

## مطالعه‌ی آزمایشگاهی سیستم دیوار برشی فولادی با ورق‌های پرکننده‌ی کامپوزیتی تحت بارگذاری چرخه‌ای\*

«یادداشت پژوهشی»

فریبرز ناطقی الهی<sup>(۱)</sup>

مسعود خزایی پول<sup>(۲)</sup>

**چکیده** در این مقاله، رفتار غیرخطی دیوارهای برشی فولادی، که در آن ورق پرکننده جان با الیاف پلیمری شیشه‌ی تقویت شده است، به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. مدل آزمایشگاهی شامل یک پانل برشی فولادی یک طبقه، با اتصال مفصلی اعضای مرزی در چهار گوشه‌ی قاب و همچنین اتصال پیچی اعضای مرزی به ورق پرکننده است. در مجموع تعداد پنج آزمایش انجام شده است. در مدل اول آزمایشگاهی از ورق پرکننده‌ی فولادی تقویت نشده استفاده شده است، در حالی که در چهار مدل آزمایشگاهی بعدی از ورق پرکننده‌ی فولادی تقویت شده با الیاف پلیمری شیشه با تعداد لایه‌های تقویتی متفاوت با چیدمان‌های متفاوت استفاده شده است. نمونه‌های مورد بررسی تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی سیکلی در امتداد قطری قرار گرفته و نتایج حاصل ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که با استفاده از ورق پرکننده‌ی کامپوزیتی در سیستم دیوار برشی فولادی، می‌توان به مقدار قابل توجهی مقاومت تسلیم و نهایی، سختی اولیه و ثانویه و همچنین جذب انرژی سیستم را افزایش داد.

**واژه‌های کلیدی** مطالعه‌ی آزمایشگاهی، دیوار برشی فولادی، ورق پرکننده‌ی تقویت شده، الیاف پلیمری شیشه، مد شکست.

### Experimental Study of Steel Plate Shear Walls with Composite Steel Infill Plates under Cyclic Loading

F. Nateghi- Alahi

M. Khazaei-Poul

**Abstract** In this paper, nonlinear behavior of composite steel plate shear wall systems, in which steel infill plate is strengthened by fiber reinforced polymer (FRP) layers, are experimentally investigated. Tests are designed to evaluate the effect of glass-FRP layers, layers number of GFRP and orientation of GFRP layers on the stiffness, shear strength, cumulative dissipated energy and other seismic parameters in the composite steel plate shear wall. Experimental models are scaled one-story steel shear panel model, with hinge type connections of boundary elements at four corners. In the first test, unstiffened steel infill plate is used for test. In the next four tests, strengthened steel infill plates are being used with different number and orientation of GFRP layers. Each test was performed under fully reversed cyclic quasi-static loading in the elastic and inelastic response zones of the specimens, in compliance with ATC-24 (1992) test protocol. The experimental results indicate that by strengthening infill steel plate yield strength, ultimate shear strength and cumulative dissipated energy can be significantly increased.

**Keywords** Composite, Steel plate Shear Wall, GFRP, Fiber Orientation, Stiffness, Failure Modes.

★ تاریخ دریافت مقاله ۹۰/۹/۲ و تاریخ پذیرش آن ۹۲/۶/۷ می‌باشد

(۱) استاد، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، پژوهشکده‌ی سازه، تهران.

(۲) نویسنده‌ی مسئول، کارشناس ارشد سازه- زلزله، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، پژوهشکده‌ی سازه، تهران.

## مقدمه

دیوارهای برشی فولادی نسبت به سایر سیستم‌های مقاوم برابر جانبی دارای مزیت‌هایی مانند عملکرد لرزه‌ای مناسب، شکل‌پذیری بالا، جذب انرژی مناسب، سختی اولیه‌ی بالا، هزینه‌ی ساخت پایین و سرعت اجرای بالا هستند [1]. سیستم دیوار برشی فولادی به سه دسته اصلی قابل تقسیم‌بندی است.

۱- دیوار برشی فولادی تقویت‌نشده.

۲- دیوار برشی فولادی سخت‌شده.

۳- دیوار برشی فولادی کامپوزیتی.

تا پیش از دهه‌ی ۸۰ میلادی، کمناش الاستیک ورق در دیوار برشی فولادی به‌عنوان شکست سیستم در نظر گرفته می‌شد و برای جلوگیری از این مود شکست، سخت‌کننده‌های زیادی در ورق پرکننده‌ی جان برای جلوگیری از کمناش الاستیک آن استفاده می‌شد. در طراحی این نوع دیوار برشی، از کمناش الاستیک ورق جان قبل از تشکیل میدان‌های کششی جلوگیری می‌شود و مقاومت برشی کل در این نوع سیستم ترکیبی از مقاومت کمناشی جان به‌اضافه‌ی مقاومت ناشی از میدان‌های کششی قطری است. استفاده از سخت‌کننده‌ها به‌منظور افزایش جذب انرژی و پایدار شدن منحنی چرخه‌ای سیستم دیوار است. یکی از مشکلات استفاده از سخت‌کننده‌ها، افزایش زیاد هزینه‌های ساخت است [2].

از دهه‌ی ۸۰ میلادی به بعد، مطالعات زیاد در مورد رفتار دیوار برشی سخت‌نشده انجام شده و نتایج نشان داده‌است کمناش ورق پرکننده‌ی جان مود شکست این نوع سیستم نیست و ظرفیت و سختی این سیستم بعد از کمناش ورق جان بسیار مطلوب می‌باشد. دیوار برشی فولادی تقویت‌نشده، به‌عنوان یک مدل پایه در سیستم‌های دیوار برشی فولادی محسوب می‌گردد. در این نوع دیوار برشی، مقاومت کمناشی ورق پرکننده‌ی جان ناچیز است و در مراحل اولیه‌ی بارگذاری کمناش الاستیک در ورق جان رخ می‌دهد.

بار جانبی در این نوع سیستم توسط میدان‌های کششی قطری که در ورق جان بعد از کمناش الاستیک تشکیل می‌شود، تحمل می‌گردد [2]. در دیوار برشی فولادی کامپوزیتی، ورق جان با یک لایه‌ی بتن در یک یا هر دو طرف تقویت می‌شود. لایه‌ی بتنی می‌تواند ظرفیت دیوار برشی فولادی را با تسلیم یکنواخت ورق جان افزایش دهد. علاوه بر آن ظرفیت برشی لایه‌ی بتنی، ظرفیت برشی کل سیستم را افزایش می‌دهد. این نوع سیستم دیوار برشی در سازه‌های بلند برای کنترل تغییرمکان‌ها و افزایش سختی سیستم استفاده می‌شود.

الیاف پلیمری تقویت‌شده (FRP) دارای خصوصیات مکانیکی مانند سختی و مقاومت بالا، وزن کم، حمل آسان، مقاومت بالا در برابر خوردگی و شرایط محیطی است [3]. ورق پرکننده‌ی فولادی جان می‌تواند با لایه‌های FRP در دو طرف تقویت شود. در این نوع دیوار برشی فولادی کامپوزیتی، مانند دیوار برشی فولادی تقویت‌نشده، ورق جان دارای مقاومت کمناشی پایین است و ظرفیت برشی سیستم توسط ایجاد میدان‌های کششی قطری در ورق کامپوزیتی جان تحمل می‌شود. در این نوع خاص دیوار برشی فولادی، نقش الیاف پلیمری تقویت‌شده در افزایش مقاومت برشی پس از کمناش و سختی ثانویه سیستم قابل توجه است. این سیستم هم دارای خصوصیات مثبت دیوار برشی فولادی تقویت‌نشده مانند هزینه‌ی پایین و سرعت اجرای ساخت بالا است و هم چنین دارای ویژگی مثبت دیوار برشی فولادی کامپوزیتی مانند سختی و مقاومت بالا در کنترل تغییرمکان‌ها است [4].

