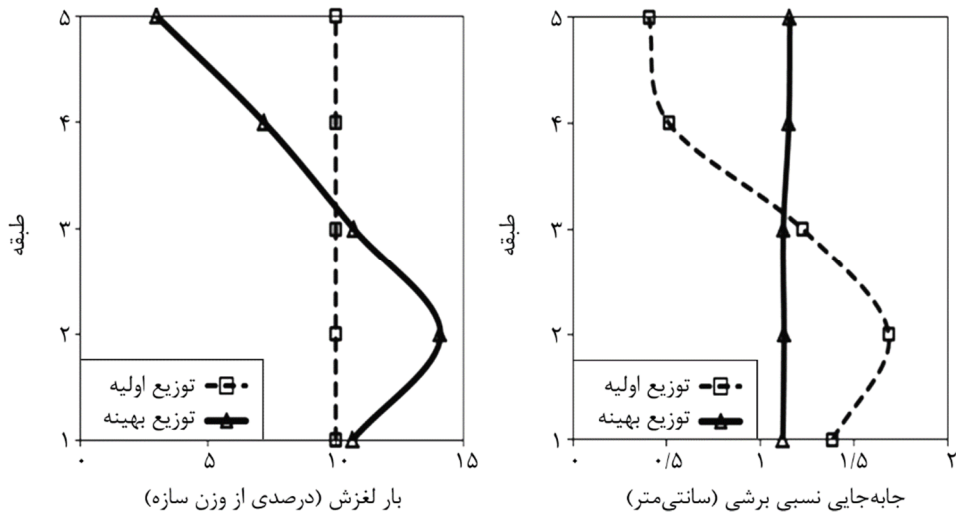
همچنین مشاهده می‌شود که در توزیع اولیه‌ی بار لغزش ضریب تغییرات بسیار بزرگ بوده $Cov=0.481$ که بیانگر توزیع غیر یکنواخت تغییر شکل‌ها در طبقات است؛ اما با تکرار چندین مرحله الگوریتم پیشنهادی و رسیدن به توزیع بهینه، ضمن تقلیل یافتن ضریب تغییرات $Cov=0.05$ توزیع تغییر شکل‌های برشی در طبقات تا اندازه‌ای یکنواخت شده است. در ادامه به‌منظور بررسی جامع‌تر، در شکل (۶) روند کاهش ضریب تغییرات گریز برشی طبقات از الگوی توزیع اولیه (گام اول) تا الگوی توزیع بهینه (گام نهایی) بار لغزش در سازه‌های قاب خمشی ۳، ۵ و ۱۰ طبقه تحت اثر زلزله‌ی کیپ موندوسینو نشان داده شده است.



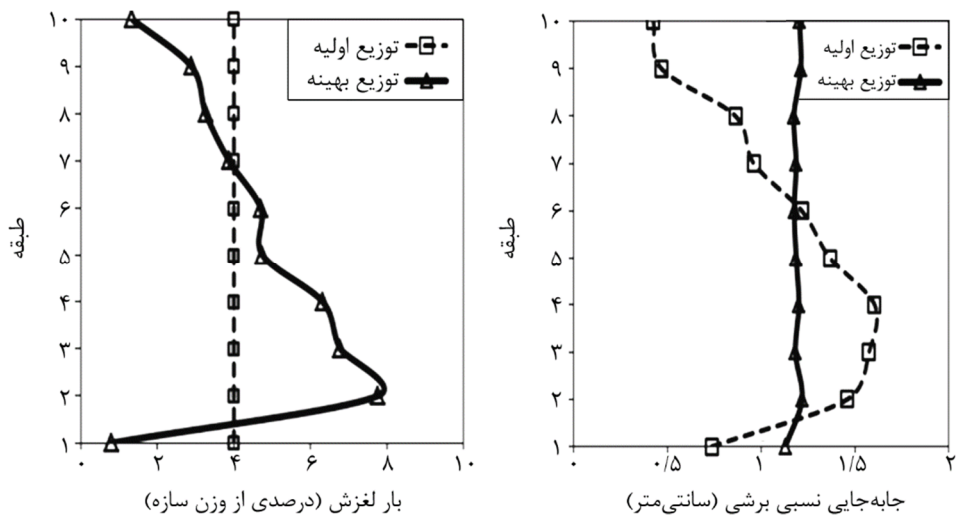
شکل (۶): تغییرات ضریب تغییرات گریز برشی از گام اول تا گام نهایی (توزیع بهینه) تحت زلزله کیپ موندوسینو.



