

نوع مقاله: یادداشت پژوهشی

چکیده

طراحی مناسب سیستم مهاربندی سازه، توانایی جذب و اتلاف انرژی کل سازه را طی وقوع زلزله و طوفان‌های شدید افزایش می‌دهد. از جمله روش‌های کارآمد در کاهش نیروهای غیرخطی وارد بر سازه، تشکیل مفاصل پلاستیک در اعضای سیستم مهاربندی است. با ایجاد مفاصل پلاستیک در مهاربندها، بزرگی نیروهای وارده بر ستون‌ها و تیرهای سازه کاهش می‌یابد. لذا در پژوهش حاضر، در ابتدا با استفاده از پرسشنامه‌ای با شش معیار، نظرات اساتید دانشگاه و دانشجویان مقطع دکتری سازه در مورد مهم‌ترین پارامترهای سنجش معیار پلاستیک سازه، گردآوری می‌شود. داده‌ها با روش تحلیل سلسله‌مراتبی با نرم‌افزار Expert Choice تحلیل و اولویت‌بندی می‌شوند. سپس، ۱۰ سیستم مهاربندی فولادی شامل مهاربندهای مورب، دروازه‌ای، هفتی، هشتی، زانویی، لوزی، و اگر با تیر پیوند افقی کناری، زیپر، ضربدری، و اگر با تیر پیوند افقی میانی و قاب خمشی فولادی با نرم‌افزار SAP2000 مدل‌سازی می‌شوند. سازه‌های فولادی در ۴ و ۸ طبقه مدل‌سازی می‌شوند. سازه‌ها طراحی و تحت تحلیل استاتیکی غیرخطی با طیف طرح استاندارد ۲۸۰۰، آنالیز و مقایسه عملکردی می‌شوند. نتایج نشان داد که معیار مفصل پلاستیک با وزن آماری ۰/۴۲۴، به‌عنوان مهم‌ترین پارامتر سنجش عملکرد پلاستیک سازه است. در بخش بررسی عملکرد مفصل پلاستیک، نتایج نشان داد که مهاربند و اگر با تیر پیوند افقی میانی (در سازه‌ی ۴ طبقه) و مهاربند زیپر (در سازه‌ی ۸ طبقه)، بیشترین توانایی را در ایجاد مفاصل پلاستیک با سطوح عملکردی بالاتر دارند. استفاده از تمامی مهاربندهای مذکور در قاب فولادی، موجب افزایش تعداد و ارتقای سطح عملکرد مفاصل پلاستیک، در مقایسه با قاب خمشی فولادی می‌شود.

واژگان کلیدی: سازه فولادی، مفصل پلاستیک، تحلیل پوش‌اور، تحلیل سلسله‌مراتبی، سیستم‌های مهاربندی نوین.

ارزیابی و مقایسه عملکرد پلاستیک قاب‌های فولادی دارای ده نوع مهاربند نوین طی تحلیل‌های پوش‌اور

مسعود مهدوی

دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه سازه، دانشکده فنی و مهندسی،
دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران،
M.Mahdavi@email.kntu.ac.ir

۱- مقدمه

مهندسان برای تعیین رفتار سازه طی زلزله و پس از آن، به بررسی معیارهای عملکردی سازه از جمله رفتار غیرخطی پارامترهایی همچون نیرو، تغییر شکل و مکانیسم تسلیم سازه می‌پردازند (Guo & Cheng, 2023; Abdolmohammadi et al., 2024). معیارهای طراحی سازه شامل نیروهای جانبی و مقاومت اعضا، مکانیسم تسلیم سازه، جابه‌جایی طبقات و سطح عملکردی سازه، در هنگام طراحی سازه باید به دقت بررسی و طراحی شود

(Liang & Yin, 2023; Firoj et al., 2022). در ناحیه‌ی عملکردی پلاستیک سازه، معیارهای تغییر مکان نسبی هدف و مکانیسم تسلیم (برای پاسخ بهینه و ترمیم آسیب‌های پس از زلزله) بسیار مهم و برای سنجش رفتار سازه، بسیار مهم است (Li et al., 2021; Cortez et al., 2022; Sunil & Kamatchi, 2022). به‌طور کلی در طراحی پلاستیک سازه، طراح باید نیروی طراحی و ابعاد اعضا را در سطح ریسک معین (طیف طراحی)

همکاران (Shao et al., 2023) به سنجش طول مفاصل پلاستیک در ستون‌ها اقدام کردند. آنها رابطه‌ای پیشنهادی برای سنجش عملکرد مفاصل پلاستیک ارائه دادند که بسیار مهم و کاربردی است. دانگ و همکاران (Dang et al., 2023) به بررسی قاب فولادی نیمه‌سخت، با استفاده از مدل پیشنهادی سنجش مفاصل پلاستیکی پرداختند. آنها مفاصل پلاستیک را به‌عنوان مهم‌ترین معیار در ارزیابی عملکرد پلاستیک سازه، معرفی کردند. طلوع-کیان و کروز-نوگر (Tolou Kian & Cruz-Noguez, 2023) به بررسی مفاصل پلاستیک در دیوارهای برشی بتن آرمه (به‌عنوان مهم‌ترین معیار پیشنهادی پژوهش در بررسی عملکرد پلاستیک سازه) پرداختند. قمری و شوشتری (Ghamari & Shooshtari, 2019) توانستند تا روشی نوین برای طراحی پلاستیک مبتنی بر عملکرد (PBPD)^۱ برای سازه‌های فولادی پیشنهاد کنند. نتایج نشان داد که مدل پیشنهادی آنها (PBPD-3D) معیار تیر ضعیف-ستون قوی را برآورده می‌کند. دینگ و همکاران (Ding et al., 2023)، عملکرد لرزه‌ای ستون و مکانیسم مفاصل پلاستیک در قاب فولادی را با روش المان محدود بررسی کردند. نتایج نشان داد که ارتفاع بحرانی ستون در محل ایجاد مفاصل پلاستیک قرار دارد. یانگ و همکاران (Yang et al., 2023) به ارزیابی عملکرد لرزه‌ای اتصال ستون به تیر، طی تشکیل مفاصل پلاستیک طی پرداختند. نتایج نشان داد که مفاصل مصنوعی پلاستیک ایجاد شده توسط طراحان، می‌تواند شرایط مناسبی را برای ارتقای عملکرد سازه ایجاد کند. ژانگ و همکاران (Zhang et al., 2023) به بررسی عملکرد لرزه‌ای سازه‌های بتنی دارای سیستم مهاربندی واگرا پرداختند. در مدل‌سازی نرم‌افزاری، تیرهای فولادی دارای پیوندهای برشی بوده و بر اساس رفتار پلاستیک طراحی شدند. در این مطالعه، قاب‌های ۶ و ۹ طبقه با نرم‌افزار SAP2000 طراحی و تحلیل شدند. نتایج نشان داد که مکانیسم برشی الاستوپلاستیک مینا در طراحی پلاستیک، بسیار شبیه به نتایج تحلیل غیرخطی است. کیان و همکاران (Qian et al., 2023) به انجام مطالعات آزمایشگاهی در راستای بررسی عملکرد لرزه‌ای پایه‌های پل، در

تعیین کند (Mahdavi, 2023). لیکن در طراحی الاستیک، بارهای طراحی به‌صورت الاستیک (خطی) فرض می‌شوند (Song & Zhang, 2023). با انجام تحلیل الاستیک، نیروهای داخلی در اعضا، تعیین و برحسب مقاومت دلخواه (و نه مقاومت نهایی) طراحی می‌شود (Liu et al., 2023). در ناحیه‌ی پلاستیک سازه، حد تسلیم و مکانیسم آن در استحکام نهایی اعضای سازه اعمال می‌شود (Cortez et al., 2022). به‌طور کلی، در روش پلاستیک (غیرخطی) برخلاف روش الاستیک (خطی)، طراحی با مقاومت نهایی اعضا (مطابق با مکانیسم تسلیم سازه) انجام می‌شود (Mahdavi et al., 2023). در روش طراحی پلاستیک، مکانیسم تسلیم مناسب برای سازه انتخاب می‌شود که باید تعادل کافی بین بارهای طراحی و مقاومت مورد نیاز در اعضای تسلیم شونده، وجود داشته باشد (Yuan & Zhang, 2024). با حل معادلات تعادل، مقاومت لازم برای طراحی اعضای تعیین می‌شود (Zhang et al., 2023). پس از طراحی اعضای تسلیم شونده، اعضای غیر تسلیم شونده، طراحی شده و با انجام تحلیل الاستیک برای اعضای کل سازه (در حالت حدی نهایی) طراحی پایان می‌یابد (Mahdavi et al., 2024; Amirmojahedi et al., 2023). شناخت پارامترهای نشانگر عملکرد پلاستیک سازه از دیدگاه‌های مختلفی شامل طراحی صحیح سازه، کنترل لرزه‌ای صحیح سازه در هنگام زلزله و مقاوم‌سازی اعضا پس از زلزله، ضروری و کاربردی است. وانگ و همکاران به ارزیابی طول مفاصل پلاستیک در پایه‌های پل پرداخته و روابطی پیشنهادی برای بررسی سطح عملکردی مفاصل پلاستیک ارائه دادند (Wang et al., 2023). جین و همکاران به بررسی تأثیر ابعاد سازه بر ساختار مفاصل پلاستیک در ستون‌های فولادی پرداختند. نتایج نشان داد که طول مفصل پلاستیک، با افزایش عرض ستون، افزایش می‌یابد. همچنین، افزایش نسبت عرض به ضخامت در ستون، موجب کاهش طول مفصل پلاستیک می‌شود (Jin et al., 2023). لی و همکاران (Lee et al., 2023) به بررسی مفاصل پلاستیک در قاب‌های فولادی پرداختند و روابطی را برای تخمین مفصل پلاستیک ارائه دادند. شائو و

شبکه عصبی پرداختند. در پژوهش، مفاصل پلاستیک معیاری بسیار مهم و کاربردی برای سنجش عملکرد پلاستیک سازه، معرفی شده است. ژو و همکاران (Zhou et al., 2022) توانستند تا روش جدیدی برای بررسی مفاصل پلاستیک طی کماتش قاب فولادی، پیشنهاد کنند. در روش مفصل پلاستیک ترمیم شونده‌ی پیشنهادی، عضو مورد نظر به صورت فشرده فرض می‌شود و کاهش مقاومت توسط کماتش موضعی لحاظ نمی‌شود.

