تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۱۷
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۸/۰۷
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۱۳

DOI: 10.48303/bese.2024.2037866.1197

نوع مقاله: یادداشت پژوهشی

تأثیر مهاربندهای همگرا بر استحکام قاب‌های فولادی در خرابی پیش‌رونده

محبوبه میرزائی علی‌آبادی (نویسنده مسئول)
استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی خاتم‌الانبیاء (ص)، بهبهان، ایران،
mirzaie@bkatu.ac.ir

احمد اسکندری
دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران- سازه، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی خاتم‌الانبیاء (ص)، بهبهان، ایران

امیرحسین درخشان‌نژاد
دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران- سازه، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی خاتم‌الانبیاء (ص)، بهبهان، ایران

چکیده

امروزه خطرات زیادی سازه‌های ساختمانی را تهدید می‌کند. بسیاری از بارگذاری‌های غیرعادی در طراحی سازه‌ها در نظر گرفته نمی‌شود. حذف ناگهانی ستون می‌تواند در اثر اشتباهات ناشی از ساخت، انفجار، ضربه و یا هر علت غیرعادی دیگری در سازه رخ دهد. در سازه‌های فولادی، قاب‌های فولادی به‌عنوان یکی از اجزای اصلی سازه، نقش مهمی در ایمنی و دوام سازه‌ها دارند. بااین‌حال، خرابی پیش‌رونده در قاب‌های فولادی، به دلیل تغییر شکل خودسرانه، مشکلاتی را برای سازه‌ها ایجاد می‌کند. هدف از انجام این پژوهش، بررسی تأثیر استفاده از مهاربندهای همگرا در افزایش دوام و ایمنی سازه‌های فولادی در برابر خرابی پیش‌رونده است. در این تحقیق، از نرم‌افزار SAP2000 و تحلیل غیرخطی با لحاظ اثرات تغییر شکل‌های هندسی غیرخطی، جهت مدل‌سازی و بررسی رفتار اتصالات در انجام تحلیل‌های عددی بهره گرفته شده است. با بررسی در سازه‌های ۳، ۸ و ۱۲ طبقه با و بدون حذف ستون مشخص شده که با سه نوع مهاربند ضربدری، هفتی و هشتی مدل‌سازی گردید. نتایج نشان داد در مدل سازه ۳ طبقه با مهاربند ضربدری به میزان ۶۳ درصد کاهش جابه‌جایی نسبت به مدل بدون مهاربند و بدون خرابی پیش‌رونده داشت. همچنین در مدل سازه ۸ طبقه با مهاربند ضربدری به میزان ۳۸ درصد کاهش جابه‌جایی نسبت به مدل بدون مهاربند و بدون خرابی پیش‌رونده داشت و به‌طورکلی مدل سازه ۱۲ طبقه با مهاربند ضربدری به میزان ۲۳ درصد کاهش جابه‌جایی نسبت به مدل بدون مهاربند و بدون خرابی پیش‌رونده داشت.

واژگان کلیدی: خرابی پیش‌رونده، مهاربندهای همگرا، قاب‌های فولادی، زلزله.

۱- مقدمه

امروزه بسیاری از بارگذاری‌های غیرعادی در طراحی سازه‌ها در نظر گرفته نمی‌شود. حذف ناگهانی ستون می‌تواند در اثر اشتباهات ناشی از ساخت، انفجار، ضربه و یا هر علت غیرعادی دیگری در سازه رخ دهد (Ebrahimi & Rahgozar, 2021; Eskandari et al.,2023). پاسخ سازه در حذف ناگهانی ستون درصورتی‌که به تعادل مجدد منتهی شود باعث ایمن ماندن سازه و درصورتی‌که تعادل نیرویی در سازه ایجاد نشود می‌تواند باعث ایجاد خرابی پیش‌رونده در سازه‌ها شود (Ashrafi & Hassanzadeh, 2018; Bagheri Pourasil et al., 2013). سازه‌ها برای خرابی پیش‌رونده مانند حذف ناگهانی ستون طراحی نمی‌شود (Bagler & Parori, 2017; Bahmanpour & Ghanbari, 2016). ارزیابی رفتار سازه‌ها در خرابی پیش‌رونده می‌تواند به درک صحیحی از مقاومت سازه‌ها بیانجامد (Pour Mohammadhadi & Laden, 2016; Porsardar et al., 2014). در سازه‌های فولادی، قاب‌های فولادی به‌عنوان یکی از اجزای اصلی سازه، نقش مهمی در ایمنی و استحکام سازه‌ها دارند (Halaji Khosrowshah & Yasharbinia, 2015; Dashti Nasser Abadi & Badiei Fard, 2015). با این‌حال، خرابی

پیش‌رونده در قاب‌های فولادی، به دلیل تغییر شکل خودسرانه و بدون هشدار، مشکلاتی را برای سازه‌ها ایجاد می‌کند (Raisi Dehkordi et al., 2015).

این مشکلات درصورتی‌که به‌موقع تشخیص داده نشوند، می‌توانند به خرابی کلی سازه و ایجاد خسارت منجر شوند (Alavi, 2022; Alizadeh & Dashti, 2023). قاب مهاربندی‌شده به دو صورت همگرا (CBF)[1] و واگرا (EBF)[2] به کار می‌رود (Qalichkhani & Adib Ramezani, 2019). هرکدام از این قاب‌ها خود به دو نوع ویژه و معمولی تقسیم می‌شوند (Mahmoudi & Habashizadeh, 2022). مهاربند واگرا ویژگی‌های سختی و شکل‌پذیری را با هم دارد زیرا در اصل ترکیبی مناسب از قاب خمشی و قاب مهاربندی‌شده همگراست (Moradkhani et al., 2019; Moradi & Tawakoli, 2021). CBF به معنای قاب مهاربندی همگراست. قاب مهاربندی‌شده همگرا، به قاب‌هایی می‌گویند که در آنها محورهای طولی اعضای مختلف (تیر، ستون و مهاربند) در یک نقطه مشترک با هم تلاقی می‌کنند (Mortazavi et al., 2022; Mehbod & Seifi, 2016). در قاب مهاربندی‌شده همگرا تیرها، ستون‌ها و مهاربندی‌ها با کمک سقف صلب، تشکیل یک خرپای قائم پایدار داده و با کنش خرپایی در برابر بارهای جانبی مقاومت می‌کنند (Mirzaei Aliabadi & Derakhshan Nezhad, 2022; Naveed & Maleki, 2022). بادبند همگرا سختی مناسبی برای جلوگیری از تغییر مکان‌های جانبی نسبی طبقات در اثر بارهای جانبی ناشی از زلزله دارد (Houshmand Ayini & Abdulahi, 2021; Shahidzadeh et al., 2022). سختی مناسب قاب مهاربندی‌شده همگرا در اثر رفتار محوری (کششی و فشاری) اعضای مهاربندی مقاوم در برابر بار جانبی زلزله فراهم می‌شود (Derakhshan Nezhad et al., 2023; Chen & Li, 2021). استفاده از مهاربندهای همگرا، به‌عنوان یکی از راهکارهای جلوگیری از خرابی پیش‌رونده در قاب‌های فولادی، در سال‌های اخیر مورد توجه قرارگرفته است (Jiang et al., 2015; Kai et al. 2021). در این روش، با استفاده از مهاربندهایی که به انتهای عضوهای قاب فولادی[3] نصب می‌شوند (Naji & Khodaverdi Zadeh, 2019)، از تغییر شکل خودسرانه عضوها جلوگیری می‌شود و استحکام و ثبات سازه افزایش می‌یابد (Ozcelik et al., 2016; Chen & Li, 2021). در تحقیقات پیشین، نتایج مثبتی برای تأثیر مهاربندهای همگرا بر استحکام قاب‌های فولادی در خرابی پیش‌رونده[4] به‌دست‌آمده است (Derakhshan Nezhad et al., 2023; Tsai, 2012). مطالعات نشان داده‌اند که استفاده از مهاربندهای همگرا، توانایی افزایش مقاومت قاب‌های فولادی در برابر خرابی پیش‌رونده را دارد (Derakhshan Nezhad et al., 2023). در یکی از مطالعات انجام شده، با استفاده از مهاربندهای همگرا، توانسته‌اند خرابی پیش‌رونده در قاب‌های فولادی را به‌طور فراوانی کاهش دهند (Chen & Li, 2021). با استفاده از مهاربندهای همگرا، مقاومت قاب‌های فولادی در برابر خرابی پیش‌رونده تا چندین برابر افزایش‌یافته است (Moradi & Tawakoli, 2021). با توجه به اهمیت موضوع، هدف این پروژه تحقیقاتی بررسی تأثیر مهاربندهای همگرا بر استحکام قاب‌های فولادی در خرابی پیش‌رونده است. در این پروژه، ساختمان‌های فولادی سه، هشت و دوازده طبقه قاب خمشی با کمک نرم‌افزار SAP2000 و به‌صورت سه‌بعدی با تأثیر پارامترهای مختلف مانند نوع و شکل مهاربندهای همگرا، بر استحکام قاب‌های فولادی پرداخته و این ارزیابی‌ها با کمک تحلیل استاتیکی غیرخطی انجام و نتایج به‌صورت جداول و نمودارهایی ارائه شده است که شامل نحوه‌ی تشکیل مفاصل پلاستیک اعضا در هر سه سازه، مقایسه‌ی تنومندی سازه‌ها، بررسی جابه‌جایی قائم گره بالای مورد نظر و مقایسه بین مدل‌های مختلف، همچنین بررسی و کنترل جابه‌جایی نسبی جانبی طبقات است.

