

بررسی رفتار دیوار برشی فولادی موجدار با سخت کننده

مسعود دانش^۱، اکبر علیزاده^۲

^۱ استادیار، گروه عمران دانشکده فنی خوی، دانشگاه ارومیه، خوی، ایران

m.danesh@urmia.ac.ir

^۲ کارشناس ارشد سازه، گروه عمران دانشکده فنی خوی، دانشگاه ارومیه، خوی، ایران

akbar2019alizadeh@yahoo.com

چکیده

دیوار برشی فولادی، یک سیستم مهار جانبی است که در دهه‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته و به علت داشتن مزایایی چون ظرفیت باربری، سختی، شکل‌پذیری و جذب انرژی زیاد، در سازه‌ها به کار می‌رود. با توجه به مقاومت بالای فولاد، ضخامت مورد نیاز دیوار برشی کم بوده که این امر موجب کمانش زود هنگام آن می‌شود، که جهت رفع این اشکال، یا باید ضخامت ورق را افزایش داد که طرحی غیراقتصادی است، یا از سخت‌کننده استفاده نمود که استفاده از سخت‌کننده نیز دارای معایبی مانند افزایش زمان ساخت، ایجاد تنش پسماند در ورق فولادی ناشی از عملیات جوشکاری و غیره می‌باشد. لذا در سال‌های اخیر ایده استفاده از دیوارهای برشی موجدار مطرح گردیده که ضمن داشتن مزایای دیوارهای برشی دارای سخت‌کننده، فاقد معایب آن است.

این تحقیق با ۲۶ مدل نمونه، به بررسی رفتار دیوارهای برشی فولادی موجدار با سخت‌کننده می‌پردازد. تحلیل نمونه‌ها با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS، به صورت دینامیکی غیرخطی انجام شده و رفتار سازه به صورت غیرخطی (شامل رفتار غیرخطی هندسی و مصالح) در نظر گرفته شده است. پارامترهای رفتاری سازه که اثرات باز شو بر روی آن‌ها بررسی گردیده شامل مقاومت برشی نهایی، شکل‌پذیری و جذب انرژی است. موارد بررسی شده شامل اثر تعداد سخت‌کننده‌ها و زاویه ورق پرکننده دیوار بر رفتار دیوارهای برشی فولادی موجدار می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد، ورق با زاویه کمتر نسبت به افق، عملکرد کلی بهتری نسبت به ورق با زاویه بیشتر داشته است.

کلید واژه : دیوار برشی فولادی موجدار، پس کمانش، سختی برون صفحه‌ای، سخت‌کننده، زاویه ورق نسبت به افق.

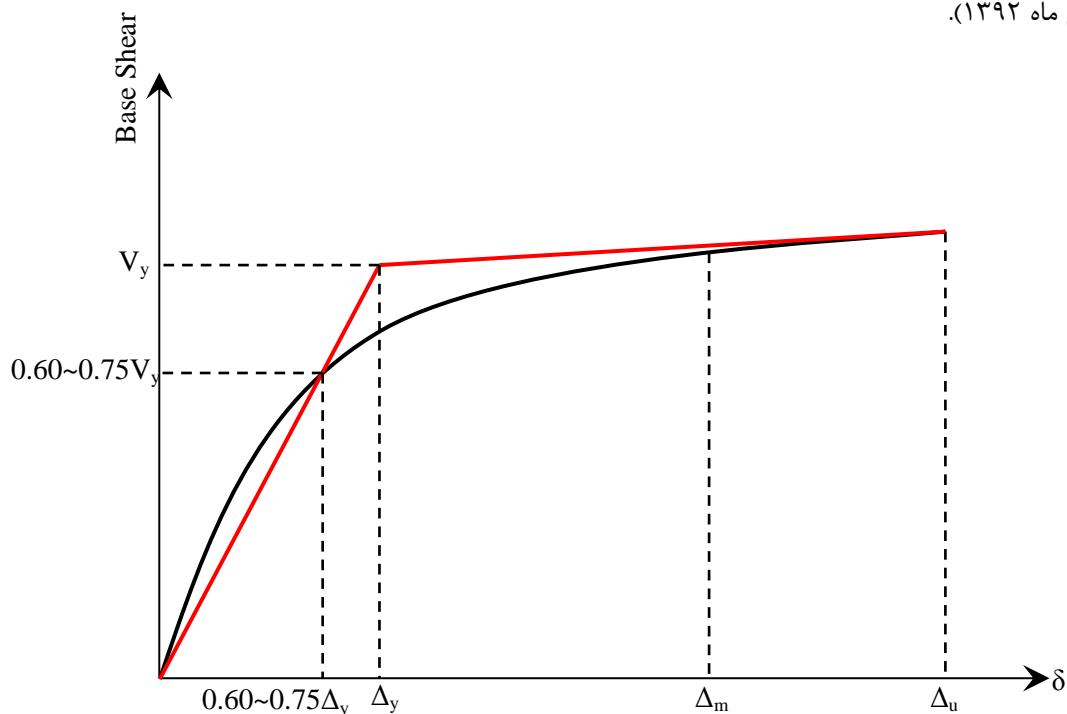
۱- مقدمه

برای مقاوم کردن قاب‌های فولادی در برابر نیروهای جانبی، سیستم‌های مختلفی می‌تواند در نظر گرفته شود. در این میان قاب‌های خمشی فولادی به دلیل قابلیت بهره‌برداری از فضای بین قاب‌ها بیشتر مورد توجه طراحان می‌باشد، ولی به خاطر سختی کم این سیستم، معمولاً طراحی این نوع سیستم منجر به انتخاب پروفیل‌هایی با مقاطع نسبتاً بزرگ می‌گردد. روشی که می‌تواند ضمن حفظ برتری این سیستم در کاهش مقدار فولاد مصرفی نقش بسزایی داشته باشد استفاده از سیستم دیوار برشی فولادی است (صبوری، ۱۳۸۰). در سه دهه اخیر، دیوار برشی فولادی یا به اختصار

SPSW (Steel Plate Shear Wall)، برای انتقال نیروهای جانبی زلزله و باد در ساختمان‌ها، به ویژه در ساختمان‌های بلند مطرح و مورد استفاده قرار گرفته است. استفاده از دیوار برشی فولادی در مقایسه با قاب‌های خمشی تا حدود ۵۰ درصد صرفه‌جویی در مصرف فولاد در سازه ساختمان‌ها به همراه داشته است. ورق فولادی تا قبل از وقوع کمانش خارج از صفحه، تحت اثر برش خالص می‌باشد. با افزایش نیرو، تنش فشاری از تنش بحرانی حد کمانش ورق فولادی بیشتر گشته، ورق کمانش کرده و صفحه جان تغییر شکل می‌دهد (پنجه‌باشی‌ا قدم، بهمن ماه ۱۳۹۴). پدیده مذکور، پس کمانش در ورق فولادی نامیده می‌شود. با بکارگیری مقاومت پس کمانشی ورق فولادی، ضخامت ورق حتی در دیوارهای برشی فولادی در سازه‌های بلند با نیروهای برشی بزرگ، کم است. به همین دلیل می‌توان جهت جلوگیری از کمانش ورق فولادی تحت اثر بارهای سرویس و بخصوص در ناحیه الاستیک به جای افزایش ضخامت آن که غیر اقتصادی می‌باشد، از سخت‌کننده‌ها برای تقویت ورق استفاده کرد. استفاده از ورق‌های موجدار (مصطفی، تابستان ۱۳۹۵) به عنوان دیوار برشی، به علت داشتن مزایای ورق‌های تقویت شده و عدم معایب فوق‌الذکر آن، می‌تواند جایگزین مناسبی برای آن‌ها بوده، زیرا بهره‌گیری از سختی برون صفحه‌ای ورق، که از شکل هندسی موج‌ها ناشی می‌شود، باعث ایجاد رفتاری مشابه دیوارهای فولادی تقویت شده می‌شود (موقوفه، مهرماه ۱۳۹۴).

