

Investigation of the Cyclic Behaviour of X-bracing Steel Frame with Quadrilateral Bending Fuse Installed at the Intersection of Braces

Fahima Mehdipour¹, Bahman Shervani Tabar^{2*}, Seyed Sina Kourehli²

1- Master's student, Department of Civil Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran

2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran

ABSTRACT

In this paper, to increase the ductility in steel concentrically braced frames, a new quadrilateral bending fuse is suggested at the intersection of the braces. In the first part, in order to achieve suitable dimensions, a diverse range of fuse dimensions and the behavior of the built models have been evaluated using ABAQUS software. The obtained results indicate that the maximum base shear and stiffness of the structure decreases with the increase in the dimensions of the opening used. The ratio of lateral stiffness value for 3% opening compared to X bracing is 44%, for 5% opening compared to X bracing it is 44% and for 10% opening compared to X bracing it is 20%. In the second part of the studies, firstly, a two-dimensional frame was designed using steel concentrically braced frames in ETABS software, and then three fifteen floors two-dimensional frame models by replacing quadrilateral bending fuses with 3, 5, and 10% opening percentages in OpenSees software was investigated. To evaluate the performance of studied frames, nonlinear dynamic time history analysis and nonlinear static analysis performed using different near field and far field accelerations was investigated. The meaning of 3% opening percentage is that the area of the quadrilateral fuse installed in the middle of the cross brace is equal to 3% of the product of the opening length of frame in the height of the floor. The results of dynamic analysis of time history show that for the near field earthquakes, the average base shear ratio for openings of 3%, 5% and 10% compared to X bracing is 72%, 40% and 26%, respectively. These values are equal to 72%, 38% and 24% for the far field, respectively.

ARTICLE INFO

Receive Date: 17 May 2023

Revise Date: 25 August 2023

Accept Date: 23 September 2023

Keywords:

Cyclic behavior

Steel frame

Brace

Quadrilateral bending fuse

ABAQUS

OpenSees

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2023.396747.3113>

*Corresponding author: Bahman Shervanitabar.

Email address: b.shervani@azaruniv.ac.ir

ارزیابی رفتار چرخه‌ای قاب فولادی مهاربندی شده ضربدری دارای فیوز خمشی چهار

ضلعی نصب شده در محل تقاطع مهاربندها

فهیمة مهدی پور^۱، بهمن شروانی تبار^{۲*}، سیدسیناکورهللی^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران

چکیده

در تحقیق حاضر برای افزایش شکل پذیری در قاب‌های مهاربندی هم‌محور ضربدری، استفاده از فیوز خمشی چهارضلعی در محل تقاطع مهاربندها پیشنهاد شده است. اساس کارکرد المان پیشنهادی، عملکرد آن به عنوان یک المان فیوز و ایجاد رفتار بهتر در المان‌های مهاربندی است. در بخش اول برای دستیابی به ابعاد مناسب، محدوده متنوعی از ابعاد فیوز و رفتار مدل‌های ساخته شده، از لحاظ مقاومت با تنش تسلیم مربوط به فولاد نرمة ساختمانی در نرم‌افزار ABAQUS مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج بدست آمده بیانگر آنست که با افزایش ابعاد باز شوی بکار رفته میزان نیروی حداکثر و سختی سازه کاهش می‌یابد. نسبت مقدار سختی جانبی برای بازشوی ۳٪ نسبت به مهاربندی ضربدری برابر ۴۴ درصد، برای بازشوی ۵٪ نسبت به مهاربندی ضربدری برابر ۴۴ درصد و برای بازشوی ۱۰٪ نسبت به مهاربندی ضربدری برابر ۲۰ درصد است. در بخش دوم مطالعات صورت گرفته، ابتدا در نرم‌افزار ETABS قاب دو بعدی با استفاده از مهاربند ضربدری طراحی شده و سپس سه مدل قاب دو بعدی پانزده طبقه با درصدهای بازشوی ۳، ۵ و ۱۰ درصد جایگزین شده در نرم‌افزار OpenSees با المان پیشنهادی و تحت تحلیل بارافزون و دینامیکی غیرخطی تاریخچه زمانی با کمک رکوردهای حوزه نزدیک و دور از گسل قرار گرفته‌اند (منظور از بازشوی ۳٪ این است که مساحت فیوز چهارضلعی تعبیه شده در وسط مهاربند ضربدری برابر ۳٪ حاصلضرب دهانه در ارتفاع طبقه می‌باشد). نتایج تحلیل‌های دینامیکی تاریخچه زمانی بیانگر آنست که برای زلزله‌های حوزه نزدیک میانگین نسبت برش پایه برای بازشوهایی ۳٪، ۵٪ و ۱۰٪ نسبت به مهاربندی ضربدری به ترتیب برابر ۷۲٪، ۴۰٪ و ۲۶٪ است. این مقادیر برای حوزه دور به ترتیب برابر ۷۲٪، ۳۸٪ و ۲۴٪ است.

کلمات کلیدی: رفتار چرخه‌ای، قاب فولادی، مهاربند، فیوز خمشی چهار ضلعی، ABAQUS، OpenSees

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://doi.org/10.22065/jsce.2023.396747.3113	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2023.396747.3113	۱۴۰۲/۰۲/۳۱	۱۴۰۲/۰۷/۰۱	۱۴۰۲/۰۷/۰۱	۱۴۰۲/۰۶/۰۳	۱۴۰۲/۰۲/۲۷
			بهمن شروانی تبار		*نویسنده مسئول:	
			b.shervani@azaruniv.ac.ir		پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

استفاده از مهاربندهای ضربداری یکی از متداول‌ترین روش‌های موجود برای مهاربندی و مقاوم‌سازی سازه‌های فولادی در برابر نیروهای جانبی بوده است. در این سیستم اعضای قطری به صورت همزمان عمل نموده و با توجه به جهت نیروی جانبی یکی از اعضا تحت فشار و دیگری تحت کشش قرار می‌گیرد [۱]. در ساختمان‌های با اسکلت فولادی سیستم قاب خمشی و سیستم استفاده از مهاربند دارای کاربرد بیشتری می‌باشد. در سیستم‌های مهاربندی ضربداری به علت سختی بالا نیروی زیادی از زلزله دریافت می‌شود و آسیب‌های وارده به این سیستم‌ها پس از وقوع زلزله در اعضای مهاربندی ضربداری به علت سختی بالا نیروی زیادی از زلزله دریافت می‌شود و آسیب‌های وارده به اصلی در این سازه‌ها نداشتن شکل‌پذیری مناسب می‌باشد [۲]. در مهاربندها تحت فشار کمانش بوجود آمده و بطور ناگهانی مقاومت مهاربندها در تحمل نیروی فشاری از دست می‌رود. در حالیکه در مهاربندهای تحت کشش در مرحله پلاستیک، تغییرشکل‌های پلاستیک ماندگار بوجود می‌آید و تا زمانی که جابجایی سازه در نوسان‌های بعدی به اندازه این تغییر شکل ماندگار نرسد عملاً این اعضا در کشش وارد نمی‌شوند. این دو عامل باعث ایجاد تغییرمکان و در عین حال نبود نیروی مقابله کننده با آن می‌شوند که در نهایت بدون هشدار قبلی و بدون استفاده کامل از ظرفیت مقاومتی اعضای مهاربندی، سیستم مهاربندی و سازه دچار خرابی می‌شود. برای جلوگیری از بروز چنین مشکلی می‌توان از مستهلک کننده انرژی استفاده نمود که با جذب قسمت اعظم انرژی موجب بهبود رفتار چرخه‌ای و در نتیجه شکل‌پذیرتر شدن سازه گردد و از وارد آمدن ضربات ناگهانی به سازه جلوگیری کند [۳].

در دهه‌های اخیر مطالعات بسیاری بر روی سیستم‌های مهاربندی صورت پذیرفته است و طرح‌ها و ایده‌های متنوعی برای رفع این موضوع ارائه شده است. از جمله این روش‌ها توسط کافی و همکاران [۴] ارزیابی آزمایشگاهی و عددی سیستم نوین مهاربندی با عضو لوزی شکل مجهز به میراگر تسلیم شونده پرداخته شده است. این سیستم که در راستای افزایش شکل‌پذیری، جذب انرژی بالاتر و پوشش ضعف‌های سیستم‌های موجود مورد پیشنهاد و بررسی قرار گرفته است، در ساخت نمونه‌ها ۳ مدل مختلف با اتصالات سخت، نیمه سخت و ساده، تحت بار چرخه‌ای قرار گرفته و نتایج آنها با یکدیگر مورد مقایسه شدند. نتایج بدست آمده نشان از قابلیت بالای هر سه سیستم در جذب انرژی و شکل‌پذیری را می‌دهد. در نهایت نیز در راستای امکان‌سنجی مدلسازی سیستم پیشنهادی در نرم‌افزار اجزا محدود ABAQUS مورد مدلسازی و صحت‌سنجی قرار گرفت که نتایج آن با نتایج آزمایشگاهی دارای هماهنگی مناسبی می‌باشد. کافی و همکاران [۵] به بررسی یک سیستم مهاربندی جدید با عضو میراگر تسلیم شونده دایره‌ای به صورت تجربی و عددی پرداختند. برای این منظور، یک نمونه آزمایشی از سیستم مهاربندی لوزی شکل مجهز به میراگر تسلیم شونده دایره‌ای با مقیاس و اتصالات پین ساخته شد. زاویه بین اعضای مهاربندی برابر با ۱۵/۶ درجه در نظر گرفته و نمونه تحت الگوی بارگذاری ATC-24¹ قرار گرفت و نتایج تجربی با خروجی‌های عددی به دست آمده از شبیه‌سازی‌ها با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS مقایسه شد که نشان‌دهنده تطابق زیاد بین آنها است. سپس دو نوع مهاربندی لوزی شکل مجهز به حلقه فولادی با ضخامت‌های مختلف و همچنین یک عنصر پیوندی با استحکام بالا جایگزین حلقه فولادی، در مقیاس واقعی مدل‌سازی و در داخل یک قاب با دو دهانه و یک طبقه قرار گرفت. نتایج نشان داد تمام اعضای مهاربندی اصلی الاستیک باقی مانده‌اند و تنها حلقه فولادی آسیب دیده است که نشان‌دهنده این واقعیت است که سیستم پیشنهادی می‌تواند بارهای القایی را به درستی در تمام اجزای سیستم توزیع کند. قابل ذکر است که مقدار زاویه بین عناصر مهاربندی نقش مستقیمی در ظرفیت کل سیستم دارد. پیشرفت‌های عددی نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت حلقه، ظرفیت می‌تواند تا ۷۵ درصد ظرفیت یک سیستم مهاربندی مورب را افزایش دهد. خیرالدین و همکاران [۶] به ارزیابی لرزه‌ای سازه‌های بتن‌آرمه مقاوم شده با مهاربند فولادی به روش تحلیل دینامیکی فزاینده و بارافزون نزدیک به گسل پرداختند. در این تحقیق دو نوع سیستم مهاربندی هم‌محور و برون‌محور با تعداد طبقات ۱۰ و تعداد دهانه ۵ تحت ۷ رکورد زلزله نزدیک به گسل مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که ظرفیت باربری قاب بتن آرمه با اعمال سیستم مهاربندی هم‌محور و برون‌محور به ترتیب تا ۲/۳ و ۲ برابر افزایش می‌یابد. و استفاده از قاب بتن آرمه مقاوم شده با مهاربند برون‌محور باعث کاهش برش‌پایه

