

# Analysis and capacity-limited design of crescent-shaped concentrically braced frames (CSCBFs) and evaluation of seismic performance factors and energy demand

E. Alizadeh<sup>1</sup>, A. Asghari<sup>2\*</sup> 

1. M.Sc., School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.
2. Associate Prof., School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

## Abstract

Crescent-shaped concentrically braced frames (CSCBFs) represent an innovative seismic-resistant system that blends the strengths of Special Concentrically Braced Frames (SCBFs) and Special Moment Frames (SMFs). SCBFs are valued for their high lateral stiffness, which limits seismic displacements, simplifies drift control, allows for smaller structural sections, and reduces costs. They are also easier to repair since braces can be replaced more readily than beams or connections. However, SCBFs restrict architectural flexibility due to diagonal braces that obstruct openings and suffer from poor post-buckling behavior, resulting in asymmetric hysteresis and reduced energy dissipation. SMFs, by contrast, eliminate diagonal braces, providing open layouts and superior architectural freedom. Their ductile seismic response arises from flexural yielding in beams, but this performance relies heavily on complex, precisely detailed beam-to-column moment connections. Thus, while SCBFs offer stiffness and simplicity, SMFs provide ductility and openness, qualities CSCBFs aim to integrate.

CSCBFs achieve this integration by employing crescent-shaped braces that resemble circular arcs. Unlike conventional concentrically braced frames (CBFs) with straight members subjected mainly to axial forces, the curved geometry in CSCBFs introduces strong axial-flexural interaction. This mitigates brace buckling and hysteresis asymmetry, improving ductility and energy dissipation. The system combines stiffness, ductility, and architectural flexibility in a single design philosophy.

To evaluate their seismic behavior, multi-story CSCBF archetypes with varying bay numbers, heights, and brace eccentricities are developed. Since no design codes currently address CSCBFs, these models follow SCBF provisions. A capacity-limited design methodology is applied so that braces act as energy-dissipating fuses, protecting beams and columns from inelastic damage, mirroring the SCBF philosophy of controlled damage and repairability. Nonlinear analysis methods are employed to assess performance. Fiber-based static pushover analyses provide key parameters such as ductility and overstrength factors, offering insight into deformation and strength capacity. In addition, nonlinear time history analyses with 11 pairs of far-field ground motions from FEMA P695 measure dynamic responses, including peak and residual drift ratios. These results are compared to seismic code limits to check compliance and safety. Findings indicate that current assumptions for the response modification factor ( $R$ ) of CSCBFs may be too optimistic, highlighting the need for more conservative design provisions and further studies.

Energy-based evaluations further clarify system behavior. Analyses of hysteretic energy, damping energy, and kinetic energy show how seismic input energy is distributed. Results confirm that the capacity-limited strategy works effectively: beams and columns remain elastic, while braces absorb most seismic energy as sacrificial elements. This ensures both safety and repairability after strong earthquakes.

Overall, CSCBFs offer a promising structural system that combines the stiffness and simplicity of SCBFs with the ductility and openness of SMFs. By using curved braces to improve buckling resistance and energy dissipation, CSCBFs achieve a balanced performance that addresses both engineering and architectural demands. These findings support CSCBFs as a practical high-performing solution for seismic design, though refinement of design guidelines remains necessary.

## Review History

Received: May 20, 2025

Revised: Sep 06, 2025

Accepted: Dec 10, 2025

## Keywords

Concentrically braced frames  
capacity-limited design  
pushover analysis  
nonlinear time-history analysis  
energy demand parameters

\* Corresponding Author Email: [abazar.asghari@ut.ac.ir](mailto:abazar.asghari@ut.ac.ir) - ORCID: 0009-0005-3224-1815



## تحلیل و طراحی ظرفیتی قاب‌های مهاربندی شده همگرای هلالی شکل و ارزیابی پارامترهای عملکرد لرزه‌ای و تقاضای انرژی

احسان علیزاده<sup>۱</sup>، ابازر اصغری<sup>۲\*</sup> 

۱. کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۲. دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

### چکیده

### تاریخچه داوری

دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۳۰

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۶/۱۵

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۱۹

### کلمات کلیدی

قاب‌های مهاربندی شده همگرا

طراحی ظرفیتی

تحلیل بارافزون

تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی

پارامترهای تقاضای انرژی

قاب‌های مهاربندی شده همگرای هلالی شکل دسته‌بندی جدیدی از سیستم‌های مقاوم لرزه‌ای هستند که المان‌های مهاربندی آن‌ها مستقیم نبوده و دارای انحناهایی از قطعی از دایره هستند. برخلاف المان‌های متعارف که فقط تحت نیروی محوری فشاری یا کششی هستند، انحنای این پیکربندی و خروج از مرکزیت آن‌ها که در وسط طول مهاربندها است، باعث به وجود آمدن اندرکنش لنگر خمشی و نیروی محوری شده و رفتار لرزه‌ای و استهلاك انرژی متفاوتی با آن‌ها خواهند داشت. این ویژگی باعث تغییر شرایط پس از کمانش می‌شود که مهم‌ترین حالت خرابی در سازه‌های مهاربندی است. برای ارزیابی عملکرد لرزه‌ای این سیستم، سازه‌های نمونه که متشکل از تعداد دهانه‌های مهاربندی متناسب با تعداد طبقات و خروج از مرکزیت‌های مختلف است، بر اساس لزوم لرزه‌ای قاب‌های مهاربندی همگرای ویژه طراحی اولیه شده و سپس روشی برای طراحی ظرفیتی آن‌ها ارائه می‌شود تا کماکان نقش مهاربندها به عنوان فیوز سازه‌ای حفظ شود. پس از آن، با استفاده از رویکردهای مدل‌سازی غیرخطی، تحلیل بارافزون و تاریخچه زمانی روی آن‌ها اعمال می‌شود. ضرایب اضافه مقاومت و شکل‌پذیری از منحنی ظرفیت حاصل از تحلیل بارافزون و مقادیر دررفت‌های موقت نسبی طبقات و دررفت‌های پسماند نسبی طبقات از تحلیل تاریخچه زمانی به دست آمده و با مقادیر مجاز آیین‌نامه مقایسه می‌شوند. نتایج این تحلیل نشان‌دهنده این است که ضریب رفتار در نظر گرفته شده مناسب نبوده و تمهیداتی برای افزایش تناسب ابعادی نیاز خواهد بود. در نهایت پارامترهای تقاضای انرژی شامل انرژی‌های هیسترتیک، میرایی و جنبشی در مقیاس کلی و عضوی بررسی می‌شود تا عملکرد اعضای مهاربندی در اتلاف انرژی ارزیابی شود.

### ۱- مقدمه و مرور ادبیات

کمانش رفتار نامناسبی از خود نشان می‌دهند؛ زیرا کمانش در مهاربندهای فشاری موجب افزایش نیروی نامتعادل کننده در تیرها و کاهش مقاومت و سختی سازه می‌شود که احتمال وقوع پدیده طبقه نرم را افزایش می‌دهد. این پدیده در نهایت می‌تواند توانایی استهلاك انرژی توسط این فیوزهای سازه‌ای را کاهش داده و به

مهاربندهای همگرا با وجود سختی جانبی بالا و تجربه جابه‌جایی‌های کمتر در برابر بارهای لرزه‌ای، از نظر معماری چندان مطلوب نیستند و ایجاد بازشوهای مناسب در دهانه‌هایی که این سیستم به کار رفته، دشوار است. علاوه بر این، این مهاربندها پس از

\* رایانامه نویسنده مسئول: ORCID - abazar.asghari@ut.ac.ir :0009-0005-3224-1815

کپی‌رایت © ۲۰۲۶، انتشارات دانشگاه تربیت مدرس (TMU Press). این مقاله به صورت دسترسی آزاد منتشر شده و تحت مجوز بین‌المللی Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 قرار دارد (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>). بر اساس این مجوز، شما می‌توانید این مطلب را در هر قالب و رسانه‌ای کپی، بازنشر و بازآفرینی کنید و یا آن را ویرایش و بازسازی نمایید، به شرط آنکه نام نویسنده را ذکر کرده و از آن برای مقاصد غیرتجاری استفاده کنید.



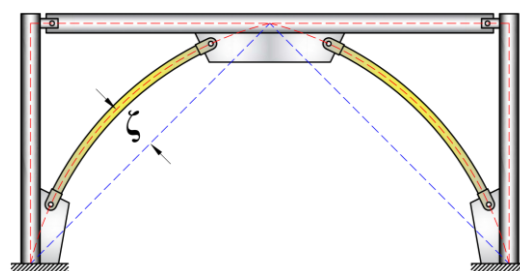
یکی از چالش‌های مهم در استفاده از مهاربندهای هلالی شکل، پیچیدگی ساخت و هزینه‌های مرتبط با خم‌کاری و جوشکاری پروفیل‌های فولادی با انحنا زیاد است. خم‌کاری دقیق این پروفیل‌ها نیازمند تجهیزات تخصصی و کنترل کیفیت بالا برای حفظ شعاع انحنا و جلوگیری از تمرکز تنش در نقاط بحرانی است. همچنین، جوشکاری در محل‌های انحنا دار به دلیل تغییر زاویه اتصال و احتمال اعوجاج حرارتی، نیازمند مهارت بالای جوشکار و استفاده از روش‌های جوشکاری پیشرفته مانند جوش نفوذی یا جوش چندپاس می‌باشد. این عوامل می‌توانند منجر به افزایش هزینه‌های ساخت، زمان اجرا و نیاز به نظارت دقیق‌تر در کارگاه شوند. بنابراین، در صورت استفاده گسترده از این سیستم، لازم است تحلیل هزینه-فایده اقتصادی در کنار تحلیل‌های لرزه‌ای انجام شود تا توجیه‌پذیری آن در پروژه‌های واقعی مورد ارزیابی قرار گیرد.

تحقیقات اولیه در زمینه مهاربندهای برون‌مرکز توسط استکانچی و همکارانش انجام شد که در آن المان قطری دوخطی با یک المان ثانویه به محل اتصال تیر و ستون متصل می‌شد [1]. ارزیابی‌های آن‌ها نشان داد که نمودار نیرو-تغییر مکان این سیستم دارای دو نقطه تسلیم است؛ به طوری که طراحی بهینه می‌تواند منجر به کاهش برش پایه و شتاب طبقات شود. از سوی دیگر، حذف مشکل کمانش مهاربندهای فشاری در چارچوب طرح لرزه‌ای بر مبنای عملکرد و کاهش ریسک ایجاد طبقه نرم و ناپایداری کلی سازه، ناشی از سخت‌شدگی در جابه‌جایی‌های بزرگ و غیرخطی بودن هندسی، به همراه رفتار متقارن چرخه‌ای، از نتایج تحقیقاتی بود که ترومبتی<sup>۱</sup> و همکارانش در مورد مهاربندهای برون‌مرکز دوخطی به آن دست یافتند [2, 3]. طراحی مهاربندهای دوخطی بر اساس منحنی هدف به منظور مقاصد طراحی عملکردی و محاسبه سختی الاستیک اولیه آن‌ها، به همراه ارزیابی عددی از طریق تحلیل‌های غیرخطی، از دیگر دستاوردهای تحقیقاتی در این حوزه محسوب می‌شود. این سیستم همچنین دارای ظرفیت شکل‌پذیری قابل توجه، سخت‌شدگی نهایی و جلوگیری از آسیب‌های ناشی از آثار مرتبه دوم به همراه غیروابسته

فروریزش سازه منجر شود. به بیان دیگر، رفتار مهاربندها در حالت فشار و کشش یکسان نیست و این موضوع باعث نامنظمی و نامتقارنی منحنی چرخه‌ای این سیستم می‌شود. از سوی دیگر، قاب‌های خمشی مشکلات معماری کمتری دارند، اما شکل‌پذیری بالای آن‌ها که به کیفیت طراحی و اجرای اتصالات گیردار وابسته است، می‌تواند منجر به جابه‌جایی‌های جانبی غیرمنطقی شود.