۱-۱- پیشینه تحقیق

کای و همکاران (Kai et al., 2021) در سال ۲۰۲۱ در پژوهشی، نتایج آزمایش‌هایی روی شش زیر چارچوب فولادی چندطبقه با چارچوب فولادی مقاوم در برابر لحظه‌ای (سه باره‌ای

بدون براکت و سه باره‌ای با براکت‌های فولادی) ارائه می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که براکت‌های فولادی می‌توانند ظرفیت مقاومت بار را افزایش دهند، اما براکت‌های فشاری کم‌اثر هستند و براکت‌های کششی مفیدترند. همچنین، اثرات مخربی از جمله کاهش ظرفیت انحنایش و ظرفیت عملکرد کاتنری در براکت‌های V- شکل مشاهده شد.

جیانگ و همکاران (Jiang et al., 2015) در سال ۲۰۱۵، در پژوهشی بررسی کردند که چگونه سیستم‌های مهاربندی در قاب‌های فولادی تحت تأثیر آتش می‌توانند از وقوع خرابی نامتناسب جلوگیری کنند؛ و به این نتیجه می‌رسند که استفاده از مهاربندها می‌تواند مقاومت خرابی ناشی از آتش را به مدت یک ساعت افزایش دهد و حضور مهاربندهای عمودی در خانه‌های داخلی ضروری است تا جلوی خرابی گرفته شود. سیستم مهاربندی افقی و عمودی ترکیبی برای جلوگیری از خرابی در فضاهای چندبخشی ضروری است و حفاظت آتش برای ستون‌های دور محیطی در نقاط کورنر جلوی خرابی جهانی را می‌گیرد.

ناجی و همکاران (Naji & Khodaverdizadeh, 2019) در سال ۲۰۱۹ در تحقیقی، با استفاده از روش مسیر بار جایگزین، رفتار چارچوب‌های مهاربندی هم‌مرکز و نامتمرکز در شرایط خرابی پیش‌رونده را بررسی کردند. نتایج نشان می‌دهد که هر دو سیستم مهاربندی می‌توانند در برابر خرابی پیش‌رونده مقاومت کنند و در سیستم مهاربندی هم‌مرکز با کاهش بخش مهاربندی، انعطاف‌پذیری سازه افزایش پیدا می‌کند.

مرادی و همکاران (Moradi & Tavakoli, 2021) در سال ۱۴۰۰ در تحقیقی به بررسی حساسیت قاب‌های فولادی با مهاربند همگرا نسبت به متغیرهای تصادفی تحت یک رکورد زلزله می‌پردازند. در این تحقیق، قاب‌های دوبعدی ۱۰ طبقه با سیستم مهاربندی همگرای دوگانه با مهاربند ضربدری، هفتی، هشتی و قطری مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. دو روش تحلیل حساسیت مونت‌کارلو و تحلیل حساسیت مرتبه اول ممان دوم FOSM5[5] برای انجام تحلیل حساسیت به کار گرفته شده است. نتایج نشان داد که تأثیر متغیرهای تصادفی بر ماکزیمم جابه‌جایی بام بیشتر از ماکزیمم برش پایه و پریود سازه است. همچنین، حساسیت ماکزیمم برش پایه در قاب‌های مهاربندی همگرای ضربدری بیشتر از سایر سیستم‌های سازه‌ای است. روش FOSM نسبت به روش مونت‌کارلو در برآورد حساسیت پارامترهای ماکزیمم جابه‌جایی بام و ماکزیمم برش پایه بهتر عمل کرده است.

مرادخانی و همکاران (Moradkhani et al., 2019) در سال ۱۳۹۹ در پژوهشی، خرابی پیش‌رونده سازه‌های بلندمرتبه با سیستم دوگانه قاب خمشی فولادی و مهاربند کمانش‌ناپذیر در سناریوهای مختلف را مورد بررسی قرار دادند. مهاربندهای هشت ۸- هفت ۷ و شورون در دهانه‌های کناری و گوشه نصب شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که ضعیف‌ترین عملکرد مربوط به سازه دوگانه با مهاربند کمانش‌ناپذیر (هشت ۸-هفت ۷) در گوشه و بهترین عملکرد مربوط به سازه دوگانه با مهاربند کمانش‌ناپذیر شورون در دهانه کناری بوده است. همچنین، در تمامی سناریوهای حذف تک‌ستون، مقدار خیز در سازه‌هایی که ستون حذف‌شده در دهانه مهاربندی قرار نداشته است بیشتر از سازه‌های دارای سناریوی حذف برای ستون در دهانه مهاربندی بوده است.

۱-۲- ضرورت انجام تحقیق

تحقیقات در زمینه استفاده از مهاربندهای همگرا در سازه‌های فولادی، به دلیل اهمیت آن در افزایش استحکام و ایمنی سازه‌ها، مورد توجه قرارگرفته است. با توجه به اینکه موضوع تحقیقاتی بررسی تأثیر مهاربندهای همگرا بر استحکام قاب‌های فولادی در خرابی پیش‌رونده، یکی از موضوعات مهم و پراهمیت در حوزه سازه‌های فولادی است. با توجه به اینکه خرابی پیش‌رونده در قاب‌های فولادی می‌تواند باعث خطرات جدی برای افراد و خسارت‌های بالایی برای مالکان سازه شود، استفاده از مهاربندهای همگرا به‌عنوان یک راهکار مهم در جلوگیری از خرابی پیش‌رونده مورد توجه قرارگرفته است. علاوه بر این، با توجه به اینکه استفاده از مهاربندهای همگرا در سازه‌های

