



بررسی ابعاد بازشو، سختی المان‌های مرزی و نوع ورق میانی بر رفتار دیوار برشی فولادی

فرزاد حاتمی^{۱*}، نیما پاسلار^۲

^۱ مرکز تحقیقات سازه و زلزله، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

^۲ گروه مهندسی عمران، واحد قشم، دانشگاه آزاد اسلامی، قشم، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۰۲-۲۴

بازنگری: ۱۳۹۷-۰۸-۱۹

پذیرش: ۱۳۹۷-۱۰-۱۸

ارائه آنلاین: ۱۳۹۷-۱۰-۱۸

کلمات کلیدی:

دیوار برشی فولادی

بازشو

المان‌های مرزی

شکل‌پذیری

جذب انرژی

ورق میانی

خلاصه: دیوار برشی فولادی به عنوان یک سیستم باربر جانبی کارآمد در طی چند دهه گذشته همواره مورد توجه طراحان و محققان قرار گرفته است. شرایط گوناگون ورق و المان‌های مرزی هر یک به نحوی بر رفتار دیوار برشی فولادی تأثیرگذار هستند. در این مقاله رفتار این سیستم در شرایطی که ورق میانی دارای بازشو مرکزی با قطر متفاوت، ورق میانی از جنس فولاد متفاوت و افزایش سختی در المان‌های مرزی صورت پذیرفته است، مورد بررسی قرار گرفته است. در این مطالعه با استفاده از روش اجزای محدود سه هدف دنبال شد. الف) بررسی تأثیر بازشو دایره‌ای بر رفتار دیوار برشی فولادی و ارائه رابطه بین نسبت قطر سوراخ به ارتفاع و مقاومت‌نهایی دیوار. ب) تأثیر افزایش سختی المان‌های تیر و ستون بر رفتار دیوار برشی فولادی و ارائه رابطه بین تأثیر افزایش هر یک بر مقاومت‌نهایی دیوار. ج) تأثیر جنس ورق میانی با فولادهای متفاوت بر رفتار دیوار برشی فولادی. بدین منظور با استفاده از نرم افزار اجزای محدود مدل‌های عددی متعددی طراحی شد که در ابعاد بازشو، سختی المان‌های مرزی و نوع ورق میانی تفاوت داشتند. نتایج تمامی مدل‌ها پیرامون مقاومت‌نهایی، شکل‌پذیری، سختی و جذب انرژی استخراج و با یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفت. همچنین روابطی بین تأثیر افزایش قطر بازشو و افزایش سختی المان‌های مرزی بر مقاومت‌نهایی دیوار برشی فولادی ارائه شد.

۱- مقدمه

که در این رابطه D قطر سوراخ و d ارتفاع پانل است [۱]. شوماخر^۲ و همکارانش (۱۹۹۹)، با بررسی اتصال ورق میانی به المان‌های مرزی در دیوارهای برشی فولادی مدل‌های مختلف اتصال ورق میانی به ورق اتصال و المان‌های مرزی در گوشه‌ها را آزمایش کردند. در یکی از مدل‌ها که ورق میانی به صورت مستقیم به المان‌های مرزی جوش شده بود (بدون ورق اتصال) نسبت به مدل‌های دارای ورق اتصال حساسیت کمتری را نسبت به پارگی داشت با این حال، این مدل نمایانگر یک طرح عملی نیست چرا که نیازمند به نصب بسیار دقیق است که این امر در عمل دشوار است. در مدل دیگر که یک مربع با طول ۶۰ میلی‌متر در گوشه‌های ورق اتصال، به منظور کاهش مناطق با تنش بالا به صورت مربعی بیرون آورده شده بود، تأثیر قابل توجهی در نتایج نهایی نسبت به مدل اولیه نداشت هرچند که پارگی

دیوارهای برشی فولادی به دلیل مقاومت، سختی، جذب انرژی و شکل‌پذیری نسبتاً بیشتر نسبت به سایر سیستم‌های مشابه، رفتار مناسبی را در مواجهه با نیروهای جانبی خصوصاً زلزله از خود نشان می‌دهند. یکی از مزایای این سیستم امکان وجود بازشو در سرتاسر دیوار است. این بازشوها می‌توانند به دلایل فنی یا محدودیت‌های معماری ایجاد شده باشند. روبرت^۱ و صبوری‌قمی (۱۹۹۲) در یک تحقیق تئوری و آزمایشگاهی در خصوص دیوارهای برشی فولادی با مطالعه تعدادی دیوار برشی فولادی که برخی از آن‌ها دارای بازشو دایره‌ای در مرکز دیوار بودند به این نتیجه دست یافتند که مقاومت و سختی این دیوارها تقریباً، با رابطه خطی $(1-D/d)$ رو به کاهش است

1 Robert

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: hatami@aut.ac.ir

2 Schumacher

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لایسنس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لایسنس، از آدرس <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمائید.



در گوشه‌ها به تأخیر افتاده بود. همچنین به‌طور کلی شکل پارگی‌ها در اتصالات، تأثیر قابل توجهی بر ظرفیت باربری نداشت [۲].

آستانه‌اصل (۲۰۰۱)، یک تحقیق جامع در خصوص جزئیات تحلیل و طراحی دیوارهای برشی فولادی انجام داد. هر دو پانل سخت‌شده و سخت‌نشده به وسیله این محقق مورد آزمایش قرار گرفت. او پیشنهاد کرد که ورق‌های توپر به‌صورت بدون سخت‌کننده استفاده شود مگر اینکه درجایی نیاز به تعبیه بازشو باشد [۳]. علوی و ناطقی (۲۰۱۳)، با بررسی سه نمونه دیوار برشی فولادی بدون سخت‌کننده، با سخت‌کننده‌های مورب و یک مدل با بازشو در مرکز و سخت‌کننده مورب، با مقیاس ۱/۲ را تحت آزمایش قرار دادند. نتایج نشان می‌داد که مقاومت دیوار برشی فولادی با بازشو با قطر ۱/۳ ارتفاع و سخت‌کننده‌های مورب تقریباً برابر با دیوار برشی فولادی بدون بازشو بود و همچنین در سایر پارامترهای لرزه‌ای نیز به‌طور قابل توجهی بهبود یافته بود [۴]. نظیفی و شریعتمدار (۲۰۱۷)، در تحقیقی با عنوان بررسی اثر تنش تسلیم بر رفتار تیر دیوار برشی فولادی شیاردار با شیار بهبود یافته، به این نتیجه رسیدند که تغییرات تنش تسلیم تأثیر ناچیزی بر روی سختی دارد. این تغییرات بر روی مقاومت و استهلاک انرژی تأثیر مستقیم دارد ولی این تأثیرات خطی نیستند. همچنین شکل کلی نمودارها با تغییرات تنش تسلیم تغییر نمی‌کند و پایدار می‌ماند [۵]. حسین‌زاده‌اصل و صفرخانی (۲۰۱۷)، به‌منظور جلوگیری از شکست ترد در اتصال تیر به ستون، دیوارهای برشی فولادی را با چند نمونه تیر RBS¹ خاص پیشنهاد دادند. کاهش مقطع در تیر نمونه‌های آن‌ها به صورت دایره و بیضی در جان و بال تیر بود. نمونه‌های با کاهش مقطع بیضی در جان تیر بهترین عملکرد را در مقاومت‌نهایی، شکل‌پذیری، جذب انرژی و سختی داشتند [۶]. قلهکی و همکارانش (۲۰۱۷)، در تحقیقی با عنوان ارائه رابطه تحلیلی محاسبه سختی دیوارهای برشی فولادی کامپوزیت به این نتیجه دست یافتند که استفاده از ورق فولادی با تنش تسلیم پایین دارای ضخامت معادل با ورق فولادی معمولی، موجب افزایش سختی دیوار برشی فولادی کامپوزیت خواهد شد. همچنین درگیر شدن پوشش بتنی با اعضای مرزی، موجب افزایش مقدار سختی خواهد شد [۷]. شکسته‌بند و همکارانش (۲۰۱۷)، با بررسی نمونه‌های آزمایشگاهی دیوار برشی فولادی که ورق میانی

1 Reduced Beam Section

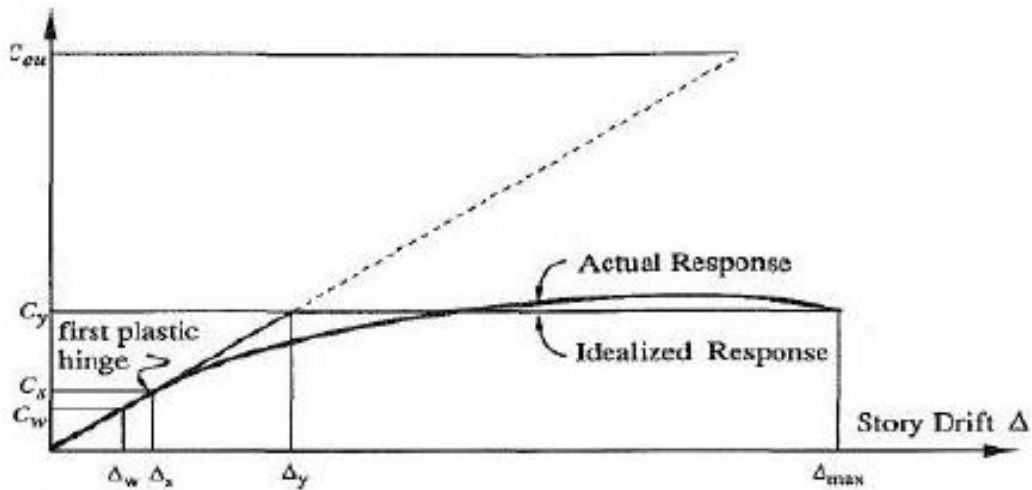
آن‌ها به تیرها و المان‌های سخت‌کننده‌ای که به عنوان ستون ثانویه در نظر گرفته شده بود به این نتیجه دست یافتند که علیرغم اینکه در این مدل دیوارها مقاومت و شکل‌پذیری تا حدودی کاهش می‌یابد اما این مقدار قابل توجه نیست و از این مدل دیوارها می‌توان به عنوان گزینه‌ای دیگر در کنار دیوار برشی فولادی کلاسیک بهره برد [۸].

