مطالعه تحلیلی اثر تقویت در رفتار دیوار برشی فولادی بازشودار

سمیه حرآبادی فراهانی، دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشگاه آزاد واحد تهران- جنوب
فریبرز ناطقی الهی، استاد، پژوهشکده مهندسی سازه، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله
مصطفی برقی، استادیار، دانشکده عمران، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی

چکیده

در دهه‌های اخیر، سیستم دیوار برشی فولادی به عنوان یکی از سیستم‌های مقاوم در برابر بارهای جانبی مورد توجه محققین قرار گرفته است. نیازهای معماری و ملاحظات غیرسازه‌ای نظیر عبور سیستم‌های تأسیساتی از جمله عوامل ایجاد بازشو در دیوارهای برشی فولادی می‌باشند. در این تحقیق، به منظور بهبود رفتار دیوارهای برشی فولادی بازشودار به بررسی تقویت این سیستم پرداخته شده است. به این منظور دیوار برشی فولادی بازشودار در دو حالت تقویت با سخت‌کنندهٔ عمودی- افقی و تقویت با سخت‌کنندهٔ قطری مورد مطالعه و تحلیل غیرخطی با برنامه *Ansys* قرار گرفته‌است. مدل اجزاء محدود مشابه نمونهٔ آزمایش شده توسط دکتر ناطقی ایجاد شده است. مطالعه اجزاء محدود مدل ایجاد شده، انجام و رفتار متناظر با منحنی پوش‌آور چرخهٔ هیسترزیس با عملکرد بار- تغییرمکان به دست آمده از اجزاء محدود مقایسه شده است. نتایج تحلیل عددی اجزاء محدود نشان می‌دهد، تقویت دیوار برشی فولادی بازشودار باعث افزایش مقاومت به میزان ۵ تا ۱۵ درصد و افزایش سختی به میزان ۸ تا ۱۶ درصد و کاهش کمانش خارج از صفحه سیستم شده که این میزان به نوع تقویت، نوع و ابعاد بازشو بستگی داشته که در این میان، سخت‌کنندهٔ قطری اثر بیشتری در افزایش ظرفیت برشی و سختی سیستم داشته و در کنترل تغییرمکانهای خارج از صفحه و توزیع تنش در ورق پرکننده دیوار مناسبتر عمل کرده است.

کلیدواژه‌ها: دیوار برشی فولادی بازشودار، سخت‌کنندهٔ قطری، سخت‌کنندهٔ افقی- عمودی، ظرفیت برشی

۱- مقدمه

استفاده از دیوارهای برشی فولادی به دلیل سختی و مقاومت بالا، قابلیت جذب انرژی زیاد، اقتصادی بودن و سادگی اجرای آن به سرعت در جهان رو به گسترش است و در چند دهه اخیر در ساخت ساختمانهای جدید و همچنین تقویت ساختمانهای موجود در کشورهای زلزله‌خیزی همچون ژاپن و آمریکا به کار گرفته شده است.

در حالت کلی دیوارهای برشی فولادی از دو ستون در دو طرف ورق فولادی و تیر طبقات در بالا و پایین ورق تشکیل شده است. ورق فولادی و ستونها در ترکیب با همدیگر یک تیرورق عمودی را تشکیل می‌دهند که در آن ستونها بالهای تیرورق، ورق فولادی جان و تیر طبقات سخت‌کننده‌های آن می‌باشند. هدف اصلی در طراحی لرزه‌ای این سیستم بر این مبناست که رفتار سازه، در مقابل نیروهای ناشی از زلزله‌های کوچک بدون خسارت و در محدوده خطی باقی مانده و در مقابل نیروهای ناشی از زلزله‌های شدید، ضمن حفظ پایداری کلی خود، خسارتهای سازه‌ای و غیرسازه‌ای را تحمل کند. به همین دلیل مقاومت لرزه‌ای مورد نظر آیین‌نامه‌ها در زلزله شدید کمتر از مقاومت جانبی مورد نیاز جهت حفظ پایداری سازه در محدوده الاستیک است. بنابراین، برای طراحی سیستم لازم است تحلیل غیرالاستیک صورت گیرد.

در طراحی سازه‌ها به غیر از سازه‌های بلند و مهم، تأمین فضاهای مناسب داخلی و ملاحظات معماری از مهمترین اهداف طراحی است که پس از آن، مهندس طراح مقید به ایجاد سازه مناسب در چارچوب فضاهای تعیین شده خواهد بود. اعمال چنین نیازهای معماری و زیباسازی را می‌توان یکی از عوامل ایجاد بازشو در دیوارهای برشی فولادی به حساب آورد. همچنین ملاحظات غیرسازه‌ای از قبیل موقعیت و مسیر سیستم‌های تأسیساتی می‌توانند از دیگر عوامل مؤثر در ایجاد بازشو در دیوارهای برشی فولادی

باشند. با توجه به اینکه در زمان مقاوم‌سازی سازه‌ها، موقعیت این تأسیسات پیش از اجرای دیوار برشی فولادی از قبل مشخص می‌باشند، لذا این گزینه هنگام مقاوم‌سازی سازه‌ها از اهمیت بیشتری برخوردار می‌گردد. برخی مواقع از دیدگاه سازه‌ای نیز لازم می‌گردد که در دیوارهای برشی فولادی، بازشو ایجاد شود. نیاز طراح به ورق نازکتر در طراحی دیوار برشی فولادی و یا کاربرد فولاد با مقاومت تسلیم کم که ممکن است در بازار قابل دسترس و موجود نباشند، می‌توانند از جمله موارد سازه‌ای موثر در ایجاد بازشو قلمداد شوند.