فولادی، مستلزم هزینه‌های بالایی است، تعیین بهینه‌سازی هزینه‌ها و استفاده بهینه از مهاربندهای همگرا نیز از اهداف مهم این پروژه تحقیقاتی است. با تعیین بهینه‌سازی هزینه‌ها و استفاده بهینه از مهاربندهای همگرا، می‌توان به کاهش هزینه‌های ساخت سازه و افزایش راندمان استفاده از مهاربندهای همگرا در سازه‌های فولادی دست پیدا کرد. با مطالعات انجام شده و بررسی‌های به‌عمل‌آمده در زمینه احتمال آسیب‌پذیری ساختمان‌های امروزی در سطح شهرها در برابر خرابی پیش‌رونده و اینکه اکثر قریب به‌اتفاق ساختمان‌های موجود یارای مقابله با چنین پدیده‌ای را نداشته و در برابر خرابی پیش‌رونده آسیب‌پذیر هستند، لذا هدف از این پایان‌نامه این است که با ارائه راهکاری به دنبال بهبود این وضعیت بوده و بتوان به کمک آن دسته از ساختمان‌ها شتافت که احداث شده‌اند اما در طراحی‌هایشان بارگذاری ویژه خرابی پیش‌رونده لحاظ نشده است. در این پروژه، ساختمان‌های فولادی سه، هشت و دوازده طبقه قاب خمشی با کمک نرم‌افزار SAP2000 و به‌صورت سه‌بعدی با تأثیر عامل‌های مختلف مانند نوع و شکل مهاربندهای همگرا، بر استحکام قاب‌های فولادی پرداخته و این ارزیابی‌ها با کمک تحلیل استاتیکی غیرخطی انجام و نتایج به‌صورت جداول و نمودارهایی ارائه شده است که شامل نحوه تشکیل مفاصل پلاستیک اعضا در هر سه سازه، مقایسه تنومندی سازه‌ها، بررسی جابه‌جایی قائم گره بالای مورد نظر و مقایسه بین مدل‌های مختلف، همچنین بررسی و کنترل جابه‌جایی نسبی جانبی طبقات است.

۱-۳- اهداف پژوهش

- بررسی تأثیر استفاده از مهاربندهای همگرا در افزایش استحکام و ایمنی سازه‌های فولادی در برابر خرابی پیش‌رونده.
- تعیین نوع، شکل، بهینه مهاربندهای همگرا برای افزایش استحکام قاب‌های فولادی و جلوگیری از خرابی پیش‌رونده.
- بهینه‌سازی هزینه‌ها و استفاده بهینه از مهاربندهای همگرا در سازه‌های فولادی، به‌منظور کاهش هزینه‌های ساخت سازه و افزایش راندمان استفاده از مهاربندهای همگرا در سازه‌های فولادی.
- بررسی تغییراتی که در رفتار و استحکام سازه‌های فولادی با استفاده از مهاربندهای همگرا در خرابی پیش‌رونده ایجاد می‌شود.
- استفاده از شبیه‌سازی‌های عددی و به کمک نرم‌افزار SAP2000، به‌منظور تعیین بهترین نوع و شکل مهاربندهای همگرای بهینه.

امروزه بحث پدافند غیرعامل و افزایش انعطاف‌پذیری و مقاوم‌سازی سازه‌ها در برابر انفجار، برخورد و ضربه یکی از اصلی‌ترین دغدغه‌های سازمان‌های دولتی در سراسر دنیا از جمله ایران است که همین بحث باعث ضرورت خاص چنین پژوهش‌هایی در حیطه بررسی انواع اتصالات در قاب فولادی همراه با انواع مهاربندها در برابر خرابی پیش‌رونده شده است.

۲- انواع خرابی پیش‌رونده

هر سازه و ساختمان مثل یک دستگاه عمل می‌کند که از اجزای مختلفی از قبیل سقف، کف، دیوار و ستون تشکیل شده است. این اجزا به یکدیگر متصل بوده و با هم در ارتباط هستند. هرگونه تغییر در یکی از اجزای ساختمان می‌تواند بر سایر اجزا نیز تأثیرگذار باشد. به‌عنوان‌مثال در صورت بروز زلزله، اگر بخشی از سقف یک ساختمان آسیب ببیند می‌تواند به ستون‌ها نیز فشار وارد کرده و آسیب بزند. از سوی دیگر اگر یک نوع نقص در بخشی از ساختمان وجود داشته باشد که به‌موقع ترمیم و اصلاح نشود، می‌تواند باعث آسیب سایر بخش‌ها شود. این نقص می‌تواند خرابی در سیستم تأسیسات داخلی ساختمان باشد یا نمای خارجی ساختمان. آنچه در حفظ ایمنی و زیبایی ساختمان اهمیت دارد این است که خرابی‌ها به‌موقع تشخیص داده شود و در جهت رفع آنها اقدامات لازم صورت گیرد. چون اکثر خرابی‌های مشاهده شده در اجزای ساختمان، به مرور زمان بیشتر شده و به‌عنوان یک یا چند مدل از انواع خرابی پیش‌رونده موجب تخریب ساختمان خواهد شد. خرابی پیش‌رونده، خرابی تمام و یا قسمت عمده‌ای از یک سازه تحت بارگذاری‌هایی از

قبیل زلزله، انفجار، آتش‌سوزی و... است که با حذف یک ستون در بخشی از سازه شروع شده و با انتشار گسیختگی به اعضای مجاور می‌تواند پایداری کل سازه را تهدید نماید و بروز یک خرابی موضعی در یک عضو سازه‌ای منجر به شکست اعضای مجاور آن و فروریزش‌های اضافی در ساختمان می‌گردد.

۳- طراحی مقاوم در برابر تخریب پیش‌رونده

در طراحی و بهسازی ساختمان‌های جدید و موجود، سطح طراحی در برابر تخریب پیش‌رونده وابسته به سطح کاربری ساختمان است. سطح کاربری ساختمان یا بر اساس ضوابط سطوح عملکرد دستورالعمل و یا با توجه به خواست مالکین ساختمان تعیین می‌گردد. مقررات طراحی این مجموعه ضوابط به شکلی تدوین شده است که با توجه به سطوح مختلف کاربری، امکان ایجاد سطوح مختلف مقاومت در برابر تخریب پیش‌رونده فراهم گردد. این سطوح مختلف طراحی در برابر تخریب پیش‌رونده از روش‌های زیر استفاده می‌کنند:

الف) نیروهای کلافی: در این روش ظرفیت کششی برای سیستم کف و سقف تجویز می‌گردد که امکان انتقال بارهای وارده از قسمت‌های تخریب شده را فراهم می‌کنند.

ب) روش مسیر جایگزین: در این روش سازه باید توانایی پل زدن بر بخش‌های تخریب‌شده را دارا باشد.

پ) مقاومت افزایش‌یافته: در این روش ظرفیت خمشی و برشی ستون‌ها و دیوارها افزایش می‌یابند تا با کاهش احتمال گسترش خسارات، میزان حفاظت ساختمان را افزایش دهند (Jiang et al., 2015).

با افزایش روزافزون ساخت‌وسازهای سازه‌های فولادی احتمال آسیب این سازه‌ها در برابر زلزله زیاد شده است. همچنین با افزایش حملات تروریستی و انفجار بررسی خرابی پیش‌رونده در سازه‌های فولادی امری است اجتناب‌ناپذیر. سازه‌های فولادی به علت سرعت ساخت نسبت به سازه‌های بتنی کارایی بالاتری دارند؛ از این‌رو پژوهش‌های گوناگونی بر روی این سازه‌ها انجام شده است. قاب‌های خمشی فولادی دارای سختی کم و شکل‌پذیری بالایی هستند و مهاربندهای هم‌محور دارای سختی بالا و شکل‌پذیری کمتری هستند؛ از این‌رو استفاده از این دو سیستم سازه‌ای در ساخت‌وسازهای اخیر استفاده شده است؛ بنابراین در این پژوهش به بررسی تأثیر مهاربندهای همگرا بر استحکام قاب‌های فولادی در خرابی پیش‌رونده پرداخته خواهد شد تا دید بهتری نسبت به این سازه‌ها داشته باشیم.

