

# تأثیر حلقه‌ی فولادی در قاب‌های مهاربندی‌شده‌ی هم‌مرکز تحت زلزله‌های مصنوعی به روش موجک

مه‌سا میرزاحسینی\* (دانشجوی کارشناسی ارشد)

محمدعلی کافی (استادیار)

رضا وه‌دانی (استادیار)

دانشکده‌ی هندی‌سمان، دانشگاه سمنان

مهندسی عمران شریف، (تابستان ۱۳۹۴)  
دوری ۲ - ۳۱، شماره ۱/۲، ص. ۶۳-۵۵، (پادداشت فنی)

قاب‌های مهاربندی‌شده‌ی هم‌مرکز به‌عنوان یکی از سیستم‌های مقاوم در برابر بار جانبی، ضمن داشتن سختی بالا، مسائل اقتصادی و سهولت اجرا نسبت به قاب‌های خمشی شکل‌پذیری کمتری دارند، در دو دهه‌ی اخیر، پژوهش‌های متعددی در زمینه‌ی افزایش شکل‌پذیری این سیستم بر روی المان‌های جاذب انرژی در محل اتصال بادبند به صفحه‌ی گوشه انجام شده است. حلقه‌ی فولادی یکی از انواع المان‌های جاذب انرژی است، که به‌صورت تحلیلی و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. حلقه‌ی فولادی در هنگام وقوع زلزله از ورود سایر اعضاء به ناحیه‌ی غیرخطی و کماتش در مهاربند جلوگیری می‌کند و یا آن را به تعویق می‌اندازد، در این نوشتار، ضمن مدل‌سازی و انجام آنالیز غیرخطی قاب‌های خمشی مهاربندی‌شده‌ی هم‌محور، تأثیر حلقه‌ی فولادی یک بار تحت زلزله‌های موجود و بار دیگر تحت زلزله‌های مصنوعی تولیدشده به روش موجک مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد حلقه‌ی فولادی ضمن کاهش برش پایه، عملکرد مطابقی در استهلاک انرژی خواهد داشت.

واژگان کلیدی: مهاربند هم‌محور، شکل‌پذیری، حلقه‌ی فولادی، برش پایه، تبدیل موجک.

mirzahosseini@semnan.ac.ir  
mkafi@semnan.ac.ir  
rvahdani@semnan.ac.ir

## ۱. مقدمه

آنچایی که رابط‌های برشی بخشی از اعضاء سازه‌ی ابتدایی است و سیستم سقف را پشتیبانی می‌کنند و بازسازی پس از یک زلزله‌ی شدید، بر هزینه و حتی غیرممکن خواهد بود. ضمن اینکه تیرها در این سیستم برای جلوگیری از لهیدگی نیازمند سخت‌کننده‌های متعدد در جان خود هستند، که این مسئله نیازمند صرف هزینه، وقت و نظارت عالی در نحوه‌ی اجرا هستند.<sup>[۱]</sup> مطالعات متعددی جهت بهبود رفتار لرزه‌یی این مهاربندها صورت گرفته است. از آن جمله می‌توان به مطالعات انجام‌شده در سال ۲۰۰۹ اشاره کرد که ضمن مطالعه‌ی تجربی و آزمایشگاهی، رفتار پیوندهای برشی قائم در حالت معمول (پروفیل فولادی با بدون سخت‌کننده) و مرکب (پروفیل فولادی که بتن ناحیه‌ی محصور به جان و بال‌ها را پر کرده است) بررسی شده است.<sup>[۲]</sup> همچنین پژوهشگرانی در سال ۲۰۱۳ طی مطالعاتی رفتار لرزه‌یی قاب‌های مهاربندی‌شده‌ی واگرا را با کاربرد zipper-struts در نقطه‌ی میانی لینک برشی به‌صورت تحلیلی مورد بررسی قرار داده‌اند.<sup>[۳]</sup>

یکی دیگر از روش‌های پیشنهادی جهت بهبود عملکرد مهاربندهای هم‌مرکز، ایجاد لقی در اتصال مهاربند است، که در سال ۱۳۸۹ بررسی شده است.<sup>[۴]</sup> از مشکلات این نوع مهاربندها، ایجاد نیروی ضربه در مهاربند است. نتایج تحلیل‌های

یکی از متداول‌ترین سیستم‌های مقاوم در برابر بار جانبی، مهاربندهای هم‌مرکز است؛ که این سیستم ضمن داشتن سختی بالا، اقتصادی و به‌سادگی قابل اجراست. مشکل عمده‌ی مهاربندهای هم‌مرکز، عدم شکل‌پذیری آنهاست. وقوع کماتش مهاربند پیش از رسیدن به مرحله‌ی غیرکشسان سبب خواهد شد سیستم مقاوم در برابر بار جانبی از باربری خارج و موجب وارد آمدن آسیب به ساختمان شود. در دو دهه‌ی گذشته، مطالعات متعددی جهت تأمین شکل‌پذیری این مهاربندها توسط پژوهشگران مختلف انجام شده است.

قاب‌های با مهاربند برون‌محور از جمله سیستم‌هایی است که به گونه‌یی اقتصادی، سختی مورد نیاز و شکل‌پذیری مورد نظر را برآورده می‌سازند. پژوهش‌های اولیه بر روی این نوع سیستم‌ها در دانشگاه برکلی کالیفرنیا و در سال ۱۹۷۷ انجام شده است. در این سیستم، استهلاک انرژی ورودی سیستم در درجه‌ی اول به رابط برشی محدود می‌شود. رابط برشی به قطعه‌یی از تیرگرفته می‌شود که در بین اتصال مهاربند - تیر و اتصال تیر - ستون قرار می‌گیرد، البته از

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۱/۱۲/۷، اصلاحیه ۱۳۹۲/۵/۷، پذیرش ۱۳۹۲/۵/۲۷

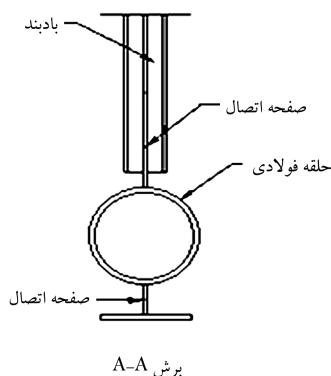
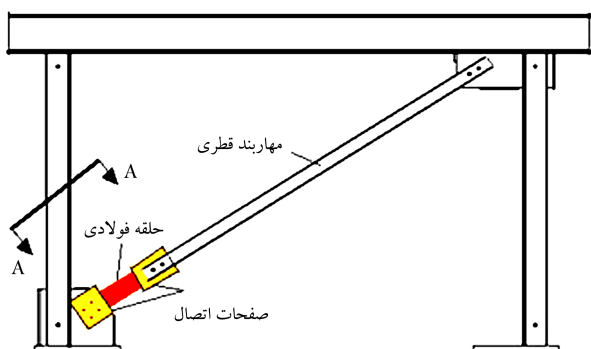
## ۲. معرفی المان حلقه به عنوان مستهلک کننده انرژی

در پژوهشی در سال ۲۰۰۷، [۱۶] استفاده از یک حلقه‌ی فلزی در نقطه‌ی اتصال مهاربند به صفحه‌ی فولادی گوشه به صورت تحلیلی و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور رسیدن به هدف از یک حلقه‌ی فولادی به قطر  $d$ ، طول  $l$  و ضخامت  $t$  در نقطه‌ی اتصال مهاربند به صفحه‌ی فولادی گوشه استفاده شده است. شکل ۱، نحوه‌ی قرارگیری حلقه در قاب مهاربندی شده را نشان می‌دهد.