در طی چهار دهه‌ی گذشته مطالعات آزمایشگاهی و تحلیلی زیادی بر روی عملکرد لرزه‌ای دیوارهای برشی فولادی انجام شده که منجر به شناخت بهتر نسبت به عملکرد این نوع سیستم مقاوم جانبی شده‌است. واگنر [5] اولین محقق بود که از میدان کششی یکنواخت قطری برای محاسبه‌ی ظرفیت پانل‌هایی با بال‌های صلب و جان لاغر استفاده کرد و

در دیوارهای برشی فولادی کامپوزیتی مورد بررسی قرار دادند.

لوبل و همکاران [17] رفتار دو دیوار برشی فولادی یک طبقه و یک دیوار برشی چهارطبقه را به صورت آزمایشگاهی، تحت بارگذاری سیکلی مورد مطالعه قرار دادند و نتایج را با مدل تحلیلی مقایسه کردند و نشان دادند که ظرفیت بعد از کمزشی را مدل تحلیلی به خوبی برآورد می‌کند، در حالی که برآورد سختی به روش تحلیلی با خطای نسبتاً زیادی همراه است. کسپس و همکاران [18] مطالعات آزمایشگاهی به منظور بررسی نسبت ضخامت ورق جان به بعد پانل و همچنین نوع اتصال تیر به ستون انجام دادند و نشان دادند که مود شکست در هنگام استفاده از جان ضخیم تر به صورت ناپایداری در ستون است و اختلاف بین اتصال ساده و خمشی ناچیز است. درایور و همکاران [19] رفتار یک دیوار برشی فولادی چهار طبقه با جان لاغر تحت بارگذاری سیکلی را به صورت آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار دادند. علوی - ناطقی [۲۰] مطالعات آزمایشگاهی و تحلیلی بر روی ترکیب سخت‌کننده‌های قطری با بازشوی استراتژیک در دیوار برشی فولادی انجام دادند و نتیجه گرفتند که این نوع سیستم دارای جذب انرژی بالا و رفتار لرزه‌ای مناسب می‌باشد. به علاوه آنها روابط نظری را برای تخمین ظرفیت دیوار برشی فولادی با شرایط مختلف لاغری و با توجه به نقش سختی اعضای مرزی ارائه کردند [21]. ویان و همکاران [22] رفتار دیوارهای برشی فولادی با اتصال RBS تیر به ستون مرکب با ورق پرکننده سوراخ‌دار جان تحت بارگذاری سیکلی را به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. علی‌نیا [23,24] تأثیر اعضای مرزی در رفتار دیوارهای برشی با جان لاغر را به صورت تحلیلی مورد ارزیابی قرار داد و نشان داد که سختی اعضای مرزی در کمزشی الاستیک برشی ورق جان و رفتار بعد از کمزشی نقش خیلی کمی دارد.

بیان نمود که کمزشی جان نمی‌تواند نشان‌دهنده‌ی ظرفیت نهایی سیستم باشد. براساس این ایده، محققان زیادی مدل‌های تحلیلی برای برآورد ظرفیت سیستم دیوار برشی فولادی پیشنهاد داده‌اند. توربرن و همکاران [6] روش تحلیلی «مدل نواری» را برای برآورد ظرفیت دیوارهای برشی فولادی تقویت‌نشده با جان لاغر تحت نیروی برشی توسعه و پیشنهاد دادند. تیملر و همکاران [7] روابط موجود برای به‌دست آوردن زاویه‌ی میدان‌های کششی را در ورق جان با آزمایش‌هایی اصلاح کردند. الگالی [8] به صورت آزمایشگاهی رفتار دیوارهای برشی فولادی را مورد بررسی قرار داد و یک مدل تحلیلی برای به‌دست آوردن رفتار این نوع سیستم‌ها ارائه داد. برمن و برونو [9] نیز یک روش تحلیل پلاستیک برای تحلیل این نوع سیستم‌ها ارائه داده‌اند. مدل نواری امروزه در آیین‌نامه‌ی کانادا (CAN/CSA 2001) [10] و AISC [11] برای برآورد ظرفیت سیستم دیوار برشی فولادی پیشنهاد شده‌است. البته روش‌های دیگری نیز مانند روش اندرکنش - قاب - ورق (PFI) [12] و روش اصلاح‌شده‌ی اندرکنش - قاب - ورق (M-PFI) [13] نیز برای برآورد ظرفیت برشی این نوع سیستم‌ها ارائه شده‌است که به نظر مؤلفان از جهاتی مانند دقت بالاتر در محاسبه‌ی رفتار چندخطه‌ی سیستم و در نظر گرفتن اثر اندرکنشی قاب و ورق پرکننده دارای برتری نسبت به مدل نواری است. مؤلفان روابطی برای به‌دست آوردن رفتار چندخطه‌ی سیستم دیوار برشی تقویت‌شده با FRP براساس این دو روش توسعه و پیشنهاد داده‌اند [4].

آستانه و زاهو [14,15] مطالعات آزمایشگاهی بر روی دو نمونه از دیوار برشی فولادی کامپوزیتی سه‌طبقه، تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی انجام دادند. آنها نشان دادند که لایه‌ی بتنی توزیع تنش بهتری را در ورق جان ایجاد می‌کند و خطوط میدان‌های کششی را در ناحیه‌ی بیشتری توسعه می‌دهد. رهایی و حاتمی [16] به‌طور تحلیلی و آزمایشگاهی اثر فاصله‌ی گل‌میخ‌های برشی، صلبیت تیر میانی، و نوع اتصال تیر به ستون را

### مطالعه‌ی آزمایشگاهی

پیچ صورت گرفته است و تقریباً به صورت گیردار عمل می‌کند. اعضای مرزی طوری طراحی شده‌اند که تمامی محدوده‌ی تغییر مکان‌ها همواره در ناحیه‌ی خطی قرار داشته باشد. هم‌چنین اعضای مرزی حداقل الزامات پیشنهادی در AISC 341-05 را برآورده می‌کند. هدف از انتخاب اعضای مفصلی، حذف اثر اندرکنشی اعضای مرزی با ورق پرکننده بوده است، و هم‌چنین بررسی تنها اثر نوع ورق پرکننده‌ی جان در رفتار سیستم‌های دیوار برشی تقویت‌شده و تقویت‌نشده است. در تمامی آزمایش‌ها، اعضای مرزی یکسان است.

در تمامی این پنج مدل آزمایشگاهی، ورق پرکننده‌ی جان به صورت مربعی شکل، با بعد ۰/۶ متر انتخاب شده است. تعدادی جابه‌جایی سنج و کرنش سنج نیز در نقاط حساس مورد نظر بر روی نمونه‌ها نصب گردید. در شکل (۲) نحوه‌ی قرارگیری نمونه‌ها در دستگاه بارگذاری محوری (Roell-Amsler) برای انجام آزمایش‌ها نشان داده شده است.

مشخصات ورق پرکننده‌ی جان در مدل‌های مورد بررسی در جدول (۱) نشان داده شده است. در نمونه‌ی SPSP1، از ورق فولادی تقویت‌نشده به ضخامت ۰/۹mm به عنوان ورق پرکننده‌ی جان استفاده شده است. در مدل‌های بعدی، ورق پرکننده‌ی جان ۰/۹mm، با تعدادی لایه پلیمری GFRP با چیدمان متفاوت، مطابق شکل (۳) تقویت شده است.

