



مطالعه رفتار دیوارهای برشی فولادی نیمه مقید در برابر بارگذاری یکنواخت و چرخه‌ای

جلال‌الدین بهمنی^۱، نوید سیاه پلو^{۲*}

۱- دانشکده مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران
۲- دانشکده فنی و مهندسی، موسسه آموزش عالی جهاد دانشگاهی خوزستان، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۰۶/۲۱

بازنگری: ۱۳۹۸/۱۰/۰۵

پذیرش: ۱۳۹۸/۱۰/۲۷

ارائه آنلاین: ۱۳۹۸/۱۱/۱۳

کلمات کلیدی:

دیوار برشی فولادی نیمه مقید

اتلاف انرژی

سخت‌کننده افقی و قائم

ستون فرعی میانی.

خلاصه: تشکیل مفصل پلاستیک در پای ستون‌های اطراف دیوار برشی می‌تواند به خرابی کلی سازه منجر شود. برای رفع این نقیصه دیوار برشی فولادی نیمه مقید (SSSWs) پیشنهاد شده‌است. در این دیوار ستون‌های فرعی در طرفین آن نسبت به ستون اصلی فاصله داشته و صرفاً وظیفه تحمل بارهای جانبی را بر عهده دارند. در نتیجه در صورت پلاستیک شدن، به ستون‌های اصلی قاب آسیبی وارد نمی‌شود. بررسی رفتار سیستم SSSW به تعداد محدودی مطالعه آزمایشگاهی خلاصه می‌شود. از آن‌جا که مطالعه آزمایشگاهی تأثیر عواملی چون ضخامت ورق جان، سخت‌کننده جان (یک یا دو طرف)، مقطع ستون مرزی پرهزینه است در این مقاله تأثیر متغیرهای مذکور بر سختی ارتجاعی، ظرفیت اتلاف انرژی، مقاومت نهایی و شکل‌پذیری به کمک مدل‌سازی اجزا محدود بررسی شده‌است. ضمناً تأثیر ستون فرعی میانی در بهبود احتمالی رفتار سیستم SSSW پیشنهاد گردید. ابتدا اعتبار مدل عددی اثبات و مابقی مدل‌ها بر اساس مدل صحت‌سنجی تولید گردید. آنگاه بازتاب خطی و غیرخطی سیستم SSSW در برابر بارگذاری تک‌آهنگ و محاسبه و مقایسه شده‌است. در محدوده فرض‌های تحقیق نتایج نشان می‌دهد که تغییر مقطع ستون فرعی (مرزی) بر بازتاب سیستم SSSW بی‌تأثیر است؛ اما با نصب سخت‌کننده‌های افقی و قائم در یک یا دو طرف جان و اضافه کردن ستون فرعی میانی دیوار، مقاومت نهایی، ظرفیت اتلاف انرژی، سختی اولیه افزایش و شکل‌پذیری سیستم به دلیل افزایش سختی خارج از صفحه ورق دیوار کاهش می‌یابد. بعلاوه افزایش ضخامت ورق جان از ۲ به ۴ میلی‌متر سختی اولیه، شکل‌پذیری و ظرفیت اتلاف انرژی و مقاومت نهایی مدل را افزایش می‌دهد.

۱- مقدمه

استفاده از دیوارهای برشی فولادی به‌عنوان یک گزینه اقتصادی و سهل‌الاجرا برای مقاومت در برابر نیروهای جانبی همچون زلزله و باد در ساختمان‌ها، به‌ویژه ساختمان‌های بلند مورد توجه قرار گرفته است. سیستم از نظر سختی برشی از سخت‌ترین سامانه‌های مهاربندی x شکل سخت‌تر بوده و با توجه به امکان ایجاد بازشو در هر نقطه آن، کارایی همه‌ی سامانه‌های مهاربندی را از این نظر دارا است [۱]. همچنین استفاده از دیوار برشی فولادی به‌عنوان یک سیستم باربر جانبی لرزه‌ای به‌طور کارآمد در بهسازی لرزه‌ای به‌منظور افزایش مقاومت جانبی و سختی ساختمان‌ها در برابر زلزله، در سازه‌های

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: siahpolo@acecr.ac.ir

بتنی و فولادی مورد توجه قرار گرفته است. این سیستم دارای سختی مناسب برای کنترل تغییر شکل سازه و همچنین مکانیسم شکست شکل‌پذیر و اتلاف انرژی بالا است. راه‌های مقاوم‌سازی دیوارها، بهبود رفتار کمانشی آن‌ها با استفاده از نصب سخت‌کننده‌های افقی و قائم در یک یا دو طرف جان دیوار، تغییر مقطع ستون فرعی و افزودن ستون فرعی میانی است. یکی از راهبردهایی که به‌منظور بهبود عملکرد دیوار برشی فولادی مدنظر قرار گرفته است، جدا کردن المان مرزی قائم دیوار از ستون‌های اصلی ساختمان است. بدین منظور بافاصله‌ای مشخص نسبت به ستون اصلی (ستون سیستم باربر ثقلی و جانبی)، دو ستون فرعی به‌عنوان المان‌های قائم دیوار برشی اجرا



استفاده از ستون‌های نگه‌دارنده انعطاف‌پذیر نسبت به ستون‌های نگه‌دارنده سخت و قوی ارجحیت دارد [۷] و [۸]. صبوری و همکاران در پژوهشی که سال ۲۰۰۸ ارائه نمودند، حداقل ممان اینرسی لازم برای سخت‌کننده‌ها به‌منظور وقوع کمانش موضعی قبل از کمانش کلی دیوار برشی فولادی پیشنهاد نمودند [۹]. صبوری و قلهکی در سال ۲۰۰۸ دو نمونه دیوار برشی شکل‌پذیر سه‌طبقه دارای ورق نازک با مقیاس یک‌سوم را تحت بارگذاری دوره‌های آزمایش نمودند. برای ورق ستونها و پانلها به ترتیب از فولاد پر مقاومت و فولاد نرم استفاده شد. ضمناً اتصال تیر به ستون در دو حالت صلب و ساده در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد نوع اتصال تیر به ستون بر ضریب شکل‌پذیری، مقاومت و جذب انرژی اثرگذار بوده، ولی اثر فراوانی بر سختی اولیه ندارد [۱۰]. مطالعه آزمایشگاهی انجام‌شده توسط یو و چن (۲۰۰۹) جهت محاسبه مقاومت جانبی دیوارهای برشی سرد نورد نشان داد در دیوارها، در کنار کمانش ورق و کنده شدن پیچ‌ها، ممکن است کمانش ستون‌های داخلی نیز رخ دهد [۱۱]. جهانپور و همکاران (۲۰۱۱) به استناد نتایج آزمایشگاهی به‌دست‌آمده در تحقیقات قبلی و با ارائه فرمولاسیون گام‌به‌گام، روشی را برای محاسبه حداکثر ظرفیت باربری جانبی دیوار برشی نیمه مقید ارائه نمودند. ظرفیت باربری نهایی پیشنهادی بسیار با نتایج به‌دست‌آمده از کار آزمایشگاهی و مدل اجزا محدود همخوانی و انطباق دارد [۱۲]. مطالعه آزمایشگاهی رفتار دیوار برشی تقویت‌شده و تقویت نشده که توسط صبوری قمی و سجادی در سال ۲۰۱۲ انجام گرفت نشان می‌دهد با به کار بردن سخت‌کننده، میزان جذب انرژی و مقاومت برشی دیوار فولادی افزایش می‌یابد [۱۳]. پیراسته و کیانی (۲۰۱۳) اثر سخت‌کننده‌های افقی، قائم، افقی-قائم، قطری و ضربدری بر رفتار دیوار برشی فولادی بررسی نمودند. این مطالعه نشان داد سخت‌کننده قطری متقاطع در یک‌طرف دیوار برشی در افزایش ظرفیت باربری و کاهش تغییر شکل‌های خارج از صفحه تأثیرگذار است [۱۴]. جهانپور و سادات خلردی (۲۰۱۴) در مطالعه‌ای اثر نوع اتصال ستون فرعی به تیر بر مقاومت نهایی دیوارهای برشی فولادی نیمه-مقید در لبه‌ها را بررسی نمودند. نتایج نشان داد ظرفیت باربری نهایی در حالت اتصال صلب به‌طور متوسط ۱۸/۹ درصد بیشتر از حالت اتصال مفصلی است. بعلاوه با افزایش لنگر واژگونی میزان این تفاوت کاهش می‌یابد [۱۵]. جهانپور و همکاران (۲۰۱۵) تأثیر ضخامت ورق و تنش

می‌شوند. چنین سیستمی «دیوار برشی نیمه مقید در لبه‌ها» یا SSSWs نام‌گذاری شده‌است [۲] و [۳]. مزیت چنین روشی کاهش ابعاد مقطع ستون مجاور دیوار و افزایش ایمنی ستون از پلاستیک شدگی کامل و پرهیز از تشکیل مکانیسم در طبقه است. این در حالی است که در سیستم متداول (اتصال دیوار به ستون‌های قائم اصلی) علاوه بر آنکه به مقطع بزرگی برای ستون نیاز است، با ورود ستون به ناحیه غیرخطی و احتمال تشکیل مفصل پلاستیک، سلامت سازه ممکن است به مخاطره بیفتد. توضیحات تکمیلی در معرفی این سیستم در بخش ۱-۲ مقاله ارائه‌شده‌است. شایان‌ذکر است در سیستم‌های دیوار برشی متداول (به‌غیر از سیستم SSSW) نصب سخت‌کننده‌ها، تغییر مقطع و افزودن ستون فرعی میانی با جلوگیری از کمانش ورق فولادی قبل از جاری شدن، باعث بهبود رفتار آن شده و علاوه بر این باعث افزایش سختی، مقاومت، شکل‌پذیری و قابلیت جذب انرژی می‌شود [۴].