شکل (۷): نمودارهای گریز برشی طبقات و بار لغزش میراگرهای قاب خمشی ۳ طبقه در توزیع اولیه و توزیع بهینه تحت میانگین سه شتاب‌نگاشت زلزله.



شکل (۸): نمودارهای گریز برشی طبقات و بار لغزش میراگرهای قاب خمشی ۵ طبقه در توزیع اولیه و توزیع بهینه تحت میانگین سه شتاب‌نگاشت زلزله.



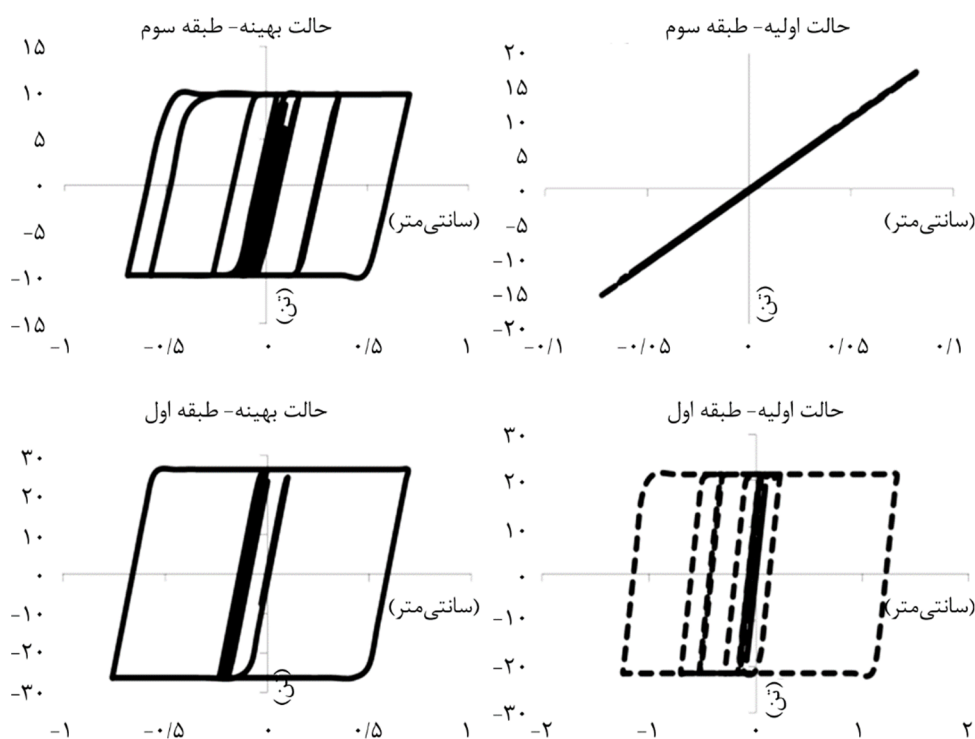
شکل (۹): نمودارهای گریز برشی طبقات و بار لغزش میراگرهای قاب خمشی ۱۰ طبقه در توزیع اولیه و توزیع بهینه تحت میانگین سه شتاب‌نگاشت زلزله.

