

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه شاهرود

دانشکده مهندسی عمران

گروه سازه و زلزله

مطالعه رفتار لرزه‌ای دیوارهای برشی فولادی

دانشجو: زهرا اکبری لر

اساتید راهنما:

دکتر علی کیهانی

دکتر حسن حاجی کاظمی

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

شهریور ۱۳۹۱

دانشگاه شاهرود
دانشکده مهندسی عمران
گروه سازه و زلزله

پایان نامه کارشناسی ارشد خانم زهرا اکبری لر به شماره دانشجویی ۸۸۰۰۲۹۴
تحت عنوان:

مطالعه رفتار لرزه‌ای دیوارهای برشی فولادی

در تاریخ ۹۱/۶/۲۷ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد مورد ارزیابی و با درجه عالی مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	اساتید مشاور	امضاء	اساتید راهنما
	-----		دکتر علی کیهانی
	-----		دکتر حسن حاجی کاظمی

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
	سید علی حسینی		دکتر وحید رضا کلات جاری
			دکتر رامین امینی

آنان که با انخاری پاک و فطرتی زیاده قلب دیگران جای دارند را
هرگز هراسی از فراموشی نیست؛ چرا که جاودانند

تقدیم به مهربان فرشتگانی که

لحظات ناب باور بودن، لذت و غرور دانستن، جسارت خواستن، عظمت رسیدن و تمام تجربه‌های یکتا
و زیبای زندگی‌مدیون حضور سبز آنهاست. آنان که همراهان همیشگی و پشتوانه‌های زندگی‌ام
هستند.

تقدیم به خانواده‌ی عزیزم

تشکر و قدردانی

در آغاز سخن بر خود لازم می‌دانم که از کلیه ی عزیزانی که مرا در تهیه این پایان‌نامه یاری نموده‌اند سپاسگزاری کنم و زحمتهای آنان را ارج نهم، بویژه استادهای راهنما جناب آقای دکتر علی کیهانی از دانشگاه صنعتی شاهرود و جناب آقای دکتر حسن حاجی کاظمی از دانشگاه فردوسی مشهد که در کمال صبوری با حسن خلق و فروتنی از هیچ کمکی در این عرصه بر من دریغ نمودند و زحمت راهنمایی این پایان‌نامه را بر عهده گرفتند. از پروردگار مهربان، آرزوی تندرستی و پیروزی روزافزون را برای همه‌ی این عزیزان خواستارم.

زهرا اکبری‌لر

شهریور ۱۳۹۱

تعهدنامه

اینجانب زهرا اکبری لر دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران-گرایش سازه دانشکده مهندسی عمران دانشگاه شاهرود و نویسنده پایان نامه "مطالعه رفتار لرزه‌ای دیوارهای برشی فولادی" با راهنمایی جناب آقای دکتر کیهانی و جناب آقای دکتر حاجی کاظمی متعهد می‌شوم:

- تحقیق‌ها در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تا کنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرکی یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه شاهرود می‌باشد و مقاله‌های بدست آمده با نام "دانشگاه شاهرود" و یا "shahrood university" به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افراد که در بدست آوردن نتایج اصلی پایان نامه تاثیرگذار بوده‌اند در مقاله‌های بدست آمده از پایان نامه رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاقی انسانی رعایت شده است.

تاریخ:

امضای دانشجو:

مالکیت نتیجه‌ها و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقاله‌های بدست آمده ، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم‌افزارها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحوی مقتضی در تولیدهای علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

از دهه ۱۹۷۰ میلادی، بکارگیری دیوار برشی فولادی به عنوان یک سیستم مقاوم در برابر بارهای جانبی (باد و زلزله) مطرح است. مطالعه‌های تئوری و آزمایشگاهی نشان از عملکرد مطلوب (سختی برشی زیاد، ظرفیت بالا، جذب انرژی بالا) این سیستم دارد. اساس ایده‌ی دیوارهای یاد شده، بهره‌گیری از میدان کششی قطری است که پس از کمانش ورق فولادی در آن ایجاد می‌شود. یکی از مسائلی که در بکارگیری این دیوارها مطرح است، موضوع ایجاد بازشو در پانل دیوار برشی فولادی به منظور عبور تأسیسات و یا دلایل معماری می‌باشد. در این پژوهش، اثر ایجاد بازشو در گوشه‌های پانل به منظور عبور تأسیسات، مورد مطالعه قرار می‌گیرد. اثر عواملی همچون موقعیت بازشو، شکل بازشو، اثر بکارگیری سخت‌کننده و یا عدم استفاده از آن در رفتار دیوار برشی فولادی بررسی می‌گردد. به این منظور، نرم‌افزار قدرتمند اجزای محدود ABAQUS 6.9 جهت مدلسازی انتخاب شد. نتایج آن با یک نمونه آزمایشگاهی معتبر (Vian, Bruneau در سال ۲۰۰۴ میلادی) مقایسه شد تا صحت آن بررسی گردد. همگرایی خوبی میان نتایج ملاحظه شد که بیان‌گر درستی مدلسازی است. در ادامه، تحلیل استاتیکی غیر خطی (Pushover) توسط نرم‌افزار ABAQUS 6.9 بر روی مدل‌ها انجام می‌شود و با آنالیز مدل‌ها، اثر پارامترهای یاد شده در رفتار دیوار برشی فولادی (سختی الاستیک و مقاومت) بررسی می‌گردد.

کلمات کلیدی: دیوار برشی فولادی، بازشو، میدان کششی قطری

مقاله‌های ارائه شده

- "بررسی بازشوهای اطراف المان‌های مرزی در رفتار دیوارهای برشی فولادی"، نهمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اردیبهشت ۱۳۹۱
- "بررسی اثر استفاده از سخت‌کننده در بازشو به شکل ربع دایره در رفتار دیوارهای برشی فولادی"، هشتمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، اردیبهشت ۱۳۹۳
- "بررسی اثر شکل بازشوهای اطراف المان‌های مرزی در رفتار دیوارهای برشی فولادی"، دهمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، اردیبهشت ۱۳۹۴
- "بررسی اثر استفاده از سخت‌کننده در بازشوهای اطراف المان‌های مرزی دیوارهای برشی فولادی"، دهمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، اردیبهشت ۱۳۹۴

فهرست مطالب

فصل اول - معرفی سیستم دیوار برشی فولادی

- ۱-۱- پیش گفتار ۲
- ۲-۱- معرفی دیوار برشی فولادی ۳
- ۳-۱- مزایای استفاده از دیوار برشی فولادی ۵
- ۴-۱- هدفها و روش پژوهش ۱۰
- ۵-۱- ساختار پایان نامه ۱۱

فصل دوم - مروری بر پژوهش‌های انجام شده در زمینه دیوار برشی فولادی

- ۱-۲- پیش گفتار ۱۴
- ۲-۲- ساختمانمایی با سیستم دیوار برشی فولادی ۱۴
- ۱-۲-۲- کاربرد دیوارهای برشی فولادی به منظور نوسازی ۱۵
- ۲-۲-۲- کاربرد دیوارهای برشی فولادی به منظور مقاوم سازی ۱۷
- ۳-۲- مقایسه‌ی رفتار تیر ورق‌ها با دیوارهای برشی فولادی ۲۰
- ۴-۲- معرفی دیوارهای برشی فولادی کامپوزیت ۲۲
- ۵-۲- مدل نواری ۲۶
- ۶-۲- مدل نواری با زاویه‌های مختلف ۲۹
- ۷-۲- مدل اندرکنش قاب و پانل (PFI) ۳۰
- ۱-۷-۲- نمودار بار- تغییرمکان برشی ورق فولادی ۳۱
- ۲-۷-۲- نمودار بار- تغییرمکان برشی قاب ۳۹
- ۸-۲- مدل اصلاح شده اثر متقابل قاب و پانل (M-PFI) ۴۱
- ۹-۲- کارهای آزمایشگاهی انجام شده در زمینه‌ی دیوار برشی فولادی ۴۲
- ۱-۹-۲- کارهای آزمایشگاهی در کانادا ۴۲
- ۲-۹-۲- کارهای آزمایشگاهی در کشور ژاپن ۴۶

- ۴۹ کارهای آزمایشگاهی در انگلیس ۳-۹-۲
- ۵۰ کارهای آزمایشگاهی در آمریکا ۴-۹-۲
- ۵۴ کارهای آزمایشگاهی در تایوان و کره جنوبی ۵-۹-۲

فصل سوم - مدلسازی اجزای محدود

- ۶۰ ۱-۳- پیش‌گفتار ۳-۳
- ۶۲ ۲-۳- معرفی نرم‌افزار ABAQUS ۳-۳
- ۶۴ ۳-۳- مشخصات نمونه‌ی مدلسازی شده ۳-۳
- ۶۵ ۴-۳- مروری بر مفهوم تحلیل غیرخطی ۳-۳
- ۶۶ ۵-۳- نقص اولیه‌ی ورق پانل ۳-۳
- ۶۸ ۶-۳- شرایط مرزی ۳-۳
- ۶۹ ۷-۳- المان S4R ۳-۳
- ۶۹ ۸-۳- المان Connector ۳-۳
- ۷۱ ۹-۳- مدلسازی بارگذاری ۳-۳
- ۷۲ ۱۰-۳- شبکه‌بندی اجزای محدود ۳-۳
- ۷۳ ۱۱-۳- مشکلات همگرایی در مدلسازی دیوار برشی فولادی ۳-۳
- ۷۴ ۱۲-۳- مقایسه‌ی نتایج مدلسازی با نمونه آزمایشگاهی ۳-۳

فصل چهارم - بررسی اثر بازشوها در رفتار دیوار برشی فولادی

- ۸۰ ۱-۴- پیش‌گفتار ۴-۴
- ۸۱ ۲-۴- روش تحقیق ۴-۴
- ۸۱ ۳-۴- مشخصات نمونه‌ی مورد مطالعه ۴-۴
- ۸۳ ۴-۴- نحوه‌ی نامگذاری مدل‌ها ۴-۴
- ۸۶ ۵-۴- بررسی اثر بازشوهای ربع دایره در ناحیه‌ی فوقانی پانل ۴-۴
- ۸۹ ۶-۴- بررسی اثر بازشوهای ربع دایره در ناحیه‌ی تحتانی پانل ۴-۴
- ۹۲ ۷-۴- بررسی اثر بازشوهای ربع دایره در راستای قطری پانل ۴-۴

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱- یک نمونه تیر ورق قائم و دیوار برشی فولادی تحت بار جانبی ۴
- شکل ۱-۲- یک نمونه دیوار برشی فولادی دارای سخت‌کننده ۴
- شکل ۱-۳- تصویر کلی نمودار بار- تغییر مکان جانبی سیستم ۵
- شکل ۱-۴- تعیین سختی سیستم در هر تراز دلخواه ۶
- شکل ۱-۵- اثر $P-\Delta$ ۷
- شکل ۱-۶- ایجاد بازشو در سیستم‌های مقاوم جانبی مختلف ۱۰
- شکل ۲-۱- ستون‌های تخریب شده در ساختمان اصلی ۱۵
- شکل ۲-۲- تخریب پارکینگ آمبولانس‌ها (ساختمان جانبی) ۱۶
- شکل ۲-۳- مشابَهت سیستم دیوار برشی فولادی با تیر ورق طره ۲۰
- شکل ۲-۴- انواع دیوارهای برشی کامپوزیت ۲۳
- شکل ۲-۵- مولفه‌های اصلی دیوار برشی فولادی کامپوزیت معمولی ۲۴
- شکل ۲-۶- مقاومت برشی ورق فولادی در (a) دیوار برشی کامپوزیت (b) دیوار برشی فولادی ۲۴
- شکل ۲-۷- برش اعمالی و میدان قطری فشاری بتن ۲۵
- شکل ۲-۸- مدل تحلیلی نواری، ارائه شده توسط تربرن (Thorburn) و همکاران در سال ۱۹۸۳ ۲۷
- شکل ۲-۹- مدل تحلیلی نواری با زاویه‌های مختلف SSW ارائه شده توسط رضایی (سال ۱۹۹۹) ۲۹
- شکل ۲-۱۰- پانل برشی فولادی به صورت یک طبقه‌ی مجزا ۳۰
- شکل ۲-۱۱- نمودار بار جانبی- تغییر مکان برشی ورق فولادی ۳۱
- شکل ۲-۱۲- وضعیت تنش‌ها در ورق فولادی قبل و بعد از کمانش ورق ۳۲
- شکل ۲-۱۳- نمودار بار- تغییر مکان برشی قاب فولادی ۴۰
- شکل ۲-۱۴- نمودار بار- تغییر مکان برشی پانل (سیستم دیوار برشی فولادی) ۴۱
- شکل ۲-۱۵- آزمایش استاتیکی تیملر و کولاک (Timler, Kulak) سال ۱۹۸۳ (آزمایش اول) ۴۳
- شکل ۲-۱۶- آزمایش چرخه‌ای تیملر و کولاک (Timler, kulak) سال ۱۹۸۳ (آزمایش دوم) ۴۳
- شکل ۲-۱۷- نمونه آزمایشی و رفتار هیستریزس یکی از نمونه‌های آزمایش درایور (Driver) و همکاران ۴۴
- شکل ۲-۱۸- منحنی هیستریزس پانل برشی در آزمایش PR-3.2-M₂-15 توسط تاکاناشی و همکاران ۴۷
- شکل ۲-۱۹- منحنی هیستریزس پانل برشی در آزمایش PR-3.2-M₂-25 توسط تاکاناشی و همکاران ۴۸
- شکل ۲-۲۰- منحنی هیستریزس پانل برشی در آزمایش PR-3.2-M₂-60 توسط تاکاناشی و همکاران ۴۸
- شکل ۲-۲۱- کاهش مقاومت برشی نهایی و سختی برشی ورق فولادی در پانل با بازشوی دایره‌ای ۴۹

- شکل ۲-۲۲- رفتار هیستریزیس نمونه‌های الغالی (Elgaaly) و همکارانش در سال ۱۹۹۳ ۵۱
- شکل ۲-۲۳- دیوارهای برشی کامپوزیت (C-SPW) جدید و سنتی ۵۲
- شکل ۲-۲۴- مقایسه خسارت دیوار بتنی در دو نمونه سنتی و نوین در تغییر مکان نسبی جانبی یکسان ۵۳
- شکل ۲-۲۵- یکی از نمونه‌های آزمایشگاهی وین (Vian) و همکاران (با حفره‌های متعدد در راستای ۴۵ درجه) ۵۴
- شکل ۲-۲۶- گسیختگی اتصال جوشی پانل از ورق پشت‌بند ۵۵
- شکل ۲-۲۷- آزمایش بار چرخه‌ای بر روی نمونه دیوار برشی فولادی باریک ۵۶
- شکل ۳-۱- مشخصات هندسی نمونه آزمایشگاهی منتخب برای مدلسازی ۶۴
- شکل ۳-۲- مد اول کمانشی پانل دیوار برشی فولادی ۶۷
- شکل ۳-۳- مد دوم کمانشی پانل دیوار برشی فولادی ۶۷
- شکل ۳-۴- مد سوم کمانشی پانل دیوار برشی فولادی ۶۷
- شکل ۳-۵- مد چهارم کمانشی پانل دیوار برشی فولادی ۶۸
- شکل ۳-۶- المان S4R ۶۹
- شکل ۳-۷- نمونه‌ی مدلسازی شده توسط ABAQUS ۷۰
- شکل ۳-۸- نمونه‌ی آزمایشگاهی و نحوه قرارگیری جک‌ها ۷۱
- شکل ۳-۹- استفاده از قید Coupling در تیر فوقانی نمونه به منظور مدلسازی بارگذاری ۷۲
- شکل ۳-۱۰- شبکه‌بندی مدل اجزای محدود ۷۳
- شکل ۳-۱۱- نمودار بار- تغییر مکان جانبی نمونه آزمایشگاهی و مدل اجزای محدود ۷۵
- شکل ۳-۱۲- توزیع تنش‌های فون میزز (بر حسب MPa) در انتهای تحلیل در نمونه اجزای محدود ۷۵
- شکل ۳-۱۳- توزیع تنش‌های اصلی حداکثر (بر حسب MPa) در انتهای تحلیل در نمونه اجزای محدود ۷۶
- شکل ۴-۱- مشخصات هندسی نمونه دیوار برشی فولادی مورد مطالعه ۸۲
- شکل ۴-۲- حفره‌های موجود در پانل نمونه 2-C-X(top)-R50 ۸۳
- شکل ۴-۳- حفره‌های موجود در پانل نمونه 2-C-Dia(T)-R35 ۸۴
- شکل ۴-۴- حفره‌های موجود در پانل نمونه ST-4-T-L50 ۸۴
- شکل ۴-۵- توزیع تنش‌های فون میزز در انتهای تحلیل در نمونه 2-C-X(top)-R50 (بر حسب MPa) ۸۶
- شکل ۴-۶- توزیع تنش‌های اصلی حداکثر در انتهای تحلیل در نمونه 2-C-X(top)-R50 (بر حسب MPa) ۸۶
- شکل ۴-۷- نمودار بار- تغییر مکان جانبی نمونه بدون حفره و نمونه‌های 2-C-X (top) ۸۷
- شکل ۴-۸- اثر ایجاد باز شو در سختی الاستیک نمونه‌های 2-C-X(top) به ازای R/H متفاوت ۸۸
- شکل ۴-۹- اثر ایجاد باز شو در $F_{d=2cm}$ و مقاومت نمونه‌های 2-C-X(top) به ازای R/H متفاوت ۸۸
- شکل ۴-۱۰- توزیع تنش‌های فون میزز در انتهای تحلیل در نمونه 2-C-X(bot)-R50 (بر حسب MPa) ۸۹

- شکل ۴-۱۱- توزیع تنش‌های اصلی حداکثر در انتهای تحلیل در نمونه 2-C-X(bot)-R50 (برحسب MPa)..... ۸۹
- شکل ۴-۱۲- نمودار بار- تغییر مکان جانبی نمونه بدون حفره و نمونه‌های 2-C-X(bot)..... ۹۰
- شکل ۴-۱۳- اثر ایجاد بازشو در سختی الاستیک نمونه‌های 2-C-X(bot) به ازای R/H متفاوت..... ۹۱
- شکل ۴-۱۴- اثر ایجاد بازشو در $F_d=2\text{cm}$ و مقاومت نمونه‌های 2-C-X(bot) به ازای R/H متفاوت..... ۹۱
- شکل ۴-۱۵- توزیع تنش‌های فون میزز در انتهای تحلیل در نمونه 2-C-Dia(T)-R50 (برحسب MPa)..... ۹۳
- شکل ۴-۱۶- توزیع تنش‌های اصلی حداکثر در انتهای تحلیل در نمونه 2-C-Dia(T)-R50 (برحسب MPa)..... ۹۳
- شکل ۴-۱۷- نمودار بار- تغییر مکان جانبی نمونه بدون حفره و نمونه‌های 2-C-Dia(T)..... ۹۴
- شکل ۴-۱۸- اثر ایجاد بازشو در سختی الاستیک نمونه‌های 2-C-Dia(T) به ازای R/H متفاوت..... ۹۵
- شکل ۴-۱۹- اثر ایجاد بازشو در $F_d=2\text{cm}$ و مقاومت نمونه‌های 2-C-Dia(T) به ازای R/H متفاوت..... ۹۵
- شکل ۴-۲۰- توزیع تنش‌های فون میزز در انتهای تحلیل در نمونه 2-C-Dia(C)-R50 (برحسب MPa)..... ۹۶
- شکل ۴-۲۱- توزیع تنش‌های اصلی حداکثر در انتهای تحلیل در نمونه 2-C-Dia(C)-R50 (برحسب MPa)..... ۹۶
- شکل ۴-۲۲- نمودار بار- تغییر مکان جانبی نمونه بدون حفره و نمونه‌های 2-C-Dia(C)..... ۹۷
- شکل ۴-۲۳- اثر ایجاد بازشو در سختی الاستیک نمونه‌های 2-C-Dia(C) به ازای R/H متفاوت..... ۹۸
- شکل ۴-۲۴- اثر ایجاد بازشو در $F_d=2\text{cm}$ و مقاومت نمونه‌های 2-C-Dia(C) به ازای R/H متفاوت..... ۹۸
- شکل ۴-۲۵- نمودار بار- تغییر مکان جانبی نمونه بدون حفره و نمونه‌های 2-C-X(top)-R20 و 2-C-X(bot)-R20..... ۹۹
- شکل ۴-۲۶- نمودار بار- تغییر مکان جانبی نمونه بدون حفره و نمونه‌های 2-C-X(top)-R35 و 2-C-X(bot)-R35..... ۱۰۰
- شکل ۴-۲۷- نمودار بار- تغییر مکان جانبی نمونه بدون حفره و نمونه‌های 2-C-X(top)-R50 و 2-C-X(bot)-R50..... ۱۰۰
- شکل ۴-۲۸- مقایسه سختی الاستیک نمونه‌های 2-C-X(top) و 2-C-X(bot) به ازای R/H متفاوت..... ۱۰۲
- شکل ۴-۲۹- مقایسه $F_d=2\text{cm}$ نمونه‌های 2-C-X(top) و 2-C-X(bot) به ازای R/H متفاوت..... ۱۰۲
- شکل ۴-۳۰- مقایسه مقاومت نمونه‌های 2-C-X(top) و 2-C-X(bot) به ازای R/H متفاوت..... ۱۰۲
- شکل ۴-۳۱- نمودار بار- تغییر مکان جانبی نمونه بدون حفره و نمونه‌های 2-C-Dia(C)-R20 و 2-C-Dia(T)-R20..... ۱۰۴
- شکل ۴-۳۲- نمودار بار- تغییر مکان جانبی نمونه بدون حفره و نمونه‌های 2-C-Dia(C)-R35 و 2-C-Dia(T)-R35..... ۱۰۴
- شکل ۴-۳۳- نمودار بار- تغییر مکان جانبی نمونه بدون حفره و نمونه‌های 2-C-Dia(C)-R50 و 2-C-Dia(T)-R50..... ۱۰۵
- شکل ۴-۳۴- مقایسه سختی الاستیک نمونه‌های 2-C-Dia(T) و 2-C-Dia(C) به ازای R/H متفاوت..... ۱۰۶
- شکل ۴-۳۵- مقایسه $F_d=2\text{cm}$ نمونه‌های 2-C-Dia(T) و 2-C-Dia(C) به ازای R/H متفاوت..... ۱۰۷
- شکل ۴-۳۶- مقایسه مقاومت نمونه‌های 2-C-Dia(T) و 2-C-Dia(C) به ازای R/H متفاوت..... ۱۰۷
- شکل ۴-۳۷- توزیع تنش‌های فون میزز در انتهای تحلیل در نمونه 4-C-R39.8 (برحسب MPa)..... ۱۰۸
- شکل ۴-۳۸- توزیع تنش‌های فون میزز در انتهای تحلیل در نمونه 4-T-L50 (برحسب MPa)..... ۱۰۹
- شکل ۴-۳۹- توزیع تنش‌های اصلی حداکثر در انتهای تحلیل در نمونه 4-C-R39.8 (برحسب MPa)..... ۱۰۹

- شکل ۴-۴۰- توزیع تنش‌های اصلی حداکثر در انتهای تحلیل در نمونه 4-T-L50 (برحسب MPa).....۱۰۹
- شکل ۴-۴۱- نمودار بار-تغییر مکان جانبی نمونه بدون حفره و نمونه‌های 4-T-L20 و 4-C-R15.9.....۱۱۰
- شکل ۴-۴۲- نمودار بار-تغییر مکان جانبی نمونه بدون حفره و نمونه‌های 4-T-L35 و 4-C-R27.9.....۱۱۰
- شکل ۴-۴۳- نمودار بار-تغییر مکان جانبی نمونه بدون حفره و نمونه‌های 4-T-L50 و 4-C-R39.8.....۱۱۱
- شکل ۴-۴۴- تاثیر شکل بازشو در سختی الاستیک دیوار برشی فولادی.....۱۱۲
- شکل ۴-۴۵- تاثیر شکل بازشو در $F_{d=2cm}$ دیوار برشی فولادی.....۱۱۳
- شکل ۴-۴۶- تاثیر شکل بازشو در مقاومت دیوار برشی فولادی.....۱۱۳
- شکل ۴-۴۷- توزیع تنش‌های فون میزز در انتهای تحلیل در نمونه 4-C-R27.9 (برحسب MPa).....۱۱۵
- شکل ۴-۴۸- توزیع تنش‌های فون میزز در انتهای تحلیل در نمونه ST-4-C-R27.9 (برحسب MPa).....۱۱۵
- شکل ۴-۴۹- توزیع تنش‌های اصلی حداکثر در انتهای تحلیل در نمونه 4-C-R27.9 (برحسب MPa).....۱۱۵
- شکل ۴-۵۰- توزیع تنش‌های اصلی حداکثر در انتهای تحلیل در نمونه ST-4-C-R27.9 (برحسب MPa).....۱۱۶
- شکل ۴-۵۱- نمودار بار-تغییر مکان جانبی نمونه بدون حفره و نمونه‌های 4-C-R15.9 و ST-4-C-R15.9.....۱۱۶
- شکل ۴-۵۲- نمودار بار-تغییر مکان جانبی نمونه بدون حفره و نمونه‌های 4-C-R27.9 و ST-4-C-R27.9.....۱۱۷
- شکل ۴-۵۳- نمودار بار-تغییر مکان جانبی نمونه بدون حفره و نمونه‌های 4-C-R39.8 و ST-4-C-R39.8.....۱۱۷
- شکل ۴-۵۴- اثر بکارگیری سخت‌کننده در بازشو (به شکل ربع دایره) و در سختی الاستیک سیستم.....۱۱۹
- شکل ۴-۵۵- اثر بکارگیری سخت‌کننده در بازشو (به شکل ربع دایره) و در $F_{d=2cm}$ سیستم.....۱۱۹
- شکل ۴-۵۶- اثر بکارگیری سخت‌کننده در بازشو (به شکل ربع دایره) و در مقاومت سیستم.....۱۱۹
- شکل ۴-۵۷- توزیع تنش‌های فون میزز در انتهای تحلیل در نمونه 4-T-L35 (برحسب MPa).....۱۲۱
- شکل ۴-۵۸- توزیع تنش‌های فون میزز در انتهای تحلیل در نمونه ST-4-T-L35 (برحسب MPa).....۱۲۱
- شکل ۴-۵۹- توزیع تنش‌های اصلی حداکثر در انتهای تحلیل در نمونه 4-T-L35 (برحسب MPa).....۱۲۱
- شکل ۴-۶۰- توزیع تنش‌های اصلی حداکثر در انتهای تحلیل در نمونه ST-4-T-L35 (برحسب MPa).....۱۲۲
- شکل ۴-۶۱- نمودار بار-تغییر مکان جانبی نمونه بدون حفره و نمونه‌های 4-T-L20 و ST-4-T-L20.....۱۲۲
- شکل ۴-۶۲- نمودار بار-تغییر مکان جانبی نمونه بدون حفره و نمونه‌های 4-T-L35 و ST-4-T-L35.....۱۲۳
- شکل ۴-۶۳- نمودار بار-تغییر مکان جانبی نمونه بدون حفره و نمونه‌های 4-T-L50 و ST-4-T-L50.....۱۲۳
- شکل ۴-۶۴- اثر بکارگیری سخت‌کننده در بازشو (به شکل مثلث) و در سختی الاستیک سیستم.....۱۲۵
- شکل ۴-۶۵- اثر بکارگیری سخت‌کننده در بازشو (به شکل ربع دایره) و در $F_{d=2cm}$ سیستم.....۱۲۵
- شکل ۴-۶۶- اثر بکارگیری سخت‌کننده در بازشو (به شکل ربع دایره) و در مقاومت سیستم.....۱۲۵
- شکل ۵-۱- موقعیت قرارگیری بازشوها در ناحیه تحتانی و فوقانی پانل.....۱۳۰
- شکل ۵-۲- موقعیت قرارگیری بازشوها در ناحیه قطر کششی پانل.....۱۳۰

- شکل ۵-۳- موقعیت قرارگیری بازشوها در ناحیه قطر فشاری پانل ۱۳۰
- شکل ۵-۴- نمونه مورد مطالعه به منظور بررسی اثر شکل (مثلثی و ربع دایره) ۱۳۱
- شکل ۵-۵- نمونه مورد مطالعه به منظور بررسی اثر سخت کننده در بازشو به شکل ربع دایره ۱۳۱
- شکل ۵-۶- نمونه مورد مطالعه به منظور بررسی اثر سخت کننده در بازشو به شکل مثلثی ۱۳۲

فهرست جدول‌ها

- جدول ۴-۱ - مشخصات مصالح دیوار برشی فولادی مورد مطالعه ۸۲
- جدول ۴-۲ - مقادیر K و $F_{d=2,7cm}$ در نمونه‌های 2-C-X(top) ۸۷
- جدول ۴-۳ - مقادیر K و $F_{d=2,7cm}$ در نمونه‌های 2-C-X(bot) ۹۰
- جدول ۴-۴ - مقادیر K و $F_{d=2,7cm}$ در نمونه‌های 2-C-Dia(T) ۹۴
- جدول ۴-۵ - مقادیر K و $F_{d=2,7cm}$ در نمونه‌های 2-C-Dia(C) ۹۷
- جدول ۴-۶ - مقایسه مقادیر K و $F_{d=2,7cm}$ نمونه‌های 2-C-X(top) و 2-C-X(bot) با نمونه بدون حفره ۱۰۱
- جدول ۴-۷ - مقایسه مقادیر K و $F_{d=2,7cm}$ نمونه‌های 2-C-X(bot) با نمونه‌های 2-C-X(top) نظیرش ۱۰۱
- جدول ۴-۸ - مقایسه مقادیر K و $F_{d=2,7cm}$ نمونه‌های 2-C-Dia(T) و 2-C-Dia(C) با نمونه بدون حفره ۱۰۵
- جدول ۴-۹ - مقایسه مقادیر K و $F_{d=2,7cm}$ نمونه‌های 2-C-Dia(T) با نمونه‌های 2-C-Dia(C) نظیرش ۱۰۶
- جدول ۴-۱۰ - مقایسه مقادیر K و $F_{d=2,7cm}$ نمونه‌های 4-C و 4-T با نمونه بدون حفره ۱۱۱
- جدول ۴-۱۱ - مقایسه مقادیر K و $F_{d=2,7cm}$ نمونه‌های 4-T با نمونه‌های 4-C نظیرش ۱۱۲
- جدول ۴-۱۲ - مقایسه مقادیر K و $F_{d=2,7cm}$ نمونه‌های 4-C و ST-4-C با نمونه بدون حفره ۱۱۸
- جدول ۴-۱۳ - مقایسه مقادیر K و $F_{d=2,7cm}$ نمونه‌های ST-4-C با نمونه‌های 4-C نظیرش ۱۱۸
- جدول ۴-۱۴ - مقایسه مقادیر K و $F_{d=2,7cm}$ نمونه‌های 4-T و ST-4-T با نمونه بدون حفره ۱۲۴
- جدول ۴-۱۵ - مقایسه مقادیر K و $F_{d=2,7cm}$ نمونه‌های ST-4-T با نمونه‌های 4-T نظیرش ۱۲۴

فهرست علائم

A_b	مساحت مقطع تیر
A_c	مساحت مقطع ستون
A_o	سطح بازشو
A_p	سطح پانل
b	دهانه دیوار برشی فولادی و یا پانل برشی
d	ارتفاع طبقه در دیوار برشی فولادی و یا پانل برشی
D	قطر بازشوی دایره‌ای و یا قطر دایره‌ی محیطی دربرگیرنده بازشو
E	ضریب ارتجاعی
$F_{d=2cm}$	بار اعمالی به مدل اجزای محدود برای ایجاد تغییر مکان جانبی نسبی ۲ سانتیمتر
$F_{d=7cm}$	بار اعمالی به مدل اجزای محدود برای ایجاد تغییر مکان جانبی نسبی ۷ سانتیمتر (مقاومت مدل اجزای محدود)
F_U	مقاومت نهایی
F_{wcr}	نیروی برشی بحرانی (حد کمانش) ورق فولادی
F_y	تنش تسلیم
F_{fu}	بار برشی نهایی قاب
F_w	بار برشی ورق فولادی
F_{wu}	بار برشی نهایی ورق فولادی
$F_{wu,r}$	بار برشی نهایی کاهش یافته ورق در اثر بازشو

$\underline{F}_{t+\Delta t}$ بردار نیروهای داخلی گره‌ها (تنش المان‌ها)

$\underline{f}_{t+\Delta t}$ بردار نیروهای نامتعادل در لحظه $t+\Delta t$

G ضریب ارتجاعی برشی

H ارتفاع پانل

h ارتفاع طبقه

I_f ممان اینرسی ستونها

M_{fp} ممان پلاستیک در ستونها

L عرض دهانه و طول بازشو مثلثی

K سختی

K_f سختی برشی قاب

K_w سختی برشی ورق فولادی

$K_{w,r}$ سختی برشی کاهش یافته ورق فولادی در اثر بازشو

R شعاع بازشو

$\underline{R}_{t+\Delta t}$ بردار نیروهای خارجی اعمال شده

t ضخامت ورق فولادی

U_{wcr} تغییر مکان برشی بحرانی (حد کمانش) ورق فولادی

U_{we} تغییر مکان برشی حد الاستیک ورق فولادی

U_{wpb} تغییر مکان برشی ناشی از تنش‌های میدان کششی، σ_{ty} ، در ورق فولادی (پس کمانش)

U_{fe} تغییر مکان برشی حد الاستیک قاب

τ_{cr} تنش برش بحرانی (حد کمانش) ورق فولادی

کرنش برشی بحرانی (حد کمانش)	γ_{cr}
ضریب پواسون	μ
حد جاری شدن ورق فولادی	σ_o
تنش حد جاری شدن ورق فولادی در برش	τ_{wy}
تنش حد جاری شدن میدان کششی بوجود آمده در ورق فولادی	σ_{Ty}
تنش واقعی	σ_{true}
تنش اسمی (مهندسی)	σ_{nom}
کرنش اسمی (مهندسی)	ϵ_{nom}
کرنش پلاستیک لگاریتمی	ϵ_{ln}^{pl}
زاویه انحراف میدان کششی	θ
تغییر مکان	Δ

فصل اول - معرفی سیستم دیوار برشی فولادی

۱-۱- پیش گفتار

تاکنون سیستم‌های متنوعی برای مقاومت در برابر بارهای جانبی (باد و زلزله) پیشنهاد و بکار گرفته شده است که از آن جمله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- سیستم‌های قاب خمشی
 - دیوارهای برشی بتنی
 - سیستم‌های مهاربندی متمرکز^۱ (CBF) و سیستم مهاربندی خارج از مرکز^۲ (EBF)
- مهمترین پارامترهایی که در انتخاب یک سیستم مقاوم در برابر بارهای جانبی دخالت دارند عبارتند از:
- سختی
 - مقاومت بالا
 - جذب انرژی بالا در رفتار چرخه‌ای

1-Concentrically Braced Frames
2- Eccentrically Baced Frames

• شکل پذیری بالا

همواره پژوهشگران در پی یافتن سیستم مناسب برای مقاومت در برابر بارهای جانبی هستند؛ به طوری که پارامترهای نامبرده تامین شوند.

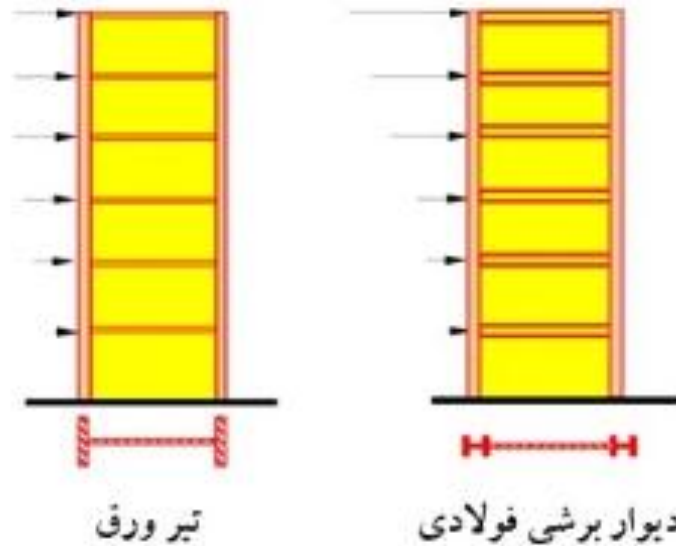
دیوار برشی فولادی^۱ (SSW) یک سیستم نوین مقاوم در برابر بارهای جانبی است. از دهه ۷۰ میلادی تعداد زیادی از سازه‌های مهم در امریکا و ژاپن با استفاده از این سیستم ساخته شده‌اند. چند نمونه از سازه‌های اجرا شده با این سیستم در زلزله‌های شدید همچون نرتریج (Northridge) کالیفرنیا در سال ۱۹۹۴ و زلزله کوبه (Kobe) ژاپن در سال ۱۹۹۵ قرار گرفته‌اند و رفتار مطلوبی از خود نشان داده‌اند؛ به طوری که هیچ خسارت سازه‌ای وجود نداشته و یا مقدار آن ناچیز گزارش شده است. شواهد آزمایشگاهی، مطالعه‌های نظری و تجربه‌ی زلزله‌های گذشته حاکی از رفتار مناسب این سیستم است. برای نمونه، گزارش اولیه تحقیقات انجام شده در تابستان ۲۰۰۰ میلادی در آزمایشگاه سازه دیویس هال (Davis Hall) دانشگاه برکلی کالیفرنیا نشان می‌دهد که ظرفیت دیوارهای برشی فولادی برای مقابله با خطراتی مانند زلزله، طوفان و انفجار در مقایسه با دیگر سیستم‌ها مثل قاب ممان‌گیر ویژه، حداقل ۲۵٪ بیشتر است. آزمایشهای مذکور نشان می‌دهد که این سیستم دارای شکل‌پذیری بسیار بالایی است [۲۱].

۱-۲- معرفی دیوار برشی فولادی

عملکرد اصلی دیوار برشی فولادی، مقاومت در برابر برش افقی طبقه و لنگر واژگونی ناشی از بارهای جانبی است. این سیستم شامل یک پانل ورق فولادی، ستون‌های مرزی و تیرهای افقی طبقه می‌باشد. پانل ورق فولادی و ستون‌های مرزی به عنوان یک تیر ورق قائم عمل می‌کنند، ستون‌ها به عنوان بال‌های تیر ورق قائم، ورق فولادی به عنوان جان و تیرهای افقی طبقه شبیه سخت‌کننده‌های

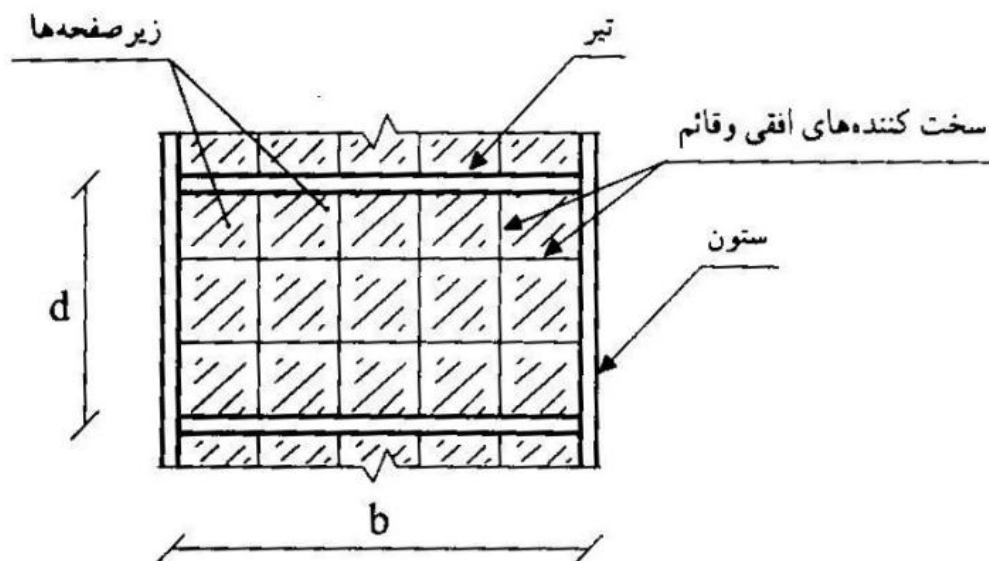
1- Steel Shear Walls(SSW) or Steel Plate Shear Walls(SPSW)

عرضی در تیر ورق کار می‌کنند. شکل (۱-۱)، یک نمونه تیرورق و دیوار برشی فولادی را نمایش می‌دهد [۲].



شکل ۱-۱ - یک نمونه تیر ورق قائم و دیوار برشی فولادی تحت بار جانبی [۲]

دیوار برشی فولادی می‌تواند همراه با سخت‌کننده و یا بدون آن استفاده شود. طراحان نوع دیوار برشی فولادی (دارای سخت‌کننده یا بدون آن) را با توجه به عملکرد لرزه‌ای، نیازهای معماری، مسایل اقتصادی، راحتی در ساخت، حمل و نقل و نصب آن انتخاب می‌کنند. شکل (۱-۲)، یک نمونه دیوار برشی فولادی دارای سخت‌کننده را نمایش می‌دهد [۲].



شکل ۱-۲ - یک نمونه دیوار برشی فولادی دارای سخت‌کننده [۱]

۱-۳- مزایای استفاده از دیوار برشی فولادی

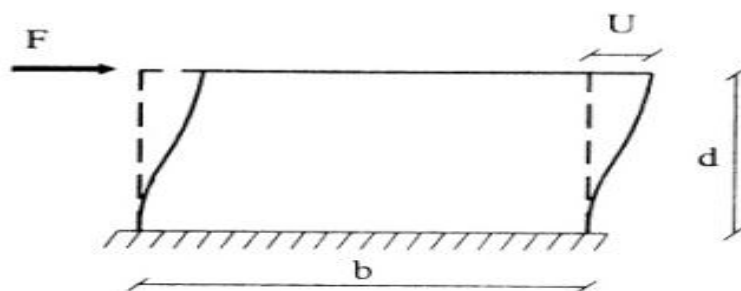
برخی از مزایای استفاده از دیوار برشی فولادی برای مقابله در برابر بارهای جانبی عبارتند از:

شکل پذیری و جذب انرژی زیاد

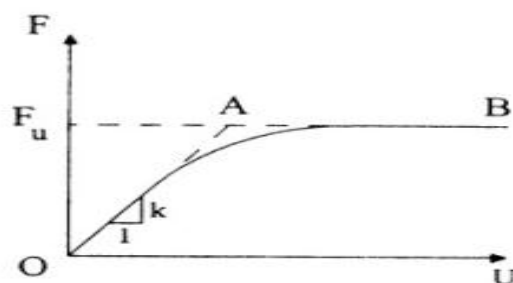
آزمایش‌های متعدد نشان می‌دهد، منحنی‌های هیستریزس دیوارهای مذکور تحت اثر بارهای رفت و برگشتی با ورق‌های نازک و یا با ورق‌های تقویت شده، کاملاً پایدار و میزان جذب انرژی در آنها بالا می‌باشد [۱].

سختی برشی و مقاومت بالا

دو عامل تعیین کننده در سیستم‌های مقاوم در برابر بارهای جانبی، سختی و مقاومت آنهاست که به کمک نمودار بار-تغییر مکان جانبی آنها تعیین می‌گردد. شکل (۱-۳)، یک نمونه از این نمودارها را در یک تصویر کلی نشان می‌دهد.



a سیستم تحت اثر بار جانبی



b دیاگرام بار - تغییر مکان

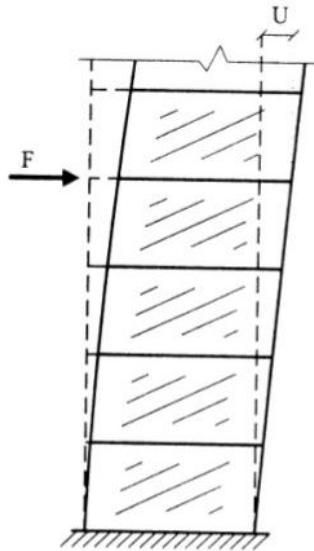
شکل ۱-۳- تصویر کلی نمودار بار-تغییر مکان جانبی سیستم [۱]

شیب خط OA در نمودار یاد شده، سختی سیستم مقاوم نامیده می شود و F_U مقاومت و یا بار نهایی سیستم می باشد. همان طور که در شکل (۱-۳-ب) مشاهده می گردد؛ رابطه ی بین نیرو و تغییر مکان جانبی در محیط الاستیک به صورت زیر است:

$$F = KU \quad (1-1)$$

برای تعیین سختی در هر تراز دلخواه می توان از رابطه ی (۱-۱) استفاده نمود (شکل ۱-۴).

$$K = \frac{F}{U} \quad (2-1)$$



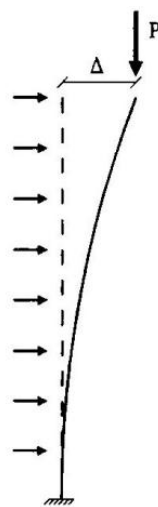
شکل ۱-۴ - تعیین سختی سیستم در هر تراز دلخواه [۱]

با توجه به لزوم کنترل تغییر مکان جانبی در ساختمان ها، سختی سیستم های مقاوم در برابر زلزله از اهمیت خاصی برخوردار می باشد. سیستم هایی که دارای سختی جانبی بیشتری می باشند، تغییر مکان جانبی آنها در برابر بارهای جانبی کمتر است. در موارد زیر، کنترل تغییر مکان جانبی اهمیت دارد:

- آسیب دیدن اجزای غیر سازه ای
- اثرات P-Δ
- حفظ تجهیزات و لوازم حساس در ساختمان های خاص

- تامین ایمنی

در عمل هنگامی که بارهای جانبی به سازه اعمال می‌گردد، سازه جابجا شده و در نتیجه بارهای قائم نسبت به محورهای قابها و دیوارها، خارج از محوری پیدا می‌نمایند. به دنبال آن، سازه تحت اثر لنگری اضافه قرار می‌گیرد. جابجایی اضافی، باعث لنگر داخلی بیشتر برای تعادل با لنگر اعمالی ناشی از بارهای قائم خواهد شد. این اثر بار قائم P ، بر تغییر مکان جانبی Δ به اثر $P-\Delta$ موسوم است. اثر یادشده در یک تیر طره در شکل (۱-۵) به صورت ساده نمایش داده شده است.



شکل ۱-۵ - اثر $P-\Delta$ [۱]

چنانچه سازه انعطاف‌پذیر و بار وزنی آن زیاد باشد، نیروهای اضافی ناشی از اثر $P-\Delta$ ممکن است باعث افزایش تنش‌ها بیش از حد مجاز در بعضی از اعضا شده و با ایجاد ناپایداری، موجب انهدام سازه شوند. بنابراین استفاده از سیستم‌های مقاومی که برابر نیروهای جانبی سختی بیشتر و تغییرمکان جانبی کمتری دارند، می‌تواند در کنترل این پدیده بسیار موثر باشند.

همچنین در صورت جابجایی قابل توجه سازه، اعضای غیرسازه‌ای نظیر درب‌ها، آسانسورها، تیغه‌ها، نماها، میانقاب‌ها و به خصوص تاسیسات ممکن است دچار آسیب‌های جدی گردند. در بعضی از ساختمان‌های خاص همچون بیمارستان‌ها، موزه‌ها، آزمایشگاه‌ها و غیره که تجهیزات و لوازم حساسی در آنها قرار دارد، جابجایی زیاد می‌تواند موجب خسارت جبران‌ناپذیر گردد. بدین لحاظ

استفاده از سیستم های مقاوم با سختی زیاد را الزامی می نماید. سیستم دیوار برشی فولادی، سختی و مقاومت بالایی دارد.

گرچه بیشتر پژوهشگران معتقدند که شتاب، مهمترین پارامتر نحوه پاسخ افراد به ارتعاش می باشد و ممکن است برای ساکنان ساختمان ها به خصوص سازه های بلند ایجاد انواع واکنش های نامطلوب نماید و باعث سلب آسایش آنها گردد ولی جابجایی زیاد نیز می تواند باعث عدم ایمنی گردد به خصوص در زلزله که نسبت به نوسان های باد، کمتر بروز نموده و زمان ارتعاش معمولا کمتر بوده ولی حرکات آن شدیدتر می باشد. بنابراین معیار طراحی در زلزله قبل از آسایش که معمولا در رابطه با باد مطرح است، ایمنی خواهد بود. تغییر مکان های جانبی را می توان با افزایش سختی کاهش داد ولی این افزایش سختی تاثیر مهمی بر کاهش شتابها نخواهد داشت [۱].

وزن کم

این سیستم، در مقایسه با دیوارهای برشی بتن مسلح، بسیار سبک تر است که منجر می شود ستون ها و پی ها، وزن کمتری را تحمل کنند. به عبارت دیگر، این سیستم باعث کاهش جرم سازه و نیروی لرزه ای وارد بر آن می شود [۲].

سرعت و سهولت در اجرا و نصب

استفاده از دیوارهای برشی فولادی پیچ شده در محل و جوش شده در کارخانه می تواند فرآیند نصب را سرعت ببخشد، هزینه ی ساخت را کاهش دهد و بازرسی در محل و کنترل کیفی آن را به شکل موثر امکان پذیر می سازد. مقاوم سازی لرزه ای سازه های موجود با این سیستم، در مقایسه با دیوارهای برشی بتن مسلح بسیار ساده تر و آسان تر است.

این سیستم برای مناطق سرد مناسب است زیرا ساخت بتن در دماهای پایین غیر اقتصادی است بنابراین در مقایسه با سیستم های بتنی، ساخت دیوارهای برشی فولادی با المان های جوش شده در کارخانه و پیچ شده در محل بسیار کارآتر است [۲].

حجم کم

ضخامت نسبتاً کم دیوارهای برشی فولادی در مقایسه با دیوارهای برشی بتن مسلح سبب می‌شود که این سیستم، فضای کمتری را اشغال کند. چنانچه از دیوارهای برشی بتن مسلح در سازه‌های بلند استفاده شود، دیوارهای برشی در طبقات پایین‌تر بسیار ضخیم می‌شوند و سطح زیادی از پلان طبقه را اشغال می‌کنند [۲].

تعدیل تنش

در این سیستم به علت گستردگی مصالح و اتصالات، تعدیل تنش به مراتب بهتر از سایر سیستم‌های مقاوم در برابر بارهای جانبی مانند قاب‌ها و انواع مهاربندها صورت می‌گیرد زیرا معمولاً در آن سیستم‌ها، مصالح به صورت دسته شده و اتصالات متمرکز می‌باشند [۱].

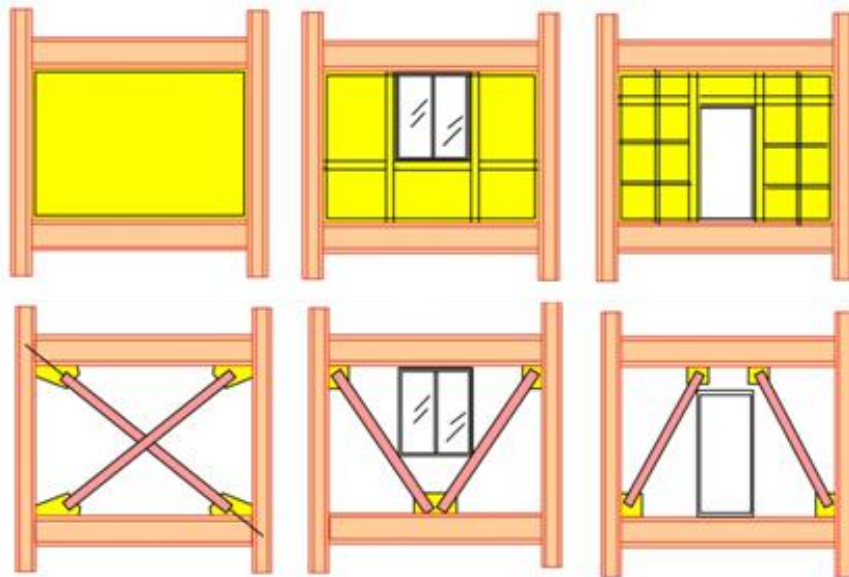
کاهش هزینه‌ها

تجربه بررسی اقتصادی استفاده از سیستم دیوارهای برشی فولادی به جای قاب ممان‌گیر در چند ساختمان نشان می‌دهد که با بکارگیری این سیستم، واحد قابل ملاحظه‌ای در مصرف فولاد صرفه‌جویی می‌شود. ساختمان ۲۵ طبقه‌ی هایات ریجنسی (Hyatt Regency) جز سازه‌های نسبتاً بلند به شمار می‌آید. در این سازه، استفاده از دیوارهای برشی فولادی به جای قاب ممان‌گیر، مصرف فولاد را از $1197 \frac{N}{m^2}$ به $790 \frac{N}{m^2}$ کاهش داده، به عبارت دیگر حدود ۳۴٪ در استفاده از فولاد صرفه‌جویی شده است.

