



# تأثیر فولاد نرم و تغییرات ضخامت ورق و بررسی ضخامت و جهت قرارگیری الیاف در شکل‌پذیری و مقاومت نهایی دیوارهای برشی فولادی نیمه‌مقید تقویت شده با الیاف پلیمری شیشه (GFRP)

سید ابراهیم سادات خلردی<sup>۱\*</sup>، علیرضا جهان‌پور<sup>۲</sup>، محمدعلی برخوردار<sup>۳</sup>، میلاد فرخزاد<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی دکتری، مهندسی عمران، دانشگاه ملایر، ملایر

۲- استادیار، مهندسی عمران، دانشگاه ملایر، ملایر

۳- استاد، مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت، تهران

۴- کارشناس ارشد، مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت، تهران

\* ملایر، صندوق پستی ۶۵۷۱۹-۹۵۸۶۳، kholerdiabrahim55@gmail.com

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۱/۳۰، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۲/۱۲)

## چکیده

نوع جدیدی از دیوارهای برشی فولادی که دیوار برشی فولادی نیمه‌مقید نامیده می‌شود برخلاف دیوار برشی فولادی سنتی که ورق فولادی به ستون‌های اصلی سازه متصل است، ورق فولادی به ستون‌های فرعی که وظیفه تحمل نیروهای پس‌کمانش ورق را دارند متصل می‌شود. برای بهبود عملکرد دیوار برشی فولادی نیمه‌مقید می‌توان از الیاف پلیمری استفاده کرد. این مقاله، تأثیر تنش تسلیم و ضخامت ورق و همچنین ضخامت و جهت قرارگیری الیاف بر دیوار برشی فولادی نیمه‌مقید تقویت شده با الیاف پلیمری از جنس شیشه (GFRP) را مورد بررسی قرار می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد استفاده از ورق با تنش تسلیم پایین در سیستم دیوار برشی فولادی نیمه‌مقید تقویت شده با الیاف، رفتار سیستم را بهبود بخشیده و جذب انرژی و شکل‌پذیری را افزایش می‌دهد. بعلاوه افزایش ضخامت ورق، سختی داخلی را افزایش داده و در افزایش مقاومت نهایی نسبت به افزایش تنش تسلیم مؤثرتر است همچنین پارامترهای لرزه‌ای سیستم پیشنهاد شده با افزایش ضخامت الیاف، تا حد بهینه افزایش می‌یابند.

## واژگان کلیدی

دیوار برشی فولادی، نیمه‌مقید، فولاد نرم، الیاف پلیمری

## The Effect of Yield Stress, Plate Thickness, and Fibers Thickness and Orientation on Ultimate Capacity and Ductility of Semi-Supported Steel Plate Shear Walls Reinforced by Glass Fiber Polymers

S.E. Sadat Kholerdi, A.Jahanpour, M.A.Barkhordari, M.Farokhzad

### Abstract

In this new type of steel plate shear wall, called semi-supported steel plate shear wall, steel plates are connected to secondary columns which are responsible for undergoing post-buckling force of plates while in the traditional steel plate shear walls, steel plates are connected to main columns. Fiber polymers can be utilized to improve the functionality of semi-supported steel plate shear walls. The effect of yield stress, plate thickness, and fibers thickness and orientation on semi-supported steel plate shear walls reinforced by glass fiber polymers has been investigated in this study. The results exhibit that the behavior of system as well as its energy absorption and ductility can be enhanced by using plates with lower amounts of yield stress. Increasing each of plates thickness or yield stress improves ultimate resistance although the effect of plates thickness is much more remarkable than that of yield stress. Moreover, increasing the fibers thickness increases seismic parameters of the supposed system up to an optimal limit.

### Keywords

Steel shear wall, Semi rigid, Low yield point steel (LYP), Fiber polymer

نشریه علمی و پژوهشی سازه و فولاد / ۲۹

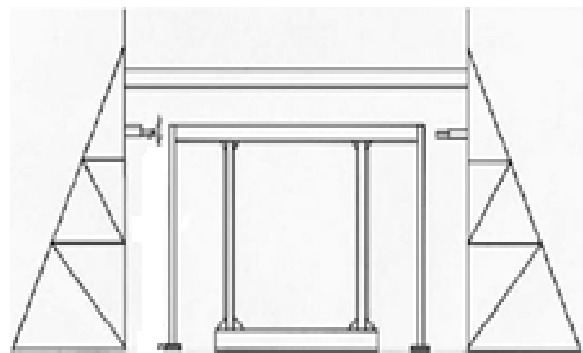


نتیجه گرفتند که اگر ورق فقط به تیرها متصل شده باشد، اقتصادی‌ترین سیستم حاصل شده و در عین حال سازه دارای رفتاری مناسب می‌باشد. Driver و همکارانش [۱۶] در سال ۲۰۰۱ پیشنهاد دادند که ورق دیوار به همراه اعضای خود با تیرهای واسطه‌ای که در تراز تیرهای اصلی هستند، به اعضای قاب متصل شوند. آن‌ها تأکید کردند، اگرچه ستون را می‌توان طوری طراحی کرد که هم در برابر بارهای جانبی (مهار میدان کشش و نیروهای داخلی اعضای قاب به سبب بار جانبی) و هم برای بارهای قائم مقاوم باشد، اما جدا کردن این دو حالت می‌تواند سودمند باشد. در ادامه سیستم جدیدی توسط Moharrami و همکارانش [۱۷ و ۱۸] پیشنهاد شد که دیوار برشی فولادی نیمه‌مقید (SSSSW)<sup>۲</sup> نام داشت و همان‌طور که در شکل (۱) نمایش داده شده است در این نوع از دیوار برشی فولادی، ورق فولادی به ستون‌های اصلی قاب که وظیفه تحمل بار ثقلی را دارند متصل نیست، بلکه به ستون‌های ثانویه‌ای وصل است که تحت بار قائم قرار ندارند. بعدها Jahanpour و همکارانش [۱۹] ظرفیت باربری نهایی این سیستم را مورد ارزیابی قرار دادند. از سوی دیگر مطالعات اخیر نشان می‌دهد الیاف تقویت شده پلیمری (FRP)<sup>۳</sup> با افزایش مقاومت نهایی، سختی و شکل‌پذیری برای بهبود پارامترهای لرزه‌ای سازه‌های فلزی آسیب دیده و یا غیراستاندارد مناسب هستند. الیاف FRP تا نقطه گسیختگی رفتار خطی از خود نشان می‌دهند که این امر می‌تواند سبب افزایش سختی و مقاومت نهایی سازه شود [۲۰ و ۲۱].

دیوار برشی فولادی (SSW)<sup>۱</sup> شبیه یک تیر ورق است که به صورت قائم در تمام ارتفاع ساختمان قرار داده شده است. استفاده از دیوار برشی فولادی به علت سختی و شکل‌پذیری بالا و پایداری حلقه‌های هیستریزیس به عنوان سیستم مقاوم لرزه‌ای در تمام دنیا در حال افزایش است [۱]. تعداد زیادی از محققان در جهان مثل Driver [۲ و ۳]، Elgaaly [۴]، Astaneh-Asl [۵ و ۶] و Sabouri-Ghomi و همکارانش [۷ و ۸]، تمرکز تحقیقاتشان را بر روی رفتار دیوار برشی فولادی قرار داده‌اند و بررسی‌های تئوری و آزمایشگاهی فراوانی انجام داده‌اند. سختی، شکل‌پذیری و جذب انرژی مناسب دیوارهای برشی فولادی باعث شده است تا به عنوان یک سیستم باربر جانبی کارآمد مورد استفاده قرار گیرد. در رابطه با سه پارامتر ذکر شده به عنوان پارامترهای لرزه‌ای یک سیستم باربر جانبی، نیز، محققین زیادی به مطالعه و پژوهش پرداختند [۹-۱۴]. اساس ایده دیوار برشی فولادی استفاده از رفتار پس‌کمانشی ورق می‌باشد که تنش زیادی به ستون‌ها وارد می‌کند بنابراین برای جلوگیری از تغییر شکل‌های بزرگ ستون و فروریختن سازه باید از ستون‌های قوی استفاده کرد که این امر موجب غیراقتصادی شدن سیستم می‌شود [۳]. محققین برای رفع این مشکل پیشنهاداتی را ارائه کردند. Lu و Xue برای اولین بار در یک تحقیق عددی در سال ۱۹۹۴ [۱۵] شکل دیوار برشی فولادی را طوری در نظر گرفتند که لبه‌های ورق دیوار آزاد بوده و به ستون‌ها متصل نشود و بدین ترتیب میدان کشش از ورق به ستون‌ها منتقل نگردد. آن‌ها