در مورد تأثیرات بازشو در رفتار دیوار برشی فولادی مطالعاتی توسط چندین محقق انجام گرفته است. روبرتز و صبوری‌قمی مطالعاتی در مورد نمونه‌های بدون سخت‌کننده و با بازشو دایره‌ای در مرکز ورق دیوار انجام دادند، آنها ضریب کاهش ($1-D/d$) را برای تخمین مقاومت و سختی پانل بازشودار پیشنهاد کردند که در آن D قطر بازشو و d ارتفاع پانل می‌باشد. سپس صبوری‌قمی در تحقیقات بعدی ضریب اصلاح شده ($1- A/A_0$) را جایگزین ضریب ($1-D/d$) نمود که در آن A_0 مساحت ورق و A مساحت بازشو می‌باشد [۱]. همچنین وین و برونیو در مرکز تحقیقات زلزله دانشگاه بوفالو، سه نمونهٔ دیوار برشی فولادی با مقاومت تسلیم پایین را طراحی و در دانشگاه تایوان تحت بارگذاری چرخه‌ای مورد آزمایش قرار دادند. یکی از این نمونه‌ها شامل پانلی با بیست عدد سوراخ دایره‌ای به قطر ۲۰۰ میلیمتر بود [۲]. در حالت با سخت‌کننده، مطالعاتی در کشور ژاپن توسط تاکاناشی و همکارش در مورد اثر بازشو در دیوار برشی با سخت‌کنندهٔ افقی و عمودی انجام گرفته است [۳]. در ایران، صبوری‌قمی و قلهکی در ادامه تحقیقات آزمایشگاهی، مطالعاتی در مورد دیوار برشی فولادی با سخت‌کننده و بازشو دایره‌ای انجام دادند [۴]. در دانشگاه امیرکبیر نیز تأثیر بازشو مستطیلی بزرگ و برخی پارامترهای هندسی بر رفتار غیرخطی دیوار برشی فولادی مورد مطالعه قرار گرفت [۵]. در بررسی تأثیر نسبتهای لاغری مختلف بر رفتار دیوار برشی فولادی بازشودار نیز مطالعاتی در دانشگاه صنعتی تبریز انجام شد [۶] و مشاهده گردید، با افزایش نسبت لاغری از مقدار سختی و مقاومت دیوار کاسته شده است. همچنین با افزایش نسبت لاغری؛ میزان کاهش سختی و مقاومت دیوار در اثر ایجاد بازشو کمتر گردید. با افزایش نسبت لاغری، مقدار شکل‌پذیری دیوار افزایش یافته که این روند افزایش شکل‌پذیری دیوار؛ رفته رفته با افزایش نسبت لاغری کاهش پیدا کرد. نحوهٔ این روند افزایش؛ می‌تواند به این علت باشد که کاهش صخامت ورق و به تبع آن افزایش نسبت لاغری، باعث می‌شود که از ظرفیت ورق به طور کامل استفاده گردد و در نتیجه با افزایش لاغری، روند افزایش شکل‌پذیری دیوار کاهش یابد. در این تحقیق، ضمن بررسی اثر شکل و ابعاد بازشو بر رفتار دیوار برشی فولادی، به منظور بهبود رفتار دیوارهای برشی فولادی بازشودار به بررسی تقویت این سیستم پرداخته شده است. به این منظور، دیوار برشی فولادی بازشودار در دو حالت تقویت با سخت-کنندهٔ عمودی- افقی و تقویت با سخت‌کنندهٔ قطری مورد مطالعه قرار گرفته است.

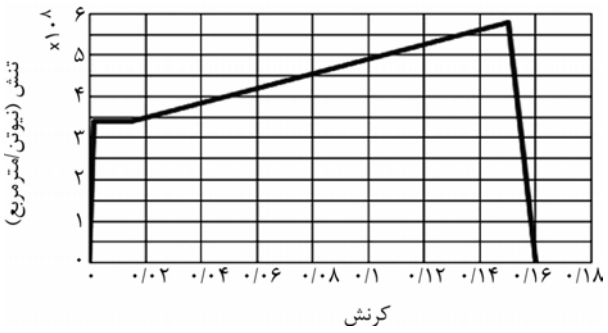
۲- مدلسازی اجزاء محدود و صحت سنجی آن

در این تحقیق از نرم‌افزار اجزاء محدود *ANSYS* جهت مدلسازی و تحلیل نمونه‌ها استفاده شده است تا علاوه بر بررسی مجدد صحت مدلسازی، بتوان با استفاده از آن به مطالعهٔ پارامترهای مؤثر بر رفتار دیوار برشی فولادی بازشودار پرداخت. در مدلسازی هندسی، ورق فولادی با المان *Shell 181* که یک المان چهار گرهی است که هر گره آن شش درجه آزادی (سه درجه آزادی تغییرمکانی و سه درجه آزادی دورانی) دارد، شده است. به منظور در نظرگرفتن کمانشهای موضعی بالهای تیر و ستون، آنها نیز با المان *Shell* 181 مدل شده‌اند. سیستم مورد بررسی شامل یک قاب تک دهانه یک طبقه در مقیاس ۱:۲، مطابق با مدل بررسی شده در پژوهشگاه زلزله‌شناسی توسط دکتر ناطقی و علوی می‌باشد. از آنجا که در این تحقیق هدف بررسی رفتار دیوار برشی فولادی می‌باشد و رفتار تیرها و ستونهای محیطی مورد نظر نمی‌باشد، در مدلسازی از پروفیل بال پهن نمره ۱۶ به عنوان المانهای تیر و ستون در کلیه نمونه‌ها استفاده شده است. در نمونه‌ها، از ورق فولادی با ضخامتهای ۰/۸، ۱ و ۱/۵ میلیمتر و به ابعاد ۱۲۰×۱۸۰ به عنوان ورق پرکننده دیوار استفاده شده است و از ورق به

ضخامت ۱۰ میلیمتر جهت سخت‌کننده‌های بال ستون و از ورق به ضخامت ۵ میلیمتر جهت سخت‌کننده‌های اطراف بازشو و سخت‌کننده‌های ورق پرکنندهٔ دیوار استفاده شده است.

