



سیزدهمین کنفرانس ملی سازه و فولاد

3 تا 6 دی ماه سال 1403

هتل المپیک - تهران



تعیین سهم مناسب هر سیستم از بار جانبی زلزله در سیستم دوگانه قاب با ستون‌های پیوند یافته برای

دستیابی به عملکرد شکل پذیر و دوسطحی

\*پوریا قمی زاده<sup>۱</sup>، اباذر اصغری<sup>۲</sup>، سید رسول میرقادری<sup>۳</sup>، لیلا سقرجوقی فرهانی<sup>۴</sup>

### چکیده

سیستم قاب با ستون‌های پیوند یافته از سیستم‌های نسبتاً جدید با قابلیت تعمیرپذیری سریع و کم هزینه پس از زلزله است. تعمیر سریع و بازگرداندن قابلیت بهره‌برداری از سازه آسیب دیده در این سیستم با تعویض المان‌های پیوند صورت می‌گیرد. این سیستم متشکل از دو سیستم قاب خمشی و ستون‌های پیوند یافته می‌باشد. جهت بهره‌مندی از ویژگی تعمیرپذیری این سیستم دوگانه، باید سیستم قاب خمشی پس از تسلیم سیستم ستون‌های پیوند یافته همچنان بدون افت مقاومت عملکرد ارتجاعی خود را حفظ کند (رفتار دو سطحی باشد) تا خرابی‌ها در زلزله‌ی طرح تنها در المان‌های پیوند متمرکز باشند. در این پژوهش با اختصاص نسبت‌های مختلف از نیروی زلزله به دو سیستم قاب خمشی و ستون‌های پیوند یافته، عملکرد سیستم دوگانه به کمک تحلیل‌های غیرخطی مورد بررسی قرار گرفته است و با توجه به نتایج، حداقل و حداکثر سهم این دو سیستم از بار زلزله جهت دستیابی به بهترین عملکرد تعیین شده است. برای دستیابی به عملکرد دو سطحی و رفتار شکل پذیر، قاب خمشی باید به تنهایی مقاومت کافی برای تحمل حداقل 40 درصد از برش پایه را داشته باشد. عملکرد سیستم دوگانه در تغییر شکل‌های بزرگ با محدود شدن سهم قاب‌های خمشی به زیر 60 درصد مناسب است.

### واژگان کلیدی:

سیستم باربر لرزه‌ای، قاب خمشی، ستون‌های پیوند یافته، سیستم دوگانه، سازه تعمیرپذیر

<sup>1</sup> دانشکده فنی دانشگاه تهران ، [pouria.ghomizade@ut.ac.ir](mailto:pouria.ghomizade@ut.ac.ir)

<sup>2</sup> دانشکده فنی دانشگاه تهران ، [abazar.asghari@ut.ac.ir](mailto:abazar.asghari@ut.ac.ir)

<sup>3</sup> دانشکده فنی دانشگاه تهران ، [rmirghaderi@ut.ac.ir](mailto:rmirghaderi@ut.ac.ir)

<sup>4</sup> دانشکده فنی دانشگاه تهران ، [lsfarahani@ut.ac.ir](mailto:lsfarahani@ut.ac.ir)



## مقدمه

پس از رخداد هر زلزله بزرگ یکی از چالش‌های اساسی خارج شدن سازه‌های آسیب دیده از چرخه بهره برداری است که خود یک مشکل اساسی برای ساکنین خانه‌های تخریب شده، بیمارستان‌ها و نهادهای متولی امداد و نجات است. برای مثال در زلزله‌ی 7.3 ریشتری سال 1396 سر پل زهاب پس از حدود یک سال از حادثه مشکلات اسکان ساکنین سازه‌های تخریب شده همچنان به قوت خود باقی بود، زیرا فرآیند تخریب و ساخت سازه‌های فروریخته و ترمیم و بازسازی سازه‌های آسیب دیده بسیار پرهزینه و زمان‌بر می‌باشد. مشکلاتی مشابه در سیستم‌های امداد رسانی پس از زلزله نیز قابل بیان است. برای مثال آسیب به سازه‌های مربوط به ایستگاه‌های آتشنشانی، مراکز بهداشت و درمان، شهرداری‌ها، فروشگاه‌ها و سایر مراکز خدمت رسانی معضلات بسیاری به همراه دارد که فرآیند کمک رسانی به مصدومان و آوارگان را کند می‌کند. در سال‌های اخیر استفاده از سیستم‌های باربر لرزه ای با قابلیت تعمیر سریع پس از زلزله بسیار مورد توجه بوده است. با استفاده از سازه‌هایی با این قابلیت می‌توان پس از زلزله با صرف کمترین هزینه و در کمترین زمان ممکن از سازه آسیب دیده بهره‌برداری کرد. ایده‌های مختلفی برای ساخت یک سازه با قابلیت تعمیر سریع وجود دارد. یکی از این ایده‌ها متمرکز کردن خرابی بر اعضای شکل‌پذیر با قابلیت تعویض سریع است. از سیستم‌های باربر جدید در این زمینه می‌توان به سیستم قاب با ستون‌های پیوند یافته یاد کرد.

این سیستم علاوه بر مزایای مذکور دارای ویژگی‌های منحصر به فرد دیگری نیز هست. با طراحی هوشمندانه این سیستم می‌توان به عملکرد دو سطحی دست پیدا کرد و با توجه به میزان شدت زلزله با کمترین هزینه می‌توان سازه را تعمیر نمود. برای مثال یک سازه مسلح به سیستم قاب با ستون‌های پیوند یافته می‌تواند در هر یک از دو سطح زلزله طرح (DBE) و بزرگترین زلزله محتمل (MCE)، در حد تعیین شده توسط طراح دچار خرابی شود و بدین ترتیب با وقوع یک زلزله متوسط فقط تعداد اندکی از اعضای آن نیاز به تعویض/تعمیر داشته باشند در حالی که همچنان در زلزله‌های بزرگ تر نیز قابلیت تعمیر پذیری خود را حفظ می‌کند.

سیستم قاب با ستون پیوند یافته در واقع ترکیب سیستم قاب خمشی با یک یا چند دهانه ستون‌های نزدیک به هم است که توسط تیرهایی به هم پیوند شده اند. این طرح می‌تواند برای طراحی یک سازه یا بهسازی سازه موجود مورد استفاده قرار گیرد.