ژو و همکاران (Zhou et al., 2022) توانستند تا روش جدید پیشنهادی برای بررسی مفصل پلاستیک در ستون‌های فولادی با استحکام بالا تحت بارهای چرخه‌ای پیشنهاد دهند. هان و همکاران (Han et al., 2022) توانستند تا رفتار چرخه‌ای ستون‌های لوله‌ای و مربعی پر شده از بتن با ناحیه‌ی مفصل پلاستیک سخت‌شده را بررسی کنند. نتایج نشان داد که سخت‌کننده‌ی مفاصل پلاستیک می‌تواند کماتش موضعی ستون را به تعویق انداخته و ساختار کماتش موضعی را به نحو مطلوبی تغییر دهد. ژو و همکاران (Zhou et al., 2022) توانستند تا مدل مفصل پلاستیک ترمیم‌شده‌ی مرتبه دوم با موقعیت دلخواه را برای طراحی عملکردی قاب فولادی توسعه دهند. نتایج نشان داد که روش پیشنهادی بسیار کارآمد و نشانگر خوبی برای عملکرد پلاستیک قاب است. ژانگ و همکاران (Zhang et al., 2023) به بررسی پاسخ چرخه‌ای ستون‌های بتنی پیش‌ساخته در ناحیه مفاصل پلاستیک اقدام کردند. آنها مفصل پلاستیک را به عنوان مهم‌ترین قسمت ستون در تغییرات عملکرد پلاستیک سازه و بخش غیرخطی آن، معرفی و پیشنهاد کردند. یوان و همکاران (Yuan et al., 2023) به بررسی مکانیسم تغییر شکل مفاصل پلاستیک پیشنهادی در قاب فولادی پرداختند. آنها اتصال پیشنهادی تیر به ستون نوین دارای مفصل پلاستیک را برای بازیابی عملکرد سازه پس از زلزله پیشنهاد کردند. تراور و همکاران (Teraver et al., 2023) به بررسی مفاصل پلاستیک در آلیاژ حافظه‌دار (SMA)^۲ برای تقویت برشی تیرهای بتن مسلح پرداختند. نتایج نشان داد که استفاده از آلیاژ مذکور،

محدوده مفاصل پلاستیک اقدام کردند. نتایج نشان داد که شکل‌پذیری و ظرفیت اتلاف انرژی، معیارهای مناسبی برای بررسی عملکرد پلاستیک است.

کیائو و همکاران (Qiao et al., 2023) به بررسی مفاصل پلاستیک و مکانیسم آسیب در ستون‌های بتن مسلح پرداختند. نتایج نشان داد که مفاصل پلاستیک در تمام ستون‌های مورد بررسی ایجاد شده و می‌تواند معیار مناسبی برای بررسی سطح عملکرد پلاستیک سازه باشد.

هوانگ و همکاران (Huang et al., 2022) به بررسی دریافت قاب‌های بتنی با مفاصل پلاستیک مصنوعی پرداختند. نتایج نشان داد که دریافت بین طبقه‌ای، معیار مناسبی برای ارزیابی عملکرد پلاستیک سازه است. لمز و همکاران (Lemes et al., 2021) به بررسی تیرهای کامپوزیت با رویکرد مفاصل پلاستیک اقدام کردند. آنها رابطه‌ای پیشنهادی برای بررسی عملکرد پلاستیک تیرها ارائه داده و طول مفاصل پلاستیک در دیوارهای برشی بتن مسلح را بررسی کردند. نتایج نشان داد که بین تغییر شکل نهایی و طول مفاصل پلاستیک معادل، ارتباط مستقیمی وجود دارد. گو و وانگ (Guo & Wang, 2023) به ارزیابی طول مفاصل پلاستیک ایجاد شده در دیوارهای برشی مهاربندی شده پرداختند. بدین منظور، ۵۱ مدل المان محدود با نرم‌افزار اپنسیس مدل‌سازی شد. نتایج نشان داد که یک رابطه‌ی مستقیم بین تغییر شکل نهایی و طول مفاصل پلاستیک معادل وجود دارد. جین و همکاران (Jin et al., 2022) به بررسی طول مفاصل پلاستیک در ستون‌های مربعی و پیش‌بینی آنها پرداختند. نتایج نشان داد که افزایش نسبت بار محوری، موجب افزایش طول مفاصل پلاستیک می‌شود. همچنین، با افزایش نسبت ابعاد و مقاومت فشاری بتن، طول مفاصل پلاستیک کاهش می‌یابد. شین و کیم (Shin & Kim, 2023) به بررسی دوران مفاصل پلاستیک در مهاربند‌های فولادی، با استفاده از مدل‌های پیشنهادی پرداختند. سووال و گونر (Suwal & Guner, 2023) به بررسی مفاصل پلاستیک در ناحیه‌ی اتصال تیر به ستون بتن مسلح، با استفاده از

عملکردی آنها، به طور هم‌زمان و در یک مقاله، موضوعی است که تاکنون در مطالعات بسیار کمی در سطح جهان وجود داشته است. این مقایسه کمک خواهد کرد تا حین انجام بارگذاری‌های مشابه بر تمام سازه‌های فولادی، مقایسه‌ای جامع و کامل انجام گیرد و نقاط قوت و ضعف تمام مهاربندهای فوق‌الذکر، در یک مطالعه‌ی منسجم، ارزیابی و نتایج حاصل، دارای ارزش مناسب برای کاربرد در سایر پژوهش‌های آتی باشد.

۲- روش انجام پژوهش

۲-۱- فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP)

این روش توسط توماس ال. ساعتی (Zhao et al., 2023) ابداع شد و به عنوان روشی عملی در آنالیز مسائل مهندسی استفاده می‌شود (Iaria & Susca, 2022). این روش مبتنی بر تصمیم‌گیری‌های چندمعیاره است. در این روش، مشاهدات و افکار مدیر پروژه مرتب می‌شود. سپس، عوامل بر اساس مقایسه‌های زوجی تجزیه و تحلیل شده و مدیر پروژه می‌تواند آنها را شناسایی کند. در پایان تحلیل، عوامل مورد نظر، اولویت‌بندی می‌شوند (Lu et al., 2022; Tuysuz & Kahraman, 2023). مزایای مهم تحلیل سلسله‌مراتبی عبارتند از: (الف) ارزیابی میزان سازگاری نظرات مختلف، (ب) انجام مقایسه‌های زوجی بین تمام عوامل مؤثر بر پروژه (هدف)، (ج) امکان ایجاد معیارها و زیرمعیارهای مختلف در پروژه‌ی ارزیابی هدف (Ayyildiz et al., 2023). در تحلیل سلسله‌مراتبی، مدیر پروژه می‌تواند تا وزن‌های آماری تمام معیارها را تعیین کند؛ بنابراین، مدیر پروژه می‌تواند زیرمعیارها و گزینه‌های مختلفی برای نیل به خواسته‌های پژوهش، ایجاد کرده و بسط و گسترش دهد.

۲-۲- تحلیل سلسله‌مراتبی (گام اول پژوهش)

در بخش اول پژوهش حاضر، نظرات کارشناسان اعم از اساتید دانشگاه و دانشجویان دکتری (در رشته مهندسی عمران-گرایش سازه) جمع‌آوری شد. برای گردآوری نظرات، از

موجب افزایش مقاومت برشی (۲۸-۱۰۹ درصد) و افزایش دوران خمشی (۵۹-۳۹۵ درصد) می‌شود. دی و همکاران (Di et al., 2022) توانستند تا رفتار هیسترتیک ستون‌های کامپوزیت دارای مفاصل پلاستیک تقویت‌شده را بررسی کنند. نتایج نشان داد که استفاده از ژاکت (پوشش) کامپوزیت سیمانی، موجب کاهش ناحیه‌ی مفاصل پلاستیک در ستون‌های پل می‌شود. لی و همکاران (Lee et al., 2021) توانستند تا طول مفاصل پلاستیک در ستون‌های بتن مسلح مستطیلی را تخمین بزنند. نتایج نشان داد که استفاده از پوشش بتنی باعث کاهش مفاصل پلاستیک می‌شود. فو و همکاران (Fu et al., 2023) موفق شدند تا روشی را برای محاسبه‌ی طول مفاصل پلاستیک توسط آزمون شبه‌استاتیک پیشنهاد کنند. نتایج نشان داد که نسبت تراکم محوری، بیشترین تأثیر را بر مفاصل پلاستیک دارد. نگوین و تان (Nguyen and Tan, 2023) به بررسی جابه‌جایی مفاصل پلاستیک در سازه‌های بتن آرمه، طی خرابی پیش‌رونده پرداختند. نتایج نشان داد که افزایش ضخامت فولاد در محدوده‌ی مفاصل، موجب کاهش ظرفیت خمشی مفاصل پلاستیک می‌شود. کیم و همکاران (Kim et al., 2022) به بررسی رفتار خمشی تیرهای بتن مسلح در ناحیه‌ی مفاصل پلاستیک پرداخته و معیار مفصل پلاستیک را به عنوان مهم‌ترین پارامتر بررسی عملکرد پلاستیک سازه معرفی کردند.

