



http://journaliss.ir

ارزیابی عملکرد لرزه‌ای قاب‌های ترکیبی فولادی خمشی و مهاربندی واگرا با اتصالات مرکزگرای پس کشیده

فرشاد بحری^۱، شهریار طاووسی تفرشی^{۱*}، نادر فنائی^۲

۱- گروه مهندسی عمران، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲- گروه مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

* تهران، صندوق پستی ۱۱۴۸۹۶۳۵۳۷، sh_tavousi@iauctb.ac.ir

چکیده

قاب‌های خمشی فولادی ویژه به دلیل شکل‌پذیری مناسب، کاربرد گسترده‌ای در سازه‌های مقاوم در برابر زلزله دارند؛ اما پس از زلزله‌های شدید، معمولاً دچار جابه‌جایی پسماند زیادی می‌شوند. در مقابل، سیستم‌های مرکزگرای پس کشیده که با استفاده از کابل‌های فولادی پیش‌تنیده طراحی می‌شوند، با ایجاد نیروی بازگرداننده، توانایی بازگرداندن سازه به حالت اولیه را دارند. با این حال، این سیستم‌ها به دلیل رفتار ارتجاعی اجزا، ظرفیت اتلاف انرژی پایینی دارند و ممکن است در برابر زلزله‌های شدید، دررفت‌های قابل توجهی تجربه کنند.

در این پژوهش، برای بهره‌گیری از مزایای دو سیستم سازه‌ای، چند پیکربندی ترکیبی به صورت عددی بررسی شده‌اند. این پیکربندی‌ها شامل قاب خمشی ویژه، قاب مهاربندی واگرا و قاب مرکزگرای پس کشیده هستند. ۱۲ مدل قاب فولادی سه دهانه و یک طبقه با استفاده از نرم‌افزار آباکوس تحت بارگذاری چرخه‌ای تحلیل شدند. نوآوری پژوهش در طراحی یک سیستم ترکیبی جدید با عملکرد لرزه‌ای متعادل، سختی جانبی مطلوب و کاهش جابه‌جایی پسماند است.

نتایج نشان داد ترکیب قاب خمشی با سیستم مرکزگرا، جابه‌جایی پسماند را تا حدود ۳۵٪ کاهش می‌دهد. همچنین، کاهش نیروی پیش‌تنیدگی کابل‌ها، موجب افزایش ۲/۵ برابری نسبت میرایی معادل شد. ترکیب قاب مهاربندی واگرا با قاب مرکزگرا نیز نسبت میرایی معادل را تا ۶٪ در دررفت ۲٪ افزایش داد.

واژگان کلیدی

قاب دارای اتصالات مرکزگرا، قاب خمشی ویژه، روش اجزای محدود، بارگذاری چرخه‌ای، میرایی، استهلاک انرژی

Seismic Performance Evaluation of Steel Moment and Eccentrically Braced Hybrid Frames with Post-Tensioned Self-Centering Connections

F. Bahri, Sh. Tavousi Tafresehi, N. Fanaie

Abstract

Special Moment-Resisting Frames (SMRFs) are widely adopted in seismic-resistant steel structures due to their notable ductility. However, they often exhibit significant residual drifts following major earthquakes, which can compromise the structural serviceability and increase repair costs. On the other hand, Post-Tensioned Self-Centering (PTSC) systems, designed using prestressed steel tendons, generate restoring forces that enable the structure to return to its original configuration. Despite this advantage, PTSC systems typically show low energy dissipation capacity and may experience considerable drifts under strong ground motions due to their elastic behavior.

To leverage the strengths of both systems, this study investigates several hybrid configurations combining SMRFs, PTSC frames, and Eccentrically Braced Frames (EBFs). Twelve one-story, three-bay steel frames were modeled and analyzed under cyclic loading using Abaqus finite element software. The novelty of the research lies in proposing a hybrid system that achieves balanced seismic performance, enhanced lateral stiffness, and reduced residual drift.

Results indicate that integrating SMRFs with PTSC systems can reduce residual drift by up to 35%. Moreover, reducing the post-tensioning force of tendons led to a 2.5-fold increase in the equivalent damping ratio. Combining EBFs with PTSC frames further increased the damping ratio up to 6% at 2% drift levels.

Keywords

Post-Tensioned Self-Centering Frame (PTSC), Special Moment-Resisting Frame (SMRF), Finite Element Method (FEM), Cyclic Loading, Damping, Energy Dissipation

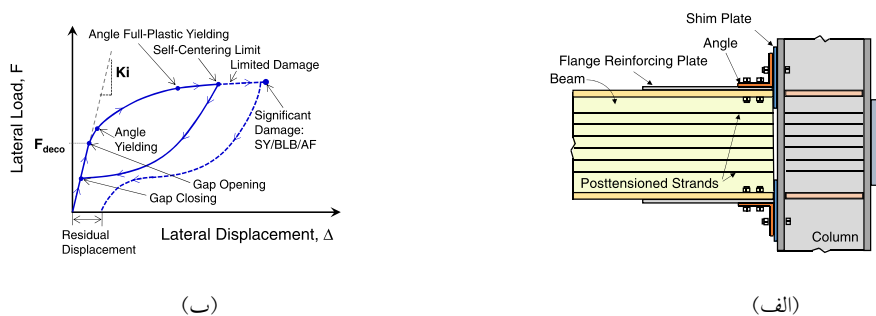


سیستم‌های سازه‌ای مقاوم در برابر زلزله، انرژی‌های ناشی از زلزله را از طریق آسیب کنترل‌شده در اعضای سازه‌ای از پیش تعیین شده مستهلک می‌نمایند. این اعضای از پیش تعیین شده به نوعی مانند فیوز عمل می‌کنند تا از گسترش آسیب به سایر بخش‌های سازه جلوگیری نمایند [۱]. با این حال، این اعضای آسیب‌دیده پس از زلزله در حالت تغییرشکل یافته باقی می‌مانند. این وضعیت باعث ایجاد جابه‌جایی‌های دائمی در سازه می‌شود که به آن «جابه‌جایی پسماند» گفته می‌شود و یکی از پیامدهای نگران‌کننده زلزله است. به‌عنوان نمونه، پس از زلزله‌های نیوزلند در سال‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۱۱، خسارات بیمه‌ای تخمینی به حدود ۳۰ میلیارد دلار نیوزلند رسید [۲]. این خسارات اقتصادی قابل توجه، ضرورت طراحی سازه‌هایی با تاب‌آوری بالا در برابر زلزله را که شامل مکانیزم‌های کاهش آسیب می‌شوند، در پی دارد.

رخداد‌های لرزه‌ای متوالی، یعنی تکرار حرکات زمین با شدت متوسط تا قوی در بازه‌های زمانی کوتاه، در بسیاری از مناطق زلزله‌خیز جهان مشاهده شده‌اند [۳-۵]. در سال‌های اخیر، علاقه‌مندی به سیستم‌های سازه‌ای مجهز به مکانیزم‌های مرکزگرا^۱ که قابلیت بازگشت خودکار سازه‌ها به وضعیت قبل از زلزله را دارند، افزایش یافته است. پژوهش‌های قابل توجهی بر روی قاب‌های فولادی مرکزگرا، به‌ویژه قاب‌های مهاربندی شده [۶-۸]، بادبندهای میراگر مرکزگرا [۹ و ۱۰]، قاب‌های خمشی مرکزگرا [۱۱ و ۱۲]، سیستم‌های کابلی گهواره‌ای [۳ و ۱۴]، ساختمان‌های فولادی با سیستم تیر کوپله تحت لغزش کنترل‌شده [۱۵] و دیوارهای برشی فولادی [۱۶] انجام شده است.

کابل‌های فولادی پس‌کشیده^۲ به‌عنوان یک روش مؤثر برای بازگرداندن خودکار قاب‌های فولادی پس از تحمل نیروهای خارجی به کار می‌روند [۱۷]. در این قاب‌ها، کابل‌های پس‌کشیده موازی با تیرها نصب شده و با ایجاد نیروی بازگرداننده، تیرها را پس از تغییرشکل به سمت موقعیت اولیه در نزدیکی ستون‌ها بازمی‌گردانند. علاوه بر اجزای پس‌کشیده، سیستم‌های ویژه‌ای نیز برای جذب یا تغییر مسیر انرژی به کار می‌روند. این سیستم‌ها از آسیب دیدن اعضای اصلی سازه جلوگیری می‌کنند. اگرچه ساخت قاب‌های مرکزگرا عمدتاً از روش‌های معمول ساخت سازه‌های فولادی پیروی می‌کند، اما به‌کارگیری اعضای پیش‌تنیده، دقت بیشتری را در مرحله ساخت و نصب می‌طلبد [۱۸].

شکل (۱) جزئیات اتصال پس‌کشیده را نشان می‌دهد که شامل نبشی‌های بالایی و نشیمن به‌عنوان اجزای میراگر انرژی است. همچنین نمای ساده‌شده‌ای از رفتار لرزه‌ای این اتصالات ارائه شده است. رفتار خمشی اتصال مرکزگرا با باز و بسته شدن شکاف‌ها در محل اتصال تیر به ستون توصیف می‌شود، که توسط ریکلز^۳ و همکاران بررسی شده است [۱۱ و ۱۹]. به دلیل این رفتار باز شدن شکاف‌ها، تغییرشکل قابل توجه اغلب در نبشی‌های فولادی رخ می‌دهد و در نتیجه تیرها و ستون‌ها عمدتاً در محدوده الاستیک باقی می‌مانند. شکل (۱-الف) هندسه یک اتصال مرکزگرا و شکل (۱-ب) نمودارهای چرخه‌ای این اتصال مرکزگرا را نمایش می‌دهد. در شکل (۲)، چرخه‌های هیستریزس یک اتصال مرکزگرا و یک قاب خمشی ویژه متداول با یکدیگر مقایسه شده‌اند.



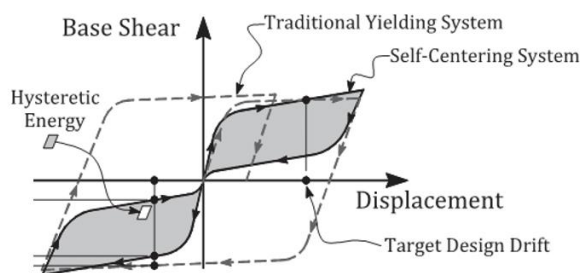
شکل ۱- اتصال قاب خمشی پس‌کشیده پیشنهادی توسط گارلوک^۴ و همکاران [۱۱] الف) نمای کلی اتصال ب) پاسخ چرخه‌ای - (SY: تسلیم رشته‌ها؛ BLB: کماتش موضعی تیر؛ AF: شکست نبشی)

² Post-Tensioned Connection

³ Ricles

⁴ Garlock

¹ Self-Centering



شکل ۲- مقایسه نمودار هیستریزس قاب مرکزگرا با قاب خمشی ویژه فولادی متداول [۲۰]

پژوهش‌های بیش‌تری بر انواع سیستم‌های مرکزگرا انجام شده است؛ از جمله مطالعه جیانگ^۵ و همکاران که پاسخ مکانیکی اتصالات صفحه قوسی مرکزگرا را ارزیابی کردند [۲۶]. فنگ^۶ و همکاران نیز رویکرد نوینی با استفاده از فولادهای حافظه‌دار و آسیب حدافلی به اتصال ارائه نمودند [۲۷]. محمدی‌نیا و مرادی نوعی اتصال تیر-ستون با میله‌های دارای فولاد حافظه‌دار را بررسی کردند که ویژگی‌های مرکزگرایی را فراهم کرده و آسیب پسماند را کاهش می‌دهد؛ این اتصال از طریق روش محیط پیوسته شبیه‌سازی و پاسخ مرکزگرایی آن تحلیل شد [۲۸]. آن‌ها در این زمینه یک مطالعه عددی جامع ارائه نمودند [۲۷]. هوانگ^۷ و همکاران اثر مشترک کابل‌های پس‌کشیده در سیستم مرکزگرا و مکانیزم اصطکاکی دفع انرژی را بررسی کرده و یافته‌ها را از طریق آزمایش‌های تجربی تأیید کردند [۲۹]. علاوه بر این، نه تنها مکانیزم‌های جدید مرکزگرا مورد بررسی قرار گرفتند، بلکه سیستم‌های سازه‌ای ترکیبی با قاب‌های مرکزگرا نیز مطالعه شده و با سیستم‌های رایج باربر جانبی نظیر قاب خمشی مقایسه شدند [۳۰-۳۳]. در مطالعه‌ای دیگر، احمدی و همکاران مقاومت در برابر فروریزش قاب‌های چندطبقه دارای اتصالات مرکزگرا را از طریق شبیه‌سازی اجزای محدود بررسی نمودند [۳۴]. پژوهش‌های متعددی نیز به بررسی تأثیر استفاده از اتصالات مرکزگرا در پای ستون‌های طبقه همکف به‌منظور جلوگیری از تشکیل مفاصل پلاستیک اختصاص یافت [۳۵]. هوانگ و همکاران سختی اولیه سیستم‌های مرکزگرا و کاربرد آن در قاب‌های خمشی را به‌صورت تجربی و عددی ارزیابی نمودند [۳۶]. تورس^۸ نیز عملکرد لرزه‌ای سازه‌های قاب‌های دارای سیستم مرکزگرا را تحت پس‌لرزه‌ها تحلیل کرد و کاهش

مطالعات متعددی امکان ادغام عناصر پس‌کشیده در قاب‌های فولادی را بررسی کرده‌اند. این مطالعات شامل کارهای ریکلز [۱۲ و ۱۹ و ۲۱]، باین‌حال، شایان‌ذکر است که آیین‌نامه‌های طراحی لرزه‌ای موجود، مقررات خاص و جامعی در این حوزه ندارند. برای رفع این خلأ، انجام تحقیقات جامع‌تری ضرورت دارد؛ این تحقیقات باید عملکرد لرزه‌ای اتصالات پس‌کشیده را ارزیابی کرده و چارچوب‌های طراحی مناسب برای مهندسان سازه ارائه دهند. در این راستا، روش تحلیل اجزای محدود به‌عنوان یک ابزار کارآمد برای بررسی رفتار لرزه‌ای اتصالات فولادی پس‌کشیده مطرح شده است. مدل‌های اجزای محدود امکان تحلیل دقیق پاسخ‌های سازه‌ای و رفتار اجزای مختلف را فراهم می‌کنند که اغلب از طریق آزمایش‌های فیزیکی به‌راحتی میسر نیست. مطالعات متعددی از مدل‌سازی اجزای محدود برای تحلیل اتصالات فولادی پس‌کشیده بهره برده‌اند. به‌عنوان نمونه، چو^۲ و همکاران با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس پاسخ نیرو-جابجایی تیر و توزیع تنش در اتصال پس‌کشیده را پیش‌بینی کردند و نتایج را با داده‌های آزمایش اتصالات ستون‌های قوطی پرشده با بتن و اتصالات صلب تیر به ستون با مقطع بال کاهش‌یافته مقایسه نمودند [۲۲]. فاجیانو^۳ و همکاران نیز با بهره‌گیری از آباکوس به ارزیابی رفتار اتصال پس‌کشیده با میله‌های میراگر انرژی پرداختند [۲۳]؛ مفهومی که توسط کریستوپولوس^۴ و همکاران معرفی شده بود [۲۴]. الگوهای تغییرشکل و تنش این مدل در تحقیقات آن‌ها به‌تفصیل بررسی شد. همچنین، باوندی و همکاران شاخص کمی جدیدی برای ارزیابی سریع عملکرد سازه‌های مرکزگرا ارائه دادند [۲۵].