با توجه به نمودارهای تنش- کرنش مصالح فولاد به کار رفته در نمونه‌ها مشاهده می‌شود، که از فولاد با تنش تسلیم پایین‌تر جهت ورق پرکننده و از فولاد با تنش تسلیم بالاتر جهت المانهای مرزی به منظور اینکه صفحهٔ پرکننده دیوار قبل از قاب تغییرشکل پلاستیک را تجربه کند، استفاده شده است. با توجه به مصالح فولاد، معیار تسلیم فون میسز انتخاب شده است و خواص مواد در فشار و کشش یکسان است و قانون سخت‌شوندگی نیز سینماتیک (*Kinematic*) انتخاب شده است و رفتار غیرخطی مصالح و غیرخطی هندسی نیز لحاظ شده است.

نمودار (۱): *نمودار تنش- کرنش مصالح فولاد ورق پرکننده و سخت-کنندهٔ دیوار برشی.*



نمودار (۲): *نمودار تنش- کرنش مصالح فولاد المانهای مرزی دیوار برشی.*

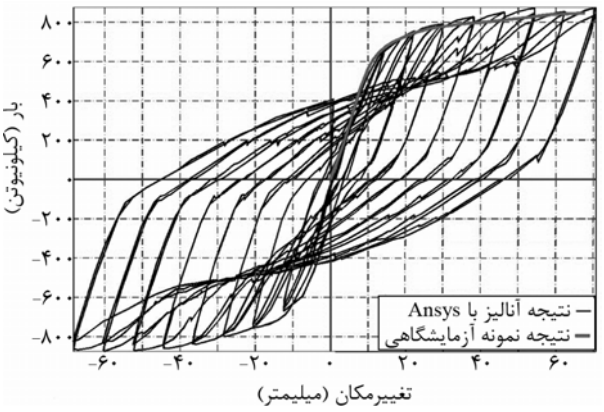
نمونه‌های مدل شده تحت اثر دو نوع بارگذاری قرار گرفته‌اند:

الف) بار قائم ۸ تن بر روی هر ستون جهت منظور نمودن اثر بارهای ثقلی؛

ب) بارگذاری جانبی نمونه‌ها به صورت تابعی از زمان می‌باشد که به صورت رمپینگ با گذشت زمان افزایش می‌یابد. در برنامه به منظور بارگذاری نمونه‌ها لازم است، ابتدا حداکثر بار وارده به نمونه‌ها وارد شود که مقدار آن بر اساس ضخامت ورق پرکننده دیوار و ابعاد بازشو می‌باشد. نمونه‌های دارای ورق‌پرکننده به ضخامت ۰/۸، ۱ و ۱/۵ میلیمتر به ترتیب ۷۰۰، ۸۰۰ و ۹۰۰ کیلونیوتن می‌باشد.

در کارهای آزمایشگاهی، پایان آزمایش معمولاً با گسیختگی‌هایی نظیر پارگی ورق، شکست اتصال و ... مشخص می‌شود. اما برای توقف تحلیل به روش اجزای محدود تعریف معیار خرابی ضروری است. در برنامه *ANSYS* نقطه گسیختگی تعریف نشده است. در نتیجه، برای مقایسه نیروهای برشی نمونه‌های دارای بازشو با ابعاد و ترکیبات مختلف سخت‌کننده‌ها، معیاری مطابق با نتایج تحقیقات و آزمایشات انجام شده در زمینه دیوار برشی فولادی، که مقدار مجاز تغییرمکان جانبی نسبی را برابر ۴/۵ تا ۵ درصد ارتفاع دیوار در نظر می‌گیرد. در مدل‌های تحت بررسی ارتفاع دیوارها برابر ۱۵۰ سانتیمتر می‌باشد و تغییرمکان مجاز برابر ۷/۵ سانتیمتر در نظر گرفته شده است. در نتیجه، نمونه‌ها در جابه‌جایی ۷/۵ سانتیمتر مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند.

به منظور اطمینان از صحت روش مدلسازی و تحلیل اجزای محدود، نتایج یک نمونه از کارهای آزمایشگاهی با نتایج نمونهٔ مدل شده در نرم‌افزار اجزای محدود مقایسه شده است، که نمونهٔ آزمایشگاهی، نمونهٔ تک طبقه، تک دهانه‌ای است که فاقد بازشو بوده و ضخامت ورق پرکننده آن ۱/۵ میلیمتر بوده و در پژوهشگاه زلزله‌شناسی توسط دکتر ناطقی- علوی مورد آزمایش قرار گرفته است. نمونهٔ تحلیلی با برنامه *Ansys* مشخصات نمونه آزمایشگاهی را داشته است. با مقایسه منحنی هیسترزیس آزمایشگاهی و پوش منحنی هیسترزیس به دست آمده از تحلیل مطابق با نمودار (۳)، مشاهده می‌شود که نتایج تحلیل همگرایی خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد. بنابراین با توجه به نتایج به دست آمده، مدلسازی دیوار برشی فولادی به روش اجزای محدود را می‌توان به عنوان یک روش مناسب و قابل اعتماد پذیرفت.



نمودار (۳): *مقایسهٔ نتایج تحلیل اجزاء محدود و نمونه آزمایشگاهی.*

۳- مدل‌های تحلیلی و نتایج

در این تحقیق به منظور بررسی اثر سخت‌کننده بر رفتار و عملکرد دیوار برشی فولادی سه حالت به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

