



تأثیر یکنواخت‌سازی گریز طبقات بر اندیس خرابی ساختمان‌های دارای میراگر فلزی جاری‌شونده

سامان باقری^{۱*}، علی حدیدی^۱، علیرضا علیلو^۲

۱- استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی زلزله، دانشگاه تبریز

* s_bagheri@tabrizu.ac.ir

خلاصه

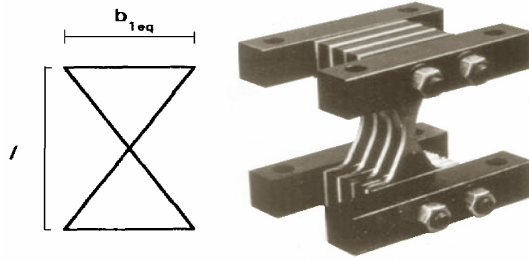
میراگرهای فلزی جاری‌شونده از جمله ابزار معمول برای کنترل غیرفعال سازه‌ها بخصوص ساختمان‌های فولادی می‌باشند. در این میراگرها نظیر المان‌های افزایشده سختی و میرایی (ADAS) از خاصیت تسلیم و جاری‌شوندگی فلزاتی مثل فولاد نرمه به منظور جذب و استهلاک انرژی زلزله استفاده می‌شود. انتخاب مناسب مشخصات میراگر در طبقات مختلف سازه ساختمانی می‌تواند باعث عملکرد بهتر ساختمان در هنگام زلزله شود. در این مقاله بر اساس مفهوم توزیع یکنواخت تغییرشکل‌های نسبی طبقات و با استفاده از یک الگوریتم بهینه‌سازی سعی بر آن است که به انتخاب مناسبی برای سختی و مقاومت میراگرها در طبقات مختلف ساختمان برسیم. برای این منظور از مدل‌های ۵ و ۱۰ طبقه ساختمان با قاب ساده فولادی دارای بادبندی هشت و میراگرهای ADAS تحت سه رکورد مختلف زلزله استفاده شده است. نتایج تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی نشان می‌دهد در حالتی که مشخصات میراگرها طی فرایند بهینه‌سازی و با هدف یکنواخت کردن گریز (جابجایی نسبی) طبقات بدست آمده‌اند، اندیس خرابی سازه کاهش قابل ملاحظه‌ای نسبت به ساختمان هم‌وزن غیر بهینه دارد و لذا انتظار می‌رود در زلزله رفتار مناسب‌تری داشته باشد. بر این اساس الگویی برای انتخاب سختی میراگرهای طبقات مختلف ساختمان پیشنهاد می‌شود.

