

## پیشنهاد شکل جدیدی از دیوار برشی فولادی و مقایسه عملکرد لرزه‌ای آن با انواع معمول

سید محمدرضا مرتضوی<sup>۱\*</sup>، محمد فراهانی<sup>۲</sup>

۱- استادیار، مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

۲- کارشناس ارشد، مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

\*تهران، صندوق پستی ۱۶۳-۱۶۷۸۵، [mortazavi@sru.ac.ir](mailto:mortazavi@sru.ac.ir)

### چکیده

یکی از مهمترین عوامل در طراحی ساختمان‌ها، عملکرد لرزه‌ای سازه آن‌ها در برابر بارهای جانبی است. در سازه‌ها سیستم‌های باربر جانبی مسئول انتقال بارهای جانبی به زمین هستند. دیوار برشی فولادی نیز در سیستم‌های باربر جانبی به کار گرفته می‌شود که مزایایی از جمله سهولت اجرا، سرعت بالای اجرا، اقتصادی بودن، قابلیت تعمیر و تعویض و قابلیت اجرا در سازه‌های موجود دارد. از این رو تحقیق بر روی این سیستم می‌تواند به طراحی سازه‌ها و مقاوم‌سازی ساختمان‌های موجود کمک کند. دیوار برشی فولادی در دو نوع کلی سخت‌نشده و سخت‌شده وجود دارد. در تحقیق حاضر تلاش شده است که بهترین شکل هندسی دیوار برشی فولادی از نظر عملکرد لرزه‌ای، مشخص شود. حجم مصالح به کار رفته در نمونه‌ها یکسان در نظر گرفته شده است تا عملکرد لرزه‌ای آن‌ها در شرایطی برابر مقایسه گردد و این موضوع، جنبه نوآورانه‌ی این تحقیق است. هفت مدل المان محدود دیوار برشی فولادی با شکل‌های سخت‌نشده و سخت‌شده مختلف ساخته شد و با روش تحلیل استاتیکی غیرخطی و بارگذاری‌های خطی فزاینده و چرخه‌ای تحلیل گردید. به عنوان نتیجه می‌توان گفت، نمونه‌های سخت‌شده عملکرد لرزه‌ای بهتری نسبت به دیوار برشی فولادی سخت‌نشده دارند و سختی، جذب انرژی پلاستیک و شکل‌پذیری بالاتری دارند. نمونه‌های با شکل جدید پیشنهادی نیز عملکرد لرزه‌ای بهتری نسبت به نمونه‌های سخت‌شده معمولی دارند و سختی، مقاومت، جذب انرژی پلاستیک و شکل‌پذیری آن‌ها بالاتر است و تغییر صفحه خارج از صفحه کمتر و توزیع تنش بهتری دارند.

### واژگان کلیدی

دیوار برشی فولادی، دیوار برشی فولادی سخت‌شده، دیوار برشی فولادی سخت‌نشده، سخت‌کننده

## Introducing a new shape of steel plate shear wall and comparing its seismic performance against usual types

S.M.R. Mortazavi, M. Farahani

### Abstract

Seismic performance is one of the most important factors in designing of structures. Lateral load bearing systems in structures are responsible to transfer lateral loads into the ground. Steel plate shear wall as a load bearing system in structures has some advantages such as easy and fast implementation, being economical, repairable, changeable and applicable on existing structures. Therefore, more research on these systems can help to design and retrofitting of existing structures. There are two general types of steel plate shear wall: stiffened and unstiffened. In this study, it is tried to determine the best geometrical shape of steel plate shear wall in terms of seismic performance. Material volume which are applied in all models are the same in order to compare their seismic performance in an equal circumstances and this is the innovative aspect of this study. Seven different stiffened and unstiffened steel plate shear walls are modeled using FEM in this paper. All models are analyzed with non-linear static analysis and linear incremental and cyclic loading. It is investigated that stiffened models had better performance in terms of seismic behavior in comparison with unstiffened models. These models also had more stiffness, more ductility and they absorb more plastic energy. Proposed models with new and innovative forms had better seismic performance, higher stiffness, higher strength, higher plastic energy absorption and higher ductility compare to usual stiffened models. In addition, these models had controlled out of plane displacement and better stress distribution.

### Keywords

Steel plate shear wall, Stiffened steel plate shear wall, Unstiffened steel plate shear wall, Stiffener

در تحقیق حاضر سعی گردیده است با ارائه هندسه جدیدی برای ساخت دیوار برشی فولادی سخت‌شده، عملکرد لرزه‌ای این سیستم بهبود داده شود. در دیوار برشی فولادی سخت‌شده با هندسه جدید پیشنهادی، دو دیوار پرکننده با ضخامتی برابر با نصف ضخامت دیوار برشی معمولی در دو طرف سخت‌کننده‌ها قرار می‌گیرد، به عبارت دیگر در این روش ساخت، دو دیوار وجود دارد که به وسیله سخت‌کننده‌ها با همدیگر یکپارچه می‌شوند و بدین ترتیب ممان اینرسی<sup>۱</sup> برون صفحه‌ای دیوار افزایش می‌یابد.

برای مقایسه درست تاثیر این هندسه جدید پیشنهادی، شش مدل المان محدود<sup>۲</sup> دیوار برشی فولادی سخت‌شده ساخته شد. این شش مدل شامل دو مدل دیوار برشی فولادی با سخت‌کننده قائم، یکی با شکل معمول و یکی با شکل جدید پیشنهادی، دو مدل دیوار برشی فولادی با سخت‌کننده افقی، یکی با شکل معمول و یکی با شکل جدید پیشنهادی و دو مدل دیوار برشی فولادی با سخت‌کننده ضربدری یکی با شکل معمول و یکی با شکل جدید پیشنهادی در نرم افزار Abaqus ساخته شدند. یک مدل المان محدود دیوار برشی فولادی سخت‌نشده نیز به عنوان نمونه استاندارد و شاهد ایجاد گردید، به این معنی که عملکرد همه مدل‌ها نسبت به این مدل سنجیده شد. طراحی این مدل‌ها به گونه‌ای صورت گرفت که وزن مصالح بکار رفته در همگی یکسان باشد تا عملکرد لرزه‌ای آنها به درستی و در شرایط برابر از نظر مقدار مصالح بکار رفته برای ساخت آنها، مقایسه گردد. در ابتدا لازم است نتایج حاصل از تحلیل توسط نرم‌افزار Abaqus، صحت‌سنجی شود. پس از صحت‌سنجی و تایید دقت و اعتبار نتایج حاصل از تحلیل توسط نرم‌افزار، مدل‌های المان محدود ساخته شده تحت دو نوع بارگذاری خطی فزاینده<sup>۳</sup> و چرخه‌ای<sup>۴</sup>، به روش استاتیکی غیرخطی<sup>۵</sup> تحلیل شدند. با استفاده از نتایج این تحلیل‌ها منحنی پش‌آور<sup>۶</sup>، منحنی چرخه‌ای<sup>۷</sup> و منحنی جذب انرژی پلاستیک در بارگذاری چرخه‌ای برای نمونه‌ها ترسیم گردید و تغییرشکل‌ها و توزیع تنش و کرنش<sup>۸</sup> این مدل‌های المان محدود محاسبه گردید.

در انتها با استفاده از نتایج بدست آمده، عملکرد لرزه‌ای مدل‌های المان محدود دیوار برشی سخت‌شده و دیوار برشی سخت‌نشده با هم مقایسه گردید تا اثر هندسه جدید پیشنهادی برای دیوار برشی سخت‌شده، بر عملکرد لرزه‌ای این سیستم باربر جانبی مشخص گردد.

## ۲- تحقیق‌های انجام شده پیرامون موضوع

Guo و همکارانش در سال ۲۰۱۵ اثر اتصالات مفصلی، گیردار و نیمه گیردار قاب پیرامونی را بر روی دیوار برشی فولادی مطالعه کردند. ظرفیت باربری، مکانیسم استهلاک انرژی، مود شکست، تنش و فرایند گسترش تغییرشکل در سیستم قاب نیمه‌صلب و دیوار برشی فولادی سخت‌شده به‌وسیله آزمایش تجربی و تحلیل المان محدود مطالعه شد. نتایج آزمایش تجربی نشان دادند که نصب سخت‌کننده تغییر شکل‌های خارج از صفحه سیستم را کاهش می‌دهد و بار تسلیم و همچنین ظرفیت باربری نهایی سیستم را افزایش می‌دهد. نتایج تحلیل المان محدود نشان دادند که ظرفیت باربری نهایی سیستم با اتصال صلب ۱۵٪ بیشتر از سیستم با اتصال مفصلی است. سیستم با اتصال نیمه‌صلب شبیه به سیستم با اتصال مفصلی بود و اختلاف بین آنها تنها ۵٪ بود [۱].