شکل آزمایشگاهی (ب)

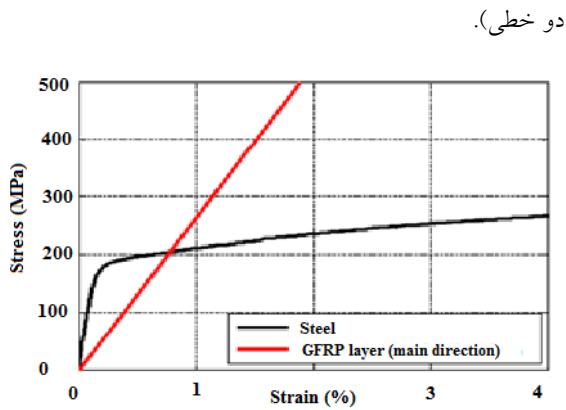


شکل شماتیک (الف)

شکل ۳- شکل دیوار برشی فولادی نیمه‌مقید Moharrami و همکارانش [۱۸]

فولادی نیمه‌مقید مرکب با الیاف (CSSSSW)<sup>۵</sup> می‌پردازد و در کنار آن تأثیر ضخامت ورق فولادی، استفاده از فولاد با تنش تسلیم پایین (LYP)<sup>۶</sup>، ضخامت الیاف پلیمری و جهت قرار

برای بهبود رفتار دیوار برشی فولادی نیمه‌مقید می‌توان از الیاف پلیمری شیشه (GFRP)<sup>۴</sup> استفاده کرد. این مقاله با کمک نرم‌افزار ABAQUS به بررسی پارامترهای لرزه‌ای دیوار برشی



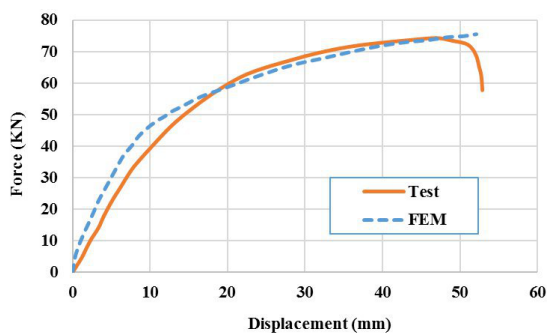
شکل ۲- مقایسه نمودار تنش- کرنش فولاد و الیاف [۲۱]

### ۲-۲- روش مطالعه

برای مدل کردن آنالیز الاستیک غیرخطی المان محدود، از نرم‌افزار ABAQUS نسخه (6.5.1) [۲۳] استفاده شده است. برای مدل کردن ورق، تیر و ستون از المان Solid از نوع سه بعدی ۱۰ گرهی (C3D10) و برای مدل کردن لایه‌های GFRP از المان S4R (المان پوسته‌ای ۴ گره‌ای با انتگرال کاهش یافته) استفاده شد.

### ۲-۳- صحت‌سنجی مدل

به منظور صحت‌سنجی نتایج بدست آمده از نرم‌افزار، این نتایج با نتایج نمونه ساخته شده توسط محرمی در مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن که در شکل (۱) نشان داده شده است مورد مقایسه قرار گرفته است (شکل (۳)). همانطور که از شکل (۳) پیداست، سازگاری بسیار مناسبی بین نتایج بدست آمده برقرار است.



شکل ۳- مقایسه منحنی نیرو-جابجایی به دست آمده از آزمایش [۱۸] با نتایج مدل المان محدود

در جدول (۲) مشخصات هندسی و در جدول (۳) مشخصات مکانیکی مدل مورد آزمایش توسط محرمی و همکاران ارائه شده است.

گیری لایه‌ها را نیز مورد بررسی قرار می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد استفاده از فولاد LYP در سیستم پیشنهادی مناسب بوده و آن را به سمت شکل‌پذیری و جذب انرژی بالاتر سوق می‌دهد، به علاوه افزایش ضخامت ورق فولادی بیش از افزایش تنش تسلیم فولاد در پارامترهای لرزه‌ای مؤثر است. همچنین با افزایش ضخامت لایه‌های GFRP تا حد بهینه می‌توان ظرفیت برشی سیستم و شکل‌پذیری آن را افزایش داد.

## ۲- تحلیل عددی

### ۲-۱- فرضیات اساسی در تحلیل

مدل‌سازی‌های انجام شده برای بررسی تأثیر ضخامت و تنش تسلیم ورق و همچنین تأثیر ضخامت و جهت قرارگیری الیاف در سیستم CSSSW انجام شده است.

برای تقویت کلیه سیستم‌ها در هر سمت ورق از تعداد ۵ لایه ۱ میلیمتری الیاف پلیمری در فواصل یکسان در هر یک از راستاهای قطری ورق استفاده شده است. مشخصات مکانیکی الیاف پلیمری در مدل‌های المان محدود در جدول (۱) ذکر شده و نمودار تنش- کرنش آن‌ها در شکل (۲) نشان داده شده است.

جدول ۱- مشخصات مکانیکی الیاف پلیمری شیشه (GFRP) [۲۱]

$T_y$	$T_x$	$G_{23}$	$G_{13}$ و $G_{12}$	$E_y$	$E_x$
MPa	MPa	MPa	MPa	GPa	GPa
۲۳	۵۳۷	۳۴۲۵	۵۶۰۸	۷/۰۷	۲۶/۴۹

\*  $E_y$  و  $E_x$  به ترتیب مدول الاستیسیته کششی الیاف در جهت  $x$  و  $y$  می‌باشند،  $G_{12}$ ،  $G_{13}$  و  $G_{23}$  به ترتیب مدول الاستیسیته برشی در صفحات  $xy$ ،  $xz$  و  $yz$  هستند و  $T_x$  و  $T_y$  بیانگر مقاومت کششی در جهت  $x$  و  $y$  می‌باشند.

در تحلیل‌های پوش آور رفتار الیاف پلیمری به صورت لایه-ای و کامپوزیت در نظر گرفته می‌شود. همچنین به جهت ساده‌سازی مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار، فرضیات زیر در نظر گرفته شده است:

- ۱- رفتار لایه‌های GFRP الاستیک خطی در نظر گرفته می‌شود.
- ۲- هیچ لغزشی در محل چسبندگی بین لایه‌های GFRP و فولاد وجود ندارد.
- ۳- الیاف پلیمری و ماده چسبنده در مدل المان محدود، هر دو به عنوان یک‌لایه در نظر گرفته می‌شوند.
- ۴- از تئوری فون مایز (Von Misses) به دلیل دقت بالا در مدل‌سازی‌ها استفاده شده است [۲۱].
- ۵- از حرکت خارج از صفحه ستون‌ها در تمامی مدل‌ها جلوگیری شده است.
- ۶- فولاد مورد استفاده دارای رفتار غیرخطی است (رفتار دو



جدول ۲- مشخصات مکانیکی اعضای فولادی در آزمایش [۱۸]

المان‌ها	مدول الاستیسته GPa	تنش تسلیم MPa	تنش نهایی MPa
تیر	۲۰۰	۳۶۰	۴۵۰
ستون اصلی	۲۰۰	۳۶۰	۴۵۰
ستون فرعی	۲۰۰	۳۶۰	۴۵۰
ورق	۲۰۰	۲۴۰	۳۰۰

جدول ۳- مشخصات هندسی اعضای فولادی در آزمایش [۱۸]

المان	ارتفاع جان (h) mm	پهنای بال (b) mm	ضخامت بال (t <sub>f</sub> ) mm	ضخامت جان (t <sub>w</sub> ) mm
تیر	۲۴۰	۱۲۰	۹/۸	۶/۲
ستون اصلی	۱۶۰	۸۲	۷/۴	۵
ستون فرعی	۱۲۰	۵۵	۹	۷

#### ۲-۴- مدل‌سازی‌های انجام شده

نمونه ساخته شده توسط محرمی و همکارانش به عنوان مدل اولیه (S) در نظر گرفته شد. در این مقاله سعی شده است تا از خاصیت بالا بودن مقاومت کششی نهایی و همچنین پایین بودن مدول الاستیسته الیاف در مقایسه با فولاد استفاده و از این مواد به عنوان عضو کمکی در کنار ورق فولادی برای تحمل بارهای جانبی استفاده شود. همچنین تأثیر این تسلیم در ضخامت‌های متغیر ورق و الیاف، تنش‌های متفاوت ورق فولادی و طرز قرارگیری الیاف نیز مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور مدل‌سازی‌هایی طبق جدول (۴) انجام شده است.