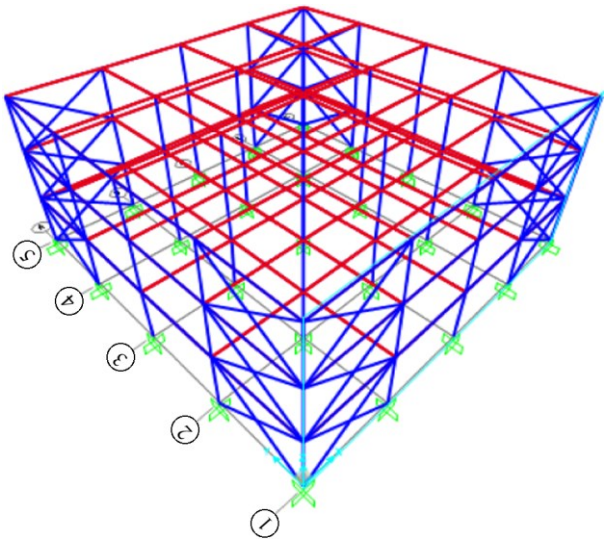
۴- روش کار

در این پژوهش به بررسی تأثیر مهاربندهای همگرا بر استحکام قاب‌های فولادی در خرابی پیش‌رونده پرداخته می‌شود. ضوابط لرزه‌ای آن تحت آیین‌نامه ۲۸۰۰ انجام می‌شود. مدل‌ها در نرم‌افزار SAP2000 شبیه‌سازی شده است. ویژگی مدل‌ها به قرار زیر است:

سه سازه با تعداد طبقات ۳، ۸ و ۱۲ بدون مهاربند مدل‌سازی شده و سپس سه مهاربند به حالت ۷، ۸ و حالت ضربدری در هر سه سازه مدل‌سازی شدند، سپس یکی از ستون‌های میانی را در مدل‌ها تخریب کرده و تحلیل انجام خواهد شد و در انتها نتایج حاصل از هر ۲۴ مدل با یکدیگر مقایسه و نتیجه‌گیری خواهد شد.

۴-۱- مدل‌سازی

برای نمونه در شکل (۱) شماتیک سه‌بعدی مدل ۳ طبقه نشان داده شده است.



شکل (۱): شماتیک سه‌بعدی مدل ۳ طبقه.

۴-۲- تعریف مصالح

مصالح مصرفی در این سازه فولاد St37 است که تنش تسلیم آن ۲۴۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع و حداقل تنش نهایی ۳۷۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع می‌باشد.

۴-۳- بارگذاری

بار مرده روی سقف برابر ۳۵۰ کیلوگرم بر مترمربع و بار زنده برابر ۲۰۰ کیلوگرم بر مترمربع است.

۴-۴- بار زلزله

محاسبه بار زلزله در کشور ایران بر اساس آیین‌نامه ۲۸۰۰ انجام می‌شود.

۴-۵- طبقه‌بندی نوع زمین

یکی از عامل‌های طراحی لرزه‌ای ساختگاه، رده‌بندی ساختگاه است. در آیین‌نامه ایران رده‌بندی ساختگاه و طبقه‌بندی نوع زمین به چهار گروه I, II, III, IV تقسیم‌بندی می‌شود.

تیپ خاک مورد بررسی در این پژوهش از نوع خاک تیپ II است.

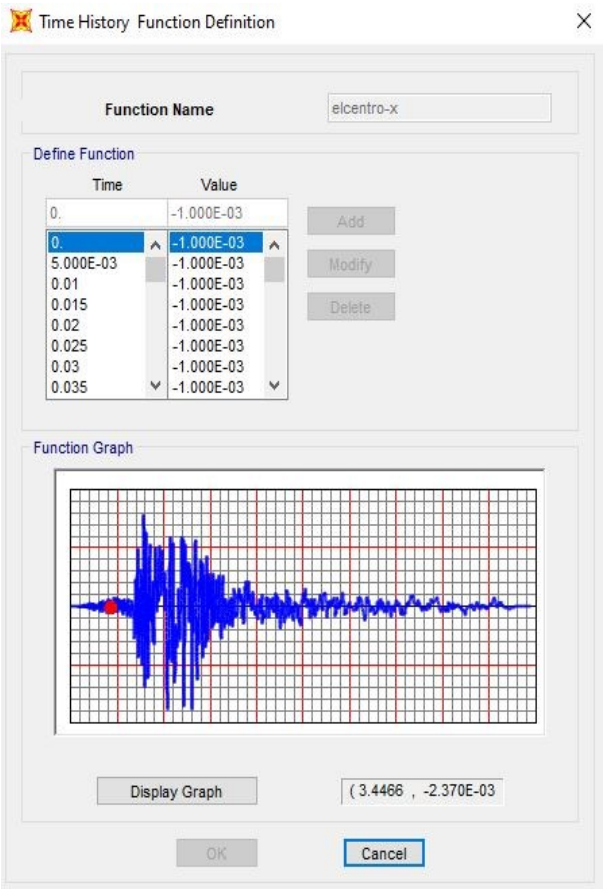
۴-۶- تحلیل دینامیکی غیرخطی[۶]

این نوع تحلیل عموماً برای ساختمان‌های نامنظم مورد استفاده قرار می‌گیرد (ساختمان مدهای نوسانی داشته باشد که در آن مدها حرکت در یک امتداد توأم با حرکت در امتداد عمود بر آن باشد برای ملحوظ نمودن اثرات این حرکات توأم ساختمان باید به‌وسیله روش تحلیل دینامیکی محاسبه شود).

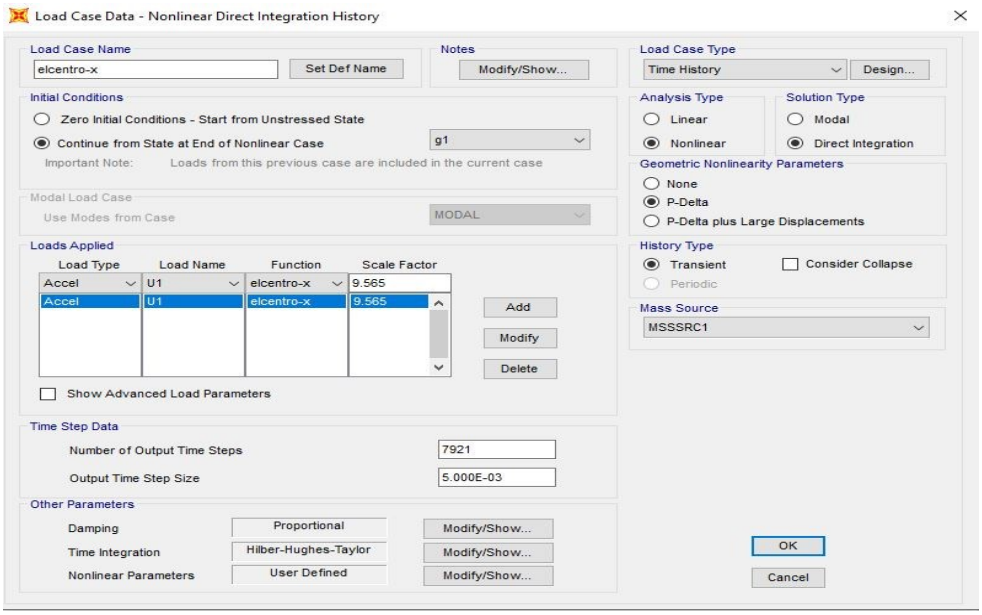
این نوع تحلیل بازتاب‌های سازه در هر مقطع زمانی در مدت وقوع زلزله با تأثیر دادن شتاب‌های ناشی از حرکت زمین (شتاب‌نگاشت) در تراز پایه ساختمان و انجام محاسبات دینامیکی مربوطه تعیین می‌شود. تحلیل دینامیکی مورد استفاده در این پروژه تحلیل با استفاده از تاریخچه زمانی است. شتاب‌نگاشت‌ها به‌گونه‌ای مقیاس شوند که طیف حاصل از این شتاب‌نگاشت‌ها مساوی یا بزرگ‌تر از دامنه طیف طرح در محدوده فرکانسی مورد نظر باشد.