در بیمارستان ۶ طبقه آلیووویو (Olive View) که جز سازه‌های نسبتاً کوتاه محسوب می‌شود میزان کاهش فولاد به مراتب بیشتر بوده به طوری که با استفاده از دیوارهای برشی فولادی به جای قاب ممان‌گیر، مصرف فولاد از $1915 \frac{N}{m^2}$ به $957 \frac{N}{m^2}$ کاهش یافته یعنی حدود ۵۰٪ در مصرف فولاد صرفه‌جویی شده است [۱].

ایجاد بازشو

در سیستم‌های مهاربندی، محدودیت ایجاد بازشو وجود دارد. به ندرت می‌توان در مهاربند شکل بازشو ایجاد کرد اما به راحتی می‌توان در هر قسمت پانل دیوار برشی فولادی، بازشو ایجاد نمود و در صورت نیاز از سخت‌کننده استفاده نمود. شکل (۱-۶)، این مطلب را نشان می‌دهد [۲].



شکل ۱-۶- ایجاد بازشو در سیستم‌های مقاوم جانبی مختلف [۲]

۱-۴- هدف‌ها و روش پژوهش

در چهار دهه اخیر، دیوار برشی فولادی به عنوان یک سیستم مقاوم در برابر بارهای جانبی (باد و زلزله) بویژه در ساختمان‌های بلند مورد توجه است. سرعت و سهولت در اجرا و نصب، تعدیل تنش، شکل‌پذیری بالا، امکان ایجاد بازشو و... از ویژگی‌های این سیستم می‌باشد. ایجاد بازشو در دیوارهای یادشده به دلایل معماری (نصب در و پنجره) و یا عبور تأسیسات، به عنوان یک مسئله مطرح است. هدف این پایان‌نامه، بررسی ایجاد بازشو به منظور عبور تأسیسات می‌باشد. از این‌رو، اثر ایجاد بازشو در اطراف المان‌های مرزی (تیر و ستون) بررسی می‌شود و پارامترهایی همچون موقعیت بازشو، شکل بازشو، بکارگیری و یا عدم استفاده از سخت‌کننده در بازشو مورد مطالعه قرار می‌گیرد تا تاثیر آن در

سختی الاستیک و مقاومت دیوار برشی فولادی تعیین گردد. به این منظور، نرم افزار قدرتمند اجزای محدود ABAQUS برای مدلسازی انتخاب شده است. مقایسه‌ای میان نتایج مدل نرم‌افزاری و نتایج یک نمونه آزمایشگاهی معتبر صورت می‌گیرد تا صحت مدلسازی آشکار گردد. به منظور دستیابی به هدف پایان‌نامه، مدلسازی و تحلیل استاتیکی غیرخطی (Pushover) توسط نرم‌افزار ABAQUS صورت گرفته است. با آنالیز عددی بر روی مدل‌ها، تأثیر پارامترهای یاد شده در رفتار این سیستم تعیین می‌شود.

۱-۵- ساختار پایان‌نامه

ساختار این پایان‌نامه به شرح زیر می‌باشد:

فصل اول: در این فصل، دیوار برشی فولادی به عنوان یک سیستم مقاوم جانبی معرفی شده و ویژگی‌های بکارگیری آن در مقایسه با سایر سیستم‌ها بیان شده و در مرحله‌ی بعد، به شرح مسئله پایان‌نامه و روش پژوهش پرداخته شده است.

فصل دوم: نمونه‌هایی از به‌کارگیری دیوار برشی فولادی در برخی از سازه‌های جهان به منظور نوسازی و یا مقاوم‌سازی اشاره می‌شود. در ادامه، مدل‌های تحلیلی ارائه شده، برخی آزمایش‌های صورت گرفته در جهان و همچنین پاره‌ای از مسائل پیرامون این سیستم بیان می‌گردد.

فصل سوم: ابتدا به معرفی نرم‌افزار ABAQUS و علت انتخاب آن جهت مدلسازی پرداخته می‌شود. در ادامه، مشخصات نمونه‌ی آزمایشگاهی منتخب جهت مدلسازی ارائه می‌گردد. سپس مبانی مدلسازی شرح داده می‌شود، و در انتهای فصل، مقایسه‌ای میان نتایج نرم‌افزار و نمونه آزمایشگاهی صورت می‌گیرد تا صحت مدلسازی روشن گردد.

فصل چهارم: در این فصل، تأثیر ایجاد بازشو در اطراف المان‌های مرزی (تیر و ستون) در رفتار دیوار برشی فولادی بررسی می‌شود. اثر پارامترهایی همچون موقعیت بازشو، شکل بازشو، اثر بکارگیری

سخت کننده و یا عدم استفاده از آن مورد مطالعه قرار می گیرد. نتایج بدست آمده از تحلیل استاتیکی غیرخطی (Pushover) مدل ها با نرم افزار ABAQUS، در این فصل ارائه می شود.

فصل پنجم: در این فصل، نتیجه گیری مربوط به پایان نامه ارائه می شود و در پایان، پیشنهادهایی برای کارهای پژوهشی آتی ارائه می گردد.

**فصل دوم - مروری بر پژوهش‌های انجام شده
در زمینه دیوار برشی فولادی**

۲-۱- پیش‌گفتار

تحقیق‌ها بر روی دیوارهای برشی فولادی از اوایل دهه ۱۹۷۰ آغاز شده است. در این بخش، اشاره‌ی مختصری به مطالعات تحلیلی و آزمایشگاهی در این زمینه خواهد شد. منظور از پژوهش‌های تحلیلی، کارهای تئوری غیرآزمایشگاهی است که به جنبه‌های مختلف رفتار دیوارهای برشی فولادی می‌پردازد. هدف اصلی این گونه تحقیق‌ها آن است که تحلیل و طراحی سیستم‌های دیوار برشی فولادی به‌سادگی و بدون نیاز به تعریف پیچیدگی‌های زیاد قابل انجام باشد.

۲-۲- ساختمان‌هایی با سیستم دیوار برشی فولادی

دیوار برشی فولادی یک سیستم مقاوم در برابر بارهای جانبی است. این دیوارها، در ساخت سازه‌های نوساز و هم در تقویت سازه‌های موجود جهان، به‌خصوص در کشورهای زلزله‌خیز به‌صورت گسترده مورد استفاده قرار گرفته است؛ علت آن، رفتار مناسب و مزایای خوب این سیستم می‌باشد. در

این بخش، به تعدادی از این سازه‌ها و رفتار آنها در زلزله‌های گذشته اشاره می‌گردد.

۱-۲-۲- کاربرد دیوارهای برشی فولادی به منظور نوسازی

مطالعه‌ی سرگذشت بیمارستان آلیووویو (Olive View) واقع در سیلمار (Sylmar) انتهای شمال غربی دره سان‌فرناندو در منطقه لوس‌آنجلِس کالیفرنیا، یکی از آموزنده‌ترین مطالب در رابطه با رفتار ساختمانها در برابر زلزله می‌باشد.

این ساختمان در نوامبر ۱۹۷۰ به بهره‌برداری رسید و پس از ۱۰ هفته، بر اثر زلزله‌ی نهم فوریه ۱۹۷۱ تخریب گردید. ساختمان این بیمارستان از مشهورترین ساختمانهای تخریب شده در زلزله سان‌فرناندو بود که در آن علاوه بر تعدادی زخمی، سه نفر کشته شدند که از بین آنها دو نفر بیمار و یک نفر از کارمندان بیمارستان بودند، با توجه به اینکه زلزله در ساعات اولیه روز (ساعات کم‌ترافیک انسانی) اتفاق افتاد، تلفات به سه نفر محدود گشت. در غیر این صورت به مراتب بالاتر می‌بود. شکل (۱-۲) و (۲-۲)، قسمتی‌هایی از تخریب سازه در اثر زلزله‌ی یاد شده را نمایش می‌دهد.



شکل ۱-۲- ستون‌های تخریب شده در ساختمان اصلی [۱]



شکل ۲-۲- تخریب پارکینگ آمبولانس‌ها (ساختمان جانبی) [۱]

در اوایل دهه‌ی ۸۰ میلادی، این بیمارستان مجدداً در همان محل قبلی ساخته شد. با مطالعه و بررسی بسیار، برای جلوگیری از خرابی مجدد بیمارستان در زلزله‌های احتمالی بعدی از دیوارهای برشی فولادی برای مقابله با نیروهای جانبی استفاده گردید. در دیوارهای برشی فولادی بکار رفته از بازشو برای نصب پنجره استفاده شده است. در صورت استفاده از دیوارهای برشی بتنی به جای دیوارهای برشی فولادی، ضخامت دیوارهای یاد شده قابل توجه و مقدار آرماتور لازم در آنها نیز بسیار زیاد می‌گردید. در اطراف بازشوها نیز، لزوم استفاده از آرماتور اضافی برای تقویت دیوار برشی بتنی اجتناب‌ناپذیر می‌بود. علاوه بر آن، استفاده از دیوارهای برشی ضخیم باعث افزایش وزن ساختمان می‌شود که طبیعتاً افزایش نیروهای ناشی از زلزله را به دنبال خواهد داشت. همچنین با توجه به مطالعات طراح، در صورتی که در ساخت مجدد بیمارستان از قاب‌های ممان‌گیر استفاده می‌شد؛ مقدار مصرف فولاد در هر مترمربع زیر بنا حدوداً 1915 N/m^2 می‌گردید ولی با توجه به استفاده از سیستم دیوارهای برشی فولادی، مصرف فولاد در هر مترمربع به $957/5 \text{ N/m}^2$ کاهش یافت به عبارت دیگر ۵۰٪ در مصرف فولاد صرفه‌جویی بعمل آمد. علاوه بر آن، استفاده از این سیستم با توجه به سختی برشی بالای آن نسبت به قابهای ممان‌گیر و طبیعتاً تغییر مکانهای کم، پیش‌بینی می‌شد که در صورت وقوع زلزله‌های بعدی به اجزاء غیرسازه‌ای نیز خسارت کمتری وارد گردد.

این بیمارستان در ۱۷ ژانویه ۱۹۹۴ دوباره تحت اثر زلزله قوی نرت‌بریج (Northridge) کالیفرنیا قرار

گرفت. در زلزله‌ی یاد شده، شتاب اندازه‌گیری شده زمین در محل پارکینگ بیمارستان که فقط چندمتر تا ساختمان اصلی فاصله دارد در جهت افقی دارای مقدار ماکزیمم $0.91g$ و در جهت قائم دارای مقدار ماکزیمم $0.60g$ بود. مقادیر شتاب ماکزیمم اندازه‌گیری شده در محل بام ساختمان اصلی بیمارستان در جهت افقی $2/3g$ و در جهت قائم $1/7g$ بود. با وجود این ارتعاشات قوی، هیچ‌گونه خسارت سازه‌ای وجود نداشت. خسارت وارده به اجزاء غیرسازه‌ای آن از جمله تأسیسات و غیره بسیار ناچیز بود. این امر، برخلاف رفتار بسیار بد ساختمان در زلزله‌ی قبلی می‌باشد. سرگذشت این بیمارستان، مؤید آن است که استفاده از دیوارهای برشی فولادی در سازه‌ی ساختمانها، قابل اطمینان بوده و نه تنها صرفه‌جوئی قابل ملاحظه‌ای را در مصرف فولاد به‌همراه دارد بلکه رفتار آنها را نیز در برابر نیروهای ناشی از زلزله کاملاً بهبود بخشیده است و در کاهش خسارات نقش بسزایی ایفا می‌نماید.

ساختمانهای بسیار دیگری در سطح جهان با استفاده از سیستم دیوارهای برشی فولادی ساخته شده‌اند که از جمله‌ی آنها می‌توان به موارد زیر اشاره نمود.

- ساختمان مرکزی ۵۴ طبقه بانک وانملون (One Melon) در پیتسبورگ پنسیلوانیای آمریکا
- ساختمان مسکونی ۵۱ طبقه واقع در سان فرانسیسکو
- ساختمان ۲۵ طبقه در ادمونتون (Edmonton) کانادا
- ساختمان ۳۲ طبقه بایرهوچ‌هوس (Bayer Hochhaus) در لورکوزن آلمان
- ساختمان ۲۰ طبقه دادگاه فدرال در سیاتل آمریکا
- ساختمان ۱۵ طبقه بیمارستان C-H مافیت در سان فرانسیسکو آمریکا [۲۱]

۲-۲-۲- کاربرد دیوارهای برشی فولادی به‌منظور مقاوم‌سازی

بسیاری از ساختمانهای موجود به کمک سیستم دیوارهای برشی فولادی در مقابل بارهای جانبی به‌خصوص زلزله تقویت شده‌اند که در زیر برای نمونه به دو مورد از آنها اشاره می‌شود.

ساختمان مرکز درمانی در چارلستون

پس از زلزله ۱۹۷۱ سان‌فرناندو که در آن دو بیمارستان تخریب گردید و بر اثر آن ۴۶ نفر جان خود را از دست دادند، تصمیم گرفته شد تا ساختمان کلیه بیمارستانها از نظر مقاومت در برابر زلزله بررسی و در صورت نیاز تقویت شوند. در این بازنگری، از جمله ساختمانهایی که نیاز به تقویت جدی داشت، مربوط به یک مرکز درمانی در چارلستون واقع در جنوب کارولینا بود. در سال ۱۹۶۳ این بیمارستان ساخته شده است و متشکل از ساختمانهای متعددی از یک تا ۵ طبقه می‌باشد.

اسکلت ساختمان اصلی بیمارستان از نوع بتن مسلح و سقفها از نوع دال بتنی مسطح می‌باشند. سیستم مقاوم در مقابل بارهای جانبی از نوع قاب ممان‌گیر همراه با دیوارهای اطراف پله‌ها بوده که صرفاً برای بار باد طراحی شده‌اند.

پس از مطالعه و بررسی، با وجود آن‌که شاید مناسب‌ترین روش تقویت ساختمانهای بتنی در مقابل بارهای جانبی استفاده از دیوارهای برشی بتنی باشد اما به دلایل زیر تصمیم گرفته شد که در تقویت بیمارستان نامبرده به‌جای دیوار برشی بتنی از دیوارهای برشی فولادی استفاده شود:

(۱) دیوارهای برشی فولادی امکان ساخت در کارخانه و نصب سریع و تمیز را در محل بوجود می‌آورند، به‌دلیل جلوگیری از اخلال در کار روزانه بیمارستان و کاهش مشکلات برای بیماران، این نوع دیوار انتخاب شد.

(۲) طبق پیش‌بینی بعمل آمده، تعداد ۶۰ دیوار برشی برای تقویت ساختمان اصلی بیمارستان مورد نیاز بود. استفاده از دیوار برشی فولادی به مراتب اتلاف فضای کمتری را به همراه داشت، از این‌رو به‌منظور جلوگیری از کاهش زیربنای مفید و اتلاف فضاها این سیستم بکار گرفته شد.

(۳) در دیوارهای برشی فولادی به‌سادگی می‌توان تغییرات موردنظر را از جمله جابجایی و یا ایجاد بازشو به دلایل مختلف از جمله عبور تأسیسات انجام داد. این تغییرات در دیوارهای

برشی بتنی به مراتب سخت‌تر و یا گاهی غیرممکن است. از این‌رو، به منظور پیش‌بینی امکان تغییرات در آینده، این سیستم برگزیده شد [۱].

ساختمان کتابخانه ایالتی اورگان (Oregon)

ساختمان کتابخانه ایالتی اورگان (Oregon) آمریکا، واقع در سیلم (Salem) در سال ۱۹۳۷ بنا گردیده است و ضرورت حفظ آن به لحاظ تاریخی احساس می‌شد. بدین لحاظ، سازه‌ی آن برای بارهای جانبی ناشی از زلزله مورد مطالعه قرار گرفت.

این سازه از نوع بتنی با تیرها و ستونهای مستطیل شکل بود و با بررسی آن مشاهده گردید که مقاومت ساختمان در مقابل بارهای جانبی زلزله ناچیز است. لذا تصمیم گرفته شد، با فرض عدم استحکام ساختمان نامبرده در مقابل بارهای جانبی، سازه آن مورد تقویت قرار گیرد. روش‌های زیادی مورد مطالعه قرار گرفت. سیستم دیوارهای برشی فولادی به عنوان بهترین سیستم تشخیص داده شد. در زیر به پاره‌ای از این دلایل اشاره می‌شود:

۱) حفظ تجهیزات داخلی ساختمان به لحاظ کنترل تغییرمکان از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بود، از این‌رو با توجه به سختی قابل توجه دیوارهای برشی فولادی، این کنترل بخوبی انجام گرفت.

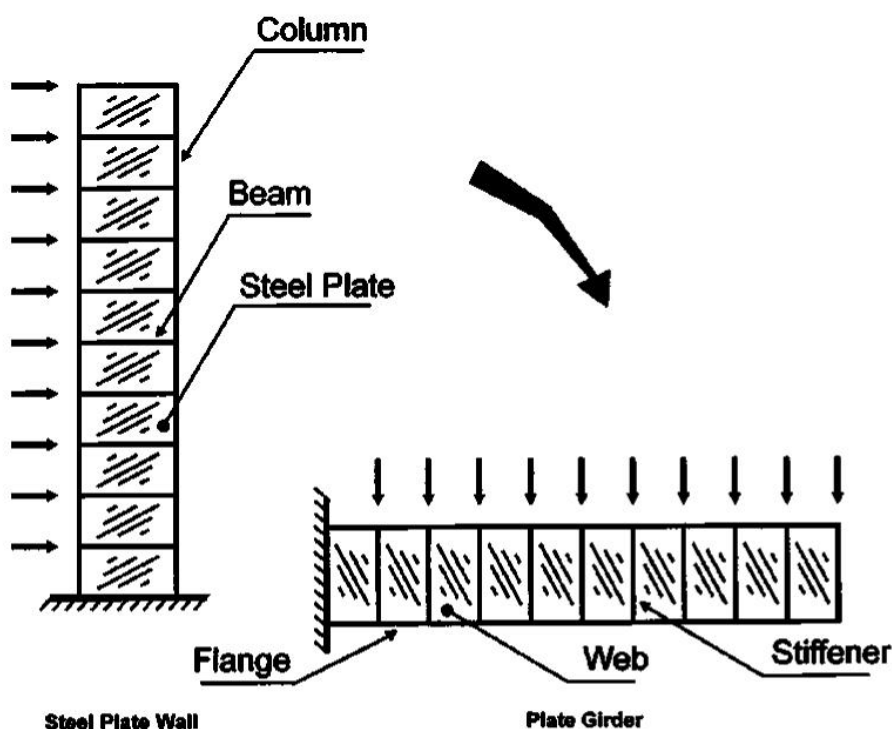
۲) باز بودن و سرویس‌دهی کتابخانه در زمان تقویت ساختمان، یک ضرورت بود. ساخت قطعات در کارخانه، نصب پاکیزه و بدون ریخت‌وپاش دیوار برشی فولادی در محل، این خواسته را برآورده کرد.

۳) در انتخاب سیستم مقاوم جانبی سعی می‌شد تا از اشغال فضا و زیربنا تا حد امکان جلوگیری شود، از این‌رو ظرفیت دیوارهای برشی فولادی در مقایسه با سیستم‌های دیگر همچون دیوار برشی بتنی این نیاز را هم تامین می‌کرد.

در تقویت ساختمان نامبرده، دیوارهای برشی فولادی طوری طراحی گردیدند که بدون نیاز به ماشین‌آلات سنگین که می‌توانست باعث اختلال در کار روزانه کتابخانه گردد، قطعات بصورت جداگانه در کارخانه ساخته و حداکثر با دو کارگر حمل و نصب شود [۱ و ۳].

۳-۲- مقایسه‌ی رفتار تیر ورق‌ها با دیوارهای برشی فولادی

سیستم دیوار برشی فولادی شامل یک پانل ورق فولادی، ستون‌های مرزی و تیرهای افقی طبقه می‌باشد. ورق فولادی و ستون‌های مرزی آن به عنوان یک تیر ورق قائم عمل می‌کنند. ستون‌ها به عنوان بال‌های تیر ورق، ورق فولادی به عنوان جان و تیرهای افقی طبقه تقریباً به عنوان سخت‌کننده‌های عرضی در تیر ورق کار می‌کنند. شکل (۳-۲)، مشابهت این سیستم را با تیرورق طره نمایش می‌دهد.



شکل ۳-۲- مشابهت سیستم دیوار برشی فولادی با تیر ورق طره [۴]

با وجود شباهت دیوارهای برشی فولادی با تیر ورق‌ها، تفاوت‌هایی میان این دو وجود دارد که عبارتند از:

(۱) تیرورق‌ها به‌ندرت در معرض نیروی محوری قرار می‌گیرند در حالی که دیوارهای برشی در اکثر مواقع به دلیل نیروی جاذبه در معرض نیروی محوری قرار دارند. ستون‌های مرزی این سیستم معمولاً نیروی محوری و دیوارهای برشی فولادی تنها برش و خمش را تحمل می‌کنند. در تحلیل، باید

اثرات $P - \Delta$ ناشی از نیروی محوری ستون‌های مرزی بر روی پایداری کلی سیستم دیوار برشی در نظر گرفته شود.

۲) بال تیوروق‌ها معمولاً سختی خمشی کمی در صفحه‌ی جان دارند. همانطور که پیش‌تر اشاره شد؛ در یک دیوار برشی فولادی، ستون‌های مرزی همانند بال‌های تیر ورق عمل می‌کنند. ستون‌های این سیستم در مقایسه با بال‌های تیوروق، مقاومت و سختی خمشی درون صفحه‌ای بزرگ‌تری دارند که این مقاومت و سختی خمشی ستون‌های مرزی، درعرض و زاویه‌ی میدان کششی تاثیرگذار است.

۳) امروزه سخت‌کننده‌های تیر ورق، ورق‌هایی هستند که به یک طرف جان جوش داده می‌شوند. اما در دیوارهای برشی، تیرهای طبقه نقش سخت‌کننده‌ها را ایفا می‌کنند. تیرهای طبقه به تنهایی و یا در صورتی که دال طبقه به آن‌ها متصل باشد به عنوان یک سخت‌کننده بسیار قوی در مقایسه با سخت‌کننده‌های تیر ورق رفتار می‌کنند. سختی و مقاومت تیرهای طبقه بر روی شرایط مرزی جهت کمانش ورق اثر می‌گذارد. در سیستم دیوار برشی، تیرهای طبقه تقریباً یک مرز ثابت را برای ورق فولادی فراهم می‌کنند. تیرهای طبقه قوی و سخت، مهار بهتری را برای میدان کششی فراهم می‌نماید به‌ویژه پس از آن که دیوار برشی فولادی در طبقه‌های بالا و پایین کمانش می‌کند.

۴) تیوروق‌ها عموماً تحت بارگذاری یکنواخت یا بارگذاری از نوع خستگی با شدت کم مورد مطالعه قرار می‌گیرند در حالی که دیوارهای برشی تحت بارگذاری چرخه‌ای غیرالاستیک نسبتاً بزرگ مورد بررسی قرار می‌گیرند.

معادلات تیوروق‌ها ممکن است ظرفیت دیوارهای برشی را کمتر از ظرفیت واقعی آن‌ها پیش‌بینی کند. تخمین ظرفیت این سیستم با چنین شرایطی تا حدی منجر به طراحی محافظه‌کارانه می‌شود. اگرچه در طراحی، اصول و مولفه‌های دیگری هم به‌منظور افزایش مقاومت دیوار برشی بکاربرده می‌شود. از این‌رو، نیاز است ظرفیت واقعی دیوار برشی فولادی با استفاده از مدل پیشرفته‌تری از رفتار این سیستم بدست آید [۵].

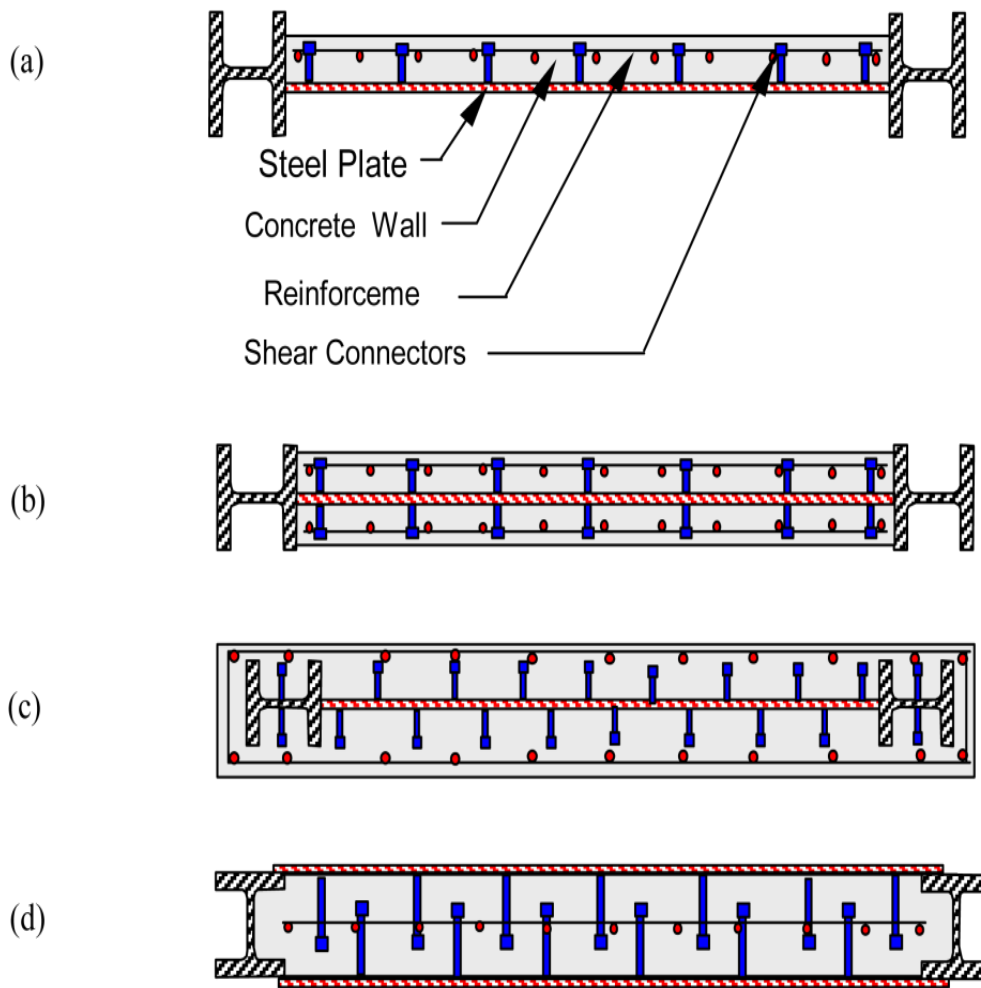
برمن (Berman) و برونو (Bruneau) [۵] در سال ۲۰۰۴ از طریق مطالعات تحلیلی نشان دادند که شباهت دیوارهای برشی فولادی با تیروورق کیفی است و نه کمی. همانطور که در پیش‌تر اشاره شد؛ بال‌های تیر ورق، ورق‌هایی هستند که سختی خمشی کمی در درون صفحه‌ی جان دارند در حالی که المان‌های مرزی سیستم دیوارهای برشی فولادی معمولاً مقاطع بال پهن یا مقاطع سازه‌ای توخالی با سختی خمشی درون صفحه‌ای قابل توجه هستند. زاویه انحراف میدان کششی در تیروورق‌ها چندان تحت تأثیر بال‌ها و سخت‌کننده‌های جان نیست اما در این سیستم، زاویه انحراف میدان کششی شدیداً تحت تأثیر المان‌های مرزی است. معادله‌ی مربوط به مقاومت تیر ورق‌ها، مقاومت دیوارهای برشی فولادی را کمتر از مقدار واقعی برآورد می‌کند. برمن و برونو معتقدند که طراحی این سیستم براساس ضوابط طراحی تیروورق‌ها (AISC1999) می‌تواند منجر به طراحی غیر اقتصادی و محافظه‌کارانه شود. آن‌ها برای طراحی لرزه‌ای سیستم باربر جانبی نامبرده، مدلسازی به روش نواری را پیشنهاد می‌کنند. در ادامه، به مدلسازی نواری اشاره خواهد شد.

۲-۴- معرفی دیوارهای برشی فولادی کامپوزیت

دیوارهای برشی کامپوزیت^۱ (C-SPW) شامل یک دیوار برشی فولادی و یک دیوار بتن مسلح است که این دیوار بتنی از یک طرف و یا هر دو طرف توسط اتصالات مکانیکی (همچون گل‌میخ یا بولت) به ورق فولادی متصل شده است. دیوار بتنی، مهار لازم را برای ورق فولادی تامین می‌کند و با این روش از کمانش ورق فولادی پیش از تسلیم جلوگیری می‌شود.

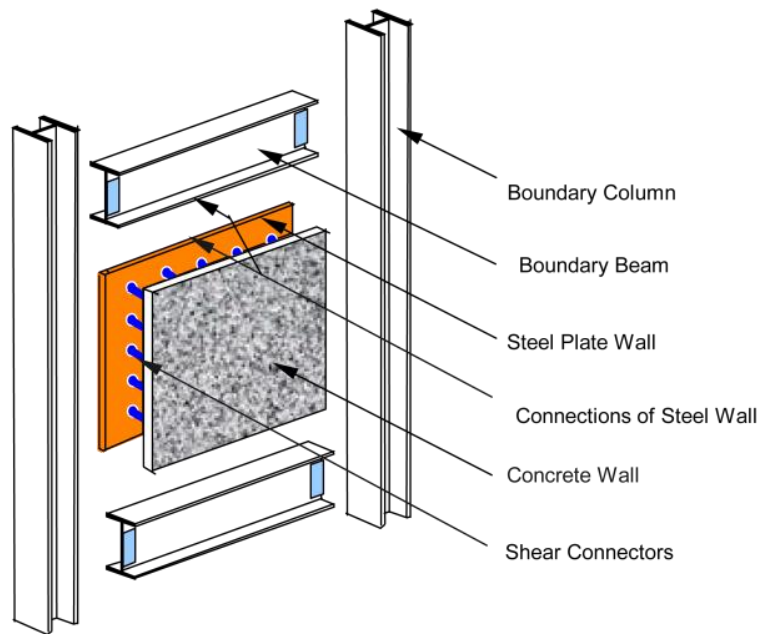
دیوارهای برشی کامپوزیت به عنوان یک سیستم مقاوم در برابر بارهای جانبی در ساختمان‌ها بکار برده شده‌اند اما بکارگیری این سیستم هنوز چندان رایج نیست. در شکل (۲-۴)، نمونه‌هایی از انواع دیوار برشی فولادی کامپوزیت نشان داده شده است.

1- Composite Steel Plate Shear Walls



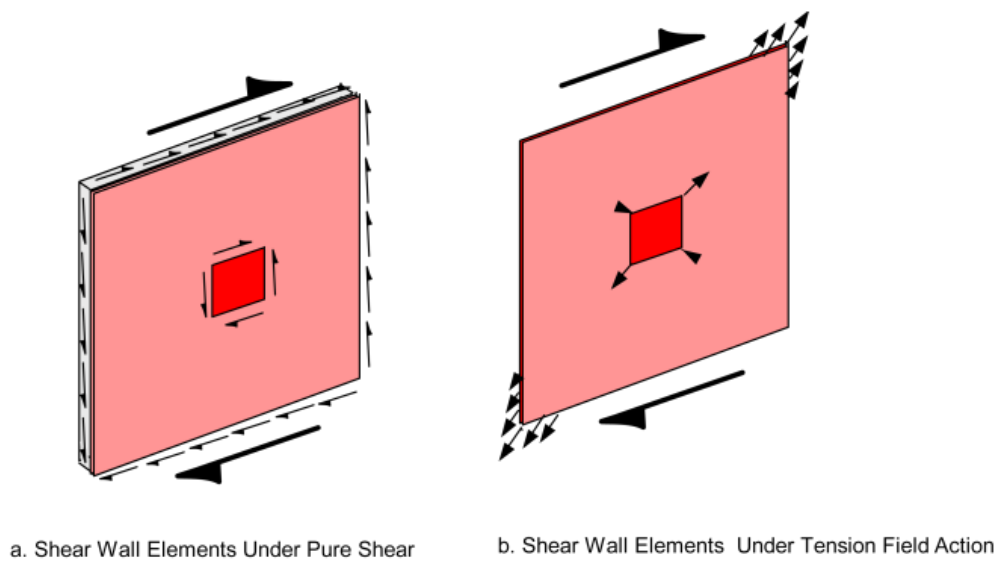
شکل ۲-۴- انواع دیوارهای برشی کامپوزیت [۶]

اجزای اصلی دیوار برشی کامپوزیت عبارتند از دیوار فولادی، دیوار بتنی، اتصال دهنده‌های برشی، ستون‌های مرزی، تیرهای مرزی، اتصال‌های دیوار فولادی به تیرها و ستون‌های مرزی و اتصال‌های تیر به ستون. دیوار برشی فولادی به ستون‌ها و تیرهای مرزی توسط پیچ و یا جوش متصل می‌شود. نقش اصلی این اتصال‌ها، انتقال برش و کشش است. دیوار بتنی به دیوارهای مرزی با استفاده از قطعات اتصال دهنده‌ی مکانیکی وصل می‌شود. این اتصال‌ها، برشی را که توسط آرماتورهای داخل دیوار تحمل می‌شود را منتقل می‌کنند. شکل (۲-۵)، اجزای اصلی این سیستم را نشان می‌دهد.



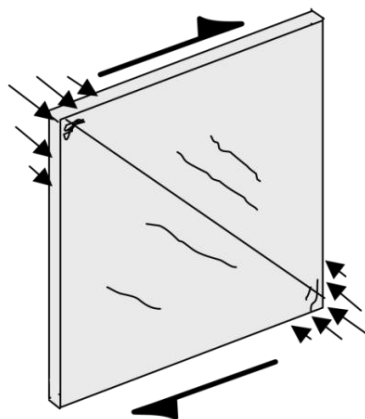
شکل ۲-۵- مولفه‌های اصلی دیوار برشی فولادی کامپوزیت معمولی [۶]

نقش اصلی ورق فولادی در یک دیوار برشی کامپوزیت آن است که مقاومت برشی، سختی و شکل‌پذیری برشی را تامین کند. ورق فولادی در یک دیوار برشی کامپوزیت، برش طبقه را با تسلیم برشی تحمل می‌کند. در دیوار برشی فولادی، برش طبقه از طریق میدان کششی قطری تحمل می‌شود. شکل (۲-۶)، رفتار ورق فولادی را در دیوارهای برشی کامپوزیت و فولادی نمایش می‌دهد.



شکل ۲-۶- مقاومت برشی ورق فولادی در (a) دیوار برشی کامپوزیت (b) دیوار برشی فولادی [۶]

دیوار بتنی مانند سخت‌کننده عمل می‌کند و از کمانش ورق جلوگیری می‌کند. همچنین دیوار بتنی، مقداری از برشی طبقه را توسط میدان فشاری قطری تحمل می‌کند. شکل (۲-۷)، میدان فشاری قطری در بتن را نمایش می‌دهد [۶].



شکل ۲-۷- برش اعمالی و میدان فشاری بتن [۶]

برخی از مزایای دیوارهای برشی کامپوزیت به شرح زیر است:

۱) این سیستم در مقایسه با دیوارهای برشی بتن مسلح (با ظرفیت برشی برابر) دارای سختی برشی احتمالاً بزرگ‌تر، ضخامت کوچکتر و وزن کمتری است. ضخامت کمتر این سیستم یک مزیت بزرگ از لحاظ معماری است زیرا فضای قابل استفاده‌ی بیشتری را به ویژه در ساختمان‌های بلند فراهم می‌کند. وزن کمتر دیوار برشی کامپوزیت منجر به کاهش نیروی لرزه‌ای می‌شود که این امر منجر به پی کوچکتر خواهد شد.

۲) در یک دیوار برشی کامپوزیت می‌توان از دیوارهای بتنی پیش ساخته و یا بتن درجا استفاده کرد. از آنجایی که دیوارهای برشی ورق فولادی می‌توانند سختی و پایداری را در طی نصب فراهم کنند، ساخت دیوارهای بتن مسلح می‌تواند خارج از مسیر کارگاه و به طور مستقل از ساخت سازه‌ی فولادی انجام شود. بویژه چنانچه از دیوارهای بتنی پیش ساخته استفاده شود، این دیوارها در هر زمان از مرحله ساخت می‌توانند به راحتی به دیوارهای برشی فولادی پیچ شوند.

۳) پس از کمانش راستای قطر فشاری در دیوارهای برشی فولادی، برش طبقات توسط عمل میدان کششی پانل تحمل می‌شود. در حالی که در دیوارهای برشی کامپوزیت، دیوار بتنی از کمانش ورق قبل از تسلیم جلوگیری می‌کند، از این رو ورق فولادی، برش طبقه را توسط تسلیم برشی تحمل می‌کنند. به علاوه آن که دیوار بتنی مسلح می‌تواند عایق حرارت و ضدآتش برای دیوارهای برشی فولادی باشد.

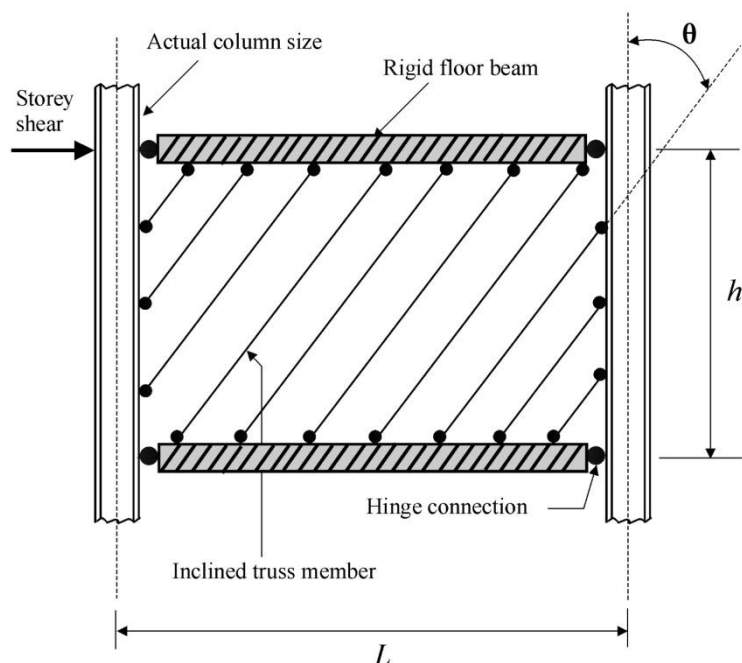
۴) پس از وقوع یک زلزله متوسط و رایج، دیوارهای برشی فولادی شروع به کمانش می‌کنند و دیوارهای برشی بتنی ترک می‌خورند. از این رو نیاز به بررسی و تعمیر می‌باشد. چنین تعمیراتی از نظر هزینه‌های مربوط به ساخت گران است. علاوه بر آن، قطع عملکرد سازه و اشغال فضا به منظور تعمیر، هزینه بر است. تحت یک چنین زلزله‌هایی در دیوارهای برشی کامپوزیت بویژه در سیستم نوین آن، خسارت تنها به تسلیم برشی ورق فولادی محدود می‌شود، هیچ ترکی در دیوار بتنی ایجاد نمی‌شود و خسارتی به المان‌های دیگر سیستم وارد نمی‌آید. یک چنین عملکردی بسیار مطلوب است زیرا ساختمان پس از وقوع چنین حوادثی می‌تواند به کار خود ادامه دهد.

۲-۵- مدل نواری

توسعه‌ی روش مدلسازی چند نواری برای دیوار برشی فولادی نازک بدون سخت‌کننده، گامی بزرگ بسوی طراحی لرزه‌ای ساختمان‌های دارای دیوار برشی فولادی بود. این روش مدلسازی براساس تئوری میدان کششی قطری پیشنهادی توسط واگنر (Wagner) در سال ۱۹۳۱ است که بعداً توسط افراد دیگر بهبود یافت.

توربن (Thorburn) و همکاران در سال ۱۹۸۳، یک مدل تحلیلی ساده برای مطالعه‌ی رفتار برشی دیوارهای برشی فولادی نازک بدون سخت‌کننده پیشنهاد دادند. در روش پیشنهادی یاد شده، رفتار میدان کششی پانل توسط یک سری اعضای کششی دوسر مفصل مورب مدل می‌شود. نوارها، موازی با جهت راستای میدان کششی هستند. در این مدل پیشنهادی، فرض می‌شود که تیرهای مرزی

از نظر خمشی کاملاً صلب هستند و به‌طور مفصلی به ستون‌ها متصل شده‌اند. به ستون‌های مرزی، سختی واقعی آن‌ها اختصاص داده می‌شود. با فرض آن که پانل پرکننده‌ی دیوار برشی فولادی تحت بار فشاری قطری کمانش می‌کند، زاویه‌ی انحراف میدان کششی محاسبه می‌شود. شکل (۲-۸)، مدل پیشنهادی تربرن را نمایش می‌دهد.



شکل ۲-۸- مدل تحلیلی نواری، ارائه شده توسط تربرن (Thorburn) و همکاران در سال ۱۹۸۳ [7]

برپایه‌ی فرضیاتی که پیش‌تر یاد شد، زاویه‌ی انحراف (θ) برای میدان کششی بدست می‌آید.

$$\tan^4 \theta = \frac{1 + \frac{Lt}{2A_c}}{1 + \frac{ht}{A_b}} \quad (1-2)$$

t ضخامت ورق پرکننده، A_c مساحت مقطع ستون، A_b مساحت مقطع تیر، L عرض دهانه و h ارتفاع طبقه است. رابطه (۱-۲) با استفاده از اصول کار حداقل بدست آمده است. لازم به توضیح است که تنها انرژی میدان کششی و انرژی محوری تیرها و ستون‌ها در محاسبه‌ی این رابطه در نظر گرفته شده است.

تیملر (Timler) و کولاک (Kulak) در سال ۱۹۸۳، یک نمونه‌ی دیوار برشی فولادی یک طبقه بزرگ مقیاس را تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار دادند و اعتبار مدل چند نواری ارائه شده توسط تربرن (Thorburn) و همکاران (سال ۱۹۸۳) را بررسی کردند، آن‌ها با در نظر گرفتن انرژی کرنشی خمشی ستون‌های مرزی رابطه‌ی مربوطه را اصلاح کردند.

$$\tan^4 \theta = \frac{1 + \frac{tL}{2A_c}}{1 + th \left[\frac{1}{A_b} + \frac{h^3}{360I_c L} \right]} \quad (2-2)$$

t ضخامت ورق پرکننده، A_c مساحت مقطع ستون، A_b مساحت مقطع تیر، L عرض دهانه، h ارتفاع طبقه، I_c ممان اینرسی ستون مرزی در راستای عمود بر صفحه‌ی جان و θ زاویه‌ی انحراف میدان کششی می‌باشد.

مدل نواری پیشنهادی توسط تربرن (Thorburn) و عبارت ارائه شده توسط تیملر (Timler) و کولاک (Kulak) برای محاسبه‌ی زاویه انحراف میدان کششی، گامی در جهت تحقیق هرچه بیشتر در زمینه‌ی دیوارهای برشی فولادی را فراهم کرد و همچنین شروعی برای مطالعات تحلیلی و آزمایشگاهی بر روی جنبه‌های مختلف رفتار این سیستم در دانشگاه‌های آلبرتا کانادا بود. این پژوهش‌ها منجر به افزودن دیوارهای برشی فولادی نازک بدون سخت‌کننده برای اولین بار به آیین‌نامه‌های طراحی شد. آیین‌نامه کانادایی (CSA 1994) (CSA-S16-1 1994)، از مدل چند نواری به عنوان یک روش ساده برای تحلیل لرزه‌ای سیستم دیوارهای برشی فولادی بدون سخت‌کننده بهره جست.

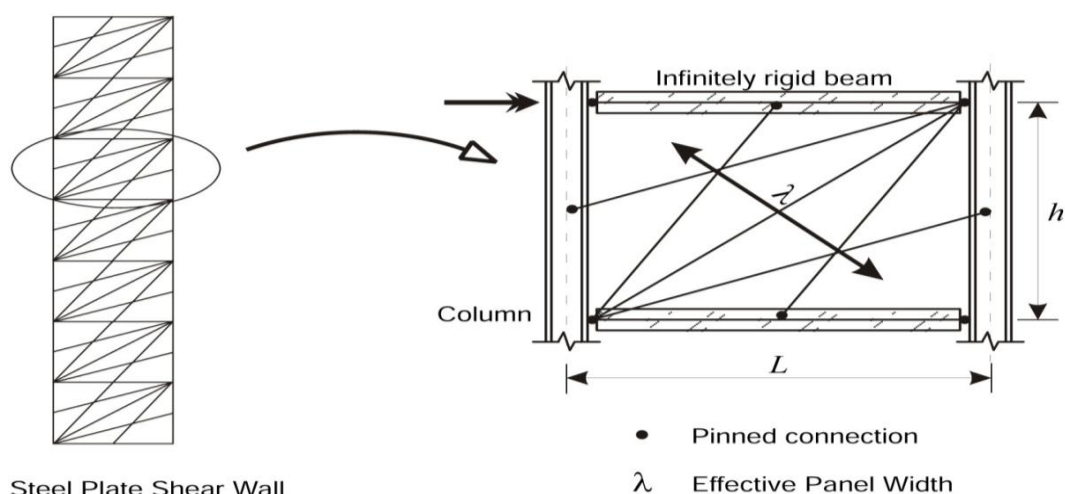
در سال ۱۹۹۸، الغالی (Elgaaly) مطالعات دقیقی جهت بررسی تأثیر اعضای نواری (اعضای خرابی) در مدل چند نواری و زاویه انحراف میدان کششی آن آغاز کرد. نتایج تحقیق ایشان نشان می‌دهد که تعداد اعضای مورب بستگی به لاغری پانل‌های برشی و

سختی المان‌های مرزی دارد. او همچنین دریافت که تغییرات کم در زاویه‌ی انحراف، اثر ناچیزی بر روی سختی اولیه‌ی دارد.

ضوابط آیین‌نامه‌ی کانادا (CSA2001) و یادداشت نوشته‌شده برای ضوابط لرزه‌ای AISC (AISC2005a)، حداقل ۱۰ عدد نوار را برای مدل کردن ورق جان به منظور تقریب‌زدن اثر بار توزیع‌شده بر روی المان‌های مرزی قاب پیشنهاد می‌کند [۷].

۲-۶- مدل نواری با زاویه‌های مختلف

تحقیقات انجام شده توسط رضایی [۸ و ۹] در دانشگاه بریتیش کلمبیا (British Columbia) کشور کانادا در سال ۱۹۹۹ نشان داد که مدل نواری چندان هم مناسب نیست. مطالعات آزمایشگاهی در این دانشگاه توسط رضایی نشان داد که زاویه‌ی نوار کششی در گوشه‌ها به راستای قائم و در وسط ورق این زاویه به راستای افق نزدیک‌تر است و دلیل آن، اثر متقابل ورق پرکننده و المان‌های مرزی در گوشه‌ها است. به منظور غلبه بر این نقص مدل نواری، او یک مدل نواری با زاویه‌های مختلف برای دیوارهای برشی فولادی پیشنهاد کرد. در این مدل، همه‌ی نوارها موازی با میدان کششی نیستند بلکه در راستاهای مختلف قرار می‌گیرند. این مدل دارای ۵ عضو خرابایی است.



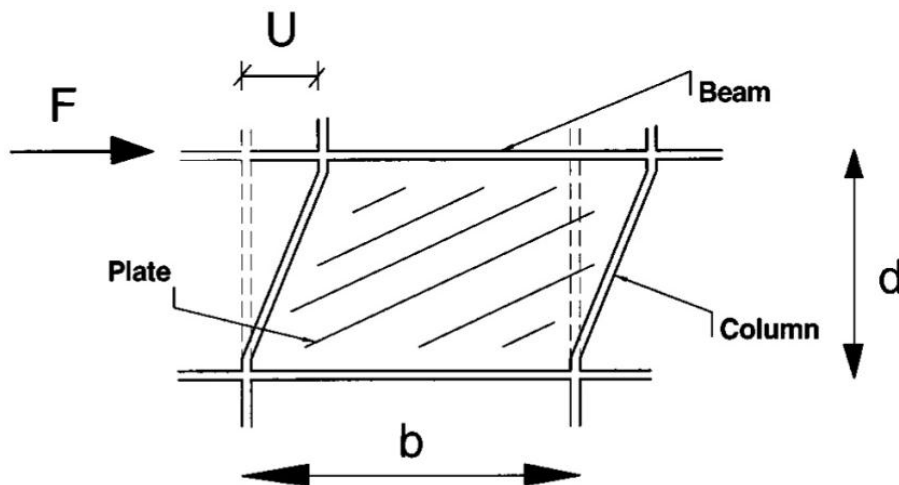
Steel Plate Shear Wall

شکل ۲-۹- مدل تحلیلی نواری با زاویه‌های مختلف SSW ارائه شده توسط رضایی (سال ۱۹۹۹) [۹]

۷-۲- مدل اندرکنش قاب و پانل (PFI)

کاربرد روش نواری تنها محدود به دیوارهای برشی فولادی با ورق نازک است و برای دیوارهای برشی فولادی با ورق ضخیم و یا دیوارهای برشی فولادی تقویت شده قابل استفاده نمی‌باشد. در این روش ورق فولادی با تعداد میله جایگزین می‌گردد بنابراین قاب و ورق به صورت یک سیستم مجازی همراه با هم تحلیل می‌گردند. از این‌رو طراح نمی‌تواند هنگام طراحی هیچگونه درک فیزیکی از رفتار سیستم، به‌ویژه اندرکنش قاب و ورق فولادی داشته باشد.

مدل اندرکنش قاب و پانل^۱ (PFI) صبوری و رابرتز (Roberts) [4]، بر مبنای اندرکنش قاب و صفحه‌ی پرکننده است که به منظور تحلیل و طراحی انواع مختلف دیوارهای برشی فولادی (دیوارهای با صفحات نازک و ضخیم و دیوارهای با و یا بدون سخت کننده) ارائه شده است. شکل (۲-۱۰)، پانل برشی فولادی را به صورت یک طبقه‌ی مجزا نمایش می‌دهد.



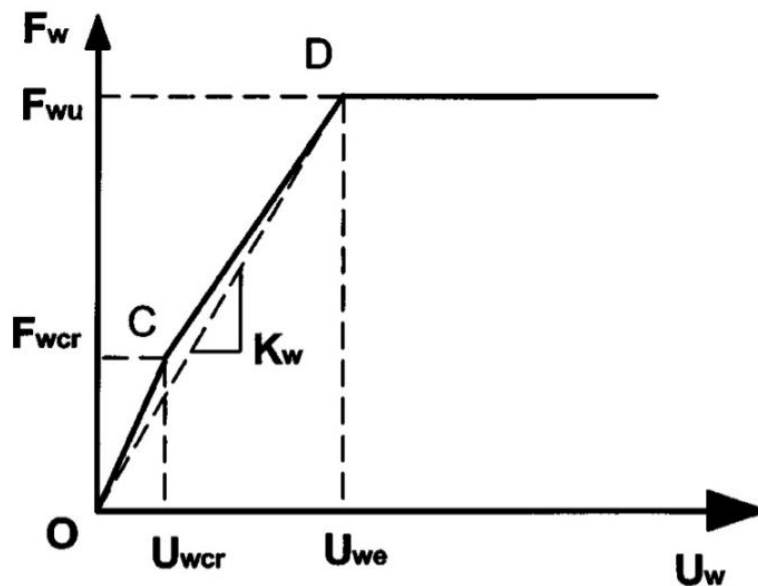
شکل ۲-۱۰- پانل برشی فولادی به صورت یک طبقه‌ی مجزا [۴]

در صورتی که یک پانل برشی فولادی به صورت شکل (۲-۱۰) در نظر گرفته شود، برای دستیابی به نمودار بار-تغییر مکان برشی آن با توجه به تئوری ارائه شده توسط صبوری و همکار، می‌توان ورق فولادی و قاب را از یکدیگر تفکیک نموده و نمودار نامبرده را برای هر کدام از آن‌ها بدست آورد. سپس با جمع آثار آن‌ها به نمودار بار-تغییر مکان برشی پانل دست یافت.