۱- دیوار بازشودار بدون سخت‌کننده؛

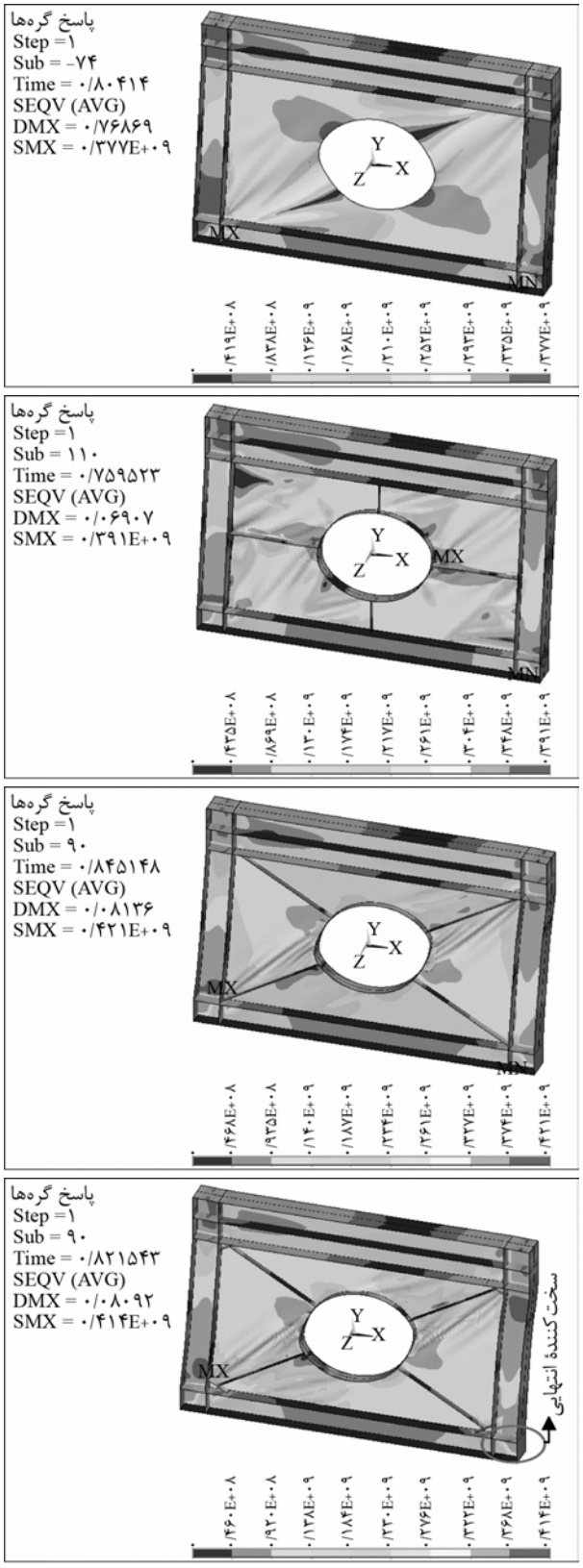
۲- دیوار بازشودار با سخت‌کنندهٔ لبه بازشو و سخت‌کنندهٔ عمودی- افقی؛

۳- دیوار بازشودار با سخت‌کنندهٔ لبه بازشو و سخت‌کنندهٔ قطری؛

کلیه حالتهای فوق در سه ضخامت ۰/۸، ۱ و ۱/۵ میلیمتر مدل شده است. بازشوهای در نظر گرفته شده در نمونه‌ها شامل بازشو دایره‌ای به قطر ۴۰ و ۷۰ سانتیمتر و بازشو مستطیلی به ابعاد ۴۵x۳۰، ۶۰x۴۰ و ۹۰x۶۰ می‌باشد.

۳-۱- توزیع تنش و یکنواختی در تسلیم

شکل (۱) توزیع تنش در سیستم در مرحله آغاز گسیختگی برای دیوار برشی فولادی بازشودار با بازشو دایره‌ای به قطر ۷۰ سانتیمتر و ضخامت ورق به مقدار ۱ میلیمتر در حالتهای مختلف بدون تقویت و تقویت با سخت‌کنندهٔ افقی- عمودی و قطری را نشان می‌دهد. کلیهٔ نمونه‌ها تحت بارگذاری جانبی اولیه ۸۰۰ کیلونیوتن قرار گرفته و ظرفیت برشی آنها در نمونهٔ بدون سخت‌کنندهٔ ۵۸۰ کیلونیوتن، در نمونهٔ با سخت‌کنندهٔ افقی- عمودی، قطری و قطری با سخت‌کنندهٔ انتهایی به ترتیب ۶۲۰، ۶۳۵ و ۶۶۰ کیلونیوتن می‌باشد. با دقت در شکلها و بررسی تنش فون- میسز در نمونه‌ها مشاهده می‌شود استفاده از سخت‌کننده باعث توزیع مناسبتر تنش در کل سیستم شده و از تمرکز تنش در اطراف بازشو و از افزایش تنش در المانهای مرزی عمودی جلوگیری کرده است. افزایش تنش در ورق پرکننده



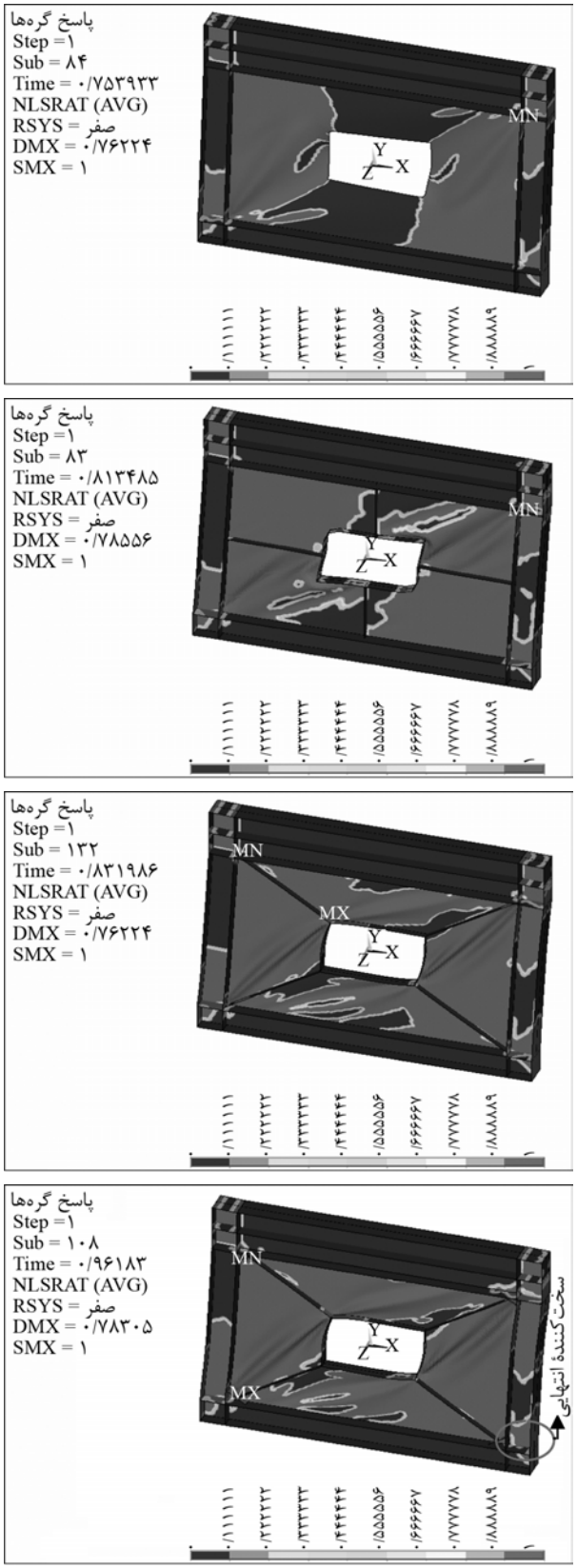
شکل (۱): *نمونه‌های دارای بازشو دایره‌ای به قطر ۷۰ سانتیمتر و ضخامت ۱ میلیمتر.*