البته این پیشنهاد هیچ‌گونه اطمینانی ایجاد نمی‌کند که واقعاً چه تعداد شتاب‌نگاشت برای تحلیل غیرخطی یک سازه خاص لازم است. این عدد ممکن است برای سازه‌های مختلف متفاوت باشد. از طرف دیگر تعریف محدوده فرکانسی مورد نظر چندان روشن به نظر نمی‌رسد و حساسیت پاسخ سازه به محدوده فرکانس‌ها باید مورد مطالعه قرار گیرد.

پراکندگی بالای پاسخ‌های دینامیکی تحت شتاب‌نگاشت‌هایی که مطابق ضوابط استاندارد ۲۸۰۰ ایران انتخاب و مقیاس می‌شوند، انکارناپذیر است. به‌منظور انجام تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی، زلزله ال‌سنترو به نرم‌افزار معرفی شده است (شکل‌های ۲ و ۳).



شکل (۲): رکورد زلزله ال‌سنترو.



شکل (۳): معرفی زلزله ال‌سنترو به مدل.

جدول (۱): مشخصات مدل‌ها.

مدل	تعداد طبقات	نوع مهاربند	خرابی پیش‌رونده	مدل	تعداد طبقات	نوع مهاربند	خرابی پیش‌رونده
۱	۳	بدون	بدون خرابی	۱۳	۸	بدون	دارای خرابی
۲	۳	ضربدری	بدون خرابی	۱۴	۸	ضربدری	دارای خرابی
۳	۳	هفت	بدون خرابی	۱۵	۸	هفت	دارای خرابی
۴	۳	هشت	بدون خرابی	۱۶	۸	هشت	دارای خرابی
۵	۳	بدون	دارای خرابی	۱۷	۱۲	بدون	بدون خرابی
۶	۳	ضربدری	دارای خرابی	۱۸	۱۲	ضربدری	بدون خرابی
۷	۳	هفت	دارای خرابی	۱۹	۱۲	هفت	بدون خرابی
۸	۳	هشت	دارای خرابی	۲۰	۱۲	هشت	بدون خرابی
۹	۸	بدون	بدون خرابی	۲۱	۱۲	بدون	دارای خرابی
۱۰	۸	ضربدری	بدون خرابی	۲۲	۱۲	ضربدری	دارای خرابی
۱۱	۸	هفت	بدون خرابی	۲۳	۱۲	هفت	دارای خرابی
۱۲	۸	هشت	بدون خرابی	۲۴	۱۲	هشت	دارای خرابی

۵- مدل‌های مورد بررسی

همان‌گونه که پیش‌تر بیان شد، در این پژوهش به بررسی ۲۴ مدل پرداخته خواهد شد، مشخصات مدل‌ها در جدول (۱) بیان شده است.

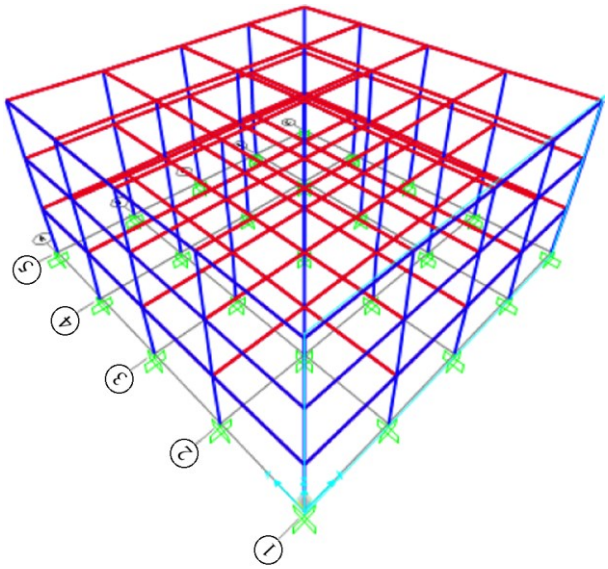
۶- نتایج تحلیل

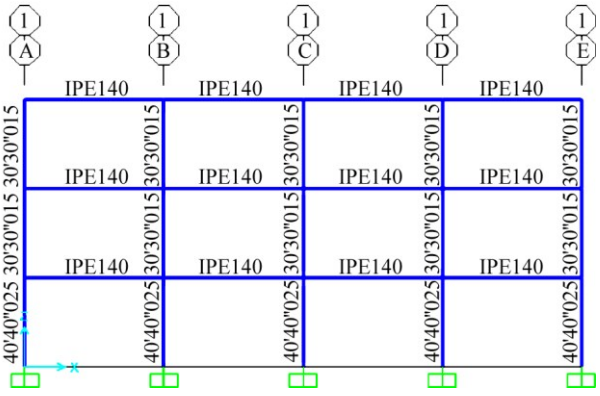
هر پژوهش، تلاشی منطقی، سازمان‌یافته و علمی برای دستیابی به پاسخ یک پرسش یا راه‌حل برای یک مسئله است. برای رسیدن به پاسخ‌ها و راه‌حل‌ها که در حقیقت هدف‌های اصلی یک پژوهش هستند باید مسیری طی شود که چگونگی طی این مسیر به عوامل گوناگونی چون ماهیت مسئله و پرسش و... وابسته است (جدول ۲).

هر مسیر پژوهشی در واقع فرایندی است که شامل گام‌ها و مرحله‌هاست (شکل‌های ۴ و ۵).

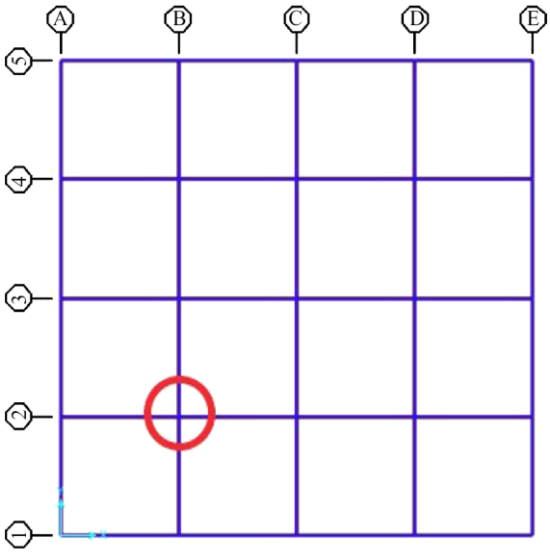
جدول (۲): نتایج تحلیل جابه‌جایی و شتاب بام در سازه‌های ۳، ۸ و ۱۲ طبقه تحت تأثیر مهاربندهای همگرا (ضربدری، هفتی، هشتی) در حالت‌های با و بدون خرابی پیشرونده (حذف ستون).