#### ۲-۵- تحلیل نتایج

نتایج بدست آمده برای مدل‌های مختلف که طبق جدول (۴) ساخته شده‌اند در جدول (۵) ارائه شده است. نتایج برای ورق با ضخامت و تنش تسلیم متفاوت با و بدون الیاف و همچنین تأثیر ضخامت و جهت قرارگیری الیاف بر روی مقاومت و شکل‌پذیری دیوارهای برشی فولادی نیمه‌مقید در لبه‌ها ارائه شده‌اند. در این جدول‌ها زاویه قرارگیری الیاف به صورت صفر درجه (افقی)، ۹۰ درجه (عمودی) و ۴۵ درجه است که مدل آن‌ها در شکل (۴) نشان داده شده است.

تأثیر تغییرات تنش تسلیم ورق بر مقاومت نهایی، جذب انرژی و شکل‌پذیری به ترتیب در شکل‌های (۵)، (۶) و (۷) نشان داده شده‌اند. از شکل (۵) می‌توان فهمید که با افزایش تنش تسلیم در ورق، مقاومت نهایی به صورت خطی با شیب ثابت افزایش می‌یابد (هر چه تنش تسلیم ورق بیشتر می‌شود مقاومت

نهایی آن نیز بیشتر می‌شود) و با مسلح کردن ورق با الیاف این روند تغییر نمی‌کند و شیب مانند قبل ثابت می‌ماند ولی تسلیم با افزایش مقاومت کششی سیستم سبب می‌شود مقادیر مقاومت نهایی نظیر به نظیر برای هر مدل به طور میانگین ۵۹٪ افزایش یابند. شکل (۶) بیانگر این مطلب است که با افزایش تنش تسلیم ورق، تأثیر تغییر انرژی جذب شده همانند تغییر در مقاومت نهایی بوده و با افزایش تنش تسلیم در ورق، انرژی جذب شده به صورت خطی با شیب ثابت، افزایش می‌یابد و با مسلح کردن ورق با الیاف این روند تکرار می‌شود و شیب مانند قبل ثابت می‌ماند ولی تسلیم سبب می‌شود با افزایش انرژی ورق و نه قاب، مقادیر انرژی جذب شده نظیر به نظیر برای هر مدل به طور میانگین ۴۰٪ افزایش یابد. شکل (۷) نشان می‌دهد که با افزایش تنش تسلیم در ورق، شکل‌پذیری به صورت خطی با شیب ثابت کاهش می‌یابد و با مسلح کردن ورق با الیاف این روند تکرار می‌شود (اعداد روی شکل‌ها، نام مدل‌ها هستند که در جدول (۴) مشخص شده‌اند).

نتایج مربوط به تغییر ضخامت ورق بر سه پارامتر مقاومت نهایی، جذب انرژی و شکل‌پذیری در شکل‌های (۸)، (۹) و (۱۰) نشان داده شده‌اند. شکل (۸) نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت ورق مقاومت نهایی به صورت خطی با شیب ثابت افزایش می‌یابد. در مدل‌های مسلح شده نیز با افزایش ضخامت ورق مقاومت نهایی افزایش می‌یابد با این تفاوت که در این حالت شیب این افزایش به ازای افزایش ضخامت ورق، ثابت نیست و با اضافه شدن ضخامت ورق از ۱ به ۲ میلیمتر، جهش چشمگیری در افزایش مقاومت در مدل‌های مسلح شده مشاهده می‌شود. شکل (۹) نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت ورق انرژی جذب شده افزایش می‌یابد و با افزایش ضخامت ورق از ۴ میلیمتر به ۵ میلیمتر، تأثیر افزایش ضخامت در افزایش انرژی جذب شده کاهش می‌یابد، به عبارت دیگر با افزایش ضخامت از حد بهینه، تأثیر این پارامتر در افزایش انرژی جذب شده کاهش می‌یابد. در مدل‌های مسلح شده نیز با افزایش ضخامت، انرژی جذب شده افزایش می‌یابد با این تفاوت که به ازای افزایش ضخامت ورق از ۱ به ۲ میلیمتر جهش چشمگیری در افزایش انرژی جذب شده در مدل‌های مسلح شده مشاهده می‌شود. همچنین در مدل‌های مسلح شده روند توضیح داده شده در افزایش ضخامت از ۴ میلیمتر به ۵ میلی‌متر ملاحظه می‌گردد و در این حالت با کاهش نسبت ضخامت الیاف به ضخامت ورق، تأثیر افزایش ضخامت در افزایش انرژی جذب شده کاهش می‌یابد، به عبارت دیگر با افزایش ضخامت از حد بهینه،



با افزایش ضخامت ورق از ۲ به ۳ و از ۳ به ۴ میلیمتر، تقریباً شکل‌پذیری ثابت می‌ماند و با افزایش ضخامت از ۴ به ۵ میلیمتر کاهش شکل‌پذیری مشاهده می‌شود. با تسلیح ورق به کمک الیاف این روند تکرار می‌شود با این تفاوت که شکل‌پذیری مدل‌ها به طور میانگین ۱۵٪ کاهش می‌یابد.

تأثیر این پارامتر در افزایش انرژی جذب شده کاهش می‌یابد. با انجام مدل‌سازی‌های بیشتر می‌توان این نسبت بهینه را پیدا کرد. شکل (۱۰) نشان می‌دهد که تغییر ضخامت ورق و افزایش تدریجی آن تأثیر یکنواختی در شکل‌پذیری ندارد و با افزایش ضخامت از ۱ به ۲ میلیمتر شکل‌پذیری افزایش می‌یابد،

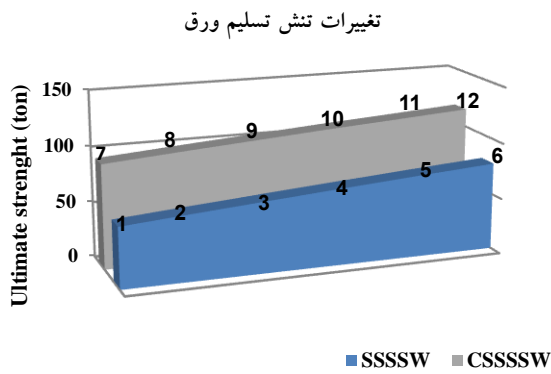
جدول ۴- مشخصات مدل‌های ساخته شده

ضخامت الیاف پلیمری mm	زاویه قرارگیری الیاف*		ضخامت ورق فولادی mm	تنش تسلیم ورق فولادی MPa	نام مدل	
	زیر ورق	روی ورق				
---	---	---	۱۰۰	۲	S-۱۰۰-۲	۱
---	---	---	۱۳۰	۲	S-۱۳۰-۲	۲
---	---	---	۱۶۰	۲	S-۱۶۰-۲	۳
---	---	---	۱۸۰	۲	S-۱۸۰-۲	۴
---	---	---	۲۱۰	۲	S-۲۱۰-۲	۵
---	---	---	۲۴۰	۲	S-۲۴۰-۲	۶
۵	-۴۵,۴۵	-۴۵,۴۵	۱۰۰	۲	S-۱۰۰-۲-R	۷
۵	-۴۵,۴۵	-۴۵,۴۵	۱۳۰	۲	S-۱۳۰-۲-R	۸
۵	-۴۵,۴۵	-۴۵,۴۵	۱۶۰	۲	S-۱۶۰-۲-R	۹
۵	-۴۵,۴۵	-۴۵,۴۵	۱۸۰	۲	S-۱۸۰-۲-R	۱۰
۵	-۴۵,۴۵	-۴۵,۴۵	۲۱۰	۲	S-۲۱۰-۲-R	۱۱
۵	-۴۵,۴۵	-۴۵,۴۵	۲۴۰	۲	S-۲۴۰-۲-R	۱۲
---	---	---	۲۴۰	۱	S-۲۴۰-۱	۱۳
---	---	---	۲۴۰	۲	S-۲۴۰-۲	۶
---	---	---	۲۴۰	۳	S-۲۴۰-۳	۱۴
---	---	---	۲۴۰	۴	S-۲۴۰-۴	۱۵
---	---	---	۲۴۰	۵	S-۲۴۰-۵	۱۶
۵	-۴۵,۴۵	-۴۵,۴۵	۲۴۰	۱	S-۲۴۰-۱-R	۱۷
۵	-۴۵,۴۵	-۴۵,۴۵	۲۴۰	۲	S-۲۴۰-۲-R	۱۲
۵	-۴۵,۴۵	-۴۵,۴۵	۲۴۰	۳	S-۲۴۰-۳-R	۱۸
۵	-۴۵,۴۵	-۴۵,۴۵	۲۴۰	۴	S-۲۴۰-۴-R	۱۹
۵	-۴۵,۴۵	-۴۵,۴۵	۲۴۰	۵	S-۲۴۰-۵-R	۲۰
---	---	---	۲۴۰	۲	S-۲۴۰-۲	۶
۵	۰	۹۰	۲۴۰	۲	S-V-H-۵-R	۲۱
۵	۴۵	۴۵	۲۴۰	۲	S-/-/-۵-R	۲۲
۵	۰,۹۰	۰,۹۰	۲۴۰	۲	S-VH-VH-۵-R	۲۳
۵	-۴۵,۴۵	-۴۵,۴۵	۲۴۰	۲	S-۲۴۰-۲-R	۱۲
۱	-۴۵,۴۵	-۴۵,۴۵	۲۴۰	۲	S-X-X-۱-R	۲۴
۱/۵	-۴۵,۴۵	-۴۵,۴۵	۲۴۰	۲	S-X-X-۱/۵-R	۲۵
۲	-۴۵,۴۵	-۴۵,۴۵	۲۴۰	۲	S-X-X-۲-R	۲۶
۲/۵	-۴۵,۴۵	-۴۵,۴۵	۲۴۰	۲	S-X-X-۲/۵-R	۲۷
۳	-۴۵,۴۵	-۴۵,۴۵	۲۴۰	۲	S-X-X-۳-R	۲۸