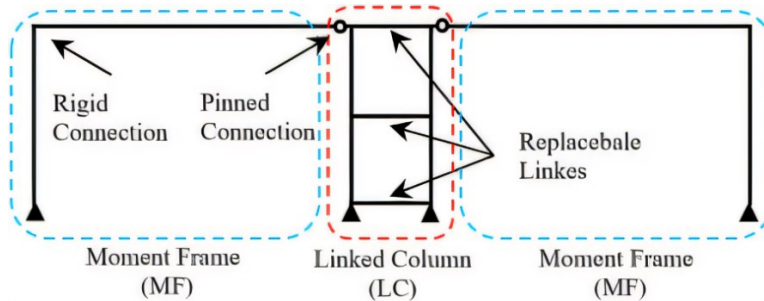
سیستم ستون‌های پیوند یافته با توجه به حضور تیرهای پیوند در تراز طبقات و ترازهای مابین طبقات (با توجه به تقاضا و شرایط سازه) می‌تواند در برابر نیروهای جانبی مقاومت و سختی ایجاد کند. مهم ترین ویژگی این سیستم قابلیت تعمیر سریع سازه پس از آسیب‌های ناشی از زمین لرزه است زیرا اعضای پیوند قابلیت تعویض سریع و بلافاصله پس از زلزله را دارند و آسیب‌های ناشی از زلزله بر این اعضا متمرکز هستند. در شکل-1 یک نمونه سازه با سیستم قاب با ستون پیوند یافته (LCF) نشان داده شده است.



## سیزدهمین کنفرانس ملی سازه و فولاد

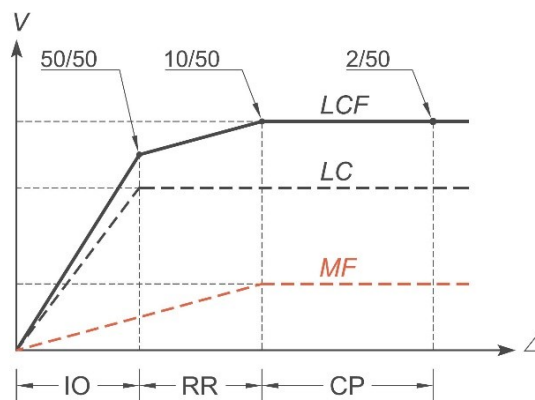
3 تا 6 دی ماه سال 1403

هتل المپیک - تهران



شکل-1 سیستم قاب با ستون‌های پیوند یافته

اگر سازه نشان داده شده تحت اثر نیروی جانبی معادل با زلزله قرار گیرد و در اثر افزایش نیروی جانبی دچار تغییر شکل جانبی شود نمودار رفتاری سازه، شامل رفتار جداگانه ستون‌های پیوند یافته (LC)، قاب خمشی (MRF) و کل مجموعه قاب و ستون‌های پیوند یافته (LCF) به صورت نشان داده شده در شکل-2 می‌باشد. طراحی ایده آل سازه با سیستم قاب با ستون‌های پیوند یافته به صورتی است که تحت اثر زلزله ای با احتمال وقوع 50 درصد در 50 سال تنها آسیب‌ها در تیرهای پیوند حد فاصل ستون‌های پیوند یافته متمرکز باشد. بدین ترتیب هر سه نمودار تا این سطح از زلزله (DBE) کاملاً خطی هستند. پس از آن به دلیل آسیب‌های ناشی از تسلیم‌های برشی / خمشی به تیرهای پیوند بخش ستون‌های پیوند یافته (LC) سختی خود را از دست می‌دهند. با زیاد تر شدن سطح نیرو و جابجایی، تا زلزله ای با احتمال وقوع 10 درصد در 50 سال (SLE)، قاب خمشی (MRF) همچنان رفتار خطی دارد و سختی خود را حفظ می‌کند. اما پس از آن مفاصل پلاستیک در قاب‌های خمشی ظاهر شده و سختی این سیستم نیز کاهش خواهد یافت تا جایی که زلزله ای با احتمال وقوع 2 درصد در 50 سال (MCE) باعث رفتار کاملاً غیر خطی سازه می‌شود (اما فروریزش رخ نمی‌دهد). با توجه به جابجایی برابر دو سیستم به هم پیوسته و رفتار موازی آن‌ها در برابر نیروهای جانبی می‌توان نمودار رفتار قاب با ستون‌های پیوند یافته (LCF) را ترسیم نمود.



شکل-2 سطوح عملکرد و سطوح خطر سیستم دوگانه قاب با ستون پیوند یافته



## سیزدهمین کنفرانس ملی سازه و فولاد

3 تا 6 دی ماه سال 1403

هتل المپیک - تهران



بنا بر این انتظار می‌رود در زلزله‌های کوچک تر از زلزله سطح طرح (DBE) رفتار سازه کاملاً خطی باشد و قابلیت بهره برداری بی وقفه از سازه ( $IO^1$ ) مهیا شود. در زلزله‌هایی با قدرتی ما بین دو سطح زلزله طرح (DBE) و زلزله بهره برداری (SLE) سازه قابلیت تعمیر سریع با تعویض عضو آسیب دیده (تیرهای پیوند) را داشته و در نهایت تا رسیدن به حداکثر زلزله محتمل MCE فروریزش در سازه رخ ندهد. معمولاً سطح تعمیر سریع در سازه‌هایی که این قابلیت را ندارند با عنوان سطح تأمین امنیت جانی ( $LS^1$ ) شناخته می‌شود. در سیستم قاب با ستون‌های پیوند یافته نیز انتظار می‌رود ضمن حفظ جان ساکنین قابلیت تعویض سریع عضو شکل پذیر (فیوز سازه ای) مهیا باشد. و سایر اعضا با رفتار ارتجاعی خود حتی کمترین آسیب ماندگار را تجربه نکنند.

در این پژوهش سعی بر آن است که با توجه به پارامترهای مؤثر در عملکرد هر یک از بخش‌های یک سیستم LCF، حداقل و حداکثر سهم نیروی دو سیستم قاب خمشی و ستون‌های پیوند یافته از باربری جانبی کل برای دستیابی به عملکرد دو سطحی تعیین شود. این هدف با بررسی مستقل معیارهای سختی و مقاومت و به کمک تحلیل‌های غیرخطی استاتیکی و دینامیکی صورت گرفته است.