Zirakian و Jhang در سال ۲۰۱۴ رفتار سازه‌ای دیوار برشی فولادی با نقطه تسلیم پایین را با روش‌های تحلیلی و المان محدود مطالعه کردند. پس از آن، آنها مدل‌سازی عددی را با نتایج تجربی اعتبارسنجی کردند و فواید استفاده از فولاد با نقطه تسلیم پایین در مقایسه با فولاد معمولی را بررسی کردند. در ضمن، میزان مؤثر بودن مدل اصلاح‌شده اندرکنش قاب و دیوار برشی فولادی، در پیش‌بینی پاسخ سیستم مطالعه شد. نتایج نشان داد که استفاده از فولاد با نقطه تسلیم پایین نیروی اعمال‌شده به قاب توسط دیوار برشی را نسبت به حالتی که فولاد معمولی مورد استفاده قرار می‌گیرد کاهش می‌دهد و امکان تعمیر و مقاوم‌سازی سازه‌های موجود را فراهم می‌سازد. ساخت دیوار برشی فولادی از فولاد با نقطه تسلیم پایین ظرفیت استهلاک انرژی سیستم را افزایش می‌دهد. در نهایت روش اصلاح‌شده اندرکنش قاب و دیوار برشی فولادی که تغییر شکل‌های برشی و خمشی را نیز در نظر می‌گیرد، برای پیش‌بینی رفتار دیوار برشی فولادی ساخته شده از فولاد با نقطه تسلیم پایین به کار گرفته شد که نتایج مطابقت خوبی با نتایج تجربی داشت و این مدل در پیش‌بینی رفتار این سیستم بسیار مؤثر است [۲].

Sabouri-Ghomi و همکارانش در سال ۲۰۱۲ کاهش سختی و مقاومت دیوار برشی فولادی را در اثر ایجاد بازشو در مکان دلخواهی از دیوار برشی فولادی بررسی کردند. آنها برای تعیین مکانیسم و اندازه کاهش سختی و مقاومت دیوار برشی فولادی در اثر ایجاد بازشو و همچنین وابستگی این کاهش

دیوار برشی فولادی با قاب پیرامونی دارای اتصال خمشی یا صلب بهتر از عملکرد دیوار برشی فولادی با قاب پیرامونی با اتصال برشی یا ساده است. اختلاف مقاومت و استهلاک انرژی این دو سیستم به ترتیب ۲۸٪ و ۱۸٪ است بنابراین توصیه می‌شود که در این سیستم از قاب پیرامونی با اتصال خمشی استفاده شود [۵].

Sabouri-Ghomi و Gholhaki در سال ۲۰۰۷ دو نمونه دیوار برشی فولادی که دارای یک دهانه و سه طبقه بودند را آزمایش کردند. اتصال تیر به ستون در یکی از نمونه‌ها گیردار و در دیگری ساده بود. آنها برای المان‌های پیرامونی از فولاد پر مقاومت و برای ورق پرکننده از فولاد نرم استفاده کردند. نتایج آزمایش نشان دادند که مقدار برش پایه قابل تحمل در نمونه با اتصال گیردار در حدود ۲۰ درصد بیشتر از نمونه با اتصال ساده بوده، به علاوه نمونه با اتصال گیردار انرژی بیشتری را نسبت به نمونه با اتصال ساده جذب کرده است [۶].

Astaneh-Asl در سال ۲۰۰۲ آزمایشاتی را بر روی دیوار برشی کامپوزیتی انجام داد. هنگامی که دیوارهای برشی فولادی بدون سخت‌کننده تحت بار جانبی قرار می‌گیرند، ابتدا کمانه کرده و بعد از آن نیروی جانبی به وسیله مقاومت پس‌کمانش تحمل می‌شود. کمانه کردن باعث کاهش جذب انرژی ورق می‌شود به منظور جلوگیری از کمانش ورق، دو نمونه دیوارهای برشی مرکب توسط دکتر آستانه در دانشگاه برکلی مورد آزمایش قرار گرفت. در هر دو نمونه بر روی ورق فولادی لایه‌ای از بتن ریخته و اتصال بتن و فولاد به وسیله بولت ایجاد شد تا از کمانش ورق جلوگیری شود. در هر دو نمونه منحنی چرخه ای پایدار ایجاد گردید و هر دو نمونه رفتار مناسبی از خود نشان داده‌اند، به طوری که تا دررفت ۴٪ تقریباً هر دو نمونه تمام ظرفیت خود و در دررفت ۵٪ حدود ۸۰ درصد ظرفیت خود را حفظ نموده‌اند [۷].

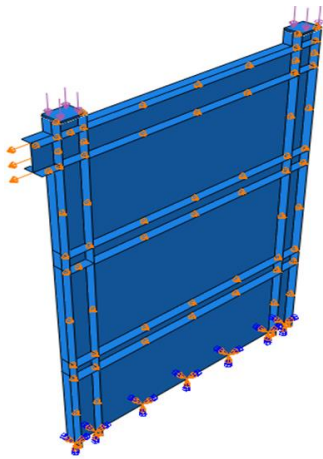
### ۳- اعتبارسنجی نرم‌افزار مورد استفاده

در این تحقیق برای مدل‌سازی و تحلیل نمونه‌ها از نرم‌افزار Abaqus نسخه ۶.۱۱.۳ استفاده شده است. برای نشان دادن مورد اعتماد بودن نتایج عددی حاصل از مدل‌سازی و تحلیل المان محدود در نرم‌افزار Abaqus می‌بایست مدل‌های آزمایشگاهی که ابعاد هندسی، خواص مکانیکی مصالح بکار رفته، شرایط مرزی، نحوه بارگذاری و سایر عوامل تاثیرگذار مشخص و واضحی دارند را به طور دقیق توسط نرم‌افزار شبیه‌سازی نمود و نتایج حاصل از شبیه‌سازی و تحلیل عددی، با نتایج آزمایشگاهی

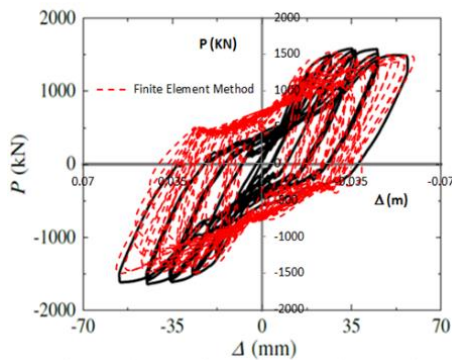
به اندازه و مکان قرارگیری بازشو، تحلیل المان محدود غیرخطی انجام دادند. در هر مدل مکان قرارگیری بازشو تغییر کرد تا اثر این متغیر بر روی سیستم مشخص گردد. نتایج نشان داد که سختی و مقاومت دیوار برشی فولادی سخت‌نشده با تغییر مکان بازشو رابطه عکس دارد اما دیوار برشی فولادی سخت‌شده تغییر سختی و مقاومت نمی‌دهد و این یعنی سختی و مقاومت دیوار برشی سخت‌شده تابعی از مکان قرارگیری بازشو نیست. همچنین مشخص شد که با افزایش اندازه بازشو سختی و مقاومت دیوار برشی سخت‌شده و سخت‌نشده کاهش می‌یابد و با افزایش نسبت عرض به ارتفاع بازشو فرآیند افزایش انرژی جذب‌شده توسط سیستم، یک روند کاهش خطی دارد. در ضمن مشخص شد که جذب انرژی در دیوار برشی فولادی سخت‌شده بسیار بیشتر از دیوار برشی فولادی سخت‌نشده است [۳].

Sabouri-Ghomi و Asad-Sajjadi در سال ۲۰۱۱ بر روی دو دیوار برشی فولادی که یکی از آنها دارای سخت‌کننده و دیگری فاقد سخت‌کننده بود و همچنین یک قاب پیرامونی تحقیقاتی انجام دادند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که نصب سخت‌کننده باعث بهبود رفتار دیوار برشی فولادی می‌شود و باعث ۲۶٪ افزایش در ظرفیت استهلاک انرژی و ۵۱٪ افزایش در سختی دیوار برشی فولادی شد، اما اثر این کار بر روی مقاومت برشی دیوار برشی فولادی کم بود. در ضمن نشان داده شد که نصب سخت‌کننده باعث ۲۵.۴٪ کاهش در تغییر مکان متناظر با برش تسلیم می‌شود [۴].

