

بررسی رفتار اتصال ورق FRP و مهارهای FRP بادبزی

مهرداد گرک یراق *

دانش آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

داود مستوفی نژاد

استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

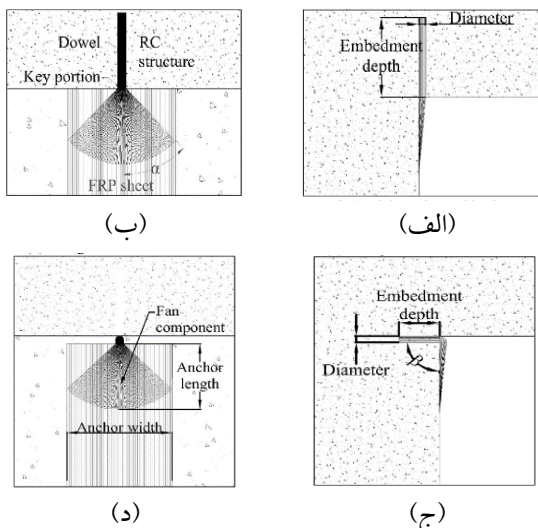
چکیده

تقویت سازه‌های بتن آرمه با استفاده از کامپوزیت‌های FRP مکانیزم‌های گسیختگی متنوعی را منجر می‌شود. متداول‌ترین مود شکست در نمونه‌های تقویت شده، جدا شدگی زود هنگام ورق FRP پیش از استحصال حداکثر ظرفیت کششی آن می‌باشد. یکی از روش‌های مؤثر در به تأخیر انداختن یا حذف جدا شدگی ورق‌های تقویتی استفاده از مهارهای FRP می‌باشد. در این مطالعه رفتار اتصال، پس از جدا شدگی ورق از سطح بتن و عملکرد مهار پس از جدا شدگی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در محدوده‌ی تحقیق، عمق قرارگیری مهار، نسبت سطح مقطع مهار به سطح مقطع ورق تقویتی و طول اتصال ورق FRP بر روی مهارهای مستقیم بررسی شد. بر اساس نتایج حاصل از آزمایش برش مستقیم، افزایش طول قسمت بادبزی مهارهای FRP مقاومت اتصال را افزایش می‌دهد. با این حال افزایش طول قسمت بادبزی تا ۹۰ میلی‌متر، توانایی حذف جدا شدگی ورق تقویتی از مهار FRP را ندارد. در ادامه‌ی تحقیق، طول بادبزی ۱۵۰ میلی‌متر مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد، در این نمونه مقاومت اتصال تقریباً به مقاومت نهایی کششی کامپوزیت FRP رسیده و به طور متوسط افزایش ۹۲ درصدی در مقاومت اتصال نسبت به نمونه‌هایی با طول بادبزی ۶۰ میلی‌متر اتفاق می‌افتد. مود شکست در این نمونه‌ها جدا شدگی ناگهانی در اتصال، به همراه آسیب جزئی به ورق تقویتی در ناحیه‌ی اتصال مهار به ورق است. افزایش مقاومت اتصال با افزایش طول قسمت بادبزی مهار را می‌توان ناشی از افزایش سطح اتصال بین ورق تقویتی و مهار بادبزی و انتقال تنش در سطحی بیشتر دانست.

واژه‌های کلیدی: کامپوزیت FRP، مهار بادبزی، اتصال FRP با بتن، جدا شدگی، مقاومت اتصال.

۱- مقدمه

شود و اگر زاویه از ۱۳۵ درجه بیش تر باشد شکست سطحی در بتن روی خواهد داد. بر اساس نتایج، گرد کردن لبه‌ی سوراخ‌ها اثر قابل ملاحظه‌ای بر تمرکز تنش و در نتیجه مقاومت اتصال دارد. هم چنین با افزایش عمق و زاویه‌ی مهار و نیز قطر حفره‌ها مقاومت اتصال افزایش می‌یابد [۴]. در سال ۲۰۱۹ کاستیلو و هم‌کاران، به بررسی مهارهای مستقیم پرداختند. هدف آن‌ها بررسی رفتار مهارهای FRP نصب شده در انتهای ورق‌های FRP و توسعه‌ی یک روش برای محاسبه‌ی ظرفیت اتصال، زمانی که مود شکست گسیختگی ورق تقویتی است، بیان شد. برای انجام این کار یک برنامه‌ی آزمایشگاهی مفصل انجام شد و مکانیزم انتقال نیرو بین مهار و سازه در عمق بتن مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج تجربی نشان داد که مقاومت بتن تأثیر چندانی بر نتایج ندارد. همچنین با افزایش زاویه‌ی باد بزنی نیروی نهایی کاهش می‌یابد؛ زیرا در این حالت به علت هم راستا نبودن نیرو و الیاف، نیروی برشی بیش‌تری در اتصال ایجاد می‌شود. هم چنین بر پایه‌ی نتایج، رابطه‌ی بین سطح مقطع مهار و بار نهایی خطی نیست؛ آن‌ها دلیل آن را کاهش کیفیت نصب با افزایش سطح مقطع مهار می‌دانستند [۵]. مهارها بر حسب محل کاربرد به دو دسته‌ی کلی مهارهای مستقیم و مهارهای خمیده تقسیم می‌شوند. شکل ۱ انواع مهارها و نیز اجزای تشکیل دهنده‌ی هر مهار را نشان می‌دهد [۷-۵].



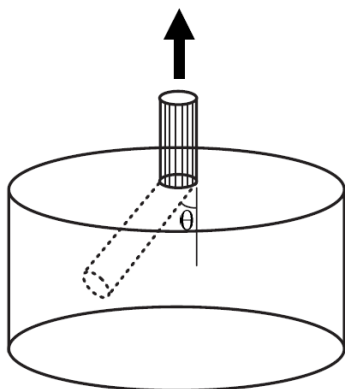
شکل ۱- مهارهای FRP مستقیم و خمیده؛ (الف) مهار مستقیم- نمای جانبی؛ (ب) مهار مستقیم- نمای فوقانی؛ (ج) مهار خمیده- نمای جانبی (د) مهار خمیده- نمای فوقانی [۷-۵]

