

## بررسی اثر مقاوم‌سازی دیوار برشی فولادی بازشودار با الیاف FRP به روش عددی

محمد مهدی چمن‌آرا، کارشناس ارشد سازه، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم تحقیقات بروجرد، بروجرد  
علی نیکخو (نویسنده مسؤؤل)، استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه علم و فرهنگ، تهران،  
E-mail: nikkhoo@usc.ac.ir

**چکیده:** سیستم دیوار برشی فولادی که در دهه‌های اخیر به لحاظ مطالعات و به کارگیری مورد توجه محققین و صنعتگران قرار گرفته است، به عنوان یک سیستم مقاوم در برابر بارهای لرزه‌ای شناخته می‌شود. عملکرد دیوار برشی فولادی در سازه‌ها همانند دیوار برشی بتنی می‌باشد و به کارگیری سیستم دیوار برشی فولادی در سالهای اخیر نشاندهنده رفتار بسیار مناسب این سیستم در سازه‌ها به خصوص در استهلاک انرژی لرزه‌ای و کنترل تغییرشکلها می‌باشد. همچنین با توجه به آن که از دیرباز وجود بازشوها در دیوارهای برشی به جهت ایجاد تمرکز تنشها و دیگر ضعفها مورد توجه و بررسی بوده است، در این تحقیق، ۸۳ مدل دیوار برشی فولادی بازشودار در قاب فولادی با انواع آرایش سخت‌کننده‌های FRP\* با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS تحت تحلیل غیرخطی اجزاء محدود، مدل‌سازی و مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد، با در نظر گرفتن انواع آرایش سخت‌کننده‌ها، توزیع تنش در ورق و المان‌های مرزی بسیار یکنواخت‌تر و تنشهای پیرامون بازشو در ورق کاهش می‌یابد. همچنین، با توجه به وجود کمانشهای بحرانی در لبه‌های بازشو، سخت‌کننده‌های افقی - قائم توأم، در کنترل کمانش خارج از صفحه ورق تأثیر به‌سزایی داشته و سخت‌کننده‌های ضربدری به لحاظ بازدهی مصالح بیشترین تأثیر در افزایش ظرفیت برشی، سختی و جذب انرژی را دارند.

**کلیدواژه‌ها:** دیوار برشی فولادی بازشودار، کمانش خارج از صفحه، تحلیل اجزاء محدود غیرخطی، سخت‌کننده‌های FRP

### ۱- مقدمه

ابتکاری مقاوم در برابر بارهای جانبی زلزله و باد می‌باشد و در مقایسه با دیگر سیستم‌های مقاوم در برابر بارهای جانبی از قبیل قاب خمشی و قاب بادبندی شده عملکرد بهتری دارد. این سیستم شامل یک سری پانلهای مجزا می‌باشد که هر پانل از بالا و پایین به تیرها و از طرفین به ستونها متصل شده است. این سیستم در کل طبقات به این صورت بوده و در ارتفاع یک سازه، تشکیل یک دیوار می‌دهد. شناخت رفتار کلی سیستم دیوارهای برشی فولادی و کارایی آن نیاز به انجام آزمایشهای مختلفی دارد و با توجه به داده‌های آزمایشگاهی می‌توان به نتایج تئوریک به دست آمده اطمینان کرده و حاصل این نتایج در مقاصد طراحی و عملی

دیوارهای برشی فولادی (SPSW)\* از دهه ۱۹۷۰ میلادی در ساختمانهای مختلف به عنوان سیستم مقاوم در برابر بارهای جانبی به خصوص زلزله مورد استفاده قرار گرفته است. سیستم مذکور در دو زلزله قوی نورث‌ریج آمریکا و کوبه ژاپن و همچنین در آزمایشگاهها از خود رفتار بسیار مناسبی را نشان داده است [۱]، به همین جهت استفاده از آن در کشورهای زلزله‌خیز جهان به سرعت رو به گسترش می‌باشد. به کارگیری این سیستم در مقایسه با قابهای فولادی ممان گیر تا حدود ۵۰ درصد صرفه جویی در مصرف فولاد را در سازه ساختمان به همراه داشته است [۱]. دیوار برشی فولادی یک نوع سیستم

تئوریک و آزمایشگاهی خود را به روی دیوار برشی فولادی متمرکز کردند و برای پیش‌بینی رفتار دیوار برشی فولادی و اندرکنش ورق فولادی و قاب محیطی آن مدل ریاضی ارائه نمودند. در سال ۱۹۹۲ میلادی رفتار دینامیکی دیوار برشی فولادی و همچنین اثر بازشو در رفتار دیوار برشی فولادی توسط رابرتز و صبوری [۹] بررسی شد.

در سال ۱۹۹۳ مطالعاتی در زمینه رفتار دیوار برشی فولادی بدون سخت‌کننده و رفتار دیوارهای برشی فولادی با ورق نرم مورد بررسی قرار گرفت. مطالعات تئوریکی در زمینه طراحی و آنالیز دیوارهای برشی فولادی، منجر به ارائه دو مدل رفتاری گردید. مدل نواری که اولین بار توسط تورین در سال ۱۹۸۳ بر اساس تئوری میدان کششی ارائه گردیده به عنوان ضمیمه آیین‌نامه فولاد کانادا CAN/CSA S16-01 پذیرفته شده است. در این مدل، پانل برشی با یک سری اعضای خرابایی مورب جایگزین می‌شوند. مدل ارائه شده فقط قابلیت کاربرد در صفحات نازک را داشته و استفاده از آن در صفحات ضخیم همراه با خطاهای زیاد است که این امر به نوبه خود از دقت محاسبات می‌کاهد و جوابهای دور از واقعیت را ارائه می‌نماید. مدل دوم توسط صبوری [۱۰] و برمن [۱۱] بر مبنای اندرکنش قاب و صفحه پرکننده و به منظور آنالیز و طراحی انواع مختلف دیوارهای برشی فولادی اعم از دیوارهای با صفحات نازک و ضخیم و دیوارهای با سخت‌کننده یا بدون سخت‌کننده و بازشو ارائه شده است. همچنین بررسیهای گسترده‌ای در پارامترهای وابسته به دیوار برشی فولادی انجام شده که از آن جمله می‌توان به مطالعه تعیین ضریب شکل-پذیری [۱۲]، اتصالات لولایی [۱۳]، تقویت المان مرزی [۱۴]، ارزیابی روش تعیین ظرفیت برشی [۱۵]، استفاده از فولاد نرم [۱۶]، استفاده از ورق نازک [۱۷]، اثر سختی المان مرزی بر رفتار پس‌کمانش [۱۸] و اندرکنش برشی و خمشی دیوار برشی فولادی با ورق نازک [۱۹] اشاره نمود.

### ۳- مدلسازی اجزاء محدود و صحت‌سنجی آن

در این تحقیق، از نرم‌افزار اجزاء محدود ABAQUS برای مدلسازی و تحلیل نمونه‌ها استفاده شده تا علاوه بر بررسی مجدد صحت مدلسازی، بتوان از آن به مطالعه پارامترهای

به کار برده شود. در این تحقیق با توجه به نتایج آزمایشگاهی علوی [۲] که تستهای صورت گرفته در زمینه دیوارهای برشی فولادی تقویت شده می‌باشد و همچنین نتایج به دست آمده از نرم‌افزار ABAQUS، برای دیوار برشی فولادی بازشودار با آرایش مختلف سخت‌کننده‌ها و ضخامت‌های متفاوت دیوار برشی فولادی (دیوار به ضخامت‌های ۰/۸، ۱، ۱/۵، ۳، ۵ میلیمتر)، اثر بازشوها و سخت‌کننده‌های مختلف از جمله سخت‌کننده‌ها با آرایشهای افقی-عمودی توأماً، قطری و ضربدری در یک طرف دیوار و در دو طرف آن، بر روی پارامترهای مختلفی از جمله ظرفیت برشی سیستم، سختی سیستم، میزان نزدیک‌شدگی المانهای مرزی، توزیع تنشها در ورق فولادی و کمانش خارج از صفحه در بارگذاری ثقلی و جانبی مورد بررسی قرار گرفته است. که به نوعی، القاء‌کننده بررسی رفتار دیوار برشی فولادی بازشودار تقویت شده با FRP در برابر بارهای لرزه‌ای می‌باشد.

### ۲- تاریخچه مختصری از تحقیقات انجام شده

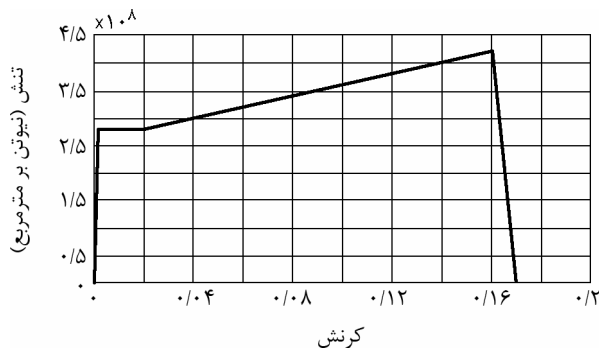
اخیراً استفاده از دیوار برشی فولادی به عنوان یک گزینه اقتصادی با اجرای آسان برای مقاوم‌سازی سازه‌ها مورد توجه قرار گرفته است و محققین زیادی درباره پارامترهای مختلف این سیستم تحقیقاتی انجام داده‌اند که از آن جمله می‌توان به بررسی تأثیر جنس و خواص ورق [۳]، زاویه تشکیل میدان کششی [۴]، ضخامت ورق [۵]، نسبت عرض به ارتفاع پانل برشی [۶]، نحوه اتصال تیر به ستون [۷-۸] و وجود بازشو در ورق [۹] اشاره کرد.