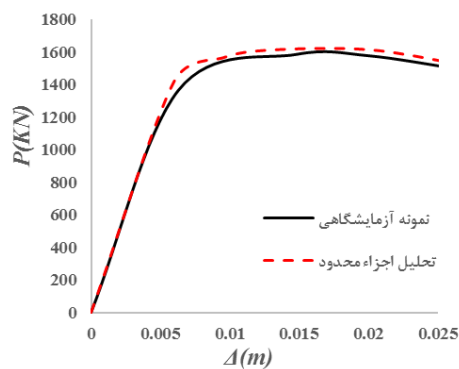
Chen و Zhang در سال ۲۰۱۰ صفحات دیوار برشی فولادی با نقطه تسلیم پایین را تحت بار درون صفحه‌ای مطالعه کردند. در این مطالعه فقط صفحات دیوار برشی فولادی از فولاد با نقطه تسلیم پایین ساخته شدند و قاب پیرامونی از فولاد با مقاومت بالا ساخته شد. چند آزمایش برای بررسی رفتار کمانش برشی غیر الاستیک دیوار برشی فولادی با نقطه تسلیم پایین تحت بار یکنواخت درون صفحه‌ای انجام شد. همچنین ویژگی‌های سختی، مقاومت، ظرفیت اتلاف انرژی و تغییر شکل با انجام آزمایش بارگذاری چرخه‌ای بر روی دیوار برشی فولادی با نقطه تسلیم پایین بررسی شد. نتایج آزمایش تجربی نشان دادند که با استفاده از فولاد با نقطه تسلیم پایین و کمتر نگره داشتن نسبت ضخامت به عرض از ۸۰، تغییر شکل خارج از صفحه قابل مشاهده‌ای حتی وقتی زاویه دررفت به بزرگی ۰/۰۲ رادین بود، مشاهده نشد. نتایج همچنین نشان دادند که سیستم دیوار برشی فولادی با نقطه تسلیم پایین قادر است تا زاویه دررفت ۰/۰۵ رادین تغییر شکل پایدار بدهد. همچنین عملکرد



شکل ۲- مدل المان محدود سرهم شده و شرایط مرزی تعریف شده مطابق با نمونه آزمایشگاهی



شکل ۳- چرخه هیستریزس نمونه آزمایشگاهی (نمودار مشکی) در کنار چرخه هیستریزس تحلیل مدل اجزاء محدود

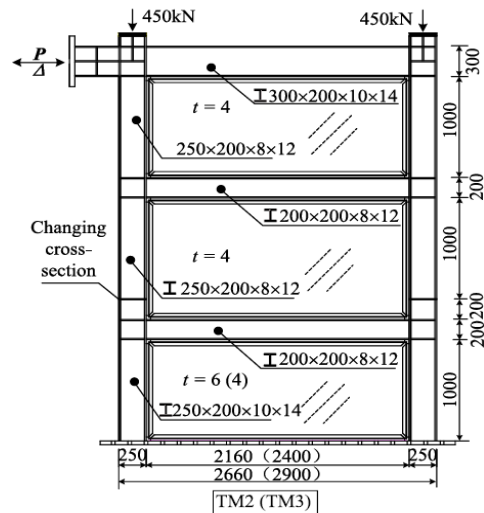


شکل ۴- منحنی پوش آور نمونه آزمایشگاهی در کنار منحنی پوش آور تحلیل اجزاء محدود

شکل (۳) و (۴) نشان می‌دهند که نتایج تحلیل چرخه‌ای و بار افزون نمونه‌های آزمایشگاهی و اجزاء محدود بسیار نزدیک به هم هستند و می‌توان گفت مدل اجزاء محدود ساخته شده در

مقایسه گردد. Wang و همکارانش در سال ۲۰۱۵ چهار مدل دیوار برشی فولادی یک دهانه و سه طبقه را مورد آزمایش قرار دادند که نمونه TM3 آن‌ها برای اعتبارسنجی تحقیق حاضر مورد استفاده قرار گرفت [۸].

۳-۱- مدل‌سازی هندسی و تعریف شرایط مرزی  
مشخصات هندسی نمونه TM3، Wang و همکارانش در شکل (۱) نشان داده شده است [۸].



شکل ۱- مشخصات هندسی مدل آزمایشگاهی Wang و همکارانش [۸]

هر یک از اجزای این نمونه در مدل المان محدود بصورت جداگانه و به صورت المان‌های پوسته‌ای ۳ بعدی<sup>۹</sup> در نرم‌افزار ترسیم می‌شوند. پس از ترسیم تمام اجزای مدل به صورت جداگانه، المان‌های مختلف در محل موردنظر قرار داده می‌شوند. تراز پی نمونه آزمایشگاهی کاملاً گیردار است و از حرکت خارج از صفحه تیر و ستون‌ها جلوگیری شده است، بنابراین در مدل المان محدود نیز این شرایط مرزی شبیه‌سازی شده است. در شکل (۲)، نمایی از سیستم سرهم‌شده نهایی به همراه شرایط مرزی تعریف شده، نشان داده شده است.

۳-۲- مقایسه نتایج مدل آزمایشگاهی با مدل اجزاء محدود

در آزمایش‌های Wang و همکارانش نتایج برای دو نوع تحلیل چرخه‌ای و بار افزون بدست آمده‌اند. بنابراین برای نشان دادن درستی نتایج تحلیل عددی، این نتایج برای مدل عددی که کاملاً شبیه به نمونه آزمایشگاهی Wang و همکارانش است نیز محاسبه گردیدند. نتایج دو تحلیل در نمونه‌های آزمایشگاهی و اجزاء محدود در شکل (۳) و (۴) نشان داده شده است.

این نرم افزار به درستی نمونه آزمایشگاهی را شبیه سازی کرده است. بنابراین می توان نتیجه گرفت نتایج حاصل از مدل سازی و تحلیل نرم افزار اجزاء محدود Abaqus دارای اعتبار هستند.

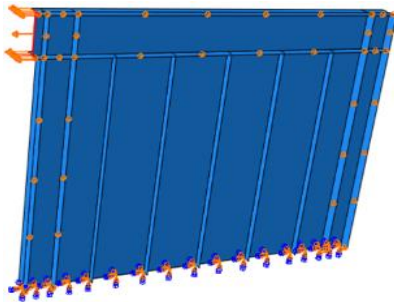
#### ۴- نمونه های مورد بررسی و مشخصات آنها

در سیستم دیوار برشی فولادی کمانش خارج از صفحه دیوار پرکننده<sup>۱</sup> باعث کاهش عملکرد لرزه ای می گردد این مشکل را می توان با افزایش ممان اینرسی دیوار حول محور خارج از صفحه حل کرد. از این رو در این تحقیق پیشنهاد گردید که به جای استفاده از یک دیوار پرکننده، از دو دیوار با فاصله از هم استفاده گردد و سخت کننده ها نیز در وسط دو دیوار قرار گیرند و به هر دو دیوار متصل شوند و هر دو را سخت کنند. بدین ترتیب ممان اینرسی دیوار برشی حول محور خارج از صفحه افزایش می یابد و پیش بینی می گردد عملکرد لرزه ای دیوار را افزایش دهد.

از لحاظ اجرایی برای ساخت دیوار برشی فولادی با شکل جدید پیشنهادی، در ابتدا سخت کننده ها به یکی از دیوارها جوش می شوند، سپس بر روی دیوار دوم شیارهایی در محل قرارگیری سخت کننده ها ایجاد می گردد، پس از آن دیوار دوم روی سخت کننده ها قرار می گیرد بطوریکه شیارها منطبق به سخت کننده ها گردند سپس شیارها با جوش پر می شوند و دیوار دوم نیز از اتصال سراسری با سخت کننده ها برخوردار می گردد و کاملاً با آنها ممزوج می شود. برای ساخت دیوار برشی فولادی با شکل جدید پیشنهادی می توان از روش های نوین جوشکاری مانند جوشکاری با استفاده از ربات ها، جوشکاری به روش های UW<sup>۱۱</sup>، RW<sup>۱۲</sup> و غیره نیز بهره جست که بررسی روش بهینه جوشکاری در کارخانجات سازه های فلزی می تواند موضوع یک تحقیق جداگانه باشد.

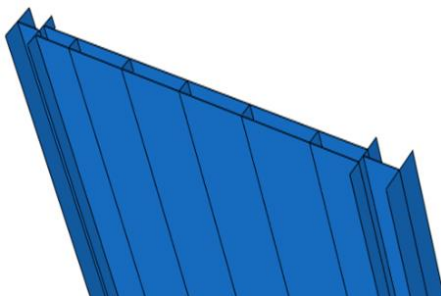
در این تحقیق ۱ نمونه دیوار برشی فولادی سخت نشده به عنوان نمونه استاندارد و شاهد و ۶ نمونه دیوار برشی فولادی سخت شده مدل سازی و تحلیل عددی گردیدند. شکل (۵) شمای کلی نمونه ها و شرایط مرزی آنها را نمایش می دهد. طول دهانه و ارتفاع دیوار برشی فولادی به ترتیب ۴ و ۳ متر و ضخامت دیوار برشی بدون سخت کننده ۴ میلی متر در نظر گرفته شد. برای ساختن نمونه های سخت شده و درعین حال دارای وزن برابر با دیوار برشی فولادی سخت نشده، ۰/۵ میلی متر از ضخامت دیوار برشی سخت نشده کم شد و به سخت کننده ها اختصاص داده شد. بنابراین حجم فولادی که برای سخت کننده ها در نظر گرفته شده برابر با ۰/۰۰۶ مترمکعب

( $0.0005 \times 3 \times 4$ ) است. برای ساخت نمونه های با شکل جدید پیشنهادی نیمی از ضخامت دیوارهای سخت شده به طرف دیگر سخت کننده ها منتقل شد. به عبارتی ضخامت ۳/۵ میلی متری دیوار سخت شده به دو ضخامت ۱/۷۵ میلی متری تقسیم شد و در دو طرف سخت کننده ها قرار گرفت. ضمناً یک دستک با طول ۱۰ سانتی متر با مقطعی مشابه مقطع تیر فوقانی، جهت بارگذاری جانبی، در بالای نمونه ها قرار داده شد.



