

بررسی عملکرد دیوار برشی گهواره‌ای با قاب مهاربندی واگرا مجهز به لینک قائم برشی به

روش طراحی بر اساس نیرو

مهرداد درج^۱، محمد غلامی^{۲*}، امیرحسین پرویزی^۳

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران - m.dorj@sutech.ac.ir

۲- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران (نویسنده مسئول) - m.gholami@yu.ac.ir

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد، واحد شهر قدس، تهران، ایران - omidparvizi@qodsiau.ac.ir

چکیده

در این پژوهش، یک سیستم ترکیبی شامل دیوار برشی گهواره‌ای و قاب مهاربندی واگرا با لینک قائم برشی به‌عنوان یک گزینه نوین باربر جانبی پیشنهاد و بررسی شده است. هدف، ارزیابی نحوه توزیع نیروی طراحی بین دو سیستم و تعیین سهم هر یک از برش پایه کل در ساختمان‌های ۱۰ طبقه است. جهت مشخص شدن تاثیر پارامتر توزیع نیرو طراحی در مدل‌ها، چهار مدل با درصدهای مختلفی از توزیع نیرو بین دهانه‌های بابر جانبی سیستم مدلسازی شده است. همچنین جهت مشخص نمودن میزان حساسیت رفتار نمونه‌ها به میزان کابل مورد استفاده در مدل‌ها، چهار مدل با مساحت‌های متفاوت سطح مقطع کابل در عین ثابت ماندن سایر مشخصات مدل‌ها، مورد بررسی و با مدلی که قاب مهاربندی واگرا برای ۱۰۰٪ نیرو طراحی شده، مقایسه شده‌اند. روش طراحی برای سیستم پیشنهادی، روش نیرویی در نظر گرفته شده است. نتایج نشان داد با افزایش سهم دیوار برشی گهواره‌ای (۱۰٪ تا ۴۰٪)، بازگشت‌پذیری سیستم بهبود یافته ولی استهلاك انرژی کاهش می‌یابد. همچنین، افزایش سطح مقطع کابل از ۳۰٪ به ۱۰۲۰٪ باعث افزایش سختی پس از تسلیم و ظرفیت نهایی شد، اما تاثیر قابل توجهی بر بازگشت‌پذیری یا مرکزگرایی نداشت. نوآوری این تحقیق، معرفی سیستمی ترکیبی با قابلیت همزمان اتلاف انرژی و برگشت‌پذیری لرزه‌ای است که می‌تواند به‌عنوان راهکاری کارآمد در طراحی لرزه‌ای ساختمان‌ها مطرح شود.

کلمات کلیدی

قاب مهاربندی واگرا، لینک قائم برشی، دیوار برشی گهواره‌ای، برگشت‌پذیری، طراحی بر اساس نیرو.

با توجه به اینکه ساختمان‌های موجود در کشور بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ ساختمان و به منظور تأمین سطح عملکرد ایمنی جانی^۱ تحت زلزله طرح ساخته می‌شوند، این ساختمان‌ها پس از زلزله طرح و حتی زلزله‌های با سطح پایین‌تر نیز معمولاً دچار خسارت و تخریب می‌شوند. لذا استفاده مجدد از این سازه‌ها با توجه به گستردگی خسارت و میزان هزینه ترمیم، عملاً کاری دشوار و مقرون به صرفه نیست. این موضوع سبب ظهور ایده‌های جدیدی توسط محققین به منظور هدایت خسارت به نقاط مشخصی از سازه شد تا بتوانند تنها با تعویض المان‌های آسیب‌دیده، با سرعت بیشتری از ساختمان‌ها بهره‌برداری نمایند [۱-۳]. از طرفی در ساختمان‌ها هنگامی که لنگر واژگونی ناشی از نیروهای جانبی زلزله از لنگر مقاوم ناشی از بارهای ثقلی بیشتر می‌شود، موجب وقوع حرکت گهواره‌ای در سازه و المان‌های باربر موجود در سیستم سازه‌ای ساختمان شده که این وضعیت تا زمانی که لنگر واژگونی از لنگر ناشی از بار ثقلی کمتر شود ادامه می‌یابد و جابجایی پسماند نیز در ساختمان نیز باقی می‌ماند. بنابراین محققین نیز برای جلوگیری از این وضعیت در ساختمان، استفاده از ایده حرکت گهواره‌ای دیوار برشی دارای کابل‌های پیش تنیده را به عنوان روشی برای کاهش عملکرد غیرخطی محتمل در انواع سازه و برگشت‌پذیری آن، به عنوان یک روش بهینه مورد توجه قرار دادند [۴]. در کنار استفاده از روش گهواره‌ای، با توجه به اینکه خود سیستم‌های مهاربندهای همگرا و واگرا هر کدام به نوبه خود دارای مزایایی می‌باشند، استفاده از آن‌ها پیشنهاد می‌شود.

اولین تحقیقات در مورد قاب مهاربندی واگرا با تیر پیوند قائم^۲ (V-EBF) توسط سیکو و همکاران در سال ۱۹۸۸ صورت گرفت که در یک قاب دوطبقه یک دهانه از این سیستم استفاده کردند. منحنی‌های هیستریزیس پایدار و متقارن حاصل از نتایج آزمایشگاهی آنها نشان دهنده قابلیت خوب این سیستم در استهلاک انرژی می‌باشد [۵]. بعد از آن واکابایاشی با مقایسه رفتار V-EBF و سیستم مهاربندی شورن معکوس^۳ به صورت تئوری نشان داد که سیستم V-EBF دارای پایداری و رفتار مناسب تری است [۶]. بر اساس نتایج تحلیلی غیرخطی انجام شده توسط دوسیکا و همکاران که براساس دستورالعمل استانداردهای لرزه ای AISC صورت پذیرفت، مشخص شد که ظرفیت برشی نهایی با مقادیر آزمایشگاهی مطابقت خوبی داشته و جان آنها در برش جاری می‌شود [۷]. زهرائی و همکاران با بررسی آزمایشگاهی و تئوری پنج نمونه از قابهای V-EBF یک طبقه و یک دهانه دریافتند که منحنی‌های هیستریزیس نمونه‌ها نشان دهنده عملکرد رضایت بخش این سیستم در جذب و استهلاک انرژی اعمال شده به سازه است و استفاده نکردن از سخت کننده تا پیش از کماتش جان تیر پیوند قائم تأثیری در رفتار نمونه ندارد ولی پس از آن به سرعت دچار افت مقاومت می‌شود. همچنین در تمامی نمونه‌ها ضریب رفتار بین ۷/۱۵ تا ۱۰/۶۵ به دست آمد که از مقدار ۷ که توسط آیین نامه طراحی لرزه‌ای ایران (استاندارد ۲۸۰۰) تعیین شده، بیشتر می‌باشد [۸، ۹]. خزائی و ناطقی الهی [۱۰] با ترکیب مهاربند همگرا با یک پانل فولادی برشی که در محل تقاطع مهاربندها به بررسی تئوری و آزمایشگاهی رفتار لرزه‌ای آن پرداختند. از مزایای مهم این سیستم، محدود شدن آسیب‌ها در میراگر به جای اعضاء اصلی و راحتی تعویض آن پس از زلزله می‌باشد. نکته اصلی در طراحی این سیستم این است که به خاطر اینکه پانل برشی بدون کماتش مهاربندها وارد ناحیه غیرخطی شود باید ظرفیت کماتش مهاربند سیستم بیشتر از ظرفیت پانل فولادی باشد. شایان‌فر و همکاران [۱۱] در سال ۲۰۱۲ به مطالعه رفتار قاب‌های واگرا با لینک قائم با استفاده از روش طراحی پلاستیک مبتنی بر عملکرد پرداختند و به این نتیجه رسیدند که مفاصل پلاستیک، جابه‌جایی درونی و چرخش پلاستیک تیرهای پیوند به طور یکنواختی در ارتفاع قاب توزیع می‌شوند. و تر و همکاران به مطالعه رفتار غیرخطی V-EBF پرداختند که نتایج همگرایی خوب از مدل تحلیلی ارائه شده با نتایج تجربی را نشان داد [۱]. لیان و مینگزو [۱۲] به مطالعه عملکرد لرزه‌ای V-EBF پرداختند. نتایج آنان نشان می‌دهد که نمونه‌ی یک دهانه و یک طبقه دارای سختی جانبی، شکل‌پذیری و قابلیت اتلاف انرژی قابل اطمینانی می‌باشد. یک بررسی تجربی قاب‌های مهاربندی واگرا مجهز به لینک قائم، نشان داد که استفاده از لینک‌های قائم ساخته شده از فولاد با نقطه تسلیم پایین، سبب می‌گردد تا لینک قائم قبل از شکست به حداکثر ظرفیت پیچشی خود برسد [۱۳، ۱۴].

طی بررسی عملکرد لرزه‌ای قاب‌های بتن آرمه با حرکت گهواره‌ای کنترل شده به واسطه سیستم‌های برگشت‌پذیری فولادی، مشخص گردید که قاب‌های بتن مسلح گهواره‌ای نسبت به قاب معمولی اثرات زلزله بر روی سازه را با تضعیف سختی کلی، کاهش می‌دهد و به

1 Life Safety

2 Eccentrically Braced Frame with Vertical Link

3 Inverted Chevron-V braced frames

موجب آن، برش داخل طبقه به طرز قابل توجهی نیز کاهش می‌یابد. همچنین مشخص گردید که پاسخ هیستریزیس نمونه‌ها پرچمی شکل شده و مرکزگرایی بطور عالی انجام شده است [۱۵-۱۷]. ماریوت و همکاران در سال ۲۰۰۷ امکان استفاده از سیستم گهواره‌ای و کابل‌های پیش‌تنیده را در جهت بهسازی لرزه‌ای سازه مورد مطالعه و بررسی قرار دادند. همچنین آن‌ها در سال ۲۰۰۸ پس از انجام آزمایشاتی روی مدل مقیاس شده‌ای که مجهز به سیستم میراگرهای طرفین دیوار بود، کارایی و بهبود عملکرد لرزه‌ای سازه‌های موجود را نشان دادند [۴]. کی‌یو و همکاران در سال ۲۰۱۰ با انجام تحقیقات عددی به این نتیجه رسیدند که حداکثر جابه‌جایی در سازه‌های دارای دیوارهای گهواره‌ای، قابل کنترل بوده و سبب محدود شدن آسیب وارده بر سازه می‌شود. آن‌ها همچنین در سال ۲۰۱۲ کارایی این سیستم را در بهبود عملکرد یک ساختمان یازده طبقه با طبقه نرم به اثبات رساندند [۱۸]. لی‌یو و همکاران در سال ۲۰۱۷ عملکرد لرزه‌ای قاب بتن آرمه با حرکت گهواره‌ای کنترل شده را مورد بررسی قرار دادند، تحقیقات آنان نشان داد که قاب بتن مسلح گهواره‌ای نسبت به قاب معمولی اثرات زلزله بر روی سازه را با تضعیف سختی کلی، کاهش می‌دهد. علاوه بر این، به موجب آن، برش داخل طبقه به طرز قابل توجهی نیز کاهش می‌یابد [۱۹]. خان‌محمدی و حیدری به بررسی بهبود رفتار لرزه‌ای ساختمان‌های دیوار برشی بتن مسلح با استفاده از سیستم‌های گهواره‌ای چندگانه در سال ۲۰۱۵ پرداختند. آن‌ها دریافتند که همه ساختمان‌های با ارتفاع مختلف و سیستم گهواره‌ای متفاوت در هر دو سطوح زلزله، مبنای طراحی حداکثر زلزله محتمل از دریافت‌های ماندگار ناچیزی برخوردار می‌باشند [۲۰]. امیرذهنی و همکاران در سال ۲۰۱۶ رفتار لرزه‌ای قاب‌های مهاربندی فولادی با عملکرد گهواره‌ای مجهز به میراگرهای استهلاک انرژی را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که با توجه به این که وقوع تغییر شکل‌های پلاستیک می‌تواند پایداری کلی سازه را به خطر بیندازد می‌توان با بکارگیری کابل‌های پس‌تنیده به عنوان کلیدی‌ترین عضو سازه‌ای در ایجاد قابلیت مرکزگرایی سیستم، میزان این تغییر شکل‌ها ماندگار را کاهش داد [۲۱].

