

انتخاب بهینه‌ی جابجایی تسلیم میراگرهای فلزی جاری‌شونده در ساختمان‌های قاب خمشی فولادی

Original Article

سامان باقری* (دانشیار)

داریا طبیعت‌نژاد (کارشناس ارشد)
دانشکده‌ی فنی مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

میراگرهای فلزی جاری‌شونده همانند المان‌های افزایش‌دهنده‌ی میرایی و سختی، از جمله متداول‌ترین ابزار اتلاف انرژی برای کنترل و کاهش پاسخ دینامیکی سازه‌ها محسوب می‌شوند. انتخاب مناسب پارامترهای طراحی این نوع میراگرها تأثیر زیادی در رفتار غیرخطی سازه دارد. یکی از این پارامترها، جابجایی تسلیم میراگر است. براساس پژوهش‌های پیشین، از میان پارامترهای طراحی این نوع میراگرها، جابجایی تسلیم بیشترین تأثیر را در تقاضای شکل‌پذیری سازه دارد. در این نوشتار روشی برای انتخاب این مشخصه‌ی طراحی میراگر در طبقات مختلف قاب‌های خمشی فولادی پیشنهاد شده است، تا نیاز شکل‌پذیری طبقات مختلف یکنواخت شود. با استفاده از الگوریتم پیشنهادی در چند مثال شامل قاب‌های خمشی ۳، ۵ و ۱۰ طبقه ملاحظه شده است که کاهش قابل ملاحظه‌ی در اندیس خرابی قاب‌های ساختمانی ایجاد می‌شود. همچنین رفتار چرخه‌یی میراگرها بهبود می‌یابد و میراگرهای کلیه‌ی طبقات مشارکت مؤثری در استهلاک انرژی ورودی زلزله از خود نشان می‌دهند.

واژگان کلیدی: قاب خمشی فولادی، میراگر فلزی جاری‌شونده، زلزله، تحلیل غیرخطی، بهینه‌سازی، جابجایی تسلیم.

s_bagheri@tabrizu.ac.ir
dariya.tabiattnejad@googlemail.com

۱. مقدمه

یکی از متداول‌ترین و قدیمی‌ترین ابزارهای کنترل غیرفعال، که برای کنترل و کاهش پاسخ‌های لرزه‌یی سازه‌ها تحت زمین‌لرزه‌های شدید به‌کار می‌روند، میراگرهای جاری‌شونده‌ی فلزی هستند. در این نوع از میراگرها از خاصیت جاری‌شدن فلزات یا همان رفتار هیستریک فلزات به هنگام تغییرشکل در ناحیه‌ی خمیری استفاده می‌شود، که باعث افزایش استهلاک انرژی ورودی می‌شود. علاوه بر این، این میراگرها باعث افزایش سختی نیز می‌شوند. میراگرهای فلزی جاری‌شونده اقسام متنوعی دارند که از آن جمله می‌توان به قطعات تسلیم مرکزی، قطعات U شکل و المان‌های افزایش‌دهنده‌ی میرایی و سختی به‌صورت ورق‌های مثلثی (TADAS) و یا به‌صورت ورق‌های X شکل (ADAS) اشاره کرد.^[۱]

آخرین مورد که پرکاربردتر و متداول‌تر از سایر انواع میراگرهای فلزی جاری‌شونده است، متشکل از ورق‌های فولادی X شکل است، که به‌صورت موازی در کنار هم قرار می‌گیرند (شکل ۱). اساس کار این میراگرها بر رفتار غیرارتجاعی شکل‌پذیر استوار است، که در حین زلزله با بهره‌گرفتن از خاصیت جاری‌شدن فولاد سبب اتلاف انرژی زلزله می‌شوند. میراگر ADAS در بالا به تیر طبقه و در پایین به مهاربند شکل متصل می‌شود. به هنگام زلزله با به‌وجود آمدن جابجایی نسبی طبقات،

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۱۰/۸، اصلاحیه ۱۳۹۳/۱/۲۷، پذیرش: ۱۳۹۳/۳/۱۰.

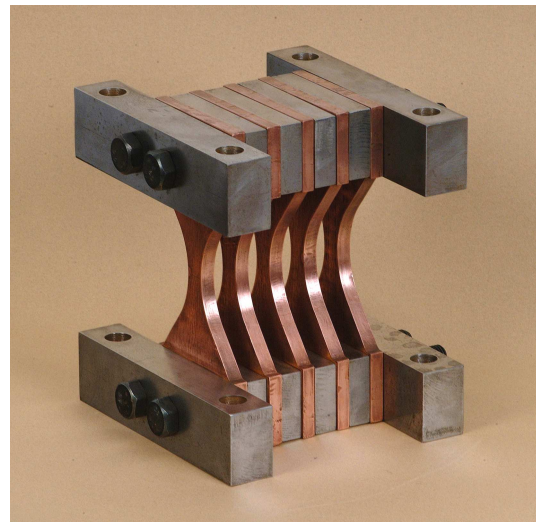
تغییر مکان نسبی در بالا و پایین میراگر به‌وجود می‌آید و ورق‌های میراگر مطابق شکل ۲ به‌صورت انحنای مضاعف تغییرشکل می‌دهند.^[۱] استفاده از این میراگرها باعث می‌شود اتلاف انرژی در اعضاء اصلی سازه صورت نگیرد، بلکه در محل‌هایی که به همین منظور تعبیه شده‌اند، متمرکز شود. این نوع ابزار نیاز به نگهداری ندارد، پس از زلزله نیز می‌توان در صورت نیاز آنها را به راحتی تعویض کرد. همچنین ظرفیت باربری قائم سیستم از وجود این نوع میراگر متأثر نمی‌شود.

در سال ۱۹۸۷ اولین آزمایش‌های جدی بر روی المان‌های ADAS در دانشگاه میشیگان،^[۲] و سپس در سال ۱۹۸۹ پژوهش‌های وسیعی در مرکز پژوهش‌های مهندسی زلزله‌ی دانشگاه برکلی کالیفرنیا (EERC) انجام شده است.^[۳] در سال ۱۹۹۲ نیز پژوهش‌هایی در زمینه‌ی تأثیر پارامترهای طراحی سیستم میراگر ADAS نصب‌شده در قاب خمشی انجام و نشان داده شده است که انتخاب مناسب آنها تأثیر به‌سزایی در رفتار غیرارتجاعی و تغییرشکل‌های سازه دارد.^[۴] این پارامترها عبارت بودند از: ۱. جابجایی تسلیم (Δ_y)، ۲. ضریب سخت‌شوندگی کرنشی (α)، ۳. نسبت سختی اعضاء بادبندی به سختی میراگرها (B/D)، ۴. نسبت سختی میراگر به سختی طبقه‌ی بدون سیستم میراگر و بادبند (SR)، ۵. سختی کشسان میراگر (K_d). در پژوهش مذکور، همچنین توصیه‌هایی تقریبی برای انتخاب پارامترهای طراحی میراگر ADAS پیشنهاد شده است. روند مشابهی جهت نیل به توصیه‌های طراحی در مورد سازه‌های مجهز به میراگر TADAS نیز در سال ۱۹۹۳ انجام شده است.^[۵]

