

مطالعه عددی عملکرد دیوار برشی فولادی L شکل تحت بارگذاری چرخه‌ای یک جهته و دوجته

رضا جمال‌زائی^۱، فرهنگ فرحب^{۲*}، امیر ایازی^۳

۱- کارشناس ارشد سازه، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران غرب، تهران، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران غرب، تهران، ایران

۳- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهر قدس، تهران، ایران

چکیده

رفتار چرخه‌ای دیوارهای برشی فولادی موضوع بسیاری از مطالعات تجربی و عددی در سال‌های گذشته بوده که بیشتر بر بارگذاری یک جهته تمرکز داشته است. باید توجه داشت هر گاه احتمال خسارت قابل توجهی همراه با اعمال بار دو طرفه وجود داشته باشد، بارگذاری می‌بایست به صورت رفت و برگشتی و دو طرفه انجام شود. پژوهش حاضر با هدف بررسی عملکرد لرزه‌ای دیوار برشی فولادی L شکل، تحت بارگذاری چرخه‌ای یک جهته و دوجته انجام شده است بر این اساس پیکربندی L شکل برای شبیه‌سازی بهتر پاسخ واقعی این سیستم تحت بار دوجته اتخاذ گردید. قبل از ایجاد نمونه‌های مورد مطالعه در نرم افزار اجزای محدود آباکوس، عملیات صحت‌سنجی انجام شد که در نهایت تطابق قابل قبولی با نتایج آزمایشگاهی مشاهده گردید. در ادامه "۴ مدل عددی"، تحت دو الگوی بارگذاری چرخه‌ای یک جهته و دوجته با در نظر گرفتن متغیرهایی نظیر تغییر در ضخامت ورق جان، تغییر در مقطع المانهای مرزی عمودی، استفاده از فولاد پرمقاومت در المانهای مرزی، استفاده از اتصالات ساده مفصلی و مقطع کاهش یافته، ایجاد و مورد تحلیل استاتیکی غیرخطی قرار گرفت. به منظور اعمال بار یک جهته از دستورالعمل بارگذاری ATC-24 و جهت بارگذاری دوجته از آیین نامه FEMA 461 استفاده گردید و پارامترهای لرزه‌ای مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل از تحلیل غیرخطی نشان داد نمونه‌های اجزای محدود تحت الگوی بار دوجته، افزایش مقاومتی حدود ۴۰ درصد و سختی حدود ۲۰ درصد نسبت به میانگین نتایج نمونه‌های تحت بارگذاری یک جهته داشته اما اتلاف انرژی حدود ۷۰ درصد کمتر از نمونه با بارگذاری یک جهته بدست آمد.

کلمات کلیدی: بارگذاری یک جهته، بارگذاری دوجته، دیوار برشی فولادی L شکل، تحلیل استاتیکی غیرخطی، بارگذاری چرخه‌ای

*نویسنده مسئول: فرهنگ فرحب

پست الکترونیکی: farahbod.f@wtiau.ac.ir

تاریخ دریافت مقاله: ۰۰۰۰/۰۰/۰۰، تاریخ پذیرش مقاله: ۰۰۰۰/۰۰/۰۰

۱- مقدمه

مطالعات آزمایشگاهی و عددی انجام شده در سه دهه گذشته نشان داده است که دیوار برشی فولادی یک سیستم موثر و اقتصادی برای مقاومت در برابر بارهای جانبی باد و زلزله است. طراحی مناسب این دیوارها، شکل‌پذیری بیشتر، سختی زیاد، چرخه هیستریزس پایدار و ظرفیت جذب انرژی بیشتری را در پی خواهد داشت. در این تحقیق سیستم دیوار برشی فولادی L شکل، متشکل از دو دیوار فولادی متعامد بدون سخت‌کننده با جان نازک و دارای دو المان مرزی عمودی غیر مشترک لبه‌ای و یک المان مرزی عمودی میانی می‌باشد. در دیوار برشی L شکل، تنش‌های کششی در مسیر رسیدن به المان مرزی میانی متصل به دو دیوار متعامد کاهش پیدا می‌کند و این امر موجب عملکرد بهتر در آن ناحیه می‌شود به طوری که المان مرزی عمودی مشترک بین دو دیوار متعامد مقاومت بیشتری نسبت به المان لبه‌ای غیرمشترک داشته و در حالت کلی می‌تواند ظرفیت برشی و مقاومت بالاتری نسبت به دیوار برشی فولادی معمول از خود نشان دهد [۱]. با توجه به خطر لرزه‌خیزی بالا در کشورهایی چون ژاپن، ایالات متحده، کانادا و ایران نیاز به مقاوم‌سازی بسیاری از ساختمان‌ها در برابر زلزله، استفاده از سیستم دیوار برشی فولادی با پیکربندی L شکل به دلیل سختی و مقاومت بالا مناسب و مقرون به صرفه به نظر می‌رسد و می‌تواند نسبت به مدل‌های معمول رفتار بهتری در مقابل زلزله از خود نشان دهد. در اوایل دهه ۸۰ میلادی با آغاز تحقیقات پایه، محققینی چون کولاک^۱ و توربرن^۲ [۲] و ارائه مدل تحلیل نواری توسط این محققین، استفاده از دیوار برشی‌های فولادی بدون سخت‌کننده به سبب مقاومت فراکمانشی قابل توجه این سیستم، نظر پژوهشگران زیادی را به خود جلب نمود و بر اساس همین تحقیقات پایه، آیین‌نامه‌های فولاد کانادا و آمریکا ضوابطی را برای تحلیل دیوارهای برشی فولادی با جان نازک ارائه نمودند. در سال ۲۰۰۸ تحقیقاتی توسط مایکل برونو^۳ [۳] در کشور آمریکا صورت گرفت که در آن از اتصالات RBS^۴ بین تیر و ستون استفاده شد، نتایج تحقیق‌های انجام شده حاکی از آن بود که مقدار شکل‌پذیری، حداکثر برش پایه و جذب انرژی در اتصالات RBS بیشتر از اتصال ساده می‌باشد. همچنین خرازی و همکارانش [۴] در سال ۲۰۱۰ روش اصلاح شده اندرکنش ورق و قاب را به منظور تحلیل دیوار برشی فولادی ارائه کردند که اندرکنش بین رفتار برشی و خمشی سیستم را به خوبی تشریح کرده و در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی متعدد سازگاری خوبی از خود نشان داد. صبوری قمی و همکارانش [۵] در سال ۲۰۱۱ اثر بازشوهای متقارن در رفتار دیوارهای برشی فولادی را بررسی نمودند نتایج نشان داد با افزایش مساحت بازشوها در تمامی نمونه‌ها کاهش ظرفیت باربری و انرژی جذب شده محسوس است. همچنین تحقیقاتی در سالهای اخیر به منظور چگونگی عملکرد تقاطع دو دیوار برشی متعامد در رفتار کلی آن انجام شده است به طور مثال در سال ۲۰۱۲، وی لی^۵ و کینگ نینگ لی^۶ [۶]، تحقیقاتی بر روی یک دیوار برشی L شکل بتنی انجام دادند که نتایج بیانگر عملکرد لرزه‌ای بهتر نمونه L شکل در مقایسه با مدل سنتی بود. امامی و همکاران [۷] در سال ۲۰۱۳ بر روی رفتار چرخه‌ای دیوار برشی فولادی دوزنقه‌ای و همچنین دیوار برشی فولادی سخت نشده تحقیق نمودند این مطالعه تجربی برای مقایسه سختی، نسبت انعطاف‌پذیری و ظرفیت جذب انرژی سه نوع دیوار برشی مختلف شامل دیوار برشی سخت نشده، دیوار برشی موجدار دوزنقه‌ای عمودی و دیوار برشی موجدار دوزنقه‌ای افقی انجام شد نتایج نشان داد مقاومت نهایی نمونه سخت نشده تقریباً ۱۷ درصد نسبت به نمونه‌های موجدار بزرگتر بوده و ظرفیت جذب انرژی، نسبت انعطاف‌پذیری و سختی اولیه نمونه‌های موجدار تقریباً ۵۲، ۴۰ و ۲۳ درصد در مقایسه با نمونه سخت نشده بیشتر است. حسین‌نژاد و تهرانی‌زاده [۸] در سال ۲۰۱۴ تحقیقاتی بر روی دیوارهای برشی فولادی با تعداد طبقات مختلف و نسبت عرض به ارتفاع متفاوت انجام دادند، آنها نتیجه گرفتند که تسلیم ورق در پانل‌های با تعداد طبقات کمتر خیلی زودتر از قاب پیرامونی انجام می‌گیرد در حالی که در تعداد طبقات زیاد تسلیم کامل ورق به تعویق می‌افتد. در سال ۲۰۱۵ مرادی‌نژاد و همکارانش [۹] به بررسی تاثیر موقعیت قرارگیری دیوار برشی فولادی، بر خرابی پیشرونده پرداختند نتایج حاصل از تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی نشان داد که قرارگیری دیوار برشی فولادی در کنج پلان منجر به رفتار بهتر سازه در برابر تخریب پیشرونده می‌گردد. در سال ۲۰۱۶ شیائومنگ ژانگ^۷ و همکارانش [۱۰] تحقیق آزمایشگاهی بر روی یک دیوار برشی فولادی مرکب T شکل با هدف ارزیابی مقاومت، سختی، تغییرشکل، شکل‌پذیری و ظرفیت اتلاف انرژی آن انجام دادند، نتایج

¹ Kulak

² Thorburn

³ Michel Bruneau

⁴ Reduced Beam Section

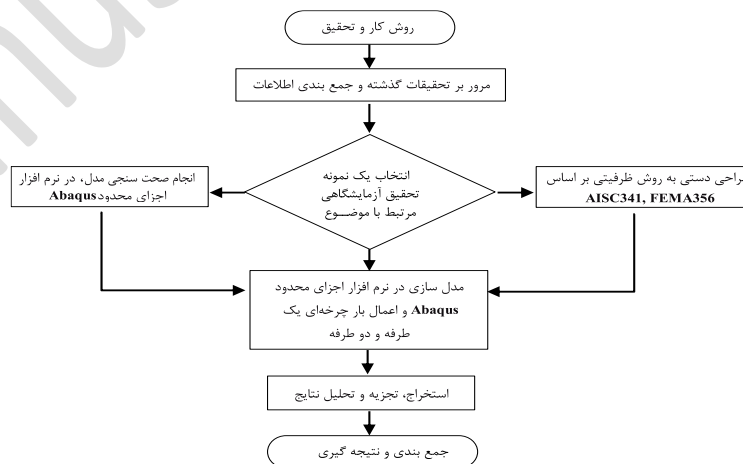
⁵ Wei Li

⁶ Qing-ning Li

⁷ Xiaomeng Zhang

نشان داد که نسبت نیروی محوری و جزئیات پیکربندی دیوار تأثیر قابل توجهی بر کل رفتار پسماند خواهد داشت. همچنین در سال ۲۰۱۷ حمیدی پور و همکارانش [۱۱] به بررسی دیوار برشی فولادی بازشودار تحت تأثیر بار انفجار پرداختند که در این تحقیق برخی پارامترهای اصلی تأثیرگذار بر رفتار غیرخطی دیوار برشی فولادی بازشودار و بدون بازشو مورد مطالعه قرار گرفته و با مقایسه پارامترهای خروجی آنها اثر بازشو بر رفتار دیوار برشی فولادی تحت بارگذاری انفجار بررسی شد. در سال ۲۰۱۸ مجید قلهکی و همکاران [۱۲] به بررسی شاخص آسیب دیوارهای برشی ورق فولادی پرداختند، در این راستا ۲۷ قاب شامل ۱۸ قاب با سیستم باربر جانبی از نوع دیوار برشی فولادی نازک و همچنین ۹ قاب خمشی فولادی ویژه با سه ارتفاع مختلف در پیکربندی های کوتاه، میانی و بلند مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت شاخص خرابی هر قاب برای سطوح مختلف عملکرد با استفاده از چهار شاخص پارک و انگ، تغییر مکان نسبی حداکثر، شکل پذیری و شکل پذیری پلاستیک محاسبه شد. مشاهدات نشان داد که شاخص خسارت برای قاب با سیستم باربر جانبی دیوار برشی فولادی در قاب های بلندتر نسبت به دیگر قابها نتایج مناسبتری را ارائه نموده است. در سال ۲۰۱۹ قمری و همکاران [۱۳] با جدا نمودن ورق دیوار فولادی از المان مرزی ستون و قرار دادن سخت کننده در دو سمت ورق دیوار فولادی توانستند از اعمال نیروی برشی زیاد به ستونها جلوگیری کنند، همچنین مناسبترین زاویه برای ورق دیوار فولادی برابر با ۶۰ درجه پیشنهاد شد. در مطالعه آزمایشگاهی و عددی صورت گرفته توسط ازندریانی و همکاران [۱۴] در سال ۲۰۲۰ بر روی دیوارهای برشی فولادی شامل ورقهای با تنش تسلیم پایین نشان داد که استفاده از اتصال صلب و مفصلی تیر به ستون می تواند بر عملکرد و جذب انرژی سیستم دیوار فولادی تأثیر بگذارد و مشخصات مصالح ورقهای دیوار فولادی می تواند تأثیر چینی ارتباطی را مشهودتر نماید. همچنین در سال ۲۰۲۱، کنارنگی و همکاران [۱۵] رفتار چرخه‌ای دیوار برشی کامپوزیت با شکل مقطع C را با هدف تعیین میزان مقاومت و ظرفیت جابجایی نسبی تحت بار جانبی، مورد بررسی قرار دادند که نتایج ارزشمندی در خصوص چگونگی رفتار لرزه‌ای این مدل و توسعه دستورالعمل‌های طراحی در ساختمانهای فولادی بلند مرتبه به همراه داشت. در سال ۲۰۲۲ جیان لی^۸ و همکاران [۱۶] طی یک مطالعه آزمایشگاهی و عددی، پنج نمونه دیوار برشی کامپوزیت با مقطع L شکل (دو نمونه با فلنج پهن و سه نمونه با فلنج باریک) را تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار دادند که با توجه به نتایج آزمایش، عملکرد پسماند، سختی، کاهش ظرفیت باربری، اتلاف انرژی، شکل پذیری چرخه‌ای و رفتار تأخیر برشی به تفصیل مورد بررسی قرار گرفت علاوه بر این، مدل‌های اجزای محدود توسط نرم افزار اجزای محدود ABAQUS تولید شدند در نهایت نمونه‌های با فلنج پهن ظرفیت باربری و سختی اولیه بالاتری را نشان دادند در حالی که نمونه‌های با فلنج باریک، شکل پذیری چرخه‌ای و ظرفیت اتلاف انرژی بهتری داشتند.