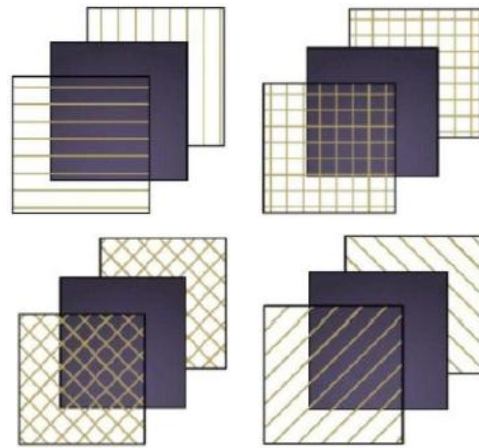
جدول ۵- نتایج بدست آمده

شکل پذیری	انرژی جذب شده kJ	مقاومت نهایی ton	سختی اولیه ton/mm	توضیحات	نام مدل		
۲۳/۷۰	۴۴/۵۹	۵۴/۴۵	۱۱/۰۵	تنش تسلیم ۱۰۰ MPa	تغییر تنش تسلیم ورق با ضخامت ثابت (بدون الیاف)	S-۱۰۰-۲	۱
۲۰/۲۸	۴۹/۹۰	۵۹/۵۱	۱۱/۰۵	تنش تسلیم ۱۳۰ MPa		S-۱۳۰-۲	۲
۱۸/۴۵	۵۵/۱۰	۶۴/۴۵	۱۱/۰۵	تنش تسلیم ۱۶۰ MPa		S-۱۶۰-۲	۳
۱۶/۹۵	۶۰/۲۰	۶۹/۲۴	۱۱/۰۵	تنش تسلیم ۱۸۰ MPa		S-۱۸۰-۲	۴
۱۶/۳۹	۶۵/۲۰	۷۳/۸۳	۱۱/۰۵	تنش تسلیم ۲۱۰ MPa		S-۲۱۰-۲	۵
۱۵/۰۳	۶۷/۹۵	۷۸/۲۳	۱۱/۰۵	تنش تسلیم ۲۴۰ MPa		S-۲۴۰-۲	۶
۱۷/۱۳	۷۰/۰	۹۳/۴۴	۱۲/۴۲	تنش تسلیم ۱۰۰ MPa	تغییر تنش تسلیم ورق با ضخامت ثابت (با الیاف)	S-۱۰۰-۲-R	۷
۱۵/۷۰	۷۵/۸	۹۸/۳۷	۱۲/۴۲	تنش تسلیم ۱۳۰ MPa		S-۱۳۰-۲-R	۸
۱۴/۸۴	۸۱/۳۳	۱۰۳/۰۹	۱۲/۴۲	تنش تسلیم ۱۶۰ MPa		S-۱۶۰-۲-R	۹
۱۴/۰۴	۸۶/۷۴	۱۰۷/۷۳	۱۲/۴۲	تنش تسلیم ۱۸۰ MPa		S-۱۸۰-۲-R	۱۰
۱۳/۰۴	۹۱/۶۶	۱۱۱/۹۲	۱۲/۴۲	تنش تسلیم ۲۱۰ MPa		S-۲۱۰-۲-R	۱۱
۱۲/۴۰	۹۶/۶۷	۱۱۶/۲۱	۱۲/۴۲	تنش تسلیم ۲۴۰ MPa		S-۲۴۰-۲-R	۱۲
۱۳/۴۶	۴۵/۹۸	۵۵/۴۲	۶/۳۹	ضخامت ورق ۱ mm	تغییر ضخامت ورق با تنش تسلیم ثابت (بدون الیاف)	S-۲۴۰-۱	۱۳
۱۵/۳۰	۶۷/۹۵	۷۸/۲۳	۱۱/۰۵	ضخامت ورق ۲ mm		S-۲۴۰-۲	۱۴
۱۴/۸۵	۸۳/۸۷	۹۵/۳۱	۱۲/۲۳	ضخامت ورق ۳ mm		S-۲۴۰-۳	۱۵
۱۴/۶۴	۱۰۰/۲۲	۱۱۰/۴۷	۱۵/۳۲	ضخامت ورق ۴ mm		S-۲۴۰-۴	۱۶
۱۲/۲۷	۱۰۲/۴۸	۱۲۲/۵۴	۱۴/۰۲	ضخامت ورق ۵ mm		S-۲۴۰-۵	۱۷
۱۰/۴۸	۳۶/۶۹	۸۶/۲۸	۷/۰۲	ضخامت ورق ۱ mm		S-۲۴۰-۱-R	۱۸
۱۲/۴۰	۹۶/۶۷	۱۱۶/۲۱	۱۲/۴۲	ضخامت ورق ۲ mm	تغییر ضخامت ورق با تنش تسلیم ثابت (با الیاف)	S-۲۴۰-۲-R	۱۹
۱۲/۶۱	۱۰۳/۸۲	۱۲۴/۶۸	۱۲/۵۹	ضخامت ورق ۳ mm		S-۲۴۰-۳-R	۲۰
۱۳/۰۲	۱۱۵/۵۷	۱۳۵/۱۷	۱۵/۶۵	ضخامت ورق ۴ mm		S-۲۴۰-۴-R	۲۱
۱۱/۲۹	۱۱۷/۲۴	۱۴۳/۱۷	۱۴/۷۳	ضخامت ورق ۵ mm		S-۲۴۰-۵-R	۲۲
۱۵/۰۳	۶۷/۹۵	۷۸/۲۳	۱۱/۰۵	ندارد		S-۲۴۰-۲	۲۳
۱۳/۸۰	۸۰/۵۹	۹۳/۲۳	۱۱/۴۱	یک سمت افقی یک سمت عمودی		S-V-H-۵-R	۲۴
۱۱/۸۰	۸۸/۳۴	۱۰۹/۵۳	۱۱/۰۶	یک سمت ۴۵ درجه سمت دیگر ۴۵-	تغییر جهت قرارگیری الیاف با ضخامت ثابت	S-/-/۵-R	۲۵
۱۳/۳۰	۸۶/۸۶	۹۹/۸۵	۱۲/۰۲	شطرنجی (افقی و عمودی) هر دو سمت		S-VH-VH-۵-R	۲۶
۱۲/۴۰	۹۶/۶۷	۱۱۶/۲۱	۱۲/۴۲	شطرنجی (۴۵ و ۴۵-) هر دو سمت		S-۲۴۰-۲-R	۲۷
۱۱/۹	۷۴/۳۱	۹۰/۰۹	۱۲/۴۲	ضخامت الیاف ۱ mm	تغییر ضخامت الیاف با جهت قرارگیری ثابت	S-X-X-۱-R	۲۸
۱۱/۴	۷۷/۲۷	۹۵/۰۸	۱۲/۴۲	ضخامت الیاف ۱/۵ mm		S-X-X-۱/۵-R	۲۹
۱۱/۲	۸۰/۰۷	۹۹/۱۸	۱۲/۴۲	ضخامت الیاف ۲ mm		S-X-X-۲-R	۳۰
۱۰/۵	۸۴/۲۱	۱۰۵/۲۸	۱۲/۴۲	ضخامت الیاف ۲/۵ mm		S-X-X-۲/۵-R	۳۱
۹/۹	۸۷/۳۳	۱۰۹/۴۷	۱۲/۴۲	ضخامت الیاف ۳ mm		S-X-X-۳-R	۳۲