مزایای کامپوزیت‌های FRP^۱ از جمله مقاومت کششی بالا، خوردگی کم، وزن مخصوص کم، سهولت در اجرا و خنثی بودن در مقابل امواج الکترومغناطیسی، سبب شده از آن‌ها به طور گسترده در تقویت سازه‌های بتن آرمه استفاده شود. استفاده از ورق‌های FRP مکانیزم‌های گسیختگی متنوعی را در پی خواهد داشت، که متداول‌ترین آن جدا شدگی زود هنگام کامپوزیت FRP پیش از استحصال حداکثر ظرفیت کششی آن می‌باشد. این رفتار ترد و شکننده باعث عدم استفاده‌ی کامل از ظرفیت FRP می‌شود. کارآیی تقویت سازه‌های بتن آرمه با استفاده از کامپوزیت‌های FRP در گروهی اتصال هر چه بهتر بین ورق تقویتی و سطح بتن است. بنا بر این همین‌طور که استفاده از ورق‌های FRP گسترش می‌یابد، دست‌یابی به حداکثر ظرفیت ورق تقویتی، مستلزم حذف یا به تأخیر انداختن جدا شدگی زود رس ورق تقویتی با به کارگیری روش‌ها و مکانیزم‌هایی جهت ایجاد مهار کافی می‌باشد. از جمله‌ی این روش‌ها استفاده از مهارهای FRP باد بزنی می‌باشد [۳-۱]. مهارهای FRP با استفاده از بافته‌ی الیاف لوله شده، آغشته به رزین اپوکسی به عنوان ماتریس ساخته می‌شوند که یک انتهای آن درون حفره‌ی آماده شده داخل بتن قرار گرفته و انتهای دیگر آن روی ورق FRP متصل می‌شود. مهارهای خارجی در تقویت اعضای بتن آرمه با ورق‌های FRP، توانایی افزایش ظرفیت و شکل‌پذیری و هم چنین به تأخیر انداختن یا حذف پدیده‌ی جدا شدگی را دارند.

در سال ۲۰۱۷ لورادو و هم‌کاران تأثیر پارامترهای هندسی و نصب مهار CFRP را بر حداکثر مقاومت، حالت شکست و رفتار بار-لغزش مهارهای FRP بررسی کردند. در این مطالعه، آزمایش‌های برش مستقیم بر روی طنابی از الیاف کربن جای گذاری شده در بتن برای شناسایی پارامترهای مؤثر بر ظرفیت مهارهای FRP انجام شد. پارامترهای مورد ارزیابی شامل روش ساخت و نصب، عمق گیرایی مهار، گرد کردن لبه‌ی سوراخ‌ها، قطر سوراخ و زاویه‌ی قرارگیری مهار داخل بتن بودند. زاویه‌ی قرارگیری مهار داخل بتن بین ۹۰ تا ۱۳۵ درجه در نظر گرفته شد؛ زیرا اگر زاویه کم‌تر از ۹۰ درجه باشد ممکن است به علت تمرکز تنش دچار گسیختگی مهار

^۱ Fiber Reinforced Polymers

- ۱- با افزایش هر یک از پارامترهای قطر، عمق و زاویه‌ی قرارگیری مهار داخل بتن، متوسط مقاومت اتصال کاهش می‌یابد.
- ۲- مقاومت بتن تنها برای نمونه‌هایی که عمق گیرایی مهار عدد کوچکی است اهمیت پیدا می‌کند؛ زیرا شکست این نمونه‌ها به صورت گسیختگی مخروطی در بتن اتفاق می‌افتد.
- ۳- برای جلوگیری از گسیختگی مهار، مقدار کافی از الیاف باید در مهار موجود باشد. این امر ممکن است نیاز به استفاده از مهارهایی با قطر بیش‌تر برای طول‌های بزرگ‌تر داشته باشد.



شکل ۲- نمونه‌های مورد استفاده در تحقیقات ازبک اوغلو و همکاران [۱۳]

در تحقیقات گذشته روش‌های مختلفی جهت ساخت مهارهای FRP مورد استفاده قرار گرفته است. در سال ۲۰۱۱ ژانگ و هم‌کاران، تحقیقاتی پیرامون مهارهای FRP از جنس شیشه و کربن انجام دادند. در این تحقیق، ۲۷ تست برش مستقیم جهت بررسی پارامترهای عرض ورق مورد استفاده برای ساخت مهار، جنس الیاف و روش ساخت مهار انجام شده است. در تحقیق آن‌ها دو روش برای ساخت مهارهای FRP مورد استفاده قرار گرفته است؛ در روش اول موسوم به روش خشک، مهار بدون هر گونه آغشته شدن به چسب اپوکسی استفاده می‌شود؛ اما در روش دوم موسوم به روش اشباع، آن قسمت از مهار که داخل بتن قرار می‌گیرد ۲۴ ساعت پیش از استفاده به چسب آغشته شده و به صورت رول در می‌آید و پس از خشک شدن از آن استفاده می‌شود.

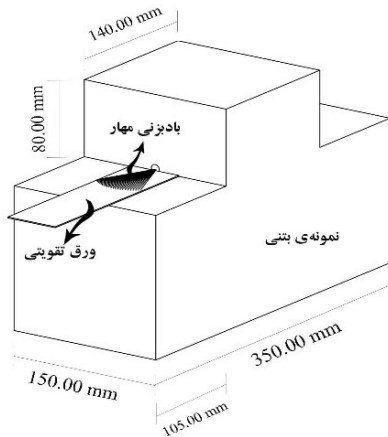
آزمایش‌ها نشان می‌دهند که مود شکست مهارهای ساخته شده به روش اشباع، جدا شدگی ورق به همراه گسیختگی مهار است و مود شکست مهارها اگر به صورت خشک مورد استفاده قرار گیرند، جدا شدگی ورق به همراه بیرون کشیدگی مهار است. نتایج

علاوه بر این‌ها، استفاده از مهارهای FRP در تقویت برشی و خمشی اعضای بتن آرمه شامل تیر، ستون، اتصالات و دال‌ها نشان می‌دهد که این مهارها ظرفیت باربری نهایی و شکل پذیری و جذب انرژی را به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌دهند [۱۰-۶]. در مقاوم سازی تیرهای بتن آرمه مؤثر بودن مهارهای خارجی در گروه تقویت کل تیر و تأمین قیود کافی برای نیروهای عکس العمل بین تیر و ورق تقویتی خواهد بود [۱۱]. اسپادا و هم‌کاران در سال ۲۰۰۰، اثر مهارهای خارجی بر روی مقاومت، الگوی شکست و شکل پذیری را بررسی کردند. در این تحقیق، مهارهای خارجی سبب به تأخیر افتادن جدا شدگی زود رس و بهبود شکل پذیری تیرها شدند. از طرفی تیرهای تقویت شده با مهار خارجی، بار نهایی بیش‌تری نسبت به تیرهای تقویت شده بدون مهار خارجی تحمل می‌کنند [۱۲].