نسبت به مهاربند هم محور گردید. و جابجایی در قاب بتن آرمه مقاوم شده با مهاربند برون محور کمتر از جابجایی در قاب بتن آرمه مقاوم شده مهاربند هم محور می باشد. کچویی [۷] به بررسی یک فیوز موضعی در طول مهاربند پرداخت. این فیوز بوسیله المان های کمکی محصور شده تا بدین وسیله از کمانش موضعی آن تحت بار فشاری جلوگیری شود. این موضوع سبب می شود مهاربند تحت بارگذاری سیکلی در فشار و کشش به صورت مشابه عمل کرده و در نتیجه رفتاری شکل پذیر با جذب انرژی بالا از خود ارائه دهد. همچنین در این مطالعه با استفاده از نتایج کارهای عددی به بررسی موقعیت مناسب فیوز در طول مهاربند و تعیین شکل ظاهری بهینه و اندازه طول مناسب برای آن پرداخته شده است. نتایج حاصله عملکرد به مراتب بهتر مهاربندهای هم محور جدید نسبت به مهاربندهای هم محور سنتی را به لحاظ شکل پذیری و جذب انرژی نشان داده است. در تحقیق دیگری کافی و همکاران [۸] به ارائه یک فیوز نوین کمانش ناپذیر کامپوزیتی^۲ برای استفاده در اعضای مهاربند پرداختند. این فیوز با ابعادی به نسبت کوچک، تکامل یافته مهاربندهای کمانش ناپذیر طول کوتاه^۳ یک میراگر هیستریزیس با رفتار و ظرفیت باربری متفاوت در کشش و فشار است. استفاده از اجزای کششی مضاعف در این فیوز توانسته است تا کاهش ظرفیت کششی اعضای مهاربند ناشی از استفاده فیوزهای معمول سازه ای در آنها را مرتفع نماید. در انتها پارامترهای تنظیم کننده مقاومت با بررسی نمودار هیستریزیس نمونه ها محاسبه و مقایسه شده است. نتایج حاکی از رفتار شکل پذیر فیوز پیشنهادی با کرنش متوسط ۵٪، توام با ظرفیت کششی و استهلاک انرژی مناسب می باشد. بوستانی و همکاران [۹] به بررسی عملکرد چرخه ای یک مهاربندی جدید با استفاده از عناصر مهاربندی دایره ای یا بیضی^۴ برای کاهش آسیب در سازه های تحت تحریک زلزله پرداختند. برای ارزیابی خواص لرزه ای این سیستم مهاربندی، یک تحلیل تجربی بر روی قاب مهاربندی تحت بارگذاری چرخه ای انجام شد. نتایج نشان داد که این سیستم مهاربندی دارای رفتار هیستریزیک پایدار، دامنه شکل پذیری خوب و قابلیت اتلاف انرژی بالای برخوردار است. گوسلا و همکاران^۵ [۱۰] به بررسی پاسخ غیرخطی یک سیستم مهاربندی، که در آن اتلاف انرژی به یک فیوز متکی است پرداختند، که از طریق آزمایش های تجربی و تحلیل های عددی مورد بررسی قرار دادند. بعد از بارگذاری اطلاعات مفیدی در مورد تأثیر چندین پارامتر طراحی، مانند فشردگی مقطع، شکل و لاغری اعضا ارائه گردید. پایداری حلقه های پسماند و اتلاف انرژی از طریق آزمایش های چرخه ای ارزیابی گردید. نتایج نشان داد که فیوزها به راحتی قابل تعویض هستند و انعطاف پذیری بالایی دارند. نوبهار و همکاران [۱۱] به بررسی پارامترهای عملکرد لرزه ای مهاربند زانویی پرداختند. در این تحقیق مهاربندهای زانویی در قاب ۳ دهانه در دهانه مرکزی قرار گرفته است. در قاب های با چهار دهانه نیز مهاربندهای زانویی یک بار در دهانه های مرکزی و در حالت دیگر در دهانه های کناری قرار گرفته اند. نتایج نشان داد، قاب های طراحی شده براساس ضرایب عملکردی پیشنهادی در محدوده قابل قبول قرار دارند. و با افزایش ارتفاع قاب های مورد مطالعه، مقدار ضریب مقاومت کاهش یافته است. همچنین نمونه های مطالعاتی دارای شکل پذیری بسیار عالی هستند. حسینی و همکاران [۱۲] به بررسی وسایل اتلاف انرژی با رفتار کششی و فشاری یکسان به منظور ایجاد مهاربندهای کمانش تاب پرداختند. در این تحقیق یک قاب مهاربندی شده معمولی و یک قاب با المان پیشنهادی را تحت بارگذاری دینامیکی غیرخطی مورد بررسی قرار دادند. مفصل پلاستیک در قابها مورد بررسی قرار گرفت و مشاهده شد که در قاب با میراگر مهاربندها به طور الاستیک رفتار کرده و در قاب با مهاربندی معمولی، مهاربند و برخی ستون ها وارد فاز غیرخطی شده است. نتایج حاکی از آن است که مهاربندهای دارای المان شکل پذیر پیشنهادی دارای جذب انرژی بسیار بیشتری نسبت به نمونه نظیر هستند. و مقایسه برش پایه دو سیستم تحت بارهای دینامیکی نشان می دهد که برش پایه قاب های با مهاربند معمولی ۳۵ درصد کمتر از نمونه نظیر است که نشانگر این مسئله است که بخش اعظم انرژی ورودی به سازه توسط دستگاه اتلاف انرژی پیشنهادی جذب شده است. جیانوزی و همکاران^۶ [۱۳] سیستم جدید مهاربند ضربدری با پانل برشی شکل پذیر جاری شونده را مورد بررسی قرار دادند که در این اتصال برای اتلاف انرژی از یک پانل برشی شکل پذیر جاری شونده ی مربع شکل استفاده شده است. در این تحقیق نشان

² Composite Buckling Restrained Fuse (CBRF)

³ Reduced Length Buckling-Restrained Braces

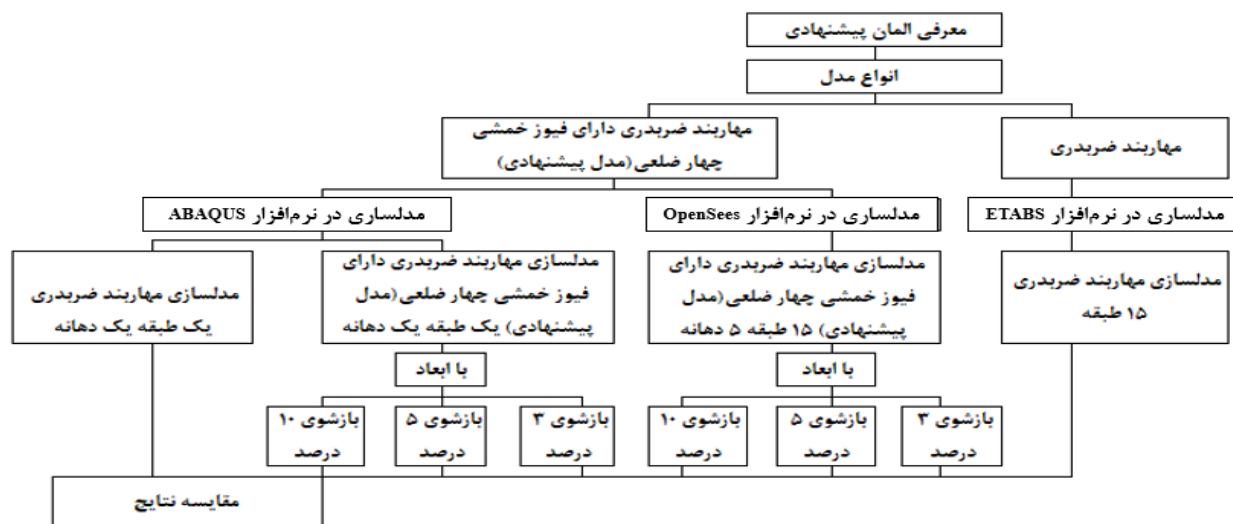
⁴ OGrid

⁵ Gusella, F et al.

⁶ Giannuzzi, D et al.

داده شد که استفاده از این اتصال باعث تغییر شکل پلاستیک کافی بدون کمانش مهاربند و جذب بیشتر انرژی خواهد شد. عندلیب و همکاران در سال [۱۴] به بررسی آزمایشگاهی شکل پذیری و عملکرد رینگ‌های فولادی ساخته شده با ورق پرداختند. در رینگ‌هایی که در این تحقیق استفاده شده است، دو نیم حلقه توسط ورق‌هایی به همدیگر وصل شده و مورد بررسی آزمایشگاهی قرار گرفته است. نمونه‌های مورد نظر به صورت فشاری-کششی مورد بارگذاری چرخه‌ای قرار گرفتند. نتایج بدست آمده از منحنی‌های چرخه‌ای حاکی از آن است که نمونه‌های مورد نظر دارای رفتار هیستریزس و شکل پذیری مناسبی هستند.

هدف از این مقاله بهبود رفتار مهاربند ضربدری است. برای این منظور مهاربند ضربدری مجهز به فیوز خمشی چهار ضلعی در قاب تعبیه شده است و این فیوز خمشی طوری طراحی می‌شود که قبل از آنکه مهاربند به بار بحرانی خود برسد، دچار تسلیم می‌شود و از این طریق بتواند با تشکیل مفصل پلاستیک، جذب انرژی نماید و از ورود اعضای سازه‌ای به مرحله غیرخطی جلوگیری کند. روند نمای پژوهش حاضر در شکل ۱ ارائه شده است.



شکل ۱: روند نمای پژوهش حاضر

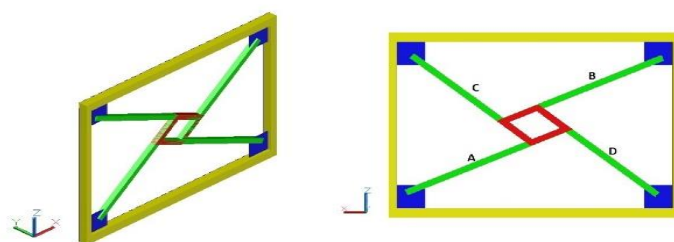
۲- مبانی نظری طرح پیشنهادی

این تحقیق که به صورت مدلسازی یا تحلیل عددی فیوز خمشی چهارضلعی است، به منظور نشان دادن تاثیر استفاده از این المان در قاب مهاربندی شده‌ای با المان پیشنهادی و بدون آن در نرم‌افزار OpenSees مدل شده و عملکرد لرزه‌ای قاب‌های مهاربند ضربدری با المان پیشنهادی و بدون آن، با استفاده از تحلیل دینامیکی غیرخطی برحسب تاریخچه زمانی، بررسی گردیده و نتایج بدست آمده با هم مقایسه شدند. همچنین برای بررسی تاثیر المان پیشنهادی در ارتفاع، قاب ۱۵ طبقه مورد بررسی قرار گرفته است. برای بررسی جزئی‌تر المان پیشنهادی و دستیابی به ابعاد مناسب، محدوده متنوعی از ابعاد فیوز و رفتار مدل‌های ساخته شده، با استفاده از نرم‌افزار آنالیز اجزای محدود ABAQUS مورد طراحی و تحلیل قرار گرفت و از منحنی دو خطی برای تعریف مشخصات رفتاری مصالح فولادی استفاده گردید. برای تحلیل سازه مورد مطالعه از روش تحلیل استاتیکی غیرخطی استفاده شد بررسی عددی رفتار مدل‌های پیشنهادی تحت بارگذاری چرخه‌ای بر طبق الگوی ATC-24⁷ می‌باشد. علاوه بر بررسی رفتار مهاربند ضربدری دارای فیوز خمشی چهارضلعی، به بررسی استهلاک انرژی و عملکرد مهاربند ضربدری نیز پرداخته شده است. فیوز خمشی چهار ضلعی از لحاظ مقاومت با تنش تسلیم مربوط به فولاد نرمه‌ی

ساختمانی بررسی شد، تا هنگام وقوع زلزله، قبل از کماتش مهاربندی ضربدری جاری شده و با ورود به مرحله غیرخطی قسمت زیادی از انرژی زلزله را مستهلک کرده و از وارد آمدن خسارت به اعضای اصلی سازه، جلوگیری شود.

۲-۱- معرفی المان پیشنهادی

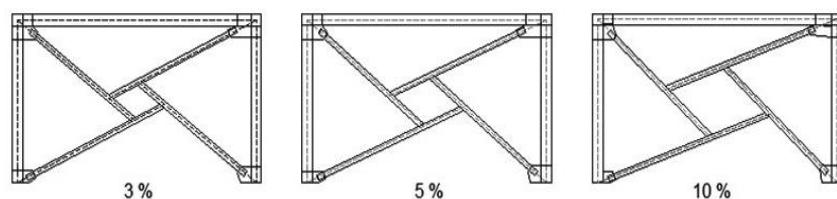
روشی که در این تحقیق مدنظر قرار گرفته عبارت است از استفاده از یک فیوز خمشی چهارضلعی در میان مهاربند ضربدری می‌باشد. مطابق شکل ۲ یک فیوز خمشی چهارضلعی در وسط مهاربندی ضربدری تعبیه می‌شود. به طوری که در هنگام تغییر شکل دو قسمت از مهاربند که در شکل ۲ با علامت B و A مشخص شده‌اند تحت کشش قرار می‌گیرند و دو قسمت C و D تحت فشار قرار می‌گیرند و فیوز خمشی چهارضلعی به عنوان مستهلک کننده انرژی وارد عمل می‌شود. خلاقیت این طرح استفاده از ظرفیت خمشی فیوز چهارضلعی در عملکرد کشش و فشار مهاربندها می‌باشد و این امر موجب استهلاک انرژی در نوسانات قاب می‌شود. در مهاربندهای برون محور قسمت‌های کوچکی از تیرها تحت خمش قرار می‌گرفتند و به مرحله خرابی می‌رسیدند که بعد از زلزله می‌بایست تعویض شوند و چون تیرهای عضوهای اصلی سازه‌ها هستند، تعویض قسمت‌هایی از آنها خیلی مشکل است. با این تدبیر جدید قسمت‌هایی که خمیده شده و به مرحله خرابی می‌رسند، در وسط مهاربند X می‌باشد که تعویض آن بعد از زلزله به مراتب آسان تر می‌باشد. این فیوز خمشی چهارضلعی می‌تواند از جنس فولاد نرمه یا از جنس فولاد با تنش تسلیم پایین تر باشد که سریعتر به مرحله خمش پلاستیک برسد که حداکثر جذب انرژی را داشته باشد.