۵-۲- تأثیر توزیع بهینه بار لغزش بر رفتار چرخه‌ای میراگرها

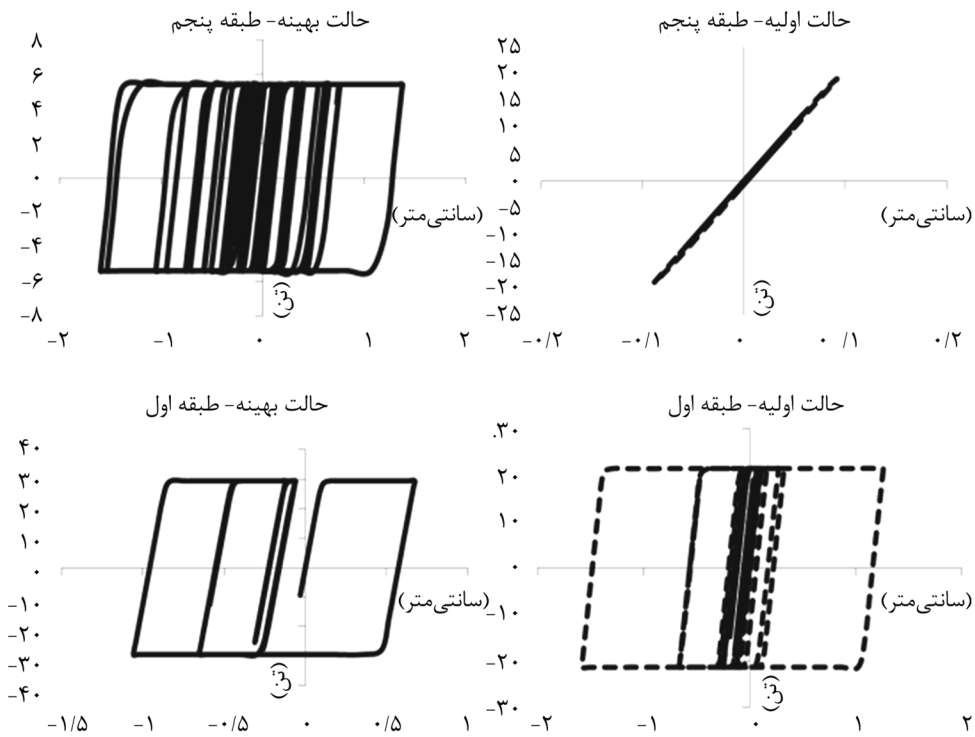
چنانچه پیش‌ازاین اشاره شد، از خصوصیات مهم میراگرهای اصطکاکی، خاصیت استهلاک انرژی بالای آنها است چرا که با استهلاک انرژی توسط میراگر تلاش‌های وارده روی اعضای اصلی کاهش می‌یابد. بنابراین در این بخش از مقاله، خاصیت استهلاک انرژی به‌عنوان معیار طراحی بهینه میراگرها مورد توجه قرار می‌گیرد. بعد از اعمال الگوریتم بهینه‌سازی رفتار هیستریزس میراگرها به‌طور چشمگیری در قیاس با حالت اولیه تغییر می‌کند. در شکل‌های (۱۰) تا (۱۲) رفتار چرخه‌ای میراگرها در طبقات اول و آخر قاب خمشی ۳ و ۵ طبقه همچنین در طبقات پنجم و آخر قاب خمشی ۱۰ طبقه، تحت اثر زلزله کیپ موندوسینو در دو حالت توزیع اولیه با بار لغزش یکسان در طبقات و توزیع بهینه با استفاده از الگوریتم پیشنهادی آورده شده است. با توجه به شکل‌های اخیر، در هر سه قاب در حالت اولیه و قبل از بهینه‌سازی، میراگر طبقه‌ی آخر به اندازه‌ی بسیار اندک وارد حوزه‌ی غیرخطی شده و میزان

در شکل (۷) مشاهده می‌شود نحوه‌ی توزیع بهینه بار لغزش در قاب ۳ طبقه به‌گونه‌ای است که این مقدار در طبقات سازه کمتر از مقدار بار لغزش اولیه حاصل شده است. در شکل (۸)، قاب خمشی ۵ طبقه به‌گونه‌ای است که مقدار بار لغزش در طبقات بالایی کمتر و در طبقات پایینی بیشتر از بار لغزش اولیه می‌باشد. درحالی‌که الگوی توزیع بهینه در سازه قاب خمشی ۱۰ طبقه مطابق شکل (۹)، دارای توزیع متفاوت‌تر بوده به‌طوری‌که بار لغزش در طبقات بالایی و پایینی کمتر و در طبقات میانی بیشتر از مقدار اولیه به‌دست آمده است.