محققان جهت استفاده از مزایای سیستم‌های استهلاک انرژی و سیستم‌های برگشت‌پذیری بطور همزمان در سازه‌ها، ترکیب هر دو سیستم را پیشنهاد دادند. کلاتون و همکاران مطالعاتی را پیرامون سیستم دیوار برشی فولادی خود مرکز (SC-SPSW) با هدف استفاده از مزایای قاب‌های فولادی پس‌تنیده خود محور و با استحکام و شکل‌پذیری دیوارهای برشی ورق فولادی بصورت عددی و آزمایشگاهی انجام دادند. شبیه‌سازی‌های عددی نشان داد که نتایج آزمایشگاهی با نتایج عددی مطابق خوبی دارد. علاوه بر این، نشان داد که سیستم آنان در عین استهلاک انرژی زیاد، برگشت‌پذیری مناسبی نیز دارد و عملکرد لرزه‌ای این سیستم جهت استفاده در سازه‌ها مناسب است [۲۲، ۲۳]. اولین آزمایشات میز لرزه‌ای بر روی سیستم لرزه‌ای SC-SPSW توسط دودن و همکاران در سال ۲۰۱۶ انجام شد. آنان دو قاب سه طبقه با اتصالات متفاوت را تحت رکوردهای زلزله قرار دادند و به نتیجه رسیدند که در هر دو قاب، برگشت‌پذیری قاب‌ها بطور مناسبی انجام می‌گیرد. همچنین پس از بارگذاری، نتایج نشان داد که خرابی‌ها به دیوار برشی فولادی محدود می‌گردد [۲۴]. کی و همکاران در سال ۲۰۲۱ نیز طی تحقیقی، قاب‌های بتنی خود مرکز مجهز به کابل‌های پس‌تنیده را بصورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان می‌دهد که پیش‌تنیدگی اولیه رشته‌های کابل باعث بهبود عملکرد بتن برای ظرفیت‌های باربری می‌گردد و برای کاهش تغییر شکل‌های پسماند مفید واقع می‌گردد. همچنین دریافتند که افزایش عرض مقطع تیر در این سیستم، شکل‌پذیری را بهبود می‌بخشد [۲۵]. در سیستم قاب‌های واگرا با لینک قائم، هرچند محدودیت‌های معماری جهت ایجاد بازشو کمتر می‌شود و آسیب‌های ناشی از بارگذاری جانبی در لینک قائم متمرکز می‌شود؛ اما پس از بارگذاری جانبی، قاب واگرا دچار تغییر شکل پسماند قابل توجه‌ای قرار می‌گیرد [۲۶].

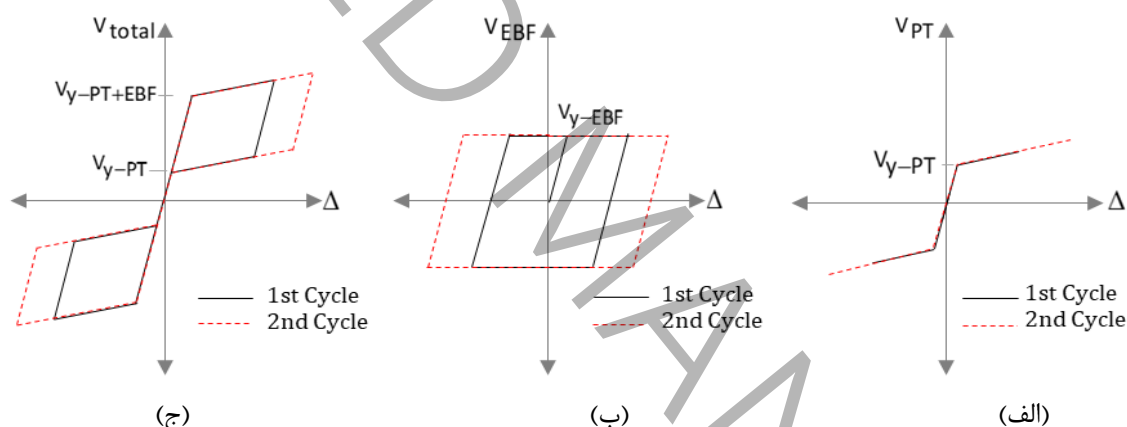
در سیستم‌های قاب‌های خمشی پس‌تنیده برای تأمین امکان جابجایی کابل‌های پس‌تنیده، به اتصالات مفصلی با سوراخ لوبیایی نیاز است که تنها با یک پیچ مرکزی قابل اجرا هستند. این موضوع باعث بروز مشکلاتی از جمله تمرکز تنش در محل اتصال، کاهش ظرفیت باربری و محدودیت‌های جدی اجرایی، به‌ویژه در دهانه‌های باربر بزرگ و ساختمان‌های با اهمیت ویژه می‌شود. از این رو، دیوارهای گهواره‌ای گزینه مناسب‌تری برای تحقق سازه‌های مرکزگرا به شمار می‌آیند. از طرفی قابل توجه است که در سیستم قاب‌های واگرا با لینک قائم، هرچند محدودیت‌های معماری جهت ایجاد بازشو کمتر می‌شود و آسیب‌های ناشی از بارگذاری جانبی در لینک قائم متمرکز می‌شود؛ اما پس از بارگذاری جانبی، قاب مهاربندی واگرا دچار تغییر شکل پسماند قابل توجه‌ای قرار می‌گیرد. بر این اساس، در این پژوهش برای نخستین بار رفتار ترکیبی قاب مهاربندی واگرا و دیوار گهواره‌ای خودمرکز تحت بارگذاری چرخه‌ای و شرایط مختلف توزیع

¹ Self-Centering Steel Plate Shear Wall

برش پایه مورد مطالعه قرار گرفته است. در این مطالعه، یک دهانه سیستم برگشت پذیر دیوار گهواره ای فولادی مجهز به کابل های پس تنیده، با استفاده از تیرهای رابط به دهانه قاب و اگر اضافه گردید تا در هنگام بارگذاری، دهانه مهاربندی و اگر مجهز به لینک قائم استهلاک انرژی قاب را انجام دهد و دیوار گهواره ای فولادی مجهز به کابل نیز سبب برگشت پذیری یا مرکزگرایی قاب گردد و در نهایت مزایا و معایب سیستم پیشنهادی مشخص گردد.

۲- معرفی مکانیزم رفتاری سیستم پیشنهادی

مکانیزم رفتاری سیستم پیشنهادی^۱ (EBF-RCSW) به این صورت می باشد که استهلاک انرژی سیستم به واسطه قاب مهاربندی و اگر مجهز به لینک برشی قائم می باشد و ایجاد عملکرد برگشت پذیری سیستم به عهده دیوار برشی فولادی گهواره ای مجهز به کابل های پس تنیده است. در شکل (۱) رفتار نیرو- جابجایی سیستم پیشنهادی ترکیبی و هر یک از سیستم های قاب مهاربندی و دیوار برشی گهواره ای بصورت مجزا ارائه شده است، V_{y-PT} میزان برش پایه دیوار گهواره ای، V_{y-EBF} میزان برش پایه قاب مهاربندی و اگر $V_{y-PT+EBF}$ برش پایه کل سیستم ترکیبی پیشنهادی EBF-RCSW می باشد. ضریب α نسبتی از سختی ثانویه به سختی اولیه می باشد همچنین ضریب β نشان دهنده میزان برگشت پذیری سیستم می باشد. ضرایب مذکور در روابط (۱) و (۲) ارائه شده اند. برای وضوح بیشتر اجزای سیستم پیشنهادی، در شکل (۲) شماتیک کلی سیستم شامل قاب مهاربندی و اگر، دیوار برشی گهواره ای، کابل های پس تنیده و لینک قائم نشان داده شده است.



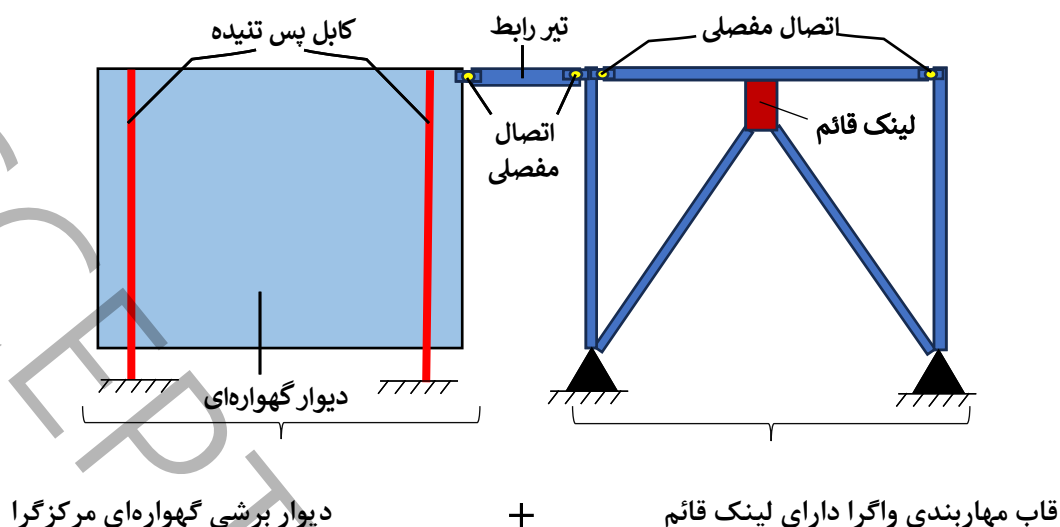
شکل ۱. نمودار شماتیک نیرو-جابجایی: (الف) دیوار برشی گهواره ای مرکزگرا، (ب) قاب مهاربندی مجهز به لینک برشی قائم، و (ج) سیستم ترکیبی پیشنهادی EBF-RCS.

Fig. 1. Schematic force-displacement diagram. (a) Self-centering rocking shear wall, (b) Braced frame equipped with a vertical shear link, and (c) Proposed combined EBF-RCS system

$$\alpha = \frac{K_{\text{Secondary}}}{K_{\text{Initial}}} \quad (1)$$

$$\beta = \frac{2V_d}{V_{Py} + V_d} \quad (2)$$

¹ Eccentrically Braced Frame with Rocking Concrete Shear Wall



شکل ۲. شکل شماتیک سیستم پیشنهادی ترکیب قاب مهاربندی واگرا و دیوار برشی گهواره‌ای مرکزگرا.
Fig. 2. Schematic view of the proposed system combining an eccentrically braced frame and a self-centering rocking shear wall.

۳- اعتبار سنجی

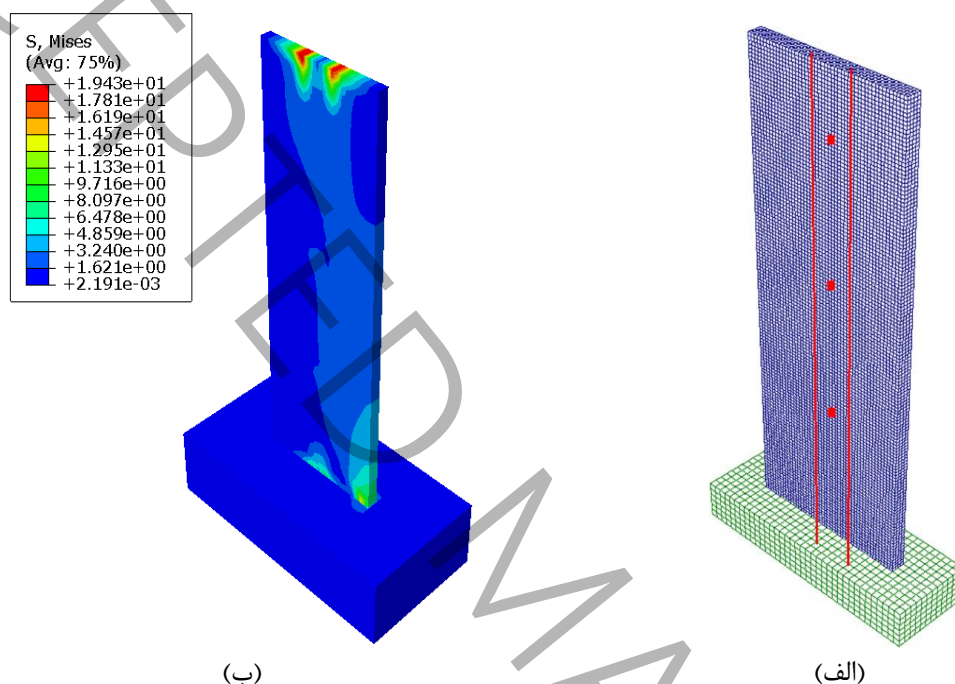
در این تحقیق جهت اعتبارسنجی سیستم پیشنهادی، مدل آزمایشگاهی ارائه شده توسط قریشی و همکاران [۲۷] با استفاده از نرم افزار آباکوس مدل‌سازی گردید. سیستم مورد آزمایش آنان، یک سیستم دیوار برشی گهواره‌ای متشکل از یک دیوار، دو کابل پس کشیده و همچنین یک میلگرد متصل کننده دیوار به فنداسیون مطابق شکل (۳-الف) می‌باشد که تحت یک رکورد زلزله با تحلیل تاریخیچه زمانی قرار گرفته است.