طراحی طول، قطر و ضخامت حلقه‌ی تابع نیروی محوری مورد انتظار مهاربند است. ضمن آنکه طراحی حلقه‌ی فولادی به گونه‌ی خواهد بود که قبل از وقوع کماتش در عضو فشاری مهاربند، حلقه‌ی فولادی تسلیم شود. بدین ترتیب حلقه‌ی فولادی نقش یک کنترل‌کننده (فیوز) را برای کماتش عضو در بر خواهد داشت.

حلقه‌ی فولادی در آزمایشگاه سازه با قرارگرفتن در جک یونیورسال، تحت نیروی کشش و فشار قرار گرفته و ضمن اعمال نیروی محوری، تغییر قطر قائم حلقه اندازه‌گیری شده است. شکل‌های ۲ و ۳، به ترتیب منحنی هیستریزس نیرو - تغییر قطر قائم و پوش منحنی هیستریزس نیرو - تغییر قطر قائم حلقه‌ی بی به قطر خارجی ۲۲۰، ضخامت ۱۲ و طول ۱۰۰ میلی‌متر را نشان می‌دهد.

بررسی آزمایشگاهی و تحلیلی حلقه‌ی فولادی نشان داده است که حلقه‌ی فولادی، قابلیت جذب انرژی بسیار بالا و شکل‌پذیری مناسبی دارد و می‌تواند به منزله‌ی یک المان شکل‌پذیر در مهاربندهای هم‌محور استفاده شود. ظرفیت کششی حلقه از ظرفیت فشاری آن بیشتر و با ظرفیت کششی و فشاری مهاربندهای هم‌محور هم‌سو است. [۱۹] پس از وقوع زلزله، حلقه‌ی انتهای بادبند به دلیل تغییرشکل‌های خمیری آسیب خواهد دید که مستلزم تعمیر و بازسازی خواهد بود، با این حال این تعمیر و بازسازی، به اتصال گوشه‌ی بادبند و تعویض حلقه‌ی فولادی محدود خواهد



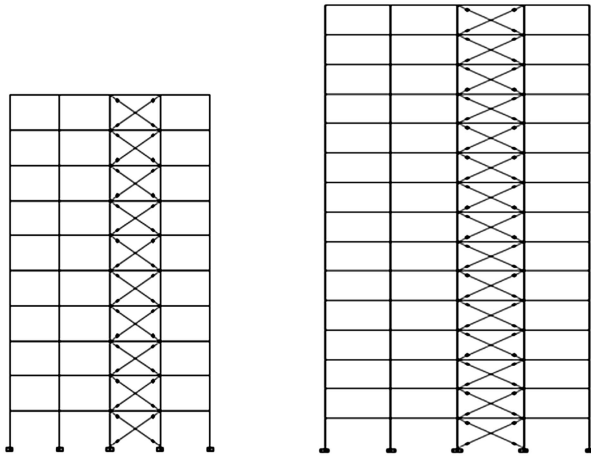
شکل ۱. نحوه‌ی قرارگیری حلقه‌ی فولادی در مهاربند. [۱۶]

انجام شده نشان می‌دهد نسبت سختی بادبند به قاب، دوره‌ی تناوب بار وارده و میزان لقی از پارامترهای مهم در ایجاد ضربه است.

کاربرد انواع میراگرهای فلزی از دیگر روش‌هایی است که به منظور افزایش شکل‌پذیری در مهاربندها مورد استفاده قرار می‌گیرد. در واقع یکی از مهم‌ترین مکانیزم‌های موجود برای اتلاف انرژی ورودی به یک سازه در هنگام وقوع زلزله، تغییرشکل‌های غیرکشسان فلزات است. [۶] طراحی لرزه‌ی، در سازه‌های فولادی متداول بر پایه‌ی شکل‌پذیری بعد از تسلیم<sup>۱</sup> اعضاء سازه جهت اتلاف انرژی استوار است. مطالعات متعدد در رابطه با کاربرد میراگرهای هیستریک فلزی در داخل سازه به منظور جذب انرژی ورودی زلزله، نشان‌دهنده‌ی کاربرد مؤثر آنها در محافظت سازه در برابر زلزله است، [۷] و در پژوهشی در سال ۱۹۷۵، برای اولین بار کاربرد میراگرهای فلزی جهت اتلاف انرژی مطرح شد. [۸] به منظور طراحی مؤثر این میراگرها، باید رفتار هیستریک آنها تحت بارگذاری سایکلک وابسته به زمان مورد ارزیابی قرار گیرد. با توسعه‌ی رابطه نیرو - جابه‌جایی مناسب برای میراگرها، مهندس طراح می‌تواند این اطلاعات را در تحلیل سازه‌ی کلی منظور کند. [۹]

از جمله‌ی این میراگرها می‌توان به انواع المان‌های جاذب انرژی با عملکردهای متفاوت خمشی، برشی و پیچشی اشاره کرد، در این روش المان مستهلک‌کننده با جذب قسمت اعظم انرژی، از ورود اعضاء مهاربندی به مرحله‌ی خمیری و کماتش عضو جلوگیری می‌کند. این امر سبب بهبود رفتار هیستریزس و جذب بهتر انرژی و نیز منجر به رفتار شکل‌پذیر مهاربند و جلوگیری از واردشدن ضربات ناگهانی به سازه خواهد شد. از شناخته‌شده‌ترین نمونه‌های کاربردی آنها می‌توان به میراگرهای ADAS اشاره کرد، که کاربرد آنها در بادبندهای شورون (۷ یا ۸) معمول است. این میراگرها در دو نوع صفحه‌ی مثلثی و یا صفحات X شکل مورد استفاده قرار می‌گیرند. استهلاک انرژی در این سیستم از طریق تغییرشکل خمیری ورق‌های فولاد نرمه در خمش انجام می‌شود. [۱۰] این میراگرها اولین بار در سال ۱۹۷۲، [۱۱] و پس از آن در سال ۱۹۸۹ با انجام آزمایش‌های میز لرزه‌ی، عملکرد این نوع میراگرها در ساختمان ۳ طبقه مورد بررسی قرار گرفتند. [۱۱] پژوهشگرانی نیز در سال ۱۹۹۳ ضمن پیشنهاد روش طراحی برای این سیستم به مقایسه‌ی پارامترهای تحلیلی خود و نتایج آزمایشگاهی پرداختند. [۱۲] همچنین در مطالعات دیگری مکانیزم و عملکرد این نوع میراگرها مورد بررسی قرار گرفته است. [۱۳-۱۵]

نوع دیگری از المان‌های خمشی، المان حلقه‌ی فولادی است که در سال‌های پیشین در برخی پژوهش‌ها به صورت تحلیلی و آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار گرفته است، [۱۶-۱۸] و در آنها اثر نمونه‌ی از حلقه‌ی فولادی به عنوان میراگرهای فلزی در مرکز مهاربند هم‌محور بررسی شده است. در این نوشتار، قابلیت شکل‌پذیری و میزان جذب انرژی المان‌های حلقه‌ی تعبیه‌شده در مهاربندهای هم‌محور، به صورت ماکرو مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور دو قاب دو بعدی ۱۰ و ۱۵ طبقه با سیستم باربر جانبی قاب خمشی به همراه مهاربند هم‌محور در دو حالت تحت آنالیز تاریخچه‌ی زمانی بررسی شده است. همچنین به منظور ایجاد شرایطی نزدیک‌تر به آنچه در واقعیت رخ خواهد داد، رکوردهای انتخابی جهت انجام تحلیل تاریخچه‌ی زمانی با استفاده از روش تبدیل موجک و انطباق با طیف منطقه‌ی استقرار سازه، بازسازی شده و نتایج مورد بحث قرار گرفته است. قرارگرفتن حلقه‌ی فولادی جوش شده به دو صفحه‌ی اتصال در مهاربند موجب خواهد شد که حلقه‌ی فولادی تحت خمش قرار گیرد و عملکرد خمشی غیرکشسان آن موجب استهلاک انرژی زلزله شود. نتایج حاصل از این بررسی بیان‌گر عملکرد خوب و کارایی مناسب حلقه‌ی فولادی به عنوان یک المان شکل‌پذیر است. در ادامه، جزئیات المان شکل‌پذیر، منحنی رفتار و نحوه‌ی قرارگیری آن ارائه شده است.