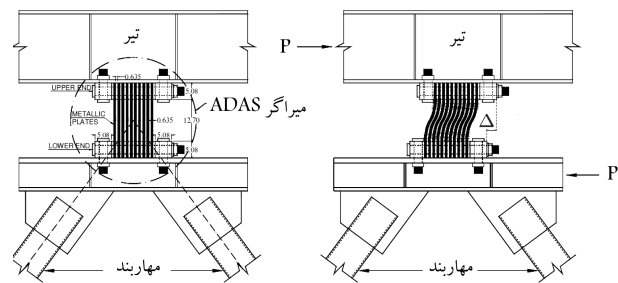
لرزه‌ی سازه همانند جابجایی نسبی بین طبقه‌ی، برش پایه، و یا شتاب مطلق طبقات ارائه و در آن برای حل مسئله‌ی بهینه‌سازی از روش‌های مبتنی بر گزاردان استفاده شده و توزیع بهینه‌ی میراگرهای الحاقی مورد نیاز در ساختمان به‌دست آمده است.^[۹] همچنین در سال ۲۰۰۲ از الگوریتم ژنتیک برای حل همان مسئله استفاده شده است.^[۱۰] سپس در سال ۲۰۰۳، طراحی میراگرهای اصطکاکی و جاری‌شونده‌ی فلزی برای عملکرد بهینه‌ی لرزه‌ی سازه مورد توجه قرار گرفته است.^[۷] دلیل مطالعه‌ی توأم این دو نوع میراگر، مشابهت مشخصه‌های طراحی آنهاست. نمودار چرخه‌ی رفتار هر دو نوع میراگر به صورت دو خطی مدل شده است؛ که در مورد میراگر فلزی، رفتار دو خطی به صورت کشسان خمیری با سخت‌شوندگی و در مورد میراگر اصطکاکی، به صورت صلب - خمیری کامل بوده است. در مطالعه‌ی مذکور پارامترهای طراحی سیستم میراگر فلزی نصب‌شده به همراه بادبند شامل جابجایی تسلیم میراگر، سختی میراگر، و سختی بادبند و همچنین پارامترهای طراحی سیستم میراگر اصطکاکی نصب‌شده به همراه بادبند شامل نیروی لغزش میراگر و سختی بادبند است. در اینجا نیز از الگوریتم ژنتیک جهت بهینه‌سازی استفاده و توابع هدف متعدد براساس پاسخ‌های مختلف سازه در نظر گرفته شده است.

در پژوهش دیگری در سال ۲۰۰۲ نیز جهت رسیدن به عملکرد بهتر سازه، کارایی روشی ساده برای جاگذاری میراگرهای چسبیده خطی در سیستم سازه‌ی چند درجه‌ی آزادی مورد بررسی قرار گرفته است.^[۱۱] همچنین در سال ۲۰۰۷ توزیع بهینه‌ی میراگرهای چسبیده در طبقات مختلف قاب‌های ساختمانی با تعریف تابع هدف براساس برش پایه مورد مطالعه قرار گرفته و نتایج روش مذکور با حالت معمول تر، که تابع هدف براساس جابجایی بام تعریف می‌شود، مقایسه شده است.^[۱۲] استفاده از میرایی چسبیده افزوده بر سازه علاوه بر سادگی تحلیل این خاصیت را دارد که می‌توان هر نوع میراگر الحاقی دیگر را نیز به صورت تقریبی با میرایی چسبیده معادل آن مدل کرد. به عنوان نمونه در پژوهشی در سال ۲۰۰۷، توزیع بهینه‌ی سختی و میرایی چسبیده معادل (و نه نوع خاصی از میراگر) به صورت توأم در بهسازی ساختمان‌ها در نظر گرفته شده و یک تابع هدف تعمیم‌یافته جهت در نظر گرفتن هم‌زمان جابجایی، شتاب مطلق و برش پایه استفاده شده است.^[۱۳] در همین زمینه همچنین می‌توان به طراحی بهینه‌ی ساختمان‌های دارای میراگر ADAS در پژوهشی در سال ۱۹۹۹ اشاره کرد.^[۸] در پژوهش مذکور تئوری کنترل بهینه (OCT) جهت استخراج مقدار میرایی چسبیده معادل مورد نیاز در هر تراز طبقه‌ی ساختمان استفاده شده و سپس از روی میرایی چسبیده مورد نیاز، مشخصات میراگر ADAS معادل به دست آمده است. معادل‌سازی میراگر ADAS با میراگر چسبیده براساس برابری انرژی مستهلک‌شده در یک چرخه‌ی تحریک هارمونیک صورت گرفته است، که به هنگام عملکرد لرزه‌ی این معادل‌سازی دارای تقریب خواهد بود.

در حالی که در بیشتر پژوهش‌های صورت‌گرفته، توزیع بهینه‌ی میراگرها در ارتفاع سازه مطرح شده است؛ تعداد میراگرها در یک تراز طبقه و محل آنها در دهانه‌های مختلف هر تراز از قاب خمشی ساختمانی در پژوهشی در سال ۲۰۱۲ مورد ارزیابی قرار گرفته است. در پژوهش مذکور از یک الگوریتم بهینه‌سازی خاص استفاده نشده است، بلکه چیدمان‌های مختلف میراگرهای چسبیده در دهانه‌های مختلف یک قاب خمشی ۵ دهانه با ارتفاع ۵ متر (۱۵ طبقه) آزموده شده و دهانه‌ی میانی قاب، به‌عنوان بهترین محل قرارگیری میراگر براساس نتایج حاصل عنوان شده است.^[۱۴] محققان دیگری در سال ۲۰۱۰ نیز طراحی لرزه‌ی بهینه‌ی قاب‌های خمشی فولادی با میراگرهای فلزی یا اصطکاکی الحاقی را به همراه سیستم بادبندی مورد مطالعه قرار دادند.^[۱۵] متغیرهای بهینه‌سازی شامل توزیع ارتفاعی میراگر، نوع میراگر، نیروی تسلیم (در مورد میراگر فلزی)، و یا نیروی لغزش (در مورد میراگر اصطکاکی)،



شکل ۱. میراگر X شکل ADAS.



شکل ۲. نحوه‌ی عملکرد میراگر X شکل ADAS.

پژوهشگران در موارد ذکرشده‌ی اخیر در تلاش بودند روش ساده‌ی برای طراحی سازه‌های مجهز به میراگر ارائه دهند که فقط نیازمند تحلیل‌های کشسان متداول در فرایند طراحی معمول باشد؛ در حالی که با در نظر گرفتن رفتار غیرخطی و پیچیدگی‌های موجود در سازه‌ی مجهز به میراگر تحت تحریک زمین‌لرزه، نیاز به الگوریتم‌های طراحی بهینه در این زمینه احساس می‌شود. بر این اساس در سالیان اخیر پژوهش‌های زیادی جهت طراحی بهینه‌ی سازه‌های مجهز به میراگرهای الحاقی صورت گرفته است.^[۷-۱۵]

اغلب این روش‌های بهینه‌سازی به نتایج و توصیه‌های کلی و جامع طراحی منجر نمی‌شوند، بلکه الگوریتم‌های پیشنهادی هستند که بسته به خصوصیات سازه، میراگر و تحریک وارده منجر به جواب بهینه می‌شوند. در این میان، پژوهش‌هایی در مورد طراحی بهینه‌ی میراگرهای چسبیده و لزج - کشسان نسبت به میراگرهای اصطکاکی و جاری‌شونده‌ی فلزی بسیار بیشتر است. زیرا میراگر چسبیده و لزج - کشسان می‌توانند با فرض رفتار خطی استفاده شوند، در حالی که میراگرهای فلزی و اصطکاکی ذاتاً رفتار غیرخطی دارند و به‌کارگیری آنها در سازه لزوماً منجر به پاسخ غیرخطی سیستم سازه‌ی با میراگر خواهد شد و در نتیجه تحلیل و طراحی بهینه‌ی آنها نیازمند عملیات محاسباتی پیچیده‌تری است؛^[۷] اگرچه نباید از این نکته غافل شد که میراگرهای جاری‌شونده‌ی فلزی همانند ADAS، بسیار ارزان‌تر از میراگرهای چسبیده هستند.^[۸]

از میان پژوهش‌های یادشده می‌توان به تحقیقات سال‌های ۲۰۰۱ الی ۲۰۰۳ اشاره کرد.^[۹،۱۰] ابتدا در سال ۲۰۰۱، روشی برای به‌دست‌آوردن میرایی چسبیده و لزج - کشسان مورد نیاز برای رسیدن به سطح کاهش مشخصی در یکی از پاسخ‌های

طبقات مختلف حاصل می‌شود. در این حالت، سختی بادبندها و میراگرها به صورت ثابت باقی می‌ماند و تغییر رفتار سیستم جانبی طبقات، فقط با تغییر در مشخصه‌ی جابجایی تسلیم میراگرها انجام می‌شود. برخلاف سایر الگوریتم‌های بهینه‌سازی اشاره‌شده در مرور پژوهش‌های پیشین، الگوریتم پیشنهادی این نوشتار بسیار ساده و در عین حال سریع و کاراست.