برای مدل‌سازی نمونه اعتبار سنجی از المان‌های مختلفی استفاده شده است، به طوری که در مدل‌سازی دیوار برشی گهواره‌ای جهت ساخت صفحه فولادی صلب از المان Shell چهار گره‌ای (S4R) و جهت ساخت کابل‌های پیش‌تنیده از المان Wire از نوع Truss دو گره‌ای سه بعدی (T3D2) دو بعدی استفاده شده است. حلگر مورد استفاده برای اعمال پیش‌تنیدگی به کابل‌ها و اعمال بار جانبی چرخه‌ای به مدل‌ها از نوع Dynamic Implicit و در دو گام (Step) که در گام اول اعمال حرارت و در گام دوم اعمال بارگذاری دینامیکی در نظر گرفته شده است.

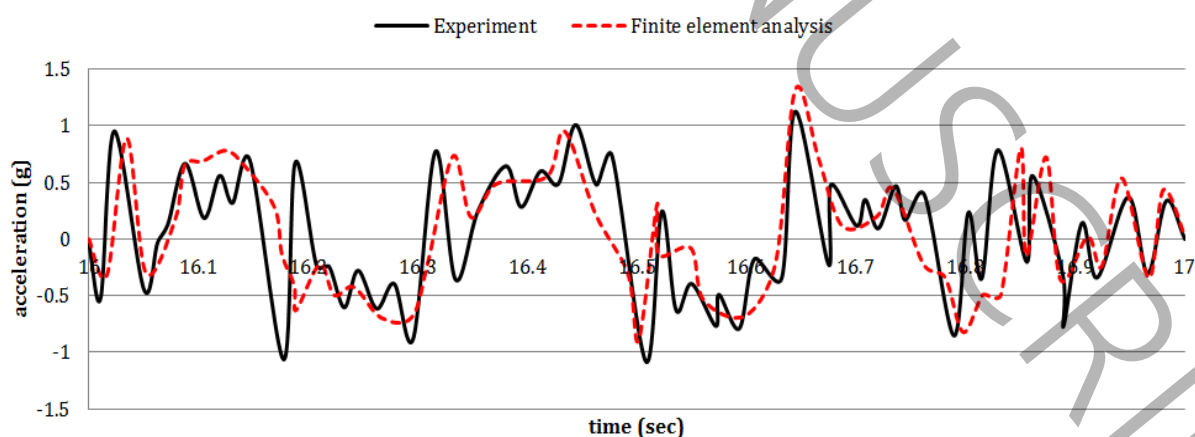
اعتبارسنجی مدل اجزای محدود با استفاده از نتایج آزمایشگاهی موجود تحت بارگذاری دینامیکی تاریخیچه زمانی انجام شد. گرچه تمرکز پژوهش حاضر بر بارگذاری چرخه‌ای است، باید توجه داشت که مکانیزم‌های اصلی خرابی در هر دو نوع بارگذاری مشابه هستند. همچنین یک تحلیل دینامیکی را می‌توان به صورت مجموعه‌ای از تحلیل‌های استاتیکی در گام‌های زمانی کوتاه در نظر گرفت؛ بنابراین انطباق مدل با نتایج دینامیکی، دقت آن در تحلیل‌های چرخه‌ای را نیز پشتیبانی می‌کند.

پس از مدل‌سازی و تحلیل مدل اجزا محدودی، مطابق شکل (۳-ب) مشخص گردید که بیشتر توزیع تنش در بالای دیوار برشی و در محل مهار کابل‌ها به دیوار است. همچنین توزیع تنش‌ها نشان می‌دهد که در پایین دیوار، محل پنجه فشاری نیز تنش زیادی وجود دارد و پس از زلزله دو محل مذکور محتمل‌ترین قسمت‌ها جهت شکست می‌باشند. در شکل (۴)، منحنی شتاب-زمان حاصل از نرم افزار آزمایش می‌باشد که نشان دهنده پوشش مناسب نمودار مدل آزمایشگاهی توسط نمودار مدل عددی در زمان‌های مختلف بارگذاری است. با توجه به شکل (۴)، مشخص است که تطابق خوبی بین نتایج آزمایش و تحلیل اجزاء محدود وجود دارد و نرم افزار آباکوس می‌تواند ظرفیت مدل‌سازی صحیح این سیستم و سیستم‌های مشابه را داشته باشد. همچنین نتایج نشان داد که حداکثر خطای نسبی بین قله‌های پاسخ نمودار آزمایشگاهی و نمودار عددی کمتر از ۴٪ می‌باشد. این مقادیر بیانگر دقت بالای مدل عددی در بازتولید رفتار آزمایشگاهی می‌باشد.

در فرآیند استخراج داده‌های شتاب از مدل عددی، به منظور حذف نویزهای عددی و ارتقای دقت نتایج، از یک فیلتر پایین‌گذر Butterworth مرتبه چهارم استفاده شد. با توجه به آنکه دوره تناوب اصلی قاب ۱۰ طبقه مورد مطالعه حدود ۱,۰۸ ثانیه است (معادل فرکانس اصلی حدود ۰,۹ هرتز)، بازه فرکانسی مؤثر سیستم کمتر از ۲۰ هرتز در نظر گرفته شد. بر این اساس، مقدار فرکانس برشی (cut-off frequency) برابر با ۲۰ هرتز انتخاب گردید تا مؤلفه‌های واقعی پاسخ در بازه فرکانسی سازه حفظ شده و اثر نویزهای عددی با فرکانس بالا حذف شود. اعمال این فیلتر موجب افزایش همخوانی بین نتایج عددی و داده‌های آزمایشگاهی و بهبود کیفیت منحنی‌های شتاب به دست آمده گردید.



شکل ۳. (الف) مدلسازی دیوار برشی گهواره‌ای و (ب) نحوه توزیع تنش در مدل اجزا محدودی دیوار برشی گهواره‌ای.
Fig. 3. (a) Modeling of the self-centering rocking shear wall, and (b) Stress distribution in the finite element model of the self-centering rocking shear wall.



شکل ۴. مقایسه شتاب حاصل از آزمایش و تحلیل اجزاء محدود [۲۷].
Fig. 4. Comparison of acceleration obtained from the experiment and finite element analysis [27].

۴- روش طراحی

۴-۱- بدست آوردن برش پایه به روش طراحی بر اساس نیرو برای مجموعه قاب پیشنهادی

روش طراحی در این پژوهش برای سیستم‌های مورد بررسی، روش طراحی نیرویی در نظر گرفته شده است که در این مورد، برش پایه، نیروی طراحی هر طبقه و ضریب توزیع نیروی برش پایه مطابق استاندارد زلزله ایران (استاندارد ۲۸۰۰) و مطابق زیر بدست می‌آید.

$$V_i = \frac{S_a}{RW_{Total}} \quad (3)$$

که در این رابطه S_a شتاب طیفی می‌باشد که با استفاده از نمودار طیف شتاب استاندارد بعد از محاسبه زمان تناوب T به دست می‌آید، همچنین R ضریب رفتار و W_{Total} وزن کل سازه می‌باشد. برای توزیع برش پایه در طبقات از رابطه (۵) استفاده می‌شود.

$$F_i = C_i V \quad (4)$$

$$F_i = \frac{W_i h_i^K}{\sum_{j=1}^n W_j h_j^K} \quad (5)$$

C_i نیز ضریب توزیع نیروی جانبی طبقات و K ضریب اثر حرکت شلاقی می‌باشد.

$$T = 1.4 \times 0.0488 \times H^{0.75} \quad (6)$$

T زمان تناوب و H ارتفاع کل سازه می‌باشد.

برش پایه قاب‌های ۱۰ طبقه مورد بررسی در این پژوهش، مشخصات و میزان برش پایه کل برای آن‌ها در جدول (۱) محاسبه و بدست آمده است.

جدول ۱. مشخصات مدل ۱۰ طبقه جهت محاسبه برش پایه.

Table 1. Specifications of the 10-story model used for calculating the base shear.

پارامترها	واحد	مدل ۱۰ طبقه
وزن لرزه ای هر طبقه	Ton	۲۶۳
ارتفاع هر طبقه	m	۳/۹۶
زمن تناوب (T)	Sec	۱/۰۸
ضریب رفتار (R)	-	۷
سختی (K)	Ton/m	۱/۲۹
شتاب (S_a)	m/s ²	۰/۷۷۸
برش پایه (V)	Ton	۱۴۶/۱۱

میزان سهم برش پایه هر یک از قاب‌های سیستم پیشنهادی از برش پایه کل متناسب با سختی آن قاب بدست می‌آید و مطابق با رابطه (۵) که قبلاً ذکر شده است، توزیع نیروی بین طبقات هر یک از این قاب‌ها انجام می‌گردد. طراحی قاب مهاربندی واگرا مانند طراحی سازه‌های فولادی مرسوم از طراحی ظرفیتی و بر اساس ظرفیت نهایی لینک قائم (المان فیوز قاب مهاربندی واگرا) انجام شده ولی طراحی دیوار گهواره‌ای مرکزگرا مقداری پیچیده‌تر می‌باشد که در ادامه نحوه طراحی آن شرح داده شده است.

۴-۲- طراحی دیوار گهواره‌ای مرکزگرا و محاسبه مقدار نیروی پس‌تنیدگی لازم برای کابل (T_0) و مقدار دما (ΔT)

جهت ایجاد مکانیزم برگشت‌پذیری برای سیستم پیشنهادی، کابل‌ها باید پس‌تنیده شوند تا یک لنگر مقاوم در سیستم دیوار برشی ایجاد نمایند. پس برای بدست آوردن مقدار نیروی پیش‌تنیدگی مورد نیاز، مقادیر لنگر مقاوم و محرک را برابر هم قرار داده تا رابطه (۷) به دست آید و در نتیجه رابطه (۸) که همان مقدار نیروی پس‌تنیدگی (T_0) است حاصل شود.

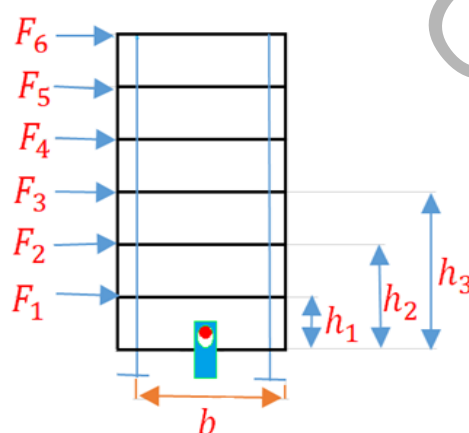
$$F_h = T_0 b \quad (7)$$

$$T_0 = \frac{F_h}{b} \quad (8)$$

در این رابطه، b همان اندازه دهانه دیوار برشی گهواره‌ای منهای فاصله کابل پیش‌تنیده از بر دیوار از دو طرف می‌باشد. رابطه مقدار لنگر محرک ($M_{\text{overturning}}$) برابر مجموع حاصل ضرب نیروهای هر طبقه در ارتفاع آن طبقه از تراز پایه که بر اساس رابطه (۹) محاسبه می‌گردد و جزئیات آن مطابق شکل (۵) می‌باشد.

$$M_{\text{overturning}} = \sum_{i=1}^4 F_i \times h_i \quad (9)$$

که در این رابطه F_i نیروی هر طبقه و h_i ارتفاع تراز پایه برای هر طبقه می‌باشد. منظور از نیروی هر طبقه در این بخش از طراحی، همان نیروی است که از سهم برش پایه مربوط به دهانه دیوار گهواره‌ای مرکزگرا بین طبقات توزیع می‌شود و سهم دهانه دیوار برشی (سیستم برگشت‌پذیر) به نسبت سختی آن دهانه بدست می‌آید که طراح سازه متناسب با برگشت‌پذیری مورد نیاز می‌تواند مقدار این سختی را با کاهش یا افزایش میزان نیروی پس‌تنیدگی اولیه تغییر دهد.



شکل ۵. نحوه توزیع نیرو در هر طبقه متناسب با تراز ارتفاعی آن طبقه از سطح مبنا.

Fig. 5. Method of distributing the force on each story proportional to that story's elevation from the base level.