۲- سختی، مقاومت، جذب انرژی، شکل‌پذیری و ضریب رفتار

عوامل تعیین کننده در سیستم‌های مقاوم در برابر بارهای جانبی، سختی، مقاومت، جذب انرژی، شکل‌پذیری و ضریب رفتار آن‌ها می‌باشد که به کمک دو خطی کردن دیاگرام ظرفیت جانبی (شکل ۱) تعیین می‌گردد (نصری، بهمن ماه ۱۳۹۲).



شکل (۱). نمودار ظرفیت

نیروی زلزله برای طراحی خطی سازه‌ها، از یک طیف خطی زلزله بدست می‌آید و به منظور اعمال کاهش که در نیروی اعمالی زلزله به دلیل عواملی مانند شکل‌پذیری، مقاومت افزون، میرایی و... به وجود می‌آید، نیروی خطی محاسبه شده از طیف خطی با استفاده از ضریبی به نام ضریب کاهش یا ضریب رفتار، کاهش پیدا می‌کند. در طراحی لرزه‌ای سازه‌های فولادی برای لحاظ نمودن رفتار غیرالاستیک واقعی سازه، به کارگیری یک تحلیل

غیرخطی مفید و کارآمد می‌باشد. در روش تحلیل نواری، استفاده از المان‌های غیرخطی خرپایی برای منظور کردن مناسب اثرات تنش‌های تسلیم کششی یکنواخت جان بر روی اجزای مرزی افقی و قائم توصیه می‌شود. همچنین استفاده از المان‌های غیرخطی غشایی ناهمسانگرد در تحلیل المان محدود دیوارهای برشی به شرط وجود در نرم‌افزارهای موجود مهندسی جهت مدل کردن دقیق‌تر دیوار مفید می‌باشد. چنانچه از مدل غیرخطی استفاده شود، در اینصورت اجزای مرزی افقی و قائم می‌توانند در مقابل موده‌های ناخواسته مانند کماتش در اثر رفتار غیرالاستیک با اعمال تغییرشکل‌های مناسب به قاب کنترل‌کننده باشند. تغییرمکان‌های موردنظر می‌توانند حاصل تسلیم کامل کششی ورق جان بوده، یا به هر روش دیگری محاسبه شوند. تحلیل پوش اور بهترین روش برای دستیابی به نیروهای واقعی اجزای مرزی است. نیروهای محوری و خمشی که با استفاده از این روش برای اعضای مرزی به دست می‌آیند، کمتر از نظایر آنها در حالتی هستند که نیروها از طریق طرح بر اساس ظرفیت حاصل می‌شوند (نصری، بهمن ماه ۱۳۹۲).

۳- مروری بر مطالعات پیشین

طرح استفاده از دیوار برشی فولادی براساس نتایج مطالعات انجام شده بر روی تیرورق‌ها، برای اولین بار در دهه ۸۰ میلادی در دانشگاه آلبرتا کانادا توسط ثوربورن و همکاران مطرح گردید (Thorburn, 1983). این مطالعات با نتایج آزمایش‌های انجام شده توسط تیملر و کولاک در همان سال مورد تأیید قرار گرفت (Qiang Cao, 2018). شان و همکارانش رفتار هیستریزیس و جذب انرژی قاب فولادی با دیوار برشی فولادی موجدار دوزنقه‌ای را مورد بررسی قرار دادند (Sudeok Shon, 2017). امامی و همکاران رفتار چرخه‌ای دیوارهای برشی فولادی موجدار دوزنقه‌ای بدون سخت‌کننده را مورد مطالعه آزمایشگاهی قرار دادند (Fereshteh Emami, 2013). ناطق الهی و خزایی‌پور نیز رفتار غیرخطی دیوارهای برشی فولادی را که در آن ورق پرکننده جان با الیاف پلیمری شیشه‌ای تقویت شده است، بصورت آزمایشگاهی بررسی کردند (ناطق الهی، ۱۳۹۴).

یکی از سیستم‌های ساختمانی که در سالیان اخیر توسعه مناسبی در سطح جهانی داشته است، سیستم ساختمانی قاب فولادی سبک سرد نورد (LSF) می‌باشد. دیوارهای برشی فولادی سرد نورد شده با پوشش فولادی، یکی از سیستم‌های باربر جانبی در این نوع سیستم ساختمانی می‌باشد. اسماعیلی و همکارانش رفتار دیوارهای برشی فولادی سرد نورد شده با پوشش فولادی را تحت بارگذاری جانبی چرخه‌ای بصورت آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار دادند (شیرین، اسماعیلی، ۱۳۹۶). حسینی و آقابرانی، تأثیر شکل و زاویه موج ورق را در رفتار لرزه‌ای دیوار برشی فولادی بررسی کردند (آقابرانی، ۲۷ فروردین ۱۳۹۴). اشگی و غلامپور به بررسی اثر پارامترهای ضخامت ورق موجدار، افزایش ارتفاع دیوار و افزایش طول دهانه قاب، در رفتار لرزه‌ای دیوار برشی فولادی موجدار از نظر میزان شکل‌پذیری، ظرفیت باربری و میزان اتلاف انرژی سیستم پرداختند (اشگی، ۱۳۹۶). کلالی و همکاران رفتار دیوار برشی فولادی با ورق موجدار را در ضخامت‌های متفاوت بررسی کردند (کلالی، ۱۳۹۷). خزاعی و ابراهیمی رفتار لرزه‌ای دیوار برشی فولادی با ورق موجدار را بررسی کرده و چگونگی تقسیم نیروی برشی بین ورق و قاب پیرامون آن را ارزیابی کردند (راوری، ۶ و ۷ اردیبهشت ۱۳۹۰). علوی و ناطقی میزان تقویت دیوارهای برشی فولادی را با سخت‌کننده‌های قطری مورد ارزیابی قرار دادند. زنوزی و ولی‌پور رفتار دیوار برشی فولادی بازشودار به همراه سخت‌کننده را بررسی کردند (زنوزی، ۱۸ شهریور ماه ۱۳۹۵). مظاهری‌مقدم و همکارانش، تأثیر بازشوها در رفتار دیوارهای برشی فولادی را بررسی کردند (مظاهری‌مقدم، ۱۳۹۵). نهایتاً، خسروی و موسوی به تحلیل نمونه‌هایی از دیوار برشی فولادی مرکب (اجرای لایه‌ای بتنی در یک یا دو طرف ورق فولادی، جهت جلوگیری از کماتش ورق) با ورق‌های صاف و موجدار دوزنقه‌ای با موجهای افقی و قائم پرداختند (کیخسروی، بهمن ماه ۱۳۹۴).