اصول کارکرد تمامی میراگرهای فلزی جاری‌شونده مشابه یکدیگر و براساس رفتار چرخه‌ی تسلیم‌شونده‌ی یک ابزار فلزی شکل‌پذیر است. بنابراین پارامترهای طراحی تمامی این نوع میراگرها که مطابق شکل ۲ در داخل یک قاب خمشی بین تیر و مهاربند ۸ نصب می‌شوند، مشترک است و نتایج به‌دست‌آمده از مطالعه بر روی میراگرهای ADAS را می‌توان برای سایر این نوع میراگرها نیز به‌کار برد.

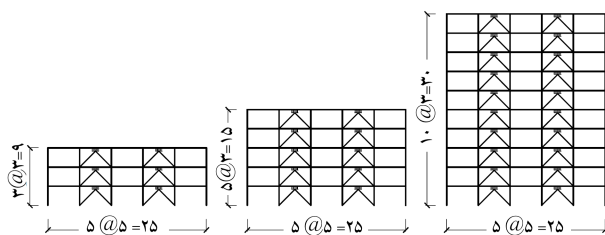
۲. مدل‌سازی و فرضیات

برای بررسی کارایی الگوریتم پیشنهادی، که در بخش‌های بعدی این نوشتار به‌طور کامل توضیح داده شده است، از مدل‌های قاب خمشی دو بُعدی فولادی ۳، ۵ و ۱۰ طبقه مجهز به میراگر فلزی جاری‌شونده از نوع ADAS که بر روی بادبندهای ۸ شکل نصب شده، استفاده شده است. در این مدل‌ها طول دهانه، ارتفاع طبقات و عرض باربر آن‌ها مطابق مشخصات ساختمان‌های متعارف به ترتیب ۳، ۵ و ۵ متر است. هندسه‌ی این مدل‌ها در شکل ۳ نشان داده شده است.

رفتار تمامی اعضاء سازه‌ی به غیر از میراگرها به‌صورت خطی فرض شده و نحوه‌ی انتخاب مشخصات میراگرها به ترتیبی که در ادامه آمده و کنترل‌صورت‌گرفته بر روی اعضاء قاب، این فرض را برآورده ساخته است. البته با تعریف مفاصل خمیری برای مهاربندها، ستون‌ها و تیرها در طرح اولیه و گام نهایی بهینه‌سازی، صحت این فرض کنترل شده است.

برای مدل‌کردن رفتار غیرارتجاعی میراگرهای فلزی جاری‌شونده از مدل دو خطی کشسان خمیری با سخت‌شوندگی ۵٪ استفاده شده است. اگر دو پارامتر Δ_y و F_y به ترتیب سختی اولیه‌ی میراگر (K_d)، جابجایی تسلیم میراگر (Δ_y) و نیروی تسلیم میراگر (F_y) مشخص شود، پارامتر سوم با توجه به اینکه سختی اولیه‌ی میراگر برابر نسبت نیروی تسلیم به جابجایی تسلیم است، مشخص می‌شود و در نتیجه کل پارامترهای طراحی ابزار میراگر به‌دست می‌آید. در تمامی مدل‌ها نسبت سختی اعضاء بادبندی به سختی میراگرها (B/D)، در تمامی طبقات برابر با مقدار پیشنهادی ۲، ۲^[۵] در نظر گرفته شده و به این ترتیب، سختی اولیه‌ی میراگرها به‌دست آمده است.

در این پژوهش از نرم‌افزار SAP۲۰۰۰^[۲۰] برای مدل‌سازی و تحلیل، و از مباحث ششم و دهم مقررات ملی ساختمان^[۲۱] جهت بارگذاری و طراحی اولیه‌ی اعضاء اصلی سازه‌ی بادبندی مدل‌ها استفاده شده است. برای اینکه مقایسه‌ی حالت‌های مختلف با یکدیگر ممکن باشد، طراحی اولیه‌ی قاب‌ها به گونه‌ی انجام شده است که



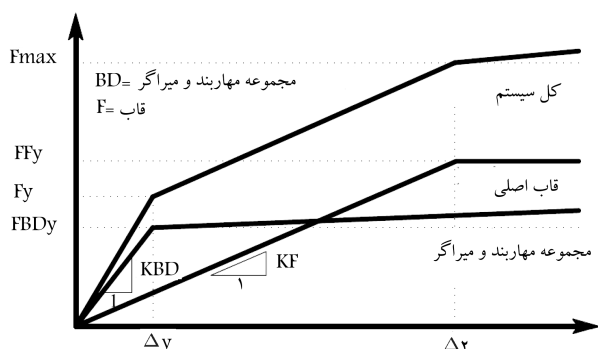
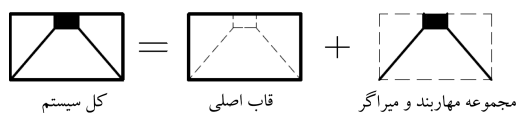
شکل ۳. هندسه‌ی مدل‌های استفاده‌شده در پژوهش حاضر.

و سختی بادبند بوده است. آنها برای حل مسئله‌ی بهینه‌سازی از الگوریتم ژنتیک و برای ارزیابی پاسخ سازه‌ی بهینه‌شده با میراگر، از جذر مجموع مربعات جابجایی نسبی طبقات و یا شتاب طبقات استفاده کردند. نتایج حاصل از مقایسه‌ی ۳ نمونه مدل قاب خمشی در حالت قبل و بعد از بهسازی با افزودن بهینه‌ی میراگرها نشان داده است که بعد از طراحی بهینه، پارامترهای پاسخ اشاره‌شده در بالا کاهش می‌یابند و توزیع شتاب طبقات و جابجایی نسبی طبقات یکنواخت‌تر می‌شود؛ در نتیجه نیاز شکل‌پذیری طبقات نیز یکنواخت‌تر می‌شود. همچنین نتیجه‌گیری شده است که توزیع میراگرها در ارتفاع سازه به منظور بهسازی آن باید براساس نیاز شکل‌پذیری طبقات صورت پذیرد.

مطالعات اخیر نشان داده است که به هنگام زلزله‌های قوی، در سازه‌هایی که به روش‌های مرسوم طراحی شده‌اند، نیاز شکل‌پذیری و جابجایی طبقات به‌طور یکنواخت توزیع نمی‌شود.^[۱۶-۱۹] به عبارت دیگر، می‌توان گفت توزیع نامناسب مقاومت و سختی باعث توزیع نامناسب تقاضای شکل‌پذیری در طبقات مختلف و احتمال به‌وجود آمدن طبقه‌ی نرم می‌شود.^[۱۶، ۱۸] در نتیجه می‌توان گفت که در هنگام زلزله‌های شدید، زمانی که بعضی از اعضاء سازه‌ی به بهینه‌ی ظرفیت لرزه‌ی خود رسیده‌اند، بخش‌هایی از سازه هنوز با مقادیر مجاز ظرفیت لرزه‌ی خود فاصله قابل توجهی دارند. این موضوع بیان‌گر این خواهد بود که بخشی از مصالح مصرفی در سازه بلااستفاده مانده و از تمام ظرفیت آن مصالح استفاده نشده است. در صورتی که تدبیری اندیشیده شود تا مصالح از قسمت‌های بلااستفاده به قسمت‌های مورد نیاز بروند، می‌توان به توزیع یکنواخت‌تری برای نرمی یا تغییرشکل دست یافت. در پژوهش‌هایی در سال ۲۰۰۴^[۱۶، ۱۷] نشان داده شده است که می‌توان با در نظر گرفتن این موضوع، به توزیع بهینه‌تر مقاومت و سختی دست یافت. ابزار مورد استفاده در این فرایند بهینه‌سازی، نحوه‌ی توزیع نیروی جانبی زلزله برای طراحی ساختمان بوده است.

