

پیشنهاد ضریب رفتار برای سیستم دوگانه‌ی قاب خمشی فولادی با شکل‌پذیری متوسط و مهاربند هم‌گرا با میراگر اصطکاکی پال

Original Article

سید مهدی زهرانی* (استاد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه تهران

حسین اعلانی (دانشجوی دکتری)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد قائم‌شهر

ضریب رفتار در استانداردهای تحلیل و طراحی مبین جذب انرژی لرزه‌یی ورودی از زمان تشکیل اولین مفصل خمیری تا مکانیزم خرابی است و از آن برای کاهش نیروهای طراحی استفاده می‌شود. پارامترهای مختلفی چون ضریب کاهش در اثر شکل‌پذیری، مقاومت افزون و درجه‌ی نامعینی در تعیین مقدار آن مؤثرند. میراگرها نیز به‌عنوان ابزار بهسازی لرزه‌یی باعث استهلاک بخشی از انرژی ورودی زلزله می‌شوند. تاکنون پژوهش‌های بسیاری در حوزه‌ی ضریب رفتار صورت گرفته است، ولی نقش میراگر اصطکاکی و تأثیر آن در پارامترهای ضریب رفتار هنوز به‌خوبی بررسی نشده است. در این نوشتار، با در نظر گرفتن میراگر اصطکاکی پال در طبقات و با استفاده از تحلیل‌های غیرخطی، تأثیر این میراگر در ضریب رفتار قاب‌های دو بُعدی فولادی ۶، ۳ و ۹ طبقه دارای ۵، ۳ و ۷ دهانه‌ی طراحی شده براساس پیش‌نویس دیرایش چهارم استاندارد ۲۸۰۰ و آخرین ویرایش مبحث ششم و دهم و تجدیدنظر اول نشریه‌ی ۳۶۰ مورد بررسی قرار گرفته است، که حکایت از بهبود ضریب رفتار تا ۱۰٪ در سیستم‌های دوگانه‌ی فولادی و مهاربندی هم‌گرا به همراه میراگر پال نسبت به نمونه‌های قاب بدون میراگر دارد.

واژگان کلیدی: ضریب رفتار، میراگر اصطکاکی پال، سیستم دوگانه‌ی فولادی، مهاربند هم‌گرا، تحلیل استاتیکی غیرخطی، تحلیل دینامیکی غیرخطی.

mzahrai@ut.ac.ir
h.aalaei@qaemshahriau.ac.ir

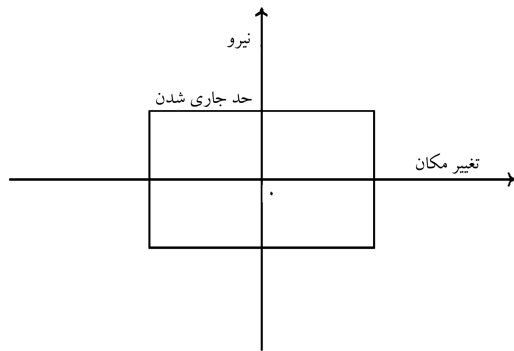
۱. مقدمه

در پژوهشی در سال ۱۹۹۷، نسبت به ارائه‌ی تاریخچه‌ی انواع سیستم‌های جاذب انرژی اقدام شده است.^[۱] در سال ۱۹۹۸ نیز، نحوه‌ی طراحی المان‌های به‌کاررفته در این‌گونه سیستم‌ها برای مقابله با نیروهای جانبی ناشی از زلزله ارائه شده است.^[۲] همچنین پس از سال‌ها تلاش در این زمینه و بررسی نتایج حاصل در مورد چگونگی کاربرد سیستم‌های جاذب انرژی، انجمن مهندسان سازه‌ی شمال کالیفرنیا اقدام به ارائه‌ی دستورالعملی مبنی بر استفاده از روش غیرخطی در سازه‌های مجهز به سیستم‌های جاذب انرژی در سال‌های ۱۹۹۲ و ۱۹۹۴ کرده است.^[۳] همچنین در طی سال‌ها دستورالعمل‌هایی مانند FEMA۲۷۳، FEMA۲۷۴، FEMA۳۰۲، ATC ۱۹ و NEHRP۲۰۰۳ برای ارزیابی ساختمان‌های دارای سیستم جاذب انرژی و طراحی سیستم‌های سازه‌یی دارای میراگر براساس روش‌های خطی منتشر شده است.^[۴-۵] در سال ۲۰۱۲ تعیین ضریب رفتار قاب مجهز به میراگر اصطکاکی پال به روش تجربی، که در آن برای یک قاب فولادی یک طبقه به ابعاد ۱۹۰ × ۸۰ سانتی‌متر مجهز به میراگر اصطکاکی پال و به روش یانگ انجام شده است، بررسی شد.^[۶] همچنین در همان سال پژوهشگران دیگری در رابطه با ضریب رفتار سازه‌های

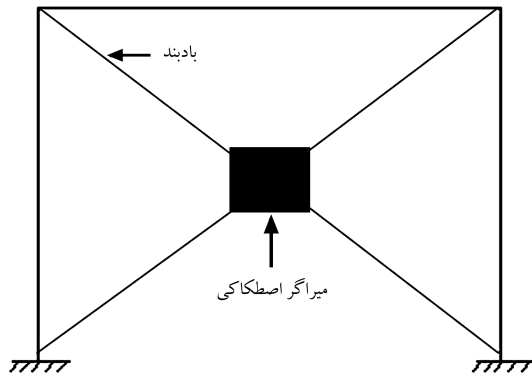
در حین وقوع زلزله مقدار قابل توجهی انرژی به سازه وارد می‌شود. در روش‌های معمولی طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله، نیاز ساختمان از طریق سختی، شکل‌پذیری و میرایی سازه تأمین می‌شود. استفاده از روش‌های ارتجاعی در تحلیل و طراحی سازه‌های مقاوم در برابر زلزله به‌لحاظ سادگی و کاربردی بودن اهمیت ویژه‌ی دارد. در این نوع روش‌ها با کاهش نیروهای طراحی، که میزان آن وابسته به نوع سیستم سازه‌یی است، عملاً شرایط ورود سازه‌ها به محدوده‌ی رفتار غیرخطی مصالح و اتلاف بخشی از انرژی ورودی به سیستم از طریق آن فراهم می‌شود. به این ترتیب، از انهدام سازه جلوگیری می‌شود؛ ولی بعد از وقوع زلزله اگر ساختمان نیازمند ترمیم و بازسازی باشد، مستلزم صرف هزینه‌ی زیاد است. بنابراین، به‌منظور کاستن از صدمات سازه‌یی در حین وقوع زلزله استفاده از میراگرهای جاذب انرژی پیشنهاد شده است. ایده‌ی اولیه‌ی استفاده از سیستم‌های جاذب انرژی به اوایل قرن بیستم میلادی بر می‌گردد.

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۷/۹، اصلاحیه ۱/۱۳۹۳/۱۰/۲۷، پذیرش: ۱۳۹۳/۱۰/۲۷



شکل ۱. حلقه‌ی هیستریزیس میراگر اصطکاکی.



شکل ۲. قاب با مهاربند قطری و میراگر اصطکاکی.