نمونه‌های دارای سخت‌کنندهٔ قطری نسبت به نمونه‌های دارای سخت‌کنندهٔ عمودی- افقی نشان‌دهنده افزایش ظرفیت پس کمانشی و توسعه بهتر عملکرد میدان کششی در ورق پرکننده آنها می‌باشد.

شکل (۲) یکنواختی در تسلیم دیوار برشی فولادی بازشودار با بازشو مستطیلی به ابعاد ۴۰×۶۰ سانتیمتر و ضخامت ورق به مقدار ۱/۵ میلیمتر در حالتهای مختلف تقویت و بدون تقویت را نشان می‌دهد. کلیهٔ نمونه‌ها تحت بارگذاری جانبی اولیه ۹۰۰ کیلونیوتن قرار گرفته و ظرفیت برشی آنها در نمونهٔ بدون سخت‌کننده ۶۲۰ کیلونیوتن، در نمونه با سخت‌کنندهٔ افقی- عمودی، قطری و قطری با سخت‌کنندهٔ انتهایی به ترتیب ۶۹۸، ۷۰۷ و ۷۱۹ کیلونیوتن می‌باشد. در اشکال زیر اعداد زیر شکلها بیان‌کننده نسبت تنش ورق به تنش تسلیم فولاد به کار رفته در ورق می‌باشد و نسبت یک بیان‌کننده تسلیم ورق می‌باشد و از آنجا که در این سیستم هدف تسلیم ورق قبل از المانهای مرزی اطراف آن می‌باشد، با مشاهده اشکال مشخص می‌شود با افزودن سخت‌کننده به نمونه‌ها، یکنواختی تسلیم در ورق پرکننده دیوار بهبود یافته و ظرفیت بیشتری از ورق برای مقابله با نیروی جانبی مشارکت کرده است و در نتیجه عملکرد سیستم دیوار برشی فولادی بازشودار مطلوبتر شده است.

۳-۲- تغییرشکل خارج از صفحه

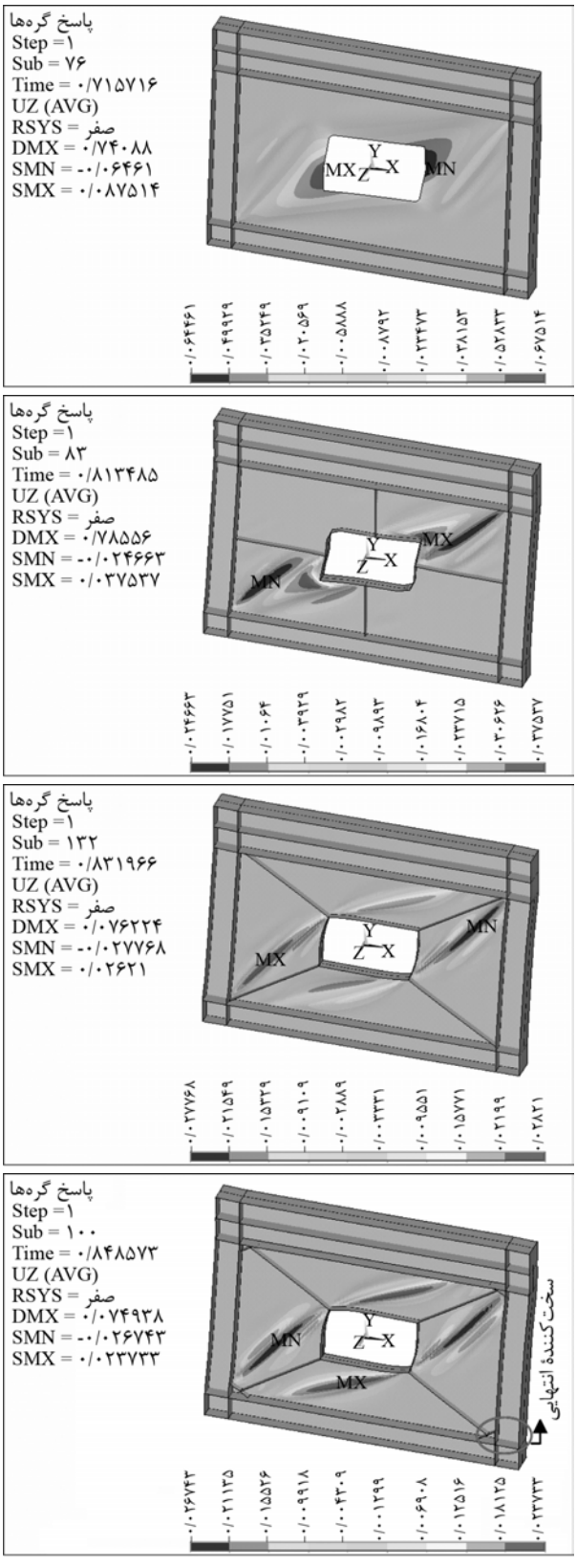
در شکل (۳)، تغییرشکلهای برون صفحه‌ای تحت بار جانبی ۸۰۰ کیلونیوتن در نمونه با بازشو مستطیلی به به ابعاد ۴۰×۶۰ سانتیمتر و ضخامت ورق به مقدار ۱ میلیمتر برای حالتهای بدون سخت‌کننده، با سخت‌کنندهٔ عمودی- افقی و با سخت‌کنندهٔ قطری آورده شده است. ظرفیت برشی در نمونهٔ بدون سخت‌کننده ۵۵۱ کیلونیوتن، در نمونه با سخت‌کنندهٔ افقی- عمودی، قطری و قطری با سخت‌کنندهٔ انتهایی به ترتیب ۶۱۳، ۶۲۴ و۶۴۰ کیلونیوتن می‌باشد. با مشاهدهٔ اشکال مشخص می‌شود تغییرشکلهای خارج از صفحه برای نمونهٔ بدون سخت‌کننده برابر ۶۷/۵۱ میلیمتر، برای نمونهٔ با سخت‌کنندهٔ افقی-عمودی برابر ۳۷/۵۳ میلیمتر و برای نمونه‌های با سخت‌کنندهٔ قطری و قطری با سخت-کنندهٔ انتهایی به ترتیب ۲۸/۲۱ و ۲۳/۷۳ می‌باشد. در نتیجه