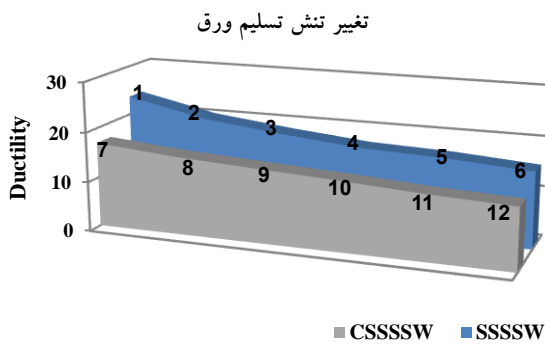




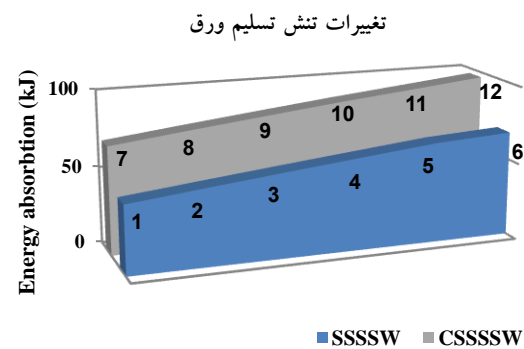
شکل ۵- تأثیر تغییرات تنش تسلیم ورق بر مقاومت نهایی سیستم در حالت تقویت نشده (SSSSW) و تقویت شده با الیاف (CSSSSW)



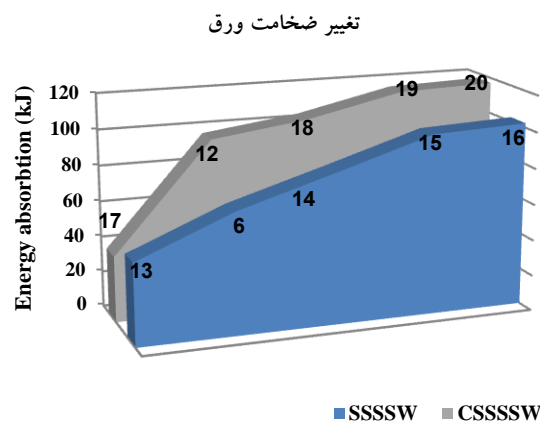
شکل ۴- جهت قرارگیری الیاف پلیمری شیشه (GFRP) در مدل‌ها



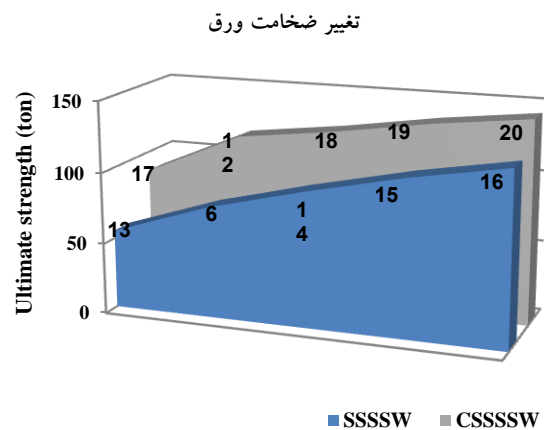
شکل ۷- تأثیر تغییرات تنش تسلیم ورق بر شکل‌پذیری سیستم در حالت تقویت نشده (SSSSW) و تقویت شده با الیاف (CSSSSW)



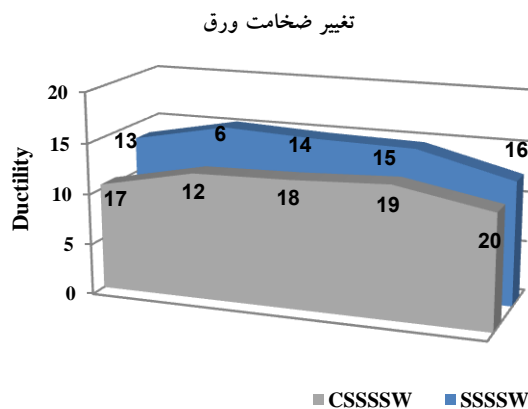
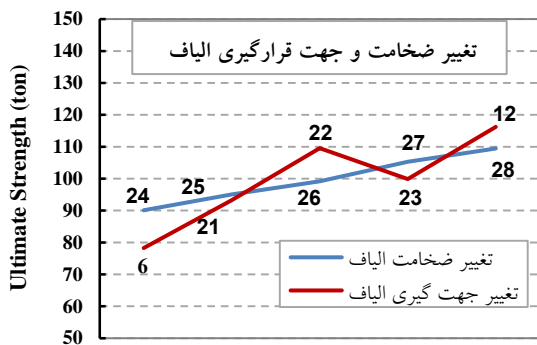
شکل ۶- تأثیر تغییرات تنش تسلیم ورق بر انرژی جذب شده سیستم در حالت تقویت نشده (SSSSW) و تقویت شده با الیاف (CSSSSW)



شکل ۹- تأثیر تغییرات ضخامت ورق بر انرژی جذب شده سیستم در حالت تقویت نشده (SSSSW) و تقویت شده با الیاف (CSSSSW)

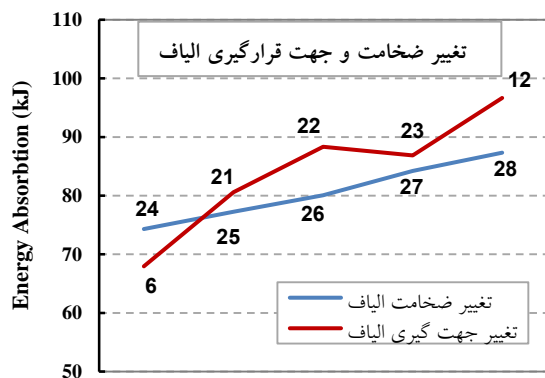


شکل ۸- تأثیر تغییرات ضخامت ورق بر مقاومت نهایی سیستم در حالت تقویت نشده (SSSSW) و تقویت شده با الیاف (CSSSSW)



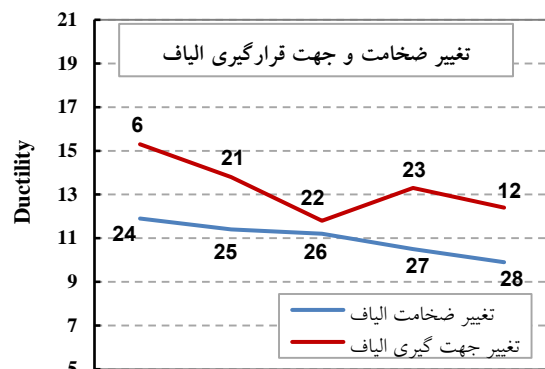
شکل ۱۱- تأثیر تغییرات ضخامت و جهت قرارگیری الیاف بر مقاومت نهایی سیستم تقویت شده با الیاف پلیمری شیشه (CSSSSW)

شکل ۱۰- تأثیر تغییرات ضخامت ورق بر شکل پذیری سیستم در حالت تقویت نشده (SSSSW) و تقویت شده با الیاف (CSSSSW)



شکل ۱۲- تأثیر تغییرات ضخامت و جهت قرارگیری الیاف بر انرژی جذب شده سیستم تقویت شده با الیاف پلیمری شیشه (CSSSSW)