۳. تعریف مؤلفه‌های ضریب رفتار

هر آیین‌نامه‌ی طراحی لرزه‌یی معیارهایی برای طراحی سیستم‌های سازه‌یی ارائه می‌دهد. در این معیارها نوع سیستم و جنبه‌های ویژه‌ی آن مدنظر خواهند بود، که نحوه‌ی رفتار سیستم را تعیین می‌کنند. در بیشتر آیین‌نامه‌ها از جمله آیین‌نامه‌ی طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰ ایران)، روش متعارف تعیین نیروهای جانبی مبتنی بر روش استاتیکی معادل مطابق رابطه‌ی ۱ است. روش به‌دست آوردن نیروی معادل استاتیکی در بیشتر آیین‌نامه‌ها بر مبنای طراحی براساس ضریب رفتار است.

$$V = C.W, \quad C = \frac{ABI}{R} \quad (1)$$

که در آن، A نسبت شتاب مبنای طرح، B ضریب بازتاب، I ضریب اهمیت و R ضریب رفتار سازه است. استاندارد ۲۸۰۰ نیز مثل برخی آیین‌نامه‌های لرزه‌یی معتبر دنیا مقادیر مختلفی را برای تعیین ضریب رفتار معرفی می‌کند. ATC۱۹ و ATC۳۴ از روش ساده‌یی به‌صورت ضرب ۳ پارامتر ارائه‌شده در رابطه‌ی ۲ برای تعیین ضریب رفتار استفاده می‌کنند: [۲۰]

$$R = R_{\mu} \cdot R_S \cdot R_R \quad (2)$$

که در آن، R_{μ} ضریب کاهش در اثر شکل‌پذیری، R_S ضریب مقاومت افزون و R_R ضریب نامعینی ساختمان است. شکل ۳، منحنی نیرو - تغییرمکان به‌دست‌آمده از یک تحلیل استاتیکی غیرخطی به همراه نمودار دوخطی ایده‌آل را نشان می‌دهد. همچنین ویتاکر در سال ۱۹۹۹ برای درنظرگرفتن آثار ناشی از کاربرد میراگر الحاقی در سیستم سازه‌یی، استفاده از پارامتر R_E را به‌صورت رابطه‌ی ۳ پیشنهاد

مجهز به میراگرهای اصطکاکی سیلندری به بررسی پرداخته‌اند. [۱۰] در سال‌های ۲۰۱۲ و ۲۰۱۳ در پژوهش‌های دیگری به بررسی ضرایب رفتار در سیستم‌های قاب خمشی فولادی ویژه به همراه میراگر هیستریزیس و بادبندهای کم‌انرژی ناپذیر پرداخته شده است، که در آن ضریب رفتار قاب خمشی فلزی بدون میراگر، ۵/۹۵ اشاره شده است. [۱۱] همچنین در سال ۲۰۱۳ محققان به بررسی تأثیر میراگر اصطکاکی در ضریب رفتار قاب‌های فولادی مهاربندی‌شده با بادبند شورون در ساختمان‌های ۵، ۸ و ۱۰ طبقه براساس مقادیر مختلف بار لغزش پرداختند و سیستم قاب خمشی دوگانه با مهاربند شورون به همراه میراگر پال و براساس ویرایش سوم استاندارد ۲۸۰۰ را مورد مطالعه قرار دادند و ضرایب رفتار براساس مقادیر مختلف بار لغزش از ۴/۵ تا ۱۳/۵ برای سازه‌ی ۵ طبقه و ۴/۵ تا ۸/۵ برای سازه‌ی ۸ طبقه و ۴/۵ تا ۷ برای سازه‌ی ۱۰ طبقه به‌دست آمده است. [۱۲] پژوهشگرانی نیز در سال ۲۰۱۴ به بررسی تأثیر میراگر اصطکاکی در رفتار لرزه‌یی مخازن پرداخته‌اند. [۱۳] ضریب کاهش نیرو که نقش مهمی در طراحی سازه‌های مقاوم در برابر نیروهای لرزه‌یی دارد، در استاندارد ۲۸۰۰ و UBC۹۷ با نام ضریب رفتار و در گزارش NEHRP با نام ضریب کاهش پاسخ و در گزارش SEAOC به نام ضریب عملکرد سیستم یا المان به‌کار رفته است. با توجه به آنکه در مطالعات پیشین سیستم‌های سازه‌یی متفاوت به همراه میراگرهای مختلفی بررسی شده‌اند، اما تأثیر میراگر اصطکاکی در پارامترهای ضریب رفتار کاملاً بررسی نشده است، لذا در این پژوهش مفاهیم مربوط به پارامترهای تأثیرگذار در ضریب رفتار و ضریب رفتار قاب مجهز به میراگر اصطکاکی پال در مقایسه با سیستم دوگانه فولادی قاب خمشی به همراه مهاربند هم‌گرا مورد ارزیابی قرار گرفته است. طراحی‌ها براساس پیش‌نویس ویرایش چهارم استاندارد ۲۸۰۰ [۱۴] و ضوابط جدید آخرین ویرایش میسج ششم، [۱۴] و میسج دهم مقررات ملی ساختمان با درنظرگرفتن شرایط حدی، [۱۵] و تجدیدنظر اول ویرایش یکم نشریه‌ی ۳۶۰ [۱۶] انجام شده است. بدین منظور، میراگر اصطکاکی پال با بارهای لغزش بهینه به قاب مذکور اضافه شده و با استفاده از نرم‌افزار SAP۲۰۰۰ تحت تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی غیرخطی قرار گرفته است.

۲. میراگر اصطکاکی پال

میراگرهای وابسته به تغییرمکان به دو دسته‌ی میراگرهای تسلیمی و اصطکاکی تقسیم می‌شوند. با توجه به نصب و تعویض نسبتاً آسان و ساده، سیستم‌های اصطکاکی نسبت به سیستم‌های تسلیمی دارای مزیت بیشتری هستند. سیستم ابداعی میراگر اصطکاکی پال اولین بار توسط دو کانادایی در سال ۱۹۸۲ ارائه شده است. [۱] میراگرهای اصطکاکی حلقه‌های پایدار پسماند ایجاد می‌کنند. مدل هیستریزیس ماکروسکوپی این میراگرها مطابق تئوری کولمب است. یکی از مزیت‌های میراگر اصطکاکی پال نسبت به سایر میراگرها با توجه به نمودار هیستریزیس مستطیلی در شکل ۱، اتلاف انرژی بیشتر آن در هر چرخه است.

میراگرهای اصطکاکی پال طوری طراحی می‌شوند که حین زلزله‌های خفیف یا باد نلغزند، اما حین زلزله‌های شدید تحت نیروی از پیش تعیین‌شده شروع به لغزش کنند. این لغزش با استهلاک انرژی زلزله به‌صورت مکانیکی همراه است و از جاری‌شدن مهاربند و دیگر اعضاء سازه جلوگیری می‌کند (شکل ۲). زمانی که بار لغزش میراگر زیاد باشد، اصطکاک در آن صفر خواهد بود و هیچ‌گونه لغزشی اتفاق نمی‌افتد؛ و اگر بار لغزش خیلی کم باشد، مقدار اتلاف انرژی قابل صرف‌نظر کردن است.

که در آن، ϕ تابعی از μ ، T و شرایط خاک در محل است و از رابطه‌ی ۶ به دست می‌آید:

$$\phi = 1 + \frac{1}{\sqrt{2T - \mu T}} - \frac{2}{5T} e^{-2(\ln T - \mu T)^2} \quad (6)$$

۲.۱.۳. ضریب مقاومت افزون (R_S)

در صورتی که رابطه‌ی نیرو - جابه‌جایی برای یک تحلیل استاتیکی غیرخطی موجود باشد، نیروی برش پایه (V_y) و برش پایه‌ی طراحی برای ساختمان در تراز مقاومت (V_w) موجود است، که با استفاده از این اطلاعات، ضریب مقاومت افزون براساس رابطه‌ی ۷ محاسبه می‌شود:

$$R_s = \frac{V_y}{V_w} \quad (7)$$

مقاومت افزونی که در رابطه‌ی ۷ ارائه شده است، عواملی نظیر: اختلاف بین تنش اسمی جاری شدن و تنش واقعی جاری شدن، عدم اطمینان موجود در مدل‌های ریاضی، و اثر المان‌های غیرسازه‌یی را در نظر نمی‌گیرد. به منظور در نظر گرفتن عوامل ذکر شده، مقدار ضریب مقاومت افزون به دست آمده از این روش را می‌توان توسط چند ضریب اصلاحی به ضریب مقاومت افزون واقعی سازه تبدیل کرد.^[۱۲]