در پژوهش حاضر، مهم‌ترین معیارهای بررسی عملکرد پلاستیک سازه از دیدگاه‌های سازه‌ای و عملکردی، مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور، معیارهای بررسی عملکرد پلاستیک سازه (با استفاده از پرسشنامه و اولویت‌بندی داده‌ها با روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP))^۳ بررسی می‌شود. سپس، مفاصل پلاستیک (مهم‌ترین معیار عملکرد پلاستیک بر اساس نتایج مطالعه‌ی حاضر) در ۱۰ نوع قاب فولادی مهاربندی شده با مهاربندهای مورب، دروازه‌ای، هفتی، هشتی، زانویی، لوزی، واگرا با تیر پیوند افقی کناری، زیپر، ضربدری، واگرا با تیر پیوند افقی میانی و قاب خمشی فولادی، بررسی و مقایسه می‌شود. وجود انواع سیستم‌های مهاربندی و انجام مقایسات سطوح

$$n = \frac{(z_{\infty}^2 \times s^2)}{d^2} \quad (1)$$

پارامترها در رابطه‌ی (۱) بدین شرح است: S : برابر با حاصل ضرب پارامتر p (احتمال موفقیت) و پارامتر q (احتمال شکست) که در این پژوهش، برابر با $0/5$ است. z_{∞}^2 : در سطح خطای مفروض $(0/5)$ ، برابر با $1/9$ است. (Malkewitz et al., 2023).

d : بیانگر خطای محاسبات است. در این پژوهش، خطای محاسبات برابر $0/05$ فرض شده است که مقداری متعارف در اکثریت مطالعات علمی است (Malkewitz et al., 2023).

بر اساس رابطه (۱)، تعداد افراد جامعه‌ی آماری برابر ۳۵ نفر تعیین شد. لیکن، برای افزایش اعتبار نتایج پژوهش، حجم نمونه به ۷۰ نفر افزایش یافت. هر پرسشنامه ۱۵ سؤال دارد که پاسخ به ۹ سؤال درجه انجام می‌شود (Liu et al., 2023; Asilhoglu & Cay, 2023). در جدول (۲)، روش ۹ درجه‌ی ال.ساعتی در مقایسه‌ی زوجی پرسشنامه‌ها ارائه شده است.

پایایی و روایی پرسشنامه، برای افزایش کیفیت نتایج پژوهش مهم است (Iaria & Susca, 2022; Lu et al., 2022). در پژوهش حاضر، برای بررسی پایایی از روش آلفای کرونباخ (Zakariya, 2022) استفاده می‌شود که فرمول ریاضی آن، طبق رابطه‌ی (۲) است:

$$\alpha = \frac{K}{K-1} \left(1 - \sum \frac{(S_i^2)}{S^2} \right) \quad (2)$$

پارامترها در رابطه‌ی (۲) بدین شرح است: α : ضریب آلفای کرونباخ، K : تعداد پارامترها، S_i^2 : واریانس در پارامتر شماره‌ی i ، S^2 : واریانس کل آزمون (واریانس مجموع نمرات پارامتر) (Zakariya, 2022).

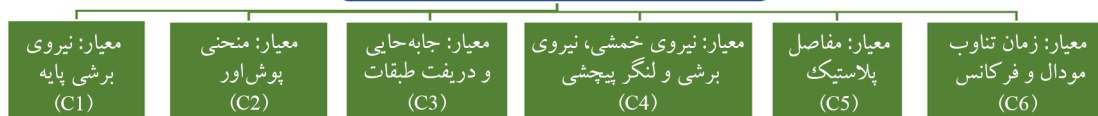
پرسشنامه‌ی محقق ساخته دارای شش معیار استفاده شد. به‌طور کلی، تحلیل سلسله‌مراتبی دارای چهار مدل مختلف است که انواع آن در جدول (۱) ارائه می‌شود (Iaria & Susca, 2022; Ayyildiz, 2016). در پژوهش حاضر، از مدل ۱ (ارائه شده در جدول ۱) برای انجام تحلیل سلسله‌مراتبی استفاده شده است.

جدول (۱): مدل‌های موجود در روش تحلیل سلسله‌مراتبی (Ayyildiz et al., 2023)

نوع مدل	پارامتر	هدف	معیار	زیرمعیار	گزینه
مدل ۱	دارد	دارد	دارد	ندارد	ندارد
مدل ۲	دارد	دارد	دارد	دارد	ندارد
مدل ۳	دارد	دارد	دارد	ندارد	دارد
مدل ۴	دارد	دارد	دارد	دارد	ندارد

عوامل سازنده‌ی تحلیل سلسله‌مراتبی شامل (الف) هدف، (ب) معیارها، (پ) زیرمعیارها و (ت) گزینه‌ها است (Khalil, 2016). در شکل (۱)، ساختار تحلیل سلسله‌مراتبی در پژوهش حاضر، ارائه شده است. داده‌های گردآوری شده با روش تحلیل سلسله‌مراتبی در نرم‌افزار Expert Choice (Erdogan et al., 2017) تحلیل می‌شود. معیارهای پژوهش با بررسی منابع کتابخانه‌ای از جمله مقالات و کتب که مهم‌ترین آنها شامل مراجع (Li et al., 2022; Jiang et al., 2023; Zhao et al., 2023; Gong et al., 2023; Hoult & de Almeida, 2022; Shen et al., 2021; Zhao et al., 2023; Wu, 2022; Oehlers & Seracino, 2004; Aydenlou, 2020) است، تعیین گردید. اندازه‌ی جامعه آماری (n) با استفاده از فرمول کوکران (برای جمعیت‌هایی با اندازه‌ی نامشخص) تعیین شد که روش به کار گرفته شده، بر اساس رابطه‌ی (۱) است:

هدف: معیارهای بررسی عملکرد پلاستیک سازه



شکل (۱): ساختار انجام تحلیل سلسله‌مراتبی در پژوهش حاضر.

Choice و ارائه‌ی نتایج، معیارها با عنوان C1 تا C6 نام‌گذاری می‌شوند که در نمودار شکل (۱)، قابل مشاهده است.

۲-۳- مدل‌سازی نرم‌افزاری (گام دوم پژوهش)

در پژوهش حاضر، ارتفاع‌های ۱۲ و ۲۴ متر برای قاب‌های فولادی در نظر گرفته شد. در تمامی سازه‌ها، ارتفاع طبقات یکسان و برابر با ۳ متر است. مصالح به کار رفته در مدل‌سازی، فولاد St37 است که مشخصات آن در جدول (۳) ارائه می‌شود. زمین محل احداث پروژه، دارای ریسک نسبتاً بالایی است (۳/۰/۴)، کاربری آن مسکونی (I=۱) و روی خاک نوع ۳ ساخته شده است (Zarrineghbal et al., 2021). ضرایب C (ضریب زلزله) و K (ضریب ارتفاع سازه) بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ ساختمان محاسبه می‌شود (Moghaddam et al., 2021; Mansouri, 2017). پارامترهای لازم برای تعیین ضرایب لرزه‌ای در جدول (۴) ارائه می‌شود. بارگذاری گسترده وارد بر قاب‌ها شامل بار ثقلی (بارهای مرده و زنده به ترتیب ۵۰۰ و ۲۰۰ کیلوگرم بر متر) (Eshagh et al., 2020; Taghikhani et al., 2024) و بار جانبی (بار لرزه‌ای برحسب ضرایب زلزله و ارتفاعی وارد شده در نرم‌افزار طی مدل‌سازی (مراجعه به جدول ۴) است. بارگذاری غیرخطی با استاندارد ۲۸۰۰ (Mansouri, 2017) و ترکیب بارهای خطی انجام گرفت (شکل ۲).

جدول (۲): طیف ۹ درجه برای مقایسه امتیازدهی معیارها در پژوهش حاضر (Liu et al., 2023; Asiluglu & Cay, 2023)

ردیف	شرح وضعیت	(الف) وضعیت شاخص (ب) در مقایسه با شاخص	ارزش
۱	شاخص (الف) و (ب) اهمیت یکسانی دارند.	اهمیت برابر	۱
۲	شاخص (الف) کمی مهم‌تر از (ب) است.	برتری نسبی	۳
۳	شاخص (الف) مهم‌تر از (ب) است.	برتری زیاد	۵
۴	شاخص (الف) بسیار مهم‌تر از (ب) است.	برتری بسیار زیاد	۷
۵	شاخص (الف) ارجح از (ب) است.	برتری کامل	۹
۶	ارزش‌ها مقدار متوسط را بیان می‌کنند.	متوسط	۸-۶ / ۴-۲

آلفای کرونباخ در پژوهش حاضر برابر با ۰/۹۰۱۴ محاسبه شد. در مطالعات، مقادیر بالای ۰/۹ بسیار مناسب و قابل قبول است (Cheng et al., 2023; Cella & Martin, 2022). در نتیجه، پایایی پرسشنامه تأیید می‌شود. همچنین، روایی پرسشنامه توسط اساتید دانشگاه و از طریق اصلاح معیارهای پیشنهادی اولیه، انجام شد. مجموعاً، پرسشنامه از پایایی و روایی قابل قبولی برخوردار بوده و برای گردآوری نظرات کارشناسان و خبرگان امر، مناسب است. همچنین، برای سهولت در ورود داده‌ها به نرم‌افزار Expert

جدول (۳): مشخصات فولاد St37 به کار رفته در مدل‌سازی نرم‌افزاری سازه‌های فولادی (Taheri et al., 2021).