با توجه به مطالعه مراجع فوق، اکثر تحقیقات انجام شده با تمرکز بر دیوار برشی فولادی ساده و تحت بارگذاری چرخه‌ای یک جهته انجام شده و مطالعات بسیار محدودی در خصوص رفتار دیوار برشی فولادی با مقطع L شکل تحت بارگذاری چرخه‌ای انجام پذیرفته است، لذا در پژوهش حاضر سعی شده است با استفاده از یک روش عددی مناسب و کارآمد به بررسی ارتباط شکل مقطع این سیستم نوین و الگوی بارگذاری یک جهته و دوجهته بر عملکرد لرزه‌ای و مقایسه پاسخ‌های سازه‌ای آنها با یکدیگر پرداخته شود.



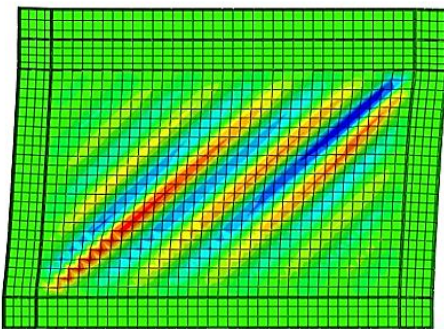
شکل ۱: نمودار روندنمای مراحل انجام تحقیق

⁸ Jian Li

پس از آماده سازی شرایط آزمایش جهت بارگذاری چرخه‌ای نمونه، از دستورالعمل بارگذاری ATC-24 استفاده شد [۲۱]. این استاندارد یکی از قدیمی‌ترین دستورالعمل‌های تدوین شده در ایالات متحده آمریکا در حوزه ارزیابی لرزه‌ای به شمار می‌رود که در آن از جابجایی تسلیم به عنوان پایه‌ای برای افزایش دامنه بارگذاری استفاده می‌گردد.

۲- صحت‌سنجی مدل‌سازی نمونه SPSW2 در نرم‌افزار ABAQUS

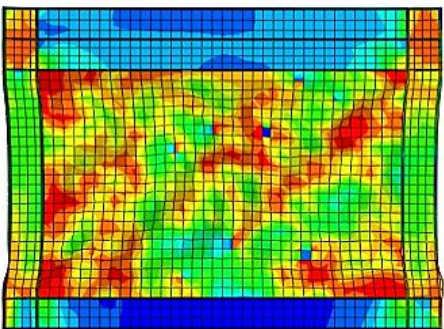
این دیوار برشی فولادی یک نمونه با ورق نازک بدون سخت کننده بوده که در این تحقیق به منظور صحت روند مدل‌سازی استفاده گردید. پاسخ‌ها تا حدود دررفت ۰/۴٪ در محدوده نزدیک الاستیک بود و پدیده کمانش موجی شکل در ورق داخلی در حدود دررفت ۰/۸٪ ظاهر شد. شکل ۳ نمونه را در دررفت ۰/۲۵٪ نشان داده است. در چرخه ۲۶ مقاومت برشی نمونه به ۷۶۵ کیلو نیوتن در ۶۰ میلی‌متر جابجایی افقی رسید و سرانجام نمونه مقدار ۰/۴۶٪ دررفت را تحمل نمود و آزمایش در چرخه ۲۸ متوقف شد، شکل ۵ نمونه را در وضعیت نهایی نشان داده است، تعدادی پارگی موضعی و گسیختگی در جوشهای شیاری فیش پلیت‌ها در چهار گوشه رخ داد.



شکل ۴: تشکیل میدان کشش قطری در ورق فولادی هنگام تحلیل



شکل ۳: تشکیل میدان کشش قطری نمونه SPSW2 در آزمایشگاه [۱۷]



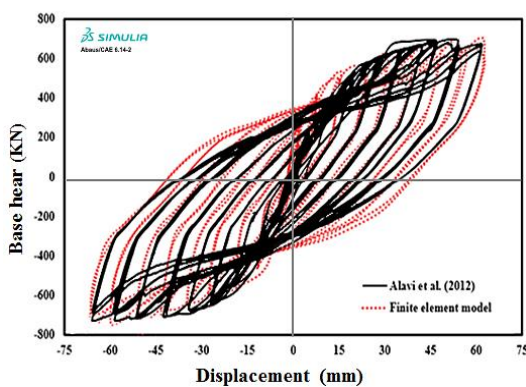
شکل ۶: توزیع تنش در حالت بارگذاری چرخه‌ای در انتهای تحلیل



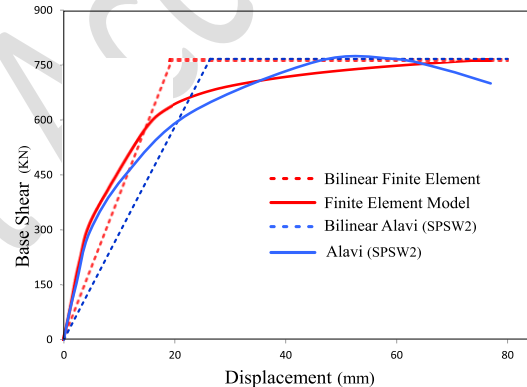
شکل ۵: تغییر شکل پلاستیک ستون نمونه SPSW2 در دررفت ۴/۵۶٪ [۱۷]

به منظور مدل‌سازی نمونه SPSW2 در نرم‌افزار آباکوس ابتدا اعضای تشکیل دهنده دیوار برشی فولادی شامل تیر، ستون و ورق فولادی، با المان ۴ گره‌ای پوسته‌ای مدل شدند سپس در کنار یکدیگر قرار گرفتند و برای اتصال به هم تمام المان‌ها با یکدیگر یکپارچه شدند. در ادامه جهت اتصال ورق فولادی به المان‌های مرزی و همچنین اتصال تیر به ستون از قید tie جهت شبیه سازی جوش نفوذی کامل استفاده گردید. برای شبیه‌سازی نقص اولیه در دیوار برشی فولادی قبل از تحلیل اصلی یک تحلیل کمانشی انجام شد. در ادامه مدل‌سازی و به منظور شبیه‌سازی رفتار مدل اجزا محدود با نمونه آزمایشگاهی، درجات آزادی بال پایینی تیر در تراز پایه مقید شد. همچنین برای رفتار دو بعدی قاب و شبیه‌سازی مهار عمود بر صفحه، چشمه اتصالات تیر در راستای عمود بر صفحه مقید شد. با توجه به مقید بودن انتهای نمونه به کف در مدل آزمایشگاهی SPSW2، هنگام مدل‌سازی در نرم افزار، شرایط گیرداری بالا و پایین دیوار برشی را مشخص کرده و در بالا و پایین دیوار برشی درجات آزادی تعیین شد، به این منظور از گزینه Displacement/Rotation استفاده گردید که هر شش درجه آزادی انتقالی و دورانی را متناسب با شرایط مدل آزمایشگاهی مسدود کرده و همچنین برای ایجاد شرایط مشابه مدل آزمایشگاه در قسمت

المانهای مرزی فوقانی کلیه درجات آزادی به غیر از حرکت در جهت X حول محور خارج از صفحه، باز گذاشته شد و گره‌های خارجی بال‌ها در پیرامون چشمه اتصال در برابر تغییر مکان در جهت X مهار گردیدند. برای انجام تحلیل استاتیکی غیر خطی در حالت رفت و برگشتی از حلگر Abaqus/Explicit استفاده شد این حلگر نسبت به حلگر استاندارد از سرعت بالاتری برخوردار می‌باشد در همین راستا بار رفت و برگشتی مطابق با دستورالعمل بارگذاری ATC-24 به نرم‌افزار معرفی شد و سپس به وسط تیرهای دابل اعمال شد. نوع بارگذاری با توجه به شرط مرزی تعریف شده از نوع جابجایی کنترل در نظر گرفته شد. در هنگام آزمایش، تاریخچه بارگذاری تغییر مکان، توسط جک به وسط تیر بالایی اعمال گردید. این روش بارگذاری در نرم‌افزار، با در نظر گرفتن یک گره مرجع در وسط جان تیر بالایی که تاریخچه بارگذاری به آن اعمال شد مدل گردید. برای توزیع نیروی این نقطه بر روی سطحی که در عمل نیرو به آن اعمال می‌شد، سطح مذکور و گره مرجع توسط گزینه Coupling به یکدیگر بسته شد و نیرو و تغییر مکان این گره برای مقایسه با نتایج آزمایشگاهی ثبت گردید. پس از تعریف بارها و شرایط تکیه‌گاهی، مدل مورد نظر مش بندی گردید و به المانهای کوچک تبدیل شد تا نرم‌افزار بتواند ماتریس سختی برای هر المان تشکیل داده و این ماتریس سختی‌ها را اسمبل و مطابق با نیروهای گره‌ای، تحلیل را انجام داده و نیروها و تغییر شکل‌های المانها را بدست آورد. برای مش بندی ابتدا از مش با ابعاد مختلف استفاده شد و در نهایت با مقایسه نتایج مشخص شد که مش با اندازه ۵۰ میلی‌متر بهترین عملکرد را دارا است. مش‌های بزرگتر باعث افزایش مقاومت نهایی مدل نسبت به نمونه آزمایشگاهی خواهد شد و در مش‌های کوچکتر با افزایش زمان تحلیل، نتایج با مش به اندازه ۵۰ میلی‌متر یکسان شد. برای مقطع تیر و ستون از مش به اندازه ۴۰ میلی‌متر استفاده شد. اما برای ورق فولادی و نیز تیر و ستون در طول از همان اندازه مش ۵۰ میلی‌متر استفاده گردید.



شکل ۸: همپوشانی مدل اجزای محدود و مدل آزمایشگاهی



شکل ۷: مقایسه منحنی نیرو- تغییر مکان و دوطرفی حاصل از تحلیل بارافزون مدل اجزای محدود و آزمایشگاه

در شکل ۷ مقایسه منحنی نیرو- تغییر مکان حاصل از تحلیل بارافزون مدل اجزای محدود و آزمایشگاه و در شکل ۸ نیز منحنی هیستریزس مدل تحلیلی به همراه مدل آزمایشگاهی آورده شده است، با مقایسه نتایج می‌توان ملاحظه نمود که سختی اولیه مدل اجزای محدود، به میزان بسیار کمی از سختی اولیه مدل آزمایشگاهی بیشتر است. همانطور که در شکل ۷ نشان داده شده است مقدار بار نهایی دو مدل، اختلاف اندکی با یکدیگر دارند با توجه به اینکه مقدار مقاومت نهایی در نمونه آزمایشگاهی علوی برابر ۷۶۷/۲ کیلو نیوتن و نمونه اجزای محدود برابر با ۷۶۵/۱ کیلو نیوتن می‌باشد میزان خطای صحت سنجی برابر ۰/۲۸ درصد بدست آمد که بیانگر تطابق رضایت بخش بین منحنی‌های چرخه‌ای آزمایشی و تحلیل عددی خواهد بود. با توجه به تطابق قابل قبول نتایج، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که مدل‌سازی و فرضیات در نظر گرفته شده در تحلیل، از دقت قابل قبولی برخوردار بوده و می‌توان از مدل‌سازی انجام شده برای بررسی پارامترهای مختلف استفاده نمود.

۳- مدل‌سازی نمونه‌های مورد مطالعه

در این تحقیق ۷ مدل دیوار برشی فولادی L شکل تحت دو نوع الگوی بارگذاری یک‌جهته و الگوی بارگذاری دوجهته در مجموع ۱۴ مدل با توجه به پارامترهایی نظیر ضخامت ورق جان، شکل مقطع المانهای مرزی عمودی، نوع فولاد مصرفی و نحوه اتصال المانهای

مرزی افقی و عمودی به یکدیگر انتخاب و مدل سازی شدند. جهت ارزیابی رفتار این مدل ها ابتدا نمونه های اصلی (شاهد) طراحی شده و در ادامه نمونه های مورد بررسی با توجه به مشخصات نمونه های اصلی و اعمال پارامترهای مذکور ایجاد گردید.