در سال ۲۰۱۴ میثمی و هم‌کاران از FRP باد بزنی به جهت تقویت برش منگنه‌ای دال استفاده نمودند. یک دال بدون هیچ‌گونه تغییر به عنوان نمونه‌ی شاهد و سه دال با استفاده از FRP باد بزنی برای افزایش ظرفیت برشی و ایجاد مهار کافی تقویت شدند. برای تقویت از ۸، ۱۶ و ۲۴ تقویت کننده استفاده گردید. نتایج آزمایش نشان داد که روش تقویت ارائه شده، هم ظرفیت برش منگنه‌ای و هم ظرفیت تغییر شکل را افزایش داده و از شکست‌های ترد دال جلوگیری می‌کند. حالت شکست غالب برای دال‌های مسطح تقویت شده با FRP باد بزنی، جدا شدگی باد بزنی‌ها به دلیل عمق کم دال و همچنین جدا شدگی مهار انتهایی از سطح بتن بود. نتایج هم چنین نشان می‌دهند که این روش مقاوم سازی نه تنها می‌تواند ظرفیت برشی دال را تا مقداری در حدود دو برابر نمونه‌ی شاهد افزایش دهد، بلکه ممکن است مود خرابی دال را از برشی به برشی-خمشی و هم چنین خمشی تغییر دهد [۷].

تعدادی از تحقیقات پارامترهای مهارهای FRP را به تنهایی مورد بررسی قرار داده‌اند. در سال ۲۰۰۹ ازبک اوغلو و هم‌کاران رفتار کششی مهارهای FRP در بتن را بررسی نمودند. ۸۱ نمونه‌ی استوانه‌ای بتنی با قرارگیری مهارهای FRP تحت آزمایش بیرون کشیدگی قرار گرفتند (شکل ۲).

در این تحقیق پارامترهای مقاومت فشاری بتن، عمق قرارگیری مهار داخل بتن، قطر و زاویه‌ی مهار بر ظرفیت بیرون کشیدگی مهارها بررسی شد. اهم نتایج بررسی آن‌ها نشان داد [۱۳]:



شکل ۳- نمونه‌های آزمایش

۲-۲- مشخصات الیاف و اپوکسی مورد استفاده

در این تحقیق، تقویت نمونه‌ها با استفاده از کامپوزیت مسلح شده با الیاف کربن (CFRP) انجام گرفت. ورق مورد استفاده، محصول شرکت Sika سوئیس و با نام تجاری SikaWrap-Quantom-230C می‌باشد. همچنین رزین اپوکسی EPR3301 به عنوان ماتریس در کامپوزیت FRP استفاده گردید. مشخصات مکانیکی الیاف و رزین اپوکسی مورد استفاده در جدول ۱ نشان داده شده است [۱۷-۱۶].

جدول ۱- مشخصات مکانیکی الیاف و رزین اپوکسی مورد استفاده

نوع مصالح	مقاومت		ضخامت (mm)	کرنش نهایی (%)
	مدول الاستیسیته (GPa)	کششی (MPa)		
SikaWrap-230C	۲۳۸	۴۳۰۰	۰/۱۳۱	۱/۸
Quantom-EPR-3301	۴/۵	۳۰	-	۱/۵

این رزین اپوکسی تولید شرکت کوانتوم ایران بوده و از دو جزء A و B تشکیل شده است. نسبت جزء A به B برابر با ۳ به ۱ است. بر اساس کاتالوگ، زمان لازم جهت عمل آوری رزین اپوکسی ۷ روز در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد می‌باشد. همچنین میزان رزین مصرفی پیشنهاد شده توسط شرکت کوانتوم بین ۸۰۰ تا ۱۲۰۰ گرم به ازای هر متر مربع الیاف است. این رزین پیش از این در تحقیقات متعددی مورد استفاده قرار گرفته است، که نتایج آن‌ها نشان دهنده‌ی مقاومت مناسب کششی و برشی این رزین می‌باشد [۱۹-۱۸].

هم چنین حاکی از آن است که افزودن یک مهار به طور متوسط می‌تواند مقاومت اتصال را تا ۵۳ درصد نسبت به نمونه‌های شاهد افزایش دهد. علاوه بر این، استفاده از یک مهار می‌تواند ظرفیت لغزش اتصال را در مواردی بیش از ده برابر ظرفیت لغزش نمونه‌های شاهد افزایش دهد [۱۴].

در سال ۲۰۲۲ خراسانی و هم‌کاران با مروری بر تحقیقات پیشین، یک نمای کلی از تأثیر پارامترهای مختلف بر عملکرد مهارهای FRP در سازه‌های تقویت شده با کامپوزیت FRP ارائه دادند. تحقیقات آن‌ها نشان می‌دهد که مسائل و شکاف‌های زیادی برای پیش بینی ظرفیت مهارهای FRP وجود دارد [۱۵].

تا به امروز، تحقیقات محدودی برای بررسی رفتار اتصال بین مهار و ورق FRP انجام گرفته است. پارامترهایی متعددی نظیر نوع الیاف و رزین اپوکسی مورد استفاده، طول مهار، نسبت سطح مقطع مهار به سطح مقطع ورق تقویتی و مقاومت بتن بر نتایج تحقیق مؤثر هستند. الیاف و رزین اپوکسی استفاده شده در این تحقیق پیش از این در بسیاری از مقالات مورد استفاده قرار گرفته است. هدف از این تحقیق بررسی رفتار اتصال بین ورق و مهارهای FRP مستقیم پس از جدا شدگی ورق تقویتی از سطح بتن و ارزیابی عمق قرارگیری ۵۰ میلی‌متر برای انتقال تنش به بتن است. به همین جهت هیچ اتصالی بین ورق تقویت کننده و سطح بتن وجود ندارد. در این تحقیق تأثیر طول مهار و نسبت سطح مقطع مهار به سطح مقطع ورق تقویتی بر رفتار اتصال بررسی شد. به گونه‌ای که ورق تقویتی دچار گسیختگی نشده و یا مهار از داخل بتن دچار بیرون کشیدگی نشود.

۲- مراحل آزمایشگاهی

۲-۱- مشخصات نمونه‌ها و بتن مورد استفاده

به جهت انجام اهداف تحقیق نمونه‌هایی با ابعاد ۱۵۰×۱۵۰×۳۵۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد که بیرون آمدگی به اندازه‌ی ۸۰ میلی‌متر برای بررسی مهارهای FRP مستقیم در مرکز نمونه وجود دارد (شکل ۳).