۴- مدل سازی در ABAQUS

در تعریف مشخصات ناحیه پلاستیک فولاد را به نرم افزار آباکوس، می بایست از تنش و کرنش واقعی استفاده کرد. نرم افزار این مقادیر تنش و کرنش را به مقادیر صحیح تبدیل می کند. داده های مربوط به مصالح فولاد مورد استفاده در آزمایش ها، اغلب موارد اسمی میزان مقاومت فولاد می باشد. برای تبدیل کردن این مقادیر به تنش و کرنش واقعی، از فرمول های زیر استفاده می شود [2]:

$$\varepsilon = \ln(1 + \varepsilon_{\text{nominal}}) \quad (1)$$

$$\sigma = \sigma_{\text{nominal}}(1 + \varepsilon_{\text{nominal}}) \quad (2)$$

برای تعیین کرنش در ناحیه پلاستیک، می بایست مقادیر کرنش الاستیک را از آن کسر نمود:

$$\varepsilon^{pl} = \varepsilon^t - \varepsilon^{el} = \varepsilon^t - \frac{\sigma}{E} \quad (3)$$

که در این روابط، $\varepsilon_{\text{nominal}}$ و σ_{nominal} به ترتیب کرنش و تنش اسمی و همچنین، ε و σ ، به ترتیب بیانگر کرنش و تنش واقعی هستند. برای معرفی پلاستیسیته فولاد از سخت شدگی سینماتیک استفاده شده است. در این روش رفتار فولاد تا رسیدن به تنش تسلیم الاستیک خطی بوده، در این نقطه فولاد تحت بار ثابت جاری می شود. پارامترهای مورد نیاز این مدل، ضریب کشسانی (E_s)، نسبت پواسون (ν)، تنش تسلیم (F_y) و تنش نهایی (F_u) است [20]. مقادیر بکار رفته در این تحقیق، در جدول (۱) نشان داده شده است.

جدول (۱). مشخصات فولاد به کار رفته در تحقیق

مصالح	E_s (MPa)	F_y (MPa)	F_u (MPa)	ε_y	ε_u
HEB-160	2.06×10^6	340	450	0.17	14.4
h=5mm	2.05×10^6	340	470	0.17	20.5
h=1mm	2.04×10^6	280	500	0.14	21.6

رفتار غیر خطی هندسی توسط فعال کردن گزینه Nlgeom در تحلیل نوع Dynamic Explicit، با لحاظ اثر P- δ و تغییر شکل های بزرگ و رفتار غیر خطی مصالح، با سخت شوندگی کرنشی معادل ۰,۰۳ در نظر گرفته شد. المان s4r برای مدل کردن دیوار بکار رفت و با سایز ۵۰ میلی متر، مش بندی شد. صفحات گوشه با ابعاد ۷۰×۵ میلی متر در سرتاسر پانل برای اتصال صفحات میان قاب به اعضای مرزی مورد استفاده قرار گرفتند. چهار سوراخ با ابعاد ۲۵×۲۵ میلی متر از گوشه های صفحات گوشه برش داده شد تا گوشه ها را از تمرکز تنش خارج کند. از جوش گوشه برای اتصال صفحات گوشه به اعضای مرزی استفاده شد. صفحه میان قاب با استفاده از جوش آرگون به صفحات گوشه متصل شده است، چون از ورق های نازک برای صفحه میان قاب استفاده شده است. اتصالات جوشی توسط دستور Merge Instances در بخش Assembly آباکوس مدل شد. چگالی تمامی مصالح فولادی یکسان و برابر 7850×10^{-8} نیوتن بر میلی متر مکعب تعریف گردید. برای تحلیل کمانشی دیوار، تحلیل Buckle بخش Linear Perturbation آباکوس استفاده شد، سپس حداکثر بار جابجایی برای بارگذاری نمونه ها ۷۰ میلی متر اعمال شد. یک Amplitude (دامنه حل) از صفر تا ۷۰ میلی متر و با تغییرات ۰,۱ میلی متر در هر بازه زمانی یک ثانیه ایجاد گردید (Erfan Alavi, 2013).

۵- مدل های مورد بررسی

از دو مدل ورق موجدار به شکل دوزنقه ای، با جهت قائم و با دو گام مختلف استفاده شده است. جهت قائم ورق ها رفتار

مناسبتی نسبت به حالت افقی دارد. منظور از گام در این ورق‌ها، فاصله موج‌های ورق دوزنقه‌ای نسبت به یکدیگر می‌باشد. در این تحقیق از دو گام با زوایای ۴۵ درجه (فاصله بین گام‌ها ۵۰ میلی‌متر) و ۲۳٫۵ درجه (فاصله بین گام‌ها ۱۱۵ میلی‌متر) استفاده شده است.

در مدل‌های با سخت‌کننده، از تسمه‌های فولادی ۵×۵۰ میلی‌متر بسته به یکطرفه یا دوطرفه بودن مدل، به عنوان سخت‌کننده در راستای عمودی ورق، در داخل شیارهای ورق دوزنقه‌ای استفاده شده است. همچنین تمامی بازشوها در مدل‌های با سخت‌کننده با یک ورق فولادی ۵×۵۰ میلی‌متر تقویت شده است.

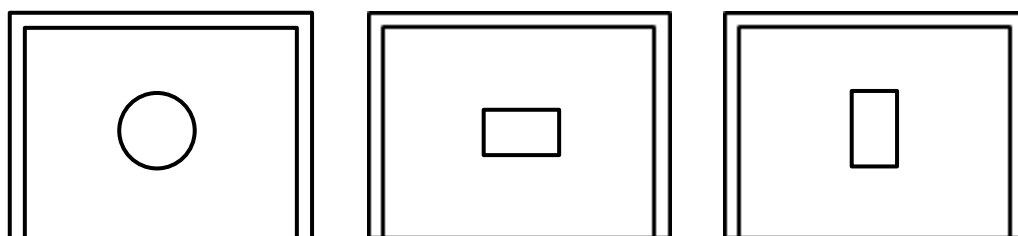
طبق جدول (۲) مدل‌هایی با مشخصات مدل مرجع، با متغیرهای شکل بازشو، اندازه بازشو، تعداد سخت‌کننده‌ها و نوع ورق موجدار، مدل‌سازی و نتایج آنها را با یکدیگر مقایسه شده است. خروجی‌های مدنظر جهت مقایسه مدل‌ها با یکدیگر، کانتور تنش مایسز در رفتار پس کمانشی، نمودار بارجابی - تغییرمکان و نمودار تغییرات انرژی جمعی خواهد بود.

