

ارزیابی طول موثر پیوستگی روش کاشت الیاف در نصب خارجی به روش سرعت سنجی تصویری ذرات

چکیده

مقاومت پیوستگی بین ورق پلیمر مسلح با الیاف (FRP) و بتن، عامل اصلی موثر بر رفتار اعضای بتنی مقاوم سازی شده به روش نصب خارجی (EBR) می باشد. مقاومت پیوستگی به عوامل مختلفی همچون نوع آماده سازی سطحی، مقاومت بتن و ضریب کشسانی، ضخامت و طول پیوستگی ورق FRP وابسته است. براساس مطالعات پژوهشگران، افزایش طول اتصال بیشتر از طول موثر پیوستگی، تضمین کننده افزایش مقاومت پیوستگی نخواهد بود. بیشتر مدل های تئوری موجود، مقاومت پیوستگی را بر اساس طول موثر پیوستگی تخمین می زنند. بنابراین برای رسیدن به یک اتصال رضایت بخش، آگاهی از طول موثر پیوستگی اهمیت زیادی دارد. در این پژوهش، به منظور ارزیابی و مقایسه طول موثر پیوستگی در روش EBR با استفاده از کاشت الیاف و روش های متداول آماده سازی سطحی (برس زنی و ماسه پاشی)، تعداد ۱۲ نمونه منشور بتنی ساخته شد و مورد آزمایش قرار گرفت. طول موثر پیوستگی و مقاومت پیوستگی نمونه ها با استفاده از آزمایش برش مستقیم و به کمک آنالیز میدان کرنش، به روش سرعت سنجی تصویری ذرات (PIV) به دست آمد و با مدل های آیین نامه های ایالات متحده آمریکا و اتحادیه اروپا مقایسه گردید. نتایج نشان داد، که استفاده از روش کاشت الیاف بجای روش های آماده سازی سطحی متداول، موجب کاهش طول موثر پیوستگی به میزان ۲۰٪ و افزایش مقاومت پیوستگی به میزان ۳۴٪ می گردد.

کلمات کلیدی

طول موثر پیوستگی، FRP، کاشت الیاف، نصب خارجی، سرعت سنجی تصویری ذرات (PIV).

تعیین ظرفیت اتصال ورق FRP به بتن از مسائل مهم مقاومسازی سازه‌های بتنی با استفاده از پلیمرهای مسلح شده با الیاف (FRP^۱) به روش نصب خارجی (EBR^۲) است که تا کنون پژوهش‌های گسترده‌ای در این زمینه صورت گرفته است [۴-۱]. بر اساس بررسی‌های متعدد، محققان دریافته‌اند که ظرفیت اتصال به‌طور عمده توسط ویژگی‌های مکانیکی و فیزیکی بتن، ضخامت و سختی ورق FRP و طول موثر پیوستگی^۳ تعیین می‌شود [۵-۷].

نیروی اعمال شده به ورق‌های FRP به‌طور عمده از طریق تنش‌های برشی ایجاد شده در میان سطح ورق FRP و بتن در یک طول محدود که طول موثر پیوستگی نامیده می‌شود، بین ورق FRP و سطح بتن منتقل می‌شود. افزایش طول اتصال می‌تواند باعث افزایش ظرفیت اتصال شود، زیرا افزایش طول اتصال موجب کاهش تنش‌های برشی موجود بین دو سطح ورق FRP و بتن می‌شود. با این حال افزایش طول اتصال به مقدار بیش از طول موثر پیوستگی، نمی‌تواند باعث افزایش ظرفیت اتصال شود [۸]. بنابراین، تعیین طول موثر پیوستگی یکی از مسائل مهم در تعیین حداکثر ظرفیت اتصال ورق FRP به بتن است. از این رو، اکثر دستورالعمل‌های آیین‌نامه‌ای، همچون آیین‌نامه‌ی انجمن بتن آمریکا (ACI 440.2R-08) [۹]، آیین‌نامه‌ی بتن اتحادیه اروپا (fib14) [۱۰] و آیین‌نامه‌ی بتن ایتالیا (CNR-DT200) [۱۱]، حداکثر ظرفیت پیوستگی اتصال ورق FRP به بتن را، بر اساس طول موثر پیوستگی و شکست جداشدگی ورق FRP از سطح بتن محاسبه می‌کنند. بنابراین، مقدار مجاز ظرفیت به‌دست آمده از روابط آیین‌نامه‌ای بسیار کمتر از حداکثر ظرفیت گسیختگی FRP است. این مسئله باعث شده، بسیاری از پژوهشگران به دنبال ارائه روش‌هایی برای افزایش ظرفیت اتصال در روش EBR باشند.