۳ نمونه‌ی استوانه‌ای با ارتفاع ۲۰۰ میلی‌متر و قطر ۱۰۰ میلی‌متر جهت تعیین مقاومت فشاری بتن مصرفی، از هر مخلوط تهیه گردید. آزمایش فشاری تک محوره روی نمونه‌ها پس از ۲۸ روز قرارگیری در حوضچه‌ی آب، انجام شد.

۲-۳- دستگاه آزمایش برش مستقیم

پس از مقاوم سازی نمونه‌ها به وسیله ورق FRP، آزمایش برش مستقیم با استفاده از دستگاهی مجهز به یک جک هیدرولیکی با ظرفیت ۳۰۰ کیلو نیوتون انجام می‌گیرد (شکل ۴).



شکل ۴- دستگاه آزمایش برش مستقیم

۲-۴- طبقه بندی و تقویت نمونه‌های آزمایشگاهی

به جهت مطالعه و بررسی مهارهای FRP مستقیم، نمونه‌ها بر اساس عمق گیرایی مهار، طول باد بزی و نسبت سطح مقطع مهار به کامپوزیت FRP نام گذاری شدند.

نام گذاری نمونه‌های تقویت شده با استفاده از مهارهای باد بزی، به صورت PO-d-f-n است که PO نشان دهنده آزمایش برش مستقیم، d طول قسمت باد بزی مهار، f نسبت سطح مقطع مهار به ورق تقویتی و n شماره‌ی تکرار آزمایش می‌باشد. در همه‌ی آزمایش‌ها از ورق مسلح شده به الیاف کربن با ضخامت ۰/۱۳۱ و عرض ۴۸ میلی متر استفاده شد. هم چنین عمق قرارگیری مهار داخل بتن برای کلیه‌ی نمونه‌های تقویت شده با مهارهای FRP برابر ۵۰ میلی متر در نظر گرفته شد. بر اساس تحقیقات صورت گرفته توسط ازبک اوغلو و هم کاران [۱۳] اگر عمق گیرایی مهار در داخل بتن عدد کوچکی باشد، شکست مخروطی در بتن رخ خواهد داد. بنابراین عمق گیرایی ۵۰ میلی متر به صورتی انتخاب گردید تا شکست در بتن رخ نداد و مقاومت بتن تأثیر چندانی بر نتایج نداشته باشد. به جهت صحت سنجی نتایج، هر آزمایش دو بار انجام گرفت. در صورت وجود اختلاف غیر قابل قبول در نتایج، آزمایش تکرار شد. به منظور تقویت نمونه‌ها با این روش مراحل زیر انجام گرفت:

- ۱- حفره‌ای با قطر ۱۲ میلی متر و به عمق مورد نظر، به وسیله‌ی مته داخل بتن و دقیقاً هم راستا با محل قرار گیری ورق FRP ایجاد می‌شود (شکل ۵-الف)؛
- ۲- حفره‌ی ایجاد شده به وسیله‌ی دستگاه پمپ باد کاملاً از گرد و غبار تمیز می‌شود؛
- ۳- سطح نمونه برای ایجاد مانعی در مقابل اتصال ورق به آن کاملاً با چسب نواری پوشانده می‌شود (شکل ۵-ب)؛
- ۴- پس از اطمینان از تمیز شدن کامل حفره، نمونه به صورت عمودی قرار داده می‌شود و با رزین اپوکسی Quantum EPR 3301 پر می‌گردد؛
- ۵- مهار، داخل حفره‌ی پر شده با چسب قرار داده شده و چسب اضافی خارج شده از اطراف آن برداشته می‌شود.
- ۶- پس از گذشت چند دقیقه نمونه به حالت اول قرار داده شده و پس از اشباع ورق FRP، الیاف بخش باد بزی مهار بر روی سطح ورق به وسیله‌ی رزین متصل می‌شوند (شکل ۵-ج)؛

نمونه داخل دستگاه قرار گرفته و پس از تکیه دادن آن به صفحه‌ی قائم، نمونه تراز شده و تکیه گاه نگه دارنده‌ی فشاری محکم می‌شود؛ سپس انتهای آزاد ورق FRP با استفاده از جک هیدرولیکی با نیروی ۳۵۰ کیلو نیوتون محکم می‌گردد. دو ورق فولادی ۱۰۰×۱۰۰ میلی متر در انتهای ورق تقویتی استفاده شد تا از پارگی موضعی ورق تقویتی داخل فک دستگاه جلوگیری شود. هم چنین دو بولت به قطر ۱۶ میلی متر و یک شمش فولادی برای ممانعت از چرخش نمونه داخل دستگاه و بی اثر کردن نیروی خارج از محور به کار برده شد. در تمامی آزمایش‌ها بارگذاری به صورت کنترل تغییر مکان انجام گرفت. سرعت بار گذاری در دستگاه حاضر را می‌توان بین ۱ تا ۶۰ میلی متر بر دقیقه تنظیم نمود. در تحقیق حاضر، بار گذاری مطابق با استاندارد ASTM D3039 [۲۰] با سرعت ۲ میلی متر بر دقیقه انجام شد.

در ابتدا، مقاومت اتصال ورق تقویتی بر روی سطح نمونه‌ها و مود شکست آن‌ها ارائه می‌شود. در ادامه، منحنی‌های بار-لغزش نمونه‌ها بررسی می‌شوند.

۷- پیش از آزمایش، چسب نواری از سطح بتن جدا می‌شود تا هیچ اتصالی بین ورق و سطح نمونه وجود نداشته باشد.

۳-۱- مقاومت اتصال نمونه‌های آزمایشگاهی

نتایج حاصل از آزمایش برش مستقیم، شامل مقاومت اتصال و مود گسیختگی نمونه‌ها در جدول ۲ ارائه گردیده است.