شکل ۲: مهاربند با فیوز خمشی چهار ضلعی.

۳- مدلسازی در نرم افزار ABAQUS

برای دستیابی به ابعاد مناسب، محدوده متنوعی از ابعاد فیوز و رفتار مدل‌های ساخته شده، از لحاظ مقاومت با تنش تسلیم مربوط به فولاد نرمه‌ی ساختمانی در نرم افزار ABAQUS [۱۵] مورد ارزیابی قرار گرفته است. که برای این منظور یک قاب یک دهانه یک طبقه از سازه جدید را در نرم افزار ABAQUS بصورت عددی مطابق شکل ۳ مدل نمودیم تا به بررسی رفتار این قاب یک دهانه یک طبقه بپردازیم. هدف از مدلسازی، انتخاب ابعاد مناسب و بدست آوردن اطلاعات مورد نیاز برای طراحی المان پیشنهادی در نرم افزار ABAQUS است. برای این منظور ۳ قاب با فیوز خمشی چهارضلعی با بازشوهای متفاوت تجهیز شده‌اند یعنی: ۳ درصد، ۵ درصد و ۱۰ درصد دهانه با ارتفاع ۳/۲۰ متر و طول دهانه ۵ متر مطابق شکل ۲ مورد مطالعه قرار گرفت (منظور از بازشوی ۳٪ این است که مساحت فیوز چهارضلعی تعبیه شده در وسط مهاربند ضربدری برابر ۳٪ حاصلضرب دهانه در ارتفاع طبقه می‌باشد). مقطع ستون‌های از مقطع I شکل ۲۲۰ (IPB220) و مقطع تیرها از مقطع I شکل ۲۲۰ (IPE220) و مقطع مهاربندها از دوپل ناودانی ۱۰۰ (2UNP100) که به هم متصل شده‌اند و به شکل قوطی درآمده‌اند استفاده شده است. با تکیه‌گاه‌های گیردار و اتصالات مفصلی بین تیرها و ستون‌ها و اتصالات صلب بین مهاربند دارای فیوز خمشی چهار ضلعی مدل شده اند اتصالات بین مهاربند و قاب خارجی از نوع مفصلی است.



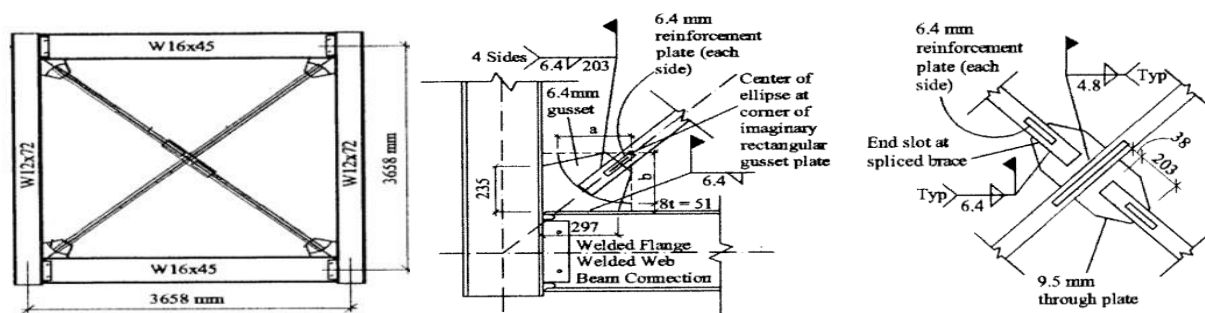
شکل ۳: قاب‌های مورد بررسی با بازشوهای متفاوت.

جدول ۱: مشخصات مکانیکی اعضاء المان پیشنهادی

نوع مصالح فولادی	تنش تسلیم (MPa)	تنش نهایی (MPa)	کرنش نهایی (MPa)
فولاد نرمه	۲۴۰	۳۸۰	۰/۰۲

۳-۱- صحت سنجی در نرم‌افزار ABAQUS و OpenSees

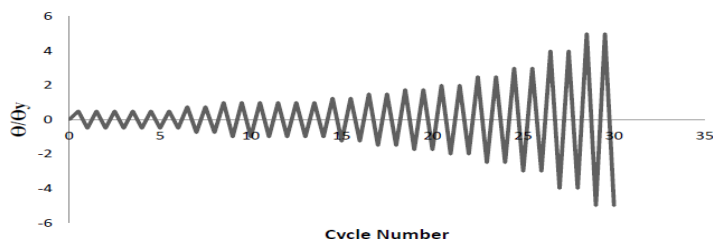
برای اطمینان از درستی شبیه‌سازی غیرالاستیک رفتار نمونه‌ها، با ساخت نمونه‌ای در نرم‌افزار ABAQUS و OpenSees نتایج بدست آمده اعتبار سنجی شد. برای این منظور از نمونه‌ی HSS31 در مقاله پالمر و همکاران^۸ استفاده شده است. در این نمونه از یک قاب با دو ستون W12x72، دو تیر W16x45 و عضو مهاربندی HSS3x3x1/4 استفاده شده است. برای مدل‌سازی اتصال تیر به ستون و شبیه‌سازی نبشی جان در نرم‌افزار ABAQUS و OpenSees ۸۰ درصد جان تیر ادامه داده شده و به بال ستون متصل می‌شود (شکل ۴) [۱۶].



شکل ۴: نمونه قاب مهاربندی ضربدری HSS31 [۱۶].

برای بارگذاری از قطعه صلبی که بر روی بال تیر بالایی قرار گرفته است و انتقال نیرو را از دال شبیه‌سازی می‌کند، استفاده شده است. این قاب تحت بارگذاری چرخه‌ای تغییر مکان براساس آیین‌نامه ATC-24^۹ مطابق شکل ۵ قرار گرفته است [۱۷].

8 Palmer et al.
9 Applied Technology Council

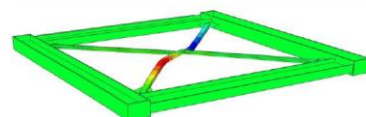
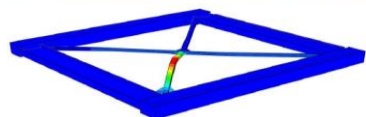


شکل ۵: الگوی بارگذاری تغییر مکان [۱۷].

همان طور که در اشکال ۷ و ۸ و جداول ۲ و ۳ مشاهده می شود نمونه عددی که در این مطالعه برای اعتبارسنجی ساخته شده بود حالت کمانش عضو مهاربندی و گسترش تنش در ورق اتصال میانی اتصال گوشه را به خوبی پیش بینی نموده است.

(ب)

(الف)



شکل ۶: مقایسه مدل آزمایشگاهی با مدل نرم افزاری (الف) - کمانش نامتعادل مهاربند منقطع، ب - کمانش S شکل مهاربند پیوسته).

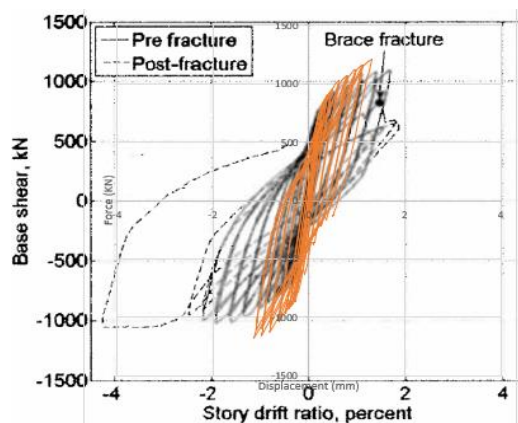
جدول ۲: مقایسه نتایج حاصل از طراحی مدل آزمایشگاهی و مدل نرم افزاری ABAQUS.

مدل ها	مدل آزمایشگاهی				مدل نرم افزاری ABAQUS			
	تغییر مکان (mm)	برش پایه (kN)	نیروی حداکثر	انرژی (kN-mm)	تغییر مکان (mm)	برش پایه (kN)	نیروی حداکثر	انرژی (kN-mm)
ردیف ۱	۱۱/۶۴	۱۰۲۰/۵	۱۱۱۰/۶	۵۸۸۹۶/۵۲	۱۳/۶	۱۰۶۳	۱۲۰۴	۴۳۴۷۱/۲۵

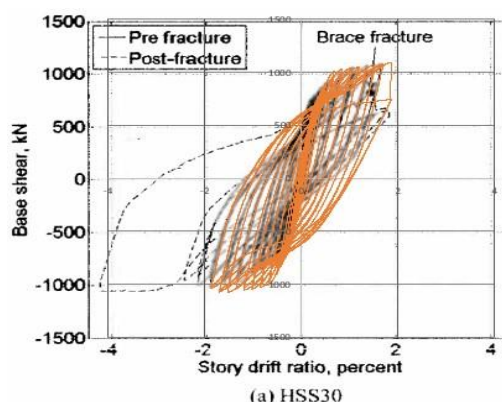
جدول ۳: مقایسه نتایج حاصل از طراحی مدل آزمایشگاهی و مدل نرم افزاری OpenSees.

مدل ها	مدل آزمایشگاهی				مدل نرم افزاری OpenSees			
	تغییر مکان (mm)	برش پایه (kN)	نیروی حداکثر	انرژی (kN-mm)	تغییر مکان (mm)	برش پایه (kN)	نیروی حداکثر	انرژی (kN-mm)
ردیف ۱	۱۱/۶۴	۱۰۲۰/۵	۱۱۱۰/۶	۵۸۸۹۶/۵۲	۱۴/۳۹	۱۰۰۷/۴	۱۰۳۷	۵۹۱۳۷/۸

مقایسه نتایج عددی با نمونه آزمایشگاهی در اشکال ۷ و ۸ ارائه شده است. همان طور که در اشکال ۷ و ۸ دیده می شود، نمودارهای هیستریزس مدل آزمایشگاهی به رنگ سیاه و مدل مهاربند دارای فیوز به رنگ نارنجی نشان داده شده است که دارای همپوشانی قابل قبولی است.



شکل ۷: مقایسه منحنی هیستریزیس مدل مهاربندی آزمایشگاهی با مهاربند مجهز به فیوز به رنگ نارنجی در نرم افزار ABAQUS



شکل ۸: مقایسه منحنی هیستریزیس مدل مهاربندی آزمایشگاهی با مهاربند مجهز به فیوز به رنگ نارنجی در نرم افزار OpenSees

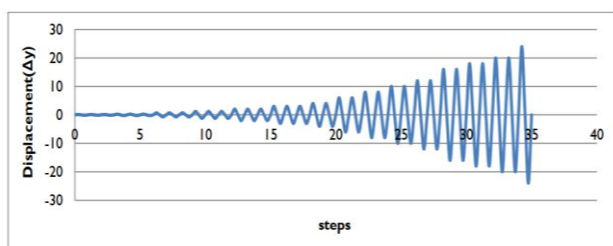
۳-۲- روش مدل سازی در نرم افزار ABAQUS

در این قسمت با استفاده از نرم افزار اجزای محدود و انجام تحلیل های استاتیکی غیرخطی بر روی مدل سه بعدی، به بررسی رفتار مهاربند ضربدردی مجهز به فیوز خمشی چهارضلعی طبق شکل ۹ پرداخته شد. فولاد بکار رفته در این مدل فولاد ساختمانی S۳۷ می باشد که برای حالت الاستیک آن، دو پارامتر مدول الاستیسته یانگ و ضریب پواسون، تحت رفتار ایزوتروپ ماده تعریف می شود و برای حالت پلاستیک آن چهار مقدار تنش تسلیم، کرنش متناظر تنش تسلیم، کرنش نهایی و کرنش متناظر تنش نهایی در قالب دو نقطه تحت رفتار کمنماتیک یا شیب سخت شونده گی بیان می شود. المان مورد استفاده از نوع پوسته ای^{۱۰} و المان ۴ گرهی با انتگرال گیری کاهش یافته^{۱۱} در آنها برای حل مسئله استفاده می شود. نحوه مش بندی به گونه ای بوده است تا در محل اتصالات و مهاربندها مش ریزتر از سایر قسمت ها (تیر و ستون) می باشد. ابعاد مش حداکثر ۵۰ میلیمتر برای تیرها و ستون ها و برای اتصالات ۱۵ میلیمتر می باشد. بارگذاری به دو صورت تک آهنگ و رفت و برگشتی اعمال می شود که برای حالت چرخه ای بصورت تغییر مکان کنترل می باشد و از الگوی بارگذاری ATC-24^{۱۲} مطابق شکل ۱۰ تبعیت شده است [۱۷]. برای به دست آوردن جابجایی لحظه تسلیم از آنالیز استاتیکی با بارگذاری از نوع جابجایی تا ۵۰ میلیمتر استفاده شده است. جابجایی ها در آنالیز پوش و چرخه ای در تراز طبقه اعمال شده است. تکیه گاه ها در پای ستون ها به صورت گیردار می باشد و محل اعمال بار در بالای ستون ها می باشد.