گریس^۴ و همکاران نشان دادند، استفاده از ورق‌های FRP عرضی (به شکل رکابی^۵) در سطح جانبی تیر تقویت شده با ورق FRP، راه‌کار مناسبی در به تعویق انداختن جداشدگی زود هنگام ورق FRP از سطح بتن است و به نحو قابل ملاحظه‌ای خیز تیر را کاهش و ظرفیت تحمل بار را افزایش می‌دهد [۱۲].

فیرمو^۶ و همکاران، استفاده از یک نوع مهارهای مکانیکی در انتهای ورق FRP را به‌عنوان روشی برای جلوگیری از جداشدگی زود هنگام ورق FRP از سطح بتن پیشنهاد کردند [۱۳]. مهار مکانیکی فوق به صورت یک صفحه فلزی مربع شکل که توسط چهار پیچ ورق FRP را به سطح بتن محکم می‌کند طراحی شد. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که بکارگیری مهار مکانیکی در نمونه‌های تقویت شده به این روش در مقایسه با نمونه‌های فاقد مهار مکانیکی، باعث توزیع یکنواخت تر تنش، کاهش تنش برشی و افزایش ظرفیت اتصال می‌شود. با این حال، جداشدگی در طول نمونه‌ها بین مهارهای مکانیکی اتفاق خواهد افتاد و حالت شکست نمونه‌های تقویت شده به این روش قله کن شدن مهارهای مکانیکی خواهد بود.

در پژوهشی دیگر، افتخار و یعقوبی روش ایجاد سوراخ بر روی سطح بتن را به‌عنوان یک روش برای پیوستگی بهتر ورق FRP به سطح بتن مورد ارزیابی قرار دادند [۱۴]. بر اساس نتایج حاصل از این پژوهش، ایجاد سوراخ بر روی سطح بتن در مقایسه با روش‌های آماده‌سازی سطحی معمول، می‌توان پدیده جداشدگی را به تعویق انداخت و ظرفیت باربری و جابجایی نهایی بالاتری را مشاهده کرد. ایجاد شیارهای طولی بر روی سطح بتن به‌عنوان یک راه‌کار دیگر در حذف پدیده جداشدگی زود هنگام ورق FRP از سطح بتن توسط مستوفی‌نژاد و محمودآبادی ارائه شد [۱۵]. در این روش ابتدا بر روی سطح بتن شیارهای طولی ایجاد شده و پس از پر کردن این شیارها توسط رزین اپوکسی، ورق FRP بر روی سطح چسبانده می‌شود. ایجاد شیار در این روش باعث افزایش سطح تماس ورق FRP و سطح بتن شده و مقاومت پیوستگی را افزایش می‌دهد. نتایج این پژوهش نشان داد، نمونه‌های آماده‌سازی سطحی شده به این

¹ Fiber Reinforced Polymer

² Externally Bonded Reinforcement

³ Effective bond length

⁴ Grace

⁵ U-Wrap

⁶ Firmo

روش در مقایسه با نمونه‌های آماده‌سازی سطحی شده به روش‌های معمول، مقاومت پیوستگی را به میزان ۸۰ درصد افزایش می‌دهد و پدیده جداشدگی زود هنگام ورق FRP از سطح بتن را از بین می‌برد.

علی‌پور و توکلی‌زاده، روش شیارهای دایره‌ای را برای به تعویق انداختن پدیده‌ی جداشدگی زود هنگام پیشنهاد کردند [۱۶]. در این روش، با استفاده از دستگاه مغزه‌گیر بتن، شیارهای دایره‌ای متداخل با قطر، عرض و عمق مشخص، بر روی سطح بتن ایجاد می‌شود. سپس شیارها با رزین اپوکسی پر شده و ورق FRP بر روی سطح چسبانده می‌شود. در این روش با در اختیار گرفتن و محصور کردن بتن اطراف شیار دایره‌ای توسط چسب داخل شیارها، پیوستگی قابل قبولی بین بتن و ورق FRP ایجاد می‌شود. بر طبق گزارش این پژوهشگران، استفاده از روش شیارهای دایره‌ای نسبت به سایر روش‌های آماده‌سازی سطحی علاوه بر افزایش مقاومت پیوستگی، جابجایی و توان جذب انرژی را بیشتر می‌کند.