برخی پژوهشگران نیز در پژوهشی مشابه (۲۰۰۷)^[۱۸] یک الگوی توزیع نیروی جانبی لرزه‌ی در ارتفاع ساختمان‌های قاب خمشی پیشنهاد کرده‌اند تا توزیع نیاز شکل‌پذیری طبقات یکنواخت شود. به اعتقاد ایشان، در این صورت از تمرکز خرابی در یک یا چند طبقه خاص جلوگیری خواهد شد و ساختمان عملکرد لرزه‌ی بهتری خواهد داشت. همچنین در پژوهشی در سال ۲۰۱۲^[۱۹] نیز اثر اندرکنش خاک - سازه بر روی توزیع ارتفاعی تقاضای شکل‌پذیری قاب‌های ساختمانی بررسی شده است. در مطالعه‌ی مذکور توزیع یکنواخت‌تر تقاضای شکل‌پذیری طبقات مینا قرار داده شده و بر این اساس کنایات الگوهای آیین‌نامه‌ی و پیشنهادات قبلی موجود برای توزیع نیروی لرزه‌ی در طبقات ساختمان مورد ارزیابی قرار گرفته و نتیجه‌ی حاصل این بوده است که هیچ‌کدام از توزیع‌های آیین‌نامه‌ی یا پیشنهادات قبلی موجود، با در نظر گرفتن اندرکنش خاک - سازه بهینه نیستند.

در این نوشتار نشان داده می‌شود که چنانچه جابجایی تسلیم میراگرها (Δ_y) به‌عنوان یکی از مشخصه‌های طراحی آنها، در تمامی طبقات قاب‌های خمشی فولادی به‌طور یکسان انتخاب شود، نیاز شکل‌پذیری طبقات لزوماً به‌صورت یکنواخت در ارتفاع سازه توزیع نمی‌شود؛ به عبارت دیگر، از تمامی ظرفیت مصالح مصرفی استفاده نشده است و طراحی به‌صورت بهینه نیست. لذا روشی پیشنهاد شده است که با متغیر فرض کردن جابجایی تسلیم میراگرها در طبقات مختلف قاب خمشی و با استفاده از الگوریتم رسیدن به تقاضاهای شکل‌پذیری یکنواخت در طبقات، منجر به طراحی سازه‌ی شود که از نقطه‌نظر توزیع ابزار میراگر در ارتفاع، سازه‌ی بهینه است و در نتیجه رفتار مناسب‌تری تحت زلزله‌های مختلف داشته باشد. به عبارت دیگر، در این روش توزیع بهینه‌ی مصالح، با تغییر در مشخصه‌ی جابجایی تسلیم میراگرهای



شکل ۴. رفتار غیرارتجاعی قاب خمشی با میراگر.

جدول ۲. مقادیر اولیه‌ی جابجایی تسلیم میراگرها در کلیه‌ی طبقات براساس شکل پذیری هدف ۶ تحت زلزله‌های مختلف بر حسب سانتی متر.

قاب	Imp.	San.	Tabas	Duzce	Nor.	Parkf.
۳ طبقه	۰٫۲۹	۰٫۲۶	۰٫۲۵	۰٫۲۸	۰٫۵۴	۰٫۳۶
۵ طبقه	۰٫۳۵	۰٫۳۶	۰٫۳۰	۰٫۳۱	۰٫۵	۰٫۴۳
۱۰ طبقه	۰٫۴۴	۰٫۳۹	۰٫۲۹	۰٫۳۶	۰٫۳۸	۰٫۴۰

برای رسیدن به شکل پذیری هدف، سازه تحت اثر یک شتاب‌نگاشت مشخص، تحلیل تاریخی زمانی غیرخطی می‌شود و پس از محاسبه‌ی شکل پذیری طبقات، میانگین شکل پذیری طبقات با مقدار هدف، مقایسه می‌شود. با انجام چندین سری تحلیل و تغییر دادن جابجایی تسلیم کلیه‌ی میراگرهای طبقات مختلف می‌توان تقریباً به شکل پذیری هدف دست پیدا کرد. مقادیر جابجایی تسلیم براساس شکل پذیری هدف ۶ برای قاب‌های خمشی ۳، ۵ و ۱۰ طبقه در جدول ۲ ارائه شده است. این مقادیر، مقادیر انتخابی اولیه برای جابجایی تسلیم میراگرها در کلیه‌ی طبقات هستند که در بخش بعد، با اصلاح آنها در طبقات مختلف سازه طی یک فرایند بهینه‌سازی، علاوه بر اینکه تطابق میانگین شکل پذیری طبقات با مقدار هدف حفظ شده است، توزیع شکل پذیری در طبقات مختلف نیز یکسان شده است.

۴. توزیع بهینه‌ی مشخصه‌ی جابجایی تسلیم میراگرها

هدف اصلی در این پژوهش، ارائه‌ی روشی جهت توزیع بهینه‌ی مشخصه‌ی جابجایی تسلیم میراگرهای فلزی جاری شونده در ارتفاع قاب‌های خمشی برای رسیدن به توزیع یکنواخت تقاضای شکل پذیری است. از دیدگاه افزایش انرژی مستهلك شده توسط میراگر، انتخاب جابجایی تسلیم کوچک‌تر مناسب‌تر است، در حالی که برای محدود کردن تقاضای شکل پذیری و جابجایی طبقات در زلزله‌های شدید، جابجایی تسلیم میراگر باید به اندازه‌ی کافی بزرگ باشد. در این نوشتار جابجایی تسلیم میراگرها (Δy) به صورت یک متغیر، که در حجم مصالح مصرفی در میراگرها و مقاومت و شکل پذیری طبقات مؤثر است، مورد توجه قرار گرفته است. برای این منظور، سختی بادبندها از طراحی اولیه‌ی سازه و سختی میراگرها از نسبت سختی $B/D = 2$ به دست آمده و به صورت ثابت باقی مانده و تغییر مقاومت و شکل پذیری طبقات فقط با تغییر در جابجایی تسلیم میراگرها انجام شده است. برای رسیدن به این هدف

جدول ۱. مشخصات شتاب‌نگاشت‌های زلزله‌های انتخابی.

زلزله	ایستگاه	M	PGA (g)	خاک (USGS)
Imperial Valley ۱۹۷۹	H-E°۶۲۳	۶٫۵	۰٫۴۴	C
Sanfernando ۱۹۷۱	PEL°۹۰	۶٫۶	۰٫۲۱	C
Duzce ۱۹۹۹	DZC۲۷°	۷٫۱	۰٫۵۴	C
Tabas ۱۹۷۸	TAB-TR	۷٫۴	۰٫۸۵	C
Northridge ۱۹۹۴	NWH۳۶°	۶٫۷	۰٫۵۹	C
Parkfield ۱۹۶۶	C°۲۰۶۵	۶٫۱	۰٫۴۸	C

در اعضاء سازه‌ی هیچ‌گونه اضافه مقاومتی وجود نداشته باشد. برای این منظور از مقاطع توری یک با مشخصات پیوسته برای ستون‌ها، تیرها، و مهاربندها استفاده شده است. این تذکر لازم است که این مقاطع توری یک پیوسته از درون‌بایی مشخصات مقاطع موجود IPB, IPE, Box و به دست آمده‌اند.

شتاب‌نگاشت‌های انتخابی برای انجام تحلیل‌های دینامیکی تاریخی زمانی همگی ثبت شده بر روی خاک نوع III (C) هستند، تا با فرض صورت‌گرفته برای نوع زمین در طراحی لرزه‌ی قاب‌ها هماهنگ باشند و از لحاظ محتوای بسامدی نیز سعی شده است متنوع باشند. مشخصات کامل رکورد‌های مورد استفاده در جدول ۱ ارائه شده است. جهت استفاده از این شتاب‌نگاشت‌ها با توجه به اینکه بعداً از نتایج زلزله‌های مختلف میانگین‌گیری خواهد شد، بیشینه‌ی شتاب زمین آنها به $g = 0.35$ مقیاس شده است.