جدول ۲- نتایج آزمایشگاهی

نمونه‌های آزمایش	مقاومت اتصال (kN)	میانگین مقاومت اتصال (kN)	درصد افزایش مقاومت نسبت به po- 2-60 (%)	مود شکست
PO-60-2-1	۱۰/۰۰	۱۰/۰۵	-	DF
PO-60-2-2	۱۰/۰۹			DF
PO-90-2-1	۱۳/۲۴	۱۳/۳۱	۳۲	DF
PO-90-2-2	۱۳/۳۸			DF
PO-150-2-1	۲۰/۵۹	۱۹/۸۵	۹۲	FR
PO-150-2-2	۱۹/۱۱			FR
PO-60-3-1	۱۱/۳۸	۱۱/۸۱	۱۷	DF
PO-60-3-2	۱۲/۲۵			DF
PO-90-3-1	۱۴/۶۲	۱۵/۱۰	۵۰	DF
PO-90-3-2	۱۵/۵۹			DF

در این نمونه‌ها به جهت نبود اتصال بین ورق تقویتی و سطح بتن، نمونه‌ی شاهدی وجود ندارد؛ بنا بر این به منظور بررسی عملکرد مهارهای FRP باد بزنی در افزایش مقاومت اتصال و جلوگیری از جدا شدگی ورق تقویتی، درصد افزایش مقاومت اتصال نسبت به نمونه‌های تقویت شده با کم‌ترین مقدار مهار در این جدول بیان گردیده است. در تحقیق حاضر تأثیر پارامترهای مهار باد بزنی بر اتصال مهار بر روی ورق FRP و مود گسیختگی آن مورد ارزیابی قرار گرفته است. هم‌چنین در نمونه‌های این گروه، به جهت نبود اتصال بین ورق تقویتی و سطح بتن، محدودیتی در افزایش طول بخش باد بزنی مهار وجود ندارد. علاوه بر آن مود شکست جدا شدگی فقط بین مهار باد بزنی و ورق تقویتی اتفاق می‌افتد؛ بنا بر



(ب)

(الف)



(د)

(ج)

شکل ۵- مراحل تقویت نمونه‌های آزمایشگاهی؛ (الف) ایجاد حفره جهت قرارگیری مهار داخل بتن؛ (ب) قرار دادن مهار داخل حفره پر شده با رزین؛ (ج) قرارگیری مهار اشباع شده بر روی ورق؛ (د) ایجاد بافت رنگی مناسب روی سطح بتن جهت پردازش عکس‌ها

شکل ۵- مراحل تقویت نمونه‌های آزمایشگاهی؛ (الف) ایجاد حفره جهت قرارگیری مهار داخل بتن؛ (ب) قرار دادن مهار داخل حفره پر شده با رزین؛ (ج) قرارگیری مهار اشباع شده بر روی ورق؛ (د) ایجاد بافت رنگی مناسب روی سطح بتن جهت پردازش عکس‌ها رنگ‌های آبی، سبز، قرمز و مشکی به صورت نقطه‌ای بر روی سطح پاشیده شدند.

۳- نتایج آزمایشگاهی

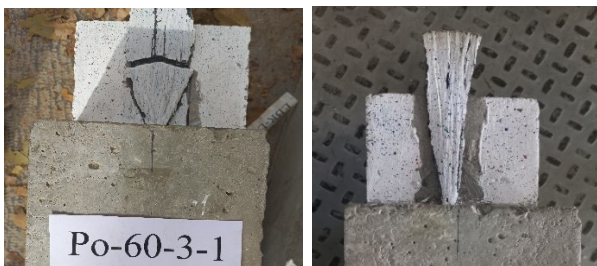
در این بخش نتایج حاصل از آزمایش‌های برش مستقیم انجام گرفته بر روی نمونه‌های تقویت شده مورد بررسی قرار می‌گیرند.

کرنش و تنش را به دست آورد. به جهت ارزیابی میدان لغزش در این تحقیق از تکنیک PIV استفاده شده است. با عکس برداری متوالی از نمونه و پردازش عکسها مقادیر لغزش به دست می آید. به جهت انجام آنالیز، عکسها نیاز به المان بندی دارند. در تحقیق حاضر از المان‌هایی به ابعاد 128×128 پیکسل با فواصل ۶۴ پیکسل استفاده شده است. واحد طول در این عکسها پیکسل است. با انجام تکنیک PIV، لغزش ابتدای اتصال ورق تقویتی در حین بار گذاری محاسبه می‌گردد. از طرفی نیروی اعمال شده به نمونه در طول آزمایش با استفاده از نیرو سنج‌های دستگاه ثبت می‌شود. بدین ترتیب منحنی بار-لغزش برای هر نمونه به دست می‌آید.



(ب)

(الف)



(د)

(ج)



(ه)

شکل ۶- مود شکست نمونه‌های آزمایشگاهی: (الف) PO-60-2-1؛ (ب) PO-90-2-1؛ (ج) PO-150-2-1؛ (د) PO-60-3-1؛ (ه) PO-90-3-1

رفتار بار-لغزش نمونه‌های آزمایش در شکل ۷ نشان داده شده است. این نمودار به صورت صعودی بوده و رفتار آن کاملاً خطی است. هم چنین شیب نمودارهای بار-لغزش این گروه تقریباً ثابت

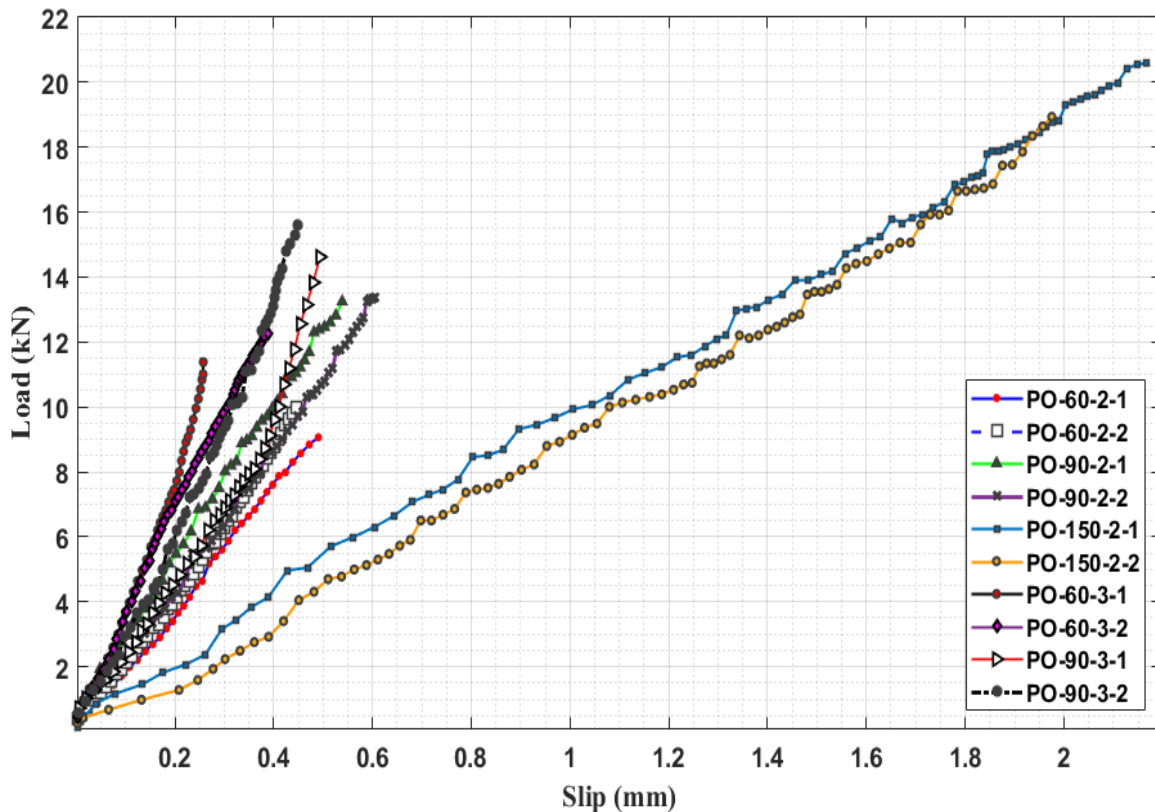
این در قسمت مود شکست، حروف لاتین DF جدا شدگی بین ورق تقویتی و مهار باد بزنی و FR پارگی ورق تقویتی را نشان می‌دهند. در این نمونه‌ها افزایش طول باد بزنی با سطح مقطع ثابت مهار مورد ارزیابی قرار گرفته است. مود شکست نمونه‌ها در شکل ۶ نشان داده شده است.