### مروری بر پژوهش‌های گذشته

سیستم ستون‌های پیوند یافته اولین بار در سال 1998 در طراحی ستون‌های برج اصلی پل جدید اوکلند در خلیج سان فرانسیسکو توسط مروان نادر و همکارانش مورد استفاده قرار گرفت. وظیفه پیوندها در این پل استهلاک نیروهای ناشی از زلزله بود. این پیوندها قابلیت تعویض سریع پس از زلزله را داراست. بدین ترتیب پس از آسیب جزئی ناشی از زلزله با تعویض پیوندها، پل توانایی مقاومت در برابر زلزله‌های بعدی و سایر بارگذاری‌ها (که بعضاً پس از زلزله و ایجاد نقص در سازه به راحتی به سازه آسیب می‌رسانند) را می‌یابد (Nader et al., n.d). پس از آن پل‌های زیادی با آن شکل و شمایل طرح و اجرا شدند و البته اینگونه برای اولین بار ایده استفاده از سیستم ستون‌های پیوند یافته در سازه‌های فولادی شکل گرفت. در سال 2007 برای اولین بار پیتر دوسیکا از ایده ستون‌های پیوند یافته در سازه‌های ساختمانی استفاده کرد تا به این وسیله قابلیت تعمیر سریع سازه پس از زلزله با تعویض پیوندها برای ساختمان مهیا شود (Peter Dusicka & Robert Iwai, 2007). در نتیجه سیستم باربر جانبی فولادی جدیدی با نام قاب با ستون پیوند یافته (LCF) به وجود آمد. این سیستم متشکل از دو سیستم باربر جانبی ستون‌های پیوند یافته (LC) و قاب خمشی فولادی (MF) می‌باشد که به طور هم‌زمان و مشترک در برابر بارهای ناشی از زلزله مقاومت می‌کنند. ملکوتیان و همکاران در سال 2013 به بررسی پاسخ لرزه ای سیستم قاب با ستون‌های پیوند یافته پرداختند. در این پژوهش که به کمک مدلسازی‌های عددی و تحلیل‌های غیرخطی (بار افزون، تاریخچه زمانی و تحلیل دینامیکی افزاینده) با المان‌های فایبر صورت گرفت، نحوه صحیح طراحی این سیستم باربر دوگانه با تیرهای پیوند خمشی و ترکیبی (خمشی و برشی) مورد بررسی قرار گرفت (Malakoutian et al., 2013). در سال 2014 لوپز و همکاران یک مدل آزمایشگاهی از این سیستم در دانشگاه برکلی را مورد مطالعه قرار دادند (Lopes et al., 2014). در سال 2016 لوپز به کمک تحلیل‌های عددی و مدل‌های آزمایشگاهی به دنبال تضمین قابلیت بازگشت سریع به بهره برداری سازه (تعمیر سریع) در فرآیند طراحی و جزئیات بندی بود (Lopes, 2016).

ملکوتیان و همکارانش در سال 2016 به کمک تحلیل‌های عددی غیرخطی به تعیین پارامترهای لرزه ای سیستم قاب با ستون پیوند یافته به کمک دستورالعمل FEMA p695 و ارزیابی رفتار این سیستم پرداختند و به ضرایب  $\Omega_0 = 3$ ،  $C_b = 5.5$  و  $R = 8$



## سیزدهمین کنفرانس ملی سازه و فولاد

3 تا 6 دی ماه سال 1403

هتل المپیک - تهران



دست یافتند. طراحی پیوندها در این سیستم به کمک مدل‌های آزمایشگاهی و مدلسازی به روش اجزا محدود صورت گرفت (Malakoutian et al., 2016). شعیی و همکاران در سال 2017 روشی جدید ارائه کردند که یک روش طراحی پلاستیک بر اساس عملکرد (PBD<sup>3</sup>) برای سازه‌های دارای فیوز و مبتنی بر جابجایی سازه بود. در این روش عملکرد و اندرکنش دو بخش تشکیل دهنده سازه به صورت همزمان مورد بررسی قرار می‌گیرد (Shoeibi et al., 2017). این روش با وجود کاربردی بودن همچنان نمی‌توانست به سادگی برای طراحی سازه‌های LCF مورد استفاده قرار گیرد. شعیی و همکاران در سال 2018 نیز به بررسی پارامتریک ستون‌های پیوند یافته پرداختند (Shoeibi et al., 2018) سپس در سال 2019 شعیی و همکاران روشی ساده شده و بر اساس نیرو را جهت طراحی این سیستم ارائه دادند. ویژگی مهم این روش تضمین عملکرد چند سطحی و خطی ماندن قاب خمشی در هنگام اعمال زلزله طرح به سازه بود (Shoeibi et al., 2019). بدین ترتیب بخش مهمی از مشکلات عملی طراحی این سیستم مرتفع شد و به کمک بار توزیع شده بین دو سیستم باربر موازی، طراحی به کمک نیروی وارده انجام شد. در سال 2021 تازرو و محب خواه روش مبتنی بر جابجایی مستقیم را به عنوان روش طراحی قاب با ستون‌های پیوند یافته ابداع کردند (Tazarv & Mohebkhah, 2021a, 2021b). در سال 2022 فنگلی و همکاران مطالعاتی عددی و آزمایشگاهی را روی رفتار چرخه ای ستون های پیوند یافته با برکنش پای ستون تحت زمین لرزه انجام دادند (Li et al., 2022).

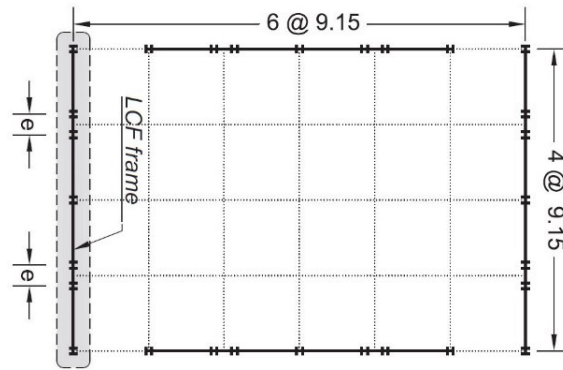
در نهایت در سال 2023 مونتوری و همکاران روش طراحی بر اساس کنترل موده‌های خرابی را با نظریه کنترل مکانیسم پلاستیک (TPMC<sup>4</sup>) بر روی 27 نمونه عددی مورد مطالعه قرار دادند و با کمک روش‌های تحلیل غیرخطی معیارهایی جهت طراحی این سیستم ارائه کرده اند (Montuori et al., 2023). از ابتدای مطرح شدن ایده قاب با ستون‌های پیوند یافته، استفاده از ستون‌های پیوند یافته به عنوان یک سیستم باربر جانبی ثانویه برای مصارف بهسازی لرزه ای مطرح بود. اما برای اولین بار توسط جابری و اصغری با توجه به ظرفیت بالای ستون‌های پیوند یافته در مقابل زلزله، این سیستم به عنوان یک سیستم باربر جانبی مستقل مورد مطالعه قرار گرفت و بررسی‌های صورت گرفته نشان می‌داد که این سیستم به عنوان یک سیستم باربرجانبی مستقل فولادی توانسته است انتظارات را تأمین کند (Jaberi & Asghari, 2020b, 2020a, 2022). جابری و همکاران در سال 2024 در پژوهشی دیگر یک روش طراحی برای سیستم‌های LCF و LCS بر اساس عملکرد و به وسیله ی تحلیل زمان-دوام ارائه دادند که در آن به ارائه راهکاری جهت طراحی ایمن و اقتصادی این سیستم پرداختند. آن‌ها کنترل و محدود کردن دوران تیر پیوند را به عنوان یک پارامتر مهم افزایش ظرفیت لرزه ای معرفی کردند. این روش به دنبال حل مشکلات موجود در طراحی این سیستم‌ها که شامل تعامل پیچیده بین اجزای مختلف و تغییرات بار جانبی در طول زلزله می‌شود ارائه شده است (Jaberi et al., 2014).