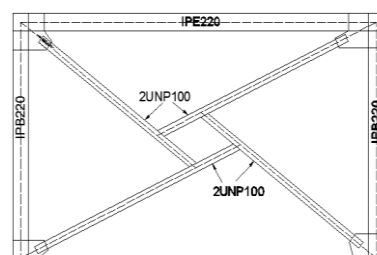
10 SHELL.

11 Reduced integration point in an S4R element

12 Applied Technology Council



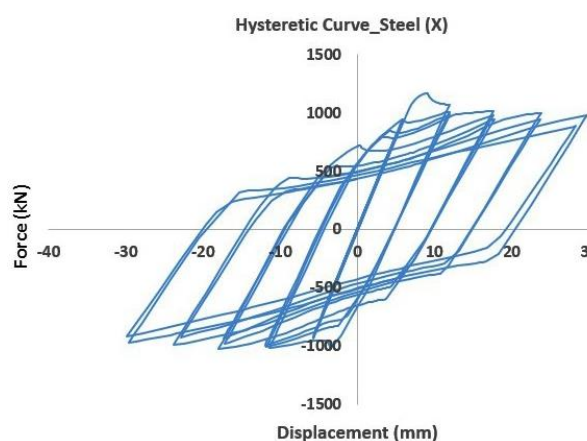
شکل ۱۰: الگوی بارگذاری ATC-24 [۱۷].



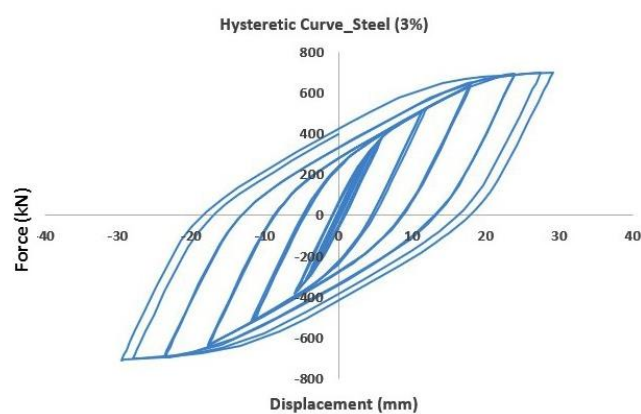
شکل ۹: مدلسازی المان پیشنهادی

۳-۳- بررسی نتایج حاصل از تحلیل چرخه‌ای

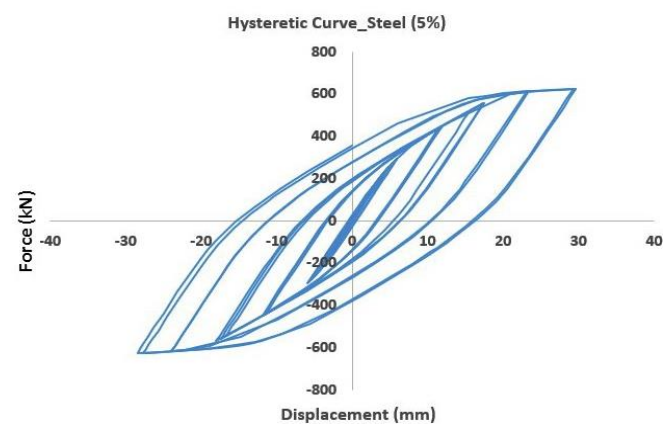
همان طور که از نمودارهای مدل مهاربند ضربدری دارای فیوز خمشی چهارضلعی دیده می‌شود. وجود فیوز خمشی چهارضلعی در بهبود رفتار تک آهنگ و چرخه‌ای مهاربند ضربدری نقش موثری داشته و منحنی هیستریزیس مهاربند ضربدری را به حالت دوکی شکل درآورده است، ولی در عوض مقاومت جانبی مهاربند ضربدری و سختی آن را کاهش داده است.



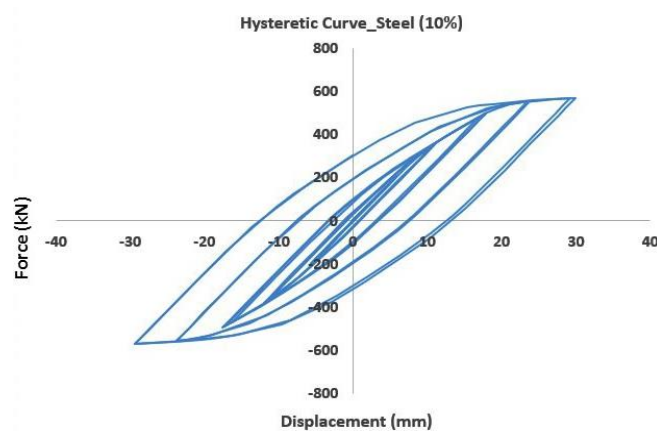
شکل ۱۱: منحنی چرخه‌ای نمونه ۱ طبقه X.



شکل ۱۲: منحنی چرخه‌ای نمونه ۱ طبقه - بازشوی ۳٪.



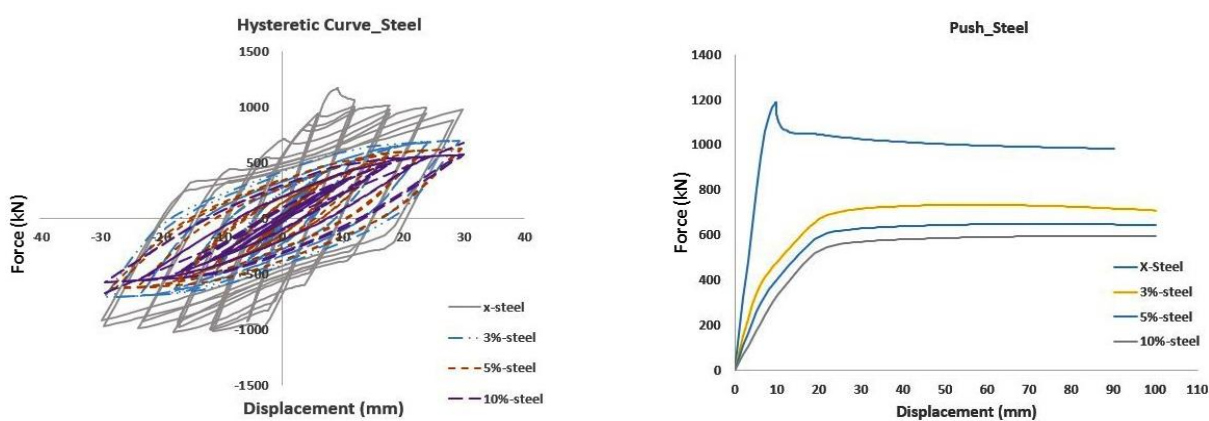
شکل ۱۳: منحنی چرخه‌ای نمونه ۱ طبقه - بازشوی ۵٪.



شکل ۱۴: منحنی چرخه‌ای نمونه ۱ طبقه - بازشوی ۱۰٪.

۳-۳-۱- مقایسه منحنی عملکرد مدل‌های پیشنهادی با مهاربند ضربدری

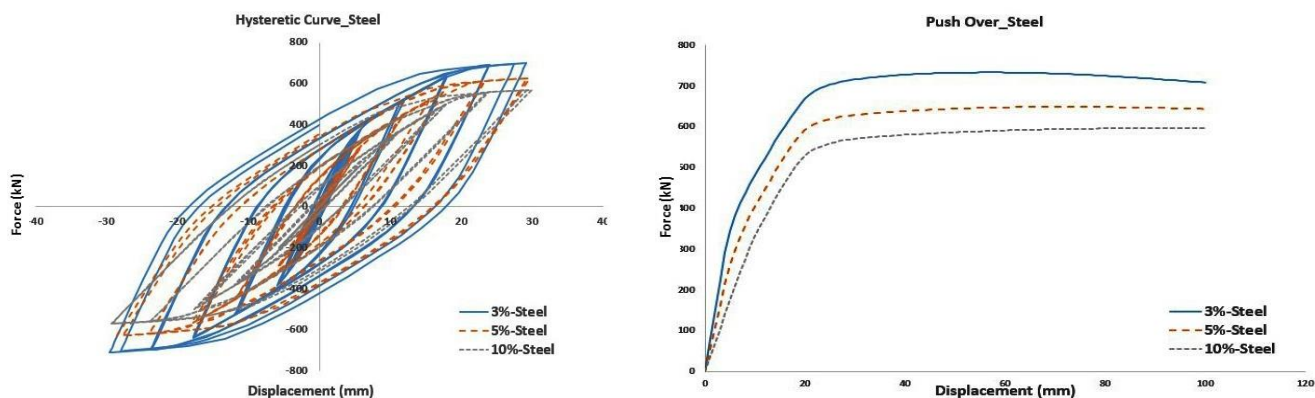
رفتار مهاربند ضربدری به گونه‌ای است که در چرخه‌های بارگذاری متوالی دچار افت باربری شده و بصورت پله‌ای در هر چرخه، بار بحرانی کماتش قطری‌ها کاهش می‌یابد، علت این مسئله کماتش قطری‌ها فشاری و جاری شدن قطری‌های کششی می‌باشد. همان‌طور که از نمودارهای مدل مهاربند ضربدری دارای فیوز خمشی چهارضلعی دیده می‌شود وجود قاب میانی در بهبود رفتار تک‌آهنگ و چرخه‌ای مهاربند ضربدری نقش موثری داشته و منحنی هیستریزیس مهاربند ضربدری را به حالت دوکی شکل درآورده است، در صورت استفاده از مهاربند ضربدری دارای فیوز خمشی چهارضلعی، شاهد بهبود رفتار چرخه‌ای و تک‌آهنگ مهاربند ضربدری بوده ولی در عوض باعث افت و کاهش سختی مهاربند ضربدری گردیده که در شکل ۱۵ قابل مشاهده می‌باشد. علت این مسئله را می‌توان چنین برداشت کرد که در مهاربند ضربدری سختی مدل توسط سختی محوری عضو قطری تامین بوده، که در صورت استفاده از مهاربند ضربدری دارای فیوز خمشی چهارضلعی سختی مدل توسط فیوز خمشی تامین گردیده، لذا این مسئله سبب کاهش مقاومت و سختی مدل گردیده است.



شکل ۱۵: منحنی چرخه‌ای و بارافزون مدل‌های پیشنهادی با مهاربند ضربدری.

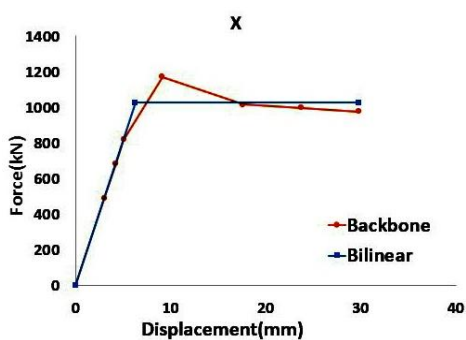
۳-۳-۲- مقایسه منحنی عملکرد مدل‌های پیشنهادی

منحنی‌های چرخه‌ای (هیستریزیس) و بارافزون قاب‌های یک طبقه یک دهانه مجهز به فیوز خمشی چهارضلعی دارای فولاد معمولی در شکل ۱۶ آورده شده است. با مقایسه این شکل‌ها ملاحظه می‌شود که سیستم‌های مجهز به فیوز خمشی چهارضلعی دارای فولاد معمولی در شرایط بازشوی متفاوت، بازشوی ۳٪ دارای قابلیت استهلاک انرژی بیشتری نسبت به بازشوهای ۵٪ و ۱۰٪ دارا می‌باشد. و همچنین بازشوی ۵٪ نیز نسبت به بازشوی ۱۰٪ از قابلیت استهلاک انرژی بیشتری برخوردار است. با توجه به افزایش ابعاد بازشوی سیستم فیوز خمشی چهارضلعی چرخه‌های هیستریزیس در تغییر مکان کمتری تشکیل می‌شود و میزان مقاومت و سختی سیستم در هر دوره از بارگذاری به صورت قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد.