کلمات کلیدی: میراگر، بهینه‌سازی، طراحی لرزه‌ای، سختی، اندیس خرابی

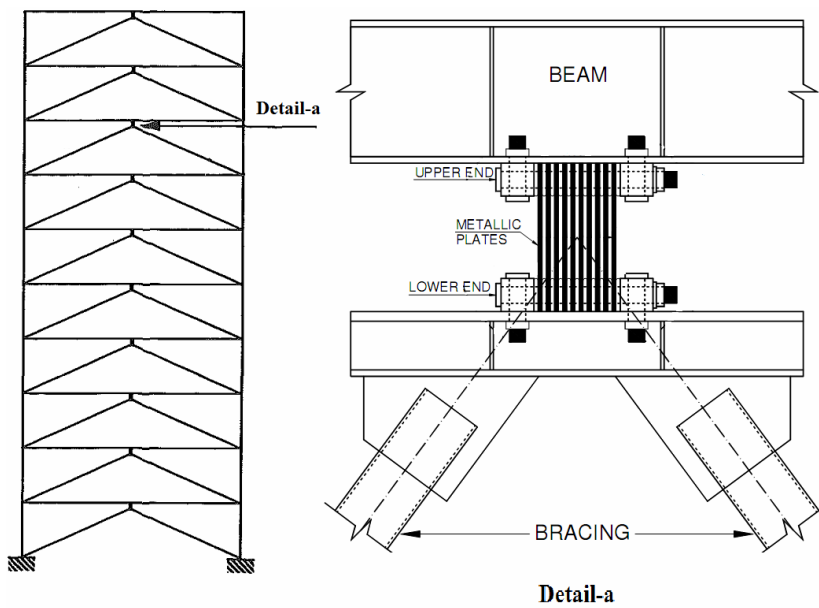
۱. مقدمه

میراگرهای جاری‌شونده از جمله سیستم‌های کنترل غیرفعال هستند که از خاصیت جاری شدن فلزات به طرق مختلف استفاده کرده و باعث اتلاف انرژی زلزله می‌شوند. از انواع بسیار متداول و رایج این میراگرها می‌توان به المانهای افزایشده سختی و میرایی (ADAS) اشاره کرد. این میراگرها از ورق‌های فولادی X شکل که به صورت موازی در کنار هم قرار می‌گیرند، ساخته می‌شوند (شکل ۱). هر قاب با المان ADAS، از یک میراگر ADAS و دو عضو مهاربند که از دستگاه نگهداری می‌کنند، تشکیل می‌یابد (شکل ۲). تغییر مکان جانبی بین طبقه‌ای، سبب ایجاد تغییر مکان نسبی در بالا و پایین میراگر شده و نهایتاً منجر به تسلیم برشی میراگر می‌شود.

در سال ۱۹۸۷ اولین آزمایشات سیکلی بر روی این المان‌ها توسط برگمن و گوال در دانشگاه میشیگان انجام گرفت [۱]. این آزمایشات، نشان داد که المان‌های ADAS مقاومت خستگی خوبی در برابر بارهای سیکلی داشته و تا رسیدن به نقطه شکست، چرخه‌های پایداری از خود نشان می‌دهند. در سال ۱۹۸۹ گروهی به رهبری ویتاکر [۲]، تحقیقات وسیعی را بر روی رفتار دینامیکی المان‌های ADAS آغاز کردند. در این تحقیقات مشخص شد که این المان‌ها قادر به تحمل بیش از ۱۰۰ سیکل بارگذاری در دامنه تغییر مکان $3\Delta_y$ با چرخه‌های کاملاً پایدار و بدون زوال بوده و گسیختگی در ۱۵ سیکل با دامنه تغییر مکان $14\Delta_y$ اتفاق می‌افتد (Δ_y تغییر مکان تسلیم میراگر می‌باشد). بر اساس این تحقیقات، جابجایی مناسب برای طراحی این المان‌ها $10\Delta_y$ پیشنهاد شد [۲]. در سال ۱۹۹۱ ویتاکر و گروهش در یک برنامه تحقیقی جامع تر رفتار لرزه‌ای المان‌های ADAS را با شبیه‌سازی لرزه‌ای مورد آزمایش قرار دادند [۳]. در سال ۱۹۹۳ آیکن و همکاران نتایج تحقیقات آزمایشگاهی را در یک مقاله جامع منتشر کردند [۴]. همچنین تأثیر پارامترهای مختلف المان ADAS نیز بر روی پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها توسط ژیا و هانسون مورد مطالعه قرار گرفته است [۵]. انتخاب مناسب پارامترهای المان ADAS همواره در چگونگی رفتار غیرخطی میراگرها نقش بسیار مهمی دارد. یکی از مهمترین این پارامترها نسبت سختی بادبند به میراگر است (نسبت B/D). مقدار مناسب این نسبت در کلیه طبقات ساختمان به دلایل اقتصادی و برای جلوگیری از تسلیم کششی و کماتش فشاری مهاربندها عدد ۲ پیشنهاد داده شده است ($B/D=2$) [۵و۲]. در این مقاله این نسبت به عنوان یک متغیر در طبقات مختلف ساختمان، مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.



شکل ۱- شکل واقعی و شکل معادل ورق‌های ADAS



شکل ۲- قاب با المان ADAS و جزئیات اتصال میراگر به تیر طبقه و مهاربند هشت

۲. ویژگی‌های مکانیکی المان ADAS

در این مقاله روابط پیشنهادی ویتاکر و همکاران [۲]، جهت تعریف مشخصات هندسی و مکانیکی المان‌های ADAS در نظر گرفته می‌شود. ویتاکر و همکاران برای تهیه منحنی بار- تغییر شکل، به جای استفاده از شکل هندسی واقعی از شکل هندسی معادل، که با فرضیات زیر همراه بود، استفاده کردند:

(۱) ورق‌ها در دو انتهای خود، کاملاً گیردار فرض می‌شوند.

(۲) تغییر شکل ورق‌های میراگر، حول محور افقی به صورت انحنای مضاعف، انجام می‌گیرد.

(۳) عرض معادل هر ورق در دو انتها، نصف ارتفاع ورق لحاظ می‌شود.

(۴) نقطه عطف منحنی تغییر شکل، دقیقاً در وسط ورق‌ها می‌باشد.