شکل ۴. قاب مدل‌شده‌ی ۱۰ و ۱۵ طبقه.

مقاطع Box برای ستون‌ها و همچنین از زوج ناودانی برای مهاربندها استفاده شده است.

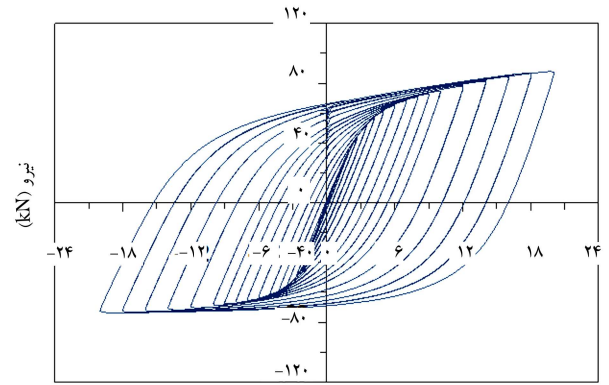
پس از طراحی با توجه به مقاطع محاسبه‌شده برای بادبندها و نیروی موردانتظار هر مهاربند، المان‌های مستهلک‌کننده و مشخصات رفتاری آنها محاسبه شده است، لذا با بهره‌گیری از قابلیت نرم‌افزار ABAQUS جهت مدل‌سازی قاب‌های دوبعدی به صورت وایرالمنت، قاب ساختمانی جدید با سیستم قاب خمشی فولادی و مهاربند فولادی هم محور، که در نقطه‌ی اتصال مهاربند به صفحه‌ی فولادی گوشه شامل المان مستهلک‌کننده است، مدل‌سازی و تحت آنالیز تاریخیچه‌ی زمانی قرار گرفته است. مدل‌سازی اجزاء قاب با استفاده از المان Beam صورت گرفته است، این نوع المان در حالت دو و سه بعدی برای مدل‌سازی سازه‌های باریک میله‌یی‌شکل، که در مقابل بارهای محوری و خمشی استحکام دارند، به کار می‌رود.<sup>[۲۱]</sup>

#### ۴. آنالیز دینامیکی

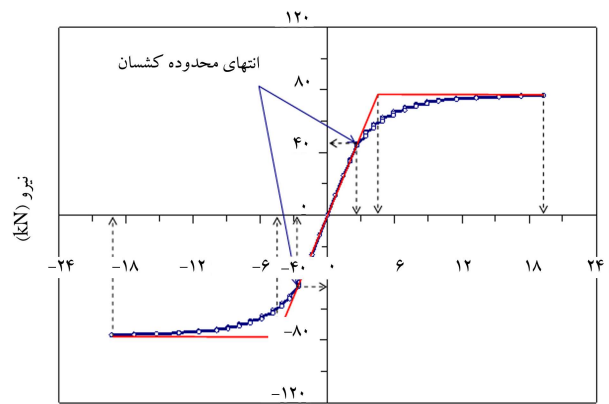
در این قسمت نتایج مربوط به تحلیل دو قاب تحت زلزله‌های Imperial vally، Turkey و Lomaperieta با مشخصات متفاوت مطابق جدول ۱ ارائه شده است. همه‌ی رکوردهای برگزیده، مربوط به زلزله‌های دور از گسلند، با توجه به محل قرارگیری قاب‌ها تمامی زمین‌لرزه‌ها به شتاب ۰٫۳۵g مقیاس شده‌اند. به عنوان نمونه، شکل‌های ۵ و ۶، تاریخیچه‌ی زمانی پاسخ قاب ۱۰ طبقه را تحت زلزله‌ی ترکیه نمایش می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، با کاربرد المان جاذب، بیشینه‌ی برش پایه‌ی قاب کاهش می‌یابد. همچنین مقادیر بیشینه‌ی جابه‌جایی با کاربرد المان حلقوی افزایش یافته است. از طرفی به دلیل وجود میرایی و پدیده‌ی لختی برش،

جدول ۱. مشخصات زمین‌لرزه‌های مورد استفاده.

زلزله	PGA (g)	دوره‌ی تناوب	
		غالب (s)	مدت دوام (s)
Imperial vally	۰٫۲۴	۰٫۳۲	۳۸٫۹۴۵
Lomaperieta	۰٫۲۳	۰٫۳	۳۸٫۹۴۵
Turkey	۰٫۱	۰٫۶۸	۱۳۸٫۵۵



شکل ۲. منحنی هیستریزس نیرو - تغییر قطر قائم حلقه به قطر خارجی ۲۲۰، ضخامت ۱۲ و طول ۱۰۰ میلی‌متر.<sup>[۱۶]</sup>

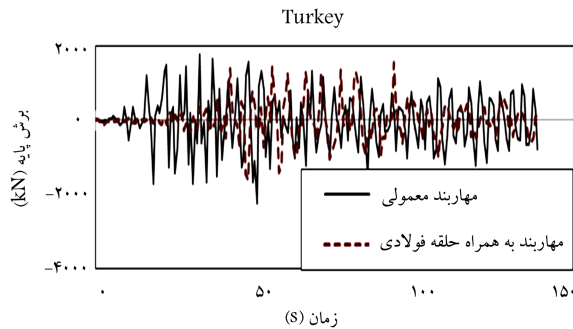
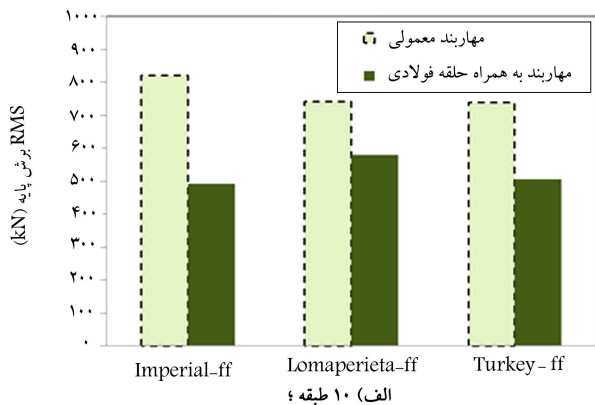


شکل ۳. پوش منحنی هیستریزس نیرو - تغییر قطر قائم حلقه به قطر خارجی ۲۲۰، ضخامت ۱۲ و طول ۱۰۰ میلی‌متر.<sup>[۱۶]</sup>

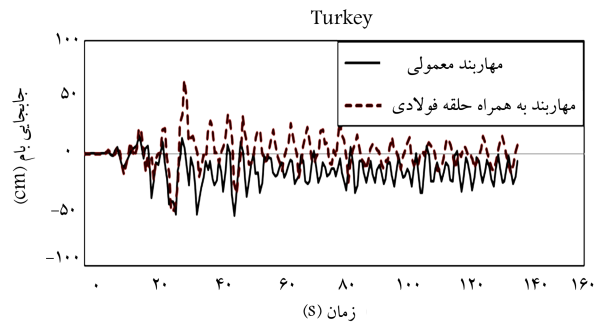
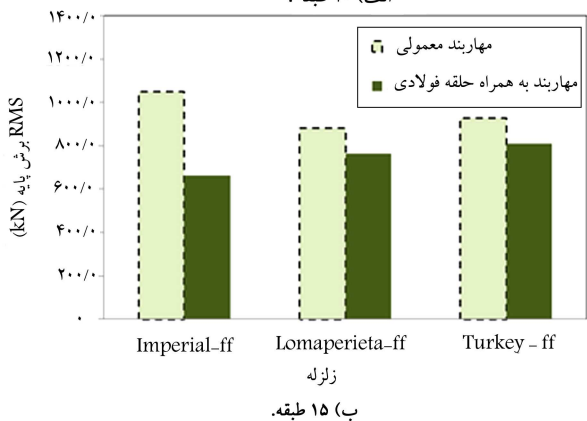
شد. از سوی دیگر هزینه‌های ساخت و نصب این میراگرها تقریباً ناچیز و به سهولت قابل کاربرد هستند.