۳. تخمین اولیه‌ی جابجایی تسلیم میراگرها

از میان پارامترهای طراحی میراگر فلزی جاری شونده نظیر ADAS، جابجایی تسلیم بیشترین تأثیر را در ضریب شکل پذیری دارد. [۵] همان‌طور که می‌دانیم، ضریب شکل پذیری طبقه‌ی i ام (μ_i)، از رابطه‌ی ۱ به دست می‌آید:

$$\mu_i = \frac{\Delta u_i}{\Delta y_i} \quad (1)$$

که در آن، Δy_i جابجایی نسبی تسلیم طبقه و Δu_i جابجایی نسبی نهایی طبقه است. ضریب شکل پذیری کل یک سازه‌ی n طبقه (μ) را می‌توان با میانگین‌گیری از شکل پذیری کل طبقات طبق رابطه‌ی ۲ تعریف کرد:

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_i}{n} \quad (2)$$

در قاب‌های خمشی مجهز به میراگر فلزی جاری شونده، علاوه بر مجموعه‌ی میراگرها و بادبند‌های ۸ شکل، خود قاب نیز در برابر نیروهای جانبی مقاومت می‌کند. شکل ۴، رفتار غیرارتجاعی قاب خمشی مجهز به هر میراگر جاری شونده با رفتارکشسان خمیری را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با فرض دیرتر تسلیم شدن قاب نسبت به میراگر می‌توان گفت در این سیستم سازه‌ی، جابجایی تسلیم طبقه همان جابجایی تسلیم میراگر موجود در آن طبقه است. بنابراین می‌توان با انتخاب مناسب پارامتر جابجایی تسلیم میراگر به شکل پذیری مورد نظر دست یافت.

۵. سازه با مشخصه‌های جابجایی تسلیم جدید در طبقات مختلف، مجدداً تحت همان شتاب‌نگاشت، تحلیل تاریخچه‌ی زمانی می‌شود و به گام ۳ می‌رود.

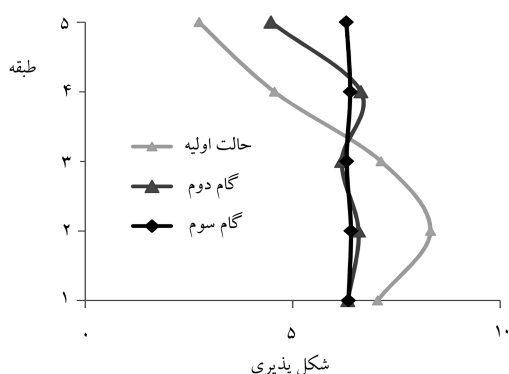
با انجام و تکرار مراحل بالا، در نهایت هم‌گرایی حاصل می‌شود و توزیع بهینه‌ی جابجایی تسلیم در طبقات مختلف به دست می‌آید. با داشتن جابجایی تسلیم میراگرها از فرایند بهینه‌سازی و سختی میراگرها، که براساس پیشنهاد موجود نصف سختی بادبندها انتخاب شده است، می‌توان مشخصات هندسی میراگرهای جاری شونده‌ی فازی لازم برای سازه را به دست آورد. برای مثال در مورد میراگرهای ADAS می‌توان از روابط ارائه شده در مرجع [۲۲] برای این منظور استفاده کرد.

۵. نتایج و بحث

۵.۱. توزیع شکل‌پذیری و جابجایی تسلیم میراگرها

الگوریتم پیشنهادی بر روی مدل‌های توصیف شده در بخش ۲ پیاده شده است، تا کارایی آن را بتوان ارزیابی کرد. در شکل ۵، روند هم‌گرایی الگوریتم بهینه‌سازی در قاب خمشی ۵ طبقه برای زلزله‌ی Imperial Valley نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در طرح اولیه، علی‌رغم اینکه میانگین نیاز شکل‌پذیری طبقات ۶ است (برابر با شکل‌پذیری هدف انتخابی)، ولی توزیع آن یکنواخت نیست و ضریب تغییرات (COV) برابر ۰٫۳۹ است. فقط طی دو گام الگوریتم پیشنهادی، توزیع شکل‌پذیری عملاً یکنواخت می‌شود، به طوری که ضریب تغییرات به حدود ۰٫۰۱ تقلیل می‌یابد.

در شکل‌های ۶ الی ۸، نحوه‌ی توزیع نیاز شکل‌پذیری طبقات و جابجایی تسلیم میراگرهای طبقات قاب‌های خمشی فولادی ۳، ۵ و ۱۰ طبقه در دو حالت طراحی اولیه با Δ_y ثابت اولیه و طراحی با Δ_y بهینه ملاحظه می‌شود. این نمودارها از متوسط‌گیری نتایج حاصل از تحلیل‌های تاریخچه‌ی زمانی مدل‌ها، تحت ۶ شتاب‌نگاشت ذکر شده در بخش ۳ و با شکل‌پذیری هدف ۶ به دست آمده‌اند. از این شکل‌ها مشخص می‌شود که توزیع ثابت مشخصه‌ی جابجایی تسلیم در ارتفاع قاب‌های خمشی موجب به وجود آمدن توزیع غیر یکنواخت تقاضای شکل‌پذیری در طبقات شده است. به عبارت دیگر، برای قاب‌های خمشی ۳ و ۵ طبقه، تقاضای شکل‌پذیری در طبقات بالا کمتر و در طبقات پایین بیشتر از مقدار میانگین است. در حالی که این پارامتر برای قاب خمشی ۱۰ طبقه، در طبقات بالا و پایین کمتر و در طبقات میانی بیشتر از مقدار میانگین است.



شکل ۵. روند هم‌گرایی الگوریتم بهینه‌سازی در سازه‌ی ۵ طبقه‌ی قاب خمشی برای زلزله‌ی Imperial Valley.

باید از جابجایی تسلیم میراگرهای طبقاتی، که نیاز شکل‌پذیری آن‌ها (μ_i) کمتر از مقدار میانگین (μ_{avg}) است، کاست و به جابجایی تسلیم میراگرهای طبقاتی، که نیاز شکل‌پذیری آن‌ها بیشتر از مقدار میانگین است، افزود. این کار تا زمانی که نیاز شکل‌پذیری طبقات به اندازه‌ی کافی یکنواخت شود، ادامه می‌یابد. میزان یکسان بودن نیاز شکل‌پذیری طبقات با محاسبه‌ی ضریب تغییرات (COV) از طریق رابطه‌ی ۳ قابل سنجش است. یادآور می‌شود که مطابق توضیحات بخش ۳، مقدار میانگین شکل‌پذیری طبقات به شکل‌پذیری هدف تنظیم شده و طی مراحل بهینه‌سازی نیز تغییر نمی‌کند.

$$COV = \frac{1}{\mu_{avg}} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\mu_i - \mu_{avg})^2} \quad (3)$$

برای عملی ساختن اهداف توضیح داده شده، این الگوریتم در مراحل ۱ الی ۵ اجرا شده است. در تمام مراحل الگوریتم باید توجه کرد که تغییر شکل‌های غیرارتجاعی میراگرها از حد خرابی آنها، که معمولاً ۱۰ برابر جابجایی تسلیم در نظر گرفته می‌شود، [۲۳] خارج نشود و بادبندها هم در اثر سخت‌شوندگی کرنشی میراگرها، وارد حوزه‌ی غیرارتجاعی نشوند. در صورت بروز چنین حالتی، عمل بهینه‌سازی متوقف و الگوی مربوط به آن گام نیز به عنوان الگوی توزیع بهینه در نظر گرفته می‌شود:

۱. ابتدا سازه‌ی مورد نظر برای ترکیب بارهای ثقلی و جانبی مبحث ششم مقررات ملی ساختمان، [۲۱] و مطابق ضوابط تنش مجاز مبحث دهم مقررات ملی ساختمان، [۲۲] به گونه‌ی طراحی می‌شود که هیچ‌گونه اضافه مقاومتی در اعضا آن وجود نداشته باشد. در ابتدا سختی اولیه‌ی میراگرها مطابق توصیه‌های موجود، نصف سختی بادبندها انتخاب می‌شود.