بر اساس روش پیشنهادی ویتاکر و همکاران [۲]، جابجایی تسلیم (Δ_y)، ظرفیت برشی تسلیم (V_y) و سختی برشی تسلیم (K_y) هر ورق معادل

X ، به ترتیب از روابط زیر بدست می‌آیند:

$$\Delta_y = \frac{3 \sigma_y l^2}{4 E t} \quad (1)$$

$$V_y = \frac{2M_y}{l} = \frac{\sigma_y b_{1eq} t^2}{2l} \quad (2)$$

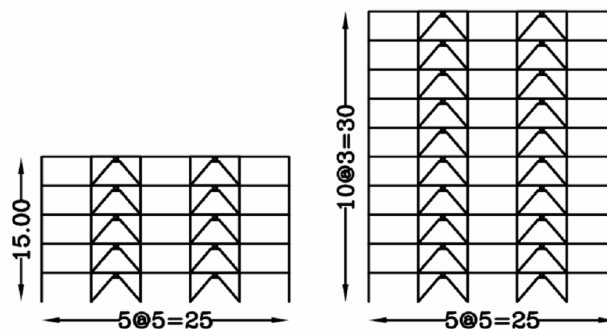
$$K_y = \frac{V_y}{\Delta_y} \quad (3)$$

در روابط بالا l ، t و b_{leg} به ترتیب ضخامت، ارتفاع و عرض ورق‌های X شکل و σ_y تنش تسلیم مصالح ورق می‌باشد که معمولاً از فولاد نرمه است. در این صورت می‌توان رفتار نیرو-جابجایی میراگر را به صورت مدل دو خطی با سخت‌شوندگی کرنشی ۰٫۰۵ در نظر گرفت.

۳. فرضیات مدلسازی و زلزله‌های بکار رفته

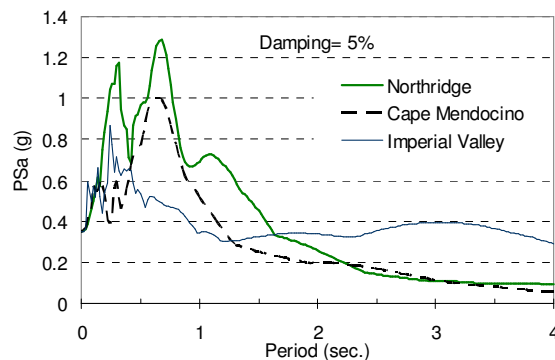
قاب‌های بکار رفته در این تحقیق، قاب‌های فولادی ۵ طبقه و ۱۰ طبقه مجهز به المان ADAS می‌باشند (شکل ۳). این قاب‌ها قسمتی از سازه سه بعدی متقارن هستند که طول دهانه، ارتفاع طبقات و عرض باربر آنها به ترتیب ۵، ۳ و ۵ متر فرض شده است. در انتخاب این مدل‌ها سعی شده که مشخصات هندسی قاب‌ها، حتی‌الامکان مشابه ساختمان‌های متعارف باشد. بارگذاری جانبی این قاب‌ها بر اساس آیین‌نامه ۲۸۰۰ ایران [۶]، انجام گرفته و فرض می‌شود که این سازه‌ها همگی در ناحیه لرزه‌خیزی ۱ و بر روی خاک نوع III آیین‌نامه ۲۸۰۰ ایران، با کاربری مسکونی احداث شده‌اند. طراحی اجزای سازه‌ای نیز مطابق ضوابط AISC-ASD [۷] طوری انجام می‌شود که بیش مقاومتی در المان‌های سازه وجود نداشته باشد (تنهادر چنین حالتی مقایسه دو سازه معنی پیدا می‌کند).

برای انجام تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی از نرم‌افزار SAP2000 استفاده می‌شود [۸]. طراحی و مدلسازی با این فرض انجام می‌شود که تمامی المان‌های سازه‌ای در حوزه الاستیک باقی مانده و فقط میراگرها وارد حوزه غیرارتجاعی شوند. برای مدل کردن رفتار غیرخطی میراگرها از مدل دوخطی ویتاکر و همکاران با سخت‌شوندگی کرنشی ۵٪ استفاده می‌شود. برای تعریف چنین رفتاری در نرم‌افزار SAP2000 از المان پلاستیک ون، استفاده می‌شود.



شکل ۳- مشخصات هندسی قاب‌های بکار رفته در تحقیق

جهت انجام تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی از رکورد افقی سه زلزله معروف جهان، که همگی بزرگی بیش از ۶ ریشتر دارند، استفاده می‌شود. این رکوردها در زمینی ثبت شده‌اند که مشخصات آن منطبق بر خاک نوع III آیین‌نامه ۲۸۰۰ ایران است (جدول ۱). برای حذف اثر پارامتر حداکثر شتاب زمین (PGA)، رکوردهای انتخابی ابتدا بر اساس شتاب مبنای طرح منطقه یعنی g ۰٫۳۵، مقیاس شده و سپس مورد استفاده قرار می‌گیرند. در شکل ۴ طیف شبه‌شتاب این رکوردهای مقیاس شده، با نسبت میرایی ۵٪ آمده است.