۳-۱ طراحی مقاطع با استفاده از روش ظرفیتی

در آیین نامه طراحی لرزه ای سازه های فولادی آمریکا^{۱۲} دیوارهای برشی فولادی بدون سخت کننده و با ورق نازک جان، عموماً به عنوان دیوارهای برشی فولادی ویژه طراحی می شوند، این آیین نامه شامل ضوابط طراحی برای دیوارهای برشی فولادی ویژه و برای مناطق با خطر لرزه خیزی بالا می باشد [۱۸]. این دیوارها دارای جان نازک هستند که قادرند نیروهای کششی بزرگ را تحمل نمایند اما مقاومت فشاری آنها بسیار کم و ناچیز و در حد صفر است. در این روش، ورق فولادی برای تحمل صد درصد برش طبقه طراحی می شود و از مشارکت قاب پیرامونی در انتقال برش طبقه صرف نظر می گردد، در ضوابط لرزه ای آیین نامه فولاد آمریکا و راهنمای طراحی دیوارهای برشی فولادی^{۱۳}، طراحی تیرها و ستون ها به میزان نیروهای وارده ناشی از میدان کششی وابسته می باشد به عبارت دیگر افزایش ضخامت ورق فولادی، نیروی انتقالی ناشی از میدان کشش ورق به المان های مرزی دیوار را افزایش می دهد که منجر به افزایش ابعاد ستون ها می گردد. طراحی های معمولی نشان داده اند که زاویه تنش کششی از ۳۰ درجه تا ۵۵ درجه تغییر می کند. در این تحقیق دیوار برشی فولادی جزئی از سیستم باربری جانبی در یک ساختمان ۱۵ طبقه با سیستم قاب خمشی دوگانه متشکل از قاب خمشی فولادی و دیوار برشی فولادی فرض شده و طراحی مقاطع بر این اساس انجام پذیرفته است. طراحی اولیه ضخامت ورق جان بر اساس یک زاویه مفروض آلفا محاسبه گردیده است. با فرض $\alpha=30^\circ$ درجه زاویه تنش کششی و داشتن طول و ارتفاع دیوار برشی فولادی ابتدا با استفاده از رابطه (F5-1) آیین نامه AISC 341-16 یک ضخامت اولیه برای ورق جان بدست آمد.

$$t_w \geq \frac{V_u}{\phi 0.42 F_{y(Plate)} L_{cf} \sin(2\alpha)} \quad (1)$$

در رابطه ۱ پارامتر t_w ضخامت طراحی ورق جان، V_u مقاومت برشی مورد نیاز و L_{cf} فاصله خالص پانل جان بین بالهای المانهای مرزی قائم است. پس از تعیین ضخامت ورق جان، انتخاب اولیه المانهای مرزی قائم بر اساس سختی مورد نیاز داده شده در بخش F5-4a آیین نامه AISC 341-16 انجام پذیرفت.

$$I_c \geq 0.00307 \frac{t_w h^4}{L} \quad (2)$$

در رابطه ۲، I_c ممان اینرسی المان مرزی قائم، عمود بر خط ورق جان بوده، L فاصله بین خطوط مرکزی المانهای مرزی قائم و h فاصله بین خطوط مرکزی المانهای مرزی افقی است که در نهایت مقاطع المانهای مرزی عمودی بر اساس ممان اینرسی حداقل حاصل شده است. در ادامه به منظور طراحی اولیه المانهای مرزی افقی نیروی اعمالی از طرف ورق جان از زاویه آلفا انتخابی به دست آمده است. در آیین نامه AISC 341-16 پیشنهاد شده است المانهای مرزی افقی یک سختی حداقلی را شبیه به آنچه برای المانهای مرزی قائم می باشند تامین نماید. در این رابطه Δt_w اختلاف در ضخامت ورق جان بالا و پایین المان مرزی افقی است.

$$I_{HBE(req)} \geq 0.003 \frac{\Delta t_w L^4}{h} \quad (3)$$

پس از محاسبه و طراحی مقاطع المانهای مرزی قائم و افقی و تعیین ضخامت جان، مجدداً زاویه میدان کششی قطری بر اساس مقاطع طراحی شده محاسبه گردید، به این منظور از رابطه ۲-۱۷ آیین نامه AISC 341 استفاده شده است.

$$\tan^4(\alpha) = \frac{1 + \frac{t_w L}{2A_c}}{1 + t_w h \left(\frac{1}{A_b} + \frac{h^3}{360I_c L} \right)} \quad (4)$$

¹² AISC 341-16

¹³ Design Guide 20

در رابطه ۴، A_c و I_c به ترتیب سطح مقطع و ممان اینرسی ستونهای کناری، h ارتفاع طبقه و A_b سطح مقطع تیر است.

جدول ۲: مشخصات مقاطع نمونه شاهد دیوار برشی فولادی

نمونه شاهد	المان مرزی افقی (HBE)	المان مرزی قائم (VBE)	ورق جان (WP)	زاویه میدان کشش قطری (α)
SL ₁ *, SF ₁ *	۲۵×۱۸×۳۴۰×۴۰۰-PG	۴۰×۳۴۰-BOX	۱۱×۴۶۶۰-PL	۹/۵ درجه

۲-۳ نمونه‌های تحلیلی ایجاد شده در نرم افزار ABAQUS

جهت ارزیابی و مقایسه رفتار نمونه‌های دیوار برشی فولادی L شکل تحت الگوی بار دوجبهته و یکجبهته مطابق جدول ۲، ابتدا نمونه اصلی (شاهد) ساخته شد و مورد تحلیل غیرخطی شبه‌استاتیکی با استفاده از حلگر Abaqus/Standard قرار گرفت، در ادامه نمونه‌های جدید از روی مدل‌های اصلی با توجه به تغییر در پارامترهایی نظیر ضخامت ورق جان، شکل هندسی مقطع، نوع فولاد مصرفی در المانهای مرزی، مقطع کاهش یافته در المانهای مرزی افقی، مدل‌سازی و مورد بررسی قرار گرفتند.

جدول ۳: پارامترهای موثر در ایجاد نمونه‌های تحلیلی

ردیف	مؤلفه تعیین کننده	متغیر
۱	تغییر در ضخامت ورق جان	ضخامت‌های ۹mm، ۱۳mm، ۱۱mm
۲	نوع اتصال تیر به ستون	اتصال مفصلی ساده (Simple Joint)، اتصال گیردار کامل تیر با مقطع کاهش یافته (RBS)
۳	فولاد مصرفی در المانهای مرزی	فولاد نرمه (ST37)، فولاد پرمقاومت (ST52)
۴	شکل مقطع المانهای مرزی عمودی	BOX، HEB

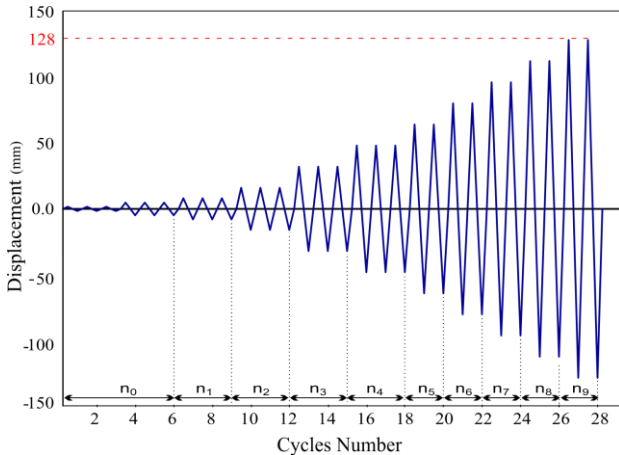
جدول ۴: مشخصات نمونه‌های عددی دیوار برشی فولادی L شکل

مشخصات نمونه‌های تحلیلی	ورق جان (mm)	المان مرزی افقی (mm)	المان مرزی عمودی (mm)	الگوی بارگذاری نمونه‌های عددی	
				دوجبهته	یکجبهته
نمونه دارای ضخامت ورق جان ۱۱ میلی‌متر	۱۱×۴۶۶۰-PL	۲۵×۱۸×۳۴۰×۴۰۰-PG	۴۰×۳۴۰-BOX	SL ₁ *	SF ₁ *
نمونه دارای ضخامت ورق جان ۱۳ میلی‌متر	۱۳×۴۶۶۰-PL	۲۵×۱۸×۳۴۰×۴۰۰-PG	۴۰×۳۴۰-BOX	SL ₂	SF ₂
نمونه دارای ضخامت ورق جان ۹ میلی‌متر	۹×۴۶۶۰-PL	۲۵×۱۸×۳۴۰×۴۰۰-PG	۴۰×۳۴۰-BOX	SL ₃	SF ₃
نمونه با اتصال RBS تیر به ستون	۱۱×۴۶۶۰-PL	۲۵×۱۸×۳۴۰×۴۰۰-PG	۴۰×۳۴۰-BOX	SL ₄	SF ₄
نمونه با اتصال ساده تیر به ستون	۱۱×۴۶۶۰-PL	۲۵×۱۸×۳۴۰×۴۰۰-PG	۴۰×۳۴۰-BOX	SL ₅	SF ₅
نمونه دارای فولاد پرمقاومت ST52 در ستون	۱۱×۴۶۶۰-PL	۲۵×۱۸×۳۴۰×۴۰۰-PG	۴۰×۳۴۰-BOX	SL ₆	SF ₆
نمونه دارای مقطع HEB در ستون	۱۱×۴۶۶۰-PL	۲۵×۱۸×۳۴۰×۴۰۰-PG	۴۲×۲۰×۴۰۰×۳۴۰-HEB	SL ₇	SF ₇

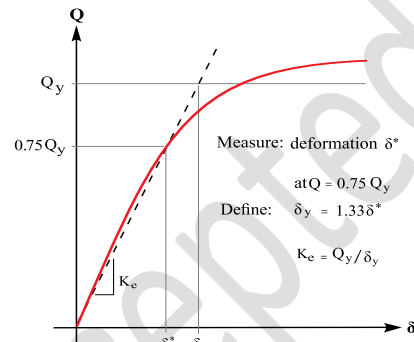
پس از مدل‌سازی نمونه‌های مورد تحقیق، مش‌بندی و معرفی شرایط مرزی و اولیه در نرم افزار اجزای محدود ABAQUS، بارگذاری و تحلیل بر روی نمونه‌ها انجام شد.

۳-۳ بارگذاری چرخه‌ای نمونه‌ها

در این تحقیق به منظور اعمال بار یک‌جهته^{۱۴} بر روی نمونه‌های اجزای محدود* SF₁ تا SF₇ از دستورالعمل بارگذاری^{۱۵} ATC-24 و جهت بارگذاری دوجته بر روی نمونه‌های SL₁* تا SL₇ از آیین‌نامه FEMA 461 مطابق با الگوی بار پیشنهادی استفاده شد. استاندارد ATC-24 یکی از قدیمی‌ترین دستورالعمل‌های تدوین شده در ایالات متحده آمریکا در حوزه ارزیابی لرزه‌ای به شمار رفته که در آن از جابجایی تسلیم به عنوان مبنایی برای افزایش دامنه بارگذاری استفاده شده است.



شکل ۱۰: تاریخچه بارگذاری چرخه‌ای یک‌جهته (ATC24)



شکل ۹: تعیین مقادیر نیرو تغییرمکان تسلیم و سختی الاستیک (ATC24)

۳-۳-۱ بارگذاری چرخه‌ای یک‌جهته

به منظور تعیین تغییرمکان نقطه جاری شدن و استفاده از این پارامتر جهت تعیین تاریخچه بارگذاری چرخه‌ای یک‌جهته، ابتدا یک تحلیل استاتیکی غیرخطی بارافزون^{۱۶} انجام شد و پس از ترسیم منحنی نیرو-تغییرمکان، منحنی حاصله، دوخطی شده و با استفاده از روابط پیشنهادی آیین‌نامه ATC-24 و شکل ۹ ابتدا مقدار δ^* بدست آمده و δ_y با استفاده از نمودار و روابط زیر حاصل شد. Q_y مقاومت تسلیم سازه بوده و تخمین Q_y می‌تواند بر اساس نتایج حاصله از یک آزمایش با بارگذاری یکنواخت (بارافزون) بدست آید. جهت اعمال تاریخچه بارگذاری تغییرمکان، در Abaqus/Standard یک نقطه مرجع^{۱۷} در وسط تیر بالایی، مدل شد و برای توزیع نیروی این نقطه بر روی سطحی که در عمل نیرو به آن اعمال شده است، سطح مذکور و گره مرجع، توسط گزینه کوپلینگ^{۱۸} به یکدیگر بسته شدند به کمک این قید حرکت یک سطح به حرکت یک نقطه مقید شده است.