اولین کار جدی برای بررسی مقاومت پانلهای برشی پس از کمانش جان آنها توسط دانشمندانی از جمله واگنر طی سالهای ۱۹۵۰ تا ۱۹۸۰ انجام گرفت. پس از او دانشمندان بسیاری چون کوهن، باسلر، راکی، پورترو و غیره بر روی میدان کشش قطری تیر ورقها مطالعه نمودند و به تدریج در محاسبه مقاومت نهایی آنها، سختی بالها نیز با توجه به نتایج آزمایشگاهی در نظر گرفته شد [۱]. طرح استفاده از دیوار برشی فولادی با ورق نازک بر اساس نتایج مطالعات انجام شده توسط کولاک و همکارانش مطرح گردید. در اواخر دهه ۸۰ میلادی صبوری قمی [۱] و همکاران ایشان نیز مطالعات

این بریدگی باعث کاهش تمرکز تنش در گوشه‌های دیوار شده و مانع از پارگی زود هنگام آن می‌گردد. فولاد به کار رفته در مدل‌های آنالیز شده از نوع فولاد مصرفی در نمونه‌های آزمایشگاهی است. در مدل‌های مورد بررسی، هدف فقط بررسی رفتار برشی ورق می‌باشد و رفتار تیرها و ستونهای محیطی مد نظر قرار نمی‌گیرد. به همین علت در این تحقیق برای کلیه مدل‌ها از یک مقطع برای اعضاء مرزی استفاده شده است. برای انتخاب ابعاد مناسب اعضاء مرزی دیوار از ضوابط آیین‌نامه AISC-2005 استفاده شده است.

### ۳-۱- مشخصات مصالح به کار رفته

مشخصات مصالح فولاد به کار رفته در نمونه‌هایی که توسط علوی [۲] در پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله (با همکاری دکتر ناطقی‌الهی) مورد آزمایش قرار گرفته در نرم‌افزار ABAQUS نیز استفاده شده است. همچنین مشخصات مصالح الیاف FRP به کار رفته به عنوان سخت‌کننده‌ها از جنس کربن در نظر گرفته شده است. نمودارهای (۱) و (۲) رفتار مصالح فولاد به کار رفته در آزمایشگاه و مدلسازی و نمودار (۳) و جدول (۱)، رفتار استخراج شده از آن و رفتار مصالح FRP به کار رفته در مدلسازی را نشان می‌دهد.



نمودار (۱): نمودار تنش - کرنش مربوط به ورق فولادی.

همان‌طور که در نمودارهای (۱) و (۲) مشاهده می‌شود از فولاد نرم جهت دیوار برشی فولادی استفاده شده تا مفصل پلاستیک ابتدا در دیوار تشکیل شود. به بیانی دیگر، سازه در تغییر مکان کمتری وارد ناحیه غیرخطی شده و شروع به جذب انرژی می‌کند و بدون آسیب دیدن اجزای اصلی باربر سازه

مؤثر بر رفتار دیوار برشی فولادی بازشودار پرداخت. در مدلسازی هندسی، ورق فولادی با المان SHELL181 که یک المان چهار گرهی که هر گره شش درجه آزادی دارد، مدل شده است. سیستم مورد بررسی مطابق با مدل دیوار برشی فولادی آزمایش شده در تستهایی که توسط علوی [۲] در پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله با همکاری دکتر ناطقی‌الهی صورت گرفته به صورت قاب تک دهانه در یک طبقه با مقیاس ۱/۲ به ابعاد ۱۲۰۰×۱۸۰۰ میلی‌متر می‌باشد و از پروفیل IPB160 برای المانهای مرزی و از ورق با ضخامتهای ۱/۵ میلی‌متر برای دیوار استفاده شده است. در محل اتصال تیر به ستون از سخت‌کننده به ضخامت ۱۰ میلی‌متر در جان ستون و در محاذات بال تیر و از ورق فولادی به ضخامت ۵ میلی‌متر و عرض ۴ سانتیمتر به عنوان سخت‌کننده‌های قطری دیوار برشی و فیوز استفاده شده است. منظور از فیوز، قطعات بریده شده از گوشه‌های دیوار در محل اتصال تیر و ستون می‌باشد که شکل آن به صورت مثلثی به اضلاع ۸ و ۱۲ سانتیمتر است، شکلهای (۱) و (۲).



شکل (۱): مدل آزمایشگاهی دیوار برشی فولادی با ضخامت ۱/۵ میلی‌متر [۲].



شکل (۲): نحوه بارگذاری مدل در آزمایشگاه بر روی دیوار برشی فولادی به ضخامت ۱/۵ میلی‌متر [۲].

الف) بار قائم ۸ تن بر روی هر ستون جهت منظور نمودن اثر بارهای ثقلی.  
 ب) بار جانبی افزایشی از مقدار صفر تا حدی که تغییر مکان جانبی سازه به حد مجاز (۷/۵ سانتیمتر) برسد. اعمال بار بر مدل بر اساس کنترل نیرو انجام یافته است.

### ۳-۳- نوع تحلیل‌های انجام شده

روش تحلیل در نمونه مذکور بر اساس کنترل نیرو می‌باشد. بر این اساس نیرو به تدریج افزایش یافته تا تغییر مکان به مقدار مجاز آن که ۷/۵ سانتیمتر است محدود گردد و ظرفیت باربری قابل قبول برای سیستم به دست آید. بر اساس مطالعات انجام شده و آزمایشات مختلف در خصوص دیوارهای برشی فولادی حداکثر تغییر مکان مجاز سیستم در حدود ۵ درصد ارتفاع دیوار توصیه شده که در مدل‌های تحت بررسی که ارتفاع دیوارها برابر ۱۵۰ سانتیمتر است، تغییر مکان هدف برابر ۷/۵ سانتیمتر در نظر گرفته می‌شود. همچنین در این تحقیق از مدل اندرکنش قاب و صفحه پرکننده برای تحلیل استفاده شده است.

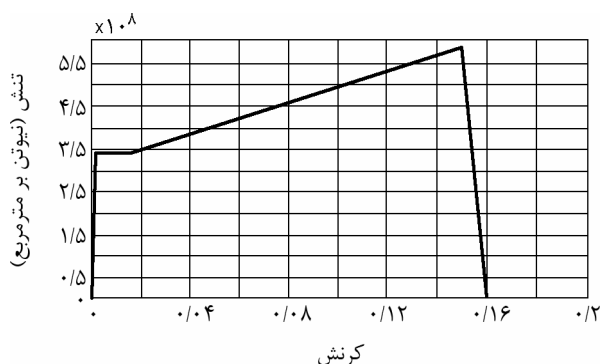
### ۳-۴- شرایط مرزی

شرایط مرزی به گونه‌ای تعریف شده که اتصال ورق فولادی به اعضاء مرزی گیردار باشد. علاوه بر این، برای تأمین صلبیت کافی در تیر بالایی و این که تغییر شکل همه گره‌های بالایی یکسان شود، در محل اتصال تیر به ستون در جان ستون یک ناحیه صلب تعریف شده است. ضمناً احتمال خرابی اولیه دیوار به وسیله کمناش خارج از صفحه ورق لحاظ گردیده است.

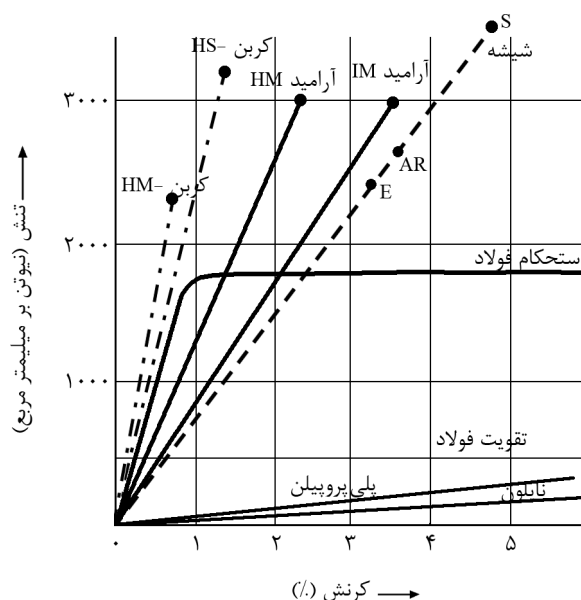
### ۳-۵- مقایسه منحنی به دست آمده از نتایج آزمایشگاهی و منحنی پوش حاصل از روش المانهای محدود

در این بخش، منحنی پوش به دست آمده از روش المانهای محدود برای دیوار برشی به ضخامت ۱/۵ میلی‌متر بدون سخت کننده با منحنی هیستریزس آزمایشگاهی آن نمونه مقایسه شده است. نمودارهای (۴) و (۵) مقایسه نتایج آزمایشگاهی و مدلسازی به روش المان محدود را نشان می‌دهد.

مانند ستون‌ها و تیرها، آن قسمت از سازه که وظیفه جذب انرژی را بر عهده دارد، زودتر شروع به جذب انرژی کند که این فلسفه به خوبی در نمودارهای به دست آمده مشاهده می‌شود.



نمودار (۲): نمودار تنش- کرنش مربوط به المانهای مرزی.



نمودار (۳): نمودار تنش- کرنش مربوط به الیاف FRP [۲۰].

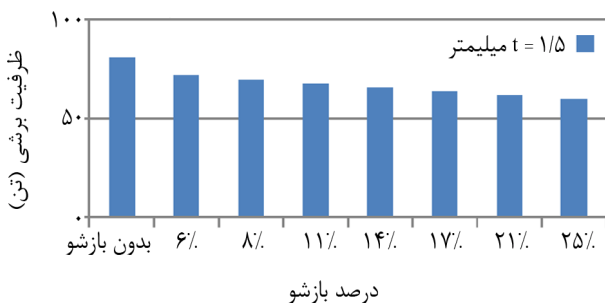
جدول (۱): مشخصات مصالح FRP Laminate به کار رفته به عنوان سخت کننده‌های ورق دیوار برشی فولادی.