شاخص	تنش تسلیم حداقل	تنش کششی حداقل	تنش تسلیم مؤثر	تنش کششی مؤثر	مدول الاستیسیته	ضریب پواسون
مقدار عددی (واحد)	۲۴×۱۰ ^۶ (کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع)	۲۷×۱۰ ^۶ (کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع)	۲۷/۶×۱۰ ^۶ (کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع)	۴۲/۵۵×۱۰ ^۶ (کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع)	۲/۰۳۹×۱۰ ^{۱۱} (کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع)	۰/۳

جدول (۴): پارامترهای لرزه‌ای در قاب‌های فولادی پژوهش حاضر (Zarrineghbal et al., 2021; Mansouri, 2017)

C	B	N	B ₁	T ₀ (ثانیه)	T _S (ثانیه)	S ₀	S	K	T (ثانیه)	H (متر)	نوع قاب
C _(R_u = 5.5) = ۰/۱۵	۲/۷۵	۱	۲/۷۵	۰/۱۵	۰/۷	۱/۱	۱/۷۵	۱	۰/۵۱	۱۲	۴ طبقه
C _(R_u = 7) = ۰/۱۱۸	۲/۲۹	۱/۰۴	۲/۲۱	۰/۱۵	۰/۷	۱/۱	۱/۷۵	۱	۰/۸۷	۲۴	۸ طبقه
C _(R_u = 5.5) = ۰/۱۲۵											
C _(R_u = 7) = ۰/۰۹۸											

نکته: پارامترها در جدول (۴) به این شرح هستند: H: ارتفاع کل سازه، T: زمان تناوب سازه، B₁: ضریب شکل طیف، N: ضریب اصلاح طیف، B: ضریب بازتاب سازه، R_u: ضریب رفتار سازه و S₀، S، T_S و T₀: ضرایب مرتبط با نوع زمین بستر و میزان خطرپذیری زلزله در منطقه مورد مطالعه.

در پژوهش حاضر، ۱۰ سیستم مهاربندی فولادی، طراحی و تحلیل می‌شوند که در جدول (۶)، معرفی و نام‌گذاری شده‌اند.

۳- نتایج

۳-۱- وزن‌دهی و اولویت‌بندی معیارها (روش AHP)

در این قسمت، نتایج تحلیل سلسله‌مراتبی (خروجی نرم‌افزار Expert Choice) ارائه می‌شود. در جدول (۷)، ماتریس مقایسه‌ای معیارها (میانگین داده‌های گردآوری شده از جامعه‌ی آماری) ارائه می‌شود.

جدول (۵): معرفی مقاطع در قاب‌های فولادی ۴ و ۸ طبقه.

نوع قاب	عضو	شماره طبقات	نوع مقطع
تیر	مهاربند	۱-۴	۱۶۰ IPE
		۱-۴	۴×۴۰×۸۰ TUBO
ستون	مهاربند	۱-۲	۱۸۰ HE
		۳-۴	۱۶۰ HE
تیر	مهاربند	۱-۸	۱۶۰ IPE
		۱-۸	۴×۴۰×۸۰ TUBO
ستون	مهاربند	۱-۲	۲۰۰ HE
		۳-۴	۱۸۰ HE
		۵-۶	۱۶۰ HE
		۷-۸	۱۴۰ HE

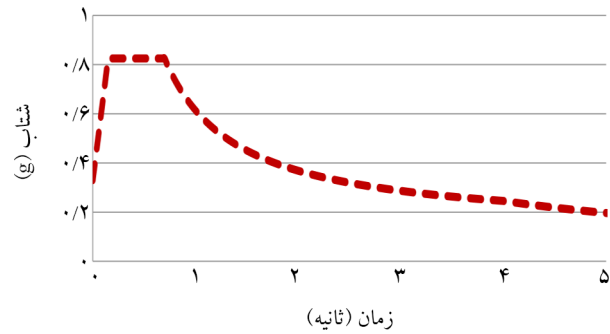
جدول (۶): مهاربند‌های طراحی شده با نرم‌افزار SAP2000 در پژوهش حاضر.

سیستم مهاربندی	مورب	دروازه‌ای	هشتی	زانویی	لوزی
عنوان	CBFD	CBFG	CBFIV	CBFK	CBFR
سیستم مهاربندی	هفتی	ضربدری	زیبر	واگرا با تیر پیوند افقی کناری	واگرا با تیر پیوند افقی میانی
عنوان	CBFV	CBFX	CBFZ	EBFF	EBFH

جدول (۷): ماتریس مقایسه‌ای معیارها در پژوهش حاضر.

معیار	C1	C2	C3	C4	C5	C6	وزن آماری	اولویت
C1	۱	-۶	۳	۲	-۳	-۵	۰/۰۴۵	۵
C2	-۶	۱	۹	۸	۴	۲	۰/۲۸۵	۲
C3	۳	۹	۱	-۲	-۶	-۷	۰/۰۶۹	۴
C4	۲	۸	-۲	۱	-۴	-۶	۰/۰۳۰	۶
C5	-۳	۴	-۶	-۴	۱	-۳	۰/۴۲۴	۱
C6	-۵	۲	-۷	-۶	-۳	۱	۰/۱۴۸	۳

نرخ ناسازگاری: ۰/۰۳



شکل (۲): طیف استاندارد ۲۸۰۰ ساختمان برای خاک نوع ۳ (Eshagh et al., 2019)

دو نوع بارگذاری غیرخطی شامل $G=1.1\text{Live}+1.1\text{Dead}$ و $\text{EXP}=1\text{E}$ بر روی قاب‌ها اعمال شد. Dead: بار مرده، Live: بار زنده و E: بار زلزله در راستای افقی است. محل تشکیل مفاصل پلاستیک در تیرها و ستون‌ها به ترتیب معادل $0.5H$ و $0.95H$ و در مهاربندها معادل $0.5H$ (طول عضو است). در پژوهش حاضر، قاب‌های مهاربندی شده با نرم‌افزار SAP2000.V14.2.2 طراحی شدند (Mahdavi, 2023; Mahdavi et al., 2023; Sabah et al., 2022). برای انجام تحلیل، از روش استاتیکی غیرخطی استفاده گردید (Mahdavi, 2020). با انجام تحلیل‌های استاتیکی خطی، مقاطع اعضا در قاب‌های فولادی ۴ و ۸ طبقه تعیین گردید که در جدول (۵) ارائه می‌شوند. لازم به ذکر است که تمام سازه‌ها با روش LRFD طراحی شده‌اند (Mahdavi et al., 2024).

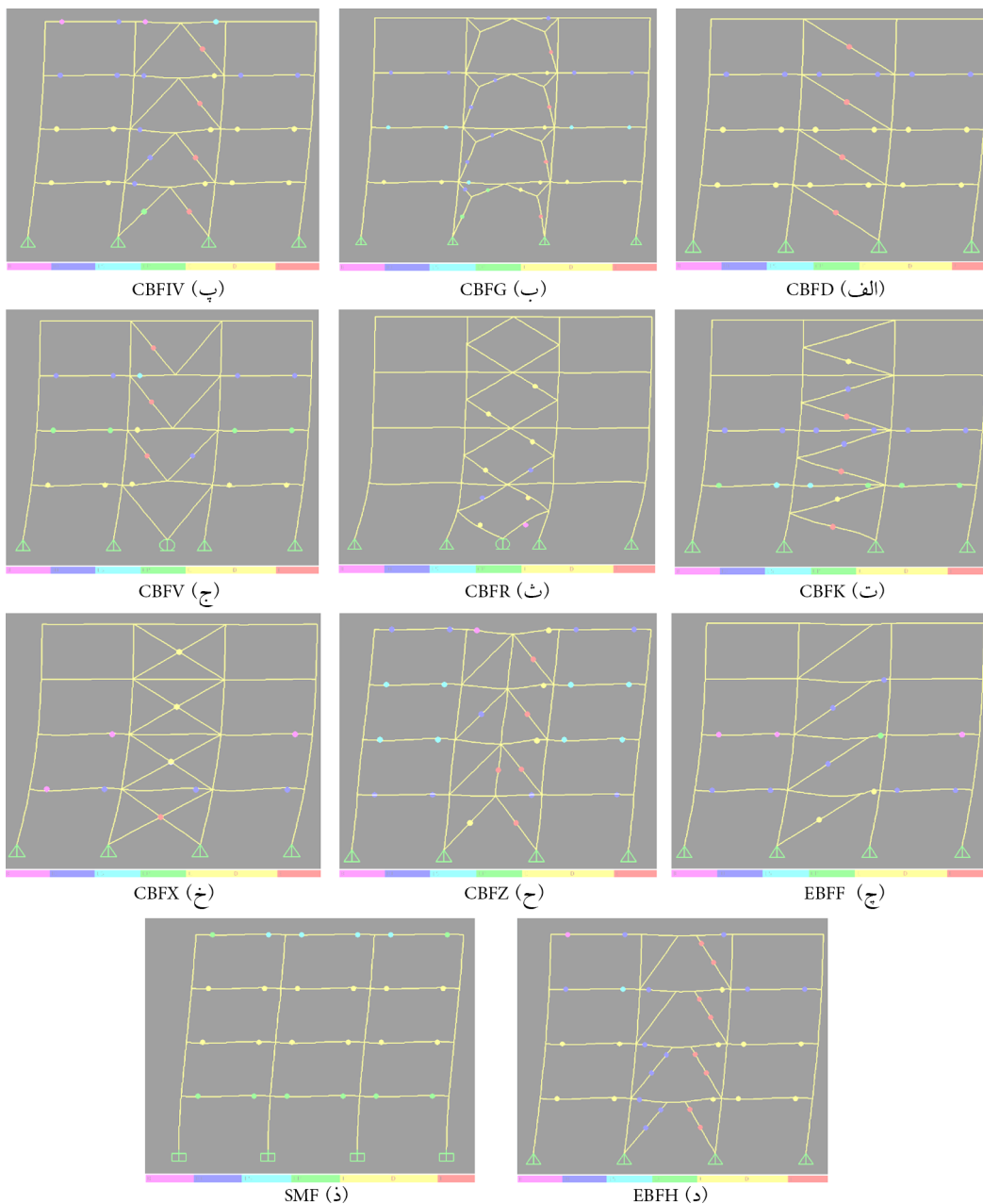
پلاستیک (غیرخطی) انتخاب شد. همچنین، ناسازگاری نتایج برابر $0/03$ است که چون مقادیر کمتر از $0/10$ در مطالعات، بسیار مناسب و قابل قبول است، لذا نتایج از نظر صحت سنجی تأیید می شود.