۴. مدل تحلیلی

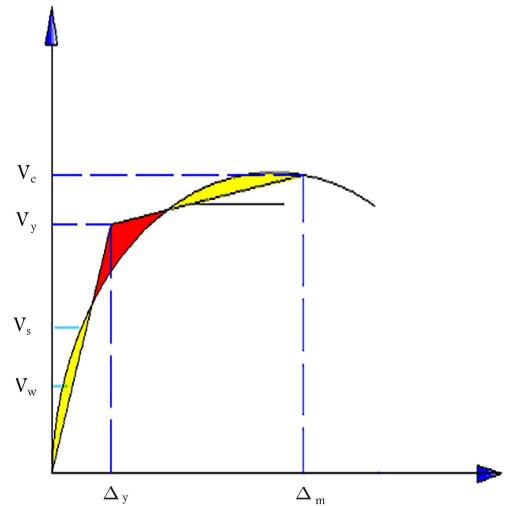
در این بررسی ابتدا نمونه‌های قاب‌های خمشی فولادی ۳، ۶ و ۹ طبقه در ۳ حالت ۳، ۵ و ۷ دهانه مورد بررسی قرار گرفته‌اند. سپس در مرحله‌ی بعد با در نظر گرفتن مهاربند هم‌گرایی قطری در دهانه‌ی وسط و با شکل‌پذیری متوسط، دوباره تحلیل و طراحی انجام شده است. در قاب مورد بررسی که یک قاب کناری سازه است، تمامی دهانه‌ها ۵ متر و ارتفاع طبقات ۳ متر در نظر گرفته شده است. این تذکر لازم است که بارگذاری و طراحی سازه براساس پیش‌نویس ویرایش چهارم استاندارد ۱۲۸۰۰ ایران، آیین‌نامه‌های مبحث ششم مقررات ملی و مبحث دهم مقررات ملی ساختمان (LRFD) بوده و کلیه‌ی ضوابط مربوط به طراحی قاب با مهاربند هم‌گرایی قطری مورد ارزیابی قرار گرفته است. مشخصات بارگذاری عبارت‌اند از:

$$DL = 550 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}, \quad LL = 300 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}, \quad WALL = 300 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

که در آن، DL شدت بار مرده، LL شدت بار زنده، و $WALL$ بار دیوار است. خاک منطقه نوع II و ناحیه با خطر نسبی خیلی زیاد در نظر گرفته شده است.

برای مدل‌سازی میراگر از المان خمیری ون (WEN) در نرم‌افزار SAP2000 استفاده شده است. از ویژگی‌های المان ون این است که می‌تواند برای هر درجه‌ی آزادی دلخواه معرفی شود و رفتار المان در هر جهت مستقل از جهت دیگر است و در آن اثری ندارد. با در نظر گرفتن سختی میراگر و بار لغزش بهینه، که براساس روش فیلیت راثولت و همکاران (۱۹۹۰)،^[۱۳] به دست آمده است، به بررسی تأثیر میراگر پرداخته شده است.

در این مرحله صحت‌سنجی روابط براساس روش فیلیت راثولت و همکاران به منظور طراحی میراگر اصطکاکی پال که در یک سازه‌ی ۳ طبقه با برش لغزش



شکل ۳. منحنی ظرفیت یک مدل سازه‌یی و دوخطی کردن آن.

کرده است:^[۲۱]

$$R = R_\mu \cdot R_S \cdot R_R \cdot R_\xi \quad (3)$$

که در آن، R_ξ ضریب کاهش در نیروهای طراحی لرزه‌یی ناشی از افزودن میراگر الحاقی به سیستم (مازاد بر ۵٪ میرایی ذاتی مصالح) است.

۱.۳. پارامترهای مؤثر در ضریب رفتار

برای معرفی مفهوم ضریب رفتار و پارامترهای مؤثر در آن، رابطه‌ی نیرو - تغییرمکان برای یک قاب مطابق شکل ۳ مورد بررسی قرار می‌گیرد. چنین منحنی را که بیان‌گر پاسخ یک قاب چند درجه آزادی است و در معرض تغییرمکان‌های افزایشی قرار گرفته است، می‌توان با استفاده از تحلیل استاتیکی غیرخطی به دست آورد. منحنی به دست آمده، غالباً با یک منحنی دوخطی تقریب زده می‌شود.

۱.۱.۳. ضریب کاهش در اثر شکل‌پذیری R_μ

یکی از پارامترهایی که می‌توان از شکل ۳ به دست آورد، ضریب کاهش در اثر شکل‌پذیری است. شکل‌پذیری تابعی از رفتار سازه پس از جاری شدن اولیه‌ی مصالح است، که در بارهای دینامیکی و به ویژه زلزله از عوامل ضروری برای عدم فروریزش سازه محسوب می‌شود. بر این اساس ضریب شکل‌پذیری را می‌توان نسبت بیشینه‌ی تغییرمکان قابل تحمل سازه به تغییرمکان حد تسلیم بیان کرد (رابطه‌ی ۴):

$$\mu = \frac{\Delta_{max}}{\Delta_y} \quad (4)$$

پژوهش‌های زیادی بر روی دو مؤلفه‌ی اصلی ضریب رفتار، R_S و R_μ ، مخصوصاً ضریب کاهش در اثر شکل‌پذیری (R_μ) انجام شده است. از این میان می‌توان به پژوهش‌های میراندا و برترو (۱۹۹۴)، ناسارو کراوینکلر (۱۹۹۲) و نیومارک (۱۹۷۹) اشاره کرد، که هر کدام از آنها روابط مختلفی بر حسب دوره‌ی تناوب اصلی سازه، میرایی، نوع خاک و شکل‌پذیری سازه ارائه کرده‌اند. در این پژوهش از روابط میراندا و برترو (۱۹۹۴) در سایت رسوبی برای تعیین ضریب کاهش شکل‌پذیری (رابطه‌ی ۵) استفاده شده است:^[۴]

$$R_\mu = \frac{\mu - 1}{\phi} + 1 \quad (5)$$

(pushover) با در نظر گرفتن یک الگوی بار ثقلی اولیه و الگوی اعمال بار جانبی مطابق با مود اول بر مبنای نشریه‌ی ۳۶۰ قرار گرفته است. در این پژوهش، سازه بر مبنای تغییر مکان هدف پوش داده شده و منحنی دو خطی براساس تغییر مکان هدفی است که مطابق دستورالعمل بهسازی لرزه‌یی، به روش ضرایب تغییر مکان به دست آمده است. ولی از آنجا که سازه پس از رسیدن به تغییر مکان هدف، همچنان ظرفیت باربری جانبی دارد، لذا سازه تا رسیدن به حد ایمنی جانبی هل داده شده و نتایج در این حد نیز مورد ارزیابی قرار گرفته است. همچنین برای انجام یک مقایسه‌ی صحیح، نمونه‌ها تحت تحلیل استاتیکی غیرخطی تا حد ایمنی جانبی در قاب‌های بدون میراگر نیز قرار گرفته‌اند. سپس در ادامه با داشتن نمودار منحنی ظرفیت سازه مشابه، که از انجام تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی حاصل شده است، می‌توان کلیه‌ی پاسخ‌های لرزه‌یی سازه‌یی مربوط به این پژوهش را از آن استخراج کرد. بدین منظور در Excel برنامه‌یی نوشته شده است که می‌توان با وارد کردن مقادیر حاصل از تحلیل پوش‌آور و بر مبنای روش تساوی انرژی که در شکل ۳ نشان داده شده است، برای دو خطی کردن منحنی پوش‌آور استفاده و ضریب رفتار را بر مبنای آیین‌نامه‌ی ATC 19 محاسبه کرد.

یک نمونه قاب معرفی شده با سیستم دوگانه‌ی فولادی قاب خمشی با شکل پذیری متوسط و مهاربند هم‌گرا به همراه میراگر اصطکاکی پال در شکل ۴ و وضعیت تشکیل مفاصل در یکی از نمونه‌ها تحت تحلیل استاتیکی غیرخطی در شکل ۵ نشان داده شده است.