کاظمی‌نیاکرانی و عرب‌زاده (۲۰۱۸)، در تحقیقی با عنوان اثر بازشو و فاصله برشگیرها در رفتار دیوار برشی فولادی مرکب به بررسی پارامتر مقاومت در این دیوارها پرداختند. نتایج این تحقیق نشان می‌داد که بر خلاف دیوار برشی فولادی که بازشو در مرکز نسبت به کناره دیوار، بیشتر مقاومت را کاهش می‌دهد، بازشو در گوشه‌های دیوار برشی فولادی مرکب نسبت به میانه آن باعث کاهش مقاومت می‌شود. همچنین با کاهش فاصله بین برش‌گیرها ظرفیت دیوار برشی فولادی مرکب افزایش می‌یابد [۹]. بهزادی‌نیا و رهایی (۲۰۱۸)، در تحقیقی با عنوان بررسی اثر محل قرارگیری و تعداد بازشو بر عملکرد دیوار برشی کامپوزیت، با بررسی تعدادی دیوار برشی فولادی بازشو دار، با بازشوهایی نزدیک به تیر یا ستون و بازشوهایی مستطیلی افقی یا عمودی به این نتیجه رسیدند که دیوار در حالت تک بازشو و بازشو مرکزی کمترین کاهش سختی و مقاومت را داشته و دارای توزیع متناسب تر تنش می‌باشد. ضمناً کماتش ورق فولادی و جاری شدن المان‌های دیوار از عوامل تغییر سختی آن می‌باشند [۱۰].

در این مقاله سعی شده‌است تا تأثیر بازشو، جنس ورق میانی و سختی المان‌های مرزی بر رفتار دیوار برشی فولادی تعیین گردد. به همین منظور تعدادی مدل اجزا محدود ساخته شدند که با افزایش نسبت قطر بازشو به ارتفاع پانل، جنس ورق میانی و سختی المان‌های مرزی با هم تفاوت داشتند. پارامترهای مورد بررسی پیرامون مقاومت‌نهایی، شکل‌پذیری، جذب انرژی و سختی مؤثر بودند که برای تمامی مدل‌ها نسبت به هم مورد بررسی قرار گرفتند. همچنین روابطی جهت تأثیر افزایش قطر بازشو و سختی المان‌های مرزی بر مقاومت‌نهایی ارائه شدند.

۲- شکل‌پذیری

عموماً از شکل‌پذیری به عنوان قابلیت سازه برای تحمل کردن تغییرشکل‌های پلاستیک قبل از گسیختگی تعبیر می‌شود که عبارت است از خارج قسمت تغییرشکل جانبی نسبی حداکثر (جابه‌جایی



شکل ۱. منحنی پاسخ واقعی و ایده آل سازه [۱۲]

میانی این دیوار دارای ضخامت ۶ / ۲ میلی متر و جنس آن از فولاد LYS 165 با تنش تسلیم ۱۶۵ MPa تنش نهایی ۳۰۰ MPa بود. المان های تیر و ستون نیز از فولاد ASTM A572 با تنش تسلیم ۳۴۵ MPa بود. مقاطع تیرها W18×65 از نوع RBS (با مقطع کاهش یافته) و مقاطع ستون ها W18×71 بود. هندسه نمونه در شکل ۲ قابل مشاهده است. بارگذاری از نوع چرخه ای بود که به نقطه میانی تیر فوقانی از طریق جک و طبق پروتکل بارگذاری ATC-24 (شکل ۳) به نمونه S2 تا میزان تغییر مکان نسبی ۳٪ اعمال شده بود. پس از پایان بارگذاری، پارگی در ناحیه کاهش یافته تیر تحتانی مطابق شکل ۴(b) قابل مشاهده است.

۴- اعتبارسنجی

جهت مدل سازی نمونه ذکر شده از نرم افزار اجزای محدود آباکوس (ABAQUS) نسخه 6.14-2 استفاده شد. نمونه مورد نظر برای اعتبارسنجی، نمونه آزمایشگاهی S2 برنیو و همکارانش [۱۴] بود. جهت مدل سازی از المان های S4R استفاده شد چرا که این المان رفتار کمانشی ورق نازک را به خوبی شبیه سازی می کند. المان ۴ گرهی S4R که از خانواده المان های پوسته ای موجود در آباکوس است از روش انتگرال گیری کاهش یافته برای رسیدن به جواب بهره می گیرد. سائز مش بندی ۱۰۰ میلی متر و اثرات غیر خطی هندسی و مصالح برای تحلیل لحاظ شد. برای بارگذاری مانند نمونه آزمایشگاهی

نهایی سازه) δ_{max} به تغییر شکل جانبی نسبی δ_y (جابه جایی تسلیم سازه) که با توجه به منحنی پوش آور و دو خطی سازه در شکل ۱ به صورت رابطه زیر قابل محاسبه است [۱۱].

$$\mu = \frac{\Delta_{max}}{\Delta_y} \quad (1)$$

C_{eu} : نیروی متناظر طراحی در حالتی که سازه در حالت ارتجاعی باقی بماند.

C_y : نیروی متناظر حد تسلیم سازه

C_s : تراز نیرو در تشکیل اولین مفصل پلاستیک

C_w : تراز نیرو در حالت تنش های مجاز

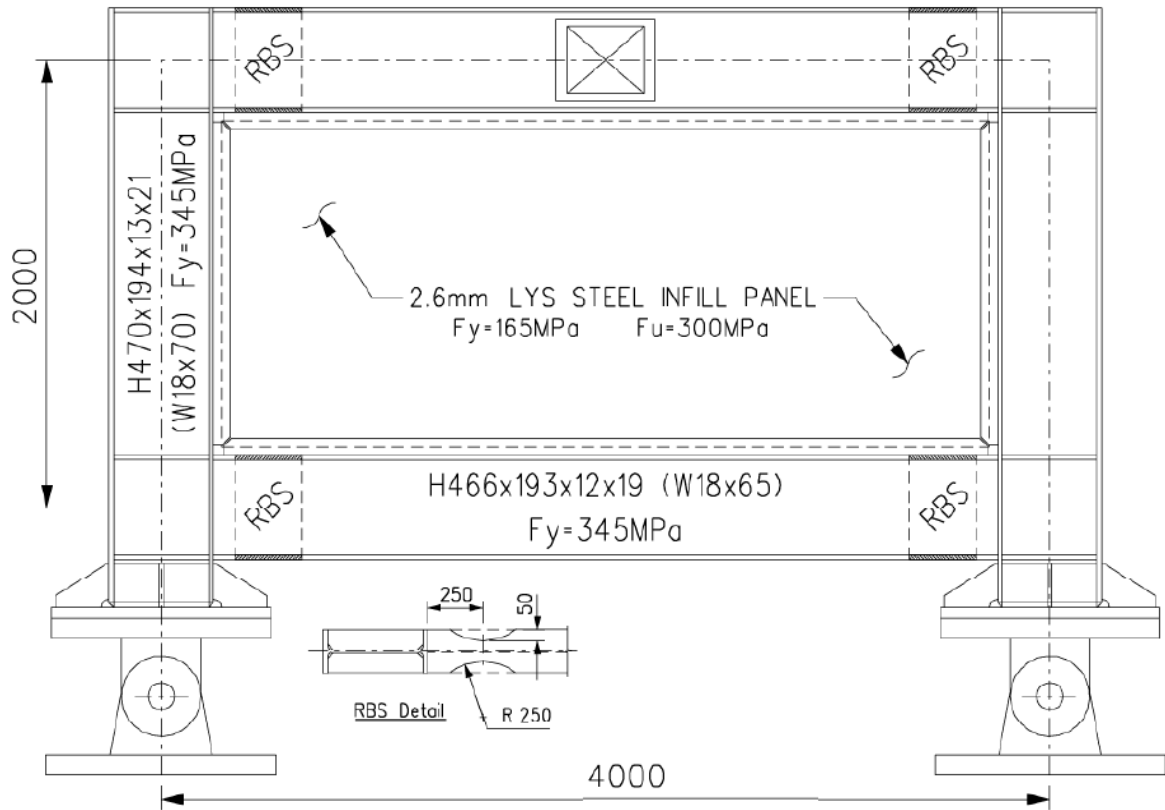
مطابق دستورالعمل به سازی لرزه ای ایران (نشریه ۳۶۰) و 356 FEMA جهت دو خطی کردن نمودار پوش آور دو شرط الزامی است که به آن ها اشاره شده است:

(۱) مساحت زیر منحنی پوش آور و نمودار دوخطی برابر باشد.

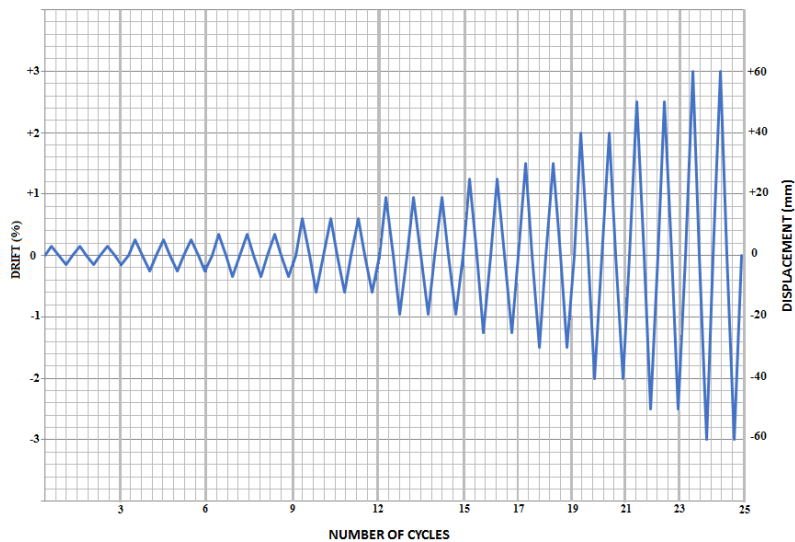
(۲) نمودار دوخطی در ۰/۶ مقدار ماکزیمم برش پایه خود، منحنی پوش آور را قطع نماید [۱۳].