۲-۷-۱- نمودار بار- تغییر مکان برشی ورق فولادی

در صورتی که فرض کنیم:

- رفتار ورق فولادی بصورت الاستیک و کاملاً پلاستیک باشد.
 - ستون‌ها به اندازه کافی صلب باشند به طوری که بتوان از تغییر شکل آن‌ها در محاسبه تغییر شکل برشی ورق فولادی صرف نظر نمود و همچنین بتوان فرض نمود میدان کششی تشکیل شده پس از کمانش ورق بصورت یکنواخت تمام سطح ورق را فراگیرد.
 - ورق فولادی دارای اتصال ساده با قاب اطراف خود باشد.
 - اختلاف بین مقدار میدان کششی در دو طبقه مجاور کوچک بوده به طوری که ممان ایجاد شده در تیرهای طبقات در اثر میدان کششی ناچیز باشد.
 - بتوان از اثر تنش‌های ناشی از خمش بر روی تنش‌های کمانشی ورق صرفه نظر نمود.
- می‌توان ورق فولادی را قبل از کمانش و بعد از آن مورد بررسی قرار داده و نمودار بار جانبی-تغییر مکان برشی پانل را بدست آورد. در شکل (۲-۱۱)، نمودار یادشده نشان داده شده است.

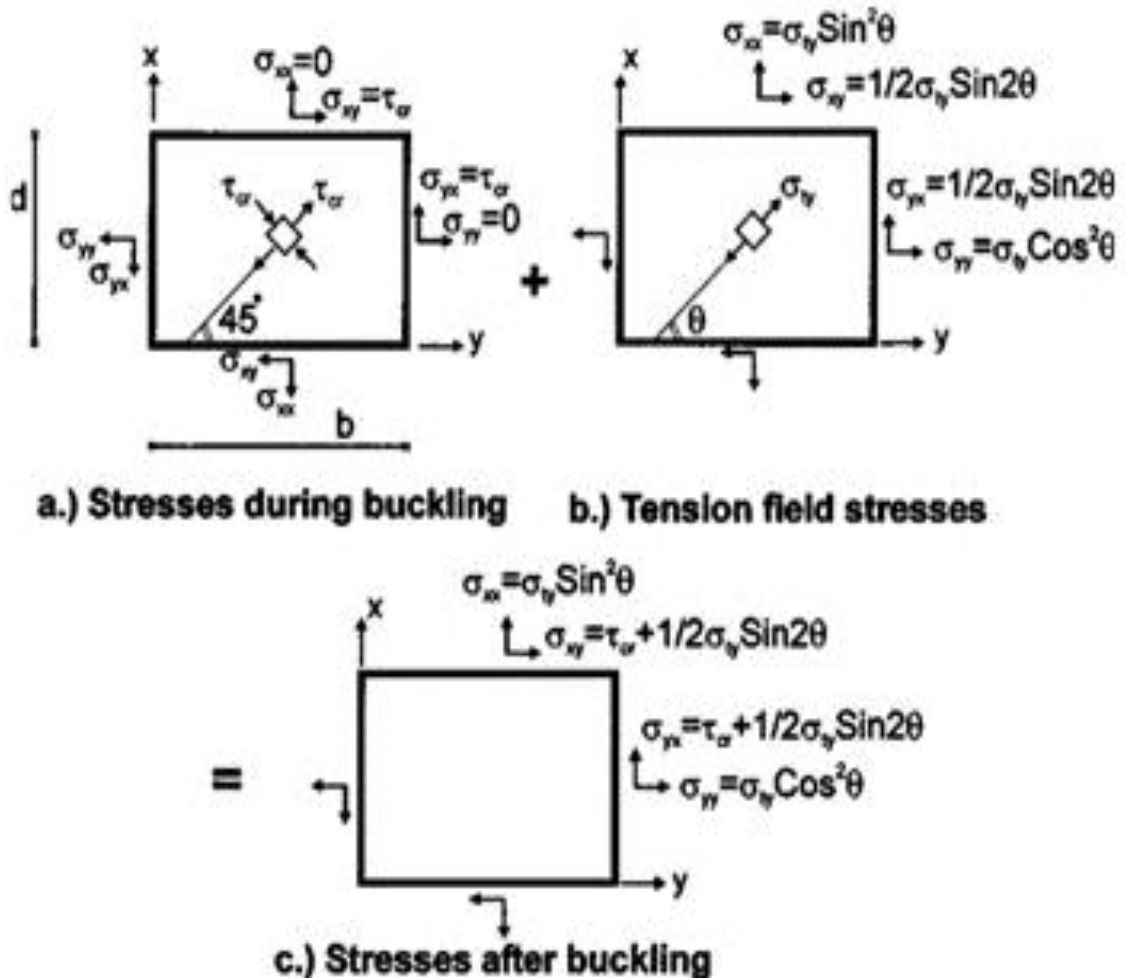


شکل ۲-۱۱- نمودار بار جانبی- تغییر مکان برشی ورق فولادی [۴]

همانطور که در شکل (۱۱-۲) مشاهده می‌گردد نقطه C، حد کمانش و نقطه D، حد جاری شدن ورق فولادی را نشان می‌دهد.

قبل از کمانش

شکل (۱۲-۲)، وضعیت تنش‌ها را قبل و بعد از کمانش ورق فولادی نمایش می‌دهد.



شکل ۲-۱۲- وضعیت تنش‌ها در ورق فولادی قبل و بعد از کمانش ورق [۴]

تا قبل از کمانش ورق فولادی وضعیت تنش‌ها در شکل (۲-۱۲-a) نشان داده شده است. در این حالت تنش‌های مساوی کششی و فشاری اصلی در امتداد زاویه 45° و 135° تا زمان رسیدن آن‌ها به تنش بحرانی کمانش ورق تشکیل می‌گردد. تنش برشی بحرانی ورق فولادی با فرض تکیه‌گاه ساده از تئوری کلاسیک پایداری قابل محاسبه است.

$$\tau_{cr} = \frac{K\pi^2 E}{12(1-\mu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2 \quad (3-2)$$

که در آن t ضخامت ورق فولادی، E ضریب ارتجاعی و μ ضریب پواسون بوده و k از روابط زیر بدست می‌آید.

$$K = 5.35 + 4\left(\frac{b}{d}\right)^2 \quad \text{برای } \frac{d}{b} \geq 1 \quad (4-2)$$

$$K = 5.35\left(\frac{b}{d}\right)^2 + 4 \quad \text{برای } \frac{d}{b} \leq 1 \quad (5-2)$$

در این حالت، نیروی برشی ورق فولادی هنگام کمانش آن برابر خواهد بود با :

$$F_{wcr} = \tau_{cr} b t \quad (6-2)$$

همچنین تغییرمکان برشی ورق فولادی، هنگام کمانش آن از رابطه زیر قابل محاسبه است.

$$U_{wcr} = d \gamma_{cr} \quad (7-2)$$

که در آن γ کرنش برشی بوده و مقدار آن برابر است با:

$$\gamma_{cr} = \frac{\tau_{cr}}{G} \quad (8-2)$$

G در رابطه بالا ضریب ارتجاعی برشی می‌باشد.

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)} \quad (9-2)$$

در شکل (۲-۱۱)، بار و تغییرمکان برشی در نقطه C ، که حد کمانش ورق فولادی را نشان

می‌دهد به ترتیب به کمک روابط (۲-۶) و (۲-۷) بدست می‌آید.

در صورت ضخیم بودن ورق فولادی به طوری که تنش برشی بحرانی (τ_{cr}) در پانل از تنش

برشی حد جاری شدن (τ_{wy}) تجاوز نماید، در آن صورت، ورق فولادی جاری می‌شود. به عبارت دیگر،

در این شرایط، نقطه C در شکل (۲-۱۱)، به نقطه D منتقل می‌شود.

پس از کمانش

در صورت نازک بودن ورق فولادی و کمانش آن قبل از جاری شدن، ورق پس از کمانش قادر به تحمل تنش‌های فشاری بیشتر نخواهد بود. تنش‌های کششی تا جاری شدن ورق فولادی می‌توانند افزایش یابند. بدین ترتیب پس از کمانش ورق با شکل‌گیری تدریجی میدان کششی و گسترش آن در تمام سطح آن، مکانیزم باربری جدیدی ایجاد می‌گردد که در شکل (b-۱۲-۲) نشان داده شده است و آن را پس‌کمانش^۱ می‌نامند.

اگر زاویه میدان کششی بوجود آمده θ فرض شود، شکل (b-۱۲-۲)، تنش‌های نشان داده شده در ورق فولادی هنگام جاری شدن در مختصات x-y، بدون منظور نمودن تنش‌های بحرانی هنگام کمانش برابر خواهد بود با:

$$\sigma_{xx} = \sigma_{ty} \sin^2 \theta \quad (۱۰-۲)$$

$$\sigma_{yy} = \sigma_{ty} \cos^2 \theta \quad (۱۱-۲)$$

$$\sigma_{xy} = \sigma_{yx} = \frac{1}{2} \sigma_{ty} \sin 2\theta \quad (۱۲-۲)$$

همانطور که در شکل (c-۱۲-۲) مشاهده می‌گردد، تنش‌های ورق فولادی در مختصات x-y، پس از کمانش با منظور نمودن تنش‌های بحرانی، از روابط زیر قابل محاسبه می‌باشد.

$$\sigma_{xx} = \sigma_{ty} \sin^2 \theta \quad (۱۳-۲)$$

$$\sigma_{yy} = \sigma_{ty} \cos^2 \theta \quad (۱۴-۲)$$

$$\sigma_{xy} = \sigma_{yx} = \tau_{cr} + \frac{1}{2} \sigma_{ty} \sin 2\theta \quad (۱۵-۲)$$

در روابط فوق σ_{ty} ، تنش حد جاری شدن میدان کششی بوجود آمده در ورق می‌باشد. براساس معیار جاری شدن فون میزز^۲، ورق فولادی زمانی جاری می‌گردد که

$$(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 + 6\sigma_{xy}^2 + 6\sigma_{yz}^2 + 6\sigma_{zx}^2 - 2\sigma_0^2 = 0 \quad (۱۶-۲)$$

1-Post-buckling
1-Von Mises

با قرار دادن مقادیر از روابط (۲-۱۳)، (۲-۱۴) و (۲-۱۵) در رابطه (۲-۱۶) و با توجه به این که

$$\sigma_{zz} = \sigma_{yz} = \sigma_{zx} = 0 \quad (۲-۱۷)$$

می‌باشد، می‌توان نوشت

$$3\tau_{cr}^2 + 3\tau_{cr}\sigma_{ty} \sin 2\theta + \sigma_{ty}^2 - \sigma_0^2 = 0 \quad (۲-۱۸)$$

بدین ترتیب به کمک رابطه (۲-۱۸) می‌توان σ_{ty} را در زمان جاری شدن ورق فولادی

محاسبه نمود. در این حالت نیروی برشی ورق هنگام جاری شدن آن که حد نهایی باربری

آن می‌باشد، برابر خواهد بود با

$$F_{wu} = \sigma_{xy}bt = bt \left(\tau_{cr} + \frac{1}{2} \sigma_{ty} \sin 2\theta \right) \quad (۲-۱۹)$$

همچنین تغییرمکان برشی ورق فولادی هنگام جاری شدن که تغییرمکان برشی

حدالاستیک نامیده می‌شود؛ از رابطه زیر قابل محاسبه است.

$$U_{we} = U_{wcr} + U_{wpb} \quad (۲-۲۰)$$

در این رابطه U_{wcr} ، تغییرمکان برشی ورق فولادی در هنگام کمانش می‌باشد و از رابطه (۲-۷)

قابل محاسبه است و U_{wpb} تغییرمکان برشی ناشی از تنش‌های میدان کششی (σ_{ty}) است که در

شکل (۲-۱۲) نشان داده شده است و می‌توان آن را با مساوی قرار دادن کار انجام شده توسط

نیروی برشی ناشی از تنش‌های یاد شده، با انرژی کرنشی ورق فولادی محاسبه نمود.

$$\frac{1}{2} \left[\left(\frac{1}{2} \sigma_{ty} \sin 2\theta \right) tb \right] U_{wpb} = \iiint F_0 dx dy dz \quad (۲-۲۱)$$

در رابطه فوق F_0 به صورت عمومی زیر قابل بیان می‌باشد.

$$F_0 = \frac{1}{2} \left[\frac{1+\mu}{E} (\sigma_{xx}^2 + \sigma_{yy}^2 + \sigma_{zz}^2) - \frac{\mu}{E} (\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz})^2 + \frac{2(1+\mu)}{E} (\sigma_{xy}^2 + \sigma_{xz}^2 + \sigma_{yz}^2) \right] \quad (۲-۲۲)$$

در صورتی که مقادیر σ_{xx} ، σ_{yy} ، σ_{xy} و σ_{yx} را از رابطه (۲-۱۰)، (۲-۱۱) و (۲-۱۲) در رابطه (۲-۲۲)

قرار دهیم و با توجه به این نکته که

$$\sigma_{zz} = \sigma_{xz} = \sigma_{yz} = 0 \quad (23-2)$$

می‌باشد، می‌توان نوشت

$$F_0 = \frac{1}{2} \left[\frac{1+\mu}{E} (\sigma_{ty}^2 \sin^4 \theta + \sigma_{ty}^2 \cos^4 \theta) - \frac{\mu}{E} (\sigma_{ty} \sin^2 \theta + \sigma_{ty} \cos^2 \theta)^2 + \frac{2(1+\mu)}{E} \left(\frac{1}{4} \sigma_{ty}^2 \sin^2 2\theta + \frac{1}{4} \sigma_{ty}^2 \sin^2 2\theta \right) \right] \quad (24-2)$$

با ساده نمودن رابطه (24-2)، حاصل بصورت زیر خواهد بود :

$$F_0 = \frac{\sigma_{ty}^2}{2E} \quad (25-2)$$

با قرار دادن رابطه (25-2) در رابطه (21-2) می‌توان نوشت

$$\left(\frac{1}{4} \sigma_{ty} \sin 2\theta \right) t b U_{wpb} = \iiint \frac{\sigma_{ty}^2}{2E} dx dy dz \quad (26-2)$$

و یا

$$\left(\frac{1}{4} \sigma_{ty} \sin 2\theta \right) t b U_{wpb} = \frac{\sigma_{ty}^2}{2E} d b t \quad (27-2)$$

و یا

$$U_{wpb} = \frac{2\sigma_{ty} d}{E \sin 2\theta} \quad (28-2)$$

با قرار دادن مقادیر U_{wcr} از رابطه (7-2) از رابطه (28-2) در رابطه (20-2)، تغییرمکان برشی ورق فولادی هنگام جاری شدن و یا به عبارت دیگر تغییرمکان حدالاستیک آن بدست می‌آید.

$$U_{we} = \left(\frac{\tau_{cr}}{G} + \frac{2\sigma_{ty}}{E \sin 2\theta} \right) d \quad (29-2)$$

که در آن مقدار σ_{ty} از رابطه (18-2) و τ_{cr} از رابطه (4-2) قابل محاسبه می‌باشند. با محاسبه بار و تغییرمکان برشی ورق فولادی هنگام جاری شدن آن به ترتیب از روابط (19-2) و (29-2)، نقطه D در شکل (11-2) بدست می‌آید که بدین ترتیب نمودار بار-تغییرمکان برشی ورق فولادی تعریف می‌گردد.

با داشتن مختصات نقاط C و D در شکل (۲-۱۱)، معادله خطوط OC و CD به سادگی قابل محاسبه می‌باشند. معادله خط OC بصورت رابطه زیر خواهد بود.

$$F_w = \frac{Gbt}{d} U_w \quad (\text{قبل از کمانش ورق}) \quad (۳۰-۲)$$

همچنین معادله خط CD بصورت زیر می‌باشد.

$$F_w = \left(\frac{Ebt}{4d} \right) U_w - \tau_{cr} bt \left(1 - \frac{E}{4G} \sin^2 2\theta \right) \quad (\text{پس از کمانش ورق}) \quad (۳۱-۲)$$

برای سادگی می‌توان به جای خط OC و CD خط OD (خط چین) را در شکل (۲-۱۱)، جایگزین نمود. بررسی و محاسبات نشان می‌دهد اثر این جایگزینی عملاً بسیار ناچیز و قابل گذشت می‌باشد. ضمن آنکه رابطه بین بار-تغییرمکان برشی ورق فولادی را تا حد زیادی ساده می‌نماید. بدین ترتیب رابطه یادشده و یا به عبارت دیگر معادله خط OD در شکل (۲-۱۱) به صورت زیر خواهد بود.

$$F_w = K_w U_w \quad (۳۲-۲)$$

که در آن K_w شیب خط OD و یا سختی برشی ورق فولادی بوده که برابر است با:

$$K_w = \frac{bt \left(\tau_{cr} + \frac{1}{2} \sigma_{ty} \sin 2\theta \right)}{d \left(\frac{\tau_{cr}}{G} + \frac{2\sigma_{ty}}{E \sin 2\theta} \right)} \quad (۳۳-۲)$$

همانطور که در رابطه (۲-۲۹) مشاهده می‌گردد، تغییرمکان برشی حدالاستیک ورق فولادی تقریباً مستقل از ضخامت آن (t) و کاملاً مستقل از دهانه پانل (b) می‌باشد (t در τ_{cr} ظاهر می‌گردد که اثر آن بر روی تغییرمکان برشی قابل توجه نمی‌باشد، حداکثر تغییرات تغییرمکان برشی بین دو حد بالا و پایین آن حدوداً ۲۵٪ است و در ورق‌های نازک که $\tau_{cr} = 0$ می‌باشد، تغییرمکان برشی کاملاً مستقل از t است). به عبارت دیگر می‌توان بیان نمود که ضخامت ورق و دهانه پانل تأثیر چندانی در مقدار تغییرمکان برشی حدالاستیک آن ندارند و تغییرمکان یادشده تحت تأثیر مستقیم ارتفاع پانل (d) می‌باشد. از طرف دیگر همانطور که در رابطه (۲-۱۹) مشاهده می‌گردد، نیروی برشی نهائی ورق فولادی مستقل از ارتفاع پانل (d) بوده ولی مستقیماً متأثر از ضخامت ورق و دهانه پانل می‌باشد.

طبیعتاً سختی برشی ورق که نسبت نیرو به تغییرمکان برشی آن است، متأثر از همه عوامل ابعاد ورق (d و t, b) خواهد بود که در رابطه ساده شده ($2-33$) نیز می‌توان حضور آنها را مشاهده نمود.

باتوجه به این که عملاً ستونهایی که در دیوار برشی بکار گرفته می‌شوند، در ساختمانها جز سازه باربر قائم قرار می‌گیرند و این مطلب به لحاظ کنترل واژگونی در دیوارهای برشی فولادی نیز مفید و لازم می‌باشد، از این رو ستونها از صلبیت قابل توجهی برخوردار هستند. همچنین در صورت عدم صلبیت کافی ستونها، توزیع یکنواخت تنشهای کششی در ورق پس از تشکیل میدان کششی قطری امکان پذیر نخواهد بود و بدین جهت لازم است ستونها از یک صلبیت حداقل برخوردار باشند. بدین ترتیب زاویه میدان کششی قطری (θ) به سمت 45° میل می‌کند.

در تحقیق‌های آزمایشگاهی بر روی دیوارهای برشی فولادی با ورق نازک، θ حدوداً بین 35° تا 55° گزارش شده است. در دیوارهای برشی متعارف عموماً در پانلهایی که عرض پانل (b) بزرگتر از ارتفاع آن (d) می‌باشد ($b > d$)، $\theta < 45^\circ$ است و در پانلهایی که عرض پانل (b) کوچکتر از ارتفاع آن (d) باشد ($b < d$)، $\theta > 45^\circ$ است. البته صلبیت ستونها و تا اندازه‌ای صلبیت تیرها و ضخامت ورق نیز در مقدار θ نقش دارند. در بدترین شرایط، اثر θ بر روی مقاومت نهایی و تغییرمکان برشی حدالاستیک ورق فولادی ناچیز و اثر آن بر روی سختی برشی ورق قابل توجه نمی‌باشد، از این رو فرض $\theta = 45^\circ$ در دیوارهای برشی فولادی متعارف در ساختمانها، معقول به نظر می‌رسد. به خصوص که حداقل صلبیت ستونها در محاسبات مورد توجه قرار گیرد.

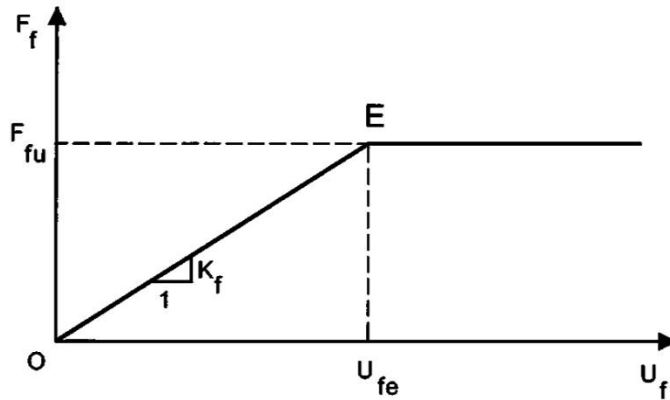
با توجه به بحث بالا در رابطه با نیروی برشی نهایی، تغییرمکان برشی حدالاستیک و سختی برشی ورق فولادی و اثر ابعاد ورق فولادی (d, t, b) و زاویه میدان کششی قطری (θ) روی عوامل یاد شده به نظر می‌رسد در صورتی که در دیوار برشی فولادی سعی شود عرض آنها (b) هر چه بیشتر از ارتفاع طبقه (d) در طراحی آنها انتخاب گردد، علاوه بر آن که دیوار به جای میل به سمت عملکرد خمشی به سمت عملکرد برشی خواهد رفت، وضعیت دیوار برشی نیز به لحاظ عوامل ذکر شده بهبود

می‌یابد زیرا همانطور که ذکر گردید با توجه به تغییرمکان برشی حدالاستیک ورق فولادی تابع d بوده و تقریباً مستقل از b و t می‌باشد، از این‌رو با افزایش عرض دیوار (b) مقدار آن ثابت باقیمانده ولی مقاومت برشی‌نهایی آنکه مستقل از d بوده و رابطه مستقیم با b و t دارد و با افزایش عرض دیوار برشی (b) افزایش می‌یابد که طبیعتاً افزایش سختی برشی دیوار را نیز که متناسب با آن است به همراه خواهد داشت ($K = \frac{F}{U}$).

از سوی دیگر، با افزایش قابل توجه b نسبت به d ($b \gg d$)، میدان کششی عمدتاً بین تیرهای طبقات تشکیل شده و کمتر ستونها را آزار خواهد داد (بحث تعدیل تنش‌ها). همچنین با این عمل دست‌طراح برای ایجاد بازشو در دیوار برشی فولادی بازتر بوده و مشخصات مقاومتی دیوار با بازشو (نیروی برشی‌نهایی، تغییرمکان برشی حدالاستیک و سختی برشی) کمتر دچار آسیب خواهد گردید. بدین ترتیب می‌توان انتظار داشت که دیوارهای برشی فولادی با نسبت عرض به ارتفاع بیش از واحد ($1 < \frac{b}{d}$) به لحاظ عملکرد و رفتار نسبت به دیوارهای با ($1 > \frac{b}{d}$) ارجحیت داشته باشند و این رفتار و عملکرد با افزایش هر چه بیشتر $\frac{b}{d}$ نسبت به واحد بهبود یابد [۱، ۴].

۲-۷-۲- نمودار بار-تغییرمکان برشی قاب

در صورتی که فرض کنیم اتصال‌های تیرها به ستون‌ها گیردار و تیرها کاملاً صلب بوده و رفتار قاب به صورت الاستیک و کاملاً پلاستیک باشد، نمودار بار-تغییرمکان برشی آن را می‌توان به صورت شکل (۲-۱۳) نشان داد که در صورت بدست آوردن مختصات نقطه E ، نمودار یاد شده تعریف می‌گردد.



شکل ۲-۱۳- نمودار بار-تغییرمکان برشی قاب فولادی [۴]

با تئوری می‌توان نشان داد که مجموع نیروهای برشی در ستون‌های قاب بدون ورق فولادی مستقل از تنش‌های ناشی از میدان کششی (σ_{ty}) می‌باشد، از این‌رو، نیروی برشی نهایی قاب پس از شکل‌گیری

گره‌های پلاستیک در ستون‌ها برابر خواهد بود با

$$F_{fu} = \frac{4M_{fp}}{d} \quad (۳۴-۲)$$

که در آن M_{fp} ممان پلاستیک در ستون‌ها می‌باشد.

تغییرمکان برشی قاب هنگام تشکیل گره‌های پلاستیک در ستون‌ها که در واقع تغییرمکان برشی حدالاستیک آن می‌باشد. برابر خواهد بود با:

$$U_{fe} = \frac{M_{fp} d^2}{6EI_f} \quad (۳۵-۲)$$

که در آن، I_f ممان اینرسی ستون‌ها می‌باشد.

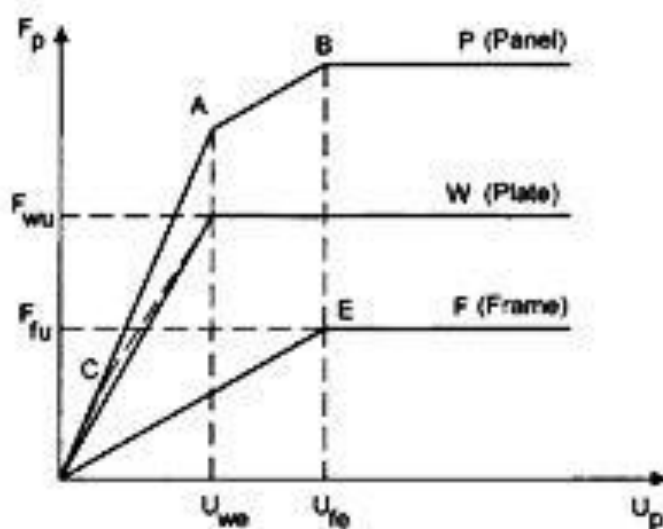
مقادیر F_{fu} و U_{fe} که به ترتیب از روابط (۳۴-۲) و (۳۵-۲) بدست می‌آید، مختصات نقطه E در شکل (۲-۱۳) می‌باشند. با داشتن آن می‌توان معادله خط OE را نوشته و بدین ترتیب نمودار بار-تغییرمکان برشی قاب را تعریف نمود.

$$F_f = K_f U_f \quad (۳۶-۲)$$

که در آن K_f شیب خط OE و یا سختی برشی قاب می‌باشد و برابر است با

$$K_f = \frac{24EI_f}{d^3} \quad (۳۷-۲)$$

برای دستیابی به نمودار بار- تغییرمکان برشی سیستم، کافی است برای هر تغییرمکان برشی تعریف شده، مقادیر بار جانبی را از نمودارهای (۲-۱۱) و (۲-۱۳) که به ترتیب مربوط به ورق فولادی و قاب می‌باشند را با هم جمع نموده تا نمودار نامبرده بدست آید. در شکل (۲-۱۴)، نمودار ذکر شده برای ورق فولادی و قاب به تفکیک رسم گردیده که به ترتیب با حروف W و F نشان داده شده است. همچنین جمع دو نمودار که در واقع نمودار بار-تغییرمکان برشی پانل (سیستم دیوار برشی فولادی) می‌باشد در شکل یاد شده با حرف P نشان داده شده است [۴و۱].



شکل ۲-۱۴- نمودار بار- تغییر مکان برشی پانل (سیستم دیوار برشی فولادی) [۴]

۲-۸- مدل اصلاح شده اثر متقابل قاب و پانل (M-PFI)

خرازی و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۰۸، مدل PFI را به مدل اصلاح‌شده‌ی اثر متقابل قاب و پانل (M-PFI) ارتقا دادند. ویژگی روش M-PFI نسبت به روش PFI ناشی از آن است که در نمودار بار-جابجایی، اثر لنگر واژگونی بر پاسخ دیوار برشی فولادی در نظر گرفته می‌شود. این روش جهت

تحلیل و بررسی برشی و خمشی این سیستم پیشنهاد شده است. در این روش، رفتار برشی ورق و قاب به طور جداگانه بررسی می‌شود و نمودار بار-تغییر مکان سیستم با جمع رفتار برشی هر یک از آن‌ها بدست می‌آید. سپس با فرض این که ورق وقاب به صورت واحد عمل می‌کنند، تحلیل خمشی صورت می‌گیرد. اندرکنش میان رفتار برشی و خمشی، رفتار سیستم را به خوبی تشریح می‌کند. ارزیابی روش M-PFI توسط تحلیل‌های اجزای محدود انجام شد و تطابق خوبی میان مدل اجزای محدود و مدل پیشنهادی آنها از نظر سختی و مقاومت مدل‌های دیوار برشی فولادی بدست آمده است.

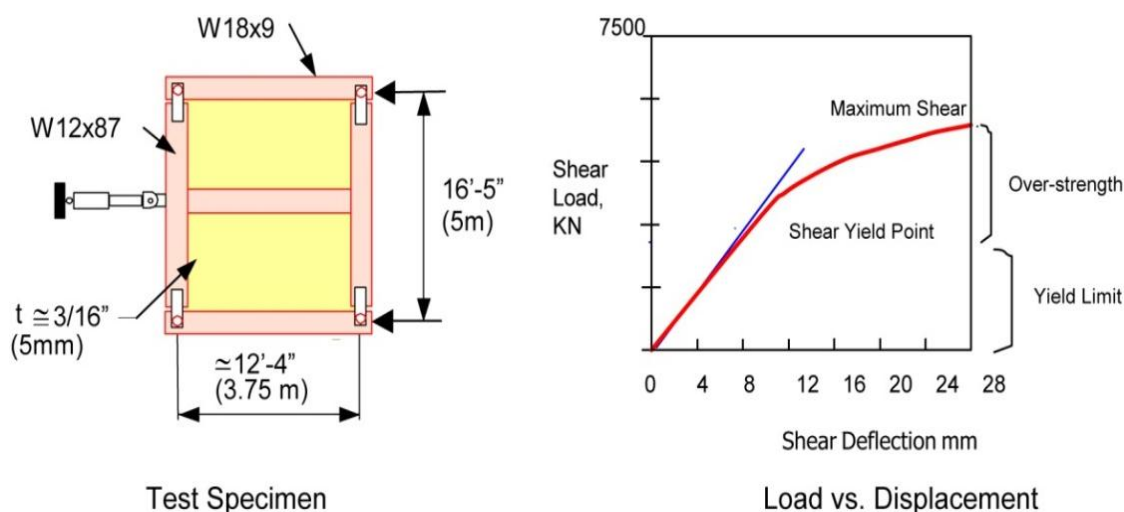
۲-۹- کارهای آزمایشگاهی انجام شده در زمینه دیوار برشی فولادی

تعدادی از پژوهشگران، در آمریکا، ژاپن، کانادا، انگلیس، کره جنوبی و تایوان رفتار دیوارهای برشی فولادی را با انجام آزمایش‌های استاتیکی و دینامیکی بر روی نمونه‌های یک تا چهار طبقه مطالعه کرده‌اند. در این بخش به اختصار، کارهای آزمایشگاهی مهم در طی ۴ دهه‌ی گذشته اشاره خواهد شد.

۲-۹-۱- کارهای آزمایشگاهی در کانادا

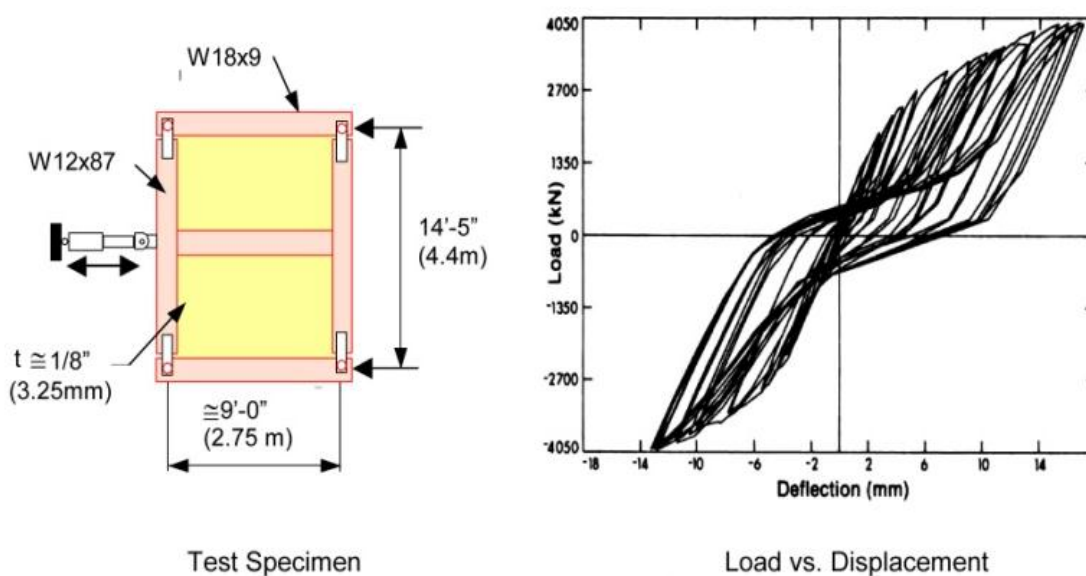
پژوهشگران دانشگاه آلبرتا (تیملر و کولاک (Timler, Kulak) در سال ۱۹۸۷، کولاک (Kulak) در سال ۱۹۹۱، درایور (Driver) و همکاران در سال ۱۹۹۶) آزمایش‌های چرخه‌ای و پوش‌اور بر روی دیوارهای برشی فولادی بدون سخت کننده انجام داده‌اند. همانطور که پیش‌تر ارائه شد، تربرن (Thorburn) و همکاران در سال ۱۹۸۳ بر پایه‌ی تحقیقات تحلیلی، معادله‌ای برای تشکیل زاویه انحراف میدان کششی پیشنهاد کرده‌اند. آزمایش تیملر و کولاک (Timler, Kulak) در این دانشگاه در سال ۱۹۸۳ نشان می‌دهد که معادله پیشنهادی تربرن (Thorburn) و همکاران با نتایج آزمایش به اندازه کافی تطبیق دارد. از آنجایی که سختی خمشی ستون‌ها بر مقدار زاویه انحراف میدان کششی

تأثیر می‌گذارد از این رو آن‌ها رابطه تربن (Thorburn) را اصلاح کردند. شکل (۲-۱۵)، بخش اول آزمایش آن‌ها را نشان می‌دهد.



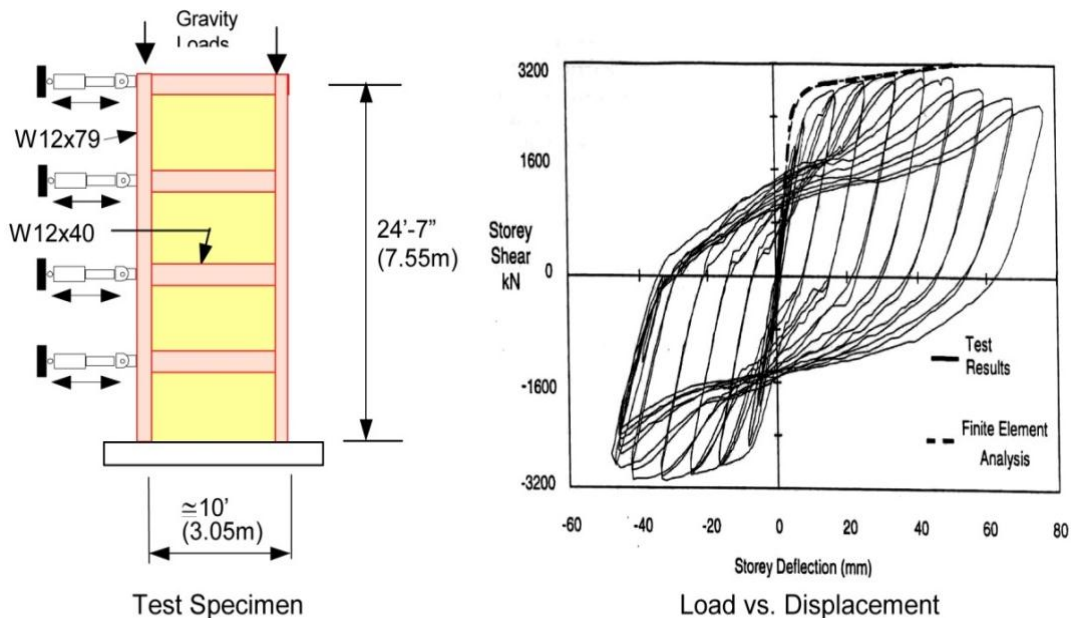
شکل ۲-۱۵- آزمایش استاتیکی تیملر وکولاک (Timler, Kulak) سال ۱۹۸۳ (آزمایش اول) [۲]

شکل (۲-۱۶)، نمونه آزمایشی تحت بارگذاری چرخه‌ای توسط تیملر وکولاک (Timler, Kulak) در سال ۱۹۸۳ و پاسخ هیستریزیس چرخه‌ای بار-تغییر مکان آن را نشان می‌دهد. نتایج آزمایش نسبت افزایش مقاومت به مقاومت اولیه (over-strength) بیش از ۲ برابر و شکل‌پذیری بیش از ۳/۵ برابر را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۱۶- آزمایش چرخه‌ای تیملر وکولاک (Timler, kulak) سال ۱۹۸۳ (آزمایش دوم) [۲]

دراپور (Driver) و همکاران در سال ۱۹۹۶ و ۱۹۹۸ نتایج آزمایش چرخه‌ای یک نمونه‌ی دیوار برشی فولادی ۴ طبقه‌ی یک دهانه را گزارش کرده‌اند. این نمونه آزمایشی و پاسخ چرخه‌ای طبقه‌ی اول پانل دیوار برشی در شکل (۲-۱۷)، به نمایش درآمده است.



شکل ۲-۱۷- نمونه آزمایشی و رفتار هیستریزیس یکی از نمونه‌های آزمایش دراپور (Driver) و همکاران [۲]

این نمونه‌ی آزمایشی، یک مدل $\frac{1}{4}$ مقیاس است. دیوار برشی فولادی به قاب خمشی جوش داده شده است. اتصالات تیر به ستون صلب است. ورق پرکننده توسط جوش و با استفاده از ورق پشت‌بند به قاب پیرامون جوش شده است. پژوهشگران مختلف به منظور اعتبارسنجی مدل‌های اجزای محدود و یا روش‌های تحلیلی ساده شده، نتایج این آزمایش را بکار گرفته‌اند. مد خرابی این نمونه به برش، خرابی دیوار و یا رفتار سیستم مربوط نمی‌شود؛ خرابی در پای ستون جایی که به تیر متصل است اتفاق افتاده و احتمالاً به دلیل تمرکز تنش در پایه‌ی نمونه آزمایشگاهی متصل به کف طبقه است البته وقوع چنین تمرکز تنش‌هایی در سازه‌ی واقعی انتظار نمی‌رود. نمونه‌ی آزمایشگاهی با وجود خرابی زود هنگام در پایه‌ی ستون، رفتار چرخه‌ای خوبی از خود نشان می‌دهد.

لوبل (Lubell) سال ۱۹۹۷، رضایی سال ۱۹۹۹، رضایی و همکاران در سال ۱۹۸۸ و ۲۰۰۰ در دانشگاه بریتیش کلمبیا (British Columbia)، مجموعه‌ای از آزمایش‌های میز لرزان و چرخه‌ای را بر

روی دیوارهای برشی فولادی انجام داده‌اند. در این مطالعات، بارهای برشی متناوب بر روی دو نمونه آزمایشی یک طبقه یک دهانه اعمال شده است. قاب‌های مرزی در نمونه‌ی آزمایشگاهی، قاب خمشی بودند. دو نمونه‌ی مورد آزمایش تنها در جزئیات ورق وصله‌ی پایه و تیر بالای اختلاف داشتند. نمونه آزمایشگاهی دوم دارای اتصالات پایه و تیر فوقانی قوی‌تر بود تا به این وسیله میدان کششی به صورت کامل تشکیل شود. نمونه‌های آزمایشگاهی یک طبقه، تغییرشکل‌های غیرالاستیک باشکل‌پذیری حدود ۶ را تجربه کردند. نسبت افزایش مقاومت به مقاومت اولیه (over-strength) بیش از حدود ۱/۵ بود. محققان با بررسی این دو نمونه آزمایشگاهی یک طبقه به این نتیجه رسیده‌اند که ورق‌های فولادی پرکننده نیاز به قاب خمشی را کاهش می‌دهند زیرا با ایجاد مهار اضافی قطری طبقه، چرخش اتصال‌های تیر به ستون کم می‌شود و همچنین تیر سقف سخت‌تر منجر به افزایش مقاومت و سختی سیستم می‌شود. این آزمایش‌ها به طور تحلیلی هم شبیه‌سازی شدند تا از طریق مطالعات عددی، توانایی روش‌های تحلیلی ساده شونده که در آیین‌نامه طراحی فولاد کانادا (CAN/CSA-S16-1(CSA1994) استفاده شده است، سنجیده گردد [۲].

تعداد کمی آزمایش دینامیکی بر روی دیوار برشی فولادی با میز لرزان انجام شده است. یکی از آزمایش‌های میز لرزان توسط رضایی در سال ۱۹۹۹ [۱۱] بر روی یک مدل دیوار برشی فولادی $\frac{1}{4}$ مقیاس، چهار طبقه‌ی یک دهانه و بدون سخت‌کننده انجام شده است. هدف اصلی این آزمایش، مطالعه‌ی عملکرد لرزه‌ای دیوارهای برشی فولادی چندطبقه تحت اثر تحریک داخلی شدید بود. نمونه‌ی چهارطبقه در معرض سه زمین لرزه ثبت شده و یک زمین لرزه‌ی ترکیبی تولید شده قرار گرفته است. رکوردهای انتخابی برای میز لرزان طوری انتخاب شده است که بیان‌گر شدت‌های مختلف تحریک، محتوای فرکانسی و فاصله‌های مرکز زلزله باشد. رضایی در سال ۱۹۹۹، گزارش کرد که ظرفیت محدود میز لرزان استفاده شده، مانع از دستیابی به پاسخ‌های غیرالاستیک قابل توجه شده است.

۲-۹-۲ - کارهای آزمایشگاهی در کشور ژاپن

تاکاناشی (Takanashi) و همکار در سال ۱۹۷۳، می‌میورا و آکی‌یاما (Akiyama و Mimura) در سال ۱۹۷۷، اولین آزمایش‌ها را بر روی دیوارهای برشی فولادی انجام داده‌اند. تاکاناشی (Takanashi) و همکار، آزمایش‌های چرخه‌ای را بر روی ۱۲ نمونه یک طبقه و دو طبقه انجام دادند. ۱۲ نمونه‌ی یک طبقه دارای عرض ۲/۱m و ارتفاع ۰/۹m بود. نمونه‌ها در مقایسه با ابعاد ساختمان‌های معمولی دارای مقیاس $\frac{1}{4}$ هستند.

برای بهبود منحنی‌های هیستریزیس و افزایش میزان جذب انرژی (افزایش سطح زیر منحنی‌های هیستریزیس) در دیوارهای برشی فولادی به دو صورت می‌توان عمل نمود.

- افزایش ضخامت ورق فولادی

- تقویت ورق فولادی به کمک سخت‌کننده

راه حل اول کاملاً غیراقتصادی و پرهزینه می‌باشد، زیرا برای بهبود منحنی‌های هیستریزیس دیوارهای مذکور لازم است؛ ضخامت ورق فولادی آنقدر افزایش داده شود تا ورق قبل از جاری شدن کمانش ننماید که این افزایش ضخامت بسیار قابل توجه بوده و لذا غیراقتصادی است.

راه حل دوم به دلیل تقویت ورق فولادی به کمک سخت‌کننده‌ها کاملاً موثر و اقتصادی می‌باشد.

هدف از این آزمایش‌ها، مطالعه‌ی دیوارهای برشی فولادی تقویت شده و تقویت نشده با آرایش‌های مختلف سخت‌کننده در پانل تحت بارگذاری چرخه‌ای غیرالاستیک بود. به استثنای یکی از نمونه‌ها، همه‌ی آن‌ها سخت‌کننده‌های قائم یا سخت‌کننده‌های افقی و قائم در یک طرف یا هر دو طرف ورق فولادی داشتند که با جوش به آن‌ها متصل شده بود. نتایج مهم این آزمایش‌ها عبارتند از:

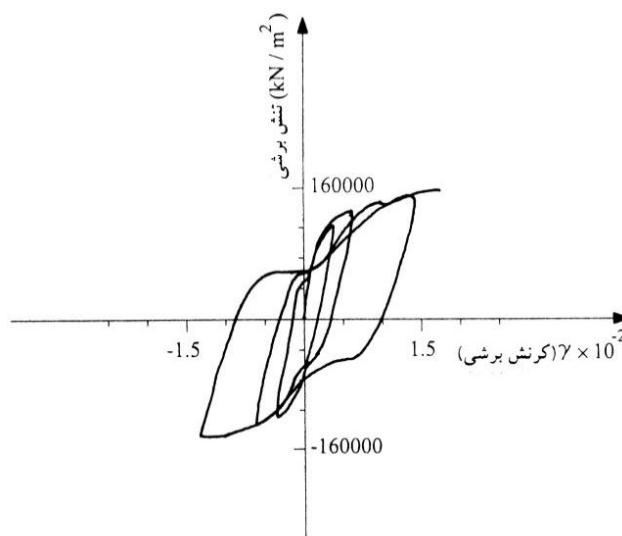
- پانل‌های دارای سخت‌کننده انرژی بیشتری نسبت به پانل‌های بدون سخت‌کننده مستهلک می‌کنند.

- دیوارهای برشی فولادی دارای سخت‌کننده و بدون آن رفتار شکل‌پذیر و پایدار از خود نشان دادند.

• پانل‌هایی که دارای سخت‌کننده در دو سمت ورق هستند رفتار پایدارتری نسبت به دیوارهای دارای سخت‌کننده در یک طرف، از خود نشان می‌دهند.

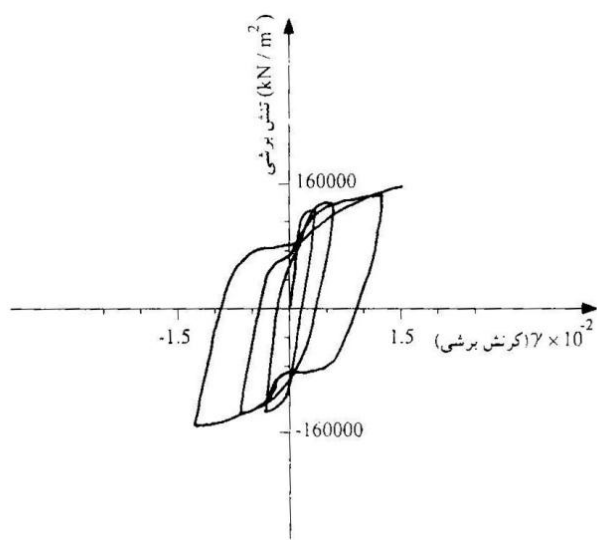
آنها بر پایه‌ی آزمایش‌های انجام شده پیشنهاد کردند که دیوارهای برشی فولادی دارای سخت‌کننده طراحی شوند تا از کمانش الاستیک پانل جلوگیری شود.

در ادامه به سه نمونه از منحنی هیستریزیس مربوط به آزمایش‌های انجام شده توسط تاکاناشی و همکاران اشاره خواهد شد. در آزمایش PR-3.2-M₂-15 از سخت‌کننده‌های ضعیف استفاده شده و تقویت در یک سمت ورق فولادی انجام شده است. به علت کمانش کلی ورق فولادی منحنی‌های هیستریزیس به صورت S شکل می‌باشد که در شکل (۲-۱۸) آمده است.

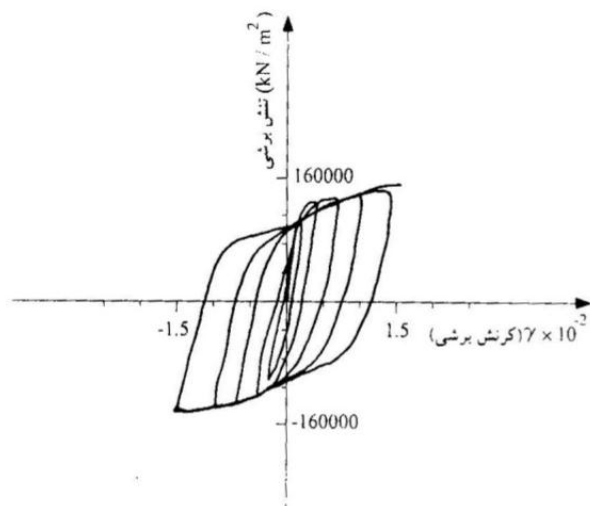


شکل ۲-۱۸- منحنی هیستریزیس پانل برشی در آزمایش PR-3.2-M₂-15 توسط تاکاناشی و همکاران [۱]

با افزایش ابعاد سخت‌کننده‌ها، وضعیت منحنی‌های هیستریزیس بهبود یافته و باعث گردید که از کمانش کلی ورق فولادی جلوگیری شده و کمانش در زیرصفحه‌ها انجام شود. شکل (۲-۱۹) و (۲-۲۰) به ترتیب مربوط به آزمایش‌های PR-3.2-M₂-25 و PR-3.2-M₂-60 مشاهده می‌باشد.



شکل ۲-۱۹- منحنی هیستریزیس پانل برشی در آزمایش PR-3.2-M₂-25 توسط تاکاناشی و همکاران [۱]



شکل ۲-۲۰- منحنی هیستریزیس پانل برشی در آزمایش PR-3.2-M₂-60 توسط تاکاناشی و همکاران [۱]

توری (Torii) و همکاران در سال ۱۹۹۶ در مورد کاربرد دیوارهای فولادی با نقطه‌ی تسلیم پایین در ساختمان‌های بلندمرتبه مطالعه کرده‌اند. در سال‌های اخیر جهت کنترل پاسخ لرزه‌ای سازه، تحقیق‌های مهمی به منظور استفاده از فولاد با نقطه‌ی تسلیم پایین در دیوارهای برشی صورت گرفته است. این تلاش‌ها، منجر به طراحی و ساخت تعدادی سازه با استفاده از این سیستم (یاماگوچی (Yamaguchi) و همکاران در سال ۱۹۹۸) شده است. از اطلاعات منتشرشده به نظر

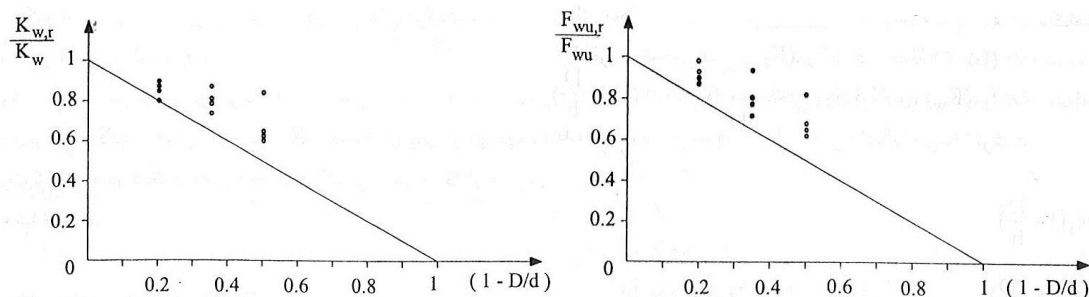
می‌رسد که این سیستم بسیار نویدبخش بوده و نیاز به تحقیق بیشتر در این زمینه وجود دارد. طراحان ژاپنی، استفاده از پانل‌های برشی با نقطه‌ی تسلیم پایین را در ساختمان‌ها آغاز کرده‌اند [۱ و ۲].