### معرفی مدل‌های مورد مطالعه

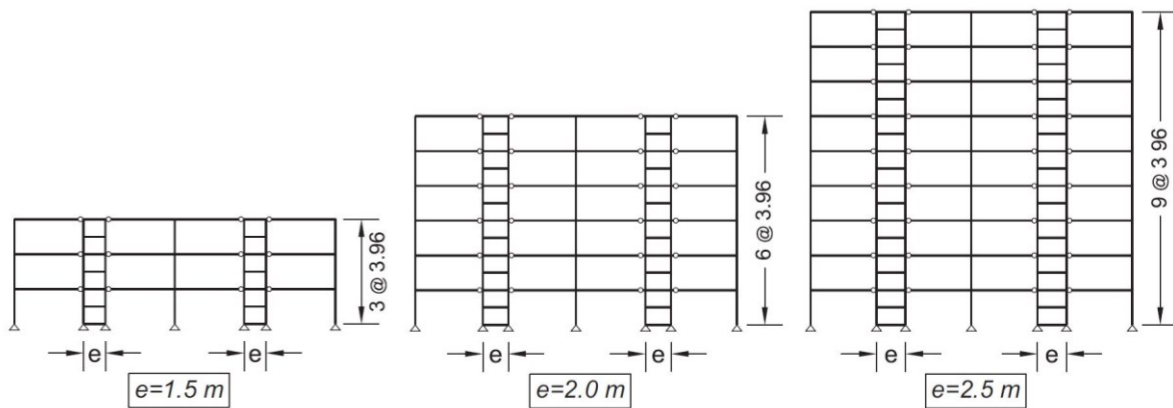
در این پژوهش جهت بررسی عملکرد لرزه ای سیستم مورد نظر سه سازه 3، 6 و 9 طبقه با سیستم قاب با ستون‌های پیوند یافته مورد بررسی قرار گرفته اند. سازه‌های مورد بررسی به صورت دو بعدی و با شرایط بارگذاری ثقلی و لرزه ای کاملاً یکسان می‌باشند. این سازه‌ها به کمک نرم افزار SAP2000 و با پارامترهای لرزه ای مشابه با قاب‌های خمشی مدلسازی شده اند. در این مدلسازی ها از قاب‌های 5 دهانه با طول 6 متر برای هر دهانه و ارتفاع 3.96 متر برای هر طبقه استفاده شده است. پلان‌های مذکور از پلان



های SAC مطابق با شکل-3 استخراج شده است. مقدار بار مرده و زنده مفروض به ترتیب معادل با 6 و 2 کیلونیوتون بر متر مربع می باشد که به صورت یکنواخت و با توجه به سهم بارگیر قاب بر روی تراز سقفها توزیع شده است. تحلیل مدلها جهت طراحی بر اساس روش تحلیل استاتیکی معادل و طراحیها بر اساس روش ضرایب بار و مقاومت (LRFD) و مطابق با استاندارد AISC 360-22 صورت گرفته است. در طراحی مدلها از مقاطع بال پهن آمریکایی (سری W) و مصالح فولادی ASTM A992 با تنش تسلیم 345 مگاپاسکال استفاده شده است. فرضیات مربوط به لرزه خیزی محل احداث بر مبنای منطقه ای با نسبت شتاب مبنای طرح با خطر نسبی خیلی زیاد و خاک نوع D مطابق با ASCE 7-22 می باشد. همچنین ضریب اهمیت سازه برابر 1 فرض شده است.



شکل-3 پلان سازه های مورد بررسی



شکل-4 قاب های 3، 6 و 9 طبقه مورد بررسی

با توجه به استفاده از قاب دو بعدی در مدلسازیها جهت وارد کردن آثار P-Delta و جرم موثر از ستونهای تکیه دهنده<sup>۱۰</sup> استفاده شده است. در طراحی سازه دوران تیرهای پیوند در زلزله طرح به یک دهم رادین محدود شده است و با توجه به شباهت سیستم قاب با ستونهای پیوند یافته به سیستم قاب خمشی، برای بارگذاری اولیه زلزله از فرمول تجربی مربوط به قابهای خمشی استفاده شده است. همچنین کنترلهای لرزه ای مربوط به سیستم قاب خمشی نیز مطابق با استاندارد AISC 341-22 صورت گرفته



است. به عنوان حدس اولیه برای طراحی هر یک از اعضا و همچنین صحت سنجی مدلسازی از مقاطع استفاده شده در سازه با پلانی مشابه در پژوهش شعبی و همکاران استفاده شده است (Shoeb et al., 2017) و با توجه به نتایج حاصل شده مقاطع اصلاح شدند. مقاطع بدست آمده از طراحی مطابق جدول-1 می باشد.