۳-۲- تجزیه و تحلیل غیر خطی (پوش اور)

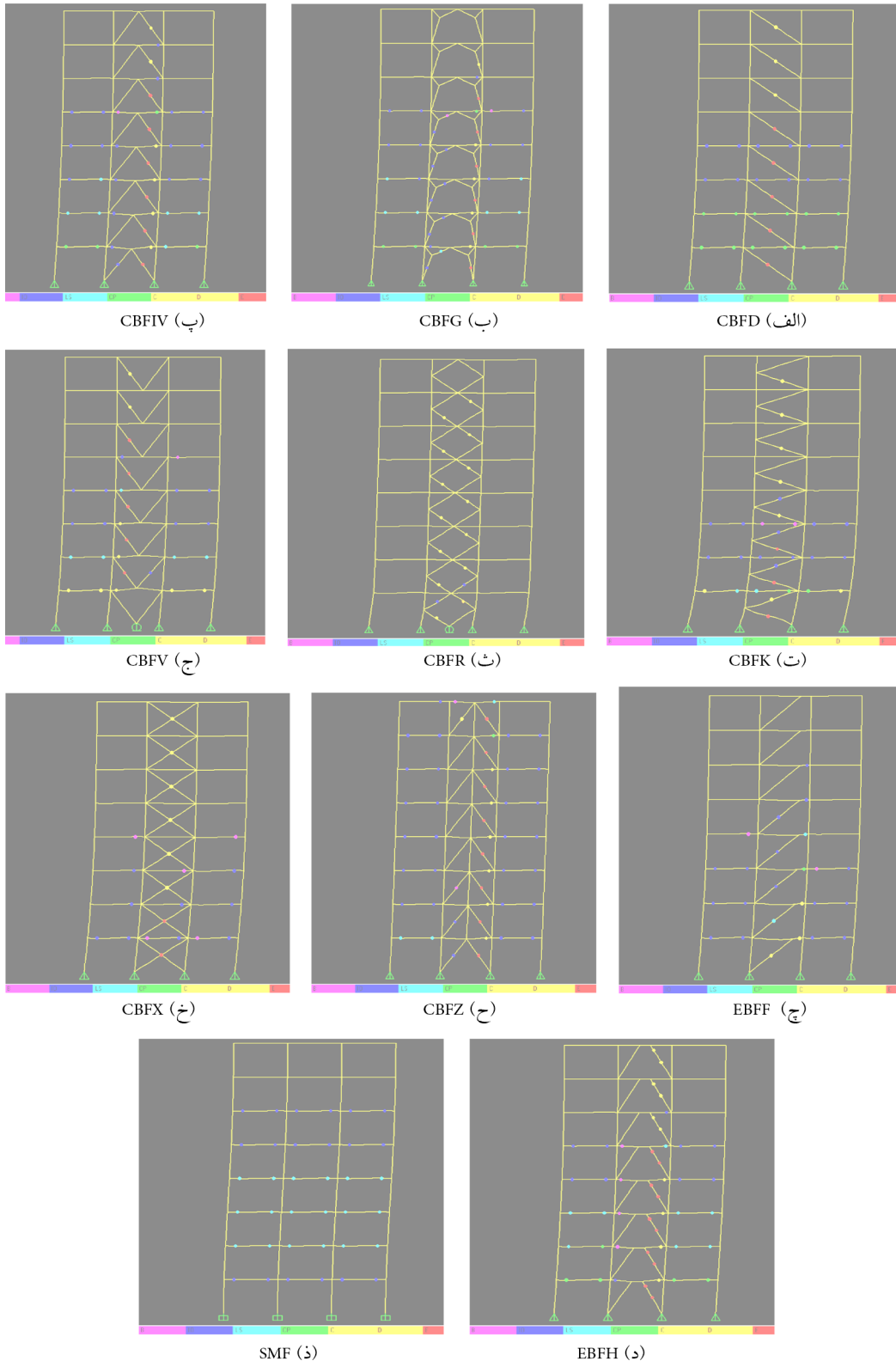
۳-۲-۱- مفاصل پلاستیک

در این بخش، مفاصل پلاستیک در قاب های فولادی تحت آنالیز پوش اور، تعیین و بررسی می شوند (شکل ۳ و ۴).

جدول (۷) نشان داد که معیار مفصل پلاستیک ($C5=0/424$) بهترین معیار برای ارزیابی عملکرد پلاستیک است. منحنی پوش اور ($C5=0/285$) در رتبه ی دوم و زمان تناوب مودال و فرکانس ($C5=0/148$) در رتبه ی سوم قرار دارند. همچنین، معیارهای (الف) جابه جایی و دریفت طبقه ($C3=0/069$)، (ب) نیروی خمشی و برشی و لنگر پیچشی در اعضا ($C4=0/030$) و (پ) نیروی برشی پایه ($C1=0/045$) پارامترهای مهم در ارزیابی عملکرد الاستیک سازه هستند. با توجه به نتایج، لولا پلاستیکی به عنوان معیار عملکرد



شکل (۳): مفاصل پلاستیک در اعضای قاب فولادی ۴ طبقه تحت تحلیل پوش اور



شکل (۴): مفاصل پلاستیک در اعضای قاب فولادی ۸ طبقه تحت تحلیل پوش اور.

جدول (۸) تعداد مفاصل پلاستیک و سطح عملکردی آنها را
 در قاب فولادی ۴ طبقه نشان می دهد.
 بیشترین و کمترین تعداد مفاصل پلاستیکی را در قاب ۴ طبقه ایجاد
 کردند. همچنین سیستم EBFH بهترین سطح عملکرد را در بین
 سیستم های مهاربندی داراست. جدول (۸) نشان داد که سیستم های EBFH و CBFR به ترتیب

جدول (۸): مفاصل پلاستیک در قاب‌های فولادی ۴ طبقه با سطوح عملکردی مختلف تحت تحلیل پوش اور.

سطح عملکردی کل	کل	E	D	C	CP	LS	IO	B	سیستم مهاربندی سازه
									سطح عملکردی
C	۲۲	۴	۰	۱۲	۰	۰	۶	۰	CBFD
IO	۲۹	۴	۰	۸	۲	۵	۱۰	۰	CBFG
C	۲۷	۴	۰	۱۱	۰	۱	۹	۲	CBFIV
IO	۱۹	۳	۰	۲	۴	۲	۸	۰	CBFK
C	۹	۰	۱	۵	۰	۰	۲	۱	CBFR
C	۱۹	۳	۰	۶	۴	۱	۵	۰	CBFV
نامعلوم	۱۰	۱	۰	۳	۰	۰	۳	۳	EBFF
IO	۲۷	۵	۰	۴	۰	۸	۹	۱	CBFZ
نامعلوم	۱۰	۱	۰	۳	۰	۰	۳	۳	CBFX
IO	۳۳	۸	۰	۱۱	۰	۱	۱۲	۱	EBFH
C	۲۴	۰	۰	۱۲	۸	۴	۰	۰	SMF

نکته: سطوح عملکردی بیان شده در جدول (۸)، به این شرح است: B: قابلیت استفاده بی‌وقفه، IO: قابلیت استفاده بی‌وقفه و زیرشاخه‌ای از سطح عملکردی B با عنوان B-1 است، LS: ایمنی جانی، CP: آستانه فروریزش، C: ایمنی جانی، D: ایمنی جانی محدود E: لحاظ نشده.

جدول (۹): مفاصل پلاستیک در قاب‌های فولادی ۸ طبقه با سطوح عملکردی مختلف تحت تحلیل پوش اور.

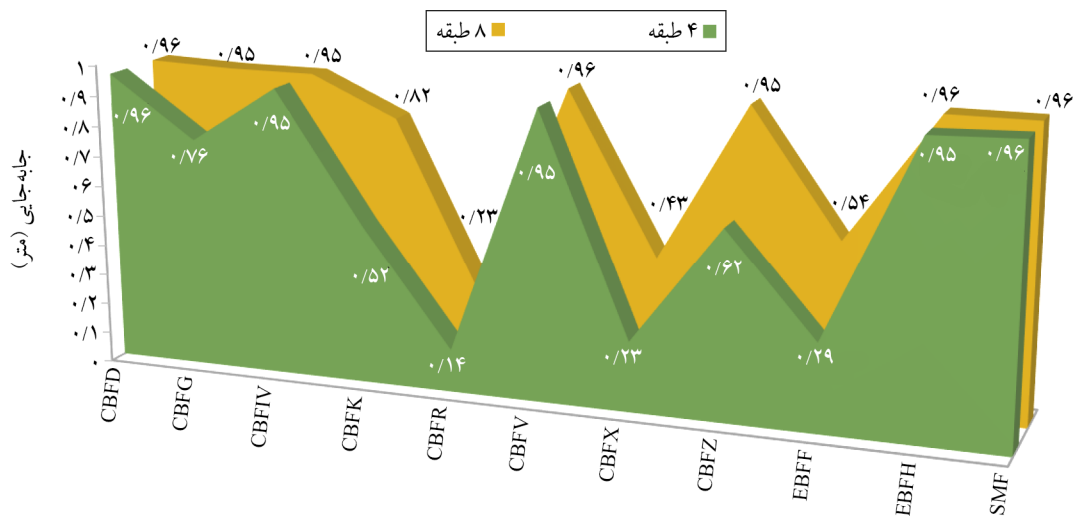
سطح عملکردی کل	کل	E	D	C	CP	LS	IO	B	سیستم مهاربندی سازه
									سطح عملکردی
نامعلوم	۳۰	۵	۰	۳	۱۲	۰	۱۲	۰	CBFD
IO	۴۳	۶	۰	۵	۴	۷	۱۹	۲	CBFG
IO	۴۱	۶	۰	۶	۴	۶	۱۸	۱	CBFIV
IO	۲۹	۳	۰	۷	۲	۲	۱۳	۲	CBFK
C	۱۶	۰	۱	۱۳	۰	۰	۲	۰	CBFR
IO	۳۰	۵	۰	۹	۰	۵	۱۰	۱	CBFV
IO	۲۴	۰	۰	۳	۱	۲	۱۶	۲	EBFF
IO	۴۹	۸	۰	۷	۰	۳	۲۹	۲	CBFZ
IO	۲۲	۲	۰	۶	۰	۰	۹	۵	CBFX
نامعلوم	۴۷	۱۰	۰	۱۰	۵	۸	۱۰	۴	EBFH
نامعلوم	۳۶	۰	۰	۰	۰	۱۸	۱۸	۰	SMF