جدول (۲). مشخصات مدل‌های مورد بررسی در دیوار برشی فولادی موجدار دوزنقه‌ای

ردیف	نام مدل	شکل بازشو	اندازه بازشو (mm)	نوع سخت‌کننده	گام موج ورق (mm)
۱	S50	بدون بازشو	----	بدون سخت‌کننده	۵۰
۲	S115	بدون بازشو	----	بدون سخت‌کننده	۱۱۵
۳	C300-S50	دایره	۳۰۰	بدون سخت‌کننده	۵۰
۴	C300-S1-S50	دایره	۳۰۰	یکطرفه	۵۰
۵	C300-S2-S50	دایره	۳۰۰	دوطرفه	۵۰
۶	C300-S115	دایره	۳۰۰	بدون سخت‌کننده	۱۱۵
۷	C300-S1-S115	دایره	۳۰۰	یکطرفه	۱۱۵
۸	C300-S2-S115	دایره	۳۰۰	دوطرفه	۱۱۵
۹	C500-S50	دایره	۵۰۰	بدون سخت‌کننده	۵۰
۱۰	C500-S1-S50	دایره	۵۰۰	یکطرفه	۵۰
۱۱	C500-S2-S50	دایره	۵۰۰	دوطرفه	۵۰
۱۲	C500-S115	دایره	۵۰۰	بدون سخت‌کننده	۱۱۵
۱۳	C500-S1-S115	دایره	۵۰۰	یکطرفه	۱۱۵
۱۴	C500-S2-S115	دایره	۵۰۰	دوطرفه	۱۱۵
۱۵	R300-S50	مستطیل	۳۰۰	بدون سخت‌کننده	۵۰
۱۶	R300-S1-S50	مستطیل	۳۰۰	یکطرفه	۵۰
۱۷	R300-S2-S50	مستطیل	۳۰۰	دوطرفه	۵۰
۱۸	R300-S115	مستطیل	۳۰۰	بدون سخت‌کننده	۱۱۵
۱۹	R300-S1-S115	مستطیل	۳۰۰	یکطرفه	۱۱۵
۲۰	R300-S2-S115	مستطیل	۳۰۰	دوطرفه	۱۱۵
۲۱	R500-S50	مستطیل	۵۰۰	بدون سخت‌کننده	۵۰
۲۲	R500-S1-S50	مستطیل	۵۰۰	یکطرفه	۵۰
۲۳	R500-S2-S50	مستطیل	۵۰۰	دوطرفه	۵۰
۲۴	R500-S115	مستطیل	۵۰۰	بدون سخت‌کننده	۱۱۵
۲۵	R500-S1-S115	مستطیل	۵۰۰	یکطرفه	۱۱۵
۲۶	R500-S2-S115	مستطیل	۵۰۰	دوطرفه	۱۱۵

با توجه به مطالعات پیشین در زمینه سخت‌کننده‌های اطراف بازشو، بهترین حالت افزایش سختی دیوار برشی فولادی باز شудар، اضافه کردن همزمان سخت‌کننده‌های اطراف باز شو و روی دیوار می‌باشد. به طور کلی دیوارهای برشی

فولادی در توزیع تنش در اعضاء مرزی بسیار متغیر هستند که با افزودن سخت‌کننده‌ها توزیع تنش در این اعضا یکنواخت می‌گردد. به همین دلیل در این تحقیق علاوه بر سخت‌کننده دور بازشوی اطراف کلیه بازشوها بر روی دیوار، از سخت‌کننده‌های عمودی در یک یا هر دو طرف دیوار استفاده گشته است. متغیرهای موردنظر در این تحقیق شامل شکل بازشو، ابعاد بازشو، تعداد سخت‌کننده و نوع ورق موجدار است. برای شکل بازشو دو شکل متداول در صنعت ساختمان شامل دایره و مستطیل (دو حالت طولی و عرضی) در نظر گرفته شده است. جهت تعیین رفتار دیوار تحت تأثیر ابعاد بازشو، اندازه‌های ۳۰۰ میلی‌متر و ۵۰۰ میلی‌متر برای بازشوها در نظر گرفته شده است. بازشو با این ابعاد می‌تواند نیازهای معماری را برآورده کند. شکل (۲)، سه حالت متغیر برای شکل بازشو را نشان می‌دهد.



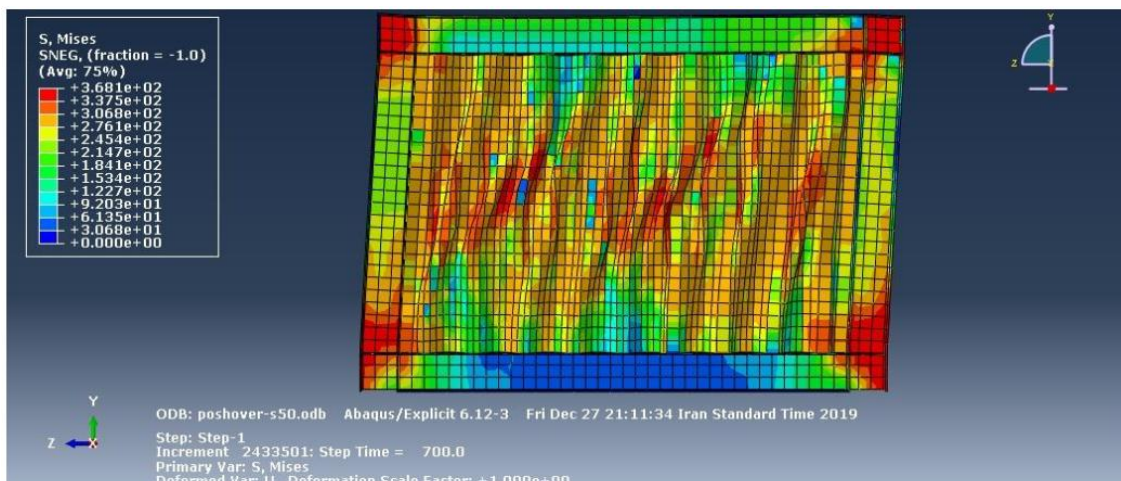
شکل (۲). شکل بازشو در دیوار برشی فولادی موجدار دوزنقه‌ای

برای در نظر گرفتن مسأله ناکاملی، انحنای جانبی صفحه تحت عنوان یک ناکاملی اولیه در مدل عددی اعمال می‌شود. اینکار با دادن تغییرشکل اولیه کوچکی به صفحه، مطابق با تغییرشکل یکی از مودهای کماتشی صفحه (اغلب مود کماتشی اول) که از تحلیل Buckling دست می‌آید، انجام می‌گیرد. لذا تحلیل هر مدل در دو بخش آنالیز خطی کماتش و آنالیز غیرخطی بعد از کماتش صورت گرفته است. آنالیز کماتش، توسط آنالیز Buckling در نرم‌افزار انجام شده و تغییرشکل حاصل از آن به عنوان نقص اولیه (imperfection)، جهت آنالیز غیرخطی بعد از کماتش، که توسط آنالیز Dynamic-Explicit صورت پذیرفته، در نظر گرفته شده است.