¹ Wolski

² Chou

³ Faggiano

⁴ Christopoulos

⁵ Jiang

⁶ Fang

⁷ Huang

⁸ Torres

قابل توجهی در جابه‌جایی پسماند گزارش داد [۳۷]. کامپردیس^۱ و همکاران آرایش جدید ترکیب قاب خمشی و سیستم مرکزگرا را پیشنهاد کردند که در آن پای ستون نیز با جزئیات مشابه تیرها به‌منظور ایجاد قابلیت‌های مرکزگرا تجهیز شده بود [۳۸]. نتایج آن‌ها نشان داد این رویکرد می‌تواند نیاز به اجزای مرزی قاب‌های مرکزگرا را به‌طور چشمگیری کاهش دهد. مرادی و علم نیز در مطالعه‌ای عددی، سه پارامتر اصلی شامل صفحات تقویتی بال تیر، مقاومت تسلیم و سخت‌شدگی کرنشی نبشی‌های فولادی و میزان نیروی اولیه پس‌کشیدگی کابل‌ها را بررسی کردند [۳۹]. کیم^۲ و کریستوپولس نیز تحقیق ترکیبی تجربی و پارامتریک عددی را بر روی جزئیات جدید اتصالات پس‌کشیده جهت افزایش شکل‌پذیری پاسخ ارائه دادند [۴۰]. هو^۳ و همکاران (۲۰۲۵) نوعی اتصال برشی نوین را معرفی کردند که ترکیبی از مهاربندهای فولاد آلیاژی حافظه‌دار و اتصالات مرکزگرا است و نشان دادند افزایش سطح فولاد آلیاژی حافظه‌دار ظرفیت تحمل بار را افزایش و تغییرشکل باقی‌مانده را کاهش می‌دهد. مدل مکانیکی ساده‌شده این اتصال با نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود تطابق خوبی داشت [۴۱]. گو^۴ و همکاران (۲۰۲۵) فناوری نوینی از تیرهای مرکزگرا را معرفی نمودند که با استفاده از مکانیزم‌های مرکزگرایی، قابلیت کاهش قابل‌توجه تغییرشکل‌های بین طبقه و افزایش تاب‌آوری لرزه‌ای سازه‌ها را فراهم می‌کند. آزمایش‌های بر روی قاب فولادی سه‌طبقه نشان داد که قاب‌های مرکزگرای دارای پیش‌بار اولیه، نسبت به قاب‌های معمولی و بدون پیش‌بار، عملکرد بهتری در کاهش تغییرشکل‌ها و جذب انرژی دارند [۴۲]. شی^۵ و همکاران (۲۰۲۵) رفتار مکانیکی مهاربند ترکیبی مرکزگرا که شامل کابل‌های فولاد آلیاژی حافظه‌دار و دمپ‌های ویسکوالاستیک است را از طریق آزمایش‌های چرخه‌ای بررسی کرده و نشان دادند که افزایش تعداد و پس‌کشیدگی کابل‌های فولاد آلیاژی حافظه‌دار باعث افزایش سختی اولیه و نیروی فعال‌سازی می‌شود، درحالی‌که تغییرشکل باقی‌مانده کاهش می‌یابد. همچنین کاهش پس‌کشیدگی کابل‌ها در چرخه‌های بعدی اهمیت بالایی در کاربردهای آینده دارد. سیستم مرکزگرا مزایای متعددی دارد، به‌ویژه زمانی که با سیستم‌های مقاوم جانبی نظیر قاب‌های خمشی ویژه یا قاب‌های مهاربندی‌شده برون‌محور ترکیب شود [۴۳]. قارقوز و همکاران (۲۰۲۵) چارچوب نوآورانه‌ای را برای بهینه‌سازی استراتژی‌های مقاوم‌سازی لرزه‌ای با استفاده از ترکیب یادگیری ماشین تبیینی و

سیستم دمپر اصطکاکی چرخشی معرفی کردند که منجر به بهبود دقت طراحی و کاهش تغییرشکل‌های باقی‌مانده و افزایش ظرفیت جذب انرژی سازه‌ها می‌شود. این رویکرد با تحلیل داده‌محور، پارامترهای مقاوم‌سازی را متناسب با خطرات لرزه‌ای بهینه می‌کند و عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها را به‌طور قابل‌توجهی ارتقا می‌دهد [۴۴]. سونگ^۶ (۲۰۲۵) ظرفیت اتلاف انرژی دیوارهای برشی مرکزگرا را تحت بارگذاری‌های چرخه‌ای با استفاده از مدل‌نمایی بررسی و کمی‌سازی نمود. نتایج نشان داد دیوارهایی با نسبت آرماتور بیش‌تر و مقاومت بالاتر بتن، تخریب کم‌تری در ظرفیت اتلاف انرژی دارند، درحالی‌که پارامتر مرکزگرایی بزرگ‌تر، باعث کاهش این ظرفیت در بارگذاری‌های کم‌تر از تغییرشکل نهایی می‌شود [۴۵]. حسلو و فنائی (۱۴۰۳) عملکرد اتصالات مرکزگرا را با استفاده از شبیه‌سازی عددی در آباکوس بررسی کردند و اثر پارامترهایی مانند مقاومت تسلیم نبشی، نیروی پس‌کشیدگی و سطح مقطع کابل را بر رفتار لرزه‌ای ارزیابی نمودند. نتایج نشان داد که افزایش نیروی مرکزگرایی و سطح مقطع کابل، ظرفیت خمشی و باربری جانبی اتصال را بهبود می‌دهد، اما افزایش بیش از حد نیروی پس‌کشیدگی می‌تواند موجب آسیب به تیر شود [۴۶]. گرامی و همکاران (۱۴۰۲) عملکرد قاب‌های فولادی مجهز به میراگر آلیاژ حافظه‌دار شکلی را تحت اثر لرزه‌ای اصلی و پس‌لرزه بررسی نمودند و نشان دادند که استفاده از این میراگرها می‌تواند در یافت پسماند و تغییرشکل نسبی را کاهش دهد. نتایج تحلیل دینامیکی افزایشی در Opensees بیانگر بهبود رفتار لرزه‌ای سازه به‌ویژه پس از تجربه تغییر مکان‌های شدید ناشی از زلزله اصلی است [۴۷]. ظرفیت اتلاف انرژی و سختی جانبی سیستم‌های قاب خمشی و مهاربندی‌شده برون‌محور در کنار خواص مرکزگرایی سیستم پس‌کشیده، موجب کاهش یا حذف در یافت‌های پسماند می‌گردد. با این حال، به دلیل پیچیدگی جزئیات و تنوع پارامترها، تحقیقات گسترده‌ای برای ارزیابی این سیستم‌ها مورد نیاز است. در این مطالعه، ۱۲ قاب فولادی یک‌طبقه با آرایش‌های متنوعی شامل قاب خمشی ویژه و قاب مهاربندی‌شده و اگر با سیستم مرکزگرایی پس‌کشیده در نرم‌افزار آباکوس مورد بررسی قرار گرفتند. اهداف اصلی این تحقیق عبارت‌اند از:

۱- مقایسه رفتار چرخه‌ای مدل‌های مشابه (سیستم مرکزگرا با قاب خمشی و یا قاب مهاربندی‌شده و اگر)

⁶ Song

¹ Kamperidis

² Kim

³ Hu

⁴ Xu

⁵ Shi



۲- مقایسه نمودارهای میرایی و اتلاف انرژی بین مدل‌های مورد بررسی مشابه

۳- مقایسه جابه‌جایی پسماند مدل‌های مختلف با یکدیگر

۴- بررسی وضعیت کرنش پلاستیک معادل تعدادی از نمونه‌ها

۲- مطالعات موردی سازه‌ها

در این تحقیق، ساختمان فولادی ۱۲ طبقه‌ای با پلان نشان داده‌شده در شکل (۳)، با سیستم‌های مقاوم لرزه‌ای مختلف تحلیل و طراحی شد. این ساختمان دارای پنج دهانه در دو راستای متعامد با طول هر دهانه ۶ متر و ارتفاع هر طبقه ۳/۵ متر است. در قاب محیطی ساختمان، سه دهانه میانی به‌عنوان سیستم مقاوم باربر جانبی در نظر گرفته شده و طراحی شدند.

طراحی سازه‌ها با اتصالات مرکزگرا مطابق روابط ارائه‌شده توسط گارلوک و همکاران انجام شده است [۱۱]. قاب‌های خمشی فولادی ویژه نیز مطابق آیین‌نامه ASCE 7-22 طراحی شدند [۴۸]. بارهای مرده بام و سایر طبقات به‌ترتیب برابر با ۶۰۰ و ۵۵۰ کیلوگرم بر مترمربع و بارهای زنده بام و سایر طبقات به‌ترتیب ۱۵۰ و ۲۰۰ کیلوگرم بر مترمربع فرض شده‌اند. برای بارگذاری زلزله، ساختمان بر روی خاک تپ D با ضرایب اصلاح $F_v = 1.5$ و $F_a = 1.0$ طبق ASCE 7-22 قرار دارد. پارامترهای شتاب پاسخ طیفی حداکثر زلزله (MCER) شامل $S_s = 1.03g$ برای پی‌بند کوتاه و $S_1 = 0.6g$ برای پی‌بند یک ثانیه در نظر گرفته شده‌اند. ساختمان در دسته طراحی زلزله^۱ E قرار داشته و ضریب رفتار برای قاب خمشی فولادی ویژه برابر با ۸ فرض شده و ضریب اهمیت I برابر با ۱ است.

برای اتصالات مرکزگرای پس‌کشیده و تیرهای موجود در دهانه‌های قاب خمشی فولادی ویژه، از فولاد S235 با مقاومت تسلیم ۲۳۵ مگاپاسکال استفاده شده و ستون‌ها از فولاد S355 با مقاومت تسلیم ۳۵۵ مگاپاسکال در نظر گرفته شدند. کابل‌های پس‌کشیده مرکزگرا نیز با مقاومت نهایی ۱۰۰۰ مگاپاسکال در محاسبات لحاظ شدند.

فرآیند طراحی مطالعات موردی شامل مراحل زیر است:

• مرحله ۱: طراحی قاب خمشی فولادی ویژه و قاب مهاربندی‌شده واگرا

در ابتدا، دو ساختمان ۱۲ طبقه به‌صورت جداگانه با استفاده از سیستم‌های باربر جانبی قاب خمشی ویژه و قاب مهاربندی‌شده واگرا طراحی شدند تا ظرفیت باربری مورد نیاز آن‌ها تأمین گردد.

^۱ Seismic Design Category (SDC)

در ادامه، قاب واقع در طبقه همکف این ساختمان‌ها به‌عنوان نمونه مطالعاتی انتخاب شد تا مورد تحلیل و مدل‌سازی دقیق‌تر قرار گیرد. در این مرحله، فرض بر آن است که قاب‌های مرکزگرای پس‌کشیده تا محدوده‌ای از بارگذاری زیرمجموعه قاب‌های خمشی محسوب می‌شوند که در اتصالات آن‌ها امکان ایجاد تغییرشکل‌های غیرارتجاعی کنترل‌شده و بازگشت به وضعیت اولیه پس از اتلاف انرژی ناشی از زلزله فراهم شده است.

• مرحله ۲: بررسی ستون‌ها و اتصالات بر اساس ضوابط لرزه‌ای

ستون‌ها و اتصالات با استناد به ضوابط لرزه‌ای متداول برای قاب‌های خمشی و مهاربندی‌شده ویژه، کنترل و طراحی شده‌اند. این کنترل‌ها شامل رعایت اصولی چون «قاعده‌ی تیر ضعیف-ستون قوی»، «کنترل برش چشمه اتصال» و «بررسی ظرفیت ستون‌ها در برابر مکانیزم خرابی مهاربندها» است. هدف از این ملاحظات، تضمین رفتار مناسب و پایدار سازه تحت اثر بارهای زلزله است.

• مرحله ۳: طراحی اتصالات مرکزگرای پس‌کشیده

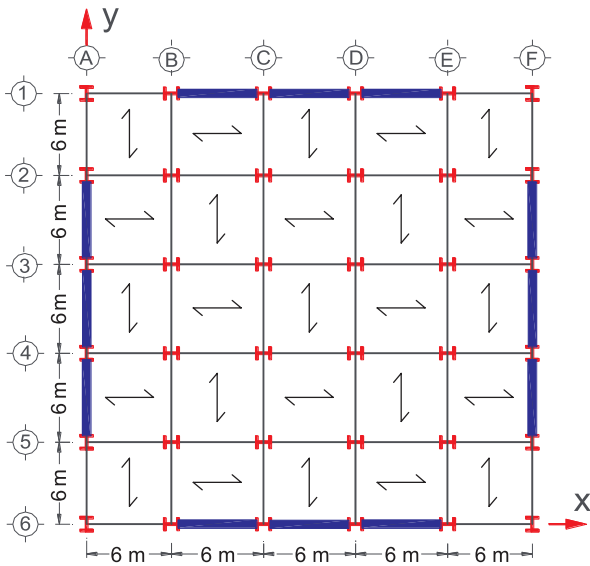
اتصالات مرکزگرای پس‌کشیده با بهره‌گیری از روابط ارائه‌شده توسط گارلوک و همکاران [۱۱] به‌گونه‌ای طراحی شدند که ظرفیت خمشی آن‌ها معادل با کل نیروی برشی وارد بر قاب اصلی ساختمان ۱۲ طبقه در سطح دررفت ۲ درصد باشد.