شکل ۴- طیف شبه‌شتاب زلزله‌های منتخب با $PGA=0.35g$



جدول ۱- مولفه افقی زلزله‌های مورد استفاده در تحقیق

Earthquake	Station	M	PGA	USGS soil
Imperial Valley 1979	H-E05230	6.5	0.44	C
Northridge 1994	NWH360	6.7	0.59	C
Cape Mendocino 1992	89156 Petrolia	7.1	0.66	C

جدول ۲- جابجایی تسلیم میراگرها در قاب‌های ۵ طبقه و ۱۰ طبقه در سه زلزله مختلف بر حسب cm

	Northridge	Imperial valley	Cape Mendocino
5-Story Building	0.38	0.27	0.25
10-Story Building	0.22	0.17	0.23

۴. روش بهینه‌سازی

از ایده تئوری تغییرشکل‌های نسبی یکنواخت، می‌توان برای ارزیابی توزیع بهینه سختی میراگرها در ارتفاع قاب‌های ساختمانی مجهز به المان‌های ADAS استفاده کرد. طبق این ایده، در سازه‌ای که تغییرشکل‌های نسبی در طبقات مختلف آن به صورت یکنواخت‌تری توزیع شده باشد، از مصالح استفاده بهینه‌تری شده و آن سازه رفتار بهتری خواهد داشت. جهت انجام این کار می‌توان از الگوریتم پیشنهادی مقدم و همکاران [۹] با اعمال اندکی تغییرات، استفاده کرد. به این صورت که در این مقاله تغییر سختی و مقاومت طبقات، جهت رسیدن به تغییرشکل‌های برشی نسبی یکنواخت، فقط با تغییر نسبت B/D در طبقات انجام گرفته و سطح مقطع بادبندها در تمام مراحل اجرای الگوریتم ثابت باقی می‌ماند. الگوریتم بهینه‌سازی جهت دستیابی به الگوی توزیع مناسب نسبت B/D در مراحل زیر انجام می‌گیرد:

(۱) سازه بر اساس ضوابط تنش مجاز آیین‌نامه AISC طوری طراحی می‌شود که بیش مقاومتی نداشته و نسبت B/D در تمام طبقات آن ۲ باشد.
(۲) سازه تحت اثر رکورد زلزله مورد نظر، با نرم‌افزار SAP2000 تحلیل غیرخطی شده و پس از محاسبه شکل‌پذیری طبقات، میانگین شکل‌پذیری طبقات با مقدار هدف مقایسه می‌شود. سپس پارامترهای مقاومتی میراگر، بدون تغییر در نسبت B/D اولیه، جهت رسیدن به شکل‌پذیری هدف، تنظیم می‌شود. در این مقاله از شکل‌پذیری هدف ۵ استفاده می‌شود. در جدول ۲ تغییر مکان تسلیم میراگرها جهت رسیدن به این شکل‌پذیری هدف، آمده است.

(۳) پس از رسیدن به شکل‌پذیری هدف، مقادیر حداکثر گریز برشی بین طبقه‌ای $(\Delta_{sh})_i$ ، میانگین آنها (Δ_{avg}) و ضریب تغییرات آنها (COV) از رابطه (۴) محاسبه می‌گردد. اگر ضریب تغییرات به اندازه کافی کوچک نباشد، سازه نیاز به بهینه‌سازی داشته و بایستی به گام بعدی رفت.

$$COV = \frac{1}{\Delta_{avg}} \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N ((\Delta_{sh})_i - \Delta_{avg})^2} \quad N: \text{تعداد طبقات}; \quad (4)$$

(۴) از سختی میراگرها بدون تغییر در مساحت بادبندها، در طبقاتی که گریز برشی کمتری نسبت به مقدار میانگین دارند، کاسته شده و به طبقاتی که گریز برشی بیشتر از مقدار میانگین دارند، افزوده می‌شود. برای همگرایی این تغییرات باید به صورت تدریجی با استفاده از رابطه (۵) انجام گیرد. این رابطه برای تغییر تدریجی مشخصات مقاومتی از الگوی پیشنهادی مقدم و همکاران برگرفته شده است [۹]. توان α مطابق پیشنهاد آنها ۰/۲ منظور می‌شود.

$$[(S_b)_i]_{n+1} = [(S_b)_i]_n \left[\frac{(\Delta_{sh})_i}{\Delta_{avg}} \right]^\alpha \quad (5)$$

در رابطه فوق، $(S_b)_i$ سختی میراگرها در طبقه i ام و n شماره گام مورد نظر می‌باشد. برای مقایسه دو سازه لازم است کل مصالح بکار رفته و وزن سازه اولیه با سازه جدید یکسان باشد. بنابراین لازم است تعداد میراگرهای بدست آمده در این گام، در نسبت تجمعی تعداد میراگرهای حالت اولیه به حالت بدست آمده در این گام، ضرب شود.