۲. مقدار اولیه‌ی جابجایی تسلیم کلیه‌ی میراگرها (Δ_y) براساس شکل‌پذیری هدف و شتاب‌نگاشت مورد نظر مطابق توضیحات بخش ۳ تخمین زده می‌شود. برای حل مثال‌های در نظر گرفته شده در این نوشتار، شکل‌پذیری هدف برابر با ۶ انتخاب شده و جابجایی تسلیم میراگرها مطابق جدول ۲ به دست آمده است. برای هر شکل‌پذیری هدف دیگر می‌توان همین روند را تکرار کرد.

۳. از نتایج تحلیل تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی سازه تحت شتاب‌نگاشت مورد نظر، مقادیر شکل‌پذیری طبقات و میانگین شکل‌پذیری طبقات به دست آمده و با استفاده از آن‌ها، ضریب تغییرات شکل‌پذیری طبقات از رابطه‌ی ۳ محاسبه می‌شود. اگر ضریب تغییرات به اندازه‌ی کافی کوچک باشد ($COV \leq 0.04$)، عملیات متوقف و در غیر این صورت به گام بعدی مراجعه می‌شود.

۴. بدون تغییر در سطح مقطع اعضا سازه‌ی و سختی میراگرها، از جابجایی تسلیم میراگرهای طبقاتی، که نیاز شکل‌پذیری آن‌ها کمتر از مقدار میانگین است، کاسته و به جابجایی تسلیم میراگرهای طبقاتی، که نیاز شکل‌پذیری بیشتر از مقدار میانگین دارند، افزوده می‌شود. به این ترتیب حجم مصالح مصرفی در کل میراگرهای ساختمان ثابت باقی می‌ماند و مقایسه معنی‌دار خواهد بود. برای هم‌گرایی در محاسبات، این تغییرات باید به صورت تدریجی و با استفاده از معادله‌ی ۴ انجام شود:

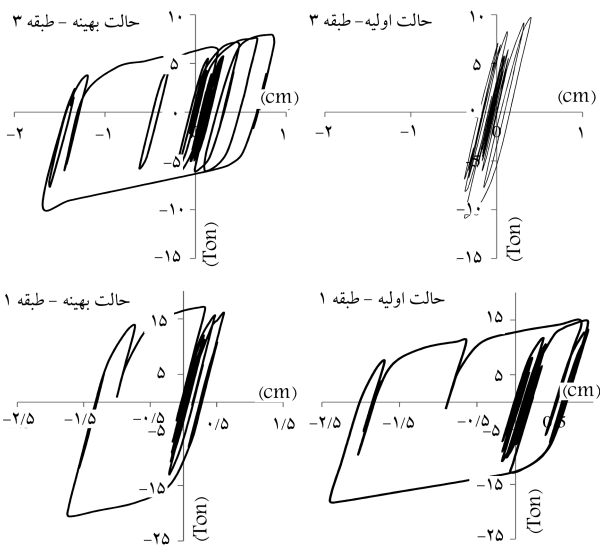
$$[(\Delta_y)_i]_{m+1} = [(\Delta_y)_i]_m \left[\frac{\mu_i}{\mu_{avg}} \right]^\alpha \quad (4)$$

که در آن، $(\Delta_y)_i$ جابجایی تسلیم میراگر در طبقه‌ی i ام و m شماره‌ی گام مورد نظر است. برای توان α از مقدار ۰٫۲ استفاده می‌شود، تا هم‌گرایی به تدریج، ولی مطمئن صورت گیرد.

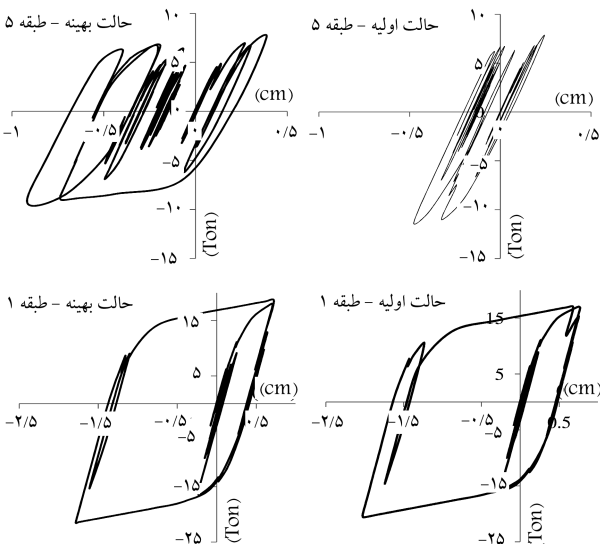
۲.۵. تأثیر بهینه‌سازی در رفتار چرخه‌ی میراگرها

پس از اعمال الگوریتم بهینه‌سازی، رفتار چرخه‌ی میراگرها در قیاس با حالت اولیه تغییر می‌کند. به‌عنوان نمونه در شکل‌های ۹ و ۱۰ رفتار چرخه‌ی میراگرها برای طبقات اول و آخر سازه‌های قاب‌های خمشی ۳ و ۵ طبقه مجهز به میراگر، تحت اثر زلزله‌ی Imperial Valley در دو حالت طراحی با Δy اولیه ثابت و طراحی با Δy بهینه برای شکل‌پذیری هدف ۶ ارائه شده است.

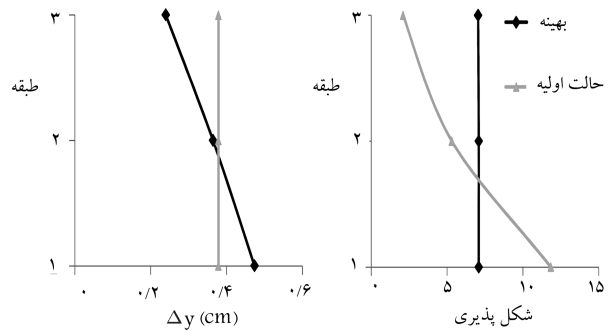
اگرچه رفتار چرخه‌ی میراگرهای طبقات اول و آخر هر دو قاب در شکل‌های ۹ و ۱۰ توجه شود، می‌توان گفت که میراگر طبقه‌ی آخر در حالت قبل از بهینه‌سازی، به مقدار بسیار کم وارد حوزه‌ی غیرارتجاعی شده است. از آنجایی که سطح زیر منحنی چرخه‌ی، همواره نشان‌دهنده‌ی میزان اتلاف انرژی است؛ بنابراین میراگر طبقه‌ی آخر در حالت قبل از بهینه‌سازی، نقش مؤثری در اتلاف انرژی زلزله نداشته و این در



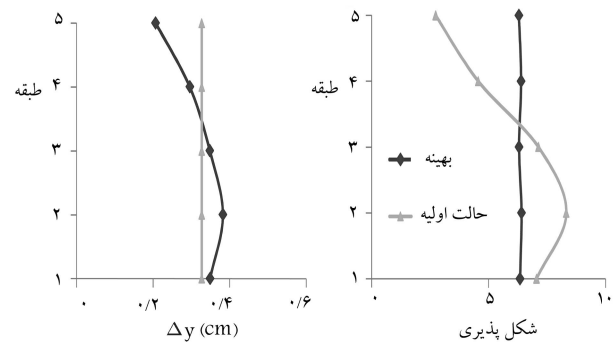
شکل ۹. رفتار چرخه‌ی میراگرهای طبقه‌ی اول و آخر قاب خمشی ۳ طبقه در حالت Δy اولیه ثابت و Δy بهینه در زلزله‌ی Imperial Valley.



