

استفاده از صفحات کامپوزیتی پلیمری شیشه برای تقویت دیوار برشی فولادی نیمه - مقید

محمد علی برخورداری* (استاد)

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

سید علی اصغر حسین زاده (استادیار)

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه گلستان

میلاد فرخزاد (کارشناس ارشد)

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

مهندسی عمران شریف، (پاییز ۱۳۹۷)
دوری ۲ - ۳۴، شماره ۱/۳، ص. ۳۶-۲۷

پژوهش حاضر به ارزیابی تأثیر استفاده از الیاف پلیمری شیشه (GFRP) در بهبود مشخصه‌های رفتاری (مقاومت، سختی اولیه، شکل‌پذیری و جذب انرژی) سیستم دیوار برشی فولادی نیمه - مقید تحت بارگذاری‌های سیکلی و بارافزون (پوش‌آور) با استفاده از روش المان محدود پرداخته است. در سیستم‌های در نظر گرفته شده، تأثیر خصوصیات مختلف مدل‌ها، نظیر: حضور یا عدم حضور بارش و ابعاد آن، تغییر ضخامت ورق، تغییر نسبت طول دهانه به ارتفاع طبقه و تغییر ابعاد ستون‌های ثانویه لحاظ شده است. نتایج نشان می‌دهد که به دلیل استفاده از الیاف تقویتی، مقاومت ورق به ویژه در مدل‌های با ضخامت ورق کمتر، افزایش قابل توجهی دارد؛ در حالی که مقاومت قاب عمدتاً تغییر چندانی نمی‌کند. بنابراین، مقاومت و سختی اولیه سیستم تقویت شده افزایش می‌یابد. استفاده از الیاف تقویتی، شکل‌پذیری سیستم را به میزان کمی کاهش می‌دهد، لیکن موجب افزایش چشم‌گیری در جذب انرژی سیستم می‌شود.

واژگان کلیدی: دیوار برشی فولادی نیمه - مقید، الیاف GFRP، تحلیل غیرخطی، تحلیل چرخه‌ای، منحنی هیستریزس.

barkhordar@iust.ac.ir
ahosseinzade@gmail.com
miladfarokhzad@yahoo.com

۱. معرفی

وقوع زلزله و نحوه مقابله با آن همواره یکی از چالش‌های بشر در نواحی لرزه‌خیز دنیا محسوب می‌شود. یکی از سیستم‌های باربر لرزه‌ی که در سال‌های اخیر مورد توجه مهندسان عمران قرار گرفته است، سیستم دیوار برشی فولادی (SPSW)^۱ است. در سیستم دیوار برشی فولادی، ورق به اعضاء مرزی افقی (تیرها) و قائم (ستون‌ها) با استفاده از اتصال پیچی یا جوشی متصل می‌شود. مجموعه حاصل تشکیل یک سیستم دوگانه را می‌دهد که در آن ورق و قاب خمشی به صورت مشترک در مقابل بارهای لرزه‌ای ایفاء نقش می‌کنند. سیستم دیوار برشی فولادی، مزایای گسترده‌ای نظیر سختی و مقاومت قابل توجه، شکل‌پذیری مناسب و جذب انرژی بالا دارد که با داشتن آن‌ها، سیستم دیوار برشی فولادی در زلزله‌های بزرگی، نظیر کوبه^۲ و نورث ریج^۳ عملکرد تحسین‌برانگیزی از خود نشان داده است.^۱

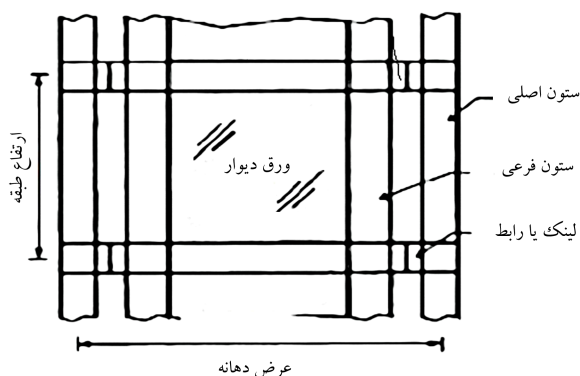
در گذشته، طراحی سیستم دیوار برشی فولادی به وقوع کماتش برشی در ورق‌ها محدود می‌شد و برای بالا بردن ظرفیت کماتشی ورق از سخت‌کننده یا ورق‌های ضخیم استفاده می‌شد که به دلیل افزایش هزینه‌های ساخت و اجرا در مقایسه با

سیستم رقیب دیوار برشی بتن‌آرمه، کاربرد سیستم دیوار برشی فولادی را غیراقتصادی می‌کرد. مطالعات در دهه‌های اخیر،^۴ نشان داد که وقوع کماتش برشی در ورق به معنای پایان ظرفیت باربری آن نیست و با وقوع کماتش در ورق، مکانیزم باربری از کماتش برشی به تشکیل نواحی کششی قطری تغییر می‌کند. کاربرد دیوار برشی فولادی با ورق نازک (بدون سخت‌کننده) و میانی طراحی آن، ابتدا در آیین‌نامه‌ی کانادا^۴ و سپس در آیین‌نامه‌ی طراحی لرزه‌ای آمریکا،^۵ و متمم آن،^۵ وارد شد. مشخصه‌های رفتاری سیستم‌های دیوار برشی فولادی که براساس آیین‌نامه طراحی شده‌اند، توسط برخی پژوهشگران،^۶ و همچنین رفتار لرزه‌ای آن‌ها،^۷ مطالعه شده است. طراحی دیوار برشی فولادی در آیین‌نامه‌های موجود به نوعی مطابق با اصول طراحی براساس ظرفیت انجام می‌شود. مطابق با اصول طراحی براساس ظرفیت، تیرها برای تحمل بیشینه تنش‌های ناشی از تسلیم ورق و ستون‌ها نیز برای تحمل بیشینه نیروی ناشی از تسلیم ورق و تشکیل مفصل‌های خمیری در انتهای تیرها طراحی می‌شوند. این موضوع سبب افزایش قابل توجه در ابعاد اعضاء قاب، به ویژه ستون‌ها در ساختمان‌های بلندمرتبه می‌شود و به اقتصاد طرح لطمه می‌زند. نتایج آزمایش‌های انجام شده،^۵ نشان می‌دهد که در صورت استفاده از مقاطع کوچک‌تر برای ستون‌ها، مقاومت و رفتار شکل‌پذیر سیستم با وقوع تسلیم، کماتش و با

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۵/۲/۶، اصلاحیه ۱۳۹۵/۶/۳۱، پذیرش ۱۳۹۵/۱۰/۴.

DOI: 10.24200/J30.2018.1406



شکل ۱. سیستم دیوار برشی فولادی پیشنهادی. [۸]

شده است، لیکن مطالعه‌ی خاصی که به بررسی تأثیر الیاف پلیمری در بهبود رفتار سیستم دیوار برشی فولادی نیمه - مقید پرداخته باشد، وجود ندارد.

در برخی مطالعات،^[۱۴، ۱۵] تأثیر استفاده از الیاف پلیمری شیشه (GFRP) در رفتار سیکلی دیوار برشی فولادی به صورت عددی و آزمایشگاهی و نیز تأثیر راستا و تعداد لایه‌های الیاف تقویتی در خصوصیات رفتاری سیستم مطالعه شده و نتایج نشان داده است که تقویت ورق به کمک الیاف پلیمری می‌تواند تأثیر قابل توجهی در افزایش مقاومت، سختی و جذب انرژی سیستم داشته باشد، اما شکل پذیری سیستم را تا حدی کاهش می‌دهد. نتایج به دست آمده همچنین نقش برجسته‌ی راستای الیاف را در رفتار سیستم مرکب نشان دادند و با توجه به آن‌ها، اگر راستای الیاف تقویتی در راستای حوزه‌ی کشش قطری باشد، بیشترین تأثیر را در رفتار سیستم خواهد گذاشت.

همچنین رفتار سیستم دیوار برشی فولادی تقویت شده با الیاف پلیمری کربنی (CFRP)^۷ به صورت عددی و آزمایشگاهی (۲۰۱۴) مطالعه شد و نتایج نشان داد که کاربرد الیاف پلیمری می‌تواند موجب افزایش سختی، مقاومت و جذب انرژی در سیستم شود و نیز زاویه‌ی قرارگیری الیاف می‌تواند نقش تعیین‌کننده‌ی در پارامترهای رفتاری سیستم مرکب داشته باشد.

پژوهش حاضر به ارزیابی تأثیر استفاده از الیاف پلیمری شیشه (GFRP) در بهبود مشخصه‌های رفتاری (مقاومت، سختی اولیه، شکل پذیری و جذب انرژی) سیستم دیوار برشی فولادی نیمه - مقید تحت بارگذاری‌های سیکلی^۸ و بارافزون (پوش‌آور)^۹ با استفاده از روش المان محدود پرداخته است. در ساختمان‌های فلزی استفاده از الیاف پلیمری شیشه‌ی (GFRP) در مقایسه با الیاف نوع کربنی (CFRP) به دلیل قیمت کمتر الیاف شیشه‌ی و امکان بروز واکنش و خوردگی گالوانیک بین الیاف نوع کربنی و فلز پایه برتری دارد.^[۱۵] در سیستم‌های در نظر گرفته شده، تأثیر خصوصیات مختلف مدل‌ها، نظیر: حضور یا عدم حضور بازشو و ابعاد آن، تغییر ضخامت ورق، تغییر نسبت طول دهانه به ارتفاع طبقه و تغییر ابعاد ستون‌های ثانویه نیز لحاظ شده است.