۳-۳-۲ بارگذاری چرخه‌ای دوجته

در این تحقیق جهت انجام بارگذاری دوجته رفت و برگشتی^{۱۹}، از آیین‌نامه FEMA 461^{۲۰} استفاده شد [۱۹]. استفاده از این دستورالعمل امکان شبیه‌سازی آثار لرزه‌ای محتمل در مقطع ستونهای دیوار برشی فولادی L شکل را فراهم می‌نماید. هنگامی که خسارت قابل توجهی تحت بارگذاری لرزه‌ای در جهات گوناگون پیش‌بینی شود، آزمایش می‌بایست تحت بارگذاری دوجته چرخه‌ای انجام گردد. تغییرشکل دوجته ممکن است به دنبال الگوی مداری شش ضلعی پیشنهاد شده در FEMA 461 اعمال شود بر این اساس آزمایش دوجته باید با استفاده از نسبت اولیه دریافت یک محوره^{۲۱} یعنی تاریخچه بارگذاری نشان داده شده در شکل ۱۱ شروع شود. به طور کلی روند بارگذاری چرخه‌ای دوجته و نحوه اعمال تاریخچه تغییرمکان حاصله به قاب در نمونه اصلی، به ترتیب زیر انجام پذیرفته است:

¹⁴ Unidirectional Loading

¹⁵ protocol

¹⁶ Pushover analysis

¹⁷ Reference Point

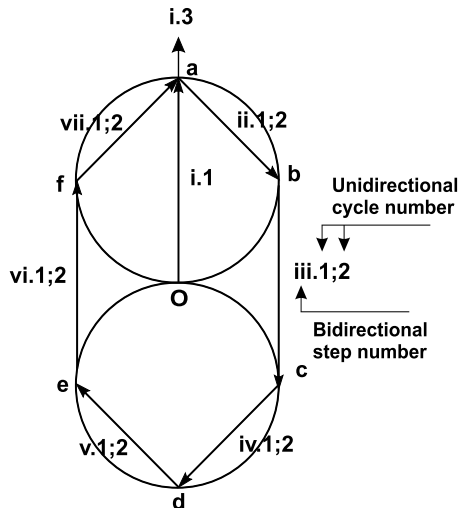
¹⁸ Coupling

¹⁹ Bidirectional Load Reversals

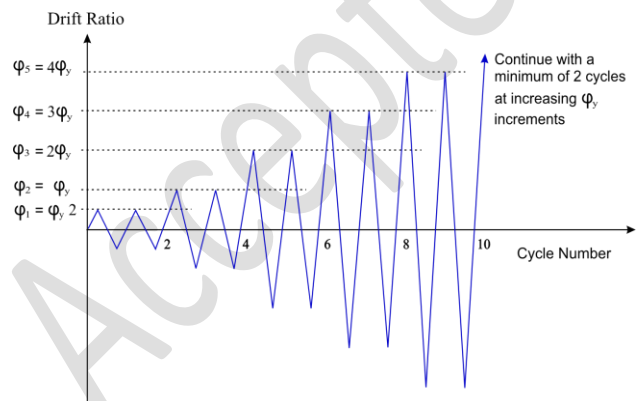
²⁰ Federal Emergency Management Agency

²¹ Unidirectional

۱- انجام تحلیل بارافزون دوجته بر روی مدل اصلی و رسم منحنی نیرو-تغییرمکان تا دریافت نهایی ۲- استخراج تغییرمکان نقطه تسلیم (Φ_Y) پس از دو خطی کردن منحنی نیرو-تغییرمکان ۳- پیاده سازی الگوی بارگذاری پیشنهادی FEMA 461 با داشتن تغییرمکان نقطه تسلیم (Φ_Y) ۴- با توجه به شکل ۱۲ بارگذاری در چرخه اول و مرحله اول (i.1) از مرکز الگو در نقطه (o) به اندازه $\Phi_Y/2$ آغاز شده و در مرحله دوم (ii.1) از چرخه اول به $\Phi_Y/4$ می رسد و به همین ترتیب مطابق با الگو تا پایان چرخه اول در نقطه (a) ادامه پیدا می کند. ۵- چرخه اول و دوم بارگذاری از نظر تغییرمکان اعمال شده در شروع بارگذاری با یکدیگر برابر و به مقدار $\Phi_Y/2$ می باشد ۶- چرخه های فرد برابر ۷ مرحله و چرخه های زوج برابر ۶ مرحله می باشد ۷- استخراج تاریخچه بارگذاری تا تغییرمکان نهایی در دو راستای اصلی و فرعی ۸- معرفی تاریخچه بارگذاری تغییرمکانی برای محورهای اصلی و فرعی به نرم افزار آباکوس به عنوان دو Amplitude مجزا جهت اعمال بار تغییرمکانی به نمونه اصلی.



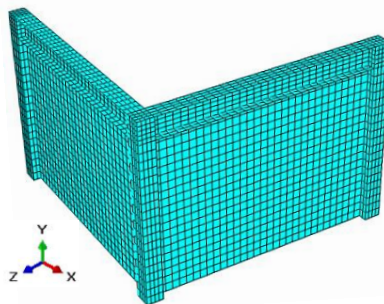
شکل ۱۲: الگوی مداری (اوربیتال) دو چرخه اول برای بارگذاری
دوجهته (FEMA461) [۱۹]



شکل ۱۱: تاریخچه بارگذاری تغییرشکل تحت بار رفت و برگشتی

۴- تحلیل عددی

در این تحقیق برای مدل سازی کلیه نمونه ها و اعضای آنها اعم از ورق جان دیوار و اعضای قاب پیرامونی، از المان پوسته ای چهارگره ای S4R و روش انتگرال گیری کاهش یافته استفاده شده است. هر گره دارای سه درجه آزادی انتقالی (u_x, u_y, u_z) و سه درجه آزادی دورانی ($\theta_x, \theta_y, \theta_z$) می باشد. المان S4R، چرخش های بزرگ و کرنش های اجزای محدود را در نظر گرفته و امکان تغییر در ضخامت را ایجاد می کند بنابراین برای تحلیل های با کرنش بزرگ و برای مصالحی که ضریب پواسون مؤثر آنها غیر صفر است و همچنین مواردی که غیرخطی شدن هندسی و غیرخطی شدن مواد ممکن است رخ دهد، مناسب می باشد. مشخصات مقاطع عرضی با استفاده از انتگرال گیری های متعددی در ضخامت صفحه، محاسبه می شود. المان S4R، از یک روش انتگرال گیری کاهش یافته استفاده می کند، به نحوی که فقط از یک نقطه انتگرال گیری در مرکز صفحه استفاده می کند. این روش می تواند نتایج دقیق تری را رقم بزند و در عین حال نسبت به حالت استفاده از المان هایی که بصورت کامل انتگرال گیری در آنها انجام می شود و به خصوص در مسائل سه بعدی، زمان تحلیل را به مراتب کاهش خواهد داد.



شکل ۱۳: مدل مش بندی شده دیوار برشی فولادی L شکل

به منظور در نظر گرفتن نقص عضو و تامین شرایط اولیه قبل از بارگذاری، ابتدا یک تحلیل کمانشی برای تعیین ۴ مود اول کمانش ورق جان صورت پذیرفت. همچنین جهت جلوگیری از کمانش خارج از صفحه درجات آزادی چشمه اتصال تیر بالایی در برابر تغییر مکان خارج از صفحه بسته شد و شرایط تکیه گاهی پای ستون ها نیز بصورت گیردار فرض شد و درجات آزادی آنها بسته شد. در هر دو روش اعمال بار دیوار برشی تحت بارگذاری رفت و برگشتی قرار گرفت و تحلیل غیرخطی از نوع کنترل جابجایی^{۲۲} با توجه به مفروضات نمونه صحت سنجی شده (SPSW2) دریافت هدف برابر ۲/۵٪ و دریافت نهایی برابر با ۴٪. منظور گردید. در ادامه تنش ها، کرنش های پلاستیک و جابجایی ها جهت بررسی نتایج استخراج شد.

۴-۱ تحلیل غیرخطی یک جهته به روش کنترل جابجایی

به منظور دستیابی به اطلاعات کلی در مورد سختی، مقاومت، ظرفیت شکل پذیری، اثرات سخت شوندگی و همچنین ارزیابی رفتار لرزه ای سیستم تحت الگوی بار یک جهته از تحلیل شبه استاتیکی چرخه ای و بارگذاری رفت و برگشتی مطابق دستورالعمل نشریه ATC-24 استفاده گردید. برابری مندرج در این دستورالعمل، شش چرخه اول بارگذاری الاستیک بوده و مقدار تغییر مکان آنها کمتر از تغییر مکان نقطه جاری شدن اختیار شد. در این چرخه ها بار اعمالی به سیستم به صورت کنترل شونده توسط جابجایی به نمونه ها وارد شد. مطابق بند ۴-۱ این نشریه، تعیین تعداد چرخه ها و تغییر مکان بیشینه هر گام بارگذاری، به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

- تعداد چرخه های n_0 با تغییر مکان بیشینه کوچکتر از δ_y باید حداقل برابر ۶ باشد.
- تعداد چرخه های n_1 با تغییر مکان بیشینه برابر با δ_y باید حداقل برابر ۳ باشد.
- تعداد چرخه های n_2 با تغییر مکان بیشینه برابر با $\delta_2 = \delta_y + \Delta$ باید حداقل برابر ۳ باشد.
- تعداد چرخه های n_3 با تغییر مکان بیشینه برابر با $\delta_3 = \delta_y + 2\Delta$ باید حداقل برابر ۳ باشد.
- تعداد چرخه های n_3 تا n_m با تغییر مکان بیشینه برابر با $\delta_4 = \delta_y + 3\Delta$ تا $\delta_m = \delta_y + (m-1)\Delta$ باید حداقل برابر ۲ باشد.

به منظور تعیین تغییر مکان نقطه جاری شدن و استفاده از این پارامتر جهت تعیین تاریخچه بارگذاری چرخه ای، ابتدا یک تحلیل استاتیکی غیرخطی بارافزون انجام شد و پس از ترسیم منحنی نیرو - تغییر مکان، منحنی دوطرفی شده و با استفاده از روابط پیشنهادی ATC-24 ابتدا مقدار δ^* بدست آمده و δ_y با استفاده از نمودار و روابط مربوطه حاصل شد. در ادامه پس از بدست آمدن δ_y و دریافت تغییر مکان هدف ۲/۵٪ متناظر با جابجایی ۸۰ میلی متر و دریافت نهایی ۴٪ متناظر با جابجایی ۱۲۸ میلی متر، تاریخچه تغییر مکان نقطه کنترل در تیر بالایی و در راستای اصلی جهت انجام تحلیل غیرخطی به نرم افزار اجزای محدود معرفی شد. به منظور مدل سازی نقطه کنترل جهت اعمال تاریخچه بارگذاری تغییر مکان به قاب، یک نقطه مرجع در وسط تیر بالایی مدل گردید و برای توزیع نیروی این نقطه بر روی سطحی که در عمل نیرو به آن اعمال می شود سطح مذکور و گره مرجع، توسط گزینه Coupling به یکدیگر بسته شدند این قید کمک می کند تا بتوان حرکت یک سطح را به حرکت یک نقطه مقید کرد.

۴-۲ تحلیل غیرخطی دوجته به روش کنترل جابجایی

جهت انجام تحلیل غیرخطی دوجته، ابتدا با توجه به توصیه آیین نامه FEMA 461 نیاز به مقدار تغییر مکان نقطه تسلیم منحنی ظرفیت مدل خواهد بود که مطابق با روش زیر انجام شد:

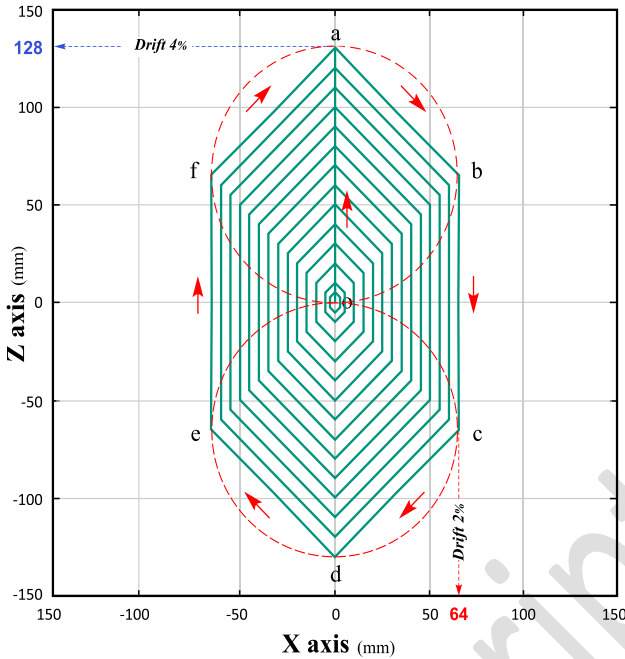
- تحلیل دوجته بارافزون نمونه مورد نظر به منظور بدست آوردن تغییر مکان نقطه تسلیم با توجه به توصیه آیین نامه FEMA 356 در خصوص اثرات لرزه ای چند جهته^{۲۳} و همزمانی مولفه های لرزه ای اعمال شده [۲۰].
- استخراج تغییر مکان نقطه تسلیم پس از دو خطی کردن منحنی نیرو- تغییر مکان حاصله از تحلیل دوجته بارافزون.

²² Displacement Control

²³ Multidirectional Seismic Effects

- پیاده سازی الگوی بارگذاری اوربیتال شش ضلعی^{۲۴} به روش پیشنهادی FEMA 461.
- استخراج مختصات تغییرمکانهای رئوس شش ضلعی بارگذاری در ۲۸ چرخه با کمک منحنی تاریخچه بارگذاری تک محوره رفت و برگشتی^{۲۵}.
- ترسیم تاریخچه بارگذاری، جهت اعمال بار در دو راستای اصلی Z و فرعی X به عنوان دو Amplitude در محل نقطه کنترل قاب و در موقعیت وسط تیر بالایی.