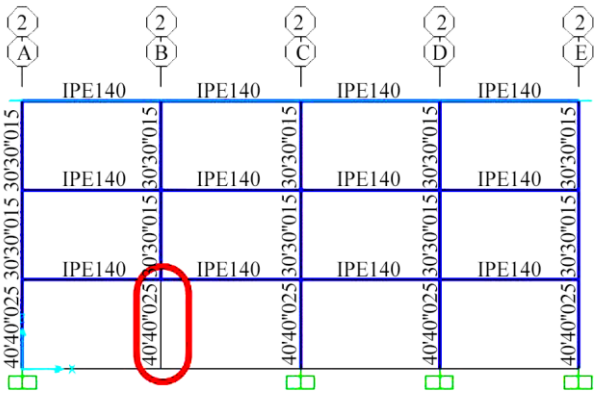
تعداد طبقات سازه	بیشترین میزان شتاب بام (متر بر مجذور ثانیه)	تحت رکورد زلزله	بیشترین میزان جابه‌جایی (سانتی‌متر)	جابه‌جایی طبقات در مدل طبقه دارای خرابی (سانتی‌متر)	قاب سازه
در بام سازه ۳ طبقه	۵/۲	ال‌سنترو	۱۸/۶	۱۸/۶	خمشی
سازه ۳ طبقه دوم	۹/۱	ال‌سنترو	۶/۷	۶/۷	مهاربند ضربدری
سازه ۳ طبقه سوم	۷/۳	ال‌سنترو	۸/۸	۸/۸	مهاربند هفتی
سازه ۳ طبقه چهارم	۹/۷	ال‌سنترو	۱۱/۶	۱۱/۶	مهاربند هشتی
سازه ۳ طبقه پنجم	۷	ال‌سنترو	۲۵	۲۴/۴۷	در مدل ۳ طبقه قاب خمشی دارای خرابی / (خرابی پیش‌رونده حذف ستون) B2
سازه ۳ طبقه ششم	۹/۷	ال‌سنترو	۱۱/۶	۸/۹	در مدل ۳ طبقه با مهاربند ضربدری دارای خرابی / (خرابی پیش‌رونده حذف ستون) B2
سازه ۳ طبقه هفتم	۸/۱	ال‌سنترو	۸/۹۶	۱۱/۵	در مدل ۳ طبقه با مهاربند هفتی دارای خرابی / (خرابی پیش‌رونده حذف ستون) B2
سازه ۳ طبقه هشتم	۹/۷	ال‌سنترو	۱۱/۶	۱۱/۵	در مدل ۳ طبقه با مهاربند هشتی دارای خرابی / (خرابی پیش‌رونده حذف ستون) B2
سازه ۸ طبقه اول	۴/۸	ال‌سنترو	۳۳/۱	۴۱/۶	خمشی
سازه ۸ طبقه دوم	۵/۵	ال‌سنترو	۲۰/۵	۲۰/۵	مهاربند ضربدری
سازه ۸ طبقه سوم	۵/۷	ال‌سنترو	۲۱/۵	۲۱/۵	مهاربند هفتی
سازه ۸ طبقه چهارم	۵/۷	ال‌سنترو	۲۱/۵	۲۱/۴	مهاربند هشتی
سازه ۸ طبقه پنجم	۶/۱	ال‌سنترو	۵۴/۵	۵۴/۳	در مدل ۸ طبقه با قاب خمشی دارای خرابی / (خرابی پیش‌رونده حذف ستون) B2
سازه ۸ طبقه ششم	۷/۲	ال‌سنترو	۲۷	۲۶/۹	در مدل ۸ طبقه با مهاربند ضربدری دارای خرابی / (خرابی پیش‌رونده حذف ستون) B2
سازه ۸ طبقه هفتم	۷/۶	ال‌سنترو	۲۹/۵	۲۹/۳	در مدل ۸ طبقه با مهاربند هفتی دارای خرابی / (خرابی پیش‌رونده حذف ستون) B2
سازه ۸ طبقه هشتم	۷/۵	ال‌سنترو	۲۸/۲	۲۸	در مدل ۸ طبقه با مهاربند هشتی دارای خرابی / (خرابی پیش‌رونده حذف ستون) B2
سازه ۱۲ طبقه اول	۵/۶	ال‌سنترو	۴۷/۱	۴۷/۱	خمشی
سازه ۱۲ طبقه دوم	۷	ال‌سنترو	۳۶/۱	۳۶/۱	مهاربند ضربدری
سازه ۱۲ طبقه سوم	۷/۱	ال‌سنترو	۴۵/۱	۴۰/۱	مهاربند هفتی
سازه ۱۲ طبقه چهارم	۷/۱	ال‌سنترو	۴۰	۴۰	مهاربند هشتی
سازه ۱۲ طبقه پنجم	۷/۵	ال‌سنترو	۶۲/۲	۶۲	در مدل ۱۲ طبقه با قاب خمشی دارای خرابی / (خرابی پیش‌رونده حذف ستون) B2
سازه ۱۲ طبقه ششم	۹/۲	ال‌سنترو	۴۷/۹	۴۷/۷	در مدل ۱۲ طبقه با مهاربند ضربدری دارای خرابی / (خرابی پیش‌رونده حذف ستون) B2
سازه ۱۲ طبقه هفتم	۶/۸	ال‌سنترو	۴۱/۲	۵۹/۲	در مدل ۸ طبقه با مهاربند هفتی دارای خرابی / (خرابی پیش‌رونده حذف ستون) B2
سازه ۱۲ طبقه هشتم	۱۰/۴	ال‌سنترو	۵۹	۵۸/۸	در مدل ۸ طبقه با مهاربند هشتی دارای خرابی / (خرابی پیش‌رونده حذف ستون) B2





شکل (۴): مدل سه‌طبقه با قاب خمشی.





شکل (۵): ستون حذف شده در مدل‌ها.

خرابی پیش‌رونده معمولاً از یک خرابی محلی شروع می‌شود و به‌صورت زنجیره‌ای به سایر بخش‌های سازه منتقل می‌شود. مهاربندهای همگرا با توزیع متوازن بارها و جلوگیری از تمرکز تنش‌ها می‌توانند از وقوع خرابی محلی جلوگیری کنند. مهاربندهای همگرا می‌توانند ظرفیت جذب انرژی سازه را افزایش دهند. در زمان وقوع زلزله، این مهاربندها با جذب انرژی وارد شده و توزیع آن در کل سازه، از گسترش خرابی جلوگیری می‌کنند. با افزایش سختی و مقاومت کلی سازه، مهاربندهای همگرا به پایداری کلی سازه کمک می‌کنند. این پایداری کلی به این معناست که حتی در صورت خرابی یک عضو، کل سازه به‌صورت پایدار باقی می‌ماند و از گسترش خرابی به سایر بخش‌ها جلوگیری می‌شود. مطالعات تجربی و موردی نشان داده‌اند که استفاده از مهاربندهای همگرا می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی مقاومت سازه را در برابر خرابی پیش‌رونده افزایش دهد. نتایج این مطالعات نشان می‌دهد که سازه‌هایی که به‌خوبی مهاربندهای همگرا دارند، در مواجهه با خرابی محلی به‌خوبی عمل کرده و از گسترش خرابی به سایر بخش‌ها جلوگیری می‌کنند. استانداردها و آیین‌نامه‌های مختلفی وجود دارند که استفاده از مهاربندهای همگرا را برای افزایش مقاومت سازه در برابر خرابی پیش‌رونده توصیه می‌کنند. به‌عنوان‌مثال، آیین‌نامه‌های طراحی سازه‌های مقاوم در برابر زلزله، معیارهای خاصی برای طراحی و استفاده از مهاربندهای همگرا ارائه می‌دهند. استفاده از مهاربندهای همگرا در طراحی سازه‌های فولادی می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی مقاومت سازه را در برابر خرابی پیش‌رونده افزایش دهد. با افزایش ظرفیت تحمل بار جانبی، توزیع بهینه بارها، کاهش تغییر شکل‌های غیرمجاز،

افزایش ظرفیت جذب انرژی، و افزایش پایداری کلی سازه، مهاربندهای همگرا می‌توانند نقش بسیار مهمی در جلوگیری از خرابی پیش‌رونده ایفا کنند.

۷- نتیجه‌گیری

در این فرایند، نتایج پژوهش از اهمیت بسزایی برخوردار است، زیرا می‌تواند مبنایی برای رفع مشکلات یا بهبود وضعیت موجود شده و راه را برای رسیدن به وضعیت مطلوب هموار سازد.