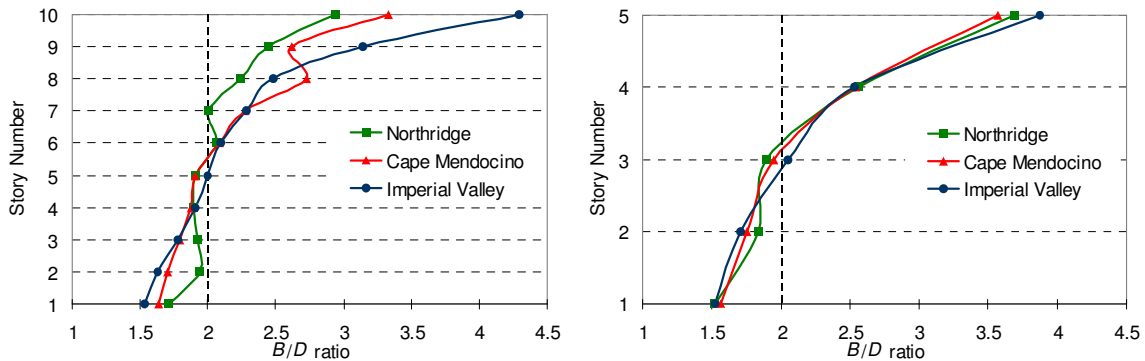
(۵) ضریب تغییرات گریز برشی طبقات، مجدداً در سازه جدید محاسبه می‌شود. اگر این ضریب به اندازه کافی کوچک باشد (مثلاً کوچکتر یا مساوی ۰/۰۵)، بهینه‌سازی متوقف شده و الگوی توزیع B/D مربوط به آن گام به عنوان الگوی مناسب شناخته می‌شود. در غیر این صورت مراحل ۴ و ۵ تکرار می‌شود.

در تمام مراحل الگوریتم، بایستی توجه کرد که تغییر شکل غیرخطی میراگرها از محدوده $10\Delta_i$ خارج نشده و بادبندها هم در اثر سخت‌شوندگی کرنشی میراگرها، وارد حوزه غیرخطی نشوند؛ در صورت بروز چنین حالتی عمل بهینه‌سازی متوقف می‌شود.

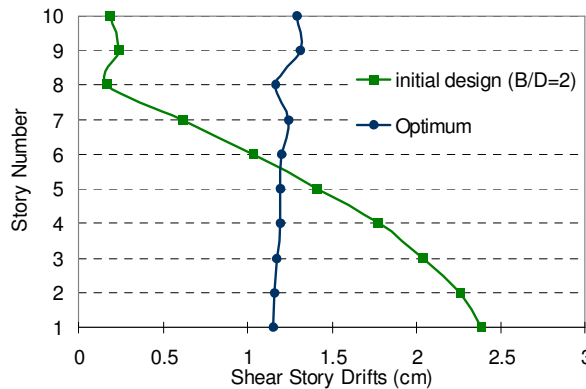
۵. تفسیر نتایج

توزیع نسبت B/D با یکنواخت‌سازی گریز طبقات در قاب‌های ۵ طبقه و ۱۰ طبقه تحت اثر سه زلزله مختلف در شکل ۵ آمده است. با مقایسه الگوی توزیع حاصل برای نسبت B/D با مقدار پیشنهادی ویتاکر و همکاران ($B/D=2$) می‌توان گفت، نسبت B/D مناسب در طبقات فوقانی بزرگتر از ۲ و در طبقات تحتانی کوچکتر از ۲ می‌باشد.

در جدول ۳ ضریب تغییرات گریز برشی طبقات در گام اول ($B/D=2$) و گام نهایی تحت اثر سه زلزله مختلف آورده شده است. با مراجعه به این جدول، می‌توان گفت که مقدار این ضریب تغییرات (COV) در تمامی مدل‌ها در گام اول، مخصوصاً در مدل‌های ۵ طبقه، بسیار بزرگ است. این امر نشان دهنده غیریکنواخت بودن تغییر شکل‌های نسبی برشی طبقات در این مدل‌ها می‌باشد. اما ملاحظه می‌شود که پس از بهینه‌سازی (در گام نهایی)، مقدار این ضریب به صفر نزدیک شده و گریز طبقات نیز یکنواخت می‌شود. در شکل ۶ توزیع گریز برشی طبقات در سازه ۱۰ طبقه تحت اثر زلزله امپریال آورده شده است. این شکل نشان می‌دهد که حداکثر تغییر شکل نسبی برشی، در گام اول $2/4$ سانتی‌متر بوده ولی پس از یکنواخت‌سازی به $1/3$ سانتی‌متر کاهش یافته است.