الیاف پلیمری شیشه‌ی مورد استفاده برای ساخت ورق‌های کامپوزیتی، با نام تجاری SikaWrap-Hex-430G ساخت شرکت سیکا است. این نوع الیاف به صورت یک‌جهته می‌باشد. از چسب Sikadur-330، برای اتصال ورق‌های فولادی به لایه‌های پلیمری استفاده شده است. براساس داده‌های شرکت سازنده، ضخامت یک لایه الیاف پلیمری SikaWrap-Hex-430G با اپوکسی Sikadur-330 برابر ۰/۵۰۸mm است. در افزایش مقاومت ورق‌های کامپوزیتی، راست تا قرارگیری الیاف نقش بسیار مهمی را ایفا می‌کند. علت آن، مقاومت و سختی زیاد در راستای الیاف، و مقاومت

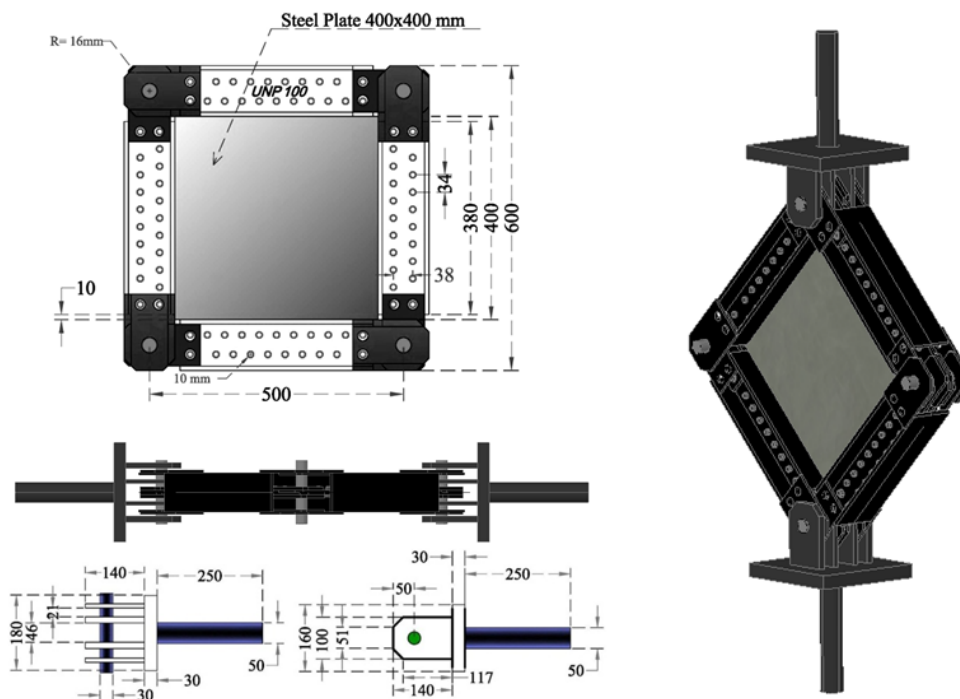
برای ارزیابی رفتار لرزه‌ای دیوارهای برشی فولادی تقویت‌شده با الیاف پلیمری شیشه‌ی تعدادی آزمایش بر روی یک مدل مقیاس شده انجام شده است. مدل آزمایشگاهی شامل یک پانل برشی یک‌طبقه، با اتصال مفصلی اعضای مرزی در چهار گوشه‌ی قاب و هم‌چنین اتصال پیچی اعضای مرزی به ورق پرکننده است. در مدل اول آزمایشگاهی از ورق پرکننده‌ی فولادی تقویت‌نشده استفاده شده است، در حالی که در چهار مدل بعدی آزمایشگاهی از ورق پرکننده‌ی فولادی تقویت‌شده با الیاف پلیمری شیشه‌ی با تعداد لایه‌های تقویتی متفاوت با چیدمان‌های متفاوت استفاده شده است. نمونه‌های مورد بررسی تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی سیکلی در امتداد قطری براساس الگوی بارگذاری ATC-24 به وسیله‌ی جک‌های هیدرولیکی ۶۰۰kN قرار گرفته است. در ادامه به‌طور کامل رفتار این نوع سیستم‌ها مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

### مدل‌های آزمایشگاهی و چیدمان آزمایش

در این تحقیق تعدادی آزمایش بر روی دیوارهای برشی فولادی تقویت‌نشده و تقویت‌شده انجام شده است. مدل آزمایشگاهی شامل یک دیوار برشی فولادی یک‌طبقه، با اتصال مفصلی اعضای مرزی در چهار گوشه‌ی قاب و هم‌چنین اتصال پیچی اعضای مرزی به ورق پرکننده است. جزئیات اجزای تشکیل‌دهنده‌ی پانل برشی فولادی در شکل (۱) نشان داده شده است. اعضای مرزی این پانل برشی متشکل از چهار بازو و با طول یکسان و برابر با ۰/۶ متر است. هر بازو از دو پروفیل UNP100 که از قسمت جان توسط دو ردیف پیچ با مقاومت بالا با قطر ۱۰ میلی‌متر متصل می‌باشد، تشکیل شده است، به طوری که ورق پرکننده بین دو پروفیل قرار گرفته است و توسط پیچ‌ها به بازوها متصل می‌شود. اتصال این چهار بازو که تشکیل یک قاب مربعی شکل را می‌دهند، به صورت مفصلی انتخاب شده است. اتصال ورق جان به اعضای مرزی نیز توسط این دو ردیف

در راستای قرارگیری الیاف ممکن است به طور قابل توجهی ظرفیت سیستم را کاهش دهد.

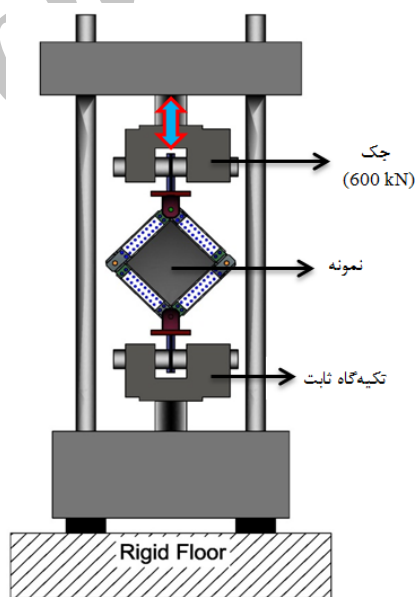
و سختی ناچیز در راستای عمود بر الیاف است. حالت بهینه‌ی استفاده از الیاف در صورتی است که راستای اصلی قرارگیری الیاف در راستای اعمال بار باشد. تغییر



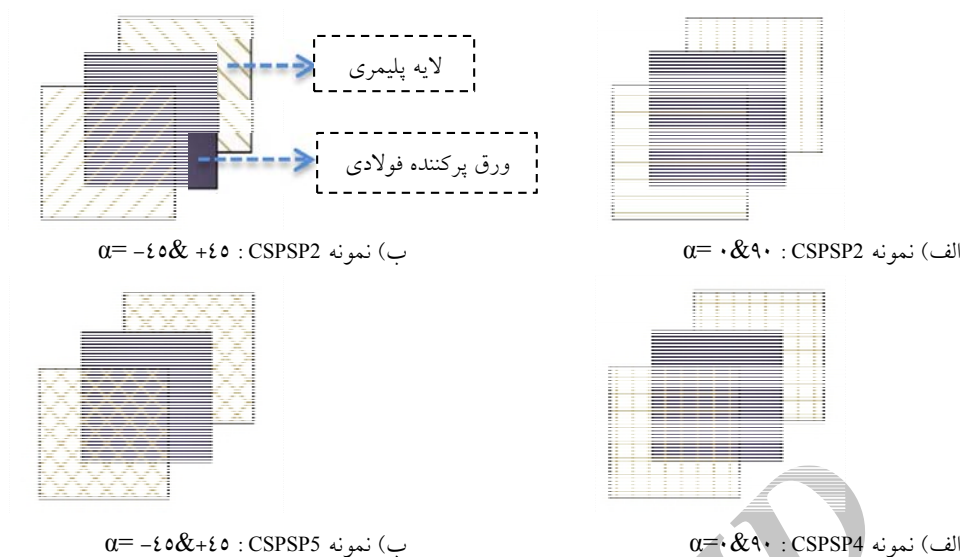
ب) جزئیات دقیق پانل برشی فولادی کامپوزیتی

الف) نمای پانل برشی فولادی کامپوزیتی

شکل ۱ جزئیات نمونه‌ی آزمایشگاهی



شکل ۲ چیدمان آزمایش (Test Set-up)



شکل ۳ حالت‌های مختلف تقویت ورق پرکننده‌ی فولادی با الیاف پلیمری در مدل‌های آزمایشگاهی