پس برای ایجاد حرکت گهواره‌ای دیوار برشی، باید لنگر محرک ($M_{\text{overturning}}$) از لنگر مقاوم ($M_R = T_0 * b$) بیشتر گردد تا بازشدگی بین تکیه گاه (فونداسیون) و دیوار ایجاد گردد و فشار بر روی پنجه فشاری ایجاد گردد. از آنجایی که نیروی پس‌تنیدگی در نرم افزار بواسطه ایجاد حرارت در کابل‌ها اعمال می‌شود، لازم است که رابطه بین دمای مورد نیاز و پس‌تنیدگی مورد نیاز را بدست آوریم. میزان تغییر دمای مورد نیاز جهت پس‌تنیده نمودن کابل‌ها در نرم افزار، طبق رابطه (۱۰) بدست می‌آید. که در این رابطه، E ضریب الاستیسیته کابل، A مساحت کابل و α ضریب انبساط حرارتی است.

$$\Delta_T = \frac{T_0}{EA\alpha} \quad (10)$$

۵- مشخصات مدل‌های مورد مطالعه

در این تحقیق جهت مدل‌سازی کابل‌های پیش‌تنیده، از فولاد A416 Grade 270 استفاده شده است. همچنین برای مدل‌سازی دیوار برشی گهواره‌ای فولادی و قاب مهاربندی واگرا با لینک قائم که شامل تیرها، ستون‌ها، لینک‌های قائم و مهاربندها می‌باشد، از فولاد A992 استفاده شده است. مشخصات مکانیکی المان‌های مذکور جدول (۲) ارائه شده است. در فرایند مدل‌سازی عددی، برای ساده‌سازی و تمرکز بر رفتار اصلی سیستم، چند فرض کلیدی در نظر گرفته شد؛ از جمله اینکه رفتار فولاد مصرفی بصورت دو خطی و با پلاستیک‌شدگی از نوع کینماتیک در نظر گرفته شده و اثر باوشینگ برای مشخصات مکانیکی المان‌ها نیز لحاظ شده است. اتصالات تیر و ستون به صورت مفصلی و ناحیه اتصال دیوار گهواره‌ای به فونداسیون به صورت تماس لغزشی و فشاری در نظر گرفته شد. همچنین اثرات سه‌بعدی ثانویه نظیر پیچش نادیده گرفته شد. لازم به ذکر است که نتایج این پژوهش به شرایط بارگذاری چرخه‌ای شبه‌استاتیکی محدود است و تعمیم آن‌ها به بارهای دینامیکی تصادفی یا سایر پیکربندی‌های هندسی نیازمند بررسی‌های تکمیلی خواهد بود.

جدول ۲. مشخصات مکانیکی المان‌های مورد استفاده در قاب‌ها و دیوارها

Table 2. Mechanical properties of the elements used in the frames and walls.

ویژگی‌های مکانیکی فولاد A416		ویژگی‌های مکانیکی فولاد A992	
چگالی ($\frac{N}{mm^3}$)	7.69×10^{-5}	چگالی ($\frac{N}{mm^3}$)	7.69×10^{-5}
مدول الاستیسیته	1.96×10^5	مدول الاستیسیته	1.99×10^5
ضریب پواسون	۰/۳۰	ضریب پواسون	۰/۳۰
تنش تسلیم (MPa)	۱۶۸۹/۹۰	تنش تسلیم (MPa)	۳۴۴/۷۳
تنش نهایی (MPa)	۱۸۶۱/۵۸	تنش نهایی (MPa)	۴۴۸/۱۵
ضریب انبساط حرارتی	1.17×10^{-5}		

در این مطالعه عملکرد دیوار برشی گهواره‌ای به همراه قاب مهاربندی واگرا با لینک قائم هشت نمونه ۱۰ طبقه مورد بررسی قرار گرفته است. جهت تسریع در نوشتار قاب مهاربندی واگرا با لینک قائم با نام Brace x% و دیوار برشی گهواره‌ای با نام Rocking بیان شده و مقادیر X و Y درصد نیروی اعمالی می‌باشند، همچنین درصد مساحت کابل (A_c) با Brace x% & Rocking

Cable z - y% نام گذاری شده‌اند که در آن Z درصد میزان افزایش کابل می‌باشد. در چهار نمونه اول آن کابل‌ها ثابت ولی نیروهای متفاوتی به سازه اعمال می‌گردد، نیروهای قاب مهاربندی واگرا (Brace x%) به ترتیب ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد نیروی کل و متناظر با آن در دیوار برشی گهواره‌ای (Rocking y%) به ترتیب ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد نیروی کل جهت طراحی می‌باشند. در چهار نمونه دوم Cable z - Brace n% & Rocking m% ، مقدار نیرو ثابت (در قاب مهاربندی ۸۰ درصد نیروی کل و در دیوار برشی ۲۰ درصد نیروی کل) ولی با افزایش مساحت کابل به اندازه ۳۰۰، ۴۰، ۷۸۰ و ۱۰۲۰ درصد مساحت اولیه طراحی صورت گرفته است. در توزیع نیروی طراحی بین قاب مهاربندی واگرا و دیوار برشی گهواره‌ای، سهم کم‌تری برای دیوار برشی در نظر گرفته شده است. دلیل این امر آن است که وظیفه اصلی باربری جانبی و استهلاک انرژی بر عهده قاب مهاربندی واگرا می‌باشد. این قاب‌ها در فرآیند طراحی از سختی بیشتری برخوردار هستند و به همین دلیل در تمامی مدل‌ها سهم بیشتری از برش پایه را متحمل می‌شوند. در مقابل، دیوار برشی گهواره‌ای عمدتاً برای بهبود خاصیت بازگشت‌پذیری و کاهش تغییر مکان‌های پسماند در سیستم در نظر گرفته شده است.

برای مدل‌سازی نمونه‌های مورد مطالعه از المان‌های مختلفی استفاده شده است، به طوری که در مدل‌سازی دیوار برشی گهواره‌ای جهت ساخت صفحه فولادی صلب از المان Shell چهار گره‌ای (S4R) و جهت ساخت کابل‌های پیش‌تنیده از المان Wire از نوع Truss دو گره‌ای سه بعدی (T3D2) دو بعدی استفاده شده است. همچنین در مدل‌سازی قاب مهاربندی واگرا با لینک قائم برای اعضای تیر، ستون و مهاربند از المان Wire از نوع Beam دو گره‌ای (B31) و برای ساخت لینک قائم از المان Shell چهار گره‌ای (S4R) استفاده گردیده است. علاوه بر این، تیر رابط نیز از المان Wire از نوع Truss دو گره‌ای سه بعدی (T3D2) تعریف شده است. حلگر مورد استفاده برای اعمال پیش‌تنیدگی به کابل‌ها و اعمال بار جانبی چرخه‌ای به مدل‌ها از نوع Dynamic Implicit و با روند تحلیلی شبه استاتیکی (Quasi static) در نظر گرفته شده است.

برای انتخاب ابعاد المان‌ها، تحلیل حساسیت به مش انجام شد. نتایج حاصل از سه سطح مش (ریز، متوسط و درشت) نشان داد که اختلاف نتایج بین مش متوسط و ریز کمتر از ۵٪ است، در حالی که مش متوسط زمان محاسباتی کمتری نیاز دارد. بر این اساس، مش متوسط به عنوان گزینه نهایی انتخاب شد. با این حال، به دلیل تفاوت در نوع المان‌ها، مش‌بندی اجزا به صورت تفکیک شده انجام گرفت. لینک قائم که با المان Shell در نظر گرفته شد، به دلیل وقوع تسلیم در هنگام بارگذاری، نیازمند مش ریز (۱ سانتی‌متر) شد. سایر اعضا که با المان Beam مدل شدند، با مش متوسط (۱۰ سانتی‌متر) مش‌بندی شدند. دیوار فولادی صلب نیز به دلیل انتخاب رفتار Rigid برای آن، حساسیت کمی نسبت به مش داشته و برای آن مش درشت‌تر (۲۰ سانتی‌متر) در نظر گرفته شد.

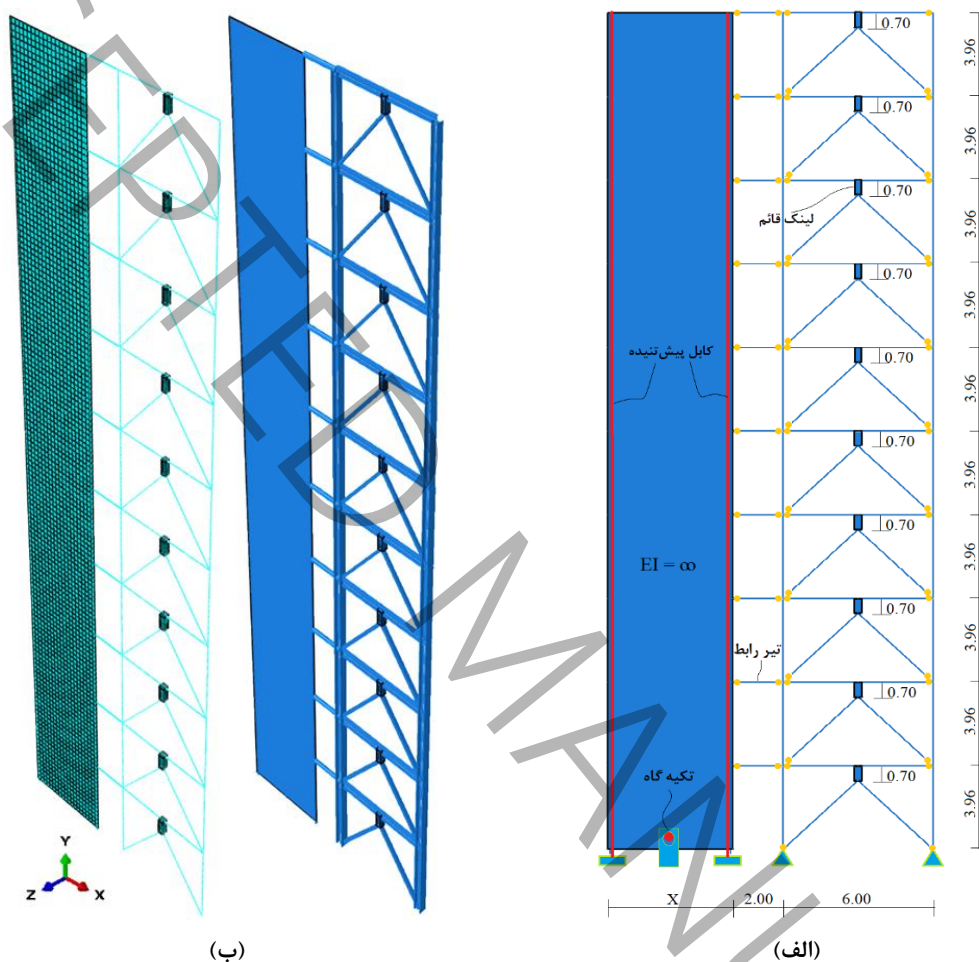
گفتنی است که در نمونه‌های مورد مطالعه در این تحقیق، قاب‌ها دارای ۳ دهانه هستند که قاب سمت راست یک قاب مهاربندی واگرا با لینک قائم که اتصالات لینک قائم به تیر و بادبند گیردار، اتصالات ستون‌ها به یکدیگر گیردار و سایر اتصالات مفصلی می‌باشند که عرض دهانه این قاب در کلیه نمونه‌ها ۶ متر می‌باشد. دهانه میانی نیز با تیرهایی که دو انتهای آن مفصلی می‌باشد دهانه‌های طرفین را به یکدیگر متصل می‌کند که طول دهانه آن ۲ متر است. همچنین دهانه سمت چپ نیز یک دیوار برشی گهواره‌ای می‌باشد که دارای یک تکیه‌گاه در مرکز پای دیوار (در جهت X مقید شده) و دو بالشتک در دو سوی دیوار می‌باشد که توسط دو کابل پیش‌تنیده مطابق شکل (۶) مهار شده است و طول دهانه آن برای چهار مدل Rocking 10%، Rocking 20%، Rocking 30% و Rocking 40% با مساحت کابل ثابت به ترتیب برابر ۴، ۵، ۶ و ۷ متر و برای چهار مدل با مساحت کابل متغیر و نیروی ثابت، برابر ۵ متر می‌باشد. ارتفاع تمام طبقات نیز ۴ متر می‌باشد. قابل ذکر است که دیوار برشی گهواره‌ای طوری طراحی شده که در برابر بارهای اعمالی در حالت الاستیک باقی بماند. وزن در تمام طبقات یکسان و برابر ۲۶۳۰ کیلو نیوتن است. همه مدل‌های این مطالعه مطابق جدول (۳) نام‌گذاری شدند.

جدول ۳. تمامی مدل‌های مورد مطالعه.

Table 3. All models examined in the study.