۳- مدل آزمایشگاهی مرجع

در این تحقیق از نمونه آزمایشگاهی S2 یک طبقه - یک دهانه ویان و همکارانش [۱۴] استفاده شد. عرض و ارتفاع این نمونه به ترتیب برابر ۴۰۰۰ و ۲۰۰۰ میلی متر (مرکز به مرکز) بود. ورق



شکل ۲. هندسه مدل [۱۴]



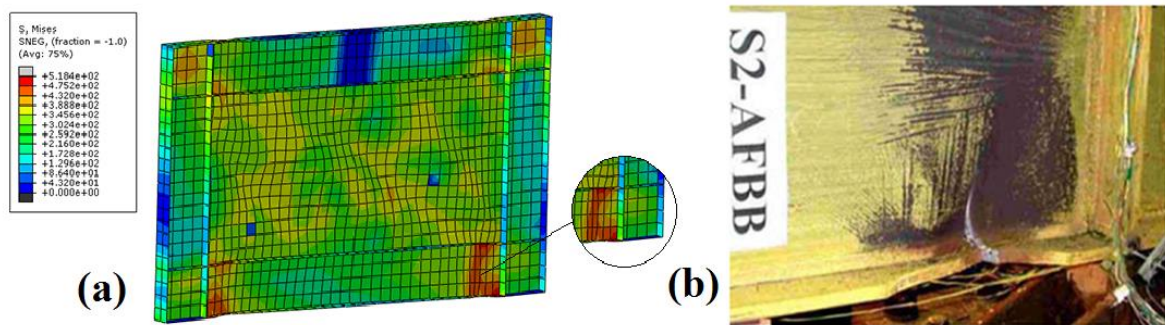
شکل ۳. نمودار بارگذاری نمونه آزمایشگاهی طبق پروتکل ATC-24 [۱۴]

مفصلی در نظر گرفته شدند. با انجام تحلیل کمانشی مقدار ۰/۱ از اولین مد تغییرشکل کمانشی به ورق میانی به عنوان نقص اولیه

[۱۴] از پروتکل ATC-24 استفاده شد و بارگذاری به نقطه میانی تیر طبقه فوقانی اعمال شد. تکیه‌گاه‌ها نیز با توجه به شرایط آزمایشگاهی

جدول ۱. بارگذاری نمونه‌ها

تعداد سیکل	دامنه جابه‌جایی (mm)
۳	۳±
۳	۵±
۳	۷±
۳	۱۲±
۳	۱۹±
۲	۲۵±
۲	۳۰±
۲	۴۰±
۲	۵۰±
۲	۶۰±



شکل ۴. مدل FE پس از بارگذاری (a) تیر تحتانی مدل آزمایشگاهی پس از بارگذاری (b) [۱۴]

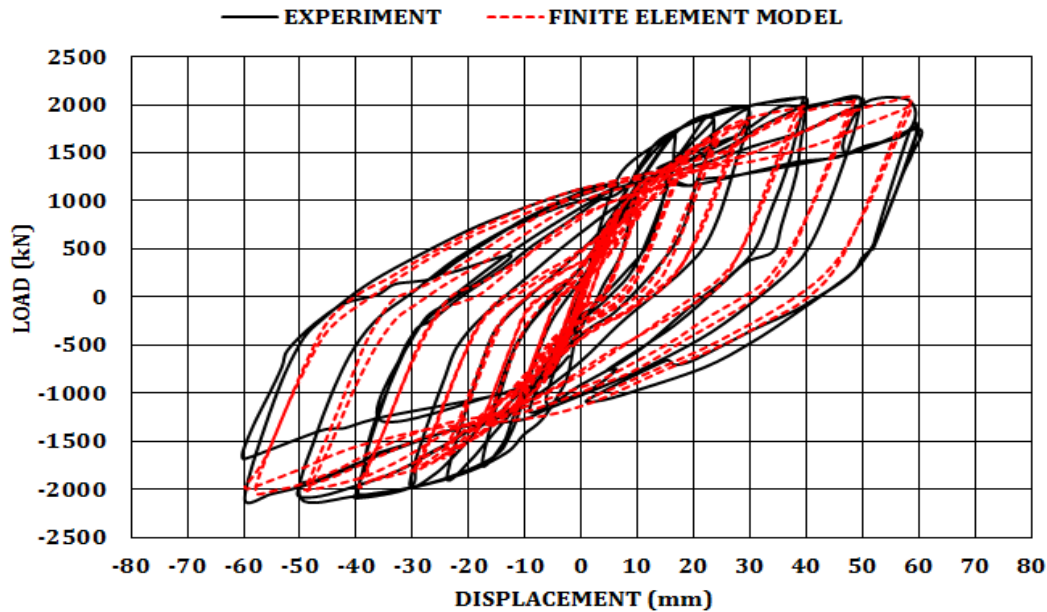
المان‌های مرزی و ضخامت ورق میانی در نمونه‌ها مطابق نمونه آزمایشگاهی [۱۴] هستند که در قسمت ۲ به آن پرداخته شد. ابعاد بازشو نیز با نسبت $(D/d = ۰ \text{ الی } ۰/۵)$ طراحی شدند. همچنین از ورق میانی با جنس فولاد LYS 165، A572 و ST37 استفاده شد که منحنی تنش-کرنش فولادهای مصرفی مطابق شکل ۶ قابل مشاهده است. جهت افزایش سختی در المان‌های تیر و ستون بعضی از مدل‌ها، مدول الاستیک فولاد المان مورد نظر به میزان ۵۰٪ یا ۱۰۰٪ افزایش یافته است. دلیل این امر این است که افزایش سختی با افزایش ابعاد المان‌ها، شرایط مرزی را تحت تأثیر قرار می‌دهد در نتیجه به منظور قابلیت مقایسه در شرایط یکسان از این روش استفاده شده است. همچنین در جدول ۳ خصوصیات مکانیکی فولادهای مصرفی بیان شده است.

اختصاص داده شد. همچنین پس از پایان بارگذاری در نمونه FE شکل (a) مطابق نمونه آزمایشگاهی بیشترین تنش‌ها در ناحیه کاهش یافته تیر تحتانی در سمت راست نمونه بود که در شکل (b) قابل مشاهده است.

در شکل ۵ مقایسه بین منحنی هیستریزس نمونه آزمایشگاهی و مدل نرم‌افزاری مشاهده می‌شود که نتایج حاکی از تقریب بسیار خوب و صحت مدل‌سازی دارد.

۵- تعریف مدل‌ها

جدول ۲ مشخصات مدل‌های اجزا محدود را نمایش می‌دهد. این مدل‌ها در سائز بازشو (نسبت قطر بازشو به ارتفاع پانل (D/d) ، مصالح فولاد ورق میانی و سختی اجزای مرزی تفاوت دارند. ابعاد



شکل ۵. مقایسه و اعتبارسنجی منحنی هیستریزیس و آزمایشگاهی [۱۴] و مدل اجزای محدود

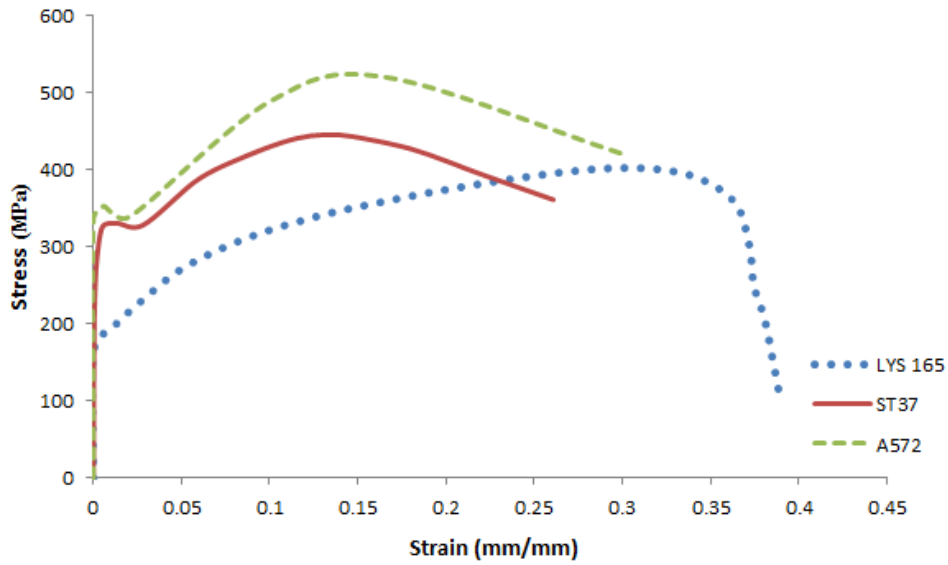
جدول ۲. مدل‌های اجزای محدود FE

مدل	بازشو (D/d)	ورق میانی	افزایش در سختی المان (%)	
			ستون‌ها	تیرها
SPSW-WO	۰	LYS 165	—	—
SPSW-O10%	۰/۱	LYS 165	—	—
SPSW-O20%	۰/۲	LYS 165	—	—
SPSW-O30%	۰/۳	LYS 165	—	—
SPSW-O40%	۰/۴	LYS 165	—	—
SPSW-O50%	۰/۵	LYS 165	—	—
SPSW-C50%	۰	LYS 165	۵۰ %	—
SPSW-C100%	۰	LYS 165	۱۰۰ %	—
SPSW-B50%	۰	LYS 165	—	۵۰ %
SPSW-B100%	۰	LYS 165	—	۱۰۰ %
SPSW-I572	۰	A572	—	—
SPSW-I37	۰	ST 37	—	—

۶- نتایج و تحلیل مدل‌ها

جابه‌جایی در هر سیکل تهیه شده‌است و نمودار دو خطی برای محاسبه شکل‌پذیری نیز با توجه به شرایط دستورالعمل به‌سازی لرزه‌ای ایران (نشریه ۳۶۰) و FEMA356 [۱۳] برای هر مدل رسم شده‌است که این امر با استفاده از کدنویسی در نرم‌افزار MATLAB صورت پذیرفته‌است.