۲. روش مطالعه

۲.۱. مدل‌ها

در پژوهش حاضر، از نمونه‌ی یک طبقه‌ی دیوار برشی فولادی نیمه - مقید که توسط محرمی و همکاران در مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن آزمایش شده است (شکل ۲)،^[۸] به عنوان مدل اصلی یا اولیه (مدل S) در انجام مطالعات استفاده شده است که ابعاد ورق استفاده شده در آن، ۲۵۰۰×۲۲۰۰×۲ میلی‌متر بوده و همچنین برای ستون‌های اصلی و فرعی (ثانویه) و تیر طبقه نیز به ترتیب از مقاطع ۱۶×۲۱،



شکل ۲. نمونه‌ی آزمایش شده‌ی محرمی و همکاران.^[۲]

تغییر شکل قابل توجه در ستون‌ها تحت تأثیر قرار می‌گیرد. برای مرتفع کردن دغدغه‌ی مذکور، برخی پژوهشگران،^[۸] در حدود یک دهه‌ی پیش، سیستم دیوار برشی نیمه - مقید (SSSW)^۴ را پیشنهاد کردند (شکل ۱). در سیستم نیمه - مقید برای جلوگیری از انتقال تنش‌های کششی ورق به ستون‌های اصلی در دو سمت دیوار، ورق فقط در بخشی از طول دهانه‌ی دیوار (و نه در کل آن) استفاده و در دو سمت خود به ستون‌های ثانویه که در باربری ثقلی نقشی ندارند، متصل می‌شود. به این ترتیب، علاوه بر تفکیک نسبی سیستم‌های باربر ثقلی و لرزه‌ی، ابعاد ستون‌های اصلی در دو سمت دیوار برشی نیز کاهش می‌یابد. به ویژه، در مواردی که استفاده از بازشو در طول دهانه‌ی دیوار برشی فولادی ضرورت دارد (برای مطالعه‌ی رفتار سیستم‌های دیوار برشی فولادی با بازشوی تقویت شده می‌توان به برخی مطالعات،^[۹، ۱۰] مراجعه کرد) و یا در مقاوم‌سازی ساختمان‌های موجود، می‌توان به خوبی از مزایای سیستم جدید ذکر شده بهره برد. البته باید به این نکته توجه داشت که در صورت استفاده از سیستم نیمه - مقید در مقایسه با سیستم اولیه (کاملاً مقید) انتظار می‌رود به دلیل کاهش طول ورق، تا حدی از مقاومت، سختی و جذب انرژی سیستم جدید کاسته شود. نحوه‌ی طراحی و رفتار لرزه‌ی دیوارهای برشی فولادی نیمه - مقید قبلاً در برخی پژوهش‌ها بررسی شده است.^[۱۱، ۱۲]

با توجه به مطالعات پیشین، یک راهکار که برای جبران آثار ذکر شده پیشنهاد می‌شود، استفاده از پوشش بتنی بر روی ورق دیوار برشی فولادی است. نتایج برخی مطالعات،^[۱۳] نشان می‌دهد که استفاده از پوشش بتنی می‌تواند علاوه بر افزایش سختی و ظرفیت کماتنشی ورق فولادی، توزیع یکنواخت‌تر تنش‌ها در سطح ورق و گسترش ناحیه‌ی تسلیم قطری در پهنای بیشتری از سطح ورق را به دنبال داشته باشد. راهکار دوم، برای بهبود رفتار سیستم که اخیراً به آن توجه شده است،^[۱۴-۱۶] تقویت ورق با استفاده از الیاف پلیمری (FRP)^۵ است که در مقایسه با راهکار اول می‌تواند مزایای بیشتری را به لحاظ فضای قابل بهره‌برداری و سرعت و سهولت‌های اجرایی موجب شود. در دهه‌های اخیر، استفاده از صفحات کامپوزیتی پلیمری وارد صنعت ساخت و ساز ابنیه و همچنین مقاوم‌سازی ساختمان‌های موجود شده است. از مشخصات اصلی مواد پلیمری مذکور، مقاومت و سختی بسیار بالا، وزن کم و قابلیت حمل و نقل آسان، امکان برش در شکل‌های مختلف و مقاومت قابل توجه در مقابل خوردگی و عوامل محیطی است. با توجه به مزایای ذکر شده، امروزه استفاده از الیاف پلیمری به عنوان تقویت‌کننده علاوه بر ساختمان‌های بتن‌آرمه در ساختمان‌های فولادی نیز گسترش یافته است. به ویژه در زمینه‌ی سیستم دیوار برشی فولادی، مطالعات عددی و آزمایشگاهی معدودی در سال‌های اخیر توسط برخی پژوهشگران در زمینه‌ی کاربرد الیاف پلیمری در تقویت سیستم دیوار برشی فولادی نیز انجام

جدول ۱. مشخصات مدل‌های دیوار برشی فولادی نیمه - مقید بدون تقویت و تقویت شده با الیاف پلیمری شیشه (GFRP).

نام مدل اصلی بدون تقویت	ابعاد ورق فولادی ضخامت×طول×ارتفاع (mm)	نسبت طول به ارتفاع ورق	ابعاد بازشو طول×ارتفاع (mm)	درصد بازشو (%) (سطح بازشو/سطح ورق)	مقاطع ستون‌های فرعی	مدل تقویت شده‌ی نظیر
S	۲۵۰۰×۲۲۰۰×۲	۰٫۸۸	-	-	۲UNP۱۶۰	S-R
S-T۱	۲۵۰۰×۲۲۰۰×۱	۰٫۸۸	-	-	۲UNP۱۶۰	S-T۱R
S-T۳	۲۵۰۰×۲۲۰۰×۳	۰٫۸۸	-	-	۲UNP۱۶۰	S-T۳R
S-T۴	۲۵۰۰×۲۲۰۰×۴	۰٫۸۸	-	-	۲UNP۱۶۰	S-T۴R
S-T۵	۲۵۰۰×۲۲۰۰×۵	۰٫۸۸	-	-	۲UNP۱۶۰	S-T۵R
S-۰٫۵	۲۵۰۰×۱۲۵۰×۲	۰٫۵۰	-	-	۲UNP۱۶۰	S-۰٫۵R
S-۱٫۰	۲۵۰۰×۲۵۰۰×۲	۱٫۰۰	-	-	۲UNP۱۶۰	S-۱٫۰R
S-۱٫۵	۲۵۰۰×۳۷۵۰×۲	۱٫۵۰	-	-	۲UNP۱۶۰	S-۱٫۵R
S-۲٫۰	۲۵۰۰×۵۰۰۰×۲	۲٫۰۰	-	-	۲UNP۱۶۰	S-۲٫۰R
S-۲٫۵	۲۵۰۰×۶۲۵۰×۲	۲٫۵۰	-	-	۲UNP۱۶۰	S-۲٫۵R
S-U۱۰۰	۲۵۰۰×۲۲۰۰×۲	۰٫۸۸	-	-	۲UNP۱۰۰	S-U۱۰۰R
S-U۱۲۰	۲۵۰۰×۲۲۰۰×۲	۰٫۸۸	-	-	۲UNP۱۲۰	S-U۱۲۰R
S-U۱۴۰	۲۵۰۰×۲۲۰۰×۲	۰٫۸۸	-	-	۲UNP۱۴۰	S-U۱۴۰R
S-U۱۸۰	۲۵۰۰×۲۲۰۰×۲	۰٫۸۸	-	-	۲UNP۱۸۰	S-U۱۸۰R
S-O۲۰	۲۵۰۰×۲۲۰۰×۲	۰٫۸۸	۵۰۰×۴۴۰	۲۰	۲UNP۱۶۰	S-O۲۰R
S-O۳۰	۲۵۰۰×۲۲۰۰×۲	۰٫۸۸	۷۵۰×۶۶۰	۳۰	۲UNP۱۶۰	S-O۳۰R
S-O۴۰	۲۵۰۰×۲۲۰۰×۲	۰٫۸۸	۱۰۰۰×۸۸۰	۴۰	۲UNP۱۶۰	S-O۴۰R
S-O۵۰	۲۵۰۰×۲۲۰۰×۲	۰٫۸۸	۱۲۵۰×۱۱۰۰	۵۰	۲UNP۱۶۰	S-O۵۰R

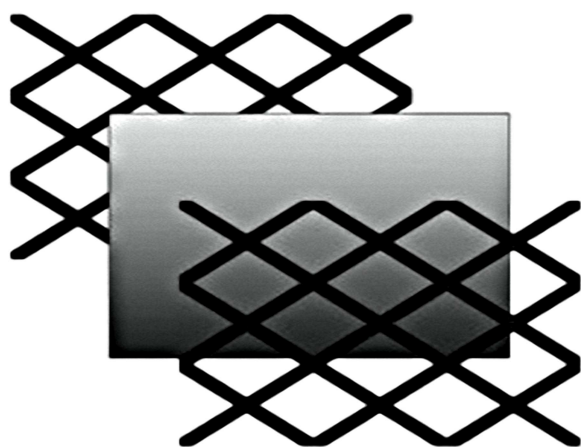
مقاطع تیرها (IPE۲۴۰) و ستون‌ها (۲IPE۱۶۰) در کلیه مدل‌ها مشابه است.