جدول ۵: تاریخچه تغییرمکان دوجته (FEMA461)



شکل ۱۴: الگوی بارگذاری مداری (اوربیتال) شش ضلعی در ۲۸

چرخه

برای بارگذاری دوجته (FEMA 461)

Analysis Step	Number of Cycle	Step Time	Cumulative Time	Displacement (mm)	Drift Ratio Percent (%)	
7	Cycle 1	45	45	$\Phi_Y/2$	5	0.16 %
13	Cycle 2	40	85	$\Phi_Y/2$	5	0.16 %
20	Cycle 3	45	130	Φ_Y	10	0.31 %
26	Cycle 4	40	170	Φ_Y	10	0.31 %
33	Cycle 5	45	215	$2\Phi_Y$	20	0.63 %
39	Cycle 6	40	255	$2\Phi_Y$	20	0.63 %
46	Cycle 7	45	300	$3\Phi_Y$	30	0.94 %
52	Cycle 8	40	340	$3\Phi_Y$	20	0.63 %
59	Cycle 9	45	385	$4\Phi_Y$	40	1.25 %
65	Cycle 10	40	425	$4\Phi_Y$	40	1.25 %
72	Cycle 11	45	470	$5\Phi_Y$	50	1.56 %
78	Cycle 12	40	510	$5\Phi_Y$	50	1.56 %
85	Cycle 13	45	555	$6\Phi_Y$	60	1.88 %
91	Cycle 14	40	595	$6\Phi_Y$	60	1.88 %
98	Cycle 15	45	640	$7\Phi_Y$	70	2.19 %
104	Cycle 16	40	680	$7\Phi_Y$	70	2.19 %
111	Cycle 17	45	725	$8\Phi_Y$	80	2.50 %
117	Cycle 18	40	765	$8\Phi_Y$	80	2.50 %
124	Cycle 19	45	810	$9\Phi_Y$	90	2.81 %
130	Cycle 20	40	850	$9\Phi_Y$	90	2.81 %
137	Cycle 21	45	895	$10\Phi_Y$	100	3.13 %
143	Cycle 22	40	935	$10\Phi_Y$	100	3.13 %
150	Cycle 23	45	980	$11\Phi_Y$	110	3.44 %
156	Cycle 24	40	1020	$11\Phi_Y$	110	3.44 %
163	Cycle 25	45	1065	$12\Phi_Y$	120	3.75 %
169	Cycle 26	40	1105	$12\Phi_Y$	120	3.75 %
176	Cycle 27	45	1150	$13\Phi_Y$	130	4.06 %
182	Cycle 28	40	1190	$13\Phi_Y$	130	4.06 %

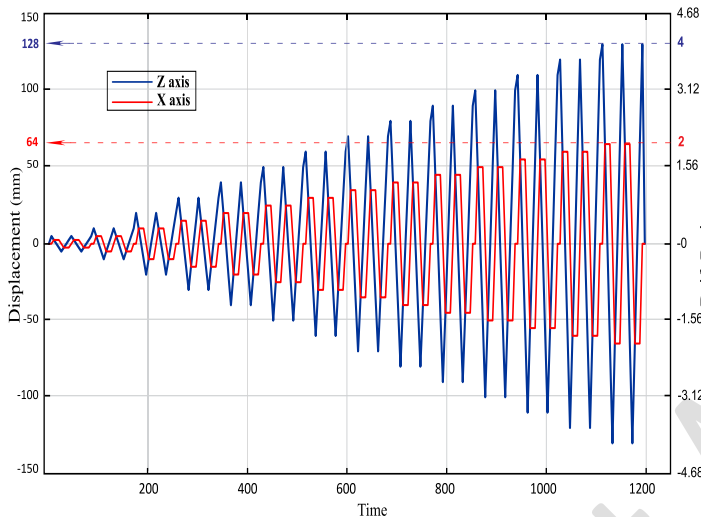
برای بررسی رفتار سازه و مولفه‌های آن در برابر نیروهای لرزه‌ای، ایجاد یک تاریخچه بارگذاری هماهنگ برای آزمایش، که الگو مناسبی از واقعیت را نشان دهد لازم است. با انجام تحلیل بارافزون دوجته، پس از دوخطی کردن منحنی بار تغییرمکان (شکل ۱۵)، مقدار تغییرمکان نقطه تسلیم برابر ۱۰ میلی‌متر بدست آمد که این مقدار به عنوان معیار تسلیم برای ایجاد الگوی بارگذاری اوربیتال شش ضلعی براساس روش پیشنهادی FEMA 461 انتخاب شد. سپس با داشتن تغییرمکان نقطه تسلیم، مقادیر $\Phi_Y/2$ ، $\Phi_Y/4$ ، $2\Phi_Y$ تا $13\Phi_Y$ منتج و مختصات نقاط a, b, c, d, e, f در دو راستای Z و X و در ۲۸ چرخه مطابق شکل ۱۴ استخراج و الگوی بارگذاری اوربیتال شش ضلعی ترسیم گردید، در نهایت تاریخچه بارگذاری تغییرمکان دوجته رفت و برگشتی برای محورهای Z و X ترسیم و هر تاریخچه بارگذاری به عنوان یک دامنه به نرم‌افزار جهت تحلیل مدل معرفی شد. در شکل ۱۴ الگوی بارگذاری اوربیتال دوجته ترسیم شده است، بارگذاری ابتدا با مبدا O در مرکز الگو آغاز و مطابق با توصیه آیین نامه FEMA 461 در گام اول به اندازه $\Phi_Y/2$ معادل ۵ میلی‌متر در راستای محور Z به راس a در شش ضلعی اول رسید و در گام دوم با برگشت به اندازه $\Phi_Y/4$ معادل ۲/۵ میلی‌متر در دو راستای Z و X به راس b در شش ضلعی اول رسید و در گام سوم مجدداً به مقدار $\Phi_Y/2$ در امتداد محور -Z تا راس c ادامه پیدا کرد و متناسب با الگو به همین ترتیب تا نقطه a در شش ضلعی اول ادامه یافت و چرخه اول بارگذاری در ۷ گام تکمیل شد. در ادامه از نقطه a یک چرخه کامل مشابه چرخه اول طی شد تا چرخه دوم نیز

²⁴ Hexagonal orbital pattern

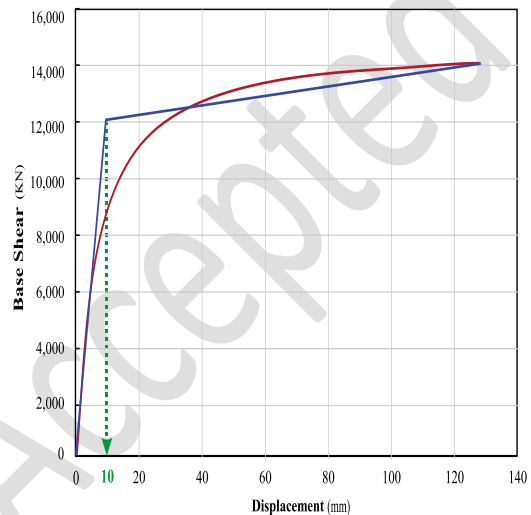
²⁵ Unidirectional Load Reversals

در در شش ضلعی اول و گام ۱۳ تکمیل گردید در این مرحله مطابق توصیه آیین نامه مقدار بارگذاری با دو برابر شدن به مختصات Φ_Y معادل ۱۰ میلی‌متر از مبدا O و در راستای Z منتقل شد و دو چرخه دیگر به همین ترتیب تا رسیدن به نقطه $2\Phi_Y$ معادل ۲۰ میلی‌متر ادامه یافت و در نهایت پس از ۱۸۲ گام به موقعیت $13\Phi_Y$ در نقطه a، واقع در راس شش ضلعی چهاردهم رسید که این نقطه معادل دررفت نهایی ۴٪ و انتهای چرخه ۲۸ خواهد بود.

در جدول ۵ چرخه‌های بارگذاری تا تغییرمکان ۱۳۰ میلی‌متر نشان داده شده است. پس از بدست آمدن مختصات نقاط رئوس شش ضلعی در ۲۸ چرخه، تاریخچه تغییرمکان در دو راستای بارگذاری X و Z به منظور اعمال در نرم‌افزار آباکوس، به صورت شکل ۱۶ می‌باشد.



شکل ۱۶: نمودار تاریخچه تغییرمکان دوجبهته در راستای محورهای Z و X بر اساس ۲۸ چرخه (FEMA 461)



شکل ۱۵: استخراج تغییرمکان نقطه تسلیم از منحنی دوطرفه بار تغییرمکان پس از تحلیل بارافزون دوجبهته

۵- تحلیل و بررسی نتایج

تحلیل نمونه‌های دیوار برشی فولادی L شکل با رعایت ضوابط و شیوه پیشنهادی آیین‌نامه‌های ATC-24 و FEMA 461 انجام پذیرفت و کانتورهای توزیع تنش، کرنش‌های پلاستیک و جابجایی‌ها استخراج شد. خروجی تحلیل‌های چرخه‌ای، منحنی‌های هیستریزس و نمودار بار-تغییرمکان بوده که جهت ارزیابی رفتار انواع مدل‌ها از لحاظ مشخصه‌های رفتاری عمده، شامل سختی، مقاومت، شکل‌پذیری و جذب انرژی و وضعیت جمع شدگی منحنی هیستریزس^{۲۶} مورد استفاده قرار گرفت. نمودار بار-تغییرمکان حاوی اطلاعات ارزشمندی در خصوص رفتار لرزه‌ای هر سازه است. پارامترهای مهم لرزه‌ای هر سازه را می‌توان از ساده سازی این نمودارها محاسبه نمود. همچنین با مشاهده نمودار بار-تغییرمکان می‌توان رفتار کلی سازه را استنباط نمود.

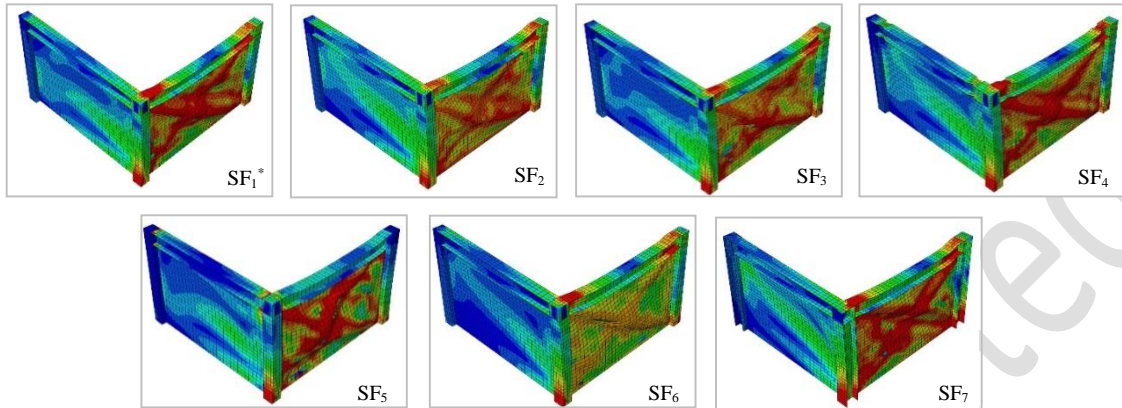
۵-۱ نتایج تحلیل غیرخطی تحت بارگذاری یک‌جبهته بر اساس ATC-24

پس از شروع بارگذاری، میدان کششی قطری در تمامی نمونه‌ها تشکیل شد و تا تغییرمکان هدف برابر ۸۰ میلی‌متر، معادل دررفت ۵/۲٪، هیچ گونه کمانشی درالمانهای مرزی افقی بوجود نیامد در نهایت بارگذاری تا دررفت ۴٪ و تغییرمکان نظیر ۱۲۸ میلی‌متر با هدف بررسی بیشتر ظرفیت باربری سازه ادامه یافت. با توجه به شکل ۱۷، کانتورهای تنش^{۲۷} ایجاد شده در نمونه‌های SF₁، SF₂، SF₃، SF₄ و SF₇ نشان می‌دهد که مود خرابی، جاری شدن ورق جان در مرحله اول و در ادامه تشکیل مفصل پلاستیک در تیر بالایی بوده است. در نمونه SF₅ یعنی مدل با اتصال مفصلی تیر به ستون، جاری شدن ورق جان در ابتدا رخ داده و سپس مفصل پلاستیک در پای ستون ایجاد شده است.

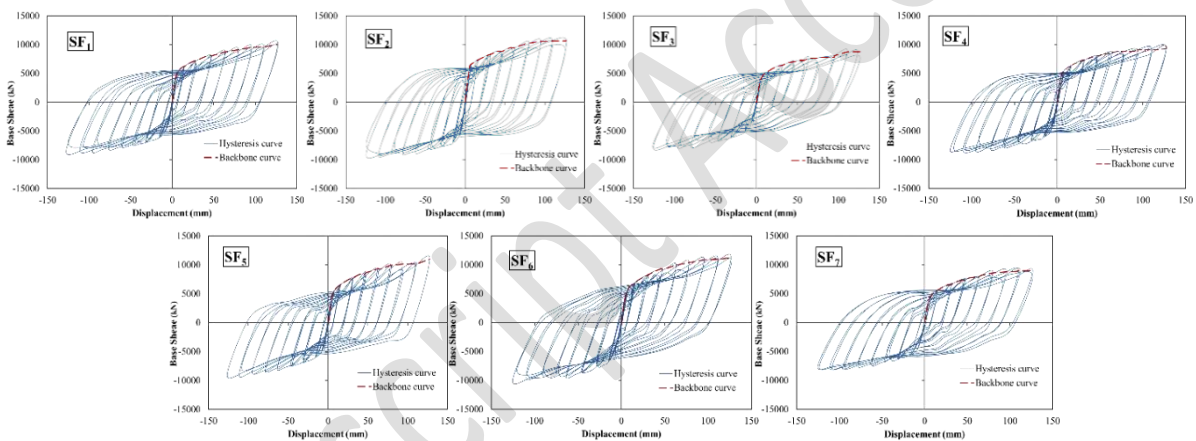
²⁶ Pinching

²⁷ stress contours

در نمونه SF₆ مدل با فولاد پر مقاومت در قاب پیرامونی، قبل از جاری شدن ورق جان، المان مرزی افقی به نقطه تسلیم رسیده و تنش بیشتری به دلیل مقاومت بالای خود تحمل کرده است که این امر یک مود رفتاری نامطلوب به شمار می‌رود. آیین نامه AISC 341-16 در خصوص طراحی لرزه‌ای دیوار برشی فولادی مقرر می‌دارد که تسلیم کششی ورق جان اولین مکانیزم تسلیم در دیوار برشی فولادی باشد.