جدول ۱ مشخصات ورق پرکننده‌ی جان در نمونه‌های آزمایشگاهی

مدل آزمایشگاهی	تعداد لایه در ورق پرکننده		ضخامت هر لایه در ورق پرکننده (mm)		زاویه‌ی قرارگیری لایه‌های پلیمری نسبت به راستای افقی تیر	نوع الیاف پلیمری
	لایه‌ی فولادی	لایه‌ی پلیمری	ورق فولادی	لایه‌ی پلیمری		
SPSP1	۱	۰	۰٫۹	-	-	-
CSPSP2	۱	۲	۰٫۹	۰٫۵۰۸	۹۰ # ۰	SikaWrap-430G
CSPSP3	۱	۲	۰٫۹	۰٫۵۰۸	۴۵ # -۴۵	SikaWrap-430G
CSPSP	۱	۴	۰٫۹	۰٫۵۰۸	۹۰ & ۰ # ۹۰ & ۰	SikaWrap-430G
CSPSP5	۱	۴	۰٫۹	۰٫۵۰۸	۴۵ & -۴۵ # ۴۵ & -۴۵	SikaWrap-430G

در صد به دست آمده است. خلاصه‌ی نتایج تست کشش در جدول (۲) ارائه شده است. الیاف پلیمری تقویت شده دارای رفتار تقریباً خطی تا گسیختگی نهایی است. براساس اطلاعات شرکت سازنده، مدول الاستیسیته و تنش گسیختگی یک لایه از الیاف SikaWrap-Hex-430G با اپوکسی Sikadur 330 در راستای طولی الیاف به ترتیب برابر با ۲۶/۴۹ MPa و ۵۳۷ MPa است. این مقادیر در جهت عمود بر راستی طولی الیاف به ترتیب برابر با ۷/۰۷ MPa و ۲۳ MPa است. کرنش گسیختگی در راستای طولی و عرضی الیاف به ترتیب برابر با ۲/۲٪ و ۰/۴۶٪ می‌باشد. به طور خلاصه در جدول (۳) مشخصات مکانیکی لایه‌ی

### خصوصیات مکانیکی مصالح

برای به دست آوردن مشخصات دقیق مکانیکی از جمله رفتار تنش-کرنش مصالح، بر روی مصالح مصرفی در اعضای مرزی و هم‌چنین ورق پرکننده آزمایش تست کشش (Test Coupon) براساس استاندارد ASTM-A370-05 انجام شده است [25]. براساس این آزمایش‌ها، مقاومت تسلیم و مدول الاستیسیته ورق فولادی پرکننده‌ی جان به ترتیب برابر ۱۹۷ MPa و ۲۰۴ GPa به دست آمده است. برای اعضای مرزی (UNP-100) نیز این مقادیر به ترتیب برابر ۳۱۰ MPa و ۲۰۳ GPa به دست آمده است. کرنش گسیختگی برای ورق پرکننده‌ی جان و اعضای مرزی به ترتیب برابر با ۲۶ و

کامپوزیتی ارائه شده است.

بازویی از دو المان MPC184 و COMBIN7 به طور ترکیبی استفاده شده است. با توجه به در دست داشتن نتایج تست کشش برای فولاد مصرفی در آزمایش، رفتار مصالح استفاده شده در قاب و ورق پرکننده در مدل المان محدود به صورت رفتار خمیری سخت شونده سینماتیک و به صورت مستقل از سرعت مدل سازی گردید. در این نوع رفتار از مدل بسلینگ استفاده می شود و اثر بوشینگر در نظر گرفته می شود. نوع تحلیل انجام شده در این تحقیق از نوع تحلیل غیرخطی با تغییر مکان های بزرگ و با اعمال نقص اولیه بر اساس مود اول کماتش بوده است. نوع بارگذاری وارد بر سازه به صورت کنترل- تغییر مکان و به صورت بارافزا صورت گرفته است. اعمال بار در امتداد قطری نمونه ها و مشابه با شرایط آزمایشگاه صورت گرفته است. منحنی نیرو- تغییر مکان این نمونه در شکل (۵) نشان داده شده است. در شکل (۶) وضعیت تنش های وان- میسر و تغییر مکان های خارج از صفحه ی پانل برشی فولادی نشان داده شده است.

## بارگذاری

تمامی نمونه ها تحت بارگذاری شبه استاتیکی سیکلی در امتداد قطری خود، مطابق شکل (۲) قرار گرفتند. بارگذاری به صورت کنترل تغییر مکان و بر اساس پروتکل بارگذاری (1992) ATC-24 [26] از دامنه ی کوچک بارگذاری تا شکست نمونه ها ادامه پیدا کرد. پروتکل بارگذاری یکسانی که بر روی تمامی نمونه ها اعمال شده است، در شکل (۴) نشان داده شده است. برای به دست آوردن پروتکل بارگذاری نیاز به مقدار تغییر مکان تسلیم نمونه ها بوده است و این مقدار با استفاده از تحلیل المان محدود با برنامه ی ANSYS به دست آمده است. المان مورد استفاده برای مدل سازی اعضای مرزی و ورق فولادی از نوع پوسته ی ۱۸۱ (Shell-181) است. این المان چهار گرهی است که هر گره آن دارای ۳ درجه آزادی انتقالی و ۳ درجه آزادی دورانی است و برای مدل سازی ورق ها و پوسته ها مناسب است. برای ایجاد مفصل خمشی در اعضای

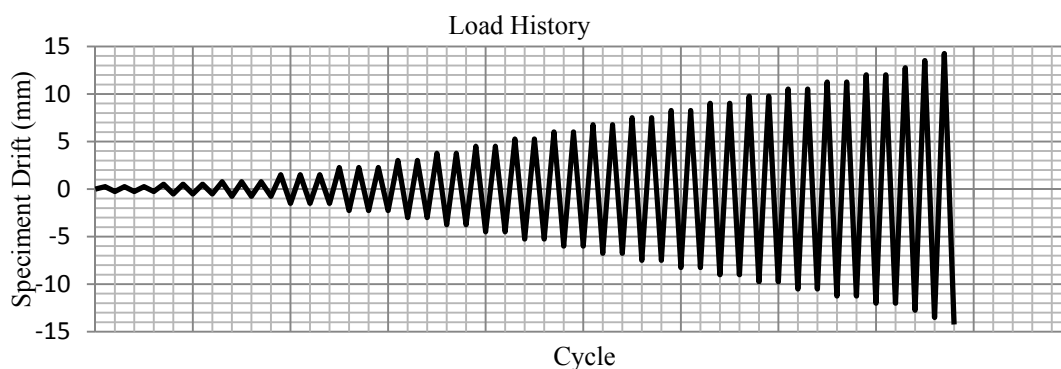
جدول ۲ خصوصیات مکانیکی مصالح مصرفی فولادی

نوع مصالح	مدول الاستیسیته GPa	تنش تسلیم MPa	کرنش تسلیم %	تنش نهایی MPa	کرنش حد نهایی %	کرنش گسیختگی %
ورق با ضخامت ۰٫۹ میلی متر	۲۰۴	۱۹۷	۰٫۰۹۷	۳۲۳/۲	۲۵	۲۶
ناودانی ۱۰۰	۲۰۳	۳۱۰	۰٫۲۳	۴۶۰/۵	۱۸	۱۹

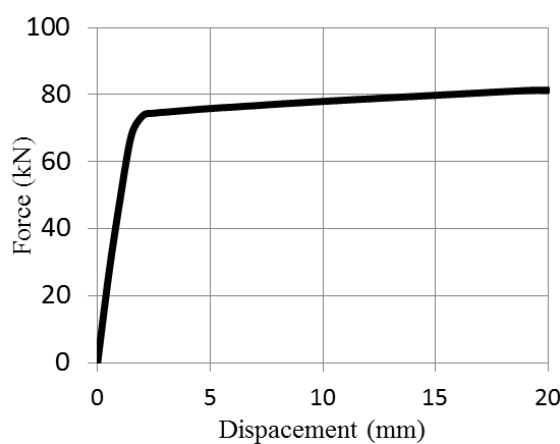
جدول ۳ مشخصات مکانیکی لایه ی کامپوزیتی تقویتی

نوع لایه ی کامپوزیتی			
مدول الاستیسیته ی کششی		مقاومت کششی نهایی	
EX (GPa)	EY (GPa)	TX (MPa)	TY (MPa)
۲۶/۴۹	۷/۰۷	۵۳۷	۲۳