یکی از قدیمی‌ترین مطالعات آزمایشگاهی انجام‌شده در زمینه دیوارهای برشی فولادی به تحقیق تاکاهاشی و همکاران در سال ۱۹۷۳ بازمی‌گردد. ایشان ضمن مقایسه رفتار دیوار برشی فولادی و سیستم‌های مهاربندی نتیجه گرفتند که در دو نوع سیستم حلقه‌های هیستریزس پایدار و ظرفیت اتلاف انرژی قابل‌توجهی دارند. ضمناً رفتار دینامیکی غیرخطی هر دو مدل در برابر زلزله و بارهای لرزه‌ای می‌تواند قابل‌اتکا باشد [۵]. حبیبی نژاد (۲۰۰۴) تعدادی دیوار برشی نیمه مقید را در آزمایشگاه ارزیابی نمود. نتایج مطالعه‌ایشان نشان داد دیوار برشی نیمه مقید ظرفیت باربری قابل‌توجهی داشته و می‌تواند جدا نمودن سیستم مقاوم جانبی از سیستم باربر ثقلی به‌کار گرفته شود. در نتیجه سازه‌های مقطع ستون اصلی کاهش می‌یابد [۶]. محرمی و همکاران (۲۰۰۶) مزایای استفاده از دیوار برشی فولادی جدار نازک برای مقاوم‌سازی سازه‌های فولادی را در مدل‌های آزمایشگاهی ارزیابی نمودند. در این راستا از دیوار برشی نیمه مقید دارای ستون‌های فرعی لبه‌ای استفاده شد. نتایج نشان داد برای افزایش ظرفیت باربری سیستم به‌عنوان اولویت اول مقاوم‌سازی، استفاده از ستون‌های نگه‌دارنده سخت‌تر برای دیوار برشی نسبت به ستون‌های نگه‌دارنده انعطاف‌پذیر ارجحیت دارد. به‌علاوه اگر اولویت اول مقاوم‌سازی افزایش قابلیت جذب و استهلاک انرژی باشد،

مقید نشان می‌دهد، عمده پژوهش‌ها بر رفتار آزمایشگاهی این نوع سیستم سازه‌ای متمرکز بوده است. ضمناً عوامل مختلفی بر رفتار غیرخطی چنین سیستمی تأثیرگذار بوده که اثر برخی عوامل در مطالعات قبلی کمتر در نظر گرفته شده است. برخی از مهم‌ترین آن‌ها عبارت‌اند از ضخامت دیوار برشی، جنس مصالح دیوار و ستون‌های فرعی، مقطع ستون فرعی، نحوه اتصال ستون فرعی به تیرهای فوقانی و تحتانی، استفاده از ستون فرعی میانی، استفاده از سخت‌کننده در یک و دو سمت دیوار، فاصله المان فرعی با ستون اصلی (نسبت طول دهانه دیوار به طول دهانه قاب). بدیهی است بررسی هم‌زمان چنین عوامل از طریق مطالعه آزمایشگاهی میسر نیست. از طرفی در یک مقاله نیز نمی‌توان تأثیر عوامل فوق را به‌صورت یکجا و در قالب یک مطالعه عددی بررسی نمود. به همین دلیل در مقاله حاضر صرفاً تأثیر تغییر مقطع ستون‌های فرعی، تأثیر سخت‌کننده‌های جان دیوار و اثر اضافه کردن ستون فرعی میانی (علاوه بر ستون‌های لبه‌ای) بر رفتار غیرخطی دیوارهای برشی فولادی که در برابر بارگذاری چرخه‌ای قرار گرفته است، ارزیابی می‌گردد. در این پژوهش برای شبیه‌سازی عددی از نرم‌افزار اجزا محدود آباکوس^۱ استفاده شده است. پس هدف اصلی مقاله بررسی تأثیر عواملی مختلفی همچون نوع مقطع ستون لبه‌ای در دو حالت UNP و IPE، استفاده هم‌زمان از سخت‌کننده‌ها در جان دیوار (یک و دو طرف جان) به همراه المان لبه‌ای، تأثیر وجود ستون قائم فرعی اضافی در مرکز پانل برشی بر رفتار دیوار برشی فولادی نیمه مقید تعریف شده است. انتخاب مقطع UNP به‌عنوان ستون لبه‌ای برگرفته از مدل آزمایشگاهی مرجع ۷ است که در فرآیند صحت‌سنجی انتخاب شده است. ضمناً از آنجایی که پروفیل IPE در مطالعات قبلی به‌عنوان یک المان قابل‌استفاده در ستون فرعی (لبه‌ای) استفاده نشده بود و از طرفی از مقاطع بسیار رایج و متداول در ایران است، در این مقاله نیز به‌عنوان مقطع ستون لبه‌ای انتخاب شده است. مقاله حاضر در واقع بسط و توسعه مطالعات انجام‌شده قبلی به‌ویژه مراجع [۷] است که بروش عددی (شبیه‌سازی در آباکوس) انجام گرفته است. دلیل استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس هزینه‌بر بودن کارهای آزمایشگاهی و البته امکان شبیه‌سازی قدرتمند نرم‌افزار به‌شرط کالیبراسیون مدل است. بدین منظور ابتدا قابلیت شبیه‌سازی نرم‌افزار با کمک مطالعه آزمایشگاهی مرجع [۷]

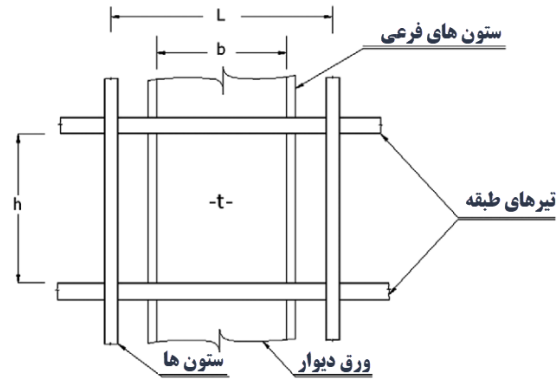
تسلیم فولاد را بر رفتار دیوار برشی فولادی نیمه مقید تقویت‌شده با الیاف شیشه (GFRP) بررسی نمودند. نتایج این پژوهش نشان داد با افزایش تنش تسلیم (با و بدون الیاف شیشه) مقاومت نهایی و جذب انرژی افزایش یافته است، درحالی‌که شکل‌پذیری کاهش می‌یابد [۱۶]. سیاه‌پلو و بهمنی (۲۰۱۸) مطالعه رفتاری اجزا محدود عملکرد غیرخطی دیوارهای برشی فولادی نیمه مقید تقویت‌شده با سخت‌کننده‌های افقی و قائم را بررسی نمودند. نتایج نشان داد با استفاده از سخت‌کننده بر روی ورق جان مقاومت نهایی، سختی اولیه و اتلاف انرژی چرخه‌های افزایش و شکل‌پذیری کاهش می‌یابد [۱۷]. جهانپور و محرمی (۲۰۱۵) رفتار ستون‌های فرعی در دیوارهای برشی فولادی نیمه مقید را مورد ارزیابی قرار دادند. در این بررسی، از تئوری پلاستیک شدگی سازه‌ها برای یافتن توزیع نیروی محوری، در امتداد ستون فشاری استفاده شده است. سپس با استفاده از روش انرژی، برای یک دیوار برشی فرض شده با هندسه و مواد خاص و یک نیروی برشی معین، می‌توان حداکثر لنگری که باعث کماتش ستون فرعی می‌شود را تعیین کرد [۱۸]. شکسته‌بند و همکاران (۲۰۱۷) مطالعه‌های روی رفتار لرزه‌ای دیوارهای برشی فولادی نیمه مقید در دو حالت آزمایشگاهی و عددی انجام دادند. نتایج به‌دست‌آمده حاکی از رفتار پایدار و مطلوب دیوارهای برشی فولادی نیمه مقید در تغییر مکان‌های بزرگ تا دریفت ۵٪ است. همچنین با افزایش قطر بازشو، مقاومت و میزان استهلاک انرژی سیستم بشدت کاهش می‌یابد [۱۹]. شکسته‌بند و همکاران (۲۰۱۷) یک مطالعه آزمایشگاهی و عددی بر روی رفتار لرزه‌ای ورق جان دیوارهای برشی فولادی با تنش تسلیم پایین^۱ و تنش تسلیم بالا^۲ که فقط به تیرهای قاب متصل شده است، انجام داده‌اند. نتایج نشان داد که مقاومت برشی، شکل‌پذیری، ظرفیت اتلاف انرژی دیوارهای دارای ورق جان با تنش تسلیم بالا به ترتیب ۷۰، ۱۰ و ۳۰ درصد نسبت به نمونه‌های با تنش تسلیم پایین افزایش یافته‌اند. به نظر می‌رسد استفاده از صفحات جان با تنش تسلیم بالا در سیستم‌هایی که ورق جان فقط به تیرها متصل است یک راه‌حل امیدوارکننده برای جبران نگرانی در مورد ظرفیت برشی کم و اتلاف انرژی کم ناشی از صفحه فولادی جداشده از ستون‌ها باشد [۲۰].

همان‌گونه که بررسی مطالعات قبلی در زمینه دیوار برشی نیمه

1 - Low Yield Strength (LYS)

2 - High Yield Strength (HYS)

با ضخامت کم و پرهیز از ایجاد خرابی در ستون‌های اصلی قاب است [۳]. همان‌گونه که در مقدمه عنوان شد، در ادامه مطالعات مختلفی در زمینه‌ی استحصال درک بهتری از رفتار چنین سیستمی انجام گرفته است. شاخص‌ترین مطالعه در ایران تحقیق آزمایشگاهی-عددی انجام گرفته در مرجع [۷] است. شکل ۱ شمای کلی دیوار برشی فولادی قاب، ستون‌های فرعی (لبه‌ای) که با فاصله از ستون‌های اصلی دارند، تیرهای بالا و پایین و ورق دیوار تشکیل شده‌است.