مهاربندهای برون‌مرکز هلالی شکل نوع جدیدی از سیستم‌های باربر جانبی هستند که می‌توانند به طور هم‌زمان مزایای قاب‌های مهاربندی و خمشی را داشته باشند. همان‌طور که در شکل (۱) مشاهده می‌شود، المان‌های مهاربندی در این سیستم برخلاف مهاربندهای متعارف، مستقیم نبوده و دارای خروج از مرکزیت هستند و می‌توانند بر اساس نیاز تنظیم شوند. ایده اصلی این سیستم فراهم کردن یک سازوکار تسلیم اندرکنشی لنگر خمشی-نیروی محوری و تنظیم بهینه تغییر شکل در ناحیه غیرخطی است.

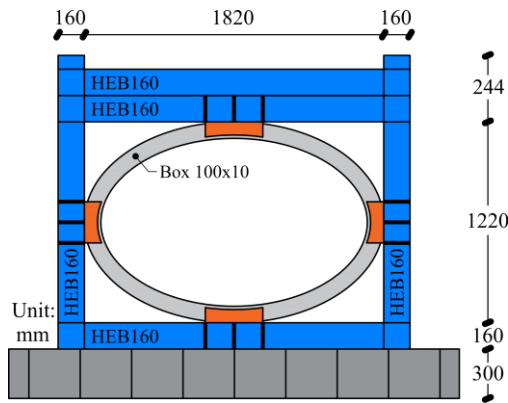
مزیت برجسته مهاربندهای هلالی شکل که از قطاعی از دایره تشکیل شده است، این است که امکان تنظیم سختی سیستم با تغییر مقدار خروج از مرکزیت به میزان دلخواه فراهم می‌شود. به همین دلیل، در این مقاله، سیستم مورد بررسی با خروج از مرکزیت‌های متفاوتی مورد تحلیل قرار خواهد گرفت. در کاربردهای عملی، به‌ویژه در سازه‌های دارای سیستم دوگانه که شامل مهاربندهای همگرا و قاب‌های خمشی هستند، تنظیم سختی بخش‌های مختلف سازه به گونه‌ای که نسبت تنش‌های اعضا معقول و اقتصادی باقی بماند، چالشی پیچیده است. با این حال، ایده تنظیم سختی به کمک این سیستم می‌تواند به طور هوشمندانه‌ای این فرآیند را تسهیل کند. همچنین، این مفهوم می‌تواند در مقاوم‌سازی سازه‌های معیوب به طور مؤثری مورد استفاده قرار گیرد، هرچند که خود این سیستم به‌تنهایی نیز قابلیت استفاده دارد.



شکل ۱. قاب مهاربندی هلالی شکل

Fig. 1. Crescent-shaped concentrically braced frame

<sup>1</sup>. Trombetti



شکل ۲. آزمایش تجربی سیستم مهاربندی بیضوی [۱۵، ۲۲]

Fig. 2. Elliptical brace test set-up [15, 22]

## ۲- طراحی اولیه

نمونه‌ها ابتدا باید با استفاده از نرم‌افزار ETABS [23] با روش ضرایب بار و مقاومت (LRFD) طراحی اولیه شوند. با توجه به اینکه سیستم سازه‌ای مورد بررسی یک پیکربندی نوین از مهاربندهای همگرا است، در گام اول لزوم طراحی و پارامترهای عملکرد لرزه‌ای این سیستم جدید مشابه مهاربندهای همگرای ویژه در نظر گرفته می‌شود. به همین دلیل، فیوز سازه‌ای مورد استفاده همان مهاربندها خواهد بود و بیشترین ارتفاع سازه به حدود ۵۰ متر محدود می‌شود.

سازه‌های مورد مطالعه به شکل پیکربندی مهاربند هلالی شکل هستند که در خروج از مرکزیت‌های برابر با  $L/10$ ،  $L/15$ ،  $L/20$ ،  $L/8$  و  $L/6$  که  $L$  طول مهاربند بدون خروج از مرکزیت است، در تعداد طبقات ۳، ۶، ۹ و ۱۲ با ارتفاعی برابر با ۳/۶ متر طراحی می‌شوند. این سازه‌ها براساس کاربری متعارف و بر مبنای دستورالعمل FEMA P695 [24] توسعه پیدا کرده‌اند. اتصالات تیرها به ستون‌ها و همچنین اتصالات مهاربندها به تیرها و ستون‌ها به صورت مفصلی انتخاب شده‌اند. مقاطع تیرها و ستون‌ها از نوع W شکل با مصالح A992 و مقاطع مهاربندها از نوع قوطی شکل با مصالح A500GrB هستند. پلان در نظر گرفته شده برای تمامی سازه‌ها مطابق شکل (۳) یک پلان مربعی متقارن است که از چهار دهانه در راستای x و چهار دهانه در راستای y تشکیل شده و هر کدام طولی معادل ۷/۲ متر دارند. همچنین برای رسیدن به تناسب ابعادی کاربردی و حل مشکل ابعاد غیرمنطقی مقاطع مهاربندها، تعداد دهانه‌های مهاربندی با توجه به تعداد طبقات مطابق شکل (۴) تعیین می‌شود. برای تعداد طبقات ۳، ۶، ۹ و ۱۲ به ترتیب از ۱، ۲،

بودن مقاومت تسلیم اولیه و سختی جانبی اولیه آن است. بنابراین، این سیستم می‌تواند به عنوان جایگزینی مناسب برای مهاربندهای کمناش تاب مطرح شود، چرا که رفتار چرخه‌ای مطلوب و اتلاف انرژی آن بدون کاهش در سختی و مقاومت قابل توجه است [4, 5].

آزمایشات تجربی اولیه روی نمونه‌های دوطبقی و هلالی شکل توسط پالرمو<sup>۱</sup> و همکاران [6, 7] و همچنین آنتونی<sup>۲</sup> و همکاران [8] تحت تأثیر نیروهای فشاری، کششی و چرخه‌ای انجام شد. به علاوه، ژو<sup>۳</sup> و همکاران [9] نیز آزمایش‌هایی را بر روی مهاربندهای زانویی انحنادار انجام دادند. همچنین، آزمایش‌های شبه‌استاتیکی روی یک سازه نمونه دوطبقه‌ای که مجهز به مهاربندهای دوطبقی با مقیاس یک‌دوم بود، صورت گرفت [10]. از دیگر مطالعات انجام شده روی انواع مختلف مهاربندهای برون‌مرکز، می‌توان به تحقیقات قاسمی و همکاران اشاره کرد که به بررسی عددی سیستم مهاربندی بیضوی شکل مطابق شکل (۲) پرداختند. نتایج این بررسی‌ها نشان‌دهنده ظرفیت بالاتر جابه‌جایی نسبی قبل از کمناش در مقایسه با مهاربندهای سنتی بود [11, 12]. آن‌ها سختی الاستیک جانبی این قاب را با استفاده از قضیه انرژی کرنشی و قضیه کاستلیانو محاسبه کرده [13, 14] و آزمایش‌های شبه‌استاتیکی آن‌ها رفتار هیستریزس قابل توجهی را با قابلیت استهلاک انرژی بیشتر نشان داد [15].

علاوه بر این، نوآوری‌های دیگری نیز در زمینه مهاربندهای برون‌مرکز از جمله ارزیابی و محاسبه ضرایب لرزه‌ای مهاربندهای ربع بیضوی تحت رکوردهای زلزله حوزه دور و نزدیک و مقایسه آن‌ها با قاب‌های خمشی [16, 17]، نصف بیضوی و شبه ایکس [18, 19] ارائه شده است. بوستانی و همکاران آزمایش‌های تجربی و بررسی‌های عددی را روی مهاربندهای دایروی جانمایی شده در قاب‌های مربعی انجام دادند [20]. پس از آن، شامی‌وند و همکاران المان‌هایی را برای حل مشکل مهاربندهای متصل به وسط ستون که امکان تشکیل مفصل پلاستیک را در اثر برش زیاد افزایش می‌دهند، معرفی کردند [21].

<sup>1</sup>. Palermo

<sup>2</sup> Antoine

<sup>3</sup> Zhou

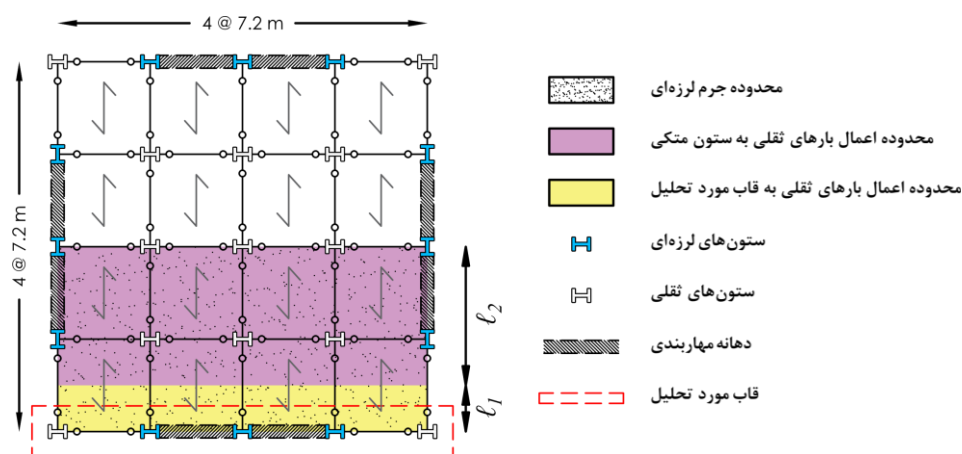
با توجه به این که در فرآیند تحلیل و طراحی، به جای استفاده از قاب‌های سه‌بعدی، از قاب‌های دوبعدی استفاده شده است، ضروری است که تأثیر قاب‌های حذف‌شده نیز در تحلیل قاب مورد تحلیل لحاظ شود. زمانی که سازه تحت تأثیر نیروی جانبی قرار می‌گیرد، آثار  $P - \Delta$  منجر به ایجاد لنگرهای ثانویه در پایه ستون‌های میانی پلان می‌شود. از آنجاکه این ستون‌ها تنها باربری ثقلی دارند و باربری جانبی را بر عهده نمی‌گیرند، مستعد ناپایداری هستند. اما به دلیل اتصال آن‌ها به ستون‌های باربر جانبی، بازتوزیع لنگر صورت گرفته و آثار لنگرهای ثانویه از طریق تیرهای متصل میان ستون‌های ثقلی و ستون‌های لرزه‌ای به قاب باربر جانبی منتقل و تحمل می‌شود؛ بنابراین، مدل‌سازی ستون‌ها و تیرهای متکی در کنار قاب مورد مطالعه به منظور افزایش دقت مدل‌سازی الزامی است. به دلیل مفصلی بودن اتصالات المان‌های متکی و اعمال یک ضریب بزرگ افزایشدهنده برای صلب کردن آن‌ها برای عدم مشارکت در باربری جانبی، این المان‌ها تأثیری بر زمان تناوب سازه نداشته و تنها وظیفه دارند اثر بارگذاری‌هایی را که در فرآیند تبدیل مدل سه‌بعدی به دوبعدی از مدل‌سازی حذف شده‌اند، منتقل کنند.