جدول-1 مقاطع حاصل از طراحی سازه

Frame	Story	Linked column system			Moment frame system		
		Story link	Mid-story link	Column	Exterior column	Interior column	Beam
3-Story	3	I-45 x 1-20 x 1.5	I-52.5 x 1.2-17.5 x 2	W-14 x 132	W-14 x 176	W-14 x 311	W-18 x 130
	2	I-80 x 1.5-20 x 1.5	I-67.5 x 2.5-22.5 x 2.5	W-14 x 342	W-14 x 233	W-14 x 500	W-18 x 211
	1	I-72.5 x 2.5-22.5 x 2	I-72.5 x 3.5-25 x 2.5	W-14 x 730	W-14 x 233	W-14 x 500	W-18 x 211
6-Story	6	I-40 x 1-25 x 2	I-40 x 1-25	W-14 x 132	W-14 x 193	W-14 x 398	W-18 x 175
	5	I-40 x 1-25 x 2	I-55 x 1-25 x 2	W-14 x 145	W-14 x 311	W-14 x 550	W-14 x 426
	4	I-55 x 1.2-27.5 x 2	I-62.5 x 1.5-27.5 x 2.5	W-14 x 257	W-14 x 311	W-14 x 550	W-14 x 398
	3	I-70 x 1.5-25 x 2.5	I-75 x 2-30 x 2.5	W-14 x 426	W-14 x 311	W-14 x 550	W-14 x 257
	2	I-70 x 1.5-25 x 2.5	I-72.5 x 2.5-32.5 x 3	W-14 x 605	W-14 x 311	W-14 x 550	W-18 x 130
	1	I-75 x 2-27.5 x 2	I-70 x 3-35 x 2.5	W-16 x 757B	W-14 x 311	W-14 x 550	W-18 x 130
9-Story	9	I-40 x 1-27.5 x 2.5	I-40 x 1-27.5 x 2.5	W-14 x 132	W-14 x 193	W-14 x 342	W-18 x 158
	8	I-40 x 1-27.5 x 2.5	I-40 x 1-27.5 x 2.5	W-14 x 176	W-14 x 311	W-14 x 550	W-14 x 398
	7	I-40 x 1-27.5 x 2.5	I-50 x 1.2-32.5 x 2.5	W-14 x 257	W-14 x 311	W-14 x 550	W-14 x 455
	6	I-45 x 1-27.5 x 2.5	I-57.5 x 1.5-30 x 3	W-14 x 342	W-14 x 311	W-14 x 550	W-14 x 455
	5	I-52.5 x 1.2-30 x 2.5	I-57.5 x 1.5-30 x 3	W-14 x 455	W-14 x 311	W-14 x 550	W-14 x 370
	4	I-67.5 x 1.2-27.5 x 2.5	I-75 x 1.5-35 x 2.5	W-14 x 455	W-14 x 311	W-14 x 550	W-14 x 283
	3	I-72.5 x 1.5-32.5 x 2.5	I-70 x 2-37.5 x 3	W-14 x 605	W-14 x 311	W-14 x 550	W-18 x 143
	2	I-72.5 x 1.5-32.5 x 2.5	I-75 x 2-35 x 3	W-14 x 730	W-14 x 311	W-14 x 550	W-18 x 143
	1	I-80 x 1.5-27.5 x 2.5	I-67.5 x 2.5-40 x 3	W-16 x 899B	W-14 x 311	W-14 x 550	W-18 x 97

### تحلیل های غیرخطی و ارزیابی مدل ها

پس از طراحی سازه ها، تحلیل های استاتیکی غیرخطی به کمک نرم افزار OpenSees<sup>16</sup> صورت گرفته است. در این تحلیل ها برای در نظرگیری آثار غیرخطی از مقاطع با پلاستیسیته گسترده (از نوع فایبر) و فولاد با رفتار ایده آل (Steel02) استفاده شده است. تحلیل های غیرخطی بر اساس FEMA365، FEMA440 و ASCE 41 بر مدل ها اعمال شده است. توزیع بار در طبقات سازه ها با توجه به شکل مد اول رفتاری صورت گرفته است. نتایج این تحلیل ها در بخش های بعدی آورده شده است.

### تحلیل حالات مختلف توزیع بار در LCF

پیش تر اشاره شد که سیستم قاب با ستون های پیوند یافته نوعی سیستم باربر جانبی دوگانه است که از دو سیستم قاب خمشی (MRF) و تعدادی زوج ستون پیوند شده (LC) تشکیل شده است. اگر تعداد تیرهای با اتصال صلب زیاد شوند یا مقطع تیرهای مذکور بزرگ شود، هم سختی و هم مقاومت قاب خمشی افزایش می یابد همچنین اگر تعداد دهانه های LC افزایش یابد یا مقاطع تیرهای پیوند یا خود ستون ها پیوند شده بزرگ شوند، سختی و مقاومت سیستم ستون های پیوند یافته نیز افزایش خواهد داشت شرط عملکرد مناسب مجموعه این است که سختی و مقاومت به نحوی تنظیم شوند که عملکرد دو سطحی مناسب اتفاق بیفتد. منظور از عملکرد دو سطحی مناسب آن است که سیستم ستون های پیوند یافته نسبت به قاب خمشی در جابجایی کوچک تری تسلیم شود تا



## سیزدهمین کنفرانس ملی سازه و فولاد

3 تا 6 دی ماه سال 1403

هتل المپیک - تهران



به این ترتیب بتوان از قابلیت تعمیرپذیری سازه بهره برد. علاوه بر این تشخیص رفتار غیرخطی سازه و تعیین عملکرد هر یک از دو سیستم تشکیل دهنده این مجموعه دید بهتری از عملکرد آن می‌دهد. آنچه در این پژوهش به عنوان معیار هدف قرار داده شده است، تعیین سهم هر یک از دو سیستم برابر از بار جانبی معادل زلزله است به طوری که بهترین عملکرد برای آن حاصل شود. همانطور که پیش تر در سیستم‌های دوگانه دیگر نظیر ترکیب دیوارهای برشی با قاب‌های خمشی و ترکیب مهاربندهای همگرا با قاب‌های خمشی چنین معیارهایی وجود دارد. برای دستیابی به بازه ای مناسب برای سهم هر یک از دو سیستم، 5 حالت برای سهم سیستم ها در نظر گرفته شده است که به صورت زیر هستند.

- 1- سیستم قاب خمشی 20 درصد و سیستم ستون‌های پیوند یافته 80 درصد از برش پایه را داشته باشد.
- 2- سیستم قاب خمشی 40 درصد و سیستم ستون‌های پیوند یافته 60 درصد از برش پایه را داشته باشد.
- 3- سیستم قاب خمشی 50 درصد و سیستم ستون‌های پیوند یافته 50 درصد از برش پایه را داشته باشد.
- 4- سیستم قاب خمشی 60 درصد و سیستم ستون‌های پیوند یافته 40 درصد از برش پایه را داشته باشد.
- 5- سیستم قاب خمشی 80 درصد و سیستم ستون‌های پیوند یافته 20 درصد از برش پایه را داشته باشد.