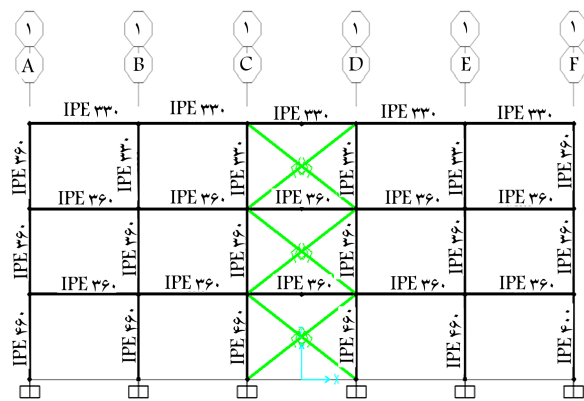
۲.۴. تحلیل دینامیکی غیرخطی

در این پژوهش برای بررسی رفتار واقعی سازه‌ها و بررسی بهتر نتایج و تدقیق تحلیل، از تحلیل دینامیکی غیرخطی در تمام مدل‌ها استفاده شده است. بدین منظور براساس استاندارد ۲۸۰۰، سه زوج شتاب‌نگاشت منطبق با منطقه‌ی مورد بررسی، شتاب‌نگاشت‌های طیس، چی چی و نورتریج در نظر گرفته شده و در شکل ۶، نمودار شتاب‌های طیفی مربوط به آنها نشان داده شده و همه‌ی مدل‌ها تحت اثر این زلزله‌ها، تحلیل دینامیکی غیرخطی شده‌اند. در این نوع تحلیل، از تحلیل دینامیکی غیرخطی فراینده (IDA) استفاده شده است و تمامی نتایج با در نظر گرفتن افزایش گام به گام شتاب‌نگاشت تا مرحله‌ی رسیدن به حد ایمنی جانبی استخراج شده‌اند. استخراج نتایج براساس تغییر مکان و برش پایه‌ی بیشینه در هر گام اعمالی شتاب‌نگاشت است. همچنین با توجه به اینکه در روش فیلپت رانولت و همکاران به منظور طراحی میراگر اصطکاکی پال محدودیت ارتفاع تا ۱۰ طبقه وجود دارد، مدل‌هایی که در این بررسی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند، کمتر از ۱۰ طبقه انتخاب شده‌اند.

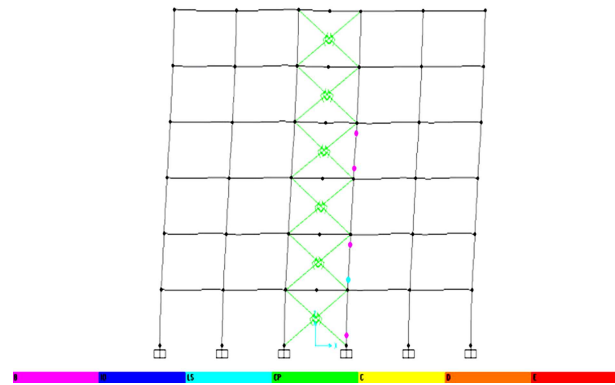
وضعیت تشکیل مفاصل در یکی از نمونه‌ها تحت تحلیل دینامیکی غیرخطی در شکل ۷ نشان داده شده است.

۵. نتایج تحلیل‌ها

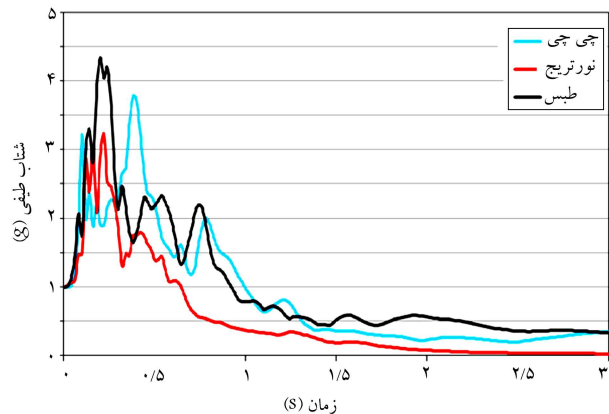
با توجه به قاب‌های معرفی شده با سیستم دوگانه‌ی فولادی قاب خمشی با شکل پذیری متوسط و مهاربند هم‌گرا به همراه میراگر اصطکاکی پال، منحنی‌های پوش‌آوری که از انجام تحلیل استاتیکی غیرخطی و منحنی‌های ظرفیت که از تحلیل دینامیکی فراینده به دست آمده‌اند، در شکل‌های ۸ الی ۱۶ ارائه شده‌اند. نمودار استاتیکی



شکل ۴. مدل نمونه برای قاب کناری سازه‌ی ۳ طبقه در ۵ دهانه.



شکل ۵. وضعیت تشکیل مفاصل خمیری در نمونه‌ی سازه‌ی ۶ طبقه و ۵ دهانه تحت تحلیل استاتیکی غیرخطی.

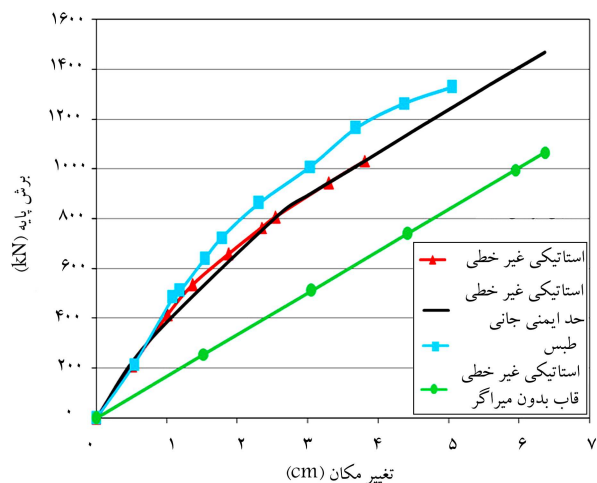


شکل ۶. تغییرات شتاب طیفی با توجه به دوره‌ی تناوب سازه‌ها.

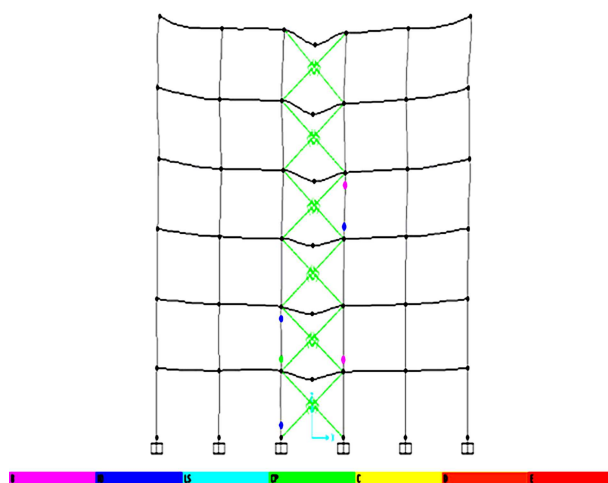
۹۰/۷۵ کیلونیوتن در منطقه با خطر نسبی کم در نظر گرفته شده است، انجام شده است. [۲۲]

۱.۴. تحلیل استاتیکی غیرخطی

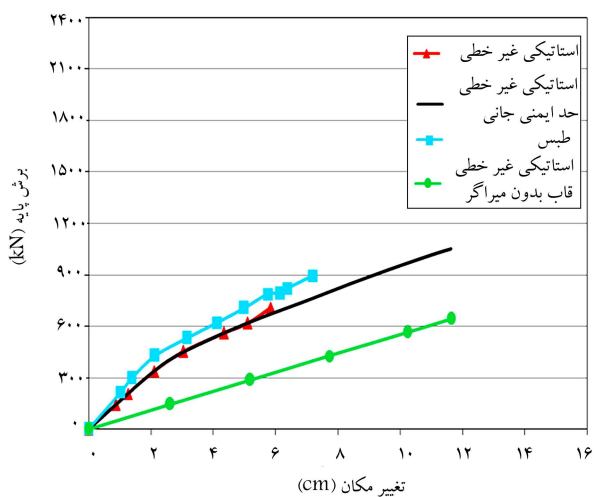
پس از انجام تحلیل خطی و طراحی هر قاب، مفاصل خمیری مطابق با تجدیدنظر اول و ویرایش اول دستورالعمل بهسازی لرزه‌یی (نشریه‌ی ۳۶۰) در نقاط موردنظر به سازه اختصاص یافته است. سپس هر قاب تحت تحلیل استاتیکی غیرخطی