شکل ۵- هندسه کلی نمونه ها و شرایط مرزی تعریف شده

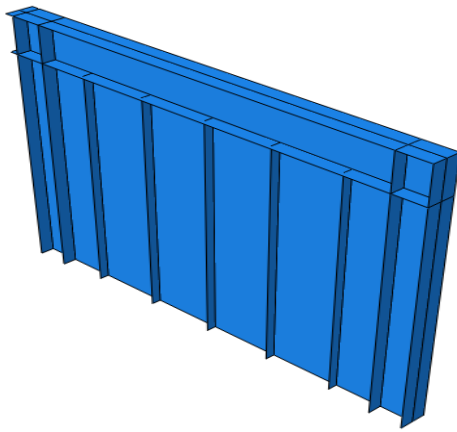
اتصالات تیر به ستون در قاب پیرامونی و اتصال سیستم به کف، گیردار در نظر گرفته شدند و تغییر شکل خارج از صفحه ستون ها و تیر در لبه بال آنها بسته شد. سخت کننده ها دارای اتصال سرتاسری به دیوارهای پرکننده هستند و کاملاً به یکدیگر دوخته شده اند. شکل (۶) برش مقطع یک نمونه با شکل جدید پیشنهادی را نشان می دهد.



شکل ۶- برش مقطع یکی از نمونه های با شکل جدید پیشنهادی

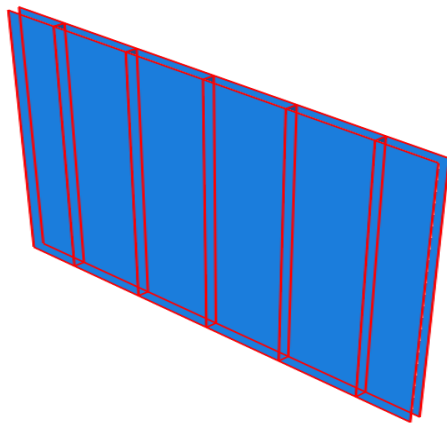
#### ۴-۱- مشخصات قاب پیرامونی و دستک بارگذاری

با توجه به اینکه دیوار برشی فولادی سخت نشده به عنوان نمونه استاندارد دارای دهانه ۴ متر، ارتفاع ۳ متر و ضخامت ۴ میلی متر است، اعضای قاب پیرامونی براساس آیین نامه ضوابط لرزه ای ساختمان های فولادی آمریکا مطابق شکل (۷) طراحی گردید [۹]. در ضمن مقطع دستک بارگذاری مشابه مقطع تیر بوده و



شکل ۹- نمونه spsw1

شکل (۱۰) دیوار پرکننده نمونه spsw2 را نشان می‌دهد که شکل جدید پیشنهادی معادل نمونه spsw1 است. سخت‌کننده‌های نمونه spsw2 مشابه سخت‌کننده‌های نمونه spsw1 است اما ورق دیوار به دو قسمت با ضخامت  $1/75$  میلی‌متر تقسیم شده و در دو طرف سخت‌کننده‌ها قرار گرفته و به سخت‌کننده‌ها، تیر و ستون‌های پیرامونی متصل گردید.



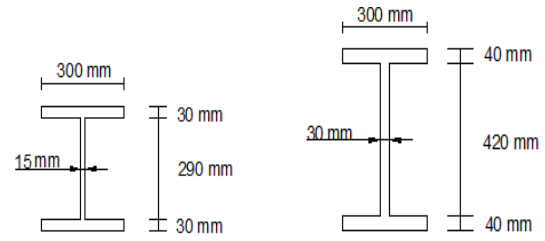
شکل ۱۰- دیوار پرکننده نمونه spsw2

۴-۴- مشخصات نمونه‌های دیوار برشی فولادی با سخت‌کننده افقی

نمونه spsw3 در شکل (۱۱) نمایش داده شده است. این نمونه دارای ۴ سخت‌کننده افقی هرکدام به طول  $3/75$  متر، عرض ۱۰ سانتی‌متر و ضخامت ۴ میلی‌متر است. در نمونه spsw3، ضخامت دیوار پرکننده فولادی  $3/5$  میلی‌متر است. همانطور که در شکل (۱۲) نشان داده شده، دیوار پرکننده نمونه spsw4 با شکل جدید پیشنهادی معادل نمونه spsw3 است.



طول آن ۱۰ سانتی‌متر است. تعداد ۸ سخت‌کننده با ضخامت ۴ میلی‌متر، طول ۲۹ سانتی‌متر و عرض ۱۵ سانتی‌متر برای جان ستون قرار داده شد که در دو طرف جان ستون و مقابل بال‌های تیر نصب گردیدند.



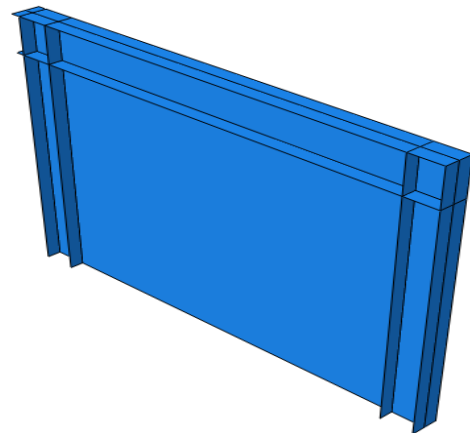
(ب)

(الف)

شکل ۷- الف) مقطع تیر مرزی (ب) مقطع ستون‌های مرزی

۴-۲- مشخصات دیوار برشی سخت‌نشده

دیوار برشی فولادی سخت‌نشده که نمونه spsw0 نامیده شد دارای دهانه‌ای به طول ۴ متر و ارتفاع ۳ متر است. طول دهانه و ارتفاع همه نمونه‌ها یکسان است. ضخامت دیوار برشی فولادی سخت‌نشده برابر ۴ میلی‌متر که یک فرض منطقی است در نظر گرفته شد. این نمونه در شکل (۸) نشان داده شده است.

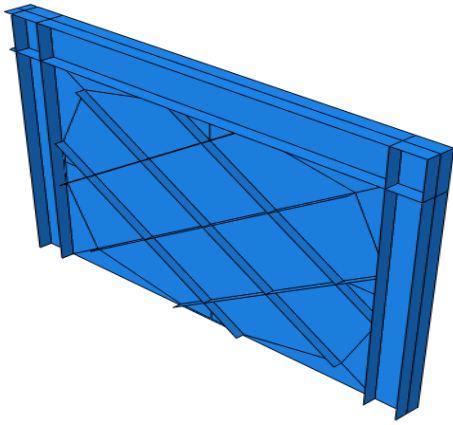


شکل ۸- شکل کلی نمونه spsw0

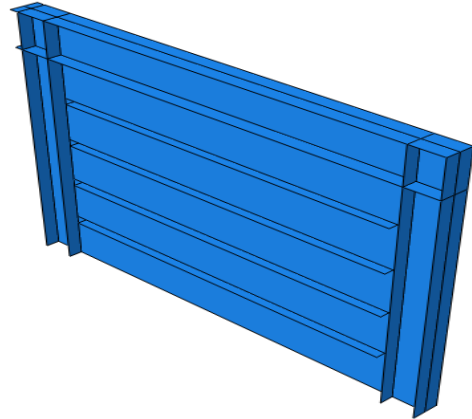
۴-۳- مشخصات نمونه‌های دیوار برشی فولادی با سخت‌کننده قائم

مطابق شکل (۹)، نمونه spsw1 دارای ۵ سخت‌کننده قائم هرکدام به طول ۳ متر، عرض ۱۰ سانتی‌متر و ضخامت ۴ میلی‌متر است. ضخامت دیوار پرکننده فولادی  $3/5$  میلی‌متر است.

دارای سخت‌کننده‌های مشابه نمونه spsw3 است اما ورق دیوار به دو قسمت با ضخامت  $1/75$  میلی‌متر تقسیم شده و در دو طرف سخت‌کننده‌ها قرار گرفته و به سخت‌کننده‌ها، تیر و ستون‌های پیرامونی متصل گردیده است.

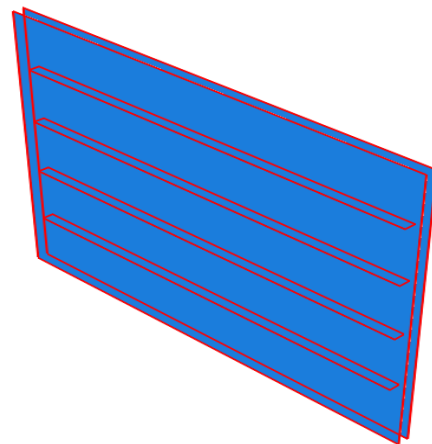


شکل ۱۳- نمونه spsw5

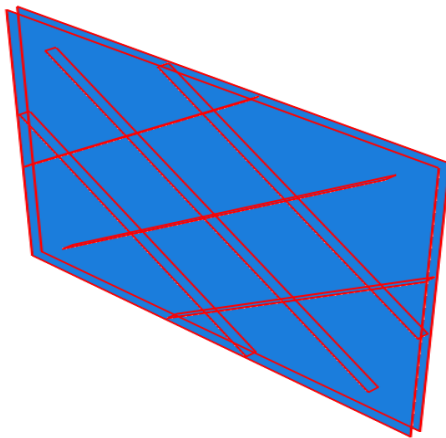


شکل ۱۱- نمونه spsw3

نمونه spsw6 شکل جدید پیشنهادی معادل نمونه spsw5 است. دیوار پرکننده نمونه spsw6 در شکل (۱۴) نشان داده شده است. مطابق این شکل سخت‌کننده‌های نمونه spsw6 و نمونه spsw5 مشابه هستند اما ورق دیوار پرکننده در نمونه spsw6 به دو قسمت با ضخامت  $1/75$  میلی‌متر تقسیم شده و در دو طرف سخت‌کننده‌ها قرار گرفته و به سخت‌کننده‌ها، تیر و ستون‌های پیرامونی متصل گردیده است.