۳-۹-۲- کارهای آزمایشگاهی در انگلیس

در انگلیس، صبوروی قمی و رابرت (Robert) در سال ۱۹۹۲ و رابرت در سال ۱۹۹۵، نتایج آزمایش شبه‌استاتیکی را بر روی ۱۶ پانل برشی نازک تقویت‌نشده گزارش کردند. جهت ایجاد برش خالص، بارگذاری رفت و برگشتی در امتداد قطر اعمال شده است. این نمونه‌ها، شامل ورق‌های فولادی هستند که در یک قاب چهارمفصلی و با استفاده از پیچ به آن متصل شده‌اند. برخی از پانل‌ها سوراخ دارند. نمونه‌ها کوچک مقیاس‌اند. این آزمایش حاکی از آن است که همه پانل‌ها شکل‌پذیری کافی داشتند.

حلقه‌های هیستریزیس معمولی آزمایش رابرت (۱۹۹۲) نشان می‌دهد که نمونه‌ها به شکل‌پذیری بیشتر از ۷ رسیده‌اند بدون آن‌که کاهشی در مقاومت مشاهده شود. یکی از جنبه‌های جالب این آزمایش آن است که اثر سوراخ‌ها در دیوار را بر روی مقاومت و سختی بررسی می‌کند. پژوهشگران به این نتیجه رسیده‌اند که مقاومت و سختی به طور خطی در

برابر $(1 - \frac{D}{d})$ کاهش می‌یابد که در شکل (۲-۲۱) نمایش داده شده است [۱۳، ۲، ۱۲].



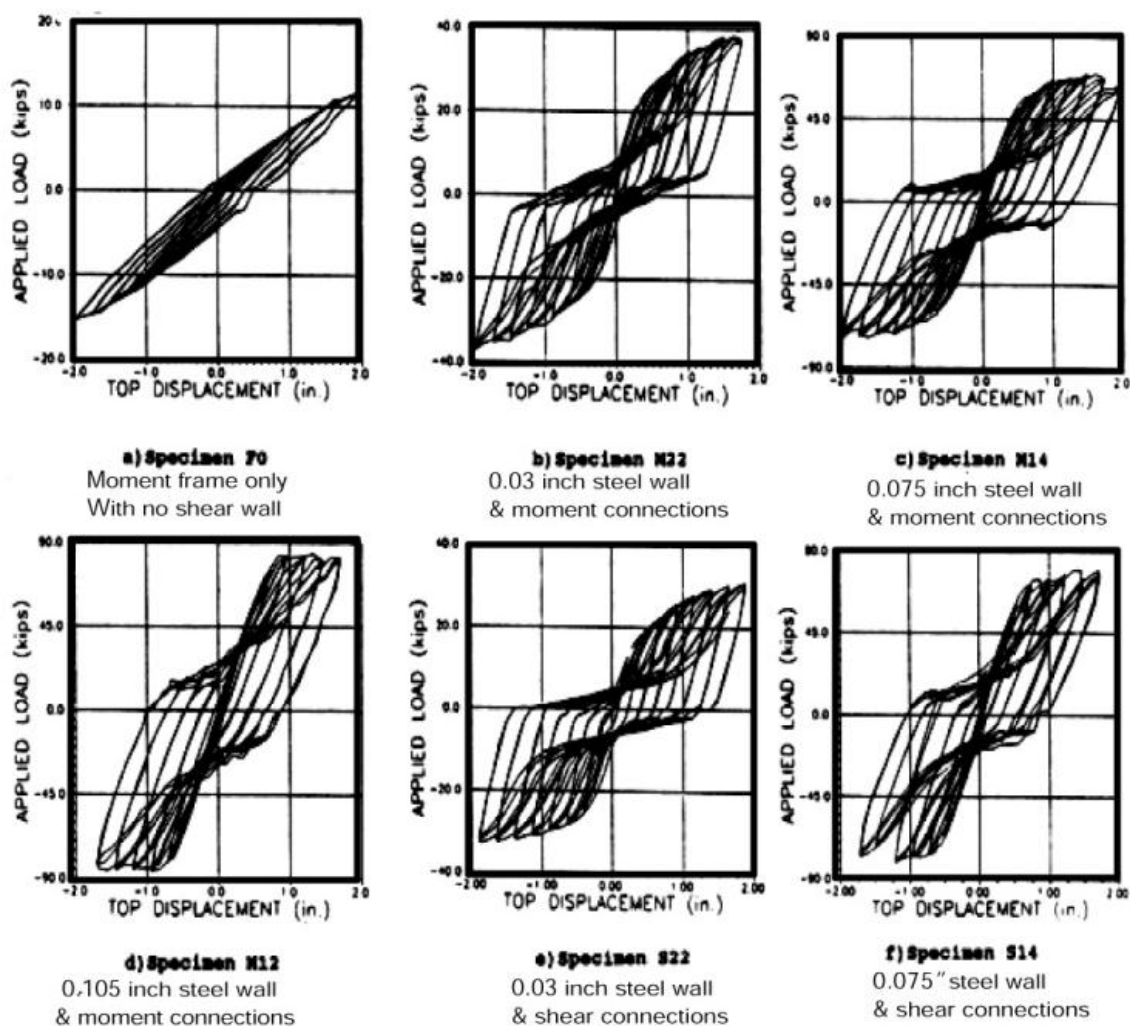
شکل ۲-۲۱- کاهش مقاومت برشی نهایی و سختی برشی ورق فولادی در پانل با بازشوی دایره‌ای [۱]

با توجه به این که میدان کششی پس از کمانش ورق فولادی در مرکز آن شکل گرفته و به تدریج همه ورق را دربر می‌گیرد، از این رو وجود بازشو در مرکز ورق بیشترین اثر کاهنده را در سختی و مقاومت برشی نهایی آن خواهد داشت.

پژوهش‌ها نشان می‌دهد، در صورتی که یک بازشوی مربع شکل در مرکز ورق فولادی ایجاد گردد، می‌توان رفتار آن را مشابه یک بازشوی دایره‌ای که دارای قطری برابر با قطر مربع داشته باشد، فرض نمود. این مطلب را می‌توان با تقریب خوب و در جهت اطمینان برای کلیه اشکال دیگر گسترداد و رفتار آنها را مشابه یک بازشو دایره‌ای که شکل مورد نظر در آن محاط شده باشد در نظر گرفت [۱].

۲-۹-۴- کارهای آزمایشگاهی در آمریکا

الغالی (Elgaaly) و کاکسز (Caccese) و همکاران [۱۴] در سال ۱۹۹۳ یک مجموعه مطالعات بر روی دیوارهای برشی فولادی انجام داده‌اند. بخش آزمایشی این تحقیق شامل بارگذاری چرخه‌ای ۶ نمونه‌ی ۳ طبقه‌ی یک دهانه می‌باشد که در معرض بار افقی چرخه‌ای در طبقه‌ی بام قرار گرفته است. نمونه‌ها، بدون سخت‌کننده و $\frac{1}{4}$ مقیاس هستند. هدف این آزمایش‌ها، بررسی اثر ضخامت پانل بر رفتار کلی سیستم‌های دیوار برشی فولادی بود. آن‌ها نتیجه گرفتند که ورق پانل، یک ضخامت بهینه دارد و چنان‌چه ضخامت از آن تجاوز کند، مد خرابی حاکم، ناپایداری ستون خواهد بود. شکل (۲-۲۲)، حلقه‌های هیسترزیس را برای این نمونه نشان می‌دهد.

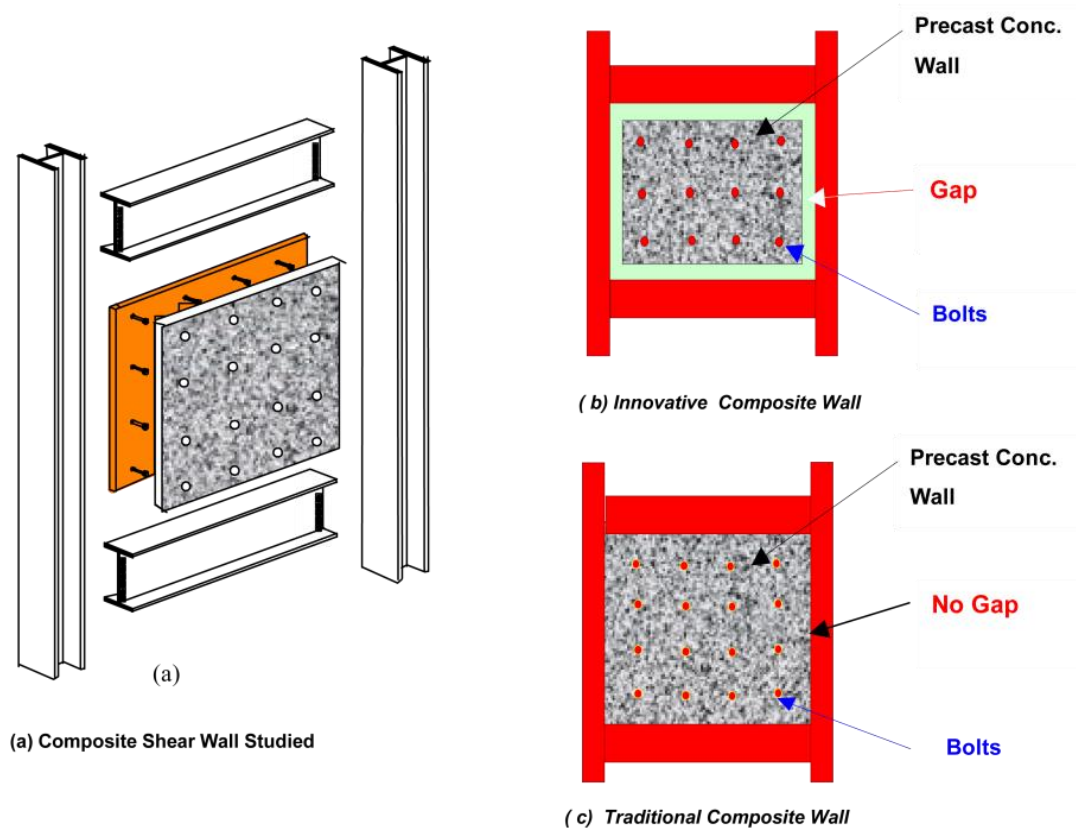


شکل ۲-۲۲- رفتار هیستریزیس نمونه‌های الغالی (Elgaaly) و همکارانش در سال ۱۹۹۳ [۲]

در حالت کلی، پژوهشگران استفاده از ورق‌های لاغرتر و بدون سخت‌کننده که در آن تسلیم ورق قبل از کمانش ستون رخ می‌دهد را پیشنهاد می‌کنند.

دو پروژه‌ی تحقیقاتی مشابه، در بخش مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه بریکلی کالیفرنیا بر روی دیوار برشی انجام شده است. یکی از پروژه‌ها در مورد دیوارهای برشی فولادی کامپوزیت بوده که توسط آستانه اصل و ژائو (Zhao) [۶] انجام شده است. آنها دو نمونه‌ی دیوار برشی کامپوزیت را در یک سیستم دوگانه به همراه قاب خمشی مورد مطالعه قرار دادند. نمونه‌های آزمایشی در همه‌ی مشخصات و شرایط بارگذاری شبیه به یکدیگراند، به جز آن که در نمونه‌ی اول یک فاصله‌ی $1/25$ in بین دیواربتنی با ستون‌ها و

تیرهای فلزی وجود دارد. شکل (۲-۲۳)، دو نمونه‌ی دیوار برشی فولادی کامپوزیت را نمایش می‌دهد.



Note: Steel shear wall is fillet-welded to steel tab plates on all four boundaries. The tab plates are fillet-welded to the boundary beam and column flanges.

شکل ۲-۲۳- دیوارهای برشی کامپوزیت (C-SPW) جدید و سنتی [۶]

نتایج آزمایش به این شرح‌اند:

- مقاومت حداکثر دیوار سنتی کمی بالاتر از نمونه‌ی مبتکرانه‌ی آن است و تفاوت در سختی نمونه‌ها کم است.
- رفتار دیوارهای برشی کامپوزیت سنتی و مبتکرانه در طی آزمایش نشان می‌دهد که هر دو نمونه، سیستم‌های خوبی برای مقابله با بارهای جانبی هستند. در چرخه‌های انتهایی، خسارت به دیوار بتنی دیوار برشی کامپوزیت سنتی بسیار هزینه‌بر است و تقریباً همه‌ی بتن آن خراب می‌شود و تنها شبکه‌ی آرماتورها به جا می‌ماند. در نمونه‌ی مبتکرانه آن، خسارت‌ها به دیوار بتنی نسبتاً محدود شده است. شکل (۲-۲۴)، تفاوت در خسارت وارده به دو نمونه را نمایش می‌دهد [۶].



a. Innovative Composite Shear Wall



b. Traditional Composite Shear Wall

شکل ۲-۲۴- مقایسه خسارت دیوار بتنی در دو نمونه سنتی و نوین در تغییر مکان نسبی جانبی یکسان [۶]

مواد و مصالح استفاده شده در ورق پانل عاملی تعیین کننده در ضخامت پانل است. ضخامت ورق نیز در تعیین اندازه‌ی المان‌های مرزی سیستم دیوار برشی فولادی تأثیرگذار است. برخی اوقات مقاومت و سختی پانل بزرگتر از مقدار مورد نیاز برای طراحی است، این امر باعث می‌شود که مقاطع بزرگ برای المان‌های مرزی بدست آید. المان‌های مرزی در شکل‌گیری میدان کششی قطری در ورق موثراند. وین (Vian)، برونو (Bruneau) و همکاران [۱۵، ۱۶، ۱۷] حفره‌هایی در راستای قطری پانل و همچنین گوشه‌های آن ایجاد کردند. ورق پانل از جنس فولاد^۱ LYS می‌باشد. آن‌ها در سیستم دیوار برشی فولادی، مقطع تیرکاهش یافته (RBS) را در انتهای تیر مهاري (در سطح بالا و پایین) بکار بردند. هدف از بکارگیری RBS در انتهای تیر مهاري آن است که مفصل پلاستیک در ستون یا وسط تیر اتفاق نیفتد و در انتهای تیرها شکل بگیرد. سه نمونه آزمایشگاهی با پانل بدون سوراخ، پانل سوراخ شده با سوراخ‌هایی در راستای ۴۵ درجه و پانل بریده شده در گوشه‌ها و تقویت شده مورد آزمایش قرار گرفتند. هر یک از نمونه‌ها رفتاری شکل پذیر و مختص به خود

1- Low Yield Strength
2- Reduced Beam Section

داشت. در همه‌ی نمونه‌ها مفصل پلاستیک در RBS شکل گرفت. در طی زلزله‌های مهم جهت کنترل پدیده‌ی تسلیم در قاب مرزی، استفاده از RBS برای تیر مهاریه سیستم دیوار برشی فولادی توصیه شده است. شکل (۲-۲۵)، نمونه‌ی دارای حفره‌های متعدد در راستای ۴۵ درجه پانل را نمایش می‌دهد.



شکل ۲-۲۵- یکی از نمونه‌های آزمایشگاهی وین (Vian) و همکاران (با حفره‌های متعدد در راستای ۴۵ درجه) [۱۵]

۲-۹-۵- کارهای آزمایشگاهی در تایوان و کره جنوبی

Qu و همکاران [۱۸] در سال ۲۰۰۸، دو نمونه‌ی تمام مقیاس دو طبقه را با جزئیات مقطع تیرکاهش یافته (RBS) و سقف کامپوزیت مورد آزمایش قرار دادند. هدف از انجام آزمایش، بررسی رفتار دیوارهای برشی فولادی تعمیر یافته بود. دیوارهای تعمیر شده‌ای که در آن، ورق پرکننده پس از زلزله تعویض شده و سپس تحت زلزله‌های متوالی قرار می‌گیرند. این برنامه‌ی آزمایشگاهی در دو فاز و در مرکز ملی تحقیقات در زمینه‌ی مهندسی زلزله^۱ (NCREE) در شهر تایپه کشور تایوان انجام شد. در فاز اول آزمایش، پانل‌های پرکننده

1- National Center for Research on Earthquake Engineering

توسط لوله‌هایی در هر دو سمت ورق مهار شدند، این امر باعث کاهش حداکثری جابجایی خارج از صفحه می‌شود. در فاز دوم آزمایش، ورق‌های پرکننده آسیب‌دیده با یک ورق جدید و بدون استفاده از مهار، جایگزین شدند. شکل (۲-۲۶)، گسیختگی اتصال جوشی پانل از ورق پشت‌بند نمونه آزمایشگاهی را نشان می‌دهد.



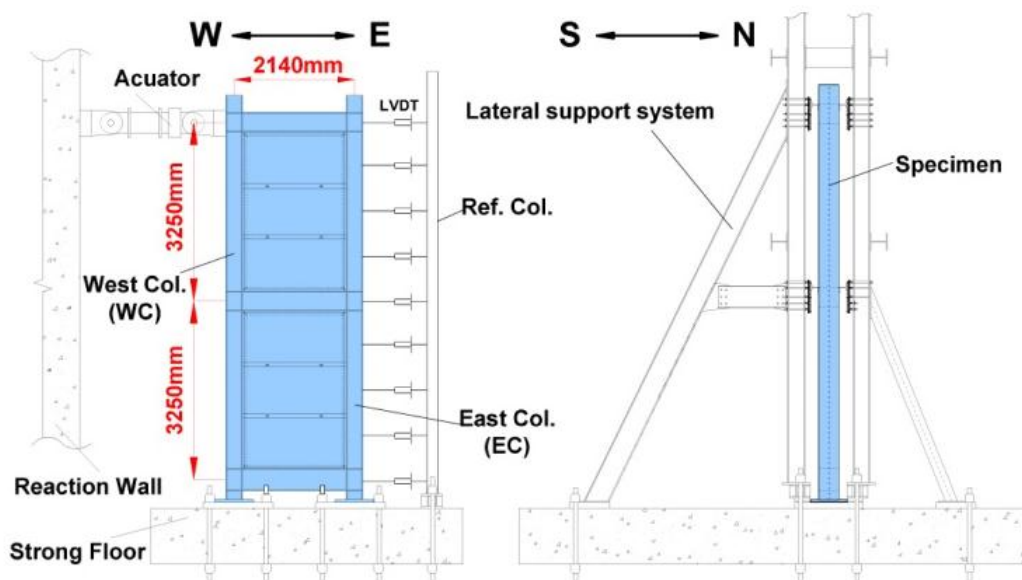
شکل ۲-۲۶- گسیختگی اتصال جوشی پانل از ورق پشت‌بند [۱۸]

نتایج بدست آمده از این برنامه‌ی آزمایشی به این شرح است:

- قیده‌های افقی نقش بسیار موثری را در ارتقا سرویس‌دهی دیوارهای برشی فولادی دارند.
- دیوارهای برشی فولادی تعمیرشده (پس از کم‌انرژی ورق پرکننده در زلزله‌ی قبلی با ورق‌ی جدید جایگزین شده است) می‌توانند مقدار زیادی از انرژی هیسترتیک را در زلزله‌ی بعد مستهلک کنند، بدون آن که خسارت شدیدی به قاب پیرامونی وارد شود و یا این که مقاومت کلی کاهش یابد.

- براساس معیارهای کتاب راهنمای AISC، نمونه‌ی دیوار برشی فولادی مورد آزمایش رفتار نیرو-جابجایی پایدار و ظرفیت استهلاک انرژی خوبی دارد، همچنین نامعینی قابل توجهی را از خود نشان می‌دهد.

Li و همکار [۱۹] در سال ۲۰۰۸ در NCREE تایوان، چهار نمونه‌ی ۲ طبقه‌ی باریک (با نسبت ۱:۰/۶) دارای ورق‌های فولادی با مقاومت تسلیم پایین و ضخامت ۲/۶ میلی‌متر را مورد آزمایش قرار دادند. مقطع تیر کاهش یافته (RBS) در انتهای تیرهای طبقات بکار برده شده است. دو عدد از نمونه‌ها با قیود افقی لوله‌ای شکل در دو سمت پانل با استفاده از بولت به بال‌های ستون مفصل شده‌اند. دو نمونه‌ی دیگر آزمایشی، هیچ قیدی ندارند. هدف از این برنامه‌ی آزمایشگاهی، بررسی عملکرد لرزه‌ای قاب‌های دیوار برشی فولادی باریک و مقید شده بود. شکل (۲-۲۷)، نمونه Li و همکار را به صورت شماتیک نمایش می‌دهد.



شکل ۲-۲۷- آزمایش بار چرخه‌ای بر روی نمونه دیوار برشی فولادی باریک [۱۹]

نتایج آزمایش حاکی از موثر بودن RBS و همچنین اتصالات جوشی جان تیر به ستون می‌باشد. قیود افقی (لوله‌های فولادی) نیروی محوری در تیرها و ستون‌ها را کاهش

می‌دهند. قاب دیوار برشی فولادی مقید شده در مقایسه با قاب غیر مقید، تغییر شکل‌های خارج از صفحه‌ی کوچکتري دارد و انرژی لرزه‌ای بیشتری را مستهلک می‌کند.

پارک (Park) و همکاران [۲۰] در سال ۲۰۰۷، آزمایشی بر روی پنج نمونه (سه طبقه‌ی یک دهانه) با ورق پرکننده‌ی نازک و بدون سخت کننده انجام دادند. ضخامت ورق و فشردگی ستون پارامترهای مورد بررسی در این آزمایش بودند. نتایج آزمایش به شرح زیر است:

- دیوارها با ورق نازک رفتار برش غالب^۱ را از خود نمایش دادند. پس از تسلیم ورق پرکننده، مفاصل پلاستیک در انتهای تیر هر طبقه و در پای ستون‌ها شکل گرفت. این نوع از دیوارها، ظرفیت تغییر شکل و استهلاک انرژی بسیار خوبی از خود نشان می‌دهند. دیوارها با ورق ضخیم رفتار خمشی غالب^۲ را نمایش دادند. در این نوع دیوارها به دلیل سختی برشی زیاد ورق، بیشتر مفاصل پلاستیک در پای دیوار اتفاق می‌افتد.
- در اثر کماتش محلی زود هنگام نمونه‌های دارای ستون غیرفشرده، ظرفیت تحمل بار و تغییر شکل نمونه به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد.

در سال ۲۰۰۹ پارک (Park) و چوی (Choi) [۲۱] در کره جنوبی، چند نمونه‌ی آزمایشگاهی^۳ طبقه‌ی دیوار برشی فولادی و $\frac{1}{3}$ مقیاس را با حالت‌های مختلف ورق پرکننده تحت بار چرخه‌ای مورد آزمایش قرار دادند. آنها پارامترهای زیر را در این آزمایش تغییر دادند:

- نوع اتصال‌ها (برای اتصال بین قاب مرزی و ورق پرکننده از پیچ به جای جوش استفاده کردند)
- طول اتصال‌های جوش بین قاب مرزی و ورق (به جای اتصال جوشی منقطع از جوش یکسره استفاده شد)

1-shear-dominated
2-flexure-dominated

نتایج آزمایش به شرح زیر است:

- دیوارهایی که در آن ورق پانل با اتصال‌های پیچی وصل شده است، سختی اولیه و ظرفیت بزرگتری را در مقایسه با دیوارهای با اتصال‌های جوشی ورق پرکننده از خود نشان می‌دهند اما به دلیل، لغزش پیچها در محل اتصال‌ها، ظرفیت تغییرشکل کاهش می‌یابد.
- نمونه‌ای که در آن ورق پرکننده با جوش منقطع متصل شده است ظرفیت تغییر شکل بسیار خوبی دارد که معادل با دیوار با اتصال جوش یکسره‌ی ورق پرکننده است؛ اگرچه ظرفیت تحمل بار و استهلاک انرژی آن نسبتاً کمتر است.

فصل سوم - مدل سازی اجزای محدود

۳-۱- پیش‌گفتار

به طور کلی برای حل مسائل فیزیکی سه روش موجود است:

(۱) روش تجربی^۱

(۲) روش تحلیل دقیق^۲

(۳) روش عددی^۳

روش تجربی یا آزمایشگاهی با توجه به اینکه مبتنی و برگرفته از خود واقعیت می‌باشد، روشی مناسب محسوب می‌گردد. روش حل دقیق همان‌طور که از نام آن پیداست به محاسبه دقیق پارامتری معادلات دیفرانسیل حاکم بر میدان‌های فیزیکی همچون میدان حرارتی، میدان تنش، میدان الکتریکی و ... می‌پردازد. روش عددی برای حل تقریبی معادلات دیفرانسیل جزئی و نیز حل انتگرال‌هاست. اساس کار این روش، حذف کامل معادلات دیفرانسیل یا ساده‌سازی آن‌ها به معادلات دیفرانسیل معمولی است که با روش‌های عددی مانند روش اویلر قابل حل باشد. در حل معادلات

1- Experimental Method
2- Exact Solution Method
3- Numerical Solution Method

دیفرانسیل جزئی، مسئله مهم این است که به معادله‌ی ساده‌ای برسیم که از نظر عددی پایدار باشد به سخن دیگر خطا در داده‌های اولیه و در حین حل، آن قدر نباشد که به نتایج نامفهومی منتهی شود. روش‌هایی با مزایا و معایب مختلف برای این امر وجود دارد. روش اجزای محدود یا روش المان‌های محدود^۱ (FEM) از زیرمجموعه‌های این روش است. روش حل عددی یکی از پرکاربردترین روش‌های مورد استفاده در حل مسائل مهندسی است. از جمله مزیت‌های حل عددی به‌ویژه روش اجزای محدود نسبت به روش‌های دیگر به شرح زیر است:

- ۱) روش آزمایشگاهی پرهزینه است در حالی که حل عددی چنین نیست.
 - ۲) روش حل دقیق در تحلیل مدل‌ها با هندسه‌ی پیچیده ناتوان است و تنها روش‌های حل عددی به‌ویژه اجزای محدود در این زمینه کارگشا است.
 - ۳) در حل مسائلی که شرایط مرزی کمی پیچیده است، حل دقیق ناتوان است و تنها روش‌های مرسوم عددی در حل این نوع مسائل بکار می‌رود.
- در میان نرم‌افزارهای عمومی اجزای محدود، نرم‌افزارهای معتبری همچون ABAQUS، ANSYS، NASTRAN به چشم می‌خورد که دارای قابلیت‌های بالایی می‌باشند [۲۲].

در این فصل، نحوه مدل‌سازی دیوار برشی فولادی اعم از انتخاب المان‌ها، بارگذاری، شرایط مرزی، شبکه بندی اجزای محدود و ... شرح داده خواهد شد. نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS به دلیل قابلیت شبیه‌سازی مسایل پیچیده مهندسی در زمینه‌های مختلف و کاربرپسند بودن آن برگزیده شده است. مدل نرم‌افزاری، باید بیان‌گر رفتار واقعی یک دیوار برشی فولادی باشد. از این رو، نتایج مدل اجزای محدود با نتایج یک نمونه آزمایشگاهی معتبر مقایسه می‌شود تا صحت مدل‌سازی آشکار گردد. چنانچه درستی مدل‌سازی اثبات شود، نتایج نرم‌افزار معتبر و قابل اطمینان خواهد بود و می‌تواند جهت مطالعه‌ی عوامل موثر بر رفتار دیوار برشی فولادی مورد استفاده قرار گیرد.

۳-۲- معرفی نرم‌افزار ABAQUS

نرم‌افزار ABAQUS، مجموعه‌ای از برنامه‌های شبیه‌سازی قدرتمند مهندسی است که بر پایه‌ی روش اجزای محدود (FEM) بنا شده است. بدون آشنایی با FEM، استفاده از نرم‌افزارهای اجزای محدود می‌تواند منجر به شبیه‌سازی نادرست و نتایج گمراه‌کننده شود. این نرم‌افزار به چندین ماژول تقسیم شده است و هر ماژول بخشی از فرآیند مدل‌سازی را برعهده دارد. برای مثال ماژول‌هایی برای تعریف هندسه مدل، خصوصیات مصالح، اندرکنش سازه با محیط پیرامون، تولید شبکه‌بندی و تعریف شرایط مرزی تعریف شده است. در ادامه به تاریخچه‌ای مختصر از این نرم‌افزار و قابلیت‌های شبیه‌سازی آن در مسائل پیچیده مهندسی اشاره خواهد شد.

تاریخچه‌ی نرم‌افزار ABAQUS

ایده‌ی اصلی نرم‌افزار ABAQUS در رساله‌ی دیوید هبیت (David Hibbitt) در سال ۱۹۷۲ میلادی تحت عنوان «مکانیک محاسباتی بر پایه‌ی روش اجزای محدود» در دانشگاه براون (Brown) ارائه شد. در سال ۱۹۷۸ میلادی، هبیت (Hibbitt) به همراه دو شریک خود به نام‌های کارلسون (Karlsson) و سورنسون (Sorenson)، شرکت HKS را تأسیس نمودند و اولین ویرایش ABAQUS را منتشر کردند. شرکت HKS، تحلیل‌گر ABAQUS/Explicit را در سال ۱۹۹۱ به مجموعه‌ی نرم‌افزار اضافه کرد و نرم‌افزار اصلی خود را منتشر ساخت. در همان سال، سرانجام اولین نسخه‌ی گرافیکی تحت عنوان ABAQUS/CAE به بازار عرضه شد. کلمه‌ی CAE مخفف عبارت Computer-Aided Engineering به معنای مهندسی با کمک‌گرفتن از کامپیوتر می‌باشد.

قابلیت‌های نرم‌افزار ABAQUS

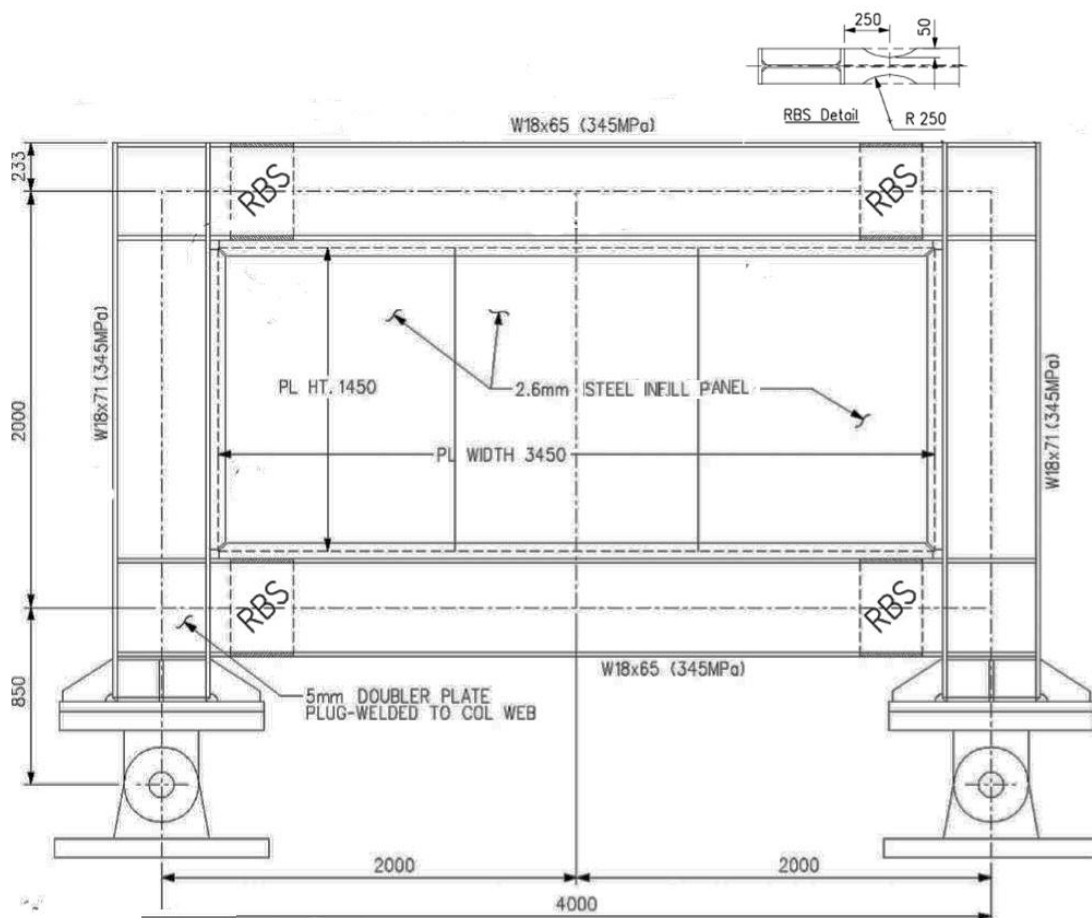
تحلیل نرم‌افزار ABAQUS بر پایه‌ی روش اجزا محدود می‌باشد. از مزایای این نرم‌افزار می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- استفاده‌ی آسان (مدلسازی، روی هم قراردادن، تعیین تماس و اندرکنش‌های سازه‌ای و ...)
- تحلیل دقیق و نتایج معتبر
- داشتن دو تحلیل گر Standard و Explicit برای انجام تحلیل ایستایی و دینامیکی
- دارا بودن مدل‌های رفتاری پیشرفته و متنوع برای مواد همچون فلزات، لاستیک، فوم، مواد ویسکوالاستیک، بتن، خاک، پلیمرها، سیالات و ...
- توانایی شبیه‌سازی مسائل با تنوع فراوان همانند مسائل انتقال حرارت، مسائل انتشار جرم، مسائل مدیریت حرارت اجزای الکتریکی، مسائل مربوط به صوت، مکانیک خاک و ...
- توانایی در حل دقیق مسائل دینامیکی غیرخطی گذرا مانند برخورد و ضربه
- سهولت در انتقال فایل و ارتباط با سایر نرم‌افزارها مانند CATIA و SolidWorks
- قابلیت شبیه‌سازی مسائل پیچیده مهندسی را در زمینه‌های مختلف مهندسی عمران، مکانیک و ... داراست.
- دارا بودن کتابخانه‌ی گسترده‌ای از اجزا، مدل‌سازی هر نوع هندسه به صورت مجازی و تحلیل خطی یا غیرخطی آن

ABAQUS محصول هزاره‌ی سوم است و به عنوان یک نرم‌افزار بسیار دقیق پژوهشی و کاربردی در دانشگاه و صنعت شناخته می‌شود. تئوری کامل این نرم‌افزار مبتنی بر تحلیل غیرخطی اجزای محدود پیشرفته است و تحلیل غیرخطی را به صورت دقیق انجام می‌دهد. کاربرد این نرم‌افزار توانمند در مقاله‌ها روزبه‌روز افزایش می‌یابد [۲۳ و ۲۴].

۳-۳- مشخصات نمونهی مدلسازی شده

همان طور که پیش تر اشاره شد، در این فصل، مدل اجزای محدود با نتایج یک نمونه آزمایشگاهی معتبر مقایسه می شود تا صحت مدلسازی آشکار گردد. از این رو، نمونهی تجربی برونو (Bruneau) و وین (Vian) [۱۵] انتخاب شده است. دیوار برشی فولادی نامبرده، یک نمونهی یک طبقه، یک دهانه و بدون سخت کننده می باشد. قاب مورد نظر دارای پهنای ۴ متر و ارتفاع ۲ متر (آکس تا آکس) است. مقاطع تیر و ستون نمونهی آزمایشگاهی به ترتیب W18*65 و W18*71 در نظر گرفته شده است. ضخامت ورق پانل ۲/۶ میلیمتر است. تیر بالا و پایین طبقه، مشخصات اتصال RBS را داراست. مشخصات هندسی نمونه، در شکل (۳-۱) آمده است.



شکل ۳-۱- مشخصات هندسی نمونه آزمایشگاهی منتخب برای مدلسازی [۱۵]

مصالح قاب پیرامونی نمونه‌ی آزمایشگاهی، فولاد ASTM A572 با تنش تسلیم 345 MPa است. پانل پرکننده‌ی سیستم دارای تنش تسلیم 165 MPa و تنش نهایی 305 MPa می‌باشد. ضریب پواسون برابر با 0.3 است. رفتار مصالح ایزوتروپیک می‌باشد [۱۵].

به منظور مدلسازی رفتار مواد در نرم‌افزار ABAQUS، مقادیر تنش واقعی (Cauchy stress) و کرنش لگاریتمی مورد نیاز است. منحنی تنش-کرنش فولاد، مقادیر تنش و کرنش اسمی (مهندسی) مصالح را فراهم می‌کند زیرا بر مبنای سطح مقطع اولیه و طول اولیه‌ی نمونه بدست می‌آید. از این‌رو، با استفاده از داده‌های آزمایش کشش، می‌توان مقادیر تنش واقعی (σ_{true}) و کرنش پلاستیک لگاریتمی (ϵ_{ln}^{pl}) را از روابط زیر یافت:

$$\sigma_{true} = \sigma_{nom}(1 + \epsilon_{nom}) \quad (1-3)$$

$$\epsilon_{ln}^{pl} = \ln(1 + \epsilon_{nom}) - \frac{\sigma_{true}}{E} \quad (2-3)$$

E ضریب ارتجاعی، σ_{nom} تنش اسمی (مهندسی) و ϵ_{nom} کرنش اسمی (مهندسی) می‌باشد [۲۴].

۳-۴- مروری بر مفهوم تحلیل غیرخطی

در تحلیل خطی سازه‌ها، رابطه‌ی ایستایی به صورت زیر برقرار است:

$$\{F\} = [K]\{U\} \quad (3-3)$$

در این رابطه، $\{F\}$ بردار نیروها، $[K]$ ماتریس سختی سازه و $\{U\}$ بردار تغییر مکان است. در تحلیل خطی سازه‌ها، $[K]$ و $\{F\}$ ثابت هستند ولی در تحلیل غیرخطی، $[K]$ یا $\{F\}$ و یا هر دوی آن‌ها، تابعی از تغییر مکان‌هاست. در این نوع مسائل، $\{U\}$ را باید از روش‌های تکرار یافت.

رفتار غیرخطی هندسی

در تحلیل خطی، تغییر شکل‌های سازه در حین بارگذاری، کوچک فرض می‌شوند. از این‌رو، شکل هندسی سازه را می‌توان بدون تغییر در نظر گرفت و این به آن معناست که سختی سازه بر مبنای شکل اولیه‌ی آن برپا می‌شود و ثابت باقی می‌ماند.

در تحلیل غیرخطی هندسی، شکل هندسی سازه سبب تغییر سختی آن می‌گردد. در سازه‌ها با شکل هندسی خاص و یا بارگذاری ویژه، فرض تغییرشکل‌های کوچک صحیح نمی‌باشد. به بیان دیگر تغییر شکل‌های بزرگ سبب تغییر در شکل هندسی سازه در حین بارگذاری شده و ماتریس سختی به تغییر مکان‌های گرهی وابسته می‌گردد و در نتیجه معادله‌ی حاکم بر سازه به صورت غیرخطی درمی‌آید.

رفتار غیرخطی مواد

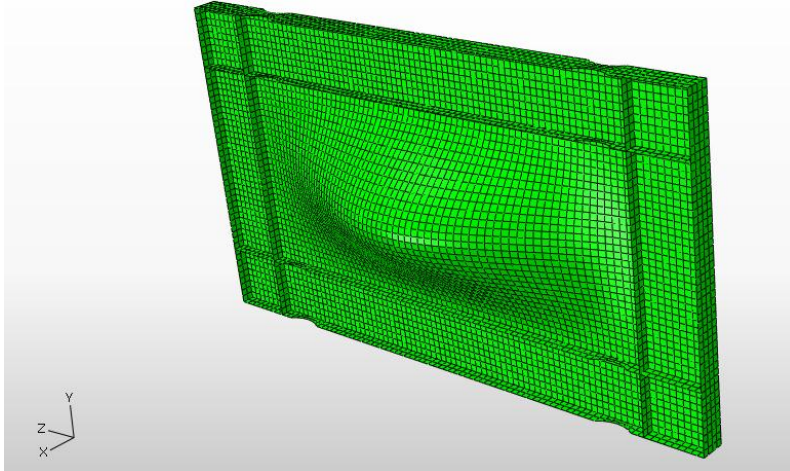
مواد گوناگون نمودار تنش-کرنش متفاوتی دارند. غیرخطی بودن رابطه‌ی تنش-کرنش، سبب غیرخطی شدن تحلیل می‌گردد. از این رو در رابطه‌سازی اجزای محدود می‌توان ماتریس ویژگی‌های مواد را وابسته به تغییر مکان‌های گرهی دانست و در نتیجه معادله حاکم بر رفتار سازه غیرخطی خواهد بود. به این حالت رفتار غیرخطی مواد می‌گویند.

۳-۵- نقص اولیه‌ی ورق پانل

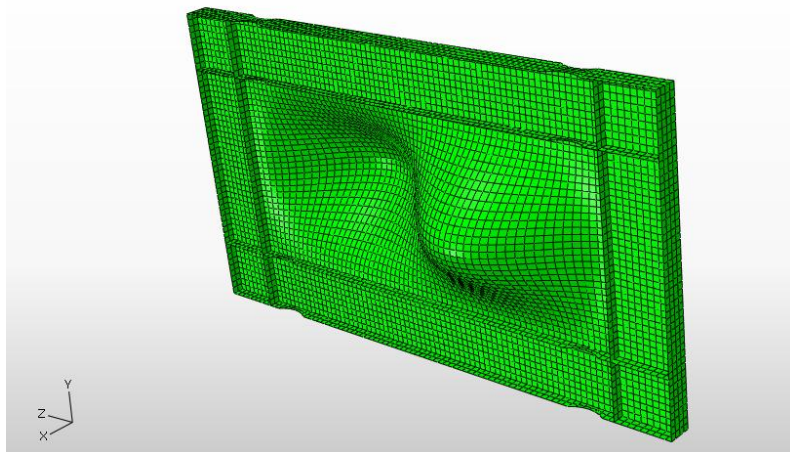
چنانچه مسائل حین اجرا و نصب پانل در قاب در نظر گرفته شود، به نظر می‌رسد که ورق پانل با ضخامت $2/6$ میلی‌متر و نسبت لاغری $1327(b/t)$ ، کاملاً صاف نبوده است. اطلاعاتی در مورد اعوجاج و شکل اولیه‌ی ورق در دسترس نیست. از سوی دیگر، مدل‌سازی دیوار برشی فولادی با ورق کاملاً صاف و بدون اعوجاج اولیه صحیح نیست زیرا:

- (۱) نرم‌افزار ABAQUS، سختی برشی سیستم را بیشتر از مقدار واقعی تخمین خواهد زد.
- (۲) چنانچه ورق کاملاً صاف و بدون اعوجاج مدل‌سازی شود، میدان کششی قطری شکل نمی‌گیرد و رفتار واقعی نمونه بدست نخواهد آمد.

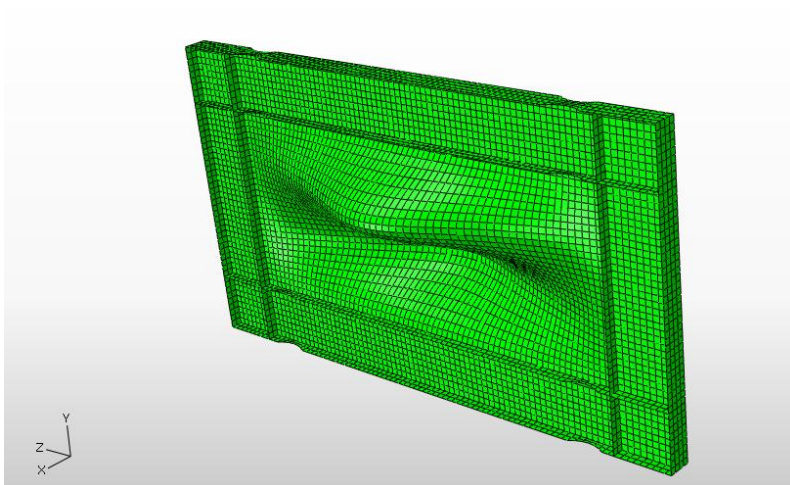
از این‌رو، تحلیل کمانشی بر روی سیستم دیوار برشی فولادی انجام شده است تا مدهای کمانشی پانل پرکننده تعیین گردد. شکل (۳-۲) تا (۳-۵)، چهارمد کمانشی اول نمونه را نمایش می‌دهد.



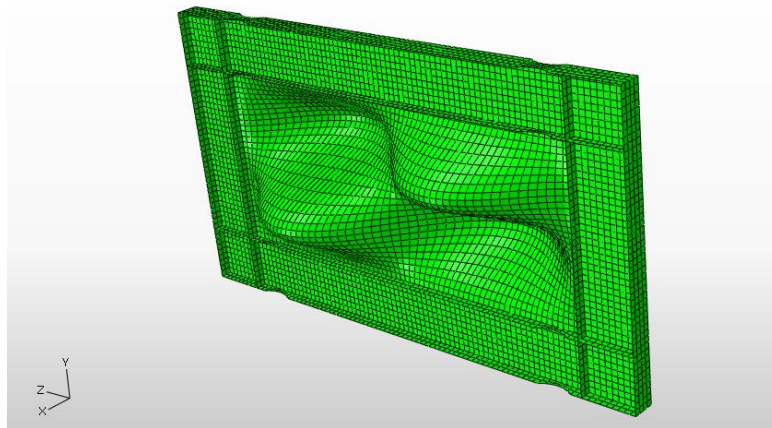
شکل ۳-۲- مد اول کمانشی پانل دیوار برشی فولادی



شکل ۳-۳- مد دوم کمانشی پانل دیوار برشی فولادی



شکل ۳-۴- مد سوم کمانشی پانل دیوار برشی فولادی



شکل ۳-۵- مد چهارم کمانشی پانل دیوار برشی فولادی

نتایج تحلیل کمانشی، به عنوان عیب و نقص اولیه (Imperfection) به نمونه اعمال شده است. با استفاده از روش تحلیل استاتیکی غیرخطی (Static Riks)، تحلیل بعد از کمانش (Postbuckling) صورت گرفته است.

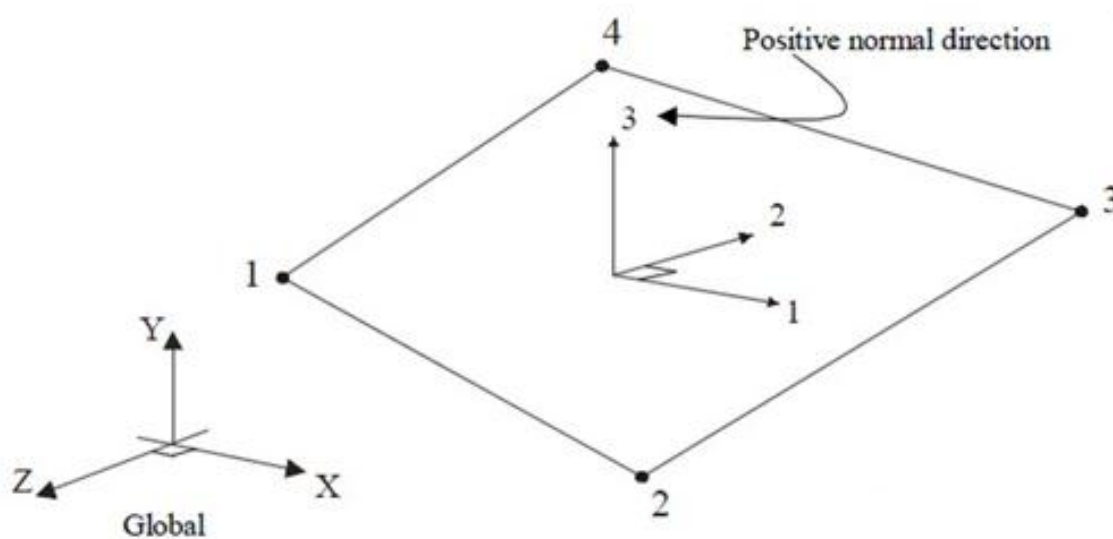
۳-۶- شرایط مرزی

در طی آزمایش، پشت‌بند (تکیه‌گاه‌های جانبی) در بالای هر ستون وجود دارند تا از حرکت خارج از صفحه‌ی قاب جلوگیری کند. با توجه به محل تکیه‌گاه‌های جانبی، جابجایی انتقالی در راستای خارج از صفحه‌ی نمونه آزمایشگاهی (در بالای هر ستون) مقید شده است.

اتصال پایه‌های نمونه‌ی آزمایشگاهی به کف، یک اتصال مفصلی است. از این‌رو، یک نقطه مرجع (Reference point) در موقعیت تکیه‌گاه‌ها تعریف شده و کلیه‌ی درجات آزادی نقطه‌ی یادشده به جز دوران حول محور خارج از صفحه مقید گشته است تا شرایط تکیه‌گاه مفصلی در پایه‌ی مدل ایجاد شود.

۳-۷- المان S4R

دیوار برشی فولادی شامل تیر، ستون و ورق نازک پانل است. کلیه‌ی اجزای این سیستم با استفاده از المان پوسته مدل‌سازی شده است. المان پوسته‌ی S4R، یک المان ۴‌گره‌ی با قابلیت انحنای دوطرفه و با انتگرال‌گیری کاهش یافته است. هر گره از این المان دارای سه درجه آزادی انتقالی (U_z, U_y, U_x) و سه درجه آزادی دورانی ($\theta_z, \theta_y, \theta_x$) می‌باشد. المان S4R، قابلیت مدل‌سازی رفتار غیرخطی هندسی و غیرخطی مواد و همچنین انتگرال‌گیری عددی در راستای ضخامت پوسته را داراست. بهره‌گیری از روش انتگرال‌گیری کاهش یافته می‌تواند اطلاعات دقیقی را در اختیار کاربر قرار دهد و در مقایسه با روش انتگرال‌گیری کامل، زمان پردازش توسط کامپیوتر را می‌کاهد. مدل‌سازی رفتار پوسته‌های نازک و ضخیم با استفاده از این المان امکان‌پذیر است. شکل (۳-۶)، المان S4R را به صورت شماتیک نمایش می‌دهد [۲۴].



شکل ۳-۶- المان S4R [۲۴]

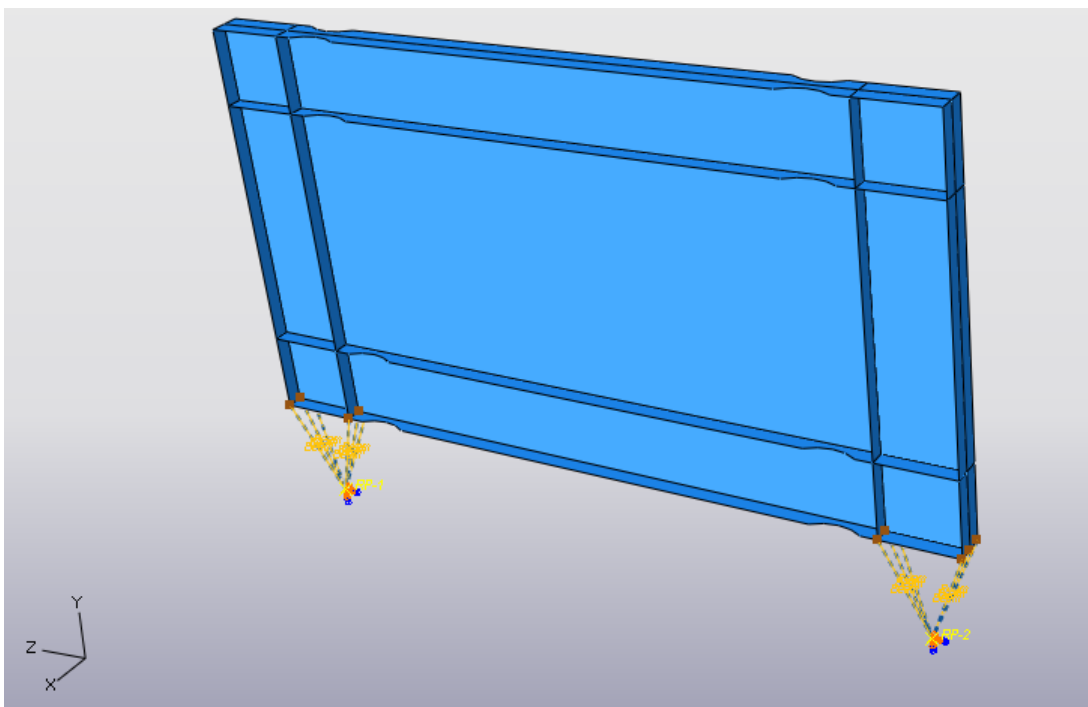
۳-۸- المان Connector

در نمونه‌ی آزمایشگاهی، قاب و پانل پرکننده بر روی دو پایه قرار گرفته‌اند. اطلاعاتی در زمینه‌ی پایه‌ها (مصالح یا مقطع آن) در اختیار نیست. اما به نظر می‌رسد که نمونه‌ی

آزمایشگاهی دیواربرشی فولادی بر روی پایه‌هایی با سختی زیاد قرار گرفته است. پیش‌تر، شکل (۳-۱)، نمونه‌ی آزمایشگاهی را به همراه پایه‌های آن به صورت شماتیک نمایش داده است.