۶- نتایج مربوط به حل مدل‌ها

۶-۱- نتایج مربوط به مدل‌های S50 و S115

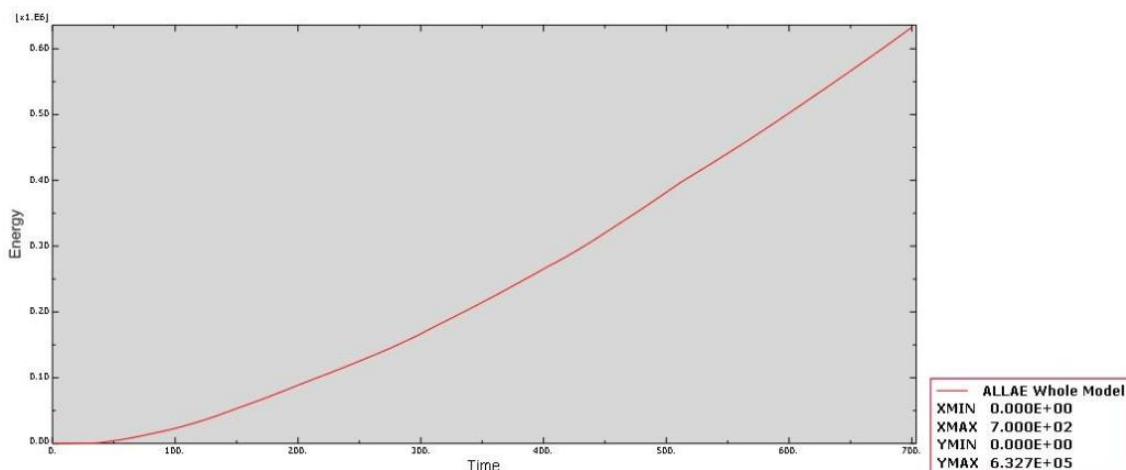
در شکل (۳)، تغییرات تنش فون میزس در مدل S50 نمایش داده شده است. حداکثر تنش در این مدل برابر ۳۶۸,۱ مگاپاسکال بوده، مشاهده می‌شود که بیشترین میزان تنش در نواحی چشمه‌های اتصال و قسمت‌های میانی ورق موجدار می‌باشد.



شکل (۳). کانتور تنش von-mises در مدل S50

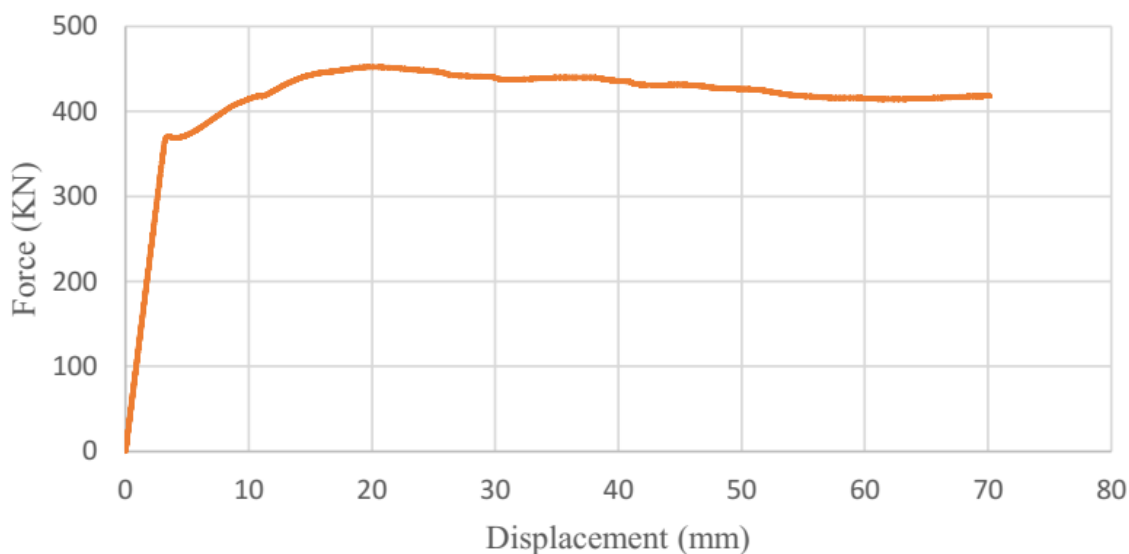
شکل (۴)، تغییرات انرژی در مدل S50 نمایش را می‌دهد. در این نمودار محور عمودی (Energy) نشان دهنده مقدار انرژی تجمعی در دیوار برحسب نیوتن در متر است. همانطور که مشاهده می‌شود حداکثر انرژی تجمعی بدست آمده برابر ۶۳۲,۷ کیلونیوتن در متر می‌باشد.

شکل (۵) نمودار بار-تغییرمکان را در مدل S50 نمایش می‌دهد. در این نمودار محور عمودی نشان دهنده مقدار نیروی برشی در دیوار با واحد آن نیوتن و محور افقی، جابجایی افقی دیوار را در واحد میلی‌متر نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود حداکثر نیروی برشی بدست آمده برابر ۴۵۲,۳ کیلونیوتن است.