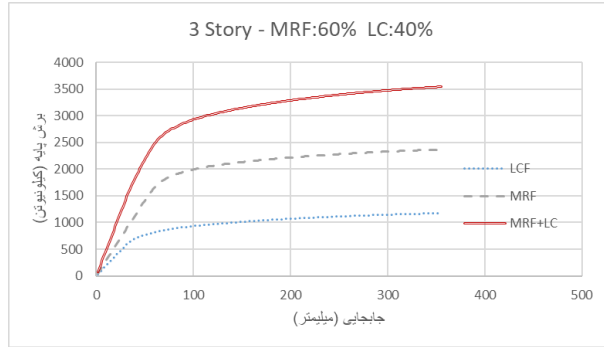
طبعاً برای تغییر سهم برابر هر سیستم از بار کل ناشی از زلزله، مقاطع اعضا و در صورت نیاز تعداد گره‌ها با اتصالات صلب در سیستم قاب خمشی و همچنین مقاطع اعضا در سیستم ستون‌های پیوند یافته تغییر می‌کند و این به معنی تغییر در مقاطع حاصل از طراحی اولیه است. بدین ترتیب برای برش پایه ثابت و تأمین حالات 5 گانه فوق، سازه‌های 3، 6 و 9 طبقه باز طراحی شدند (جمعاً 15 قاب). لازم به ذکر است به دلیل محدودیت در مقاطع، سهم هر سیستم از بار زلزله در برخی مدل‌های طراحی شده تا 4٪ با حالات 5 گانه اختلاف دارد. در تمام سازه‌ها طول ناحیه پیوند و تعداد دهانه‌های ستون‌های پیوند یافته ثابت در نظر گرفته شدند تا تأثیرات عوامل مختلف (به جز مقاطع) بر سختی و مقاومت به حداقل برسد. سپس تحلیل‌های غیرخطی استاتیکی جهت استخراج عملکرد سازه‌ها مطابق با آنچه در بخش مربوطه توضیح داده شد صورت گرفت. برای ترسیم نمودارهایی که امکان قضاوت را می‌دهند لازم است نیرو و جابجایی دو سیستم تشکیل دهنده هر سازه به صورت جداگانه رسم شوند. به همین جهت سهم سیستم قاب خمشی از زلزله، جمع برش ستون‌های قاب خمشی در پایین‌ترین طبقه و سهم سیستم ستون‌های پیوند یافته از زلزله جمع برش ستون‌های پیوند یافته در پایین‌ترین طبقه در نظر گرفته شده است. محور افقی نمودارهای اشکال 6- تا 8، برش پایه زلزله و محور قائم جابجایی گره ای مشخص در بام را نشان می‌دهد. در بالای هر نمودار مشخصات مربوط به آن از جمله تعداد طبقات قاب و مقدار سهم دو سیستم قاب خمشی و ستون‌های پیوند یافته از برش پایه مشخص شده است. با توجه به اختصاص سهم مشخصی از برش پایه به هر سیستم در طراحی، می‌توان گفت که همین نسبت‌ها در بین سختی‌های اولیه دو سیستم نیز برقرار است.



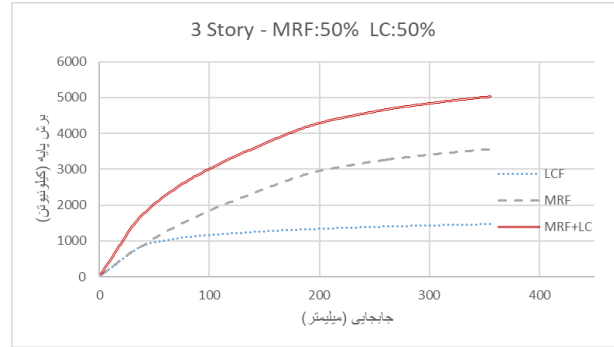
# سیزدهمین کنفرانس ملی سازه و فولاد

3 تا 6 دی ماه سال 1403

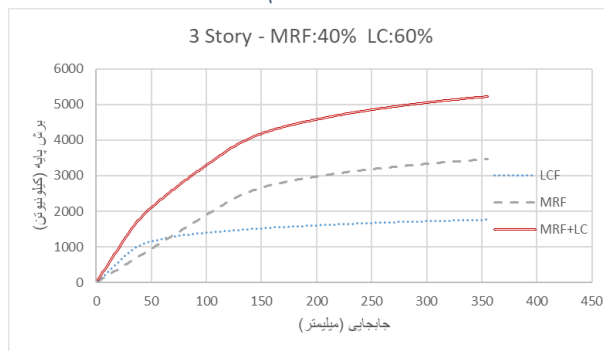
هتل المپیک - تهران



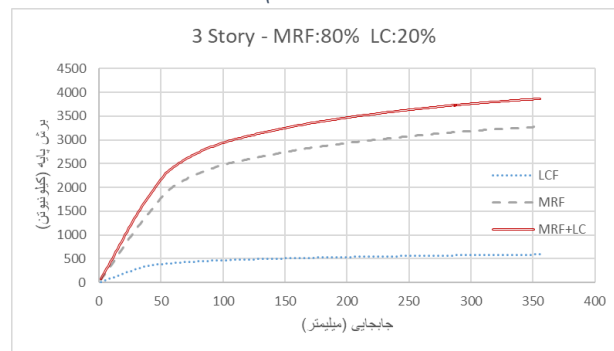
شکل-6 ب)



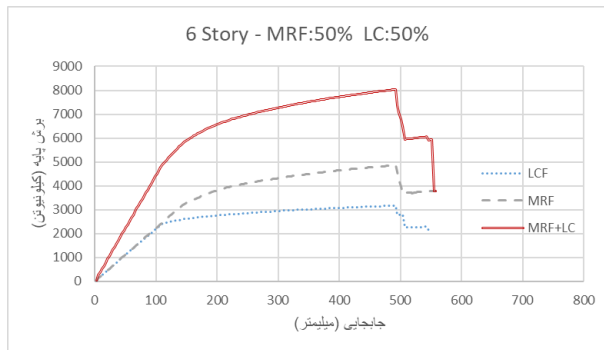
شکل-6 الف)



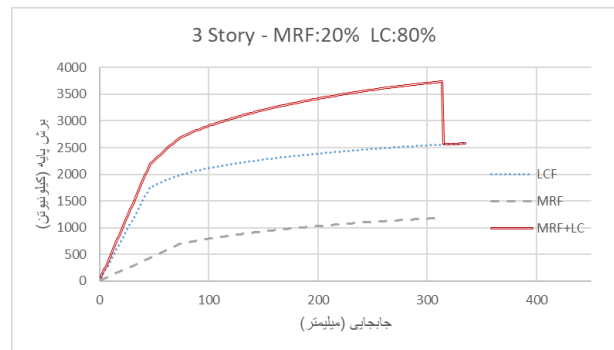
شکل-6 د)



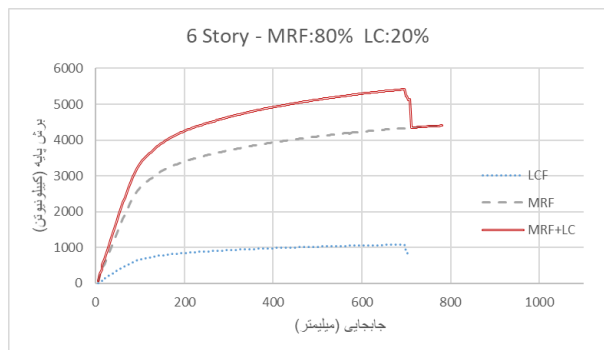
شکل-6 ج)