شکل ۱. شمای کلی دیوار برشی فولادی نیمه مقید در لبه‌ها [۷]
 Fig. 1. Schematic view of Semi-Supported Steel Shear Wall (SSSWs) with boundary elements [7]

صحت سنجی می‌شود. در ادامه با تغییر در پارامترهای مذکور نیازهای چرخه‌ای همچون منحنی بار افزون، منحنی چرخه‌ای، ظرفیت نهایی، شکل‌پذیری انتقالی، انرژی مستهلک‌شده و تغییر شکل نهایی نمونه‌ها محاسبه و با مدل مبنا (مدل آزمایشگاهی مرجع ۷) مقایسه شده‌اند.

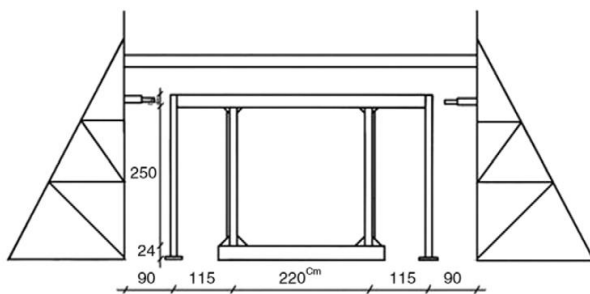
۲- مدل‌سازی و صحت سنجی

۱-۱ معرفی سیستم دیوار برشی فولادی نیمه مقید در لبه

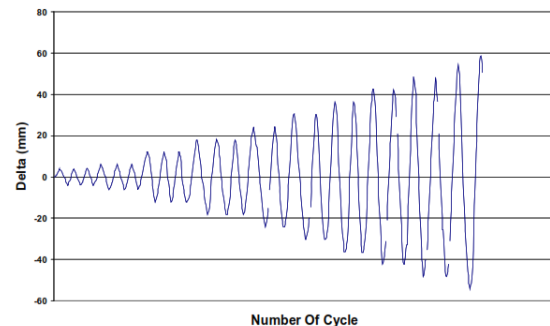
دراپور و همکاران در سال ۲۰۰۱ میلادی ایده‌ای مطرح نموده‌اند که بر اساس آن از اتصال ورق به ستون‌های اصلی فولادی جلوگیری نموده و برای عدم انتقال تنش‌های بزرگ از طرف ورق به ستون‌های اصلی، ورق فولادی را به ستون فرعی که در باربری قائم نقشی نداشته و صرفاً به ایجاد میدان کششی و تحمل بارهای جانبی کمک نموده متصل می‌گردد. به چنین سیستمی دیوار برشی فولادی نیمه مقید در لبه‌ها می‌گویند. مزیت این تکنیک امکان استفاده از ورق‌هایی

۱-۲ جزئیات مدل صحت سنجی

در این مطالعه از مدل آزمایشگاهی محرمی و حبیب نژاد که اطلاعات آن در مرجع [۷] ارائه شده‌است، به منظور تولید مدل صحت سنجی استفاده شده‌است. مدل مذکور یک دیوار برشی یک طبقه در داخل یک قاب یک دهانه و یک طبقه قرار داده شده و با استفاده از اتصالات جوشی به قاب پیرامونی متصل شده‌است. دیوار برشی دقیقاً در وسط قاب قرار گرفته و کل سیستم سازه‌ای حاصل به صورت متقارن درآمده و تحت بارگذاری چرخه‌ای مورد آزمایش قرار گرفته است. اتصالات تیر به ستون دیوار برشی و اتصال ستون قاب پیرامونی به تکیه‌گاه به صورت صلب و اتصال ستون فرعی به تیر فوقانی با استفاده از نبشی‌های زیر سری و بالاسری و یک ورق تودلی به صورت مفصلی ساخته شده‌است. ورق دیوار برشی از جنس فولاد نرم با تنش تسلیم ۱۹۵۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع و تنش گسیختگی ۲۹۸۷ کیلوگرم بر سانتی‌متر انتخاب شده تا شکل‌پذیری مناسبی از خود نشان دهد. برای سایر اعضا از فولاد معمولی که مشخصات آن با



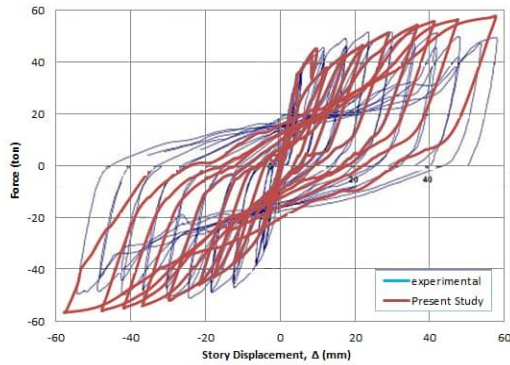
ب) مدل آزمایشگاهی سیستم SSSW
 b) Experimental model of SSSWs



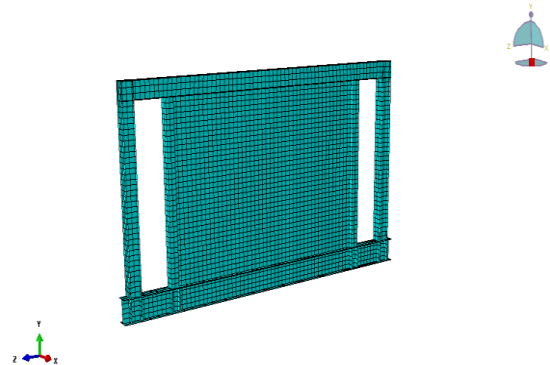
الف) پروتکل بارگذاری چرخه‌ای
 a) Cyclic loadin protocol

شکل ۲. پروتکل بارگذاری و مدل آزمایشگاهی قاب و دیوار برشی فولادی [۷]

Fig. 2. Cyclic loading and combined model of wall and frame



ب) منحنی هیستریزیس مدل آزمایشگاهی و مدل عددی مقاله حاضر
curves of experimental and FEM (present paper) model

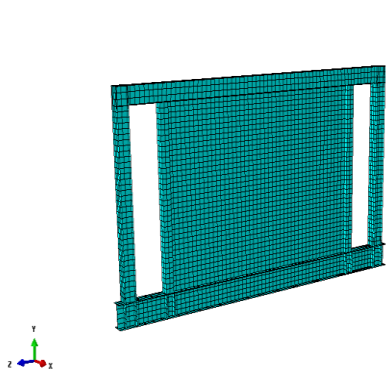


الف) مدل اجزاء محدود مش بندی شده
a) FEM meshed model

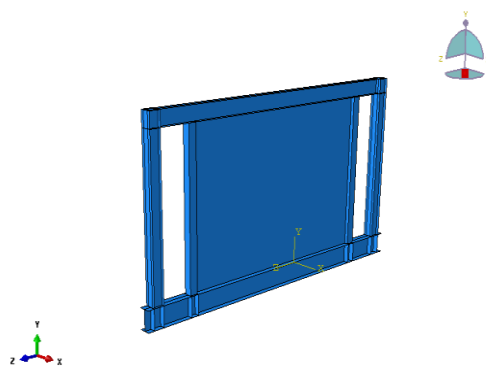
شکل ۳. مدل صحت سنجی ساخته شده در آباکوس برگرفته از مرجع ۷ به همراه نتیجه تحلیل غیرخطی چرخه‌ای
Fig. 3. Verification model developed in ABAQUS selected from Ref. [7] and nonlinear cyclic results

جهت مدل‌سازی مدل صحت سنجی از نرم‌افزار اجزا محدود آباکوس استفاده شده و ورق جان دیوار و اعضای قاب پیرامونی با استفاده از المان چهار گرهی S4R و روش انتگرال‌گیری کاهش‌یافته، مدل شده‌است. این المان در آباکوس بیانگر این است که در حل معادلات از انتگرال‌گیری کاهش‌یافته استفاده شده‌است. مدل اجزاء محدود صحت سنجی مش بندی شده در شکل ۳-الف) نشان داده شده‌است. در این مدل با تغییر ابعاد مش بندی تا رسیدن به بهینه‌ترین حالت مش بندی از نظر دقت نتایج و زمان آنالیز، آنالیز حساسیت انجام شده‌است. تغییر مکانی برابر با ۱ میلی‌متر در تغییر مکان گرهی مد اول کمانش ضرب شده و به‌عنوان شرایط اولیه (تغییر شکل اولیه) پیش از آنالیز به مدل اعمال گردید، این مقدار به‌اندازه‌ای بزرگ بوده که باعث کمانش برشی ورق و ایجاد میدان کششی قطری،

استفاده از آزمایش نمونه کشش مشخص و مورد استفاده قرار گرفته است. برای جلوگیری از کمانش خارج از صفحه دیوار در تراز تیر فوقانی (برای اعمال اثرات سقف)، مدل آزمایشگاهی با استفاده از یک سری مهار جانبی به قاب‌های دو طرف نمونه مهار گردید. برای بارگذاری نمونه از جک‌های هیدرولیکی استفاده شده که بر اساس دستورالعمل ارائه شده در مرجع [۲۱] با روش کنترل تغییر مکان به نمونه‌ها نیروهای لازم اعمال گردیده‌است. ضمناً تعداد سیکل‌های بارگذاری ۲۲ سیکل در شکل ۲-الف) نشان داده شده‌است. در نمونه موردنظر ارتفاع و عرض دهانه به ترتیب ۲/۷۴ و ۲/۲۰ متر، تیر از نوع IPE ۲۴۰، ستون‌های اصلی ۲IPE۱۶۰ و ستون‌های فرعی ۲UNP۱۲۰ انتخاب شده‌اند. همچنین ضخامت ورق فولادی ۲ میلی‌متر است. شکل ۲-ب) دیوار برشی موردنظر نشان داده شده‌است [۷].