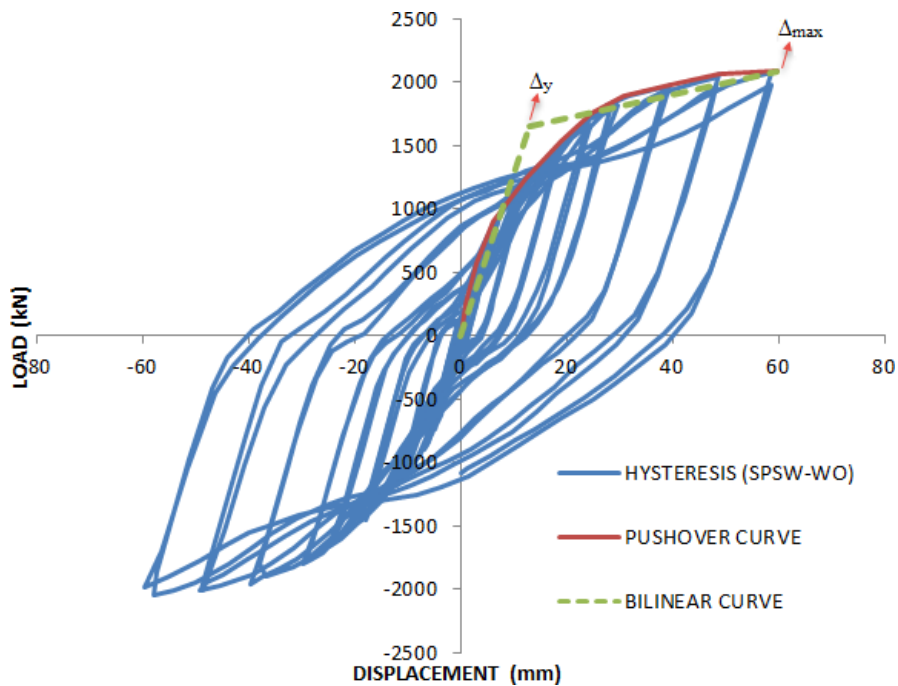
پایان بارگذاری برای مدل‌ها مطابق نمونه آزمایشگاهی تا تغییر مکان نسبی ۳٪ (۶۰ میلی‌متر) در نظر گرفته‌شد. شکل ۷ منحنی هیستریزیس، پوش‌آور و دوخطی مدل SPSW-WO را نمایش می‌دهد. نمودار پوش‌آور نیز بر اساس افزایش تدریجی



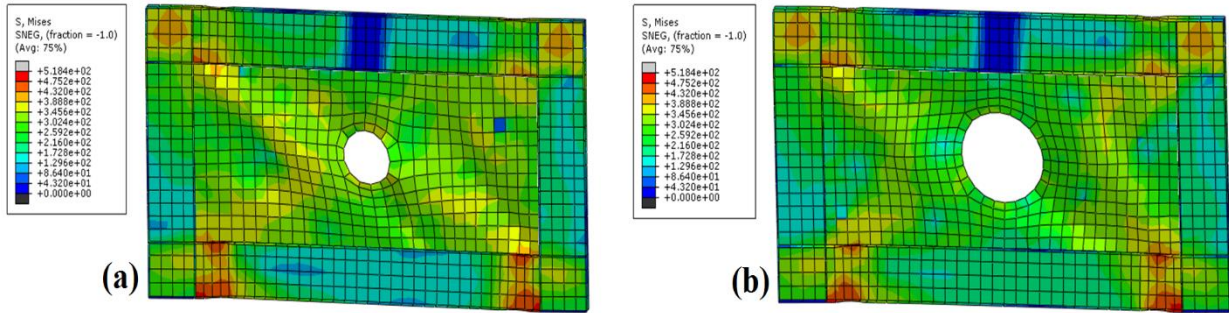
شکل ۶. منحنی تنش - کرنش فولاد مصرفی [۱۴ و ۱۵]

جدول ۳. خصوصیات مکانیکی فولادهای مصرفی [۱۴ و ۱۵]

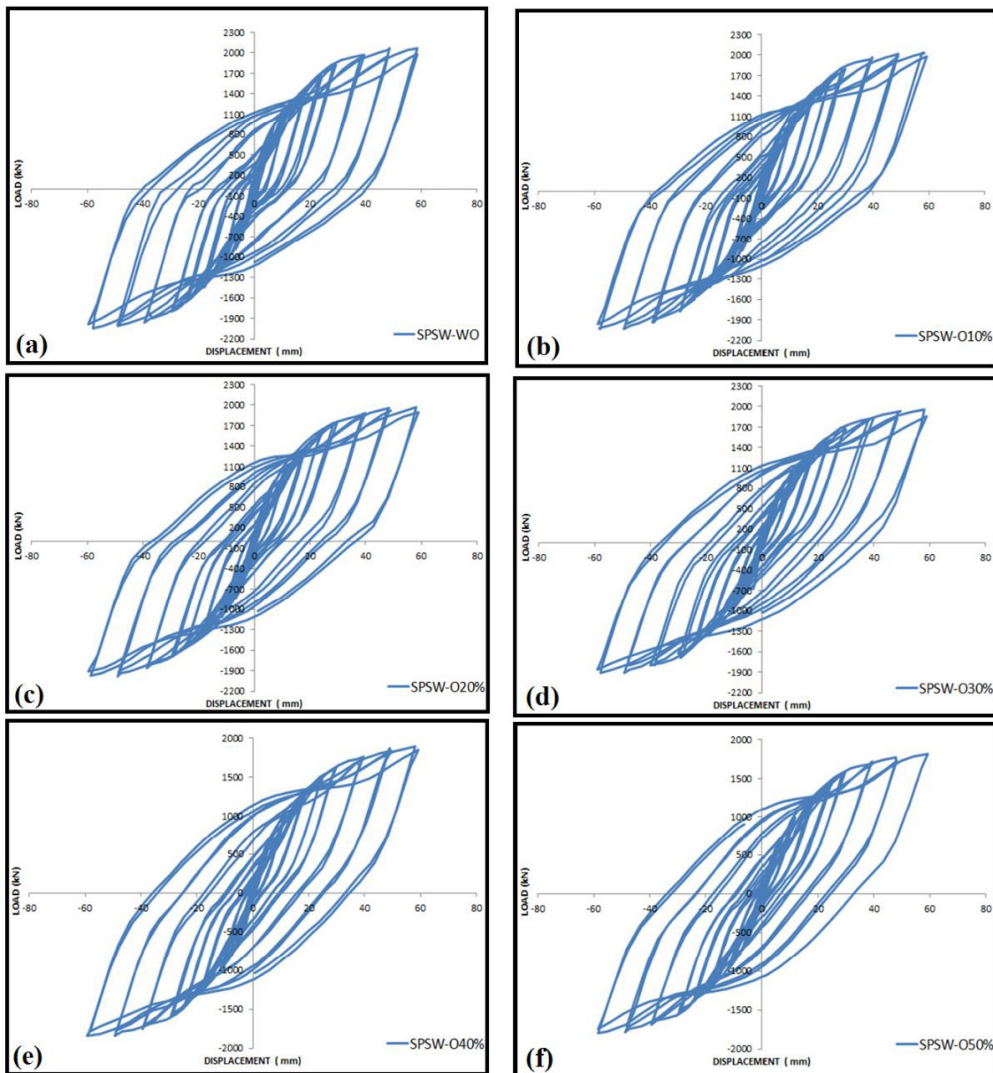
فولاد	E (Mpa)	f_y (Mpa)	f_u (Mpa)
LYS 165	۲۱۰۰۰۰	۱۶۵	۳۰۰
A572	۲۱۰۰۰۰	۳۴۵	۴۲۰
ST37	۲۱۰۰۰۰	۲۴۰	۳۶۰



شکل ۷. منحنی هیستریزیس، پوش آور و دو خطی مدل SPSW-WO



شکل ۸. کانتورهای تنش و مدل‌های (a) SPSW-O30% و (b) SPSW-O50% پس از بارگذاری

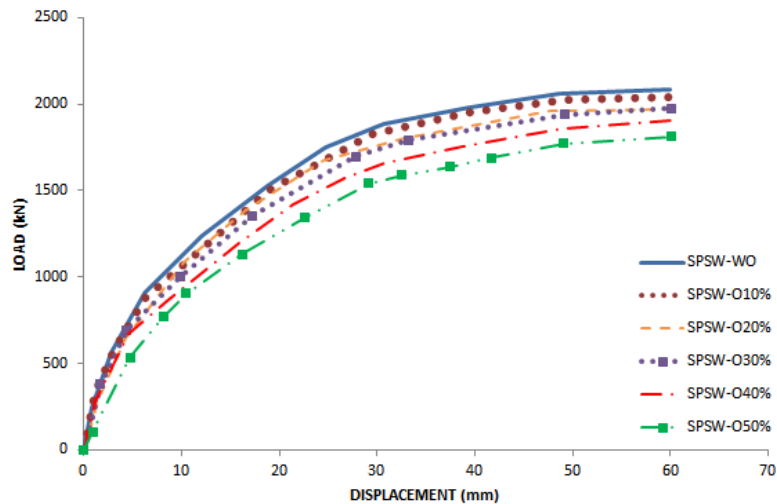


شکل ۹. نمودار هیستریزس مدل‌های با بازشو

شده‌است و با مدل بدون بازشو مورد مقایسه قرار گرفته‌است. شکل ۸ مدل‌های SPSW-O30% و SPSW-O50% پس از بارگذاری قابل مشاهده هستند.