برای تمامی المان‌های تیر و ستونی که در نقاط پیوستن چشمه اتصال به یکدیگر متصل می‌شوند، ناحیه صلب انتهایی معادل با عمق کل مقطع آن‌ها اختصاص داده می‌شود. همچنین، به منظور لحاظ کردن اثر دیافراگم صلب کف طبقات ناشی از سقف عرشه فولادی، تغییر مکان افقی کلیه گره‌های انتهایی تیرهای هر طبقه نسبت به یکدیگر مقید شده و در واقع جابه‌جایی نسبی آن‌ها برابر با صفر در نظر گرفته می‌شود.

۳، ۴ دهانه مهاربندی استفاده می‌شود. با توجه به ویژگی پیرامونی بودن قاب‌های مورد مطالعه و به منظور کاهش حجم محاسبات، به جای تحلیل و طراحی مدل‌های سه‌بعدی، از قاب‌های دوبعدی استفاده می‌شود. شرط استفاده از این رویکرد این است که قاب‌های لرزه‌بر تداخلی با یکدیگر نداشته باشند. بنابراین، با فرض نیروی زلزله وارده در راستای  $x$ ، قاب لرزه‌بر پایینی پلان برای تحلیل و طراحی انتخاب می‌شود. دهانه بارگیر ثقلی برای این قاب طبق شکل (۳) برابر با نصف طول دهانه پایینی بوده و نیمی از مجموع نیروهای جانبی کل وارد شده در راستای  $x$  نیز سهم این قاب خواهد بود.

الگوهای بار وارد شده شامل SuperDead، Partition، Slab و Live به ترتیب با مقادیر ۳، ۲/۵، ۱ و ۲ کیلونیوتن بر مترمربع بر کف پلان و همچنین الگوی بار Wall به صورت خطی با مقدار ۸ کیلونیوتن بر متر بر تیرهای پیرامونی پلان اعمال می‌شوند. برای محاسبات لرزه‌ای، روش تحلیل استاتیکی معادل با در نظر گرفتن دسته‌بندی طراحی لرزه‌ای  $D_{max}$  همراه با ترکیب‌های بار مطابق با آیین‌نامه بارگذاری آمریکا [25] و در نظرگیری ضریب رفتار برابر با ۶ انجام می‌شود. همچنین اثر زلزله قائم نیز در این محاسبات لحاظ شده است.

ضریب بزرگ‌نمایی تغییر مکان برای این سیستم همانند قاب‌های مهاربندی همگرای ویژه برابر ۵ بوده و بنابراین بیشترین مقدار دریف‌الاستیک به ۰/۰۴ برابر ارتفاع سازه محدود می‌شود [26، 27]. همچنین مقاومت محوری ستون‌ها تحت ترکیب بارهای لرزه‌ای تشدید یافته با ضریب اضافه مقاومت برابر ۳ کنترل می‌شوند.



شکل ۳. پلان‌های مورد بررسی و جزئیات تبدیل مدل سه‌بعدی به دوبعدی

Fig. 3. Studied plans and 3D to 2D conversion details

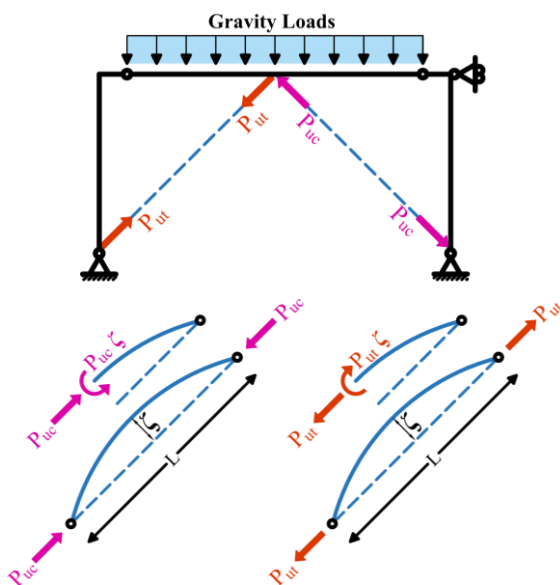
$$\frac{P_u}{P_c} \geq 0.2 \Rightarrow \frac{P_u}{P_c} + \frac{8 M_u}{9 M_n} = 1$$

$$\Rightarrow \begin{cases} P_{uc1} = \frac{1}{\frac{1}{1.14 F_{cre} A_g} + \frac{8 \xi}{9 M_n}} \\ P_{uc2} = \frac{1}{\frac{1}{0.3 \times 1.14 F_{cre} A_g} + \frac{8 \xi}{9 M_n}} \\ P_{ut} = \frac{1}{\frac{1}{F_{ye} A_g} + \frac{8 \xi}{9 M_n}} \end{cases} \quad \begin{matrix} (1) \\ (2) \\ (3) \end{matrix}$$

$$\frac{P_u}{P_c} < 0.2 \Rightarrow \frac{P_u}{2 P_c} + \frac{M_u}{M_n} = 1$$

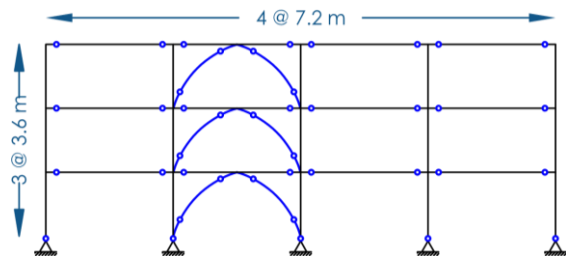
$$\Rightarrow \begin{cases} P_{uc1} = \frac{1}{\frac{1}{2 \times 1.14 F_{cre} A_g} + \frac{\xi}{M_n}} \\ P_{uc2} = \frac{1}{\frac{1}{2 \times 0.3 \times 1.14 F_{cre} A_g} + \frac{\xi}{M_n}} \\ P_{ut} = \frac{1}{\frac{1}{2 \times F_{ye} A_g} + \frac{\xi}{M_n}} \end{cases} \quad \begin{matrix} (4) \\ (5) \\ (6) \end{matrix}$$

در روابط ذکر شده،  $P_{uc}$  نیروی برآیند فشاری و  $P_{ut}$  نیروی برآیند کششی می‌باشد.  $P_u$  و  $M_u$  مقاومت‌های محوری و خمشی مورد نیاز و  $P_c$  و  $M_c$  مقاومت‌های محوری و خمشی موجود هستند. همچنین  $F_{ye}$  و  $F_{cre}$  مقادیر مورد انتظار تنش کمناش خمشی و تسلیم می‌باشد. مطابق AISC 341-22 [32]، ضریب کاهش مقاومت برابر یک در نظر گرفته شده و در روابط لحاظ نشده است.



شکل ۵. طراحی ظرفیتی قاب‌های مهاربندی هلالی شکل

Fig. 5. Capacity-limited design of crescent-shaped braced frames



شکل ۴. نمایی از قاب‌های مورد بررسی

Fig. 4. Elevation view of studied frames

### ۳- طراحی لرزه‌ای

در فرآیند طراحی لرزه‌ای یک سیستم سازه‌ای، دستیابی به یک شکل‌پذیری مطلوب مستلزم تعیین سازوکارهای تسلیم مناسب می‌باشد [28]. از آنجایی که مهاربندها در سازه‌های مهاربندی همگرا به عنوان فیوزهای سازه‌ای عمل می‌کنند، ضروری است که در لحظه‌ای که این المان‌ها به بیشترین ظرفیت باربری خود می‌رسند، سایر المان‌ها شامل تیرها و ستون‌ها، در حالت الاستیک باقی بمانند [29]. هدف اصلی این است که مفاصل پلاستیک ابتدا در مهاربندها شکل بگیرند و تشکیل این مفاصل در تیرها و ستون‌ها به تعویق بیفتد تا استهلاک انرژی در سیستم عمدتاً توسط مهاربندها انجام شود [30]. همان‌طور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود، از آنجایی که مهاربندهای مورد بررسی دوسر مفصل هستند، برآیند بیشترین نیروی ظرفیتی که از طرف آن‌ها به اعضای پیرامونی وارد می‌شود، نیرویی است که در امتداد خط واصل بین دو انتهای مهاربند در اندرکنش با لنگر خمشی، بیشترین تنش را در مرکز انحنای مهاربند ایجاد می‌کند. برای محاسبه این نیروها، با بسط روابط اندرکنشی مندرج در آیین‌نامه AISC 360-22 [31]، اگر نسبت بیشترین نیروی محوری موجود در مهاربندها به ظرفیت نیروی محوری آن‌ها از  $0.2$  بیشتر باشد، از روابط (۱ تا ۳) و در غیر این صورت از روابط (۴ تا ۶) استفاده می‌شود. در طراحی ظرفیتی، نسبت تقاضا به ظرفیت تیرها و ستون‌ها در حالتی که مطابق شکل (۶-پ) مهاربندها در آن‌ها حذف شده‌اند و طبقات در راستای  $x$  مقید شده‌اند، باید تحت تحلیل‌های زیر کمتر از ۱ باشد:

الف) تحلیلی که نیروی برآیند مهاربندهای فشاری برابر  $P_{uc1}$  و نیروی برآیند مهاربندهای کششی برابر  $P_{ut}$  بوده و با بارهای ثقلی ترکیب شوند.

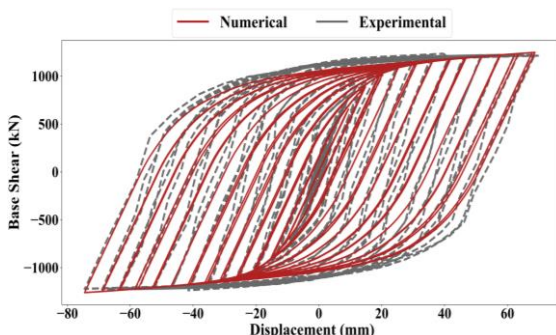
ب) تحلیلی که نیروی برآیند مهاربندهای فشاری برابر  $P_{uc2}$  و نیروی برآیند مهاربندهای کششی برابر  $P_{ut}$  بوده و با بارهای ثقلی ترکیب شوند.



## ۴- مدل سازی غیر خطی

المان‌های تیر و ستون اصلی و تیر و ستون متکی از نوع PDelta و برای المان‌های مهاربندی از نوع Corotational انتخاب می‌شود که دارای بالاترین دقت در مدل‌سازی آثار مرتبه دوم هستند. تأثیر صلبیت کف طبقات در مدل دوبعدی به این صورت است که یکی از گره‌های واقع در محل تقاطع تیرها و ستون‌ها در هر یک از طبقات به‌عنوان گره اصلی انتخاب شده و تغییر مکان راستای x سایر گره‌ها در محل چشمه‌های اتصال آن طبقات نسبت به این گره اصلی با استفاده از دستور equalDOF محدود می‌شود تا کل طبقه تغییر مکان انتقالی واحدی داشته باشد.

برای اعتبارسنجی مدل‌سازی‌های انجام‌شده در OpenSees، تحلیل مودال صورت گرفته و زمان تناوب سازه‌ها در هر دو نرم‌افزار مقایسه می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که زمان تناوب‌های سه مد اول با اختلاف کمتر از پنج درصد تطابق دارند. همچنین برای تأیید دقت مدل غیرخطی عددی در OpenSees، از نتایج آزمایشات تجربی قاسمی و همکاران که بر روی مهاربندهای بیضوی شکل مطابق شکل (۲) انجام شده است [36]، بهره گرفته می‌شود. آن‌ها قاب مورد مطالعه را تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی که بر اساس پروتکل بارگذاری سازه‌های فولادی [37] طراحی شده بود، قرار داده و نمودار نیرو-تغییر مکان آن‌ها را استخراج کردند. مقایسه این نمودار با نمودار حاصل از تحلیل شبه‌استاتیکی همان قاب در OpenSees که در شکل (۶) ارائه شده است، دقت و انطباق مناسبی را نشان می‌دهد. مساحت زیر نمودار نیرو - تغییر مکان که انرژی جذب‌شده را نشان می‌دهد، برای مدل آزمایشگاهی برابر ۲۶۷۴ کیلوژول و برای مدل عددی برابر ۲۵۹۷ کیلوژول می‌باشد که اختلاف زیر سه درصدی دارد.