#### ۳. مشخصات قاب‌های مدل‌شده

به منظور بررسی رفتار المان‌های شکل‌پذیر دو قاب ۱۰ و ۱۵ طبقه با ارتفاع طبقات ثابت معادل ۳٫۵ متر و طول دهانه‌ی ۵ متر با استفاده از نرم‌افزار Etabs مدل‌سازی شده است (شکل ۴). کاربری قاب مذکور، مسکونی در نظر گرفته شده است، لذا براساس مبحث ششم مقررات ملی ساختمان ایران، مقدار بار زنده در تمامی طبقات برای مدل‌های مذکور معادل ۲۰۰ kg/m<sup>۲</sup> و بار مرده کف طبقات برابر ۶۰۰ kg/m<sup>۲</sup> لحاظ شده است. جنس فولاد مصرفی مقاطع نیز، از نوع ST۳۷ با تنش تسلیم ۲۴۰۰ kg/m<sup>۲</sup> و تنش نهایی ۳۶۰۰ kg/m<sup>۲</sup> در نظر گرفته شده است. جنس زمین محل ساخت از نوع III و در ناحیه با خطر نسبی خیلی زیاد منظور شده است، لذا براساس استاندارد ۲۸۰۰ ایران<sup>[۲۰]</sup> شتاب مبثای طرح برابر ۰٫۳۵ است. طراحی قاب، براساس آیین‌نامه‌ی معتبر طراحی سازه‌های فولادی AISC - ASD۸۹ صورت گرفته است. در طراحی از مقاطع تیورق برای تیرها، از



شکل ۵. تاریخچه‌ی برش پایه‌ی قاب ۱۰ طبقه تحت زلزله‌ی Turkey.



شکل ۶. تاریخچه‌ی زمانی تغییر مکان بام قاب ۱۰ طبقه تحت زلزله‌ی Turkey.

شکل ۷. میزان برش پایه‌ی قاب‌های ۱۰ و ۱۵ طبقه تحت زلزله‌های متفاوت با معیار RMS.

ایجاد تغییرشکل‌های پسماند در قاب با مهاربند معمولی و انحراف نمودار تاریخچه‌ی زمانی از خط محور صفر در شکل ۸ قابل توجیه است.

یکی از پارامترهای مهم و قابل اندازه‌گیری جهت ارزیابی سازه، بیشینه‌ی تغییرمکان نسبی طبقات است. شکل ۹، نمودار تغییرمکان نسبی طبقات را در دو حالت مهاربند معمولی (W/out D) و مهاربند به همراه المان حلقه‌ی فولادی (W/D) و تحت زلزله‌های مورد بررسی نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، کاربرد المان جاذب تا حدودی سبب افزایش تغییرمکان نسبی طبقات، به‌ویژه در طبقات میانی، شده است.

با توجه به اهمیت آنالیز تاریخچه‌ی زمانی و ایجاد شرایطی جهت نزدیکی بیشتر به آنچه در واقعیت رخ خواهد داد، نیاز به شتاب‌نگاشت‌های حرکت زمین در ساختگاه سازه وجود دارد. به جز نواحی خاصی از جهان، که شتاب‌نگاشت‌های ثبت‌شده‌ی مناسب دارند، در سایر نقاط می‌توان از شتاب‌نگاشت‌های مصنوعی برای انجام تحلیل استفاده کرد. امروزه تولید شتاب‌نگاشت‌های مصنوعی مناسب، با توجه به کمبود شتاب‌نگاشت‌های ثبت‌شده‌ی زلزله و همچنین محدودیت و اشکالات موجود در آنها از یک سو و استفاده‌ی روزافزون از آنالیز دینامیکی تاریخچه‌ی زمانی از سوی دیگر، امری ضروری به نظر می‌رسد. تاکنون روش‌های مختلفی جهت تولید شتاب‌نگاشت‌های مصنوعی ارائه شده است، که هر یک برگرفته از الگویی خاص است.

استفاده از هر یک از الگوها در مطالعات مهندسی زلزله منوط به تعیین پارامترهای الگو به نحو مطلوب و در نظر داشتن نقاط ضعف آن به‌گونه‌ی شایسته است. به منظور اینکه شتاب‌نگاشت‌های مصنوعی، پارامترهای لرزه‌ی معقول و نزدیک به واقعیت

اختلاف فاز در پاسخ سازه در دو حالت مشاهده می‌شود. با توجه به شکل ۶، قاب با مهاربند معمولی تحت زلزله‌ی موردنظر دچار تغییرشکل‌های پسماند شده و مقادیر جابه‌جایی تا حدی افزایش یافته است، این در حالی است که با کاربرد المان حلقه‌ی سازه عملکرد مطلوب‌تری داشته است.

بیشینه‌ی پاسخ فقط در یک لحظه اتفاق می‌افتد، لذا پیشنهاد می‌شود به منظور بررسی عملکرد قاب‌ها در طول زمان، معیاری غیر از بیشینه‌ی پاسخ مورد مطالعه قرار گیرد. معیار جذر میانگین مربعات یا RMS<sup>۲</sup> پاسخ سازه را در طول مدت تحلیل برآورد می‌کند. رابطه‌ی ۱، نحوه‌ی محاسبه‌ی آن را نشان می‌دهد: [۲۲]

$$Y_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n y_i^2}{n}} \quad (1)$$

که در آن،  $Y_i$  نمایانگر پاسخ سازه اعم از تغییر مکان طبقه‌ی بام و یا برش پایه در زمان  $t_i$  است و  $n$  بیانگر تعداد گام‌های زمانی است، که پاسخ سازه در آن محدوده سنجیده خواهد شد.