شماره مدل	چهار مدل با مساحت سطح مقطع متغیر کابل	شماره مدل	چهار مدل با مساحت سطح مقطع یکسان کابل
۵	Brace 80% & Rocking 20% - Cable 3	۱	Brace 90% & Rocking 10%

۶	Brace 80% & Rocking 20% - Cable 5.4	۲	Brace 80% & Rocking 20%
۷	Brace 80% & Rocking 20% - Cable 7.8	۳	Brace 70% & Rocking 30%
۸	Brace 80% & Rocking 20% - Cable 10.2	۴	Brace 60% & Rocking 40%



شکل ۶. (الف) دیوار برشی گهواره‌ای به همراه قاب مهاربندی واگرا با لینک قائم، (ب) مدل سه بعدی و مش بندی دیوار برشی گهواره‌ای به همراه قاب مهاربندی واگرا با لینک قائم.

Fig. 6. (a) Self-centering rocking shear wall along with an eccentrically braced frame with a vertical link, (b) Three-dimensional model and meshing of the self-centering rocking shear wall along with an eccentrically braced frame with a vertical link.

روش طراحی ارائه شده در این بخش بنحوی تدوین شده است که تسلیم‌ها فقط در لینک قائم ایجاد شود و سایر اجزاء تا دریافت ۲ درصد الاستیک باقی بمانند. پس از طراحی، میزان برش پایه و سهم قاب واگرا و دیوار گهواره‌ای مطابق جدول (۴ و ۵) مشخص گردید.

جدول ۴. مقادیر نیروی برش پایه، سهم قاب و دیوار از برش پایه نظیر و سایر جزئیات چهار مدل با مساحت سطح مقطع یکسان کابل.

Table 4. Values of base shear, share of the frame and the wall in the base shear, and other details of four models with identical cable cross-sectional area.

مدل	Brace 90% & Rocking 10%	Brace 80% & Rocking 20%	Brace 70% & Rocking 30%	Brace 60% & Rocking 40%
طول دهانه دیوار برشی (m)	۴	۵	۶	۷
طول دهانه قاب مهاربندی واگرا (m)	۶	۶	۶	۶
طول تیر رابط (m)	۲	۲	۲	۲
طول لینک قائم (m)	۰/۷۰	۰/۷۰	۰/۷۰	۰/۷۰
سطح مقطع کابل (cm ²)	۸	۸	۸	۸
برش پایه (Ton)	۱۴۶/۱۱	۱۴۶/۱۱	۱۴۶/۱۱	۱۴۶/۱۱
سهم قاب مهاربندی واگرا از کل برش پایه (Ton)	۱۳۱/۵۰	۱۱۶/۹۰	۱۰۲/۳۰	۸۷/۷۰
سهم دیوار برشی مرکزگرا از کل برش پایه (Ton)	۱۴/۶۰	۲۹/۲۰	۴۳/۸۰	۵۸/۴۰
نیروی پس تنیدگی درون کابل (Ton)	۱۰۳/۸۰	۱۶۵/۳۰	۲۰۵/۹۰	۲۳۴/۸۰

جدول ۵. مقادیر نیروی برش پایه، سهم قاب و دیوار از برش پایه نظیر و سایر جزئیات چهار مدل با مساحت سطح مقطع متغییر. کابل.

Table 5. Values of base shear, share of the frame and the wall in the base shear, and other details of four models with variable cable cross-sectional area.

مدل	Brace 80% & Rocking 20% - Cable 3	Brace 80% & Rocking 20% - Cable 5.4	Brace 80% & Rocking 20% - Cable 7.8	Brace 80% & Rocking 20% - Cable 10.2
طول دهانه دیوار برشی (m)	۵	۵	۵	۵
طول دهانه قاب مهاربندی واگرا (m)	۶	۶	۶	۶
طول تیر رابط (m)	۲	۲	۲	۲
طول لینک قائم (m)	۰/۷۰	۰/۷۰	۰/۷۰	۰/۷۰
سطح مقطع کابل (cm ²)	۲۴	۴۳/۲۰	۶۲/۴۰	۸۱/۶۰
برش پایه (Ton)	۱۴۶/۱۱	۱۴۶/۱۱	۱۴۶/۱۱	۱۴۶/۱۱
سهم قاب مهاربندی واگرا از کل برش پایه (Ton)	۱۱۶/۹۰	۱۱۶/۹۰	۱۱۶/۹۰	۱۱۶/۹۰
سهم دیوار برشی مرکزگرا از کل برش پایه (Ton)	۲۹/۲۰	۲۹/۲۰	۲۹/۲۰	۲۹/۲۰
نیروی پس تنیدگی درون کابل (Ton)	۱۶۵/۳۰	۱۶۵/۳۰	۱۶۵/۳۰	۱۶۵/۳۰

قبل از طراحی و تعیین مشخصات پروفیل‌های قاب مهاربندی واگرا با پیوند قائم، طول پیوندها باید مورد بررسی قرار گیرند. به این صورت که کوچکترین و بزرگترین پروفیل W شکلی را که احتمال می‌دهیم در لینک‌های قائم مورد استفاده قرار گیرند را توسط رابطه (۱۱ تا ۱۳) کنترل می‌کنیم، که مقادیر مینیمم و ماکزیمم اندازه لینک مشخص شود. در نهایت پس از مدل‌سازی نیز یک کنترل نهایی انجام می‌شود که طول لینک از مقادیر حداکثر تجاوز نکرده باشد.

$$e \leq \frac{1.6M_p}{V_p} \quad (11)$$

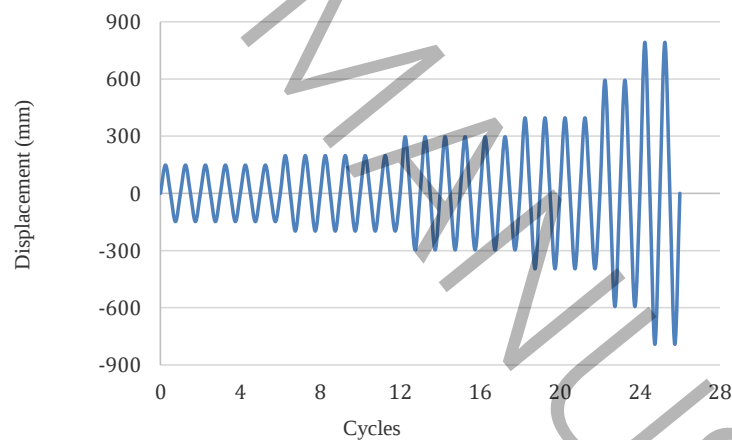
$$V_p = 0.6F_y A_{IW} \quad (12)$$

$$M_p = F_y Z \quad (13)$$

در روابط بالا، V_p و M_p به ترتیب برش پلاستیک و لنگر پلاستیک مقطع تیر پیوند می‌باشند. همچنین F_y تنش تسلیم فولاد تیر پیوند، Z اساس مقطع پلاستیک تیر پیوند، A_{IW} مساحت جان مقطع تیر پیوند می‌باشد.

۶- بارگذاری مدل‌های اجزا محدودی

بارگذاری نمونه‌ها در دو مرحله صورت می‌گیرد که در مرحله اول، کابل‌ها به روش اعمال حرارت پیش تنیده می‌شوند تا پس‌تنیدگی لازم را در قاب ایجاد کنند و در مرحله دوم، با اعمال بار پوش یا چرخه‌ای به صورت شبه استاتیکی به تراز بام قاب، تحت بارگذاری قرار می‌گیرد. جهت انجام بارگذاری پوش‌آور، بام قاب به عنوان نقطه‌ای اعمال بار، تحت جابجایی ۲٪ ارتفاع قرار گرفته است. طراحی مورد انتظار در این پژوهش برای سیستم پیشنهادی بگونه‌ای است که در جابجایی نسبی ۲٪ تنها لینک‌های قائم باید تسلیم شوند و این در حالی است که نباید هیچ گونه تسلیمی در دیگر اعضا قاب مهاربندی یا دیوار برشی گهواره‌ای به وجود آید. هدف از بارگذاری و تحلیل چرخه‌ای، بررسی تأثیر پارامتر نیرو با بتاهای مختلف بر رفتار سیستم در شرایط مساحت کابل یکسان و همچنین تأثیر مساحت کابل بر رفتار سیستم با ثابت ماندن سایر مشخصات مدل‌های مورد نظر انجام گرفته است. از جمله دستورالعمل‌های بارگذاری چرخه‌ای می‌توان به دو دستورالعمل ATC-24 و SAC اشاره نمود. در ATC-24 از جابجایی تسلیم (Δ_{yield}) به عنوان معیاری برای دامنه بارگذاری استفاده می‌شود. به دلیل ابهاماتی که در تعیین Δ_{yield} وجود داشت در سال (۲۰۰۰) پروتکل SAC جایگزین ATC-24 در آئین نامه AISC-341 گردید [۱۷]. بنابراین در این بررسی از دستورالعمل SAC برای بارگذاری چرخه‌ای استفاده شد. در شکل (۷) چرخه‌ی بارگذاری نمونه‌ها نشان داده شده است که دامنه‌های جابجایی اعمالی به آن‌ها به ترتیب ۰/۳۷۵، ۰/۵، ۰/۷۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد ارتفاع قاب در نظر گرفته شده است. بر اساس این پروتکل، دریافت جانبی سازه در بازه‌ی ۰/۳۷۵ تا ۲ درصد در چندین گام بارگذاری تکرار می‌شود. از آنجا که این مقادیر به صورت درصدی از دوران سازه تعریف می‌شوند، جابجایی مطلق از ضرب این درصد دوران‌ها در ارتفاع سازه بدست می‌آید. پس جابجایی مطلق متناظر در هر مدل بسته به ارتفاع کلی آن متفاوت خواهد بود. بدین ترتیب، با وجود تفاوت در جابجایی‌های واقعی به دست آمده برای مدل‌های مختلف، معیار درصدی دوران در تمامی سیستم‌ها یکسان در نظر گرفته شده است.

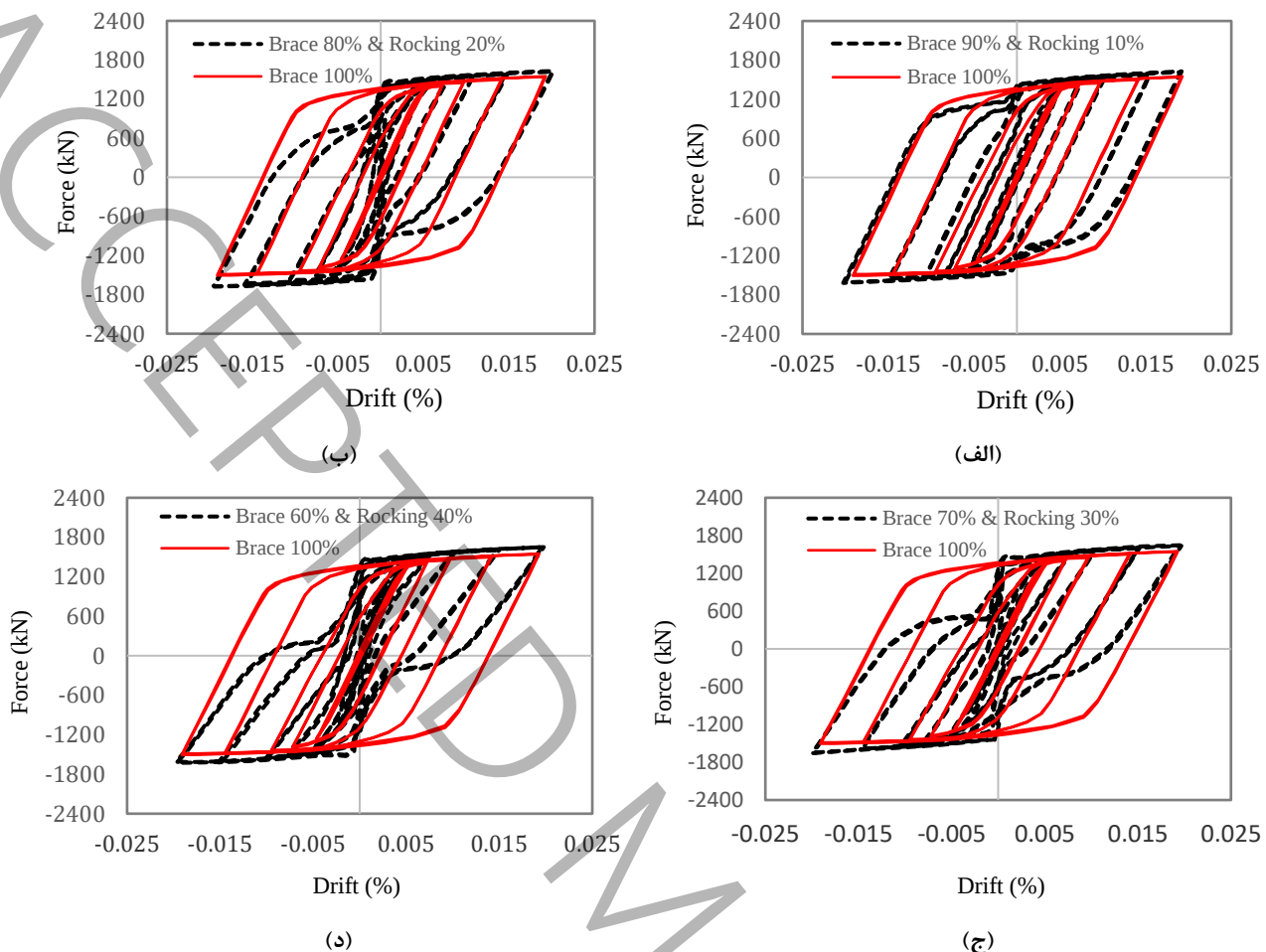


شکل ۷. چرخه‌ی بارگذاری مدل بر اساس پروتکل SAC.