• مرحله ۴: کنترل ضوابط لرزه‌ای در سطح اتصال

جزئیات اتصال و اعضای کنترل‌کننده نیرو تحت ضوابط لرزه‌ای مورد بازبینی قرار می‌گیرند تا اطمینان حاصل شود که این اعضا قادر به تحمل افزایش تقاضای ناشی از اعمال ضریب اضافه‌مقاومت هستند و از تشکیل زود هنگام مفاصل پلاستیک در آن‌ها جلوگیری می‌شود.

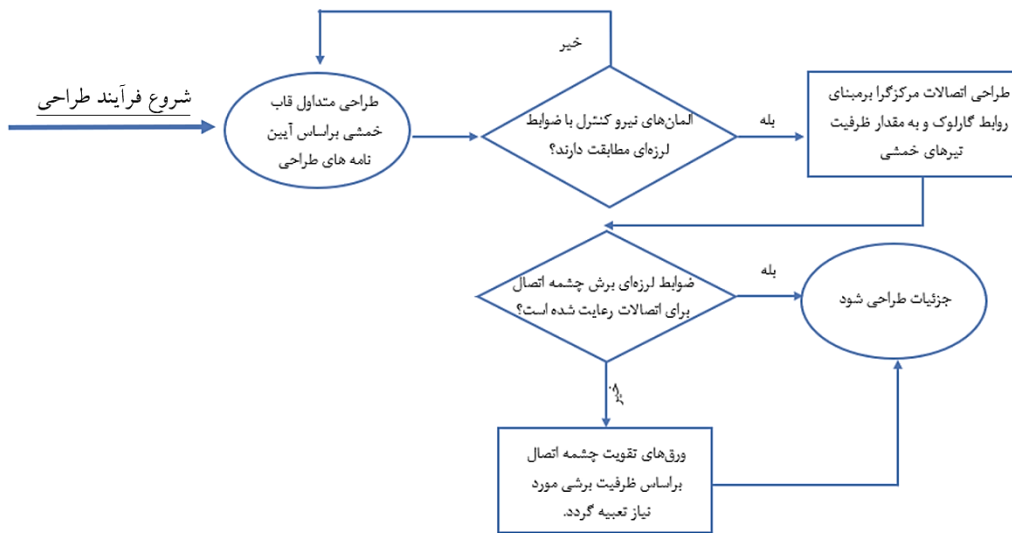
• مرحله ۵: کنترل رفتار تیرها در محل اتصالات

بیش‌ترین لنگر خمشی ناشی از بارهای لرزه‌ای معمولاً در انتهای تیرها رخ می‌دهد و با دورشدن از این نقاط کاهش می‌یابد؛ بنابراین تقویت موضعی بال تیر در مجاورت اتصالات باعث حفظ رفتار الاستیک در طول تیر تحت بار طراحی می‌شود. این روش طراحی، با حفظ شباهت در ابعاد و ظرفیت اجزای اصلی نسبت به قاب‌های خمشی ویژه، تفاوت کمی در مصرف فولاد دارد و عمده تغییر تنها در نوع و جزئیات اجرایی اتصالات است، درحالی‌که سایر اجزای سازه مشابه قاب خمشی اولیه باقی می‌مانند.



شکل ۳- پلان طبقات مطالعه موردی (رنگ آبی نشانگر دهانه‌های
 برابر جانبی است)

در نهایت، پس از طراحی کامل قاب‌های خمشی ویژه و قاب‌های
 مهاربندی‌شده واگرا بر اساس بارهای ثقلی و لرزه‌ای، اتصالات
 مرکزگرای پس‌کشیده با بهره‌گیری از روابط ارائه‌شده توسط
 گارلوک و همکاران [۱۱] به‌گونه‌ای طراحی شدند که ظرفیت
 خمشی آن‌ها معادل با کل نیروی برشی وارد بر قاب اصلی
 ساختمان ۱۲ طبقه در سطح دررفت ۲ درصد باشد، به‌طوری‌که
 بتوانند جایگزین اتصالات صلب مرسوم شوند و تمامی ضوابط
 لرزه‌ای و روابط مذکور به‌دقت کنترل و رعایت گردند.
 در شکل (۳)، پلان طبقات مطالعه موردی به تصویر کشیده
 شده و در نمودار شماتیک ارائه‌شده در شکل (۴) روند طراحی
 ارائه شده است.



شکل ۴- روند طراحی قاب‌های خمشی با اتصالات مرکزگرا

سازه‌های مورد بررسی در این پژوهش به پنج دسته مختلف
 تقسیم‌بندی شدند: دسته اول که در آن اتصالات همه دهانه‌ها
 مرکزگرای پس‌کشیده هستند، دسته دوم که در آن اتصالات همه
 دهانه‌ها به‌صورت قاب خمشی فولادی ویژه هستند، دسته سوم
 که ترکیب حالات مختلف سیستم قاب خمشی فولادی ویژه و
 سیستم مرکزگرای پس‌کشیده است، دسته چهارم که تمام دهانه‌ها
 قاب مهاربندی‌شده واگرا هستند و دسته پنجم که ترکیب حالات
 مختلف قاب مهاربندی‌شده واگرا و سیستم مرکزگرای پس‌کشیده

هستند. در جدول (۱) نام هر یک از مدل‌ها و در شکل (۵) تصاویر
 آن‌ها ارائه شده است.
 نتایج حاصل از تعیین ابعاد مقاطع تیر و ستون در طبقه همکف
 ساختمان ۱۲ طبقه به شرح جدول (۲) می‌باشد. قابل ذکر است در
 نام‌های مشخص‌شده در جدول زیر عدد اول بیانگر تعداد قاب‌های
 مرکزگرا و عدد آخر بیانگر تعداد دهانه‌هایی است که کابل از داخل
 آن‌ها به‌صورت پیوسته و یا منقطع عبور کرده است.

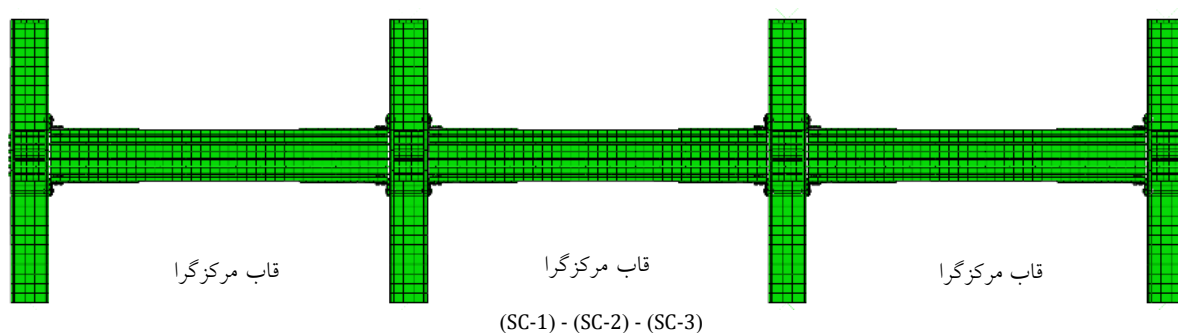
شماره‌ی علمی سازه و فولاد / ۱۳۱

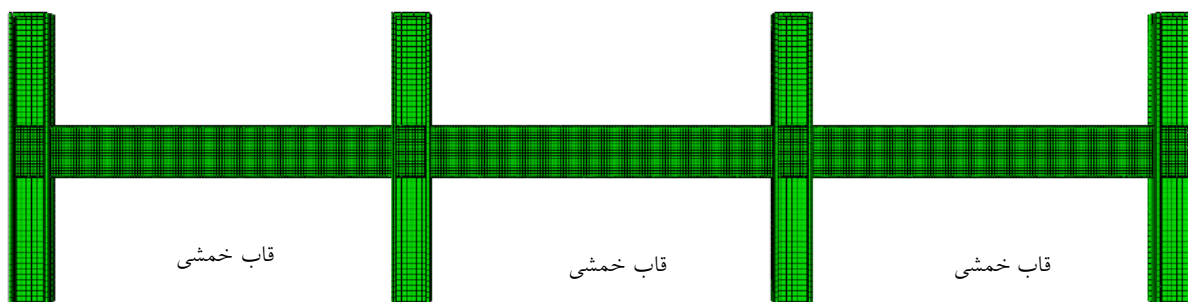
جدول ۱- معرفی مدل‌های مورد بررسی

ردیف	دسته‌بندی	نام مدل	تعریف مشخصات مدل
۱		SC-1	در این مدل هر سه دهانه مرکزگرا هستند.
۲	۱	SC-2	در این مدل، تنش تسلیم نبشی سه برابر مدل SC-1 در نظر گرفته شده است.
۳		SC-3	مقدار نیروی پیش‌تنیدگی کابل‌ها در مقایسه با مدل SC-1 به یک‌سوم کاهش یافته است.
۴	۲	SMRF	در این مدل هر سه دهانه قاب خمشی می‌باشد.
۵		2SC-1MRF-2S	در این مدل دو دهانه کناری قاب مرکزگرا و دهانه وسط قاب خمشی می‌باشد. کابل‌ها فقط در دو دهانه مرکزگرا موجود هستند.
۶		2SC-1MRF-3C	در این مدل دو دهانه کناری قاب مرکزگرا بوده و دهانه وسط خمشی می‌باشد. کابل‌ها از هر سه دهانه به صورت غیرمنقطع عبور کرده است.
۷	۳	2SC-1MRF-3S	در این مدل دو دهانه کناری قاب مرکزگرا و دهانه وسط قاب خمشی می‌باشد. کابل‌ها از هر سه دهانه به صورت منقطع عبور کرده‌اند.
۸		1SC-2MRF-1S	در این مدل دو دهانه کناری قاب خمشی و دهانه وسط قاب مرکزگرا می‌باشد. کابل‌ها فقط در دهانه میانی مرکزگرا موجود هستند.
۹		1SC-2MRF-3C	در این مدل دو دهانه کناری قاب خمشی و دهانه وسط قاب مرکزگرا می‌باشد. کابل‌ها از هر سه دهانه به صورت پیوسته عبور کرده‌اند.
۱۰	۴	EBF	در این مدل هر سه دهانه قاب مهاربندی واگرا می‌باشند.
۱۱		2SC-1EBF-2S	در این مدل دو دهانه قاب مرکزگرا و یک قاب به صورت مهاربندی واگرا می‌باشد. کابل فقط در دهانه مرکزگرا موجود است.
۱۲	۵	1SC-2EBF-1S	در این مدل یک دهانه قاب مرکزگرا و دو دهانه قاب به صورت مهاربندی واگرا می‌باشد. کابل فقط در دهانه مرکزگرا موجود است.

جدول ۲- ابعاد مقاطع تیر و ستون در طبقه همکف ساختمان‌های ۱۲ طبقه

نوع سیستم سازه‌ای	عضو سازه‌ای	عرض بال (cm)	ضخامت بال (cm)	ارتفاع جان (cm)	ضخامت جان (cm)
قاب خمشی فولادی ویژه	ستون	۶۵	۵	۶۵	۲
	تیر	۴۰	۳	۷۵	۱.۵
قاب مهاربندی واگرا	ستون	۷۰	۵	۶۵	۲
	تیر	۴۰	۲.۵	۶۵	۱.۵
مهاربند	قوطی به ابعاد پشت‌تاپشت ۲۵ سانتی‌متر و ضخامت ۲ سانتی‌متر				