۵-۱- تأثیر قطر بازشو

در این قسمت نتایج مدل‌های بازشودار که بازشو آن‌ها با نسبت (D/d) مورد بررسی قرار گرفته‌است. این نسبت از ۰/۱ الی ۰/۵ بررسی



شکل ۱۰. پوش آور مدل‌های با اتصال کامل

جدول ۴. نتایج حاصل از بارگذاری مدل‌های بازشودار و مقایسه آن‌ها نسبت به مدل SPSW-WO

مدل	مقاومت‌نهایی (kN)		شکل‌پذیری		جذب انرژی (kN.mm)		سختی (kN/mm)	
	مقدار	نسبت %	مقدار	نسبت %	مقدار	نسبت %	مقدار	نسبت %
SPSW-WO	۲۰۸۳/۳۳	۰	۴/۶۱	۰	۹۷۷۸۷/۸	۰	۱۲۷/۲۱	۰
SPSW-O10%	۲۰۴۳/۳۸	-۱/۹۲	۴/۴۴	-۳/۶۱	۹۶۵۰۲/۴	-۱/۳۱	۱۱۵/۶۸	-۹/۰۶
SPSW-O20%	۱۹۷۵/۶۱	-۵/۱۷	۴/۲۲	-۸/۳۹	۹۳۰۶۶/۶	-۴/۸۳	۱۱۳	-۱۱/۱۷
SPSW-O30%	۱۹۷۱/۹۸	-۵/۳۴	۴/۲۲	-۸/۶۲	۹۰۲۵۸/۳	-۷/۷	۱۰۹/۳۱	-۱۴/۰۷
SPSW-O40%	۱۹۰۵/۹۴	-۸/۵۱	۴/۱۳	-۱۰/۳۶	۸۶۹۷۶/۳	-۱۱/۰۵	۱۰۰/۶۶	-۲۰/۸۷
SPSW-O50%	۱۸۱۱/۲۹	-۱۳/۰۵	۴/۰۱	-۱۲/۹۷	۸۱۲۱۴/۵	-۱۶/۹۴	۹۲/۲۸	-۲۷/۴۵

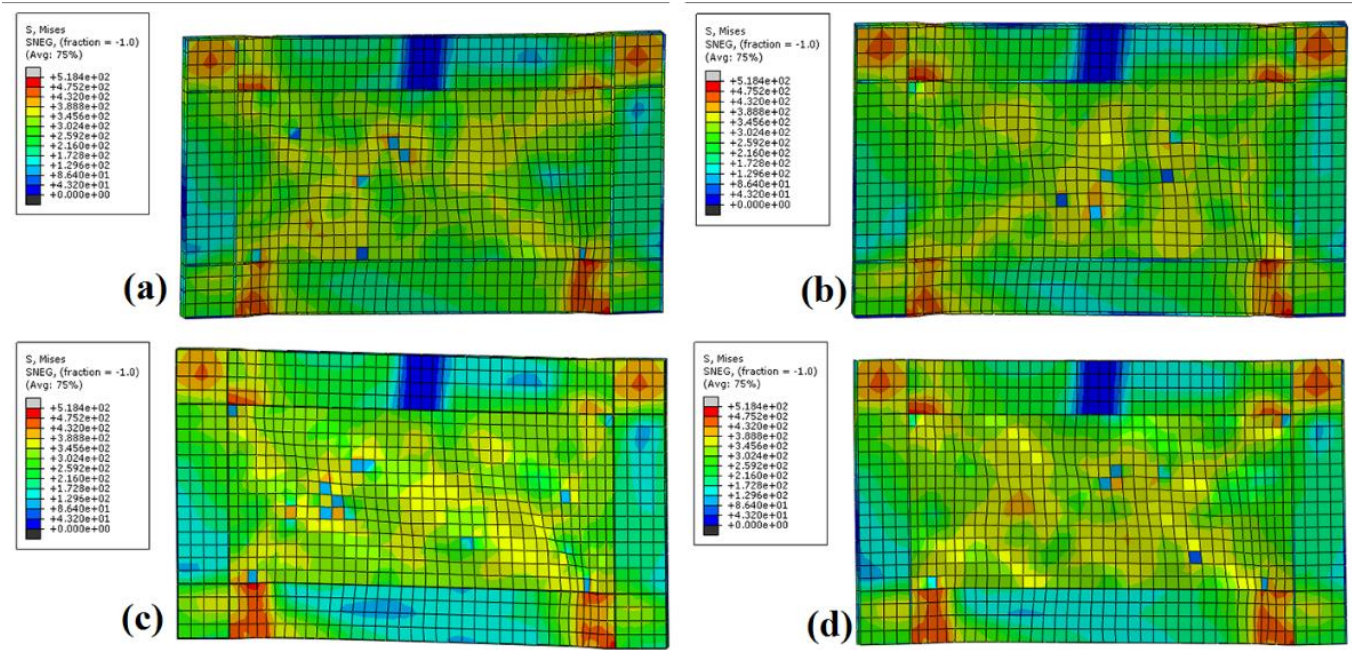
بازشو آورده شده‌است.

با توجه به شکل ۱۰ مشاهده می‌گردد که افزایش قطر بازشو باعث کاهش شیب اولیه نمودار پوش‌آور که بیانگر سختی است گردیده و مقاومت‌نهایی نیز کاهش یافته‌است. نتایج حاصل از بارگذاری مدل‌ها، و مقایسه آن‌ها نسبت به مدل SPSW-WO بر حسب درصد در جدول ۴ بیان شده‌است. (اعداد مثبت نشانه افزایش و اعداد منفی نشانه کاهش هستند)

با مقایسه خروجی‌های جدول ۴ مشاهده می‌شود با افزایش نسبت قطر بازشو به ارتفاع پانل، مقادیر مقاومت‌نهایی، شکل‌پذیری، جذب انرژی و سختی، همگی کاهش می‌یابند.

با مقایسه این مدل‌ها با مدل SPSW-WO شکل (b) ۴، و کانتورهای تنش به‌وضوح مشاهده می‌گردد که با افزایش نسبت $\frac{D}{d}$ (ظرفیت ورق میانی کاهش یافته‌است به نحوی که میدان کششی در ورق با افزایش این نسبت به صورت کامل تشکیل نمی‌شود به علاوه المان‌های مرزی متحمل تنش‌های بیشتری می‌شوند. شکل ۹ نمودار هیستریزس مدل‌های با بازشو را نمایش می‌دهد.

با مقایسه شکل ۹ مشاهده می‌شود با افزایش قطر بازشو حلقه‌های هیستریزس کوچک‌تر شده‌اند که این امر بیانگر این است که با افزایش قطر بازشو، جذب انرژی سیستم کاهش می‌یابد. برای بررسی دقیق‌تر سایر پارامترها، در شکل ۱۰ منحنی‌های پوش‌آور مدل‌های دارای



شکل ۱۱. کانتورهای تنش مدل‌های (a) SPSW-C50% ، (b) SPSW-C100% ، (c) SPSW-B50% و (d) SPSW-B100%

۵-۲- تأثیر افزایش سختی المان‌های مرزی

در این قسمت نتایج مدل‌های با افزایش سختی در المان‌های مرزی مورد بررسی قرار گرفته‌است. این مدل‌ها شامل مدل‌های SPSW-C50% و SPSW-C100% که به ترتیب با افزایش ۵۰٪ و ۱۰۰٪ سختی در ستون‌ها همراه شده و مدل‌های SPSW-B50% و SPSW-B100% که به ترتیب با افزایش ۵۰٪ و ۱۰۰٪ سختی در تیرها همراه شدند. در شکل ۱۱ مدل‌های ذکر شده پس از بارگذاری قابل مشاهده هستند.

با مقایسه مدل‌های شکل ۱۱ با مدل SPSW-WO شکل ۴ (b)، و کانتورهای تنش مشاهده می‌گردد با افزایش سختی المان‌های مرزی (تیر و ستون) تغییر قابل توجهی در وضعیت ورق میانی حاصل نشده اما در ناحیه‌های کاهش یافته تیرها، به خصوص در مدل‌های SPSW-B50% و SPSW-B100% که تیرها با افزایش سختی همراه شده بودند، تنش‌ها افزایش یافته‌اند.