شکل (۲): *نمونه‌های دارای بازشو مستطیلی به ابعاد۴۰×۶۰ سانتیمتر و ضخامت ۱/۵ میلیمتر.*

می‌توان بیان کرد با افزودن سخت‌کننده‌ها به دیوار برشی فولادی با بازشو مستطیلی تغییرشکل خارج از صفحه به مقدار

بیش از نصف کاهش یافته است و افزودن سخت‌کنندهٔ قطری نسبت به سخت‌کنندهٔ عمودی- افقی در حدود ۳۵ درصد اثـر کمـانش را در دیـــوار بهبـود بخشیـده است. بنـابرایـن

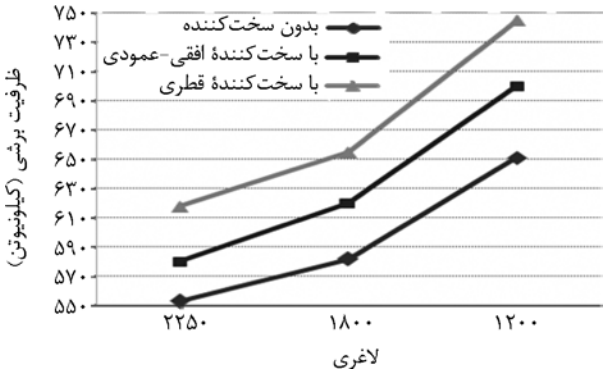


شکل (۳): *نمونه‌های دارای بازشو مستطیلی به ابعاد ۴۰×۶۰ سانتیمتر و ضخامت ۱ میلیمتر.*

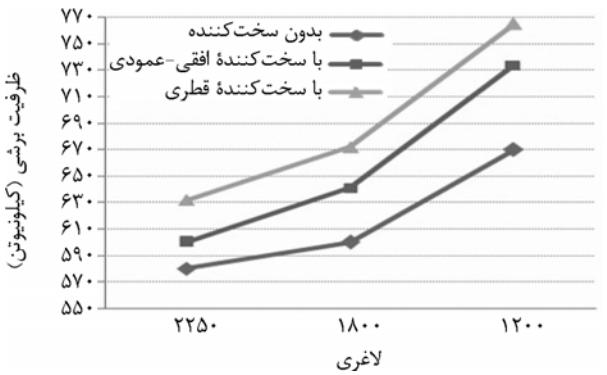
سخت‌کنندهٔ قطری نسبت به سخت‌کنندهٔ عمودی- افقی اثر بهتری در کاهش تغییرشکل خارج از صفحه داشته است.

۳-۳- مقاومت و سختی

نمودار تغییرات مقاومت سیستم در مقابل تغییرات پارامتر لاغری دیوار (b/t) در نمودارهای (۴) و (۵) آورده شده است. نسبت b/t برای ورق پرکننده به ضخامت ۰/۸، ۱ و ۱/۵ میلیمتر به ترتیب برابر ۲۲۵۰، ۱۸۰۰ و ۱۲۰۰ می‌باشد. با توجه به نمودارهای فوق می‌توان بیان کرد درصد رشد مقاومت نمونه‌های دارای سخت‌کنندهٔ قطری نسبت به نمونه‌های بدون سخت‌کننده در حالت با بازشو دایره‌ای به قطر ۷۰ سانتیمتر به میزان ۱۱/۴٪ و در حالت با بازشو مستطیلی به ابعاد ۳۰×۴۵ سانتیمتر به میزان ۱۰/۵٪ می‌باشد، همچنین درصد رشد مقاومت نمونه‌های دارای سخت‌کنندهٔ قطری نسبت به نمونه‌های دارای سخت‌کنندهٔ عمـودی- افقـی در حـالت با بـازشو دایره‌ای به قطـر ۷۰ سانتیمتر به میزان ۵/۸٪ و در حالت با بازشو مستطیلی به ابعـاد ۳۰×۴۵ سـانتیمتـر بـه میـزان ۴/۶٪ مـی‌بـاشـد.