۲-۳-۱- جابه‌جایی بیشینه

در این بخش، جابه‌جایی بیشینه در قاب‌های مهاربندی شده ارائه می‌شود. تحلیل‌ها با کنترل معیار جابه‌جایی هدف انجام می‌شود که در مدل‌سازی سازه، برابر با $0/96$ متر لحاظ می‌شود. شکل (۵) نمودار جابه‌جایی بیشینه در قاب‌های فولادی ۴ و ۸ طبقه تحت تحلیل پوش اور را نشان می‌دهد.

جدول (۹) تعداد مفاصل پلاستیک و سطح عملکردی آنها را

در قاب فولادی ۸ طبقه نشان می‌دهد. جدول (۹) نشان داد که سیستم‌های CBFZ و CBFR به ترتیب بیشترین و کمترین تعداد لولاهای پلاستیکی را در قاب فولادی ۸ طبقه ایجاد کردند. همچنین سیستم CBFZ بهترین سطح عملکرد را در بین سیستم‌های مهاربندی دارد.



شکل (۵): جابه‌جایی بیشینه در قاب‌های فولادی ۴ و ۸ طبقه تحت تحلیل پوش‌اور.

سازه، (ب) توانایی اعضا در اتلاف انرژی، (ج) سختی اعضا و سختی کل سازه باشند. لذا، بررسی مفاصل پلاستیک می‌تواند تا به‌طور کامل عملکرد غیرخطی سازه را شناسایی و معرفی کند.

نتایج نشان داد که مهاربندهای واگرای با تیر پیوند افقی میانی و زیر، بیشترین توانایی را در ایجاد مفاصل پلاستیک (با سطح عملکردی مناسب) به ترتیب در قاب‌های فولادی ۴ و ۸ طبقه دارند. همچنین مهاربند واگرای با تیر پیوند افقی میانی، بیشترین ظرفیت را در ایجاد مفاصل پلاستیک به کار برده است. این مزیت باعث می‌شود که مقدار زیادی از نیروهای زلزله توسط سیستم مهاربندی جذب شده و نیروی کمتری به تیرها و ستون‌های سازه وارد شود. لذا افزایش پایداری سازه در هنگام زلزله امکان‌پذیر بوده و ستون‌ها طی وقوع زلزله، استحکام بیشتری دارند.

نتایج نشان داد که افزایش ارتفاع قاب (از ۴ به ۸ طبقه) باعث افزایش تأثیرگذاری سیستم مهاربندی در بهبود سطح عملکردی سازه می‌شود. با بهبود سطح عملکرد سازه، سختی سازه در هنگام زلزله افزایش یافته و احتمال ایجاد آسیب‌های جزئی یا فروریزش کلی سازه کاهش می‌یابد. بنابراین پیشنهاد می‌شود از سیستم مهاربندی نوین سازه که در پژوهش حاضر عملکرد بهتری داشتند از جمله مهاربندهای زیر و واگرا، در

شکل (۵) نشان داد که در قاب فولادی ۴ طبقه، سیستم‌های CBFD و CBFV به ترتیب کمترین و بیشترین جابه‌جایی (۱۴ و ۹۶ سانتی‌متر) را دارا هستند. در قاب فولادی ۸ طبقه، سیستم‌های CBFD و CBFV به ترتیب کمترین و بیشترین جابه‌جایی (۲۳ و ۹۶ سانتی‌متر) را دارند. سیستم CBFV دارای سختی (K) زیادی است، لذا مفاصل پلاستیک کمتری در آن طی تحلیل ایجاد شده است. همچنین، جابه‌جایی قاب فولادی با مهاربند CBFV کمترین مقدار است.

۳- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، با استفاده از پرسشنامه محقق ساخته، معیارهای ارزیابی رفتار پلاستیک سازه مورد بررسی قرار گرفتند که مفصل پلاستیک به‌عنوان مهم‌ترین پارامتر شناخته شد. سپس، ۱۰ نوع سیستم مهاربندی نوین سازه در قاب‌های فولادی ۴ و ۸ طبقه، جایگذاری و عملکرد مفاصل پلاستیک و جابه‌جایی بیشینه در قاب‌های مهاربندی شده، بررسی و مقایسه شد. مهم‌ترین نتایج حاصل از پژوهش، به شرح زیر است:

نتایج نشان داد که مفاصل پلاستیک (با وزن آماری ۴/۴۲٪) مهم‌ترین معیار عملکرد سازه در ناحیه‌ی پلاستیک (غیرخطی) است. مفاصل پلاستیک در اعضای سازه می‌توانند تا بیانگر چند نوع عملکرد در سازه شامل (الف) سطح عملکرد کل

ارزیابی مطالعات سایر محققان بر روی موضوعات مشابه در سازه‌های فولادی، پیشاپیش می‌توان به تعمیم نتایج حاصل در قاب‌های فولادی دو بعدی به سازه‌های فولادی سه بعدی، پیشنهاد کرد.

منابع مالی

این پژوهش، هیچ گونه بودجه خارجی دریافت نکرده است.

تعارض منافع

نویسندگان هیچ تضاد منافع را اعلام نمی‌کنند.

References

- Abdolmohammadi, M., Ahmadi, J., & Nasseradi, K. (2024). Modified performance-based plastic design for self-centering structures. *Engineering Structures*, 299, 117149.
- Amirmojahedi, M., Shojaee, S., & Hamzehei-Javaran, S. (2023). A fuzzy based intelligent scheme for enhancing the performance of the optimal controllers by online weighting matrix selection in seismically excited nonlinear buildings. *Engineering Structures*, 294, 116738.
- Aslıoğlu, F., & Cay, R. D. (2023). A dual spatial analysis method based on recreation opportunity spectrum and analytical hierarchy process for outdoor recreation site suitability. *Journal of Outdoor Recreation and Tourism*, 44, 100703.
- Aydenlou, R. M. (2020). Types of existing buildings: detailed introduction and seismic rehabilitation. In *Seismic Rehabilitation Methods for Existing Buildings*, 193-553. Butterworth-Heinemann.
- Ayyildiz, E., Yildiz, A., Taskin, A., & Ozkan, C. (2023). An interval valued Pythagorean fuzzy AHP integrated quality function deployment methodology for hazelnut production in Turkey. *Expert Systems with Applications*, 231, 120708.
- Cella, L., & Martin, R. (2022). Direct and approximately valid probabilistic inference on a class of statistical functionals. *International Journal of Approximate Reasoning*, 151, 205-224.

سازه‌های بلندمرتبه استفاده‌ی بیشتری در مقایسه با سایر مهاربندها شود. ارزیابی تعداد دقیق طبقات سازه، نیاز به مطالعات بیشتری دارد.

- نتایج نشان داد که استفاده از مهاربندهای مورب و متقاطع، موجب کاهش تعداد مفاصل پلاستیک در اعضا شده است؛ بنابراین استفاده از سیستم مهاربندی، همواره موجب افزایش تعداد مفاصل پلاستیک و ارتقای سطح عملکردی سازه نمی‌شود و امکان کاهش تعداد مفاصل پلاستیک و نزول سطح عملکردی سازه نیز وجود دارد. لذا استفاده از سیستم مهاربندی مناسب برای سازه، با توجه به شرایط موجود در آن همچون ارتفاع کل، شدت لرزه‌خیزی بستر و بارهای وارده، بسیار مهم و موجب ارتقای عملکرد پلاستیک و مجموعاً عملکرد لرزه‌ای در نواحی الاستیک و پلاستیک می‌شود.
- نتایج نشان داد که سختی سیستم مهاربندی و تعداد مفاصل پلاستیک، ارتباط مستقیمی با یکدیگر ندارد. لذا ممکن است که با افزایش تعداد مفاصل پلاستیک، سختی عضو کاهش یافته و از سختی کل سازه نیز کاسته شود؛ بنابراین، تعداد مفاصل پلاستیک و سختی مهندسی کافی برای حفظ پایداری سازه در برابر نیروهای غیرخطی جانبی، باید دارای توازن مناسب باشند تا شرایط بهینه بر سازه حاکم شود.
- سطح عملکرد سازه با سیستم قاب خمشی فولادی (SMF)، در قاب‌های ۴ و ۸ طبقه، معادل سطح C (ایمنی جانی) است. قرار دادن هر یک از ۱۰ نوع سیستم مهاربندی در سازه، موجب بهبود سطح عملکردی آن شد. لذا، وجود انواع سیستم‌های مهاربندی مورد نظر در پژوهش، سطح عملکرد قاب‌های فولادی را در ترازهای ارتفاعی مختلف، ارتقا داده است و مجموعاً می‌توان گفت که وجود هر نوع مهاربند در سازه، موجب ارتقای سطح عملکرد پلاستیک سازه می‌شود.
- در پایان لازم به ذکر است که پژوهش حاضر بر روی قاب‌های دوبعدی فولادی انجام گرفته است. لذا، تعمیم نتایج به قاب‌های سه بعدی، نیازمند انجام مطالعات بیشتری است که در پژوهش‌های آتی بدان پرداخته خواهد شد. لیکن، با توجه به