نتایج بدست آمده برای تغییرات ضخامت الیاف و جهت قرارگیری آن در شکل‌های (۱۱)، (۱۲) و (۱۳) نشان داده شده است. شکل (۱۱) نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت الیاف مقاومت نهایی افزایش می‌یابد، با توجه به نمودار می‌توان دریافت که مقاومت نهایی در حالتی که طرز قرارگیری الیاف به شکل ضربدری (مدل ۱۲) می‌باشد، با توجه به اینکه راستای الیاف هم راستا با میدان کششی قطری بوده، بیشترین تأثیر را داشته و به ازای قرارگیری الیاف به شکل افقی در یک سمت و عمودی در سمت دیگر کمترین تأثیر را در بر خواهد داشت. شکل (۱۲) نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت الیاف با توجه به افزایش نسبت ضخامت الیاف به ضخامت ورق، انرژی جذب شده تقریباً به صورت خطی با شیب ثابت افزایش می‌یابد، با توجه به نمودار مشخص می‌شود که انرژی جذب شده در حالتی که طرز قرارگیری الیاف به شکل ضربدری (مدل ۱۲) می‌باشد با توجه به اینکه راستای الیاف هم راستا با میدان کشش قطری بوده بیشترین تأثیر را داشته و بهینه‌ترین حالت را دارد. شکل (۱۳) نشان می‌دهد که هر چند افزایش ضخامت الیاف در افزایش مقاومت نهایی و افزایش انرژی جذب شده مفید است، اما این تغییر در شکل‌پذیری تأثیر سو داشته و با افزایش ضخامت الیاف، شکل‌پذیری کاهش می‌یابد، لذا بهینه‌ترین ضخامت را باید با در نظر گرفتن همزمان مقاومت نهایی، انرژی جذب شده و شکل‌پذیری یافت. همچنین این نمودار نشان می‌دهد شکل‌پذیری در حالتی که طرز قرارگیری الیاف به شکل ضربدری (مدل ۱۲) می‌باشد کمترین مقدار را نسبت به حالت‌های دیگر قرارگیری الیاف داراست.



شکل ۱۳- تأثیر تغییرات ضخامت و جهت قرارگیری الیاف بر شکل‌پذیری سیستم تقویت شده با الیاف پلیمری شیشه (CSSSSW)

منحنی‌های بار-تغییر مکان برای دیوارهای برشی فولادی نیمه‌مقید برای حالت‌های تقویت نشده و تقویت شده، وقتی که ورق دارای ضخامت ثابت ولی تنش تسلیم‌های متفاوت است در شکل (۱۴) نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که

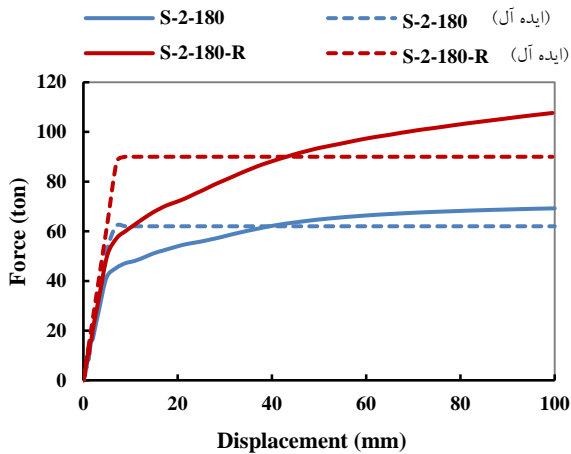




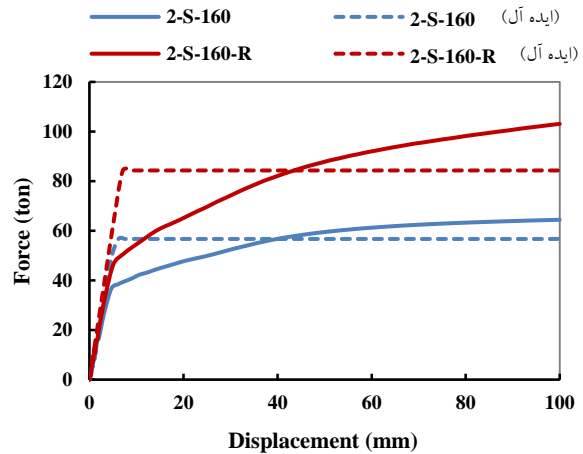
شکل (۱۶) منحنی‌های بار-تغییر مکان دیوار برشی فولادی نیمه‌مقید در حالت تقویت شده برای جهت‌های قرارگیری مختلف الیاف پلیمری شیشه و شکل (۱۷) منحنی‌های بار-تغییر مکان دیوار برشی فولادی نیمه‌مقید در حالت تقویت شده برای ضخامت‌های مختلف الیاف پلیمری شیشه را نشان می‌دهد.

برای ضخامت ثابت ورق، با افزایش تنش تسلیم هم در حالت تقویت شده و هم در حالت تقویت نشده، مقاومت و شکل‌پذیری سیستم در حال افزایش است.

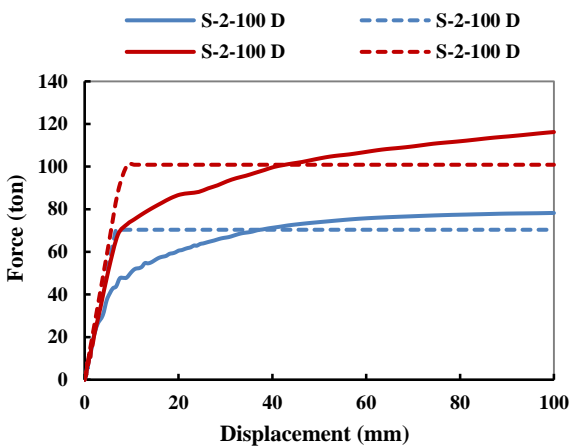
شکل (۱۵) منحنی‌های بار-تغییر مکان دیوار برشی فولادی نیمه‌مقید را در حالت‌های تقویت شده و تقویت نشده برای ورق با ضخامت‌های متغیر و تنش تسلیم ثابت نشان می‌دهد.



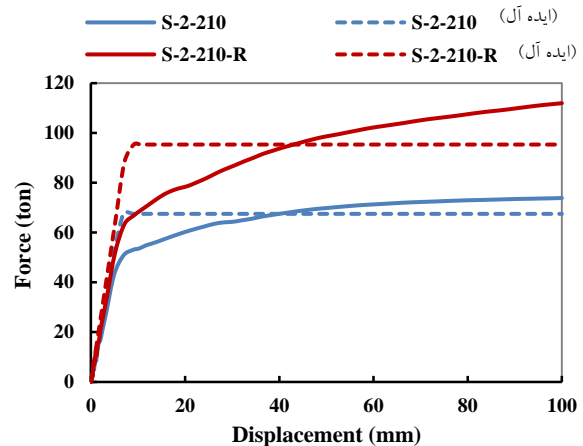
ب) ورق با تنش تسلیم ۱۸۰ MPa



الف) ورق با تنش تسلیم ۱۶۰ MPa

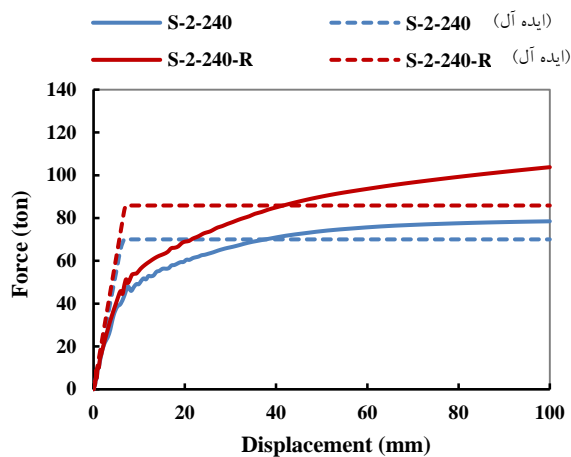


د) ورق با تنش تسلیم ۱۰۰ MPa

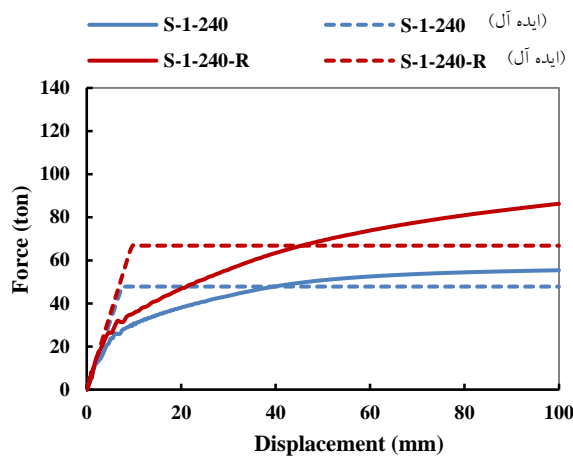


ج) ورق با تنش تسلیم ۲۱۰ MPa

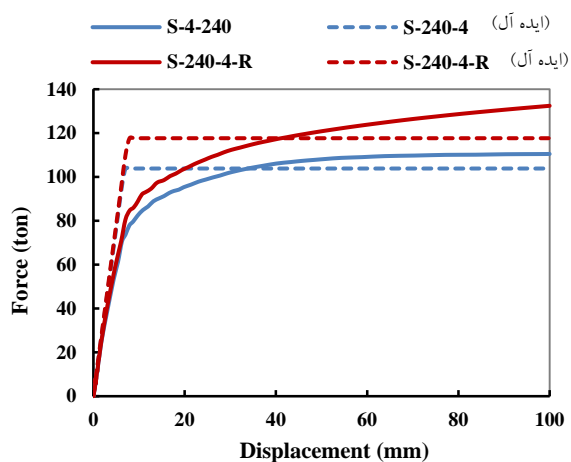
شکل ۱۴- منحنی بار-تغییر مکان دیوارهای برشی فولادی نیمه‌مقید با ورق با ضخامت ثابت ۲ میلیمتر و تنش تسلیم‌های متفاوت در حالت‌های تقویت شده و تقویت نشده