مدل ساخته شده از نمونه آزمایشگاهی محرمی و همکاران، [۸] که مبنای مطالعات پارامتریک در این تحقیق است.

بازشوها از نوع مستطیلی، بدون تقویت لبه‌یی و در مرکز ورق فرض شده است.

در مدل‌های تقویت شده از ۵ نوار به عرض ۱/۸ متر از الیاف در هر یک از دو سمت ورق در دو راستای قطری استفاده شده است؛

صرف‌نظر از تقویت‌ها، سایر مشخصات در مدل‌های تقویت شده و تقویت نشده نظیر یکسان است.



شکل ۳. نمای شماتیک از الگوی تقویت ورق با الیاف پلیمری کامپوزیتی.

UNP۱۶۰ و IPE۲۴۰ استفاده شده است. در نمونه‌ی مورد آزمایش، پایین ورق و ستون‌ها به صورت گیردار به زمین متصل شده است. همچنین برای جلوگیری از حرکت خارج از صفحه‌ی ورق، از حرکت تیر بالا و پایین ورق در جهت عمود بر صفحه‌ی ورق جلوگیری شده و اتصال ستون اصلی و فرعی به تیر و ورق به قاب محیطی از نوع گیردار (از طریق اتصال مستقیم اجزا به یکدیگر) بوده است. برای انجام مطالعات پارامتریک، در مدل‌های در نظر گرفته شده، ضخامت ورق بین ۲ تا ۵ میلی‌متر، طول ورق بین ۱۲۰۰ تا ۶۲۵۰ میلی‌متر (یعنی نسبت طول ورق به ارتفاع ۰٫۵ تا ۲٫۵)، مقطع ستون‌های فرعی بین پروفیل‌های ناودانی UNP۱۰۰ تا UNP۱۸۰ و درصد بازشو در مرکز ورق بین ۲۰ تا ۵۰ درصد سطح ورق متغیر فرض شد، درحالی که مقاطع ستون‌های اصلی (۲IPE۱۶۰) و تیر طبقه (IPE۲۴۰) و همچنین ارتفاع سیستم (۲٫۵ متر) در تمامی مدل‌ها بدون تغییر و مشابه باقی ماند. جدول ۱، به ترتیب مشخصات مدل‌های دیوار برشی فولادی نیمه - مقید بدون تقویت و تقویت شده با الیاف را ارائه می‌دهد. شکل ۳، نمای شماتیک

جدول ۲. مشخصات مکانیکی الیاف پلیمری GFRP. [۱۵، ۱۴]

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

صورت می‌گیرد، بنابراین تسلیم در یک جهت، تنش تسلیم در جهت دیگر را کاهش می‌دهد. [۱۸] بارگذاری پوش‌آور با اعمال بار متمرکز و بارگذاری سیکلی نیز با اعمال ۲۹ سیکل جابه‌جایی (تا ۱۰ برابر جابه‌جایی معادل با حد تسلیم) مطابق با پروتکل ATC-۲۴ [۱۹] به تراز تیر طبقه انجام می‌شود.

در عمل به هنگام نصب ورق فولادی، اعوجاج در آن ایجاد می‌شود. اگر از فرض ناصافی اولیه‌ی ورق چشم‌پوشی شود، نرم‌افزار سختی اولیه و نیروی نهایی که دیوار برشی فولادی تحمل می‌کند، را بیشتر از مقدار واقعی آن تخمین می‌زند؛ ضمن اینکه صفحه اصلاً کمانش نمی‌کند، مگر اینکه تغییرشکل‌های خارج از صفحه‌یی به صورت نقص اولیه به مدل اعمال شود. به جهت تسهیل وقوع کمانش در ورق و کمک به توسعه‌ی حوزه‌ی کشش قطری ورق، تغییرشکل اولیه‌ی کوچکی (به گونه‌یی که در نتایج تحلیل تأثیر نگذارد) مطابق با مدل اول کمانش ورق به مدل‌ها اعمال شده است، به گونه‌یی که بیشینه‌ی حالت خطا در ساخت به اندازه‌ی ۲ میلی‌متر شود. همچنین به جهت ساده‌سازی مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار، این فرضیات لحاظ شده است. [۱۵، ۱۴]

— رفتار لایه‌های GFRP تا قبل از وقوع شکست یا پارگی به صورت کشسان خطی در نظر گرفته شده و برای معرفی شکست از تئوری خرابی هاشین^{۱۶}، استفاده شده است. [۱۷]

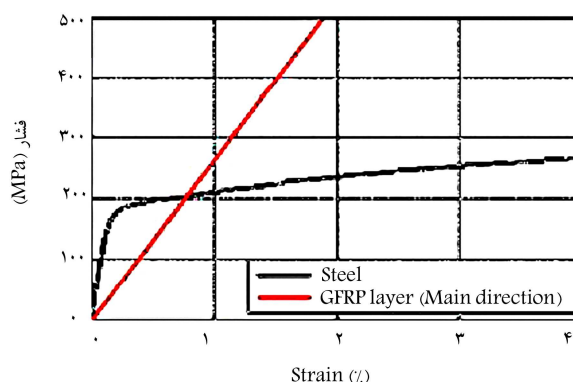
— هیچ لغزشی در محل چسبندگی بین لایه‌های GFRP و فولاد وجود ندارد.
— الیاف پلیمری و ماده‌ی چسبنده در مدل المان محدود، هر دو به عنوان یک لایه در نظر گرفته شده‌اند.

در جدول ۲، E_x و E_y به ترتیب مدول کشسانی کششی الیاف در جهت x و y ؛ G_{12} ، G_{13} ، G_{23} به ترتیب مدول کشسانی برشی در صفحات xy ، xz و yz و T_x و T_y مقاومت کششی در جهت x و y هستند.

همچنین به منظور صحنه‌گذاری بر روش مدل‌سازی در نرم‌افزار آباکوس، نمونه‌ی یک طبقه‌ی دیوار برشی فولادی نیمه - مقید که توسط محرمی و همکاران، [۸] آزمایش شده بود (شکل ۲)، مدل‌سازی و تحت بارگذاری‌های پوش‌آور و سیکلی تحلیل شد. در مدل تحلیلی از الگوی جابه‌جایی مشابه با آنچه که در مدل آزمایشگاهی اعمال شده بود، (تا لحظه‌ی وقوع پارگی و لغزش در ورق و نبشی‌های اتصال)، استفاده شد. در شکل ۵، مقایسه‌ی نتایج تحلیل عددی و آزمایشگاهی مشاهده می‌شود. همان‌طور که در شکل (الف) مشاهده می‌شود، نتایج حاکی از کیفیت روش مدل‌سازی در پیش‌بینی رفتار دیوار برشی فولادی تحت بارگذاری‌های پوش‌آور و سیکلی است. به‌علاوه به جهت حصول اطمینان از نتایج مدل‌سازی دیوارهای برشی کامپوزیت، نمونه‌ی آزمایشگاهی دیوار برشی کامپوزیت (نمونه‌ی CSPSP۳) ناطقی الهی و خزائی پول، [۱۵] مطابق با روش معرفی‌شده‌ی اخیر در نرم‌افزار مدل‌سازی و تحلیل شد. نتایج ارائه‌شده در شکل (ب) دقت نسبتاً مناسب روش مدل‌سازی را تأیید می‌کند. همچنین شکل (د) نشان می‌دهد که در جابه‌جایی‌های بزرگ به دلیل وقوع شکست و پارگی در الیاف، همان‌طور که در نتایج آزمایشگاهی نیز مشاهده می‌شود، مقاومت سیستم کامپوزیت در تحلیل‌های پوش‌آور و سیکلی دچار افت شده است.

جدول ۳. مشخصات مکانیکی ورق و اعضای قاب فولادی. [۸]

المان	مدول کشسانی (GPa)	تنش تسلیم (MPa)	تنش نهایی (MPa)
تیر و ستون‌ها	۲۰۰	۳۶۰	۴۵۰
ورق	۲۰۰	۲۴۰	۳۰۰

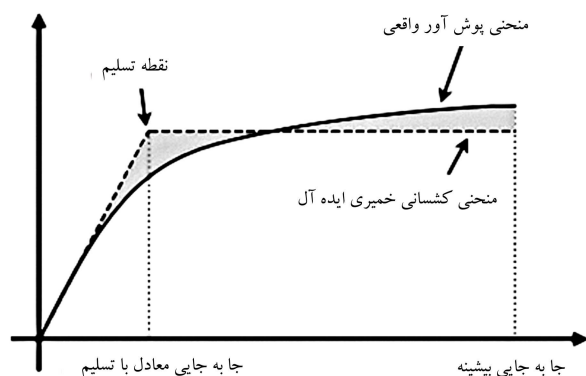


شکل ۴. مقایسه‌ی نمودار تنش - کرنش فولاد و الیاف پلیمری.