شکل (۴). نمودار تغییرات انرژی تجمعی مدل S50

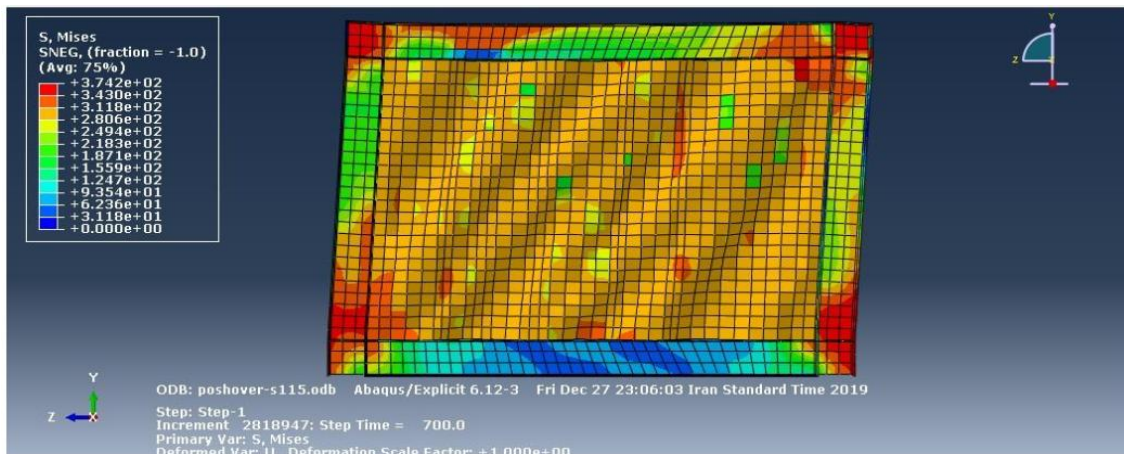
نمودار نیرو-جابجایی مدل S50



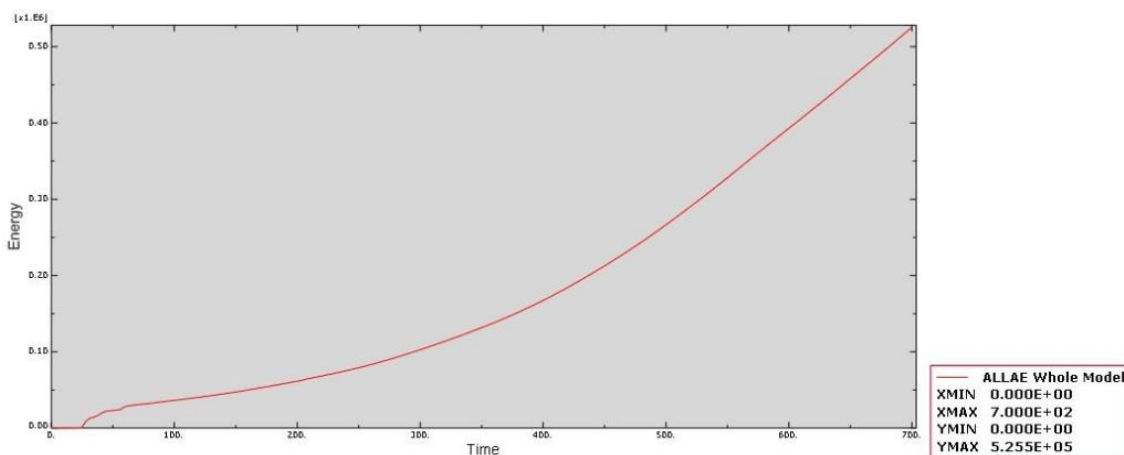
شکل (۵). نمودار نیرو-تغییرمکان مدل S50

در شکل (۶) تغییرات تنش فون میزس در مدل S115 نمایش داده شده است. حداکثر تنش در این مدل برابر ۳۷۴,۲ مگاپاسکال بوده مقدار تنش نسبت به مدل S50 اندکی افزایش داشته است. همچنین بیشترین میزان تنش مربوط به نواحی چشمه اتصال است و برخلاف مدل S50 تنش قابل توجهی در ورق موجدار ایجاد نشده است. شکل (۷) تغییرات

انرژی را در مدل S115 نمایش می‌دهد. حداکثر انرژی تجمعی بدست آمده برابر ۵۲۵,۵ کیلو نیوتن در متر است که نسبت به مدل S50 کاهش یافته است. شکل (۸) نمودار بار-تغییر مکان را در مدل S115 نمایش می‌دهد. حداکثر نیروی برشی بدست آمده برای این مدل برابر ۵۵۱,۹ کیلو نیوتن است که نسبت به مدل S50 افزایش ۲۲ درصدی داشته است.

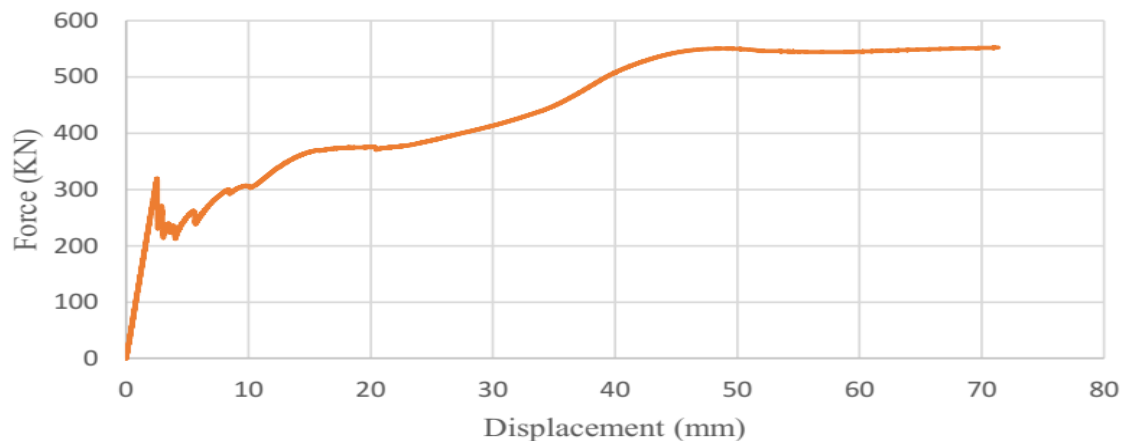


شکل (۶). کانتور تنش von-mises در مدل S115



شکل (۷). نمودار تغییرات انرژی تجمعی مدل S115

نمودار نیرو-جابجایی مدل S115



شکل (۸). نمودار نیرو-تغییر مکان مدل S115

در جدول (۳)، خلاصه نتایج مربوط به دو مدل S50 و S115 را نشان داده شده است. نتایج نشان دهنده رفتار بهتر مدل S115 با گام‌های باز، به مدل S50 با گام‌های بسته است. بطور کلی می‌توان گفت عملکرد مدل S115 از لحاظ شکل‌پذیری و مقاومت برشی نسبت به مدل S50 بهتر بوده ولی جذب انرژی مدل S50 از مدل S115 بیشتر است.

جدول (۳). خلاصه نتایج مدل‌های S50 و S115

ردیف	نام مدل	حداکثر تنش مایسز (MPa)	حداکثر انرژی تجمعی (KN.m)	حداکثر نیروی برشی (KN)
۱	S50	368.1	632.7	452.3
۲	S115	374.2	525.5	551.9
تغییرات مدل S115 نسبت به S50				
		+1.7%	-17%	+22%

۶-۲- نتایج مربوط به مدل‌های C300 و C500 (بازشوی دایروی با قطر ۳۰۰ و ۵۰۰ میلی‌متر)

جهت اختصار از نشان دادن اشکال نتایج خودداری شده، خلاصه نتایج برای مدل‌های فوق در جدول (۴) آورده شده است.

ایجاد بازشو ۵۰۰ میلی‌متری باعث کاهش مقاومت برشی، جذب انرژی و شکل‌پذیری دیوار برشی، نسبت به حالت بدون بازشو می‌شود. ولی در بازشوی ۳۰۰ میلی‌متری جذب انرژی و شکل‌پذیری اندکی افزایش داشته، اما مقاومت برشی همانند مدل ۵۰۰ میلی‌متری کاهش یافته است. پس بطور کلی می‌توان گفت ایجاد بازشو در دیوارهای برشی با ورق موجدار همواره باعث کاهش مقاومت برشی سیستم می‌شود ولی عملکرد جذب انرژی و شکل‌پذیری سیستم تابعی از اندازه بازشو بوده و لزوماً باعث کاهش آن نمی‌شود.

با ایجاد سخت‌کننده در مدل‌ها، مقاومت برشی، جذب انرژی و شکل‌پذیری نسبت به مدل بدون سخت‌کننده افزایش می‌یابد، ولی میزان افزایش جذب انرژی در مدل‌های با بازشوی ۳۰۰ میلی‌متری بسیار بیشتر از مدل‌های با بازشوی ۵۰۰ میلی‌متری است. پس می‌توان گفت در ورق‌های موجدار با گام ۱۱۵ میلی‌متر، تأثیر سخت‌کننده در جذب انرژی مدل با بازشوی کوچکتر، بیشتر از مدل با بازشوی بزرگتر است.