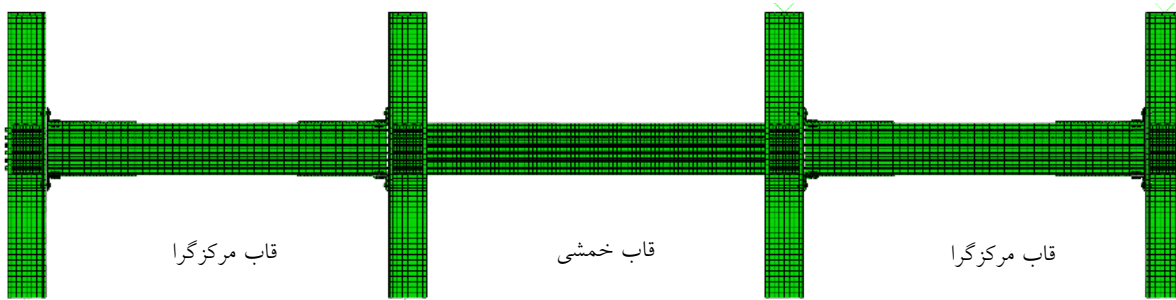




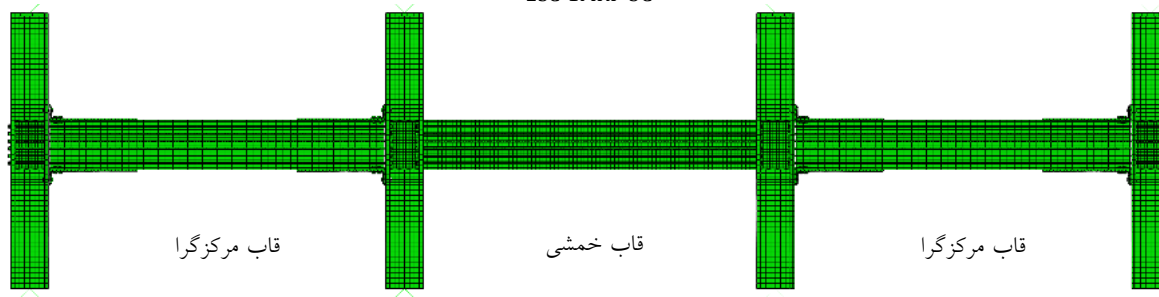
SMRF



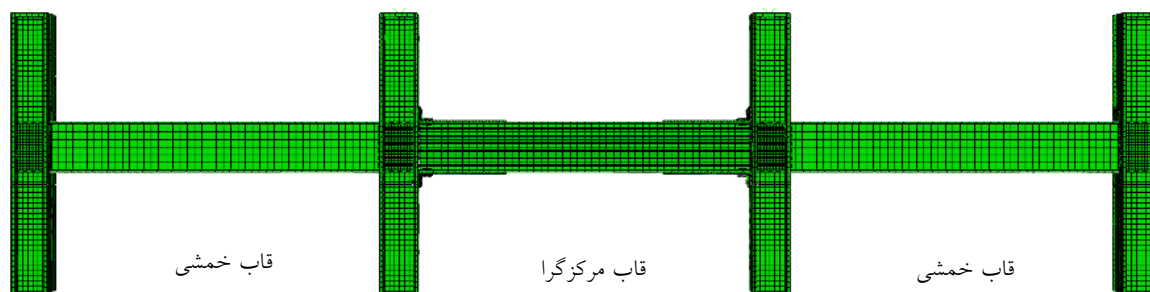
2SC-1MRF-2S



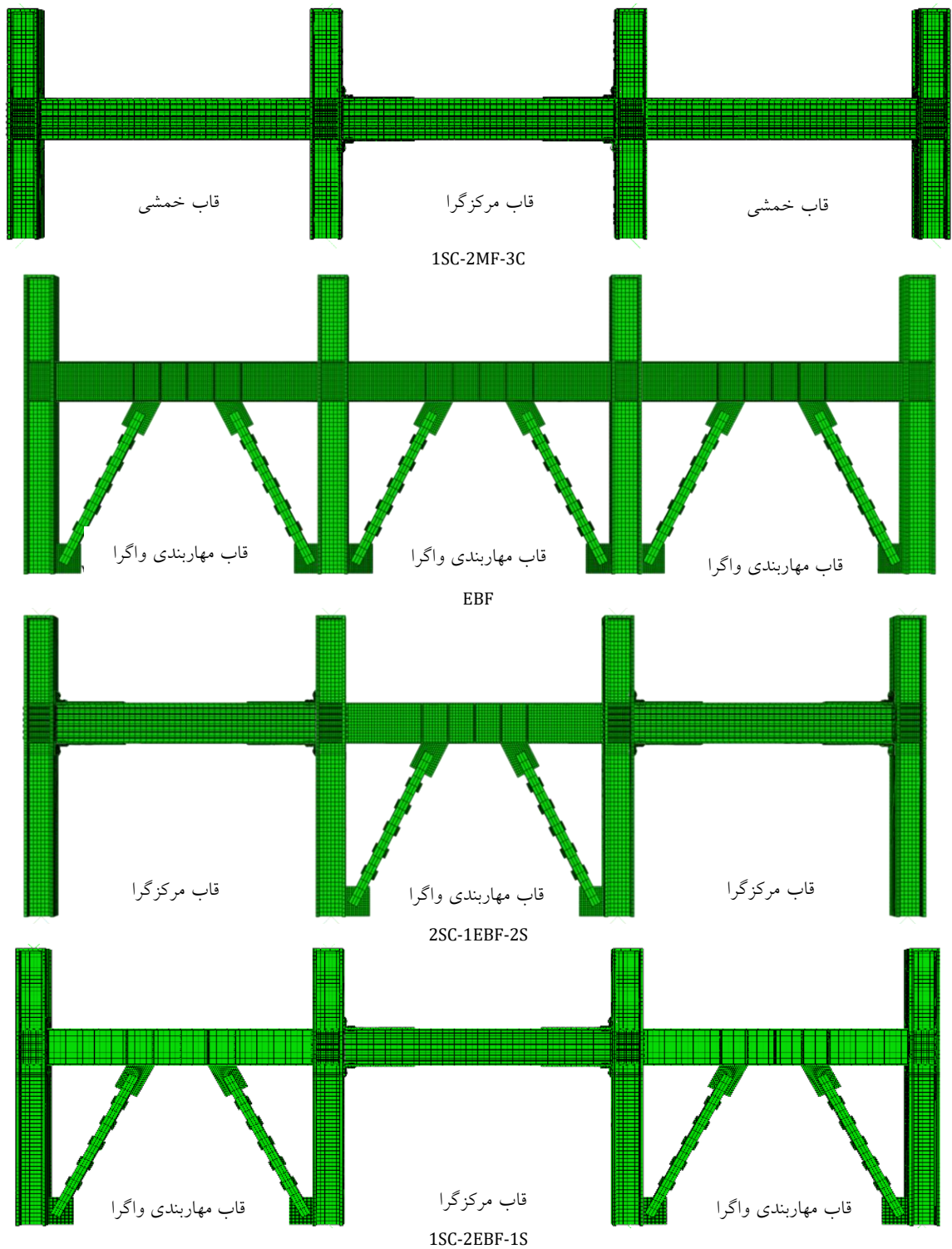
2SC-1MRF-3C



2SC-1MRF-3S



1SC-2MRF-1S



شکل ۵- تصاویر مدل‌های مورد بررسی

مشخصات هندسی و ظرفیت‌های لازم برای اجزای کلیدی اتصال بوده است، از جمله:

- نبشی‌های فولادی: ابعاد، ظرفیت لنگر پلاستیک و سازگاری تغییرشکل‌ها

خلاصه‌ای از محاسبات طراحی اتصال مرکزگرای پس کشیده به شرح ذیل می‌باشد:

به‌منظور اطمینان از کفایت سازه‌ای و عملکرد لرزه‌ای اتصال مرکزگرای پس کشیده پیشنهادی، محاسبات دقیق طراحی در سطح اجزای اتصال انجام گرفت. تمرکز این محاسبات بر تعیین

• کابل‌های پس‌کشیده: تعداد، قطر، سطح تنش و نیروی پیش‌تندگی کل

• نیروهای داخلی: نیروی تماس بین نبشی و ناحیه اتصال تیر-ستون، لنگرهای مفصل پلاستیک و ظرفیت نهایی خمشی اتصال مرکزگرای پس‌کشیده

پارامترهای زیر بر اساس روابط ارائه‌شده توسط **گارلوک** و **همکاران** استخراج و با استفاده از شبیه‌سازی‌های مبتنی بر نرم‌افزار آباکوس مورد ارزیابی قرار گرفتند:

• مقطع نبشی: ضخامت ۲۰ میلی‌متر، طول ساق‌ها ۳۰۰ میلی‌متر، طول نبشی ۳۵۰ میلی‌متر

• تعداد کابل‌ها: ۵ رشته کابل فولادی پس‌کشیده با قطر ۲۰ میلی‌متر

• نیروی پس‌کشیدگی کل: در حدود ۷۷۰ کیلونیوتن

• لنگر پلاستیک نبشی‌ها: برابر با ۹/۶ کیلونیوتن‌متر، با در نظر گرفتن اثرات سخت‌شدگی فولاد

• ظرفیت نهایی خمشی اتصال پس‌کشیده: تقریباً برابر با ۴۶۱/۴ کیلونیوتن‌متر (شامل سهم نیروی پیش‌تندگی و تغییرشکل پلاستیک نبشی‌ها)

• ظرفیت نیروی جانبی: در حدود ۴۰۴/۷ کیلونیوتن در جابه‌جایی حداکثری (زاویه چرخش $\theta = 0.02$ رادیان)

مقادیر مذکور بیانگر عملکرد مکانیکی اتصال مرکزگرای پس‌کشیده بوده و توانایی آن را در تأمین نیاز لرزه‌ای در سطح دررفت بین طبقه‌های ۲٪، مطابق با مفروضات طراحی در سازه نمونه، تأیید می‌کنند.

۳- مدل‌سازی اجزای محدود

در این بخش ابتدا مقدمه‌ای بر اهمیت استفاده از روش تحلیل اجزای محدود و سپس توضیحاتی در مورد تحلیل اجزای محدود با استفاده از نرم‌افزار آباکوس ارائه می‌شود. در انتهای این بخش به مدل‌سازی اجزای محدود یک اتصال تیر-ستون دارای نبشی‌های نشیمن و بالایی پیچی و کابل‌های پس‌کشیده (اتصال آزمایشگاهی **گارلوک**) تحت بارگذاری چرخه‌ای پرداخته می‌شود تا قبل از مدل‌سازی قاب‌های ترکیبی خمشی و مهاربندی با قاب مرکزگرا که ابعاد بزرگ‌تر و پیچیده‌تری دارد، از درستی شبیه‌سازی یک اتصال مرکزگرا تحت بارگذاری چرخه‌ای اطمینان حاصل گردد.

۳-۱- اهمیت استفاده از تحلیل اجزای محدود برای مطالعه

اتصالات مرکزگرای پس‌کشیده

رفتار اتصالات در قالب فرضیه کلاسیک سن ونان^۱ در الاستیسیته خطی، به علت تمرکز تنش که معمولاً در اتصالات رخ می‌دهد قابل تفسیر نمی‌باشد. مدل‌های تحلیلی مناسب بر پایه تئوری پلاستیسیته به دست می‌آیند. متعاقباً تعریف خصوصیات اتصالات مانند سختی، مقاومت و ظرفیت تغییرشکل نیاز به تحلیل‌های آزمایشگاهی و بررسی‌های عددی دارند [۳۳]. این مسأله حتی در مورد اتصالات مرکزگرای پس‌کشیده که رفتار مکانیکی آن‌ها در قالب رفتارهای غیرخطی مانند پلاستیک شدن مصالح (در ابزارهای میراگر انرژی زمانی که مکانیزم استهلاک انرژی آن‌ها تسلیم باشد)، جابه‌جایی‌های بزرگ، اندرکنش‌های تماسی و اصطکاکی تعریف می‌گردد، بیش‌تر قابل اعمال است.

۳-۲- تحلیل اجزای محدود با استفاده از نرم‌افزار آباکوس

تحلیل‌های عددی انجام‌شده در این پژوهش به وسیله نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس انجام شده است [۴۹]. این برنامه بر اساس قابلیت‌هایی که در مواجهه با مسائل پیچیده غیرخطی دارد، انتخاب شده است. مدل‌سازی اتصال مرکزگرای پس‌کشیده پیچیده است، زیرا رفتار آن به شدت تحت تأثیر عواملی مانند خواص غیرخطی مصالح، پیچیدگی هندسه و شرایط مرزی قرار دارد.

۳-۲-۱- خلاصه‌ای از آزمایش انجام‌شده بر روی اتصال

گارلوک و **همکاران** (۲۰۰۵) شش نمونه اتصال میانی مرکزگرای پس‌کشیده را تحت بارگذاری چرخه‌ای غیرالاستیک تا جابه‌جایی نسبی ۴٪ قرار دادند که تأثیرات بارگذاری زلزله بر آن‌ها را بررسی نمایند. در این اتصالات از نبشی‌های نشیمن و بالایی پیچی و کابل‌های پس‌کشیده که به موازات تیر قرار گرفته‌اند، استفاده شده است. پارامترهای مطالعه‌شده در این تحقیق، نیروی پس‌کشیدگی اولیه، تعداد کابل‌های پس‌کشیده و طول ورق تقویتی بال تیر می‌باشد. نتایج آزمایش نشان می‌دهند که این اتصال دارای ظرفیت اتلاف انرژی و شکل‌پذیری مناسبی است. تیرها و ستون‌ها پیش از جابه‌جایی نسبی ۴٪ الاستیک باقی می‌مانند و تنها نبشی‌ها آسیب می‌بینند و انرژی را میرا می‌کنند. عدم آسیب در تیرها و ستون‌ها و وجود اعضای پس‌کشیده به سیستم توانایی بازگشت به موقعیت اولیه یا به عبارتی قابلیت مرکزگرایی را می‌دهد.

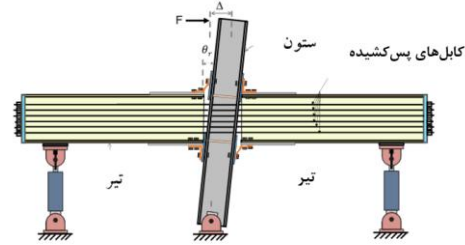
^۱ Saint-Venant



۳-۳-۳- صحت سنجی

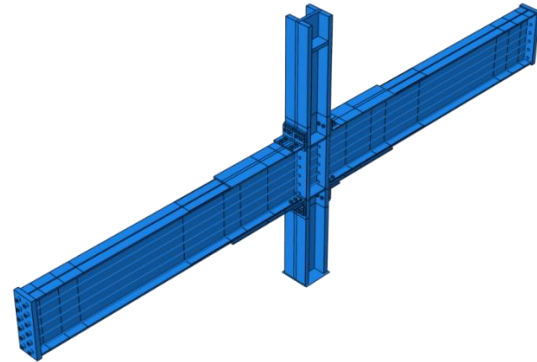
۳-۳-۱- هندسه مدل

بر اساس کار آزمایشگاهی گارلوک و همکاران (۲۰۰۵) نمونه انتخابی، مدل 36s-20-P می‌باشد که تصویر شماتیک آن در شکل (۶) نمایش داده شده است [۱۲].



شکل ۶- شماتیک نمونه مدل‌سازی شده

در این مدل‌سازی، اجزای مختلف اتصال شامل ستون، تیر، نبشی، ورق تقویتی، ورق پیوستگی، ورق مضاعف، پیچ و کابل‌ها در نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی شده‌اند. برای مدل‌سازی ستون‌های کناری از دو ورق انتهایی با ضخامت مشابه بال ستون مهاري استفاده شده و کابل‌ها در انتهای این ورق‌ها مهار شده‌اند. تمام اعضا با المان‌های پیوسته جامد سه‌بعدی مدل شده‌اند. این نوع المان‌ها برای تحلیل‌های غیرخطی شامل تماس زیاد، پلاستیسیته و تغییر شکل‌های بزرگ مناسب هستند. در شکل (۷) نمایی از مدل‌سازی اتصال در نرم‌افزار آباکوس دیده می‌شود.



شکل ۷- تصویر سه‌بعدی نمونه 36s-20-P

۳-۳-۲- مدل‌سازی مصالح

تمامی اعضا به‌غیر از کابل‌ها و پیچ‌ها از فولاد ASTM A572 رده ۵۰ ساخته شده‌اند. پیچ‌ها از جنس فولاد ASTM A490 و کابل‌ها از فولاد ASTM A416 هستند. مدول الاستیسیته و نسبت پواسون المان‌ها به‌ترتیب برابر با ۲۰۰ گیگاپاسکال و ۰/۳ در نظر گرفته

شده است. برای تعریف رفتار غیر الاستیک، سخت شدگی ترکیبی^۱ (ایزوتروپیک^۲ و کینماتیک^۳) مورد استفاده قرار گرفت.