از الگوی تقویت در نظر گرفته‌شده در پژوهش حاضر را برای یک مدل دیوار برشی فولادی نشان می‌دهد که مطابق آن، برای تقویت کلیه‌ی سیستم‌ها در هر سمت ورق از ۵ لایه الیاف پلیمری با پهنای ۱۰۰ میلی‌متر در فواصل یکسان در هر یک از راستاهای قطری ورق استفاده شده است. با توجه به نتایج مطالعات پیشین، [۱۵، ۱۴] استفاده از الیاف در امتداد ناحیه‌ی کشش قطری می‌تواند بهترین عملکرد را برای سیستم مرکب به دنبال داشته باشد. همچنین، ضخامت هر لایه از الیاف معادل با ۰/۵ میلی‌متر فرض شده است.

۲.۲. مدل‌سازی عددی و صحنه‌گذاری بر نتایج

به جهت مدل‌سازی عددی از نرم‌افزار المان محدود آباکوس^{۱۰}، [۱۷] استفاده شده است. در تمامی مدل‌ها، اجزاء مختلف (شامل تیر، ستون، ورق و الیاف) با بهره‌گیری از المان پوسته‌یی^{۱۱} چهارگره‌یی با خاصیت انتگرال‌گیری کاهش‌یافته (المان S۴R) و استفاده از یک مش بندی نسبتاً ریز مدل‌سازی شده‌اند. مشخصات مکانیکی مصالح فولادی و الیاف پلیمری در مدل‌های المان محدود در جدول‌های ۲ و ۳ ارائه شده و نمودار تنش - کرنش آن‌ها نیز در شکل ۴ مشاهده می‌شود. در تحلیل‌های غیرخطی، آثار تغییرشکل‌های بزرگ (غیرخطی هندسی) نیز منظور شده است. در تحلیل‌های پوش‌آور، رفتار فولاد و الیاف پلیمری به ترتیب به صورت ایزوتروپیک^{۱۲} و لایه‌یی^{۱۳} در تحلیل‌های شبه‌استاتیکی سیکلی^{۱۴} که شامل سیکل‌های متعدد بارگذاری است، به صورت سینماتیک با لحاظ اثر باشینگر^{۱۵} در نظر گرفته می‌شود، بدین منظور برای بارگذاری چرخه‌یی از سخت‌شدگی مجدد استفاده می‌شود که راهی مناسب برای در نظر گرفتن آثار باشینگر و تغییرات زیاد جهتی تنش و کرنش است. در سخت‌شدگی مذکور، حرکت سطح تسلیم در فضای تنش بدون هیچ‌گونه دوران یا تغییر در اندازه



شکل ۶. معادل سازی منحنی رفتار و تعیین جابه جایی معادل با حد تسلیم. [۹]

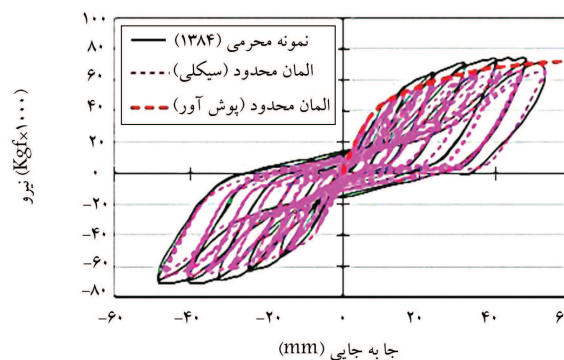
جدول ۴. خلاصه ی نتایج مقاومت، سختی اولیه و شکل پذیری مدل های اصلی بدون تقویت.

مدل	مقاومت (KN)	سختی اولیه (N/mm)	شکل پذیری	مقاومت (KN)		
				کل	ورق	قاب
S	۷۵۴	۹۹/۱	۱۰/۲	۵۶۳	۱۹۱	۱۹۱
S-T۱	۵۱۶	۷۲/۱	۱۱/۶	۳۲۱	۱۹۵	۱۹۵
S-T۳	۹۳۸	۱۱۲/۳	۸/۹	۷۵۰	۱۸۸	۱۸۸
S-T۴	۱۰۹۱	۱۲۸/۱	۹/۵	۹۰۶	۱۸۵	۱۸۵
S-T۵	۱۲۲۵	۱۴۰/۲	۸/۳	۱۰۴۴	۱۸۰	۱۸۰
S-۰/۵	۵۵۱	۶۵/۸	۹/۶	۳۶۲	۱۸۹	۱۸۹
S-۱/۰	۸۱۷	۱۰۸/۲	۱۰/۲	۶۱۹	۱۹۸	۱۹۸
S-۱/۵	۱۰۵۲	۱۴۳/۲	۱۰/۶	۸۲۸	۲۲۳	۲۲۳
S-۲/۰	۱۱۹۸	۱۵۸/۱	۹/۵	۹۶۸	۲۳۰	۲۳۰
S-۲/۵	۱۳۱۲	۱۶۲/۱	۹/۰	۱۱۲۰	۱۹۲	۱۹۲
S-U۱۰۰	۶۰۴	۶۲/۸	۷/۷	۴۴۱	۱۶۳	۱۶۳
S-U۱۲۰	۶۵۱	۷۴/۲	۸/۶	۴۹۳	۱۵۹	۱۵۹
S-U۱۴۰	۶۹۸	۸۵/۷	۹/۳	۵۱۱	۱۸۷	۱۸۷
S-U۱۸۰	۷۹۸	۱۰۸/۵	۱۰/۲	۶۱۳	۱۸۵	۱۸۵
S-O۲۰	۶۳۴	۷۳/۵	۹/۶	۴۳۸	۱۹۷	۱۹۷
S-O۳۰	۵۶۰	۵۰/۱	۷/۷	۳۶۱	۱۹۹	۱۹۹
S-O۴۰	۴۷۲	۴۰/۲	۶/۹	۲۷۴	۱۹۸	۱۹۸
S-O۵۰	۴۲۶	۳۰/۹	۶/۳	۲۲۳	۲۰۳	۲۰۳

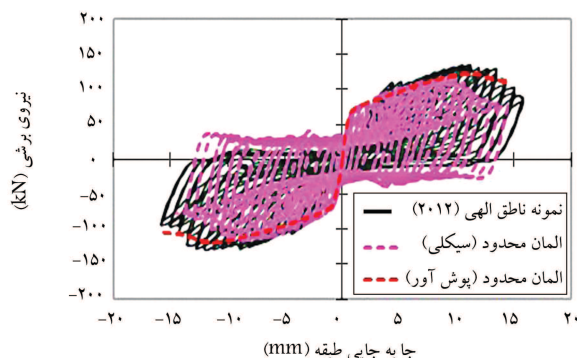
قابل توجه در اعضاء قاب پیرامونی (تیر و ستون های فرعی) ناشی از افزایش نیروهای وارده از طرف ورق مرتبط دانست.

— با افزایش طول ورق نیز (مشابه با افزایش ضخامت آن) به دلیل افزایش سطح آن، مقاومت ورق، سختی و مقاومت کل افزایش می یابد. لیکن به دلیل تغییر هندسه (طول) اعضاء قاب، مقاومت قاب ثابت باقی نمی ماند. به علاوه، در قاب های طویل (مدل S-۲/۵) به دلیل وقوع تغییر شکل و تسلیم زودرس در اعضاء قاب، مقاومت قاب و شکل پذیری سیستم تحت تأثیر قرار می گیرد.

— ستون های ثانویه در دو سمت ورق، نقش برجسته یی در وقوع تسلیم در سطح



الف) نمونه محرمی و همکاران؛ [۸]



ب) نمونه (CSPSP ۳) ناطق الهی و خزائی پول. [۱۵]

شکل ۵. مقایسه ی نتایج تحلیل در نرم افزار با نتایج آزمایشگاهی.

۳. بررسی نتایج

در بخش حاضر، ابتدا رفتار کلی سیستم های دیوار برشی فولادی نیمه - مقید با و بدون الیاف تقویتی با یکدیگر مقایسه و سپس با استفاده از نتایج تحلیل پوش آور، تأثیر استفاده از الیاف تقویتی در مشخصات رفتار سیستم نظیر: مقاومت، سختی و شکل پذیری برای مدل های مختلف ارزیابی شده است. در انتها، نیز انرژی جذب شده توسط سیستم های تقویت شده و تقویت نشده تحت بارگذاری سیکلی مطالعه و مقایسه شد.