- Gong, Y., Zhang, W., Du, Z., & He, J. (2023). Research on the progressive sagging damage and plastic hinge line mechanism of basic simplified hull girder subjected to near-field underwater explosion bubble. *Ocean Engineering*, 276, 114120.
- Guo, S., & Wang, M. (2022). Study on the equivalent plastic hinge length of superimposed RC shear walls with embedded bracings. *Structures*, 51, 455–471.
- Guo, Y., Lian, M., & Cheng, Q. (2023). Performance-based plastic design of high-strength steel framed-tube structures fused with replaceable shear links. *Journal of Constructional Steel Research*, 212, 108291.
- Han, R., Zhao, H., Sun, Y., Ju, N., & Zhao, S. (2022). Cyclic behavior of concrete-filled square tubular columns with stiffened plastic hinge region. *Journal of Constructional Steel Research*, 190, 107152.
- Hoult, R., & de Almeida, J. P. (2022). From experimental strain and crack distributions to plastic hinge lengths of RC walls with SMA rebars. *Engineering Structures*, 268, 114731.
- Huang, H., Li, M., Yuan, Y., & Bai, H. (2022). Theoretical analysis on the lateral drift of precast concrete frame with replaceable artificial controllable plastic hinges. *Journal of Building Engineering*, 62, 105386.
- Iaria, J., & Susca, T. (2022). Analytic Hierarchy Processes (AHP) evaluation of green roof and green wall- based UHI mitigation strategies via ENVI-met simulations. *Urban Climate*, 46, 101293.
- Jiang, W., Ling, X., Yuan, D., Xiao, J., Ren, X., & Li, J. (2023). Mechanical response of asphalt steel plastic pavement structure based on finite element simulation and scale load test. *Construction and Building Materials*, 407, 133490.
- Jin, L., Liang, J., Chen, F., Li, D., & Du, X. (2022). Prediction of the plastic hinge length for square CFST stocky columns. **Thin-Walled Structures*, 181*, 110104.
- Jin, L., Liang, J., Li, D., Chen, F., & Du, X. (2023). Effects of structural size and confinement on CFST column plastic hinge length. *Journal of Constructional Steel Research*, 210, 108121.
- Khalil, N., Kamaruzzaman, S. N., & Baharum, M. R. (2016). Ranking the indicators of building performance
- Cheng, Z., Luo, J., & Wu, R. (2023). On the finite-sample statistical validity of adaptive fully sequential procedures. *European Journal of Operational Research*, 307, 266-278.
- Cortez, C., Junemann, R., Fernandez, C., Urrutia, A., Crempien, J. G. F., & Cienfuegos, R. (2022). Performance of an RC building under seismic and tsunami actions in sequence via nonlinear dynamic analysis including soil-structure interaction. *Engineering Structures*, 272, 114942.
- Dang, H. K., Thai, D. K., & Kim, S. E. (2023). Stochastic analysis of semi-rigid steel frames using a refined plastic-hinge model and Latin hypercube sampling. *Engineering Structures*, 291, 116313.
- Di, J., Fan, J., Zhou, X., Zhao, L., Han, B., & Qin, F. (2022). Hysteretic behavior of composite bridge columns with plastic hinge enhanced by engineered cementitious composite jacket for seismic resistance. *Engineering Structures*, 251, 113532.
- Ding, M., Xu, W., Wang, J., Chen, Y., & Fang, R. (2023). Analytical study on seismic performance of ECC shell-RC column and its plastic hinge forming mechanism. *Structures*, 58, 105489.
- Erdogan, S. A., Saparuskas, J., & Turskis, Z. (2017). Decision Making in Construction Management: AHP and Expert Choice Approach. *Procedia Engineering*, 172, 270–286.
- Eshagh, M., Tenzer, R., & Eshagh, M. (2020). Elastic thickness of the Iranian lithosphere from gravity and seismic data. *Tectonophysics*, 774, 228186.
- Firoj, M., Bahuguna, A., Kanth, A., & Agrahari, R. (2022). Effect of nonlinear soil-structure interaction and lateral stiffness on seismic performance of midrise RC building. *Journal of Building Engineering*, 59, 105096.
- Fu, T., Zhu, Z., Ren, X., Li, Y., Sun, Y., & Meng, L. (2023). The quasi-static test of hollow prefabricated circular pier with high-strength reinforcement and calculation method for plastic hinge length. *Structures*, 49, 605–622.
- Ghamari, M., & Shooshtari, M. (2019). Application of Performance-Based Plastic Design (PBSD) method for 3D steel structures. *Engineering Structures*, 199, 109649.

- management and energy saving for sustainable green building through analytic hierarchy process and artificial neural network model. *Chemosphere*, 318, 137708.
- Mahdavi, M. (2020). Assessing the effect of underground tunnel diameter on structure-foundation-soil performance under the Kobe Earthquake. *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Civil and Environmental Engineering*, 14(7), 229-233.
- Mahdavi, M. (2023). Comparing the Performance of Diagonal, A-Chevron, Gate, Knee, Rhombus and X braces with the Finite Element Method. *Advanced Structural Mechanics*, 1(3), 11600.
- Mahdavi, M. (2023). Evaluation of the effects of link beam in eccentrically braced frames under frequency-domain modal analyses. *Advanced Structural Mechanics*, 1(4), 11607.
- Mahdavi, M., Babaafjaji, A., & Hosseini, S. R. (2024). Evaluating the Effect of Span Length on the Seismic Performance of a Steel Structure with a Chevron Brace by Finite Element Method. *Eurasian Journal of Science and Technology*, 4(3), 271-282.
- Mahdavi, M., Babaafjaji, A., & Hosseini, S. R. (2024). *Evaluating the Performance of Steel Structure under Nonlinear Analyses*. Lap Lambert Academic Publishing.
- Mahdavi, M., Babaafjaji, A., & Hosseini, S. R. (2024). *Structural Control Devices*. Lap Lambert Academic Publishing.
- Mahdavi, M., Hosseini, S. R., & Babaafjaji, A. (2023). Modelling and comparison of plastic performance in ten types of new steel braces under pushover analysis. *Computational Engineering and Physical Modeling*, 6(2), 79-97.
- Malkewitz, C. P., Schwall, P., Meesters, C., & Hardt, J. (2023). Estimating reliability: A comparison of Cronbach's α , McDonald's ω t and the greatest lower bound. *Social Sciences & Humanities Open*, 7, 100368.
- Mansouri, S. (2017). *Interpretation of Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Building, Standard No. 2800* (4th ed.). Road, Housing and Urban Development Research Center.
- Moghaddam, H., Sanagar Darbani, M., Sadrara, A., & and the users' risk via Analytical Hierarchy Process (AHP): Case of Malaysia. *Ecological Indicators*, 71, 567-576.
- Kim, H. G., Lee, Y. J., & Kim, K. H. (2022). Cyclic flexural performance of RC beams with small circular openings in plastic hinge region. *Construction and Building Materials*, 321, 126339.
- Lee, C. S., Choi, E., & Jeon, J. S. (2022). Estimating the plastic hinge length of rectangular concrete columns reinforced with NiTi superelastic shape memory alloys. *Engineering Structures*, 252, 113641.
- Lee, S., Kim, T., Lieu, Q. X., Vo, T. P., & Lee, J. (2023). A novel data-driven analysis for sequentially formulated plastic hinges of steel frames. *Computers & Structures*, 281, 107031.
- Lemes, Í. J. M., Dias, L. E. S., Silveira, R. A. M., Silva, A. R., & Carvalho, T. A. (2021). Numerical analysis of steel-concrete composite beams with partial interaction: A plastic-hinge approach. *Engineering Structures*, 248, 113256.
- Li, D., Panchal, K., Vasudevan, N. K., Mafi, R., & Xi, L. (2022). Effects of molecular design parameters on plasticizer performance in poly(vinyl chloride): A comprehensive molecular simulation study. *Chemical Engineering Science*, 249, 117334.
- Li, Q. Q., Xu, Z. D., Dong, Y. R., He, Z. H., Zhu, C., & Lu, Y. (2021). Effects of mechanical nonlinearity of viscoelastic dampers on the seismic performance of viscoelastically damped structures. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 150, 106936.
- Liang, K., & Yin, Z. (2023). Investigation on nonlinear buckling performance of the optimized wing structure under the realistic flight cases. *Aerospace Science and Technology*, 139, 108416.
- Liu, H., Huang, X., Ding, P., & Wang, B. (2023). Reliability evaluation method of vibration isolation performance of nonlinear isolator. *Journal of Sound and Vibration*, 551, 117616.
- Liu, K., Wang, Y., Wang, X., Sun, Z., Song, Y., & Di, H. (2023). Characteristic bands extraction method and prediction of soil nutrient contents based on an analytic hierarchy process. *Measurement*, 220, 113408.
- Lu, Y., Ge, Y., Zhang, G., Abdulwahab, A., Salameh, A. A., & Ali, H. E. (2023). Evaluation of waste