شکل ۱۲- دیوار پرکننده نمونه spsw4



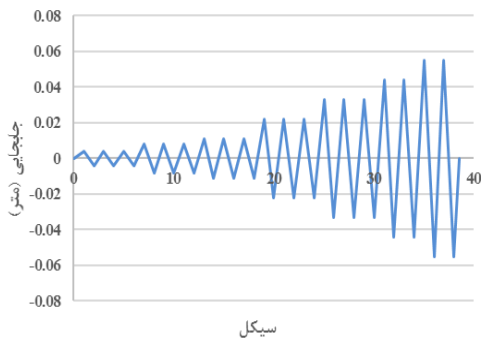
شکل ۱۴- دیوار پرکننده نمونه spsw6

#### ۴-۵- مشخصات نمونه‌های دیوار برشی فولادی با سخت‌کننده ضربدری

در شکل (۱۳) نمونه spsw5 نمایش داده شده است که دارای چهار سخت‌کننده قطری هرکدام به طول ۳ متر، عرض ۱۰ سانتی‌متر و ضخامت ۳ میلی‌متر و همچنین دارای دو سخت‌کننده قطری دیگر به طول ۴ متر، عرض ۱۰ سانتی‌متر و ضخامت ۳ میلی‌متر است. این سخت‌کننده‌های ۴ متری دقیقاً روی دو قطر اصلی دیوار و سخت‌کننده‌های ۳ متری در دو طرف آن‌ها قرار می‌گیرند. ضخامت دیوار فولادی در این نمونه،  $3/5$  میلی‌متر است.

#### ۵- خواص مکانیکی مصالح مورد استفاده

از آنجا که تحقیق‌های پیشین مانند تحقیق چن و ژانگ نشان داده‌اند که استفاده از قاب پیرامونی با مصالح سخت و دیوار پرکننده با مصالح نرم باعث بهبود عملکرد لرزه‌ای سیستم دیوار برشی فولادی می‌شود [۵]، در این تحقیق نیز برای قاب پیرامونی از فولاد ST52 به‌عنوان فولاد سخت و برای دیوار پرکننده از فولاد ST37 به‌عنوان فولاد نرم مطابق استاندارد دین آلمان



شکل ۱۷- تاریخچه بارگذاری چرخه‌ای

بارگذاری خطی فزاینده یک بارگذاری تغییرمکان کنترل است، به این معنی که به نمونه‌ها تغییرمکان اعمال می‌شود و نیروی پاسخ اندازه‌گیری می‌گردد. در بارگذاری خطی فزاینده تغییرمکان به صورت خطی افزایش می‌یابد و نتیجه آن منحنی پوش‌آور نمونه است.

بارگذاری چرخه‌ای نیز یک بارگذاری تغییرمکان کنترل است. تاریخچه بارگذاری چرخه‌ای بر اساس ATC-24 تهیه شده است [۱۱]. با توجه به این‌که در ATC-24 دامنه بار چرخه‌ای در بخش تغییرشکل کنترل، در هر مرحله به اندازه تغییرمکان حد تسلیم سیستم،  $\delta_y$ ، افزایش می‌یابد، برای محاسبه تغییرمکان حد تسلیم نمونه‌ها، همه نمونه‌ها تحت یک بارگذاری خطی فزاینده، تحلیل شدند و با استفاده از منحنی نیرو-تغییرمکان به دست آمده برای نمونه‌ها، تغییرشکل معادل تسلیم،  $\delta_y$ ، برای سیستم‌ها محاسبه گردید. از آنجایی که می‌بایست بار چرخه‌ای برای همه نمونه‌ها یکسان باشد میانگین تغییرمکان حد تسلیم برای نمونه‌ها محاسبه شد و برای ساخت تاریخچه بارگذاری چرخه‌ای مورد استفاده قرار گرفت. میانگین تغییرمکان حد تسلیم نمونه‌ها برابر  $0/011$  متر است، لذا افزایش دامنه بارگذاری چرخه‌ای در بخش تغییرشکل کنترل در هر مرحله برابر  $0/011$  متر در نظر گرفته شد.

## ۷- ارائه و بررسی نتایج

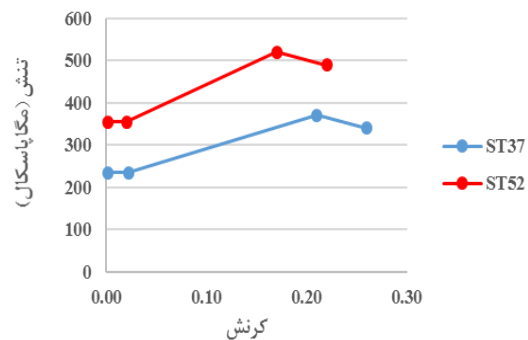
### ۷-۱- مقایسه نمودار پوش‌آور نمونه‌ها

تحلیل استاتیکی غیرخطی نمونه‌ها تحت بار خطی فزاینده، مطابق استاندارد ارزیابی لرزه‌ای و مقاوم‌سازی ساختمان‌های موجود آمریکا انجام شد [۱۲]. طبق این استاندارد نقطه کنترل نمونه‌ها باید تا ۱۵۰ در صد تغییرمکان هدفشان کشیده شود. بنابراین در این تحقیق نمونه‌های مختلف با توجه به تغییرمکان هدفشان، باید بین ۵/۵ تا ۷ سانتی‌متر کشیده شوند.

استفاده شده است [۱۰]. خواص مکانیکی این مصالح در جدول (۱) و شکل (۱۵) نمایش داده شده است. در نرم افزار Abaqus خواص مکانیکی مصالح فولادی مورد استفاده برای هر جزء از دیوار برشی فولادی، به صورت ویژگی<sup>۱۳</sup> به هر جزء اختصاص داده می‌شود.

جدول ۱- خواص مکانیکی مصالح قاب پیرامونی و دیوار پرکننده

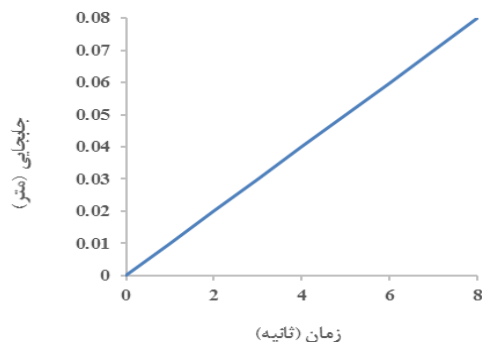
ST37	ST52	خواص
۲۰۰	۲۰۰	مدول الاستیسیته (گیگاپاسکال)
۲۳۵	۳۵۵	مقاومت تسلیم (مگاپاسکال)
۳۷۰	۵۲۰	مقاومت کششی نهایی (مگاپاسکال)
۳۴۰	۴۹۰	مقاومت شکست (مگاپاسکال)



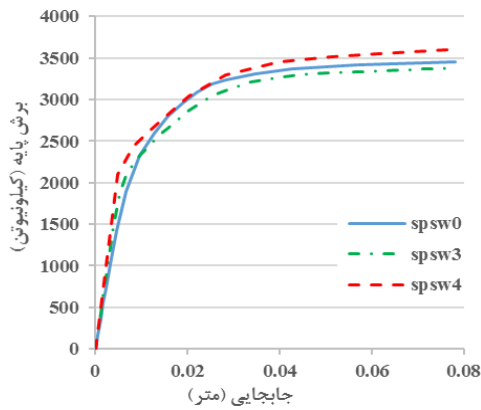
شکل ۱۵- خواص مکانیکی مصالح ST52 و ST37

## ۶- بارگذاری

در تحقیق حاضر جهت مقایسه پاسخ نمونه‌ها به بار جانبی، تاریخچه بارگذاری در دو حالت بارگذاری چرخه‌ای و بارگذاری خطی فزاینده، به مدل‌ها اعمال می‌شود. شکل (۱۶) تاریخچه بارگذاری خطی فزاینده و شکل (۱۷) تاریخچه بارگذاری چرخه‌ای را نشان می‌دهد.