در جدول ۴، خلاصه ی نتایج به دست آمده از تحلیل پوش آور برای مقاومت، سختی اولیه و شکل پذیری مدل های مختلف دیوار برشی فولادی تقویت نشده ارائه شده است. سختی اولیه ی سیستم با محاسبه ی شیب نمودار بار - جابه جایی در همان بارهای اولیه به دست آمده است. شکل پذیری مدل ها نیز از تقسیم جابه جایی بیشینه ی سیستم به جابه جایی حد تسلیم محاسبه شده است. جابه جایی بیشینه برابر با جابه جایی تراز طبقه در لحظه ی وقوع دررفت ۱/۷، ۲/۵٪ لحاظ شده است. جابه جایی حد تسلیم نیز از طریق ترسیم منحنی کشسان خمیری ایده آل بر منحنی پوش رفتار سیستم، به طوری که سطح محصور شده توسط منحنی ها در دو حالت مساوی یکدیگر باشد، مشخص شده است (شکل ۶).

با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۴ مشاهده می شود که:

— با افزایش ضخامت ورق (یا سطح مقطع آن)، مقاومت ورق و در نتیجه سختی و مقاومت کل سیستم به صورت محسوسی افزایش می یابد، لیکن مقاومت قاب تغییر چندانی نمی کند. همچنین با افزایش ضخامت ورق، شکل پذیری سیستم محدود می شود که این موضوع را می توان به وقوع تسلیم زودرس یا تغییر شکل

ورق دارند. بدین ترتیب، با کاهش مقاطع ستون‌های ثانویه، از مقاومت‌های قاب و ورق و سختی، مقاومت و تا حدی شکل‌پذیری کل سیستم کاسته می‌شود.

-- حضور بازشو در سطح ورق، بسته به ابعاد آن می‌تواند سبب کاهش قابل ملاحظه‌ای در سختی و مقاومت ورق و کل سیستم شود و شکل‌پذیری آن را محدود کند.

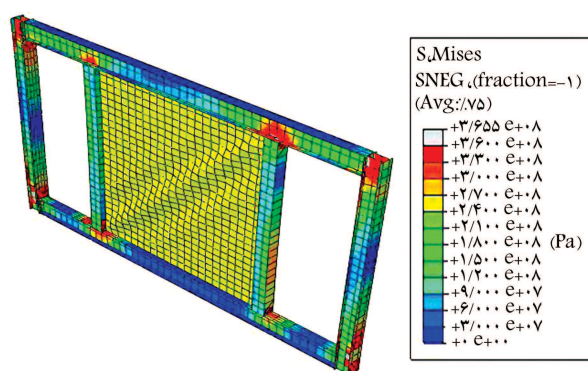
۱.۳. مقایسه‌ی رفتار کلی

در شکل‌های ۷ و ۸، به ترتیب مقایسه‌ی منحنی‌های بار - جابه‌جایی و سختی - جابه‌جایی تپ دو مدل دیوار برشی فولادی نیمه - مقید تقویت‌نشده (S-T\1) و تقویت‌شده (S-T\1R) و همچنین توزیع تنش‌های فون - میس در دو سیستم با و بدون تقویت در حد نهایی باربری سیستم‌ها مشاهده می‌شوند. مطابق شکل ۷، مقاومت ورق کامپوزیت به دلیل حضور الیاف تقویتی افزایش چشم‌گیری را نشان می‌دهد، در حالی که در مقاومت قاب، تغییر چندانی به‌وجود نیامده و مقاومت قاب در سیستم تقویت‌شده، فقط به میزان کمی کوچک‌تر از مقاومت قاب در سیستم بدون تقویت نظیر است. تغییر جزئی مذکور در مقاومت قاب، ناشی از اندرکنش متقابل قاب و ورق در سیستم دیوار برشی فولادی است که البته در سیستم‌های یک طبقه‌ی دیوار برشی فولادی چندان قابل توجه ارزیابی نمی‌شود.^[۲۰] اندرکنش متقابل قاب و ورق، قبلاً در سیستم دیوار برشی فولادی با بازشو نیز مشاهده شده بود.^[۹] بنابراین، مقاومت کل سیستم تقویت‌شده به‌صورت نسبی افزایش می‌یابد. شکل ۸ نیز نشان می‌دهد که در دو سیستم با و بدون تقویت در همان شروع بارگذاری با وقوع کمانش،

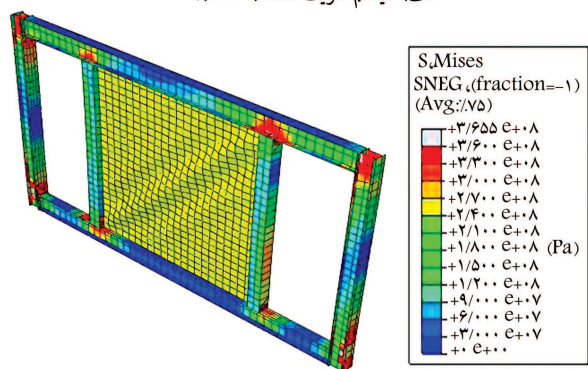
دچار افت سختی قابل ملاحظه‌ای می‌شود. این موضوع نشان می‌دهد که حضور الیاف تقویت‌کننده، تأثیر چندانی در وقوع پدیده‌ی کمانش در ورق ندارند. همچنین مطابق شکل مذکور، سختی سیستم تقویت‌شده در طول بارگذاری کمی بیشتر از سختی سیستم بدون تقویت است، لیکن روند زوال سختی در طول بارگذاری در هر دو سیستم از الگوی مشابهی پیروی می‌کند. شکل ۹ نیز نشان می‌دهد که الگوی توزیع تنش‌ها در سیستم اصلی (تقویت‌نشده) و سیستم تقویت‌شده‌ی نظیر، تقریباً مشابه است. البته به دلیل افزایش نیروهای منتقل‌شده از ورق تقویت‌شده به قاب پیرامون، سطح تنش‌ها در ستون‌های فرعی سیستم تقویت‌شده به‌طور نسبی بالاتر رفته است.

۲.۳. بررسی اثر الیاف تقویتی در مقاومت، سختی اولیه و شکل‌پذیری

در بخش حاضر، تأثیر حضور الیاف تقویتی در مقاومت، سختی اولیه و شکل‌پذیری سیستم‌های دیوار برشی فولادی نیمه - مقید با خصوصیات مختلف (شامل ۵ مجموعه‌ی مختلف) مطالعه شده است. همان‌طور که قبلاً اشاره شده است و در جدول ۱ نیز مشاهده می‌شود، در مجموعه‌ی اول ضخامت ورق دیوار متغیر (۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ میلی‌متر) فرض شده است (مدل‌های S-T\1 تا S-T\5 و مدل‌های تقویت‌شده‌ی نظیر آن‌ها). در مجموعه‌ی دوم، طول ورق دیوار متغیر (۱۲۵۰، ۲۵۰۰، ۳۷۵۰، ۵۰۰۰ و ۶۲۵۰ میلی‌متر) فرض شده است (مدل‌های S-T\1 تا S-T\5 و مدل‌های تقویت‌شده‌ی نظیر آن‌ها). همچنین در مجموعه‌ی سوم تغییر در ابعاد ستون‌های ثانویه یا فرعی (مقاطع UNP100، UNP120، UNP140، UNP160 و UNP180)

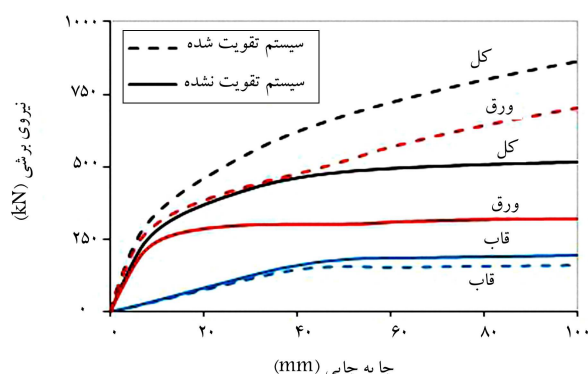


الف) سیستم تقویت نشده (S-T\1)

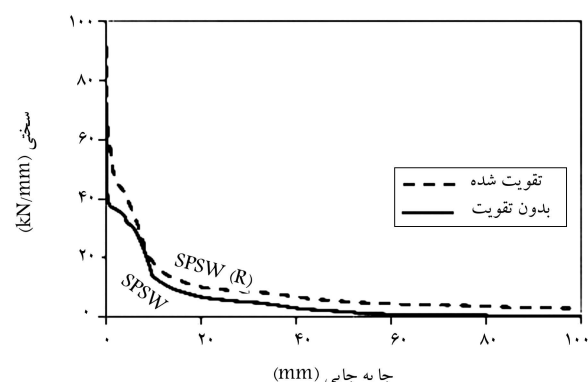


ب) سیستم تقویت شده (S-T\1R)

شکل ۹. توزیع تنش‌های فون - میس در حد نهایی باربری دو مدل دیوار برشی فولادی تقویت‌نشده (S-T\1) و تقویت‌شده‌ی نظیر (S-T\1R).



شکل ۷. مقایسه‌ی منحنی‌های بار - جابه‌جایی تپ برای دو مدل دیوار برشی فولادی تقویت‌نشده (S-T\1) و تقویت‌شده‌ی نظیر (S-T\1R).



شکل ۸. مقایسه‌ی منحنی سختی - جابه‌جایی تپ برای دو مدل دیوار برشی فولادی تقویت‌نشده (S-T\1) و تقویت‌شده‌ی نظیر (S-T\1R).