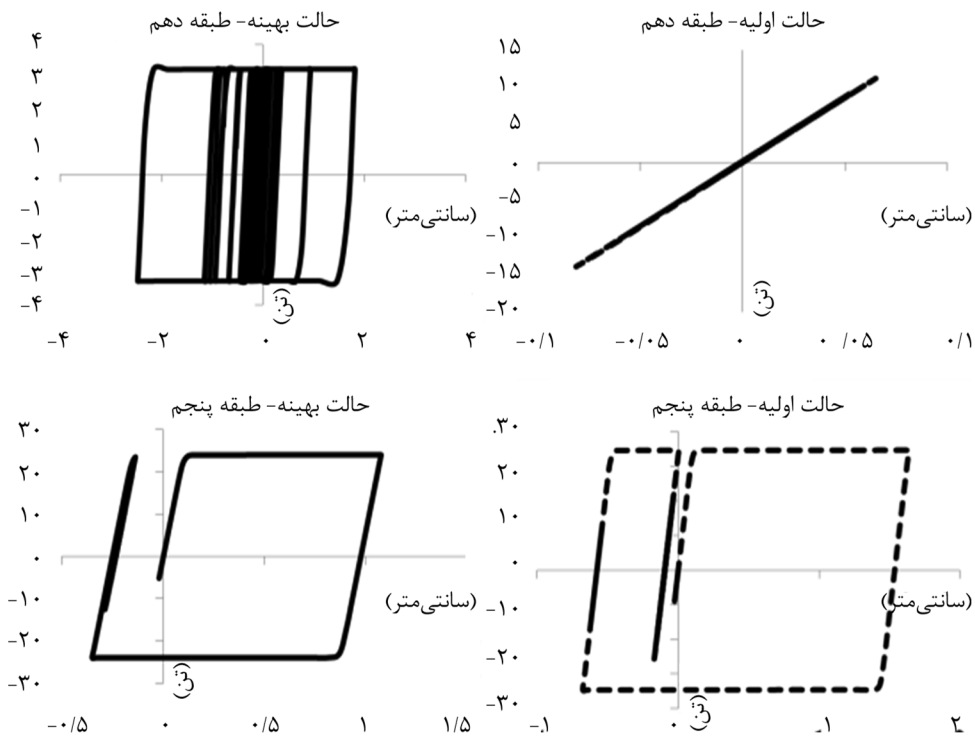
در حالت کلی می‌توان گفت که با توجه به کاهش مجموع بار لغزش میراگرها در سازه‌ی ۳ طبقه و ثابت ماندن مقدار این پارامتر در سازه‌های ۵ و ۱۰ طبقه طی فرآیند بهینه‌سازی پیشنهادی، ضمن توزیع بهینه مصالح مصرفی میراگرها در ارتفاع سازه‌ها، باعث توزیع یکنواخت تغییر شکل‌ها شده و سازه عملکرد لرزه‌ای بهتری بعد از بهینه‌سازی خواهد داشت.



شکل (۱۰): رفتار چرخه‌ای میراگرها در حالات توزیع ثابت و بهینه بار لغزش در ارتفاع قاب خمشی ۳ طبقه تحت اثر زلزله کیپ موندوسینو.



شکل (۱۱): رفتار چرخه‌ای میراگرها در حالات توزیع ثابت و بهینه بار لغزش در ارتفاع قاب خمشی ۵ طبقه تحت اثر زلزله کیپ موندوسینو.