با بررسی در سازه‌های ۳ طبقه با حذف ستون و بدون حذف ستون مشخص شده که با سه نوع مهاربند مختلف مدل‌سازی شده است مشخص شد میزان جابه‌جایی بام در مدل بدون مهاربند بیشتر از سه مدل دیگر که با مهاربندهای مختلف مدل‌سازی شده‌اند بوده است میزان جابه‌جایی بام در مدل مهاربند ضربدری کمتر از بقیه مدل‌ها در سازه ۳ طبقه بوده است. به‌طورکلی سازه با مهاربند ضربدری به میزان ۶۳ درصد کاهش جابه‌جایی نسبت به مدل بدون مهاربند و بدون خرابی پیش‌رونده داشته است و در حالت خرابی پیش‌رونده مهاربند هفتی شکل عملکرد بهتری داشته است و به میزان جابه‌جایی ۶۴ درصد کاهش یافته است، همچنین شتاب بام در سازه‌های سه‌طبقه در حالتی که خرابی پیش‌رونده وجود ندارد مهاربند هشتی شکل بیشترین میزان را دارا بوده و نسبت به مدل بدون مهاربند ۴۶ درصد بیشتر شتاب را متحمل شده است و در حالت خرابی پیش‌رونده نیز مهاربند ضربدری بیشترین میزان شتاب بام را دارا بوده و حدود ۲۸ درصد بیشتر از مدل بدون مهاربند بوده است.

با بررسی در سازه‌های ۸ طبقه با حذف ستون و بدون حذف ستون مشخص شده که با سه نوع مهاربند هفتی، هشتی و ضربدری مدل‌سازی شده است، مشخص شد میزان جابه‌جایی بام در مدل بدون مهاربند بیشتر از سه مدل دیگر که با مهاربندهای مختلف مدل‌سازی شده‌اند بوده است. میزان جابه‌جایی بام در مدل مهاربند ضربدری کمتر از بقیه مدل‌ها در سازه ۸ طبقه بوده است. به‌طورکلی سازه با مهاربند ضربدری به میزان ۳۸ درصد کاهش جابه‌جایی نسبت به مدل بدون مهاربند و بدون خرابی پیش‌رونده داشته است و در حالت خرابی پیش‌رونده همین‌طور مهاربند ضربدری شکل عملکرد بهتری داشته است و میزان جابه‌جایی ۵۰ درصد کاهش یافته است، همچنین شتاب بام در سازه‌های هشت طبقه در حالتی که خرابی پیش‌رونده وجود ندارد مهاربند هشتی و هفتی شکل هر دو بیشترین میزان را دارا بوده و نسبت به مدل بدون مهاربند ۱۶ درصد بیشتر شتاب را متحمل شده است و در حالت خرابی پیش‌رونده نیز مهاربند هشتی بیشترین میزان شتاب بام را دارا بوده و حدود ۲۰ درصد بیشتر از مدل بدون مهاربند بوده است.

با بررسی در سازه‌های ۱۲ طبقه با حذف ستون و بدون حذف ستون مشخص شده که با سه نوع مهاربند هفتی، هشتی و ضربدری مدل‌سازی شده است مشخص شد میزان جابه‌جایی بام در مدل بدون مهاربند بیشتر از سه مدل دیگر که با مهاربندهای مختلف مدل‌سازی شده‌اند بوده است میزان جابه‌جایی بام در مدل مهاربند ضربدری کمتر از بقیه مدل‌ها در سازه ۱۲ طبقه بوده است. به‌طورکلی سازه با مهاربند ضربدری به میزان ۲۳ درصد کاهش جابه‌جایی نسبت به مدل بدون مهاربند و بدون خرابی پیش‌رونده داشته است و در حالت خرابی پیش‌رونده همین‌طور مهاربند ضربدری شکل عملکرد بهتری داشته است و میزان جابه‌جایی ۲۳ درصد کاهش یافته است، همچنین شتاب بام در سازه‌های هشت طبقه در حالتی که خرابی پیش‌رونده وجود ندارد مهاربند هشتی و هفتی شکل هر دو بیشترین میزان را دارا بوده و نسبت به مدل بدون مهاربند ۲۱ درصد بیشتر شتاب را متحمل شده است و در حالت خرابی پیش‌رونده نیز مهاربند هشتی بیشترین میزان شتاب بام را دارا بوده و حدود ۲۸ درصد بیشتر از مدل بدون مهاربند بوده است.

به‌طورکلی با بررسی‌های انجام شده بر روی مدل‌ها مشخص شد سازه‌ها در هر ارتفاعی درصورتی‌که بدون مهاربند مدل‌سازی شوند یا باید اوردیزاین طراحی گردند و یا امکان تخریب سازه وجود دارد؛ ولی با استفاده از مهاربند می‌توان خسارات ایجاد شده را کاهش داد. بااین‌حال هر مهاربندی نیز کارایی لازم را

ندارد. در مدل‌های بررسی شده مهاربند ضربدری به‌مراتب بهتر عمل کرده است و مهاربند هفتی شکل کارایی کمتری را داشته است.

References مراجع

Alavi, S. (2022). SAP practical training book with practical projects. Noavar Publications (in Persian).

Alizadeh, S., & Dashti, H. (2023). Effect of soil on the seismic response of concrete structures with metal cross bracing. *Journal of Structural and Construction Engineering*, *10*(1), 160-180 (in Persian).

Ashrafi, H., & Hassanzadeh, S. (2018). Investigation of progressive failure in reinforced concrete frames by considering rigid end areas and different types of column removal scenarios. *Structural and Construction Engineering Journal*, *5*(3), 66-84 (in Persian).

Bagheri Pourasil, M., Shadmand, M., & Shoja, I. (2013). Investigation of the vulnerability of steel buildings against progressive deterioration according to GSA regulations. *National Conference of Applied Civil Engineering and New Achievements, Karaj* (in Persian).

Bagler, A., & Parori, A. (2017). Performance evaluation and seismic comparison of steel bending frames with a dual system with convergent and divergent braces with the possibility of rocking movement. *Structural Analysis - Earthquake*, *15*(2), 29-38 (in Persian).

Bahmanpour, M., & Ghanbari, A. (2016). Investigation of the performance of various types of truss systems considering the progressive damage on the behavior of the structure. *National Conference of Engineering Sciences*, Tehran (in Persian).

Chen, J., & Li, B. (2021). Influence of convergence brace configuration on progressive collapse resistance of steel frames. *Journal of Structural Engineering*, *147*(1), 211-223.

Dashti Nasser Abadi, H., & Badiei Fard, S. (2015). Investigation of the performance of reinforced concrete buildings designed based on valid regulations and seismic requirements to deal with progressive failure under the effect of earthquake load. *National Conference on Technology and Technology in Civil Engineering, Architecture, Electricity and Mechanics*, Gorgan (in Persian).

Derakhshan Nezhad, A., Mirzaei Aliabadi, M., & Derakhshan Nezhad, A. (2023). Investigating the effect of different types of frames in a 15-story steel structure. *14th National Congress of Civil Engineering*, Zanjan (in Persian).

Ebrahimi, M., & Rahgoz, R. (2021). Comparison of maximum drift due to crack growth in chevron and non-buckling braces with short length. *7th Annual International Congress on Civil Engineering, Architecture and Urban Development*, Tehran (in Persian).

Eskandari, M., Pari Rou, P., & Omidi, S. (2023). Investigating the vibration performance of concrete structures with torsional irregularity under progressive failure using the incremental dynamic analysis method. *5th International Conference and 6th National Conference on Civil Engineering*, Architecture, Tehran. (in Persian).

Halaji Khosrowshah, A., & Yasharbinia, Y. (2015). Investigating progressive failure in bending frame and steel bracing system. *Structural Analysis - Earthquake*, *13*(4), 29-38 (in Persian).

Houshmand Ayini, A., & Abdulahi, Z. (2021). Numerical investigation of the seismic performance of rotational friction dampers in steel frames with 8-shaped chevron braces. *8th International Conference on Modern Researches in Civil Engineering, Architecture, Urban Management and Environment*, Tehran (in Persian).

Jiang, J., Li, G.-Q., & Usmani, A. (2015). Effect of bracing systems on fire-induced progressive collapse of steel structures using OpenSees. *Fire Technology*, *51*, 1249-1273.

Kai, Q., Lan, X., Li, Z., & Fu, F. (2021). Effects of steel braces on robustness of steel frames against progressive collapse. *Journal of Structural Engineering*, *147*(11), 45-66.