- Today. *Proceedings*, 65(2), 503-510. doi: 10.1016/j.matpr. 2022.03.062
- Suwal, N., & Guner, S. (2024). Plastic hinge modeling of reinforced concrete Beam-Column joints using artificial neural networks. *Engineering Structures*, 298, 117012.
- Taghikhani, H., Yassaghi, A., Madanipour, S., & Najafi, M. (2024). Salt tectonics along the High Zagros Fault in Iran, faulting through welded salt walls. *Journal of Asian Earth Sciences*, 259 (105928). doi: 10.1016/j.jseaes.2023.105928
- Taheri, M. A., Payervand, F., Ahmadkhanlou, F., Yazdanparast, R., Torabi, S., & Semsarha, F. (2021). Investigation of the effect of consciousness fields on the mechanical properties of materials. *SSRN Electronic Journal*, 2, 34-51.
- Tolou Kian, M. J., & Cruz-Noguez, C. A. (2023). Plastic hinge length and inelastic rotational capacity of reinforced concrete shear walls detailed with Self-Centering reinforcement. *Engineering Structures*, 279, 115518.
- Traver, C., Ruiz-Pinilla, J. G., Monserrat, A., Montoya-Coronado, L. A., Miguel, P. F., & Ribas, C. (2023). Feasibility of iron-based shape memory alloy strips for shear strengthening of damaged RC beams promoting the formation of plastic hinges. *Construction and Building Materials*, 401, 132906.
- Tuysuz, N., & Kahraman, C. (2023). An integrated picture fuzzy Z-AHP & TOPSIS methodology: Application to solar panel selection. *Applied Soft Computing*, 149, 110951.
- Wang, C., Jia, Y., & Liang, D. (2023). Equivalent plastic hinge length of sleeve connected precast bridge piers. *Structures*, 57, 105243.
- Wu, Y. (2022). Ductility modification technologies. In Y. Wu (Ed.), *Advanced Analysis for RC Structures* (pp. 377-435). Woodhead Publishing.
- Yang, Y., Gao, S., Zheng, Y., Liu, X., Zhang, W., & Lin, B. Q. (2023). Seismic performance of precast column-beam joint with artificial plastic hinge. *Journal of Building Engineering*, 67, 105942.
- Yuan, G., & Zhang, Z. (2024). Event-triggered adaptive prescribed performance tracking for nonlinear time-varying systems with unknown control directions. *Applied Mathematics and Computation*, 463, 128359.
- Hajirasouliha, I. (2023). Recommendation of new design spectra for Iran using modified Newmark method. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 176, 108332.
- Nguyen, V. H., & Tan, K. H. (2023). Progressive collapse behaviour of advanced precast reinforced concrete joints with headed bars and plastic hinge relocation. *Engineering Structures*, 293, 116603.
- Oehlers, D. J., & Seracino, R. (2004). Flexural Strength and Ductility. In *Design of FRP and Steel Plated RC Structures* (pp. 46-99). Elsevier Science.
- Qian, H., Ye, Y., Yan, C., Jin, G., Li, C., & Shi, Y. (2022). Experimental study on the seismic performance of self-centering bridge piers incorporating ECC and superelastic SMA bars in the plastic hinge regions. *Structures*, 46, 1955-1967.
- Qiao, D., Sun, H., Ci, M., Men, J., & Wang, S. (2023). Plastic hinge and damage mechanism of RC assembly column base joint with post pouring area. *Engineering Structures*, 294, 116834.
- Sabah, R., Ozturun, N. K., & Sayin, B. (2022). Development of YAY2020, an FEA program with full-size stiffness matrix for static analysis of high-rise buildings: A comparison with SAP2000. *Case Studies in Construction Materials*, 17, 01576.
- Shao, C., Wei, W., Wu, S., Qi, Q., & Wang, C. (2023). Experimental investigation on plastic hinge length of RC round-ended hollow columns with a variable section. *Engineering Structures*, 290, 116358.
- Shen, X., Li, B., Chen, Y. T., Tizani, W., & Jiang, Y. (2021). Relocating plastic hinges in reinforced concrete beam-column joints by mechanically anchored diagonal bars. *Engineering Structures*, 251, 113468.
- Shin, D. H., & Kim, H. J. (2023). Plastic hinge rotations of steel braces estimated using improved physical theory models. *Journal of Constructional Steel Research*, 203, 107814.
- Song, J. G., & Zhang, J. X. (2023). Fault-tolerant prescribed performance control of nonlinear systems with process faults and actuator failures. *ISA Transactions*, 3, 13126.
- Sunil, J.C., & Kamatchi, P. (2022). Nonlinear modelling strategies for seismic performance evaluation of reinforced concrete structures. *Materials*

Zhou, Y., Ning, S., Huang, D., & Li, Y. (2022). Refined plastic hinge method for steel frames with local-global interactive buckling. *Thin-Walled Structures*, 181*, 110013.

Zhou, Y., Tang, L., Liu, K., Hu, B., & Li, Y. (2022). Second-order improved refined plastic hinge method for high strength steel box-section columns under cyclic loads. *Engineering Structures*, 269, 114819.

واژه‌نامه

Performance-Base Practical Design (PBPD)	۱- طراحی پلاستیک مبتنی بر عملکرد
Shape Memory Alloy (SMA)	۲- مفاصل پلاستیک در آلیاژ حافظه‌دار
Analytic Hierarchy Process (AHP)	۳- روش تحلیل سلسله‌مراتبی

Yuan, Y. J., Wang, W. D., & Huang, H. (2023). Deformation mechanism analysis of steel artificial controllable plastic hinge in prefabricate frame. *Journal of Constructional Steel Research*, 201, 107735.

Zakariya, Y. (2022). Cronbach's alpha in mathematics education research: Its appropriateness, overuse, and alternatives in estimating scale reliability. *Frontiers in Psychology*, 13, 167730.

Zarrineghbal, A., Zafarani, H., & Rahimian, M. (2021). Towards an Iranian national risk-targeted model for seismic hazard mapping. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 141, 106495.

Zhang, L., Zhang, R., Xie, L., & Xue, S. (2023). Dynamics and isolation performance of a vibration isolator with a yoke-type nonlinear inerter. *International Journal of Mechanical Sciences*, 254, 108447.

Zhang, X., Ma, X., & Zhang, S. (2023). Seismic performance of eccentrically braced precast reinforced concrete columns-steel beams frame with replaceable shear links based on plastic design. *Journal of Building Engineering*, 76, 107027.

Zhang, Y., Lei, H., Dong, Z., Li, T., Ma, F., & Liu, H. (2022). Cyclic response of precast concrete columns connected with cast-in-place UHPC in plastic hinge region. *Journal of Building Engineering*, 65, 105793.

Zhao, J., Cui, Q., Li, X., Xue, Z., & Wang, Y. (2023). Experimental study on the plastic hinge region of precast segmental bridge piers strengthened by CFRP. *Structures*, 55, 1853-1860.

Zhao, P., Ali, Z., & Ahmad, Y. (2023). Developing indicators for sustainable urban regeneration in historic urban areas: Delphi method and Analytic Hierarchy Process (AHP). *Sustainable Cities and Society*, 99, 104990.

Zhao, S., Liu, R., Liu, J., & Yang, L. (2023). Comparative study on the effect of steel and plastic synthetic fibers on the dynamic compression properties and microstructure of ultra-high-performance concrete (UHPC). *Composite Structures*, 324, 117570.

Zhou, Y., Huang, D., Li, T., & Li, Y. (2021). Second-order arbitrarily-located-refined plastic hinge model for high-strength steel frame design. *Journal of Constructional Steel Research*, 190, 107112.

Evaluation and Comparison of Plastic Performance of Steel Frames with ten Types of New Braces during Pushover Analysis

Masoud Mahdavi

M.Sc. Graduate, Department of Structures, Faculty of Civil Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran, M.Mahdavi@email.kntu.ac.ir

In order to investigate the behavior of the structure during the earthquake and after it ends, the design engineers examine the performance criteria, including the nonlinear performance of parameters including force, deformation, and yielding mechanism of the structure. Structural design criteria include lateral forces and resistance of members, structural yielding mechanism, story displacement, and performance level that should be checked during structural design. In the plastic performance of the structure, the target relative displacement criteria and the yield mechanism are very important in investigating this performance zone. Among the very important factors in the nonlinear zone are plastic hinges, which investigated in the present study in 10 types of modern braces. For this purpose, a reliable and validated questionnaire was compiled using the opinions of experts in the field of structural engineering. This questionnaire has 6 criteria, the opinions of 70 university professors and PhD students were collected by it. In creating the hierarchical research tree, widely used models including goals and criteria were used. The initial criteria were determined with the help of library studies and the opinions of structural engineering experts. The 6 criteria include "Base shear force", "Pushover curve", "Story displacement and drift", "Bending and shear forces and Torsional anchor", "Plastic hinges" and "Modal periodic time and frequency". Using Cronbach's alpha formula for unlimited societies, the validity of the questionnaire was determined, which was determined as 0.9014. Therefore, questionnaires have high reliability in grades and questions. Then, the average scores collected from the statistical population were entered as primary data in the Expert Choice software. With the hierarchical analysis method in this software, the input data were weighted and finally prioritized. Then, 2D steel frames that have 10 steel braces including Diagonal, Gate, V, Inverted V, Knee, Rhombus, Eccentrically with lateral horizontal link beam, Zipper, Cross, Eccentrically with middle horizontal link beam were modeled by SAP2000 software. The performance of all bracing systems was compared with a steel moment frame (SMF). The steel structures have 4 and 8-story, all the structures were analyzed by nonlinear static analysis (pushover analysis). The results showed that the plastic hinge criterion with an impact factor of 0.424 is the most important parameter of the structure's performance in the plastic zone. Also, the eccentrically braced frame with the middle horizontal link beam (in the 4-story structure) had a total of 33 plastic hinges and the zipper brace (in the 8-story structure) had a total of 49 plastic hinges, which increased by 60.98% and 48.04%, respectively. The plastic hinges were compared to the average of the total braces. The use of each of the 10 mentioned braces in 4 and 8-story structures reduces displacement by 33.65% and 19.27%, respectively, compared to the SMF.

Keywords: Steel Structure, Plastic Hinge, Pushover Analysis, Hierarchical Analysis, New Bracing Systems.