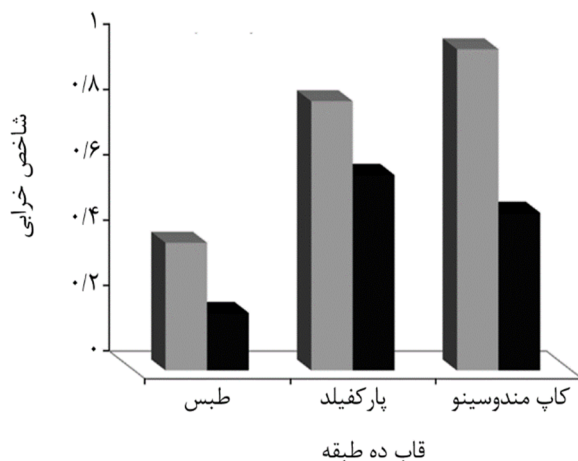
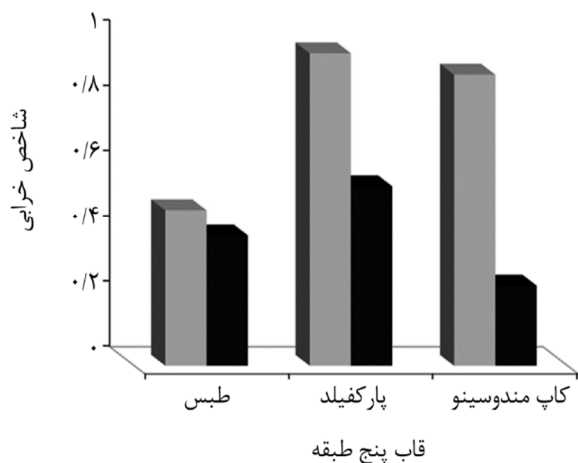
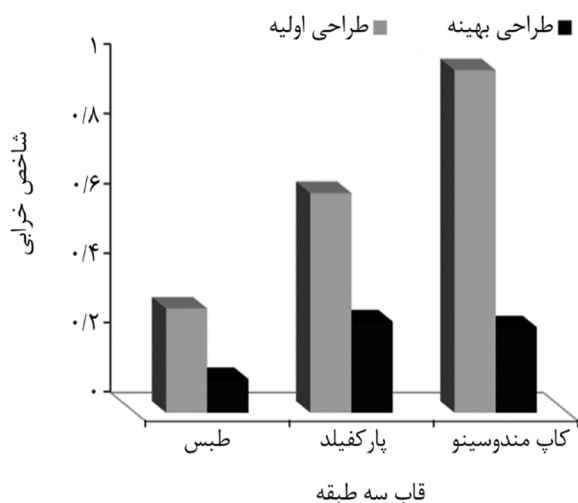


شکل (۱۲): رفتار چرخه‌ای میراگرها در حالات توزیع ثابت و بهینه بار لغزش در ارتفاع قاب خمشی ۱۰ طبقه تحت اثر زلزله کیپ موندوسینو.

طبقه بسیار بزرگ که می‌تواند باعث خرابی میراگر و ایجاد تغییر شکل‌های پلاستیک ماندگار در اعضای سازه شود؛ اما وقتی به رفتار چرخه‌ای پس از بهینه‌سازی توجه شود،

استهلاک انرژی (سطح زیر منحنی چرخه‌ای) توسط آن ناچیز است. درحالی‌که جابه‌جایی غیر ارتجاعی میراگر طبقه اول و آخر قاب ۳ و ۵ طبقه و طبقه ۵ پنجم قاب ۱۰

تحت اثر سه زلزله انتخابی آورده شده است. با مقایسه‌ی اندیس خرابی سازه‌ها ملاحظه می‌شود، اندیس خرابی در سازه‌های بهینه شده نسبت به سازه‌ی اولیه به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته است.



شکل (۱۳): اندیس خرابی قاب‌های خمشی ۳، ۵ و ۱۰ طبقه در حالات توزیع یکنواخت و بهینه بار لغزش تحت زلزله‌های مختلف.

ملاحظه می‌شود که در حالت توزیع بهینه، میراگر طبقه آخر با تولید چرخه‌های بزرگ‌تر، نقش بسیار مؤثرتری در استهلاک انرژی زلزله ایفا می‌کند. میراگر طبقه اول قاب‌های ۳ و ۵ طبقه و طبقه‌ی پنجم قاب ۱۰ طبقه نیز ضمن کاهش جابه‌جایی غیر ارتجاعی، همچنان در استهلاک انرژی مشارکت دارند. نتایج حاصل از زلزله‌های دیگر نیز چنین روندی دارند.