مشخصات مصالح FRP Laminate				
ضخامت هر لایه (میلی‌متر)	عرض ورق (میلی‌متر)	مدول الاستیسیته (Gpa)	تنش تسلیم (Mpa)	چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب)
۱	۱۰۰	۲۴۰	۳۸۰۰	۱۶۰۰

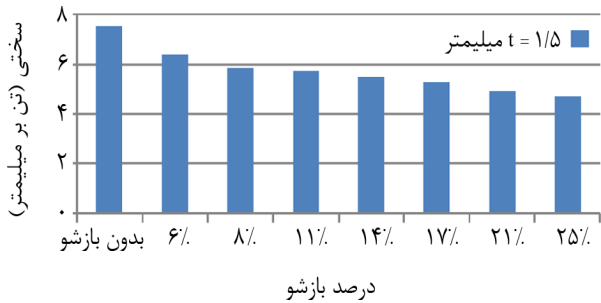
### ۳-۲- نحوه اعمال بار به نمونه

مدل‌ها تحت اثر دو نوع بارگذاری قرار گرفته‌اند:

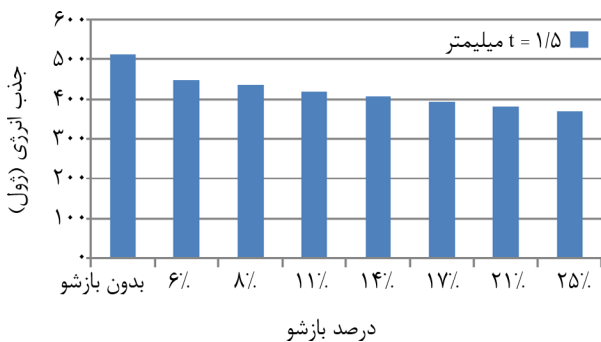
مشخص است با افزایش درصد میزان بازشو، کاهش ظرفیت برشی، سختی، جذب انرژی و تنش به دست می‌آید. به طوری که با افزایش حدود هر ۳ درصد مساحت بازشو، کاهش ۳ درصدی ظرفیت برشی و کاهش ۵ درصدی سختی سیستم، کاهش ۳ درصدی جذب انرژی و کاهش یک درصدی تنش فون‌میسس و همچنین افزایش یک تا ۲ درصدی کمانش خارج از صفحه را خواهیم داشت. در شکل (۳)، مقایسه پایان تسلیم‌ها در STEP2 (پایان بارگذاری) دیوار بدون بازشو و دیوار بازشودار نشان داده شده است.



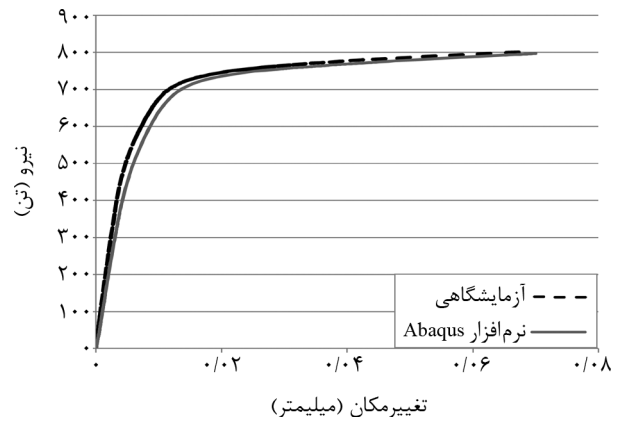
نمودار (۶): مقایسه نمودارهای ظرفیت برشی تجمعی حاصل از آنالیز برای دیوار برشی فولادی به ضخامت ۱/۵ میلی‌متر.



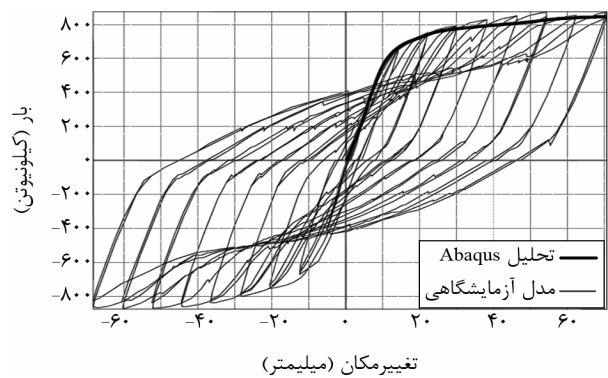
نمودار (۷): مقایسه نمودارهای سختی دیوار برشی با ضخامت ۱/۵ میلی‌متر.



نمودار (۸): مقایسه نمودارهای جذب انرژی در دیوار برشی فولادی به ضخامت ۱/۵ میلی‌متر.



نمودار (۴): مقایسه منحنی پوش حاصل از آزمایشگاه با منحنی پوش حاصل از آنالیز برای دیوار برشی فولادی به ضخامت ۱/۵ میلی‌متر.



نمودار (۵): مقایسه منحنی پوش حاصل از آزمایشگاه با منحنی پوش حاصل از آنالیز برای دیوار برشی فولادی به ضخامت ۱/۵ میلی‌متر.

## ۴- مدل‌های تحلیلی و نتایج

### ۴-۱- تأثیر بازشوها در قاب فولادی

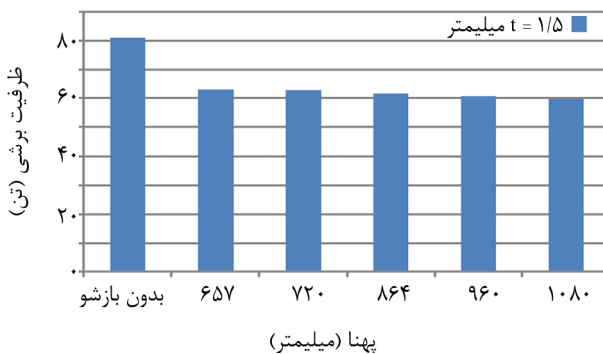
در این تحقیق، به دلیل اهمیت بسیار زیاد ایجاد بازشوها در سطح ورق فولادی، مطالعه پارامتریک گسترده‌ای بر روی حالات مختلف بازشوها از جمله میزان سطح بازشو، افزایش عرض در ارتفاع ثابت بازشو و برعکس و تغییرات در عرض و ارتفاع یک سطح ثابت بازشو انجام شده که در آن نتایج خوب و قابل توجهی به دست آمده است. در نمودارهای (۶) الی (۱۰) تأثیر میزان سطح بازشو در پارامترهای مهم رفتاری سازه‌ای نشان داده شده است.

### ۴-۱-۱- تأثیر میزان سطح بازشوها

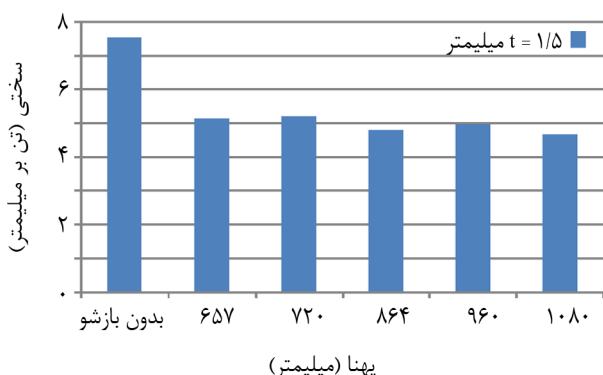
همان‌طور که انتظار می‌رفت، در نمودارهای (۶) تا (۹)

#### ۴-۱-۲- تأثیر تغییر آرایش باز شو در یک مساحت ثابت (افزایش پهنا و کاهش ارتفاع باز شو)

جهت درک بهتر از تأثیر باز شوها، مقایسه رفتارهای پارامترهای مهم سازه‌ای در شرایط مساحت ثابت باز شو و افزایش پهنا و کاهش ارتفاع باز شو بررسی و نتایج به تفسیر نمودارهای (۱۱) تا (۱۴) استخراج گردید.



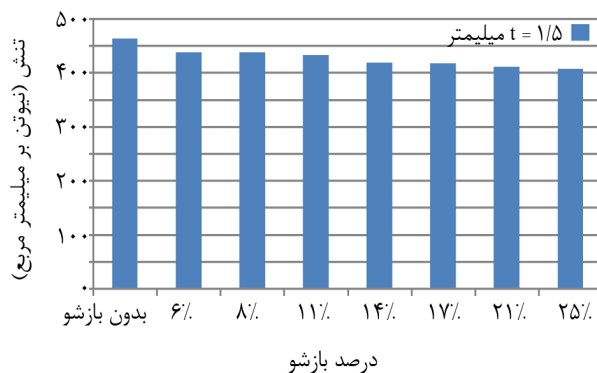
**نمودار (۱۱):** مقایسه نمودارهای ظرفیت برشی جمعی حاصل از آنالیز (کاهش پهنا و توأمافاً افزایش ارتفاع در مساحت ثابت).



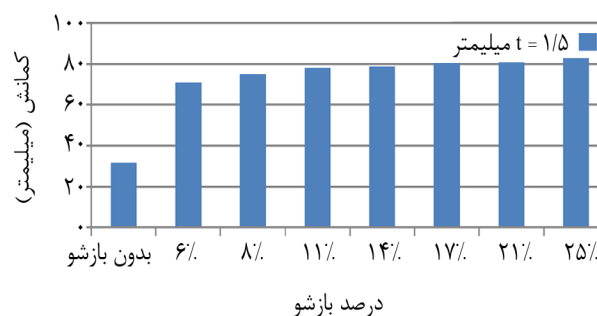
**نمودار (۱۲):** مقایسه نمودارهای سختی دیوار برشی (کاهش پهنا و توأمافاً افزایش ارتفاع در مساحت ثابت).