شکل ۶. درستی آزمایشی مدل‌سازی عددی با تست آزمایشگاهی

Fig. 6. Verification of nonlinear numerical modeling with experimental test

اطلاعات مربوط به مدل‌سازی در نرم‌افزار ETABS به‌صورت فایل‌های اکسل استخراج شده و به منظور مدل‌سازی در نرم‌افزار OpenSees [33] مورد استفاده قرار می‌گیرند. بدین ترتیب، مشخصات گره‌ها، المان‌ها، نوع اتصالات، جرم‌های گره‌ای، قیدهای تکیه‌گاهی، مشخصات مصالح، ویژگی‌های مقاطع و بارگذاری‌های ثقلی به‌طور مستقیم از ETABS دریافت می‌شود. پارامتر ndm که نمایانگر فضای ابعادی تحلیل در OpenSees است، برابر با دو تعیین می‌شود. مقاطع تعریف‌شده از نوع فایبر با مصالح از نوع Steel02 هستند تا رفتار اندرکنش بین نیروی محوری و لنگر خمشی در المان‌های مهاربندی لحاظ شود.

مدل‌سازی اتصالات مفصلی در OpenSees با استفاده از یک فنر دورانی ZeroLength با سختی دورانی بسیار کم انجام می‌شود. با توجه به ذات هندسی سیستم مهاربندی برون‌مرکز، احتمال وقوع کمانش در مهاربندها به صورت ذاتی وجود دارد و نیازی به اعمال عمدی نقص هندسی نمی‌باشد [34]. برای لحاظ کردن طول واقعی المان‌ها، بخش‌هایی از انتهای المان‌ها که با سایر المان‌ها هم‌پوشانی دارند، صلب در نظر گرفته می‌شوند.

برای مدل‌سازی المان‌های مهاربند، تیر و ستون، از المان Displacement-Based BeamColumn با تعداد نقاط انتگرال‌گیری برابر ۳ استفاده می‌شود. انتخاب این المان علاوه بر این که مشکلات همگرایی کمتری به همراه دارد، با توجه به فرمولاسیون این المان و نیاز به تقسیم المان به تکه‌های کوچک‌تر، آثار  $P - \delta$  نیز دیده می‌شود. ستون‌های متکی به‌عنوان المان‌هایی از جنس ElasticBeamColumn با سختی محوری بسیار بالا و سختی خمشی کم انتخاب شده‌اند، در حالی که تیرهای متصل‌کننده این ستون‌ها به سازه اصلی از نوع Truss با سختی محوری زیاد هستند. همچنین در محل چشمه اتصال ستون‌ها و تیرهای متکی، المان‌های ZeroLength با سختی بسیار کم قرار داده شده است. در نهایت نیروهای ناشی از سایر دهانه‌های بارگیر که در مدل دوبعدی حذف شده‌اند، در تراز هر یک از طبقات به گره چشمه اتصال المان‌های متکی وارد می‌شود [35].

تنظیمات مربوط به تبدیلات هندسی در OpenSees برای

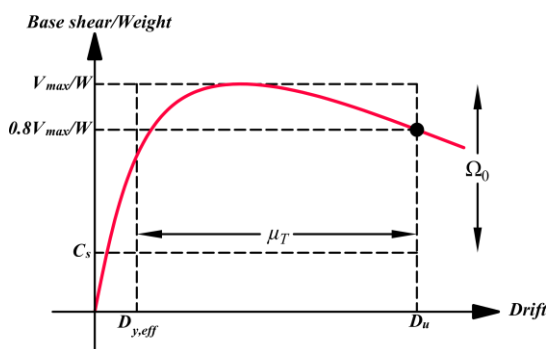
لرزه‌ای،  $T_1$  زمان تناوب تحلیلی مد اول و  $T_F$  زمان تناوب تجربی است. نتایج حاصل از این تحلیل‌ها در جدول (۱) آورده شده است. شناسه‌های مورد استفاده شامل میزان خروج از مرکزیت و تعداد طبقات است. به طور نمونه، شناسه L20S3 به معنی نمونه‌ای با خروج از مرکزیت  $L/20$  و تعداد طبقات برابر سه است. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود، با افزایش مقدار خروج از مرکزیت مهاربندها، مقادیر تغییر مکان‌های متناظر تسلیم و نهایی و دررفت‌های متناظر تسلیم و نهایی در سازه‌های با تعداد طبقات یکسان افزایش پیدا می‌کنند.

$$C_0 = \phi_{1,r} \frac{\sum_1^N m_x \phi_{1,x}}{m_x \phi_{1,x}^2} \quad (7)$$

$$\delta_{y,eff} = C_0 \frac{V_{max}}{W} \left( \frac{g}{4\pi^2} \right) \max(T_1, T_F)^2 \quad (8)$$

#### ۶- تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی

برای انجام تحلیل غیرخطی دینامیکی تاریخچه زمانی، از ۱۱ جفت شتاب‌نگاشت حوزه دور پیشنهادی توسط FEMA [24] مطابق با جدول (۲) استفاده شده است. فرآیند مقیاس‌سازی این رکوردها بر اساس آیین‌نامه بارگذاری آمریکا [25] برای طیف هدفی مطابق شکل (۸) که احتمال فراگذشت آن ۲ درصد در ۵۰ سال تعریف شده و با استفاده از روش مقیاس‌سازی دامنه در محدوده زمان تناوب بین کمینه  $0.2T$  و  $2T$  به این منظور، ابتدا شتاب درصد جرم انتقالی تا ۲۲ انجام می‌گیرد. به این منظور، ابتدا شتاب طیف DBE به عدد  $1/5$  و سپس در  $0.9$  ضرب می‌شود تا شتاب طیفی متناظر با ۹۰ درصد شتاب طیف MCE به دست آید. همچنین برای هر یک از سازه‌های نمونه، باید محدوده مقیاس‌سازی محاسبه شود. سپس ضریب مقیاس اولیه برای هر جفت شتاب‌نگاشت با توجه به مولفه‌ای که بیشترین شتاب زمین بزرگ‌تری دارد، برای انطباق با طیف موردنظر در محدوده تعیین شده محاسبه و از آن‌ها میانگین هندسی گرفته شده و ضریب مقیاس ثانویه برای هماهنگی شتاب طیفی میانگین با شتاب طیفی آیین‌نامه در بازه موردنظر محاسبه می‌شود. ضریب مقیاس نهایی، از ضرب ضریب مقیاس اولیه و ثانویه در یکدیگر به دست می‌آید. همچنین از میرایی رایلی با نسبت میرایی بحرانی  $2/5$  درصد و فرکانس‌های طبیعی دورانی مربوط به مدهای اول و دوم استفاده



شکل ۷. منحنی پوش و پارامترهای حاصل از تحلیل بارافزون

Fig. 7. Pushover curve and related parameters

#### ۵- تحلیل بارافزون

تحلیل بارافزون به عنوان یک روش تحلیل غیرخطی سریع، به منظور ارزیابی ظرفیت سازه در مراحل الاستیک و غیرالاستیک به کار می‌رود و نتایج آن شامل ضرایب اضافه مقاومت و شکل پذیری می‌باشد [38]. در فرآیند انجام تحلیل بارافزون، ضرایب ترکیب بارهای ثقلی طبق دستورالعمل FEMA [24] به گونه‌ای تعیین می‌شود که برای بارهای مرده برابر با  $1/0.5$  و برای بارهای زنده برابر با  $0.25$  لحاظ شد. در ابتدا، بارهای ثقلی به صورت استاتیکی به سازه اعمال می‌شوند و پس از آن، آثار ناشی از این بارها، شامل نیروها و تغییر شکل‌ها، باید ثابت نگه‌داشته شوند تا در مرحله بعدی، بارهای جانبی به صورت استاتیکی و غیرخطی بر اساس تغییر مکان به سازه تحمیل شوند. در این تحلیل، تنها مد غالب نوسان مدنظر قرار می‌گیرد؛ بنابراین این روش عمدتاً برای سازه‌های منظم کاربرد دارد. الگوی بار جانبی انتخاب شده متناسب با مد اول سازه تعریف شده و به صورت  $F \propto m_x \phi_{1,x}$  بیان می‌شود که  $m_x$  جرم هر طبقه و  $\phi_{1,x}$  مد اول هر طبقه می‌باشد. از این رو، پس از انجام تحلیل مودال، لازم است که شکل‌های مدی سازه استخراج شد و پس از نرمال‌سازی آن‌ها به گونه‌ای که شکل مدی طبقه آخر برابر با واحد شود، در جرم هر طبقه ضرب شوند تا الگوی بار جانبی شکل گیرد.

از خروجی‌های این تحلیل مطابق شکل (۷) می‌توان به ضریب اضافه مقاومت ( $\Omega_0$ ) که از نسبت حداکثر برش پایه به برش پایه متناظر طراحی محاسبه می‌شود و همچنین ضریب شکل پذیری وابسته به زمان تناوب ( $\mu_T$ ) که از نسبت تغییر مکان حداکثر به تغییر مکان تسلیم مؤثر بر اساس روابط (۷) و (۸) استخراج می‌شود، اشاره کرد [24]. در این روابط،  $V_{max}$  حداکثر برش پایه،  $W$  وزن



بیشترین دررفت نسبی درون طبقه‌ای برای هر یک تحلیل‌ها برابر ۰/۰۶ و برای مقادیر میانگین دررفت‌های درون طبقه‌ای برابر ۰/۰۴ است. مطابق شکل (۹)، مقادیر دررفت در سازه‌های با تعداد طبقات ۳ و ۶ همگی کمتر از حد مجاز هستند. اما در تعدادی از طبقات بعضی از نمونه‌های ۹ و ۱۲ طبقه، دررفت طبقات از حد مجاز فراتر رفته است. این نتیجه بیان‌گر این نکته است که ضریب رفتار در نظر گرفته‌شده برای طراحی این نمونه‌ها مناسب نبوده و باید کاهش پیدا کند. این امر منجر به افزایش ابعاد المان‌ها و سختی کلی سازه و در نتیجه کاهش دررفت سازه می‌شود.

شده‌است که در هر گام زمانی، ماتریس سختی آن از ماتریس سختی گام زمانی همگرا شده قبلی که هربار بروز می‌شود، استفاده می‌شود. از مهم‌ترین نتایج این تحلیل، می‌توان به دررفت نسبی طبقه اشاره کرد. همچنین تغییر مکان پسماند نیز می‌تواند مورد توجه قرار گیرد.