۵-۳- تأثیر بهینه‌سازی بر اندیس خرابی سازه‌ها

از روش‌های ارزیابی قابلیت یک سازه‌ی بهینه با سازه‌ی اولیه مقایسه اندیس خرابی آن سازه‌ها است. در این مطالعه تغییر شکل‌های نسبی برشی طبقات به‌عنوان کمیت مؤثر در خرابی انتخاب شده و شاخص خرابی مطابق رابطه‌ی ارائه شده توسط پاول و ا...آبادی [۱۶] به شرح زیر محاسبه می‌شود. به این منظور ابتدا شاخص خرابی تک‌تک طبقات (DI_s) از رابطه (۷) محاسبه شده و در نهایت شاخص خرابی کل سازه (DI_g) مطابق رابطه (۸) به دست می‌آید. محدوده‌ی مقادیر حاصل از این روابط بین صفر و یک خواهد بود.

$$DI_s = \left(\frac{D_{shm} - D_{shy}}{D_{shu} - D_{shy}} \right)^m \quad (7)$$

$$DI_g = \frac{\sum_{i=1}^n (DI_{si})^2}{\sum_{i=0}^n DI_{si}} \quad (8)$$

در رابطه (۷) D_{shm} ، گریز برشی میان طبقه‌ای حداکثر بوده که از تحلیل‌های تاریخچه زمانی به دست می‌آید. D_{shy} و D_{shu} ، به ترتیب گریز برشی تسلیم طبقه و گریز برشی نهایی مجاز طبقه است. توان m نیز عدد ۲ در نظر گرفته شده است.

در شکل (۱۳) شاخص خرابی قاب‌های خمشی ۳، ۵ و ۱۰ طبقه در دو حالت توزیع یکنواخت بار لغزش در طبقات و توزیع بهینه با اعمال الگوریتم بهینه‌سازی پیشنهادی،

۶- نتیجه‌گیری

اتلاف انرژی ورودی زلزله از خود نشان می‌دهند و رفتار لرزه‌ای سازه با توجه به کاهش پاسخ‌های حداکثر جابه‌جایی و شتاب بهبود می‌یابد. همچنین کاهش قابل‌ملاحظه‌ای در اندیس خرابی قاب‌های ساختمانی پس از بهینه‌سازی ایجاد می‌گردد.

مراجع

1. Pall, A.S. and Marsh, C. (1982) Response of friction damped braced frames. *Journal of Structural Engineering*, **108**(9), 1313-1323.
2. Filiatrault, A. and Cherry, S. (1989) Efficient numerical modelling for design of friction damped steel plane frames. *Canadian Journal of Civil Engineering*, **16**(3), 211-218.
3. Filiatrault, A. and Chery, S. (1990) Seismic design spectra for friction-damped structures. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, **116**(5), 1334-1355.
4. Moreschi, L.M. and Singh, M.P. (2003) Design of yielding metallic and friction dampers for optimal seismic performance. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **32**(8), 1291-311.
5. Lee, S.H., Park, J.H., Lee, S.K., and Min, K.W. (2008) Allocation and slip load of friction dampers for a seismically excited building structure based on story shear force distribution. *Engineering Structures*, 930-940.
6. Apostolakis, G. and Dargush, G.F. (2010) Optimal seismic design of moment-resisting steel frames with hysteretic passive devices. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **39**, 355-376.
7. Fallah, N. and Honar Parast, S. (2013) NSGA-II based multi-objective optimization in design of pall friction dampers. *Journal of Constructional Steel Research*, **89**, 75-85.
8. Karami Mohammadi, R., El Naggar, M.H., and Moghaddam, H. (2004) Optimum strength distribution for seismic resistant shear buildings. *International Journal of Solids and Structures*, **41**, 6597-6612.