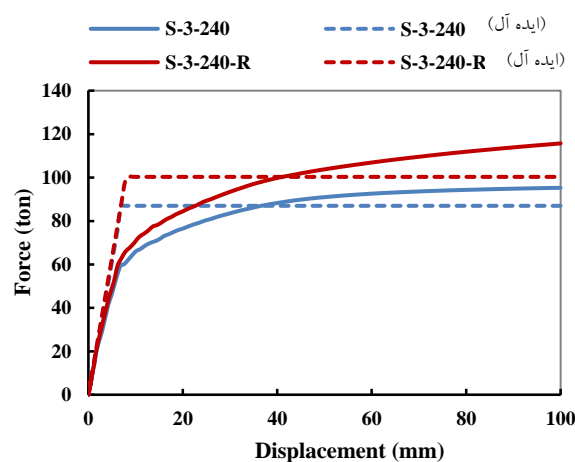
ب) ورق با ضخامت 2 mm



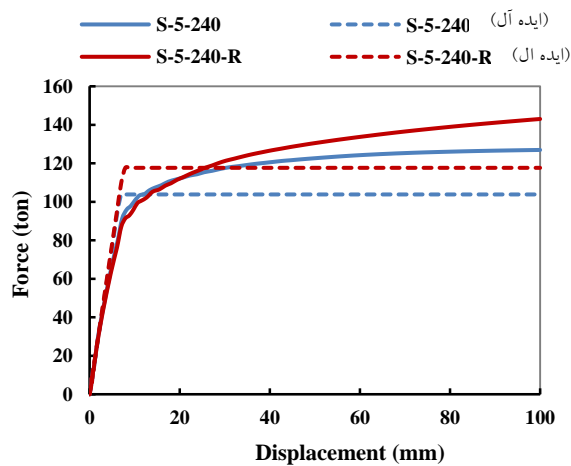
الف) ورق با ضخامت 1 mm



د) ورق با ضخامت 4 mm

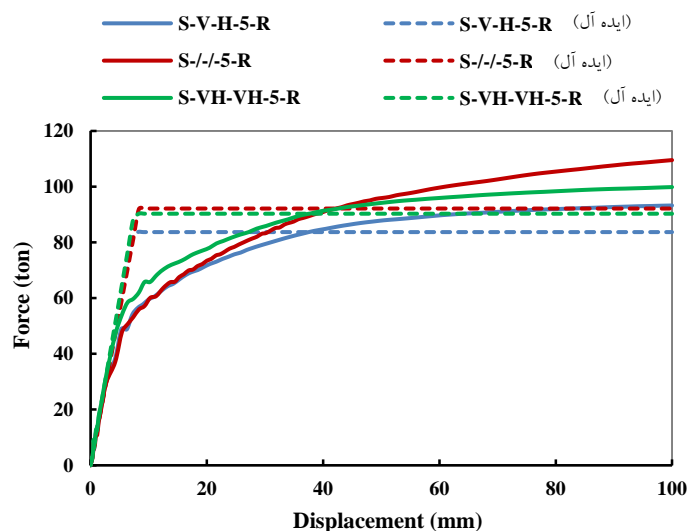


ج) ورق با ضخامت 3 mm

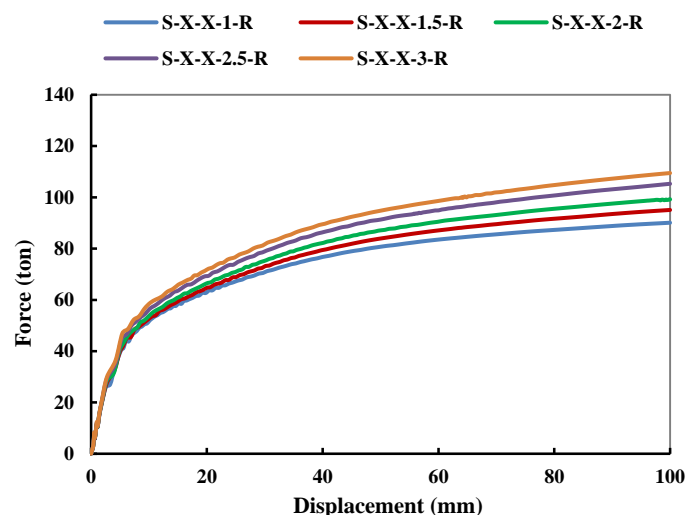


ه) ورق با ضخامت 5 mm

شکل ۱۵- منحنی بار-تغییر مکان دیوارهای برشی فولادی نیمه مقید با ورق با ضخامت‌های متغیر و تنش تسلیم ثابت ۲۴۰ مگاپاسکال در حالت‌های تقویت شده و تقویت نشده



شکل ۱۶- منحنی بار-تغییر مکان دیوار برشی فولادی نیمه مقید در حالت تقویت شده برای جهت‌های قرارگیری مختلف الیاف پلیمری شیشه



شکل ۱۷- منحنی بار-تغییر مکان دیوار برشی فولادی نیمه مقید در حالت تقویت شده برای ضخامت‌های مختلف الیاف پلیمری شیشه با جهت قرارگیری ثابت (ضربدری)

### ۳- نتیجه گیری

برای هر مدل به طور میانگین ۵۹٪ افزایش یافتند. با افزایش تنش تسلیم ورق، تأثیر تغییر انرژی جذب شده همانند تغییر در مقاومت نهایی بوده و با افزایش تنش تسلیم در ورق، انرژی جذب شده به صورت خطی با شیب ثابت افزایش می‌یابد (مساحت زیر منحنی بار-تغییر مکان افزایش یافته و باعث افزایش انرژی جذب شده می‌شود) و با مسلح کردن ورق با الیاف این روند تکرار می‌شود و شیب مانند قبل ثابت می‌ماند ولی تسلیم سبب می‌شود با افزایش جذب انرژی ورق و نه قاب، مقادیر انرژی جذب شده نظیر به نظیر برای هر مدل

در مقاله حاضر تأثیر تقویت دیوار برشی فولادی نیمه مقید با الیاف پلیمری شیشه در ضخامت‌های متغیر و جهت‌های قرارگیری مختلف و همچنین ضخامت و تنش تسلیم مختلف برای ورق دیوار مورد بررسی قرار گرفت. با افزایش تنش تسلیم در ورق، مقاومت نهایی به صورت خطی با شیب ثابت افزایش می‌یابد و با مسلح کردن ورق با الیاف این روند تغییر نمی‌کند و شیب مانند قبل ثابت می‌ماند ولی تسلیم با افزایش مقاومت کششی سیستم سبب می‌شود مقادیر مقاومت نهایی نظیر به نظیر

افزایش ضخامت الیاف در افزایش مقاومت نهایی و افزایش انرژی جذب شده مفید است، اما این تغییر در شکل پذیری تأثیر سو داشته و با افزایش ضخامت الیاف شکل پذیری کاهش می یابد، لذا بهینه ترین ضخامت را باید با در نظر گرفتن همزمان مقاومت نهایی، انرژی جذب شده و شکل پذیری یافت. شکل پذیری در حالتی که طرز قرارگیری الیاف به شکل ضربدری (مدل ۱۲) می باشد کمترین مقدار را نسبت به حالت های دیگر قرارگیری الیاف داراست.