جدول ۵. نسبت‌های مقاومت، شکل‌پذیری و سختی اولیه برای مدل‌های تقویت‌شده با ضخامت ورق مختلف.

مدل	نسبت مقاومت			نسبت	
	کل	ورق	قاب	سختی اولیه	شکل‌پذیری
S-T1R	۱/۶۷	۲/۱۹	۰/۸۲	۱/۲۶	۰/۸۴
S-R	۱/۳۸	۱/۵۳	۰/۹۳	۱/۱۵	۰/۸۹
S-T3R	۱/۲۳	۱/۳۰	۰/۹۸	۱/۰۹	۰/۸۸
S-T4R	۱/۲۱	۱/۲۶	۰/۹۷	۱/۰۵	۰/۷۹
S-T5R	۱/۱۷	۱/۱۹	۱/۰۲	۱/۰۵	۰/۸۰

جدول ۶. نسبت‌های مقاومت، شکل‌پذیری و سختی اولیه برای مدل‌های تقویت‌شده با طول ورق به ارتفاع دهانه‌ی مختلف.

مدل	نسبت مقاومت			نسبت	
	کل	ورق	قاب	سختی اولیه	شکل‌پذیری
S-۰/۵R	۱/۳۴	۱/۵۴	۰/۹۷	۱/۲۵	۰/۹۵
S-R	۱/۳۸	۱/۵۳	۰/۹۳	۱/۱۵	۰/۸۹
S-۱/۰R	۱/۴۸	۱/۶۶	۰/۹۱	۱/۱۴	۰/۹۰
S-۱/۵R	۱/۴۷	۱/۶۵	۰/۸۳	۱/۱۰	۰/۹۰
S-۲/۰R	۱/۴۴	۱/۵۹	۰/۸۱	۱/۰۷	۰/۹۰
S-۲/۵R	۱/۳۹	۱/۴۶	۰/۹۸	۱/۰۷	۰/۹۲

جدول ۷. نسبت‌های مقاومت، شکل‌پذیری و سختی اولیه برای مدل‌های تقویت‌شده با ابعاد مختلف ستون‌های ثانویه.

مدل	نسبت مقاومت			نسبت	
	کل	ورق	قاب	سختی اولیه	شکل‌پذیری
S-U۱۰۰R	۱/۴۵	۱/۶۴	۰/۹۳	۱/۲۸	۰/۹۶
S-U۱۲۰R	۱/۴۱	۱/۵۷	۰/۹۳	۱/۲۱	۰/۸۹
S-U۱۴۰R	۱/۴۱	۱/۵۸	۰/۹۷	۱/۱۸	۰/۸۳
S-R	۱/۳۸	۱/۵۳	۰/۹۳	۱/۱۵	۰/۸۹
S-U۱۸۰R	۱/۳۳	۱/۴۹	۰/۸۲	۱/۱۵	۰/۹۲

به دلیل استفاده از الیاف تقویتی متأثر از ابعاد ستون‌های ثانویه نیست. همچنین به دلیل استفاده از الیاف تقویتی، به‌طور متوسط مقاومت ورق و مقاومت کل سیستم به ترتیب در حدود ۵۵٪ و ۴۰٪ افزایش نشان می‌دهد، در حالی که مقاومت قاب تغییر عمده‌ی چندانی نکرده و افزایش سختی اولیه (بین حدود ۱۵ تا ۲۸ درصد) و کاهش شکل‌پذیری سیستم (تا حدود ۱۰٪ به‌طور متوسط)، به دلیل استفاده از الیاف تقویتی است. و نیز با افزایش مقطع ستون‌های ثانویه، تدریجاً از میزان افزایش در سختی سیستم تقویت‌شده کاسته شده است. این موضوع عمدتاً به دلیل آن است که با افزایش مقطع ستون‌های ثانویه، سختی سیستم اولیه (بدون تقویت) تدریجاً افزایش یافته است؛ لذا با ثابت‌ماندن حجم تقویت، از درصد مشارکت الیاف تقویتی در افزایش سختی سیستم کاسته شده است. در مورد تغییرات شکل‌پذیری نیز مشابه با نتایج به‌دست آمده در بخش‌های قبل، نتایج مستقل از ابعاد ستون‌های ثانویه است.

۴.۲.۳. مدل‌های با بازشو

جدول ۸، نسبت‌های تغییر مقاومت، سختی اولیه و شکل‌پذیری سیستم را برای مدل‌های تقویت‌شده و شامل بازشو به مدل‌های اصلی نظیر (تقویت نشده و با بازشو) ارائه می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، مقاومت ورق در سیستم با بازشو تحت

موردنظر قرار گرفته (مدل‌های S-U۱۰۰ تا S-U۱۸۰ و مدل‌های تقویت‌شده‌ی نظیر آن‌ها)؛ و در مجموعه‌ی چهارم نیز امکان حضور بازشوی مستطیلی با ابعاد مختلف (۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد ابعاد ورق) در مرکز ورق لحاظ شده است (مدل‌های S-O۲۰ تا S-O۵۰ و مدل‌های تقویت‌شده‌ی نظیر آن‌ها).

۱.۲.۳. مدل‌های با ضخامت ورق مختلف

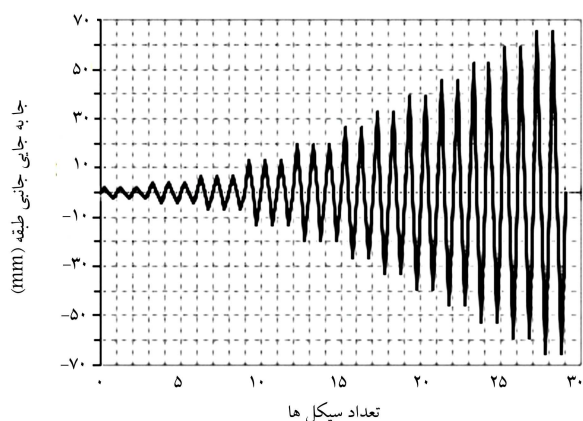
در جدول ۵، نسبت‌های مقاومت، سختی اولیه و شکل‌پذیری سیستم برای مدل‌های تقویت‌شده با ضخامت ورق‌های مختلف به مدل‌های بدون تقویت نظیر مقایسه شده است که مطابق آن به دلیل استفاده از الیاف تقویتی، مقاومت ورق به ویژه در مدل‌های با ضخامت ورق کمتر می‌تواند افزایش قابل توجه داشته باشد (تا بیش از ۲ برابر)، در حالی که در مقاومت قاب عمدتاً تغییر چندانی مشاهده نمی‌شود. در نتیجه، مقاومت کل سیستم تقویت‌شده از حدود ۶۵٪ در مدل با ورق نازک‌تر تا حدود ۲۰٪ در مدل با ورق ضخیم‌تر نسبت به مدل‌های بدون بازشو نظیر افزایش نشان می‌دهد. همچنین، بررسی نتایج سختی اولیه و شکل‌پذیری در جدول ۵ نشان می‌دهد که به دلیل استفاده از الیاف تقویتی، سختی سیستم نیز تا حدی افزایش نشان می‌دهد (تقریباً در حدود ۵ تا ۲۵ درصد افزایش در سختی برای مدل‌های مختلف)، در حالی که شکل‌پذیری آن همواره کاهش می‌یابد (به‌طور متوسط ۱۵٪ کاهش در شکل‌پذیری). مشابه با نتایج مربوط به مقاومت، با افزایش ضخامت ورق از میزان افزایش سختی کاسته می‌شود، لیکن تغییر ضخامت ورق تأثیر محسوسی در تغییرات نسبت شکل‌پذیری سیستم تقویت‌شده ندارد. همچنین از نتایج به‌دست آمده می‌توان این‌گونه نتیجه گرفت که برای رسیدن به یک افزایش مشخص در مقاومت یا سختی، باید حجم تقویت متناسب با ضخامت ورق انتخاب شود.