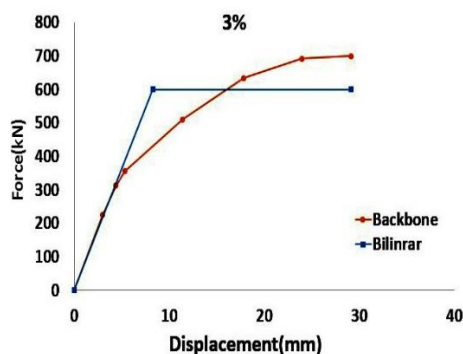


شکل ۱۶: منحنی چرخه‌ای و بارافزون مدل‌های پیشنهادی.

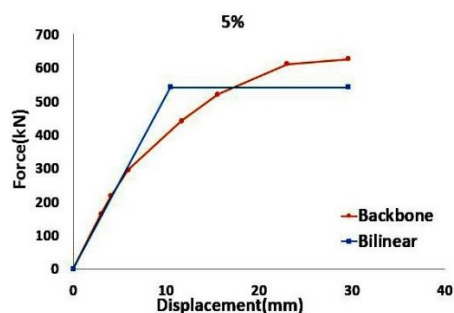
در ادامه با استفاده از دوخطی کردن نمودارهای نیروی جانبی- تغییرمکان [۱۸] مقادیر مختلف جذب انرژی، سختی اولیه و حداکثر نیرو کلیه مدل‌ها در جدول ۴ نشان داده شده است. همچنین در شکل‌های ۱۷ تا ۲۰ نمونه‌ای از یک نمودار دوخطی شده به روش گفته شده را نیز می‌توان مشاهده کرد.



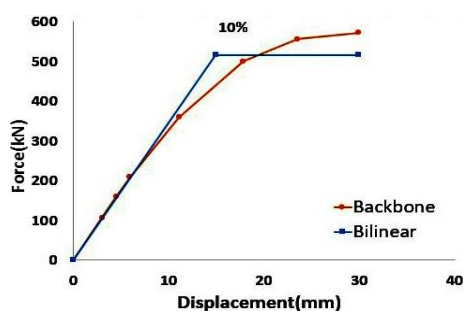
شکل ۱۷: نمودار دوخطی ۱ طبقه X.



شکل ۱۸: نمودار دوخطی ۱ طبقه - بازشوی ۳٪.



شکل ۱۹: نمودار دوخطی ۱ طبقه - بازشوی ۵٪.



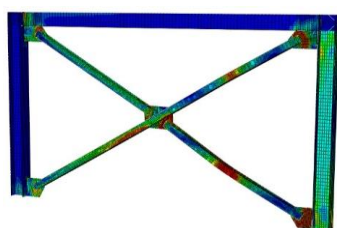
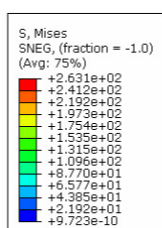
شکل ۲۰: نمودار دوخطی ۱ طبقه - بازشوی ۱۰٪.

همانطور که در جدول ۴ مشاهده می شود با قرار گرفتن المان مورد نظر در کلیه قاب‌ها با بازشوی ۳٪، ۵٪، ۱۰٪ ظرفیت باربری و سختی اولیه قاب‌ها کاهش می یابد. همچنین به طور کلی می توان گفت که با افزایش ابعاد بازشوی بکار رفته میزان نیروی حداکثر و سختی سازه کاهش می یابد. نسبت مقدار سختی برای بازشوی ۳٪ نسبت به مهاربندی ضربدری برابر ۴۴ درصد، برای بازشوی ۵٪ نسبت به مهاربندی ضربدری برابر ۴۴ درصد و برای بازشوی ۱۰٪ نسبت به مهاربندی ضربدری برابر ۲۰ درصد است.

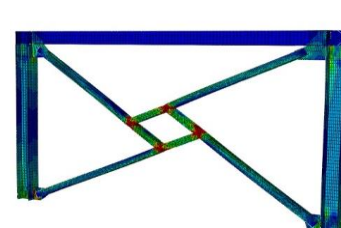
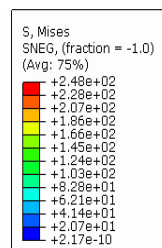
جدول ۴: مقایسه نتایج حاصل از تحلیل استاتیکی غیرخطی.

مدل‌ها	نامگذاری مدل‌ها	انرژی (kN/mm)	نیروی حداکثر (kN)	سختی (kN/mm)
مهاربند ضربدری	X	۲۶۵۵۳/۱۵۸۱۳	۱۰۶۵/۹۸	۱۶۲/۴۶۳۳۳۳۳
مهاربند ضربدری دارای فیوز خمشی با بازشوی ۳٪	٪۳	۱۴۹۹۹/۳۴۱۶۷	۶۹۹/۸۸۹	۷۲/۵۱۸۴۸۳۸۱
مهاربند ضربدری دارای فیوز خمشی با بازشوی ۵٪	٪۵	۱۳۲۱۴/۲۹۷۳۱	۶۲۵/۴۱۳	۵۱/۶۸۹۱۰۳۱۸
مهاربند ضربدری دارای فیوز خمشی با بازشوی ۱۰٪	٪۱۰	۱۱۵۷۲/۵۶۶۵۷	۵۷۰/۴۵۴	۳۴/۵۰۸۶۶۹۱۹

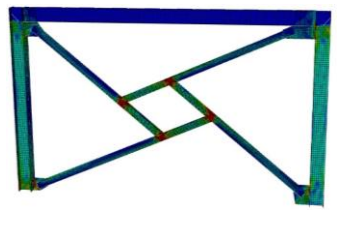
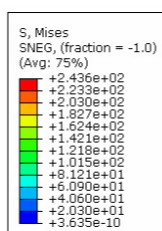
همانگونه که در شکل‌های ۲۱ تا ۲۴ ملاحظه می شود مطابق کانتور تنش فون میسز چهار نمونه مورد مطالعه، المان‌هایی که بیش از سایر المان‌ها دارای تنش‌ها و کرنش‌های بیشینه است مربوط به اعضای فیوز خمشی چهارضلعی است و همچنین ملاحظه می شود که عمده بیشینه تنش در چهار گوشه فیوز خمشی چهارضلعی متمرکز می شود.



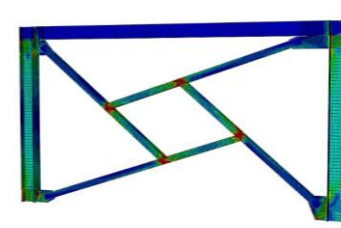
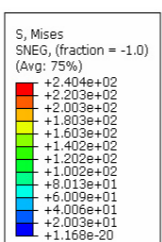
شکل ۲۱: کانتور تنش فون میسز نمونه ۱ طبقه X.



شکل ۲۲: کانتور تنش فون میسز نمونه ۱ طبقه - بازشوی ۳٪.



شکل ۲۳: کانتور تنش فون میسز نمونه ۱ طبقه - بازشوی ۵٪.



شکل ۲۴: کانتور تنش فون میسز نمونه ۱ طبقه - بازشوی ۱۰٪.

۴- معرفی و تحلیل مدل‌های مورد مطالعه در نرم‌افزار OpenSees

در این مطالعه ۳ مدل مهاربند دارای فیوز خمشی شکل‌پذیر و همچنین یک مدل مهاربند معمولی با تعداد طبقات ۱۵ و تعداد دهانه ۵ و ارتفاع طبقات ۳/۲۰ متر و طول دهانه ۵ متر انتخاب شده است. با توجه به اینکه در بخش اول تحقیق حاضر به مطالعه المان محدود یک قاب یک طبقه پرداخته شده است، لذا برای بررسی تاثیر استفاده از مهاربندی‌های پیشنهادی در ساختمان‌های مرتفع از یک قاب ۱۵ طبقه استفاده گردیده است. پای ستون مفصلی و آرایش مهاربندها به صورت ضربدری مطابق شکل ۲۵ در نظر گرفته شده است. بارگذاری قاب دو بعدی مورد نظر مطابق مبحث ششم مقررات ملی ساختمان ایران (بارهای وارد بر ساختمان) [۱۹] انجام شده است که لازم به ذکر است، مقدار بار مرده و زنده برابر ۳۰۰۰۰ نیوتن بر متر و ۹۰۰۰ نیوتن بر متر بر روی تیرهای طبقه اعمال شده و جرمی برابر ۹۷۲۸۰ در تراز هر طبقه منظور شده است. محل قرارگیری ساختمان‌ها منطقه با خطر نسبی زیاد و زمین ساختگاه نوع ۳ می‌باشد.

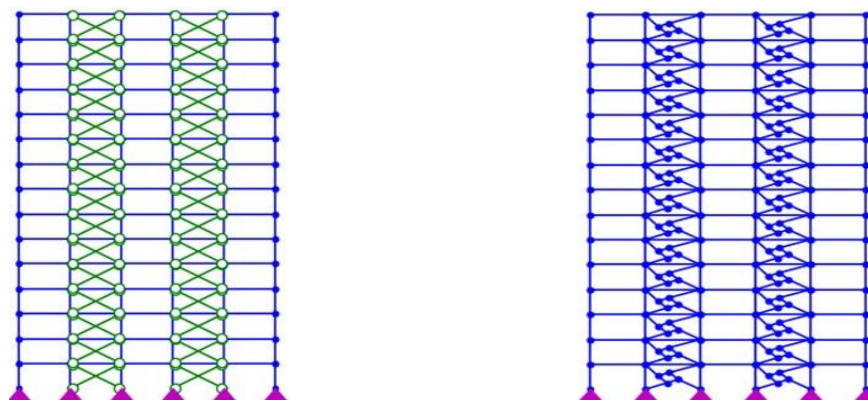
برای این منظور ابتدا قاب را در نرم‌افزار ETABS [۲۰] مدل کرده و پس از طراحی با آیین نامه ۲۸۰۰ ویرایش چهارم [۲۱] و همچنین براساس مبحث دهم آیین نامه طراحی ساختمان‌های فولادی ایران [۲۲] مقاطع اعضا محاسبه شده است. سپس بدون هیچ گونه تغییری در این قاب‌ها، فیوز خمشی چهار ضلعی در نرم‌افزار OpenSees در اتصال میانی مهاربند ضربدری تعبیه شده است بطوری که در سه مرحله این جایگزینی انجام گرفته است که در هر مرحله از بازشوهای متفاوت ۳٪، ۵٪ و ۱۰٪ درصد استفاده شده است و تحت آنالیز دینامیکی بارافزون و تاریخچه زمانی غیرخطی قرار گرفته‌اند. زمان‌های تناوب مدهای اول و دوم و سوم تمام سازه‌ها که از نرم‌افزار OpenSees بدست آمده در جدول ۵ و مشخصات مکانیکی اعضاء المان پیشنهادی برای هر کدام از مدل‌ها در جدول ۶ ارائه شده است.

جدول ۵: زمان تناوب مدهای اول و دوم و سوم بدست آمده از طراحی نرم‌افزار OpenSees (ثانیه)

مدها	OpenSees				ETABS
	مهاربند ضربدری	بازشوی ۳٪	بازشوی ۵٪	بازشوی ۱۰٪	مهاربند ضربدری
۱	۱/۵۱	۱/۵۹	۱/۶۶	۱/۹۰	۱/۷
۲	۰/۴۳	۰/۴۷	۰/۵۲	۰/۶۵	۰/۴۹
۳	۰/۲۱	۰/۲۴	۰/۲۷	۰/۳۷	۰/۲۴

جدول ۶: مشخصات مکانیکی اعضاء المان پیشنهادی

مدول الاستیسیته (kg/cm ^۲)	تنش تسلیم (kg/cm ^۲)	تنش نهایی (kg/cm ^۲)	ضریب پواسون (ν)	وزن مخصوص (kg/cm ^۳)
۲/۱×۱۰ ^۶	۲۴۰۰	۳۷۰۰	۰/۳	۷۸۵۰



شکل ۲۵: چگونگی آرایش مهاربند ضربدری دارای فیوز خمشی چهارضلعی و مهاربند ضربدری در قاب.