شکل (۹) مقادیر دررفت‌های موقت نسبی و پسماند نسبی برای سازه‌های بررسی شده را به همراه مقادیر میانگین آن‌ها در طبقات مختلف سازه‌ای به ازای رکوردهای زلزله در سطح خطر ۰/۹MCE را نشان می‌دهد. باتوجه به طیف شتاب هدف در فرآیند مقیاس‌سازی، طبق آیین‌نامه بارگذاری آمریکا [25]، حد مجاز برای

#### جدول ۱. نتایج حاصل از تحلیل‌های بارافزون

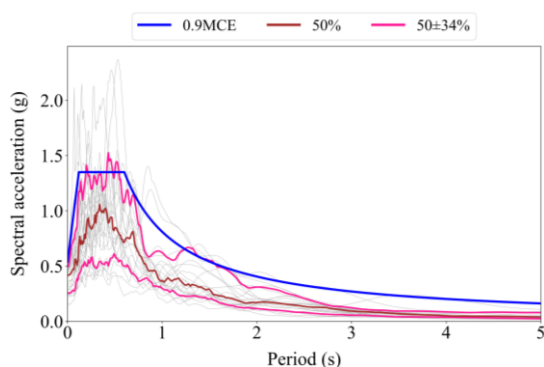
Table 1 The results of pushover analyses

| ID     | $V_{max}/W$ | $C_s$ | $\delta_v$ (mm) | $\delta_u$ (mm) | $D_v$ | $D_u$ | $\Omega_o$ | $\mu_T$ |
|--------|-------------|-------|-----------------|-----------------|-------|-------|------------|---------|
| L20S3  | 0.347       | 0.167 | 59.33           | 310.16          | 0.005 | 0.029 | 2.08       | 5.23    |
| L15S3  | 0.383       | 0.167 | 71.41           | 318.03          | 0.007 | 0.029 | 2.30       | 4.45    |
| L10S3  | 0.586       | 0.167 | 104.08          | 424.31          | 0.010 | 0.039 | 3.51       | 4.08    |
| L8S3   | 0.509       | 0.167 | 121.59          | 534.43          | 0.011 | 0.049 | 3.05       | 4.40    |
| L6S3   | 0.547       | 0.167 | 140.66          | 826.68          | 0.013 | 0.077 | 3.28       | 5.88    |
| L20S6  | 0.255       | 0.146 | 101.11          | 509.24          | 0.005 | 0.024 | 1.74       | 5.04    |
| L15S6  | 0.282       | 0.146 | 133.07          | 579.11          | 0.006 | 0.027 | 1.93       | 4.35    |
| L10S6  | 0.420       | 0.146 | 187.14          | 892.29          | 0.009 | 0.041 | 2.88       | 4.77    |
| L8S6   | 0.487       | 0.146 | 222.49          | 1089.32         | 0.010 | 0.050 | 3.33       | 4.90    |
| L6S6   | 0.571       | 0.146 | 281.52          | 1742.35         | 0.013 | 0.081 | 3.91       | 6.19    |
| L20S9  | 0.188       | 0.108 | 151.15          | 568.11          | 0.005 | 0.018 | 1.74       | 3.76    |
| L15S9  | 0.224       | 0.108 | 191.71          | 673.99          | 0.006 | 0.021 | 2.08       | 3.52    |
| L10S9  | 0.302       | 0.108 | 265.59          | 1018.04         | 0.008 | 0.031 | 2.81       | 3.83    |
| L8S9   | 0.355       | 0.108 | 310.85          | 1398.11         | 0.010 | 0.043 | 3.30       | 4.50    |
| L6S9   | 0.363       | 0.108 | 356.88          | 1755.26         | 0.011 | 0.054 | 3.36       | 4.92    |
| L20S12 | 0.138       | 0.087 | 209.22          | 608.84          | 0.005 | 0.014 | 1.59       | 2.91    |
| L15S12 | 0.192       | 0.087 | 269.66          | 845.95          | 0.006 | 0.020 | 2.20       | 3.14    |
| L10S12 | 0.257       | 0.087 | 331.01          | 1109.81         | 0.008 | 0.026 | 2.96       | 3.35    |
| L8S12  | 0.275       | 0.087 | 417.28          | 1306.87         | 0.010 | 0.030 | 3.14       | 3.13    |
| L6S12  | 0.338       | 0.087 | 526.63          | 2121.33         | 0.012 | 0.049 | 3.89       | 4.04    |

#### جدول ۲. جفت شتاب‌نگاشت‌های انتخابی برای تحلیل تاریخیچه زمانی

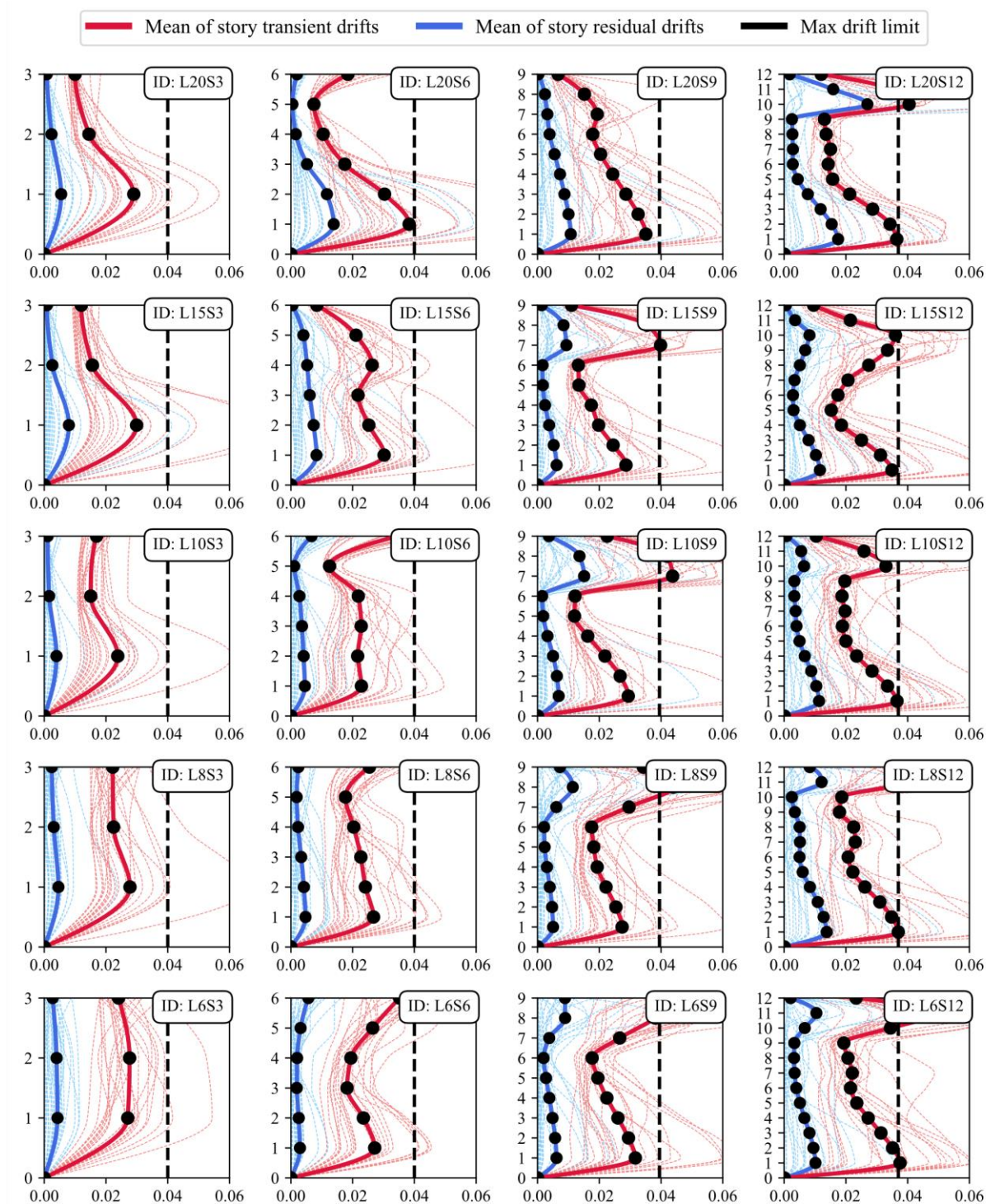
Table 2 Summary of selected records

| Event name              | Station            |
|-------------------------|--------------------|
| Superstition Hills, USA | Poe Road           |
| Loma Prieta, USA        | Capitola           |
| Landers, USA            | Coolwater          |
| Landers, USA            | Yermo Fire Station |
| Northridge, USA         | Beverly Hills      |
| Northridge, USA         | Canyon Country     |
| Kobe, Japan             | Nishi-Akashi       |
| Kobe, Japan             | Shin-Osaka         |
| Kocaeli, Turkey         | Duzce              |
| Manjil, Iran            | Abbar              |
| Hector Mine, USA        | Hector             |



شکل ۸. طیف هدف و طیف رکوردهای مورد استفاده

Fig. 8. Target and acceleration response spectra of selected records



شکل ۹. مقادیر دررفت‌های نسبی موقت و پسماند در سازه‌های مورد مطالعه تحت رکوردهای زلزله با شدت ۰/۹MCE

Fig. 9. Values of transient and residual drift ratios for studied archetypes for 0.9MCE intensity level

#### ۷- بررسی پارامترهای تقاضای انرژی

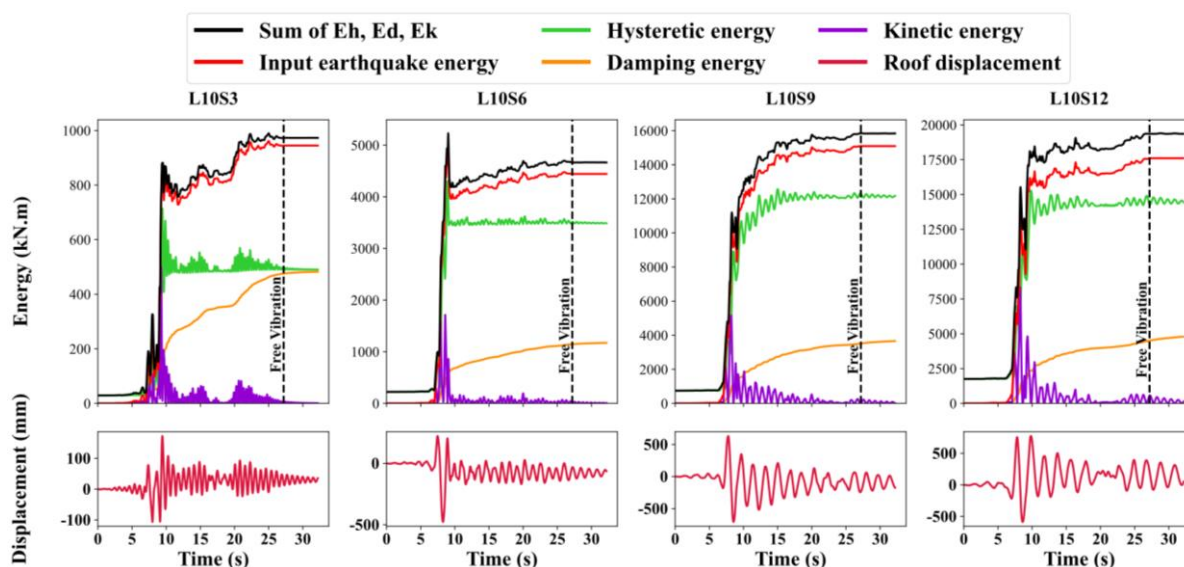
پارامترهای تقاضای انرژی، شاخص‌های پاسخی هستند که در ارزیابی سطح آسیب در مؤلفه‌های سازه‌ای در طول زمین‌لرزه استفاده می‌شوند [39]. طبق قانون پایداری انرژی که بیان می‌کند انرژی نه وجود آمده و نه از بین می‌رود بلکه تنها از شکلی به شکل دیگر

تبدیل می‌شود، بنابراین مجموع مقادیر مولفه‌های مختلف انرژی شامل انرژی کرنش الاستیک، انرژی هیسترتیک، انرژی میرایی و انرژی جنبشی باید با مقدار انرژی ورودی به سازه که تابعی از شدت زلزله اعمالی بوده و به نسبت جرم سازه‌ای در سراسر سازه توزیع می‌شود، یکی باشد. شکل (۱۰) نمونه از توزیع این مولفه‌های

نشان داده و شاخص‌های خرابی نیز وابسته به این مولفه از انرژی هستند. شکل (۱۱) توزیع انرژی هیسترتیک را برای اعضای مهاربند، تیر و ستون در سازه‌های با خروج از مرکزیت برابر  $L/10$  را نشان می‌دهد. این توزیع بیان‌گر این نکته است که رویکرد اتخاذ شده برای طراحی ظرفیتی مهاربندها صحیح بوده و این اعضا بیشترین استهلاک انرژی را نسبت به سایر اعضا دارند. انرژی میرایی ذاتی ( $E_d$ ) نیز مولفه دیگری از انرژی بوده که مربوط به مشخصه‌های ویسکوز مصالح سازه‌ای است. مطابق شکل (۱۲) به‌مانند انرژی هیسترتیک، بیشترین انرژی تلف‌شده از نوع میرایی نیز در میان اعضای مختلف، مهاربندها هستند. در نهایت مقداری از انرژی که توسط مولفه‌های بیان‌شده تلف نشود، باعث حرکت سازه شده و با نام انرژی جنبشی ( $E_k$ ) شناخته می‌شود.