۳-۳-۳- سطوح تماسی

برای مدل‌کردن اندرکنش میان اعضای جوش‌شده، از قید مهاري^۴ استفاده می‌شود که در این حالت هیچ‌گونه حرکت نسبی میان دو عضو ممکن نیست. این قید از الگوریتم ریاضی Master-Slave استفاده می‌کند و از جداشدن یا لغزش گره‌های Slave از Master جلوگیری می‌نماید.

برای مدل‌سازی اعضای غیرجوشی، از الگوریتم کلی تماس استفاده شده است. این اعضا شامل ورق تقویتی و نبشی، نبشی و سرهای پیچ، سرهای پیچ و بال تیر، سرهای پیچ و بال ستون، ورق پرکننده با مقطع تیر، گیره‌های مهاري کابل‌ها با ورق‌های انتهایی، بدنه پیچ با دیوارهای داخلی سوراخ‌های نبشی، تیر، ورق تقویتی و ستون و همچنین بدنه کابل با دیوار داخلی سوراخ‌های بال ستون و ورق انتهایی می‌باشند. برای بهبود توزیع تنش تماسی در سطوح منحنی مانند کابل‌ها و پیچ‌ها، از گزینه Surface Smoothing موجود در نرم‌افزار استفاده شده است. محدودیت تماسی بین دو عضو غیرجوشی از طریق روش Penalty اعمال شده است و رفتار مماسی و عمودی میان این قسمت‌ها مدنظر قرار گرفته است. ضریب اصطکاک برای رفتار تماسی تمام اعضا به‌جز بدنه پیچ، سوراخ‌های پیچ، بدنه کابل و سوراخ‌های کابل، برابر با ۰/۳ مطابق با دستورالعمل‌های AISC 360-22 در نظر گرفته شده است. رفتار مماسی در اعضای مذکور بدون اصطکاک فرض شده است. همچنین، رفتار عمودی به‌صورت تماس سخت (Hard Contact) تعریف شده تا از نفوذ دو سطح مجاور در یکدیگر جلوگیری شود.

۳-۳-۴- بارگذاری و شرایط مرزی

برای هر تیر، در فاصله ۴۴۹۶ میلی‌متر از مرکز ستون، شرایط مرزی غلطکی در نظر گرفته شده است (یعنی جابه‌جایی عمودی صفر است). ستون در پای خود دارای شرایط مفصلی است که از جابه‌جایی در همه جهات جلوگیری می‌کند، اما اجازه چرخش را می‌دهد. این تکیه‌گاه‌ها با استفاده از قید مهاري جسم صلب اعمال شده‌اند. برای جلوگیری از حرکت خارج از صفحه تیرهای تحت بارگذاری چرخه‌ای، جابه‌جایی جانبی آن‌ها محدود شده است. همچنین، نیروهای پیش‌تنیدگی پیچ‌ها و پس‌کشیدگی کابل‌ها طبق

¹ Combined Hardening

² Isotropic

³ Kinematic

⁴ Tie Constraint

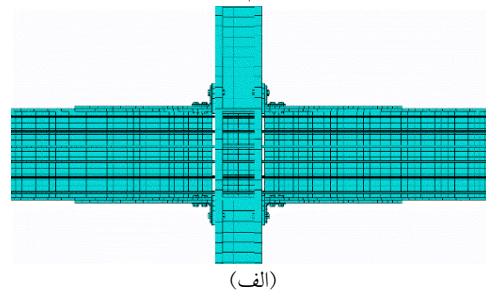
مقادیر گارلوک و همکاران (۲۰۰۵)، به صورت نیروی داخلی به اعضا وارد شده‌اند.

تاریخچه جابه‌جایی جانبی چرخه‌ای وارده بر اساس SAC 1997 انتخاب شده است. هر مرحله از بارگذاری شامل چرخه‌های مختلفی با جابه‌جایی‌های نسبی مشخص و به ترتیب زیر است: شش چرخه با جابه‌جایی‌های نسبی مساوی ۰/۳۷۵، ۰/۵ و ۰/۷۵ درصد، چهار چرخه با جابه‌جایی‌های نسبی ۱ درصد، دو چرخه با جابه‌جایی‌های نسبی ۱/۵، ۲، ۳ و ۴ درصد. اکثر نمونه‌ها تا جابه‌جایی نسبی چهار درصد مورد آزمایش قرار گرفتند.

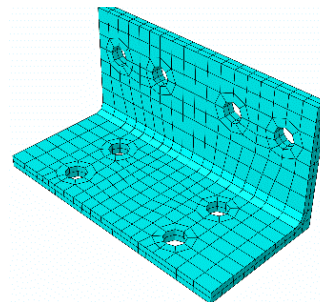
اعمال نیروهای پیش‌تندگی و پس‌کشیدگی در مدل‌سازی به صورت اعمال تنش‌های اولیه معادل نیروهای هدف انجام شده است؛ نیروی پیش‌تندگی پیچ‌ها مطابق با داده‌های تحقیق گارلوک و همکاران (۲۰۰۵) و پس‌کشیدگی کابل‌ها نیز به همین روش در مدل لحاظ شده‌اند.

۳-۳-۵- انتخاب نوع مش

نمونه با استفاده از المان‌های سه‌بعدی شش‌وجهی^۱ (هشت‌گروه‌ای خطی) با انتگرال کاهش یافته که در آباکوس موجود می‌باشد، مدل شده است. مش‌های کوچک‌تری در نواحی اطراف چشمه اتصال که تغییرات بیشتری را در تنش و کرنش تجربه می‌کنند و همچنین نبشی‌ها که دچار تسلیم می‌شوند و مفصل پلاستیک تشکیل می‌دهند، در نظر گرفته شده است. شکل (۸) مش‌بندی در چشمه اتصال و نبشی را نشان می‌دهد. کیفیت مش‌ها با استفاده از ابزار صحت‌سنجی موجود در نرم‌افزار کنترل شده است.



(الف)



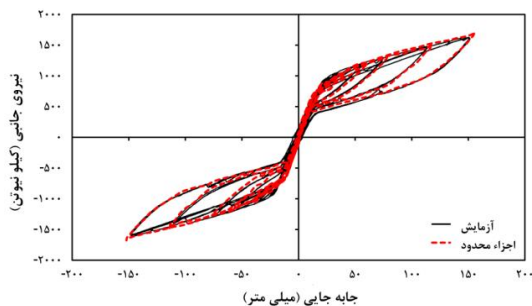
(ب)

شکل ۸- جزئیات مش‌بندی نمونه 36s-20-P، (الف) چشمه اتصال، (ب) نبشی

۳-۳-۶- صحت‌سنجی نتایج تحلیل اجزای محدود با نتایج

آزمایشگاهی

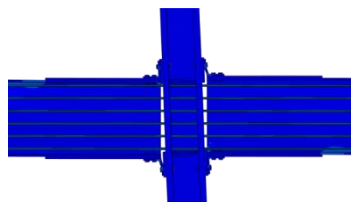
در شکل (۹) پاسخ نیروی جانبی-جابه‌جایی نمونه 36s-20-P حاصل از تحلیل اجزای محدود با مدل آزمایشگاهی آن مقایسه شده است. نیروی جانبی و جابه‌جایی در نقطه اعمال بار در بالای بال ستون اندازه‌گیری شده‌اند. می‌توان مشاهده کرد که مدل‌سازی اجزای محدود دارای دقت کافی بوده و به خوبی توانسته است سختی، نقطه تسلیم و مقاومت نمونه را پیش‌بینی نماید. شکل (۱۰) تغییرشکل و بازشدن فاصله در مدل اجزای محدود نمونه 36s-20-P را در جابه‌جایی نسبی ۴٪ با تصویر آزمایشگاهی آن مقایسه می‌کند. مطابق شکل، سازگاری خوبی میان جواب به‌دست‌آمده از تحلیل اجزای محدود و نمونه آزمایشگاهی دیده می‌شود.



شکل ۹- مقایسه پاسخ نیروی جانبی-جابه‌جایی به‌دست‌آمده از مدل‌های اجزای محدود و آزمایشگاهی



(ب)



(الف)

شکل ۱۰- تغییرشکل نمونه 36s-20-P در جابه‌جایی نسبی ۴٪، (الف) اجزای محدود، (ب) آزمایش

۴- تحلیل اجزای محدود

در تحلیل‌های چرخه‌ای، چندین جنبه بحرانی از سازه‌های مجهزه اتصال مرکز‌گرای پس‌کشیده بررسی می‌شود، از جمله:

- ۱- بررسی چرخه‌های هیستریزس مدل‌های مختلف
- ۲- ارزیابی اتلاف انرژی و میرایی معادل
- ۳- دررفت‌های ناشی از زلزله و دررفت‌های پسماند

¹ C3D8R

۵-۱- نتایج بارگذاری چرخه‌ای

نتایج هیستریزس تحلیل‌های اجزای محدود در شکل (۱۱) ارائه شده است. بر اساس دسته‌بندی انجام‌شده بر روی مدل‌های مورد بررسی، نتایج دسته اول به‌وضوح نشان می‌دهد در سازه‌هایی که اتصالات در تمام دهانه‌های آن مرکزگرا است، به‌طور کامل دارای جابه‌جایی پسماند تقریباً صفر بوده ولی در مقابل میزان اتلاف انرژی در این سازه‌ها بسیار پایین می‌باشد. همچنین به‌دلیل تأثیر کم مقاومت نبشی‌ها بر میزان اتلاف انرژی، با تغییر مشخصات این نبشی‌ها، مقدار اتلاف انرژی تغییر چشمگیری در نتایج نخواهد داشت. دسته دوم سازه با سه دهانه قاب خمشی، دارای چرخه‌های هیستریزس با اتلاف انرژی بالا و جابه‌جایی پسماند زیاد است. نمودارهای دسته سوم که مربوط به سازه‌های ترکیبی قاب خمشی و قاب مرکزگرا هستند، بیانگر اتلاف انرژی بالاتر نسبت به دسته اول و جابه‌جایی پسماند کم‌تر نسبت به دسته دوم می‌باشد. نمودار چرخه‌ای دسته چهارم که مربوط به مدل با هر سه دهانه قاب مهاربندی‌شده واگرا می‌باشد، نشان‌دهنده سختی بالا و جابه‌جایی‌های پسماند زیاد است که با ترکیب آن‌ها با قاب‌های دارای اتصال مرکزگرا (دسته پنجم) مقدار جابه‌جایی‌های پسماند کاهش می‌یابد.

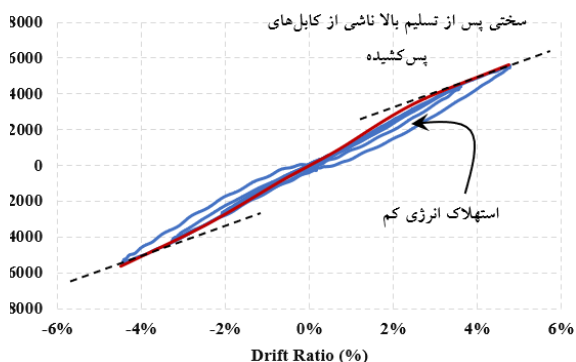
- ۴- ارزیابی پاسخ زلزله قاب‌های مرکزگرا و ترکیبی با قاب خمشی
 ۵- ارزیابی پاسخ زلزله قاب‌های مرکزگرا و ترکیبی با قاب مهاربندی‌شده واگرا
 ۶- بررسی میزان انرژی مستهلک‌شده در هر یک از نمونه‌ها

۴-۱- تحلیل استاتیکی غیرخطی (چرخه‌ای)

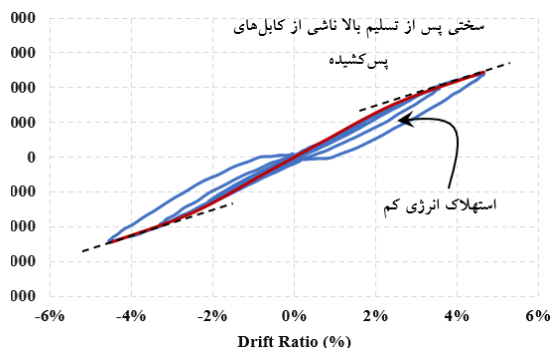
برای ارزیابی عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها، تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی انجام شد. بر اساس SAC 1997 هر مرحله از بارگذاری شامل چندین چرخه با جابه‌جایی‌های نسبی مشخص است که به‌ترتیب زیر اجرا شدند: شش چرخه با جابه‌جایی‌های نسبی ۰/۳۷۵، ۰/۵ و ۰/۷۵ درصد، چهار چرخه با جابه‌جایی نسبی ۱ درصد و دو چرخه با جابه‌جایی‌های نسبی ۱/۵، ۲، ۳ و ۵ درصد. بیش‌تر نمونه‌ها تا رسیدن به جابه‌جایی نسبی ۵ درصد تحت آزمایش قرار گرفتند.

۵- نتایج تحلیل اجزای محدود

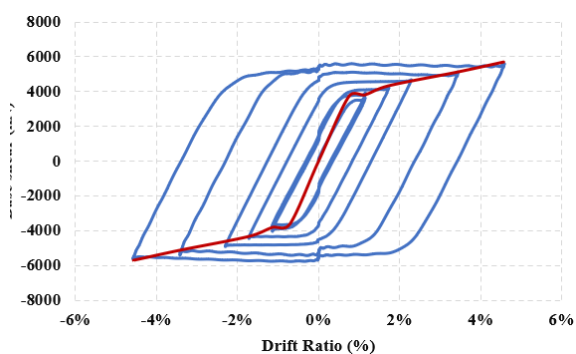
در این بخش به ارائه یافته‌های حاصل از تحلیل اجزای محدود پرداخته می‌شود. این تحلیل‌ها، به بررسی دقیق پارامترهای پاسخ چرخه‌ای از جمله اتلاف انرژی و ضرایب میرایی معادل به‌دست‌آمده از تحلیل‌های چرخه‌ای می‌پردازد. علاوه بر این، پاسخ‌های سازه‌ای محاسبه و در نمودارهای مقایسه‌ای ارائه می‌شوند که مشاهده می‌شود قابلیت‌های مرکزگرایی بهبودیافته و کاهش چشمگیر دررفت‌های پسماند ناشی از ادغام اتصالات مرکزگرای پس کشیده را برجسته می‌کنند.