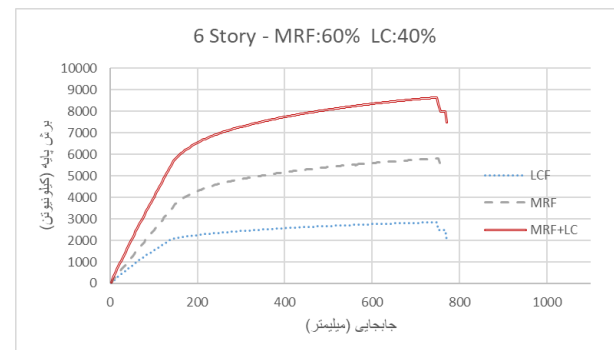
شکل-7 الف)



شکل-6 هـ)



شکل-7 ب)



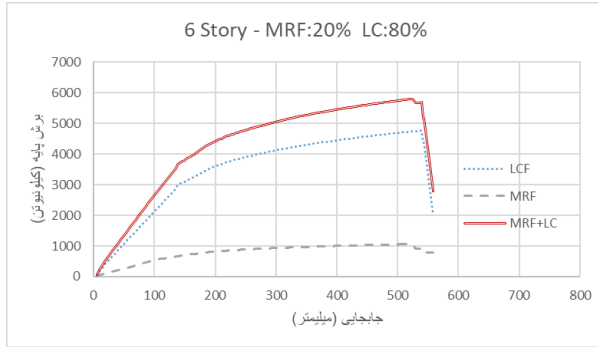
شکل-7 گ)



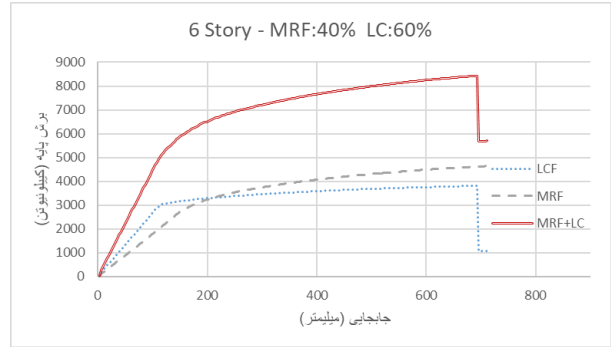
# سیزدهمین کنفرانس ملی سازه و فولاد

3 تا 6 دی ماه سال 1403

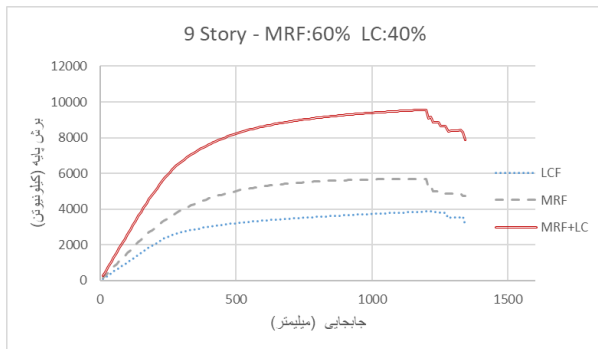
هتل المپیک - تهران



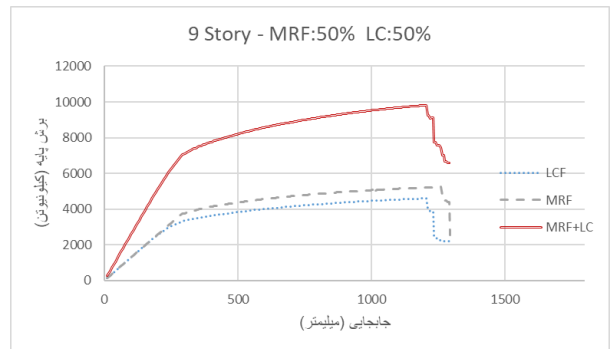
شکل-7 هـ)



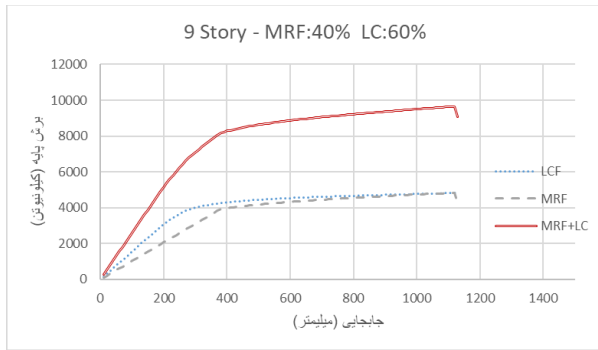
شکل-7 د)



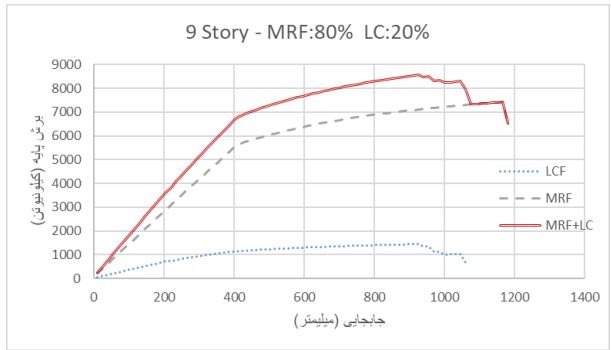
شکل-8 ب)



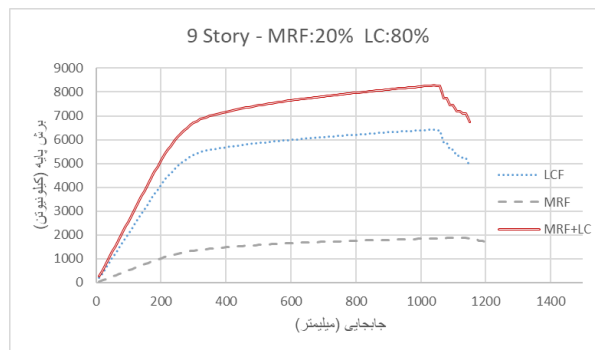
شکل-8 الف)



شکل-8 د)



شکل-8 ج)



شکل-8 هـ)



## بحث و نتیجه گیری

با توجه به نتایج حاصل از تحلیل‌های غیرخطی و نمودارهای استخراج شده، امکان قضاوت درباره نحوه عملکرد هر یک از دو سیستم تشکیل دهنده سیستم مرکب LCF فراهم شده است. نتایج منتج از مقایسه و بررسی نمودارها به شرح ذیل است.

(1) با افزایش سهم قاب خمشی از نیروی زلزله مقاومت آن افزایش یافته و جابجایی متناظر با تسلیم آن از جابجایی متناظر با تسلیم در سیستم ستون‌های پیوند یافته فاصله‌ی بیشتری پیدا می‌کند. این موضوع تضمین عملکرد دو سطحی در این سیستم است.