ب) مدل مش بندی شده قبل از تحلیل
b) Meshed model before analysis



الف) مدل سرهم‌بندی شده اجزا محدود
a) Assembled FEM

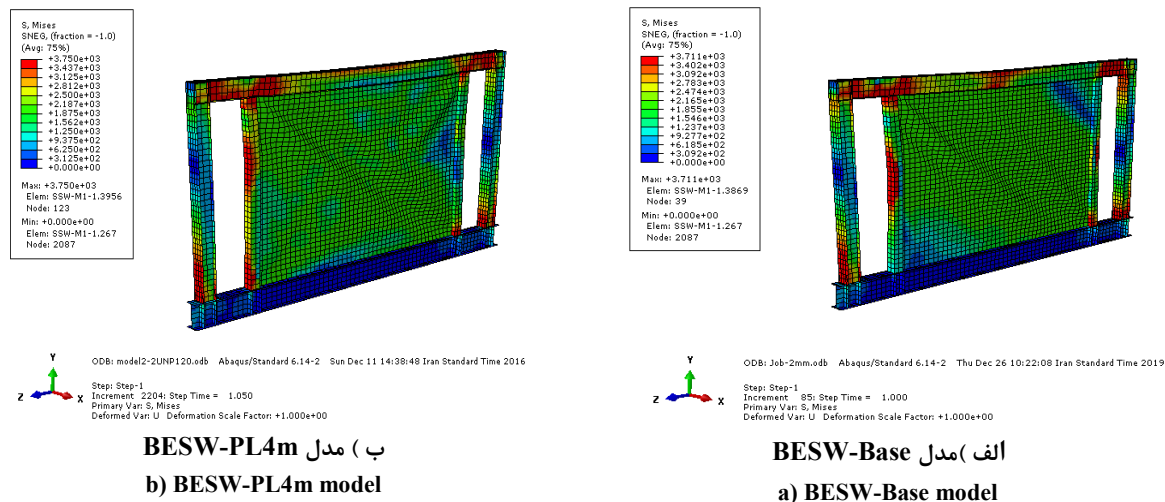
شکل ۴. نمونه‌ای از مدل عددی مورد استفاده در این مطالعه مدل‌سازی شده در آباکوس
Fig. 4. Numerical model of this study developed in ABAQUS

جدول ۱. مشخصات نمونه‌ها
Table 1. Model characteristics

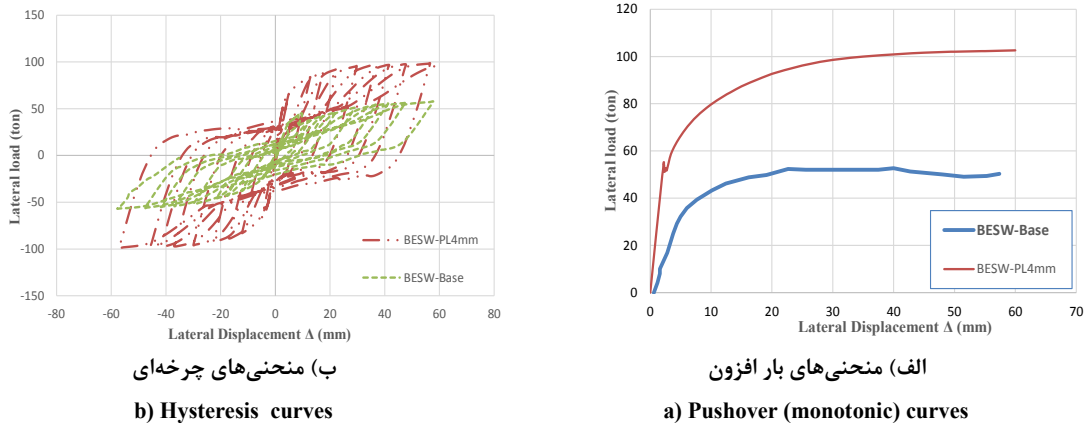
شماره مدل	کدگذاری	تغییر نسبت به مدل پایه
مدل ۱	BESW-Base	اتصال گیردار 2UNP120-b/L=0.7 ورق با ضخامت ۲ میلی‌متر (مدل اعتبارسنجی)
مدل ۲	BESW-PL4mm	اتصال گیردار 2UNP120-b/L=0.7 ورق با ضخامت ۴ میلی‌متر
مدل ۳	BESW-IPE220	اتصال گیردار IPE220-b/L=0.7 ورق با ضخامت ۴ میلی‌متر
مدل ۴	BESW-2WST	اتصال گیردار 2UNP120-b/L=0.7، استفاده از سخت‌کننده در دو طرف ابعاد سخت‌کننده‌ها مطابق کنترل آیین‌نامه [۲۲] ANSI/AISC 341-05. عرض ۵/۵ سانتی‌متر ضخامت ۴ میلی‌متر فواصل افقی ۵۰ سانتی‌متر و قائم ۴۵ سانتی‌متر است، ورق با ضخامت ۴ میلی‌متر است.
مدل ۵	BESW-1WST	اتصال گیردار 2UNP120-b/L=0.7، استفاده از سخت‌کننده در یک طرف ابعاد سخت‌کننده‌ها مطابق کنترل آیین‌نامه [۲۲] ANSI/AISC 341-05. عرض ۵/۵ سانتی‌متر ضخامت ۴ میلی‌متر و فواصل افقی ۵۰ سانتی‌متر و قائم ۴۵ سانتی‌متر
مدل ۶	BESW-RMC	اتصال گیردار 2UNP120-b/L=0.7 ورق با ضخامت ۴ میلی‌متر، استفاده از ستون فرعی میانی

نهایی سیستم، می‌توان به ناکاملی‌ها و تنش‌های پسماند موجود در مدل آزمایشگاهی و همچنین شرایط بارگذاری نمونه آزمایشگاهی اشاره نمود؛ بنابراین می‌توان نتیجه‌گیری کرد که نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل اجزاء محدود، به‌خوبی با نتایج آزمایشگاهی مطابقت داشته و می‌توان از روند مدل‌سازی ذکرشده برای بررسی پارامترهای موردنظر در این مطالعه استفاده نمود. لازم به ذکر است که با توجه به اینکه ضخامت ورق مدل مرجع [۷] (۲ میلی‌متر) از نظر مؤلفین این مقاله عدد کمی است، در ادامه و تولید مدل‌های مقاله حاضر از ورق با ضخامت ۴ میلی‌متر به‌عنوان مدل مبنا جهت مقایسه استفاده شده‌است. این مدل مبنا با نام اختصاری BESW-PL4mm تعریف شده‌است.

تقریباً بلافاصله پس از شروع تحلیل گردیده است. همان‌طور که در شکل ۳- (ب) نشان داده‌شده، نمودار چرخه‌ای مدل عددی مطابقت بسیار خوبی با نتایج آزمایشگاهی مرجع [۷] داشته و از نظر بیشینه هر یک چرخه‌ها نیز انطباقی خوبی مشاهده می‌شود. مقایسه مدل عددی و آزمایشگاهی نشان می‌دهد که در مدل آزمایشگاهی مرجع [۷] مقاومت نهایی و شکل‌پذیری به ترتیب تقریباً ۵۲ تن و ۹/۷ بوده و در مدل عددی این پژوهش به ترتیب ۵۶/۵ تن و ۱۰/۴۲ به‌دست‌آمده‌اند. با مقایسه نتایج شکل ۳، می‌توان ملاحظه نمود که سختی اولیه مدل اجزاء محدود، به میزان بسیار کمی از سختی اولیه مدل آزمایشگاهی بیشتر است. همچنین بار نهایی دو مدل، اختلاف اندکی با یکدیگر داشته که از جمله عوامل ایجاد این اختلاف در میزان بار



شکل ۵. اثر افزایش ضخامت ورق جان دیوار برشی فولادی نیمه مقید بر توزیع تنش فون-مایسیز
Fig. 5. The effect of SSSW web thickness increment on Von-Mises stress distribution



شکل ۶. تاثیر افزایش ضخامت ورق جان بر منحنی‌های بار افزون و چرخه‌ای
Fig. 6. The effect of SSSW web thickness increment on hysteresis and pushover curves

برای تمامی مصالح استفاده شده، رفتار تنش- کرنش به صورت دوخطی در نظر گرفته شده که مرحله اول ارتجاعی و مرحله دوم پسا-تسلیم است. رفتار مصالح فولادی به صورت همسان (Isotropic) و کرنش خمیری نهایی برای اجزای ساخته شده از فولاد شکل پذیر با مقاومت متوسط ۲۰ درصد در نظر گرفته شده است. ویژگی‌های مصالح تعریف شده در مازول Property شامل ویژگی‌های مصالح تمام سخت‌کننده‌ها در تیر بالایی و تیر پایینی، بال و جان ستون‌های اصلی، بال و جان ستون‌های فرعی، بال و جان تیر می‌باشند. از آنجا که تحلیلگر ضمنی (Implicit) آباکوس، توانایی بالایی در شبیه‌سازی رفتار غیرخطی دارد، از این تحلیلگر برای به دست آوردن پاسخ دیوار نسبت به تغییر مکان جانبی اعمال استفاده شده است. ضمناً اثر تغییر شکل‌های بزرگ و غیرخطی هندسی در تحلیل در نظر گرفته شده‌اند. کلیه اجزاء با استفاده از المان‌های حجمی پیوسته و با انتگرال کاهش یافته (S4R) موجود در آباکوس مش بندی شده است. به منظور اعمال بارگذاری جانبی نیز از همان الگوی بارگذاری نشان داده شده در شکل ۲-الف استفاده شده است. شرایط مرزی از جمله گیردار کردن پایین ستون‌ها و تیر پایین مانند تکیه‌گاه عمل نموده و همچنین مقید کردن جابجایی قاب در جهت عمود و چرخش موازی ورق جان در نرم‌افزار شبیه‌سازی شده است. روش بارگذاری در نرم‌افزار، با در نظر گرفتن یک گره مرجع در وسط جان تیر بالایی که تاریخچه بارگذاری به آن اعمال شده است، مدل‌سازی شده و برای توزیع نیروی این نقطه بر روی سطحی که در عمل نیرو به آن اعمال شده که سطح مذکور و گره مرجع، توسط گزینه کوپلینگ^۱ به یکدیگر