از تعدادی المان اتصال‌دهنده جهت مدلسازی پایه‌ها استفاده شده است تا ارتباط میان قاب و محل تکیه‌گاه مفصلی را فراهم کند. در المان‌های اتصال‌دهنده‌ی نرم‌افزار ABAQUS، همواره جابجایی و چرخش نسبی مطرح است. مولفه‌های حرکتی نسبی، بسته به نوع المان اتصال می‌تواند مقید یا غیرمقید باشد. جهت مدلسازی پایه‌های نمونه‌ی آزمایشگاهی، از المان اتصال‌دهنده‌ی Beam استفاده شده است. این المان، کلیه مولفه‌های انتقالی نسبی و همچنین مولفه‌های دوران نسبی میان گره‌های اتصال‌دهنده را مقید می‌کند و همانند یک تیر صلب میان دو گره عمل می‌کند [۲۴].

شکل (۳-۷)، نمونه‌ی مدلسازی شده توسط نرم‌افزار ABAQUS را نمایش می‌دهد که شامل دیوار برشی فولادی و پایه‌های آن می‌باشد.



شکل ۳-۷- نمونه‌ی مدلسازی شده توسط ABAQUS

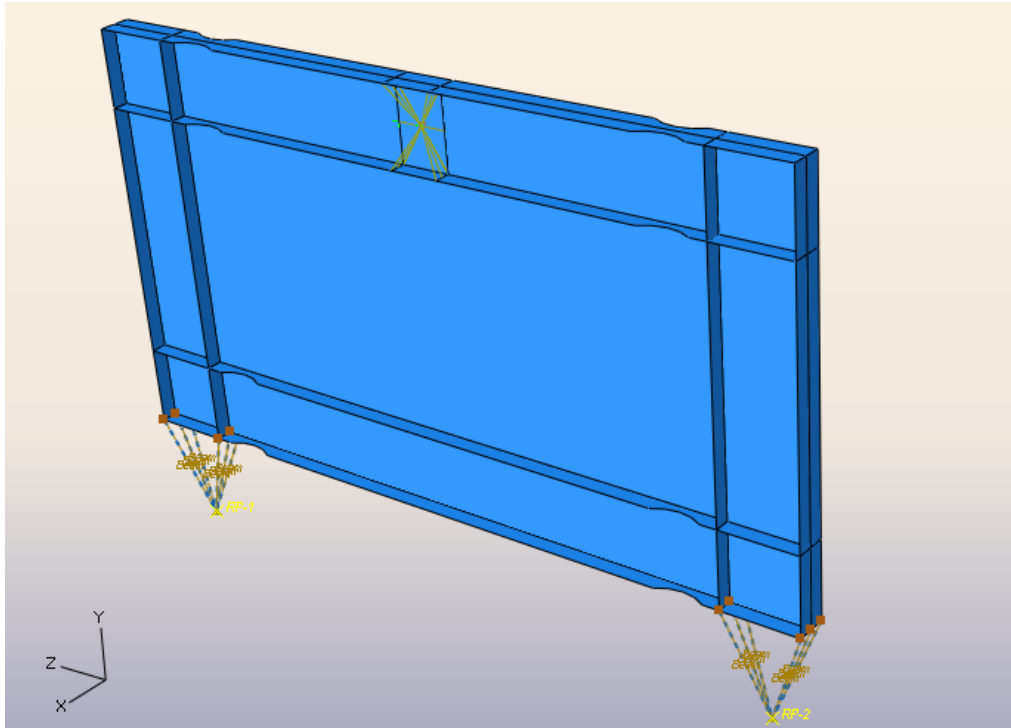
۳-۹- مدلسازی بارگذاری

بارگذاری نمونه‌ی آزمایشگاهی، از طریق یک قطعه‌ی H شکل و توسط چهار جک انجام شده است. قطعه‌ی نامبرده شامل یک تیر افقی قوطی شکل است. این قطعه به وسط تیر فوقانی نمونه جوش شده و پایه‌های قائم آن به تیر قوطی شکل وصل شده است. جک‌ها از طریق این قطعه‌ی H شکل، بار را به دیوار برشی فولادی اعمال می‌کنند. شکل (۳-۸)، نمونه آزمایشگاهی و نحوه‌ی قرارگیری جک‌ها را نمایش می‌دهد.



شکل ۳-۸- نمونه‌ی آزمایشگاهی و نحوه‌ی قرارگیری جک‌ها [۸]

با توجه به نحوه‌ی بارگذاری نمونه‌ی واقعی، از قید Coupling جهت مدلسازی بارگذاری استفاده شده است. این قید، حرکت یک نقطه کنترل (Control point) را به حرکت مجموعه‌ای از گره‌ها کوپل می‌کند. نقطه‌ی کنترل در میانه‌ی تیر فوقانی تعریف شده است. بارگذاری پوش‌اور (Pushover) از طریق این نقطه، بر روی سطحی به عرض ۳۰ سانتی‌متر و به مرکز میانه‌ی تیر اعمال می‌شود. شکل (۳-۹)، مدلسازی بارگذاری و قید Coupling را نمایش می‌دهد.



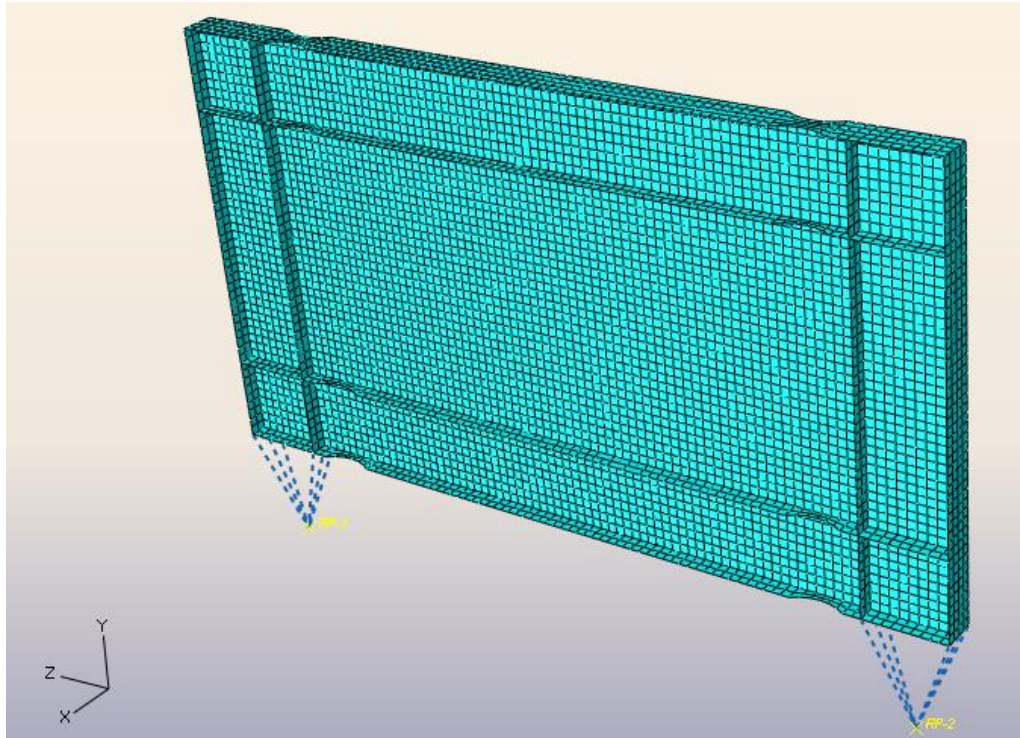
شکل ۳-۹- استفاده از قید Coupling در تیر فوقانی نمونه به منظور مدل‌سازی بارگذاری

۳-۱۰- شبکه‌بندی اجزای محدود

دیوار برشی فولادی شامل اجزای مختلف (تیر، ستون، ورق پانل و ...) می‌باشد. نکته‌ی مهم در شبکه‌بندی (مش‌بندی) آن است که تعداد المان‌های تولید شده، به گونه‌ای باشد که گره‌های المان‌های مجاور (مثلاً جان و بال تیر) بر روی هم منطبق باشند. در چنین حالتی است که انتقال نیرو میان اجزای مختلف مدل اجزای محدود صورت می‌گیرد و اتصالات صلب ایجاد می‌شود. وجود گره‌های مشترک در المان‌های مجاور، سازگاری تغییر شکل‌ها را بین اجزای مختلف فراهم می‌کند. اجزای مختلف مدل ایجاد شده با استفاده از روش Structured شبکه‌بندی شده‌اند. این روش مناسب برای المان‌های منظم با گوشه‌های نسبتاً متعامد است.

به علت کماتش‌های متعدد در نواحی مختلف مدل اجزای محدود، همگرایی عددی به سختی صورت می‌گیرد. لذا شبکه‌بندی درشت مناسب نیست. شبکه‌بندی ریز هم، زمان

تحلیل توسط نرم‌افزار اجزای محدود را افزایش می‌دهد. ابعاد شبکه‌بندی برای هر مدل تا جایی کاهش داده شده است که در نتایج تغییر قابل ملاحظه‌ای را ایجاد نکند. از این‌رو، اندازه‌ی المان‌ها حدود ۵ سانتیمتر انتخاب شده است. شکل (۳-۱۰)، شبکه‌بندی مدل اجزای محدود را نمایش می‌دهد.



شکل ۳-۱۰- شبکه‌بندی مدل اجزای محدود

۳-۱۱- مشکلات همگرایی در مدل‌سازی دیوار برشی فولادی

ABAQUS/Standard، معادلات تعادل را به روش تکرارمی‌یابد. چنانچه، پاسخ

سیستم غیرخطی باشد؛ معادله‌ی تعادل در بازه‌ی زمانی $t+\Delta t$ به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\underline{R}_{t+\Delta t} - \underline{F}_{t+\Delta t} = 0 \quad (3-4)$$

$\underline{R}_{t+\Delta t}$ ، بردار نیروهای خارجی اعمال شده و $\underline{F}_{t+\Delta t}$ ، بردار نیروهای داخلی گره‌ها (تنش

المان‌ها) است و به تغییرمکان گره‌ها وابسته است.

ABAQUS/Standard با استفاده از روش تکراری، معادله‌ی (۳-۴) را حل می‌کند و این معادله را می‌توان به صورت زیر نوشت:

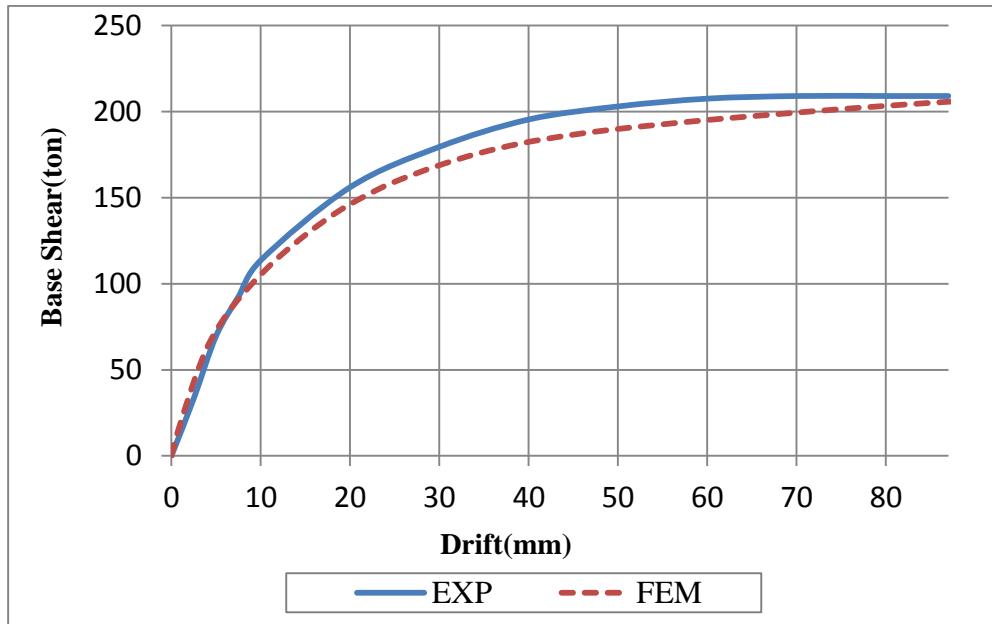
$$\underline{R}_{t+\Delta t}(U^*) - \underline{E}_{t+\Delta t}(U^*) = \underline{f}_{t+\Delta t}(U^*) \quad (۳-۵)$$

U^* ، تقریبی از حل دقیق و $\underline{f}_{t+\Delta t}(U^*)$ ، بردار نیروهای نامتعادل در لحظه‌ی $t+\Delta t$ است. بردار نیروهای نامتعادل، سبب می‌شود که روش تکراری تا رسیدن به دقت مورد نظر، ادامه یابد [۲۴].

تحلیل غیرخطی دیوار برشی فولادی توسط نرم افزار ABAQUS مشکلات همگرایی روبرو است. علت آن، تغییر شکل‌های خارج از صفحه‌ی پانل و شکل‌گیری میدان کششی قطری در آن می‌باشد. روش‌های متنوعی برای رفع این مشکل بررسی شده است که از آن جمله می‌توان به بررسی عوامل موثر در شبکه‌بندی اجزای محدود، تغییر اندازه‌ی بازه‌های افزایشی (increment) پیش فرض برنامه، اعمال عیب و نقص اولیه با شکل‌های مختلف، بررسی معیارهای همگرایی، روش‌های تحلیل گوناگون و... اشاره نمود.

۳-۱۲- مقایسه‌ی نتایج مدل‌سازی با نمونه آزمایشگاهی

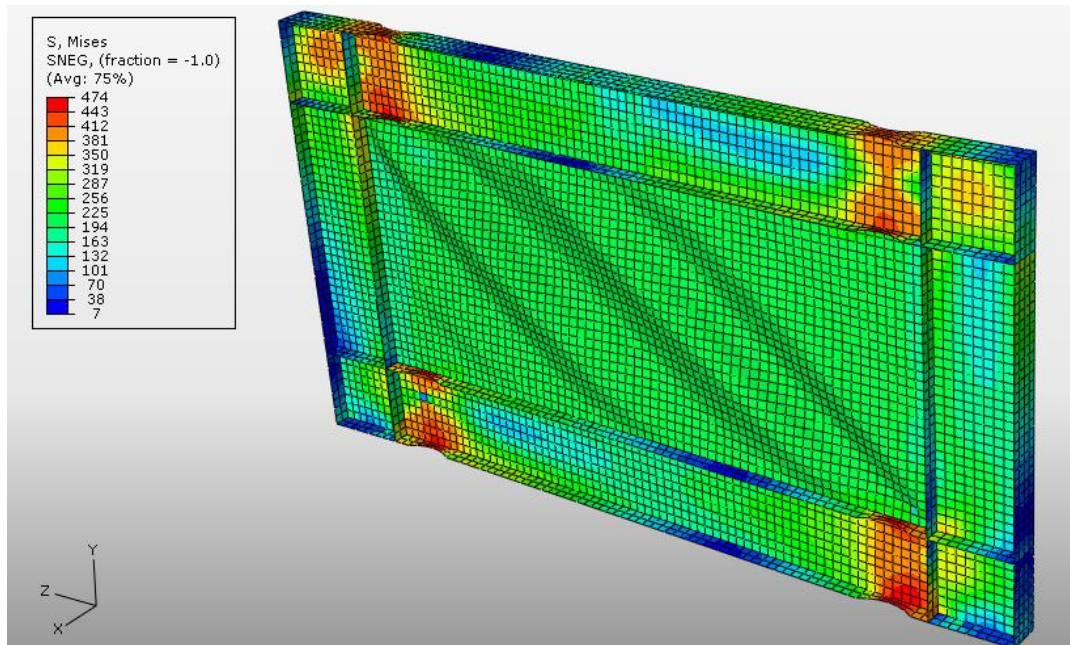
اولین سوال در یک مدل‌سازی کامپیوتری آن است که نتایج بدست آمده تا چه حدی قابل اطمینان و استناد است. به سخن دیگر، خروجی‌های نرم‌افزار تا چه اندازه می‌تواند مبنایی برای استنتاج‌های بعدی قرار گیرد. از این رو لازم است، صحت مدل‌سازی را اثبات کرد. یک نمونه‌ی آزمایشگاهی معتبر دیوار برشی فولادی (کار آزمایشگاهی Bruneau و Vian [۱۵])، مبنای بررسی صحت مدل اجزای محدود قرار گرفته است. شکل (۳-۱۱)، رفتار مدل اجزای محدود را در مقایسه با نمونه‌ی آزمایشگاهی نمایش می‌دهد.



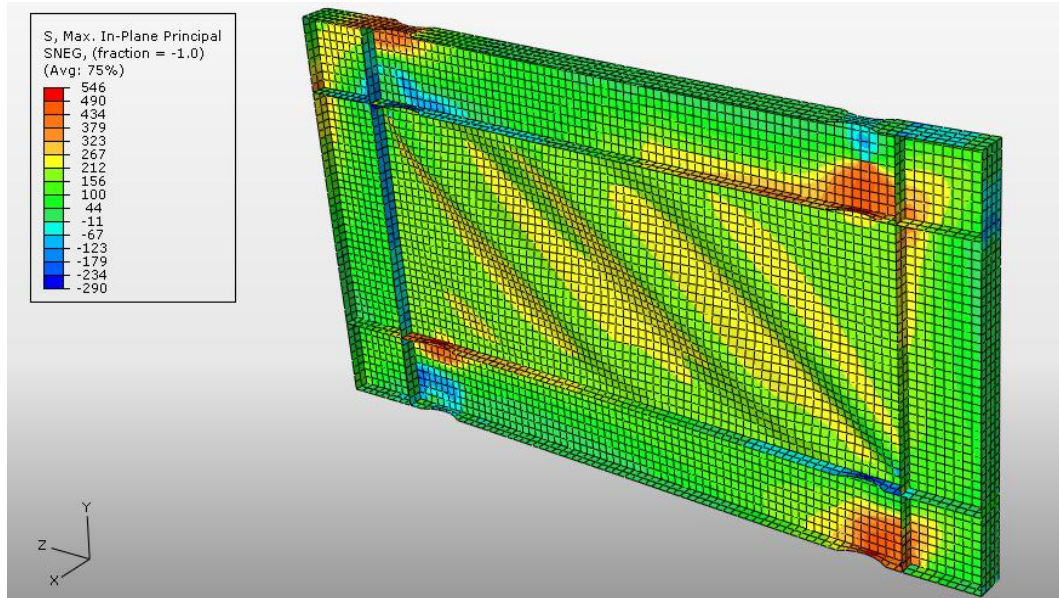
شکل ۳-۱۱- نمودار بار- تغییر مکان جانبی نمونه آزمایشگاهی و مدل اجزای محدود

شکل (۳-۱۱)، همگرایی میان رفتار نمونه آزمایشگاهی و مدل اجزای محدود را نمایش می‌دهد.

شکل (۳-۱۲) و (۳-۱۳)، توزیع تنش‌های فون میزز و تنش‌های اصلی حداکثر را در انتهای تحلیل نشان می‌دهند.



شکل ۳-۱۲- توزیع تنش‌های فون میزز (بر حسب MPa) در انتهای تحلیل در نمونه اجزای محدود



شکل ۳-۱۳ - توزیع تنش‌های اصلی حداکثر (بر حسب MPa) در انتهای تحلیل در نمونه اجزای محدود

- شکل‌های (۳-۱۲) و (۳-۱۳)، به ترتیب ایجاد مفصل‌های پلاستیک قابل توجه در ناحیه‌ی ماهیچه‌ای تیرها (RBS) و شکل‌گیری میدان کششی در راستای قطر پانل را نمایش می‌دهند.
- اختلاف کم میان نتایج مدل اجزای محدود و نمونه‌ی آزمایشگاهی می‌تواند دلایل مختلفی داشته باشد که در زیر، به پاره‌ای از آن‌ها اشاره می‌شود:
- ۱) بدون شک، ورق نازک پانل (با ضخامت ۲/۶ میلی‌متر و نسبت لاغری (b/t) ۱۳۲۷) در حین اجرا و نصب، کاملاً صاف نبوده است. اطلاعاتی در مورد اعوجاج اولیه‌ی ورق در دسترس نیست.
 - ۲) در نمونه‌ی آزمایشگاهی، نقص‌هایی همچون عدم گیرداری اتصالات (تیر به ستون و پانل به اعضای مرزی) و پیچش قاب به علت ناکافی بودن تکیه‌گاه جانبی وجود دارد که می‌تواند اختلاف میان نتایج مدل‌سازی و نمونه واقعی را توجیه کند.
 - ۳) خطای ابزار اندازه‌گیری در ثبت نتایج آزمایشگاهی، می‌تواند دلیل دیگری برای این اختلاف باشد.
 - ۴) اندازه‌ی شبکه بندی اجزای محدود می‌تواند در نتایج مدل‌سازی تاثیرگذار باشد.

با توجه به آنچه یاد شد، می توان ادعا کرد که مدل اجزای محدود دارای دقت کافی است و همگرایی خوبی با نمونه ی آزمایشگاهی دارد. از این رو، خروجی های نرم افزار می تواند مبنایی برای استنتاج های بعدی قرار گیرد.

فصل چهارم - بررسی اثر بازشوها در رفتار دیوار برشی فولادی

۴-۱- پیش گفتار

دیوار برشی فولادی، یک سیستم مقاوم در برابر بارهای جانبی است که می‌تواند در ساخت سازه‌های جدید و همچنین تقویت سازه‌های موجود بکار گرفته شود. وجود بازشو در این سیستم، به دلایل معماری (نصب در و پنجره) یا عبور تأسیسات امری اجتناب‌ناپذیر است.

در این فصل، اثر ایجاد بازشو (موقعیت بازشو، شکل بازشو، اثر بکارگیری از سخت‌کننده و یا عدم استفاده از آن) در گوشه‌های پانل جهت عبور تأسیسات مورد مطالعه قرار می‌گیرد و اثر این پارامترها، در سختی الاستیک و مقاومت سیستم بررسی می‌گردد. همان‌طور که در فصل پیش اشاره شد، با مقایسه‌ی نتایج مدل نرم‌افزاری اجزای محدود ABAQUS6.9 و نتایج یک نمونه آزمایشگاهی معتبر (توسط Bruneau و Vian [۱۵])، همگرایی خوبی میان رفتار آن‌ها مشاهده شده که حاکی از درستی مدل‌سازی است. حال می‌توان ادعا کرد که نتایج بدست آمده قابل اطمینان و استناد است به‌سختن دیگر خروجی‌های نرم‌افزار می‌تواند مبنایی برای استنتاج‌های بعدی قرار گیرد. به‌منظور

دست‌یابی به هدف این فصل، مدلسازی و تحلیل استاتیکی غیرخطی (Pushover) با بهره‌گیری از مدل اجزای محدود انجام شده است تا با آنالیز عددی بر روی مدل‌ها، بتوان اثر پارامترهای مختلف را بررسی نمود. با این شیوه می‌توان به شناخت درستی از عملکرد لرزه‌ای دیوارهای برشی فولادی دست یافت.

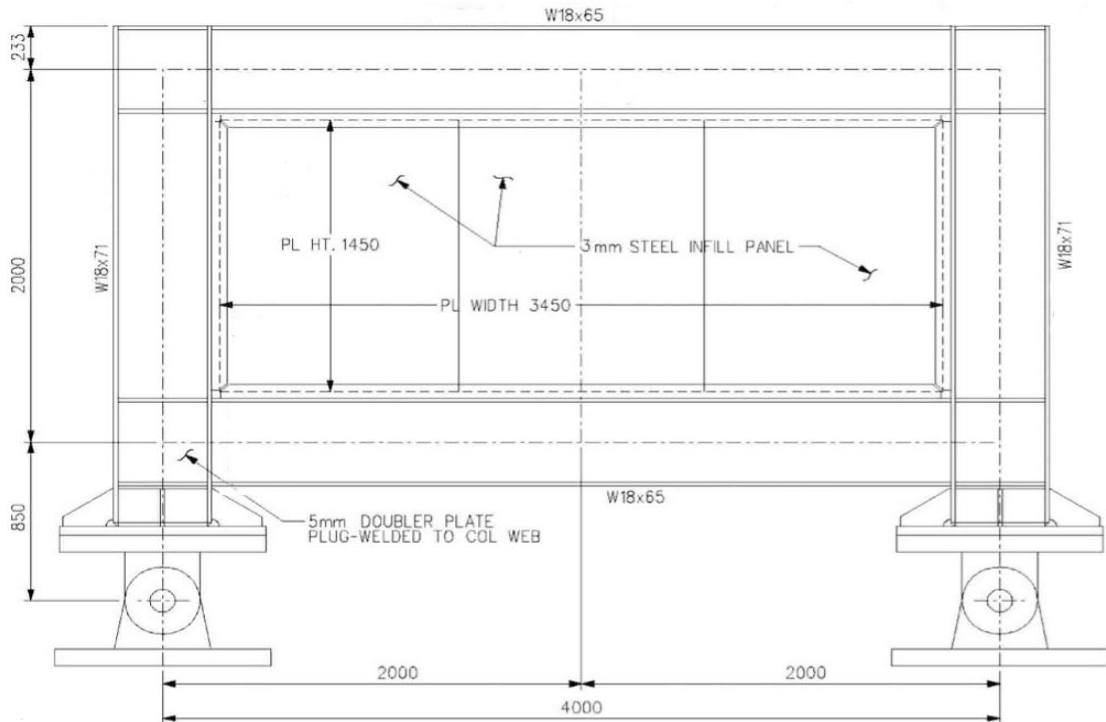
۲-۴- روش تحقیق

در این پژوهش، رفتار لرزه‌ای دیوارهای برشی فولادی دارای بازشو (در گوشه‌های پانل) مورد مطالعه قرار می‌گیرد. برای دست‌یابی به این هدف، تحلیل استاتیکی غیرخطی (Pushover) توسط نرم‌افزار ABAQUS انجام شده است. اثر پارامترهای مختلف در رفتار این سیستم، با مقایسه‌ی سختی الاستیک و بار اعمالی به دیوارهای مذکور برای ایجاد تغییر مکان نسبی جانبی ۲ سانتیمتر و ۷ سانتیمتر مورد مطالعه قرار می‌گیرد. تغییر مکان نسبی جانبی ۲ سانتیمتر، حدی است که در آن ورق فولادی و نواحی کمی از تیر نمونه‌های مدلسازی براساس معیار تسلیم فون میزز در ابتدای ناحیه خمیری واقع می‌شوند. در این فصل، بار اعمالی به سیستم برای ایجاد تغییر مکان نسبی جانبی ۲ سانتیمتر، با $F_d=2\text{cm}$ نمایش داده می‌شود و در ادامه، به اختصار از آن با عنوان بار در تغییر مکان ۲ سانتیمتر یاد خواهد شد. به منظور مشاهده‌ی رفتار کامل نمونه‌ها، حداکثر تغییر مکان جانبی اعمالی به نمونه‌ها ۷ سانتیمتر انتخاب شد تا قسمت‌هایی از ستون‌ها هم در ناحیه خمیری واقع شوند. مبنای مقایسه مقاومت مدل‌ها در تغییر مکان ۷ سانتیمتر است. در این فصل، مقاومت با $F_d=7\text{cm}$ نمایش داده می‌شود. لازم به تذکر است که در ادامه، منظور از بازشو همان بازشو در گوشه‌های پانل می‌باشد.

۳-۴- مشخصات نمونه‌ی مورد مطالعه

یک نمونه‌ی دیوار برشی فولادی یک طبقه، یک دهانه و بدون سخت‌کننده برای مدلسازی انتخاب شده است. قاب مورد نظر دارای پهنای ۴ متر و ارتفاع ۲ متر (آکس تا آکس) است که مقاطع تیر و ستون آن به ترتیب $W18*65$ و $W18*71$ در نظر گرفته شده است.

ضخامت ورق پانل پرکننده ۳ میلیمتر است. در شکل (۴-۱) جزئیات نمونه دیوار برشی فولادی مورد مطالعه آمده است.



شکل ۴-۱- مشخصات هندسی نمونه دیوار برشی فولادی مورد مطالعه

مشخصات مصالح قاب پیرامونی، سخت کننده‌ی بازشوها و پانل پرکننده در جدول (۴-۱) آمده

است.

جدول ۴-۱- مشخصات مصالح دیوار برشی فولادی مورد مطالعه [۲۵]

μ	F_u (MPa)	F_y (MPa)	E (GPa)	فولاد مصرفی	
0.3	370	240	210	ST 37	تیر، ستون و سخت کننده
0.3	330	190	210	ST 33	صفحه فولادی

شرایط مرزی، بارگذاری و اتصال‌ها مشابه با نمونه آزمایشگاهی برنو (Bruneau) و

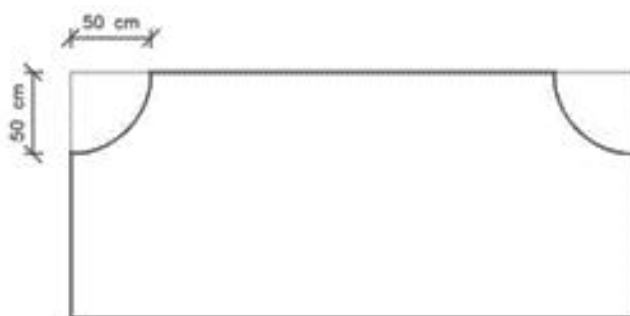
وین (Vian) [۱۵] می باشد که در فصل قبل شرح داده شده است.

۴-۴- نحوه نامگذاری مدل‌ها

در این پژوهش، کلیه مدل‌های نرم‌افزاری دارای مشخصات هندسی، مصالح، شرایط مرزی، نحوه بارگذاری و ... یکسان هستند. تفاوت نمونه‌ها در جزئیات بازشو گوشه‌های پانل (شکل بازشو، موقعیت بازشو، طول بازشو، بکارگیری سخت‌کننده و یا عدم استفاده از آن) می‌باشد.

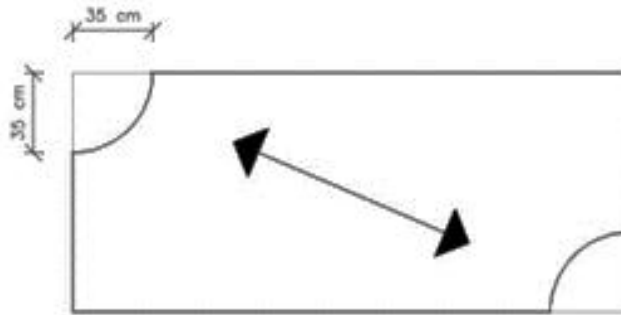
نامگذاری هر یک از مدل‌ها با استفاده از نام کلی $ST-NO.-S-L_1-L_2$ انجام می‌شود. حروف ST بیان‌گر استفاده از سخت‌کننده در بازشو است و عدم وجود حروف ST به معنای عدم بکارگیری از سخت‌کننده در آن می‌باشد. اولین عدد ذکر شده از سمت چپ ($NO.$)، تعداد بازشو در گوشه‌های پانل را بیان می‌کند. حرف S برای نمایش شکل بازشو است که از حرف C برای بازشو ربع دایره و حرف T برای بازشو مثلثی استفاده می‌گردد. نماد L_1 راستای قرارگیری دو بازشو را در گوشه‌های پانل و نسبت به هم مشخص می‌کند. نماد L_2 معرف طول بازشو است که در بازشوهای ربع دایره از حرف R و در نوع مثلثی آن از حرف L برای بیان طول بازشو استفاده می‌شود.

به‌عنوان مثال، نام اختصاری $2-C-X(top)-R50$ نشان‌دهنده‌ی آن است که هیچ سخت‌کننده‌ای در بازشو بکار برده نشده است، ۲ بازشو ربع دایره در گوشه‌های پانل وجود دارد که در راستای طولی X و در بالای ورق فولادی واقع شده‌اند. طول بازشو ربع دایره ۵۰ سانتیمتر است. شکل (۴-۲)، حفره‌های موجود در پانل نمونه $2-C-X(top)-R50$ را نمایش می‌دهد.



شکل ۴-۲ - حفره‌های موجود در پانل نمونه $2-C-X(top)-R50$

نام اختصاری 2-C-Dia(T)-R35 نشان دهنده‌ی آن است که هیچ سخت‌کننده‌ای در بازشو استفاده نشده است. ۲ بازشو ربع دایره در راستای قطری کششی پانل قرار گرفته‌اند و طول بازشو ۳۵ سانتیمتر است. شکل (۳-۴)، حفره‌های موجود در پانل نمونه 2-C-Dia(T)-R35 را نمایش می‌دهد.



شکل ۳-۴- حفره‌های موجود در پانل نمونه 2-C-Dia(T)-R35

زمانی که اثر چهار بازشو (در گوشه‌های پانل) بررسی می‌شود، در نامگذاری از ذکر نماد چهارم (L₁: مربوط به موقعیت قرارگیری بازشوها) صرف‌نظر شده است زیرا واضح است که در این حالت، بازشوها در چهار گوشه‌ی پانل قرار می‌گیرند.

به عنوان مثال نام اختصاری ST-4-T-L50 نشان دهنده‌ی آن است که بازشو دارای سخت‌کننده است و ۴ حفره‌ی مثلثی با طول بازشو ۵۰ سانتیمتر در گوشه‌های پانل موجود است. شکل (۴-۴)، حفره‌های موجود در پانل نمونه ST-4-T-L50 را نمایش می‌دهد.



شکل ۴-۴- حفره‌های موجود در پانل نمونه ST-4-T-L50

نامگذاری انواع نمونه‌های دیوار برشی فولادی مدل شده به همراه مشخصات بازشوها ی آن

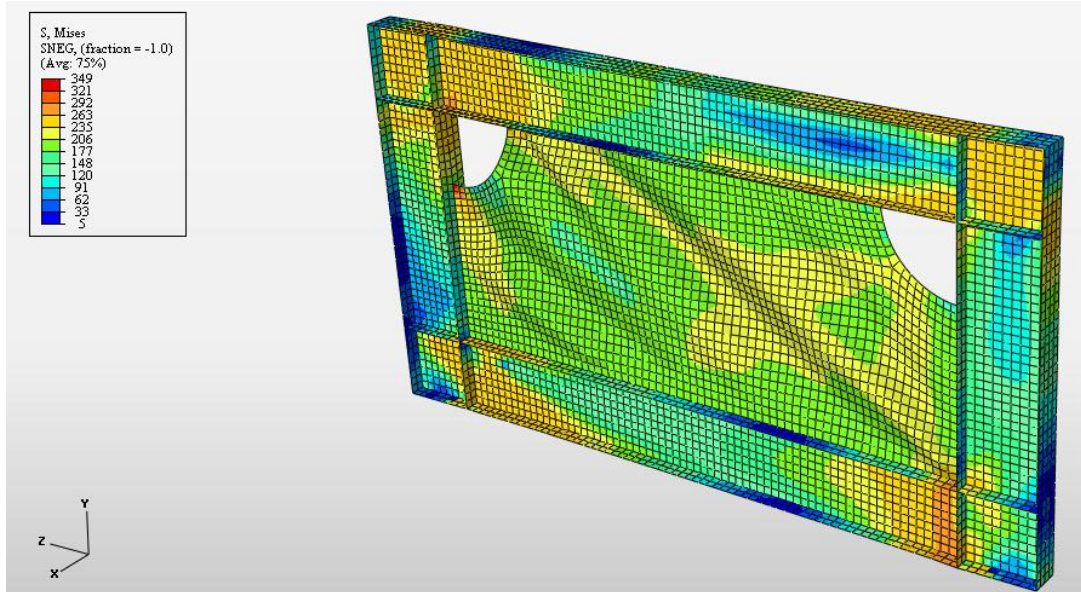
در جدول (۲-۴) به طور خلاصه آمده است:

جدول ۴-۲- نامگذاری انواع نمونه‌های دیوار برشی فولادی مدل شده

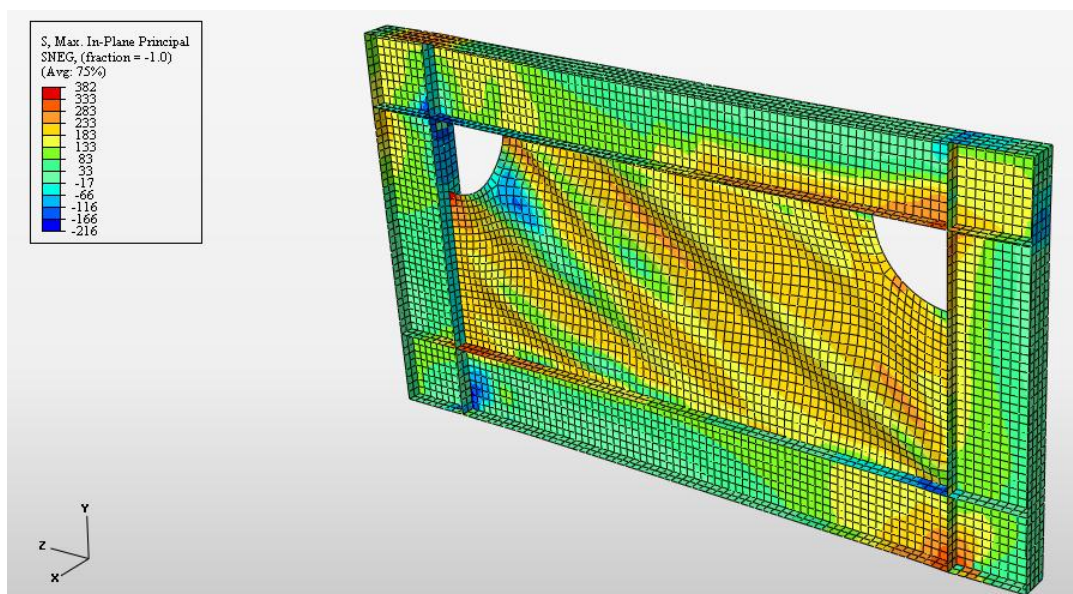
ST-NO. -S-L ₁ -L ₂	وجود سخت‌کننده در بازشو	تعداد بازشو در گوشه‌های پانل	شکل بازشو	موقعیت بازشوها	طول بازشو
2-C-X(top)-R50	بدون سخت‌کننده	2	ربع دایره C:	راستای طولی و در بالای پانل: X(top)	شعاع بازشو ۵۰ سانتیمتر: R50
2-C-X(bot)-R35	بدون سخت‌کننده	2	ربع دایره C:	راستای طولی و در پایین پانل: X(bot)	شعاع بازشو ۳۵ سانتیمتر: R35
2-C-Dia(T)-R20	بدون سخت‌کننده	2	ربع دایره C:	راستای قطر کششی پانل: Dia(T)	شعاع بازشو ۲۰ سانتیمتر: R20
2-C-Dia(C)-R50	بدون سخت‌کننده	2	ربع دایره C:	راستای قطر فشاری پانل: Dia(C)	شعاع بازشو ۵۰ سانتیمتر: R50
4-T-L35	بدون سخت‌کننده	4	مثلث T:	در چهار گوشه‌ی پانل	طول بازشو ۳۵ سانتیمتر: L35
4-C-R 27.9	بدون سخت‌کننده	4	ربع دایره C:	در چهار گوشه‌ی پانل	شعاع بازشو ۲۷/۹ سانتیمتر: R27.9
ST-4-C-R 27.9	دارای سخت‌کننده	4	ربع دایره C:	در چهار گوشه‌ی پانل	شعاع بازشو ۲۷/۹ سانتیمتر: R27.9
ST-4-T-L50	دارای سخت‌کننده	4	مثلث T:	در چهار گوشه‌ی پانل	طول بازشو ۵۰ سانتیمتر: L50

۴-۵- بررسی اثر بازشوهای ربع دایره در ناحیه‌ی فوقانی پانل

در این بخش، اثر ایجاد حفره به شکل ربع دایره در قسمت فوقانی پانل و در راستای طولی X بررسی می‌شود. از این‌رو، نمونه‌هایی با طول بازشو متفاوت مدلسازی شده است. در تمامی نمونه‌ها، کلیه مشخصات ثابت در نظر گرفته شده و تنها طول بازشو متغیر است. شکل‌های (۴-۶) و (۴-۵) به ترتیب توزیع تنش‌های فون میزز و تنش‌های اصلی حداکثر در نمونه‌ی 2-C-X(top)-R50 را نمایش می‌دهند.

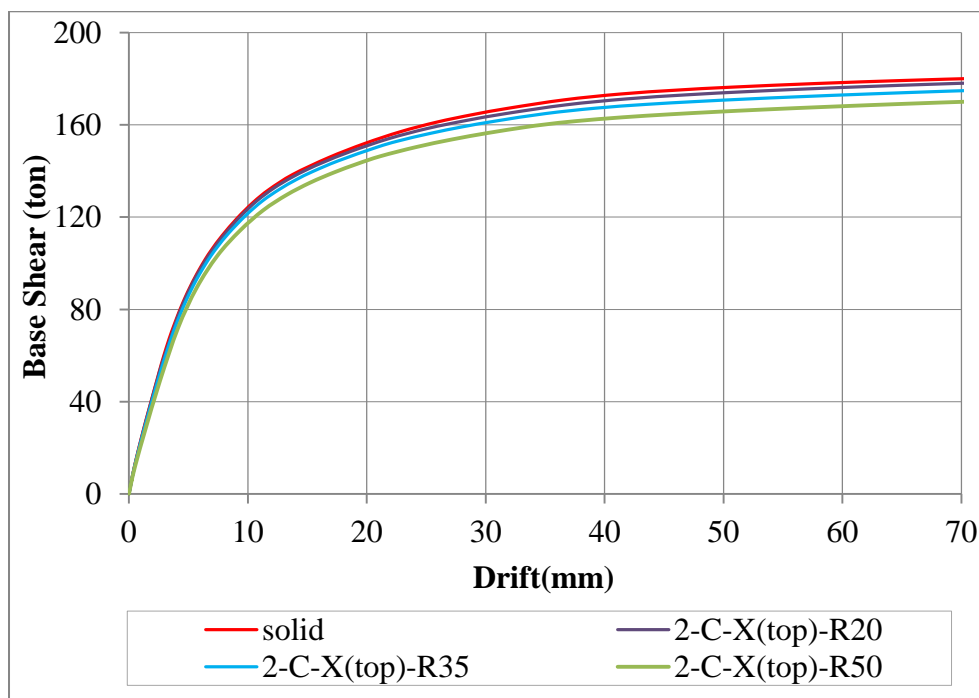


شکل ۴-۵- توزیع تنش‌های فون میزز در انتهای تحلیل در نمونه 2-C-X(top)-R50 (بر حسب MPa)



شکل ۴-۶- توزیع تنش‌های اصلی حداکثر در انتهای تحلیل در نمونه 2-C-X(top)-R50 (بر حسب MPa)

شکل (۴-۷)، نمودار بار- تغییرمکان جانبی نمونه‌ها (به ازای طول بازشو متفاوت) را در مقایسه با نمونه‌ی بدون حفره نمایش می‌دهد.



شکل ۴-۷- نمودار بار- تغییرمکان جانبی نمونه بدون حفره و نمونه‌های 2-C-X (top)

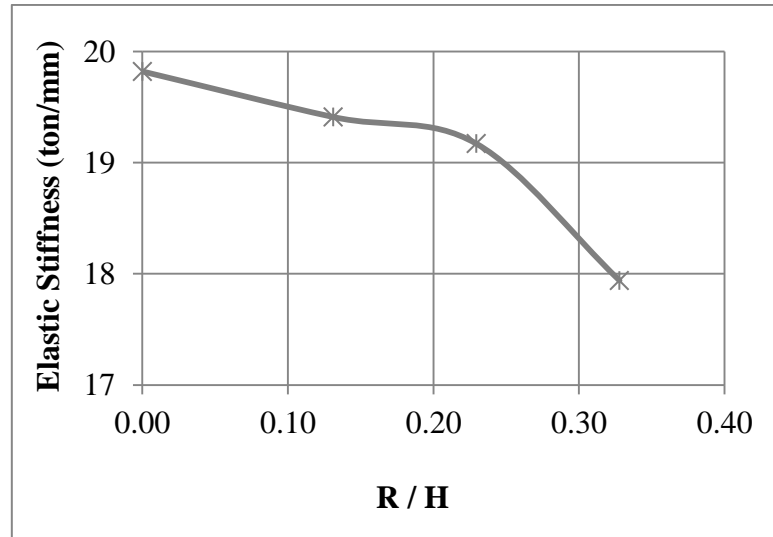
جدول (۴-۳)، مقادیر سختی الاستیک (K)، بار در تغییر مکان ۲ سانتیمتر ($F_{d=2cm}$) و مقاومت ($F_{d=7cm}$) نمونه‌ها را نمایش می‌دهد. در این جدول، اثر ایجاد بازشو در پانل دیوار برشی فولادی با نمونه‌ی بدون حفره مقایسه می‌شود.

جدول ۴-۲- مقادیر K و $F_{d=2,7cm}$ در نمونه‌های 2-C-X(top)

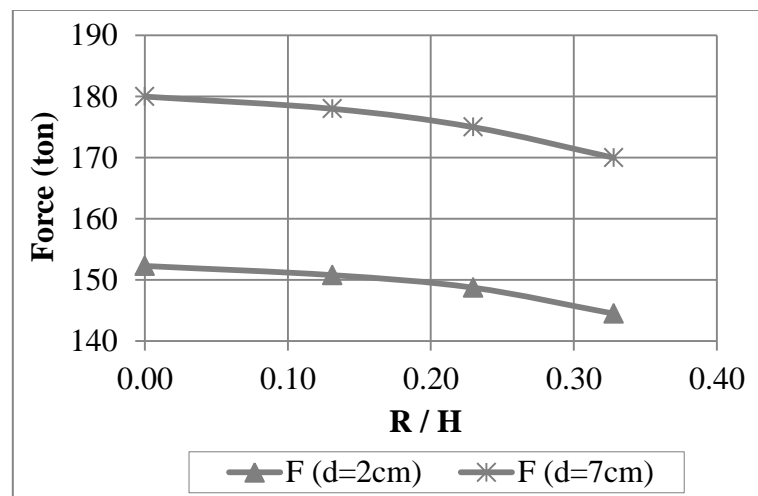
تغییرات $F_{d=7cm}$ (%)	$F_{d=7cm}$ (ton)	تغییرات $F_{d=2cm}$ (%)	$F_{d=2cm}$ (ton)	تغییرات (%) K	K (ton/mm)	R / H	نام نمونه
0	180	0	152.3	0	19.82	0	solid
-1.11	178	-0.98	150.8	-2.07	19.41	0.13	2-C-X(top)-R20
-2.78	175	-2.33	148.75	-3.28	19.17	0.23	2-C-X(top)-R35
-5.56	170	-5.12	144.5	-9.49	17.94	0.33	2-C-X(top)-R50

شکل‌های (۴-۸) و (۴-۹)، اثر ایجاد بازشوهای یاد شده را در سختی الاستیک، $F_{d=7cm}$ و $F_{d=2cm}$

دیوار برشی فولادی نمایش می‌دهند.



شکل ۴-۸- اثر ایجاد بازشو در سختی الاستیک نمونه‌های 2-C-X(top) به ازای متفاوت R/H

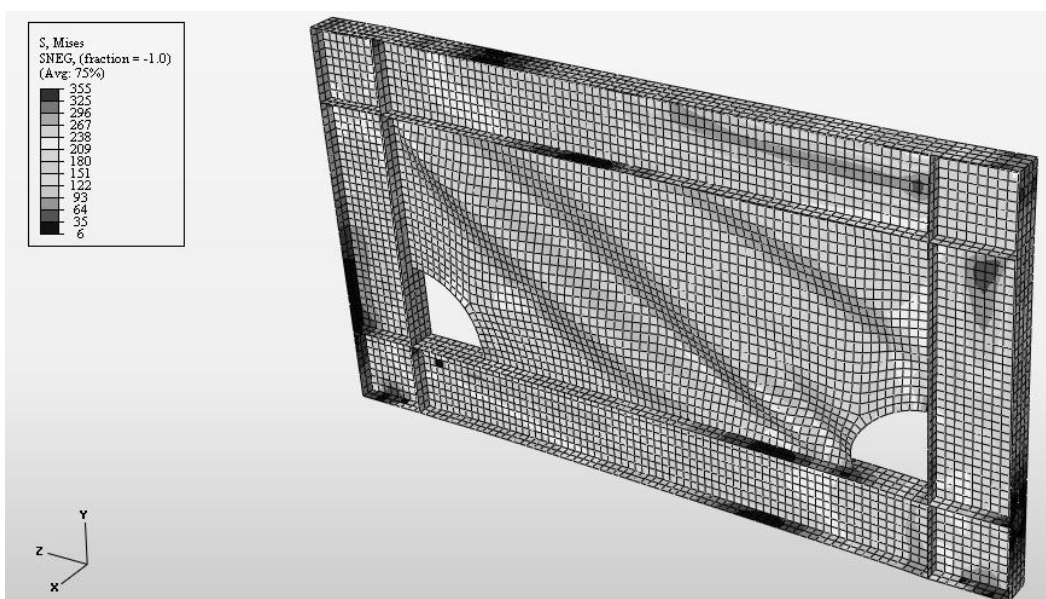


شکل ۴-۹- اثر ایجاد بازشو در $F_{d=2cm}$ و مقاومت نمونه‌های 2-C-X(top) به ازای متفاوت R/H

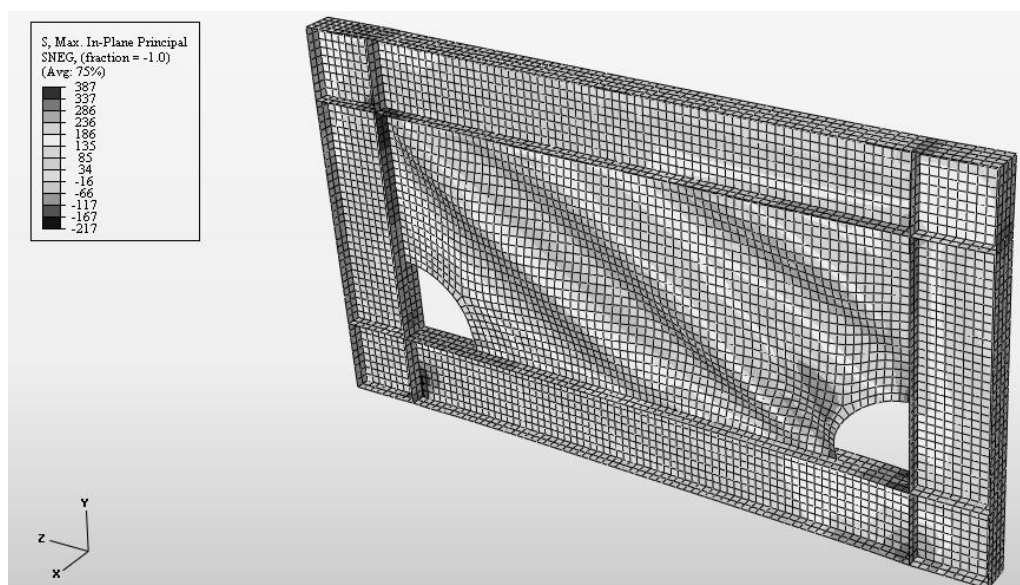
شکل‌های (۴-۸) و (۴-۹) نشان می‌دهند که با ایجاد بازشو مورد نظر، سختی و مقاومت سیستم کاهش می‌یابند. با افزایش سطح بازشو، این اثرات کاهندگی بیشتر می‌شوند. به عنوان مثال به ازای کاهش ۷/۳۱ درصد از سطح پانل، سختی الاستیک و مقاومت نمونه به ترتیب ۹/۴۹ و ۵/۵۶ درصد در مقایسه با نمونه‌ی بدون حفره کاسته می‌شود.