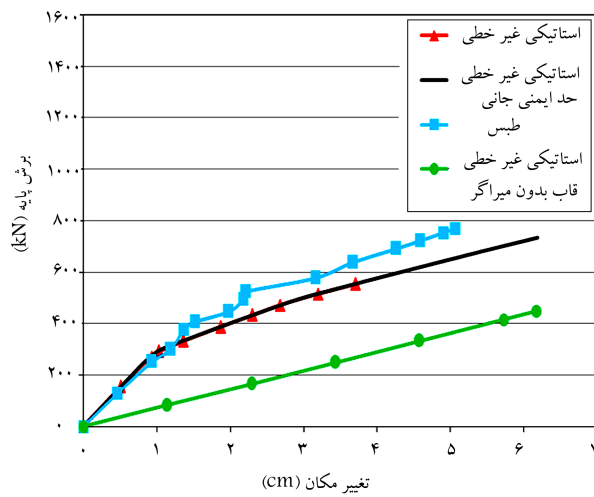
شکل ۱۰. منحنی ظرفیت سازی ۳ طبقه‌ی ۷ دهانه‌ی تحت تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی غیرخطی.



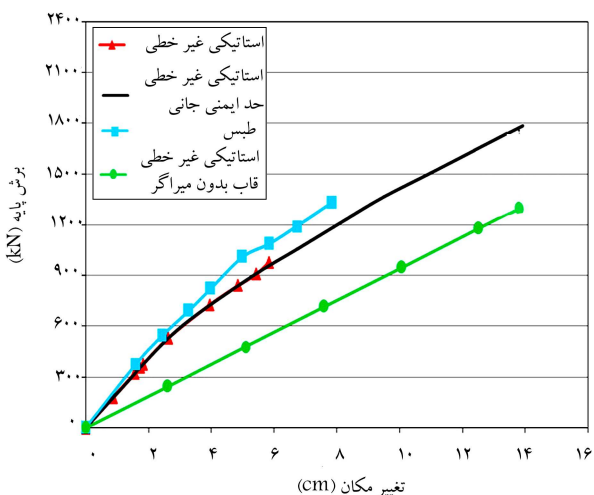
شکل ۷. وضعیت تشکیل مفاصل خمیری در نمونه‌ی سازی ۶ طبقه و ۵ دهانه تحت تحلیل دینامیکی غیرخطی.



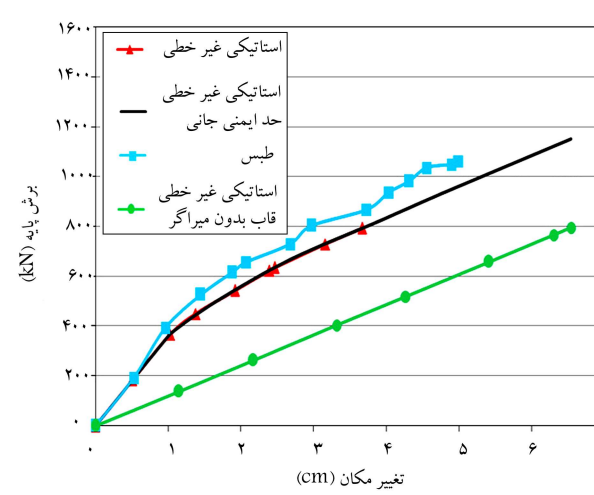
شکل ۱۱. منحنی ظرفیت سازی ۶ طبقه‌ی ۳ دهانه تحت تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی غیرخطی.



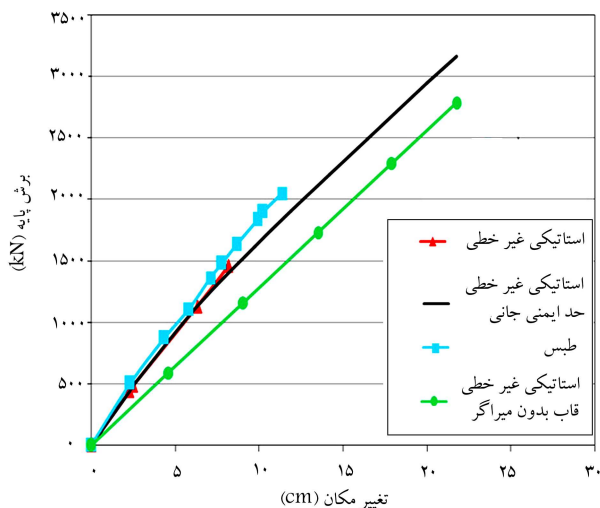
شکل ۸. منحنی ظرفیت سازی ۳ طبقه‌ی ۳ دهانه تحت تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی غیرخطی.



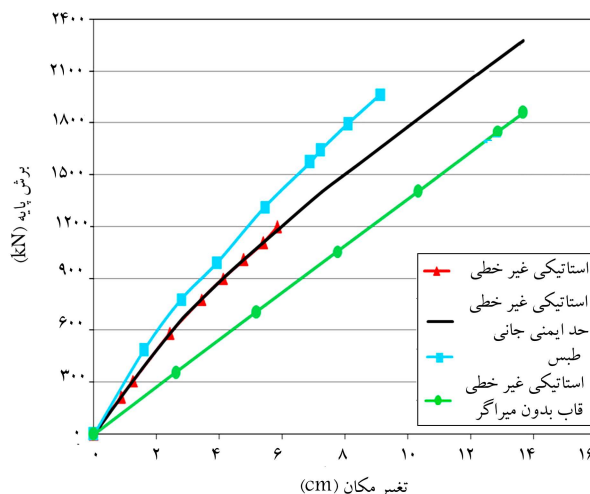
شکل ۱۲. منحنی ظرفیت سازی ۶ طبقه‌ی ۵ دهانه تحت تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی غیرخطی.



شکل ۹. منحنی ظرفیت سازی ۳ طبقه‌ی ۵ دهانه تحت تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی غیرخطی.



شکل ۱۶. منحنی ظرفیت سازی ۹ طبقه‌ی ۷ دهانه تحت تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی غیرخطی.



شکل ۱۳. منحنی ظرفیت سازی ۶ طبقه‌ی ۷ دهانه تحت تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی غیرخطی.

غیرخطی بیانگر حد تغییرمکان هدف و نمودار استاتیکی غیرخطی حد ایمنی جانی، بیانگر تغییرمکان در حد ایمنی جانی است. نکته‌ی قابل توجه در تحلیل مدل‌ها آن است که در تغییرمکان هدف، مفصل خمیری یا تشکیل نشده است، یا در مرحله‌ی خدمت‌رسانی بی‌وقفه قرار دارد. لذا نمونه‌ها با توجه به ظرفیت باربری لرزه‌یی تا حد ایمنی جانی و تشکیل مفاصل خمیری در آن سطح هل داده شده و مورد بررسی قرار گرفته‌اند، که نشان‌دهنده‌ی عملکرد مناسب میراگر است.

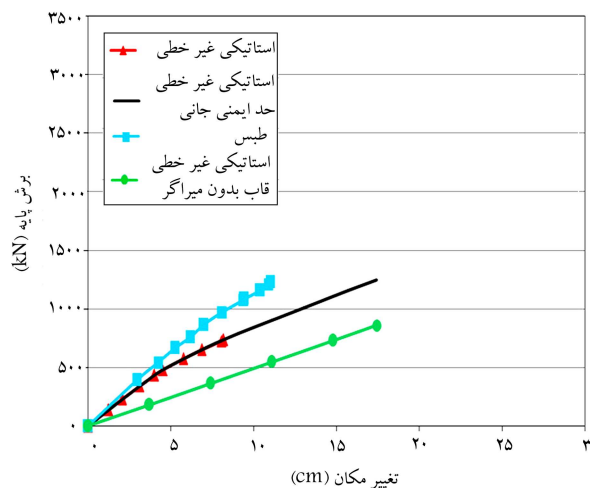
همچنین در بررسی نتایج تحلیل دینامیکی غیرخطی، مطابق با استاندارد ۲۸۰۰ و در نظر گرفتن ۳ زوج شتاب‌نگاشت، فقط نتایج پیشینه‌ی پاسخ در نمونه‌ها که ناشی از شتاب‌نگاشت طیس است، ارائه شده است.