Fig. 7. Loading cycle of the model based on the SAC protocol.

۷- مقایسه مدل‌های عددی

در این تحقیق رفتار چرخه‌ای (هیستریزیس) نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است تا رفتار و استهلاک انرژی قاب‌های پیشنهادی EBF-RCSW با پارامترهای متغیر ($\text{Brace } x\% \text{ \& Rocking } y\%$ یا $\text{Brace } z\% \text{ \& Rocking } y\%$) نسبت به یکدیگر و با قاب مهاربندی واگرای تنها با ۱۰٪ نیرو ($\text{Brace } 100\%$) مشخص گردد. در شکل (۸) منحنی هیستریزیس نیرو-جابجایی چهار مدل از سیستم پیشنهادی EBF-RCSW با توزیع مختلف میزان درصد نیرو بین دهانه‌های قاب $\text{Brace } x\% \text{ \& Rocking } y\%$ و با مساحت یکسان سطح مقطع کابل، نشان داده شده است.

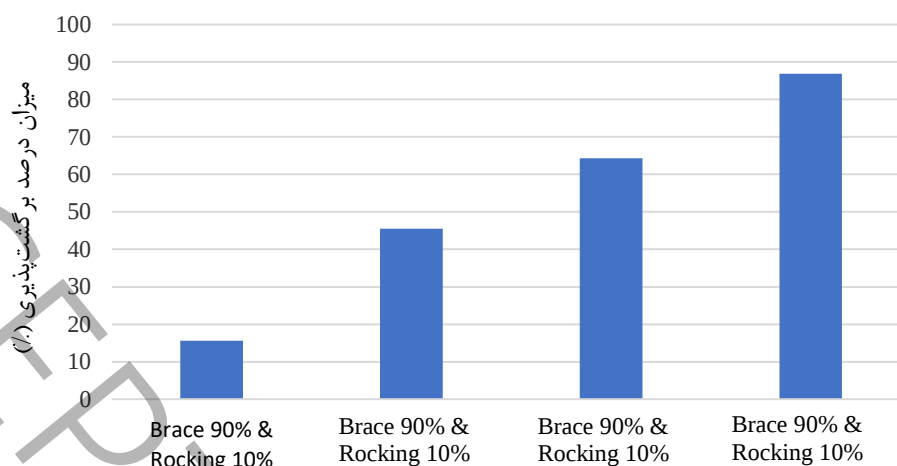


شکل ۸. منحنی چرخه‌ای دیوار برشی گهواره‌ای به همراه قاب مهاربندی واگرا و لینک قائم به نیروی متفاوت و مساحت کابل ثابت: (الف) Brace 90% & Rocking 10%، (ب) Brace 80% & Rocking 20%، (ج) Brace 70% & Rocking 30% و (د) Brace 60% & Rocking 40%.

Fig. 8. Cyclic curve of the self-centering rocking shear wall along with an eccentrically braced frame equipped with a vertical link under different force distributions and constant cable area. (a) Brace 90% & Rocking 10%, (b) Brace 80% & Rocking 20%, (c) Brace 70% & Rocking 30%, and (d) Brace 60% & Rocking 40%.

انتخاب درصد‌های مختلف توزیع نیروی طراحی بین قاب مهاربندی واگرا و دیوار برشی گهواره‌ای (از ۱۰٪ تا ۴۰٪ برای دیوار) با هدف بررسی نقش تعادلی بین ظرفیت اتلاف انرژی و میزان برگشت‌پذیری صورت گرفت. همچنین تغییر سطح مقطع کابل در بازه‌ی مشخص، برای ارزیابی اثر آن بر سختی ثانویه و ظرفیت نهایی انتخاب شد.

از شکل (۸) مشاهده می‌گردد که قاب‌های پیشنهادی که در آن‌ها دهانه برگشت‌پذیر برای نیروی بیشتری (Rocking y%) طراحی شده‌اند، حلقه‌هایی لاغرتر و پرچمی شکل دارند و میزان برگشت‌پذیری نیز بطور قابل توجهی در آن‌ها افزایش یافته است. ولی استهلاک انرژی با کاهش نیروی طراحی دهانه مهاربندی واگرا و افزایش نیروی طراحی دهانه دیوار برشی گهواره‌ای مرکزگرا با کاهش مواجه بوده است؛ بطوری که استهلاک انرژی قاب EBF-RCSW با نیروهای طراحی Brace 70% & Rocking 30%، Brace 80% & Rocking 20% و Brace 90% & Rocking 10% به ترتیب ۱۲٪، ۲۸٪ و ۴۴٪ بیشتر از قاب با نیروی طراحی Brace 60% & Rocking 40% شده است. مقدار برگشت‌پذیری برای هر چهار نمونه با توزیع مختلف نیروی برشی و سطح مقطع یکسان کابل، مطابق نمودار شکل (۹) می‌باشد.



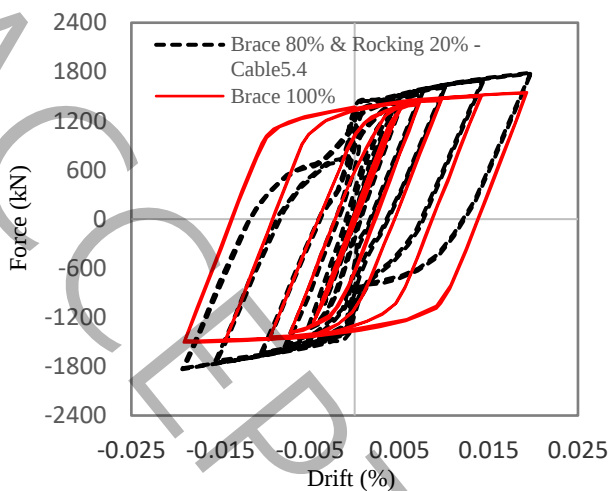
شکل ۹. برگشت پذیری برای هر چهار نمونه با نیروی متفاوت و مساحت کابل ثابت.

Fig. 9. Recoverability for all four specimens with different forces and constant cable area.

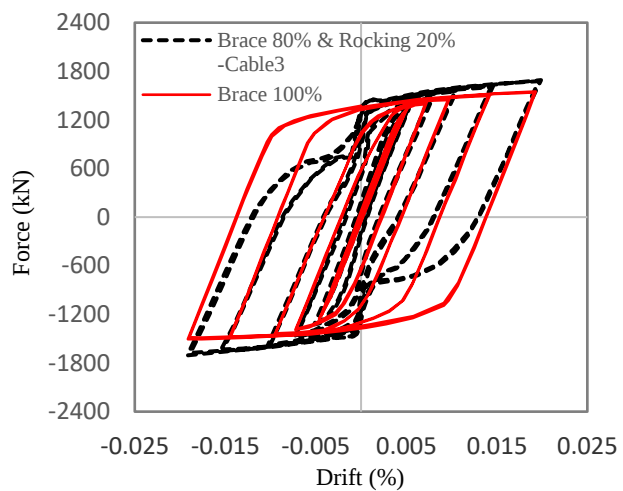
همچنین منحنی هیستریزیس چهار مدل از سیستم پیشنهادی EBF-RCSW با میزان متفاوت مساحت سطح مقطع کابل و ثابت ماندن سایر پارامترها (Brace % & Rocking % - Cable z)، نیز مطابق شکل (۱۰) می باشد. با افزایش میزان مساحت سطح مقطع کابل، میزان سختی ثانویه و سطح مقاومت نهایی مطابق شکل (۱۰) بطور چشمگیری افزایش یافته است؛ ولی این افزایش مساحت سطح مقطع کابل، تاثیر چندانی بر میزان برگشت پذیری یا مرکزگرایی مدل ها نداشته است. همه نمونه ها حلقه های هیسترتیک پایدار و چاقی را تحت بارگذاری از خود نشان داده اند و مانند سایر سیستم های مشابه انجام شده توسط سایر محققین، رفتار مطلوبی دارند.

منحنی های هیستریزیس سیستم کلایتون و همکاران (دیوار برشی فولادی مرکزگرا) نسبت به منحنی های سیستم پیشنهاد شده در این مقاله، سختی ثانویه (سختی پس از جابجایی مربوط به تسلیم) بیشتری داشته اند. اما سطح داخل حلقه های هیستریزیس سیستم پیشنهادی آنان، بسیار کمتر از مدل های پیشنهادی در این مطالعه می باشد [۲۴ و ۲۵] و منحنی های سیستم پیشنهادی ارائه شده در این تحقیق نسبت به مطالعات مشابه، به منحنی ایده آل پرچمی شکل نزدیک تر است. بنابراین، نقاط قوت اصلی سیستم پیشنهادی را می توان در برگشت پذیری لرزه ای قابل توجه، شکل هیستریزیس پرچمی و محدودسازی ناحیه پلاستیک به لینک قائم دانست که آن را نسبت به سیستم های قبلی متمایز می سازد.

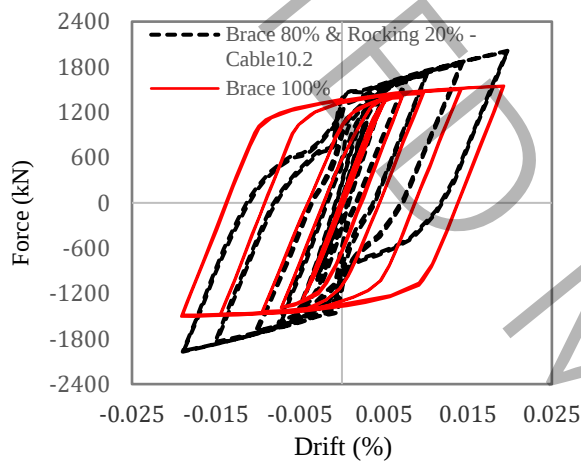
همانطور که مطابق طراحی انتظار داشتیم در قاب مهاربندی و اگر فقط لینک قائم تسلیم شود و سایر اجزای قاب متناسب با ظرفیت این المان تسلیم شده طراحی شوند و دچار تسلیم نگردند؛ شکل (۱۰) نشان می دهد که این عملکرد به درستی انجام شده است و فقط لینک قائم دچار تسلیم و پلاستیک شدگی شده است و از طرفی از نمودارهای هیستریزیس شکل (۱۰) و توزیع تنش شکل (۱۱) نیز این موضوع قابل استنباط می باشد.