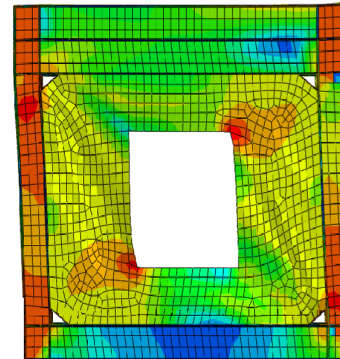
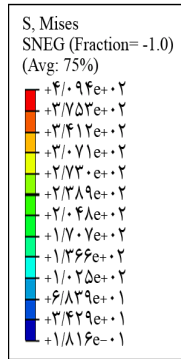
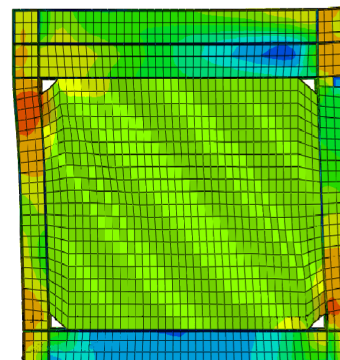
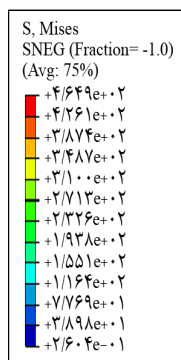
**نمودار (۱۳):** مقایسه نمودارهای جذب انرژی در دیوار برشی فولادی (کاهش پهنا و توأمافاً افزایش ارتفاع در مساحت ثابت).



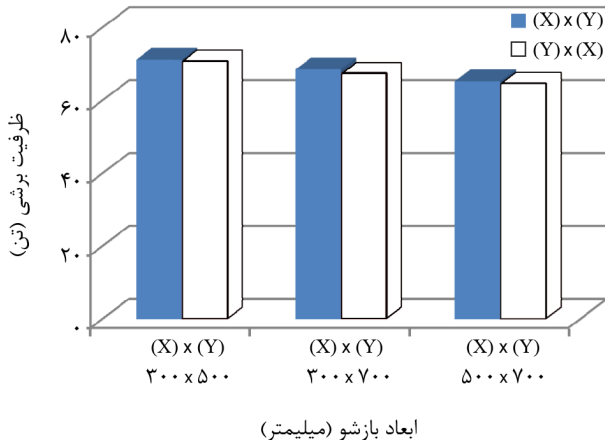
**نمودار (۹):** مقایسه نمودارهای تنش فون مایسس در دیوار برشی فولادی به ضخامت ۱/۵ میلی‌متر.



**نمودار (۱۰):** مقایسه نمودارهای کمناش خارج از صفحه دیوار برشی با ضخامت ۱/۵ میلی‌متر.

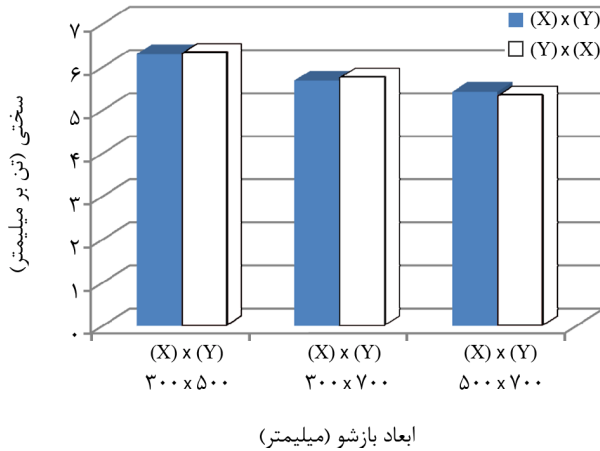


**شکل (۳):** مقایسه پایان تسلیم‌ها در STEP2 (پایان بارگذاری) دیوار بدون باز شو و دیوار باز شو.



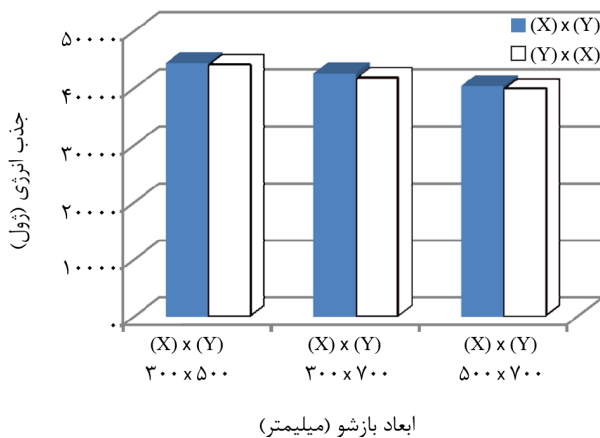
ابعاد بازشو (میلیمتر)

**نمودار (۱۵):** مقایسه نمودارهای ظرفیت برشی تجمعی حاصل از آنالیز آرایشهای مختلف بازشو (در ستونهای چسبیده بر هم، ستون سمت چپ بازشو با پهناي (X) ۳۰۰ و ارتفاع (Y) ۵۰۰ میلیمتر بوده و ستون سمت راست بازشو با پهناي ۵۰۰ و ارتفاع ۳۰۰ میلیمتر می‌باشد).



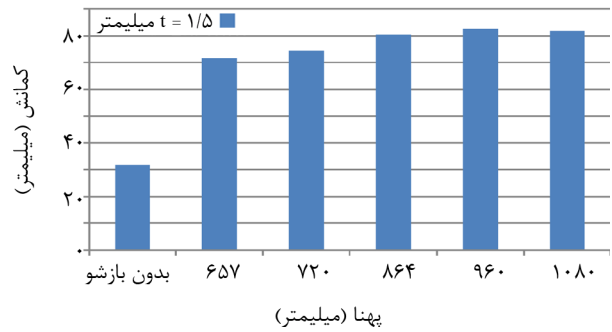
ابعاد بازشو (میلیمتر)

**نمودار (۱۶):** مقایسه نمودارهای سختی دیوار برشی با ضخامت ۱/۵ میلیمتر با آرایشهای مختلف بازشو.



ابعاد بازشو (میلیمتر)

**نمودار (۱۷):** مقایسه نمودارهای جذب انرژی در دیوار برشی فولادی با ضخامت ۱/۵ میلیمتر با آرایشهای مختلف بازشو.



**نمودار (۱۴):** مقایسه نمودارهای کمانش خارج از صفحه دیوار برشی (افزایش پهنا و توأمأ کاهش ارتفاع در مساحت ثابت).

دقت در نمودارهای (۱۱) تا (۱۴) نشان می‌دهد در بازشوها با مساحت ثابت ۲۰ درصدی، بازشوهایی که پهناي کمتری دارند، ظرفیت برشی (۲ تا ۶ درصد)، سختی (۶ تا ۱۱ درصد) و جذب انرژی (۶ تا ۱۱ درصد) بیشتری دارند. همچنین بازشوهایی که پهناي بیشتری دارند، کمانش (۴ تا ۱۲ درصد) بیشتری دارند.

#### ۴-۱-۳- تأثیر پهنا و ارتفاع بازشو

در این قسمت، بازشوها مساحتهای ثابت دارند و جای ارتفاع و پهنا را عوض نموده و رفتار آنها مورد بررسی قرار می‌گیرد.

نمودارهای (۱۵) تا (۱۸) مقایسه دیوارهای برشی فولادی با ضخامت یکسان ۱/۵ میلیمتر و اثر تغییر ابعاد بازشوها در یک مساحت ثابت را نشان می‌دهد. به این ترتیب که به طور مثال یک بار پهنا ۵۰۰ و ارتفاع ۷۰۰ میلیمتر و یک بار پهنا ۷۰۰ و ارتفاع ۵۰۰ میلیمتر باشد. همان‌طور که مشخص است تغییرات بسیار ناچیز بوده، اما نتایج بر روی بازشوها تا ۲۵ درصد را نشان می‌دهد. در دیوارهای برشی فولادی که دارای ۶ تا ۱۷ درصد بازشو هستند، هر چه ارتفاع بازشو بیشتر باشد، ظرفیت برشی سیستم و جذب انرژی هم بیشتر و تنش فون-مایسس کمتر می‌شود. همچنین در دیوارهای برشی فولادی که دارای ۶ تا ۱۷ درصد بازشو هستند، هر چه پهناي بازشو بیشتر باشد، سختی سیستم هم بیشتر و در بازشوهایی ۱۷ درصد به بالا، هر چه ارتفاع بازشو بیشتر باشد، سختی سیستم هم بیشتر می‌شود.



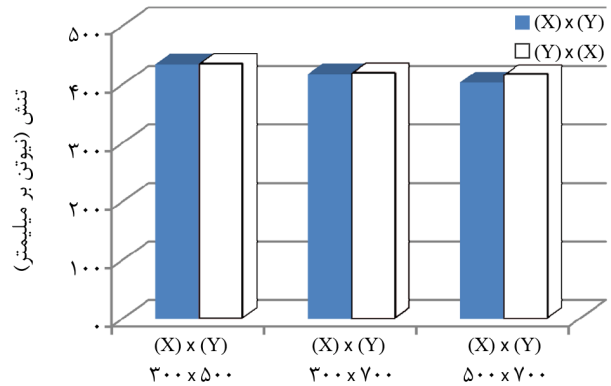
$$F_o = F_w(1 - (A_o / A_w))\alpha \quad (1)$$

که در آن نیروی برشی دیوار بدون بازشو در جابه‌جایی ۷ سانتیمتر و  $F_o$  نیروی برشی دیوار بازشودار در جابه‌جایی ۷ سانتیمتر می‌باشد. در نهایت، برای برقراری رابطه، ضریب  $\alpha$  به آن اعمال می‌شود که در این تحقیق آن را ضریب اصلاح نیروی برشی معرفی می‌شود [۲۱].