Mahmoudi, Z., & Habshizadeh, M. (2022). Investigating the seismic performance of steel bending frames reinforced with knee brace and irregular in plan. *Second International Conference on Architecture, Civil Engineering, Urban Planning, Environment and Horizons of Islamic Art in Declaration of the Second Step of the Revolution*, Tabriz (in Persian).

Mehbod, M., & Seifi, M. (2016). Innovation in the

overload diagram of steel frames with converging braces. *Structure and Steel*, *14*(21), 5-13 (in Persian).

Qalichkhani, A., & Adib Ramezani, M. (2019). Seismic behavior of end connection plates in steel frames with convergent bracing. *Structural and Construction Engineering*, *7*(30), 132-145 (in Persian).

Raisi Dehkordi, M., Alizadeh Esfiukhi, M., & Iqbali, M. (2015). Evaluation of the application of converging, diverging and buckling steel braces in the seismic improvement of steel bending frames. *Modeling in Engineering, 14*(47), 95-114 (in Persian).

Shahidzadeh, M., Shahlonjad, I., & Derakhshan Nezhad, A. (2022). Comparison of the behavior of steel frames under the effect of explosion. *Journal of Steel & Structure*, *17*(41), 26-39 (in Persian).

Tsai, M. (2012). A performance-based design approach for retrofitting regular building frames with steel braces against sudden column loss. *Journal of Constructional Steel Research*, *77*, 1-11.

واژه‌نامه

۱- قاب مهاربندی‌شده همگرا	Concentrically Brace Frame (CBF)
۲- قاب مهاربندی‌شده واگرا	Eccentrically Braced Frame (EBF)
۳- قاب فولادی	Steel Frame
۴- خرابی پیش‌رونده	Progressive Breakdown
۵- تحلیل حساسیت مرتبه اول ممان دوم	First- Order Second Moment (FOSM)
۶- تحلیل دینامیکی غیرخطی	Nonlinear Dynamic Analysis

design of beam-to-column connection with resistance to earthquake and heat. *5th International Congress on Civil Engineering, Architecture and Urban Development*, Tehran (in Persian).

Mirzaei Aliabadi, M., & Derakhshan Nezhad, A. (2022). Comparison of seismic performance of three types of steel structures with viscous damper, converging brace and bending frame. *8th International Conference on Civil, Structural and Earthquake Engineering*, Tehran (in Persian).

Moradi, M., & Tawakoli, H. (2021). Seismic sensitivity evaluation of steel frames with convergent bracing to random variables. *Amirkabir Civil Engineering Journal*, *53*(6), 2371-2388 (in Persian).

Moradkhani, M., Riahi Nouri, A., & Mohammadi, M. (2019). Investigating progressive damage in high-rise steel buildings with a dual system of special bending frame and non-buckling brace. *Earthquake Science and Engineering*, *7*(3), 151-168 (in Persian).

Mortazavi, M., Esmailabadi, R., & Fayouz, A. (2022). New method of analysis of complex trusses and simple frames with converging bracing. *Civil and Project Monthly*, *5*(2), 23-41 (in Persian).

Naji, A., & Khodaverdi Zadeh, M. (2019). Progressive collapse analysis of steel braced frames. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, *24*(2), 7-19.

Naveed, I., & Maleki, A. (2022). Geometric effect of connecting beam in the progressive failure of ten-story steel frames with off-axis bracing. *5th International Conference and 6th National Conference on Civil Engineering*, Tehran (in Persian).

Ozcelik, Y., Saritas, A., & Clayton, P. M. (2016). Comparison of chevron and suspended-zipper braced steel frames. *Journal of Constructional Steel Research*, *119*, 169-175.

Porsardar, H., Yazdinia, M., & Rahnoord, R. (2014). Review of design code approaches and methods against progressive deterioration. *International Conference on New Achievements in Civil Engineering, Architecture, Environment and Urban Management*, Tehran (in Persian).

Pour Mohammadhadi, A., & Laden, J. (2016). The effect of reducing the cross-section of braces on the

The Effect of Converging Braces on the Strength of Steel Frames in Progressive Failure

Mahbobeh Mirzaie Aliabadi[1*], Ahmed Eskandari[2] and Amir Hossein Derakhshan Nezhad[2]

1. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Technical and Engineering Faculty, Behbahan Khatam Alanbia University of Technology, Behbahan, Iran, *Corresponding Author, email: mirzaie@bkatu.ac.ir
2. M. Sc. Student in Civil-Structural Engineering, Technical and Engineering Faculty, Behbahan Khatam Alanbia University of Technology, Behbahan, Iran

In contemporary urban environments, building structures are increasingly exposed to a diverse array of extreme threats. Standard engineering design practices often focus on gravity loads and expected environmental forces, frequently neglecting "abnormal" load cases. Among these, the sudden loss of a primary vertical load-carrying member such as a column represents one of the most perilous scenarios. This failure, often precipitated by construction inaccuracies, industrial explosions, accidental vehicular impacts, or other unforeseen catastrophic events, acts as a trigger for a catastrophic phenomenon known as progressive collapse. In such a scenario, the failure of a single element initiates a chain reaction, where the redistribution of forces causes adjacent members to fail, eventually leading to partial or total structural collapse. However, the inherent susceptibility of steel frames to spontaneous, large-scale deformation under redistributed loads creates a critical vulnerability. The primary objective of this research was to conduct a comprehensive investigation into the efficacy of concentric bracing systems specifically diagonal, V-shaped, and inverted V-shaped braces as a defensive strategy to enhance the ductility and overall safety of steel buildings against the threat of progressive collapse. The methodological framework of the study utilized SAP2000, a high-precision finite element analysis software. The researchers performed non-linear static and dynamic analyses, which are essential for capturing the complex structural response after a member has been removed. By accounting for geometric non-linearities, the models were able to accurately simulate how connections behave during the intense stress of a structural failure. The scope of the study was broad, analyzing structures of varying heights 3, 8, and 12 stories under both normal conditions and simulated column-removal events. For the 3-story structures, the data highlighted a significant disparity between unbraced and braced configurations. Without any bracing, the structure proved highly unstable. The inclusion of cross-bracing (diagonal) resulted in a 63% reduction in roof displacement compared to the unbraced baseline in non-collapse scenarios. When progressive collapse was explicitly introduced, the V-shaped bracing emerged as the superior performer, mitigating displacement by 64%. Acceleration profiles provided further insight: while the inverted V-bracing caused a 46% increase in roof acceleration during non-collapse conditions, the cross-bracing system saw the highest acceleration 28% higher than unbraced models during the collapse event itself. The 8-story and 12-story models revealed that the effectiveness of bracing is not purely tied to height but depends heavily on the configuration. For 8-story buildings, the cross-bracing system consistently outperformed others, reducing roof displacement by 38% in stable conditions and by a remarkable 50% during a collapse event. The acceleration metrics showed that under non-collapse conditions, chevron-style (V and inverted V) braces experienced 16% higher acceleration, whereas, in collapse, the inverted V-brace showed a 20% increase. The 12-story models maintained these trends; the cross-brace remained the most efficient at controlling displacements, yielding a 23% reduction, while the V-shaped and inverted V-shaped configurations induced higher accelerations during collapse events, peaking at 28% above the baseline. The fundamental conclusion drawn from this extensive analysis is that unbraced structures, regardless of their total height, are dangerously susceptible to disproportionate collapse unless they are heavily over-designed. Such over-design is often economically unfeasible and inefficient. The study confirms that the strategic integration of concentric bracing significantly bolsters a structure’s capacity to absorb energy and redistribute forces after a column

failure. Ultimately, the research identifies the cross-bracing system as the most effective solution for minimizing displacement and improving overall structural resilience. These findings provide a vital empirical basis for engineers and architects, advocating for the adoption of specific bracing geometries to safeguard infrastructure against the modern, unpredictable risks of the 21st century.

Keywords: Progressive Failure, Convergent Braces, Steel Frames, Earthquakes.