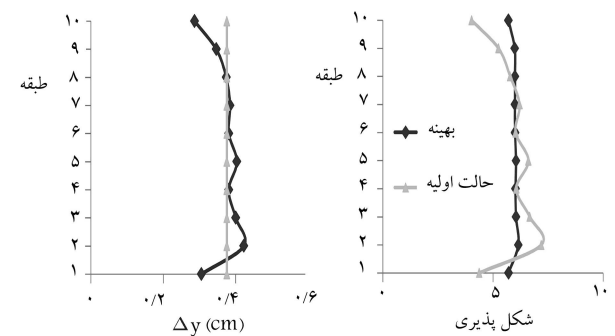
شکل ۱۰. رفتار چرخه‌ی میراگرهای طبقه‌ی اول و آخر قاب خمشی ۵ طبقه در حالت Δy اولیه ثابت و Δy بهینه، در زلزله‌ی Imperial Valley.



شکل ۶. نیاز شکل‌پذیری طبقات و جابجایی تسلیم میراگرهای قاب ۳ طبقه در دو حالت Δy اولیه ثابت و Δy بهینه از میانگین ۶ زلزله.



شکل ۷. نیاز شکل‌پذیری طبقات و جابجایی تسلیم میراگرهای قاب ۵ طبقه در دو حالت Δy اولیه ثابت و Δy بهینه از میانگین ۶ زلزله.



شکل ۸. نیاز شکل‌پذیری طبقات و جابجایی تسلیم میراگرهای قاب ۱۰ طبقه در دو حالت Δy اولیه ثابت و Δy بهینه از میانگین ۶ زلزله.

در شکل‌های ۶ و ۷ مشاهده می‌شود که نحوه‌ی توزیع بهینه‌ی مشخصه‌ی جابجایی تسلیم به گونه‌ی است که این مقدار در طبقات فوقانی کمتر از مقدار ثابت اولیه و در طبقات تحتانی بیشتر از آن به دست آمده است. در حالی که نحوه‌ی توزیع بهینه‌ی این پارامتر در قاب ۱۰ طبقه مطابق شکل ۸، در طبقات بالا و پایین کمتر و در طبقات میانی اندکی بیشتر از مقدار میانگین به دست آمده است. همچنین در این شکل‌ها ملاحظه می‌شود که با توزیع بهینه‌ی جابجایی تسلیم در ارتفاع سازه، توزیع نیاز شکل‌پذیری طبقات یکنواخت‌تر است و سازه عملکرد لرزهی بهتری پس از بهینه‌سازی خواهد داشت. همچنین با توجه به ثابت بودن مقدار کل مصالح مصرفی در میراگرهای هر یک از مدل‌ها می‌توان گفت که این روش بهینه‌سازی باعث توزیع بهینه‌ی مصالح مصرفی میراگرها در ارتفاع سازه می‌شود.

در رابطه‌ی ۵، D_{shm} معرف جابجایی نسبی برشی میان طبقه‌ی بی‌بیشینه است، که از تحلیل‌های تاریخچه‌ی زمانی به‌دست می‌آید. D_{shu} جابجایی نسبی برشی نهایی مجاز طبقه است، که برای آن از بین مقدار مجاز آیین‌نامه‌ی (۲۵) یا (۲۰) برابر ارتفاع طبقه مطابق آیین‌نامه‌ی (۲۸۰) و همین‌طور ۱۰ برابر جابجایی تسلیم میراگر طبقه (برابر با حد خرابی پیشنهادی برای میراگر)، [۲۳] مقدار کوچک‌تر مینا قرار گرفته است. D_{shy} جابجایی نسبی برشی تسلیم طبقه است، که برای قاب خمشی مجهز به میراگر کوچک‌ترین مقدار از بین جابجایی تسلیم میراگر و جابجایی تسلیم قاب در آن طبقه است. برای توان m نیز عدد ۲ در نظر گرفته شده است.

در شکل ۱۱، اندیس خرابی قاب‌های خمشی ۳، ۵ و ۱۰ طبقه در دو حالت قبل و بعد از بهینه‌سازی، برای شکل‌پذیری هدف ۶ تحت اثر ۶ زلزله مختلف ارائه شده است. همان‌طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، کاهش قابل ملاحظه‌ی در اندیس خرابی سازه‌ها پس از بهینه‌سازی ایجاد شده است. میزان این کاهش در قاب‌های کوتاه‌تر، چشم‌گیرتر است.

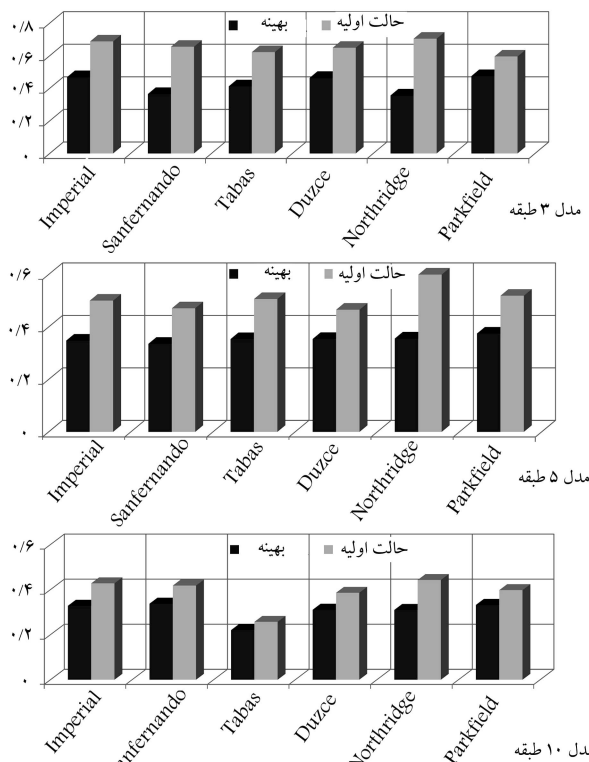
۶. نتیجه‌گیری

در این پژوهش نشان داده شده است که به هنگام زلزله‌های قوی در سازه‌های قاب خمشی فولادی مجهز به میراگرهای فلزی جاری‌شونده همانند ADAS، که به روش‌های مرسوم طراحی شده‌اند، شکل‌پذیری نیاز طبقات لزوماً به‌طور یکنواخت توزیع نمی‌شود. در نتیجه علاوه بر توزیع نامناسب مصالح و ابزار در طبقات مختلف، سازه در زلزله‌های قوی مستعد خرابی در برخی طبقات خواهد بود. بنابراین یک الگوریتم بهینه‌سازی پیشنهاد شده است تا بتوان با تغییر مشخصه‌ی جابجایی تسلیم میراگرهای طبقات مختلف قاب‌های خمشی مجهز به میراگرهای فلزی جاری‌شونده، نیاز شکل‌پذیری در طبقات را یکنواخت کرد. بدین منظور پس از انجام تحلیل تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی، به‌طور تدریجی و گام به گام از Δy طبقاتی، که تقاضای شکل‌پذیری آن‌ها کمتر از مقدار میانگین است، کاسته و به Δy طبقاتی که تقاضای شکل‌پذیری آن‌ها بیشتر از مقدار میانگین است، افزوده شده است. پس از چندین گام، توزیع تقریباً یکنواخت شکل‌پذیری طبقات حاصل شده است.

نتایج عددی تحلیل قاب‌های خمشی ۳، ۵ و ۱۰ طبقه مجهز به میراگر تحت ۶ رکورد مختلف زلزله نشان داده است که نحوه‌ی توزیع بهینه‌ی مشخصه‌ی Δy میراگرهای قاب‌های خمشی ۳ و ۵ طبقه به‌گونه‌ی است که Δy بهینه‌ی میراگرهای طبقات فوقانی کمتر از مقدار ثابت اولیه و Δy بهینه‌ی میراگرهای طبقات تحتانی بیشتر از آن است. اما در قاب خمشی ۱۰ طبقه، مقدار بهینه‌ی این پارامتر در طبقات فوقانی و تحتانی کمتر از مقدار ثابت اولیه و در طبقات میانی بیشتر از آن به‌دست آمده است.