شکل ۱۷: کانتورهای تنش فون میزس حاصل از تحلیل غیرخطی تحت بارگذاری چرخه‌ای یک‌جهته تا دریفت ۴٪



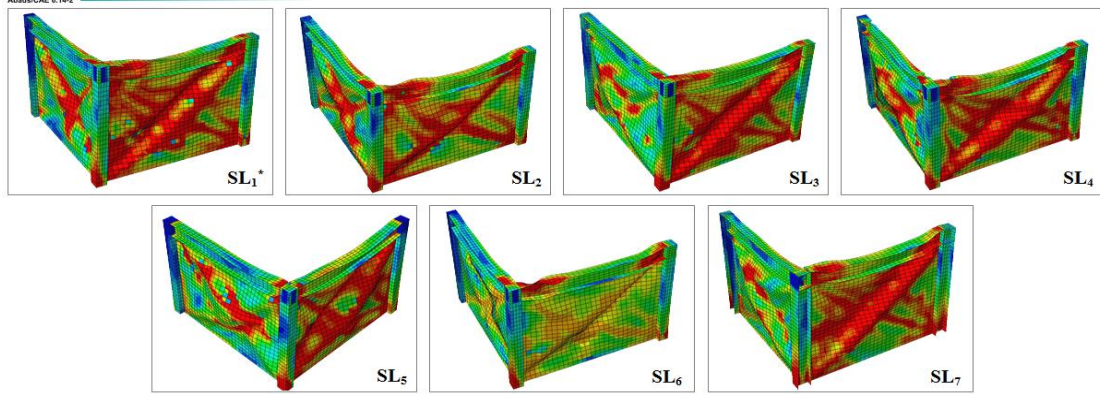
شکل ۱۸: منحنی‌های هیستریزس حاصل از تحلیل غیرخطی بارگذاری یک‌جهته بر اساس ATC 24

شکل ۱۸ نشان می‌دهد که نمونه‌ها دارای رفتار هیستریزس پایدار بوده و کاهش مقاومت در چرخه‌های بارگذاری بسیار کم است. در دیوارهای برشی فولادی، گرچه ورق فولادی در مراحل اولیه بارگذاری کم‌انرژی می‌نماید، ولی این مطلب به منزله ناپایداری سیستم تلقی نمی‌گردد. منحنی‌ها دوکی شکل هستند، بیشترین سطح منحنی متعلق به نمونه SF₂ که دارای اتلاف انرژی بیشتری نسبت به سایر نمونه‌ها بوده و کمترین سطح منحنی مربوط به نمونه SF₃ است.

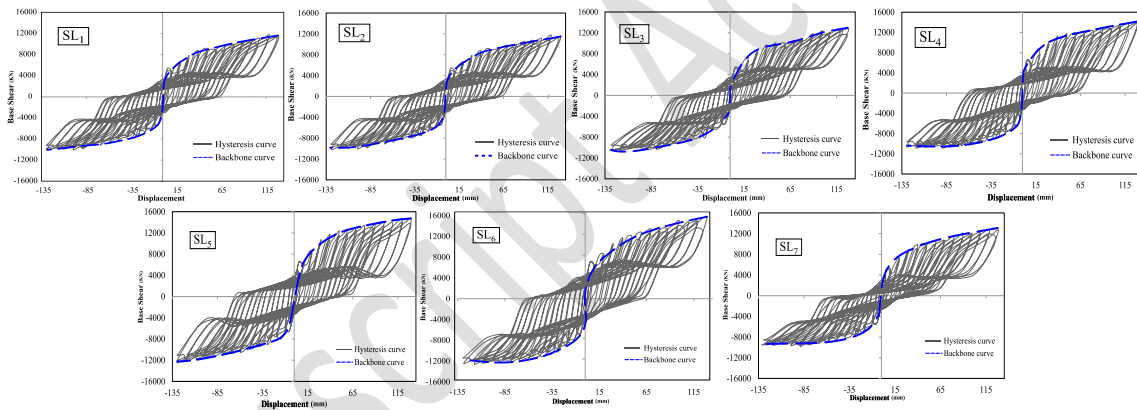
۵-۲ نتایج تحلیل غیرخطی تحت بارگذاری دوجته بر اساس FEMA 461

در سیستم دیوار برشی فولادی L شکل پس از اعمال بارگذاری دوجته، ابتدا میدان کششی قطری در تمامی نمونه‌ها تشکیل شد و با هدف بررسی بیشتر ظرفیت باربری سازه در برابر تغییر مکان جانبی، بارگذاری تا دریفت ۴٪ ادامه یافت. کانتورهای تنش ایجاد شده در نمونه‌های SF₁، SF₂، SF₃، SF₄ و SF₇ نشان داد که در ابتدا تسلیم ورق جان اتفاق افتاده و در ادامه مفصل پلاستیک در تیر بالایی تشکیل شده است. در نمونه SF₅ یعنی مدل با اتصال مفصلی تیر به ستون، مشابه نمونه SF₅ جاری شدن ورق جان در ابتدا رخ داد و سپس مفصل پلاستیک در پای ستون ایجاد شده است. در نمونه SF₆، مدل با فولاد پر مقاومت در قاب پیرامونی، قبل از جاری شدن ورق جان، المان مرزی افقی به نقطه تسلیم رسیده و تنش بیشتری به دلیل مقاومت بالای خود تحمل کرده است. پس از پایان تحلیل برای ترسیم منحنی‌های هیستریزس،

با توجه به دوجهته بودن بارگذاری انجام شده در دو راستای Z و X، پارامترهای RF₁ و RF₃ به ترتیب عکس‌العمل نیرو در برابر جابجایی وارده در راستای Z و عکس‌العمل نیرو در برابر جابجایی وارده در راستای X متناظر با جابجایی های U₁ و U₃ یعنی تغییرمکان در جهت Z و تغییرمکان در جهت X استخراج شد و در ادامه جهت بررسی برابری کلی نیروهای وارده در دو راستای عمود برهم با توجه به توصیه آیین‌نامه FEMA 356 در خصوص اثرات همزمان لرزه‌ای^{۲۸}، هر دو عکس‌العمل نیرویی با یکدیگر جمع شده (RF₃+RF₁) و برای رسم نمودار هیستریزس در راستای اصلی (U₃) مورد استفاده قرار گرفت.

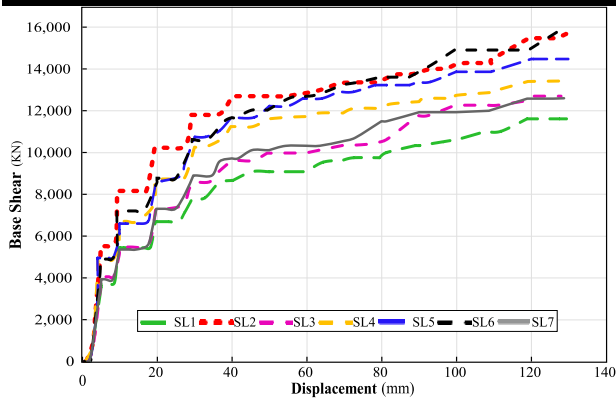


شکل ۱۹: کانتورهای تنش فون میزس حاصل از تحلیل غیرخطی تحت بارگذاری چرخه‌ای دوجهته تا دررفت نهایی ۴٪

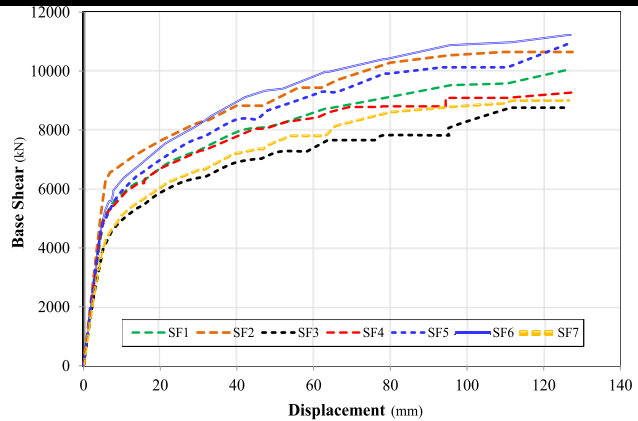


شکل ۲۰: منحنی هیستریزس نمونه‌های عددی حاصل از تحلیل غیرخطی بارگذاری دوجهته بر اساس FEMA 461

شکل ۲۰ منحنی‌های هیستریزس حاصل از تحلیل غیرخطی دوجهته را نشان می‌دهد که در تمامی نمودارها، لاغری و ایجاد پدیده جمع شدگی مشهود است. این پدیده موجب کاهش مساحت تجمعی حلقه‌های هیستریزس شده و در نتیجه انرژی مستهلک شده کمتری را موجب گردیده است.



شکل ۲۲: نمودار مقایسه‌ای پوش هیستریزس تحت بارگذاری دوجبهته (FEMA461)



شکل ۲۱: نمودار مقایسه‌ای پوش هیستریزس تحت بارگذاری یک‌جبهته (ATC-24)

۵-۳ ارزیابی لرزه‌ای نمونه‌های تحقیق

در این بخش پارامترهای مهم لرزه‌ای نظیر شکل‌پذیری، سختی، مقاومت، جذب و استهلاک انرژی سیستم و ضریب رفتار، مورد بررسی و مقایسه با یکدیگر قرار گرفت. در زلزله، اعضای سازه‌ای لرزه‌بر وارد فاز غیرارتجاعی شده و در آنها مفاصل پلاستیک تشکیل می‌شود. جهت برآورد عددی رفتار لرزه‌ای سازه‌ها، لازم است منحنی بار- تغییرمکان چرخه‌ای عضو سازه‌ای را استخراج نمود تا بر مبنای آن بتوان پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها را تخمین زد. مدل‌های چرخه‌ای عمدتاً توسط پارامترهایی تعریف می‌شوند که بیانگر مقاومت، سختی، نسبت شکل‌پذیری، زوال و سایر خصوصیات اجزای سازه‌ای می‌باشند، پارامترهای رفتار چرخه‌ای را می‌توان از روش‌های مختلفی بدست آورد که در این تحقیق در مرحله تحلیل نتایج جهت محاسبه میزان جذب انرژی سیستم و استهلاک انرژی با داشتن منحنی هیستریزس نمونه‌ها از نرم افزار متلب^{۲۹} جهت محاسبه مساحت زیرین حلقه از منحنی هیستریزس به صورت تجمعی استفاده شد. در ادامه برای بدست آوردن سایر پارامترهای لرزه‌ای از منحنی ظرفیت سازه، با توجه به داشتن منحنی هیستریزس نمونه‌ها و استخراج منحنی پوش^{۳۰} و دوخطی کردن منحنی بار- تغییرمکان مقادیر مورد نظر حاصل شد. بدین منظور از روش "پریستلی و پائولی" منحنی بار- تغییرمکان دو خطی شده و سپس با روش "چوپرا" پارامترهای فوق‌الذکر بدست می‌آید. در این روش با کمک روابط هندسی منحنی ظرفیت را دو خطی کرده و مساحت سطح زیر نمودار را محاسبه می‌کنیم. سپس قسمت خطی را تا جایی ادامه داده که سطح زیر نمودار آن با سطح زیر نمودار منحنی دو خطی یکی شود، بعد از مراحل مذکور ضریب رفتار، نسبت شکل‌پذیری، سختی اولیه، ظرفیت باربری و اولین مفصل پلاستیک به سادگی بدست خواهد آمد که نتایج حاصله در جداول ۶ و ۷ و شکل‌های ۲۳ تا ۲۵ نشان داده شده است.