جدول (۲) نشان می‌دهد ضریب اصلاح نیروی برشی برای هر پهنایی تا ارتفاع ۷۰۰ میلیمتر (در مقیاس واقعی ۱۴۰۰ میلیمتر) بین ۰/۵۹ تا ۰/۸۸ تغییر می‌کند.

#### ۴-۲- تأثیر سخت‌کننده‌ها

همان‌طور که تصور می‌رود، با ایجاد بازشوها ضعفهایی در دیوار برشی فولادی پدید می‌آیند که از مهمترین آنها می‌توان به افزایش کمانش و تنشها در لبه‌های بازشو اشاره نمود. همچنین یکی از مهمترین کاربردهای دیوار برشی فولادی در قابهای ساختمانی، جذب انرژی ناشی از زلزله و افزایش مقاومت برشی می‌باشد. یکی از روشهای بهینه و اقتصادی به منظور افزایش در جهت بهبود این پارامترها اضافه نمودن سخت‌کننده‌ها به ورق فولادی است. در همین راستا به جهت عملکرد خوب مصالح  $FRP$  از جمله مقاومت، جذب انرژی و شکل‌پذیری بالا در این تحقیق از مصالح



ابعاد بازشو (میلیمتر)

نمودار (۱۸): مقایسه نمودارهای تنش فون مایسس در دیوار برشی فولادی با ضخامت ۱/۵ میلیمتر با آرایشهای مختلف بازشو.

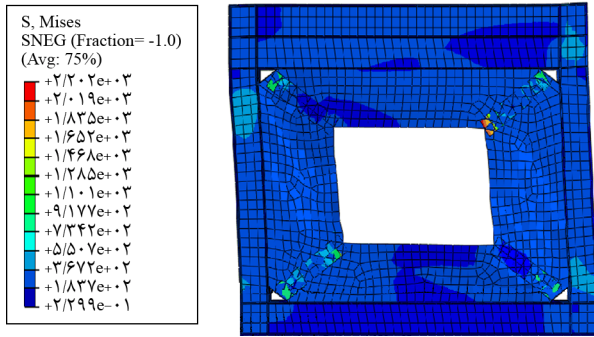
#### ۴-۱-۴- ضریب اصلاح نیروی برشی

برای مقایسه بهتر نیروهای برشی در حالت بدون بازشو و حالت بازشودار، معیاری مطابق با آیین‌نامه زلزله ۲۸۰۰ ایران در نظر گرفته شده که مقدار مجاز تغییر مکان جانبی نسبی را برای پیوند کمتر از ۰/۷ ثانیه، ۰/۲۵ ارتفاع در نظر می‌گیرد. در نتیجه، برای به دست آوردن رابطه بین نیروهای برشی در دو حالت بازشودار و بدون بازشو، مدل‌ها در جابه‌جایی ۷ سانتیمتر مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. بررسیها نشان می‌دهد که بین نیروهای برشی حالت بازشودار و حالت بدون بازشو رابطه (۱) برقرار می‌باشد:

جدول (۲): ضریب اصلاح نیروی برشی در بازشو با پهنای ۳۰۰، ۵۰۰ و ۷۰۰ میلیمتر.

بازشو با پهنای ۳۰۰، ۵۰۰ و ۷۰۰ میلیمتر با ورق ضخامت ۱/۵ میلیمتر					
$F_o = F_w(1 - (A_o / A_w))\alpha$					
ارتفاع $h(mm)$	پهنا	ظرفیت برشی قاب بدون بازشو $F_w (ton)$	ظرفیت برشی قاب بازشودار $F_o (ton)$	نسبت مساحت بازشو به مساحت ورق $1-A_o/A_w$	ضریب اصلاح نیروی برشی $\alpha$
۳۰۰	۳۰۰	۸۰/۹۰	۷۴/۱۴	۰/۹۶	۰/۸۸
	۵۰۰	۸۰/۹۰	۷۱/۲۶	۰/۹۳	۰/۸۲
	۷۰۰	۸۰/۹۰	۶۸/۶۰	۰/۹۰	۰/۷۷
۵۰۰	۳۰۰	۸۰/۹۰	۷۰/۷۵	۰/۹۳	۰/۸۱
	۵۰۰	۸۰/۹۰	۶۷/۸۹	۰/۸۸	۰/۷۴
	۷۰۰	۸۰/۹۰	۶۵/۳۳	۰/۸۴	۰/۶۸
۷۰۰	۳۰۰	۸۰/۹۰	۶۷/۴۳	۰/۹۰	۰/۷۵
	۵۰۰	۸۰/۹۰	۶۴/۶۱	۰/۸۴	۰/۶۷
	۷۰۰	۸۰/۹۰	۶۱/۹۶	۰/۷۷	۰/۵۹





شکل (۵): توزیع تنش در سیستم در مرحله پایانی گسیختگی برای دیوار برشی فولادی بازشودار تقویت شده.

جلوگیری کرده است. افزایش تنش در ورق‌های پرکننده‌ای که دارای سخت‌کننده می‌باشند، نشاندهنده افزایش ظرفیت پس‌کمانشی (نیروی حاصل از کمانش ورق در حد مجاز که بعد از تشکیل میدان کشش قطری تبدیل به نیروی مقاوم در مقابل بارهای اضافی می‌گردد) و توسعه بهتر عملکرد میدان کششی در ورق پرکننده آنها است. به طور کلی:

- الف- در دیوار با انواع سخت‌کننده‌ها توزیع تنش در اعضاء مرزی بسیار متغیر بوده و این اعضاء از حساسیت بالاتری نسبت به ورق دیوار برخوردارند به طوری که افزودن سخت‌کننده‌ها سبب یکنواخت‌تر شدن توزیع تنش در این اعضاء می‌گردد.
- ب- توزیع تنش در ورق دیوار بدون سخت‌کننده در محدوده قطر کششی دیوار (گوشه‌های بازشو) نسبتاً غیریکنواخت می‌باشد و اضافه کردن سخت‌کننده‌های افقی باعث یکنواخت‌تر شدن تنشها می‌گردد، این یکنواختی تنشها باعث افزایش بازدهی دیوار در جذب انرژی می‌گردد.
- ج- با دیوارهای برشی فولادی بازشودار تقویت شده با FRP، عموماً با اضافه شدن سخت‌کننده‌ها تنشها در دیوار به حد قابل‌ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. این در حالی است که تنشهای بزرگتری در سخت‌کننده‌ها به وجود می‌آید.

#### ۴-۲-۲- کمانش خارج از صفحه

یکی از اثرات مخرب در سیستم دیوار برشی فولادی وجود کمانشهای خارج از صفحه ورق می‌باشد که به علت نازک بودن ورق فولادی وجود این نوع کمانش دور از انتظار نخواهد بود. به همین منظور، همواره راههای جلوگیری از

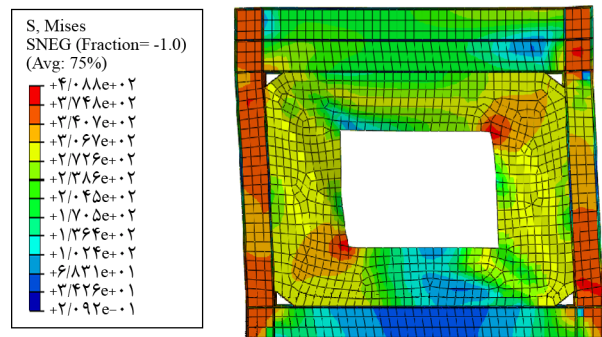
پلیمری مسلح شده با الیاف یا همان FRP با آرایشهای مختلف قرارگیری بر روی ورق دیوار استفاده شده است. در این تحقیق، به منظور بررسی اثر سخت‌کننده بر رفتار و عملکرد دیوار برشی فولادی چهار حالت به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

- ۱- دیوار بازشودار بدون سخت‌کننده؛
- ۲- دیوار بازشودار با سخت‌کننده‌های افقی، قائم، افقی-قائم توأم، قطری و ضربدری؛
- ۳- کلیه آرایش سخت‌کننده‌ها در ضخامت‌های ۰/۸، ۱، ۱/۵ و ۳ میلی‌متر مدل شده‌اند؛
- ۴- کلیه آرایش سخت‌کننده‌ها در بازشوهایی از ۶ تا ۲۵ درصد مساحت قاب مدلسازی شده‌اند.

#### ۴-۲-۱- توزیع تنش و یکنواختی در تسلیم

به منظور بررسی اثر توزیع تنشها با اضافه شدن سخت‌کننده‌های FRP بیش از ۶۰ مدل مورد بررسی قرار گرفت که نتایج مشابه آن حاکی از صحت آزمایشات دارد.

شکل‌های (۴) و (۵) توزیع تنش در سیستم در مرحله پایانی گسیختگی برای دیوار برشی فولادی بازشودار با بازشوهای مستطیلی با مساحت ۲۵ درصدی از مساحت ورق به ضخامت ۱/۵ میلی‌متر برای حالت بدون تقویت و تقویت با آرایش ضربدری را نشان می‌دهد. با دقت در این شکلها و بررسی انواع دیگر آرایش سخت‌کننده‌ها در نمونه‌ها، مشاهده می‌شود استفاده از سخت‌کننده باعث توزیع یکنواخت و مناسبتر تنش در کل سیستم شده و از تمرکز تنش در اطراف بازشو و از افزایش تنش در المانهای مرزی عمودی



شکل (۴): توزیع تنش در سیستم در مرحله پایانی گسیختگی برای دیوار برشی فولادی بازشودار تقویت‌نشده.

سخت کننده‌های قائم تا ۴۷ درصد، سخت کننده‌های افقی قائم توأم تا ۵۳ درصد و سخت کننده‌های ضربدری تا ۲۵ درصد در جهت جلوگیری از کمانش خارج از صفحه دیوار مؤثرند.



نمودار (۱۹): مقایسه نمودارهای کمانش خارج از صفحه با انواع آرایش سخت کننده‌های یکطرفه.