شکل ۷، RMS برش پایه‌ی قاب‌های ۱۰ و ۱۵ طبقه را در دو حالت نمایش می‌دهد. در این نمودار محور افقی معرف زلزله‌ی اعمال‌شده و محور قائم مقادیر RMS برش پایه را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، کاربرد المان جاذب در مهاربند تحت تمامی زمین‌لرزه‌های اعمال‌شده سبب کاهش برش پایه‌ی سازه خواهد شد، این کاهش در قاب ۱۰ طبقه و تحت زلزله‌های Imperial، Lomaperieta و Turkey به ترتیب معادل ۴۰، ۲۲ و ۳۲ درصد است، این مقدار در قاب ۱۵ طبقه به ترتیب معادل ۳۷، ۱۴ و ۱۳ درصد است. همچنین مطابق شکل ۸، RMS تغییرمکان بام قاب برای دو قاب تحت زمین‌لرزه‌های مختلف ارائه شده است، که این میزان تحت زلزله‌های متفاوت متغیر بوده است. کاهش این مقدار در حالت استفاده از المان حلقه‌ی فولادی تحت زلزله‌ی Turkey، با توجه به

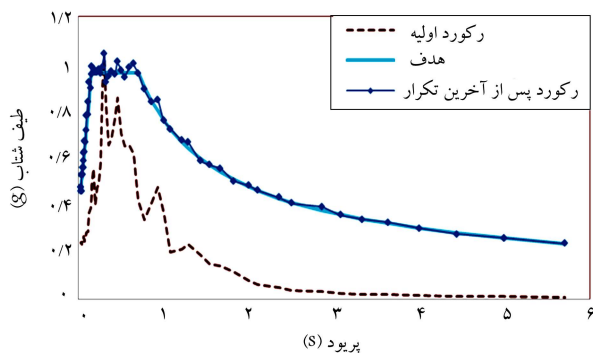
داشته باشند، استفاده از شتاب‌نگاشت‌های واقعی و اصلاح آنها توصیه شده است. این اصلاح از طریق همسازکردن طیف پاسخ شتاب‌نگاشت واقعی با طیف طرح آئین‌نامه صورت می‌گیرد. در این نوشتار با بهره‌گیری از روش موجک پیشنهادی Luis Montejo [۲۳]، فرایندی تکراری جهت تولید شتاب‌نگاشت مصنوعی انجام و سپس سازی موردنظر تحت زلزله‌های به‌دست‌آمده تحلیل شده است، جزئیات روش در ادامه ارائه شده است.

## ۵. روش مورد استفاده جهت انطباق شتاب‌نگاشت با طیف پاسخ

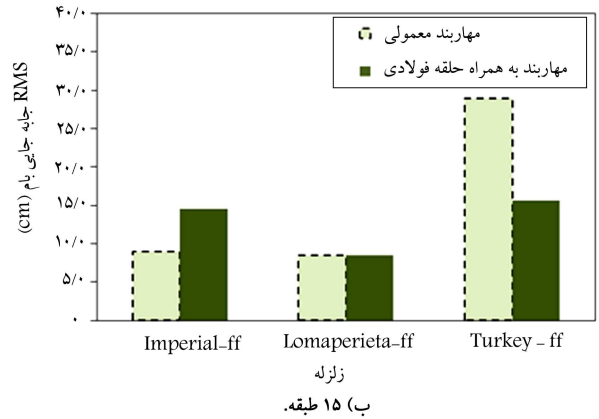
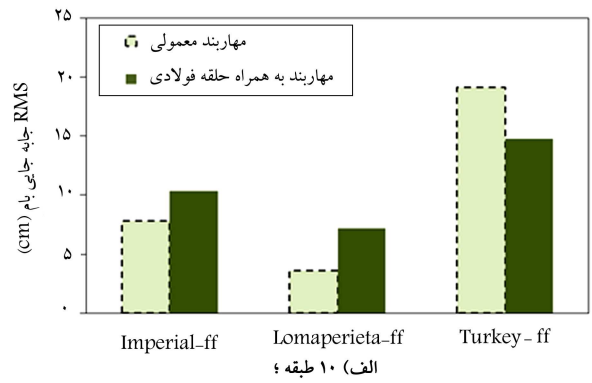
انطباق شتاب‌نگاشت‌های موجود با طیف پاسخ آئین‌نامه‌ی بر پایه‌ی پژوهش‌های انجام‌شده در سال ۲۰۰۵ [۲۳] صورت گرفته شده است. در این روش با بهره‌گیری از موجک پیوسته، شتاب‌نگاشت ثبت‌شده به تعدادی تاریخچه‌های زمانی مناسب، بدون هم‌پوشانی در بازه‌ی بسامدی تجزیه شده است، سپس هر یک از تاریخچه‌های زمانی جهت انطباق طیف پاسخ شتاب‌نگاشت اصلاح‌شده با طیف طراحی معین به‌طور مناسب مقیاس شده‌اند. [۲۳، ۲۴] روش پیشنهادی با اصلاح ۳ شتاب‌نگاشت معرفی شده با مشخصه‌های متفاوت نشان داده شده است، به گونه‌ی که همگی آنها با طیف طراحی ایران موجود در آئین‌نامه‌ی ۲۸۰۰، ویرایش سوم مطابقت داشته‌اند. در این نوشتار با توجه به محل قرارگیری سازی موردنظر در زمین نوع III از طیف مربوط به این منطقه جهت انطباق استفاده شده است.

## ۶. مشخصات زلزله‌های مصنوعی تولیدشده

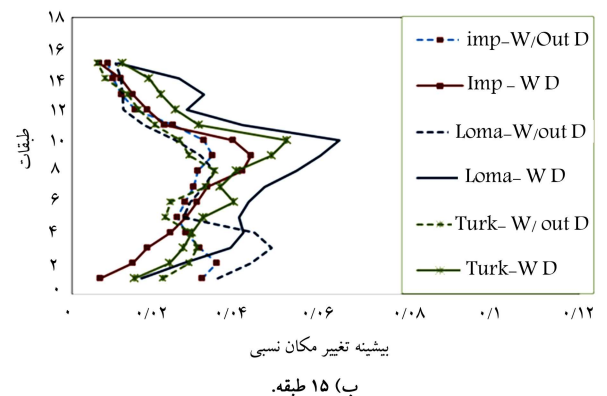
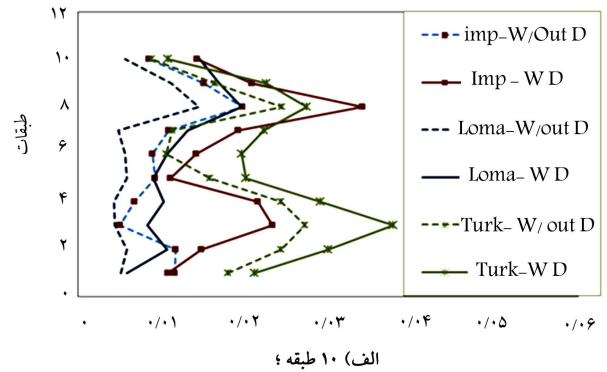
به منظور درک بیشتر فرایند مذکور نتایج انطباق طیفی و شتاب‌نگاشت اصلی و اصلاح‌شده‌ی مربوط به زلزله‌ی Lomaperieta در ادامه نشان داده شده است (شکل‌های ۱۰ الی ۱۲). فرایند تولید شتاب‌نگاشت‌های مصنوعی منطبق با طیف طرح پس از ۱۱ بار تکرار روند فوق انجام شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با استفاده از روند مذکور فرایند انطباق به خوبی انجام شده است. علاوه بر این زمان تداوم رکورد در زلزله‌ی اولیه و تولیدشده برابر است، که این امر اهمیت زیادی در تحلیل‌های غیرخطی دارد. در جدول ۲، برخی پارامترهای مربوط به رکوردهای اولیه و رکورد مصنوعی ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، زلزله‌های تولیدشده، خصوصیات متفاوتی نسبت به زلزله‌های اولیه دارند. برای نمونه، مقادیر



شکل ۱۰. انطباق طیف پاسخ هدف و شتاب‌نگاشت اولیه و مصنوعی مربوط به زلزله‌ی Lomaperieta.