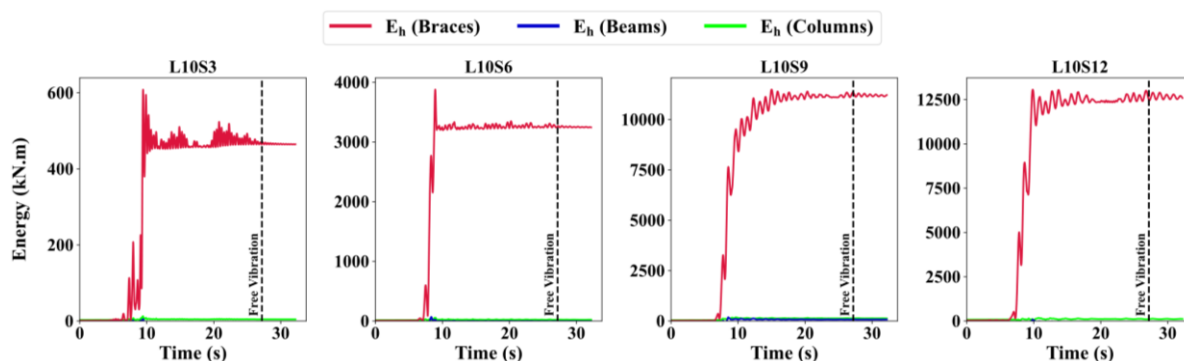
مختلف را در سازه‌های با خروج از مرکزیت برابر  $L/10$  تحت یکی از رکوردهای اعمالی نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که عدم تطابق انرژی ورودی و مجموع انرژی‌ها، عدم در نظر گرفتن انرژی کرنش الاستیک به علت سهم ناچیز آن و همچنین انرژی ورودی حاصل از بارگذاری ثقلی است. همان‌گونه که در شکل (۱۰) پیداست، افزایش انرژی‌های هیسترتیک و میرایی همزمان با تشدید انرژی جنبشی و تغییر مکان جانبی سازه اتفاق می‌افتد.

انرژی کرنشی الاستیک ( $E_{se}$ ) انرژی تلف‌شده حاصل از قسمت رفتار الاستیک مصالح است که در اثر حلقه‌های هیسترتیک، کم و زیاد شده و نهایتاً صفر می‌شود. انرژی هیسترتیک ( $E_h$ )، فقط در رفتار غیرخطی و در اثر تسلیم و خرابی اعضا و حلقه‌های رفت و برگشتی بوجود می‌آید که سطح زیر نمودار نیرو-تغییر شکل را



شکل ۱۰. توزیع پارامترهای مختلف انرژی تحت شتاب‌نگاشت Kocaeli, Turkey

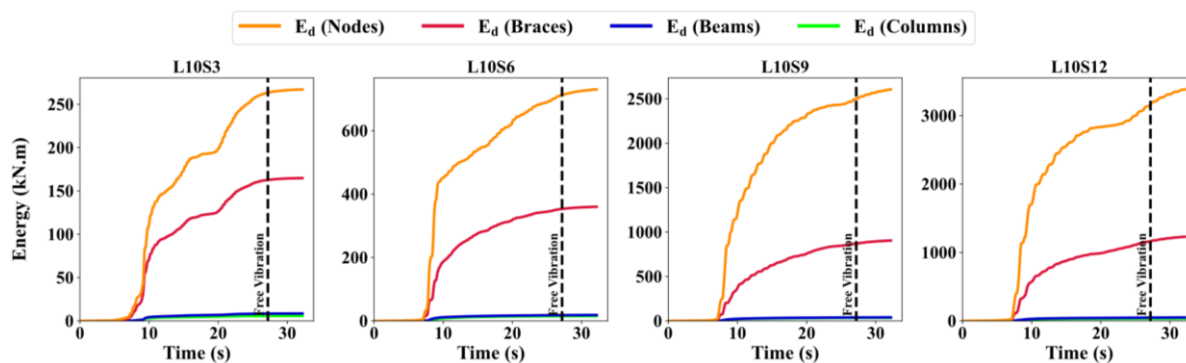
Fig. 10. Distribution of various types of seismic energy for ground motion Kocaeli, Turkey



شکل ۱۱. توزیع انرژی هیسترتیک تحت شتاب‌نگاشت Kocaeli, Turkey

Fig. 11. Distribution of hysteretic energy ( $E_h$ ) for ground motion Kocaeli, Turkey





شکل ۱۲. توزیع عضو انرژی میرایی تحت شتاب‌نگاشت Kocaeli, Turkey

Fig. 12 Distribution of damping energy ( $E_d$ ) for ground motion Kocaeli, Turkey

| ID     | Max kinetic energy (kN.m) |       |      |           | Max hysteretic energy (kN.m) |       |       |           | Max damping energy (kN.m) |       |      |           | Input energy (kN.m) |       |       |           |
|--------|---------------------------|-------|------|-----------|------------------------------|-------|-------|-----------|---------------------------|-------|------|-----------|---------------------|-------|-------|-----------|
|        | min                       | max   | mean | std. dev. | min                          | max   | mean  | std. dev. | min                       | max   | mean | std. dev. | min                 | max   | mean  | std. dev. |
| L20S3  | 184                       | 821   | 461  | 191       | 563                          | 2952  | 1716  | 766       | 334                       | 1260  | 654  | 213       | 869                 | 4206  | 2347  | 932       |
| L15S3  | 199                       | 857   | 472  | 204       | 466                          | 3386  | 1631  | 820       | 331                       | 1478  | 697  | 262       | 769                 | 4864  | 2305  | 1037      |
| L10S3  | 253                       | 1113  | 617  | 283       | 241                          | 3744  | 1588  | 1173      | 482                       | 2193  | 1052 | 408       | 854                 | 5776  | 2618  | 1518      |
| L8S3   | 380                       | 1306  | 715  | 267       | 495                          | 3775  | 1934  | 1000      | 564                       | 2470  | 1165 | 413       | 1031                | 6253  | 3078  | 1316      |
| L6S3   | 459                       | 2018  | 891  | 373       | 192                          | 8059  | 2289  | 1634      | 640                       | 3051  | 1423 | 601       | 1195                | 11135 | 3694  | 2152      |
| L20S6  | 909                       | 4282  | 1603 | 796       | 992                          | 8403  | 5028  | 2004      | 670                       | 3200  | 1821 | 645       | 1440                | 10758 | 6638  | 2570      |
| L15S6  | 841                       | 4922  | 1861 | 895       | 840                          | 9449  | 5571  | 2312      | 832                       | 3753  | 2198 | 786       | 1461                | 12174 | 7562  | 2983      |
| L10S6  | 993                       | 4315  | 2034 | 807       | 608                          | 16216 | 6347  | 3777      | 1080                      | 5707  | 3028 | 1239      | 1470                | 21816 | 9177  | 4739      |
| L8S6   | 1002                      | 4414  | 2332 | 828       | 302                          | 14623 | 6072  | 3821      | 1192                      | 6463  | 3653 | 1410      | 1271                | 20623 | 9524  | 4797      |
| L6S6   | 1116                      | 4443  | 2661 | 862       | 270                          | 15196 | 5980  | 4116      | 1119                      | 7535  | 4156 | 1663      | 1168                | 21980 | 9944  | 5325      |
| L20S9  | 1362                      | 7151  | 3165 | 1435      | 3761                         | 12975 | 8230  | 2863      | 1827                      | 5903  | 3318 | 1030      | 5180                | 18137 | 10824 | 3588      |
| L15S9  | 1195                      | 4652  | 2766 | 1088      | 3288                         | 14696 | 8828  | 3776      | 2053                      | 5156  | 3616 | 981       | 5030                | 18493 | 11731 | 4577      |
| L10S9  | 1643                      | 7594  | 3684 | 1559      | 2536                         | 16992 | 9435  | 4645      | 2862                      | 7242  | 4835 | 1400      | 4675                | 22010 | 13563 | 5756      |
| L8S9   | 1682                      | 9359  | 4391 | 2118      | 2375                         | 36084 | 10517 | 8626      | 3300                      | 10879 | 5961 | 2319      | 4942                | 46394 | 15811 | 10560     |
| L6S9   | 1943                      | 10947 | 4968 | 2928      | 1579                         | 19871 | 8213  | 5884      | 3102                      | 8768  | 5820 | 1697      | 4129                | 27452 | 13359 | 7193      |
| L20S12 | 1626                      | 28246 | 8156 | 6750      | 3660                         | 27283 | 13983 | 6952      | 2484                      | 11602 | 5397 | 2893      | 4428                | 37092 | 17567 | 9780      |
| L15S12 | 1953                      | 15561 | 5823 | 3492      | 3584                         | 41064 | 14802 | 8434      | 2644                      | 14278 | 5539 | 2653      | 4479                | 53683 | 18629 | 10974     |
| L10S12 | 2083                      | 24655 | 7626 | 5524      | 3268                         | 44779 | 17808 | 13199     | 4650                      | 15122 | 7586 | 2979      | 6207                | 54894 | 23739 | 15984     |
| L8S12  | 2188                      | 10085 | 5985 | 2597      | 2487                         | 21074 | 12087 | 5375      | 3780                      | 9838  | 7329 | 1536      | 4537                | 29197 | 17777 | 6371      |
| L6S12  | 2477                      | 12075 | 6947 | 3280      | 1906                         | 20899 | 10947 | 5972      | 4195                      | 11808 | 8877 | 1999      | 4388                | 30331 | 18209 | 7479      |

شکل ۱۳. مقادیر آماری از پارامترهای تقاضای انرژی در مدل‌های مختلف (اعداد به کیلو نیوتن متر)