شکل ۵- توزیع نسبت B/D ام بعد از یکنواخت‌سازی گریز طبقات برای قاب‌های ۵ طبقه و ۱۰ طبقه تحت اثر سه زلزله مختلف

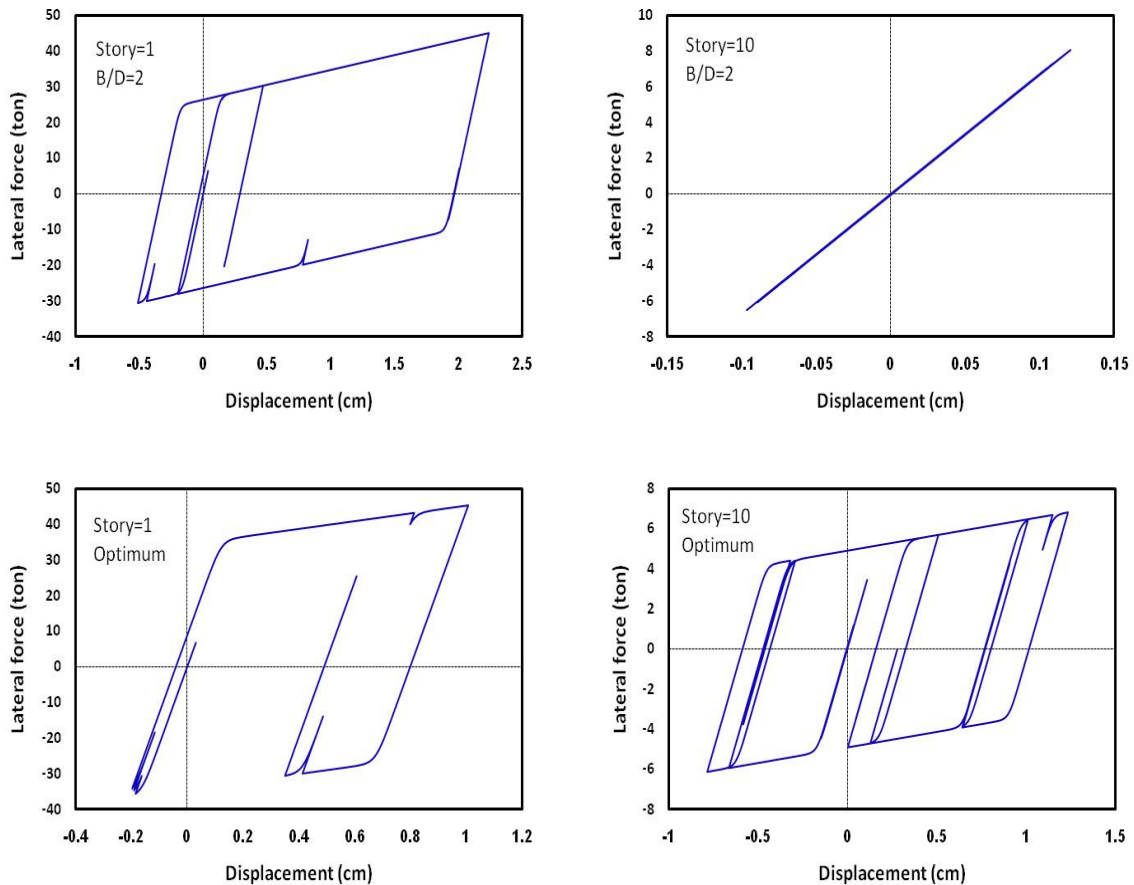


شکل ۶- تغییر شکل نسبی برشی طبقات در سازه ۱۰ طبقه در دو حالت قبل و بعد از بهینه‌سازی تحت اثر زلزله امپریال

جدول ۳- ضریب تغییرات (COV) گریز برشی طبقات در دو حالت قبل و بعد از بهینه‌سازی

		Northridge	Imperial valley	Cape Mendocino
5-Story Building	B/D=2	0.60	0.78	0.59
	Optimum	0.05	0.02	0.04
10-Story Building	B/D=2	0.3	0.73	0.48
	Optimum	0.04	0.05	0.03