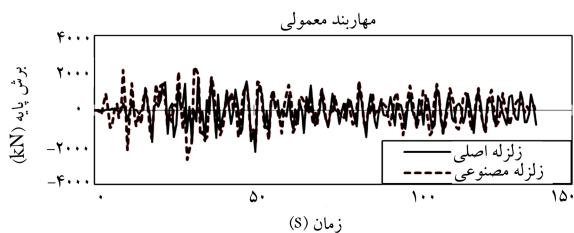
شکل ۸. تغییرمکان قاب‌های ۱۰ و ۱۵ طبقه تحت زلزله‌های متفاوت با معیار RMS.



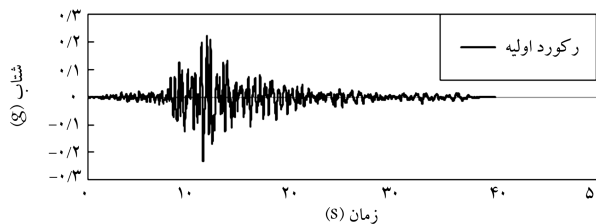
شکل ۹. بیشینه‌ی تغییرمکان نسبی قاب‌های ۱۰ و ۱۵ طبقه تحت زلزله‌های مختلف.

جدول ۲. پارامترهای مربوط به زلزله‌های اولیه و مصنوعی تولیدشده.

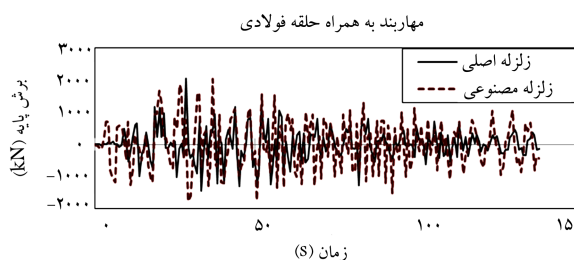
دوره‌ی تناوب غالب (s)	Vmax/Amx (s)	PGD (cm) (cm)	PGV (cm/s)	PGA (g)	زلزله
۰٫۳۲	۰٫۱۵	۷٫۱۳	۳۵٫۵۸	۰٫۲۴	زلزله‌ی اولیه
۰٫۶۴	۰٫۱۳	۴۳٫۹۷	۷۴٫۶۷	۰٫۵۵	زلزله‌ی مصنوعی
۰٫۳۰	۰٫۱۱	۴٫۱۰	۲۴٫۸۰	۰٫۲۳	زلزله‌ی اولیه
۰٫۳۰	۰٫۲۰	۴۲٫۷۰	۹۲٫۹۸	۰٫۴۷	زلزله‌ی مصنوعی
۰٫۶۸	۰٫۲۱	۹٫۹۵	۲۰٫۶۰	۰٫۱	زلزله‌ی اولیه
۰٫۴۷	۰٫۱۹	۴۶٫۶	۸۸٫۷۵	۰٫۴۸	زلزله‌ی مصنوعی



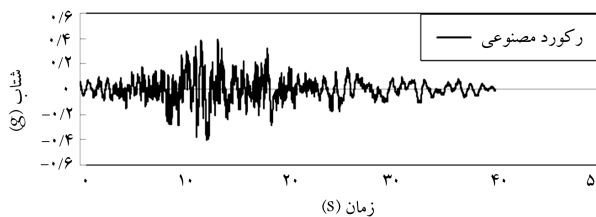
شکل ۱۳. تاریخچه‌ی زمانی برش پایه‌ی قاب ۱۰ طبقه با مهاربند معمولی تحت زلزله‌ی اصلی و مصنوعی Turkey.



شکل ۱۱. تاریخچه‌ی زمانی شتاب مربوط به زلزله‌ی Lomaperieta.

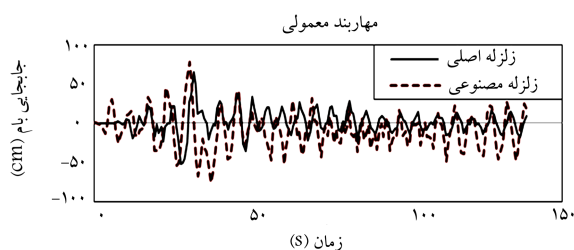


شکل ۱۴. تاریخچه‌ی زمانی برش پایه‌ی قاب ۱۰ طبقه‌ی مهاربندی به همراه المان شکل‌پذیر تحت زلزله‌ی اصلی و مصنوعی Turkey.

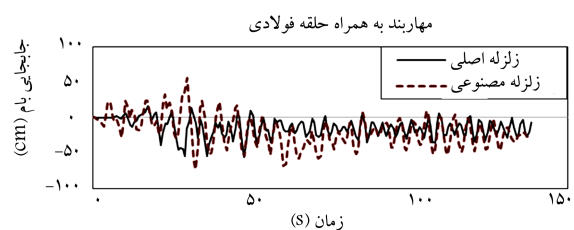


شکل ۱۲. تاریخچه‌ی زمانی شتاب زلزله‌ی مصنوعی حاصل از رکورد Loma-prieta.

بیشینه‌ی شتاب، سرعت و جابه‌جایی در رکوردهای مصنوعی و زمان رخداد آنها نسبت به رکورد اولیه متفاوت بوده است.



شکل ۱۵. تاریخچه‌ی زمانی تغییر مکان بام قاب ۱۰ طبقه با مهاربند معمولی تحت زلزله‌ی اصلی و مصنوعی Turkey.

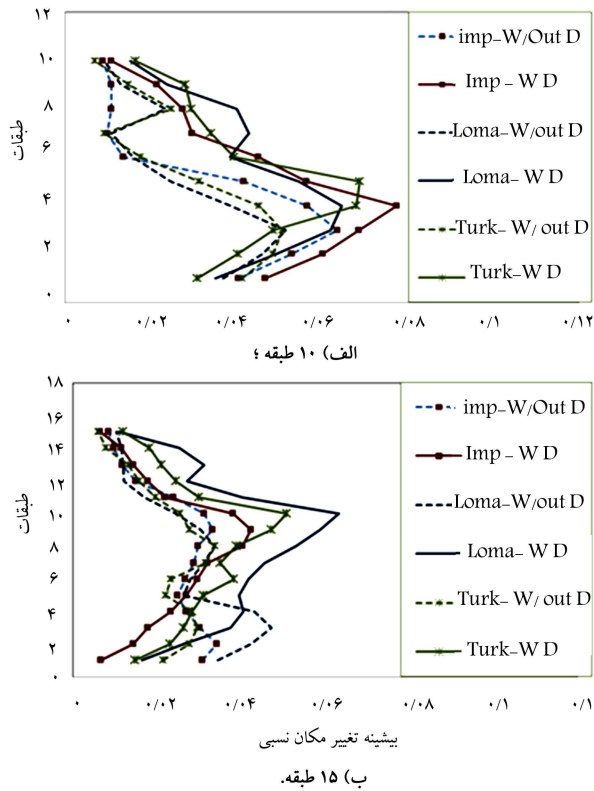


شکل ۱۶. تاریخچه‌ی زمانی تغییر مکان بام قاب ۱۰ طبقه‌ی مهاربندی به همراه المان شکل‌پذیر تحت زلزله‌ی اصلی و مصنوعی Turkey.