وضعیت تشکیل حلقه‌ی هیستریزس میراگر اصطکاکی پال تحت تحلیل دینامیکی غیرخطی در یکی از نمونه‌ها که سازه‌ی ۶ طبقه و ۵ دهانه است، در شکل ۱۷ نشان داده شده است.

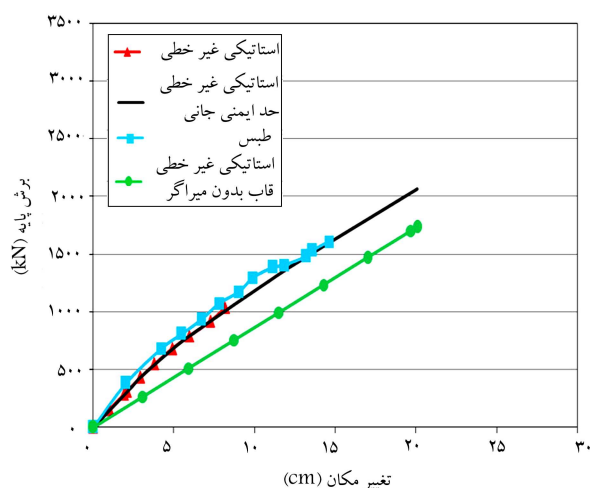
در جدول‌های ۱ و ۲ مقادیر مهم به‌دست‌آمده از منحنی‌های ظرفیت ناشی از تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی جهت تعیین ضریب رفتار در حدود تغییرمکان هدف و ایمنی جانی و در جدول ۳ مقادیر اجزاء ضریب رفتار در حالت بررسی قاب بدون میراگر ارائه شده است.

در شکل‌های ۱۸ و ۱۹ ضرایب شکل‌پذیری و مقاومت افزون در حد تغییرمکان هدف و ایمنی جانی تحت تحلیل استاتیکی غیرخطی نشان داده شده است. ضرایب رفتار به‌دست‌آمده از تحلیل استاتیکی غیرخطی در تمامی نمونه‌ها که با توجه به نتایج ارائه‌شده در جدول‌های ۱ الی ۳ است، در نمودارهای ارائه‌شده در شکل ۲۰ آمده شده است.

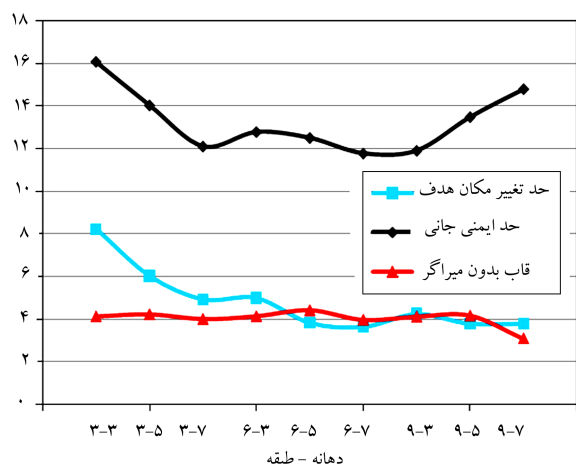
در تمامی نمونه‌ها، نمودار نیرو - تغییرمکان حاصل از تحلیل دینامیکی فراینده تطابق مناسبی را با نتایج حاصل از تحلیل استاتیکی نشان داده است، که تا حد تغییرمکان هدف، با افزایش تعداد دهانه‌ها و طبقات، ضرایب مقاومت افزون و رفتار کاهش می‌یابند. در پژوهش محمودی و عبدی (۲۰۱۲)^[۱۱] با افزایش طبقات هر دو ضریب شکل‌پذیری و مقاومت افزون، با افزایش طبقات کاهش یافته‌اند، ولی در پژوهش محمودی و زارع (۲۰۱۳)^[۱۲] با افزایش طبقات ضریب مقاومت افزون کاهش، ولی ضریب شکل‌پذیری افزایش یا کاهش یافته است.



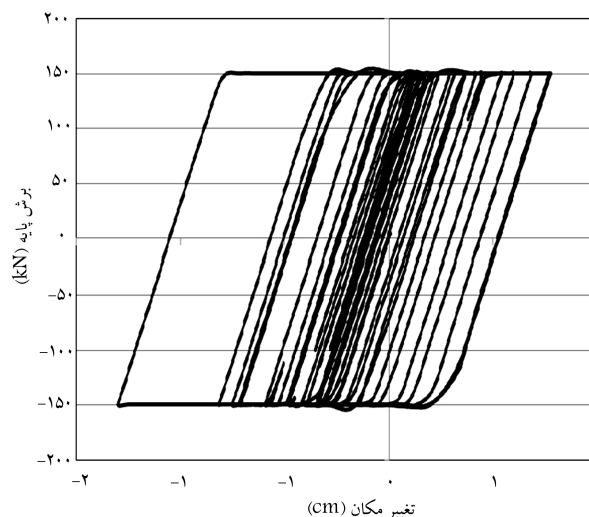
شکل ۱۴. منحنی ظرفیت سازی ۹ طبقه‌ی ۳ دهانه تحت تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی غیرخطی.



شکل ۱۵. منحنی ظرفیت سازی ۹ طبقه‌ی ۵ دهانه تحت تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی غیرخطی.



شکل ۲۰. ضرایب رفتار به دست آمده از تحلیل استاتیکی غیرخطی در تمامی نمونه‌ها.



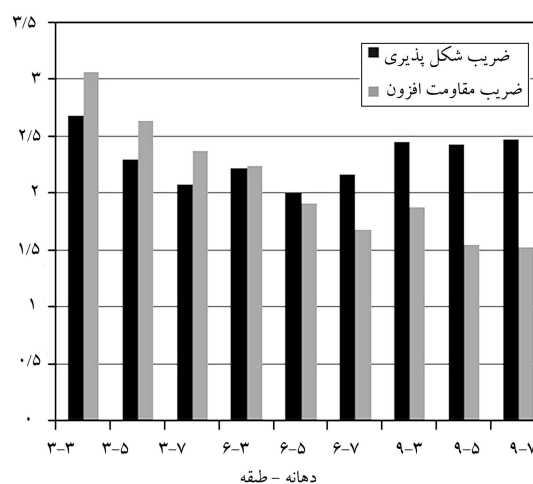
شکل ۱۷. وضعیت تشکیل حلقه‌ی هیستریزیس میراگر در سازه‌ی ۶ طبقه‌ی ۵ دهانه در تحلیل دینامیکی غیرخطی.

در نمونه‌های سازه‌های ۳ و ۶ طبقه، در حد ایمنی جانی با افزایش تعداد دهانه‌ها و طبقات، ضرایب رفتار کاهش یافته و از حدود ۱۶ به ۱۲ و از ۱۲٫۸ به ۱۱٫۸ رسیده است، ولی در نمونه‌های سازه‌ی ۹ طبقه این روند معکوس شده و ضریب رفتار از ۱۱٫۹ به ۱۴٫۸ افزایش یافته است. در نمونه‌های سازه‌های ۳ و ۶ طبقه، با افزایش تعداد دهانه‌ها، ضریب مقاومت افزون روند کاهشی داشته، ولی در سازه‌ی ۹ طبقه این روند افزایشی بوده است. این فرایند در مورد ضریب شکل‌پذیری در نمونه‌های ۳، ۶ و ۹ طبقه معکوس بوده و در نمونه‌های سازه‌های ۳ و ۶ طبقه، با افزایش تعداد دهانه‌ها، ضریب مقاومت افزون یافته، ولی در سازه‌ی ۹ طبقه این مقدار کاهش یافته است. ضریب مقاومت افزون در نمونه‌ها از سازه‌ی ۳ به ۹ طبقه به‌طور میانگین از ۳٫۹۴ به ۳٫۲۹ کاهش، ولی ضریب شکل‌پذیری در نمونه‌ها از سازه‌ی ۳ به ۹ طبقه به‌طور میانگین از ۳٫۵۶ به ۴٫۰۷ افزایش یافته است.