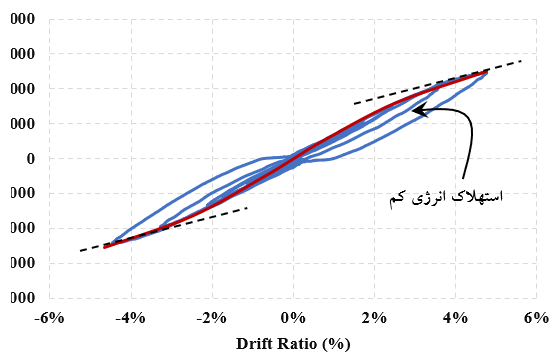
SC-2



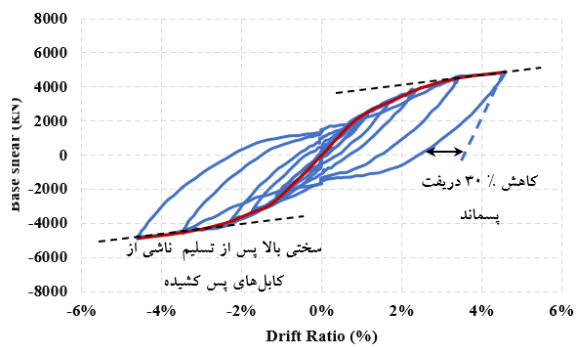
SC-1



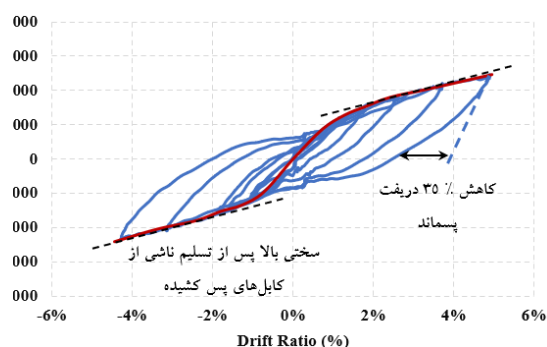
SMRF



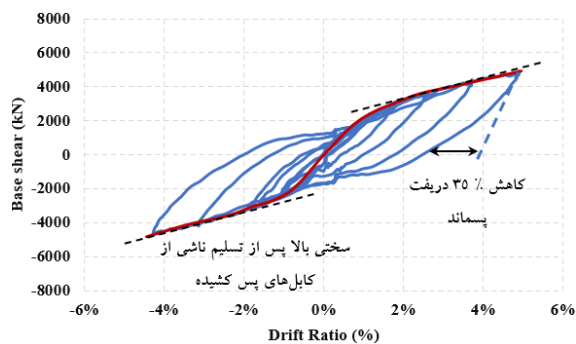
SC-3



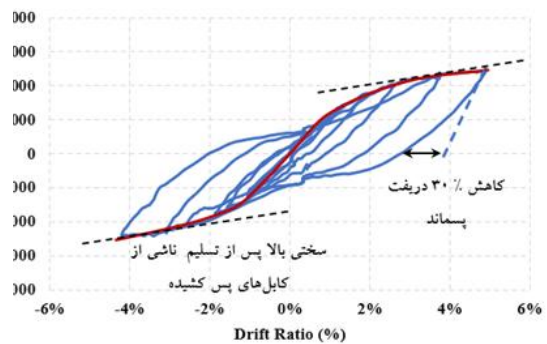
2SC-1MRF-2S



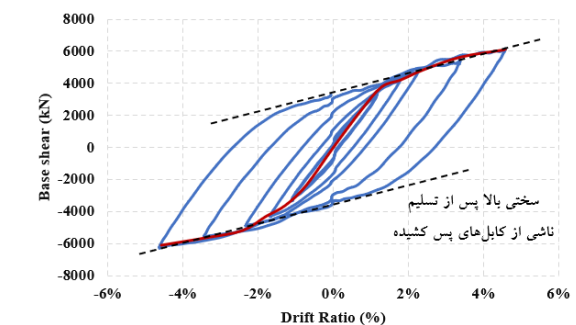
2SC-1MRF-3C



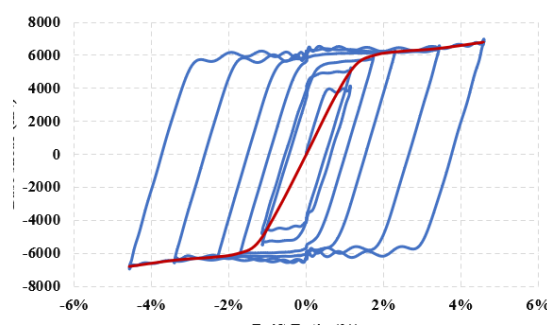
1SC-1MRF-1S



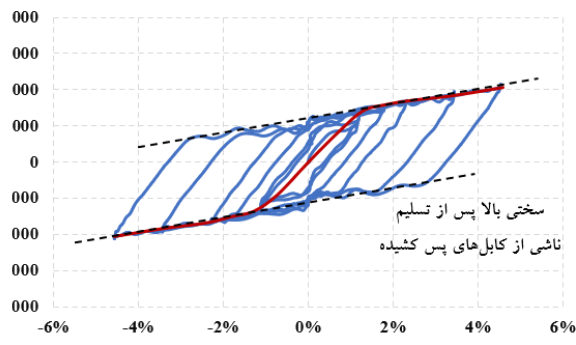
2SC-2MRF-3S



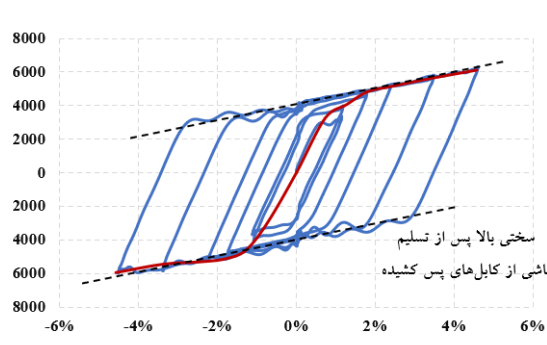
1SC-2MRF-3C



EBF



2SC-1EBF-2S



1SC-2EBF-1S

شکل ۱۱- نتایج بارگذاری چرخه‌ای



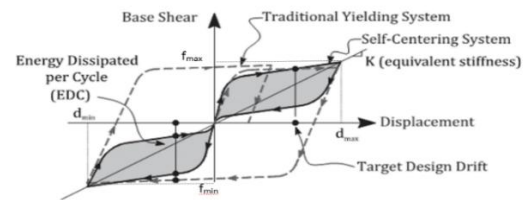
۶- استهلاک انرژی و میرایی معادل

مهم‌ترین جنبه هر تحقیق، ارائه نتایج قابل مقایسه و کمی شده است. برای دستیابی به این هدف، پاسخ‌های چرخه‌ای سازه‌های مورد مطالعه به‌طور کامل ارزیابی و پارامترهای پاسخ سازه‌ای استخراج شدند. یکی دیگر از این پارامترها، انرژی تلف‌شده در هر چرخه و نسبت میرایی معادل است. پارامترهای مذکور متناظر با هر چرخه کامل از پروتکل بارگذاری به‌دست آمدند. پارامترهای پاسخ مطابق با شکل (۱۲) و روابط زیر محاسبه شدند.

$$K = \frac{f_{max} \cdot f_{min}}{d_{max} \cdot d_{min}} \quad (1)$$

$$EDC = \text{Inner area of a single loop} \quad (2)$$

$$\xi = \frac{EDC}{2\pi K(d_{max} \cdot d_{min})^2} \quad (3)$$



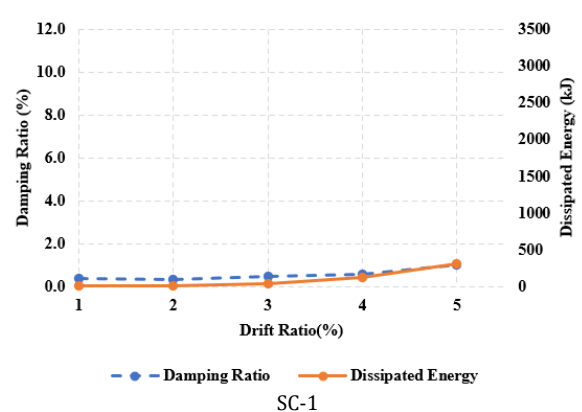
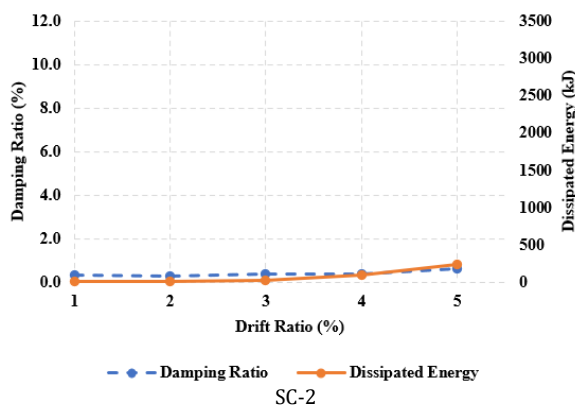
شکل ۱۲- تعاریف نظیر یک چرخه بارگذاری

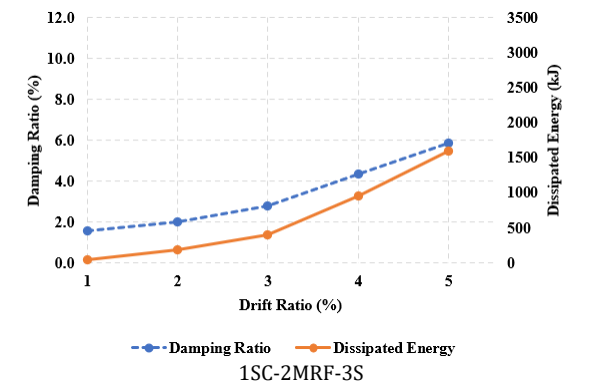
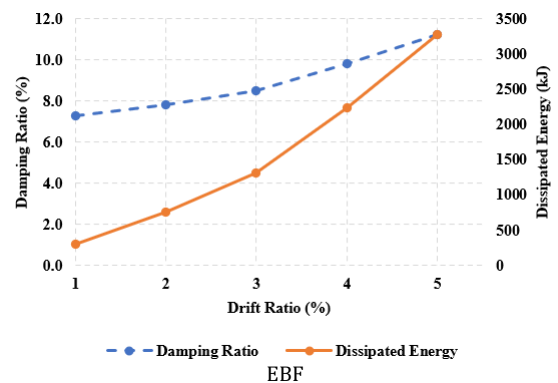
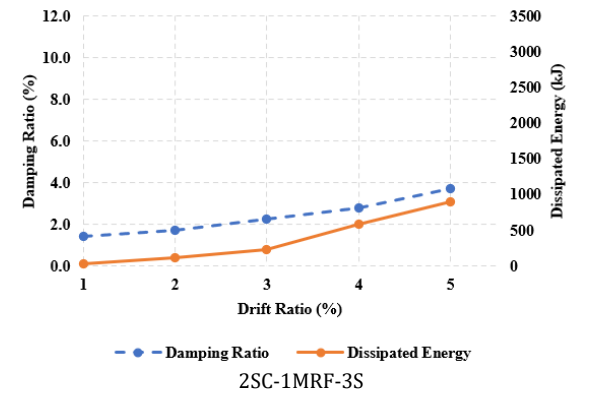
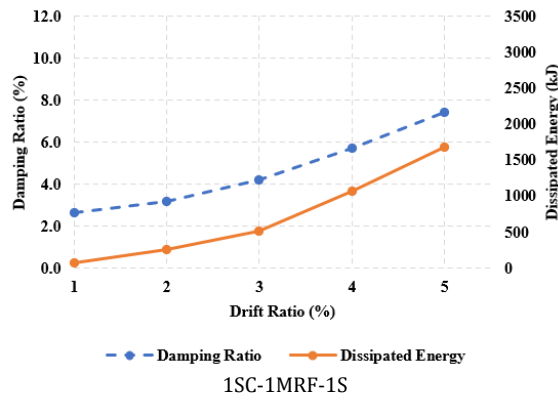
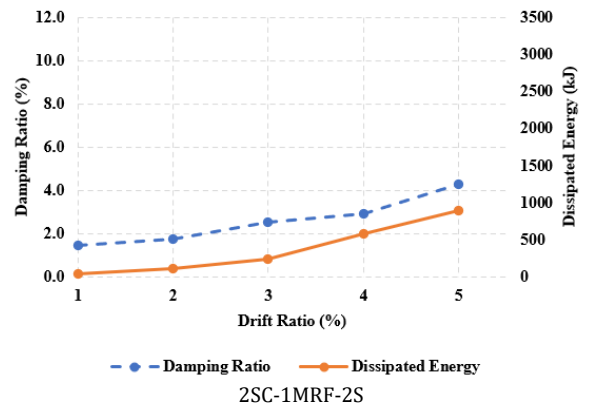
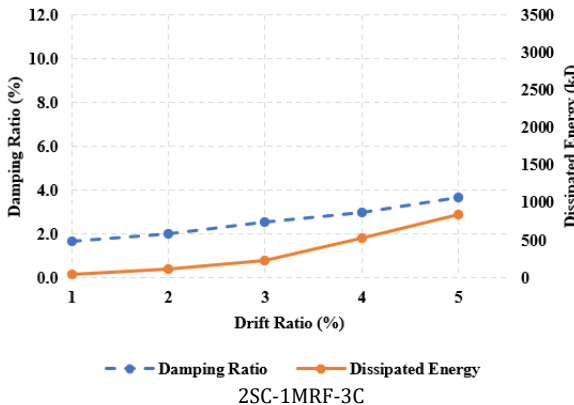
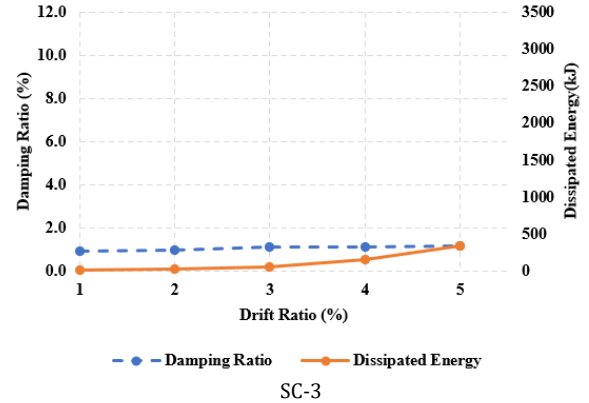
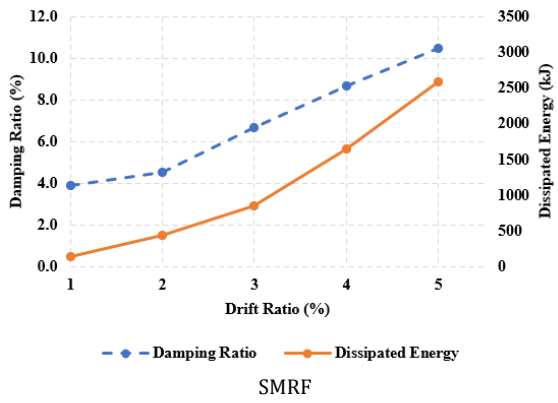
نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل پاسخ‌های چرخه‌ای، شامل انرژی مستهلاک‌شده و نسبت میرایی معادل، در شکل (۱۳) ترسیم شده است. این نمودارها نمایانگر رفتار استهلاک انرژی سیستم‌های مختلف تحت بارگذاری چرخه‌ای و در سطوح مختلف دررفت هستند.