Fig. 13. Statistical values of energy demand parameters for all studied archetypes (in kN.m)

| ID     | Max hysteretic energy for Columns (kN.m) |      |      |           | Max hysteretic energy for Beams (kN.m) |      |      |           | Max hysteretic energy for Braces (kN.m) |       |       |           | Max damping energy for Columns (kN.m) |     |      |           | Max damping energy for Beams (kN.m) |     |      |           | Max damping energy for Braces (kN.m) |      |      |           |
|--------|------------------------------------------|------|------|-----------|----------------------------------------|------|------|-----------|-----------------------------------------|-------|-------|-----------|---------------------------------------|-----|------|-----------|-------------------------------------|-----|------|-----------|--------------------------------------|------|------|-----------|
|        | min                                      | max  | mean | std. dev. | min                                    | max  | mean | std. dev. | min                                     | max   | mean  | std. dev. | min                                   | max | mean | std. dev. | min                                 | max | mean | std. dev. | min                                  | max  | mean | std. dev. |
| L20S3  | 4                                        | 96   | 19   | 24        | 1                                      | 181  | 46   | 55        | 522                                     | 2690  | 1622  | 707       | 5                                     | 41  | 12   | 8         | 7                                   | 41  | 14   | 7         | 98                                   | 413  | 196  | 71        |
| L15S3  | 4                                        | 31   | 10   | 9         | 5                                      | 125  | 24   | 37        | 430                                     | 3200  | 1568  | 783       | 5                                     | 46  | 13   | 9         | 6                                   | 43  | 15   | 8         | 112                                  | 535  | 228  | 95        |
| L10S3  | 3                                        | 30   | 7    | 7         | 3                                      | 55   | 1    | 17        | 215                                     | 3715  | 1550  | 1160      | 6                                     | 53  | 15   | 10        | 9                                   | 48  | 18   | 9         | 165                                  | 835  | 360  | 153       |
| L8S3   | 4                                        | 20   | 6    | 4         | 7                                      | 28   | 3    | 10        | 470                                     | 3720  | 1901  | 992       | 7                                     | 75  | 18   | 15        | 9                                   | 49  | 18   | 9         | 203                                  | 1027 | 417  | 178       |
| L6S3   | 4                                        | 41   | 9    | 8         | 2                                      | 44   | 4    | 12        | 168                                     | 7965  | 2261  | 1621      | 6                                     | 98  | 24   | 24        | 10                                  | 52  | 20   | 11        | 239                                  | 1258 | 519  | 251       |
| L20S6  | 16                                       | 100  | 30   | 20        | 3                                      | 461  | 142  | 144       | 783                                     | 7905  | 4631  | 1918      | 13                                    | 119 | 49   | 27        | 13                                  | 115 | 50   | 25        | 159                                  | 975  | 529  | 209       |
| L15S6  | 12                                       | 66   | 26   | 13        | 4                                      | 447  | 132  | 141       | 634                                     | 8919  | 5188  | 2217      | 13                                    | 132 | 56   | 31        | 14                                  | 102 | 49   | 23        | 190                                  | 1330 | 686  | 283       |
| L10S6  | 16                                       | 144  | 44   | 30        | 1                                      | 324  | 47   | 95        | 397                                     | 15704 | 6032  | 3703      | 15                                    | 223 | 66   | 51        | 17                                  | 120 | 57   | 29        | 360                                  | 2093 | 1000 | 462       |
| L8S6   | 14                                       | 143  | 28   | 26        | 2                                      | 145  | 5    | 53        | 83                                      | 14396 | 5815  | 3788      | 21                                    | 324 | 99   | 77        | 16                                  | 124 | 57   | 28        | 396                                  | 2267 | 1200 | 512       |
| L6S6   | 14                                       | 94   | 30   | 18        | 5                                      | 4    | 5    | 6         | 53                                      | 14974 | 5751  | 4109      | 13                                    | 259 | 68   | 58        | 13                                  | 118 | 53   | 25        | 380                                  | 2782 | 1400 | 604       |
| L20S9  | 2                                        | 72   | 51   | 17        | 5                                      | 904  | 311  | 305       | 3026                                    | 11616 | 7120  | 2609      | 27                                    | 277 | 105  | 70        | 35                                  | 191 | 88   | 44        | 304                                  | 2009 | 984  | 431       |
| L15S9  | 55                                       | 425  | 168  | 110       | 4                                      | 547  | 135  | 198       | 2571                                    | 13063 | 7777  | 3534      | 28                                    | 195 | 104  | 58        | 31                                  | 149 | 85   | 42        | 542                                  | 1837 | 1170 | 436       |
| L10S9  | 48                                       | 418  | 180  | 120       | 6                                      | 355  | 35   | 130       | 1824                                    | 15544 | 8470  | 4445      | 36                                    | 258 | 110  | 63        | 36                                  | 142 | 85   | 37        | 885                                  | 2677 | 1654 | 566       |
| L8S9   | 40                                       | 139  | 70   | 31        | 1                                      | 70   | 6    | 50        | 1660                                    | 35200 | 9738  | 8575      | 33                                    | 354 | 118  | 94        | 39                                  | 146 | 82   | 39        | 1069                                 | 3646 | 2016 | 826       |
| L6S9   | 32                                       | 138  | 63   | 31        | 3                                      | 5    | 4    | 8         | 831                                     | 19063 | 7473  | 5866      | 29                                    | 312 | 102  | 78        | 36                                  | 112 | 65   | 25        | 1260                                 | 3473 | 2048 | 674       |
| L20S12 | 70                                       | 1398 | 616  | 455       | 2                                      | 1084 | 467  | 474       | 2001                                    | 23556 | 11125 | 6335      | 41                                    | 587 | 224  | 150       | 50                                  | 614 | 261  | 158       | 844                                  | 4619 | 1980 | 1119      |
| L15S12 | 81                                       | 530  | 165  | 98        | 3                                      | 1235 | 229  | 355       | 1921                                    | 38251 | 12647 | 8119      | 36                                    | 638 | 168  | 143       | 35                                  | 512 | 154  | 109       | 915                                  | 6323 | 2107 | 1257      |
| L10S12 | 82                                       | 636  | 159  | 135       | 6                                      | 826  | 134  | 357       | 1575                                    | 42095 | 15751 | 12774     | 35                                    | 453 | 182  | 131       | 43                                  | 321 | 120  | 71        | 1230                                 | 5760 | 2665 | 1192      |
| L8S12  | 114                                      | 258  | 166  | 38        | 4                                      | 1046 | 227  | 332       | 727                                     | 18092 | 9924  | 5087      | 28                                    | 303 | 131  | 84        | 49                                  | 195 | 128  | 41        | 1306                                 | 3962 | 2738 | 748       |
| L6S12  | 75                                       | 264  | 135  | 59        | 5                                      | 1    | 7    | 17        | 183                                     | 19137 | 9174  | 5980      | 41                                    | 419 | 181  | 124       | 32                                  | 127 | 86   | 27        | 1442                                 | 4654 | 3385 | 1008      |

شکل ۱۴. مقادیر آماری از توزیع انرژی هیسترتیک و میرایی المان‌ها در مدل‌های مختلف (اعداد به کیلو نیوتن متر)

Fig.14. Statistical values of hysteretic and damping energy for all studied archetypes (in kN.m)

باعث بزرگ‌تر شدن ضریب اضافه مقاومت می‌شود. همچنین درصد مشارکت لنگر خمشی نسبت به نیروی محوری در اندرکنش آن‌ها افزایش یافته و نیروی معادلی که باعث ایجاد مفصل پلاستیک در وسط مهاربند می‌شود، کاهش می‌یابد. از این رو، نیروی نامتعادل کننده در تیرها نیز کاهش یافته و در طراحی ظرفیتی، نیاز به مقطع کوچک‌تری برای تیرها و ستون‌ها خواهد بود. از طرفی، آثار مشهود کماتش مهاربند که مهمترین مد خرابی این گونه از سیستم‌ها است، کاهش پیدا کرده و شکل‌پذیری سیستم افزایش پیدا می‌کند. در نهایت انرژی هیسترتیک و میرایی مهاربندها که اعضای فیوز این سیستم هستند، افزایش پیدا می‌کند که به معنی غیرخطی شدن بیشتر این اعضا و استفاده مضاعف از ظرفیت المان‌ها است.

- روش بیان‌شده برای طراحی ظرفیتی اعضای مهاربندی کارآمد بوده و سایر اعضا اعم از تیرها و ستون‌ها در طول فرآیند بارگذاری لرزه‌ای، الاستیک باقی می‌مانند.
- ضرایب اضافه مقاومت برای مدل‌های مورد تحلیل از ۱/۵۹ تا ۳/۹۱ و ضرایب شکل‌پذیری مبتنی بر زمان تناوب از ۲/۹۱ تا ۶/۱۹ متغیر بوده است. همچنین آثار زوال بر اثر کماتش مهاربندها در منحنی‌های پوش قابل مشاهده است.
- در مواردی اندک، مقادیر دررفت‌های نسبی طبقات در سازه‌های با تعداد طبقات بیش از ۹ طبقه، از حد مجاز تعیین‌شده در آیین‌نامه فراتر می‌رود؛ بنابراین ضریب رفتار فرضی در نظر گرفته‌شده که برابر ۶ بود، مناسب نبوده و ضمن لزوم کاهش این ضریب، افزودن الزامات لرزه‌ای بیشتر برای پوشش این ضعف ضروری است.
- بر اساس پارامترهای آماری به‌دست‌آمده، بیش از ۹۸ درصد جذب انرژی هیسترتیک و میرایی توسط مهاربندها صورت می‌گیرد و المان‌های تیر و ستون در ناحیه الاستیک باقی می‌مانند.
- در خروج از مرکزیت‌های کوچک‌تر، به علت به تأخیر افتادن کماتش المان‌های مهاربندی و تشکیل اندرکنش با لنگر خمشی و این‌که همچنان سختی جانبی سازه مطلوب بوده و نیاز به افزایش بی‌رویه مقاطع نیست، در عین اقتصادی‌بودن سازه، شکل‌پذیری قابل توجهی نیز حاصل می‌شود. از این رو، پیداکردن مقدار خروج از مرکزیتی که هم‌زمان سختی جانبی مناسب و

لازم به ذکر است از آنجایی که آخرین نسخه رسمی نرم‌افزار OpenSees توانایی محاسبه تقاضاهای انرژی بیان شده را ندارد، از نسخه سفارشی‌شده این نرم‌افزار که رکوردهای جدیدی به هسته اصلی آن اضافه شده است، استفاده می‌شود [40].

شکل (۱۳) پارامترهای آماری را از توزیع انرژی‌های ذکرشده در سازه‌های مختلف و همچنین شکل (۱۴) پارامترهای آماری را از توزیع انرژی‌های هیسترتیک و میرایی به تفکیک المان‌های سازه‌ای نشان می‌دهند. مقادیر و نسبت‌های جذب انرژی صورت گرفته توسط المان‌ها مختلف نشان می‌دهد که با طراحی صحیح ظرفیتی، هدف فیوز بودن مهاربندها به نتیجه رسیده و درصد بالایی از جذب و استهلاک انرژی و شکل‌پذیری سیستم توسط این المان‌ها صورت می‌گیرد. به عبارتی دیگر، در میان انواع انرژی‌های تعریف‌شده، انرژی هیسترتیک مهاربندها بیشترین سهم را در اتلاف انرژی کل بر عهده دارند.

#### ۸- بحث، نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این پژوهش، عملکرد لرزه‌ای یک پیکربندی نوین از قاب‌های مهاربندی‌شده مقاوم در برابر زلزله با عنوان «مهاربندهای هلالی‌شکل» مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا، ۲۰ مدل سازه‌ای با تعداد طبقات و مقادیر مختلف خروج از مرکزیت، پس از طراحی اولیه و ظرفیتی، تحت تحلیل‌های بارافزون و تحلیل‌های تاریخیچه زمانی مورد ارزیابی قرار گرفتند. هدف اصلی، تغییر سازوکار عملکرد مهاربندها از حالت صرفاً محوری - که به دلیل رفتار نامطلوب پس از کماتش ناکارآمد است - به یک رفتار اندرکنشی نیروی محوری-لنگر خمشی است. به علت نبود ضوابط لرزه‌ای برای این پیکربندی، طراحی این سیستم با توجه به ضوابط مربوط به قاب‌های مهاربندی همگرای ویژه صورت گرفت؛ بنابراین مهاربندها کماکان نقش فیوزهای لرزه‌ای را خواهند داشت. کلیات ارزیابی بر اساس رویکردهای مدل‌سازی غیرخطی در کنار بررسی پارامترهای تقاضای انرژی صورت پذیرفت. مهم‌ترین نتایج این پژوهش به صورت زیر قابل بیان است:

- با افزایش مقدار خروج از مرکزیت (ξ)، سختی جانبی سیستم کاهش یافته و برای رعایت کردن بیشترین دررفت مجاز آیین‌نامه، باید مقاطع استفاده شده در مهاربندها بزرگ‌تر شوند و یا از تعداد دهانه‌های مهاربندی بیشتری استفاده شود که



شکل پذیری خوبی داشته باشد، می‌تواند به طراحی بهینه‌تری منجر شود.