۲.۲.۳. مدل‌های با طول ورق مختلف

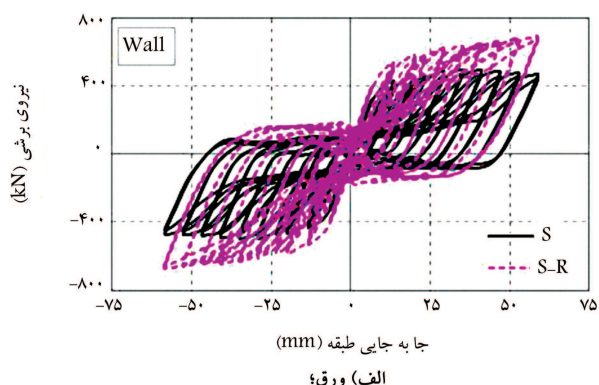
در جدول ۶، نسبت‌های تغییر مقاومت، سختی و شکل‌پذیری سیستم برای مدل‌های تقویت‌شده با طول ورق‌های مختلف به مدل‌های بدون تقویت نظیر ارائه شده است. نتایج در جدول ۶ نیز مشابه با بخش قبل، حاکی از تأثیر قابل توجه الیاف تقویتی در افزایش مقاومت ورق است، در حالی که تغییر چندانی در مقاومت قاب مشاهده نمی‌شود. بنابراین، مقاومت کل سیستم به دلیل استفاده از الیاف تقویتی همواره افزایش می‌یابد. همچنین نتایج در حالت کلی نشان می‌دهد که با افزایش طول (با سطح) ورق، به دلیل ثابت نگه داشتن حجم تقویت، اندکی از میزان افزایش در مقاومت سیستم کاسته می‌شود (در حدود ۵٪). به‌علاوه، مقایسه‌ی نسبت‌های سختی اولیه و شکل‌پذیری در جدول ۶ نشان می‌دهد که با افزایش طول ورق، شکل‌پذیری سیستم تقویت‌شده به‌طور متوسط در حدود ۱۰٪ کاهش و سختی اولیه‌ی آن در حدود ۵ تا ۲۵ درصد می‌تواند افزایش داشته باشد. نتایج در جدول ۶، مشابه با نتایج در جدول ۵، این مطلب را تأیید می‌کند که افزایش ابعاد (طول، ضخامت، یا هر دو) ورق تأثیر قابل ملاحظه‌ی در میزان کاهش نسبی شکل‌پذیری سیستم تقویت‌شده ندارد، ولی در مورد سختی اولیه با افزایش طول ورق، با توجه به ثابت ماندن میزان تقویت، به‌طور نسبی از میزان افزایش در سختی اولیه‌ی سیستم تقویت‌شده کاسته می‌شود. همچنین، از نتایج ارائه‌شده در جدول‌های ۵ و ۶ می‌توان نتیجه گرفت که در حالت کلی برای حصول یک افزایش مقاومت یا سختی مشخص، حجم تقویت باید با سطح مقطع ورق متناسب باشد.

۳.۲.۳. مدل‌های با ابعاد ستون‌های ثانویه مختلف

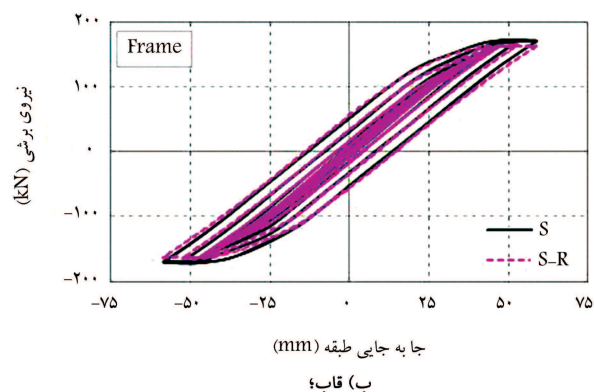
در جدول ۷، نسبت‌های تغییر مقاومت، سختی اولیه و شکل‌پذیری سیستم برای مدل‌های تقویت‌شده با ابعاد ستون‌های ثانویه‌ی مختلف به مدل‌های بدون تقویت نظیر ارائه شده است. نتایج در جدول مذکور نشان می‌دهند که تغییرات مقاومت در سیستم



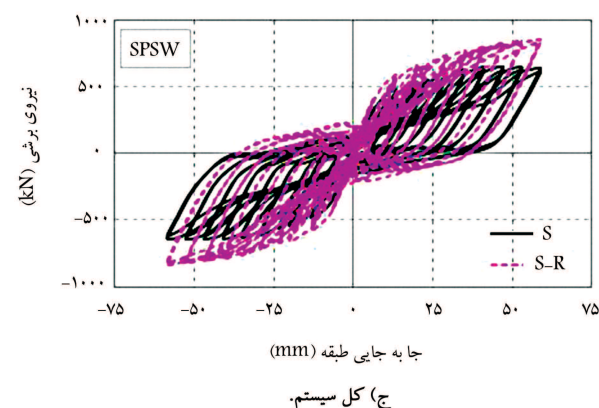
شکل ۱۰. تاریخچه‌ی جابه‌جایی سیکلی.



الف) ورق؛



ب) قاب؛



ج) کل سیستم.

شکل ۱۱. مقایسه‌ی اثر تقویت با الیاف در رفتار هیستریزس سیستم دیوار برشی فولادی (مدل های S و S-R).

تأثیر حضور بازو کاهش یافته است. همچنین، حضور بازو در سیستم تقویت شده سبب می‌شود پیوستگی بعضی از نوارهای الیاف تقویتی در ناحیه‌ی بازو قطع شود. در حالت کلی، تغییرات مقاومت در سیستم تحت تأثیر عوامل مختلفی، نظیر: ابعاد بازو، الگوی کمانش و نحوه‌ی گسترش تسلیم در ورق و اندرکنش بین ورق، الیاف تقویتی و قاب در سیستم است.

نتایج در جدول ۸ تأیید می‌کند که استفاده از الیاف پلیمری در تقویت سیستم‌های با بازو نیز کاملاً مؤثر است. با توجه به نتایج، در حدود ۵۰ تا ۹۰ درصد افزایش در مقاومت ورق و به‌طور متوسط در حدود ۴۵٪ افزایش در مقاومت کلی سیستم مشاهده می‌شود. در حالی که مقاومت قاب در سیستم تقویت‌شده در مقایسه با سیستم تقویت‌نشده نظیر، عمدتاً تغییر چندانی نکرده است. همچنین شکل‌پذیری سیستم به دلیل استفاده از الیاف تقویتی می‌تواند تا بیشینه‌ی حدود ۱۰٪ کاهش و سختی اولیه‌ی آن در حدود ۱۵ تا ۴۰ درصد افزایش داشته باشد.

۳.۳. بررسی اثر الیاف تقویتی در جذب انرژی سیستم

در بخش کنونی، به جهت مطالعه‌ی بیشتر اثر الیاف پلیمری در مشخصه‌های رفتار سیستم، با استفاده از آنالیز سیکلی، جذب انرژی در یک مدل دیوار برشی فولادی نیمه - مقید بدون تقویت (مدل S) و سیستم تقویت‌شده‌ی نظیر آن (مدل S-R) مقایسه شده است. جابه‌جایی حد تسلیم (δ_y) که پارامتر اصلی در اعمال بارگذاری سیکلی است، با استفاده از نتایج تحلیل پش‌آور، تقریباً معادل با ۶/۵ میلی‌متر برای مدل‌های اصلی و تقویت‌شده تخمین زده شده است. براساس دستورالعمل ATC-24^[۱۹] بارگذاری سیکلی با اعمال ۲۹ سیکل جابه‌جایی (مطابق شکل ۱۰)، به تراز تیر فوقانی طبقه صورت گرفته است. با توجه به شکل ۱۰، ۶ سیکل ابتدایی مبتنی بر جابه‌جایی‌های کوچک‌تر از جابه‌جایی تسلیم (δ_y ۰/۳۳ و δ_y ۰/۶۷) بوده و در سیکل‌های بعدی بارگذاری تا جابه‌جایی معادل با ۱۰ برابر جابه‌جایی حد تسلیم (δ_y ۱۰) ادامه یافته است. به طور کلی با توجه به دستورالعمل ATC-24^[۱۹] برای جابه‌جایی‌های کوچک‌تر یا مساوی با ۳ برابر جابه‌جایی حد تسلیم (δ_y ۳)، سیکل بارگذاری و برای جابه‌جایی‌های بزرگ‌تر از آن، ۲ سیکل بارگذاری در نظر گرفته می‌شود. همچنین در شکل ۱۱، منحنی‌های هیستریزس^{۱۸} (کل سیستم، ورق و قاب) برای مدل‌های بدون تقویت و تقویت‌شده؛ و در شکل ۱۲، متوسط انرژی کل جذب‌شده توسط سیستم در مدل‌های اصلی و تقویت‌شده برای سیکل‌های مختلف مشاهده می‌شود. مطابق شکل ۱۱، افزایش انرژی عمدتاً به دلیل افزایش مقاومت سیستم ناشی از حضور الیاف تقویتی و به میزان کمتری ناشی از کاهش پدیده‌ی تنگ‌شدگی^{۱۹} در منحنی‌های هیستریزس سیستم تقویت‌شده در مقایسه با مدل اصلی (بدون تقویت) است. همچنین، شکل (۱۱ ب) به خوبی نشان می‌دهد که رفتار هیستریزس جدول ۸. نسبت‌های مقاومت، شکل‌پذیری و سختی اولیه برای مدل‌های تقویت‌شده با بازو مستطیلی مرکزی.