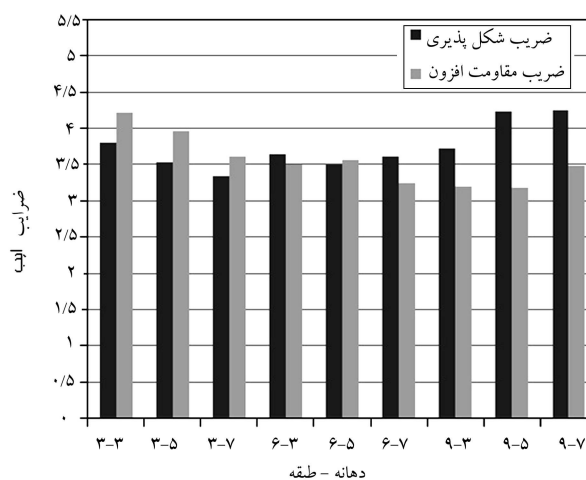
۶. نتیجه‌گیری

در مطالعه‌ی انجام شده که با استفاده از ۹ مدل سازه‌ی فولادی قاب خمشی به همراه مهاربند و میراگر اصطکاکی پال انجام شده است، به تعیین ضریب رفتار ناشی از میراگر اصطکاکی پال اقدام شده است. برای این کار از تحلیل غیرخطی استاتیکی بر مبنای تجدیدنظر اول و ویرایش اول نشریه‌ی ۳۶۰ استفاده شده است. همچنین به بررسی مدل‌ها و تعیین منحنی نیرو- تغییرمکان آنها تحت تحلیل دینامیکی غیرخطی فرایند پرده‌ای و برای رسیدن به این منظور ۳۶ تحلیل غیرخطی استاتیکی و دینامیکی انجام شده است.

از نتایج حاصل از منحنی پش‌آور مشاهده می‌شود، سازه پس از رسیدن به تغییرمکان هدف، دارای ظرفیت باربری لرزه‌ی مناسبی است، لذا تا حد ایمنی جانی هل داده شده و در آن مرحله مورد ارزیابی قرار گرفته است، که این امر افزایش ضریب رفتار را دست‌کم حدود ۹۵٪ نسبت به حد تغییرمکان هدف در پی داشته است. ضریب رفتار این سیستم را می‌توان براساس حد ایمنی جانی در نظر گرفت. در حد ایمنی جانی، در تمامی نمونه‌ها مقدار ضریب رفتار تا حدود ۱۳۵٪ نسبت به ضریب رفتار سیستم قاب خمشی تعیین شده در پیش‌نویس استاندارد ۲۸۰ که ۵ است، افزایش مشاهده می‌شود. در این پژوهش، ضریب رفتار قاب بدون میراگر نیز مورد بررسی قرار گرفته است، که بر مبنای الگوی مود اول براساس نشریه‌ی



شکل ۱۸. ضرایب شکل‌پذیری و مقاومت افزون در تمامی مدل‌ها در حد تغییر مکان هدف.



شکل ۱۹. ضرایب شکل‌پذیری و مقاومت افزون در تمامی مدل‌ها در حد ایمنی جانی.

جدول ۱. مقادیر مهم به دست آمده از منحنی ظرفیت جهت تعیین ضریب رفتار در حد تغییر مکان هدف.

ضریب رفتار	ضریب شکل پذیری	μ	Δ_y (cm)	Δ_m (cm)	ضریب مقاومت افزون (R_s)	برش پایه‌ی تراز مقاومت (Cw) (کیلو نیوتن)	برش پایه (Cy) (کیلو نیوتن)	بار لغزش بهینه (کیلو نیوتن)	نمونه‌ها
R	(R_μ)								
۸٫۲۱	۲٫۶۸	۳٫۴۱	۱٫۰۰	۳٫۴۱	۳٫۰۶	۱۷۳٫۷۵	۵۳۱٫۸۰	۱۱۰٫۱۵	سازه‌ی ۳ طبقه‌ی ۳ دهانه
۶٫۰۱	۲٫۲۹	۲٫۸۱	۱٫۲۱	۳٫۴۱	۲٫۶۳	۲۸۹٫۵۸	۷۶۰٫۶۰	۱۳۳٫۵۷	سازه‌ی ۳ طبقه‌ی ۵ دهانه
۴٫۹۲	۲٫۰۷	۲٫۴۹	۱٫۳۷	۳٫۴۱	۲٫۳۷	۴۰۵٫۴۲	۹۶۱٫۷۶	۱۵۱٫۱۰	سازه‌ی ۳ طبقه‌ی ۷ دهانه
۴٫۹۸	۲٫۲۲	۲٫۳۸	۲٫۴۶	۵٫۸۴	۲٫۲۴	۳۰۰٫۳۶	۶۷۲٫۹۵	۱۳۵٫۴۴	سازه‌ی ۶ طبقه‌ی ۳ دهانه
۳٫۸۲	۲٫۰۰	۲٫۱۲	۲٫۷۶	۵٫۸۴	۱٫۹۱	۵۰۰٫۶۱	۹۵۶٫۷۹	۱۴۹٫۹۴	سازه‌ی ۶ طبقه‌ی ۵ دهانه
۳٫۶۳	۲٫۱۶	۲٫۳۰	۲٫۵۴	۵٫۸۴	۱٫۶۸	۷۰۰٫۸۵	۱۱۷۸٫۵۲	۱۳۲٫۲۹	سازه‌ی ۶ طبقه‌ی ۷ دهانه
۴٫۲۳	۲٫۴۵	۲٫۱۷	۳٫۷۷	۸٫۱۸	۱٫۸۸	۳۹۰٫۰۶	۷۳۳٫۷۹	۱۲۶٫۹۳	سازه‌ی ۹ طبقه‌ی ۳ دهانه
۳٫۷۸	۲٫۴۳	۲٫۳۴	۳٫۴۹	۸٫۱۸	۱٫۵۵	۶۵۰٫۱۰	۱۰۰۸٫۲۹	۱۰۰٫۷۴	سازه‌ی ۹ طبقه‌ی ۵ دهانه
۳٫۷۸	۲٫۴۷	۲٫۳۸	۳٫۴۳	۸٫۱۸	۱٫۵۳	۹۱۰٫۱۴	۱۳۹۲٫۶۲	۱۱۳٫۸۶	سازه‌ی ۹ طبقه‌ی ۷ دهانه

جدول ۲. مقادیر مهم به دست آمده از منحنی ظرفیت جهت تعیین ضریب رفتار در حد ایمنی جانی.