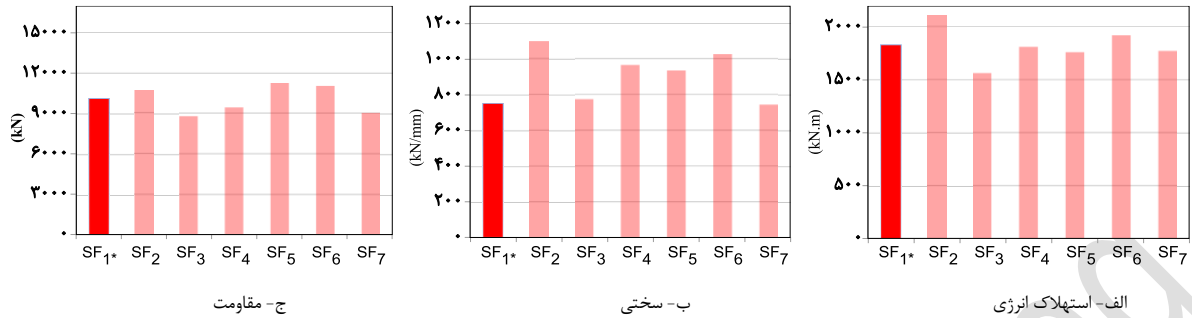
جدول ۷: پارامترهای لرزه‌ای حاصل از تحلیل غیرخطی تحت بارگذاری دو طرفه (FEMA461)

نمونه عددی	مقاومت نهایی (V ₀)	سختی الاستیک (K _E)	سختی اولیه (K ₀)	اتلاف انرژی (D.E)	ضریب رفتار (R)	شکل پذیری (μ)
	(kN)	(kN/mm)	(kN/mm)	(kN.m)		
SL ₁ ³⁰	۱۱۶۰۹	۷۵۶	۱۶۰	۴۵۵	۱۱/۲	۲/۴
SL ₂	۱۵۷۲۸	۱۱۴۳	۳۰۴	۷۳۷	۱۱/۲	۳/۳
SL ₃	۱۲۶۹۶	۸۲۶	۱۸۲	۵۴۶	۱۱/۴	۲/۴
SL ₄	۱۳۵۷۸	۹۹۳	۲۵۶	۵۳۶	۱۱/۱	۳/۲
SL ₅	۱۴۴۷۳	۱۰۷۰	۳۳۷	۵۳۹	۱۱/۵	۲/۸
SL ₆	۱۵۹۹۵	۱۰۴۰	۱۸۲	۱۰۱۰	۱۱/۵	۱/۹
SL ₇	۱۲۶۰۹	۷۹۴	۱۹۶	۱۱۸	۱۱/۶	۲/۷

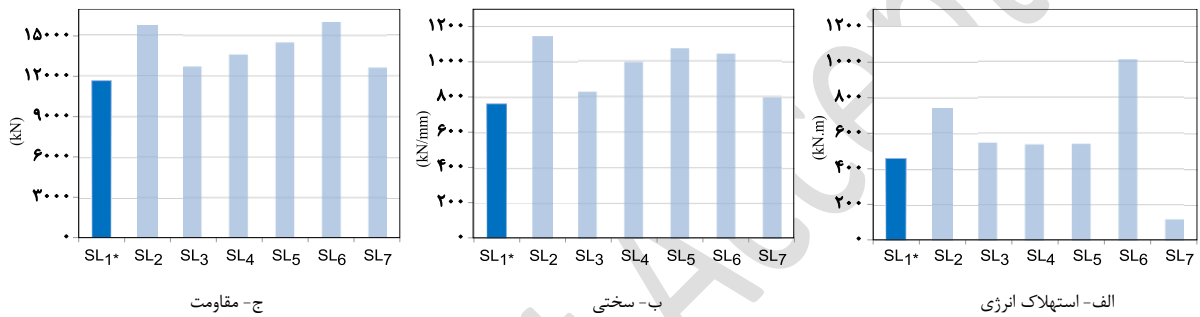
جدول ۶: پارامترهای لرزه‌ای حاصل از تحلیل غیرخطی تحت بارگذاری یک طرفه (ATC-24)

نمونه عددی	مقاومت نهایی (V ₀)	سختی الاستیک (K _E)	سختی اولیه (K ₀)	اتلاف انرژی (D.E)	ضریب رفتار (R)	شکل پذیری (μ)
	(kN)	(kN/mm)	(kN/mm)	(kN.m)		
SF ₁ ³⁰	۱۰۰۷۱	۷۴۵	۱۵۳	۱۸۰۸	۹/۱	۲/۸
SF ₂	۱۰۶۵۲	۱۰۹۶	۲۳۴	۲۱۰۷	۸/۱	۳/۸
SF ₃	۸۷۵۹	۷۷۳	۱۴۴	۱۵۶۰	۹/۵	۲/۸
SF ₄	۹۴۱۳	۹۶۴	۲۰۱	۱۸۰۸	۹/۲	۳/۶
SF ₅	۱۱۲۳۰	۹۳۳	۱۹۳	۱۷۵۶	۸/۹	۲/۹
SF ₆	۱۰۹۸۸	۱۰۲۴	۱۶۲	۱۹۱۷	۱۰/۱	۲/۵
SF ₇	۹۰۰۶	۷۴۲	۱۵۴	۱۷۶۹	۸/۸	۲/۹

²⁹ Matlab
³⁰ Backbone



شکل ۲۳: نمودار مقایسه‌ای استهلاک انرژی، سختی و مقاومت در نمونه‌های حاصل از تحلیل یک‌جهته در مقایسه با نمونه شاهد



شکل ۲۴: نمودار مقایسه‌ای استهلاک انرژی، سختی و مقاومت در نمونه‌های حاصل از تحلیل دو جهته در مقایسه با نمونه شاهد

شکل‌های ۲۳ و ۲۴ به ترتیب میزان استهلاک انرژی، سختی و مقاومت نمونه‌های مورد بررسی را در مقایسه با نمونه اصلی (شاهد) نشان می‌دهند همانطور که دیده می‌شود در نمونه‌های حاصل از تحلیل یک‌جهته دیوار برشی فولادی L شکل، نمونه با کمترین ضخامت در ورق جان (SF3) مقاومت، و استهلاک انرژی کمتری نسبت به مدل مرجع داشته است. از طرف دیگر این مقادیر در نمونه‌های با ضخامت ورق جان حداکثر (SF2) نسبت به نمونه شاهد افزایش نشان می‌دهد که نشانگر تاثیر محسوس و موثر افزایش ضخامت ورق جان بر میزان ظرفیت باربری سازه در این نوع الگوی بارگذاری است. در دیوار برشی فولادی L شکل تحت بارگذاری دو جهته تاثیر مثبت افزایش ضخامت ورق جان و استفاده از فولاد پر مقاومت بر افزایش مقاومت، سختی و استهلاک انرژی مشهود است. همچنین نمونه دارای اتصال مفصلی در المانهای مرزی افقی (SL5) بعد از نمونه (SL2) بیشترین سختی را در بین نمونه‌های مورد بررسی داشته است و از طرفی نمونه با مقطع H در المانهای مرزی عمودی (SL7) کمترین اتلاف انرژی را نسبت به سایر نمونه‌ها دارا بوده و از نظر مقاومت و سختی بعد از مدل شاهد کمترین مقادیر را نشان داد. درصد تغییرات این پارامترها در دو مدل، نسبت به نمونه شاهد در جداول ۹ و ۱۰ نشان داده شده است.

جدول ۹: مقایسه تغییرات پارامترهای مقاومت، سختی و اتلاف انرژی در نمونه‌های مدل دو جهته با نمونه شاهد

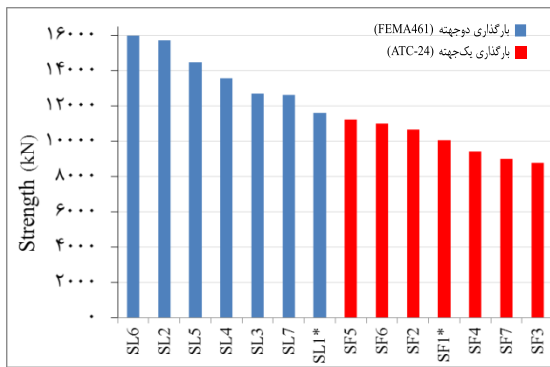
نمونه	مقاومت نهایی (V ₀)	سختی الاستیک (K _E)	اتلاف انرژی (D.E)
	(kN)	(kN/mm)	(kN.m)
SL ₂	٪۳۵/۵	٪۵۱/۲	٪۶۲
SL ₃	٪۹/۴	٪۹/۳	٪۲۰
SL ₄	٪۱۷	٪۳۱/۳	٪۱۷/۸
SL ₅	٪۲۴/۷	٪۴۱/۵	٪۱۸/۵
SL ₆	٪۳۷/۸	٪۳۷/۶	٪۱۲۲
SL ₇	٪۸/۶	٪۴/۸	-٪۷۴/۱

جدول ۸: مقایسه تغییرات پارامترهای مقاومت، سختی و اتلاف انرژی در نمونه‌های مدل یک‌جهته با نمونه شاهد (SF1*)

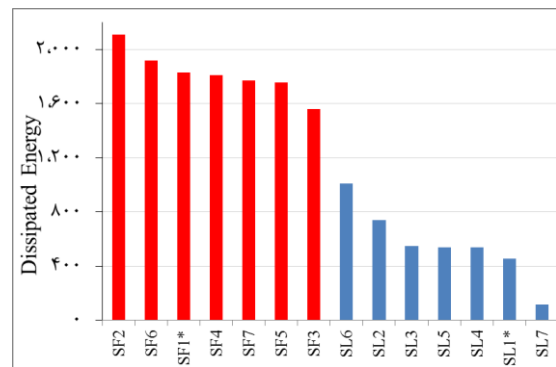
نمونه	مقاومت نهایی (V ₀)	سختی الاستیک (K _E)	اتلاف انرژی (D.E)
	(kN)	(kN/mm)	(kN.m)
SF ₂	٪۵/۸	٪۴۷	٪۵۲/۶
SF ₃	-٪۱۳	-٪۳/۷	-٪۶/۳
SF ₄	-٪۶/۵	-٪۲۹/۳	٪۳۱
SF ₅	٪۱۱/۵	٪۲۵/۲	٪۲۵/۸
SF ₆	٪۹/۱	٪۳۷/۵	٪۵/۴
SF ₇	-٪۱۰/۶	-٪۰/۴	٪۰/۵

۴-۵ مقایسه نتایج نمونه‌های دیوار برشی فولادی L شکل تحت بارگذاری یک‌جهته و دو جهته

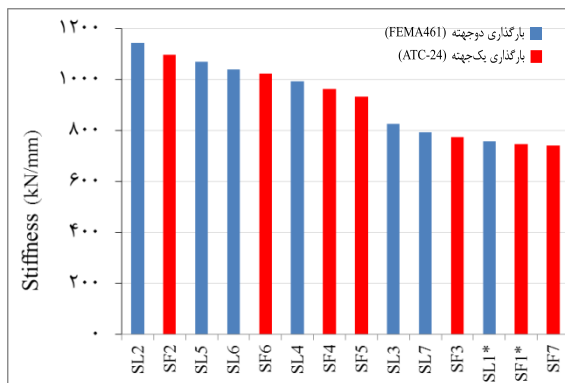
به منظور مقایسه عملکرد دیوار برشی فولادی L شکل تحت بارهای لرزه‌ای و بر اساس دستورالعمل‌های بارگذاری چرخه‌ای FEMA 461 و ATC-24 پارامترهای لرزه‌ای حاصله بررسی و با یکدیگر مورد سنجش عددی قرار گرفت.



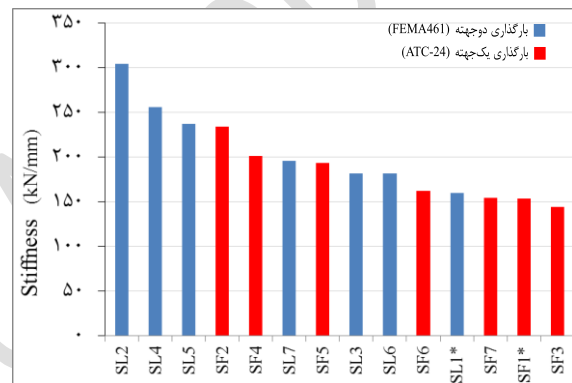
ب- مقاومت نهایی (V0)



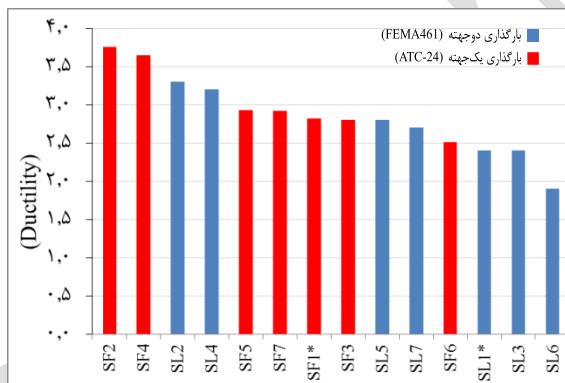
الف- استهلاک انرژی (D.E)



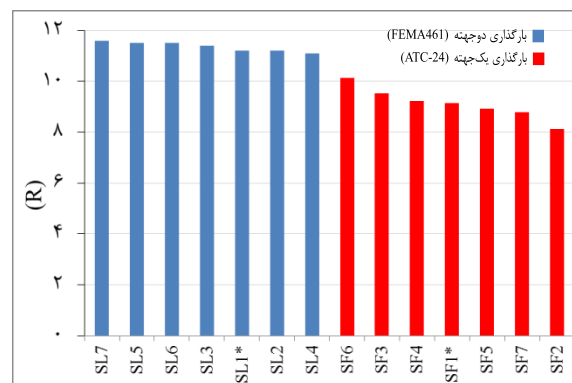
ت- سختی الاستیک (KE)



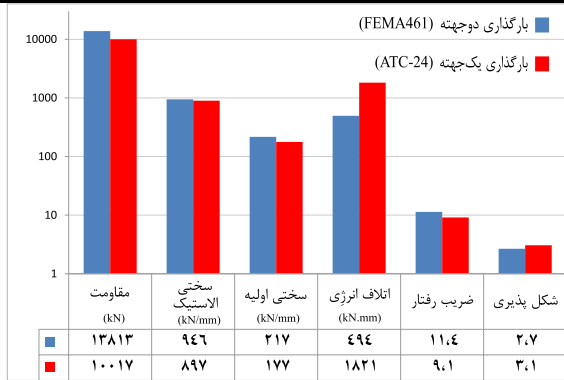
پ- سختی اولیه منحنی دوخطی (K0)