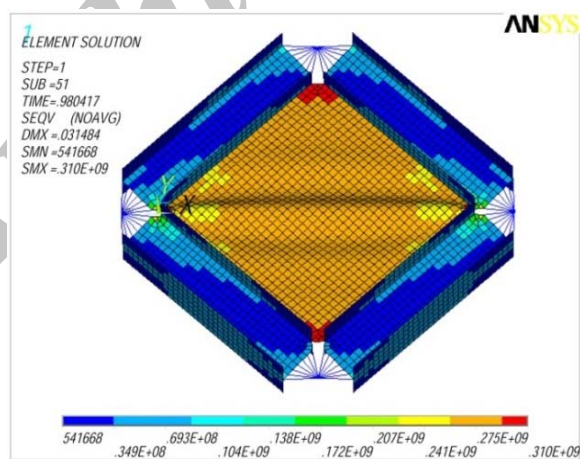
الیاف پلیمری SikaWrap-Hex-430G با اپوکسی Sikadur 330



شکل ۴ پروتکل بارگذاری بر روی نمونه‌های مورد بررسی براساس ATC-24



شکل ۵ نمودار نیرو- تغییر مکان نمونه SPSP1



شکل ۶ وضعیت تنش‌های وان- میز در نمونه SPSP1

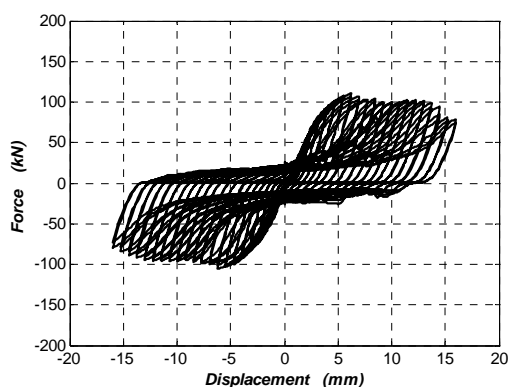
اول بارگذاری به صورت خطی بوده و در جابه‌جایی نسبی ۰/۴۲٪ در ورق جان کمانش الاستیک قابل مشاهده بوده است. بعد از تسلیم ورق پرکننده تحت

### تفسیر نتایج

نمونه SPSP1 منحنی هیستریزس نمونه‌ی SPSP1 در شکل (۷) نشان داده شده است. رفتار نمونه در مراحل



توسعه پیدا کرد و به تدریج از ظرفیت سیستم کاسته شد. پارگی‌ها در لایه پلیمری، در راستای عمود بر امتداد اصلی الیاف رخ داد و با رشد این پارگی‌ها جدا شدگی بین باند لایه فولادی و پلیمری اتفاق افتاد (شکل ۱۰). تا جابه‌جایی ۱۵ mm ظرفیت سیستم در حدود ۱۰۰ kN باقی ماند و در جابه‌جایی‌های بزرگ‌تر با رشد گسیختگی‌ها، این مقدار به ۸۰ kN رسید که تقریباً برابر با ظرفیت نمونه‌ی تقویت نشده‌است.



شکل ۹ منحنی هیستریزس نمونه‌ی CSPSP2

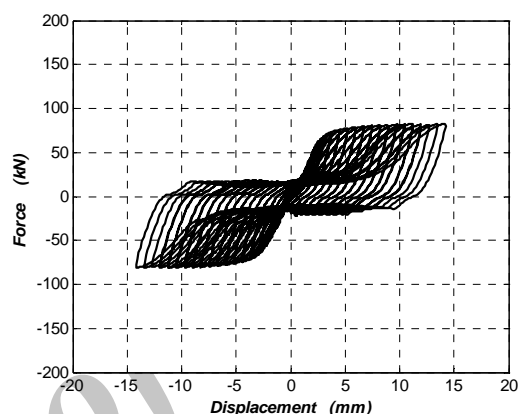


شکل ۱۰ پدیده‌ی لایه-لایه شدن و پارگی در لایه‌ی پلیمری در نمونه‌ی CSPSP2

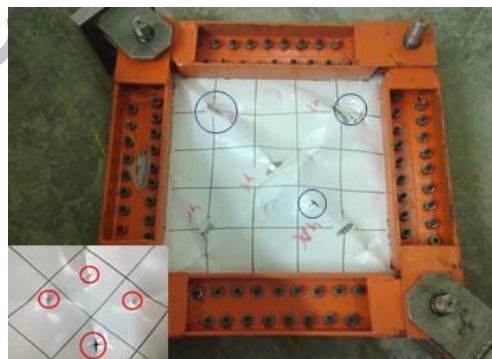
**نمونه‌ی CSPSP3.** منحنی هیستریزس نمونه‌ی CSPSP3 در شکل (۱۱) نشان داده شده‌است. رفتار نمونه در مراحل اول بارگذاری به صورت خطی بود و در جابه‌جایی نسبی ۰/۷۲٪ در ورق جان کماتش الاستیک مشاهده شد. بعد از تسلیم لایه‌ی فولادی ورق جان که در جابه‌جایی ۴/۴ mm تقریباً رخ داد، کماکان رفتار سیستم حالت سخت شونده داشت. این اضافه مقاومت توسط لایه‌های پلیمری تأمین شده بود. بعد از جابه‌جایی‌های بزرگ‌تر از ۶/۵ mm، پارگی‌هایی در

نشریه‌ی مهندسی عمران فردوسی

میدان‌های کششی قطری ظرفیت سیستم تقریباً ثابت و برابر با ۸۲/۵۸ kN به دست آمده‌است. طی بارگذاری پارگی‌هایی در ورق جان در جابه‌جایی‌های نسبتاً زیاد به صورت موضعی رخ داده‌است که در شکل (۸) نشان داده شده‌است. همان‌طور که منحنی هیستریزس این نمونه نشان می‌دهد، این گسیختگی‌های موضعی تأثیری در کاهش مقاومت برشی پانل نداشته‌اند.



شکل ۷ منحنی هیستریزس نمونه‌ی SPSP1

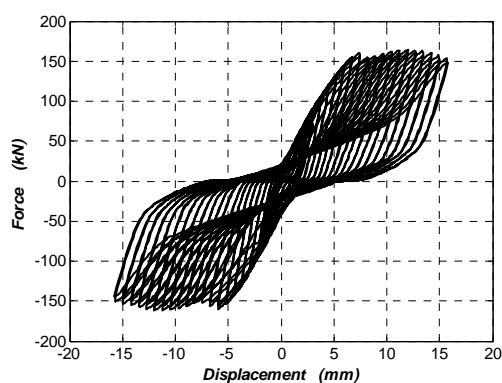


شکل ۸ پارگی‌های موضعی در ورق پرکننده‌ی جان

**نمونه‌ی CSPSP2.** منحنی هیستریزس نمونه‌ی CSPSP2 در شکل (۹) نشان داده شده‌است. در این نمونه ورق پرکننده‌ی فولادی جان با دو لایه‌ی پلیمری تقویت شده‌است. تا جابه‌جایی ۳ mm رفتار نمونه تقریباً به صورت خطی بود و در جابه‌جایی‌های بزرگ‌تر از ۵/۲۵ mm (۰/۷۵٪) کماتش در ورق جان اتفاق افتاد. در جابه‌جایی ۷ mm ظرفیت سیستم به ۱۲۰ kN رسید. در جابه‌جایی‌های بزرگ‌تر از ۸ mm، گسیختگی‌های موضعی در لایه‌ی تقویتی پلیمری

سال بیست و هفتم، شماره‌ی یک، ۱۳۹۴

۴۵ درجه می‌سازد. در این مدل ضخامت ورق پرکننده ۰/۹ میلی‌متر است و در هر طرف ۲ لایه‌ی پلیمری قرار دارد. منحنی هیستریزیس نمونه‌ی CSPSP3 در شکل (۱۳) نشان داده شده است. کماتش الاستیک در این نمونه در ورق جان در تغییر مکان نسبی ۰/۷۵٪ رخ داده است. ظرفیت نمونه در جابه‌جایی ۷mm به kN ۱۶۵/۶ رسید و در تغییر مکان‌های بزرگ‌تر، تقریباً این مقدار ثابت باقی ماند. در این نمونه برخلاف دو نمونه‌ی تقویت شده‌ی پیشین، هیچ‌گونه پدیده‌ی پارگی و لایه-لایه شدن در لایه‌ی پلیمری مشاهده نشد (شکل ۱۴).