جدول (۴). خلاصه نتایج مدل‌های C300 و C500

ردیف	نام مدل	حداکثر تنش مایسز (MPa)	حداکثر انرژی تجمعی (KN.m)	حداکثر نیروی برشی (KN)
۳	C300-S50	378.5	638.3	434.9
۴	C300-S1-S50	494.3	749.6	488.6
۵	C300-S2-S50	500.0	705.3	570.8
۶	C300-S115	391.8	528.5	521.4
۷	C300-S1-S115	481.2	676.2	535.8
۸	C300-S2-S115	441.6	949.5	499.7
۹	C500-S50	383.9	619.0	414.3
۱۰	C500-S1-S50	500.0	936.9	458.1
۱۱	C500-S2-S50	494.0	638.0	530.7
۱۲	C500-S115	368.2	524.6	485.5
۱۳	C500-S1-S115	420.7	625.8	536.6
۱۴	C500-S2-S115	443.7	705.7	565.6

با ایجاد سخت‌کننده یکطرفه در مدل‌ها، هر سه پارامتر مقاومت برشی، جذب انرژی و شکل‌پذیری افزایش می‌یابد. ولی با افزایش تعداد سخت‌کننده از یکطرفه به دوطرفه، این میزان افزایش نسبت به مدل یکطرفه کمتر است. به بیان دیگر می‌توان گفت تأثیر سخت‌کننده یکطرفه در عملکرد مقاومت برشی، جذب انرژی و شکل‌پذیری بسیار بیشتر از

سخت کننده دوطرفه است.

در ورق‌های با گام ۱۱۵ میلی‌متر با بازشوی ۵۰۰ میلی‌متری، با افزایش سخت‌کننده از یکطرفه به دوطرفه همواره هر سه پارامتر مقاومت برشی، جذب انرژی و شکل‌پذیری افزایش می‌یابد، هرچند مقدار این افزایش نسبت به سخت‌کننده یکطرفه کم است. در ورق‌های با گام ۱۱۵ میلی‌متر با بازشوی ۳۰۰ میلی‌متر، با افزایش سخت‌کننده از یکطرفه به دوطرفه همواره جذب انرژی و شکل‌پذیری افزایش می‌یابد، ولی مقاومت برشی سیستم نسبت به سخت‌کننده یکطرفه اندکی کاهش می‌یابد. اما میزان جذب انرژی در این مدل بطور قابل توجهی افزایش دارد، بطوریکه با افزودن سخت‌کننده دوطرفه، میزان جذب انرژی نسبت به مدل بدون سخت‌کننده ۸۰ درصد و نسبت به مدل با سخت‌کننده یکطرفه ۴۰ درصد افزایش می‌یابد.

با ایجاد سخت‌کننده در مدل‌های دارای بازشو، تمرکز تنش از چشمه‌های اتصال به اطراف بازشو انتقال می‌یابد و نسبت به مدل‌های بدون سخت‌کننده، تنش در چشمه اتصال کاهش می‌یابد. تغییرات پارامترها در هر دو مدل ۳۰۰ و ۵۰۰ میلی‌متری نسبت به مدل بدون بازشو تقریباً یکسان می‌باشد.

در مبحث بازشوی دایره‌ای شکل، بطور کلی می‌توان گفت ورق S50 جذب انرژی و شکل‌پذیری بیشتری نسبت به مدل‌های S115 دارد، ولی ورق S115 همواره مقاومت برشی بیشتری نسبت به مدل‌های S50 داشته است.

۶-۳- نتایج مربوط به مدل‌های R300 (بازشوی به عرض ۳۰۰ و ارتفاع ۵۰۰ میلی‌متر) و R500 (بازشوی به عرض ۵۰۰ و ارتفاع ۳۰۰ میلی‌متر)

یک بازشوی مستطیل شکل به ابعاد ۳۰۰×۵۰۰ میلی‌متر، یکبار بصورت افقی و یکبار بصورت قائم در ورق موجودار با گام‌های ۵۰ و ۱۱۵ میلی‌متر با و بدون سخت‌کننده‌های یکطرفه و دوطرفه ایجاد و نتایج مربوطه مقایسه گردیده است. خلاصه نتایج برای مدل‌های فوق در جدول (۵) آورده شده است.

با ایجاد بازشو مستطیل شکل در هر دو حالت قائم و افقی مقاومت برشی و جذب انرژی سیستم کاهش می‌یابد ولی تنش در هر دو حالت افزایش می‌یابد.

جدول (۵). خلاصه نتایج مدل‌های R300 و R500

ردیف	نام مدل	حداکثر تنش مایسز (MPa)	حداکثر انرژی تجمعی (KN.m)	حداکثر نیروی برشی (KN)
۱۵	R300-S50	385.2	592.8	432.4
۱۶	R300-S1-S50	398.9	948.1	479.5
۱۷	R300-S2-S50	391.0	603.9	545.9
۱۸	R300-S115	389.1	521.5	478.0
۱۹	R300-S1-S115	414.0	645.2	530.3
۲۰	R300-S2-S115	365.4	723.3	556.4
۲۱	R500-S50	381.4	558.1	412.3
۲۲	R500-S1-S50	386.4	847.1	452.7
۲۳	R500-S2-S50	377.9	596.1	519.0
۲۴	R500-S115	374.6	554.8	482.5
۲۵	R500-S1-S115	375.2	644.2	528.2
۲۶	R500-S2-S115	418.5	672.6	552.2

با ایجاد سخت‌کننده در مدل‌ها مقاومت برشی، جذب انرژی و شکل‌پذیری نسبت به مدل بدون سخت‌کننده افزایش می‌یابد، ولی میزان افزایش جذب انرژی در مدل‌های با بازشوی قائم بیشتر از مدل با بازشوی افقی است.

با ایجاد سخت‌کننده یکطرفه در مدل‌ها هر سه پارامتر مقاومت برشی، جذب انرژی و شکل‌پذیری افزایش می‌یابد. ولی

با افزایش تعداد سخت کننده از یکطرفه به دوطرفه فقط مقاومت برشی سیستم افزایش می یابد. به بیان دیگر می توان گفت تأثیر سخت کننده یکطرفه در عملکرد جذب انرژی و شکل پذیری بسیار بیشتر از سخت کننده دوطرفه است. با افزایش سخت کننده از یکطرفه به دوطرفه مقاومت برشی بطور قابل توجهی افزایش یافته است. با ایجاد سخت کننده در مدل های دارای بازشو مستطیلی، برخلاف مدل های با بازشوی دایره ای، تمرکز تنش در چشمه های اتصال کاهش نمی یابد. حداکثر تنش نیز در اطراف بازشو و روی قطر ورق قرار دارد.