نمودار (۴): *نمودار تغییرات مقاومت در مقابل تغییرات لاغری برای نمونهٔ دارای بازشو دایره‌ای به قطر ۷۰ سانتیمتر [۷].*



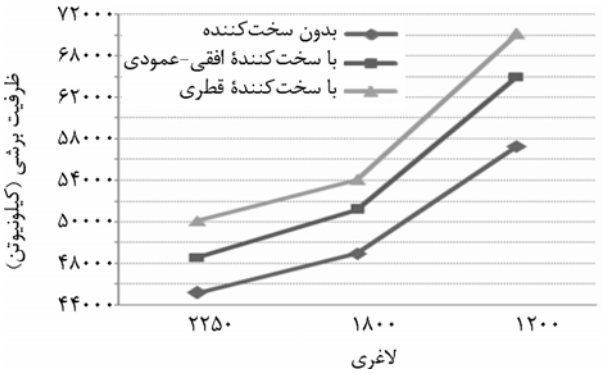
نمودار (۵): *نمودار تغییرات مقاومت در مقابل تغییرات لاغری برای نمونهٔ دارای بازشو مستطیلی به ابعاد ۳۰×۴۵ سانتیمتر [۷].*

در حالت مقایسه‌ای دیگر مشاهده می‌شود درصد رشد مقاومت نمونه‌های دارای سخت‌کنندهٔ قطری و سخت‌کننده انتهایی نسبت به نمونه‌های دارای سخت‌کنندهٔ قطری در حالت با بازشو دایره‌ای به قطر ۷۰ سانتیمتر به میزان ۳/۴٪ و در حالت با بازشو مستطیلی به ابعاد ۳۰×۴۵ سانتیمتر به میزان ۱/۷٪ می‌باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت، با به کار بردن سخت‌کننده مقاومت سیستم افزایش یافته که در این میان سخت‌کننده‌های قطری اثر مطلوبتری در افزایش مقاومت سیستم، نسبت به سخت‌کننده‌های عمودی- افقی نشان می‌دهند و نیز به کار بردن سخت‌کنندهٔ انتهایی در نمونه‌ها باعث افزایش مقاومت دیوار برشی فولادی بازشودار می‌گردد.

نمودار تغییرات سختی سیستم در مقابل تغییرات پارامتر لاغری دیوار (b/t) در نمودارهای (۶) و (۷) آورده شده است.

با توجه به نمودارهای فوق می‌توان بیان کرد درصد رشد سختی نمونه‌های دارای سخت‌کنندهٔ قطری نسبت به نمونه‌های بدون سخت‌کننده در حالت با بازشو دایره‌ای به

نمودار (۶): *نمودار تغییرات سختی در مقابل تغییرات لاغری برای نمونهٔ دارای بازشو دایره‌ای به قطر ۴۰ سانتیمتر [۷].*

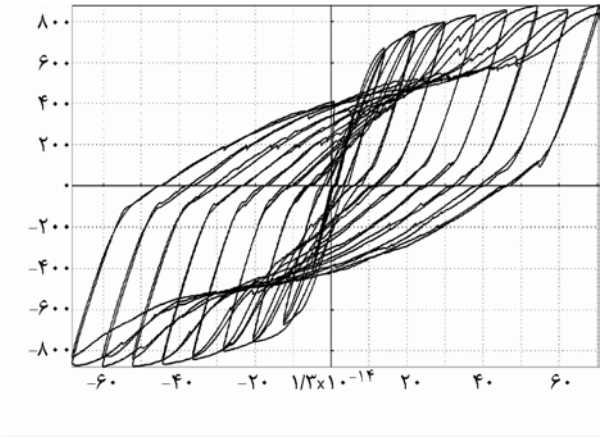


نمودار (۷): *نمودار تغییرات سختی در مقابل تغییرات لاغری برای نمونهٔ دارای بازشو مستطیلی به ابعاد ۴۰×۶۰ سانتیمتر [۷].*

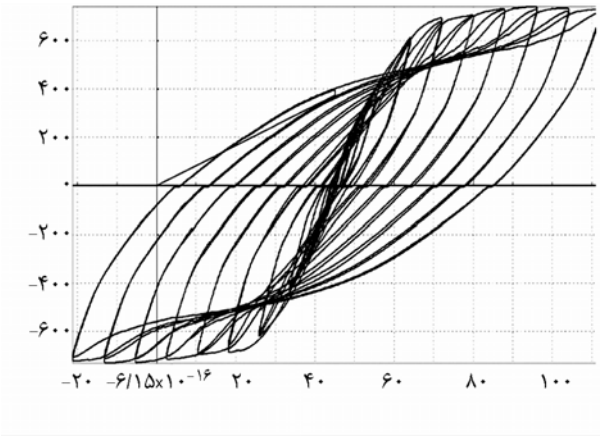
قطر ۴۰ سانتیمتر به میزان ۸/۸٪ و در حالت با بازشو مستطیلی به ابعاد ۴۰×۶۰ سانتیمتر به میزان ۱۳/۸٪ می‌باشد، همچنین درصد رشد سختی نمونه‌های دارای سخت‌کنندهٔ قطری نسبت به نمونه‌های دارای سخت‌کنندهٔ عمودی- افقی در حالت با بازشو دایره‌ای به قطر ۴۰ سانتیمتر به میزان ۲/۷٪ و در حالت با بازشو مستطیلی به ابعاد ۴۰ ×۶۰ سانتیمتر به میزان ۶ درصد می‌باشد. در حالت مقایسه‌ای دیگر مشاهده می‌شود درصد رشد سختی نمونه‌های دارای سخت‌کنندهٔ قطری و سخت‌کنندهٔ انتهایی نسبت به نمونه‌های دارای سخت‌کنندهٔ قطری در حالت با بازشو دایره‌ای به قطر ۴۰ سانتیمتر به میزان ۱/۳٪ و در حالت با بازشو مستطیلی به ابعاد ۴۰×۶۰ سانتیمتر به میزان ۴/۳٪ می‌باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت با به کار بردن سخت‌کننده، سختی سیستم افزایش یافته که در این میان سخت‌کننده‌های قطری اثر مطلوبتری در افزایش سختی سیستم، نسبت به سخت‌کننده‌های عمودی- افقی نشان می‌دهند و با افزایش ابعاد بازشو درصد مشارکت سخت‌کننده در بالابردن سختی سیستم افزایش می‌یابد و همچنین به کار بردن سخت‌کنندهٔ انتهایی در نمونه‌ها باعث افزایش سختی دیوار برشی فولادی بازشودار می‌گردد.