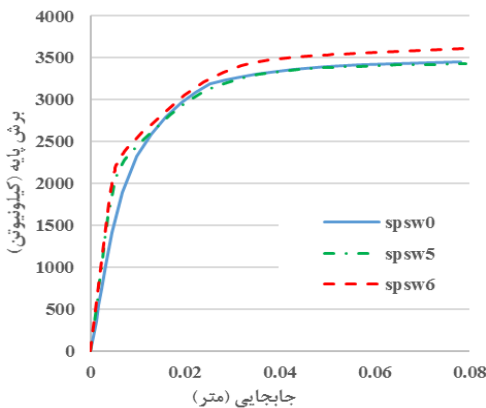


شکل ۱۶- تاریخچه بارگذاری خطی فزاینده



شکل ۱۹- مقایسه منحنی پوش‌آور نمونه‌های spsw0، spsw3 و spsw4

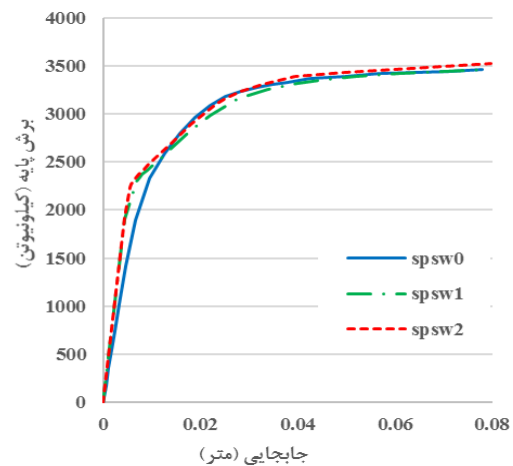
ملاحظه‌ای بیشتر از نمونه‌های spsw0 و spsw5 است. مقاومت نمونه spsw5 نیز کمتر از مقاومت نمونه سخت‌نشده است. سختی اولیه دو نمونه spsw5 و spsw6 نزدیک به هم و بیشتر از سختی اولیه نمونه سخت‌نشده است. منحنی پوش‌آور دو نمونه spsw5 و spsw6 به دلیل تسلیم برشی بخش‌هایی از دیوار پرکننده، دچار یک تغییر شیب اولیه می‌شود و سپس به دلیل کماتش کلی دیوار پرکننده یک تغییر شیب کلی روی هر سه نمونه اتفاق می‌افتد.



شکل ۲۰- مقایسه منحنی پوش‌آور نمونه‌های spsw0، spsw5 و spsw6

منحنی پوش‌آور نمونه‌ها با استفاده از روش استاندارد ارزیابی لرزه‌ای و مقاوم‌سازی ساختمان‌های موجود آمریکا ایده‌آل‌سازی شد و پارامترهای سختی اولیه، سختی موثر، مقاومت تسلیم و مقاومت در تغییر مکان هدف از آن استخراج گردید [۱۲]. پارامترهای لرزه‌ای مذکور برای نمونه‌های مختلف در جداول (۲) و (۳) نمایش داده شده و با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

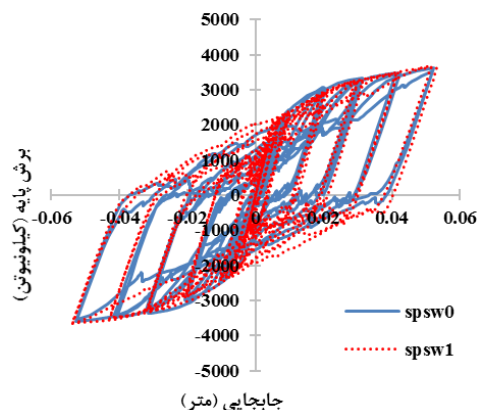
شکل (۱۸) منحنی پوش‌آور نمونه‌های spsw1 و spsw2 که سخت‌کننده قائم دارند را در مقایسه با منحنی پوش‌آور نمونه spsw0 نشان می‌دهد. براساس این شکل در جابجایی‌های بزرگ، مقاومت نمونه spsw2 بیشتر از مقاومت نمونه spsw1 و مقاومت نمونه spsw1 کمی بیشتر از نمونه spsw0 است. همچنین سختی اولیه که شیب خط مماس به منحنی در جابجایی‌های بسیار کوچک است، در دو نمونه spsw1 و spsw2 از سختی اولیه نمونه spsw0 بیشتر است. اولین تغییر شیب واضح موجود در منحنی پوش‌آور دو نمونه spsw1 و spsw2 به دلیل تسلیم برشی بخش‌هایی از دیوار پرکننده روی می‌دهد و تغییر شیب دوم که روی هر سه نمونه مشاهده می‌گردد نیز به دلیل کماتش کلی دیوار پرکننده اتفاق می‌افتد.



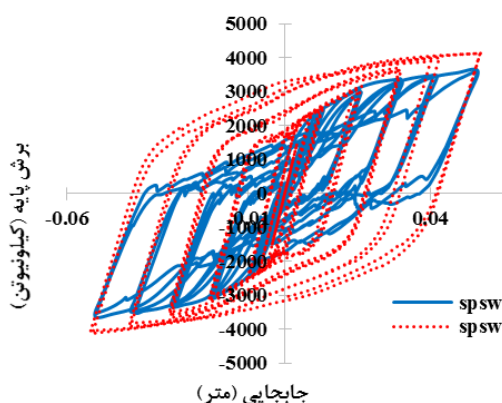
شکل ۱۸- مقایسه منحنی پوش‌آور نمونه‌های spsw0، spsw1 و spsw2

مطابق شکل (۱۹) مقاومت نمونه spsw3 از مقاومت نمونه سخت‌نشده کمتر است اما مقاومت نمونه spsw4 که شکل جدید پیشنهادی برای نمونه spsw3 است، به طور قابل توجهی از مقاومت هر دو نمونه spsw0 و spsw3 بیشتر است. سختی اولیه نمونه spsw4 نیز از سختی اولیه نمونه‌های spsw3 و spsw0 بیشتر و سختی نمونه spsw3 نیز از سختی نمونه spsw0 بیشتر است. ابتدا در منحنی پوش‌آور دو نمونه spsw3 و spsw4 به دلیل تسلیم برشی بخش‌هایی از دیوار پرکننده، یک تغییر شیب روی می‌دهد و سپس به دلیل کماتش کلی دیوار پرکننده یک تغییر شیب کلی روی هر سه نمونه اتفاق می‌افتد. مقایسه منحنی پوش‌آور سه نمونه spsw0، spsw5 و spsw6 در شکل (۲۰) نشان می‌دهد که مقاومت نمونه spsw6 که نمونه‌ی با شکل جدید پیشنهادی است به طور قابل

فشرده‌گی در آن دیده نمی‌شود و دچار پدیده پینچینگ نگردیده است.



شکل ۲۱- مقایسه چرخه هیستریزس نمونه‌های spsw0 و spsw1



شکل ۲۲- مقایسه چرخه هیستریزس نمونه‌های spsw0 و spsw2

مقایسه منحنی هیستریزس دو نمونه spsw3 و spsw4 با منحنی هیستریزس نمونه spsw0 در شکل (۲۳) و (۲۴) نمایش داده شده است. منحنی هیستریزس نمونه spsw3 نیز در نقطه اوج تقریباً منطبق بر منحنی هیستریزس نمونه سخت نشده است و در منحنی هیستریزس این دو نمونه فشرده‌گی وجود دارد که نشانه پدیده پینچینگ است. منحنی هیستریزس نمونه spsw4 در همه نقاط از جمله نقطه اوج کاملاً بالاتر از منحنی هیستریزس نمونه سخت نشده قرار دارد و کاملاً دوکی شکل بوده و پدیده پینچینگ در آن دیده نمی‌شود اما سطح حلقه‌ها به نسبت منحنی هیستریزس نمونه spsw1 کمتر است.

مطابق شکل (۲۵) و (۲۶) نمونه spsw5 نیز دارای منحنی هیستریزیسی تقریباً مشابه منحنی هیستریزس نمونه سخت نشده می‌باشد و نقطه اوج این دو منحنی منطبق بر هم است. نمونه spsw6 که در واقع شکل جدید پیشنهادی نمونه spsw5 است

جدول ۲- تغییرات سختی نمونه‌های سخت شده نسبت به نمونه

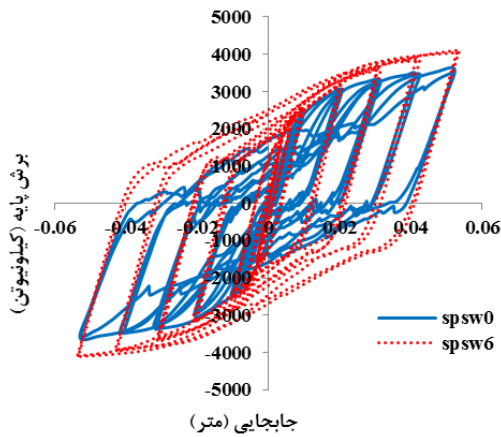
نمونه	سخت نشده		سخت شده	
	درصد بهبود سختی اولیه (MN/m)	درصد بهبود سختی موثر (MN/m)	درصد بهبود سختی اولیه	درصد بهبود سختی موثر
SPSW0	۳۱۱	۲۹۲	-	-
SPSW1	۴۳۱	۴۲۸	۳۸	۴۶
SPSW2	۴۳۵	۴۳۴	۴۰	۴۸
SPSW3	۳۶۹	۳۵۶	۱۹	۲۲
SPSW4	۴۳۵	۴۳۳	۴۰	۴۸
SPSW5	۴۳۸	۴۲۶	۴۱	۴۶
SPSW6	۴۵۸	۴۵۷	۴۷	۵۶