۱-۳- جزئیات مدل‌های پژوهش حاضر

همان‌طور که در قسمت قبلی تشریح شد، به منظور بررسی دقت نتایج مدل اجزاء محدود مدل SSSWs، نمونه دوم دیوار برشی فولادی نیمه مقید در لبه‌ای مدل محرمی و حبیب نژاد [۷] در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی و مورد بررسی قرار گرفته است. در واقع در ابتدا مدل صحت‌سنجی بر اساس مدل شماره ۲ مرجع [۷] تولید شده است. در ادامه و با تغییر در مشخصات مدل (بدون طراحی دوباره)، مشخصات نمونه‌های تحلیلی و پارامترهای مورد مطالعه در مدل‌های عددی این مقاله از جمله (۱) تغییر شکل مقطع ستون‌های فرعی بدون تغییر در سایز آن، (۲) سخت‌کننده‌ها جان دیوار برشی، (۳) ستون فرعی میانی تعیین و فهرست آن‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. اجزایی که برای این دیوار برشی فولادی نیمه مقید در مازول Part ایجاد شده شامل ستون‌های اصلی، ستون‌های فرعی، تیرهای بالا و پایین قاب، ورق جان دیوار برشی، سخت‌کننده‌ها بوده که هر کدام مطابق با اندازه واقعی مدل‌سازی شده‌اند. در شکل ۴-الف هندسه مدل پس از سرهم گذاری اجزاء در مازول Assembly و شکل ۴-ب مدل مش بندی شده قبل از تحلیل مشاهده می‌شود.

جدول ۲. نتایج حاصل از تحلیل نمونه BESW-PL4mm و مقایسه آن با BESW-Base (مدل اعتبار سنجی)

Table 2. The result of BESW-PL4mm analysis and its comparison with BESW-Base (verification model)

نمونه	δ_{max} (mm)	سختی اولیه (ton/mm)	شکل پذیری μ	مقاومت نهایی (ton)	انرژی تلف شده چرخه‌ای (KJ)
BESW-Base	۶۰	۹/۸۱	۱۰/۴۲	۵۶/۵	۴۲۸
BESW-PL4mm	۶۰	۲۴/۸۹	۱۴/۵	۱۰۲/۵	۸۴۵/۸
تغییرات (۱)	۰	۱۵۴	۳۹	۸۱	۹۸

۴-۱- اثر افزایش ضخامت دیوار برشی

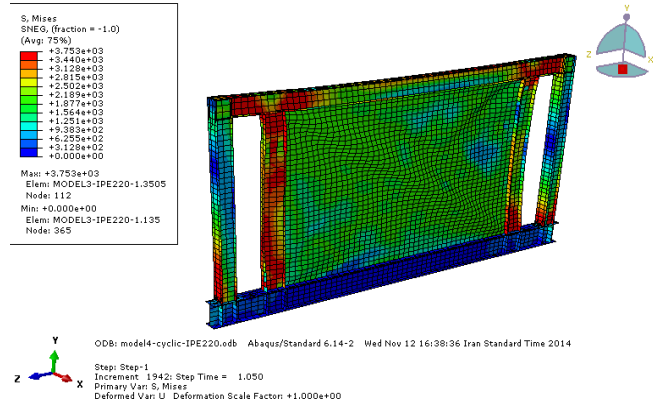
به منظور بررسی تأثیر ضخامت ورق بر رفتار خطی و غیرخطی دیوار، دو مدل BESW-Base (مدل اعتبار سنجی با ضخامت ۲ میلی‌متر) و BESW-PL4mm (مدل اعتبار سنجی با ضخامت ۴ میلی‌متر) در نظر گرفته شده‌است. به جز تغییر در ضخامت ورق مابقی شرایط مدل کاملاً شبیه مدل مبنا (مدل مرجع [۷]) است. در شکل ۵ کانتورهای تنش فون مایسیز مدل BESW-Base و BESW-PL4mm در واحد کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع نمایش داده شده‌است. مطابق این شکل، تنش ماکزیمم در چشمه اتصال، دو انتهای ستون‌های فرعی و دو انتهای تیر فوقانی (حداصل ستون فرعی و ستون اصلی) اتفاق افتاده است. در ادامه دو مدل تحت بارگذاری تک آهنگ تا حدود ۶۰ میلی‌متر (تغییر مکان کنترل) بارگذاری شده و شکل ۶-الف) به دست آمد. بعلاوه با تحلیل چرخه‌های نمونه‌ها در اثر بار چرخه‌ای نمودار چرخه‌ای در شکل ۶-ب) به دست آمده است. برای امکان مقایسه کمی و تحلیل نمونه BESW-PL4mm با نتایج مدل BESW-Base، سختی الاستیک، شکل‌پذیری انتقالی، مقاومت نهایی و انرژی تلف‌شده در جدول ۲ مقایسه شده‌اند.

با توجه به نتایج ارائه‌شده در جدول ۲ می‌توان نتیجه‌گیری کرد که با افزایش ضخامت ورق به ۴ میلی‌متر سختی اولیه به میزان ۱۵۴٪، شکل‌پذیری به میزان ۳۹٪، مقاومت نهایی به میزان ۸۱٪ و ظرفیت اتلاف انرژی به میزان ۹۸٪ افزایش می‌یابد. بعلاوه با توجه به نمودار نیرو-تغییر مکان، شیب اولیه نمودار مدل با ورق ۴ میلی‌متر نسبت به مدل اعتبار سنجی بیشتر است که نتیجه آن افزایش سختی اولیه و همچنین بالاتر بودن تراز این نمودار نسبت به نمونه BESW-Base و افزایش مقاومت نهایی است. مقایسه نمودارهای چرخه‌ای دو نمونه نشان می‌دهد نمودار نمونه BESW-PL4mm پهن‌تر از نمونه BESW-Base است. با توجه به بیشتر بودن سطح زیر منحنی نمونه BESW-PL4mm انرژی تلف‌شده چرخه‌ای بیشتری را نتیجه

جدول ۳. نتایج حاصل از بررسی عددی، نمونه BESW-IPE220

Table 3. The result of BESW-IPE220 analysis and its comparison with BESW-PL4mm

نمونه	δ_{max} (mm)	سختی اولیه (ton/mm)	شکل‌پذیری μ	مقاومت نهایی (ton)	انرژی تلف‌شده چرخه‌ای (KJ)
BESW-IPE220	۶۰	۲۶/۱۷	۱۴/۴۵	۱۰۸/۶	۹۰۷/۲۱
BESW-PL4mm	۶۰	۲۴/۸۹	۱۴/۵	۱۰۲/۵	۸۴۵/۸
تغییرات (۱)	۰	۵	۰/۳۵	۶	۷



شکل ۷. کانتور تنش فون-مایسیز در انتهای بارگذاری بارافزون در مدل BESW-IPE220

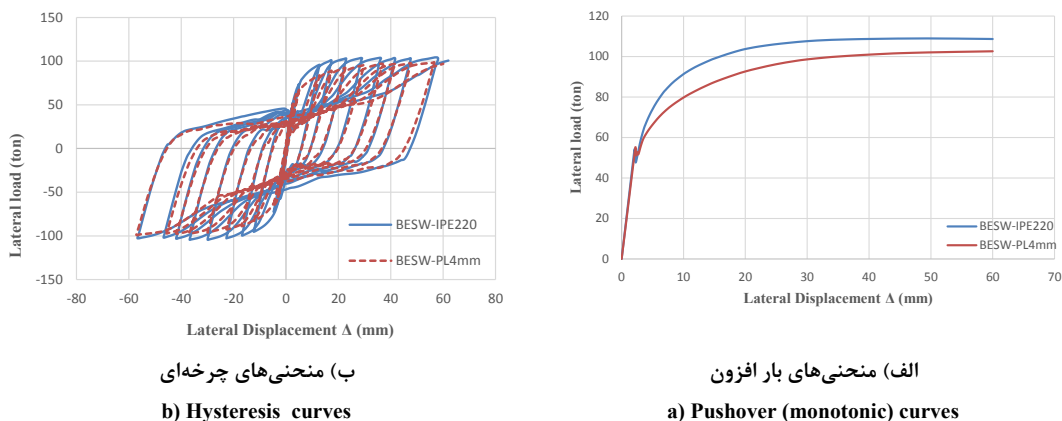
Fig. 7. BESW-IPE220 Von-Mises stress contour at the ultimate loading stage

بسته شدند و تحت بارگذاری تک آهنگ و چرخه‌ای قرار گرفته شده که با استفاده از خروجی‌های نرم‌افزار، نمودارهای چرخه‌ای و بارافزون ترسیم و برای مقایسه با نتایج آزمایشگاهی ثبت گردیدند. پارامترهای دیوار برشی فولادی نیمه مقید در لبه از جمله (۱) سختی اولیه (۲) شکل‌پذیری (۳) مقاومت نهایی (۴) ظرفیت اتلاف انرژی چرخه‌ای با استفاده از خروجی‌های نرم‌افزار آباکوس در جداولی ثبت و با نتایج مدل (با عنوان مدل مبنا) مقایسه شده‌اند.