با مقایسه منحنی‌های هیستریزس (شکل ۱۲) مشاهده می‌شود که با افزایش سختی المان‌های مرزی حلقه‌های هیستریزس اصطلاحاً چاق‌تر شده‌اند که بیانگر افزایش جذب انرژی سیستم است. این مطلب در مدل‌هایی که سختی تیرهای آن‌ها افزایش یافته، نمود بیشتری

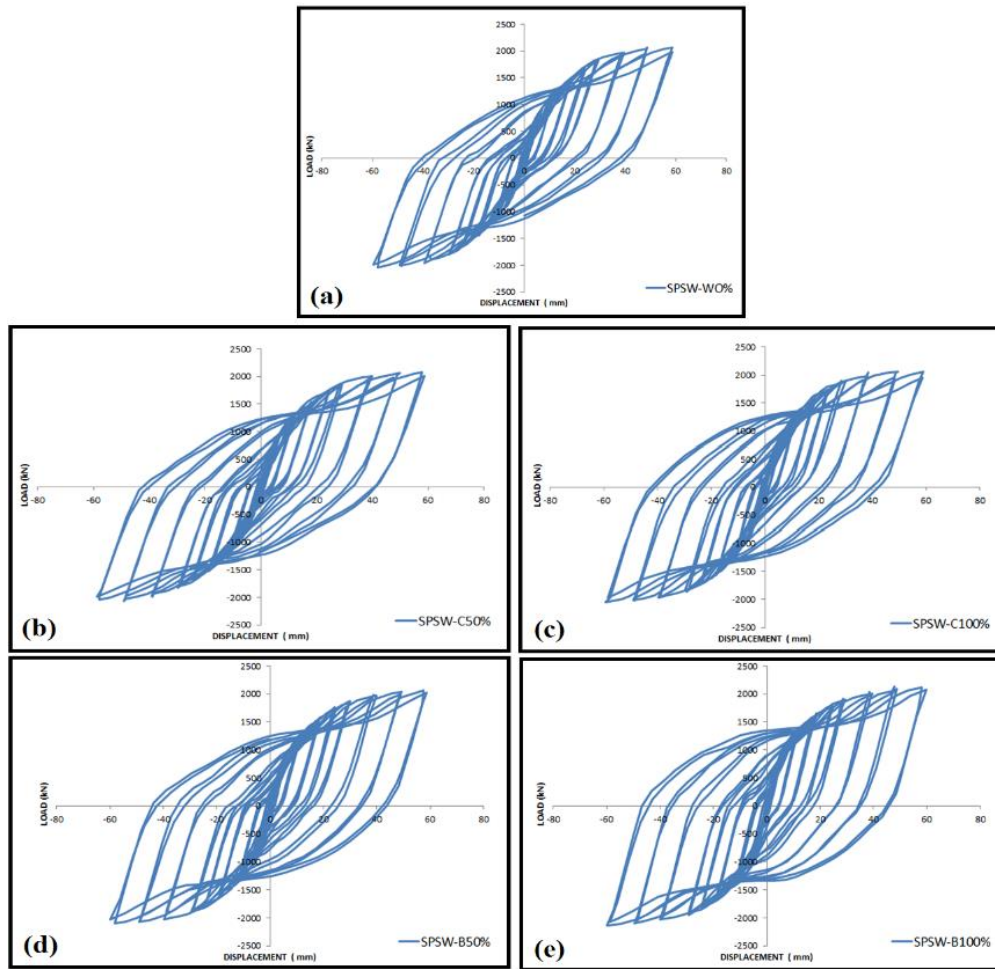
پیدا کرده‌است. در شکل ۱۳ منحنی پوش‌آور مدل‌های با افزایش در سختی المان‌های مرزی آورده شده‌است.

با مقایسه مدل‌ها در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود افزایش سختی المان‌های مرزی سبب افزایش سختی سیستم گردیده‌است اما مقاومت‌نهایی سیستم افزایش قابل توجهی نداشته‌است. نتایج حاصل از بارگذاری مدل‌ها و مقایسه آن‌ها نسبت به مدل SPSW-WO بر حسب درصد در جدول ۵ بیان شده‌است. (اعداد مثبت نشانه افزایش و اعداد منفی نشانه کاهش هستند)

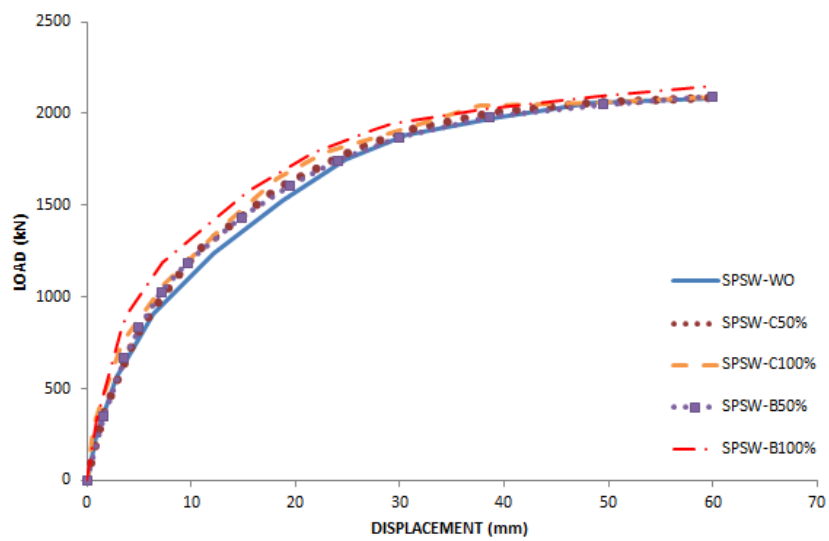
نتایج جدول ۵ نشان می‌دهد با افزایش سختی المان‌های مرزی پارامترهای مقاومت‌نهایی، شکل‌پذیری، جذب انرژی و سختی، همگی افزایش می‌یابند.

۵-۳- تأثیر تغییر مصالح فولاد ورق میانی

در این قسمت نتایج مدل‌های با تغییر مصالح فولاد مورد بررسی قرار گرفته‌است. این مدل‌ها شامل مدل SPSW-I572 که جنس فولاد ورق میانی از نوع ASTM A572 (مانند فولاد مورد استفاده در المان‌های مرزی) و مدل SPSW-I37 که جنس ورق میانی از نوع فولادی ST 37 است، هستند. هم‌چنین مدل SPSW-WO نیز



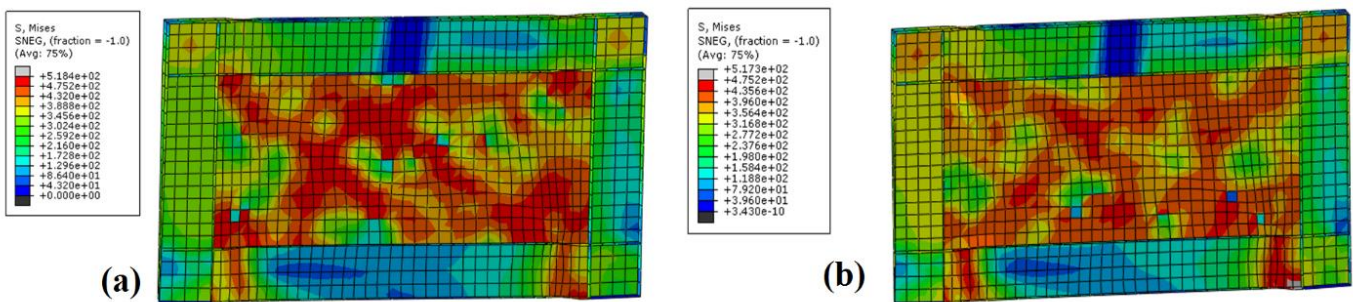
شکل ۱۲. نمودار هیستریزس مدل‌های با افزایش سختی در المان‌های مرزی



شکل ۱۳. پوش‌آور مدل‌های با افزایش سختی در المان‌های مرزی

جدول ۵. نتایج حاصل از بارگذاری مدل‌های با افزایش سختی در المان‌های مرزی و مقایسه آن‌ها با مدل SPSW-WO

مدل	مقاومت‌نهایی (kN)		شکل‌پذیری		جذب انرژی (kN.mm)		سختی (kN/mm)	
	مقدار	نسبت %	مقدار	نسبت %	مقدار	نسبت %	مقدار	نسبت %
SPSW-WO	۲۰۸۳/۳۳	۰	۴/۶۱	۰	۹۷۷۸۷/۸	۰	۱۲۷/۲۱	۰
SPSW-C50%	۲۰۸۶/۸۱	+۰/۱۷	۴/۹۸	+۸/۰۲	۹۷۸۹۳/۲	+۰/۱۱	۱۳۴/۷۶	+۵/۹۳
SPSW-C100%	۲۰۹۲/۲۹	+۰/۴۳	۶/۰۱	+۳/۰۴	۱۰۰۱۹۲/۳	+۲/۴۶	۱۵۷/۲۹	+۲۳/۶۵
SPSW-B50%	۲۰۹۳/۴۳	+۰/۴۸	۵/۶۱	+۲۱/۷۱	۹۹۶۴۶/۱	+۱/۹	۱۵۰/۸۹	+۱۸/۶۱
SPSW-B100%	۲۱۵۴/۳۸	+۳/۴۱	۷/۶۳	+۶۵/۶	۱۰۴۹۷۳	+۷/۳۵	۲۰۶/۹	+۶۲/۶۵



شکل ۱۴. کانتورهای تنش و مدل‌های SPSW-I572 (a) و SPSW-I37 (b) پس از بارگذاری

یافته‌اند. نتایج حاصل از بارگذاری مدل‌ها، و مقایسه آن‌ها نسبت به مدل SPSW-WO بر حسب درصد در جدول ۶ بیان شده‌است. (اعداد مثبت نشانه افزایش و اعداد منفی نشانه کاهش هستند) نتایج جدول ۶ نشان می‌دهد با جایگزینی فولاد با مقاومت تسلیم بالاتر پارامترهای مقاومت‌نهایی، شکل‌پذیری، جذب انرژی و سختی، همگی افزایش می‌یابند.

۷- مقایسه

در این قسمت تأثیر افزایش قطر بازشو، افزایش سختی المان‌های مرزی و مصالح ورق میانی متفاوت با توجه به نتایج حاصل از هر یک از مدل‌ها با یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفته‌اند.