(2) در شرایطی که سهم دو سیستم از بار جانبی برابر است یا حتی زمانی که 60 درصد از نیروی جانبی زلزله توسط سیستم ستون‌های پیوند یافته تحمل می‌شود، همچنان سیستم ستون‌های پیوند یافته زودتر دچار رفتار غیر ارتجاعی می‌شود که این موضوع ظرفیت این سیستم برای تسلیم در سطوح پایین تر جابجایی نسبت به سیستم قاب خمشی را نشان می‌دهد.

(3) در قاب‌های با 3، 6 یا 9 طبقه هنگامی که سهم سیستم‌ها از نیروی جانبی زلزله اختلاف زیادی دارد (حالات 80 درصد قاب خمشی 20 درصد ستون‌های پیوند شده و بالعکس) مقدار ظرفیت نیروی قابل تحمل در جابجایی‌های بزرگ کاهش حدود 20 درصدی دارد که جذب انرژی و توانایی سازه در تحمل رفتارهای غیرارتجاعی را به خطر می‌اندازد. این همان موضوعی است که برای جلوگیری از آن، آیین‌نامه‌ها تحمل حداقل 25 درصد از برش جانبی توسط قاب‌های خمشی در سیستم‌های دوگانه را لازم دانسته اند.

(4) هرچه تعداد طبقات سازه افزایش پیدا می‌کند، جابجایی نظیر تسلیم دو سیستم باربرجانبی به هم نزدیک تر می‌شود. بنا بر این استفاده از سیستم قاب با ستون‌های پیوند یافته در سازه‌های کوتاه تر مزیت بیش‌تری به همراه دارد. این امر می‌تواند ریشه در ماهیت سیستم ستون‌های پیوند یافته (LC) یعنی رفتار نسبتاً طره ای آن داشته باشد که هرچه ارتفاع بیش‌تر باشد، جابجایی‌ها بدون نیاز به افزایش قابل توجه نیرو افزایشی خواهند بود.

در نهایت با توجه به یافته‌های این پژوهش تخصیص حداقل سهم 40 درصدی از نیروی جانبی زلزله به قاب‌های خمشی برای تضمین رفتار شکل‌پذیر و دوسطحی، امری لازم به نظر می‌آید. از طرفی باید از اختصاص سهم قابل توجه (بیش از 60 درصد) به هریک از دو سیستم اجتناب شود. این اعداد با توجه به نمونه‌های مورد مطالعه حاصل شده اند و در صورت افزایش نمونه‌ها اعداد و ارقامی به مراتب دقیق تر قابل دستیابی است.

## منابع

- 1-Asghari A, Azimi Zarnagh B. (2017). A new study of seismic behavior of perforated coupled shear walls. *International Journal of Civil Engineering* 15, 775-789. <https://doi.org/10.1007/s40999-017-0174-y>
- 2-Jaberi V, Asghari A. (2020). Evaluation of seismic response of linked column with simple frame system. *Modares Civil Engineering journal*, 23,19,6.41-58. <https://mcej.modares.ac.ir/article-16-31002-en.html>
- 3-Jaberi V, Asghari A. (2020). Seismic rehabilitation of existing buildings by linked column system. *Sharif Journal of Civil Engineering*, 36(3.1):55-65. <https://dx.doi.org/10.24200/j30.2019.52748.2504>
- 4-Jaberi, V., & Asghari, A. (2022). Seismic behavior of linked column system as a steel lateral force resisting system. *Journal of Constructional Steel Research*, 196. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2022.107428>



- 5-Jaberi, V., Jaberi, M., & Asghari, A. (2024). A new performance-based seismic design method using endurance time analysis for linked column frame system and a comparison of structural systems and seismic analysis methods. *Structural Design of Tall and Special Buildings*, 33(10).  
<https://doi.org/10.1002/tal.2100>
- 6-Li, F., Zhao, B., Li, Y., Lü, T., & Wang, G. (2022). Experimental and numerical studies on the hysteretic behavior of linked column frame with uplifted column feet. *Journal of Constructional Steel Research*, 197. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2022.107441>
- 7-Lopes, A. (2016). Seismic Behavior and Design of the Linked Column Steel Frame System for Rapid Return to Occupancy. <https://doi.org/10.15760/etd.3007>
- 8-Lopes, A., Dusicka, P., & Berman, J. (2014). Linked column frame steel system performance validation using hybrid simulation. *Proc. of Tenth US National Conference on Earthquake Engineering, Anchorage, Alaska*.
- 9-Malakoutian, M., Berman, J. W., & Dusicka, P. (2013). Seismic response evaluation of the linked column frame system. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 42(6), 795–814.  
<https://doi.org/10.1002/eqe.2245>
- 10-Malakoutian, M., Berman, J. W., Dusicka, P., & Lopes, A. (2016). Quantification of Linked Column Frame Seismic Performance Factors for Use in Seismic Design. *Journal of Earthquake Engineering*, 20(4), 535–558. <https://doi.org/10.1080/13632469.2015.1104750>
- 11-Montuori, R., Nastro, E., Piluso, V., & Pisapia, A. (2023). Design procedure for failure mode control of linked column frames. *Engineering Structures*, 296. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116937>
- 12-Nader, M., Manzanarez, R., & Maroney, B. (n.d.). SEISMIC DESIGN STRATEGY OF THE NEW EAST BAY BRIDGE SUSPENSION SPAN.
- 13-Peter Dusicka, & Robert Iwai. (2007). Development of Linked Column Frame System for Seismic Lateral Loads.
- 14-Shoeibi, S., Gholhaki, M., & Kafi, M. A. (2019). Simplified force-based seismic design procedure for linked column frame system. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 121, 87–101.  
<https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.03.003>
- 15-Shoeibi, S., Kafi, M. A., & Gholhaki, M. (2017). New performance-based seismic design method for structures with structural fuse system. *Engineering Structures*, 132, 745–760.  
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.12.002>
- 16-Shoeibi, S., Kafi, M. A., & Gholhaki, M. (2018). Performance-based seismic design and parametric assessment of linked column frame system. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 62(3).  
<https://doi.org/10.3311/PPci.10920>
- 17-Tazarv, J., & Mohebkah, A. (2021a). Direct displacement-based design of the linked column steel frame System, Part 1: Modeling and yield drift evaluation. *Structures*, 31, 341–356.  
<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.01.076>
- 18-Tazarv, J., & Mohebkah, A. (2021b). Direct displacement-based design of the linked column steel frame system, Part 2: Development and verification. *Structures*, 31, 29–48.  
<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.01.075>