۳- بحث و بررسی نتایج

در این قسمت از مقاله تأثیر عواملی که در بخش ۲-۳ و مطابق جدول ۱ معرفی شده‌اند بر بازتاب غیرخطی مدل SSSWs در قالب خروجی‌های گرافیکی و جداول مقایسه‌ای ارائه خواهد شد. توزیع کانتور تنش فون مایسیز^۱ برای تشخیص نقاط با بحرانی‌ترین تمرکز تنش، نمودار بارافزون^۲ در برابر بارگذاری تک آهنگ تغییر مکان کنترل برای تعیین سختی الاستیک، شکل‌پذیری انتقالی و تغییر مکان تسلیم و نمودار چرخه‌ای برای توجه به موضوعاتی از قبیل زوال سختی و مقاومت، باریک شدگی و انرژی تلف‌شده چرخه‌ای از جمله مهم‌ترین خروجی‌هایی است که در ادامه برای هر یک از متغیرهای اصلی پژوهشی ارائه می‌گردد.

- 1 - von-mises stress contour
- 2 - pushover



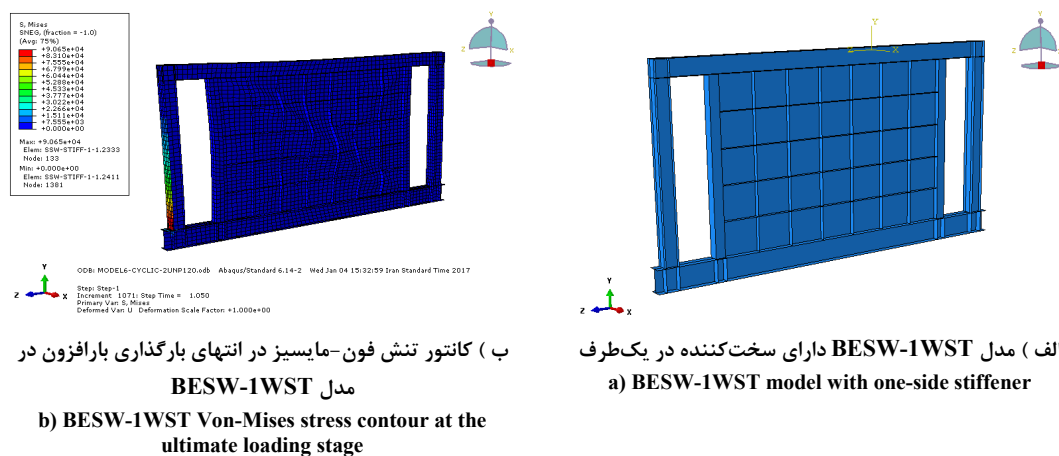
شکل ۸. تاثیر تغییر مقطع ستون‌های فرعی بر منحنی‌های بار افزون و چرخه‌ای
Fig. 8. The effect of changing SSSW boundary element section on hysteresis and pushover curves

مورد بررسی نیز تحت نیروی چرخه‌ای قرار گرفته است. کانتور تنش فون مایسیز در شکل ۷ نشان داده شده است. مطابق این شکل تنش بیشینه همانند مدل BESW-PL4mm است. به عبارتی تغییر در شکل مقطع ستون تأثیری بر تمرکز بیشینه تنش ندارد. در ادامه دو مدل تحت بارگذاری تک آهنگ تا حدود ۶۰ میلی‌متر (تغییر مکان کنترل) بارگذاری شده و شکل ۸-الف) به دست آمد. به علاوه نمودار چرخه‌ای دو مدل در شکل ۸-ب) نمایش داده شده است. شکل ۸ نشان می‌دهد سختی اولیه و سطح زیر نمودار دو نمونه به مقدار ناچیزی اختلاف و با نتایج ارائه شده در جدول ۳ مطابقت خوبی داشته است. برای امکان مقایسه کمی و تحلیل دقیق‌تر نمونه BESW-IPE220 با BESW-PL4mm نتایج تحلیل این دو نمونه در جدول ۳ ارائه شده است. با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۳، با تغییر مقطع ستون‌های فرعی، سختی اولیه ۵٪، مقاومت نهایی به میزان ۶٪ و

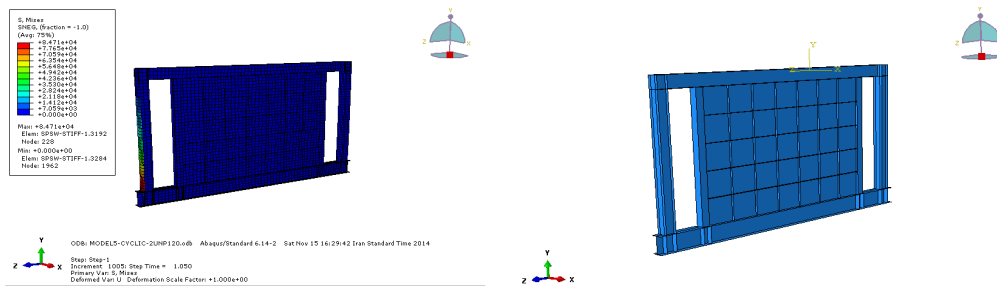
شایان ذکر است در ادامه و برای مقایسه‌ی نمونه‌های بعدی به علت کم بودن ضخامت ۲ میلی‌متر ورق جان، ضخامت جان ۴ میلی‌متر به عنوان مدل مینا (نمونه BESW-PL4mm) در نظر گرفته می‌شود.

۱-۵- اثر تغییر مقطع ستون‌های فرعی

در مدل BESW-IPE220 ضخامت ورق ۴ میلی‌متر و مقطع ستون فرعی IPE220 در نظر گرفته شده و نتایج با و ستون‌های BESW-PL4mm (مدل با ستون فرعی ۲۰ UNP) مقایسه شده است. هدف از بررسی این نمونه، قضاوت در مورد تأثیر نوع مقطع ستون‌های فرعی، بر پارامترهای دیوار برشی فولادی است. برای بررسی اثر نوع مقطع ستون‌های فرعی همراه با اتصالات گیردار، دیوار برشی فولادی



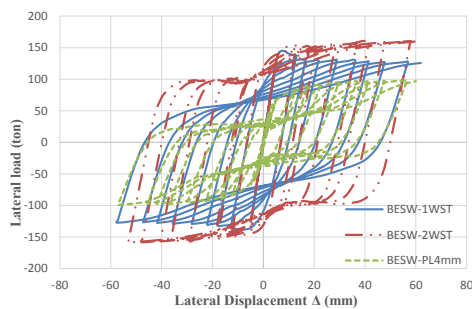
شکل ۹. اثر استفاده از سخت‌کننده یکطرفه جان بر توزیع تنش فون-مایسیز
Fig. 9. The effect of SSSW one-side stiffener on Von-Mises stress distribution



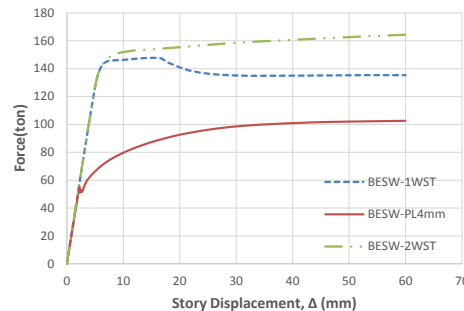
ب) کانتور تنش فون-مایسیز در انتهای بارگذاری بارافزون در مدل BESW-2WST
b) BESW-2WST Von-Mises stress contour at the ultimate loading stage

الف) مدل BESW-2WST دارای سخت کننده در دو طرف
a) BESW-2WST model with two-side stiffener

شکل ۱۰. اثر استفاده از سخت کننده دوطرفه جان بر توزیع تنش فون-مایسیز
Fig. 10. The effect of SSSW two-side stiffener on Von-Mises stress distribution



ب) منحنی های چرخه ای
b) Hysteresis curves



الف) منحنی های بار افزون
a) Pushover (monotonic) curves

شکل ۱۱. تأثیر استفاده از سخت کننده در یک و دو طرف ورق جان بر منحنی های بار افزون و چرخه ای
Fig. 11. The effect of one and two-side stiffener on hysteresis and pushover curves

قابل تأمل اینکه با استفاده از سخت کننده تمرکز تنش بیشینه فون مایسیز به پایین ستون اصلی منتقل شده است. در توجیه این پدیده می توان گفت که با افزایش سخت کننده، سختی خارج از صفحه دیوار برشی و در نتیجه مقاومت کمانشی آن افزایش یافته است. در نتیجه قبل از اینکه ورق جان به تسلیم برسد، ستون های اصلی زودتر به نقطه تسلیم میرسند. این موضوع می تواند به عنوان یک نقطه منفی قلمداد شود زیرا اساس استفاده از ستون فرعی، جدا کردن ستون های باربر جانبی از ستون های اصلی سازه است.