۳-۴- اثر تقویت در جذب انرژی دیوار برشی فولادی بازشودار

از آنجا که منحنی هیسترزیس یک سازه، بیانگر میزان جذب انرژی آن در اثر تغییرشکلهای پلاستیک می‌باشد و همچنین در صورتی که حلقه‌های هیسترزیس، به صورت پایدار بوده و دارای مساحت قابل‌قبولی باشند، سازه استعداد خوبی برای مقابله با بارهای جانبی خواهد داشت. نمودارهای (۸) و (۹)، به ترتیب نمودار هیسترزیس دیوار برشی فولادی به ضخامت ۱/۵ میلیمتر و بدون بازشو و نمودار هیسترزیس دیوار برشی فولادی بازشودار با بازشو دایره‌ای به قطر ۴۰ سانتیمتر، به ضخامت ۰/۸ میلیمتر و به همراه سخت‌کنندهٔ قطری می‌باشند، که در پژوهشگاه زلزله‌شناسی توسط دکتر ناطقی- علوی آزمایش شده‌اند. با مقایسهٔ نمودارهای فوق، این نکته قابل درک است که هر دو نمونهٔ بازشودار و بدون بازشو قادر به استهلاک انرژی با دارا بودن حلقه‌های



نمودار (۸): *نمودار هیسترزیس دیوار برشی فولادی به ضخامت ۱/۵ میلیمتر و بدون بازشو (مدل ناطقی- علوی، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله).*



نمودار (۹): *نمودار هیسترزیس دیوار برشی فولادی بازشودار با بازشو دایره‌ای به قطر ۴۰ سانتیمتر، به ضخامت ۰/۸ میلیمتر و به همراه سخت‌کنندهٔ قطری (مدل ناطقی- علوی، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله).*

هیسترزیس پایدار می‌باشند، که این امر نشان‌دهندهٔ قابل‌پذیر بودن دیوار برشی فولادی بازشودار از نظر جذب انرژی می‌باشد.

همان طور که ملاحظه می‌شود، نمودار (۸) به صورت S شکل می‌باشد و نمودار (۹) به صورت دوکی‌شکل بوده و این نشان‌دهندهٔ اثر سخت‌کننده در رفتار دیوار برشی فولادی بازشودار بوده که باعث افزایش سطح زیر منحنی هیسترزیس و افزایش جذب انرژی شده و رفتار سیستم را بهبود بخشیده است.

۴- نتیجه‌گیری

۱- نتایج تحلیل در نمونه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد تقویت دیوار برشی فولادی بازشودار باعث افزایش مقاومت و سختی سیستم نسبت به حالت تقویت نشده آن می‌شود، که در این میان سخت‌کننده‌های قطری اثر مطلوبتری در افزایش ظرفیت برشی و سختی سیستم نسبت به سخت‌کننده‌های عمودی- افقی نشان می‌دهند و همچنین با افزایش ابعاد بازشو، درصد مشارکت سخت‌کننده در بالابردن سختی و مقاومت سیستم افزایش می‌یابد.

۲- بررسی جابه‌جایی خارج از صفحهٔ ورق فولادی دلالت دارد که سخت‌کننده‌ها در کاهش میزان کمانش خارج از صفحه و افزایش ظرفیت کمانش الاستیک ورق مؤثر بوده‌اند و سخت‌کننده‌های قطری نقش بیشتری را در این زمینه نسبت به سخت‌کننده‌های عمودی- افقی داشته‌اند.

۳- بررسی تنشهای فون- میسز به دست آمده نشان می‌دهد که ورق پرکننده فولادی بعد از کمانش به دلیل عملکرد میدان کششی و توسعه آن به حد تسلیم رسیده است و با افزودن سخت‌کننده به نمونه‌ها، یکنواختی تسلیم در ورق پرکننده دیوار بهبود یافته و ظرفیت بیشتری از ورق برای مقابله با نیروی جانبی مشارکت کرده است. همچنین؛ سخت‌کننده‌های قطری، نسبت به سخت‌کننده‌های عمودی- افقی نقش بیشتری را در توزیع مناسبتر تنش در کل سیستم داشته‌اند.

۴- با توجه به نمودار هیسترزیس نمونه بدون بازشو و نمونه بازشودار تقویت شده با سخت‌کنندهٔ قطری می‌توان بیان کرد با افزودن سخت‌کنندهٔ قطری مناسب به دیوار برشی فولادی بازشودار با ورق نازک، رفتار غیرخطی و ظرفیت برشی و جذب انرژی آن را می‌توان در حد سیستم بدون بازشو ارتقاء بخشید و ضمن بهره‌مندی از مزایای سیستم‌های تقویت‌شده، با توجه به اینکه مقدار فولاد مصرفی در تقویت با سخت‌کنندهٔ قطری نسبت به حالتهای دیگر تقویت کمتر می‌باشد، در اوزان مصالح مصرفی نیز صرفه‌جویی نمود.

۵- مراجع

1. Roberts, T.M. and Sabouri-Ghomi, S. (1992). Hysteretic characteristics of unstiffened perforated steel plate shear panels, *Journal of Thin-Walled Structures*, 121-127.

2. Vian, D. and Bruneau, M. (2004). Testing of special LYS steel plate shear walls, *13th World Conference on Earthquake Engineering*, **II**, 978.

3. Takanashi, Y. Takemoto, T., and Tagaki, M. (1973). Experimental study on thin steel shear walls and particular bracing under alternative horizontal load, *Preliminary Report, IABSE* **II**, 57.

4. Sabouri-Ghomi, S. and Gholhaki, M. (2008). Nonlinear behavior of strengthening steel plate shear walls with opening, *Asian Journal of Civil Engineering*, **9**, 153-166.

5. Deylami, A. and Daftari, H. (2000). Nonlinear behavior of steel plate shear wall with large rectangular opening, *12th World Conference on Earthquake Engineering*, **III**, 408.

۶. عابدی، کریم، چناقلو، محمدرضا و عباسی‌موسوی، سیدمهدی (۱۳۸۷). بررسی تأثیر نسبتهای لاغری مختلف بر رفتار دیوار برشی فولادی بازشودار، *چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران*.

۷. حرآبادی فراهانی، سمیه و ناطقی الهی، فریبرز (۱۳۸۸). *طرح لرزه‌ای دیوار برشی فولادی بازشودار همراه با سخت‌کننده*، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد واحد تهران- جنوب، ۲۱۷ صفحه.