۴-۶- بررسی اثر بازشوهای ربع دایره در ناحیه تحتانی پانل

در این بخش، اثر ایجاد حفره به شکل ربع دایره در قسمت تحتانی پانل و در راستای طولی X بررسی می‌شود. به این منظور، نمونه‌هایی با طول بازشو متفاوت مدل‌سازی شده است. در تمامی آن‌ها، کلیه مشخصات ثابت در نظر گرفته شده و تنها طول بازشو متغیر است. شکل‌های (۴-۱۰) و (۴-۱۱) به ترتیب توزیع تنش‌های فون میزز و تنش‌های اصلی حداکثر را در نمونه 2-C-X(bot)-R50 رانمایش می‌دهند.



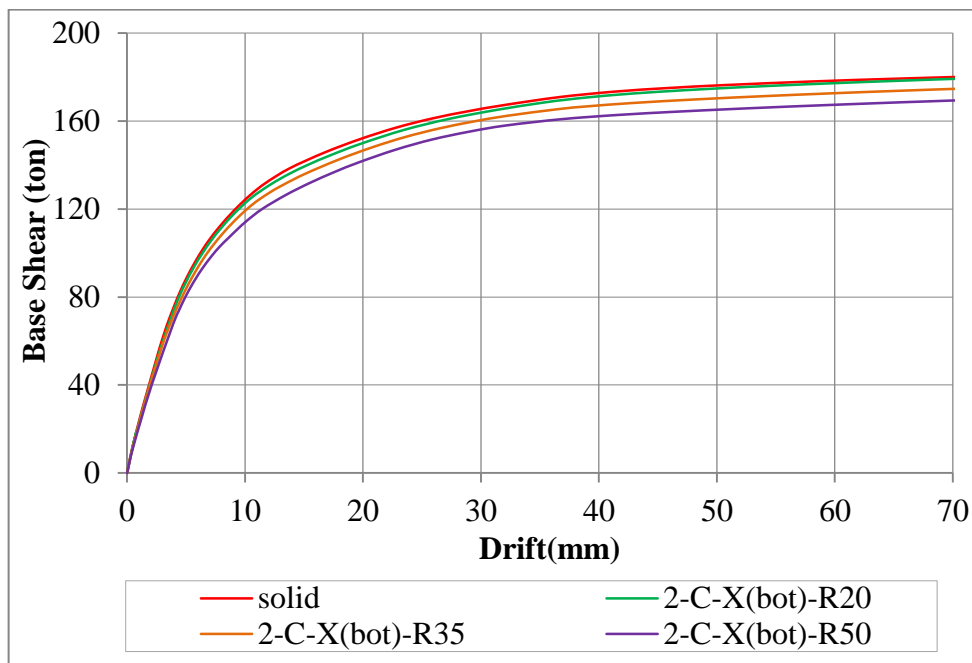
شکل ۴-۱۰ - توزیع تنش‌های فون میزز در انتهای تحلیل در نمونه 2-C-X(bot)-R50 (بر حسب MPa)



شکل ۴-۱۱ - توزیع تنش‌های اصلی حداکثر در انتهای تحلیل در نمونه 2-C-X(bot)-R50 (بر حسب MPa)

شکل (۴-۱۲)، نمودار بار- تغییر مکان جانبی نمونه‌ها (به ازای طول بازشو متفاوت) را در مقایسه

با نمونه‌ی بدون حفره نمایش می‌دهد.



شکل ۴-۱۲- نمودار بار- تغییر مکان جانبی نمونه بدون حفره و نمونه‌های 2-C-X(bot)

جدول (۴-۴)، مقادیر سختی الاستیک (K)، بار در تغییر مکان ۲سانتیمتر ($F_{d=2cm}$) و

مقاومت ($F_{d=7cm}$) نمونه‌ها را نمایش می‌دهد. در این جدول، اثر ایجاد بازشو در پانل دیوار برشی فولادی

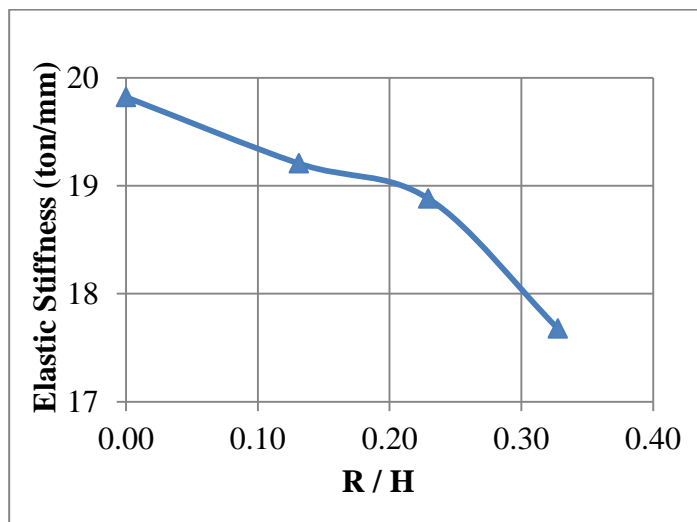
با نمونه‌ی بدون حفره مقایسه می‌شود.

جدول ۴-۳- مقادیر K و $F_{d=2.7cm}$ در نمونه‌های 2-C-X(bot)

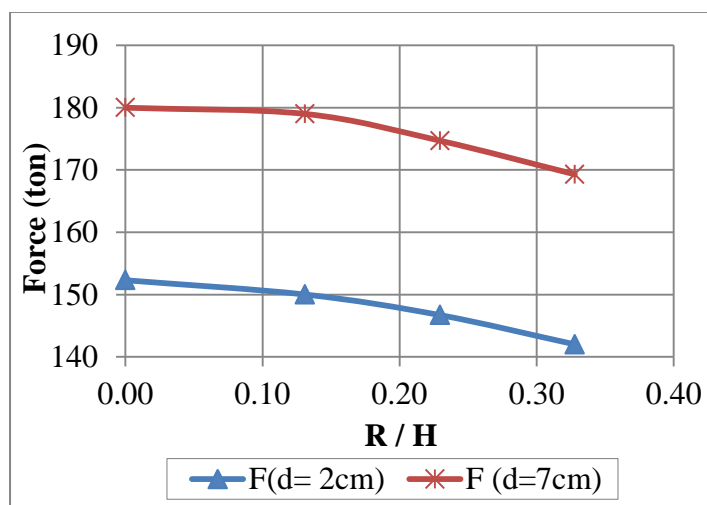
تغییرات $F_{d=7cm}$ (%)	$F_{d=7cm}$ (ton)	تغییرات $F_{d=2cm}$ (%)	$F_{d=2cm}$ (ton)	تغییرات (%) K	K (ton/mm)	R / H	نام نمونه
0	180	0	152.3	0	19.82	0	solid
-0.56	179	-1.51	150	-3.10	19.21	0.13	2-C-X(bot)-R20
-2.94	174.7	-3.68	146.7	-4.74	18.88	0.23	2-C-X(bot)-R35
-5.94	169.3	-6.76	142	-10.82	17.68	0.33	2-C-X(bot)-R50

شکل‌های (۱۳-۴) و (۱۴-۴)، اثر ایجاد بازشوه‌های یاد شده را در سختی الاستیک، $F_{d=2cm}$ و

$F_{d=7cm}$ دیوار برشی فولادی نمایش می‌دهند.



شکل ۴-۱۳ - اثر ایجاد بازشو در سختی الاستیک نمونه‌های 2-C-X(bot) به ازای R/H متفاوت



شکل ۴-۱۴ - اثر ایجاد بازشو در $F_{d=2cm}$ و مقاومت نمونه‌های 2-C-X(bot) به ازای R/H متفاوت

شکل‌های (۱۳-۴) و (۱۴-۴) نشان می‌دهند که با ایجاد بازشو مورد نظر، سختی و مقاومت سیستم

کاهش می‌یابد. با افزایش سطح بازشو، این اثرات کاهندگی بیشتر می‌شوند به طوری که به ازای کاهش

۷/۳۱ درصد از سطح پانل، سختی الاستیک و مقاومت دیوار برشی فولادی مورد مطالعه به ترتیب

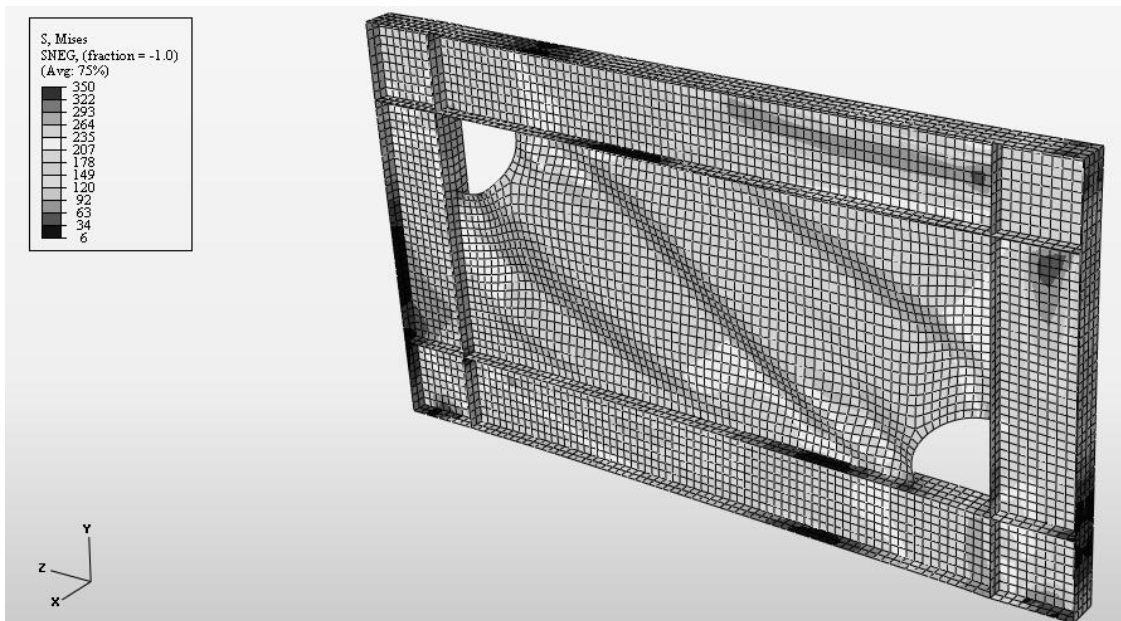
۱۰/۸ و ۵/۹ درصد در مقایسه با نمونه‌ی بدون حفره کاسته می‌شود.

۷-۴- بررسی اثر بازشوهای ربع دایره در راستای قطری پانل

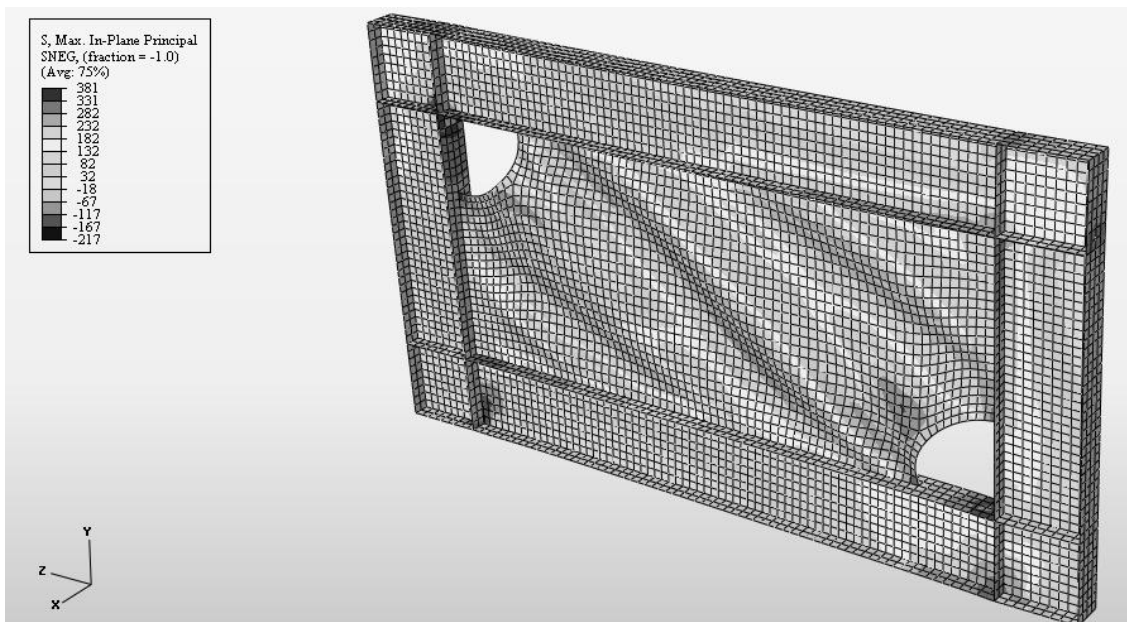
اساس ایده‌ی دیوار برشی فولادی بهره‌گیری از میدان کششی قطری است. به دلیل کمانش قطر فشاری پانل، با اعمال بار جانبی به تدریج میدان کششی قطری در پانل رشد می‌کند. در این بخش، اثر ایجاد بازشوهای (به شکل ربع دایره) راستای قطری پانل بررسی می‌شود. می‌دانیم بار جانبی زلزله به صورت رفت و برگشتی به سازه اعمال می‌گردد درحالی که نمونه‌ها توسط نرم‌افزار ABAQUS به صورت پوش‌اور (Pushover) بارگذاری می‌شوند. با توجه به آنچه یاد شد، چنانچه سوراخ‌های قطری در راستای کششی و یا امتداد فشاری پانل واقع شوند، عملکرد متفاوتی خواهند داشت. از این رو، اثر ایجاد بازشوهای قطری پانل در امتداد کششی و هم راستای فشاری مورد مطالعه قرار می‌گیرد و تاثیر آن در رفتار این سیستم مقاوم جانبی بررسی می‌گردد.

۷-۴-۱- بررسی اثر بازشوهای ربع دایره در راستای قطر کششی پانل

در این بخش، اثر ایجاد حفره (به شکل ربع دایره) در راستای قطری کششی پانل بررسی می‌گردد. از این رو، نمونه‌هایی با طول بازشو متفاوت مدلسازی شده است. در تمامی نمونه‌ها، کلیه مشخصات ثابت در نظر گرفته شده و تنها طول بازشو متغیر است. شکل‌های (۴-۱۵) و (۴-۱۶) به ترتیب توزیع تنش‌های فون میزز و تنش‌های اصلی حداکثر رادر نمونه‌ی 2-C-Dia(T)-R50 نمایش می‌دهند. لازم به یادآوری است که منظور از Dia(T) آن است که حفره‌ها در راستای قطر کششی پانل هستند.



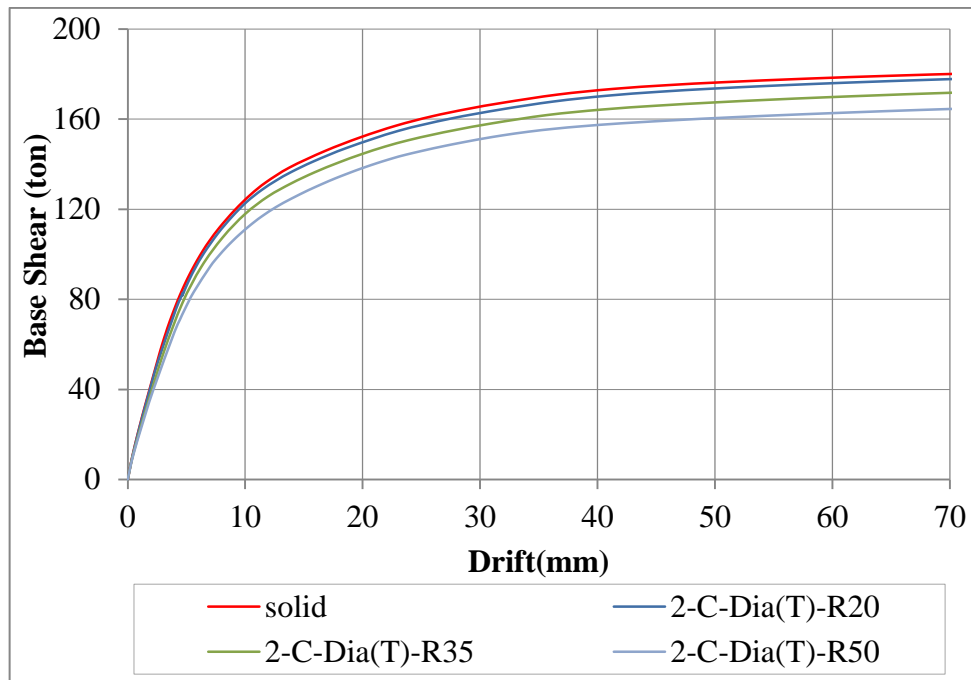
شکل ۴-۱۵- توزیع تنش‌های فون میزز در انتهای تحلیل در نمونه 2-C-Dia(T)-R50 (بر حسب MPa)



شکل ۴-۱۶- توزیع تنش‌های اصلی حداکثر در انتهای تحلیل در نمونه 2-C-Dia(T)-R50 (بر حسب MPa)

شکل (۴-۱۷)، نمودار بار-تغییر مکان جانبی نمونه‌ها (به ازای طول باز شو متفاوت) را در مقایسه با

نمونه‌ی بدون حفره نمایش می‌دهد.



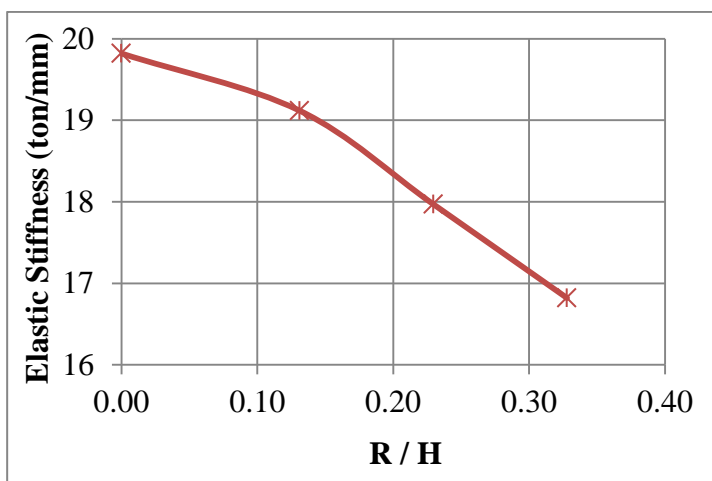
شکل ۴-۱۷- نمودار بار- تغییر مکان جانبی نمونه بدون حفره و نمونه‌های 2-C-Dia(T)

جدول (۴-۵)، مقادیر سختی الاستیک (K)، بار در تغییر مکان ۲ سانتیمتر ($F_{d=2cm}$) و مقاومت ($F_{d=7cm}$) نمونه‌ها را نمایش می‌دهد. در این جدول، اثر ایجاد بازشو در پانل دیوار برشی فولادی با نمونه‌ی بدون حفره مقایسه می‌شود.

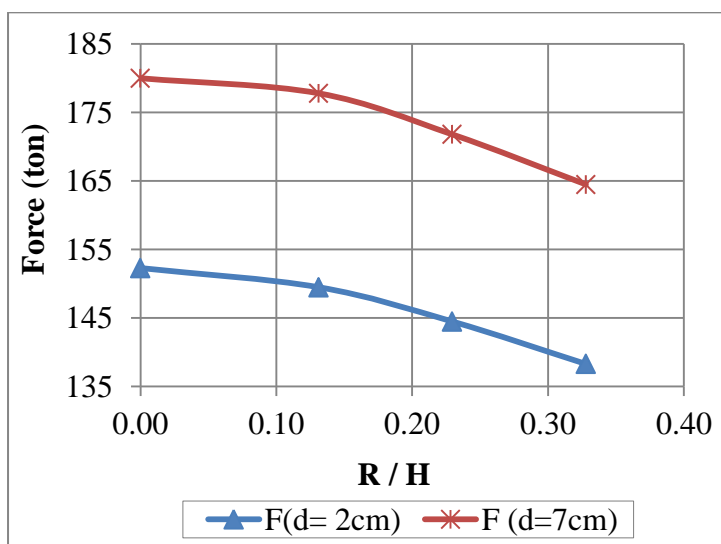
جدول ۴-۴- مقادیر K و $F_{d=2,7cm}$ در نمونه‌های 2-C-Dia(T)

تغییرات $F_{d=7cm}$ (%)	$F_{d=7cm}$ (ton)	تغییرات $F_{d=2cm}$ (%)	$F_{d=2cm}$ (ton)	تغییرات (%) K	K (ton/mm)	R / H	نام نمونه
0	180	0	152.3	0	19.82	0	solid
-1.22	177.8	-1.84	149.5	-3.54	19.12	0.13	2-C-Dia(T)-R20
-4.56	171.8	-5.12	144.5	-9.33	17.97	0.23	2-C-Dia(T)-R35
-8.61	164.5	-9.19	138.3	-15.14	16.82	0.33	2-C-Dia(T)-R50

شکل‌های (۴-۱۸) و (۴-۱۹)، اثر ایجاد بازشوهای یاد شده را در سختی الاستیک، $F_{d=2cm}$ و $F_{d=7cm}$ دیوار برشی فولادی نمایش می‌دهند.



شکل ۴-۱۸- اثر ایجاد بازشو در سختی الاستیک نمونه‌های 2-C-Dia(T) به ازای متفاوت R/H متفاوت

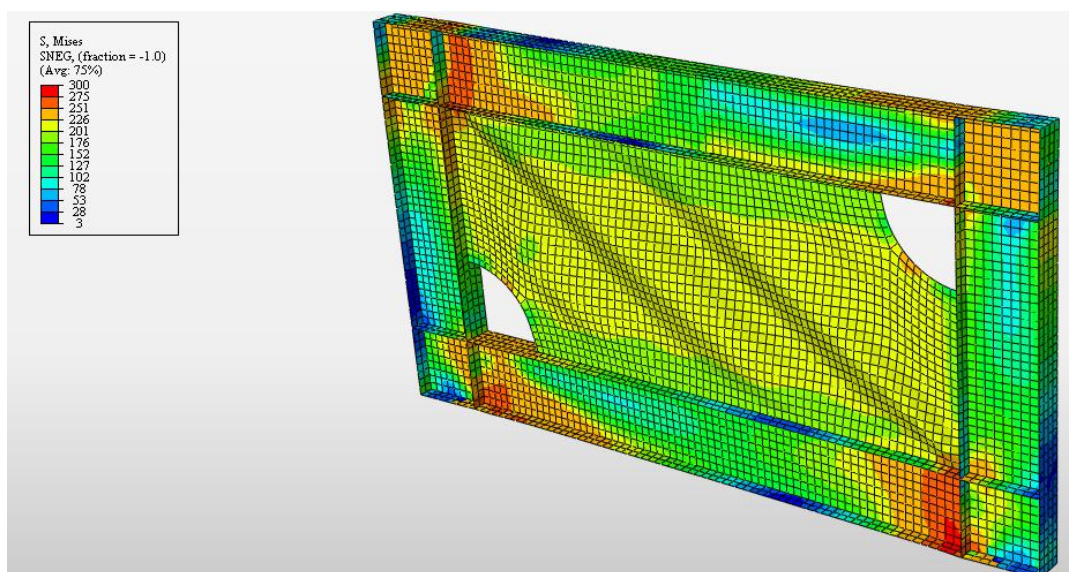


شکل ۴-۱۹- اثر ایجاد بازشو در $F_{d=2cm}$ و مقاومت نمونه‌های 2-C-Dia(T) به ازای متفاوت R/H متفاوت

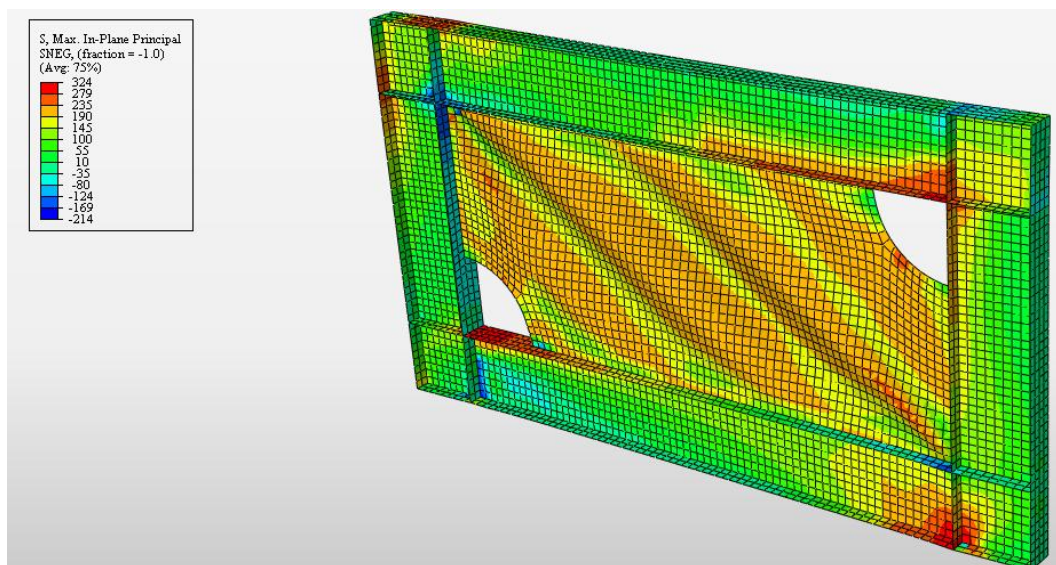
با ملاحظه‌ی شکل‌های (۴-۱۸) و (۴-۱۹) می‌توان دید که چنانچه بازشوی راستای قطری در امتداد قطر کششی پانل واقع شوند، اثرات کاهش نسبتاً شدیدی در رفتار (سختی‌الاستیک و مقاومت) دیواربرشی فولادی ایجاد می‌کنند. با افزایش سطح بازشو، این اثرات کاهندگی بیشتر می‌شوند. به‌عنوان مثال، به ازای کاهش ۷/۳۱ درصد از سطح پانل به منظور ایجاد بازشو، سختی‌الاستیک و مقاومت نمونه در مقایسه با نمونه‌ی بدون حفره به ترتیب ۱۵/۱ و ۸/۶ درصد کاسته می‌شود. در این حالت، تمامی بازشوها در راستای قطر کششی واقع شده‌اند که این امر، شکل‌گیری میدان کششی قطری و انتقال نیروها به المان‌های مرزی (تیر و ستون) را مشکل می‌سازد.

۴-۷-۲- بررسی اثر بازشوهای ربع دایره در راستای قطر فشاری پانل

در این بخش، اثر ایجاد حفره در راستای قطر فشاری ورق فولادی بررسی می‌شود. این دو حفره به شکل ربع دایره هستند. از این رو، نمونه‌هایی با طول بازشو متفاوت مدلسازی شده است. در تمامی مدل‌ها، کلیه مشخصات ثابت در نظر گرفته شده و تنها طول بازشو متغیر است. شکل‌های (۴-۲۰) و (۴-۲۱) به ترتیب توزیع تنش‌های فون میزز و تنش‌های اصلی حداکثر را در نمونه‌ی 2-C-Dia(C)-R50 نمایش می‌دهند. لازم به یادآوری است که منظور از Dia(C) آن است که حفره‌ها در راستای قطر فشاری پانل هستند.



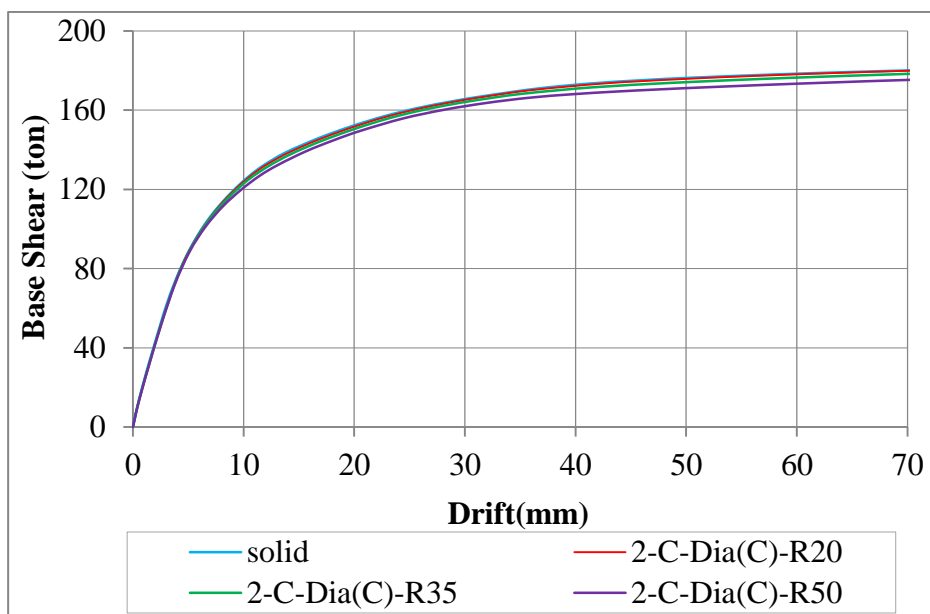
شکل ۴-۲۰- توزیع تنش‌های فون میزز در انتهای تحلیل در نمونه 2-C-Dia(C)-R50 (بر حسب MPa)



شکل ۴-۲۱- توزیع تنش‌های اصلی حداکثر در انتهای تحلیل در نمونه 2-C-Dia(C)-R50 (بر حسب MPa)

شکل (۴-۲۲)، نمودار بار- تغییرمکان جانبی نمونه‌ها (به ازای طول بازشو متفاوت) را در مقایسه

با نمونه‌ی بدون حفره نمایش می‌دهد.



شکل ۴-۲۲- نمودار بار- تغییرمکان جانبی نمونه بدون حفره و نمونه‌های 2-C-Dia(C)

جدول (۴-۶)، مقادیر سختی الاستیک (K)، بار در تغییر مکان ۲ سانتیمتر ($F_{d=2cm}$) و مقاومت ($F_{d=7cm}$)

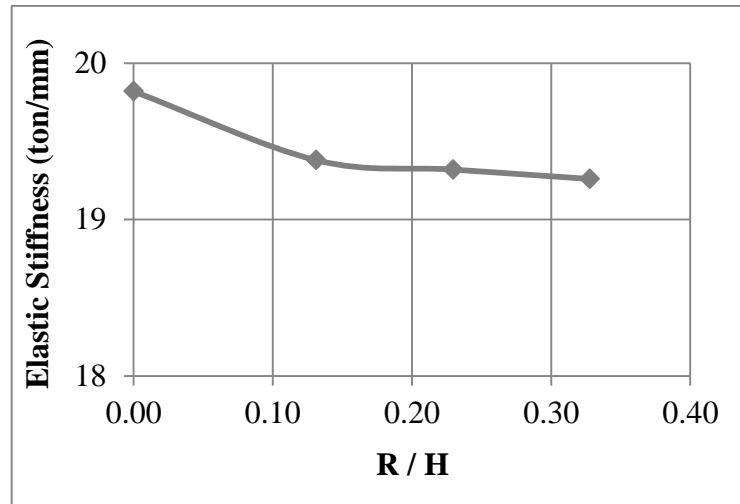
نمونه‌ها را نمایش می‌دهد. در این جدول، اثر ایجاد بازشو در پانل دیوار برشی فولادی با نمونه‌ی بدون حفره مقایسه می‌شود.

جدول ۴-۵- مقادیر K و $F_{d=2,7cm}$ در نمونه‌های 2-C-Dia(C)

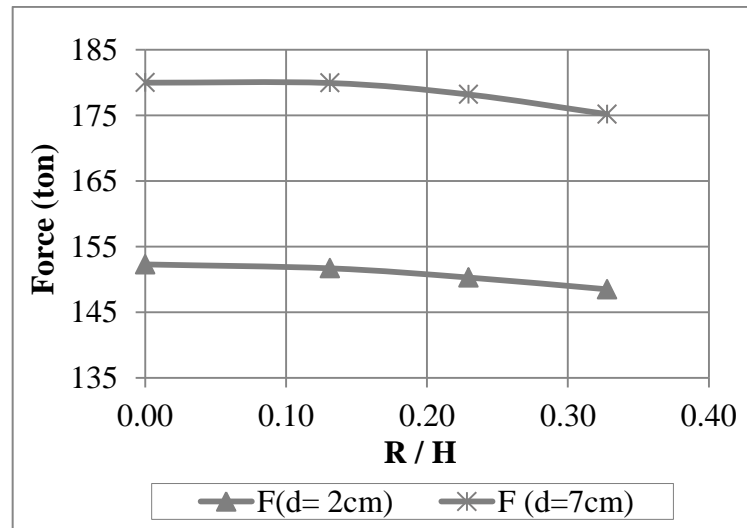
تغییرات $F_{d=7cm}$ (%)	$F_{d=7cm}$ (ton)	تغییرات $F_{d=2cm}$ (%)	$F_{d=2cm}$ (ton)	تغییرات K (%)	K (ton/mm)	R / H	نام نمونه
0	180	0	152.3	0	19.82	0	solid
-0.03	179.95	-0.39	151.7	-2.22	19.38	0.13	2-C-Dia(C)-R20
-1.00	178.2	-1.31	150.3	-2.52	19.32	0.23	2-C-Dia(C)-R35
-2.67	175.2	-2.50	148.5	-2.83	19.26	0.33	2-C-Dia(C)-R50

شکل‌های (۴-۲۳) و (۴-۲۴)، اثر ایجاد بازشوه‌های یاد شده را در سختی الاستیک،

$F_{d=7cm}$ و $F_{d=2cm}$ دیوار برشی فولادی نمایش می‌دهند.



شکل ۴-۲۳- اثر ایجاد بازشو در سختی الاستیک نمونه‌های 2-C-Dia(C) به ازای متفاوت R/H



شکل ۴-۲۴- اثر ایجاد بازشو در $F_{d=2cm}$ و مقاومت نمونه‌های 2-C-Dia(C) به ازای متفاوت R/H

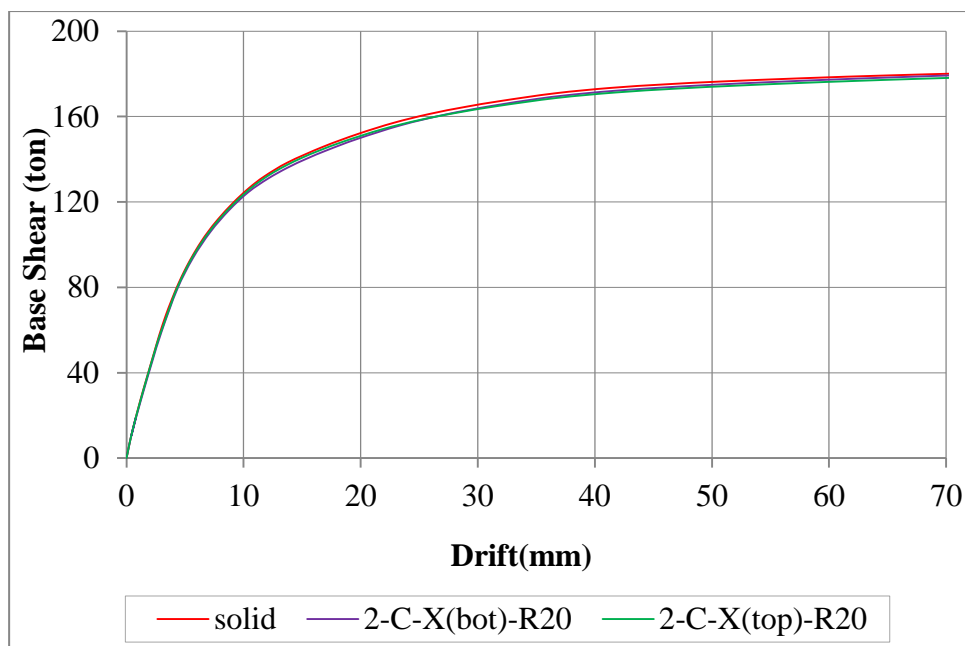
شکل‌های (۴-۲۳) و (۴-۲۴) نشان می‌دهند که بازشوهای امتداد قطر فشاری، سختی و مقاومت سیستم را کاهش می‌دهند. با افزایش سطح بازشو این اثرات کاهندگی بیشتر می‌شوند اما تغییر در دو پارامتر مهم نامبرده (سختی الاستیک و مقاومت) به‌کندی اتفاق می‌افتد. علت آن‌است که در این حالت، بازشو کمترین اختلال را در شکل‌گیری میدان کششی قطری و انتقال نیروها به المان‌های مرزی (تیر و ستون) ایجاد می‌کند. به‌عنوان مثال، به ازای کاهش ۷/۳۱ درصد از سطح پانل به منظور ایجاد بازشو، سختی الاستیک و مقاومت نمونه در مقایسه با نمونه‌ی بدون حفره به ترتیب ۲/۸۳ و ۲/۶۷ درصد کاسته می‌شود.

۸-۴ - مقایسه اثر موقعیت بازشوها

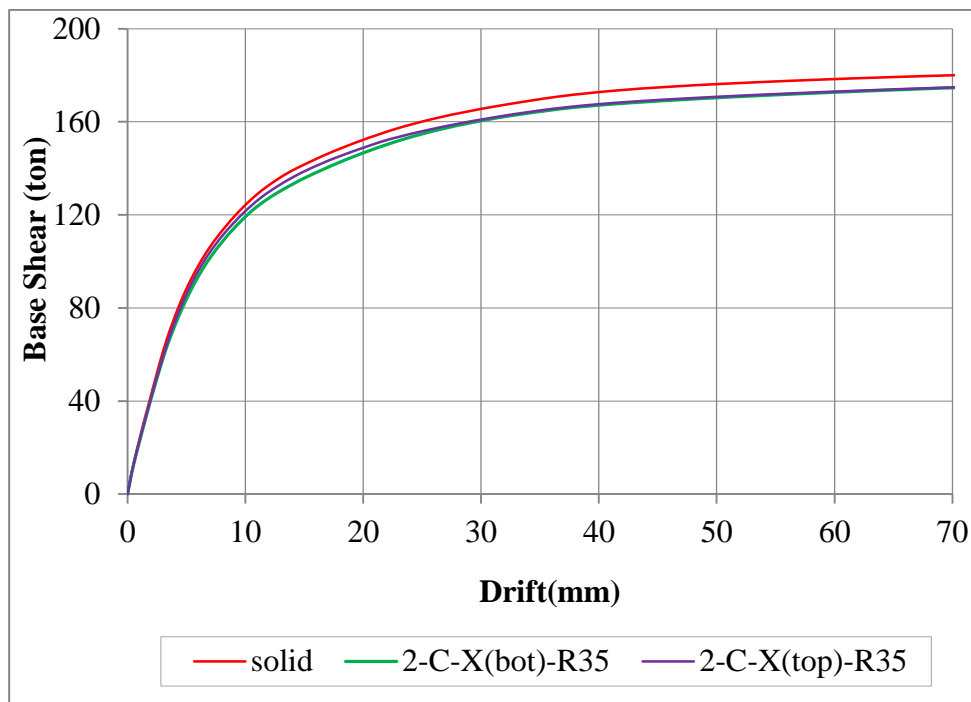
در بخش‌های (۴-۵) تا (۴-۷)، اثر ایجاد بازشو ربع‌دایره در پانل دیواربرشی فولادی در چند موقعیت متفاوت بررسی شده است. در این بخش، هدف آن است که تأثیر موقعیت حفره‌ها (به ازای سطح بازشو یکسان) در رفتار لرزه‌ای سیستم مشخص گردد. از این‌رو در ادامه، اثر چیدمان‌های متفاوت بازشو در رفتار دیواربرشی فولادی مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

۸-۴-۱ - مقایسه بازشوها (شکل: ربع‌دایره) در ناحیه‌ی فوقانی و تحتانی پانل

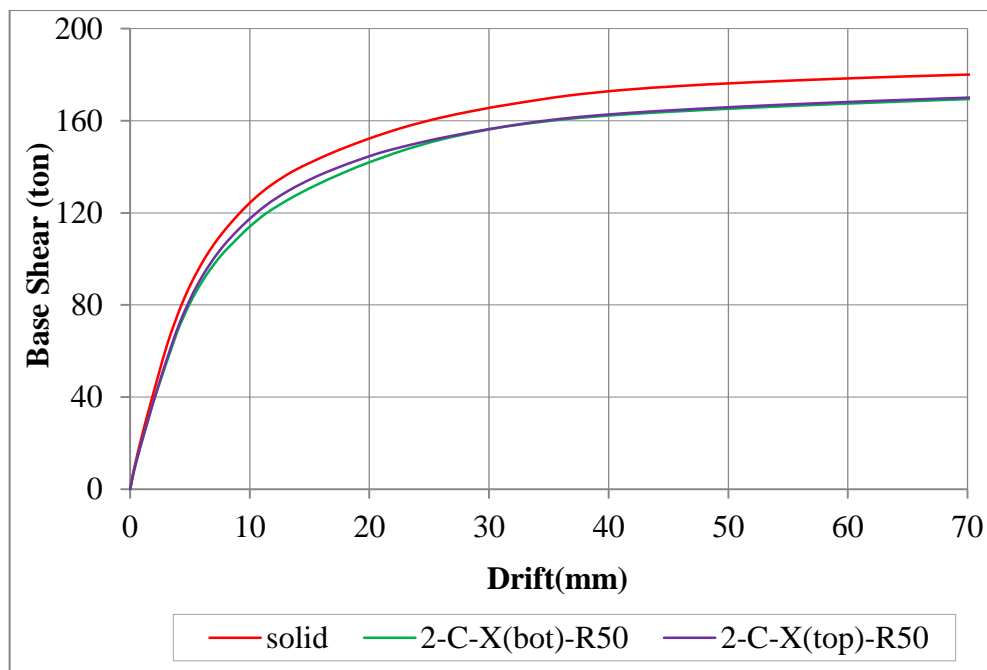
در این بخش، اثر بازشو در قسمت فوقانی پانل (بخش ۴-۵) با ایجاد بازشو در ناحیه‌ی تحتانی ورق پانل (بخش ۴-۶) مقایسه می‌گردد. بازشوها به شکل ربع‌دایره‌اند. کلیه‌ی مشخصات نمونه‌ها ثابت در نظر گرفته شده و تنها اثر موقعیت متغیر است. تأثیر اثر چیدمان حفره‌ها به ازای طول بازشو ۲۰، ۳۵ و ۵۰ سانتیمتر بررسی می‌شود. مقایسه‌ی اثر موقعیت حفره، به ازای سطح بازشوی یکسان صورت می‌پذیرد. شکل (۴-۲۵) تا (۴-۲۷)، نمودار بار-تغییرمکان جانبی نمونه‌ی دارای بازشو تحتانی و نمونه‌ی دارای بازشو فوقانی را در مقایسه با یکدیگر نمایش می‌دهند.



شکل ۴-۲۵ - نمودار بار-تغییرمکان جانبی نمونه بدون حفره و نمونه‌های 2-C-X(bot)-R20 و 2-C-X(top)-R20



شکل ۴-۲۶- نمودار بار-تغییر مکان جانبی نمونه بدون حفره و نمونه‌های 2-C-X(bot)-R35 و 2-C-X(top)-R35



شکل ۴-۲۷- نمودار بار-تغییر مکان جانبی نمونه بدون حفره و نمونه‌های 2-C-X(bot)-R50 و 2-C-X(top)-R50

جدول (۴-۷)، مقادیر سختی الاستیک (K)، بار در تغییر مکان ۲ سانتیمتر ($F_{d=2cm}$) و مقاومت ($F_{d=7cm}$)

نمونه‌ها را نمایش می‌دهد. در این جدول، اثر ایجاد بازشو در پانل دیوار برشی فولادی با نمونه‌ی بدون

حفره مقایسه می‌شود.

جدول ۴-۶ - مقایسه مقادیر K و $F_{d=2,7cm}$ نمونه‌های 2-C-X(top) و 2-C-X(bot) با نمونه بدون حفره

تغییرات $F_{d=7cm}$ (%)	$F_{d=7cm}$ (ton)	تغییرات $F_{d=2cm}$ (%)	$F_{d=2cm}$ (ton)	تغییرات K (%)	K (ton/mm)	R / H	نام نمونه
0	180	0	152.3	0	19.82	0	solid
-1.11	178	-0.98	150.8	-2.07	19.41	0.13	2-C-X(top)-R20
-0.56	179	-1.51	150	-3.10	19.21	0.13	2-C-X(bot)-R20
-2.78	175	-2.33	148.75	-3.28	19.17	0.23	2-C-X(top)-R35
-2.94	174.7	-3.68	146.70	-4.74	18.88	0.23	2-C-X(bot)-R35
-5.56	170	-5.12	144.5	-9.49	17.94	0.33	2-C-X(top)-R50
-5.94	169.3	-6.76	142	-10.82	17.68	0.33	2-C-X(bot)-R50

جدول (۴-۸)، اثر ایجاد بازشو در ناحیه‌ی پایینی پانل را نسبت به بازشو فوقانی نظیرش مقایسه

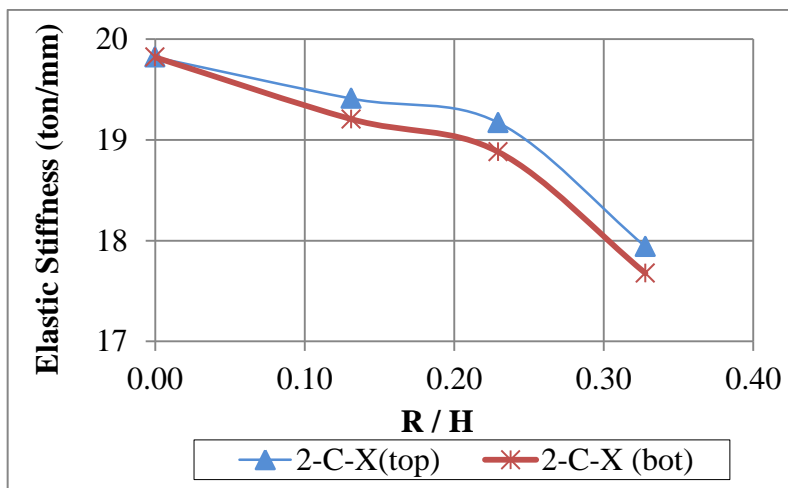
می‌کند.

جدول ۴-۷ - مقایسه مقادیر K و $F_{d=2,7cm}$ نمونه‌های 2-C-X(bot) با نمونه‌های 2-C-X(top) نظیرش

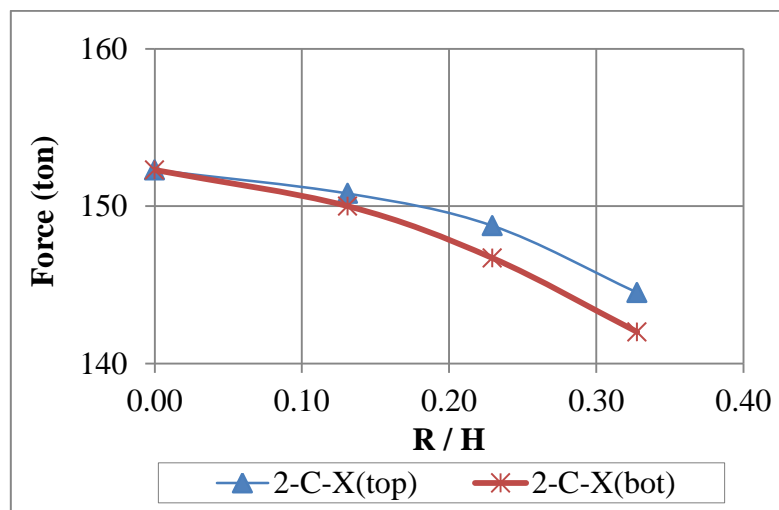
تغییرات $F_{d=7cm}$ (%)	$F_{d=7cm}$ (ton)	تغییرات $F_{d=2cm}$ (%)	$F_{d=2cm}$ (ton)	تغییرات K (%)	K (ton/mm)	R / H	نام نمونه
0	178	0	150.8	0	19.41	0.13	2-C-X(top)-R20
0.56	179	-0.53	150	-1.05	19.21	0.13	2-C-X(bot)-R20
0	175	0	148.75	0	19.17	0.23	2-C-X(top)-R35
-0.17	174.7	-1.38	146.7	-1.51	18.88	0.23	2-C-X(bot)-R35
0	170	0	144.5	0	17.94	0.33	2-C-X(top)-R50
-0.41	169.3	-1.73	142	-1.47	17.68	0.33	2-C-X(bot)-R50

شکل‌های (۴-۲۸) تا (۴-۳۰)، به ترتیب نحوه‌ی تغییرات سختی‌الاستیک، $F_{d=2cm}$ و مقاومت

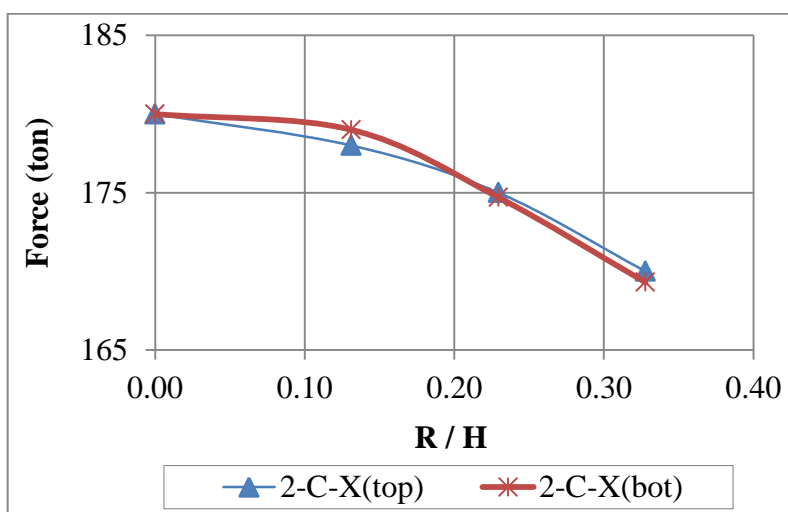
نمونه‌های دیواربرشی فولادی را در اثر ایجاد بازشوی فوقانی و بازشوی تحتانی نمایش می‌دهند.