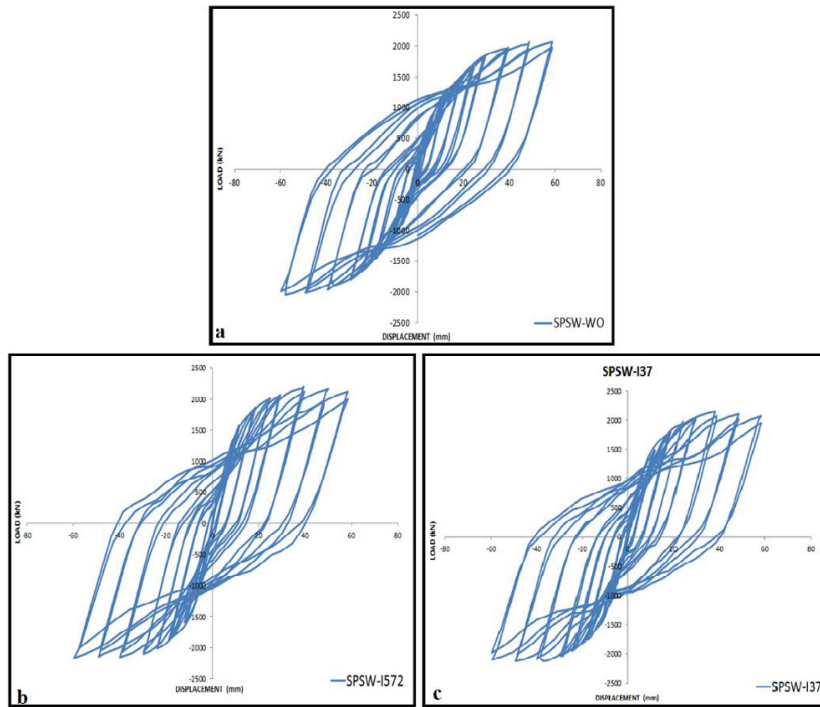
۷-۱- تأثیر افزایش قطر بازشو

با افزایش قطر بازو (D/d)، پارامترهای مقاومت‌نهایی، شکل‌پذیری،

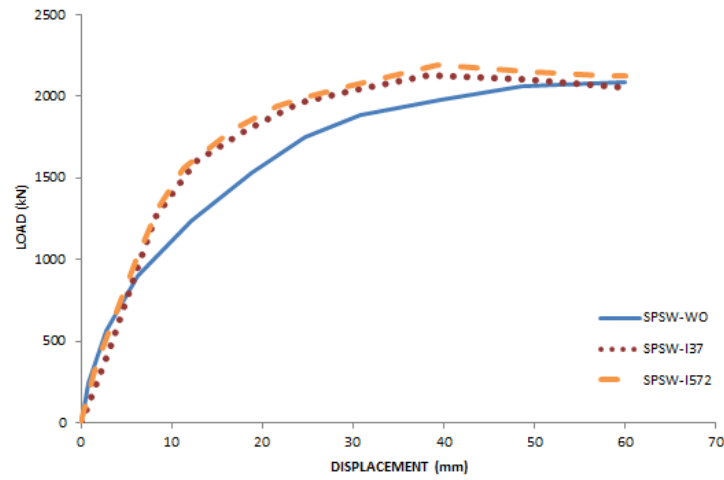
با ورق میانی از نوع فولاد LYS 165 است. در شکل ۱۴ مدل‌های SPSW-I37 و SPSW-I572 پس از بارگذاری قابل‌مشاهده هستند. با مقایسه این مدل‌ها با مدل SPSW-WO شکل ۴-ب، و کانتورهای تنش مشاهده می‌گردد در هر دو مدل، المان‌های مرزی و ورق میانی خصوصاً مدل SPSW-I37 به صورت قابل‌توجهی متحمل تنش‌های بیشتری شدند. در شکل ۱۵ منحنی‌های مدل‌های با تغییرات مصالح ورق میانی آورده شده‌است.

شکل ۱۵ نمایش می‌دهد که با تغییر جنس ورق میانی از LYS 165 به A572 و ST37 حلقه‌های منحنی هیستریزیس مساحت بیشتری را اشغال نموده‌اند که بیانگر افزایش جذب انرژی سیستم است. شکل ۱۶ منحنی پوش‌آور مدل‌های با تغییر جنس ورق میانی را نمایش می‌دهد.

با مقایسه نمودارهای شکل ۱۶ ملاحظه می‌شود با تغییر جنس ورق میانی از LYS 165 به A572 و ST37 سختی و مقاومت‌نهایی افزایش



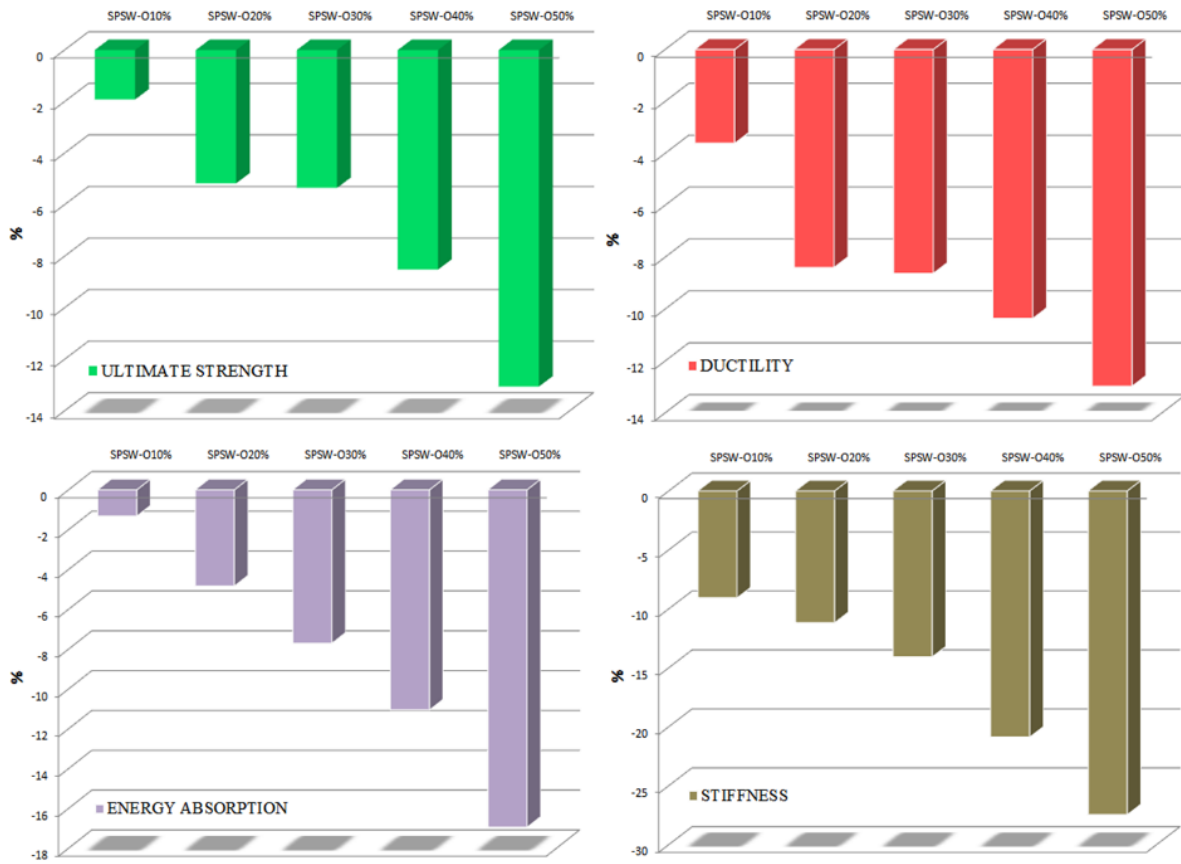
شکل ۱۵. منحنی‌های هیستریزس مدل‌های با تغییرات در مصالح فولاد ورق میانی



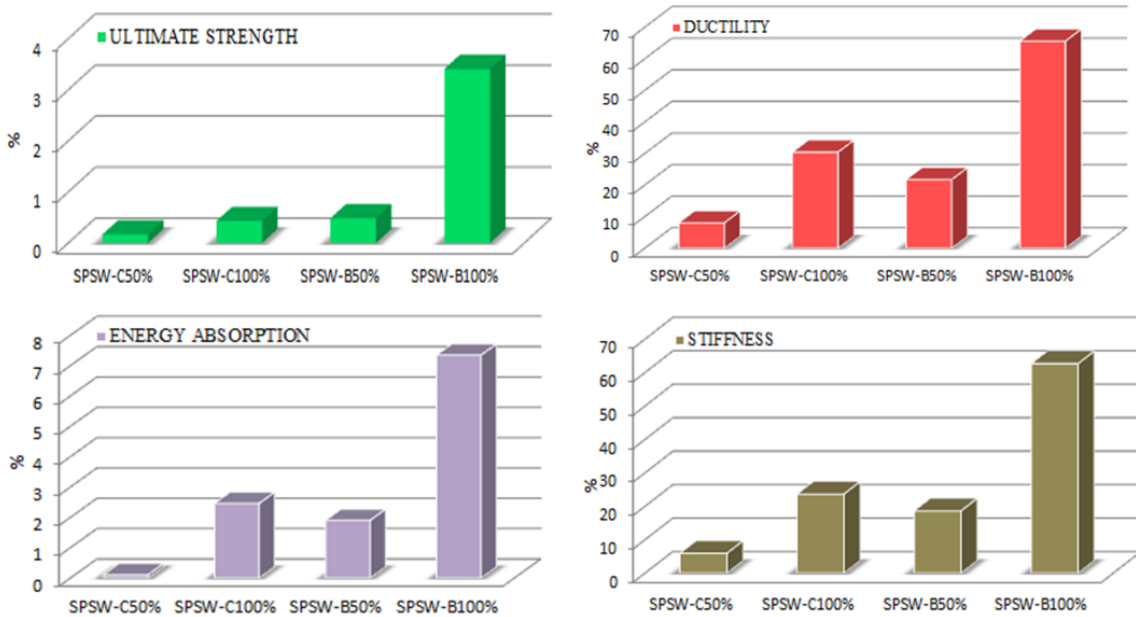
شکل ۱۶. منحنی‌های پوش‌آور مدل‌های با تغییرات در مصالح فولاد ورق میانی