جدول ۳- تغییرات مقاومت نمونه‌های سخت شده نسبت به نمونه

نمونه	سخت نشده		سخت شده	
	مقاومت تسلیم (kN)	درصد تغییر مکان هدف	مقاومت در تغییر مکان هدف (kN)	درصد بهبود مقاومت تسلیم
SPSW0	۲۹۵۰	-	۳۴۴۶	-
SPSW1	۲۹۰۰	۱/۷-	۳۴۹۴	۱/۴
SPSW2	۲۹۳۰	۰/۷-	۳۵۱۴	۲/۰
SPSW3	۲۹۰۰	۱/۷-	۳۴۱۹	۰/۸-
SPSW4	۲۹۵۰	۰	۳۵۶۶	۳/۵
SPSW5	۲۹۳۰	۰/۷-	۳۴۳۰	۰/۵-
SPSW6	۲۹۷۰	۰/۷	۳۵۴۰	۲/۷

#### ۲-۷- چرخه هیستریزس نمونه‌ها

شکل (۲۱) و (۲۲) مقایسه چرخه هیستریزس نمونه‌های spsw1 و spsw2 را با چرخه هیستریزس نمونه spsw0 نمایش می‌دهد. منحنی هیستریزس نمونه spsw1 در نقطه اوج تقریباً منطبق بر منحنی هیستریزس نمونه spsw0 بوده و فقط در جابجایی‌های کوچک، کمی در بالاتر قرار گرفته است که این موضوع نشان می‌دهد سختی و مقاومت اولیه نمونه spsw1 کمی بیشتر است. منحنی هیستریزس نمونه spsw2 کاملاً دوکی شکل بوده و در همه نقاط بالاتر از منحنی هیستریزس نمونه spsw0 قرار گرفته که نشان‌دهنده سختی و مقاومت بیشتر نمونه spsw2 در تمام مراحل بارگذاری است. در منحنی هیستریزس دو نمونه spsw0 و spsw1 کمی فشرده‌گی مشاهده می‌شود که می‌تواند نشان‌دهنده پدیده پینچینگ<sup>۱۴</sup> باشد. در حالی که منحنی هیستریزس نمونه spsw2 کاملاً دوکی شکل بوده و هیچ اثری از



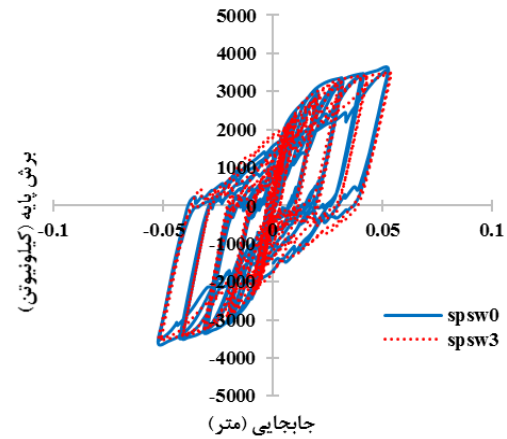
شکل ۲۶- مقایسه چرخه هیستریزس نمونه‌های spsw0 و spsw6

مقایسه منحنی هیستریزس نمونه‌ها نشان می‌دهد که استفاده از سخت‌کننده باعث می‌شود سطح حلقه‌های هیستریزس بیشتر شده و جذب انرژی در اثر تغییر شکل‌های پلاستیک بیشتر شود. استفاده از شکل جدید پیشنهادی دیوار برشی فولادی باعث می‌شود سختی و مقاومت دیوار برشی فولادی و در نتیجه مساحت حلقه‌های هیستریزس به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته و جذب انرژی پلاستیک بیشتر می‌شود.

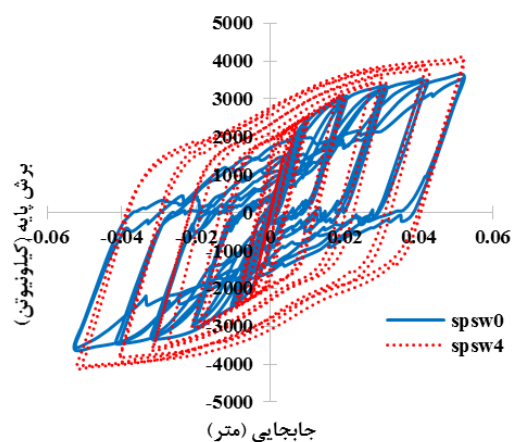
### ۷-۳- جذب انرژی پلاستیک تجمعی نمونه‌ها

شکل (۲۷) نمودار جذب انرژی پلاستیک تجمعی نمونه‌ها در طول بارگذاری چرخه‌ای را مقایسه کرده است. مطابق شکل تمام نمونه‌های سخت‌شده انرژی پلاستیک بیشتری نسبت به نمونه سخت‌نشده جذب کرده‌اند و نمونه spsw2 نیز بیشترین جذب انرژی پلاستیک را نشان می‌دهد. جذب انرژی نمونه‌های با شکل جدید پیشنهادی به مراتب بیشتر از جذب انرژی دیگر نمونه‌ها است که دلیل آن بیشتر بودن سختی و مقاومت این نمونه‌ها و در نتیجه افزایش سطح زیر منحنی تنش-کرنش یا افزایش سطح حلقه‌های هیستریزس این نمونه‌ها است.

در جدول (۴) مقدار جذب انرژی پلاستیک تجمعی نمونه‌ها طی بارگذاری چرخه‌ای نشان داده شده است. بیشترین جذب انرژی پلاستیک تجمعی مربوط به نمونه spsw2 است که ۲۹۴۸ کیلوژول انرژی جذب کرده است که این عدد ۱۲۶ درصد افزایش جذب انرژی نسبت به نمونه spsw0 و ۶۵ درصد افزایش جذب انرژی نسبت به نمونه spsw1 را نشان می‌دهد. همه نمونه‌های سخت‌شده انرژی بیشتری نسبت به نمونه سخت‌نشده جذب کردند و همه نمونه‌های با شکل جدید پیشنهادی عملکرد بهتری نسبت به نمونه‌های سخت‌شده معمولی معادل خود نشان دادند.

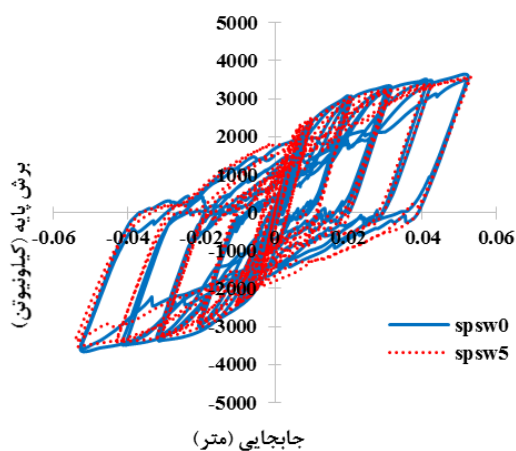


شکل ۲۳- مقایسه چرخه هیستریزس نمونه‌های spsw0 و spsw3

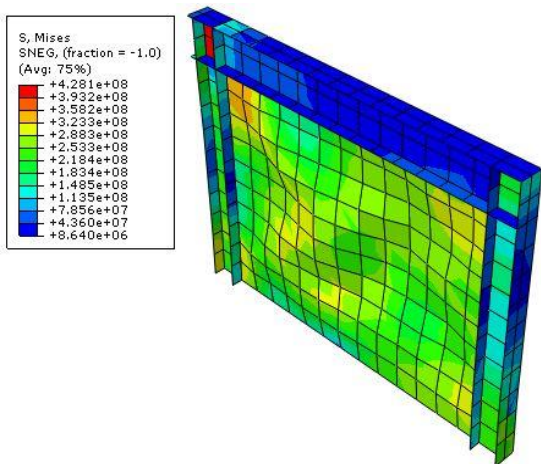


شکل ۲۴- مقایسه چرخه هیستریزس نمونه‌های spsw0 و spsw4

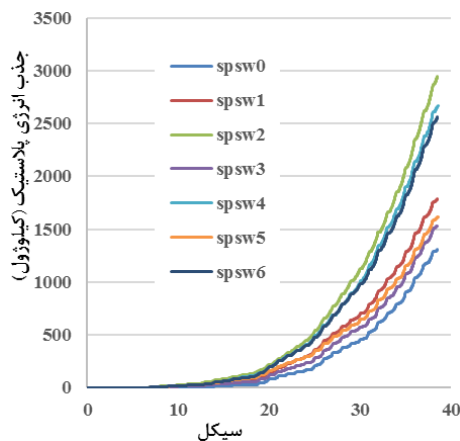
دارای منحنی هیستریزس دوکی شکل است و در نقطه اوج و تمام نقاط دیگر سختی و مقاومت آن بیشتر از نمونه‌های spsw0 و spsw5 است.