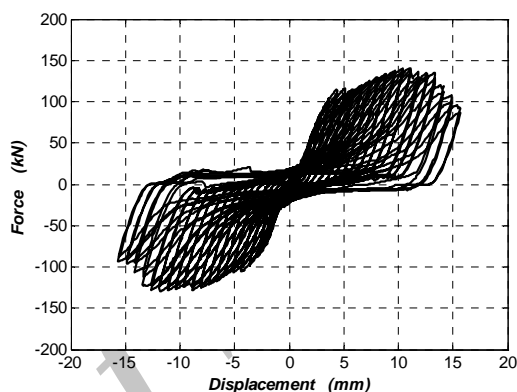
شکل ۱۳ منحنی هیستریزیس نمونه‌ی CSPSP4



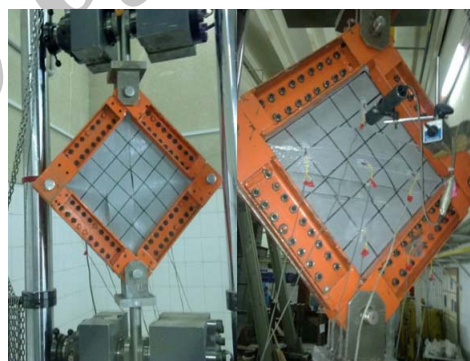
شکل ۱۴ عدم مشاهده‌ی پدیده‌ی لایه-لایه شدن و پارگی در لایه‌ی پلیمری نمونه‌ی CSPSP4 (وضعیت نمونه در تغییر مکان نسبی ۲٪)

**نمونه‌ی CSPSP5.** در این نمونه ورق فولادی پرکننده‌ی جان از هر طرف با دو لایه از الیاف پلیمری عمود بر هم در هر طرف تقویت شده است. راستای قرارگیری طولی الیاف در راستای میدان‌های کششی قرار گرفته است. منحنی هیستریزیس نمونه‌ی CSPSP5

راستای عمود بر راستای طولی الیاف شروع به شکل‌گیری کرد. تا جابه‌جایی ۱۳/۵ میلی‌متر رفتار نمونه حالت سخت‌شونده داشت و در این جابه‌جایی ظرفیت سیستم به حدود ۱۴۰/۸ kN رسید. در جابه‌جایی‌های بزرگ‌تر، به علت رشد پارگی، لایه‌لایه شدن و همچنین جداشدگی لایه‌ی پلیمری (مطابق شکل ۱۲)، ظرفیت سیستم کاهش یافت.



شکل ۱۱ منحنی هیستریزیس نمونه‌ی CSPSP3

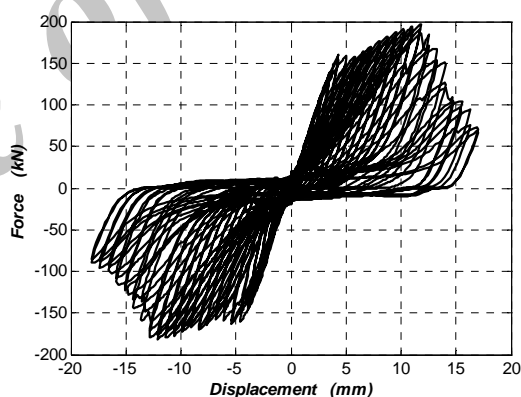


شکل ۱۲ پدیده‌ی لایه-لایه شدن و پارگی در لایه‌ی پلیمری نمونه‌ی CSPSP3

**نمونه‌ی CSPSP4.** نتایج آزمایش بر روی دو نمونه‌ی CSPSP2 و CSPSP3 نشان داد که یکی از مودهای خرابی در این نوع سیستم، گسیختگی و لایه-لایه شدن الیاف در راستای ضعیف ورق‌های GFRP است. با توجه به این مسئله و جلوگیری از این مود گسیختگی، در نمونه‌ی CSPSP4، ورق پرکننده‌ی فولادی با دو لایه‌ی عمود بر هم از الیاف پلیمری شیشه‌ی تقویت شده است. در این مدل راستای اصلی لایه‌های پلیمری با راستای میدان‌های کششی، زاویه‌های

بررسی پارامترهای مهم لرزه‌ای سیستم. الف) سختی و مقاومت برشی. در جدول (۴) مقدار سختی، مقاومت تسلیم و نهایی نمونه‌های مورد بررسی براساس منحنی‌های هیستریزیس آزمایشگاهی نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با اضافه کردن لایه‌ی کامپوزیتی سختی تمام نمونه‌ها افزایش پیدا کرده است. در نمونه‌های CSPSP2 و CSPSP3 که ورق پرکننده‌ی جان با دو لایه‌ی پلیمری تقویت شده است، مقدار سختی به ترتیب به میزان ۱۰ و ۳۹ درصد افزایش پیدا کرده است. بر این اساس اگر راستای الیاف موازی با میدان‌های کششی باشد میزان افزایش سختی سیستم تا میزان ۲۹ درصد نسبت به حالت دیگر قابل افزایش است. در نمونه‌های CSPSP4 و CSPSP5 که ورق پرکننده‌ی جان با چهار لایه‌ی پلیمری تقویت شده است، میزان سختی به ترتیب به میزان ۳۴ و ۵۹ درصد افزایش کرده است. در این حالت نیز با قرارگیری الیاف راستای الیاف پلیمری شیشه در راستای میدان‌های کششی مقدار سختی به میزان ۲۴ درصد افزایش پیدا کرده است. نتایج نشان می‌دهد که اگر راستای اصلی الیاف پلیمری در راستای میدان‌های کششی باشد میزان سختی در سیستم به بیشترین مقدار ممکن می‌رسد. مقاومت تسلیم و نهایی نیز در نمونه‌های تقویت شده افزایش پیدا کرده است. مقاومت نهایی در نمونه‌های CSPSP2، CSPSP3، CSPSP4 و CSPSP5 به ترتیب به میزان ۲۴، ۷۱، ۱۰۱ و ۱۲۰ درصد افزایش پیدا کرده است. بر این اساس مشاهده می‌شود که ظرفیت نهایی نمونه‌ها با افزایش تعداد لایه افزایش پیدا می‌کند. از طرف دیگر نتایج نشان می‌دهد که مقاومت نهایی نمونه‌ها تحت تأثیر مستقیم راستای قرارگیری لایه‌های پلیمری نسبت به میدان‌های کششی است. بر این اساس اگر راستای قرارگیری الیاف در راستای میدان‌های کششی باشد میزان مقاومت نهایی نیز در سیستم به بیشترین مقدار ممکن می‌رسد.

در شکل (۱۵) نشان داده شده است. کماتش الاستیک در این نمونه در ورق جان در تغییر مکان نسبی بزرگ‌تر از ۰/۷٪ رخ داده است. رفتار نمونه تا جابه‌جایی ۵mm تقریباً خطی بوده است. در جابه‌جایی ۵mm ظرفیت نمونه به ۱۶۰ kN رسید. در جابه‌جایی‌های بزرگ‌تر سختی سیستم کاهش یافت و رفتار سخت شونده‌ی نمونه تا جابه‌جایی ۱۲mm (۱/۷٪) ادامه داشت. در این تغییر مکان ظرفیت سیستم به ۱۸۰/۵ kN رسید. از این لحظه به بعد گسیختگی در لایه‌ی پلیمری در راستای میدان‌های کششی و به صورت قطری و هم‌چنین گسیختگی در محل اتصال ورق کامپوزیتی به اعضای مرزی مطابق با شکل (۱۶) رخ داد. از این لحظه به بعد از ظرفیت نمونه به سرعت با افزایش تغییر مکان کاسته شد و در مراحل پایانی بارگذاری ظرفیت نمونه به ۷۵ kN رسید.