۷- نتیجه گیری

با توجه به تحلیل های صورت گرفته بر روی مدل ها، نتایج زیر بدست آمد:

۱. از لحاظ شکل بازشو، بازشوی دایره ای شکل نسبت به بازشوهای مستطیلی عملکرد بهتری از نظر مقاومت برشی، جذب انرژی و شکل پذیری دارد.
۲. با ایجاد بازشو همواره مقاومت برشی و جذب انرژی نسبت به مدل بدون بازشو کاهش می یابد ولی تنش لزوماً کاهش نمی یابد.
۳. در مدل های دایره ای شکل، با ایجاد سخت کننده در ورق، تنش در چشمه های اتصال کاهش می یابد، اما در مدل های با بازشوی مستطیل چنین نیست.
۴. در بازشوهای مستطیل شکل، عملکرد لرزه ای مدل با بازشوی قائم بهتر از مدل افقی است.
۵. همواره عملکرد مدل های با بازشوی کوچکتر نسبت به مدل های با بازشوی بزرگتر بهتر است.
۶. با افزایش ابعاد بازشو در مدل های بدون سخت کننده، مقاومت برشی و جذب انرژی نسبت به مدل با بازشوی کوچکتر کاهش می یابد، ولی تنش معمولاً افزایش می یابد.
۷. با بزرگ شدن ابعاد باز شو در مدل های دارای سخت کننده، مقاومت برشی سیستم کاهش می یابد ولی لزوماً جذب انرژی کاهش نمی یابد، و می توان گفت جذب انرژی تابعی از ابعاد و شکل بازشو است.
۸. از لحاظ نوع ورق های دوزنقه ای، ورق با گام ۱۱۵ میلی متر همواره مقاومت برشی بالایی نسبت به ورق با گام ۵۰ میلی متر دارد. اما جذب انرژی و شکل پذیری در مدل های با گام ۵۰ میلی متر همواره بیشتر از ورق با گام ۱۱۵ میلی متر است.
۹. با ایجاد سخت کننده در مدل های دارای بازشو، مقاومت برشی، جذب انرژی و شکل پذیری نسبت به مدل بدون سخت کننده افزایش می یابد، ولی میزان افزایش جذب انرژی در مدل های با بازشوی کوچکتر بیشتر از مدل با بازشوی بزرگتر است.
۱۰. با ایجاد سخت کننده یکطرفه در مدل ها، هر سه پارامتر مقاومت برشی، جذب انرژی و شکل پذیری افزایش می یابد. ولی با افزایش تعداد سخت کننده از یکطرفه به دوطرفه، فقط مقاومت برشی سیستم نسبت به مدل با سخت کننده یکطرفه افزایش می یابد.
۱۱. تأثیر سخت کننده یکطرفه در عملکرد جذب انرژی و شکل پذیری بسیار بیشتر از سخت کننده دوطرفه و تأثیر سخت کننده دوطرفه در مقاومت برشی بیشتر از سخت کننده یکطرفه است. به بیان دیگر می توان گفت سخت کننده یکطرفه، در افزایش جذب انرژی و شکل پذیری دیوار برشی فولادی عملکرد بهتری داشته و سخت کننده دوطرفه، در افزایش مقاومت برشی دیوار برشی فولادی بهتر عمل می کند.

۸- مراجع

Erfan Alavi, F. N. (2013). Experimental study on diagonally stiffened steel plate shear walls with central perforation. *Journal of Constructional Steel Research*, 89(1), 9-20.

- Fereshteh Emami, M. M., Abolhassan Vafai. (2013). Experimental study on cyclic behavior of trapezoidally corrugated steel shear walls. *Engineering Structures*, 48(4), 750-762.
- Qiang Cao, J. H. (2018). Experimental study and numerical simulation of corrugated steel plate shear walls subjected to cyclic loads. *Thin-Walled Structures*, 127(1), 306-317.
- Sudeok Shon, M. Y., Seungjae Lee. (2017). An Experimental Study on the Shear Hysteresis and Energy Dissipation of the Steel Frame with a Trapezoidal-Corrugated Steel Plate. *Materials*, 10(3), 261-282.
- Thorburn, L. J., Kulak, G.L. and Montgomery, C.J. (1983). Analysis and design of steel shear wall systems. *Structural Engineering Report, No. 107(1)*.
- آقابرانی، ح. ح. (۲۷ فروردین ۱۳۹۴). بررسی رفتار لرزه‌ای دیوار برشی فولادی موجدار در اثر تغییر جهت موج ورق جان با شکل موج سینوسی، مثلثی و دوزنقه‌ای. دومین کنفرانس ملی زلزله، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین .
- اشگی، س. غ. م. (۱۳۹۶). بررسی رفتار لرزه‌ای دیوار برشی فولادی موجدار دوزنقه‌ای. همایش ملی مهندسی عمران کاربردی و دستاوردهای نوین، دانشگاه تهران، تهران .
- پنجه‌باشی‌اقدام، ب. (بهمن ماه ۱۳۹۴). بررسی موقعیت و ابعاد بازشو بر عملکرد دینامیکی قاب با دیوار برشی فولادی با نقطه تسلیم پایین موجدار به روش اجزا محدود .
- راوری، ح. ا. م. خ. (۶ و ۷ اردیبهشت ۱۳۹۰). بررسی رفتار لرزه‌ای سیستم ترکیبی دیوار برشی فولادی با ورق موجدار و قاب خمشی. ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان .
- زنوزی، م. و. پ. ا. (۱۸ شهریور ماه ۱۳۹۵). بررسی تأثیر سخت‌کننده در رفتار دیوارهای برشی فولادی باز شودار. سومین کنفرانس بین‌المللی نوآوری‌های اخیر در مهندسی عمران-معماری و شهر سازی، دانشگاه تهران، تهران .
- شیرین، اسماعیلی، ک. ع. ا. ق. (۱۳۹۶). مطالعه آزمایشگاهی رفتار دیوارهای برشی فولادی سرد نورد شده با پوشش فولادی تحت بارگذاری جانبی چرخه‌ای. نشریه علمی و پژوهشی سازه و فولاد، ۱۴(۲۱)، ۸۹-۸۱ .
- صبوری، س. (۱۳۸۰). سیستم‌های مقاوم در برابر بارهای جانبی: مقدمه‌ای بر دیوارهای برشی فولادی، نشر انگیزه، تهران.
- کلالی، م. ح. ص. ف. ج. ع. ح. (۱۳۹۷). بررسی رفتار دیوار برشی فولادی با ورق موجدار. چهارمین کنفرانس ملی سازه و فولاد، دانشگاه شریف، تهران .
- کیخسروی، ه. (بهمن ماه ۱۳۹۴). بررسی رفتار کمانشی ستون‌های دوجداره فولادی پر شده با بتن .
- مصطفی، ق. ن. (تابستان ۱۳۹۵). ارزیابی رفتار لرزه‌ای دیوار برشی فولادی موجدار .
- مظاهری‌مقدم، ع. ب. ه. و. ا. (۱۳۹۵). بررسی تأثیر بازشوها در رفتار دیوارهای برشی فولادی. فصلنامه علمی تخصصی مهندسی سازه، ۱۴(۳)، ۶۷-۸۵ .
- موقوفه، ش. (مهرماه ۱۳۹۴). اثر بازشو بر رفتار دیوارهای برشی فولادی موجدار .
- ناطق‌الهی، م. خ. پ. ف. (۱۳۹۴). مطالعه آزمایشگاهی سیستم دیوار برشی فولادی با ورق‌های پرکننده کامپوزیتی تحت بارگذاری چرخه‌ای. نشریه مهندسی عمران فردوسی، ۲۷(۱)، ۴۴-۳۵ .
- نصری، ا. (بهمن ماه ۱۳۹۲). بررسی تأثیر سخت‌کننده‌ها بر رفتار چرخه‌ای دیوار برشی فولادی دارای بازشو .