بعد از انجام فرایند بهینه‌سازی رفتار چرخه‌ی میراگرها بهبود یافته و میراگرهای تمامی طبقات، مشارکت مؤثری در استهلاک انرژی ورودی زلزله از خود نشان داده و همچنین کاهش قابل ملاحظه‌ی در اندیس خرابی قاب‌های ساختمانی پس از بهینه‌سازی ایجاد شده است.

الگوریتم ارائه‌شده در این پژوهش برای طراحی بهینه‌ی میراگرهای ساختمان قاب خمشی این قابلیت را دارد که می‌توان شکل‌پذیری هدف سازه را نیز به دلخواه انتخاب و تنظیم کرد. همچنین سرعت هم‌گرایی آن بالاست و با چند گام محدود به نتیجه‌ی مطلوب می‌رسد. در نتیجه برای سازه‌هایی با عملکردهای متفاوت، روشی نسبتاً ساده و در عین حال مؤثر است.



شکل ۱۱. اندیس خرابی قاب‌های خمشی ۳، ۵ و ۱۰ طبقه در دو حالت Δy اولیه‌ی ثابت و Δy بهینه در زلزله‌های مختلف.

حالی است که جابجایی غیرارتجاعی میراگر طبقه‌ی اول بسیار زیاد و در مرز خرابی است. اما وقتی به رفتار چرخه‌ی پس از بهینه‌سازی توجه شود، ملاحظه می‌شود که در حالت بهینه، میراگر طبقه‌ی آخر با تولید چرخه‌های بزرگ‌تر، نقش بسیار مؤثرتری در استهلاک انرژی زلزله ایفا می‌کند. رفتار چرخه‌ی میراگر طبقه‌ی اول نیز پس از بهینه‌سازی بهبود یافته و جابجایی غیرارتجاعی آن محدودتر شده است. نتایج سایر مدل‌ها تحت زلزله‌های دیگر نیز چنین روندی دارند.

۳.۵. تأثیر بهینه‌سازی در اندیس خرابی سازه

یکی از راه‌های نمایش قابلیت و کارایی سازه‌ی بهینه‌شده نسبت به حالت اولیه، مقایسه‌ی اندیس خرابی دو سازه است. در این پژوهش از رابطه‌ی ارائه‌شده در پژوهشی در سال ۱۹۸۸، [۲۵] استفاده و تغییر شکل‌های نسبی برشی طبقات به‌عنوان کمیت مؤثر در خرابی انتخاب شده است. برای محاسبه‌ی اندیس خرابی کل سازه، ابتدا اندیس خرابی تک‌تک طبقات (DI_s) مطابق رابطه‌ی ۵ محاسبه شده و نهایتاً اندیس خرابی کل سازه (DI_g) از رابطه‌ی ۶ به‌دست آمده است. محدوده‌ی مقادیر حاصل از این روابط بین صفر تا ۱ خواهد بود.

$$DI_s = \left(\frac{D_{shm} - D_{shy}}{D_{shu} - D_{shy}} \right)^m \quad (5)$$

$$DI_g = \frac{\sum_{i=1}^n (DI_s)_i^t}{\sum_{i=1}^n (DI_s)_i} \quad (6)$$

(References) منابع

1. Soong, T.T. and Dargush, G.F., *Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering*, John Wiley & Sons, 368 p. (1997).
2. Sajjadi Alehashem, S.M., Keyhani, A. and Pourmohammad, H. "Behavior and performance of structures equipped with ADAS & TADAS dampers (a comparison with conventional structures)", *The 14th World Conferences on Earthquake Engineering*, China (2008).
3. Bergman, D.M. and Goel, S.C. "Evaluation of cyclic testing of steel plate devices for added damping and stiffness", Report No. UMCE87-10, The University of Michigan, Ann Arbor, MI (1987).
4. Whittaker, A.S., Bertero, V.V., Alonso, J. and Thompson, C.L. "Earthquake simulator testing of steel plate added damping and stiffness elements", Report No. UCB/EERC-89/02, University of California, Berkeley (1989).
5. Xia, C. and Hanson, R.D. "Influence of ADAS element parameters on building seismic response", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, **118**(7), pp. 1903-1918 (1992).
6. Tsai, K.C., Chen, H.W., Hong, C.P. and Su, Y.F. "Design of steel triangular plate energy absorbers for seismic resistant construction", *Earthquake Spectra*, **9**(3), pp. 505-528 (1993).
7. Moreschi, L.M. and Singh, M.P. "Design of yielding metallic and friction dampers for optimal seismic performance", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **32**(8), pp. 1291-1311 (2003).
8. Ribakov, Y. and Gluck, J. "Optimal design of ADAS damped MDOF structures", *Earthquake Spectra*, **15**(2), pp. 317-330 (1999).
9. Singh, M.P. and Moreschi, L.M. "Optimal seismic response control with dampers", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **30**(4), pp. 553-572 (2001).
10. Singh, M.P. and Moreschi, L.M. "Optimal placement of dampers for passive response control", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **31**, pp. 955-976 (2002).
11. Lopez Garcia, D. and Soong, T.T. "Efficiency of a simple approach to damper allocation in MDOF structures", *Journal of Structural Control*, **9**(1), pp. 19-30 (2002).
12. Aydin, E., Boduroglu, M.H. and Guney, D. "Optimal damper distribution for seismic rehabilitation of planar building structures", *Engineering Structures*, **29**(2), pp. 176-185 (2007).
13. Cimellaro, G.P., Boduroglu, M.H. and Guney, D. "Simultaneous stiffness-damping optimization of structures with respect to acceleration, displacement and base shear", *Engineering Structures*, **29**(11), pp. 2853-2870 (2007).
14. Keyvani, J. and Rahimiasl, M. "Improvement of seismic performance of structure behavior utilizing viscous dampers and optimal viscous damper arrangements in steel frames", *Sharif Civil Engineering Journal*, **28**, pp. 81-88 (2012).
15. Apostolakis, G. and Dargush, G.F. "Optimal seismic design of moment-resisting steel frames with hysteretic passive devices", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **39**(4), pp. 355-376 (2010).
16. Karami Mohammadi, R., El Naggar, M.H. and Moghaddam, H. "Optimum strength distribution for seismic resistant shear buildings", *International Journal of Solids and Structures*, **41**(22-23), pp. 6597-6612 (2004).
17. Moghaddam, H. and Hajirasouliha, I. "A new approach for optimum design of structures under dynamic excitation", *Asian Journal of Civil Engineering*, **5**(1-2), pp. 69-84 (2004).
18. Park, K. and Medina, R.A. "Conceptual seismic design of regular frames based on the concept of uniform damage", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, **133**(7), pp. 945-955 (2007).
19. Ganjavi, B. and Hao, H. "A parametric study on the evaluation of ductility demand distribution in multi-degree-of-freedom systems considering soil-structure interaction effects", *Engineering Structures*, **43**, pp. 88-104 (2012).
20. Computers and Structures, Inc., SAP2000, Version 14, Structural Analysis and Design Software, Berkeley, CA (2010).
21. *Iranian National Building Code, Part 6: Design Loads for Buildings*, Ministry of Housing and Urban Development, Tehran, Iran (2006).
22. *Iranian National Building Code, Part 10: Design and Construction of Steel structures*, Ministry of Housing and Urban Development, Tehran, Iran (2008).
23. Aiken, I.D., Nims, D.K., Whittaker, A.S. and Kelly, J.M. "Testing of passive energy dissipation systems", *Earthquake Spectra*, **9**(3), pp. 335-370 (1993).
24. Whittaker, A.S., Uang, C.M. and Bertero, V.V. "An experimental study of the behavior of dual steel systems", Report No. UCB/EERC-88/14, University of California, Berkeley (1988).
25. Powell, G.H. and Allahabadi, R. "Seismic damage prediction by deterministic methods: Concepts and procedures", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **16**(5), pp. 719-734 (1988).