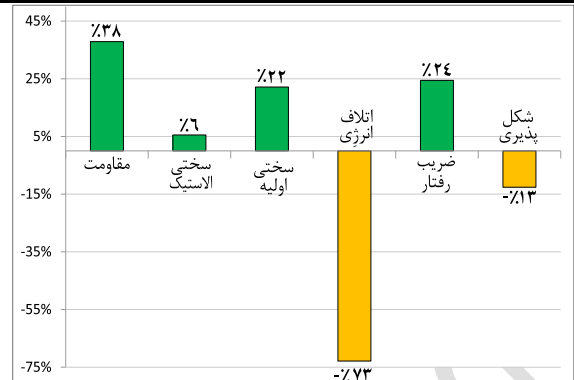
ج- نسبت شکل پذیری (μ)



ث- ضریب رفتار



د- نمودار مقایسه‌ای میانگین نتایج تحلیل غیرخطی دیوار برشی فولادی L شکل تحت الگوی بارگذاری دوجته و یکجته



چ- درصد تغییرات میانگین نتایج پارامترهای لرزه‌ای تحت بارگذاری دوجته نسبت به بارگذاری یکجته در دیوار برشی فولادی L شکل

شکل ۲۵: مقایسه پارامتریک نتایج حاصل از الگوی بارگذاری یکجته و دوجته در دیوار برشی فولادی L شکل

در شکل ۲۵ نمودارهای الف تا د، پارامترهای لرزه‌ای نمونه‌های عددی، تحت بارگذاری یکجته و دوجته را مورد مقایسه قرار داده است، به طور کلی نمونه‌های SL₂ و SL₆ عملکرد بهتری از نظر سختی، نسبت شکل پذیری و مقاومت نسبت به سایر نمونه‌ها از خود نشان دادند در حالی که نمونه SF₂ از نظر استهلاک انرژی بهترین نتیجه را بدست آورد. ضعیف‌ترین نتایج پارامترهای مقاومت و سختی مربوط به نمونه SF₃ بوده که دارای کمترین ضخامت ورق جان نسبت به سایر نمونه‌ها می‌باشد و این امر حاکی از آن است که با کاهش ضخامت ورق فولادی و کاهش مشارکت ورق فولادی در تحمل بار جانبی، سختی، مقاومت و استهلاک انرژی کاهش چشمگیری داشته است و بالعکس با افزایش سهم ورق فولادی در تحمل بار جانبی نتایج بهتری از نظر مقاومت سختی و استهلاک انرژی حاصل شده است. همچنین استفاده از فولاد پرمقاومت در المانهای مرزی عمودی تاثیر مطلوبی بر روی مقاومت سازه در هر دو مدل داشته است. نمودار (چ) در شکل ۲۵ نشان می‌دهد نمونه‌های تحت الگوی بارگذاری دوجته به طور میانگین از نظر استهلاک انرژی عملکرد ضعیفی نسبت مدل تحت بار یکجته داشته و شکل‌پذیری کمتری نیز از خود به نمایش گذاشته است درحالی که سایر پارامترهای لرزه‌ای مورد بررسی در این مدل دارای وضعیت مطلوب و قابل قبولی نسبت به مدل یکجته می‌باشند.

جدول ۱۰: نمایش پارامتریک نمونه‌های دارای عملکرد حداکثر و حداقل تحت الگوی بارگذاری دوجته و یکجته

نتایج حداقل			نتایج حداکثر			پارامترهای لرزه‌ای
واحد	مقدار	نمونه عددی	واحد	مقدار	نمونه عددی	
kN	۸۷۵۹	SF ₃	kN	۱۵۹۹۵	SL ₆	مقاومت نهایی (V ₀)
kN/mm	۴۱۱	SF ₃	kN/mm	۳۰۴	SL ₂	سختی اولیه (K ₀)
kN/mm	۱۱۲	SF ₇	kN/mm	۱۱۴۳	SL ₂	سختی الاستیک (K _E)
kN.m	۱۱۸	SL ₇	kN.m	۲۱۰۷	SF ₂	استهلاک انرژی (D.E)
-	۱/۹	SL ₆	-	۳/۸	SF ₂	نسبت شکل پذیری (μ)
-	۸/۱	SF ₂	-	۱۱/۶	SL ₇	ضریب رفتار (R)

۵- نتیجه گیری

در این تحقیق، ۱۴ نمونه دیوار برشی فولادی نازک L شکل، ۷ نمونه تحت بارگذاری یکجته مطابق با دستورالعمل ATC-24 و ۷ نمونه با استفاده از آیین نامه FEMA 461 تحت بارگذاری دوجته در قالب مدل‌های المان محدود سه بعدی در نرم افزار آباکوس ارائه و بررسی شد

سپس منحنی‌های هیستریزیس و نیرو - تغییرمکان برای مدل‌های مختلف بدست آمد با توجه به تجزیه و تحلیل اطلاعات بدست آمده از نمودارها و جداول می‌توان به نتایج زیر اشاره کرد.

۱- در الگوی بار دوجته اوربیتال شش ضلعی، با توجه به دامنه‌های بزرگتر چرخه‌ای (دریفت) در مقایسه با بارگذاری خطی رفت و برگشتی یک‌جهته در چرخه‌های یکسان افزایش مقاومت و سختی در کلیه نمونه‌های تحت بار دوجته دیده شد اما پس از ورود به ناحیه غیرخطی و از طرفی با افزایش تعداد چرخه‌ها، استهلاک انرژی به میزان قابل توجهی کاهش پیدا کرد.

۲- از نقطه نظر انرژی مستهلک شده با بررسی منحنی‌های هیستریزیس مدل‌های ارائه شده کلیه مدل‌هایی که تحت بارگذاری یک‌جهته قرار گرفته بودند پاسخ‌های سازه‌ای مناسب‌تری در استهلاک انرژی داشتند و به طور میانگین حدود ۷۰ درصد بیشتر از مدل‌های تحت بارگذاری دوجته اتلاف انرژی از خود نشان دادند.

۳- منحنی‌های هیستریزیس حاصل از تحلیل غیرخطی دوجته در تمامی نمونه‌ها، با توجه به الگوی بارگذاری اوربیتال شش ضلعی و تحمیل درخواست‌های بزرگتر به سازه دچار لاغری و جمع شدگی شد که این پدیده موجب کاهش مساحت تجمعی حلقه‌های هیستریزیس و در نتیجه انرژی مستهلک شده کمتری را موجب گردید.

۴- از نظر شکل‌پذیری مدل‌های تحت بارگذاری یک‌جهته وضعیت مطلوب‌تری نسبت به مدل دوجته داشته به طوری که ۱۳ درصد شکل‌پذیری بیش از میانگین نمونه‌های تحت بارگذاری دوجته داشتند.

۹- در مقایسه سختی دو مدل تحت الگوی بار دوجته و یک‌جهته افزایش سختی در دو حالت الاستیک و غیرخطی در کل محسوس نبود.

۶- با افزایش ضخامت ورق جان به میزان ۱۳ میلی‌متر، سختی در هر دو الگوی بارگذاری یک‌جهته و دوجته افزایش یافت این افزایش نسبت به نمونه مرجع در مدل یک‌جهته برابر ۴۷ درصد و در مدل با بارگذاری دوجته برابر ۵۱ درصد حاصل شد.

۷- استفاده از فولاد پر مقاومت در قاب پیرامونی، موجب شد قبل از جاری شدن ورق جان، المان مرزی افقی به نقطه تسلیم رسیده و تنش بیشتری به دلیل مقاومت بالای خود تحمل و در هر دو الگوی بارگذاری بیشترین افزایش مقاومت را در پی داشت.

۸- از منظر ظرفیت باربری مدل‌هایی که با الگوی دوجته مورد بارگذاری قرار گرفته بودند عملکرد سازه‌ای بهتری داشته و به طور میانگین حدود ۴۰ درصد بیش از مدل‌های تحت بارگذاری یک‌جهته مقاومت از خود نشان دادند.

۹- با توجه به نتایج پارامتریک بدست آمده تحت الگوهای بارگذاری یک‌جهته و دوجته، استفاده از مقطع H در این سیستم عملکرد قابل قبولی در مقایسه با سایر نمونه‌ها از خود نشان نداد، لذا استفاده از مقطع H در المانهای مرزی عمودی دیوارهای برشی فولادی L شکل به دلیل عدم ارضای الزامات آیین نامه AISC341-16 در خصوص سختی عرضی توصیه نمی‌گردد.

۱۰- در مجموع دیوار برشی فولادی L شکل مورد تحقیق، تحت الگوی بار دوجته از نظر مقاومت و سختی، در مقایسه با مدل تحت بار یک‌جهته عملکرد قابل قبولی داشت اما از نظر توان اتلاف انرژی و شکل‌پذیری رفتار مطلوبی از خود نشان نداد.

سپاسگزاری

نویسندگان مقاله از بیان نظرات ارزشمند داوران محترم نشریه مهندسی سازه و ساخت برای پربار گشتن این اثر، کمال سپاسگزاری را دارند.

مراجع

[1] Rahmani, M., Najarpur koojor, A. (2016). Advantages of using L-shaped shear wall in reinforced concrete buildings. 4th International Congress on Civil Engineering, Architecture and Urban Development. Tehran, Shahid Beheshti University.

- [2] Thorburn, L.J., Kulak, G.L., and Montgomery, C.J. (1983). Analysis of Steel Plate Shear Walls *Structural Engineering Report No. 107, Department of Civil Engineering*. University of Alberta, Edmonton, Canada.
- [3] Bruneau, M. (2008). Testing of Full-Scale Two-Story Steel Plate Shear Wall with Reduced Beam Section Connections and Composite Floors. *Journal Of Structural Engineering*. New York, State University, University at Buffalo.
- [4] Kharrazi, M.H., Ventura, C.E. and Prion H.G. (2010). Analysis and Design of Steel Plate Walls: Analytical Model. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 38(1), 49-59.
- [5] Sabouri Qomi, S., Ahouri, A. and Mam Azizi, P. (2011), Evaluation of the effect of the dimensions of two symmetrical openings on the stiffness and strength of reinforced steel shear walls, *6th National Congress of Civil Engineering*. Semnan, Semnan University.
- [6] Li, W. and Li, Q.N. (2012). Seismic performance of L-shaped rc shear wall subjected to cyclic loading. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 21(12), 855-866.
- [7] Emami, F. and Mofid, M. and Vafai, A. (2013), Experimental study on cyclic behavior of trapezoidally corrugated steel shear walls. *Journal of Engineering Structures*, 48, 750–762.
- [8] Hosseinzadeh, S.A.A. and Tehranizadeh, M. (2014), Behavioral Characteristics of Code Designed Steel Plate Shear Wall Systems, *Journal of Construction Steel Research*, 99, 72-84.
- [9] Moradinejad. and Gholampur, S. (2015), Evaluation of the influence of steel shear wall location on progressive failure using non-linear static analysis, *6th Tehran National Steel and Structure Congress*. Tehran, Iran
- [10] Zhanga, X. and Qin, Y. and Chen, Z. and Jiea, L. (2016), Experimental behavior of innovative T-shaped composite shear walls under in-plane cyclic loading, *Journal of Constructional Steel Research*, 120, 143-159.
- [11] Hamidipour, M. Dehghani, H. and Sediqpour, A. (2017), Investigation of the behavior of open steel shear wall under blast loading, *Civil. Architecture and Urban Planning Conference of Islamic World Countries*, Tabriz: Tabriz University.
- [12] Pachideha, G. Gholhaki, M. and Saedi Daryan, A. (2018), Analyzing the damage index of steel plate shear walls using pushover analysis, *Structures* 20, 437-451.
- [15] Jafari, A. Rusta, A. and Ebrahimi, A. (2018), Investigation of the effect of beam-to-column connections on the performance of steel shear walls, *Conference on Civil Engineering, Architecture and Urban Planning in Islamic World Countries*, Tabriz: University of Tabriz
- [13] Ghamari, A., Akbarpour, A. and Ghanbari, A. (2019). Improving behavior of semi-supported steel plate shear walls. *Journal of Central South University*, 26(10), 2891-2905.
- [14] Azandariani, M. Gholhaki, M. and Kafi, M. A. (2020). Experimental and numerical investigation of low-yieldstrength (LYS) steel plate shear walls under cyclic loading. *Engineering Structures*, 203, 109866.
- [15] Kizilarlan, E. and Bruneau, M. (2021). Hysteretic behavior of repaired C-shaped concrete filled-composite plate shear walls (C-PSW/CF). *Engineering Structures*. 241, 112410
- [16] Li, j. Wang, Z. and Moa, B. (2022), Experimental and numerical study on the seismic performance of an L-shaped double-steel plate composite shear wall, *Structures* 49, 104015.
- [17] Alavi, E. and Nateghi, F. (2013), Experimental study on diagonally stiffened steel plate shear walls with central perforation, *Journal of Constructional Steel Research*. 89 (2013) 9–20.
- [18] AISC 341-16. Seismic Provisions for Structural Steel Buildings. Chicago: American
- [19] FEMA 461. Interim testing protocols for determining the seismic performance characteristics of structural and nonstructural components. , June 2007, Washington, DC: Federal Emergency Management Agency
- [20] FEMA356. Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings., November 2000, washington, dc: Federal Emergency Management Agency
- [21] AppliedTechnology Council. Guidelines for cyclic seismic testing of component of steel structures. Redwood City, CA: ATC-24; 1992