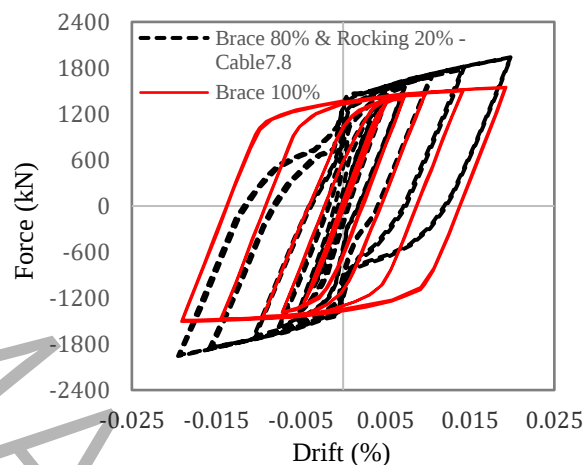
(ب)



(الف)



(د)

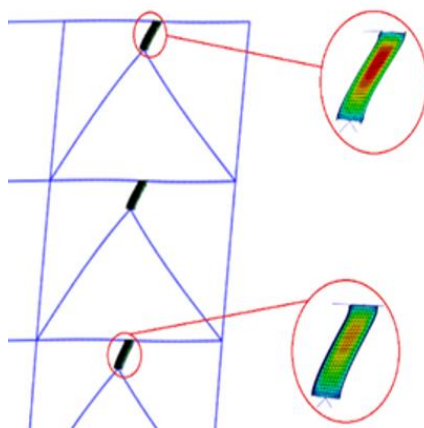


(ج)

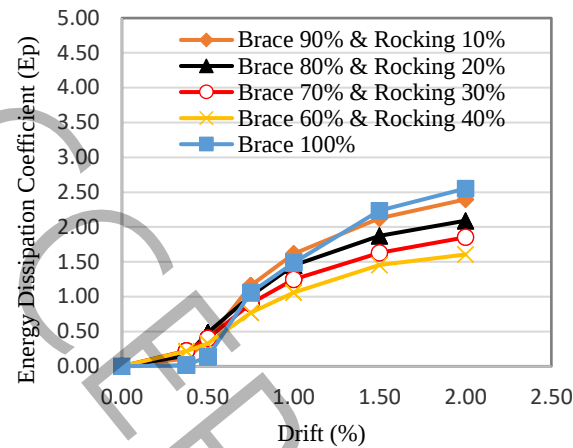
شکل ۱۰. منحنی‌های چرخه‌ای دیوار برشی گهواره‌ای به همراه قاب مهاربندی واگرا مجهز به لینک قائم با نیروی ثابت و مساحت کابل متغیر:

Brace 80% & Rocking 20%-Cable 3 (الف)، Brace 80% & Rocking 20%-Cable 5.4 (ب)، Brace 80% & Rocking 20%-Cable 7.8 (ج) و Brace 80% & Rocking 20%-Cable 10.2 (د).

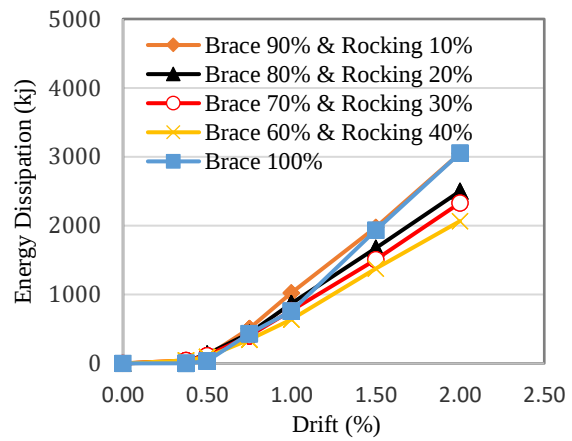
Fig. 10. Cyclic curves of the self-centering rocking shear wall along with an eccentrically braced frame equipped with a vertical link under constant force and variable cable area. (a) Brace 80% & Rocking 20% - Cable 3, (b) Brace 80% & Rocking 20% - Cable 5.4, (c) Brace 80% & Rocking 20% - Cable 7.8, and (d) Brace 80% & Rocking 20% - Cable 10.2.



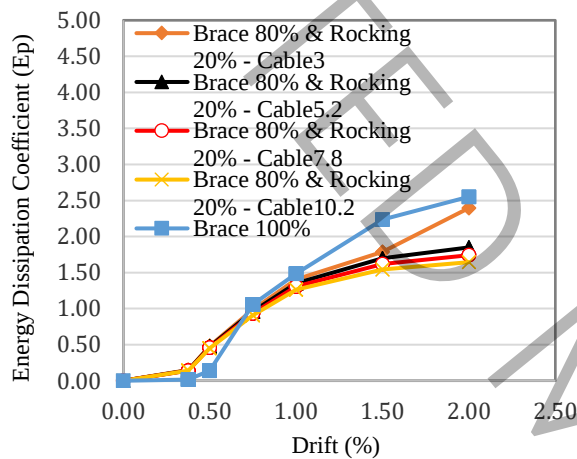
شکل ۱۱. توزیع تنش پلاستیک معادل در بخش قاب مهاربندی واگرا و تمرکز پلاستیک شدگی در لین قائم.
Fig. 11. Distribution of equivalent plastic strain in the eccentrically braced frame and concentration of plasticity in the vertical link.



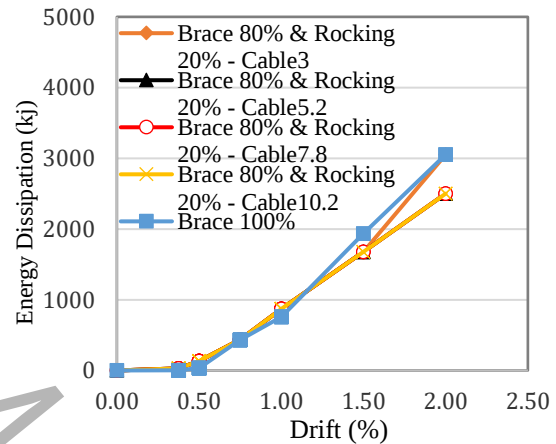
(a)



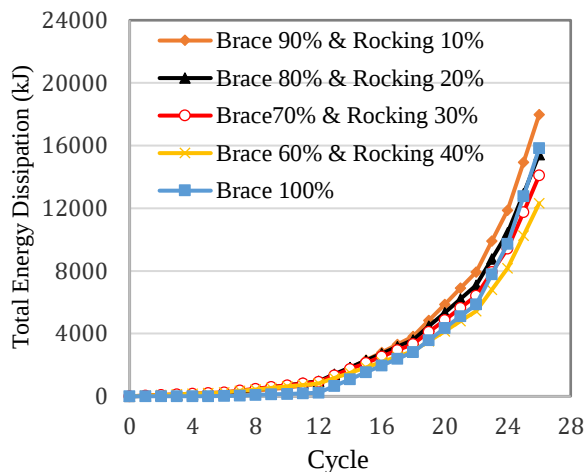
(b)



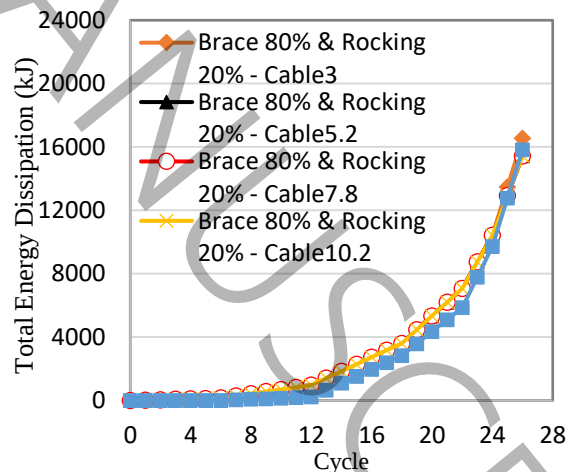
(c)



(d)



(e)



(f)

شکل ۱۲. (الف) ضریب اتلاف انرژی (E_p) مدل‌ها با نیروی مختلف و کابل ثابت، (ب) اتلاف انرژی (E_D) مدل‌ها با نیروی مختلف و کابل ثابت، (ج) ضریب اتلاف انرژی (E_p) مدل‌ها با نیروی ثابت و کابل ثابت، (د) اتلاف انرژی (E_D) مدل‌ها با نیروی ثابت و کابل متغیر، (ه) اتلاف انرژی تجمعی مدل‌ها با نیروی مختلف و کابل ثابت، و (و) اتلاف انرژی تجمعی مدل‌ها با نیروی ثابت و کابل متغیر.

Fig. 12. (a) Energy dissipation coefficient (E_p) of the models with different forces and constant cable area, (b) Energy dissipation (E_D) of the models with different forces and constant cable area, (c) Energy dissipation coefficient (E_p) of the models with constant force and constant cable area, (d) Energy dissipation (E_D) of the models with constant force and variable cable area, (e) Cumulative energy

dissipation of the models with different forces and constant cable area, and (f) Cumulative energy dissipation of the models with constant force and variable cable area.

در شکل (۱۲) مقایسه‌ی ضریب اتلاف انرژی (E_p) و اتلاف انرژی (E_D) مدل‌ها در دررفت‌های مختلف و همچنین میزان اتلاف انرژی تجمعی آن‌ها نشان داده شده است. از این منحنی‌ها مشاهده می‌شود که افزایش نیرو طراحی قاب مهاربندی واگرا ($\text{Bracing } x\%$) و کاهش نیرو طراحی در دیوار برشی گهواره‌ای ($\text{Rocking } y\%$)، تاثیر قابل توجهی در میزان افزایش اتلاف انرژی مدل‌ها دارد. مطابق نمودارهای هیستریزیس کاملاً واضح است که پارامتر مساحت سطح مقطع کابل بر میزان اتلاف انرژی مدل‌ها تاثیر قابل توجهی ندارد. زیرا، در سیستم مورد نظر، اتلاف انرژی توسط قاب مهاربندی واگرا (EBF) انجام می‌شود و نیروی طراحی آن ($\text{Brace } x\%$) برای مدل‌های با میزان مساحت مختلف کابل، یکسان می‌باشد. میزان برش طراحی، مقاومت نهایی، ضریب سختی ثانویه برای هر مدل از قاب پیشنهادی نیز مطابق جدول (۶) از نمودارها استخراج گردید و مشخص شد که با افزایش میزان مساحت کابل سیستم برگشت‌پذیر، ضریب سختی ثانویه بطور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد.

جدول ۶. نتایج حاصل از تحلیل‌های چرخه‌ای.

Table 6. Results obtained from the cyclic analyses.

مدل	برش طراحی (ton)	مقاومت نهایی (ton)	ضریب سختی ثانویه (α)
Brace 90% & Rocking 10%	۱۴۶/۱۱	۱۶۰	۰/۰۵۳۰
Brace 80% & Rocking 20%	۱۴۶/۱۱	۱۶۰	۰/۰۶۳۵
Brace 70% & Rocking 30%	۱۴۶/۱۱	۱۶۱	۰/۰۷۴۱
Brace 60% & Rocking 40%	۱۴۶/۱۱	۱۶۲	۰/۰۸۴۵
Brace 80% & Rocking 20% - Cable 3	۱۴۶/۱۱	۱۶۸	۰/۰۹۱۸
Brace 80% & Rocking 20% - Cable 5.4	۱۴۶/۱۱	۱۸۰	۰/۱۲۳۶
Brace 80% & Rocking 20% - Cable 7.8	۱۴۶/۱۱	۱۹۱	۰/۱۵۳۲
Brace 80% & Rocking 20% - Cable 10.2	۱۴۶/۱۱	۲۰۳	۰/۱۸۰۸

۸- نتیجه‌گیری

هدف این مطالعه، بررسی و معرفی یک سیستم ترکیبی نوین شامل قاب مهاربندی واگرا با لینک قائم برشی و دیوار برشی گهواره‌ای بتنی بود که بتواند همزمان بازگشت‌پذیری لرزه‌ای و ظرفیت اتلاف انرژی را فراهم نماید. در این مطالعه، عملکرد سیستم ترکیبی دیوار برشی گهواره‌ای با قاب مهاربندی واگرا مجهز به لینک قائم برشی با بررسی چهار مدل ۱۰ طبقه از نظر تاثیر نیروی طراحی و مساحت کابل بر رفتار چرخه‌ای سیستم مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تحلیل‌های عددی نشان دادند که افزایش سهم دیوار برشی گهواره‌ای موجب بهبود قابل توجه بازگشت‌پذیری و شکل پرچمی هیستریزیس شده، در حالی که افزایش سطح مقطع کابل نقش مؤثری در ارتقای سختی ثانویه و ظرفیت نهایی سیستم دارد. به طور کلی، نتایج نشان می‌دهد که رفتار مشاهده‌شده قابل تفسیر بر اساس مکانیزم‌های سیستم‌های سازه‌ای است. کاهش دررفت پسماند ناشی از نقش دیوار گهواره‌ای در ایجاد برگشت‌پذیری بوده که با کاهش سختی در چرخه‌های بارگذاری در هنگام بار برداری منجر می‌شود. همچنین بررسی شرایط مختلف توزیع برش پایه نشان داده که با افزایش سهم دیوار در تحمل برش، رفتار سیستم پایدارتر و برگشت‌پذیرتر می‌گردد. بنابراین، سیستم ترکیبی دیوار برشی گهواره‌ای با قاب مهاربندی واگرا می‌تواند به عنوان یک سیستم مقاوم در برابر زلزله با قابلیت اتلاف انرژی بالا و بازگشت‌پذیری مطلوب مورد استفاده قرار گیرد.