#### ۹- مراجع

- [1] صبوری قمی، س. (۱۳۸۰)، "سیستم های مقاوم در برابر بارهای جانبی: مقدمه ای بر دیوارهای برشی فولادی"، چاپ اول، نشر انگیزه، تهران.
- [2] Driver, R.G., Kulak, G.L., Kennedy, D.J.L. and Elwi, A.E. (1998), "Cyclic Tests of Four-Story Steel Plate Shear Wall", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 124, No. 2, pp. 112-120.
- [3] Driver, R.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*, Vol. 124, No. 2, pp. 121-130.
- [4] Elgaaly, M., Caccese, V. and Du, C. (1993), "Post Buckling Behavior of Steel Plate Shear Walls under Cyclic Loads", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 119, No. 2, pp. 588-605.
- [5] Aastaneh-Asl, A. (2001), "Seismic Behavior and Design of Steel Shear Walls", *Steel tips report*.
- [6] Aastaneh-Asl, A. and Zhao, Q. (2000), "Cyclic Tests of Steel Shear Walls", *Research Report to Sponsor. Berkeley: Department of Civil and Eng. Univ. of California*.
- [7] Sabouri-Ghomi, S. and Roberts T.M. (1992), "Nonlinear Dynamic Analysis of Steel Plate Shear Walls Including Shear and Bending Deformations", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 14, No. 5, pp. 309-317.
- [8] Sabouri-Ghomi, S., Ventura, M. and Kharrazi, M. (2005), "Shear Analysis and Design of Ductile Steel Plate Walls", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 131, No. 6, pp. 878-889.
- [9] Hong-Gun, P., Jae-Hyuk, K., Sang-Woo, J., Won-Ki, K. and In-Rak, Ch. (2007), "Framed Steel Plate Wall Behavior under Cyclic Lateral Loading", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 133, No. 3, pp. 378-388.
- [10] Topkaya, C. and Atasoy, M. (2009), "Lateral Stiffness of Steel Plate Shear Walls Systems", *Thin-Walled Structures*, Vol. 47, No. 8, pp. 827-835.
- [11] Hyo Seon, P., Kappyo, H. and Ji Hyun S., (2002), "Drift Design of Steel-Frame Shear-Wall Systems for Tall Buildings", *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, Vol. 11, No. 1, pp. 35-49.
- [12] In-Rak, C. and Hong-Gun, P. (2008), "Ductility and Energy Dissipation Capacity of Shear-Dominated Steel Plate Walls", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 134, No. 9, pp. 1495-1507.
- [13] Lei, Xu. and Joel, M. (2006), "Strength and Stiffness Determination of Shear Wall Panels in Cold-Formed Steel Framing", *Thin-Walled Structures*, Vol. 44, No. 10, pp. 1084-1095.
- [14] Vieira, L.C. and Schafer, B. W. (2012), "Lateral Stiffness and Strength of Sheathing Braced Cold-Formed Steel Stud Walls", *Engineering Structures*, Vol. 37, pp. 205-213.

به طور میانگین ۴۰٪ افزایش یابد. همچنین با افزایش تنش تسلیم در ورق، شکل پذیری به صورت خطی با شیب ثابت کاهش می یابد و با مسلح کردن ورق با الیاف این روند تکرار می شود.

با افزایش ضخامت ورق، مقاومت نهایی به صورت خطی با شیب ثابت افزایش می یابد. در مدل های مسلح شده نیز با افزایش ضخامت ورق مقاومت نهایی افزایش می یابد با این تفاوت که در این حالت شیب این افزایش به ازای افزایش ضخامت ورق، ثابت نیست و با اضافه شدن ضخامت ورق از ۱ به ۲ میلیمتر، جهش چشمگیری در افزایش مقاومت در مدل های مسلح شده مشاهده می شود. با افزایش ضخامت ورق انرژی جذب شده افزایش می یابد و با افزایش ضخامت ورق از ۴ به ۵ میلیمتر با کاهش نسبت ضخامت الیاف به ضخامت ورق، تأثیر افزایش ضخامت در افزایش انرژی جذب شده کاهش می یابد، به عبارت دیگر با افزایش ضخامت از حد بهینه تأثیر این پارامتر در افزایش انرژی جذب شده کاهش می یابد. با انجام مدل سازی های بیشتر می توان این نسبت بهینه را پیدا کرد. در مدل های مسلح شده نیز با افزایش ضخامت، انرژی جذب شده افزایش می یابد با این تفاوت که به ازای افزایش ضخامت ورق از ۱ به ۲ میلیمتر جهش چشمگیری در افزایش انرژی جذب شده در مدل های مسلح شده مشاهده می شود. تغییر ضخامت ورق و افزایش تدریجی آن تأثیر یکنواختی در شکل پذیری ندارد و با افزایش ضخامت از ۱ به ۲ میلیمتر شکل پذیری افزایش می یابد، با افزایش ضخامت ورق از ۲ به ۳ و از ۳ به ۴ میلیمتر، تقریباً شکل پذیری ثابت می ماند و با افزایش ضخامت از ۴ به ۵ میلیمتر، کاهش شکل پذیری مشاهده می شود. با تسلیح ورق به کمک الیاف این روند تکرار می شود با این تفاوت که شکل پذیری مدل ها به طور میانگین ۱۵٪ کاهش می یابد.

با افزایش ضخامت الیاف مقاومت نهایی افزایش می یابد، با توجه به نمودارها مشخص شد که مقاومت نهایی در حالتی که طرز قرارگیری الیاف به شکل ضربدری (مدل ۱۲) می باشد، با توجه به اینکه راستای الیاف هم راستا با میدان کشش قطری بوده بیشترین تأثیر را داشته و به ازای قرارگیری الیاف به شکل افقی در یک سمت و عمودی در سمت دیگر، کمترین تأثیر را در بر خواهد داشت. با افزایش ضخامت الیاف با توجه به افزایش نسبت ضخامت الیاف به ضخامت ورق، انرژی جذب شده تقریباً به صورت خطی با شیب ثابت افزایش می یابد و در حالتی که طرز قرارگیری الیاف به شکل ضربدری (مدل ۱۲) می باشد بیشترین مقدار و بهینه ترین حالت را دارد. هر چند



Shear Walls”, Journal of Constructional Steel Research, Vol. 67, No. 6, pp. 1022-1030.

[20] Nateghi-Alahi, F. and Khazaei-Poul, M. (2013), “Analytical Study on the Strengthened Steel Plate Shear Walls by FRP Laminate”, The 2<sup>nd</sup> International Conference on Rehabilitation and Maintenance in Civil Engineering, Procedia Engineering 54, pp. 377-386.

[21] Nateghi-Alahi, F. and Khazaei-Poul, M., (2012) “Experimental Study of Steel Plate Shear Walls with Infill Plates Strengthened by GFRP Laminates”, Journal of Constructional Steel Research, Vol. 78, pp. 159-172.

[۲۲] جهانپور، ع. (۱۳۸۹)، “رفتارسنجی دیوارهای برشی فولادی نازک نیمه‌مقید در لبه‌ها”، رساله دکتری، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.

[23] ABAQUS/Standard Theory manual, version 6.5.1 Hibbit, (2004), Karlsson Sorenson, Inc (HKS).

[15] Xue, M. and Lu, L-W. (1994a), “Interaction of Steel Shear Panels with Surrounding Frame Members”, Proceedings of the Structural Stability Research Council Annual Technical Session, Bethlehem, PA, pp. 339-354.

[16] Driver, R.G., Gilbert, G.Y., Behbahanifard, M.R. and Hussain, M.A., (2001), “Recent Development and Future Directions in Steel Plate Shear Wall Research”, Proceeding of North American Steel Construction Conference, Ft. Lauderdale, FL, May 9-12.

[17] Habibneghad, A. (2004), “Behavior of Semi-Supported Thin Steel Shear Walls under Lateral Loads”, M.Sc. Thesis, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

[۱۸] محرمی، ح، حبیب‌نژاد، ا، مزروعی، ع. و علیزاده، ح. (۱۳۸۴)، “دیوارهای برشی فولادی نیمه نگهداری شده در لبه‌ها”، گزارش تحقیقاتی شماره ۱-۶۷۹، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، تهران.

[19] Jahanpour, A., Moharrami, H. and Aghakoochak, A. (2011), “Evaluation of Ultimate Capacity of Semi-Supported Steel

### پی نوشت

<sup>1</sup> Steel shear wall

<sup>2</sup> Semi-supported steel shear wall

<sup>3</sup> Fiber reinforced polymer

<sup>4</sup> Glass Fiber Reinforced Polymer

<sup>5</sup> Composite semi-supported steel shear wall

<sup>6</sup> Low yield point steel