شکل ۴- ۲۸- مقایسه سختی الاستیک نمونه‌های 2-C-X(top) و 2-C-X(bot) به ازای R/H متفاوت



شکل ۴- ۲۹- مقایسه $F_{d=2cm}$ نمونه‌های 2-C-X(top) و 2-C-X(bot) به ازای R/H متفاوت



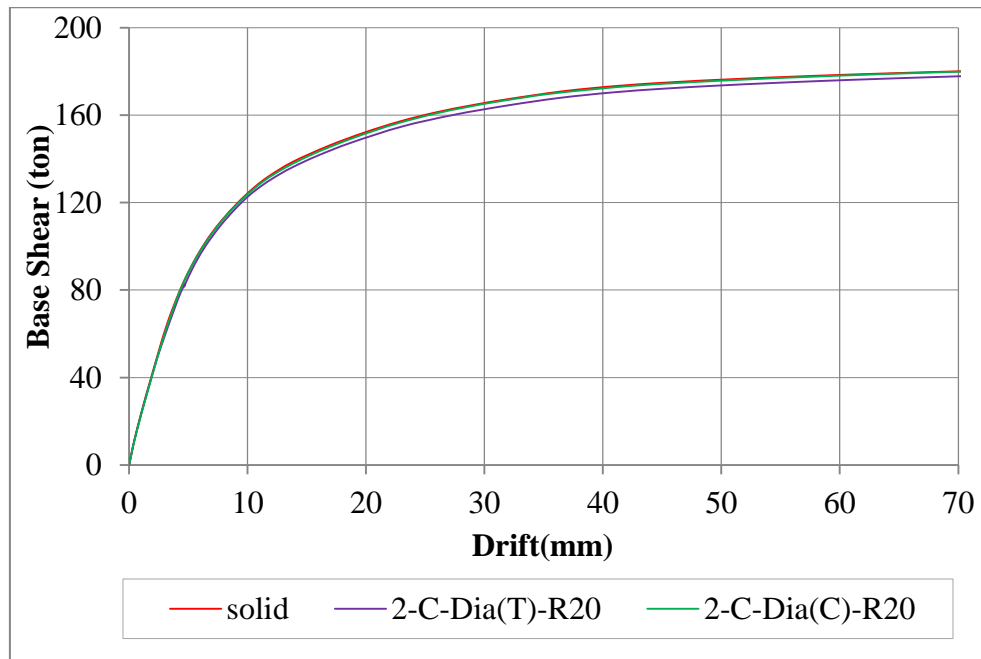
شکل ۴- ۳۰- مقایسه مقاومت نمونه‌های 2-C-X(top) و 2-C-X(bot) به ازای R/H متفاوت

با مقایسه‌ی شکل‌های (۴-۲۸) تا (۴-۳۰) می‌توان دریافت، چنانچه سطح بازشو در ناحیه تحتانی یا فوقانی پانل یکسان باشد، اختلاف در رفتار سیستم نسبتاً ناچیز است، هر چند که بازشو تحتانی عموماً اثرات کاهشی بیشتری در سختی الاستیک و مقاومت دیواربرشی فولادی دارد. به‌عنوان مثال، به ازای کاهش ۷/۳۱ درصد از سطح پانل، سختی‌الاستیک و مقاومت نمونه دارای بازشو تحتانی به ترتیب ۱/۴۷ و ۰/۴۱ درصد کمتر از نمونه‌ی دیگر است. از این رو می‌توان گفت که ایجاد حفره (ربع‌دایره) در گوشه‌های ورق و در ناحیه‌ی فوقانی یا تحتانی پانل، اثرات مشابهی در رفتار دیوارهای برشی فولادی دارد.

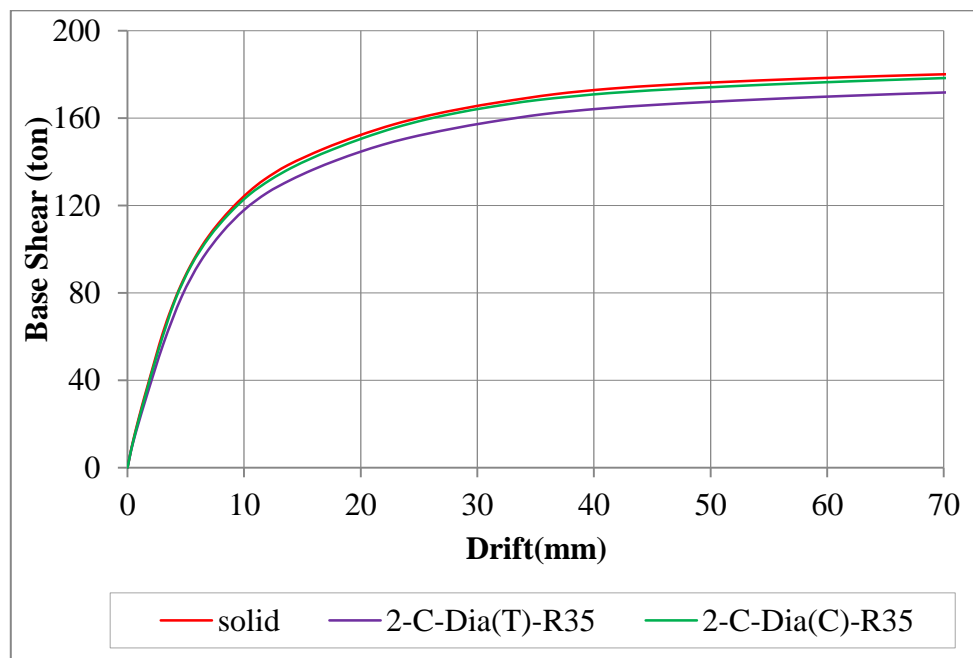
۴-۸-۲ - مقایسه بازشوهای (شکل: ربع‌دایره) راستای قطر کششی پانل با بازشوهای امتداد قطر فشاری آن

در این بخش، اثر ایجاد بازشو راستای قطر کششی پانل (بخش ۴-۷-۱) با بازشو امتداد قطر فشاری آن (بخش ۴-۷-۲) مقایسه می‌گردد. بازشوها به شکل ربع‌دایره‌اند. کلیه‌ی مشخصات نمونه‌ها ثابت در نظر گرفته شده و تنها اثر موقعیت متغیر است. تأثیر اثر چیدمان حفره‌ها به ازای طول بازشو ۲۰، ۳۵ و ۵۰ سانتیمتر مورد مطالعه قرار می‌گیرد. مقایسه‌ی اثر موقعیت حفره‌ها به ازای سطح بازشوی یکسان صورت می‌پذیرد.

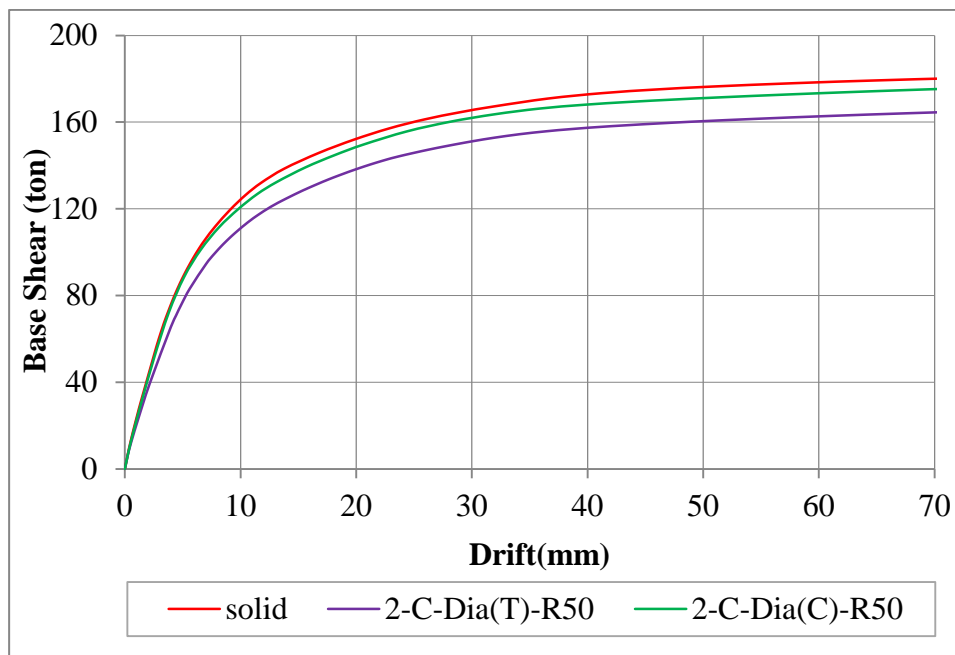
شکل‌های (۴-۳۱) تا (۴-۳۳)، نمودار بار-تغییر مکان جانبی نمونه‌ی دارای بازشو در راستای قطر کششی و نمونه‌ی دارای بازشو در امتداد قطر فشاری را در مقایسه با یکدیگر نمایش می‌دهند.



شکل ۴-۳۱- نمودار بار-تغییرمکان جانبی نمونه بدون حفره و نمونه‌های 2-C-Dia(C)-R20 و 2-C-Dia(T)-R20



شکل ۴-۳۲- نمودار بار-تغییرمکان جانبی نمونه بدون حفره و نمونه‌های 2-C-Dia(C)-R35 و 2-C-Dia(T)-R35



شکل ۴-۳۳- نمودار بار-تغییر مکان جانبی نمونه بدون حفره و نمونه‌های 2-C-Dia(C)-R50 و 2-C-Dia(T)-R50

جدول (۴-۹)، مقادیر سختی الاستیک (K)، بار در تغییر مکان ۲ سانتیمتر ($F_{d=2cm}$) و

مقاومت ($F_{d=7cm}$) نمونه‌ها را نمایش می‌دهد. در این جدول، اثر ایجاد بازشو در پانل دیوار برشی فولادی

با نمونه‌ی بدون حفره مقایسه می‌شود.

جدول ۴-۸ - مقایسه مقادیر K و $F_{d=2,7cm}$ نمونه‌های 2-C-Dia(T) و 2-C-Dia(C) با نمونه بدون حفره

تغییرات $F_{d=7cm}$ (%)	$F_{d=7cm}$ (ton)	تغییرات $F_{d=2cm}$ (%)	$F_{d=2cm}$ (ton)	تغییرات K (%)	K (ton/mm)	R / H	نام نمونه
0	180	0	152.3	0	19.82	0	solid
-1.22	177.80	-1.84	149.5	-3.54	19.12	0.13	2-C-Dia(T)-R20
-0.03	179.95	-0.39	151.7	-2.22	19.38	0.13	2-C-Dia(C)-R20
-4.56	171.8	-5.12	144.5	-9.33	17.97	0.23	2-C-Dia(T)-R35
-1	178.2	-1.31	150.3	-2.52	19.32	0.23	2-C-Dia(C)-R35
-8.61	164.5	-9.19	138.3	-15.14	16.82	0.33	2-C-Dia(T)-R50
-2.67	175.2	-2.50	148.5	-2.83	19.26	0.33	2-C-Dia(C)-R50

جدول (۴-۱۰)، اثر ایجاد بازشو در ناحیه ی قطرکشی پانل را نسبت به قطر فشاری نظیرش

مقایسه می کند.

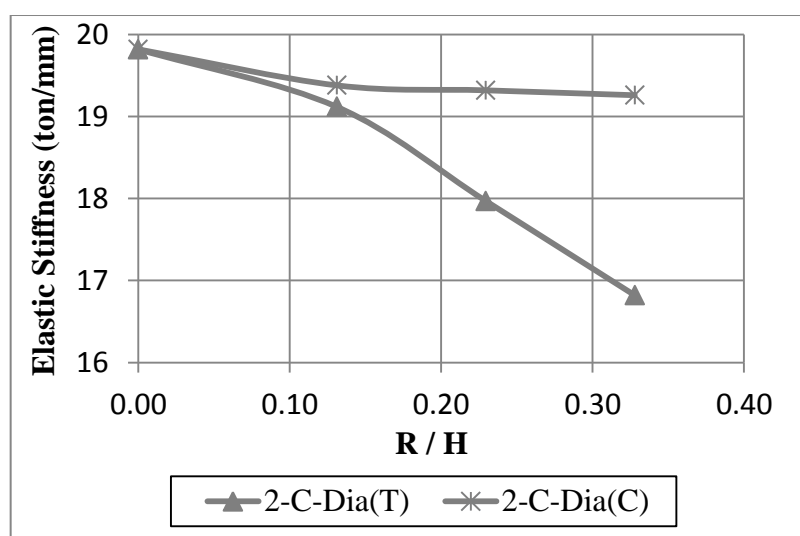
جدول ۴-۹- مقایسه مقادیر K و $F_{d=2,7cm}$ نمونه های 2-C-Dia(T) با نمونه های 2-C-Dia(C) نظیرش

تغییرات $F_{d=7cm}$ (%)	$F_{d=7cm}$ (ton)	تغییرات $F_{d=2cm}$ (%)	$F_{d=2cm}$ (ton)	تغییرات K (%)	K (ton/mm)	R / H	نام نمونه
-1.19	177.8	-1.45	149.5	-1.35	19.12	0.13	2-C-Dia(T)-R20
0	179.95	0	151.7	0	19.38	0.13	2-C-Dia(C)-R20
-3.59	171.8	-3.86	144.5	-6.99	17.97	0.23	2-C-Dia(T)-R35
0	178.2	0	150.3	0	19.32	0.23	2-C-Dia(C)-R35
-6.11	164.5	-6.87	138.3	-12.67	16.82	0.33	2-C-Dia(T)-R50
0	175.2	0	148.5	0	19.26	0.33	2-C-Dia(C)-R50

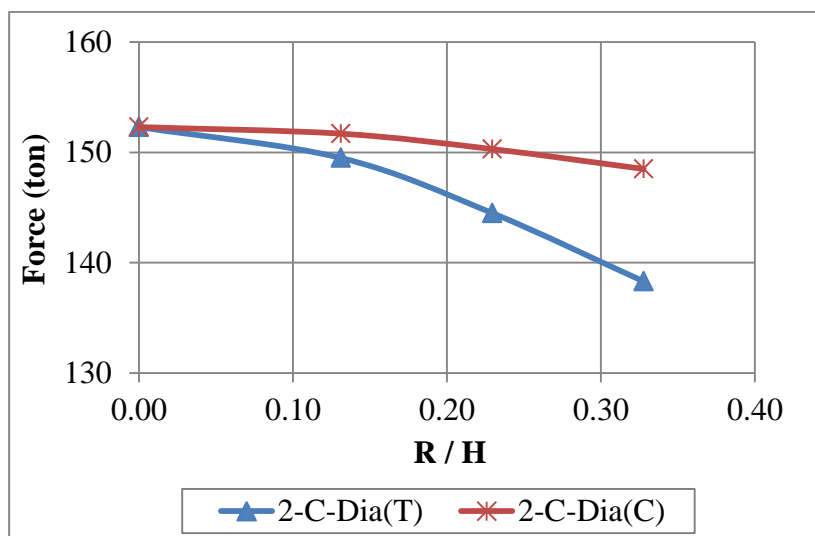
شکل های (۴-۳۴) تا (۴-۳۶)، به ترتیب نحوه ی تغییرات سختی الاستیک، $F_{d=2cm}$ و مقاومت

نمونه های دیوار برشی فولادی را در اثر ایجاد بازشو در راستای قطر کششی و فشاری در مقایسه با هم

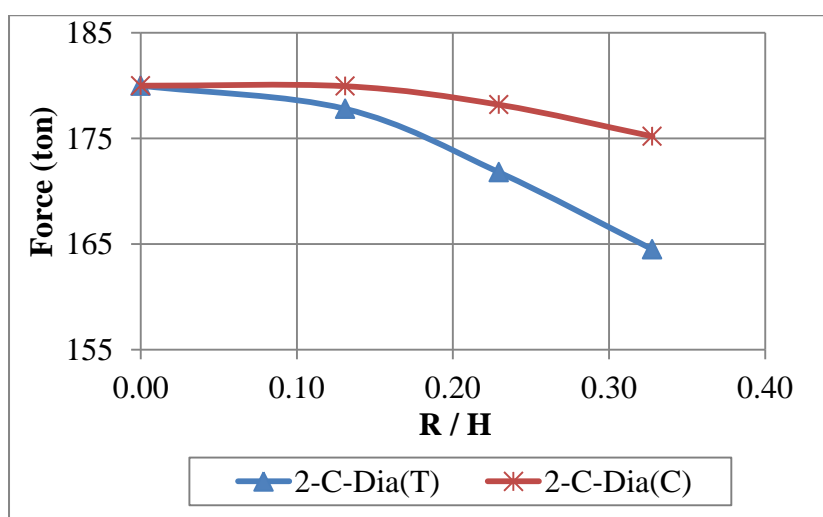
نشان می دهند.



شکل ۴-۳۴- مقایسه سختی الاستیک نمونه های 2-C-Dia(C) و 2-C-Dia(T) به ازای R/H متفاوت



شکل ۴-۳۵ - مقایسه $F_{d=2cm}$ نمونه‌های 2-C-Dia(T) و 2-C-Dia(C) به ازای R/H متفاوت



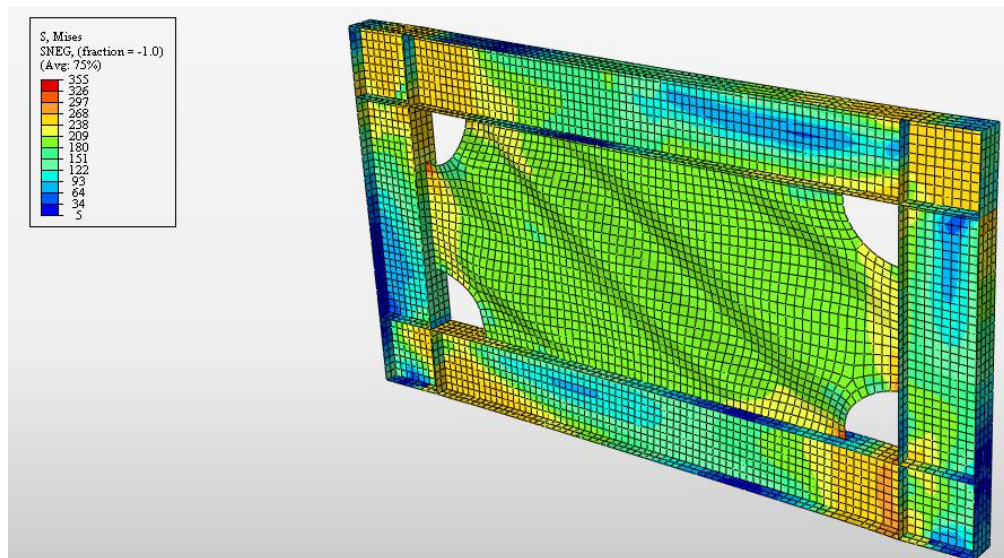
شکل ۴-۳۶ - مقایسه مقاومت نمونه‌های 2-C-Dia(T) و 2-C-Dia(C) به ازای R/H متفاوت

با مقایسه‌ی شکل (۴-۳۴) تا (۴-۳۶) می‌توان ملاحظه کرد که رفتار دیوار برشی فولادی دارای حفره دراستای قطر کششی پانل متفاوت با نمونه‌ی دارای حفره در امتداد فشاری آن است. کاهش سختی و مقاومت در نمونه‌ی دارای بازشو در امتداد قطر کششی بیشتر از نمونه‌ی دیگر می‌باشد. بعنوان مثال، به ازای کاهش ۷/۳۱ درصد از سطح پانل، سختی الاستیک و مقاومت نمونه‌ی دارای بازشو در راستای قطر کششی در مقایسه با نمونه‌ی

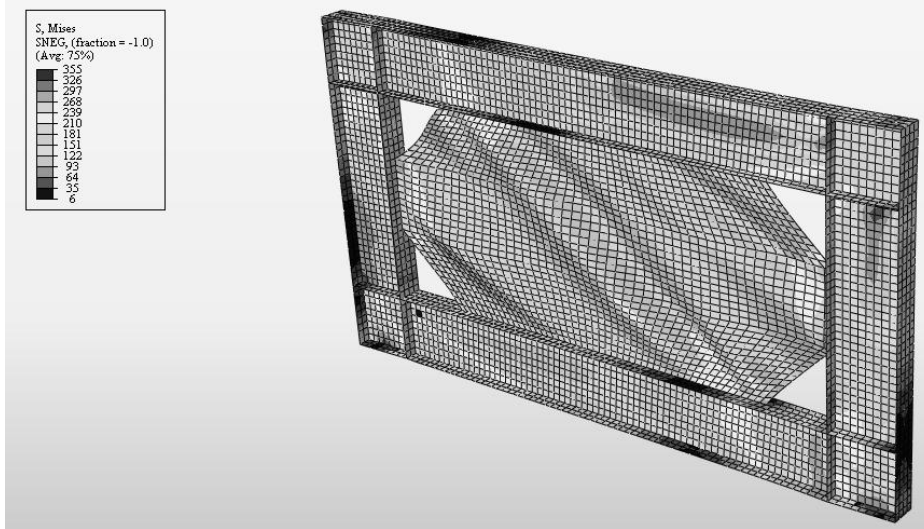
دیگر به ترتیب ۱۲/۶۷ و ۶/۱۱ درصد کمتر است. با افزایش سطح بازشو، اختلاف در رفتار نمونه‌های یاد شده بیشتر می‌شود.

۹-۴- بررسی اثر شکل بازشو

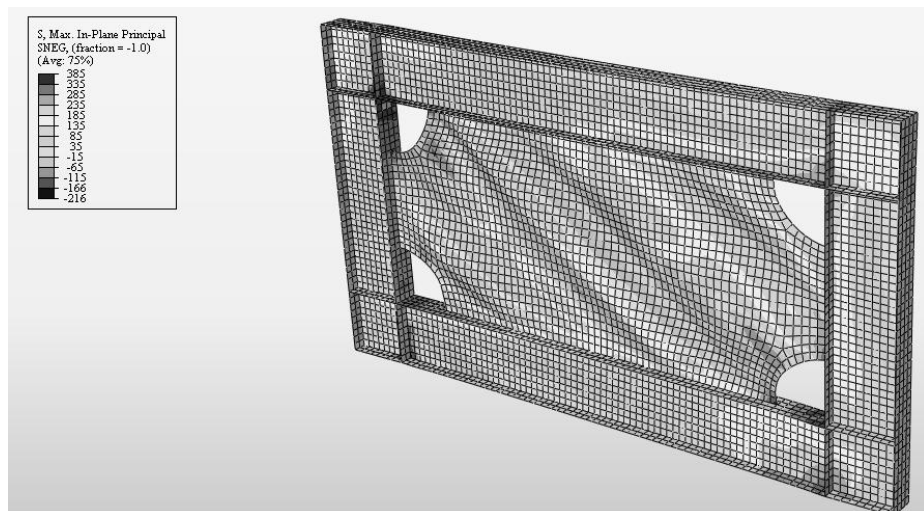
همواره ایجاد بازشو در دیوارهای برشی فولادی به دلایل معماری یا عبور تأسیسات به‌عنوان یک ضرورت مطرح است. حال پرسش آن است که شکل بازشو تا چه اندازه می‌تواند در رفتار کلی دیوارهای نامبرده موثر باشد. به منظور پاسخ‌گویی به این پرسش، چهار بازشو در گوشه‌های پانل ایجاد شده است تا اثر شکل بازشو ربع‌دایره و مثلثی به عنوان یک پارامتر مورد مطالعه قرار گیرد. کلیه مشخصات ثابت در نظر گرفته شده است تا اثر شکل تعیین گردد. مقایسه‌ی اثر شکل بازشو، به ازای کاهش سطح یکسان از پانل انجام می‌شود. شکل‌های (۴-۳۷) تا (۴-۴۰)، توزیع تنش‌های فون میزز و تنش‌های اصلی حداکثر نمونه‌های دارای بازشو ربع‌دایره و مثلثی را در قیاس با یکدیگر نمایش می‌دهند.



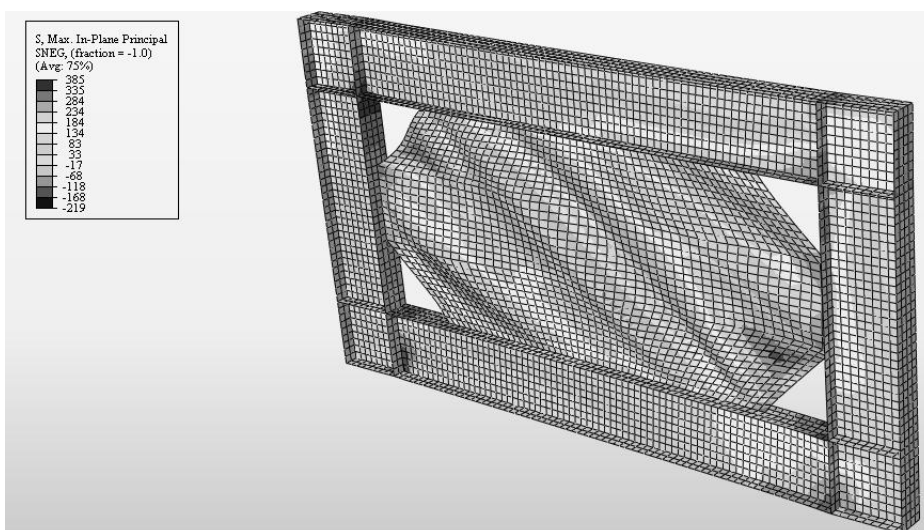
شکل ۴-۳۷- توزیع تنش‌های فون میزز در انتهای تحلیل در نمونه 4-C- R39.8 (برحسب MPa)



شکل ۴-۳۸- توزیع تنش‌های فون میزز در انتهای تحلیل در نمونه 4-T-L50 (بر حسب MPa)

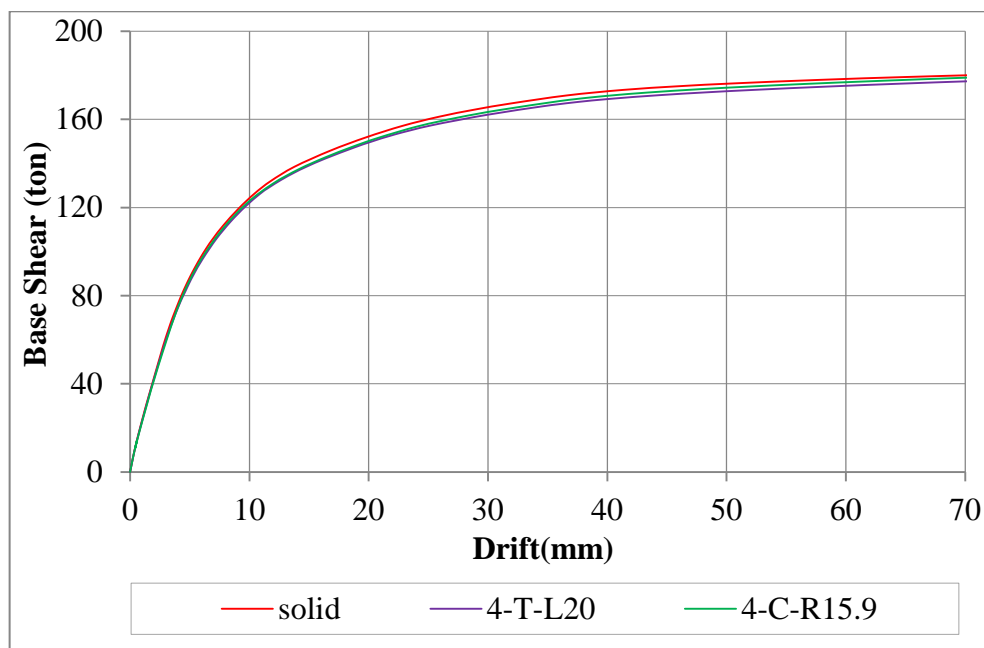


شکل ۴-۳۹- توزیع تنش‌های اصلی حداکثر در انتهای تحلیل در نمونه 4-C-R39.8 (بر حسب MPa)

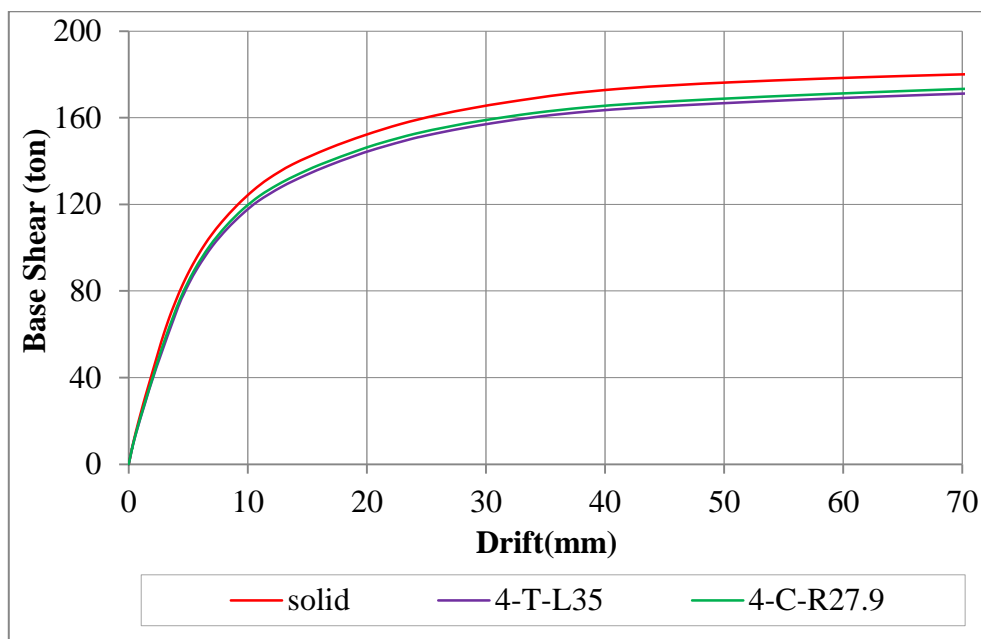


شکل ۴-۴۰- توزیع تنش‌های اصلی حداکثر در انتهای تحلیل در نمونه 4-T-L50 (بر حسب MPa)

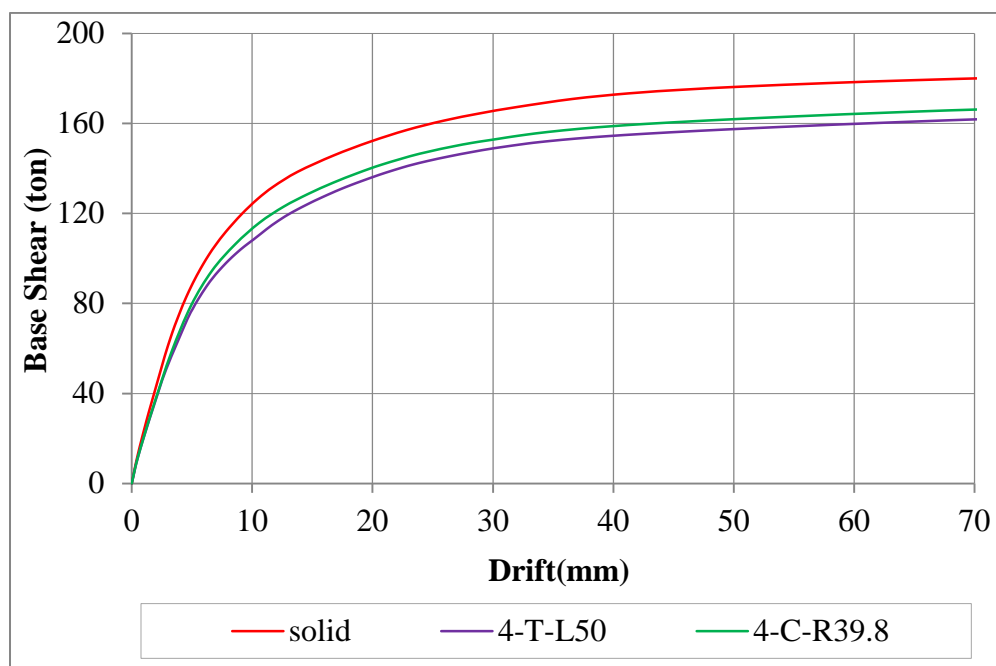
شکل (۴-۴۱) تا (۴-۴۳)، نمودار بار-تغییرمکان نمونه‌های دارای بازشو به شکل ربع‌دایره و مثلث را در مقیاس با هم نمایش می‌دهند. لازم به یادآوری است؛ به ازای کاهش سطح یکسان از پانل مقایسه‌ی اثر شکل بازشو انجام می‌شود.



شکل ۴-۴۱- نمودار بار-تغییرمکان جانبی نمونه بدون حفره و نمونه‌های 4-T-L20 و 4-C-R15.9



شکل ۴-۴۲- نمودار بار-تغییرمکان جانبی نمونه بدون حفره و نمونه‌های 4-T-L35 و 4-C-R27.9



شکل ۴-۴۳- نمودار بار-تغییر مکان جانبی نمونه بدون حفره و نمونه‌های 4-T-L50 و 4-C-R39.8

به ازای مساحت‌های مختلف بازشو، تاثیر شکل حفره در رفتار سیستم بررسی شده و مقادیر مربوطه در جدول (۴-۱۱) آمده است. در این جدول، اثر ایجاد بازشوها با نمونه‌ی بدون حفره مقایسه می‌شود. $\frac{A_o}{A_p}$ ، نسبت سطح بازشو به سطح پانل را نشان می‌دهد.

جدول ۴-۱۰- مقایسه مقادیر K و $F_{d=2.7cm}$ نمونه‌های 4-C و 4-T با نمونه بدون حفره

تغییرات $F_{d=7cm}$ (%)	$F_{d=7cm}$ (ton)	تغییرات $F_{d=2cm}$ (%)	$F_{d=2cm}$ (ton)	تغییرات K (%)	K (ton/mm)	طول بازشو / H	A_o/A_p (%)	نام نمونه
0	180	0	152.3	0	19.82	0	0	Solid
-0.67	178.8	-1.51	150	-3.84	19.06	0.10	1.49	4-C-R 15.9
-1.56	177.2	-1.64	149.8	-2.07	19.41	0.13		4-T-L20
-3.72	173.3	-4.14	146	-6.51	18.53	0.18	4.56	4-C-R 27.9
-5	171	-5.45	144	-9.33	17.97	0.23		4-T-L35
-7.78	166	-8.08	140	-11.56	17.53	0.26	9.3	4-C-R 39.8
-10	162	-10.70	136	-14.68	16.91	0.33		4-T-L50

در جدول (۴-۱۲)، اثر ایجاد بازشو مثلی نسبت به نمونه‌ی دارای بازشو ربع دایره نظیرش

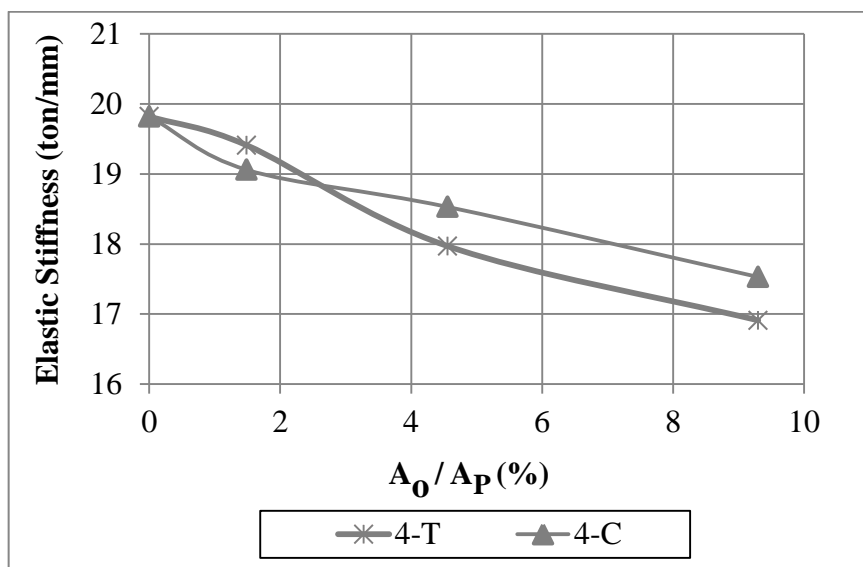
مقایسه می‌گردد.

جدول ۴-۱۱- مقایسه مقادیر K و $F_{d=2,7cm}$ نمونه‌های 4-T با نمونه‌های 4-C نظیرش

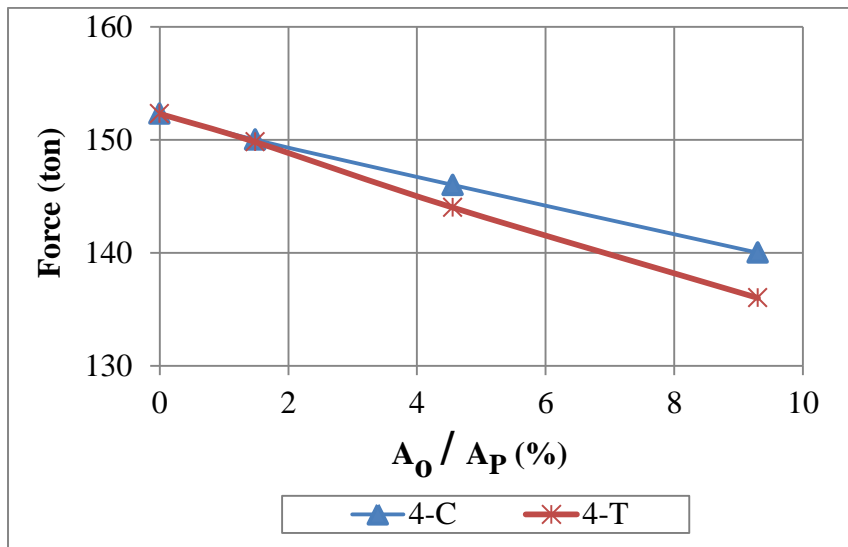
تغییرات $F_{d=7cm}$ (%)	$F_{d=7cm}$ (ton)	تغییرات $F_{d=2cm}$ (%)	$F_{d=2cm}$ (ton)	تغییرات K (%)	K (ton/mm)	طول بازشو $\frac{H}{H}$	A_o/A_p (%)	نام نمونه
0	178.8	0	150	0	19.06	0.10	1.49	4-C-R 15.9
-0.89	177.2	-0.13	149.8	1.84	19.41	0.13		4-T-L20
0	173.3	0	146	0	18.53	0.18	4.56	4-C-R 27.9
-1.33	171	-1.37	144	-3.02	17.97	0.23		4-T-L35
0	166	0	140	0	17.53	0.26	9.3	4-C-R 39.8
-2.41	162	-2.86	136	-3.53	16.91	0.33		4-T-L50

شکل‌های (۴-۴) تا (۴-۶)، اثر شکل بازشو را در سختی الاستیک، بار در

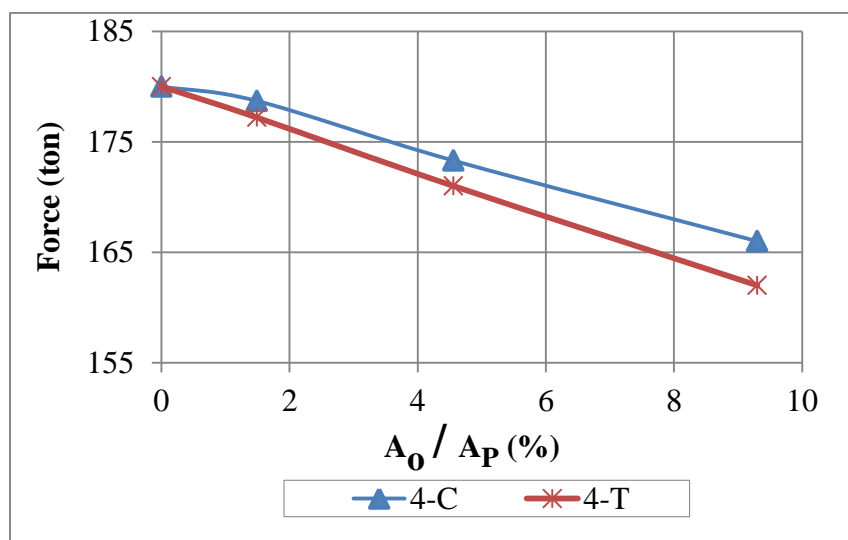
تغییر مکان ۲ سانتیمتر ($F_{d=2cm}$) و مقاومت سیستم نمایش می‌دهند.



شکل ۴-۴- تاثیر شکل بازشو در سختی الاستیک دیوار برشی فولادی



شکل ۴-۴۵- تاثیر شکل بازشو در دیوار برشی فولادی $F_{d=2cm}$



شکل ۴-۴۶- تاثیر شکل بازشو در مقاومت دیوار برشی فولادی

با ملاحظه‌ی شکل‌های (۴-۴۴) تا (۴-۴۶) می‌توان دریافت که به ازای سطح بازشو یکسان، دیوار دارای حفره به شکل ربع دایره عموماً عملکرد بهتری در مقایسه با دیوار دارای حفره‌ی مثلثی دارد، اما این اختلاف چندان محسوس نیست. باید توجه داشت که بازشو به شکل ربع‌دایره، فضای غیرمفید(پرت) کمتری را در قیاس با بازشو مثلثی ایجاد می‌کند. بعنوان مثال به ازای کاهش ۹/۳ درصد از سطح پانل، سختی‌الاستیک و مقاومت سیستم دارای بازشو مثلثی به ترتیب ۳/۵۳ و ۲/۴۱ درصد کمتر از نمونه‌ی دیگر می‌شود. می‌توان گفت که رفتار

سیستم دارای بازشو ربع دایره یا مثلثی واقع در گوشه‌های پانل (با مساحت یکسان) نسبتاً مشابه و نزدیک به هم است.

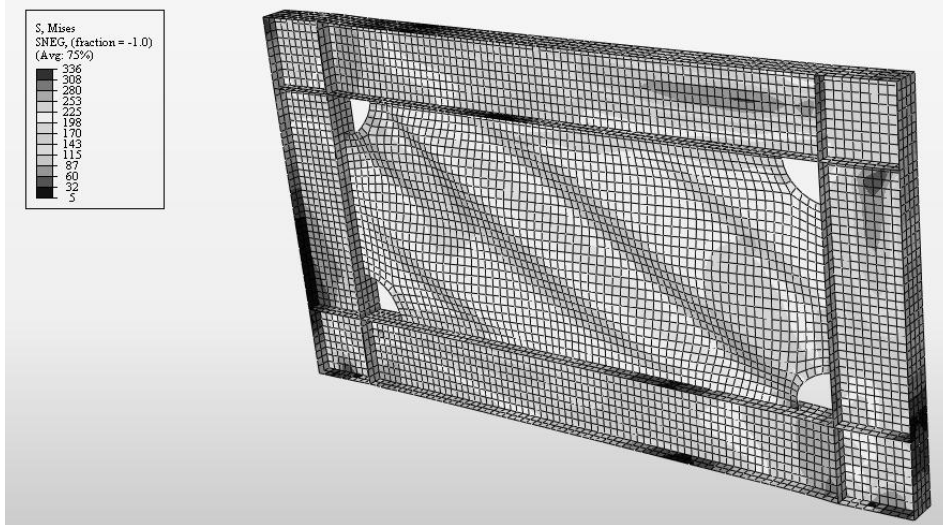
۴-۱۰- اثر استفاده از سخت‌کننده در بازشو

ایجاد بازشو در پانل دیوار برشی فولادی سبب کاهش سختی الاستیک و مقامت آن می‌شود. حال پرسش آن است که بکارگیری سخت‌کننده در بازشوه‌های اطراف المان‌های مرزی (تیر و ستون) تا چه اندازه می‌تواند موجب بهبود رفتار لرزه‌ای این سیستم گردد. سوال دیگر آن است که شکل سخت‌کننده تا چه اندازه می‌تواند در رفتار کلی سیستم تأثیرگذار باشد. در این پژوهش به منظور پاسخ‌گویی به این سوال‌ها، عملکرد دیوارهای برشی فولادی دارای سخت‌کننده در بازشو (به شکل ربع‌دایره و مثلثی) مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

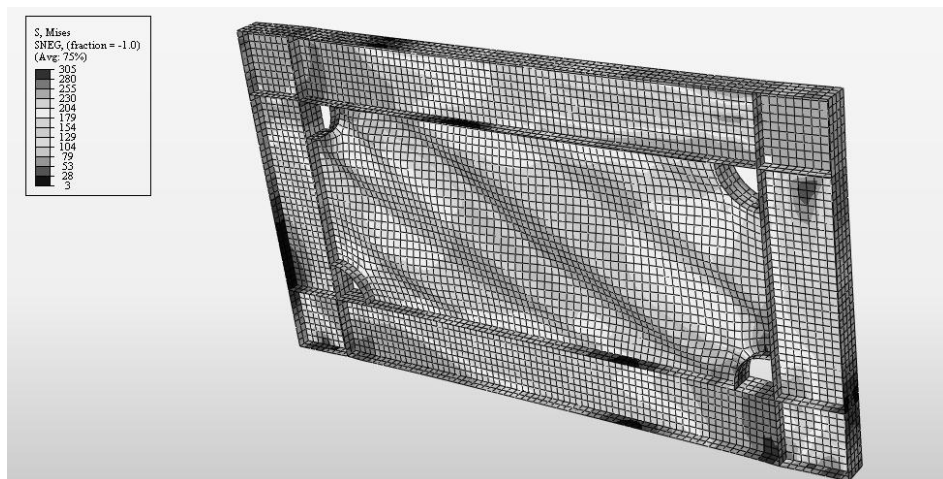
۴-۱۰-۱- بررسی اثر استفاده از سخت‌کننده در بازشو به شکل ربع دایره

در این بخش، تأثیر بکارگیری سخت‌کننده در بازشو ربع دایره مورد مطالعه قرار می‌گیرد و اثر آن در رفتار دیوار برشی فولادی تعیین می‌شود. نمونه‌ها دارای چهار بازشو به شکل ربع‌دایره هستند که در گوشه‌های پانل واقع شده‌اند. اثر این پارامتر به ازای چندین سطح بازشو متفاوت بررسی می‌گردد. ضخامت سخت‌کننده ۱۲ میلی‌متر می‌باشد.

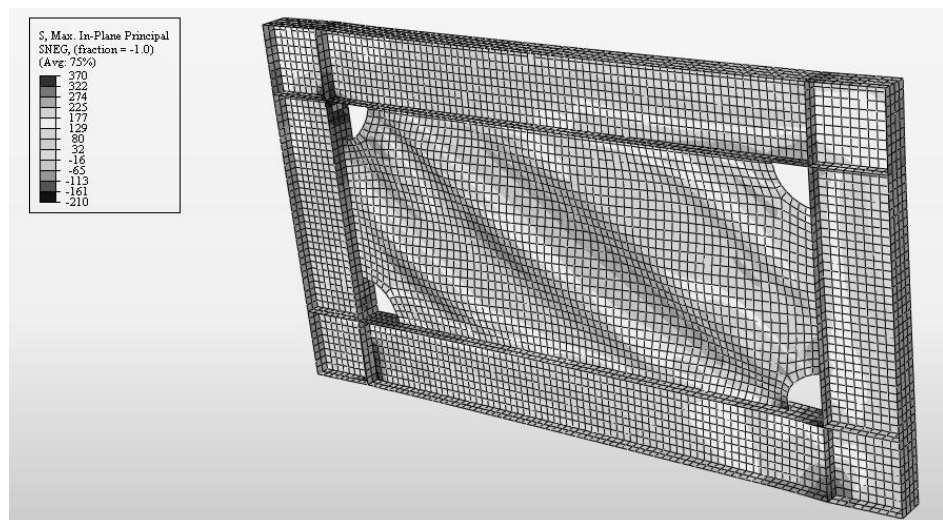
شکل‌های (۴-۴۷) تا (۴-۵۰)، توزیع تنش‌های فون میزز و تنش‌های اصلی حداکثر را در نمونه‌ی بدون سخت‌کننده و دارای سخت‌کننده (به ازای طول بازشو ۲۷/۹ سانتیمتر) برحسب MPa نشان می‌دهند.



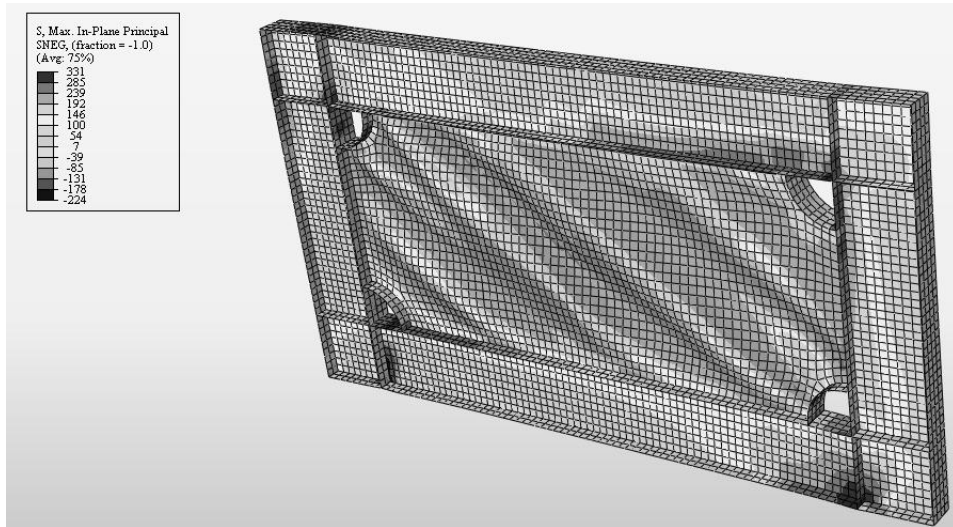
شکل ۴-۴۷ - توزیع تنش‌های فون میزز در انتهای تحلیل در نمونه 4-C-R27.9 (بر حسب MPa)



شکل ۴-۴۸ - توزیع تنش‌های فون میزز در انتهای تحلیل در نمونه ST-4-C-R27.9 (بر حسب MPa)



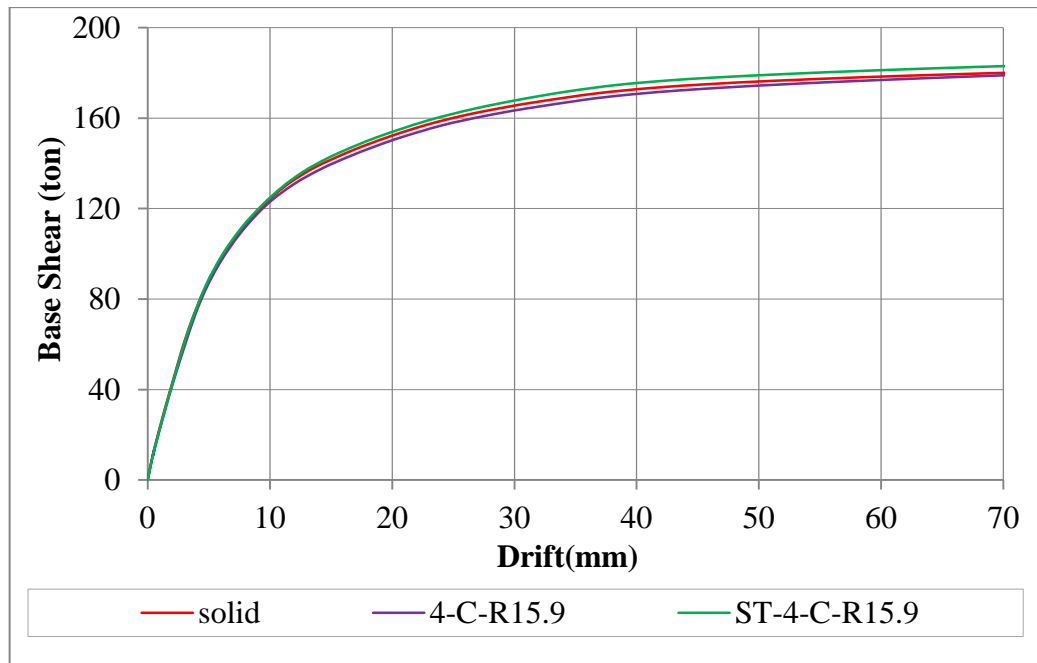
شکل ۴-۴۹ - توزیع تنش‌های اصلی حداکثر در انتهای تحلیل در نمونه 4-C-R27.9 (بر حسب MPa)



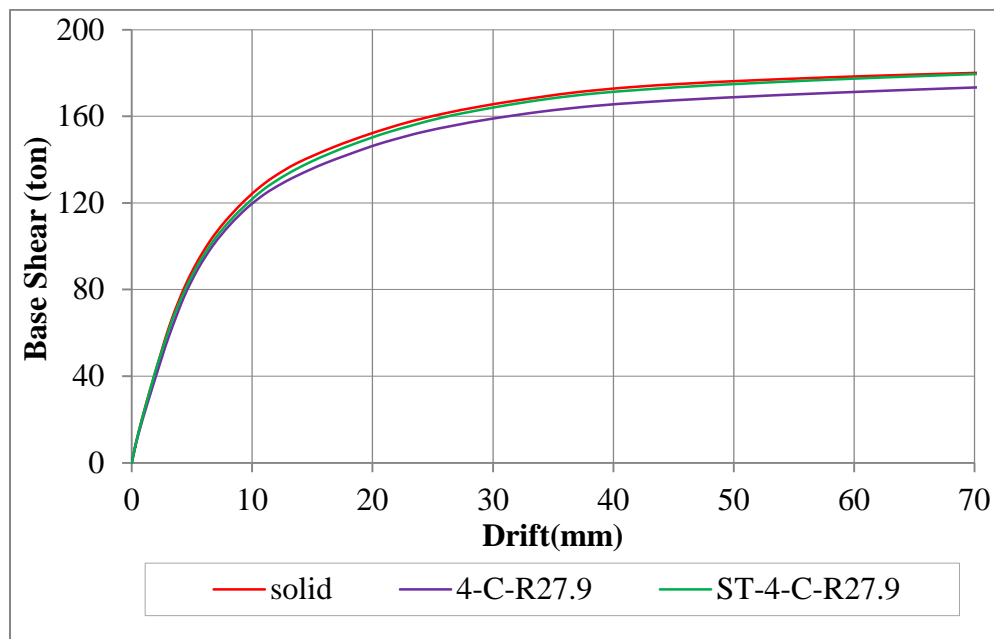
شکل ۴-۵۰- توزیع تنش‌های اصلی حداکثر در انتهای تحلیل در نمونه ST-4-C-R27.9 (بر حسب MPa)

شکل (۴-۵۱) تا (۴-۵۳)، نمودار بار-تغییر مکان نمونه‌ی بدون سخت‌کننده و نمونه‌ی دارای

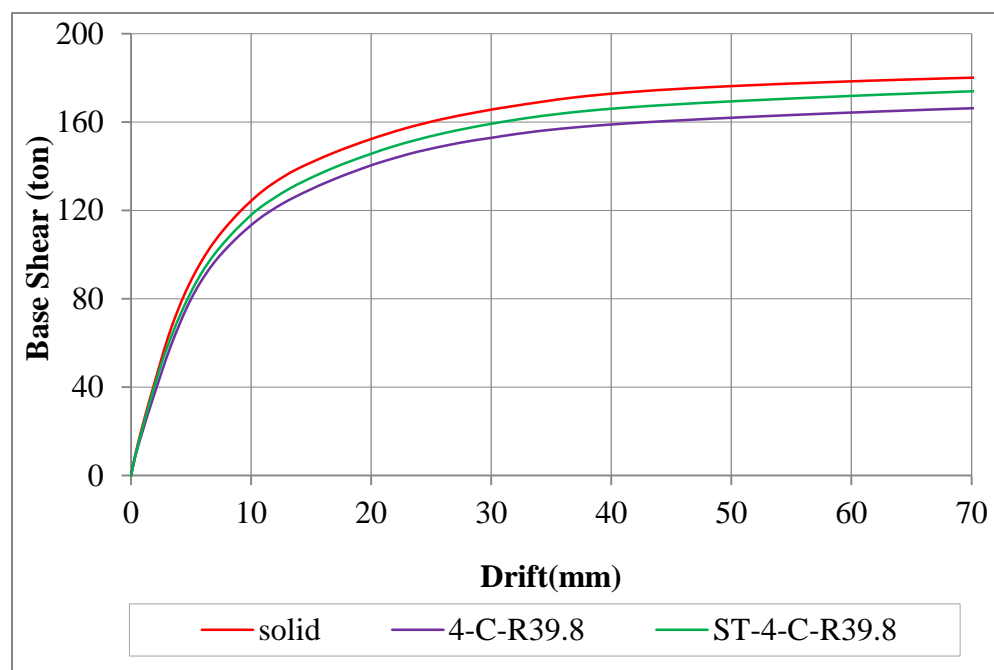
سخت‌کننده را نمایش می‌دهند.