۴-۱- پارامترهای تحلیل و طراحی

کلیه قاب‌ها مطابق با مبحث دهم مقررات ملی ساختمان ایران طراحی شده‌اند. جهت تحلیل و طراحی قاب‌ها از نرم‌افزار ETABS، استفاده شده است. مرجع طراحی در این نرم‌افزار، آیین‌نامه فولاد آمریکا می‌باشد. ضوابط طرح لرزه‌ای آیین‌نامه فولاد ایران، با ضوابط لرزه‌ای این آیین‌نامه مطابقت بسیار زیادی دارد. مشخصات مقاطع تیرها، ستون‌ها و مهاربندها برای قاب ۱۵ طبقه، مطابق جدول ۷ در نظر گرفته شده است. با توجه به هدف تحقیق حاضر برای بررسی رفتار مهاربندی شده ضربدری دارای فیوز خمشی چهار ضلعی نصب شده در محل تقاطع مهاربندها لذا حساسیت در مورد نوع مقاطع تیرها و ستون‌ها وجود نداشته و از مقاطع موجود در کتابخانه نرم افزار OpenSees برای المانهای مختلف تیر و ستون استفاده گردید.

جدول ۷: مقاطع بدست آمده از طراحی سازه ۱۵ طبقه

مهاربند	تیر	ستون‌های میانی	ستون‌های کنار	طبقات
2UNP220	W15x35	Box 550x550x30	Box 250x250x15	۱
2UNP200	W15x35	Box 550x550x30	Box 250x250x15	۲
2UNP200	W15x35	Box 550x550x30	Box 250x250x15	۳
2UNP200	W15x35	Box 550x550x30	Box 250x250x15	۴
2UNP200	W15x35	Box 450x450x25	Box 220x220x12	۵
2UNP200	W15x35	Box 400x400x25	Box 200x200x12	۶
2UNP200	W15x35	Box 400x400x25	Box 200x200x12	۷
2UNP200	W15x35	Box 350x350x20	Box 200x200x12	۸
2UNP200	W15x35	Box 300x300x20	Box 180x180x10	۹
2UNP180	W15x35	Box 250x250x20	Box 180x180x10	۱۰
2UNP180	W15x35	Box 250x250x15	Box 180x180x10	۱۱
2UNP160	W15x35	Box 250x250x15	Box 180x180x10	۱۲
2UNP160	W15x35	Box 200x200x12	Box 180x180x10	۱۳
2UNP140	W15x35	Box 180x180x10	Box 180x180x10	۱۴
2UNP100	W15x35	Box 180x180x10	Box 180x180x10	۱۵

۴-۲- انتخاب شتاب نگاشت‌ها

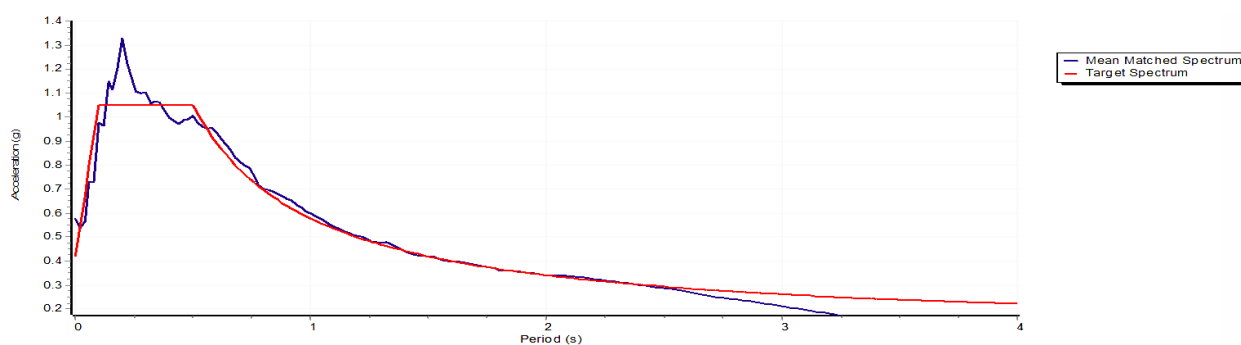
به منظور انجام تحلیل دینامیکی غیرخطی تاریخچه‌زمانی، نیاز به انتخاب رکوردهای زلزله است. بدین منظور ۵ زلزله رکورد حوزه نزدیک و ۵ رکورد حوزه دور از گسل انتخاب شده است [۲۳]. انتخاب رکوردهای حوزه نزدیک گسل به خاطر ویژگی متفاوت این رکوردها نسبت به رکوردهای دور از گسل بوده است. مشخصات رکوردها شامل بیشینه شتاب زمین، بیشینه سرعت زمین، بیشینه جابه‌جایی زمین، بزرگا و کوتاهترین فاصله ایستگاه ثبت رکورد از گسل مسبب (d) در جداول ۸ و ۹ داده شده است. هم‌پایه کردن شتاب نگاشت‌ها با استفاده از نرم‌افزار SeismoMatch [۲۴] و بر اساس طیف ارائه شده در ویرایش چهارم استاندارد ۲۸۰۰ انجام شده است. نمودارهای هم‌پایه شتاب‌نگاشت‌های تحت زلزله نزدیک و دور از گسل در اشکال ۲۶ و ۲۷ ارائه شده است.

جدول ۸: مشخصات رکوردهای دور از گسل [۲۳].

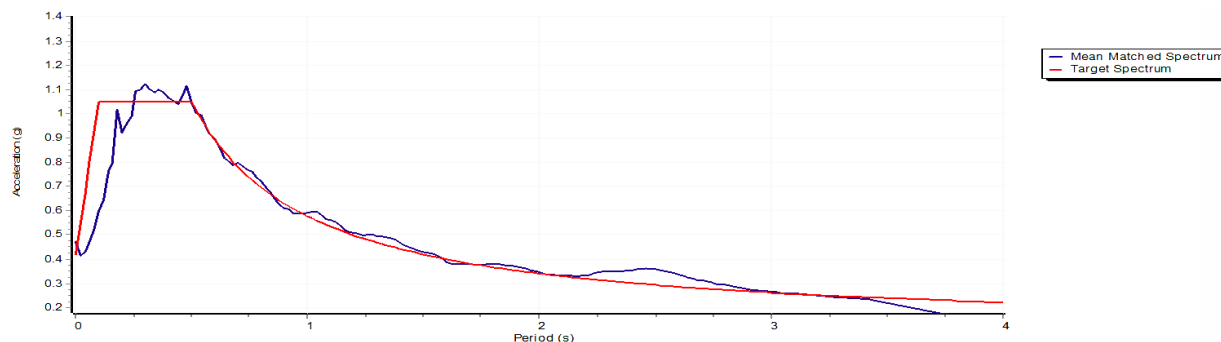
No.	Earthquake	ایستگاه	Mw	d (km)	PGA (g)	PGV (cm/s)	PGD (cm)	Duration(sec)	ضریب مقیاس
۱	Imperial	Calexico Fire	۶/۵۳	۲۴/۶	۰/۲۷۷	۱۵/۶	۱۳/۲۴	۳۷/۸۴	۳/۳۳
۲	Kern	Taft Lincoln School	۷/۳۶	۳۸/۳۹	۰/۱۴	۱۵/۲۲	۶/۱	۵۴/۳۵	۳/۲
۳	Loma	Cliff House	۶/۹۳	۷۸/۶۸	۰/۰۷۶	۱۱/۴۱	۳/۶۷	۴۰	۵/۲
۴	Manjil	Abbar	۷/۳۷	۷۵/۵۸	۰/۵۱۵	۲۰/۷	۸/۴۱	۵۳/۵	۲/۸
۵	Tabas	Dayhook	۷/۳۵	۲۸/۷۹	۰/۳۲۳	۱۳/۲۹	۷/۶۳	۲۰/۹۸	۴/۳

جدول ۹: مشخصات رکوردهای نزدیک گسل [۲۳].

No.	Earthquake	ایستگاه	Mw	d (km)	PGA (g)	PGV (cm/s)	PGD (cm)	Duration(sec)	ضریب مقیاس
۱	Bam	Bam	۶/۶	۱/۷	۰/۸۰۸	۱۲۴/۰۶	۳۳/۹	۴۹/۶	۰/۶۹
۲	Erzican	Erzincan	۶/۶۹	۴/۳۸	۰/۴۹۶	۷۸/۱۱	۲۸/۰۲	۲۰/۷۸	۰/۷۳
۳	Loma	LGPC	۶/۹۳	۹/۶۴	۰/۵۷	۳۳/۶۲	۸/۰۲	۲۵	۱/۱
۴	Northridge	Rinaldi Receiving Sta	۶/۶۹	۶/۵	۰/۸۷۴	۱۴۷/۹	۴۱/۸	۱۹/۹	۰/۵۱
۵	Tabas	Tabas	۷/۳۵	۲/۰۵	۰/۸۵۴	۹۸/۷۹	۳۱/۵	۳۲/۹۸	۰/۷۵



شکل ۲۶: نمودارهای هم‌پایه شتاب‌نگاشت‌های تحت زلزله نزدیک به گسل.



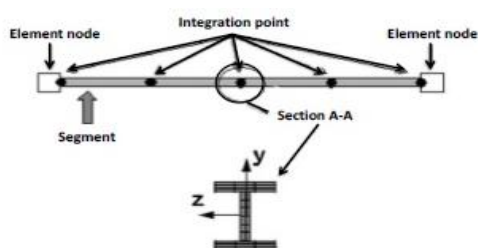
شکل ۲۷: نمودارهای هم پایه شتاب‌نگاشت‌های تحت زلزله دور از گسل.

۳-۴ روش مدل‌سازی در نرم‌افزار OpenSees

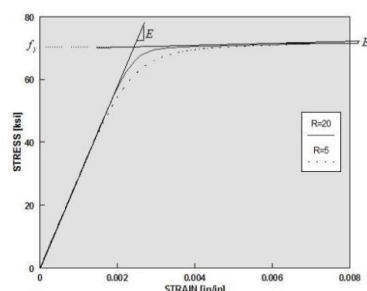
در این پژوهش قاب مهاربندی ضربدری با المان پیشنهادی و بدون آن، تحت تحلیل بارافزون و تحلیل تاریخچه‌زمانی قرار گرفته و به صورت دوبعدی در برنامه OpenSees [۲۵] مدل‌سازی شده است. برای در نظر گرفتن اثر دقیق رفتار غیرخطی فولاد از دستور ساخت مصالح فولادی^{۱۳} با سخت‌شوندگی کرنشی ایزوتروپیک استفاده شده است. این نوع فولاد در نرم‌افزار OpenSees تحت عنوان Steel02 شناخته می‌شود. نمودار تنش - کرنش چرخه‌ای برای اینگونه مصالح در شکل ۲۸ آمده است. نسبت شیب ناحیه پلاستیک به ناحیه الاستیک برابر ۰/۰۵ در نظر گرفته شده است. مدل‌های المان پیشنهادی هم برای مهاربند و هم تیر و ستون از المان‌های غیرخطی^{۱۴} با مقاطع غیرخطی^{۱۵} استفاده شده است. همچنین این المان برای ساختن اعضای بر مبنای جابجایی که دارای پلاستیسیته گسترده (روش فایبر) هستند مطابق شکل ۲۹ استفاده می‌شود. مشخصات مصالح مصرفی برای تحلیل تاریخچه‌زمانی و بارافزون در جدول ۱۰ قابل مشاهده می‌باشد.

جدول ۱۰: مشخصات مصالح مصرفی برای تحلیل تاریخچه‌زمانی و بارافزون.

ردیف	عنوان	توضیحات
۱	مقاومت نظیر حد تسلیم فولاد	$F_y = 2400 \text{ kg/cm}^2$
۲	مدول الاستیسیته فولاد	$E_s = 2.0 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$



شکل ۲۹: المان و مقطع تیر و ستون غیرخطی.



شکل ۲۸: نمودار تنش کرنش فولاد با عنوان Steel02.