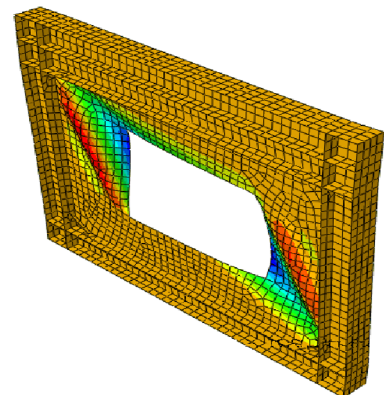
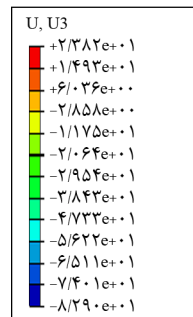
#### ۴-۲-۳- اثر بر دیگر پارامترهای مهم (ظرفیت برشی، سختی، جذب انرژی و منحنی هیستریزیس)

به منظور درک بهتر و مقایسه میان انواع آرایش سخت کننده‌ها، مدل‌سازیهای متعددی با توجه به سطح ثابت ورقهای FRP به عنوان سخت کننده‌ها طراحی گردید که بیانگر اثر مطلوبتر نوع سخت کننده با نظر به میزان بازدهی مصالح باشد. بر همین اساس مدل‌های بازشودار با مساحت‌های ۶ تا ۲۵ درصد در ضخامت‌های ۱/۸، ۱، ۱/۵، ۳ و ۵ میلیمتر بررسی گردید که نتایج مشابهی در پارامترهای مهمی از جمله ظرفیت برشی، سختی، جذب انرژی و منحنی هیستریزیس داشته‌اند.

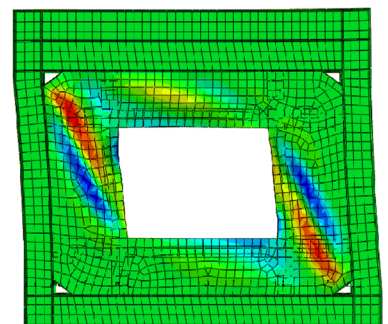
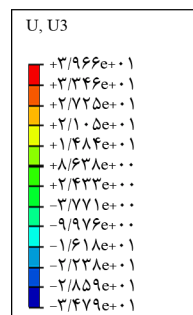
در نمودار (۲۰)، ظرفیت برشی مدل‌های مختلف دیوار برشی فولادی با بازشو ۲۵ درصدی و ضخامت ورق ۱/۵ میلیمتر و نیز با آرایش سخت کننده‌های یکطرفه افقی- قائم، قطری و ضربدری بازشو نشان داده شده است. همچنین در این شکل دیده می‌شود که سخت کننده‌های ضربدری نسبت به بقیه سخت کننده‌ها افزایش قابل توجهی بر روی ظرفیت برشی دارند، به طوری که سخت کننده‌های ضربدری ۱۸ درصد بیش از سخت کننده‌های افقی- قائم و قطری ظرفیت برشی ایجاد می‌کنند.

این پدیده مورد توجه محققان بوده است. بررسی مدل‌های آزمایش شده نشان می‌دهد کمانشهای بحرانی در دیوارهای برشی فولادی بازشودار در لبه‌های بازشو اتفاق می‌افتد و اولویت به کارگیری سخت کننده‌ها در این نواحی بیش از سایر نواحی اهمیت پیدا می‌کند.

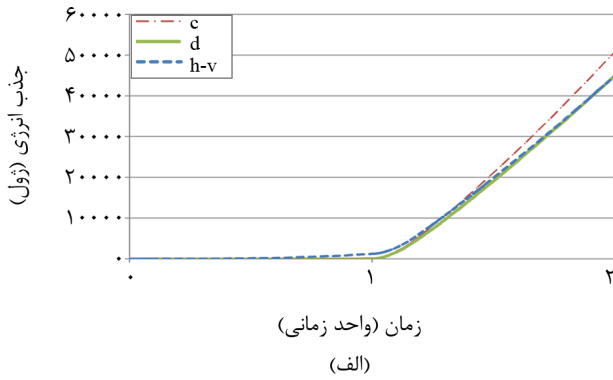
شکل‌های (۶) و (۷) توزیع کمانش خارج از صفحه‌ای در مرحله پایانی برای دیوار برشی فولادی بازشودار با بازشوهای مستطیلی با مساحت ۲۵ درصد از مساحت ورق به ضخامت ورق ۱/۵ میلیمتر برای حالت بدون تقویت و تقویت با آرایش افقی- قائم توأم را نشان می‌دهد. با دقت در شکلها و بررسی کمانش در نمونه‌های دیگر مشاهده می‌شود و با توجه به نمودار (۱۹) که مربوط به مقایسه نمودارهای کمانش خارج از صفحه دیوار برشی فولادی با بازشو ۲۵ درصد و ضخامت ۱/۵ میلیمتر با انواع آرایش سخت کننده‌های یکطرفه و استفاده از میزان مصالح سخت کننده یکسان را نشان می‌دهد، استفاده از سخت کننده‌های افقی تا ۲۴ درصد،



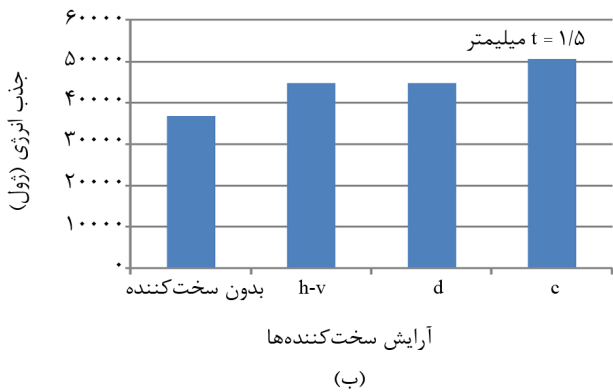
شکل (۶): کمانش مرحله پایانی برای دیوار برشی فولادی بازشودار تقویت نشده.



شکل (۷): کمانش مرحله پایانی برای دیوار برشی فولادی بازشودار تقویت شده افقی- قائم توأم پیرامون بازشو.



نمودار (۲۰): مقایسه نمودارهای ظرفیت برشی جمعیتی حاصل از آنالیز (منظور از آرایش h-v: سخت‌کننده افقی قائم توأم، رجوع به علائم اختصاری).



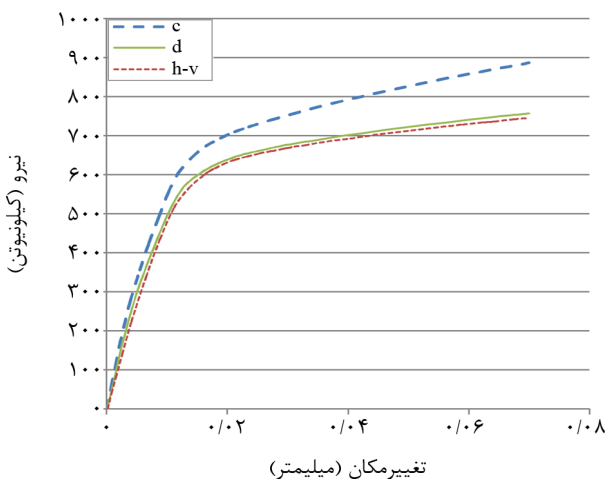
نمودار (۲۲): مقایسه نمودارهای جذب انرژی در دیوار برشی فولادی.

در نمودار (۲۱)، سختی مدل‌های مختلف دیوار برشی فولادی با بازشو ۲۵ درصدی و ضخامت ورق ۱/۵ میلیمتر و نیز با آرایش سخت‌کننده‌های یکطرفه افقی- قائم، قطری و ضربدری بازشو نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، سخت‌کننده‌های ضربدری نسبت به بقیه سخت‌کننده‌ها افزایش قابل‌توجهی بر روی سختی دارند. سخت‌کننده‌های ضربدری تا ۳۳ درصد، سخت‌کننده‌های قطری تا ۱۸ درصد و سخت‌کننده‌های افقی- قائم تا ۱۰ درصد در جهت افزایش سختی عمل می‌کنند.

سخت‌کننده‌های ضربدری تا ۳۸ درصد و سخت‌کننده‌های قطری و افقی- قائم تا ۲۲ درصد در جهت افزایش جذب انرژی عمل می‌کنند. در نمودار (۲۲- الف)، منظور از زمان صفر تا یک مرحله اول بارگذاری (اعمال بار ثقلی) و زمان ۱-۲ مرحله دوم بارگذاری (اعمال بار جانبی) می‌باشد.

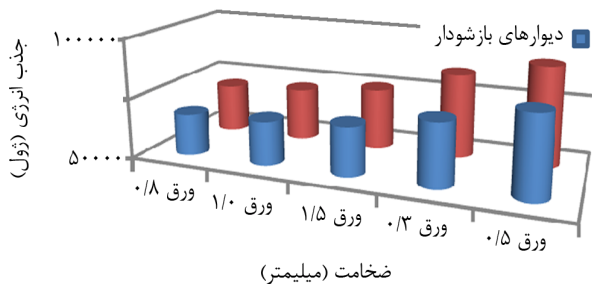
نمودار (۲۲) میزان جذب انرژی مدل‌های مختلف دیوار برشی فولادی با آرایش سخت‌کننده‌های افقی- قائم، قطری و ضربدری بازشو نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، سخت‌کننده‌های ضربدری، نسبت به بقیه سخت‌کننده‌ها افزایش قابل‌توجهی بر روی سختی دارند.