شکل ۴-۵۱- نمودار بار-تغییر مکان جانبی نمونه بدون حفره و نمونه‌های 4-C-R15.9 و ST-4-C-R15.9



شکل ۴-۵۲- نمودار بار-تغییر مکان جانبی نمونه بدون حفره و نمونه‌های 4-C-R27.9 و ST-4-C-R27.9



شکل ۴-۵۳- نمودار بار-تغییر مکان جانبی نمونه بدون حفره و نمونه‌های 4-C-R39.8 و ST-4-C-R39.8

اثر استفاده از سخت‌کننده در بازشو ربع دایره بررسی شده و مقادیر مربوطه در جدول (۴-۱۳)

آمده است. در این جدول، اثر ایجاد بازشوها و بکارگیری سخت‌کننده در آن با نمونه‌ی بدون حفره

مقایسه می‌شود.

جدول ۴-۱۲- مقایسه مقادیر K و $F_{d=2,7cm}$ نمونه‌های 4-C و ST-4-C با نمونه بدون حفره

تغییرات $F_{d=7cm}$ (%)	$F_{d=7cm}$ (ton)	تغییرات $F_{d=2cm}$ (%)	$F_{d=2cm}$ (ton)	تغییرات K (%)	K (ton/mm)	R / H	نام نمونه
0	180	0	152.3	0	19.82	0	Solid
-0.72	178.7	-1.51	150	-3.84	19.06	0.10	4-C-R 15.9
1.44	182.6	1.12	154	-0.58	19.71	0.10	ST-4-C-R 15.9
-3.72	173.3	-4.14	146	-6.51	18.53	0.18	4-C-R 27.9
-0.44	179.2	-1.51	150	-1.61	19.50	0.18	ST-4-C-R 27.9
-7.78	166	-8.08	140	-11.56	17.53	0.26	4-C-R 39.8
-3.33	174	-4.66	145	-5.95	18.64	0.26	ST-4-C-R 39.8

جدول (۴-۱۴)، اثر بکارگیری سخت کننده در بازشو را با نمونه‌ی بدون سخت کننده‌ی نظیرش

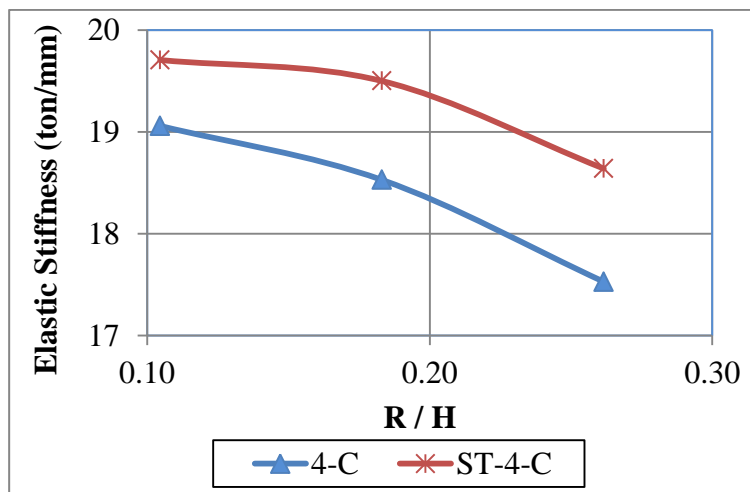
مقایسه می کند.

جدول ۴-۱۳- مقایسه مقادیر K و $F_{d=2,7cm}$ نمونه‌های ST-4-C با نمونه‌های 4-C نظیرش

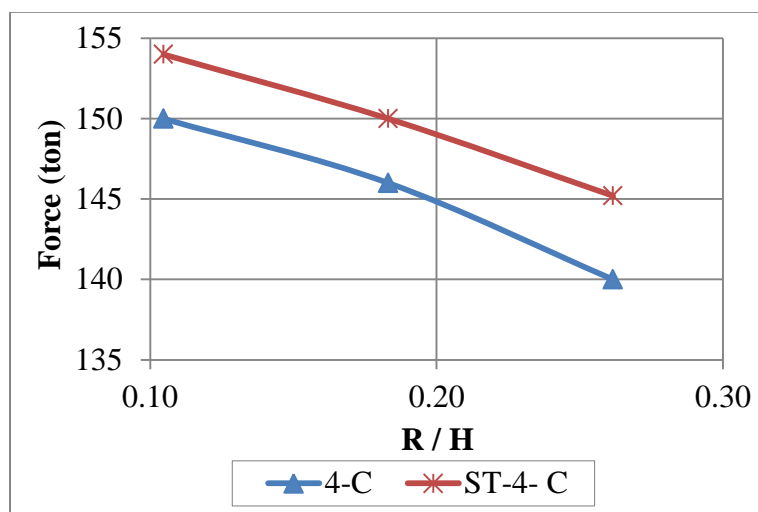
تغییرات $F_{d=7cm}$ (%)	$F_{d=7cm}$ (ton)	تغییرات $F_{d=2cm}$ (%)	$F_{d=2cm}$ (ton)	تغییرات K (%)	K (ton/mm)	R / H	نام نمونه
0	178.7	0	150	0	19.06	0.10	4-C-R 15.9
2.18	182.6	2.67	154	3.39	19.71	0.10	ST-4-C-R 15.9
0	173.3	0	146	0	18.53	0.18	4-C-R 27.9
3.40	179.2	2.74	150	5.24	19.50	0.18	ST-4-C-R 27.9
0	166	0	140	0	17.53	0.26	4-C-R 39.8
4.82	174	3.71	145.2	6.34	18.64	0.26	ST-4-C-R 39.8

شکل‌های (۴-۵۴) تا (۴-۵۶)، اثر استفاده از سخت کننده و عدم بکارگیری آن (در بازشو

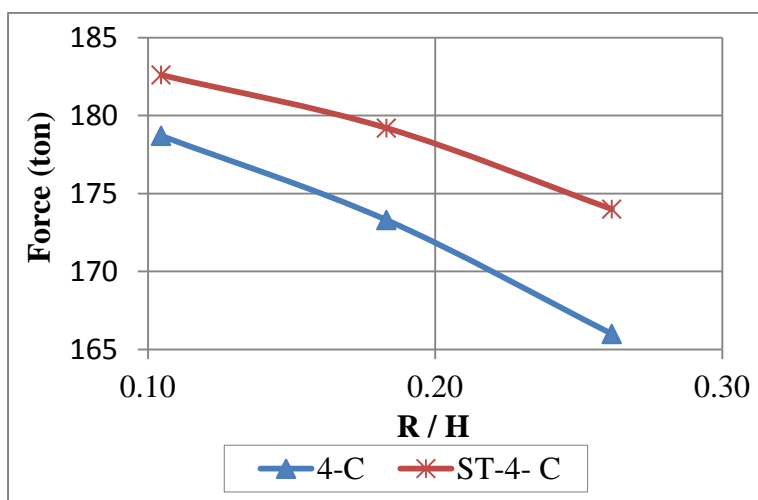
ربع دایره) را در رفتار سیستم نشان می دهند.



شکل ۴-۵۴- اثر بکارگیری سخت کننده در بازشو(به شکل ربع دایره) و در سختی الاستیک سیستم



شکل ۴-۵۵- اثر بکارگیری سخت کننده در بازشو(به شکل ربع دایره) و در $F_{d=2cm}$ سیستم



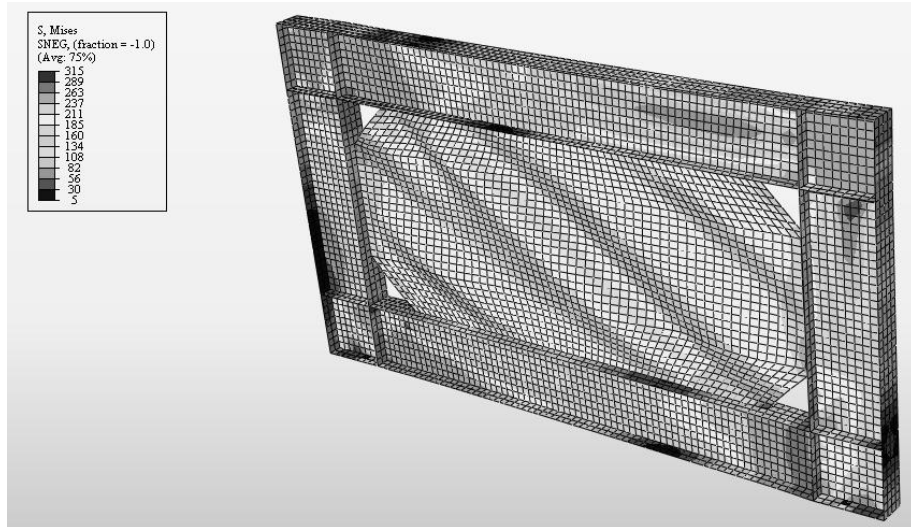
شکل ۴-۵۶- اثر بکارگیری سخت کننده در بازشو(به شکل ربع دایره) و در مقاومت سیستم

با توجه به شکل‌های (۴-۵۴) تا (۴-۵۶) می‌توان دریافت که استفاده از سخت‌کننده در بازشو به شکل ربع‌دایره می‌تواند سختی‌الاستیک و مقاومت سیستم را افزایش دهد. بعنوان مثال، چنانچه $9/3$ درصد از سطح پانل به منظور ایجاد بازشو کاسته شود، بکارگیری سخت‌کننده می‌تواند موجب افزایش $6/34$ درصد در سختی‌الاستیک و $4/82$ درصد در مقاومت نهایی نمونه شود. از این‌رو می‌توان گفت که بکارگیری سخت‌کننده در بازشو به شکل ربع‌دایره موجب بهبود رفتار کلی سیستم می‌شود، اما این افزایش چندان قابل ملاحظه و چشمگیر نیست و علت آن، وجود اثر خمش در سخت‌کننده است.

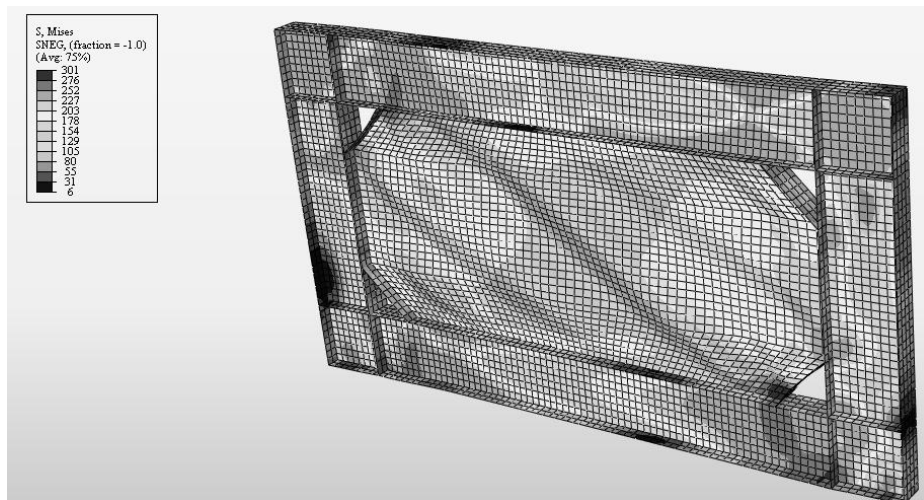
۴-۱۰-۲- بررسی اثر استفاده از سخت‌کننده در بازشو به شکل مثلث

در این بخش، تاثیر بکارگیری سخت‌کننده در بازشو مثلثی مورد مطالعه قرار می‌گیرد و اثر آن در رفتار دیوار برشی فولادی تعیین می‌شود. نمونه‌ها دارای چهار بازشو به شکل مثلث هستند که در گوشه‌های پانل واقع شده‌اند. اثر این پارامتر به ازای چندین سطح بازشو متفاوت بررسی می‌گردد. ضخامت سخت‌کننده 12 میلیمتر می‌باشد.

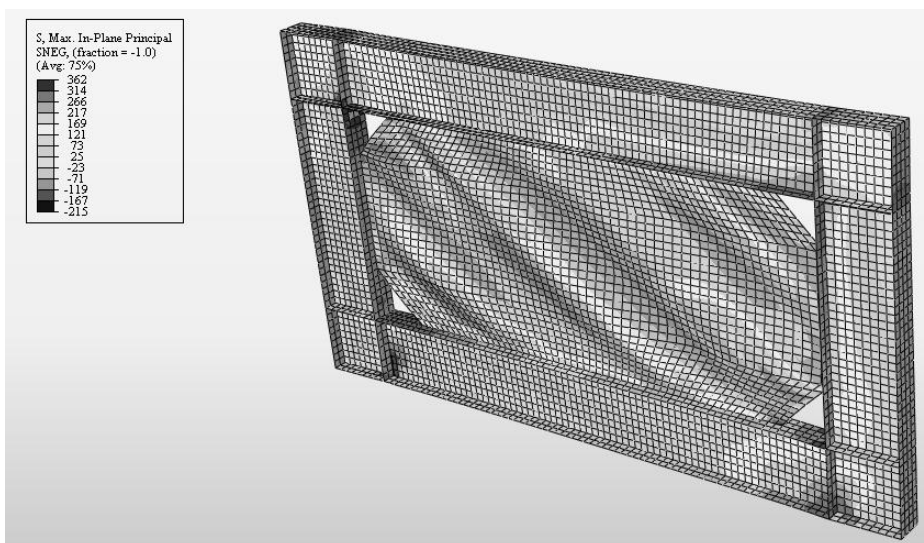
شکل‌های (۴-۵۷) تا (۴-۶۰)، توزیع تنش‌های فون میزز و تنش‌های اصلی حداکثر را در نمونه‌ی بدون سخت‌کننده و دارای سخت‌کننده (به ازای طول بازشو 35 سانتیمتر) برحسب MPa نشان می‌دهند.



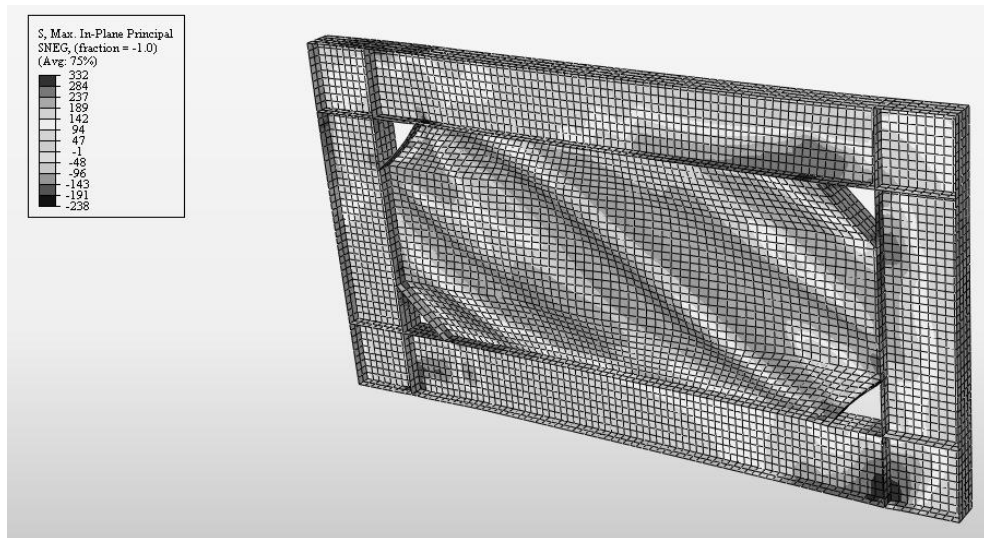
شکل ۴-۵۷- توزیع تنش‌های فون میزز در انتهای تحلیل در نمونه 4-T-L35 (برحسب MPa)



شکل ۴-۵۸- توزیع تنش‌های فون میزز در انتهای تحلیل در نمونه ST-4-T-L35 (برحسب MPa)



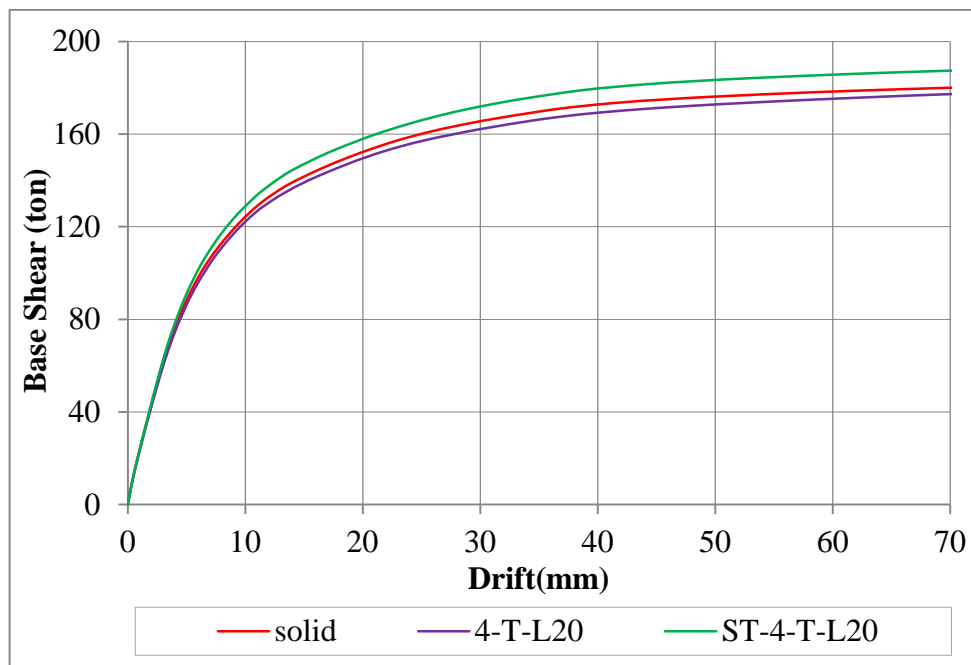
شکل ۴-۵۹- توزیع تنش‌های اصلی حداکثر در انتهای تحلیل در نمونه 4-T-L35 (برحسب MP)



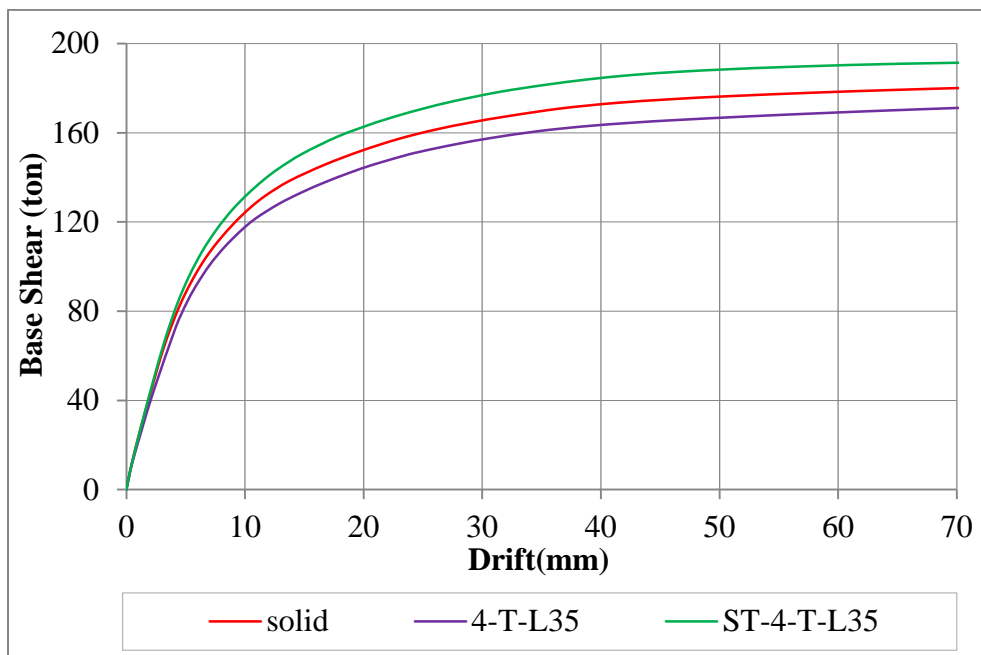
شکل ۴-۶۰- توزیع تنش‌های اصلی حداکثر در انتهای تحلیل در نمونه ST-4-T-L35 (بر حسب Mpa)

شکل‌های (۴-۶۱) تا (۴-۶۳)، نمودار بار-تغییر مکان نمونه‌ی بدون سخت‌کننده و دارای

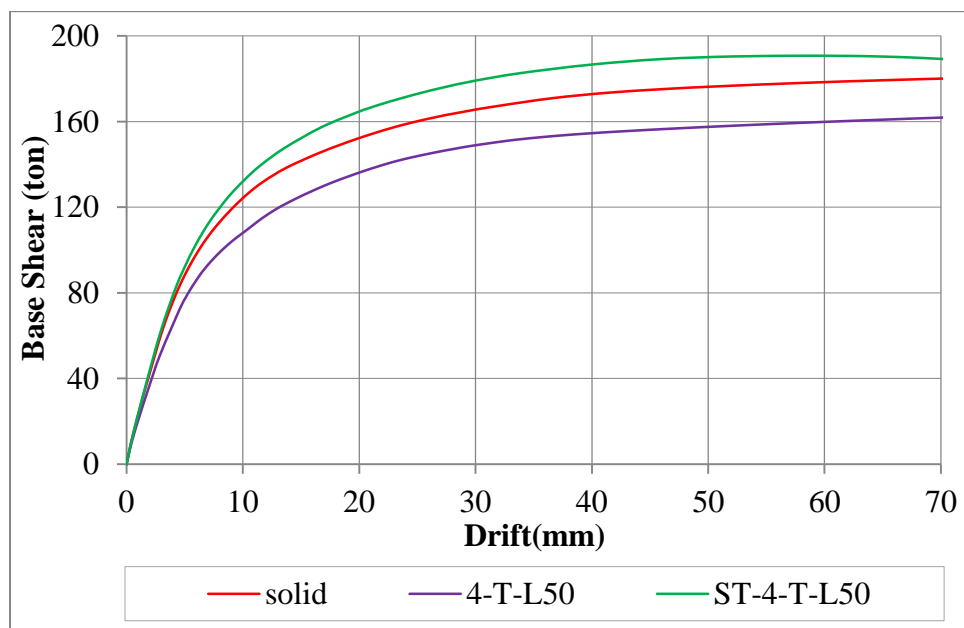
سخت‌کننده را نمایش می‌دهند.



شکل ۴-۶۱- نمودار بار-تغییر مکان جانبی نمونه بدون حفره و نمونه‌های 4-T-L20 و ST-4-T-L20



شکل ۴-۶۲- نمودار بار-تغییر مکان جانبی نمونه بدون حفره و نمونه‌های ST-4-T-L35 و 4-T-L35



شکل ۴-۶۳- نمودار بار-تغییر مکان جانبی نمونه بدون حفره و نمونه‌های ST-4-T-L50 و 4-T-L50

اثر استفاده از سخت‌کننده در بازشو مثلثی بررسی شده و مقادیر مربوطه در جدول (۴-۱۵)

آمده است. در این جدول، اثر ایجاد بازشوها و بکارگیری سخت‌کننده در آن با نمونه‌ی بدون حفره

مقایسه می‌شود.

جدول ۴-۱۴- مقایسه مقادیر K و $F_{d=2.7cm}$ نمونه‌های 4-T و ST-4-T با نمونه بدون حفره

تغییرات $F_{d=7cm}$ (%)	$F_{d=7cm}$ (ton)	تغییرات $F_{d=2cm}$ (%)	$F_{d=2cm}$ (ton)	تغییرات K (%)	K (ton/mm)	L / H	نام نمونه
0	180	0	152.3	0	19.82	0	Solid
-1.56	177.2	-1.64	149.8	-2.07	19.41	0.13	4-T-L20
4.06	187.3	3.74	158	2.37	20.29	0.13	ST-4-T-L20
-5	171	-5.45	144	-9.33	17.97	0.23	4-T-L35
6.39	191.5	6.70	162.5	2.83	20.38	0.23	ST-4-T-L35
-10	162	-10.70	136	-14.68	16.91	0.33	4-T-L50
5.06	189.1	8.01	164.5	3.13	20.44	0.33	ST-4-T-L50

جدول (۴-۱۶)، اثر بکارگیری سخت‌کننده در بازشو را با نمونه‌ی بدون سخت‌کننده‌ی نظیرش مقایسه

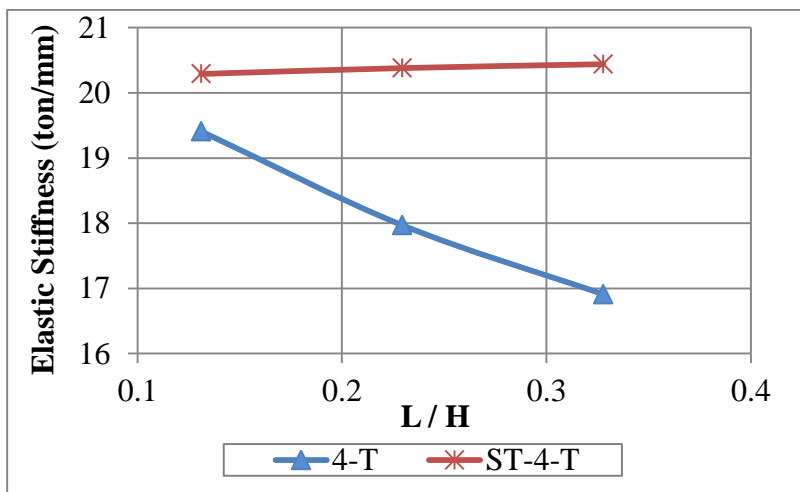
می‌کند.

جدول ۴-۱۵- مقایسه مقادیر K و $F_{d=2.7cm}$ نمونه‌های ST-4-T با نمونه‌های 4-T نظیرش

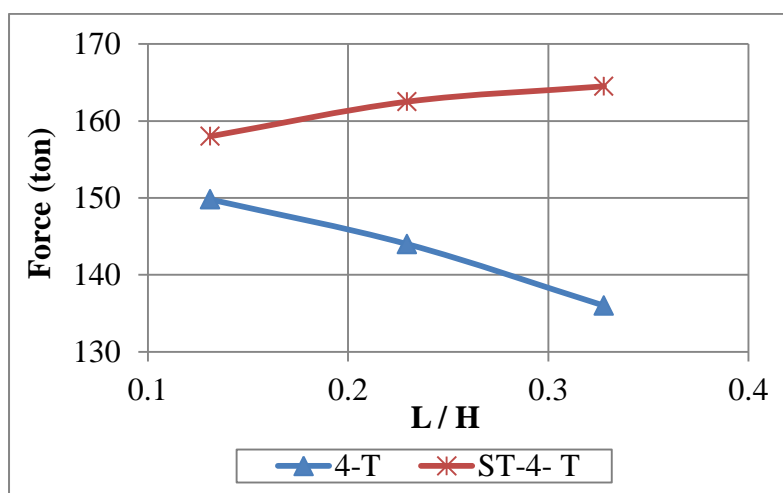
تغییرات $F_{d=7cm}$ (%)	$F_{d=7cm}$ (ton)	تغییرات $F_{d=2cm}$ (%)	$F_{d=2cm}$ (ton)	تغییرات K (%)	K (ton/mm)	L / H	نام نمونه
0	177.2	0	149.8	0	19.41	0.13	4-T-L20
5.7	187.3	5.47	158	4.53	20.29	0.13	ST-4-T-L20
0	171	0	144	0	17.97	0.23	4-T-L35
11.99	191.5	12.85	162.5	13.41	20.38	0.23	ST-4-T-L35
0	162	0	136	0	16.91	0.33	4-T-L50
16.73	189.1	20.96	164.5	20.88	20.44	0.33	ST-4-T-L50

شکل‌های (۴-۶۴) تا (۴-۶۶)، اثر استفاده از سخت‌کننده در بازشو و یا عدم بکارگیری آن را در

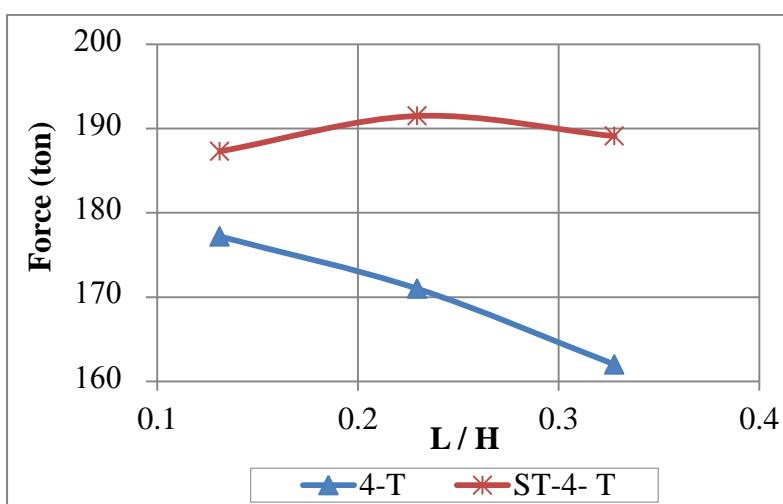
رفتار سیستم نشان می‌دهند.



شکل ۴-۶۴- اثر بکارگیری سخت کننده در بازشو(به شکل مثلث) و در سختی الاستیک سیستم



شکل ۴-۶۵- اثر بکارگیری سخت کننده در بازشو(به شکل ربع دایره) و در $F_{d=2cm}$ سیستم



شکل ۴-۶۶- اثر بکارگیری سخت کننده در بازشو(به شکل ربع دایره) و در مقاومت سیستم

با توجه به شکل‌های (۴-۶۴) تا (۴-۶۶) می‌توان دریافت که استفاده از سخت‌کننده در بازشو مثلثی می‌تواند سختی الاستیک و مقاومت سیستم را افزایش دهد. بعنوان مثال، چنانچه $9/3$ درصد از سطح پانل به منظور ایجاد بازشو کاسته شود، بکارگیری سخت‌کننده موجب افزایش $20/88$ درصد در سختی الاستیک و $16/73$ درصد در مقاومت نهایی نمونه می‌شود. بکارگیری سخت‌کننده در بازشو مثلثی رفتار کلی دیوار برشی فولادی را به طور قابل ملاحظه‌ای ارتقا می‌دهد. حال آنکه، استفاده از سخت‌کننده در بازشو ربع دایره به دلیل اثرات خمشی چنین نیست.

فصل پنجم - نتیجه گیری و پیشنهادها

۵-۱- پیش‌گفتار

دیوار برشی فولادی، یک سیستم مقاوم در برابر بارهای جانبی است که می‌تواند در ساخت سازه‌های جدید و همچنین تقویت سازه‌های موجود بکار گرفته شود. اساس ایده‌ی دیوارهای نامبرده، بهره‌گیری از میدان کششی قطری پانل است که پس از کمانش ورق فولادی در آن ایجاد می‌گردد. با افزایش بار جانبی، میدان کشش قطری در پانل گسترش می‌یابد و قطر کششی بار وارده را تحمل می‌کند.

تعدیل تنش‌ها در این سیستم به علت گستردگی اتصال‌ها به مراتب بهتر از سیستم‌های دیگر (قاب‌ها و مهاربندها) صورت می‌گیرد زیرا معمولاً در سایر سیستم‌ها، اتصال‌ها به صورت متمرکز می‌باشند. از این‌رو، رفتار دیوارهای برشی فولادی در حالت پلاستیک و تحت اثر بارهای رفت و برگشتی مناسب‌تر می‌باشد. چند نمونه از سازه‌های اجرا شده با این سیستم در معرض زلزله‌های شدیدی قرار گرفته‌اند و عملکرد مناسب و مطلوبی را از خود نشان داده‌اند. تجربه‌ی زلزله‌های گذشته،

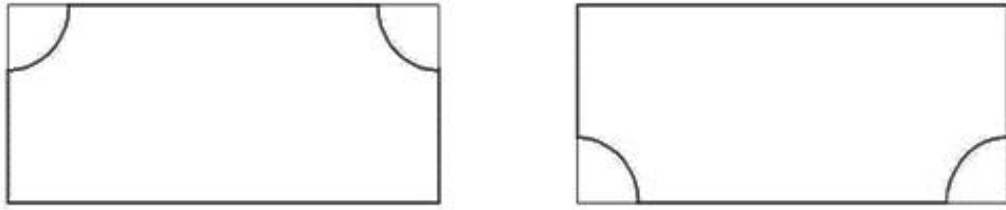
مطالعات تئوری و نتایج آزمایشگاهی همگی حاکی از سختی برشی قابل ملاحظه و میزان جذب انرژی بالا در دیوارهای برشی فولادی است. از این رو، استفاده از این سیستم برای بارهای سنگین جانبی و کنترل تغییر مکان ناشی از آن‌ها می‌تواند بسیار مفید می‌باشد [۱].

ایجاد بازشو در دیوار برشی فولادی به دلایل معماری و یا عبور تأسیسات امری اجتناب‌ناپذیر است. وجود بازشو در ورق فولادی سیستم سبب کاهش سختی و مقاومت آن می‌گردد. در این پژوهش، تاثیر ایجاد بازشو در گوشه‌های پانل به منظور عبور تأسیسات مورد مطالعه قرار گرفته است. اثر عواملی همچون موقعیت بازشو، شکل بازشو، بکارگیری سخت‌کننده و یا عدم استفاده از آن در سختی الاستیک و مقاومت دیوارهای نامبرده بررسی شده است. نرم‌افزار قدرتمند اجزای محدود ABAQUS به منظور مدلسازی بکارگرفته شده و نتایج آن با یک نمونه‌ی آزمایشگاهی معتبر مقایسه شده است تا صحت آن بررسی گردد. همگرایی خوبی میان نتایج بدست آمده که بیان‌گر درستی مدلسازی است. در ادامه، تحلیل استاتیکی غیرخطی (Pushover) توسط نرم‌افزار ABAQUS بر روی مدل‌ها انجام شده است و با آنالیز مدل‌ها، اثر پارامترهای یاد شده در رفتار دیوار برشی فولادی (سختی الاستیک و مقاومت) مورد مطالعه قرار گرفته است.

۵-۲ - نتیجه‌گیری

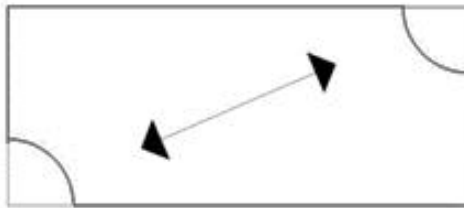
در این پژوهش، اثر وجود بازشو (در گوشه‌های پانل) در رفتار دیوار برشی فولادی به منظور عبور تأسیسات مورد مطالعه قرار گرفته و تأثیر آن در رفتار سیستم (سختی الاستیک و مقاومت) بررسی شده است. نتایج حاصل به این شرح‌اند:

(۱) ایجاد بازشو به شکل ربع‌دایره در ناحیه‌ی تحتانی ورق فولادی در مقایسه با ناحیه‌ی فوقانی آن عموماً اثرات کاهش‌ی بیشتری در سختی الاستیک و مقاومت سیستم دارد. شکل (۵-۱)، موقعیت قرارگیری بازشوهای نامبرده را نمایش می‌دهد.



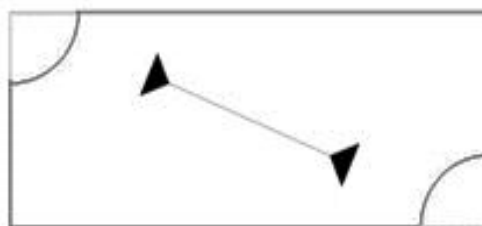
شکل ۵-۱- موقعیت قرارگیری بازشوها در ناحیه تحتانی و فوقانی پانل

به طور کلی، اختلاف در نتایج نمونه‌ها ناچیز است و می‌توان گفت، ایجاد حفره در گوشه‌های ورق و در ناحیه‌ی فوقانی یا تحتانی پانل، اثرات مشابهی در رفتار دیوارهای برشی فولادی دارد. (۲) وجود بازشو به شکل ربع دایره و در امتداد قطر کششی پانل، کاهش نسبتاً شدیدی در رفتار (سختی الاستیک و مقاومت) دیوار برشی فولادی ایجاد می‌کند. شکل (۵-۲)، موقعیت قرارگیری بازشوهای نامبرده را نمایش می‌دهد.



شکل ۵-۲- موقعیت قرارگیری بازشوها در ناحیه قطر کششی پانل

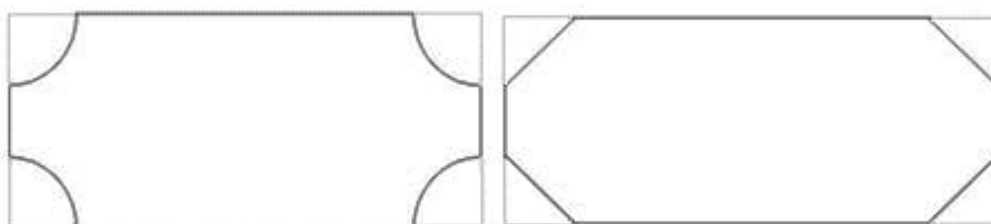
در این حالت، تمامی بازشوها در راستای قطر کششی واقع شده‌اند که این امر، شکل‌گیری میدان کششی قطری و انتقال نیروها به المان‌های مرزی (تیر و ستون) را مشکل‌تر می‌سازد. (۳) وجود بازشو به شکل ربع دایره در امتداد قطر فشاری پانل، تأثیر چندانی در کاهش سختی الاستیک و مقاومت ندارد. شکل (۵-۳)، موقعیت قرارگیری بازشوهای نامبرده را نشان می‌دهد.



شکل ۵-۳- موقعیت قرارگیری بازشوها در ناحیه قطر فشاری پانل

۴) بازشو به شکل ربع دایره در راستای قطری پانل، بسته به این که در امتداد قطر کشش یا قطر فشار باشد، عملکرد کاملاً متفاوتی خواهد داشت. بازشوها در امتداد کششی در مقایسه با امتداد فشاری، اثرات کاهشی بیشتری در مقاومت و سختی الاستیک سیستم دارند. با افزایش سطح بازشو، این اختلاف آشکارتر می‌گردد.

۵) رفتار دیوار برشی فولادی دارای بازشو به شکل ربع دایره یا مثلثی واقع در گوشه‌های پانل (با مساحت یکسان) نسبتاً مشابه است. شکل (۵-۴)، نمونه‌ی مورد مطالعه رانمایش می‌دهد.



شکل ۵-۴ - نمونه مورد مطالعه به منظور بررسی اثر شکل (مثلثی و ربع دایره)

ایجاد بازشو به شکل ربع دایره در مقایسه با بازشو مثلثی عموماً اثرات کاهشی کمتری در رفتار دیوارهای نامبرده دارد اما این اختلاف ناچیز است. ضمناً بایستی توجه داشت که بازشو به شکل ربع دایره، فضای غیرمفید (پرت) کمتری را در قیاس با بازشو مثلثی ایجاد می‌کند.

۶) در نتیجه شماره ۵ اشاره شد که اثر شکل بازشو پانل (ربع دایره یا مثلث) در رفتار دیوار برشی فولادی ناچیز است. از این‌رو، می‌توان نتایج بدست آمده از شماره ۱ تا ۴ را برای بازشو به شکل مثلث (واقع در گوشه‌های پانل) تکرار نمود.

۷) استفاده از سخت‌کننده در بازشو به شکل ربع دایره می‌تواند سختی الاستیک و مقاومت سیستم را افزایش دهد. شکل (۵-۵)، نمونه‌ی مورد مطالعه رانمایش می‌دهد.



شکل ۵-۵ - نمونه مورد مطالعه به منظور بررسی اثر سخت‌کننده در بازشو به شکل ربع دایره

بکاگیری سخت‌کننده در بازشو به شکل ربع دایره، هر چند موجب بهبود رفتار کلی سیستم می‌شود، اما به دلیل اثرات خمشی، این افزایش چندان قابل ملاحظه و چشمگیر نیست.

(۸) وجود سخت‌کننده در بازشو مثلثی، رفتار دیوارهای برشی فولادی را ارتقا می‌دهد و موجب تسهیل در انتقال نیروها به المان‌های مرزی می‌گردد. شکل (۵-۶)، نمونه‌ی مورد مطالعه را نمایش می‌دهد.



شکل ۵-۶- نمونه مورد مطالعه به منظور بررسی اثر سخت‌کننده در بازشو به شکل مثلثی

استفاده از سخت‌کننده در بازشو مثلثی می‌تواند سختی الاستیک و مقاومت سیستم را به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش دهد.

(۹) همانطور که در بند ۵ اشاره شده است، در صورت عدم بکارگیری سخت‌کننده در بازشو، رفتار دیوار برشی فولادی دارای بازشو به شکل ربع دایره یا مثلثی نسبتاً مشابه یکدیگر است اما چنانچه از سخت‌کننده در بازشو استفاده شود، رفتار دو بازشو نامبرده متفاوت از هم خواهد بود.

۵-۳- چندین زمینه برای پژوهش‌های آینده

در ادامه، چندین موضوع جهت پژوهش‌های آتی ارائه می‌گردد:

(۱) ایجاد بازشو در دیوارهای برشی فولادی به دلایل معماری (نصب در و پنجره) به عنوان یک مسئله مطرح است. از این‌رو، می‌توان تاثیر ایجاد بازشوهای نامبرده (با آرایش‌های گوناگون) را در عملکرد این سیستم مورد مطالعه قرار داد.

۲) توصیه می‌شود که ضریب رفتار دیوارهای برشی فولادی دارای بازشو تعیین شود. با توجه به وجود روش‌های مختلف تعیین ضریب رفتار، پیشنهاد می‌گردد که ضریب رفتار سازه‌ی یاد شده با روش‌های مختلف تعیین شود و نتایج حاصل از آن با هم مقایسه گردد.

۳) ارزیابی رفتار دیوارهای نامبرده تحت تحلیل تاریخچه زمانی می‌تواند مورد بررسی قرار گیرد.

۴) رفتار لرزه‌ای دیوارهای برشی فولادی، در صورت استفاده از سخت‌کننده با آرایش‌های گوناگون (سخت‌کننده افقی، قائم و مورب) در یک طرف و یا هر دو سوی پانل نیز می‌تواند مورد مطالعه قرار گیرد.

مراجع

- (۱) صبوری س.، (۱۳۸۰)، "سیستم‌های مقاوم در برابر بارهای جانبی مقدمه‌ای بر دیوارهای برشی فولادی"، چاپ اول، انتشارات انگیزه.
- 2) Astaneh-Asl A., (2001), "Seismic Behavior and Design of Steel Shear Walls", Structural Steel Educational Council, Steel TIPS Report.
- 3) Robison K., Ames D.,(2000), "Library Seismic Upgrade", Modern Steel Construction.
- 4) Sabouri-Ghomi S., Ventura C.E.; Kharrazi M.H.K.,(2005),"Shear Analysis and Design of Ductile Steel Plate Walls", *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol.131, No. 6, pp878-889.
- 5) Berman J.W., Bruneau M., (2004),"Steel Plate Shear Walls Are Not Plate Girders",*AISC Engineering Journal*, Third Quarter, pp 95-106.
- 6) Astaneh-Asl A., (2002), "Seismic Behavior and Design of Composite Steel plate Shear Walls", Structural Steel Educational Council, Steel TIPS Report.
- 7) Behbahanifard M.R., Grondin G.Y., Elwi A.E., (2003), "Experimental and Numerical Investigation of Steel Plate Shear Walls", Structural Engineering Report No.254, Department of Civil and environmental Engineering, University of Alberta, Edmonton, Alberta, Canada.
- 8) Rezei M., Ventura C., Prion H ,(2000), "Numerical Investigation of Thin Unstiffened Steel Plate Shear Walls", 12th World Conference on Earthquake Engineering.
- 9) Rezai M., Ventura C.E., (2008), "Seismic Loading Behavior of Thin Steel Plate Walls", Proceeding of ASCE Structures Congress, Vancouver, Canada.

- 10) Kharrazi M.H.K, Prion H.G.L, Ventura C.E. (2008), "Implementation of M-PFI Method in Design of Steel Plate Walls", *journal of Constructional Steel Research*, Vol. 64, No. 4, pp465-479.
- 11) Rezaei M., (1999), Phd. Dissertation, "Behavior of Steel Plate Shear Walls By Shake Table Testing", Department of Civil Engineering, University of British Columbia.
- 12) Roberts T.M., Sabouri-Ghomi S., (1991), "Hysteretic Characteristics of Unstiffened Plate Shear Panels", *Thin-Walled Structures* 12, pp145-162.
- 13) Roberts T.M., Sabouri-Ghomi S., (1992), "Hysteretic Characteristics of Unstiffened Perforated Steel Plate Shear Panels", *Thin-Walled Structures* 14, pp139-151.
- 14) Caccese, V., Elgaaly M., Chen R., (1993), "Experimental Study of Thin Steel Plate Shear Walls Under Cyclic Load", *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol 119, No. 2, pp 573-587.
- 15) Vian D., Bruneau M., Tsai K.C., Lin, Y.C., (2009), "Special Perforated Steel Plate Shear Walls with Reduced Beam Section Anchor Beams I: Experimental Investigation", *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol. 135, No.3, pp211-220.
- 16) Vian D., Bruneau M., Purba R., (2009), "Special Perforated Steel Plate Shear Walls with Reduced Beam Section Anchor Beams II: Analysis and Design Recommendations". *ASCE Journal of structural Engineering*, Vol. 135, No. 3, pp221-228.
- 17) Vian D., Bruneau M., (2004), "Testing of Special LYS Steel Plate Shear Walls", 13th Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada.
- 18) Qu B., Bruneau M., Lin C.H., Tsai K.C., (2009), "Testing of Full Scale Two-Story Steel plate Shear Walls With Reduced Beam Section Connections and Composite Floors", *ASCE journal of structural Engineering*, Vol.134, No. 3, pp 364-373.

19) Li C.H., Tsai K.C., (2008), "Experimental Response of Four 2-Story Narrow Steel plate Shear Walls", Proceeding of ASCE Structures Congress Structures 2008: Crossing Borders, Vancouver, Canada.

20) Park H.G., Kwack J.H., Jeon S.W., Kim W.K., Choi I.R., (2007), "Framed Steel Plate Wall Behavior Under Cyclic Lateral loading", *ASCE journal of structural Engineering*, Vol. 133, No. 3, pp 378-388.

21) Choi I.R., Park H.G., (2009), "Steel plate Shear Walls with Various Infill Plate Designs", *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol. 135, No. 7, pp 785-796.

۲۲) جاهد مطلق ح.ر.، نوبان م.ر.، اشراقی م.ا.، (۱۳۸۵)، "اجزای محدود ANSYS"، انتشارات دانشگاه تهران.

۲۳) ضیایی م.، پیغاله ا.، (۱۳۸۸)، "راهنمای مدلسازی با نرم افزار ABAQUS"، چاپ اول، انتشارات پندار راشد.

24) Hibbitt, Karlsson and Sorenson, Inc. (HKS). ABAQUS Users Manual, Ver. 6.9.

۲۵) ازهری م.، میرقادری ر.، (۱۳۸۷)، "طراحی سازه‌های فولادی" جلد اول، چاپ هشتم، انتشارات ارکان راشد.

An Investigation of the Behavior of Steel Plate Shear Walls under Seismic Load

Abstract

Steel plate shear walls (SPSWs) as lateral force resisting system in buildings has been used since 1970s. SPSWs resist lateral loads through development of diagonal tension field which occurs after buckling of steel infill panel. High ductility, stiffness and strength of the system against lateral forces are the most essential advantages of SPSWs. Openings in steel plate shear walls are located for utility passage or architectural reasons.

In this research, the effect of shape of openings, location and stiffeners around the openings on the strength and stiffness of the SPSWs are investigated. Openings are located in the corner of panel around the boundary elements (beam and column) to accommodate utility passage. ABAQUS 6.9 software was used for modeling. The models were compared with reliable experimental data of Bruneau and Vian (2004). It was observed that there is a good agreement between the experimental and the analytical results. Nonlinear static analysis will be used for models. These analyses are inspecting the behavior of the SPSWs (e.g. stiffness and strength).

Keywords: Steel plate shear wall, Opening, Diagonal tension field



Shahrood University
Faculty of Civil Engineering

An Investigation of the Behavior of Steel Plate Shear Walls under Seismic Load

Zahra Akbarilor

Supervisors:
Dr. Ali Keyhani
Dr. Hassan Haji Kazemi

Septembert 2012