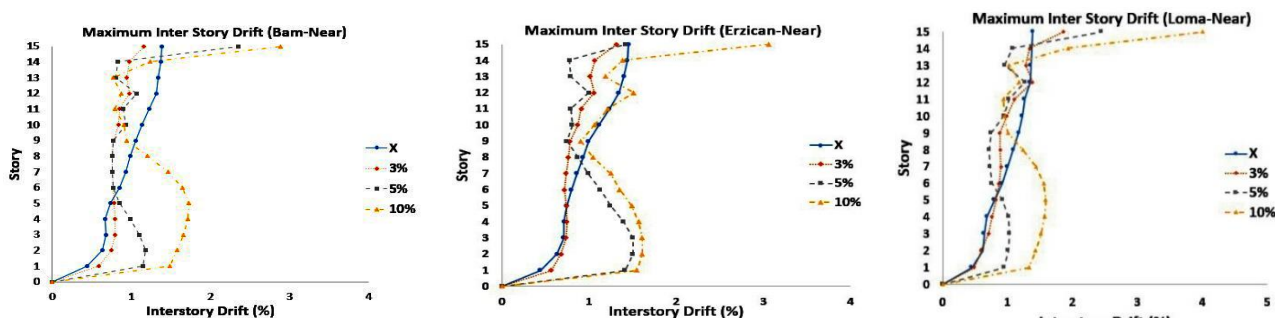
13 Giuffre-Menegotto-Pinto
14 Nonlinear Beam-Column Element
15 Inelastic Fiber Section

۴-۵- نتایج حاصل از تحلیل غیرخطی دینامیکی به صورت تایخچه زمانی قاب مهاربندی همگرا

با توجه به روند اشاره شده، در این قسمت منحنی‌های حداکثر جابجایی نسبی طبقات حاصل از تحلیل تاریخی زمانی برای قاب‌ها تحت ۱۰ شتابنگاشت ارائه می‌شوند.

۴-۵-۱- حداکثر جابجایی نسبی طبقات

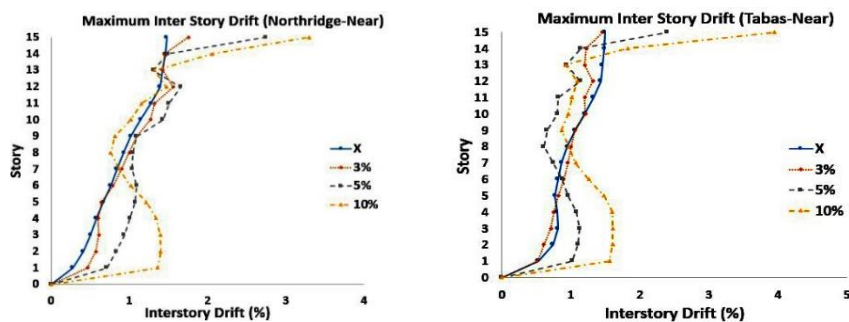
شکل‌های ۳۰ و ۳۱ حداکثر جابجایی نسبی طبقات در قاب‌های مهاربندی همگرای معمولی و دارای فیوز خمشی چهارضلعی تحت زلزله ۵ رکورد حوزه نزدیک و ۵ رکورد حوزه دور از گسل نشان می‌دهد. تغییر مکان نسبی طبقات از موارد مهم و حساس در ارزیابی سطح عملکرد سازه‌ها می‌باشد زیرا میزان آسیب‌های وارده به اجزای سازه‌ای و غیرسازه‌ای در هر طبقه ارتباط مستقیمی با میزان تغییر مکان جانبی نسبی آن طبقه دارد. لذا این پارامتر را می‌توان به عنوان شاخص خرابی در نظر گرفت. نتایج به نمایش گذاشته شده حاکی از کاهش جابجایی نسبی در بیشتر طبقات بوده که میزان خسارت وارده به سازه را می‌تواند کاهش دهد این میزان کاهش در اغلب موارد از طبقه ۶ شروع می‌شود.



ج : تحت زلزله Bam-Near.

ب : تحت زلزله Erzican-Near.

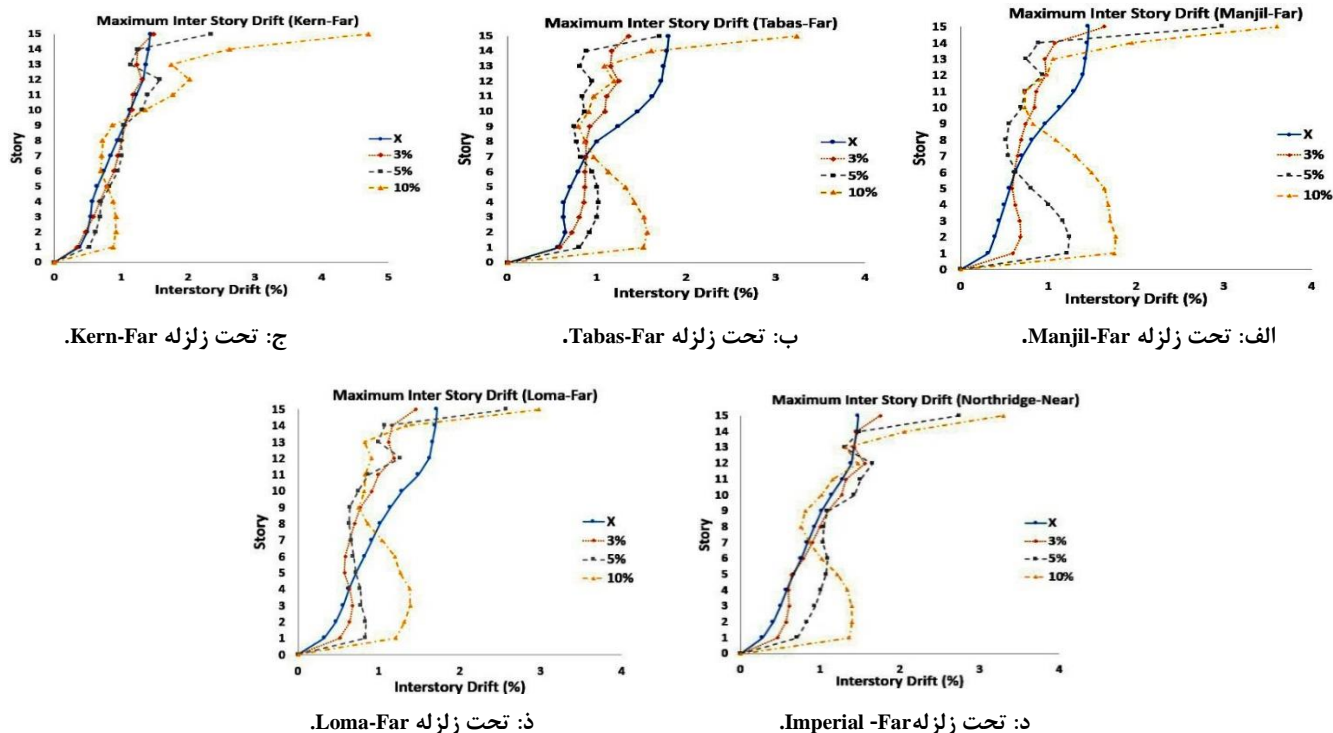
الف : تحت زلزله Loma-Near.



ذ : تحت زلزله Northridge-Near.

د : تحت زلزله Tabas-Near.

شکل ۳۰ : حداکثر جابجایی نسبی طبقات قاب‌های مهاربندی تحت زلزله نزدیک به گسل.



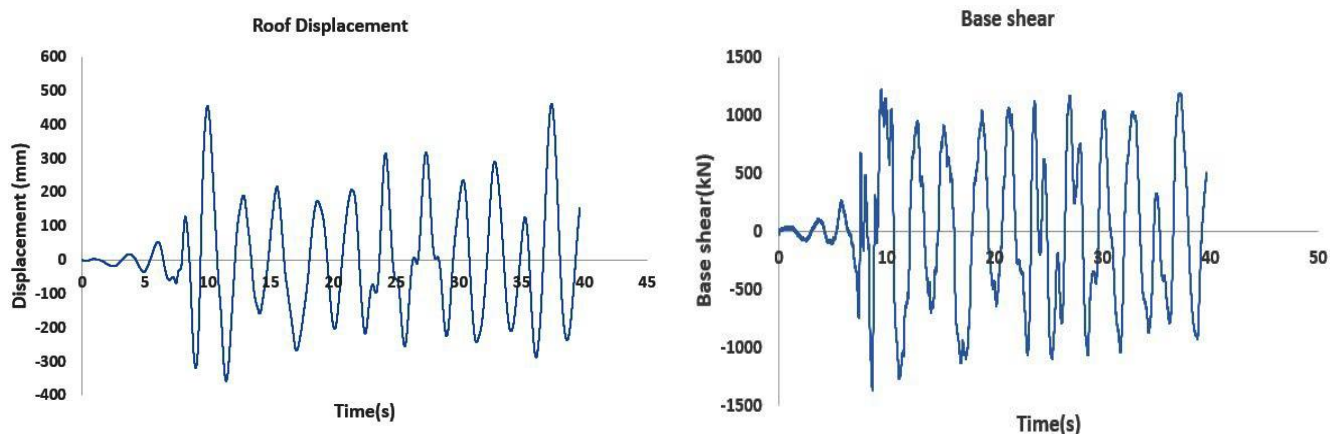
شکل ۳۱: حداکثر جابجایی نسبی طبقات قاب‌های مهاربندی تحت زلزله دور از گسل.

۴-۵-۲- حداکثر میزان برش پایه و تغییرمکان بام

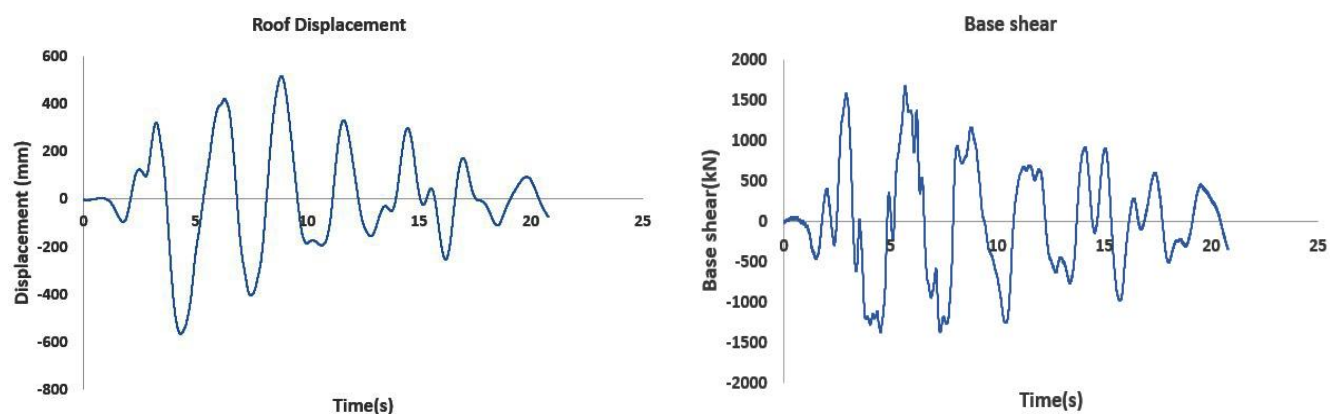
جدول ۱۱ حداکثر میزان برش پایه و تغییرمکان بام را در قاب‌های مهاربندی همگرا معمولی و دارای فیوز خمشی چهارضلعی تحت زلزله، ۵ زلزله رکورد حوزه نزدیک و ۵ رکورد حوزه دور از گسل نشان می‌دهد. همانطور که از نتایج پیداست وجود فیوز خمشی چهارضلعی در مهاربند همگرا منجر به کاهش برش پایه در حدود ۲۶/۶۰ درصد نسبت به حالت قاب با مهاربند همگرای معمولی می‌شود. مقدار کم برش پایه به دست آمده برای قاب با مهاربند دارای فیوز خمشی چهارضلعی، سبب کاهش در هزینه ساخت و تقویت فونداسیون سازه در مقایسه با قاب مهاربند همگرای معمولی می‌شود. همچنین میزان کاهش حداکثر تغییرمکان بام در حالت وجود المان پیشنهادی در حدود ۷/۱۶ درصد حالت مهاربند همگرای معمولی می‌باشد. اشکال ۳۲ و ۳۳ نمودار تاریخچه‌زمانی حداکثر تغییرمکان بام و برش پایه قاب مهاربندی با المان پیشنهادی بازشوی ۱۰٪ تحت زلزله نزدیک گسل Erzican و تحت زلزله دور از گسل Imperial را نشان می‌دهند.

جدول ۱۱: مقایسه میزان حداکثر برش پایه و تغییر مکان بام در قاب با مهاربندی همگرا دارای المان پیشنهادی و بدون آن.