در ادامه دو مدل با سخت کننده به همراه مدل BESW-PL4mm تحت بارگذاری تک آهنگ تا حدود ۶۰ میلی متر (تغییر مکان کنترل) بارگذاری شده و شکل ۱۱-الف) به دست آمد. به علاوه با تحلیل نمونه ها در اثر بار چرخه ای نمودار چرخه ای در شکل ۱۱-ب) به دست آمده است. شکل ۱۱ نشان می دهد اضافه کردن سخت کننده تأثیر جزئی بر سختی اولیه دارد. مطابق جدول ۴

ظرفیت اتلاف انرژی نمونه به میزان ۷٪ افزایش و شکل پذیری به مقدار ناچیزی کاهش می یابد

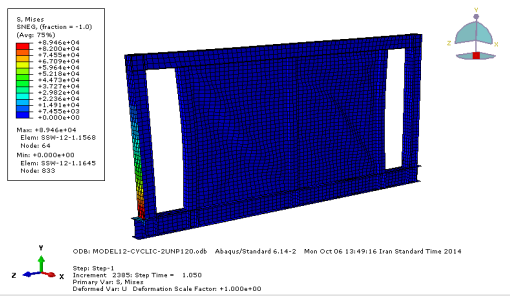
۱-۶- بررسی اثر سخت کننده ها

استفاده از سخت کننده در بهبود ظرفیت بعد از کمانش دیوارها برشی فولادی از قبل تأیید شده است؛ اما اندازه تأثیر سخت کننده در بهبود رفتار دیوار برشی SSSWs قبلاً مورد توجه قرار نگرفته است. بدین منظور مدل های BESW-1WST و BESW-2WST به ترتیب با استفاده از سخت کننده در یک و دو طرف ورق دیوار برشی با ابعادی مطابق کنترل ۰۵ - AISC ۳۴۱ [۲۲] (عرض ۵/۵ سانتی متر، ضخامت ۴ میلی متر، فواصل افقی ۵۰ سانتی متر و قائم ۴۵ سانتی متر) ایجاد شده است. شکل ۹ و ۱۰ مدل اجزاء محدود سخت کننده یک و دو طرف جان به همراه توزیع تنش فون مایسیز را نشان میدهند. نکته

جدول ۴. نتایج بررسی عددی نمونه BESW-1WST BESW-2WST و مقایسه با نمونه مینا

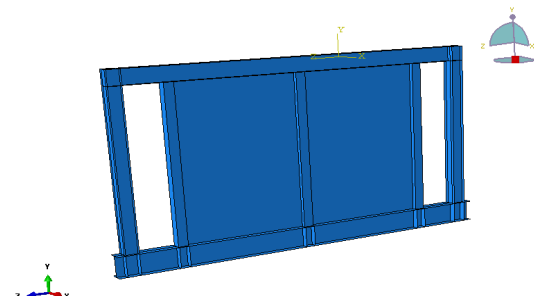
Table 4. The result of BESW-1WST and BESW-2WST analysis and its comparison with BESW-PL4mm

انرژی تلف شده چرخهای	مقاومت نهایی	شکل پذیری	سختی اولیه	δ_{max}	نمونه
(KJ)	(ton)	μ	(ton/mm)	(mm)	
۱۱۲۹/۷۶	۱۳۵/۳	۱۱/۴۵	۲۵/۸	۶۰	BESW-1WST
۱۳۹۴/۴	۱۶۴/۳	۹/۴۵	۲۵/۸۶	۶۰	BESW-2WST
۸۴۵/۸	۱۰۲/۵	۱۴/۵	۲۴/۸۹	۶۰	BESW-PL4mm
					درصد تغییرات
۳۳	۳۲	-۲۱	۴	۰	نسبت به مدل مینا
					درصد تغییرات
۶۵	۶۰	-۳۵	۴	۰	نسبت به مدل مینا



ب) کانتور تنش فون-مایسیس در انتهای بارگذاری بارافزون در مدل BESW-RMC

b) BESW-RMC Von-Mises stress contour at the ultimate loading stage



الف) مدل BESW-RMC دارای یک فرعی ستون میانی
a) BESW-RMC model with one middle secondary column

شکل ۱۲. اثر استفاده از ستون فرعی میانی بر توزیع تنش فون-مایسیس

Fig. 12. The effect one middle secondary column on Von-Mises stress distribution

۷-۱- بررسی اثر اضافه کردن ستون میانی

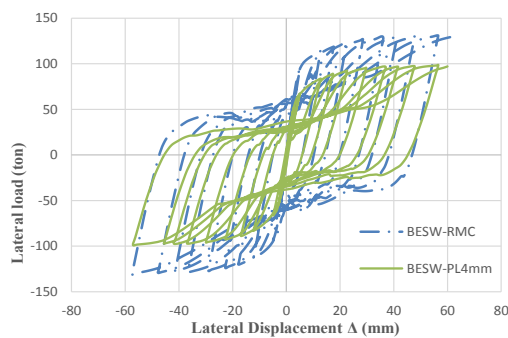
در مدل BESW-RMC از اتصال گیردار همراه با ستون فرعی میانی علاوه بر ستون‌های فرعی لبه‌ای استفاده شده‌است. سایر مشخصات دیوار کاملاً شبیه به مدل BESW-PL4mm است. شکل ۱۲ الف مدل‌های اجزاء محدود ساخته شده با نرم‌افزار آباکوس را نشان می‌دهد. برای بررسی اثر ستون فرعی میانی نسبت به نمونه مینا، دیوار برشی فولادی تحت نیروی چرخه‌ای قرار گرفته که در شکل ۱۲ ب کانتور تنش فون مایسیس بیشینه برحسب کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع نشان داده شده‌است. در اینجا تنش ماکزیمم در پای ستون اصلی اتفاق افتاده و ورق‌های دیوار حدفاصل ستون‌های فرعی کم‌انرژی شده‌اند. در توجیه این پدیده می‌توان گفت که با استفاده از ستون فرعی میانی، سختی خارج از صفحه دیوار برشی و در نتیجه مقاومت کم‌انرژی آن افزایش یافته است. پس عملاً دیوار برشی اولیه به دو دیوار برشی با طول کوتاه‌تر تقسیم شده‌اند و به همین دلیل

سختی اولیه در هر دو نمونه به میزان ۴٪ افزایش یافته است. همچنین سطح زیر نمودار دو نمونه به مقدار ناچیزی اختلاف و با نتایج ارائه شده در جدول ۳ مطابقت خوبی دارد. به علاوه مقاومت نهایی در نمونه BESW-1WST به اندازه ۳۲٪ و در نمونه BESW-2WST به اندازه ۶۰٪ افزایش یافته است. همچنین اضافه کردن سخت‌کننده در یک و دو طرف باعث شد انرژی تلف شده به ترتیب ۳۳٪ و ۶۵٪ افزایش یابد. دلیل این افزایش را می‌توان در اثر افزایش سختی خارج از صفحه ورق جان تعریف نمود؛ اما شکل پذیری در نمونه دارای سخت‌کننده یک‌طرفه ۲۱٪ و در نمونه دارای سخت‌کننده دو طرفه ۳۵٪ کاهش یافته است؛ بنابراین در محدوده مدل‌های ساخته شده در این مقاله، با اضافه کردن سخت‌کننده‌ها ضمن افزایش قابلیت اتلاف انرژی، مقاومت نهایی و سختی اولیه، رفتار دیوار به جز شکل پذیری بهبود پیدا می‌کند.

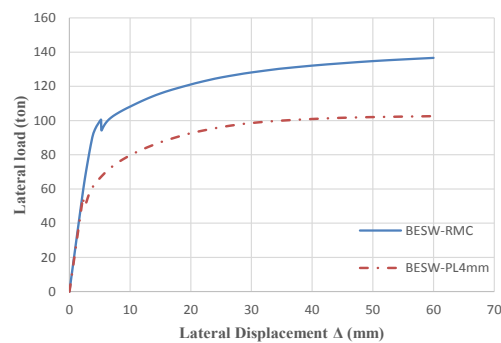
جدول ۵. نتایج نمونه‌های BESW-RMC و BESW-PL4mm (مینا) به‌وسیله بررسی عددی

Table 5. The result of BESW-RMC analysis and its comparison with BESW-PL4mm

انرژی تلف‌شده چرخه‌ای (KJ)	مقاومت نهایی (ton)	شکل‌پذیری μ	سختی اولیه (ton/mm)	δ_{max} (mm)	نمونه
۱۰۹۰/۲۷	۱۳۶/۶	۱۱/۵۴	۲۶/۵	۶۰	BESW-RMC
۸۴۵/۸	۱۰۲/۵	۱۴/۵	۲۴/۸۹	۶۰	BESW-PL4mm
+۲۹	+۳۳	-۲۶	+۶/۵	۰	تغییرات (%)



ب) منحنی‌های چرخه‌ای
b) Hysteresis curves



الف) منحنی‌های بار افزون
a) Pushover (monotonic) curves

شکل ۱۳. مقایسه منحنی‌های بار افزون و چرخه‌ای نمونه‌های BESW-RMC و BESW-PL4mm

Fig. 13. The effect one middle secondary column on hysteresis and pushover curves

۴- نتیجه‌گیری

کمبود مطالعات در زمینه دیوارهای برشی فولادی نیمه مقید در لبه (SSSWs) و وجود عوامل تأثیرگذاری همچون ضخامت ورق دیوار، نوع مقطع ستون‌های لبه‌ای (المان‌های لبه‌ای-مرزی)، وجود ستون فرعی میانی، استفاده از سخت‌کننده در یک یا دو طرف دیوار بر مقاومت نهایی دیوار، توزیع تنش فون مایسیز، روند پلاستیک شدگی اعضا قاب، انرژی جذب و مستهلک‌شده، تغییر مکان جانبی و نمودار چرخه‌ای، نیاز به مطالعات بیشتر و شناخت بیشتر این سیستم را ضروری نموده است. به علت هزینه‌بر بودن ساخت مدل‌های آزمایشگاهی، استفاده از قابلیت شبیه‌سازی در نرم‌افزار آباکوس یک جایگزین مناسب است. به همین جهت در مقاله حاضر در ابتدا برای اطمینان از صحت مدل‌سازی دیوار SSSWs، ابتدا با استفاده از مدل آزمایشگاهی مرجع [۷]، صحت مدل عددی تأیید گردید. در ادامه با تغییر متغیرهای فوق‌الذکر، رفتار

ستون‌های اصلی زودتر به نقطه تسلیم رسیده‌اند.