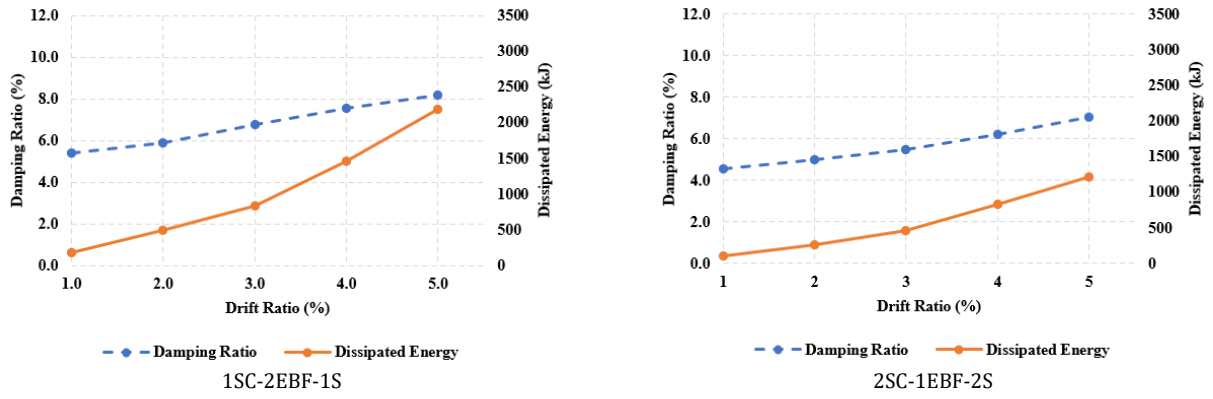
همان‌طور که از تحلیل‌ها استنباط می‌شود، افزایش تعداد دهانه‌های مرکزگرا در قاب‌ها منجر به کاهش قابل توجه ظرفیت استهلاک انرژی شده و در نتیجه نسبت میرایی معادل سیستم نیز کاهش یافته است. این پدیده عمدتاً ناشی از رفتار الاستیک کابل‌های پس‌کشیده در دهانه‌های مرکزگرا و ظرفیت پایین‌تر آن‌ها در جذب و مستهلاک‌سازی انرژی است.

نمودارهای شکل (۱۳) نشان می‌دهد که در مدل SC-3، نیروی پیش‌تنیدگی کابل‌ها به یک‌سوم مقدار مدل SC-1 کاهش یافته است. در این حالت، نسبت میرایی معادل در دررفت ۲٪ تقریباً ۲/۵ برابر افزایش یافته است. این نتیجه بیان می‌کند که افزایش نیروی پیش‌تنیدگی اولیه کابل‌ها، باعث افزایش سختی سازه می‌شود. اما در برخی سطوح دررفت، ممکن است ظرفیت استهلاک انرژی سیستم کاهش یابد.

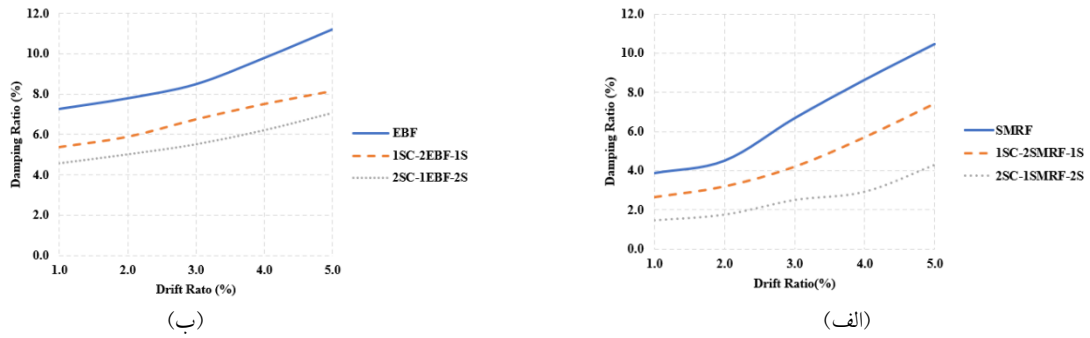
همان‌طور که در شکل (۱۴) مشخص است، مدل‌های ترکیبی دارای دهانه مرکزگرا و دهانه قاب خمشی ویژه، افزایش مشخصی در نسبت میرایی معادل نسبت به سیستم با هر سه دهانه مرکزگرا نشان داد که بیانگر تقویت توانایی استهلاک انرژی سیستم با افزودن قاب خمشی است و همچنین مدل ترکیبی دارای دو دهانه مرکزگرا و یک دهانه قاب مهاربندی واگرا (EBF) در دررفت ۲٪، نسبت میرایی معادلی برابر با حدود ۴٪ از خود نشان داد؛ که این مقدار بیانگر ظرفیت بالاتر استهلاک انرژی و میرایی مؤثر در بارگذاری چرخه‌ای نسبت به سیستم‌های با هر سه دهانه مرکزگرا است.







شکل ۱۳- نتایج استهلاك انرژی و میرایی معادل

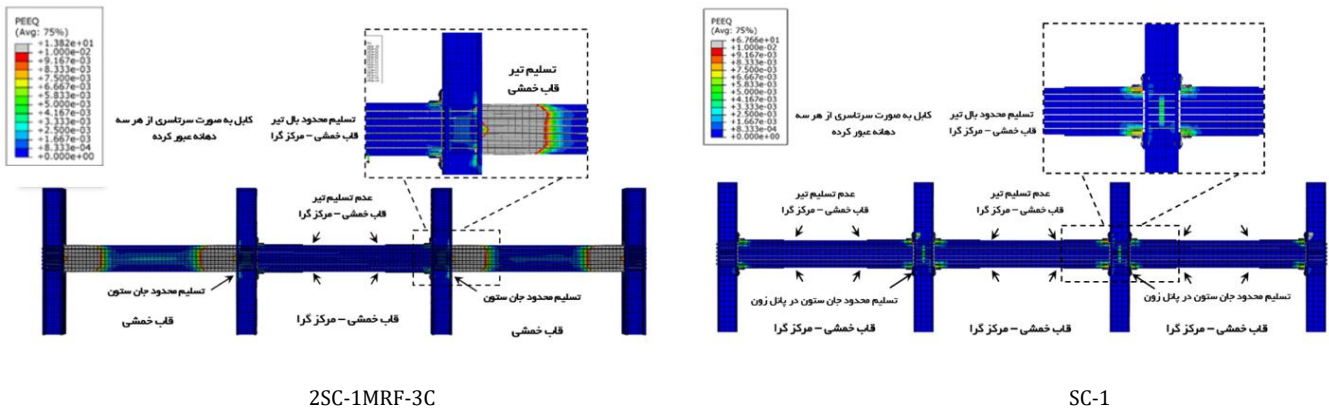


شکل ۱۴- مقایسه اثر تعداد دهانه مرکزگرا در میرایی معادل در ترکیب با (الف) قاب خمشی، (ب) قاب مهاربندی شده واگرا

کلی سازه‌ها صورت گرفته است. به منظور تمرکز بر تفاوت‌های بارز رفتاری و ویژگی‌های متمایز هندسی و سازه‌ای، نمونه‌هایی که نماینده طیف گسترده‌ای از رفتارها هستند، انتخاب شده‌اند. توضیحات هر نمودار به صورت جداگانه ارائه شده تا روند تغییرات کرنش پلاستیک به شکلی دقیق و منسجم تشریح شود و تحلیل مقایسه‌ای جامعی ارائه گردد.

۷- نمودارهای کرنش پلاستیک معادل

در این بخش، تحلیل دقیق توزیع کرنش پلاستیک معادل در نقاط مختلف مدل‌ها انجام شده است تا رفتار غیرخطی و تغییر شکل‌های غیرقابل بازگشت مصالح به خوبی مشخص شود. همان‌طور که در شکل (۱۵) مشاهده می‌شود، این تحلیل باهدف شناسایی نواحی بحرانی، بررسی مکانیزم‌های خرابی و ظرفیت باربری موضعی و



شکل ۱۵- نتایج کرنش پلاستیک معادل

۸- نتایج

در این پژوهش، ۱۲ قاب فولادی سه دهانه و یک طبقه در حالات مختلف با استفاده از نرم افزار آباکوس مدل سازی و نتایج آن‌ها ارائه شده است. اهم دستاوردهای حاصل به شرح زیر است:

۱- نتایج نشان می‌دهد سیستم‌های ترکیبی شامل قاب خمشی ویژه و قاب مرکزگرای پس کشیده، عملکرد بهتری در کنترل تغییر شکل‌های پسماند و افزایش ظرفیت استهلاک انرژی نسبت به قاب‌های صرفاً مرکزگرا دارند. این ترکیب با بهره‌گیری هم‌زمان از سختی جانبی و توان مرکزگرایی، بهبود قابل توجهی در عملکرد لرزه‌ای سازه ایجاد می‌کند.

۲- سیستم‌های کاملاً مرکزگرا که در آن تمامی دهانه‌ها به سیستم مرکزگرای پس کشیده مجهز شده‌اند، عملکردی با پاسخ چرخه‌ای پرچم‌شکل و جابه‌جایی پسماند نزدیک به صفر از خود نشان دادند. در مقابل، افزایش سهم قاب‌های خمشی و مهاربندی شده و اگر در سیستم، اگرچه موجب بهبود ظرفیت اتلاف انرژی از طریق توسعه حلقه‌های چرخه‌ای شد، اما با افزایش نسبی جابه‌جایی پسماند نیز همراه بود. با این حال، میزان این جابه‌جایی‌ها به مراتب کم‌تر از مقادیر مشاهده شده در سیستم‌های متداول قاب خمشی ویژه فولادی و مهاربندی شده و اگر بود.

۳- نتایج تحلیل‌ها نشان داد که ترکیب قاب خمشی فولادی با سیستم مرکزگرای پس کشیده، منجر به کاهش قابل توجه دررفت پسماند می‌شود؛ به گونه‌ای که میزان این دررفت در مقایسه با حالتی که تنها از قاب خمشی فولادی به عنوان سیستم مقاوم جانبی استفاده شده است، حدود ۳۵ درصد کاهش یافته است.

۴- کاهش نیروی پس کشیدگی کابل‌های مرکزگرا موجب بهبود قابل توجه ظرفیت استهلاک انرژی گردید. به طور مشخص، کاهش نیروی پس کشیدگی به یک سوم مقدار اولیه، منجر به افزایش نسبت میرایی تقریباً ۲/۵ برابر در دررفت ۲٪ شد.

۵- بر اساس نتایج مشاهده شد که ترکیب سیستم مرکزگرای پس کشیده با قاب خمشی فولادی ویژه و قاب مهاربندی شده و اگر، موجب افزایش نسبت میرایی معادل به ترتیب تا حدود ۵٪ و ۶٪ در دررفت ۲٪ می‌شود. این در حالی است که در قاب‌هایی که هر سه دهانه آن‌ها به سیستم مرکزگرای پس کشیده اختصاص یافته بود، نسبت میرایی معادل در همین سطح دررفت، کم‌تر از ۱٪ به دست آمد.

۶- مدل ترکیبی دارای دو دهانه مرکزگرا و یک دهانه قاب خمشی ویژه، افزایش مشخصی در نسبت میرایی معادل نسبت به

سیستم با هر سه دهانه مرکزگرا نشان داد که بیانگر تقویت توانایی استهلاک انرژی سیستم با افزودن قاب خمشی است و همچنین مدل ترکیبی دارای دو دهانه مرکزگرا و یک دهانه قاب مهاربندی و اگر در دررفت ۲٪، نسبت میرایی معادلی برابر با حدود ۴٪ از خود نشان داد؛ که این مقدار نشان‌دهنده ظرفیت بالاتر استهلاک انرژی و میرایی مؤثر در بارگذاری چرخه‌ای نسبت به سیستم‌های با هر سه دهانه مرکزگرا است.

۷- یکی دیگر از نتایج مهم این مطالعه، بررسی تأثیر گسسته یا پیوسته بودن کابل‌ها بر رفتار سیستم بود. نتایج حاصل از کرنش‌های پلاستیک معادل نشان می‌دهد که در آرایش منقطع کابل‌ها، هر کابل و مجموعه نبشی تنها تحت تأثیر تغییر شکل دهانه مربوط به خود قرار می‌گیرند. این موضوع منجر به تمرکز کرنش در نواحی خاصی از سیستم شده و باعث می‌شود نبشی‌ها سریع‌تر وارد ناحیه غیرالاستیک شده و در نتیجه، انرژی بیش‌تری را در هر چرخه بارگذاری مستهلک نمایند. در مقابل، در سیستم‌هایی با کابل پیوسته، کرنش ناشی از جابه‌جایی جانبی در طول کابل، توزیع شده و در نتیجه فعال‌سازی نبشی‌ها به صورت تدریجی‌تر و یکنواخت‌تری صورت می‌پذیرد. این توزیع یکنواخت کرنش موجب می‌شود نبشی‌ها با تأخیر بیش‌تری به ناحیه تسلیم وارد شوند.