در این تحقیق نشان داده شد که به هنگام زلزله‌های شدید، در سازه‌های قاب خمشی فولادی مجهز به میراگر اصطکاکی که مطابق روش‌های معمول با مقادیر ثابت بار لغزش در طبقات طراحی شده‌اند، نرمی طبقات و جابه‌جایی‌های نسبی نیاز به‌طور یکنواخت توزیع نمی‌شود. در نتیجه با تمرکز نرمی و گریز در برخی طبقات و به تبع آن توزیع نامناسب سختی و مقاومت، علاوه بر هدر رفتن مصالح و ابزار در طبقات مختلف، سازه مستعد خرابی خواهد بود؛ بنابراین با پیشنهاد یک الگوریتم بهینه‌سازی بر پایه تغییر شکل‌های یکنواخت و همچنین با تغییر مشخصه‌ی بار لغزش میراگرها به‌عنوان پارامتر مؤثر در سختی و مقاومت طبقات، گریز طبقات یکنواخت گردد و مصالح و ابزار میراگر نیز به‌صورت بهینه در ارتفاع سازه توزیع شود. بدین‌منظور پس از انجام تحلیل تاریخچه زمانی، به‌طور تدریجی و گام‌به‌گام بار لغزش طبقاتی که گریز آنها بیشتر از مقدار میانگین است را کاسته و به طبقاتی که گریز آنها کمتر از مقدار میانگین است، می‌افزاییم. پس از انجام چندین تکرار، توزیع گریز برشی طبقات کم‌وبیش یکنواخت خواهد شد و توزیع بهینه بار لغزش میراگرها در طبقات حاصل می‌گردد. نتایج حاصل از تحلیل قاب‌های خمشی ۳، ۵ و ۱۰ طبقه مجهز به میراگر اصطکاکی تحت سه زلزله‌ی منتخب نشان داد که نحوه‌ی توزیع بهینه بار لغزش قاب ۳ به‌گونه‌ای است که بار لغزش بهینه در طبقات کمتر از مقدار ثابت اولیه بوده و در قاب خمشی ۵ طبقه به‌صورتی است که مقدار بار لغزش در طبقات بالایی کمتر و در طبقات پایینی بیشتر از بار لغزش اولیه می‌باشد. درحالی‌که الگوی توزیع بهینه در سازه قاب خمشی ۱۰ طبقه، توزیع متفاوت‌تر است به‌طوری‌که بار لغزش در طبقات بالایی و پایینی کمتر و در طبقات میانی بیشتر از مقدار اولیه‌ی به دست آمد. بعد از انجام فرایند بهینه‌سازی رفتار چرخه‌ای میراگرها بهبود یافته و میراگرهای تمامی طبقات مشارکت مؤثری در

۹. مقدم، ح. (۱۳۸۱) مهندسی زلزله، مبانی و کاربرد. انتشارات فرهنگ.

۱۰. کرمی، م. (۱۳۸۲) اثر نحوه توزیع مقاومت برشی بر کاهش خرابی سازه‌ها در زلزله. پایان‌نامه دکتری، دانشگاه شریف.

11. Moghaddam, H. and Hajirasouliha, I. (2005) Optimum seismic design of concentrically braced steel frames: Concepts and design procedures. *Journal of Constructional Steel Research*, **61**(2), 151-166.

۱۲. مقدم، ح. و عباس‌نژاد، م. (۱۳۸۳) بهینه‌سازی بارگذاری لرزه‌ای قاب‌های خمشی. اولین کنگره مهندسی عمران.

13. SAP2000 Structural Analysis and Design Software (2012) User's Manual, Version 15.1, Computers and Structures inc., Berkeley, CA.

14. Iranian National Building Code, Part 6: Design loads for buildings (2006) Ministry of Housing and Urban Development, Tehran, Iran.

15. Iranian National Building Code, Part 10: Design and Construction of steel structure (2008) Ministry of Housing and Urban Development, Tehran, Iran.

16. Powell, G.H. and Allahabadi, R. (1978) Seismic Damage prediction by deterministic methods: concepts and procedures. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **16**, 719-734.