بر اساس نتایج حاصل از آزمایش برش مستقیم، افزایش طول قسمت باد بزنی مهارهای FRP باعث افزایش در مقاومت اتصال می‌گردد. در نمونه‌های تقویت شده با طول قسمت باد بزنی ۹۰ میلی متر، به طور متوسط افزایش ۳۲ درصدی در مقاومت اتصال، نسبت به نمونه‌های PO-60-2 مشاهده می‌شود. مود شکست در این نمونه جدا شدگی ورق تقویتی از مهار FRP است (شکل ۶-ب). نمونه‌های PO-60-3 با نسبت مقطع سه برابر مهار نسبت به ورق تقویتی، نسبت به نمونه‌های PO-60-2، مقاومت نهایی اتصال بالاتری را تجربه کردند. دلیل آن می‌تواند مربوط به افزایش انتقال تنش و در نتیجه افزایش مقاومت اتصال باشد؛ اما مود شکست در این حالت نیز جدا شدگی است (شکل ۶-د). افزایش همزمان نسبت سطح مقطع و طول مهار منجر به افزایش مقاومت نهایی اتصال می‌شود. به طوری که نمونه‌های PO-90-3 افزایش متوسط ۵۰ درصدی در مقاومت اتصال را تجربه می‌کنند. مود شکست در این نمونه‌ها جدا شدن مهار از ورق تقویتی بود (شکل ۶-ه). در ادامه‌ی تحقیق، طول باد بزنی ۱۵۰ میلی متر بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد، در این نمونه مقاومت اتصال تقریباً به مقاومت نهایی کششی کامپوزیت FRP رسیده و به طور متوسط افزایش ۹۲ درصدی در مقاومت اتصال نسبت به نمونه‌های PO-60-2 اتفاق می‌افتد. مود شکست در این حالت جدا شدگی ناگهانی در اتصال، به همراه آسیب جزئی به ورق تقویتی در ناحیه‌ی اتصال مهار به ورق است (شکل ۶-ج). افزایش مقاومت اتصال با افزایش طول قسمت باد بزنی مهار را می‌توان ناشی از افزایش سطح اتصال بین ورق تقویتی و مهار باد بزنی و انتقال تنش در سطحی بیش تر دانست.

۳-۲- منحنی بار- لغزش نمونه‌های آزمایشگاهی

رفتار اتصال ورق تقویتی به بتن را می‌توان با استفاده از منحنی‌های بار-لغزش بررسی نمود. لغزش یکی از پارامترهای مهم در آزمایش برش مستقیم است که از آن می‌توان پارامترهایی نظیر

است. رفتار الاستیک خطی تا مرحله‌ی شکست ورق‌های FRP، در این گروه کاملاً مشهود است.



شکل ۷- منحنی بار- لغزش نمونه‌های آزمایشگاهی

با افزایش باربری افزایش می‌یابند. با مقایسه‌ی نمودارهای لغزش در طول نمونه‌های این گروه مشاهده می‌شود، مقدار حداکثر لغزش در نمونه‌ی PO-150-2-2 به طور قابل توجهی افزایش یافته است؛ علت آن را می‌توان به عدم اتصال ورق به سطح بتن و در نتیجه افزایش مقادیر لغزش نسبت به سطح بتن مرتبط دانست.

۴- نتیجه‌گیری

بهره‌مندی از ظرفیت ورق‌های FRP، مستلزم حذف و یا به تأخیر انداختن جدا شدگی آن با استفاده از روش‌ها و مکانیسم‌هایی می‌باشد. از روش‌های مؤثر در جلوگیری از جدا شدگی ورق تقویتی، استفاده از مهارهای باد بزنی است. در این تحقیق تکنیک PIV جهت بررسی رفتار اتصال مهار و ورق تقویتی هنگام استفاده از مهارهای مستقیم باد بزنی استفاده شد. نتایج تحقیق نشان داد:

۱- افزایش طول قسمت باد بزنی مهارهای FRP با سطح مقطع ثابت مهار، باعث افزایش در مقاومت اتصال می‌گردد. در نمونه‌های تقویت شده با طول قسمت باد بزنی ۹۰ میلی‌متر، به طور متوسط

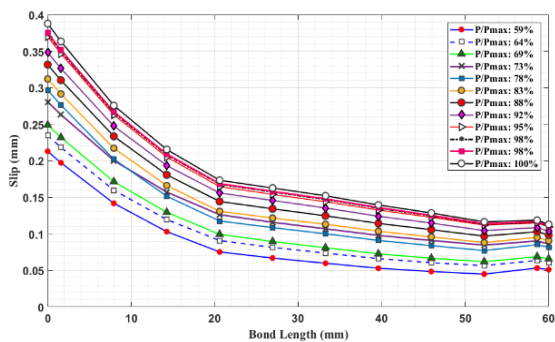
این شیب برای نمونه‌های PO-150-2 مقدار کم‌تری نسبت به سایر نمونه‌ها است؛ که نشان دهنده‌ی سختی کم‌تر این نمونه‌ها می‌باشد. نمونه‌های تقویت شده با طول باد بزنی ۹۰ میلی‌متر رفتاری نزدیک به مهارهایی با طول باد بزنی ۶۰ میلی‌متر را تجربه کرده‌اند. در عوض، افزایش طول بخش باد بزنی تا ۱۵۰ میلی‌متر علاوه بر افزایش مقاومت اتصال تا مقاومت نهایی کششی الیاف مورد استفاده، مقدار لغزش نهایی را به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش داده است. مقدار لغزش در این حالت به طور متوسط ۲/۵ برابر نمونه‌ها با طول باد بزنی ۶۰ میلی‌متر است.