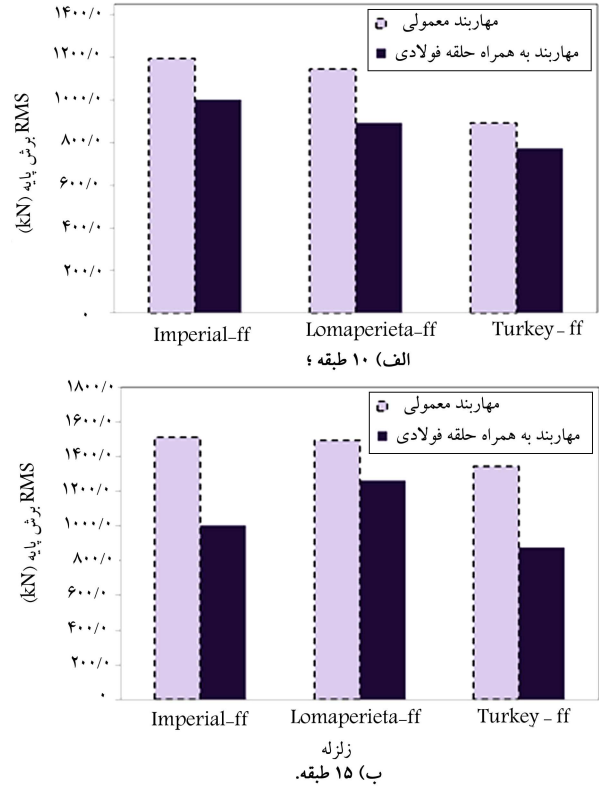
## ۷. تحلیل قاب تحت زلزله‌های مصنوعی

نتایج نشان می‌دهد در فرایند انطباق طیفی با استفاده از روش شح داده‌شده، مقادیر قابل ملاحظه‌ی در سرعت و جابه‌جایی در انتهای دامنه‌ی زمانی رکوردهای تولیدشده ایجاد شده است. جهت حل این مشکل از قابلیت تصحیح خط مبنا در نرم‌افزار Seismosignal استفاده شده است. سپس هر یک از شتاب‌نگاشت‌های تصحیح‌شده جهت انجام تحلیل تاریخچه‌ی زمانی در دو حالت به قاب مذکور اعمال شده است. ملاحظه می‌شود که پاسخ سازه تحت رکوردهای مصنوعی در هر دو قاب تا حد زیادی افزایش یافته است. به منظور مقایسه‌ی پاسخ قاب در طول رکوردهای اولیه و مصنوعی، شکل‌های ۱۳ الی ۱۶ به عنوان نمونه تاریخچه‌ی زمانی پاسخ سازه‌ی ۱۰ طبقه تحت زمین لرزه‌ی Turkey را نشان می‌دهند.

به منظور بررسی عملکرد قاب‌ها در طول زمان تحت زمین‌لرزه‌های مصنوعی، پاسخ قاب‌ها با معیار جذر میانگین مربعات محاسبه شده است، شکل‌های ۱۷ و ۱۸ به ترتیب میزان RMS برش پایه و جابه‌جایی بام را برای قاب‌های ۱۰ و ۱۵ طبقه با مهاربند معمولی و مهاربند به همراه المان حلقه‌ی فولادی نشان می‌دهند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با کاربرد المان حلقه‌ی فولادی میزان برش پایه‌ی قاب



شکل ۱۹. بیشینه تغییر مکان نسبی قاب‌های ۱۰ و ۱۵ طبقه تحت زلزله‌های مصنوعی.



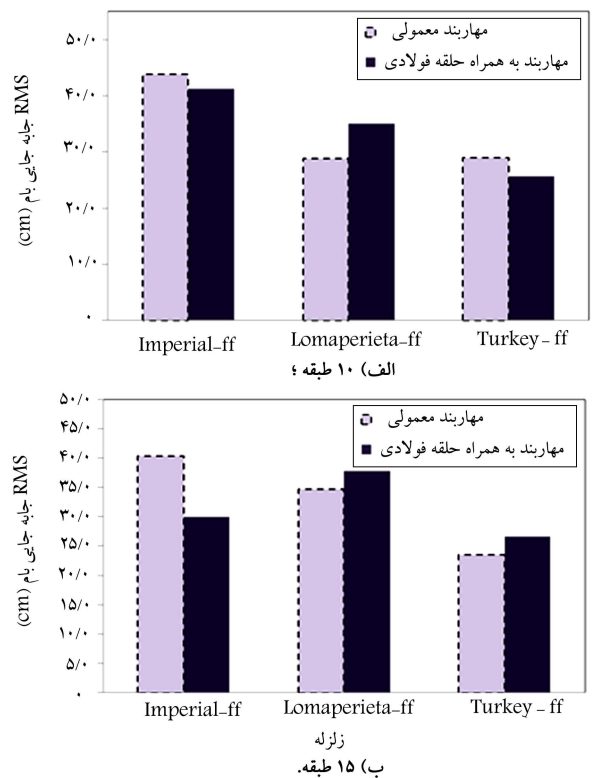
شکل ۱۷. میزان برش پایه‌ی قاب‌های ۱۰ و ۱۵ طبقه تحت زلزله‌های متفاوت با معیار RMS.

کاهش یافته است. میزان کاهش برای زمین‌لرزه‌های Imperial، Lomaperieta و Turkey در قاب ۱۰ طبقه به ترتیب معادل ۱۶، ۲۲ و ۱۳ درصد، در قاب ۱۵ طبقه، ۳۴، ۱۶ و ۳۵ درصد و همچنین تأثیر کاربرد المان جاذب در جابه‌جایی بام تحت زمین‌لرزه‌های متفاوت متغیر بوده است. در واقع با تشدید زمین‌لرزه‌ی اعمال شده، سازه وارد ناحیه‌ی غیرخطی می‌شود، لذا با تغییر رفتار دینامیکی سازه و تغییرات تدریجی در دوره‌ی تناوب آن، وضعیت جذب برش پایه و جابه‌جایی بام تطابق رفتاری نخواهند داشت. همچنین با بررسی تاریخچه‌ی زمانی جابه‌جایی بام، افزایش قابل ملاحظه‌ی جابه‌جایی در حالت استفاده از مهاربند معمولی تحت برخی زلزله‌های اعمالی می‌تواند ناشی از این مطلب باشد که به علت شدت زمین‌لرزه و کماتش مهاربندها، سازه توان باربری خود را از دست داده است؛ که این امر با افزایش قابل توجه در میزان جابه‌جایی همراه بوده است.

شکل ۱۹، نمودار تغییر مکان نسبی طبقات را در دو حالت مهاربند معمولی و مهاربند به همراه المان حلقه‌ی فولادی، تحت زلزله‌های مصنوعی نمایش می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، کاربرد المان جاذب تا حدودی سبب افزایش تغییر مکان نسبی طبقات، به‌ویژه در طبقات میانی، شده است.

## ۸. نتیجه‌گیری

طراحی حلقه و مهاربند را می‌توان به گونه‌ی انجام داد تا از عدم کماتش مهاربند اطمینان حاصل کرد. نتایج نشان داده است که کاربرد المان حلقه‌ی فولادی مانع از کماتش بادبند تحت بار لرزه‌ی شده است. این در حالی است که در قاب‌ها با مهاربند معمولی، کماتش مهاربند تقریباً در تمامی طبقات مشاهده می‌شود.



شکل ۱۸. تغییر مکان بام قاب‌های ۱۰ و ۱۵ طبقه تحت زلزله‌های متفاوت با معیار RMS.