در ادامه دو مدل BESW-RMC و BESW-PL4mm در برابر بارگذاری تک آهنگ و چرخه‌ای تحلیل شده‌اند. نتایج به‌دست‌آمده در قالب شکل ۱۳ و جدول ۵ ارائه شده‌است. از نتایج ارائه‌شده در جدول ۵ می‌توان نتیجه‌گیری کرد که با افزودن ستون فرعی میانی در دیوار برشی فولادی و اتصال گیردار ستون‌های فرعی (BESW-RMC)، سختی اولیه به میزان ۷٪، انرژی تلف‌شده به میزان ۲۹٪ و مقاومت نهایی نمونه به میزان ۳۳٪ افزایش داشته و شکل‌پذیری نمونه به‌اندازه ۲۶٪ کاهش می‌یابد. بررسی کیفی شکل ۱۳ نشان می‌دهد نمودار نمونه BESW-RMC دارای شیب اولیه بیشتر (سختی اولیه بیشتر) و با توجه به منحنی چرخه‌ای پهن‌تر نمونه، انرژی تلف‌شده بیشتری را به همراه داشته که با نتایج جدول ۵ تطابق خوبی دارد؛ بنابراین می‌توان نتیجه‌گیری نمود که افزایش سختی خارج از صفحه ورق جان، موجب تأخیر در رسیدن نمونه به جابجایی نهایی شده و شکل‌پذیری را کاهش می‌دهد.

۵- منابع

- [1] Berman, J.W., Bruneau, M., 2008. "Capacity Design of Vertical Boundary Elements in Steel Plate Shear Walls". *Engineering Journal*, American Institute of Steel Construction, Vol. 45, pp. 57-72.
- [2] Xue, M., Lu, L-W., 1994. "Influence of steel shear wall panels with surrounding frame members". In: Proc. SSRC annual technical session, pp. 339-54.
- [3] Driver, R.G., Grondin, G.Y., Behbahanifard, M., and Hussain, MA., 2001. "Recent developments and future directions in steel plate shear wall research". In: Proc. North American Steel Construction Conference. May.
- [4] Sabouri-Ghomi, S., 2002. Lateral load resisting systems: an introduction to steel shear walls. Angize Pop. (In Persian)
- [5] Takahashi, Y., Takemoto, Y., Takeda, T., and Takagi, M., 1973. Experimental study on thin steel shear walls and particular bracing under alternative horizontal load. In Preliminary Report, IABSE. Symposium on Resistance and Ultimate Deformability of Structures Acted on Well-defined Repeated Loads, Lisbon, Portugal, pp. 185-191.
- [6] Habibneghad, A., 2004. "Behavior of semi-supported thin steel shear walls under lateral loads". University of Tarbiat Modares, Iran. (In Persian)
- [7] Moharrami, H., Habibnejad, A., Mazrouei, A., and Alizadeh, H., 2006. Semi-supported thin steel shear walls. Research report no. 1-4679. The Building and Housing Research Centre. (In Persian)
- [8] Moharrami, H., Habibnejad, A., 2008. "Advantages of using Shear Walls thin for reinforcing steel structures". *Journal of Construction and Steel*, 4(4), pp. 70-82. (In Persian)
- [9] Sabouri-Ghomi, S., Kharazi, M.H., and Mam Azizi, S., 2008. "Buckling behavior improvement of steel palate shear wall systems". *Struct. Design Tall Spec. Build*, 17(4), pp. 823-837.
- [10] Sabouri-Ghomi, S., Gholhaki, M., 2008. "Experimental Study of Two Three-Story Ductile Steel Plate Shear Walls". *Amirkabir Journal*, 39(2), pp. 29-42. (In Persian)
- [11] Yu, C., Chen, Y., 2009. Steel Sheet Sheathing Options for Cold-Formed Steel Framed Shear Wall Assemblies Providing Shear Resistance – Phase 2 . Report No. UNT-G70752, University of North Texas.
- [12] Jahanpour, A., Moharrami, H., and Aghakoochak, A., 2011. "Evaluation of ultimate capacity of semi-supported steel shear walls". *Journal of Constructional Steel Research*, 67(6), pp. 1022-1030.
- [13] Sabouri-Ghomi, S., Asad Sajjadi, S.R., 2012. "Experimental and theoretical studies of steel shear walls with and without stiffeners". *Journal of Constructional Steel Research*, 75, pp. 152-159.
- [14] Pirasteh, A., Kiani, H., 2013. "Investigation of stiffeners effect on steel shear wall behavior". 7th National Congress on Civil Engineering, Sistan and Baloochestan University, Zahedan. (In Persian)

تک آهنگ و چرخه‌ای سیستم SSSW مطالعه شده است. در محدوده فرض‌ها و دامنه مدل‌های این تحقیق، نتایج زیر قابل ارائه می‌باشند:

۱- افزایش ضخامت ورق از ۲ به ۴ میلی‌متر باعث افزایش سختی اولیه، شکل‌پذیری و ظرفیت اتلاف انرژی می‌شود. ظرفیت اتلاف انرژی برای مدل با ورق ۴ میلی‌متر، ۹۷٪ بیشتر از نمونه با ورق ۲ میلی‌متر به دست آمد.

۲- در صورت استفاده از مقطع IPE۲۲۰ برای ستون‌های لبه‌ای، سختی اولیه، مقاومت نهایی و ظرفیت اتلاف انرژی به مقدار ناچیزی نسبت به نمونه مینا با مقطع ۲UNP۱۲۰ افزایش یافته اما شکل‌پذیری تقریباً ثابت باقی می‌ماند؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در محدوده مدل‌های این مقاله و فرض‌های اتخاذ شده تغییر نوع پروفیل (بدون تغییر در مساحت آن) تأثیر ناچیزی بر عملکرد سیستم SSSW دارد.

۳- با نصب سخت‌کننده‌ها در دو طرف ورق جان، سختی اولیه، مقاومت نهایی و انرژی تلف شده به ترتیب به اندازه ۴٪، ۶۰٪ و ۶۵٪ افزایش و شکل‌پذیری انتقالی ۳۵٪ کاهش یافته است. در حالتی که فقط در یک طرف دیوار سخت‌کننده وجود داشته باشد، مضاف بر آنکه تشکیل مفصل خمیری در پای ستون مشاهده گردید (تمرکز تنش بیشینه فون مایسیز در پای ستون اصلی)، سختی اولیه، مقاومت نهایی و اتلاف انرژی به ترتیب ۴٪، ۳۲٪ و ۳۳٪ افزایش و شکل‌پذیری ۲۱٪ کاهش می‌یابد.

۴- با افزودن ستون فرعی میانی در سیستم SSSW (موضوعی که در مطالعات قبلی بدان توجه نشده بود)، سختی اولیه، مقاومت نهایی و انرژی تلف شده به ترتیب به اندازه ۶٪، ۲۹٪ و ۳۳٪ افزایش و شکل‌پذیری انتقالی ۲۶٪ کاهش یافته است؛ بنابراین در محدوده فرضیات به کار گرفته شده در این پژوهش می‌توان نتیجه گرفت که با اضافه شدن ستون فرعی میانی، سختی خارج از صفحه ورق جان افزایش یافته و در نتیجه شکل‌پذیری را کاهش می‌یابد.

- behavior of the secondary columns in semi-supported steel shear walls". *Thin-Walled Structures*, 93, pp. 94-101.
- [19] Shekastehband, B., Azaraxsh, A., Showkati, H., and Pavir, A., 2017. "Behavior of semi-supported steel shear walls: Experimental and numerical simulations". *Engineering structures*, 135, pp. 161-76.
- [20] Shekastehband, B., Azaraxsh, A, and Showkati, H., 2017. "Experimental and numerical study on seismic behavior of LYS and HYS steel plate shear walls connected to frame beams only". *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 17(1), pp.154-68.
- [21] Krawinkler, H., 1992. Guidelines for cyclic seismic testing of components of steel structures. Vol. 24. Applied Technology Council.
- [22] AISC A. AISC 341-05, 2005. Seismic Provisions for Structural Steel Buildings. Chicago, IL: American Institute of Steel Construction.
- [15] jahanpour, A., Sadat Kholerdi, S.E., 2014. "The effect evaluation of Secondary Column to beam connection type on ultimate strength of Semi-Supported Steel Shear Walls thin at the edges, 8th International Congress of Civil Engineering, college of Civil Engineering, Babol. (In Persian)
- [16] jahanpour, A., Farokhzad, M., and Sadat Kholerdi, S.E., 2015. "Investigation of Plate Thicknesses and Low Yield Point Steel (LYP) in Behavior of Semi-Supported Steel Shear Walls Reinforced with Glass Fiber Polymers (GFRP) ". 10th International Congress on Civil Engineering, 5-7 May, University of Tabriz, Tabriz, Iran. (In Persian)
- [17] Bahmaei, J., Siahpolo, N., 2018. "Nonlinear performance evaluation of semi-suspended steel shear walls reinforced with horizontal and vertical stiffeners". 9th National Conference and Third International Conference on Structural and Steel, 2018. (In Persian)
- [18] Jahanpour, A., Moharrami, H., 2015. "Evaluation of

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

J. A. Bahmaei, N. Siahpolo, Studing the Behavior of Semi- supported Steel Shear Wall against Monotonic and Cyclic Loads, Amirkabir J. Civil Eng., 53(4) (2021): 1545-1558.

DOI: [10.22060/ceej.2020.17039.6434](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.17039.6434)