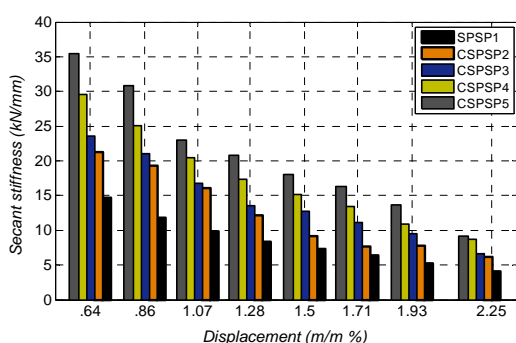
شکل ۱۵ منحنی هیستریزیس نمونه‌ی CSPSP5



شکل ۱۶ گسیختگی اتصال ورق کامپوزیتی به اعضای مرزی و پارگی لایه‌ی پلیمری در امتداد قطری در نمونه‌ی CSPSP5

جدول ۴ مقایسه‌ی مقدار سختی، مقاومت تسلیم و نهایی نمونه‌های آزمایشگاهی

مقاومت نهایی نسبی kN/kN	مقاومت نهایی kN	مقاومت تسلیم نسبی kN/kN	مقاومت نسلیم kN	سختی نسبی (kN/m)/(kN/m)	سختی kN/m	نمونه
۱	۸۲/۵۸	۱	۷۲/۸۸	۱	۲۶۱۱۵	SPSP1
۱/۲۴	۱۰۲/۳	۱/۳۸	۱۰۰/۵	۱/۱	۲۸۶۶۷	CSPSP2
۱/۷۱	۱۴۰/۸	۱/۵۸	۱۱۵	۱/۳۹	۳۶۳۲۵	CSPSP3
۲/۰۱	۱۶۵/۶	۲/۲	۱۶۰/۷	۱/۳۴	۳۴۹۸۱	CSPSP4
۲/۲	۱۸۲	۲/۲	۱۶۰	۱/۵۹	۴۱۶۵۲	CSPSP5



شکل ۱۷ سختی سکانت نمونه‌ی آزمایشگاهی

پ) میزان انرژی مستهلک شده‌ی تجمعی. میزان انرژی مستهلک شده‌ی تجمعی برای نمونه‌های آزمایشگاهی مورد مطالعه در تغییر مکان‌های نسبی مختلف بارگذاری در شکل (۱۸) نشان داده شده‌است. در چرخه‌های اول بارگذاری به‌علت این که هنوز نمونه‌ها در محدوده‌ی ناحیه‌ی الاستیک هستند، میزان انرژی مستهلک‌شده ناچیز می‌باشد. با افزایش بارگذاری و ورود پانل به ناحیه‌ی غیرخطی میزان انرژی جذب‌شده در سیکل‌هایی با دامنه‌ی بیشتر افزایش یافته‌است. همان‌طور که از شکل (۱۸) مشاهده می‌شود تقویت سیستم‌های مورد بررسی باعث افزایش میزان انرژی مستهلک‌شده‌ی تجمعی نمونه‌های آزمایشگاهی مورد بررسی شده‌است. در تغییر مکان نسبی ۲٪ میزان انرژی مستهلک‌شده‌ی تجمعی در نمونه‌های CSPSP2، CSPSP3، CSPSP4 و CSPSP5 به‌ترتیب به‌میزان ۲۴، ۲۸، ۴۸ و ۵۰ درصد نسبت به نمونه‌ی SPSP1 افزایش پیدا کرده‌است. همان‌طور که مشاهده می‌شود میزان جذب انرژی در نمونه‌های CSPSP3، CSPSP4 و نمونه‌های

سختی سکانت. در شکل (۱۷) روند تغییرات سختی سکانت برای نمونه‌های آزمایشگاهی مورد مطالعه در تغییر مکان‌های نسبی مختلف بارگذاری نشان داده شده‌است. مشاهده می‌شود که در تمام نمونه‌ها با افزایش دامنه‌ی بارگذاری سختی سکانت سیستم کاهش می‌یابد. در تمام نمونه‌های تقویت شده میزان سختی سکانت سیستم نسبت به نمونه‌ی تقویت‌نشده بیشتر است. در تغییر مکان نسبی ۲٪ سختی سکانت در نمونه‌های CSPSP2، CSPSP3، CSPSP4 و CSPSP5 به‌ترتیب به‌میزان ۴۸، ۸۱، ۱۰۰ و ۱۶۰ درصد نسبت به نمونه‌ی SPSP1 افزایش پیدا کرده‌است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در بین نمونه‌ها، نمونه‌هایی که با چهار لایه‌ی GFRP تقویت شده‌اند نسبت به تقویت با دو لایه‌ی GFRP تقویت‌شده، دارای سختی سکانت بیشتری هستند. از بین نمونه‌های CSPSP2، CSPSP3 که در آن‌ها تقویت با دو لایه‌ی GFRP صورت گرفته‌است، نمونه‌ی CSPSP3 که در آن راستای قرارگیری الیاف در راستای میدان‌های کششی بوده‌است سختی سکانت بیشتری دارد. همچنین از بین نمونه‌های CSPSP4 و CSPSP5 که تقویت با چهار لایه‌ی GFRP صورت گرفته‌است، نمونه‌ی CSPSP5 که در آن راستای قرارگیری الیاف در راستای میدان‌های کششی بوده‌است سختی سکانت بیشتری دارد. بر این اساس اگر راستای قرارگیری الیاف در راستای میدان‌های کششی باشد میزان سختی سکانت سیستم به بیشترین مقدار ممکن می‌رسد.

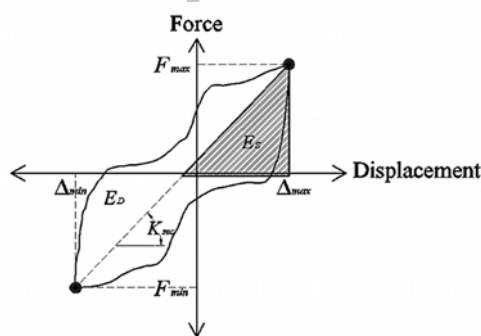
قرار گرفت و تأثیر استفاده از ورق پرکننده کامپوزیتی در رفتار لرزه‌ای سیستم دیوارهای برشی فولادی مورد مطالعه قرار گرفت. مهم‌ترین نتایج حاصل، به‌طور خلاصه به شرح زیر است:

۱- تمامی نمونه‌های مورد بررسی دارای رفتار هیستریزس مطلوب هستند.

۲- سیستم‌های تقویت‌شده نسبت به سیستم تقویت‌نشده دارای سختی و مقاومت به‌متراب بیشتری هستند. با افزایش لایه‌های پلیمری این مقادیر افزایش پیدا می‌کنند. راستای قرارگیری الیاف نسبت به میدان‌های کششی از پارامترهای مهم تغییر این پارامترها است؛ به‌نوعی که اگر راستای قرارگیری الیاف در راستای میدان‌های کششی باشد، این مقادیر به مقدار بیشینه‌ی خود می‌رسند.

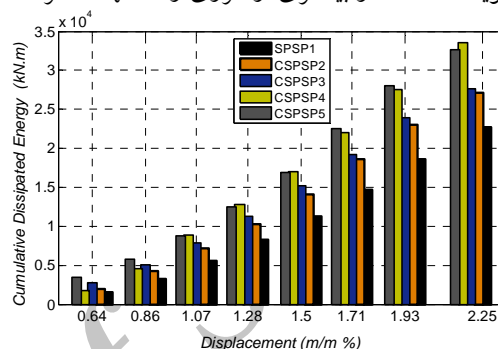
۳- میزان انرژی مستهلک شده‌ی نمونه‌ها در نمونه‌های تقویت‌شده نسبت به نمونه‌ی تقویت‌نشده افزایش یافته‌است. تغییر راستای قرارگیری لایه‌های پلیمری تقویت‌شده نسبت به میدان‌های کششی تأثیر زیادی بر میزان جذب انرژی سیستم ندارد و میزان جذب انرژی نزدیک به هم است و بیشتر به تعداد لایه‌های کامپوزیتی بستگی دارد.

۴- با تقویت ورق پرکننده‌ی جان با دو لایه‌ی عمود بر هم پلیمری در هر طرف، می‌توان از مود شکست تر مانند لایه-لایه شدن لایه‌ی پلیمری جلوگیری کرد.  
۵- راستای قرارگیری الیاف نسبت به میدان‌های کششی یک پارامتر مهم در رفتار لرزه‌ای این نوع سیستم‌ها است.