-- نتایج آنالیز تاریخیچه‌ی زمانی قاب درحالت استفاده از المان حلقه‌ی فولادی، تحت زمین‌لرزه‌هایی اولیه با کاهش بیشینه‌ی پاسخ سازه همراه بوده است. از طرفی به دلیل وجود میرایی و پدیده‌ی لختی برش، اختلاف فاز در پاسخ سازه در دو حالت مشاهده می‌شود. همچنین در قاب با مهاربند معمولی تحت برخی زمین‌لرزه‌های اعمالی، سازه دچار تغییرشکل‌های پسماند شده و مقادیر جابه‌جایی تا حد زیادی افزایش یافته است. این در حالی است که با کاربرد المان حلقوی، سازه عملکرد مطلوب‌تری داشته است. به علاوه نمودار RMS برش پایه‌ی قاب در مدل تحلیل‌شده، نشان‌دهنده‌ی کاهش پاسخ سازه در گستره‌ی زمانی آن است. به‌گونه‌ی که تحت زمین‌لرزه‌های اولیه، برش پایه در قاب ۱۰ طبقه به‌طور متوسط ۳۱٪ و در قاب ۱۵ طبقه در زلزله‌های مختلف به‌طور متوسط ۲۱٪ کاهش یافته است. در نتیجه ضریب رفتار سازه، که تعیین‌کننده‌ی اثرات نامعینی، اضافی ظرفیت و شکل‌پذیری سازه است، تا حدود زیادی افزایش یافته است. از سوی دیگر، با کاربرد المان حلقه‌ی فولادی، تغییرمکان نسبی قاب در طبقات به ویژه طبقات میانی افزایش می‌یابد، در واقع، حلقه‌های مستهلک‌کننده‌ی انرژی با جذب انرژی ورودی زلزله، کاهش برش پایه (در نتیجه کاهش نیروی داخلی اعضاء) و

ازدیاد جابه‌جایی طبقات، زلزله را کنترل می‌کند.  
 -- روش موجک جهت انطباق طیفی، دقت و هم‌گرایی بالایی دارد و شتاب‌نگاشت‌هایی با مشخصات متفاوت نسبت به رکوردهای اولیه تولید می‌کند. از سوی دیگر، زمان تداوم رکورد در زلزله‌ی اولیه و تولیدشده برابر است. این امر اهمیت بالایی در تحلیل‌های غیرخطی دارد.  
 -- مقادیر پاسخ سازه تحت رکوردهای مصنوعی تولیدشده در مقایسه با رکوردهای اولیه به طور قابل ملاحظه افزایش یافته است. همچنین نتایج RMS برش پایه‌ی دو قاب تحت رکوردهای مصنوعی نشان‌دهنده‌ی کاهش برش پایه و افزایش تغییرمکان نسبی طبقات در حالت کاربرد المان حلقه‌ی فولادی است. درصد کاهش برش پایه برای زمین‌لرزه‌های مصنوعی به‌دست‌آمده از رکوردهای Turkey و Lomaperieta, Imperial در قاب ۱۰ طبقه به‌طور متوسط معادل ۱۷٪ و در قاب ۱۵ طبقه معادل ۲۸٪ است. در واقع تحت زلزله‌های شدید، سازه در نتیجه‌ی ورود به ناحیه‌ی غیرخطی و تغییرات تدریجی در دوره‌ی تناوب سازه، روند یکسانی در جذب برش و جابه‌جایی نداشته است. با این حال نتایج تحلیل، نمایانگر عملکرد مطلوب المان حلقه‌ی فولادی در جذب برش پایه و استهلاک انرژی است.

## پانوشتها

1. post-yielding
2. root mean square

## منابع (References)

1. Hines, E.M. and Jacob, C.C. "Eccentric braced frame system performance", Tufts University, Medford ton (2010).
2. Okazaki, T., Nakashima, M. and Suita, K. "Experimental study on link-to-column connections in steel eccentrically braced frames", 13th World Conference on Earthquake Engineering, No. 275 (2004).
3. Shayanfar, M.A., Barkhordari, M.A., Vetr, M.G. and Rezaeian, A.R. "Seismic behavior of eccentrically braced frames with composite vertical shear link (CV-EBFs)", *Sharif Journal Civil Engineering*, **5**(5), pp. 28-39 (2009).
4. Zahrai, S.M., Pirdavari, M. and Momeni Farahani, H. "Evaluation of hysteretic behavior of eccentrically braced frames with zipper-strut upgrade", *Journal of Constructional Steel Research*, **83**, pp. 10-20 (2013).
5. Abbasniya, R. and Hizajia, R. "Investigation of effective parameters on impact force in 2D moment resistance frames with concentric loose braces", *Sharif journal of Civil Engineering*, **27**(2), pp. 127-132 (2011).
6. Soong, T.T. and Dargush, G.F., *Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering*, Wiley, Chichester, U.K. (1997).
7. Kelly, J.M., Skinner, R.I. and Heine, A.J. "Mechanisms of energy absorption in special devices for use in earthquake resistant structures", *Bull of The New Zealand Society for Earthquake Engineering*, **5**(3), pp. 63-88 (1972).
8. Skinner, R.I., Kelly, J.M. and Heine, A.J. "Hysteretic dampers for earthquake resistant structures", *Earthquake Engineering & Structures Dynamics*, **3**(3), pp. 287-296 (1975).
9. Chen, G. and Eads, S. "Behavior and fatigue properties of metallic dampers for seismic retrofit of highway bridges", Department of Transportation Through University Transportation Center at the University of Missouri-Rolla (2005).
10. Ibrahim, Y. "Behavior a new visco-plastic device for seismic protection of structures", Dissertation Submitted to the Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University in Partial Fulfillment (2005).
11. Whittaker, A.; Bertero, V.; Alonso, J. and Thompson C. "Earthquake simulator testing of steel plate added damping and stiffness elements", Report No. UCB/EERC-89/02, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley (1989).
12. Tsai, K.C., Chen, H.W., Hong, C.P. and Su, Y.F. "Design of steel triangular plate energy absorbers for seismic-resistant construction", *Journal of Earthquake Spectra*, **9**(3), pp. 505-528 (1993).
13. Alehashem, M.S., Keyhani, A. and Pourmohammad, H. "Behavior and performance of structures equipped with ADAS & TADAS dampers (a comparison with conventional structures)", The 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China (2008).
14. Bayat, M. and Abdollahzade, G.R. "Analysis of the steel braced frames equipped with ADAS devices under the



- far field records”, *Latin American Journal of Solids and Structures*, **8**, pp. 163-181 (2011).
15. Mahmoudi, M. and Abdi, M.G. “Mathematica modeling of the ADAS energy dissipation device”, *Journal of Contractual Steel Research*, **71**, pp. 162-170 (2012).
  16. Kafi, M.A. “Experimental and analytical investigation of steel ring ductility”, Ph.D. Dissertation, Iranian university of science and technology (2007).
  17. Malek, S., Pabsang, P. and Lohghalam, A. “Introducing a new inactive dissipate system and comparing it with TADAS dissipate”, First International Congress on Seismic Retrofitting, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran (2006).
  18. Motamedi, M. and Hafezi, M. “Analytical study of steel ring connections as hysteretic metallic damper”, 15th World Conference in Earthquake Engineering, Lisbon (2012).
  19. Abbasnia, R., Vetr, M.G. and Kafi, M.A. “Laboratory and analytical review ductile steel ring”, *Sharif Journal Civil Engineering*, **51**, pp. 41-48 (2010).
  20. Research Center for Building and Costruction, *Iranian code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings*, Standard 2800, 3rd edition (2006).
  21. ABAQUS Documentation, version 6.9.
  22. Bakun, W.H. and Wentworth, C.M. “Estimating earthquake location and magnitude from seismic intensity data”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **87**(6), pp. 1502-1521 (1997).
  23. Suarez, L.E. and Montejo, L.A. “Generation of artificial earthquakes via the wavelet transform”, *International Journal of Solids and Structures*, **42**, pp. 5905-5919 (2005).
  24. Mukherjee, S. and Gupta, V.K. “Wavelet-based generation of spectrum-compatible time-histories”, *Soil Dynamic Earthquake Engineering*, **22**, pp. 799-804 (2002).