۳-۳- منحنی لغزش در طول ورق تقویتی نمونه‌ها

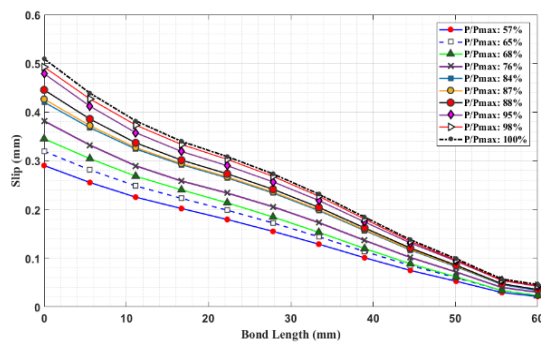
منحنی‌های لغزش در طول ورق برای نمونه‌ها در شکل ۸ نشان داده شده است. به جهت شباهت نتایج تکرار آزمایش‌ها فقط نتایج یکی از منحنی‌ها نشان داده شده است. رفتار لغزش نمونه‌ها در این گروه تقریباً یکسان است؛ در تمامی سطوح بار گذاری، حداکثر لغزش در ابتدای اتصال به صورت تدریجی کاهش یافته و مقادیر لغزش

افزایش ۳۲ درصدی در مقاومت اتصال، نسبت به نمونه‌های PO-60-2 افزایش می‌دهد. افزایش هم‌زمان نسبت سطح مقطع و طول مهار منجر به افزایش مقاومت نهایی اتصال می‌شود. به طوری که نمونه‌های PO-90-3 افزایش متوسط ۵۰ درصدی در مقاومت اتصال را نسبت به نمونه‌های PO-60-2 تجربه می‌کنند. مود شکست در این نمونه‌ها جدا شدن مهار از ورق تقویتی بود.

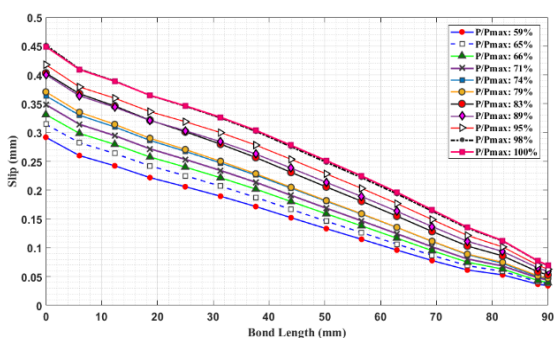
افزایش ۳۲ درصدی در مقاومت اتصال، نسبت به نمونه‌های PO-60-2 مشاهده می‌شود. مود شکست در این نمونه جدا شدگی ورق تقویتی از مهار FRP است. افزایش نسبت مقطع مهار افزایش در مقاومت اتصال را در پی دارد. با این حال مود شکست این نمونه‌ها جدا شدگی می‌باشد. نسبت مقطع مهار در نمونه‌های PO-60-3 نسبت به نمونه‌های



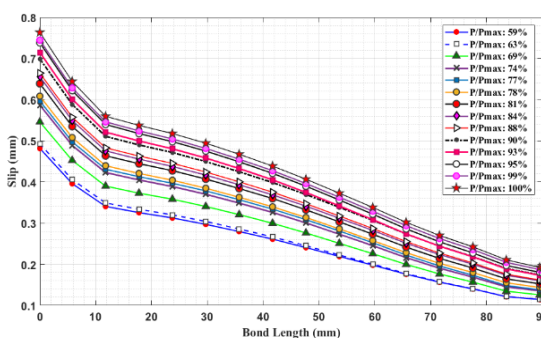
(ب)



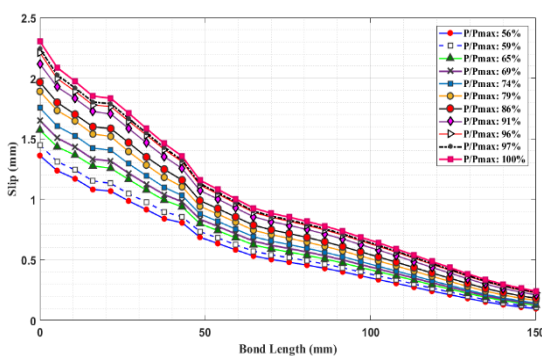
(الف)



(د)



(ج)



(ه)

شکل ۸- منحنی لغزش در طول ورق تقویتی نمونه‌ها: (الف) PO-60-2-1؛ (ب) PO-60-3-1؛ (ج) PO-90-2-1؛ (د) PO-90-3-1؛ (ه) PO-150-2-1؛ 3-1

در نمونه‌های PO-150-2 مقاومت اتصال تقریباً به مقاومت نهایی کششی کامپوزیت FRP رسیده و به طور متوسط افزایش

۹۲ درصدی در مقاومت اتصال نسبت به نمونه‌های PO-60-2 اتفاق می‌افتد. مود شکست در این حالت جدا شدگی ناگهانی در

[8] del Rey Castillo, E., Griffith, M. and Ingham, J., 2018. Seismic behavior of RC columns flexurally strengthened with FRP sheets and FRP anchors. *Composite Structures*, 203, pp.382-395.

[9] Mostofinejad, D. and Mahmoudabadi, E., 2010. Grooving as alternative method of surface preparation to postpone debonding of FRP laminates in concrete beams. *Journal of Composites for Construction*, 14(6), pp.804-811.

[10] Mostofinejad, D. and Akhlaghi, A., 2017. Experimental investigation of the efficacy of EBROG method in seismic rehabilitation of deficient reinforced concrete beam-column joints using CFRP sheets. *Journal of Composites for Construction*, 21(4), p.04016116.

[11] Chaallal, O., Nollet, M.J. and Perraton, D., 1998. Strengthening of reinforced concrete beams with externally bonded fiber-reinforced-plastic plates: design guidelines for shear and flexure. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 25(4), pp.692-704.

[12] Spadea, G., Bencardino, F. and Swamy, R. N., 2000. Optimizing the performance characteristics of beams strengthened with bonded CFRP laminates. *Materials and Structures*, 33(226), pp.119-126.