بدون المان پیشنهادی		با المان پیشنهادی							
		مهاربند ضریبی		۵٪ دهانه		۵٪ دهانه		۱۰٪ دهانه	
رکورد زلزله	برش پایه (kN)	حداکثر تغییر مکان بام (mm)		حداکثر تغییر برش پایه (kN)		حداکثر تغییر مکان بام (mm)		حداکثر تغییر برش پایه (kN)	
		رکوردهای نزدیک گسل	Bam	۶۰۳۰/۹۵۹	۳۷۸/۸۴۵	۴۴۱۳/۴۹۱	۳۲۱/۳۰۵	۲۵۵۲/۶۶۳	۳۸۶/۶۷۴
Erzican	۶۱۴۶/۹۰۱		۴۲۸/۳۳۵	۴۳۹۱/۶۱۸	۳۰۹/۱۸۸	۲۴۰۹/۰۴۶	۴۱۷/۳۸۷	۱۶۷۴/۶۰۱	۵۱۴/۹۰۱
Loma	۵۹۷۳/۰۷۳		۴۵۰/۱۶۳	۳۹۳۱/۰۱	۴۰۲/۹۱۱	۲۲۹۰/۹۷۳	۳۱۶/۸۲۵	۱۳۹۱/۸۲	۵۶۲/۸۹۴
Northridge	۴۳۴۷/۵۹۹		۴۱۳/۶۵	۴۱۲۶/۰۲۱	۴۶۷/۷۹۴	۲۱۲۳/۵۲۹	۵۸۲/۷۹۵	۱۳۲۲/۳۱۷	۴۲۵/۶۶۳
Tabas	۶۱۰۴/۰۶		۴۲۰/۷۱۱	۳۸۰۷/۵۱۳	۴۵۰/۷۷۷	۲۲۷۴/۸۸۳	۳۵۹/۰۶۸	۱۵۶۴/۶۵	۴۷۳/۶۴۱
رکوردهای دور از گسل	Imperial	۶۵۸۳/۹۸۲	۴۰۶/۷۸۵۰	۴۶۲۸/۴۶۱	۳۹۴/۵۰۳	۲۱۸۶/۱۰۱	۴۶۵/۰۹۱	۱۲۲۲/۸۹۷	۴۶۰/۶۷۷
	Kern	۵۸۶۵/۰۵۴	۴۲۶/۵۷	۳۳۴۰/۲۶	۴۴۹/۲۷۹	۲۰۳۶/۱۶۳	۴۹۸/۱۵۸	۱۲۱۹/۸۸۹	۵۳۰/۳۱۳
	Loma	۵۵۲۰/۰۰۹	۳۶۴/۶۷۱	۴۲۶۶/۴۳۱	۳۵۳/۸۳۹	۲۰۷۹/۵۳۸	۳۴۴/۲۴۶	۱۴۳۸/۰۳۱	۳۸۸/۹۷۷
	Manjil	۵۰۰۷/۴۴۶	۲۹۷/۴۳۸	۴۶۶۴/۸۵۶	۳۳۵/۵۶۹	۲۳۹۱/۵۱۸	۳۰۸/۵۸۴	۱۵۷۴/۸۰۶	۶۲۷/۸۶۷
	Tabas	۵۶۴۵/۱۶۷	۴۴۳/۱۱۹	۳۸۷۱/۶۴۲	۳۹۹/۵۴۹	۲۱۹۱/۲۸۲	۳۸۴/۲۹۷	۱۴۵۶/۹۵۲	۴۴۶/۷۰۷



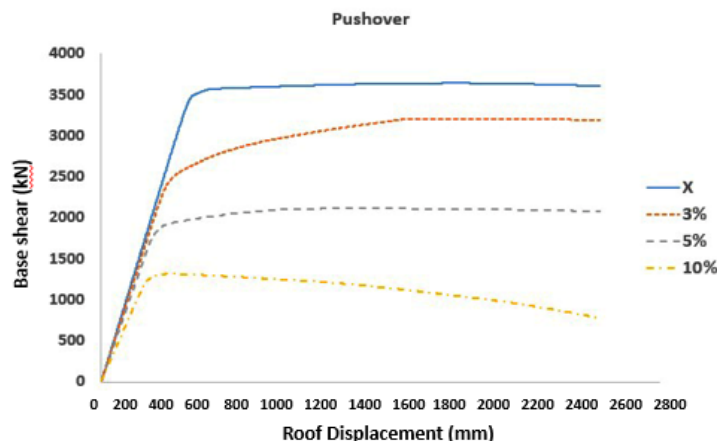
شکل ۳۲: نمودار تاریخچه زمانی حداکثر تغییر مکان بام و برش پایه قاب مهاربندی با المان پیشنهادی بازشوی ۱۰٪ تحت زلزله دور از گسل Imperial.



شکل ۳۳: نمودار تاریخچه زمانی حداکثر تغییر مکان بام و برش پایه قاب مهاربندی با المان پیشنهادی بازشوی ۱۰٪ تحت زلزله نزدیک گسل Erzican.

۴-۵-۳- مقایسه نتایج تحلیل بارافزون قاب‌های ۱۵ طبقه

در اثر تحلیل بارافزون با الگوی مثلثی تا جابه‌جایی ۲ درصد ارتفاع بام در سازه‌های ۱۵ طبقه طبق آیین‌نامه ۲۸۰۰ ویرایش چهارم [۱۸] مهاربند ضربه‌ری و مهاربندی ضربه‌ری دارای مجهز به فیوز خمشی چهارضلعی با بازشوهای ۳٪، ۵٪ و ۱۰٪ نمودار برش پایه-جابه‌جایی مطابق شکل ۳۴ بدست آمد. مهاربند ضربه‌ری بیشترین برش در جابه‌جایی را دارد و مهاربندی ضربه‌ری دارای مجهز به فیوز خمشی چهارضلعی با بازشوی ۱۰٪ کمترین این مقدار را به خود اختصاص داده است. و مهاربند ضربه‌ری ظرفیت بیشتری نسبت به سایر مدل‌ها دارد.



شکل ۳۴: منحنی بارافزون برش پایه- تغییر مکان بدست آمده از مدل‌ها.

۵- نتیجه گیری

بررسی و مطالعات انجام شده بر روی مهاربندهای همگرا از نوع اتصال میانی نشان داد، که استفاده از عضو شکل پذیر به منظور افزایش شکل پذیری در مهاربندها، ایده مناسبی است چراکه المان پیشنهادی در نقش یک فیوز عمل کرده و در نتیجه منجر به کاهش برش پایه در این نوع سیستم باربری جانبی خواهد شد.

۱- نتایج بدست آمده بیانگر آنست که با افزایش ابعاد بازشوی بکار رفته میزان نیروی حداکثر و سختی سازه کاهش می یابد. نسبت مقدار سختی برای بازشوی ۳٪ نسبت به مهاربندی ضربدری برابر ۴۴ درصد، برای بازشوی ۵٪ نسبت به مهاربندی ضربدری برابر ۴۴ درصد و برای بازشوی ۱۰٪ نسبت به مهاربندی ضربدری برابر ۲۰ درصد است.

۲- با توجه به منحنی‌های هیستریزیس متقارن بدست آمده برای مهاربند ضربدری دارای فیوز خمشی چهارضلعی مشخص است که این مهاربند تحت بارهای جانبی از عملکرد مطلوب و جذب انرژی بالایی برخوردار است.

۳- نتایج تحلیل‌های دینامیکی تاریخچه زمانی بیانگر آنست که برای زلزله‌های حوزه نزدیک میانگین نسبت برش پایه برای بازشوه‌های ۳٪، ۵٪ و ۱۰٪ نسبت به مهاربندی ضربدری به ترتیب برابر ۷۲٪، ۴۰٪ و ۲۶٪ است.

۴- نتایج تحلیل‌های دینامیکی تاریخچه زمانی بیانگر آنست که برای زلزله‌های حوزه دور میانگین نسبت برش پایه برای بازشوه‌های ۳٪، ۵٪ و ۱۰٪ نسبت به مهاربندی ضربدری به ترتیب برابر ۷۲٪، ۳۸٪ و ۲۴٪ است.

۵- به عنوان پیشنهاد پیشبرد مطالعه حاضر می توان به مطالعه آزمایشگاهی قاب‌های مهاربند ضربدری مجهز به فیوز خمشی چهارضلعی و بررسی رفتار قاب دارای مهاربند فیوز خمشی چهارضلعی متشکل از مصالح دیگر (از جنس فولاد با تنش تسلیم پایین) اشاره نمود.

مراجع

- [1] Davaran, A. and Fayeghi, A. A. (2005). Study of stability of x-bracing systems considering mid-span considering detailing. *Journal of Faculty of Engineering (University of Tabriz)*, pp. 43-36.
- [2] Samaee, S. S. Naghipour, M. and Bozorgnasab, M. (2015). Study of the effect of energy absorptionbing element in seismic performance of steel frames with symmetric y- shape concentric bracings, *The Modares Journal of Civil Engineering*, 15(4), pp. 41-53.

- [3] Naghipour, M. Salimbahrami, S. R. and Nemati, M. (2015). The Role of Ductile Behavior of Connection Elements on Seismic performance of CBF. *The Modares Journal of Civil Engineering*, 15(1), pp. 131-143.
- [4] Pachideh, G. Gholhaki, M. and Kafi, M. (2020). Experimental and numerical evaluation of an innovative diamond-scheme bracing system equipped with a yielding damper. *Steel and Composite Structures*, 36(2), 197-211.
- [5] Pachideh, G. Kafi, M. and Gholhaki, M. (2020). Evaluation of cyclic performance of a novel bracing system equipped with a circular energy dissipater. *Structures*, 28, pp. 467-481.
- [6] Kheyroddin, A. Gholhaki, M. and Pachideh, G. (2019). Seismic evaluation of reinforced concrete moment frames retrofitted with steel braces using IDA and pushover methods in the near-fault field. *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*, 7(1), 159-173.
- [7] Kachooee, A. (2021). Investigation of the Concentric Bracings Response Equipped with Lateral Restricted Local Fuse under Cyclic Loading. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 8(4), 185-213.
- [8] Mohammadi, M. Kafi, M. A. Kheyroddin, A. and Ronagh, H. R. (2021). Experimental evaluation of an innovative buckling-restrained fuse for concentrically braced frames under cyclic loading. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 8(4), 124-140.
- [9] Boostani, M. Rezaifar, O. and Gholhaki, M. (2022). Experimental investigation of a new lateral bracing system called OGrid under cyclic loading. *Structures*, 35, 172-191.
- [10] Gusella, F. Mei, A. and Orlando, M. (2023). An innovative ductile bracing system easily repairable after a seismic event. *Procedia Structural Integrity*, 44, 790-797.
- [11] Nobahar, E. Farahi, M. and Mofid, M. (2016). Quantification of seismic performance factors of the buildings consisting of disposable knee bracing frames. *Journal of constructional steel research*, 124, pp. 132-141.
- [12] Hosseini, M. Mirzaaghaee, Y. and Ebadi Tabrizi, B. (2012). *A Two-Ring Energy Dissipating Device with Similar Behaviors in Tension and Compression to Create Buckling Resistant Braces*. 15 WCEE.
- [13] Giannuzzi, D. Ballarini, R. Huckelbridge, A. Michael, P. and Valente, M. (2013). Braced Ductile Shear Panel: New Seismic-Resistant Framing System. ASCE, *Journal of Structural Engineering*, 140(2), 04013050.
- [14] Andalib, Z. Ali Kafi, M. Kheyroddin, A. and Bazzaz, M. (2014). Experimental investigation of the ductility and performance of steel rings constructed from plates. *Journal of Constructional Steel Research*, 103, pp. 77-88.
- [15] ABAQUS user manual v6.10.
- [16] Palmer, D. K. Roeder, C. W. Lehman, D. E. Okazaki, T. Shield, C. K. and Powell, J. (2012). Concentrate X-braced frames with HSS bracing. *International Journal of Steel Structure*, 12 (3), pp. 443-459.
- [17] Applied Technology Council. ATC-24. (1992). *Guidelines for cyclic testing of components of Steel Structure*.
- [18] Estados Unidos. Federal Emergency Management Agency. FEMA. (2000). *Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings*. Fema 356.
- [19] Iranian National Building. Code (part 6). (2013). *Design load for buildings*. Tehran (In Persian): Ministry of Road, Housing and Urban Development.
- [20] Computers and Structures Inc. ETABS Version 18. Berkeley, California.
- [21] Standard No. 2800. (2014). *Iranian cod of practice for seismic resistance design of buildings*. Tehran (In Persian): 4th Edn., Ministry of Road, Housing and Urban Development.
- [22] Iranian National Building. Code (part 10)., (2013). *Steel structure design*. Tehran (In Persian): Ministry of Road, Housing and Urban Development.

- [23] Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER), (2000). Strong Motion Database, University of California, Berkeley.
- [24] SeismoMatch (2016) Reference manual. Pavia, Italy: Seissoft.
- [25] Mazzoni, s. Mckenna, f. scott, M. H. and Fenves, G. L. (2006). *The Open System for Earthquake Engineering Simulation (OPENSEES) User Command Language Manual*. PEER, Univ. Calif, Berkeley, CA, (<http://opensees.berkeley.edu>).verson.2.4.1.