شکل ۱۹ یک حلقه از منحنی چرخه‌ای

و CSPSP5 به هم نزدیک است و تغییر راستای قرارگیری لایه‌های پلیمری تقویت‌شده نسبت به میدان‌های کششی تأثیر زیادی بر میزان جذب انرژی سیستم ندارد و میزان جذب انرژی نزدیک به هم است و تنها به تعداد لایه‌های کامپوزیتی بستگی دارد. در بین نمونه‌های مورد بررسی، نمونه‌هایی که با چهار لایه از الیاف GFRP تقویت شده‌اند نسبت به نمونه‌هایی با دو لایه‌ی GFRP تقویت‌شده مقدار بیشتری از انرژی را مستهلک کرده‌اند.



شکل ۱۸ انرژی مستهلک شده‌ی تجمعی نمونه‌ی آزمایشگاهی

(ت) مودهای شکست در باند بین لایه‌ی پلیمری GFRP و ورق فولادی. مودهای شکست در باند بین لایه‌ی پلیمری GFRP و ورق فولادی در نمونه‌های مورد بررسی به شرح زیر است:

- ۱- تقویت با یک لایه‌ی پلیمری در هر طرف (نمونه‌ی CSPSP2 و CSPSP3):
  - پارگی در راستای ضعیف الیاف در هر طرف.
  - پدیده‌ی لایه-لایه شدن در لایه‌ی پلیمری.
  - جداشدگی باند بین لایه‌ی پلیمری و فولادی.
- ۲- تقویت با دو لایه‌ی پلیمری در هر طرف (نمونه‌ی CSPSP4 و CSPSP5):
  - جداشدگی باند بین لایه‌ی پلیمری و فولادی.
  - شکست اتصال ورق به اعضای مرزی (فقط در نمونه‌ی CSPSP5).
  - گسیختگی در راستای اصلی الیاف در تغییر مکان‌های نسبی بزرگ (فقط در نمونه‌ی CSPSP5).

### نتیجه‌گیری

در این مقاله به‌صورت آزمایشگاهی رفتار دیوارهای برشی فولادی تقویت‌شده با الیاف پلیمری مورد بررسی

## تشکر و قدر دانی

این تحقیق با استفاده از کمک‌های مالی پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله و شرکت سیکا پارسیان در سال ۱۳۸۹ صورت گرفته است. انجام این تحقیق میسر نبود مگر با همکاری اعضای گروه آزمایشگاه سازه و گروه پژوهشکده‌ی مهندسی سازه و آقای دکتر عرفان علوی. از همکاری‌های صمیمانه‌ی مهندس محمدمهدی قانع نیز در ساخت نمونه‌ی آزمایشگاهی تقدیر می‌گردد.

## پیوست

الف) سختی سکانت

$$K_{sec} = \frac{\Delta F}{\Delta L} = \frac{F_{max} - F_{min}}{\Delta_{max} - \Delta_{min}} \quad (۱)$$

ب) ضریب میرایی ویسکوز معادل ( $\zeta_{hyst}$ )

$$\zeta_{hyst} = \frac{1}{4\pi} \left( \frac{E_D}{E_S} \right) \quad (۲)$$

پ)  $E_D$ : سطح زیر نمودار در هر چرخه

$$E_S = \frac{1}{8} (F_{max} - F_{min}) \times (\Delta_{max} - \Delta_{min}) \quad (۳)$$

## مراجع

1. Astaneh – Asl, A., "Seismic behaviour and design of steel shear walls", Steel TIPS Report, Structural Steel Educational Council, Moraga, CA, (2001).
2. Sabelli, R., Bruneau, M., "Design guide 20: steel plate shear walls", American Institute of Steel Construction. Chicago, IL, USA. (2007).
3. Zhao, X-L., Zhang, L., "State-of-the-art review on FRP strengthened steel structures", Engineering Structures; Vol. 29, PP.1808–23, (2007).
4. Khazaei-Poul, M., Natghi-Alahi, F., "Behavior of strengthened steel plate shear wall by FRP laminate", M.Sc. Thesis. International Institute Of Earthquake Engineering and Seismology, Iran, December; (2011).
5. Wagner, H., "Flat sheet metal girders with very thin webs", Part I, General theories and assumptions, Tech Memo, National Advisory Committee for Aeronautics, Washington D. C., No. 604, (1931).
6. Thorburn, L.J., Kulak, G.L., Montgomery, C.J., "Analysis of steel plate shear walls", Structural engineering report 107, Edmonton (Alberta, Canada): Department, (1983).
7. Timler, P.A., Kulak, G.L., "Experimental study of steel plate shear walls", Structural Engineering Report, University of Alberta, Canada, No. 114, (1983).
8. Elgaaly, M., "Thin steel plate shear walls behavior and analysis", Thin walled. Structures, Vol. 32, PP.151-180, (1998).
9. Berman, J.W., Bruneau, M., "Plastic analysis and design of steel plate shear walls", *Journal of Structural Engineering*. Vol. 129, PP. 1148–1156, (2003).
10. CAN/CSA S16-2001, "Limit state design of steel structures", Canadian Standards Association, Willowdale, ON., Canada. (2001).
11. AISC, "Specifications for structural steel buildings, American Institute of Steel Construction, Chicago, IL., USA, (2005b).
12. Sabouri-Ghomi, S., Ventura, C., Kharrazi, H.K., "Shear analysis and design of ductile steel plate

- walls", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 131, No. 6, June 1, (2005).
13. Kharrazi, MHK., "Rational method for analysis and design of steel plate walls", Ph.D. dissertation. Vancouver (Canada): University of British Columbia, (2005).
  14. Astaneh-Asl, A., "Seismic studies of innovative and traditional composite shear walls", Research project in-progress, Dept of Civil and Env Engineering: Univ. of California, Berkeley, (1998-2000).
  15. Astaneh-Asl, A., "Cyclic tests of steel shear walls", Research project. Berkeley: Dept. of Civil and Env Engineering, Univ of California, (2001).
  16. Rahai, A., Hatami, F., "Evaluation of composite shear wall behavior under cyclic loadings", *Journal of Constructional Steel*, Vol, 65(7), PP.1528-37, (2009).
  17. Lubell, A. S., Prion, H. G. L., Ventura, C. E., Rezai, M., "Un-stiffened steel plate shear wall performance under cyclic loading", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 126, No. 4, pp. 453-460, (2000).
  18. Caccese, V., Elgaaly, M., Chen, R., "Experimental study of thin steel-plate shear walls under cyclic load", *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol. 119, No. 2, pp. 573-587, (1993).
  19. Driver, R. G., Kulak, G. L., Kennedy, D. J. L., "Cyclic tests of four-story steel plate shear wall". *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol. 124, No. 2, pp. 112-120, (1998).
۲۰. علوی، عرفان و ناطقی الهی، فریبرز، "مطالعه‌ی تحلیلی و آزمایشگاهی دیوارهای برشی فولادی تقویت‌شده‌ی قطری"، رساله‌ی دکتری، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، (۱۳۸۹).
21. Nateghi, F., Alavi, E., "Theoretical seismic behaviour of steel plate shear walls", *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, China, NO. 05. 050120, (2008).
  22. Vian, D., Bruneau, M., Tsai, K. C., Lin, Y. C., "Special perforated steel plate shear walls with reduced beam section anchor beams, I: Experimental investigation", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 135, No. 3, March 1, (2009).
  23. Alinia, M. M., "A study into optimization of stiffeners in plates subjected to in- plane shear loads", *Thin-Walled Structures*, Vol. 43(4), PP. 845\_60, (2005).
  24. Alinia, M. M., Dastfan, M., "Behaviour of thin steel plate shear walls regarding frame members", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 62, PP.730-8, (2006).
  25. ASTM, A-370- 03, "Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products", ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States, (2006).
  26. ATC., "Guidelines for cyclic seismic testing of components of steel structures for buildings", Rep. No. ATC-24, Applied Technology Council, Redwood City, Calif, (1992).