نمودار (۲۳)، نمودارهای پوش هیستریزس مدل‌های مختلف دیوار برشی فولادی با آرایش سخت‌کننده‌های

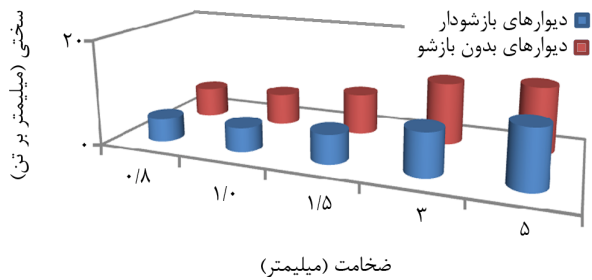


نمودار (۲۱): مقایسه نمودارهای سختی الاستیک حاصل از آنالیز برای دیوار برشی فولادی با بازشو ۲۵ درصدی به ضخامت ۱/۵ میلیمتر با آرایشهای مختلف سخت‌کننده‌های یکطرفه.

نمودار (۲۳): مقایسه منحنی‌های پوش حاصل از آنالیز.



نمودار (۲۵): مقایسه نمودارهای جذب انرژی حاصل از آنالیز.



نمودار (۲۶): مقایسه نمودارهای ظرفیت برشی تجمعی حاصل از آنالیز.

#### ۴-۴- تعیین ضریب رفتار

یکی از مهمترین پارامترهای طراحی سازه‌ها در برابر زلزله، ضریب اصلاح بازتابها به دلیل رفتار غیرخطی مصالح سازه می‌باشد. این ضریب که معمولاً ضریب رفتار نامیده می‌شود منعکس کننده مشخصات مصالح سازه، جذب انرژی بر اثر رفتار هیستریزیس، میرایی و رفتار غیرالاستیک سازه می‌باشد [۲۲]. در این تحقیق نیز از روش یوانگ در محاسبه ضریب رفتار استفاده شده است. ضریب رفتار معمولاً بر اساس تابعی از ضریب نرمی سازه‌ها محاسبه می‌گردد، لذا در حالت کلی سازه‌های با جنس مصالح یکسان و سختی بیشتر دارای ضریب رفتار بزرگتری خواهند بود، ولیکن بر اساس رابطه ارائه شده توسط یوانگ، علاوه بر ضریب نرمی سازه، از ضریب مقاومت افزون (نسبت مقاومت تسلیم حداکثر به مقاومت سازه در زمان تشکیل اولین تسلیم‌شدگی)، نیز در تعیین ضریب رفتار سازه استفاده می‌گردد. در ادامه روش محاسبه ضریب رفتار یک نمونه ارائه شده است.

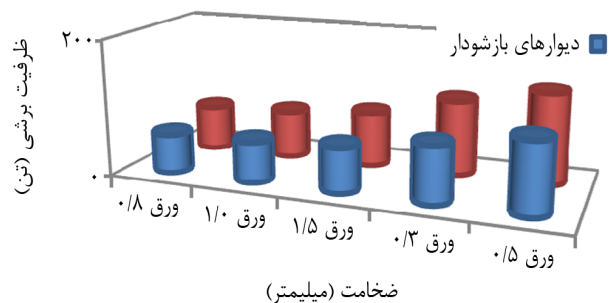
با توجه به اعداد استخراج شده از نمودار (۲۷) که مربوط به منحنی پوش حاصل از آنالیز برای دیوار برشی فولادی به ضخامت ۱/۵ میلیمتر با سخت‌کننده‌ای افقی به فواصل ۶۰ سانتیمتر و بازشو ۲۵ درصد جهت محاسبه ضریب رفتار

ثابت از سخت‌کننده‌ها (با مساحت یکسان ۲۵ درصد و یکطرفه افقی- قائم، قطری و ضربدری بازشو با یک سطح ضخامت یکسان ۱/۵ میلیمتر در همه نمونه‌ها) نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۲۳) دیده می‌شود سخت‌کننده‌های ضربدری نسبت به بقیه سخت‌کننده‌ها افزایش قابل توجهی بر روی نمودار هیستریزیس دارند.

#### ۴-۳- بررسی اثر ضخامت ورق

همان‌طور که می‌دانیم طبیعتاً افزایش ضخامت ورق می‌تواند در بهبود رفتار دیوار تأثیرگذار باشد. اما با توجه به غیراقتصادی بودن این روش همواره درک رفتار انواع دیوار برشی فولادی، بازشودار و بدون بازشو، تقویت شده و بدون تقویت حائز اهمیت بوده است. به همین جهت مدل‌های تقویت شده با سخت‌کننده‌های FRP و یا بدون تقویت با ضخامت‌های مختلف که دارای بازشو هستند و یا بازشو ندارند مورد بررسی قرار گرفتند.

در نمودارهای (۲۴) تا (۲۶)، به ترتیب نمودارهای مقایسه ظرفیت برشی تجمعی و نمودارهای مقایسه جذب انرژی (ژول) حاصل از آنالیز برای دیوار برشی فولادی به ضخامت‌های مختلف در دیوارهای بدون بازشو و دیوارهای بازشودار ۱۵ درصدی نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهند که اولاً در دیوارهای دارای بازشو و بدون بازشو با افزایش ضخامت ورق روند افزایش ظرفیتهایی چون جذب انرژی، مقاومت برشی و سختی سیستم یکسان بوده و ثانیاً افزایش ضخامت در بازه‌های حداکثر تا یک میلیمتر تأثیر چندانی در افزایش ظرفیتهای (کمتر از ۱۰ درصد) ندارند.



نمودار (۲۷): مقایسه نمودارهای ظرفیت برشی تجمعی حاصل از آنالیز.

- فون مایسس و همچنین افزایش یک تا ۲ درصدی کمانش خارج از صفحه به دست می‌آید.
۲. در دیوارهای برشی فولادی تأثیر پهنا در کاهش ظرفیتها بیشتر از ارتفاع بوده به طوری که بازشوهایی که پهنای کمتری دارند، ظرفیت برشی (۲ تا ۶ درصد)، سختی (۶ تا ۱۱ درصد) و جذب انرژی (تا ۶ درصد) بیشتری دارند. همچنین در بازشوهایی که پهنای بیشتری دارند، کمانش (۴ تا ۱۲ درصد) بیشتری دارند.
۳. در دیوارهای برشی فولادی جابه‌جایی پهنا و ارتفاع تأثیر قابل توجهی بر روی پارامترها ندارد.
۴. در دیوار برشی فولادی با ۶ تا ۱۷ درصد بازشو: ضریب اصلاح نیروی برشی برای هر پهنایی تا ارتفاع ۷۰۰ میلیمتر (در مقیاس واقعی ۱۴۰۰ میلیمتر) بین ۰/۵۹ تا ۰/۸۸ تغییر می‌کند.
۵. به طور کلی در دیوارهای برشی فولادی توزیع تنش در اعضا مرزی بسیار متغیر بوده که با افزودن انواع سخت‌کننده‌ها توزیع تنش در این اعضا یکنواخت می‌گردد. در دیوارهای برشی فولادی بازشودار تقویت شده با FRP، عموماً با اضافه شدن سخت‌کننده‌ها تنشها در دیوار به حد قابل‌ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. این در حالی است که تنشهای بزرگتری در سخت‌کننده‌ها به وجود می‌آید که نشان از افزایش ظرفیت پس کمانشی و توسعه بهتر عملکرد میدان کششی در ورق پرکننده آنها می‌باشد.
۶. بیشترین تأثیر بر روی کاهش کمانش خارج از صفحه را به ترتیب سخت‌کننده‌های افقی - قائم، قائم، ضربدری دارند.
۷. سخت‌کننده‌های FRP باعث افزایش سختی الاستیک، ظرفیت برشی و مقاومت در دیوار می‌شوند.
۸. سخت‌کننده‌های افقی - قائم در افزایش سختی سیستم (تا ۱۵ درصد)، جذب انرژی (تا ۲۲ درصد) و ظرفیت برشی (تا ۲۴ درصد) بسیار مؤثرند. این در حالی است که این سخت‌کننده‌ها مؤثرترین نوع آرایش سخت‌کننده‌ها (به دلیل محصور کردن محیط بازشو و پیوستگی سخت‌کننده‌های دور تا دور بازشو) در کاهش کمانش خارج از صفحه هستند.
۹. افزودن سخت‌کننده‌های قطری، بر خلاف دیوار برشی

می‌باشد و همچنین فرمولهای محاسبه ضریب رفتار بر اساس روش یانگ داریم:

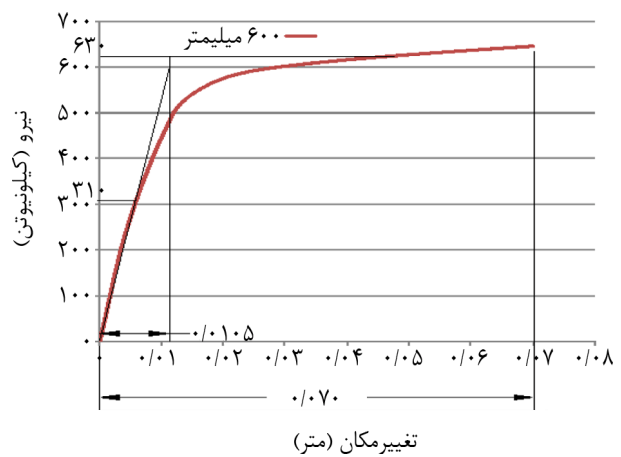
$$R = R_u \times \Omega$$

$$\delta_u = 0.7 \text{ cm}$$

$$R_u = \frac{7.0}{0.0105} = 6.67$$

$$\Omega = \frac{630}{310} = 2.03$$

$$R = 6.67 \times 2.03 = 13.55$$



نمودار (۲۷): منحنی پوش حاصل از آنالیز (نمونه تصادفی).

بر اساس نتایج حاصل از ضریب رفتار ۲۰ نمونه تصادفی از مجموع نمونه‌ها، می‌توان ضریب رفتار معادل برابر ۱۵ را با دقت و ضریب اطمینان مطلوب، برای دیوارهای برشی فولادی تقویت شده با ورقهای نازک و تمامی آرایشهای ممکن صفحات تقویت کننده با ضخامتهای مختلف دیوار پیشنهاد نمود. این ضریب می‌تواند نقش مهمی در بارگذاری لرزه‌ای نزدیک به واقعیت، جهت اعمال بر سازه‌های شامل دیوار برشی فولادی بازشودار تقویت شده داشته باشد.