[13] Ozbakkaloglu, T. and Saatcioglu, M., 2009. Tensile behavior of FRP anchors in concrete. *Journal of Composites for Construction*, 13(2), pp.82-92.

[14] Zhang, H.W., Smith, S.T. and Kim, S.J., 2012. Optimization of carbon and glass FRP anchor design. *Construction and Building Materials*, 32, pp.1-12.

[15] Muciaccia, G., Khorasani, M. and Mostofinejad, D., 2022. Effect of different parameters on the performance of FRP anchors in combination with EBR-FRP strengthening systems: A review. *Construction and Building Materials*, 354, p.129181.

[16] <http://www.sika.com.my>

[17] <http://www.Quantom EPR 3301.co.uk/>

[18] Shabani, E., Mostofinejad, D., & Saljoughian, A., 2023. Bond behavior of prestressed FRP sheet-concrete joints: Comparison of EBROG and EBR methods. *Construction and Building Materials*, 400, 13275.

[19] Eshaghi- Milasi, S., Mostofinejad, D., Saljoughian, A., & Bahmani, H., 2022. Behavior of RC columns strengthened with UHPFRC jackets through grooving method under eccentric loading: a comparative evaluation of steel and synthetic macro fibers in UHPFRC. *Structural Concrete*, 23(1), 187-206.

[20] ASTM D3039/D3039M, "Tensile properties of

اتصال، به همراه آسیب جزئی به ورق تقویتی در ناحیه‌ی اتصال مهار به ورق است.

۵- رفتار بار-لغزش نمونه‌های آزمایش به صورت صعودی بوده و رفتار آن کاملاً خطی است. هم چنین شیب نمودارها تقریباً بوده و رفتار الاستیک خطی تا مرحله‌ی شکست ورق‌های FRP کاملاً مشهود است. این شیب برای نمونه‌های PO-150-2 مقدار کم‌تری نسبت به سایر نمونه‌ها است؛ که نشان دهنده‌ی سختی کم‌تر این نمونه‌ها می‌باشد.

۶- نمونه‌های تقویت شده با طول باد بزنی ۹۰ میلی متر رفتاری نزدیک به مهارهایی با طول باد بزنی ۶۰ میلی متر را تجربه کرده‌اند. در عوض، افزایش طول بخش باد بزنی تا ۱۵۰ میلی متر علاوه بر افزایش مقاومت اتصال تا مقاومت نهایی کششی الیاف مورد استفاده، مقدار لغزش نهایی را به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش داده است. مقدار لغزش در این حالت به‌طور متوسط ۲/۵ برابر نمونه‌ها با طول باد بزنی ۶۰ میلی متر است.

۵- مراجع

[1] Teng, J.G., Lam, L., Chan, W. and Wang, J., 2000. Retrofitting of deficient RC cantilever slabs using GFRP strips. *Journal of composites for construction*, 4(2), pp.75-84.

[2] Orton, S.L., Jirsa, J.O. and Bayrak, O., 2008. Design considerations of carbon fiber anchors. *Journal of Composites for Construction*, 12(6), pp.608-616.

[3] Smith, S.T., Hu, S., Kim, S.J. and Seracino, R., 2011. FRP-strengthened RC slabs anchored with FRP anchors. *Engineering Structures*, 33(4), pp.1075-1087.

[4] Llauradó, P.V., Fernández-Gómez, J. and Ramos, F.J.G., 2017. Influence of geometrical and installation parameters on performance of CFRP anchors. *Composite Structures*, 176, pp.105-116.

[5] del Rey Castillo, E., Griffith, M. and Ingham, J., 2019. Straight FRP anchors exhibiting fiber rupture failure mode. *Composite Structures*, 207, pp.612-624.

[6] Kara, M.E. and Mustafa, Y.A.Ş.A., 2013. An Investigation of fan type anchorages applied to end of CFRP strips. *Steel and Composite Structures, An International Journal*, 15(6), pp.605-621.

[7] Meisami, M.H., Mostofinejad, D. and Nakamura, H., 2015. Strengthening of flat slabs with FRP fan for punching shear. *Composite structures*, 119, pp.305-314.

polymer matrix composite materials", 2000.

[21] Hosseini, A., Mostofinejad, D., and Hajialilue-Bonab, M., 2012. Displacement Measurement of Bending Tests Using Digital Image Analysis Method. *International Journal of Engineering and Technology*, 4, pp. 642-644.

[22] Salimian, M.S. and Mostofinejad, D., 2019. Experimental evaluation of CFRP-concrete bond behavior under high loading rates using particle image velocimetry method. *Journal of Composites for Construction*, 23(3), p.04019010.

Bond behavior between FRP sheet and FRP anchor

Mehrdad Garakyaragh *

MSc of Civil Engineering, Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology (IUT).

Davood Mostofinejad

Professor, Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology (IUT).

Abstract

Fiber-reinforced polymer (FRP) anchors are used to prevent or delay the debonding of FRP sheets in the strengthening of structures. There are various methods to prevent or delay the debonding of FRP sheets, among them is the use of FRP anchors. To make the FRP anchors, the CFRP sheet was cut to the required length, then epoxy was applied to the dowel of the anchor. In the end, the sheet was rolled around the dowel to ensure uniform alignment of the fibers. In many cases, the function of the FRP anchors starts after the sheet is completely debonded from the concrete surface. In this research, the behavior of the bond between the FRP sheet and the FRP anchor after the debonding of the reinforcement sheet from the concrete surface was evaluated. Therefore, the specimens were reinforced in such a way that there is no bond between the reinforcement sheet and the concrete surface. The simultaneous increase in the ratio of the cross-sectional area and the length of the fan leads to an increase in the bond strength; therefore, the specimens with a fan length of 90 mm experience an average increase of 50% in bond strength. In this case, the failure mode was anchor debonding from the sheet. Results showed that increasing the length of the fan improved the bond strength. Therefore, the specimens with a fan length of 150 mm reached the bond strength to almost the ultimate tensile strength of the FRP composite. The amount of slip, in this case, is on average 2.5 times the specimens with a 60 mm length of fan. According to the failure mode of the specimens, the embedment depth of 50 mm has the ability to fully transfer the stress to the concrete and the anchor has not been pulled out. Also, results showed, increasing the anchor cross-section to reinforcement sheet cross-section ratio has a positive effect on the bond strength and decreased the final slip value.

Keywords: Fiber Reinforced Polymers (FRP), Anchor, Debonding, Bond strength, FRP-concrete joint, Single-lap shear test.

* Corresponding Author: mehrdad.garakyaragh@cv.iut.ac.ir