ضریب رفتار	ضریب شکل پذیری	μ	Δ_y (cm)	Δ_m (cm)	ضریب مقاومت افزون (R_s)	برش پایه‌ی تراز مقاومت (Cw) (کیلو نیوتن)	برش پایه (Cy) (کیلو نیوتن)	بار لغزش بهینه (کیلو نیوتن)	نمونه‌ها
R	(R_μ)								
۱۶٫۰۶	۳٫۸۰	۵٫۴۰	۱٫۱۴	۶٫۱۹	۴٫۲۲	۱۷۳٫۷۵	۷۳۳٫۴۵	۱۱۰٫۱۵	سازه‌ی ۳ طبقه‌ی ۳ دهانه
۱۴٫۰۲	۳٫۵۳	۴٫۸۶	۱٫۳۵	۶٫۵۵	۳٫۹۷	۲۸۹٫۵۸	۱۱۵۰٫۰۸	۱۳۳٫۵۷	سازه‌ی ۳ طبقه‌ی ۵ دهانه
۱۲٫۰۹	۳٫۳۴	۴٫۵۱	۱٫۴۱	۶٫۳۷	۳٫۶۲	۴۰۵٫۴۲	۱۴۶۷٫۹۹	۱۵۱٫۱۰	سازه‌ی ۳ طبقه‌ی ۷ دهانه
۱۲٫۷۷	۳٫۶۴	۴٫۱۱	۲٫۸۳	۱۱٫۶۳	۳٫۵۱	۳۰۰٫۳۶	۱۰۵۳٫۲۹	۱۳۵٫۴۴	سازه‌ی ۶ طبقه‌ی ۳ دهانه
۱۲٫۴۹	۳٫۵۰	۳٫۹۴	۳٫۵۴	۱۳٫۹۲	۳٫۵۷	۵۰۰٫۶۱	۱۷۸۴٫۷۱	۱۴۹٫۹۴	سازه‌ی ۶ طبقه‌ی ۵ دهانه
۱۱٫۷۶	۳٫۶۲	۴٫۰۹	۳٫۴۵	۱۳٫۶۷	۳٫۲۵	۷۰۰٫۸۵	۲۲۷۷٫۳۴	۱۳۲٫۲۹	سازه‌ی ۶ طبقه‌ی ۷ دهانه
۱۱٫۸۹	۳٫۷۲	۳٫۶۲	۴٫۸۱	۱۷٫۴۳	۳٫۲۰	۳۹۰٫۰۶	۱۲۴۷٫۸۰	۱۲۶٫۹۳	سازه‌ی ۹ طبقه‌ی ۳ دهانه
۱۳٫۴۷	۴٫۲۴	۴٫۱۷	۴٫۸۲	۲۰٫۱۰	۳٫۱۸	۶۵۰٫۱۰	۲۰۶۶٫۳۹	۱۰۰٫۷۴	سازه‌ی ۹ طبقه‌ی ۵ دهانه
۱۴٫۷۸	۴٫۲۵	۴٫۱۸	۵٫۲۰	۲۱٫۷۷	۳٫۴۸	۹۱۰٫۱۴	۳۱۶۴٫۶۸	۱۱۳٫۸۶	سازه‌ی ۹ طبقه‌ی ۷ دهانه

جدول ۳. مقادیر ضرایب رفتار در سازه‌ی بدون میراگر در حد ایمنی جانی.

سازه‌ی ۹ طبقه			سازه‌ی ۶ طبقه			سازه‌ی ۳ طبقه			نمونه‌ها
دهانه ۷	دهانه ۵	دهانه ۳	دهانه ۷	دهانه ۵	دهانه ۳	دهانه ۷	دهانه ۵	دهانه ۳	
۳٫۰۷	۳٫۵۰	۳٫۳۴	۳٫۴۵	۳٫۵۶	۳٫۳۹	۳٫۶۸	۳٫۷۴	۳٫۵۵	ضریب مقاومت افزون (R_s)
۱٫۰۰	۱٫۱۹	۱٫۲۳	۱٫۱۵	۱٫۲۴	۱٫۲۲	۱٫۰۹	۱٫۱۳	۱٫۱۶	ضریب شکل پذیری (R_μ)
۳٫۰۷	۴٫۱۴	۴٫۰۹	۳٫۹۴	۴٫۳۹	۴٫۱۱	۳٫۹۸	۴٫۲۰	۴٫۱۰	ضریب رفتار (R)

مقاومت افزون در تعیین ضریب رفتار در این سازه‌ها دارد، که این تأثیر به حدود ۶۰٪ می‌رسد.

مقدار ضریب مقاومت افزون در سازه‌های ۳، ۶ و ۹ طبقه، ۳٫۵۵ و ضریب شکل‌پذیری، ۳٫۷۳ و مقدار ضریب رفتار در سیستم‌های به همراه میراگر به دلیل ظرفیت جذب انرژی بالا به‌طور محافظه‌کارانه معادل ۱۲ پیشنهاد می‌شود.

۳۶۰، ضریب رفتاری در حدود ۴ به دست آمده است، که حدود ۲۰٪ کمتر از مقدار پیشنهادی در پیش‌نویس نهایی استاندارد ۲۸۰۰ است. در سازه‌ی ۳ طبقه، ضریب مربوط به مقاومت افزون، تأثیر بیشتری نسبت به ضریب شکل‌پذیری در تعیین ضریب رفتار در این سازه‌ها دارد، که تأثیر آن در حدود ۱۴٪ است. اما در سازه‌های ۶ و ۹ طبقه، ضریب مربوط به شکل‌پذیری تأثیر بیشتری نسبت به ضریب

منابع (References)

1. *Structural Engineering*, John Wiley & Ltd., London (UK) and New York (USA) (1997).
2. Constantinou, M.C., Soong, T.T. and Dargush, G.F. "Passive energy dissipation systems for structural design and retrofit", Monograph Series No. 1, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, University at Buffalo, State University of New York at Buffalo, Buffalo, State University of New York at Buffalo, Buffalo, N.Y. (1998).
3. "SEAOC- Structural Engineers Association of Northern California, Recommended Lateral Force Requirements and Commentary, California (1992).
4. SEAOC- Structural Engineers Association of California, Recommended Lateral Force Requirements and Commentary, Sacramento, GA. (1999)
5. FEMA- Federal Emergency Management Agency, NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings and NEHRP Commentary on the Guidelines for the - Seismic Rehabilitation of Buildings Reports No. FEMA 273 and 274, Washington D.C. (1997).
6. NEHRP- National Earthquake Hazard Reduction Program, NEHRP Recommended Provision for Seismic Regulations for New Buildings and other Structures Federal Emergency Management Agency, Report no., FEMA 302, Washington D.C. (1997).
7. ATC, *Structural Response Modification Factors: ATC19*, Applied Technology Council, Redwood city, California, pp. 5-32 (1995).
8. *National Earthquake Hazard Reduction Program NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and other Structures*, Appendix to Chapter13, with Damping Systems, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C. (2003).
9. VaseghiAmiri J. and Azazy, A. "Determine the response modification factor of frame and pall friction damper with experimental Test", *First National Conference on Disaster Management, Earthquake and Vulnerability of Places*, Lifeline (2012).
10. Mirzaei Fard, H., Mirtaheri, M. and Rahmani, H. "Determine the response modification factor of structures with cylindrical friction dampers", *9th International Congress on Civil Engineering* (2013).
11. Mahmoudi, M. and Abdi, M.G. "Evaluating response modification factors of TADAS frames", *Journal of Constructional Steel Research*, **71**, pp. 162-170 (2012).
12. Mahmoudi, M. and Zaree, M. "Determination of the response modification factors of buckling restrained braced frames", *Proceeded Engineering*, **54**, pp. 222-231 (2013).
13. Vaseghi Amiri, J. and Esmaeiltabar Nesheli, P. "Response modification factor of chevron braced frame with pall friction damper", *International Journal of Engineering*, **26**(2), pp. 127-136 (2013).
14. Miri, M. and Kahkeshan, A. "Seismic evaluation and studying the effect of friction damper", *International Journal of Engineering & Technology*, **3**(2), pp. 137-154 (2014).
15. BHRC, *Iranian Code of Practice for Seismic Resistance Design of Buildings: Standard No. 2800*, 4rd Edition for Approval, Building and Housing Research Center (2014).
16. National Building codes, Section 6, *Loads on Buildings*, Office of the National Building provisions (1392).
17. *National Building Codes*, Section 10, Design & Construction of Steel Buildings and Office of the National Building Provisions (1392).
18. *Instruction for Seismic Rehabilitation of Existing Buildings*, NO. 360 (First Revision), Islamic Republic of Iran, Office of Deputy for Strategic Supervision, Department of Technical Affairs (2014).
19. *Commentary of Instruction for Seismic Rehabilitation of Existing Buildings*, NO: 361, Office of Deputy for Strategic Supervision, Bureau of Technical Execution System (2010)
20. ATC34, *A critical Review of Current Approaches to Earthquake Resistant Design*, ATC-34, Applied Technology Council, Redwood City, California (1995).
21. Whittaker, A., Hart, G. and Rojahn, C. "Seismic response modification factors", *Journal of Structural Engineering*, **125**(4), pp. 438-44 (1999).
22. Filiatrault, A. and Cherry, S. "Seismic design spectra for friction-damped structures", *Journal of Structural Engineering*, **116**(5), pp. 1334-1355 (1990).