مدل	نسبت مقاومت		نسبت	
	کل	ورق	قاب	شکل‌پذیری
S-R	۱/۳۸	۱/۵۳	۰/۹۳	۱/۱۵
S-O ₂₀ R	۱/۴۷	۱/۷۰	۰/۹۶	۱/۳۱
S-O ₃₀ R	۱/۵۵	۱/۹۴	۰/۸۴	۱/۴۲
S-O ₄₀ R	۱/۴۵	۱/۷۸	۰/۹۸	۱/۳۴
S-O ₅₀ R	۱/۳۸	۱/۷۴	۱/۰۰	۱/۲۷

استفاده از روش المان محدود ارزیابی شد. همچنین در سیستم‌های در نظر گرفته شده تأثیر خصوصیات مختلف مدل‌ها، نظیر: حضور یا عدم حضور بارشو و ابعاد آن، تغییر ضخامت ورق، تغییر نسبت طول دهانه به ارتفاع طبقه، و تغییر ابعاد ستون‌های ثانویه لحاظ شد. نتایج نشان داد که:

-- استفاده از الیاف تقویتی در سیستم دیوار برشی فولادی نیمه - مقید، مقاومت و سختی اولیه سیستم را افزایش می‌دهد، در حالی که شکل پذیری سیستم را تا حدی (حدود ۱۰٪) با توجه به نتایج کاهش می‌دهد.

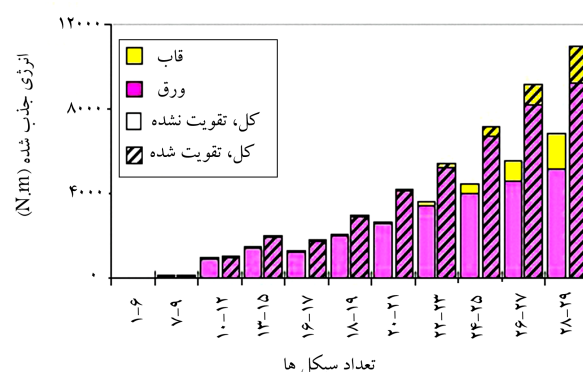
-- مقاومت ورق به دلیل حضور الیاف تقویتی افزایش قابل توجهی می‌یابد، لیکن مقاومت قاب عمدتاً تغییر چندانی نمی‌کند. در نتیجه، مقاومت کل سیستم تقویت شده می‌تواند تا حد قابل توجهی بزرگ‌تر از سیستم اولیه بدون تقویت باشد (با توجه به نتایج ۱۷ الی ۶۷ درصد افزایش).

-- به دلیل اندرکنش قاب و ورق و همچنین افزایش سهم مشارکت ورق در باربری سیستم تقویت شده، مقاومت قاب در بعضی از سیستم‌های تقویت شده در مقایسه با سیستم بدون تقویت نظیر تا حدی کاهش نشان می‌دهد.

-- در حالت کلی، تقویت ورق سطح، نیروها و در نتیجه تنش‌ها را در قاب پیرامونی افزایش می‌دهد. این موضوع می‌تواند تسلیم یا تغییر شکل بیش از حد اعضاء قاب را به دنبال داشته باشد و از این جهت، ظرفیت ورق را نیز تحت تأثیر قرار دهد.

-- برای یک حجم مشخص از الیاف تقویتی، با افزایش سطح مقطع ورق و یا مشخصات قاب، از میزان تأثیر الیاف در بهبود مقاومت و سختی سیستم کاسته می‌شود. این موضوع نشان می‌دهد که حجم الیاف تقویتی مورد نیاز باید متناسب با مشخصات قاب و ورق انتخاب شود.

-- استفاده از الیاف تقویتی می‌تواند به میزان قابل توجهی قابلیت جذب انرژی در سیستم را افزایش دهد که عمدتاً به دلیل افزایش مقاومت سیستم ناشی از حضور الیاف تقویتی و به میزان کمتری ناشی از کاهش پدیده‌ی تنگ‌شدگی در منحنی‌های هیستریزس سیستم تقویت شده در مقایسه با مدل اصلی (بدون تقویت) است.



شکل ۱۲. مقایسه‌ی اثر تقویت با الیاف در میزان جذب انرژی (مدل‌های S و S-R) برای سیکل‌های مختلف بارگذاری.

قاب در دو سیستم تقویت نشده و تقویت شده نظیر، تقریباً یکسان است و افزایش در جذب انرژی کل، ناشی از افزایش جذب انرژی در ورق تقویت شده است. در شکل ۱۲ نیز مشاهده می‌شود که جذب انرژی در سیستم‌ها، عمدتاً توسط ورق انجام شده است. به علاوه، به دلیل حضور الیاف تقویتی جذب انرژی در سیستم تقویت شده نسبت به سیستم تقویت نشده، افزایش چشم‌گیری داشته است. و با توجه به نتایج ارائه شده در شکل مذکور، با در نظر گرفتن نتایج مربوط به دو سیکل نهایی (سیکل‌های ۲۸ و ۲۹)، انرژی جذب شده در سیستم تقویت شده در حدود ۶۰٪ بیشتر از انرژی جذب شده در سیستم تقویت نشده نظیر است. این موضوع، مؤثر بودن استفاده از الیاف تقویتی را در افزایش جذب انرژی سیستم به خوبی تأیید می‌کند.

۴. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، تأثیر استفاده از الیاف پلیمری شیشه (GFRP) در بهبود مشخصه‌های رفتاری (مقاومت، سختی اولیه، شکل پذیری و جذب انرژی) سیستم دیوار برشی فولادی نیمه - مقید تحت بارگذاری‌های سیکلی و بارافزون (پوش‌آور) با

پانویس‌ها

1. steel plate shear wall
2. Kobe
3. Northridge
4. semi-supported steel shear wall
5. fiber reinforced polymer
6. glass fiber reinforced polymer
7. carbon fiber reinforced polymer
8. cyclic
9. pushover
10. Abaqus
11. shell
12. isotropic
13. lamina
14. quasi-static cyclic
15. bauschinger
16. hashin damage theory
17. drift
18. hysteresis
19. pinchiong

منابع (References)

1. Astaneh-Asl, A. and Council, S.S.E. "Seismic behavior and design of steel shear walls", Steel TIPS Report (July, 2001).
2. Wilson, J.M. "On specifications for strength of iron bridges", *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, **15**, pp. 389-414 (1886).
3. CAN/CSA/S16-09. "Design of steel structures", Canadian Standards Association (2009).
4. AISC, ANSI/AISC 341-10. "Seismic provisions for structural steel buildings", Chicago (IL): American Institute of Steel Construction, (2010).
5. FEMA 450-NEHRP, "Recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures", Washington, D.C.: Building Seismic Safety Council National Institute of Building Sciences, (2003).
6. Hosseinzadeh, S.A.A. and Tehranizadeh, M. "Behavioral characteristics of code designed steel plate shear wall sys-

- tems", *Journal of Constructional Steel Research*, **99**, pp. 72-84 (2014).
7. Berman, J. and Bruneau, M. "Plastic analysis and design of steel plate shear walls", *Journal of Structural Engineering*, **129**(11), pp. 1448-1456 (2003).
8. Moharrami, H., Habibnejad, A. and Alizadeh, H. "Semi-supported steel shear walls", Report No. 1-4679, Road, Housing & Urban Development Research Center, Tehran, Iran (2005).
9. Hosseinzadeh, S.A.A. and Tehranizadeh, M. "Introduction of stiffened large rectangular openings in steel plate shear walls", *Journal of Constructional Steel Research*, **77**, pp. 180-192 (2012).
10. Barkhordari, M.A., Hosseinzadeh, S.A.A. and Seddighi, M. "Evaluation of the behavior of steel plate shear wall with stiffened opening", *Sharif Journal of Civil Engineering*, **32-2**(2.1), pp. 79-89, Tehran, Iran (Summer, 2016).
11. Jahanpour, A., Jonsson, J. and Moharrami, H. "Seismic behavior of semi-supported steel shear walls", *Journal of Constructional Steel Research*, **74**, pp. 118-133 (2012).
12. Jahanpour, A., Moharrami, H. and Aghakouchack A.A. "Out-of-plane buckling of secondary columns in semi-supported steel shear walls", 6th Congress of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran (2011).
13. Astaneh-Asl, A. "Seismic behavior and design of composite steel shear walls", Steel TIPS Report (May, 2002).
14. Nateghi-Alahi, F. and Khazaei-Poul, M. "Analytical study on the strengthened steel plate shear walls by FRP laminate", Presented at the The 2nd International Conference on Rehabilitation and Maintenance in Civil Engineering (2013).
15. Nateghi-Alahi, F. and Khazaei-Poul, M. "Experimental study of steel plate shear walls with infill plates strengthened by GFRP laminates", *Journal of Constructional Steel Research*, **78**, pp. 159-172 (2012).
16. Rahai, A. and Hatami, F. "Evaluation of composite shear wall behavior under cyclic loadings", *Journal of Constructional Steel Research*, **65**(7), pp. 1528-1537 (2009).
17. ABAQUS/Standard Theory Manual, Version 6.5.1., Hibbitt, Karlsson, Sorenson, Inc, (HKS) (2004).
18. Alavi, E. and Nateghi-Alahi, F. "Theoretical and analytical study of steel plate shear wall with longitudinal reinforcement", International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran, Iran (2001).
19. ATC-24, "Guidelines of cyclic seismic testing on components for steel structures", Redwood City, California, U.S.A., Applied Technology Council (1992).
20. Hosseinzadeh, S.A.A. and Tehranizadeh, M. "The wall-frame interaction effect in steel plate shear wall systems", *Journal of Constructional Steel Research*, **98**, pp. 88-99 (2014).