جدول ۶. نتایج حاصل از بارگذاری مدل‌های با تغییرات مصالح فولاد ورق میانی و مقایسه آن‌ها با مدل SPSW-WO

مدل	مقاومت‌نهایی (kN)		شکل‌پذیری		جذب انرژی (kN.mm)		سختی (kN/mm)	
	مقدار	نسبت %	مقدار	نسبت %	مقدار	نسبت %	مقدار	نسبت %
SPSW-WO	۲۰۸۳/۳۳	۰	۴/۶۱	۰	۹۷۷۸۷/۸	۰	۱۲۷/۲۱	۰
SPSW-I572%	۲۱۹۱/۱۲	+۵/۱۷	۴/۷۷	+۳/۷	۱۰۹۵۴۷	+۱۲/۰۲	۱۵۷/۰۸	+۲۳/۴۸
SPSW-I37%	۲۱۲۹/۵۷	+۲/۲۲	۳/۷۶	+۳/۳۹	۱۰۶۴۲۱/۷	+۸/۸۲	۱۵۳/۱۹	+۲۰/۴



شکل ۱۷. تأثیر افزایش قطر باز شو بر پارامترهای مقاومت‌نهایی، شکل‌پذیری، سختی و جذب انرژی نسبت به مدل SPSW-WO



شکل ۱۸. تأثیر افزایش سختی المان‌های مرزی



شکل ۱۹. تأثیر مصالح ورق میانی

مدل‌های با افزایش سختی در تیرها بیشتر به چشم می‌آید. هم‌چنین رابطه افزایش مقاومت‌نهایی با افزایش سختی ستون‌ها و تیرها به ترتیب به صورت روابط ۲ و ۳ محاسبه شد:

$$\text{میزان افزایش مقاومت‌نهایی با افزایش سختی ستون‌ها بر حسب درصد} = \frac{0.192C_{SI}^2 + 23.8C_{SI}}{10000} \quad (3)$$

$$\text{میزان افزایش مقاومت‌نهایی با افزایش سختی تیرها بر حسب درصد} = \frac{4.9B_{SI}^2 - 149B_{SI}}{10000} \quad (4)$$

در این روابط C_{SI} و B_{SI} به ترتیب میزان افزایش سختی ستون‌ها و تیرها بر حسب درصد هستند.

۳-۶- تأثیر مصالح ورق میانی

با مشاهده نتایج مطابق شکل ۱۵ مشاهده می‌شود استفاده از

جذب انرژی و سختی مطابق شکل ۱۳ با کاهش روبه‌رو می‌شوند. هم‌چنین رابطه بین افزایش قطر بازشو با مقاومت‌نهایی به صورت رابطه ۱ محاسبه شد:

$$\text{میزان کاهش مقاومت‌نهایی نسبت به اندازه قطر بازشو بر حسب درصد} = 22.82\left(\frac{D}{d}\right)^2 + 12.93\left(\frac{D}{d}\right) + 0.34 \quad (2)$$

۲-۶- تأثیر افزایش سختی المان‌های مرزی

با افزایش سختی المان‌های تیر و ستون، پارامترهای مقاومت‌نهایی، شکل‌پذیری، جذب انرژی و سختی مطابق شکل ۱۴ با افزایش روبه‌رو می‌شوند که این افزایش در مدل‌هایی که سختی تیرهای آن افزایش یافته‌بود نسبت به مدل‌هایی که سختی ستون‌ها در آن افزایش یافته‌بود، بیشتر بود. دلیل این امر این است که تیرها با مقطع کاهش یافته حاکم بر طرح هستند و با افزایش سختی ستون‌ها تیرها زودتر به تسلیم می‌رسند، در نتیجه میزان افزایش پارامترهای ذکرشده در

Δ_y جابه‌جایی تسلیم سازه، mm

ورق با جنس فولاد با تنش تسلیم بالاتر پارامترهای مقاومت‌نهایی، شکل‌پذیری، جذب انرژی و سختی افزایش می‌یابند.

مراجع

۸- نتیجه‌گیری

۱- افزایش نسبت $(\frac{D}{d})$ باعث کاهش پارامترهای مقاومت‌نهایی، شکل‌پذیری، جذب انرژی و سختی می‌گردد. هم‌چنین میزان کاهش مقاومت‌نهایی دیوار برشی فولادی با افزایش نسبت $(\frac{D}{d})$ از رابطه $22.82(\frac{D}{d})^2 + 12.93(\frac{D}{d}) + 0.34$ محاسبه می‌گردد.

۲- افزایش سختی المان‌های مرزی سبب افزایش پارامترهای مقاومت‌نهایی، شکل‌پذیری، جذب انرژی و سختی می‌گردد. نسبت این افزایش در مدل با افزایش سختی در ستون‌ها، به سبب اینکه تیرهای با مقطع کاهش‌یافته حاکم بر طرح هستند به نسبت مدل با افزایش سختی در تیرها کمتر به چشم می‌آید. افزایش مقاومت‌نهایی با افزایش سختی ستون‌ها با رابطه $\frac{0.192C_{SI}^2 + 23.8C_{SI}}{10000}$ و افزایش مقاومت‌نهایی با افزایش سختی تیرها با رابطه $\frac{4.9B_{SI}^2 - 149B_{SI}}{10000}$ محاسبه می‌گردد.

۳- تغییر جنس فولاد ورق میانی از فولاد با تنش تسلیم پایین به فولاد با تنش تسلیم بالاتر، سبب افزایش پارامترهای مقاومت‌نهایی، شکل‌پذیری، جذب انرژی و سختی شد اما تنش‌های تحمیل‌شده به المان‌های مرزی نیز به صورت قابل توجهی افزایش یافتند.

۴- جنس مصالح مورد استفاده در ورق میانی می‌تواند به اندازه سختی المان‌های مرزی در مقاومت‌نهایی و جذب انرژی مؤثر باشد اما تأثیر سختی المان‌های مرزی بر پارامترهای شکل‌پذیری و سختی به مراتب بیشتر است.

فهرست علائم انگلیسی

D	قطر باز شو
d	ارتفاع پانل
C_{SI}	میزان افزایش سختی ستون‌ها بر حسب درصد
B_{SI}	میزان افزایش سختی تیرها بر حسب درصد
C_{eu}	نیروی طراحی ارتجاعی، kN
C_y	نیروی متناظر حد تسلیم سازه، kN
C_s	تراز نیرو در تشکیل اولین مفصل پلاستیک، kN
C_w	تراز نیرو در حد تنش‌های مجاز، kN
μ	شکل‌پذیری
Δ_{max}	جابه‌جایی نهایی سازه، mm

- [1] T.M. Roberts, S. Sabouri-Ghomi, Hysteretic characteristics of unstiffened perforated steel plate shear panels, *Thin-Walled Structures*, 14(2) (1992) 139-151.
- [2] A. Schumacher, G.Y. Grondin, G.L. Kulak, Connection of infill panels in steel plate shear walls, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 26(5) (1999) 549-563.
- [3] A. Astaneh-Asl, Seismic behavior and design of steel shear walls, (2001).
- [4] E. Alavi, F. Nateghi, Experimental study on diagonally stiffened steel plate shear walls with central perforation, *Journal of Constructional Steel Research*, 89 (2013) 9-20.
- [5] A. Nazifi, H. Shariatmadar, Investigation of the effect of yield stress on the behavior of the grooved steel beam shear beam Improved groove, *The 6th National and 2nd International Conference on Civil Engineering Materials and Structures*, (2017) (In Persian)
- [6] M. Hoseinzadeh Asl, M. Safarkhani, Seismic behavior of steel plate shear wall with reduced boundary beam section, *Thin-Walled Structures*, 116(Supplement C) (2017) 169-179.
- [7] M. Gholhaki, M. Movahedinia, O. Rezaie Far, Provide Analytical Relationship to Calculate the Stiffness of Composite Steel Shear Walls, *Amirkabir Journal of civil engineering*, (2018) 607-616. (In Persian)
- [8] B. Shekastehband, A.A. Azaraxsh, H. Showkati, A. Pavir, Behavior of semi-supported steel shear walls: Experimental and numerical simulations, *Engineering Structures*, 135 (2017) 161-176.
- [9] H. Kazemi, A. Arabzade, Investigation of the Nonlinear behavior of special steel shear walls with openings. (2018) (In Persian).
- [10] F. Behzadinia, A. Rahai, Investigating the effect of

- DC: Federal Emergency Management Agency, 7 (2000).
- [14] D. Vian, M. Bruneau, K.-C. Tsai, Y.-C. Lin, Special perforated steel plate shear walls with reduced beam section anchor beams. I: Experimental investigation, *Journal of Structural Engineering*, 135(3) (2009) 211-220.
- [15] S. Sabouri-Ghomi, M. Ziaei, A study on the behavior of shear link beam made of easy-going steel in eccentrically braced frames, in: *The 14th World Conference on Earthquake Engineering Beijing, China October 12-17, 2008*, .
- location and number of openings on the performance of composite shear walls, *Sharif Journal of Civil engineering*, 2018 (In Persian).
- [11] F. Hatami, A. Ghamari, *Steel and Composite Shear Wall*, Amirkabir University of Technology branch, Iranian Academic Center for Education Culture & Research, Tehran, 2014.
- [12] C.-M. Uang, Establishing R (or R w) and C d factors for building seismic provisions, *Journal of Structural Engineering*, 117(1) (1991) 19-28.
- [13] F. Prestandard, *commentary for the seismic rehabilitation of buildings (FEMA356)*, Washington,

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

F. Hatami, N. Paslar, Investigating the Opening Dimensions, the Stiffness of the Boundary Elements and the Type of the Infill Plate on the Behavior of Steel Plate Shear Wall, Amirkabir J. Civil Eng., 52(2) (2020) 437-454.

DOI: [10.22060/ceej.2019.14450.5657](https://doi.org/10.22060/ceej.2019.14450.5657)