یکنواخت‌سازی گریز طبقات باعث بهبود رفتار چرخه‌ای میراگرها می‌شود. برای مثال در شکل ۷ منحنی هیستریزیس میراگر طبقه اول و طبقه آخر از قاب ۱۰ طبقه در دو حالت طراحی با B/D ثابت و B/D بهینه (یکنواخت‌سازی گریز طبقات)، تحت اثر زلزله امپریال آورده شده است. با مراجعه به این شکل می‌توان گفت؛ اگر در انتخاب سختی میراگر طبقات از نسبت B/D ثابت در کلیه طبقات ساختمان استفاده شود، در این صورت میراگر طبقه دهم تسلیم نشده و هیچ اتلاف انرژی در آن صورت نمی‌گیرد و این در حالی است که میراگر طبقه اول از مرز جابجایی IOA_1 (مرز خرابی میراگر) گذشته و خراب شده است. پس از یکنواخت‌سازی گریز طبقات با توزیع بهینه نسبت B/D ، ملاحظه می‌شود که میراگر طبقه دهم نیز تسلیم شده و با ورود به حوزه غیرخطی در استهلاک انرژی زلزله مشارکت می‌کند و در این حال، رفتار چرخه‌ای میراگر طبقه اول بسیار بهبود یافته و از محدوده خرابی وارد حوزه چرخه‌های پایدار شده است.



شکل ۷- منحنی هیستریزیس میراگر طبقه اول و طبقه دهم ساختمان ۱۰ طبقه تحت اثر زلزله امپریال

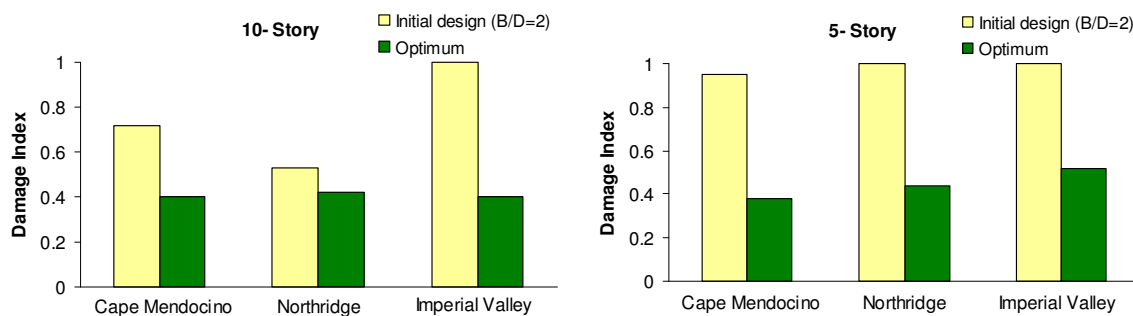
۶. اندیس خرابی سازه

برای مقایسه رفتار کلی سازه‌ای که توزیع جابجایی نسبی در طبقات آن با الگوریتم پیشنهادی در این مقاله یکنواخت شده است، با سازه‌ای که به طور معمول و با نسبت سختی باینند به میراگر (B/D) ثابت طراحی شده است، می‌توان از مقایسه اندیس خرابی سازه در این دو حالت استفاده کرد. روابط متعددی برای محاسبه اندیس خرابی پیشنهاد شده است که از جمله معروفترین و ساده‌ترین آنها رابطه پیشنهادی پاول و الله‌آبادی می‌باشد [۱۰]. در این رابطه تغییرشکل‌های نسبی برشی طبقات به عنوان کمیت خرابی انتخاب می‌شود. برای محاسبه اندیس خرابی کلی سازه ابتدا اندیس خرابی تک تک طبقات (DI_s)، مطابق رابطه (۶) محاسبه شده و نهایتاً اندیس خرابی کلی سازه (DI_g)، از رابطه (۷) بدست می‌آید:

$$DI_s = \left(\frac{D_{shm} - D_{shy}}{D_{shu} - D_{shy}} \right)^m \quad (6)$$

$$DI_g = \frac{\sum_{i=1}^N (DI_{si})^2}{\sum_{i=1}^N DI_{si}} \quad (7)$$

در روابط فوق، D_{shm} معرف گریز برشی بین طبقه‌ای موجود، D_{shy} گریز برشی تسلیم و D_{shu} گریز برشی نهایی بوده و N تعداد طبقات سازه می‌باشد. مقدار توان m نیز معمولاً عدد ۲ در نظر گرفته می‌شود. در شکل ۸ اندیس خرابی مدل‌های ۵ طبقه و ۱۰ طبقه تحت اثر سه زلزله مختلف آورده شده است. مطابق این شکل می‌توان گفت که پس از یکنواخت‌سازی جابجایی‌های نسبی طبقات طبق الگوریتم پیشنهادی، کاهش قابل ملاحظه‌ای در اندیس خرابی همه سازه‌ها تحت تمامی رکوردهای زلزله صورت گرفته است. لذا انتظار می‌رود رفتار سازه‌ای که گریز طبقات آن با الگوی نسبت B/D متغیر در ارتفاع، حاصل از الگوریتم پیشنهادی، یکنواخت شده است، در زلزله‌های واقعی بهتر از سازه طراحی شده به طور معمول و با نسبت B/D ثابت باشد.