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که سیستم‌های ترکیبی قاب فولادی، با تلفیق سازوکارهای مرکزگرای پس کشیده و قاب‌های خمشی ویژه و مهاربندی شده و اگر، تعادل مناسبی میان سختی، ظرفیت اتلاف انرژی و کنترل تغییر شکل تحت بار لرزه‌ای ایجاد می‌نمایند. قاب‌های مرکزگرا به تنهایی محدودیت‌هایی در سختی و اتلاف انرژی دارند، اما پیکربندی‌های ترکیبی پیشنهادی، مقاومت جانبی و نسبت میرایی معادل را به طور چشمگیری افزایش داده و رفتار مرکزگرایی را حفظ می‌کنند. افزودن قاب‌های مهاربندی شده و اگر به ویژه باعث افزایش قابل توجه میرایی می‌شود. این نتایج نشان‌دهنده توانمندی بالای این ترکیب‌ها در رفع محدودیت‌های سیستم‌های رایج و بهبود عملکرد لرزه‌ای سازه‌های فولادی است.

محدودیت‌های این تحقیق شامل محدود بودن مدل‌های تحلیل شده به قاب‌های سه دهانه و یک طبقه است که ممکن است عملکرد سازه‌های بلندمرتبه یا با هندسه پیچیده‌تر را به طور کامل نشان ندهد. همچنین، بارگذاری اعمال شده عمدتاً به صورت تحلیل چرخه‌ای بوده و اثرات بارگذاری دینامیکی زلزله به طور جامع بررسی نشده است. از طرفی، مدل‌سازی‌های انجام شده فاقد مدل‌سازی وادادگی کابل‌های فولادی بوده که پیش‌بینی رفتار



سازه‌های مرکزگرا پس از گذشت زمان طولانی را دشوار می‌کند. همچنین، خسارت‌های شکل‌پذیر در مدل‌های آباکوس لحاظ نشده و در نتیجه امکان پیش‌بینی شکست اجزایی مانند نبشی‌ها در سیکل‌های چندم بارگذاری چرخه‌ای وجود ندارد. علاوه بر این، روابط میان قاب‌های سازه در مدل‌های آباکوس مورد توجه قرار نگرفته است. در نهایت، فرض شده که قاب خمشی دارای شکل‌پذیری زیاد است و قاب‌های خمشی با شکل‌پذیری کم یا متوسط در نظر گرفته نشده‌اند. در کنار این موارد، بررسی‌های اقتصادی و تحلیل هزینه-فایده سیستم‌های ترکیبی برای کاربردهای عملی در پروژه‌های عمرانی نیز نیازمند مطالعات جامع‌تر و جداگانه‌ای است.

- [14] Eatherton, M.R., Ma, X., Krawinkler, H., Deierlein, G.G. and Hajjar, J.F., (2014), "Quasi-static cyclic behavior of controlled rocking steel frames", *Journal of Structural Engineering*, 140(11), p.04014083.
- [15] Lin, Y.C. (2015), "Steel sliding-controlled coupled beam modules: Development and seismic behavior for a moment resisting frame", *Engineering Structures*, 99, pp.726-736.
- [16] Clayto, P., Dowden, D.M., Li, C.H. (2015), "Full-Scale Pseudo dynamic Testing of Self-Centering Steel Plate Shear Walls", *Journal of Structural Engineering* 142(1).
- [17] Ricles, J.M., Sause, R., Garlock, M.M., and Zhao, C. (2001), "Posttensioned seismic-resistant connections for steel frames", *Journal of Structural Engineering*, 127(2), pp.113-121.
- [18] Herning, G., Garlock, M.M., Ricles, J., Sause, R., and Li, J. (2009), "An overview of self-centering steel moment frames", In *Structures Congress: Don't Mess with Structural Engineers: Expanding Our Role*, pp.1-9.
- [19] Ricles, J. M., Sause, R., Peng, S.W., and Lu, L.W. (2002), "Experimental evaluation of earthquake resistant posttensioned steel connections", *Journal of Structural Engineering*, 128(7), pp.850-859.
- [20] Zhong, C., and Christopoulos, C. (2022), "Self-centering seismic resistant structures: Historical overview and state-of-the-art", *Earthquake Spectra*, 38(2), pp.1321-1356.
- [21] Wolski, M., Ricles, J.M., and Sause, R. (2009), Experimental study of a self-centering beam-column connection with bottom flange friction device", *Journal of Structural Engineering*, 135(5), pp.479-488.
- [22] Chou, C.C., and Chen, J.H. (2011), "Seismic tests of post-tensioned self-centering building frames with column and slab restraints", *Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China*, 5(3), pp.323-334.
- [23] Faggiano, B., Esposito, M., and Mazzolani, F.E.D.E.R.I.C.O. (2008), "Behavioural investigation on a PTED beam-to-column connection based on numerical analyses", In *Proceedings, 14th World Conference on Earthquake Engineering*.
- [24] Christopoulos, C., Filiatrault, A., and Folz, B. (2002), "Seismic response of self-centring hysteretic SDOF systems", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 31(5), pp.1131-1150.
- [25] Bavandi, M., Amiri, G.G., Rajabi, E., and Moghadam, A.S. (2023), "Study of the resilience index for steel moment frames with reversible connections", In *Structures*, Vol. 47, pp.814-828.
- [26] Jiang, H., Bu, H., and He, L. (2020), "Study of a new type of self-centering beam-column joint in steel frame structures", *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 29(14), p.e1779.
- [27] Fang, C., Wang, W., and Feng, W. (2019), "Experimental and numerical studies on self-centring beam-to-column connections free from frame expansion", *Engineering Structures*, 198, p.109526.
- [1] ANSI/AISC-360, Specification for Structural Steel Buildings (ANSI/AISC 360), American Institute of Steel Construction, 2022.
- [2] Potter, S.H., Becker, J.S., Johnston, D.M., and Rossiter, K.P. (2015), "An overview of the impacts of the 2010-2011 Canterbury earthquakes", *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 14, pp.6-14.
- [3] Tenderan, R., Ishida, T., Jiao, Y., and Yamada, S. (2019), "Seismic performance of ductile steel moment-resisting frames subjected to multiple strong ground motions", *Earthquake Spectra*, 35(1), pp.289-310.
- [4] Wang, F., Wan, J., Luo, X., Ke, K., Yu, C., and Xie, W. (2024), "Seismic response of high strength steel frames equipped with energy dissipation bays subjected to seismic sequences", *Case Studies in Construction Materials*, 20, p.e03047.
- [5] Fragiaco, M., Amadio, C.L. A.U.D.I.O., and Macorini, L. (2004), "Seismic response of steel frames under repeated earthquake ground motions", *Engineering Structures*, 26(13), pp.2021-2035.
- [6] Roke, D., Sause, R., and Ricles, J.M. (2009), "Damage-free seismic-resistant self-centering steel concentrically-braced frames: D. Roke, R. Sause, JM Ricles & N. Gonner", In *Behaviour of Steel Structures in Seismic Areas*, pp. 21-28. CRC Press..
- [7] Eatherton, M.R., and Hajjar, J.F. (2014), "Hybrid simulation testing of a self-centering rocking steel braced frame system", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 43(11), pp.1725-1742.
- [8] Hajjar, J.F., Sesen, A.H., Jampole, E., and Wetherbee, A. (2013), "A synopsis of sustainable structural systems with rocking, self-centering, and articulated energy-dissipating fuses".
- [9] Erochko, J., Christopoulos, C., and Tremblay, R. (2015), Design, testing, and detailed component modeling of a high-capacity self-centering energy-dissipative brace", *Journal of Structural Engineering*, 141(8), p.04014193.
- [10] Xu, L., Jiang, H., Xie, X., and Li, Z. (2021), Modeling of disc spring self-centering energy dissipation braces from inactive state to design limit state", *Journal of Engineering Mechanics*, 147(10), p.04021077.
- [11] Garlock, M., Ricles, J.M., and Sause, R. (2004), "Experimental studies on full-scale post-tensioned steel moment connections", In *13th World Conference on Earthquake Engineering*, pp.1-6.
- [12] Garlock, M.M., Ricles, J.M., and Sause, R. (2005), Experimental studies of full-scale posttensioned steel connections", *Journal of Structural Engineering*, 131(3), pp.438-448.
- [13] Eatherton, M.R., Fahnestock, L.A., and Miller, D.J. (2014), "Computational study of self-centering buckling-restrained braced frame seismic performance", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 43(13), pp.1897-1914.

- [40] Kim, H.J., and Christopoulos, C. (2009), "Numerical models and ductile ultimate deformation response of post-tensioned self-centering moment connections", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 38(1), pp.1-21.
- [41] Hu, S., Liu, S., Zeng, S., Zhang, B., and Xu, Z. (2025), "Investigating seismic performance of a novel self-centering shear link in EBF utilizing experimental and numerical simulation", *Journal of Constructional Steel Research*, 224, p.109129.
- [42] Xu, G., Guo, T., Li, A.Q., Zhou, T., and Shuang, C. (2025), "Seismic performance of steel frame structures with novel self-centering beams: Shaking-table tests and numerical analysis", *Journal of Structural Engineering*, 151(3), p.04025002.
- [43] Shi, F., Yuan, W., Erbolat, A., Bao, W., Chen, Z., and Zhou, Y. (2025), "Mechanical behavior of hybrid self-centering brace: Insights into the role of SMA cables", *Engineering Structures*, 322, p.119205.
- [44] Gharagoz, M.M., Noureldin, M., and Kim, J. (2025), "Explainable machine learning (XML) framework for seismic assessment of structures using Extreme Gradient Boosting (XGBoost)", *Engineering Structures*, 327, p.119621.
- [45] Song, G. (2025), "Quantification of energy-dissipating capacity for self-centering shear walls considering variable loading sequences", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 189, p.109112.
- [۴۶] حسنلو، ن.، و فنائی، ن. (۱۴۰۳)، "تحلیل حساسیت اتصال مرکزگرای فولادی نسبت به پارامترهای مختلف تحت اثر بارگذاری چرخه‌ای"، نشریه علمی و پژوهشی سازه و فولاد. دوره ۲۱، شماره ۴۶ زمستان، ص. ۵۲-۳۰.
- [۴۷] گرامی، م.، میرزاحسینی، م.، و کاظمی، الف. (۱۴۰۲)، "مقایسه تأثیر پس‌لرزه بر عملکرد قاب مهاربندی‌شده مجهز به آلیاژ حافظه‌دار شکلی با قاب خمشی"، نشریه علمی و پژوهشی سازه و فولاد. دوره ۱۷، شماره ۴۲ زمستان، ص. ۸۱-۱۰۰.
- [48] American Society of Civil Engineers. (2022). Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures. American Society of Civil Engineers.
- [49] Hibbit, H., Karlsson, B., and Sorensen, E. (2012), "Abaqus user manual", version 6.12. Simulia, Providence, RI, 545.
- [28] Nia, M.M., and Moradi, S. (2022), "Continuum Finite Element Simulation of Self-Centering Beam-to-Column Connections using ANSYS", In 11n: Proceedings of the twelfth National Conference on Earthquake Engineering, Earthquake Engineering Research Institute, Salt Lake City.
- [29] Huang, X., Zhou, Z., Eatherton, M.R., Zhu, D., and Guo, C. (2020), "Experimental investigation of self-centering beams for moment-resisting frames", *Journal of Structural Engineering*, 146(3), p.04019214.
- [30] Hu, S., Wang, W., and Alam, M.S. (2023), "Probabilistic nonlinear displacement ratio prediction of self-centering energy-absorbing dual rocking core system under near-fault ground motions using machine learning", *Journal of Earthquake Engineering*, 27(3), pp.488-519.
- [31] Hu, S., Wang, W., and Alam, M.S. (2022), "Performance-based seismic design method for retrofitting steel moment-resisting frames with self-centering energy-absorbing dual rocking core system", *Journal of Constructional Steel Research*, 188, p.106986.
- [32] Majumerd, M.J.E., Dehcheshmeh, E. M., Broujerdian, V., and Moradi, S. (2022), "Self-centering rocking dual-core braced frames with buckling-restrained fuses", *Journal of Constructional Steel Research*, 194, p.107322.
- [33] Bojorquez, E., Lopez-Barraza, A., Reyes-Salazar, A., Ruiz, S.E., Ruiz-Garcia, J., Formisano, A., and Bojorquez, J. (2019), "Improving the structural reliability of steel frames using posttensioned connections", *Advances in Civil Engineering*, 2019(1), p.8912390.
- [34] Ahmadi, O., Ricles, J.M., and Sause, R. (2018), "Modeling and seismic collapse resistance study of a steel SC-MRF", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 113, pp.324-338.
- [35] Lettieri, A., Elettore, E., Freddi, F., Latour, M., and Rizzano, G. (2021), "Performance-based assessment of seismic-resilient steel moment resisting frames equipped with innovative column base connections", *ce/papers*, 4(2-4), pp.1736-1746.
- [36] Huang, X., Eatherton, M.R., and Zhou, Z. (2020), "Initial stiffness of self-centering systems and application to self-centering-beam moment-frames", *Engineering Structures*, 203, p.109890.
- [37] Torres, J.R., Bojórquez, E., Bojórquez, J., Leyva, H., Ruiz, S.E., Reyes-Salazar, A., and Reyes, H.E. (2023), "Improving the seismic performance of steel frames under mainshock-aftershock using post-tensioned connections", *Buildings*, 13(7), p.1676.
- [38] Kamperidis, V.C., Papavasileiou, G.S., Kamaris, G.S., and Vasdravellis, G. (2020), "Seismic collapse of self-centering steel MRFs with different column base structural properties", *Journal of Constructional Steel Research*, 175, p.106364.
- [39] Moradi, S., and Alam, M.S. (2016), "Finite-element simulation of posttensioned steel connections with bolted angles under cyclic loading", *Journal of Structural Engineering*, 142(1), p.04015075.