### سهم نویسندگان

سهم هر یک از نویسندگان در نگارش این مقاله برابر بوده است.

### قدردانی نویسندگان

از حمایت‌های دانشکده مهندسی عمران دانشگاه تهران جهت فراهم کردن امکانات سخت‌افزاری محاسبات سنگین قدردانی می‌گردد.

### منابع مالی

از منابع مالی سازمان‌ها یا نهادهای خاصی استفاده نشده است.

### بیانیه هوش مصنوعی

در نگارش این مقاله، از ابزارهای هوش مصنوعی استفاده‌ای نشده است.

### تعارض منافع

برای نویسندگان، تعارض منافی وجود ندارد.

## References

- [1] Estekanchi, H., Soltani, A. and Vafai, A., 2004. Seismic behavior of steel frames with off-center bracing system. In: *13th World Conference on Earthquake Engineering*. Vancouver, Canada, 1-6 August 2004.
- [2] Trombetti, T., Silvestri, S., Gasparini G. and Ricci, I., 2009. *Stiffness-Strength-Ductility-Design Approaches for Crescent Shaped Braces*. Vol. 3.
- [3] Trombetti, T., Gasparini, G., Silvestri, S. and Ricci, I., 2011. *Use of Crescent Shaped Braces for Controlled Seismic Design of Ductile Structures*. Vol. 5.
- [4] Palermo, M., Laghi, V., Gasparini, G., Silvestri, S. and Trombetti, T., 2023. A multi-performance seismic design procedure to incorporate Crescent Shaped Braces in mid-rise frame structures. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 164, p.107625. doi: 10.1016/j.soildyn.2022.107625
- [5] Palermo, M., Laghi, V., Gasparini, G., Silvestri, S. and Trombetti, T., 2021. Analytical estimation of the key performance points of the tensile force-displacement response of Crescent Shaped Braces. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 148, p.106839. doi: 10.1016/j.soildyn.2021.106839
- [6] Palermo, M., Silvestri, S., Gasparini, G. and Trombetti, T., 2015. Crescent shaped braces for the seismic design of building structures. *Materials and Structures*, 48(5), pp.1485-1502. doi: 10.1617/s11527-014-0249-z
- [7] Palermo, M., Pieraccini, L., Dib, A., Silvestri, S. and Trombetti, T., 2017. Experimental tests on Crescent Shaped Braces hysteretic devices. *Engineering Structures*, 144, pp.185-200. doi: 10.1016/j.engstruct.2017.04.034
- [8] Dib, A., Palermo, M., Pieraccini, L., Silvestri, S., Gasparini, G. and Trombetti, T., 2015. Experiments on crescent shaped braces. In: *Implementing Innovative Ideas in Structural Engineering and Project Management*. p.1359.
- [9] Zhou, Z., Ye, B. and Chen, Y., 2019. Experimental investigation of curved steel knee braces with adjustable yield displacements. *Journal of Constructional Steel Research*, 161, pp.17-30. doi: 10.1016/j.jcsr.2019.06.011
- [10] Mokhtari, E., Palermo, M., Laghi, V., Incerti, A., Mazzotti, C. and Silvestri, S., 2022. Quasi-static cyclic tests on a half-scaled two-storey steel frame equipped with Crescent Shaped Braces at both storeys: Experimental vs. numerical response. *Journal of Building Engineering*, 62, p.105371. doi: 10.1016/j.jobbe.2022.105371
- [11] Jouneghani, H.G., Haghollahi, A., Moghaddam, H. and Moghadam, A.S., 2019. Assessing Seismic Performance of the Elliptic Braced Moment Resisting Frame through Pushover Method. *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*, 7(1), pp.68-85. doi: 10.22075/JRCE.2018.13030.1232
- [12] Jouneghani, H.G., Haghollahi, A., Kalaleh, M.T. and Beheshti-Aval, S.B., 2021. Nonlinear seismic behavior of elliptic-braced moment resisting frame using equivalent braced frame. *Steel and Composite Structures*, 40(1), pp.45-64. doi: 10.12989/scs.2021.40.1.045
- [13] Ghasemi Jouneghani, H., Fanaie Khaje Nasir, N. and Haghollahi, A., 2022. Theoretical formulation for calculating elastic lateral stiffness in a simple steel frame equipped with elliptic brace. *Steel and Composite Structures*, 45(3), pp.445-462. doi: 10.12989/scs.2022.45.3.445
- [14] Jouneghani, H.G., Fanaie, N., Kalaleh, M.T. and Mortazavi, M., 2023. Determining elastic lateral stiffness of steel moment frame equipped with elliptic brace. *Steel and Composite Structures*, 46(3), pp.293-318. doi: 10.12989/scs.2023.46.3.293
- [15] Jouneghani, H.G. and Haghollahi, A., 2020. Experimental study on hysteretic behavior of steel moment frame equipped with elliptical brace. *Steel and Composite Structures*, 34(6), pp.891-907. doi: 10.12989/scs.2020.34.6.891
- [16] Shirpour, A., Fanaie, N. and Barzegar Seraji, M., 2024. Seismic performance factors of quarter-elliptic-braced steel moment frames (QEB-MFs) using FEMA P695 methodology. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 178, p.108453. doi: 10.1016/j.soildyn.2024.108453
- [17] Fanaie, N. and Shirpour, A., 2023. Analytical and numerical evaluation of quarter-elliptic-braced steel

- moment frames (QEB-MFs). *Structures*, 49, pp.426-442. doi: 10.1016/j.istruc.2023.01.100
- [18] Shirpour, A. and Fanaie, N., 2024. Determining the seismic performance factors of quasi-X bracing systems. *Journal of Constructional Steel Research*, 212, p.108248. doi: 10.1016/j.jcsr.2023.108248
- [19] Fanaie, N. and Shirpour, A., 2024. Quasi-X-braced steel moment frames (QXB-MFs) evaluation using analytical and numerical methods. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 22(2), pp.547-582. doi: 10.1007/s10518-023-01778-9
- [20] Boostani, M., Rezaifar, O. and Gholhaki, M., 2019. Seismic performance investigation of new lateral bracing system called "OGrid-H". *SN Applied Sciences*, 1, p.352. doi: 10.1007/s42452-019-0369-8
- [21] Shamivand, A. and Akbari, J., 2020. Ring-Shaped Lateral Bracing System for Steel Structures. *International Journal of Steel Structures*, 20(2), pp.493-503. doi: 10.1007/s13296-019-00299-z
- [22] Jouneghani, H.G. and Haghollahi, A., 2020. Experimental and analytical study in determining the seismic performance of the ELBRF-E and ELBRF-B braced frames. *Steel and Composite Structures*, 37(5), pp.571-587. doi: 10.12989/scs.2020.37.5.571
- [23] Computers and Structures Inc., 2022. *ETABS 2022*. Walnut Creek, CA: Computers and Structures Inc.
- [24] Federal Emergency Management Agency (FEMA), 2009. *FEMA P695: Quantification of Building Seismic Performance Factors*. Washington, D.C.: FEMA.
- [25] American Society of Civil Engineers (ASCE), 2022. *ASCE 7-22: Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures*. Reston, VA: ASCE.
- [26] Hadinejad, A., Asghari, A. and Marefat, M.S., 2025. Evaluation of the FEMA P695 methodology for quantification of seismic performance factors in dual steel SCBF-SMF structures. *Structures*, 71, p.108172. doi: 10.1016/j.istruc.2024.108172
- [27] Asghari, A. and Azimi Zarnagh, B., 2017. Evaluation of sensitivity of CBFs for types of Bracing and story numbers. *Scientia Iranica*, 24(1), pp.40-52. doi: 10.24200/sci.2017.2375
- [28] Asghari, A. and Saharkhizan, S., 2019. Seismic design and performance evaluation of steel frames with knee-element connections. *Journal of Constructional Steel Research*, 154, pp.161-176. doi: 10.1016/j.jcsr.2018.11.011
- [29] Rezaee, M. and Asghari, A., 2024. Lateral-torsional buckling investigation of multi-tiers eccentrically braced frames with shear link beam. *Structures*, 68, p.107063. doi: 10.1016/j.istruc.2024.107063
- [30] Asghari, A. and Hosseini, S., 2024. *Seismic Behavior Assessment of Special Concentrically X-Braced Frame with Through Gusset Plate*. Preprint. doi: 10.21203/rs.3.rs-4251685/v1
- [31] American Institute of Steel Construction (AISC), 2022. *ANSI/AISC 360-22: Specification for Structural Steel Buildings*. Chicago, IL: AISC.
- [32] American Institute of Steel Construction (AISC), 2022. *ANSI/AISC 341-22: Seismic Provisions for Structural Steel Buildings*. Chicago, IL: AISC.
- [33] University of California, Berkeley, 2024. *OpenSees: The Open System for Earthquake Engineering Simulation*. Available at: <http://opensees.berkeley.edu> [Accessed 20 April 2026].
- [34] Asghari, A. and Pavir, A., 2025. Numerical Evaluation of Shear Strength of Members with I, H, Tubular and Box Sections in the panel zone of steel moment-resisting frames. *Modares Civil Engineering Journal*, 25(2), pp.85-100. doi: 10.22034/25.2.85
- [35] Alizadeh, E. and Asghari, A., 2025. Seismic behavior of off-center bilinear braced frames: focus on capacity-limited design and energy demand parameters. *Structures*, 80, p.109988. doi: 10.1016/j.istruc.2025.109988
- [36] Jouneghani, H.G., Haghollahi, A. and Beheshti-Aval, S.B., 2020. Experimental study of failure mechanisms in elliptic-braced steel frame. *Steel and Composite Structures*, 37(2), pp.175-191. doi: 10.12989/scs.2020.37.2.175
- [37] Applied Technology Council (ATC), 1992.
- [38] Jaber, V. and Asghari, A., 2022. Seismic behavior of linked column system as a steel lateral force resisting system. *Journal of Constructional Steel Research*, 196, p.107428. doi: 10.1016/j.jcsr.2022.107428
- [39] Eslamnia, H., Malekzadeh, H., Jalali, S.A. and Moghadam, A.S., 2023. Seismic energy demands and optimal intensity measures for continuous concrete box-girder bridges. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 165, p.107657. doi: 10.1016/j.soildyn.2022.107657
- [40] Jalali, S., Eslamnia, H. and Malekzadeh, H., 2021. *Source code of the customized OpenSees in Github repository*. Available at: <https://github.com/OpenSeesHouse/OpenSees> [Accessed 20 April 2021].

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم؟

Alizadeh, E. and Asghari, A., 2026. Analysis and capacity-limited design of crescent-shaped concentrically braced frames (CSCBFs) and evaluation of seismic performance factors and energy demand. *Modares Civil Engineering journal*, 26(4), pp.19-33.