شکل ۸- مقایسه اندیس خرابی سازه‌های ۵ طبقه و ۱۰ طبقه در دو حالت قبل و بعد از یکنواخت‌سازی گریز طبقات

۷. نتیجه‌گیری

در این مقاله یکنواخت‌سازی گریز بین طبقه‌ای با توزیع بهینه نسبت سختی باینند به میراگر (B/D) در دو قاب ساختمانی ۵ طبقه و ۱۰ طبقه مجهز به المان‌های ADAS تحت اثر سه زلزله مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت. در ابتدا، از نسبت B/D ثابت پیشنهادی ویناکر و همکاران، جهت توزیع سختی میراگرها در طبقات مختلف سازه استفاده گردید ($B/D=2$). سپس در طول یک فرایند بهینه‌سازی این نسبت بر پایه تئوری تغییرشکل‌های یکنواخت، بعنوان یک متغیر در ارتفاع سازه مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که نسبت B/D مناسب در طبقات فوقانی عموماً بزرگتر از ۲ و در طبقات تحتانی کوچکتر از ۲ می‌باشد. استفاده از این الگوی B/D در ارتفاع سازه باعث می‌شود که گریز برشی طبقات به طور قابل توجهی یکنواخت شده و حداکثر تغییرشکل طبقات نیز به طور چشمگیری کاهش می‌یابد.

در ادامه، جهت ارزیابی دقیق‌تر سازه‌های بهینه شده نسبت به حالت اولیه آنها، اندیس خرابی این قابها در دو حالت قبل و بعد از یکنواخت‌سازی گریز باهم مقایسه شدند. نتایج نشان داد که یکنواخت‌سازی گریز طبقات با الگوریتم پیشنهادی باعث کاهش مقدار قابل توجهی در اندیس خرابی سازه می‌شود و در نتیجه انتظار می‌رود چنین سازه‌ای در زلزله‌های واقعی رفتار بهتری از خود نشان دهد.



۸. مراجع

1. Bergman, D.M. and Goel, S.C., (1987), "Evaluation of Cyclic Testing of Steel-Plate Devices for Added Damping and Stiffness," Technical Report UMCE 87-10, The University of Michigan, Ann Arbor, MI.
2. Whittaker, A.S., Bertero, V.V., Alonso, L.J. and Thompson, C.L., (1989), "Earthquake Simulator Testing of Steel Plate Added Damping and Stiffness Elements," Technical Report UCB/EERC-89/02, University of California, Berkeley.
3. Whittaker, A.S., Bertero V.V., Thompson C.L., Alonso L.J., (1991), "Seismic Testing of Steel Plate Energy Dissipation Devices," Earthquake Spectra, **7** (4), pp 563-604.
4. Aiken, I.D., Nims, D.K., Whittaker, A.S. and Kelly, J.M., (1993). "Testing of Passive Energy Dissipation Systems," Earthquake Spectra, **9** (3), pp 335-370.
5. Xia, C. and Hanson, R.D., (1992), "Influence of ADAS Element Parameters on Building Seismic Response," Journal of Structural Engineering, ASCE. **118** (7), pp 1903-1918.
۶. کمیته دائمی بازنگری آیین‌نامه طراحی ساختمانها در برابر زلزله، (۱۳۸۴)، "آیین‌نامه طراحی ساختمانها در برابر زلزله"، استاندارد ۲۸۰۰، ویرایش سوم، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن.
7. AISC (2005), "Specification for Structural Steel Buildings," ANSI/AISC 360-05, American Institute of Steel Construction, Chicago (IL).
8. SAP2000 (2005), "Integrated Structural Analysis and Design Software," Version 10, Computers and Structures Inc., Berkeley (CA).
9. Moghaddam, H., Hajirasouliha, I. and Doostan, A., (2005), "Optimum Seismic Design of Concentrically Braced Steel Frames: Concepts and Design Procedures," Journal of Constructional Steel Research, **61** (2), pp 151-166.
10. Powell, G.H. and Allahabadi, R., (1988), "Seismic Damage Prediction by Deterministic Methods: Concepts and Procedures," Earthquake Engineering and Structural Dynamics, **16** (5), pp 719-734.