شکل ۲۵- مقایسه چرخه هیستریزس نمونه‌های spsw0 و spsw5



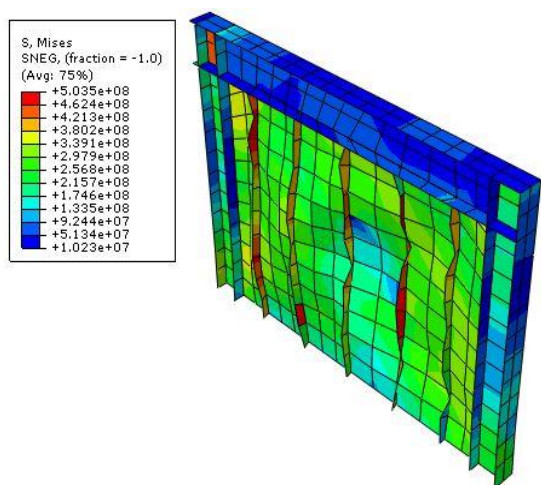
شکل ۲۸- نحوه توزیع تنش و تغییرشکل در نمونه spsw0



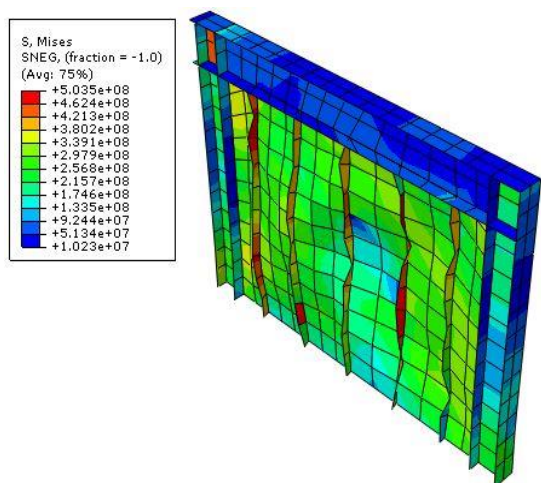
شکل ۲۷- مقایسه نمودار جذب انرژی پلاستیک تجمعی نمونه‌ها

جدول ۴- جذب انرژی پلاستیک تجمعی نمونه‌ها در طول بارگذاری چرخه‌ای و درصد بهبود آنها

درصد بهبود	انرژی جذب شده (kJ)	نمونه
-	۱۳۰۴	SPSW0
۳۷	۱۷۸۵	SPSW1
۱۲۶	۲۹۴۸	SPSW2
۱۷	۱۵۳۳	SPSW3
۱۰۴	۲۶۶۵	SPSW4
۲۳	۱۶۱۱	SPSW5
۹۶	۲۵۶۰	SPSW6



شکل ۲۹- نحوه توزیع تنش و تغییرشکل در نمونه spsw1



شکل ۳۰- نحوه توزیع تنش و تغییرشکل در نمونه spsw2

۷-۴- مقایسه توزیع تنش و منمیزس و تغییرشکل نمونه‌ها

شکل‌های (۲۸) تا (۳۰) توزیع تنش و منمیزس و تغییرشکل خارج از صفحه نمونه‌های spsw0، spsw1 و spsw2 را نشان می‌دهد. مطابق انتظار، در نمونه با شکل جدید پیشنهادی، تغییرشکل خارج از صفحه کمتری ایجاد شده است که دلیل آن افزایش ممان اینرسی حول محور خارج از صفحه و در نتیجه افزایش سختی خارج از صفحه این نمونه است. همچنین شکل (۳۰) نشان می‌دهد که در نمونه با شکل جدید پیشنهادی دیوار پرکننده فولادی تحت تنش بیشتری قرار دارد و مناطق بیشتری از آن تسلیم می‌شود و بدین ترتیب انرژی بیشتری جذب می‌کند. این دو پدیده، یعنی کاهش تغییرشکل خارج از صفحه و افزایش سطح ناحیه تسلیم شده دیوار پرکننده در دیگر نمونه‌ها با شکل جدید پیشنهادی نیز اتفاق افتاد.

## ۸- نتیجه گیری

نتایج حاصل از تحقیق حاضر عبارتند از:

۱- سختی همه نمونه‌ها نسبت به نمونه سخت‌نشده افزایش یافت. سختی نمونه‌های با شکل جدید پیشنهادی نسبت به سختی نمونه‌های سخت‌شده معمولی معادل خود نیز افزایش قابل توجهی نشان می‌دهد. بیشترین افزایش سختی مربوط به نمونه spsw6 است که سختی اولیه و موثر آن به ترتیب ۴۷ و ۵۶ درصد نسبت به سختی اولیه و موثر نمونه spsw0 افزایش پیدا کرده است.

۲- مقاومت نمونه‌های سخت‌شده و نمونه سخت‌نشده اختلاف زیادی با یکدیگر ندارند و نمونه spsw4 بیشترین افزایش مقاومت نسبت به نمونه سخت‌نشده را با ۳/۵ درصد افزایش نشان می‌دهد. مقاومت (چه مقاومت تسلیم و چه مقاومت در تغییر مکان هدف) همه نمونه‌های با شکل جدید پیشنهادی شامل spsw2، spsw4 و spsw6 از مقاومت نمونه سخت‌نشده و همچنین نمونه‌های سخت‌شده معادل خود بیشتر است.

۳- منحنی هیستریزس نمونه‌های با شکل جدید پیشنهادی کاملاً دوکی‌شکل بوده و بالاتر از منحنی هیستریزس نمونه spsw0 و نمونه‌های سخت‌شده معمولی قرار گرفته که نشان دهنده سختی و مقاومت بیشتر نمونه‌های با شکل جدید پیشنهادی در تمام مراحل بارگذاری چرخه‌ای است. در منحنی هیستریزس نمونه‌های سخت‌نشده و سخت‌شده معمولی کمی فشردگی مشاهده می‌شود که می‌تواند نشان دهنده پدیده پینچینگ باشد در حالی که منحنی هیستریزس نمونه‌های با شکل جدید پیشنهادی کاملاً دوکی‌شکل بوده و هیچ اثری از فشردگی در آن دیده نمی‌شود و دچار پدیده پینچینگ نگردیده است.

۴- همه نمونه‌های سخت‌شده انرژی بیشتری نسبت به نمونه سخت‌نشده جذب کردند و همه نمونه‌های با شکل جدید پیشنهادی عملکرد بهتری نسبت به نمونه‌های سخت‌شده معمولی معادل خود نشان دادند. بیشترین جذب انرژی پلاستیک تجمعی مربوط به نمونه spsw2 است که ۲۹۴۸ کیلوژول انرژی جذب کرده است و این عدد ۱۲۶ درصد

## پی نوشت

افزایش جذب انرژی نسبت به نمونه spsw0 و ۶۵ درصد افزایش جذب انرژی نسبت به نمونه spsw1 را نشان می‌دهد. ۵- در نمونه‌های با شکل جدید پیشنهادی تغییر شکل خارج از صفحه دیوار پرکننده کاهش یافته و تنش و نمیزس در این نمونه‌ها توزیع بهتری دارد و بنابراین در نمونه‌های با شکل جدید پیشنهادی استفاده بهینه‌تری از مصالح صورت می‌گیرد.

## ۹- مراجع

- [1] Guo, H.C., Hao, J.P. and Liu, Y.H. (2015), "Behavior of stiffened and unstiffened steel plate shear walls considering joint properties", *Thin-Walled Structures*, Vol. 97, pp. 53-62.
- [2] Zirkalian, T. and Zhang, J. (2015), "Structural performance of unstiffened low yield point steel plate shear walls", *Journal of Constructional steel research*, Vol. 112, pp. 40-53.
- [3] Sabouri-Ghomi, S., Ahouri, E., Sajadi, R., Alavi, M., Roufegarnejad, A. and Bradford, M.A. (2012), "Stiffness and strength degradation of steel shear walls having an arbitrarily-located opening", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 79, pp. 91-100.
- [4] Sabouri-Ghomi, S. and Sajjadi, S.R.A. (2012), "Experimental and theoretical studies of steel shear walls with and without stiffeners", *Journal of constructional steel research*, Vol. 75, pp. 152-159.
- [5] Chen, S.J. and Jhang, C. (2011), "Experimental study of low-yield-point steel plate shear wall under in-plane load", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 67, pp. 977-985.
- [6] صبوری قمی، س. و قلهکی، م. (۱۳۸۷)، "اثر اتصال تیر به ستون بر روی رفتار دیوارهای برشی فولادی"، رساله دکتری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی.
- [7] Astaneh-Asl, A. (2002), "Seismic behavior and design of composite steel plate shear walls", *Steel TIPS Report*, Structural Steel Educational Council, Moraga, CA, USA.
- [8] Wang, M., Shi, Y., Xu, J., Yang, W. and Li, Y. (2015), "Experimental and numerical study of unstiffened steel plate shear wall structures", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 112, pp. 373-386.
- [9] AISC, ANSI/AISC341-16, (2016), "Seismic provisions for structural steel buildings", American Institute of Steel Construction Inc. Chicago, Illinois, USA.
- [10] DIN17100/Steels for General Structural Purposes, (1987), Carbon and low alloy steel EN10025 St37-2 steel plate.
- [11] ATC-24, (1992), Guidelines for cyclic seismic testing of components of steel structures, National Center for Earthquake Engineering Research, CA, USA, pp. 9-12.
- [12] ASCE standard, ASCE/SEI, 41-17, (2017), seismic evaluation and retrofit of existing building, American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia.

<sup>8</sup> Von Mises

<sup>9</sup> 3-D Shell

<sup>10</sup> Infill wall

<sup>11</sup> Ultrasonic welding

<sup>12</sup> Resistance welding

<sup>13</sup> Property

<sup>14</sup> Pinching

<sup>1</sup> Moment of inertia

<sup>2</sup> Finite element model

<sup>3</sup> Monotonic load

<sup>4</sup> Cyclic load

<sup>5</sup> Nonlinear static analysis

<sup>6</sup> Pushover curve

<sup>7</sup> Hysteresis curve