سیستم پیشنهادی توانسته است نقاط ضعف سیستم‌های مشابه در تحقیقات پیشین را برطرف کرده و رفتاری نزدیک به مدل ایده‌آل پرچمی ارائه دهد. نوآوری اصلی این پژوهش در ارائه یک سامانه ترکیبی است که ضمن تمرکز تغییرشکل پلاستیک در لینک قائم و تضمین عملکرد قابل کنترل آن، توانایی دستیابی به پایداری چرخه‌ای، برگشت‌پذیری لرزه‌ای و ظرفیت مطلوب اتلاف انرژی را دارا می‌باشد. بنابراین، این سیستم می‌تواند به‌عنوان گزینه‌ای کارآمد برای طراحی لرزه‌ای ساختمان‌ها در مناطق زلزله‌خیز مطرح گردد.

مراجع

- [1] M.G. Vetr, A. Ghamari, J. Bouwkamp, Investigating the nonlinear behavior of Eccentrically Braced Frame with vertical shear links (V-EBF), *Journal of Building Engineering*, 10 (2017) 47–59.
- [2] A. Lettieri, A. de la Peña, F. Freddi, M. Latour, Damage-free self-centring links for eccentrically braced frames: development and numerical study, *Journal of Constructional Steel Research*, 201 (2023) 107727.
- [3] F.R. Rofooei, M. Soleimani, Assessment of the seismic behavior of self-centering eccentrically braced frames with vertical link-beam, in: *Structures*, Elsevier, 2023, pp. 1285–1305.
- [4] M. Midorikawa, T. Azuhata, T. Ishihara, A. Wada, Shaking table tests on seismic response of steel braced frames with column uplift, *Earthquake engineering & structural dynamics*, 35(14) (2006) 1767–1785.
- [5] M. Seki, H. Katsumata, H. Uchida, T. Takeda, Study on earthquake response of two-storied steel frame with Y-shaped braces, in: *Proceedings 9th world conference on earthquake engineering*, Tokyo-Kyoto, Japan, 1988.
- [6] M. Shayanfar, M. Barkhordari, A. Rezaeian, Experimental study of cyclic behavior of composite vertical shear link in eccentrically braced frames, *Steel & Composite Structures*, 12(1) (2012) 13–29.
- [7] P. Dusicka, A.M. Itani, I.G. Buckle, Evaluation of conventional and specialty steels in shear link hysteretic energy dissipators, in: *Proc., 13th World Conf. on Earthquake Engineering*, 2004.
- [8] S.M. Zahrai, A. Moslehitarbar, Cyclic behaviour of steel braced frames having shear panel system, (2006).
- [9] S.M. Zahrai, Y. Laboratory investigation of the application of vertical beam in improving the seismic performance of steel buildings, *Journal of Civil Engineering and Surveying*, Faculty of Engineering, Volume 44, Number 3, Pages 379-393 (In Persian) (2009).
- [10] M. Khazaei-Poul, F. Nateghi-Alahi, E. Alavi, Seismic behaviour of concentrically braced frame system combined with steel shear panel, in: *Proceedings of the 9th International Congress on Civil Engineering*, Isfahan University of Technology Isfahan, 2012.
- [11] M. Shayanfar, A. Rezaeian, A. Zanganeh, Seismic performance of eccentrically braced frame with vertical link using PBPD method, *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 23(1) (2014) 1–21.
- [12] M. Lian, M. Su, Seismic performance of high-strength steel fabricated eccentrically braced frame with vertical shear link, *Journal of Constructional Steel Research*, 137 (2017) 262–285.
- [13] K. Park, B. Price, C. Jiansinlapadamrong, S.-H. Chao, Seismic behavior of double-HSS links for eccentrically braced frames, *Engineering Structures*, 239 (2021) 112297.
- [14] L. Zhuang, J. Wang, X. Nie, Z. Wu, Experimental study on seismic behaviour of eccentrically braced composite frame with vertical LYP steel shear link, *Engineering structures*, 255 (2022) 113957.
- [15] M. Katrangi, M. Khanmohammadi, Experimental study of seismic performance of an innovative low-damage self-centering composite steel plate shear wall, *Journal of Structural Engineering*, 150(1) (2024) 04023212.
- [16] G. Xiao, H. Wang, P. Pan, Seismic performance of damaged frame retrofitted with self-centering and energy-dissipating rocking wall, *Resilient Cities and Structures*, 2(1) (2023) 143–151.
- [17] L.-H. Xu, Y. Zhang, Hysteresis behavior of bottom-story self-centering shear wall with steel brace-assembled bottom, *Journal of Constructional Steel Research*, 186 (2021) 106893.
- [18] D. Marriott, S. Pampanin, D. Bull, A. Palermo, Improving the seismic performance of existing reinforced concrete buildings using advanced rocking wall solutions, (2007).

- [19] A. Wada, Z. Qu, H. Ito, S. Motoyui, H. Sakata, K. Kasai, Seismic retrofit using rocking walls and steel dampers, in: Improving the seismic performance of existing buildings and other structures, 2010, pp. 1010–1021.
- [20] L. Lu, X. Liu, J. Chen, X. Lu, Seismic performance of a controlled rocking reinforced concrete frame, *Advances in Structural Engineering*, 20(1) (2017) 4–17.
- [21] M. Khanmohammadi, S. Heydari, Seismic behavior improvement of reinforced concrete shear wall buildings using multiple rocking systems, *Engineering Structures*, 100 (2015) 577–589.
- [22] A.A. Amir Zehni H., Shafie I., , study of the seismic behavior of steel bracing frames with rocking behavior equipped with energy dissipation fuses, *Iranian Structural Engineering Association Structural Engineering and Construction scientific-research journal.*, (2015).
- [23] P. Clayton, D. Dowden, C. Li, J. Berman, M. Bruneau, K. Tsai, L. Lowes, Advances in self-centering steel plate shear wall testing and design, in: 10th US National Conference on Earthquake Engineering: Frontiers of Earthquake Engineering, 2014.
- [24] P.M. Clayton, D.M. Dowden, C.-H. Li, J.W. Berman, M. Bruneau, L.N. Lowes, K.-C. Tsai, Self-centering steel plate shear walls for improving seismic resilience, *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 10(3) (2016) 283–290.
- [25] D.M. Dowden, M. Bruneau, Dynamic shake-table testing and analytical investigation of self-centering steel plate shear walls, *Journal of Structural Engineering*, 142(10) (2016) 04016082.
- [26] X. Cai, Z. Pan, Y. Zhu, N. Gong, Y. Wang, Experimental and numerical investigations of self-centering post-tensioned precast beam-to-column connections with steel top and seat angles, *Engineering Structures*, 226 (2021) 111397.
- [27] I.M. Qureshi, P. Warnitchai, Computer modeling of dynamic behavior of rocking wall structures including the impact-related effects, *Advances in Structural Engineering*, 19(8) (2016) 1245–1261.

Evaluation of the Performance of Rocking Wall with Eccentrically Braced Frame with Vertical Link Based on the Force Design Method

ABSTRACT

This study introduces a combined system of Rocking Shear Walls with Eccentrically Braced Frame with Vertical Link (RCSW-EBF). The aim of the study is to investigate the impact of the Force Design parameter (with different beta values) on the behavior of the RCSW-EBF system while keeping the cable area constant. Additionally, the study seeks to explore the effects of cable area on the behavior of the RCSW-EBF system while other characteristics remain unchanged. The 10-story frames are designed in SAP software, and the dimensions of the system sections are determined. These 10-story frames are then modeled in ABAQUS software, and their nonlinear behavior under pushover and cyclic analysis is determined. The finite element modeling has been done with Shell and Wire elements. The results of the cyclic analysis indicate that an increase in the percentage of Brace force (x%) leads to a corresponding increase in wasted energy and the coefficient of energy loss and reducing the design force of the Eccentrically Braced Frame's span and increasing the design force of the Rocking Wall with Concentrically Braced Frames' span led to a decrease in the cyclic diagrams of energy consumption. So, the energy consumption of the RCSW-EBF frame with the design forces of Braced Frame 70% and Rocking wall 30%, Braced frame 80% and Rocking wall 20%, and Braced Frame 90% and Rocking Wall 10% is respectively 12%, 28% and 44% more than the system with the design force of Braced Frame 60% and Rocking Wall 40%.

KEYWORDS

Brace Frame, Vertical link, Rocking wall, Self-Centering Reparability, Based on the Force Design.

پیوست ۱

جدول مشخصات قاب‌های مهاربندی واگرا									
		قاب مهاربندی واگرا با لینک قائم مدل طراحی شده با ۱۰۰ درصد نیرو (Brace 100%)				قاب مهاربندی واگرا با لینک قائم مدل طراحی شده با ۹۰ درصد نیرو (Brace 90%)			
طبقه	ارتفاع طبقات (m)	مقطع تیر	مقطع ستون	مقطع بادبند	مقطع لینک قائم	مقطع تیر	مقطع ستون	مقطع بادبند	مقطع لینک قائم
10	3.96	W14×68	W14×145	HSS7×7×5/8	W12×136	W14×61	W14×120	HSS7×7×5/8	W12×120
9	3.96	W14×68	W14×176	HSS7×7×5/8	W12×136	W14×61	W14×145	HSS7×7×5/8	W12×120
8	3.96	W14×68	W14×233	HSS8×8×1/2	W12×136	W14×61	W14×193	HSS8×8×1/2	W12×120
7	3.96	W14×68	W14×370	HSS8×8×1/2	W12×136	W14×61	W14×311	HSS8×8×1/2	W12×136
6	3.96	W14×68	W14×398	HSS8×8×1/2	W12×136	W14×61	W14×398	HSS8×8×1/2	W12×136
5	3.96	W14×74	W14×426	HSS8×8×1/2	W12×152	W14×68	W14×426	HSS8×8×1/2	W12×136
4	3.96	W14×74	W14×455	HSS8×8×1/2	W12×152	W14×68	W14×455	HSS8×8×1/2	W12×136
3	3.96	W14×74	W14×500	HSS8×8×5/8	W12×152	W14×68	W14×500	HSS8×8×1/2	W12×136
2	3.96	W14×74	W14×550	HSS8×8×5/8	W12×152	W14×68	W14×550	HSS8×8×1/2	W12×136
1	3.96	W14×74	W14×550	HSS8×8×5/8	W12×152	W14×68	W14×550	HSS8×8×1/2	W12×152
		قاب مهاربندی واگرا با لینک قائم مدل طراحی شده با ۸۰ درصد نیرو (Brace 80%)				قاب مهاربندی واگرا با لینک قائم مدل طراحی شده با ۷۰ درصد نیرو (Brace 70%)			
10	3.96	W14×53	W14×90	HSS6×6×5/8	W10×112	W14×53	W14×90	HSS6×6×1/2	W10×100
9	3.96	W14×53	W14×109	HSS6×6×5/8	W10×112	W14×53	W14×109	HSS6×6×1/2	W10×100
8	3.96	W14×53	W14×145	HSS6×6×5/8	W10×112	W14×53	W14×145	HSS6×6×1/2	W10×100
7	3.96	W14×53	W14×233	HSS7×7×1/2	W10×112	W14×53	W14×233	HSS6×6×1/2	W10×112
6	3.96	W14×53	W14×370	HSS7×7×1/2	W10×112	W14×53	W14×342	HSS6×6×1/2	W10×112
5	3.96	W14×61	W14×398	HSS7×7×1/2	W12×120	W14×61	W14×370	HSS6×6×1/2	W10×112
4	3.96	W14×61	W14×426	HSS8×8×1/2	W12×120	W14×61	W14×398	HSS6×6×1/2	W10×112
3	3.96	W14×61	W14×455	HSS8×8×1/2	W12×120	W14×61	W14×426	HSS6×6×1/2	W10×112
2	3.96	W14×61	W14×500	HSS8×8×1/2	W12×120	W14×61	W14×455	HSS6×6×1/2	W10×112
1	3.96	W14×61	W14×500	HSS8×8×1/2	W12×136	W14×61	W14×455	HSS6×6×1/2	W10×112
		قاب مهاربندی واگرا با لینک قائم مدل طراحی شده با ۶۰ درصد نیرو (Brace 60%)							
10	3.96	W14×48	W14×82	HSS5×5×1/2	W10×88				
9	3.96	W14×48	W14×99	HSS5×5×1/2	W10×88				
8	3.96	W14×48	W14×132	HSS5×5×1/2	W10×88				
7	3.96	W14×48	W14×211	HSS5×5×1/2	W10×100				
6	3.96	W14×48	W14×311	HSS5×5×1/2	W10×100				
5	3.96	W14×48	W14×342	HSS6×6×3/8	W10×100				
4	3.96	W14×48	W14×370	HSS6×6×3/8	W10×100				
3	3.96	W14×48	W14×398	HSS6×6×3/8	W10×100				
2	3.96	W14×48	W14×426	HSS6×6×3/8	W10×100				
1	3.96	W14×48	W14×426	HSS6×6×1/2	W10×100				