## ۵- نتیجه‌گیری

با توجه به مطالب مطرح شده در متن، خلاصه‌ای از نتایج به دست آمده به شرح ذیل می‌باشد:

۱. در دیوار برشی فولادی بازشودار با افزایش حدود هر ۳ درصد مساحت بازشو، کاهش ۳ درصدی ظرفیت برشی و کاهش ۵ درصدی سختی سیستم، کاهش ۳ درصدی جذب انرژی و کاهش یک درصدی تنش

- Elwi, A.E. (1998). Cyclic test of four-story steel plate shear wall, *Journal of Structural Engineering, ASCE*, **124**(2), 112-120.
5. Elgaaly, M., Caccese, V., and Du, C. (1993). Postbuckling behaviour of steel plate shear walls under cyclic loads, *Journal of Structural Engineering, ASCE*, **119**(2), 588-602.
6. Maripudi, V.S. (1990). Nonlinear analysis of thin steel plates with flexible boundaries under in-plane shear, Ms Thesis Univ. of Maine. Me. USA.
7. Robert, G., Kulak, G.L., Elwi, A.E., and Kennedy, D.J.L. (1998). FE and simplified models of steel plate shear wall, *Journal of Structural Engineering, ASCE*, **124**(2), 121-130.
8. Xue, M. and Lu, L.W. (1994). Interaction of infilled steel shear wall panels with surrounding frame members, *Proc. Struct. Stability Res. Council Annu. Tech. Session*, Bethlehem, Pa. 339-354.
9. Roberts, T.M. and Sabouri-Ghomi, S. (1992). Hysteretic characters of unstiffened perforated steel plate shear panels, *Thin-Walled Structures*, **14**, 139-151.
10. Sabouri-Ghomi, S. and Roberts, T.M. (1991). Nonlinear dynamic analysis of thin steel plate shear walls, *Computer and Structures*, **39**(1/2), 121-127.
11. Berman, J. and Bruneau, M. (2003). Plastic analysis and design of steel plate shear walls, *Journal of Structural Engineering*, **129**(11), 1448-1456.
۱۲. صبوری قمی، سعید و قلهکی، مجید (۱۳۸۸). تأثیر ضریب شکل‌پذیری بر ضریب رفتار دیوارهای برشی فولادی با ورق نازک، انجمن سازه‌های فولادی ایران.
۱۳. صبوری قمی، سعید و حاتمی، فرزاد (۱۳۸۳). اثر اتصال لولایی بین تیر و ستون در دیوارهای برشی فولادی، اولین کنگره ملی مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شریف، ۱۰۸۶-۸۳.
۱۴. صبوری قمی، سعید و حاتمی، فرزاد (۱۳۸۲). تأثیر تقویت تیر بر روی دیوارهای برشی فولادی، چهارمین کنفرانس بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله.
- فولادی بدون بازشو، بر روی کمانش خارج از صفحه در دیوار برشی بازشودار اثر چندانی ندارد. اما باعث بهبود رفتار هیستریزیس دیوار برشی شده و اضافه کردن این نوع سخت‌کننده به عنوان عامل تقویتی دیوارهای برشی فولادی بازشودار سبب افزایش ظرفیت باربری (تا ۲۶ درصد)، جذب انرژی (تا ۲۲ درصد) و سختی سیستم (تا ۱۸ درصد) می‌گردد. سخت‌کننده‌های قطری، سبب نزدیک شدگی ستونها می‌شوند و میزان نزدیک‌شدگی توسط این نوع سخت‌کننده‌ها، بیش از زمانی است که از سخت‌کننده‌های افقی، قائم و افقی-قائم توأم استفاده می‌گردد. از این نظر، استفاده از این نوع سخت‌کننده‌ها، بر معایب سیستم می‌افزاید.
۱۰. افزودن سخت‌کننده‌های ضربدری، کمانش خارج از صفحه در دیوار برشی بازشودار نسبت به سخت‌کننده‌های قطری دارند. به طوری که تا ۲۵ درصد موجب کاهش کمانش خارج از صفحه ورق می‌گردد. سخت‌کننده‌های ضربدری به عنوان عامل تقویتی دیوارهای برشی فولادی بازشودار سبب افزایش ظرفیت (تا ۴۸ درصد)، جذب انرژی (تا ۳۳ درصد) و سختی سیستم (تا ۳۸ درصد) می‌گردد.
۱۱. دیوار برشی فولادی بازشودار تقویت شده با FRP می‌تواند با ضریب رفتار ۱۵ معادل گردد.

## ۶- مراجع

۱. صبوری قمی، سعید (۱۳۸۰). سیستم‌های مقاوم در برابر بارهای جانبی، مقدمه‌ای بر دیوارهای برشی فولادی، نشر انگیزه، تهران، چاپ اول.
۲. علوی، عرفان (۱۳۸۸). مطالعه تحلیلی رفتار غیرخطی دیوارهای برشی فولادی تقویت شده قطری، پایان‌نامه دکترا، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله.
3. Caccese, V., Elgaaly, M., and Chen R. (1993). Experimental study of thin steel plate shear walls under cyclic load, *Journal of Structural Eng., ASCE*, **119**(2), 573-587.
4. Driver, R.G., Kulak, G.L., Kennedy, D.J.L., and



میلیمتر و نوع تقویت‌کننده به لحاظ یکطرفه و دوطرفه بودن  $b$  و درصد میزان سطح بازشو نسبت به مساحت کل ورق  $Spsw1.5-1-25\%$ : دیوار برشی فولادی با ضخامت ورق  $1/5$  میلیمتر با تقویت‌کننده‌های یکطرفه و بازشو با مساحت  $25$  درصد مساحت کل ورق  $Spsw1.5$ : دیوار برشی فولادی با ضخامت ورق  $1/5$  میلیمتر بدون تقویت‌کننده و بازشو  $Spsw25\%$ : دیوار برشی فولادی با ضخامت‌های ورق مختلف دارای بازشو با مساحت  $25$  درصد مساحت کل ورق  $Spsw H$ : دیوار برشی فولادی دارای تقویت‌کننده‌های با آرایش افقی  $Spsw V$ : دیوار برشی فولادی دارای تقویت‌کننده‌های با آرایش قائم  $Spsw H-V$ : دیوار برشی فولادی دارای تقویت‌کننده‌های با آرایش افقی- قائم توام  $Spsw D$ : دیوار برشی فولادی دارای تقویت‌کننده‌های با آرایش قطری  $Spsw C$ : دیوار برشی فولادی دارای تقویت‌کننده‌های با آرایش ضربدری  $FW$ : نیروی برشی دیوار بدون بازشو در جابه‌جایی  $7$  سانتیمتر (تن)  $FO$ : نیروی برشی دیوار بازشودار در جابه‌جایی  $7$  سانتیمتر (تن)  $\alpha$ : ضریب اصلاح نیروی برشی  $Aw$ : مساحت کل ورق (مترمربع)  $Ao$ : مساحت بازشو (مترمربع)  $R_{II}$ : ضریب کاهش ناشی از شکل‌پذیری  $\Omega$ : ضریب کاهش ناشی از مقاومت افزون  $\delta_{II}$ : تغییرمکان جانبی نسبی حداکثر  $R$ : ضریب رفتار

## ۸- واژگان تخصصی

آرایش سخت‌کننده‌ها: Arrangement of FRP stiffeners  
FRP: Fiber Reinforced Polymer  
دیوارهای برشی فولادی: Steel Plate Shear Walls (SPSW)

۱۵. قلهکی، مجید و رضایی‌فر، امید (۱۳۸۷). ارزیابی روش‌های تعیین ظرفیت برشی دیوارهای برشی فولادی، اولین کنفرانس بین‌المللی مقاومت‌سازی لرزه‌ای.  
۱۶. قلهکی، مجید و رضایی‌فر، امید (۱۳۸۷). مزایای کاربرد فولاد نرم در دیوارهای برشی فولادی، اولین کنفرانس بین‌المللی مقاومت‌سازی لرزه‌ای.  
۱۷. قلهکی، مجید و رضایی‌فر، امید (۱۳۸۸). اثر مقاومت افزون بر ضریب رفتار دیوارهای برشی فولادی با ورق نازک، هشتمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران دانشگاه شیراز.  
۱۸. قلهکی، مجید و شوقی‌جوان، محمد (۱۳۸۹). بررسی تأثیر سختی ستونها بر رفتار پس‌کمانشی دیوارهای برشی فولادی، پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران دانشگاه فردوسی مشهد.  
۱۹. قلهکی، مجید و اصغری‌تکدام، هوشنگ (۱۳۸۹). اندرکنش برشی و خمشی دیوارهای برشی فولادی با ورق نازک، پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران دانشگاه فردوسی مشهد.  
۲۰. توکل‌زاده، محمدرضا و قدس، امیرصمد (۱۳۸۸). مروری بر آیین‌نامه تقویت عضوهای بتنی با ورق‌های  $FRP$ ,  $ACI 440.2R-08$ , سومین همایش بتن شرق کشور، مشهد.  
۲۱. حقی، نکیسا و واثقی، جواد (۱۳۸۷). بررسی تأثیر بازشو در رفتار دیوار برشی فولادی، چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران دانشگاه تهران.  
۲۲. امانخانی، مهناز (۱۳۸۸). مقاومت‌سازی دیوارهای برشی فولادی با ورق نازک بعد از زلزله، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده تحصیلات تکمیلی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب.

## ۷- علائم اختصاری

$Spsw a-b-c$ : دیوار برشی فولادی با ضخامت ورق  $a$