در بسیاری از روش‌هایی که تا کنون برای بهبود عملکرد پیوستگی ورق FRP و بتن ارائه شده است، پدیده جداشدگی زود هنگام ورق FRP از سطح بتن به طور کامل از بین نرفته و کاربرد این روش‌ها در تمام اعضای سازه‌ای امکان پذیر نیست. یکی از روش‌هایی که اخیراً توسط عطاری و توکلی‌زاده به منظور حذف جداشدگی زود هنگام ورق FRP از سطح بتن مورد بررسی قرار گرفته است، روش کاشت الیاف است [۱۷]. در این روش ابتدا بر روی سطح عضو بتنی سوراخ‌هایی ایجاد شده و سپس رشته‌های الیاف با استفاده از رزین اپوکسی به صورت نیمی در سوراخ و نیمی به صورت آزاد درون سوراخ‌ها کاشته می‌شود. سپس نیمه‌ی آزاد الیاف در جهت بارگذاری بر روی سطح بتن خوابانده شده و همراه با چسباندن ورق FRP بر روی سطح بتن با یکدیگر درگیر می‌شوند و به صورت یکپارچه عمل می‌کنند. نتایج آزمایش بر روی نمونه‌های تهیه شده به این روش نشان داد، نمونه‌های ساخته شده به این روش پیش و پس از قرارگیری در معرض حرارت، جداشدگی زود هنگام از خود نشان نداده و گسیختگی ورق FRP، حالت شکست آنها بوده است. در این پژوهش، روش کاشت الیاف نسبت به روش‌های آماده‌سازی سطحی معمول مقاومت پیوستگی بین FRP و سطح بتن را ۳۲٪ و ۹۰٪ به ترتیب در دماهای محیط و ۲۰۰°C افزایش داد.

در پژوهش پیش‌رو، به هدف ارزیابی اثر کاشت الیاف در کاهش طول موثر پیوستگی و بهبود عملکرد پیوستگی بین بتن و ورق FRP، چهار دسته نمونه‌ی منشوری ساخته شد. دو دسته به روش‌های متداول (روش ماسه‌پاشی و روش برس‌زنی) و دو دسته به روش کاشت الیاف (با و بدون آماده‌سازی سطحی) ساخته شد. لازم به ذکر است در این پژوهش، طول موثر پیوستگی و مقاومت پیوستگی نمونه‌ها با استفاده از آزمایش برش مستقیم^۱ و به کمک تحلیل میدان کرنش به روش سرعت‌سنجی تصویری ذرات^۵ (PIV)، مورد ارزیابی قرار گرفت.

۲- پردازش تصاویر به کمک سرعت سنجی تصویری ذرات (PIV)

در این پژوهش، به منظور دستیابی به میدان جابه‌جایی و کرنش ورق FRP از روش PIV استفاده شد. PIV ابتدا به‌عنوان یک روش اندازه‌گیری سرعت در زمینه آزمایش‌های تجربی مکانیک سیالات مورد استفاده قرار گرفت [۱۸]. پس از آن وایت^۲ و همکاران [۱۹] با انجام تغییراتی روش PIV را برای استفاده در زمینه ژئوتکنیک توسعه دادند. بر اساس نتایج پژوهش‌ها و درست آزمایی صورت گرفته توسط پژوهشگران متعدد، روش PIV اصلاح شده در مقایسه با روش‌های اندازه‌گیری جابه‌جایی پیشین، دارای دقت بالاتر می‌باشد [۱۹-۲۱].

در فرآیند PIV، ابتدا ناحیه‌ی مورد بررسی در نخستین تصویر به تعدادی بخش‌های کوچکتر به صورت یک شبکه تقسیم بندی می‌شود (به هر بخش کوچک وصله آزمون^۳ گفته شده و اندازه آن بر مبنای پیکسل تعیین می‌شود). سپس یک وصله با ابعاد بزرگ‌تر به‌عنوان ناحیه‌ای که نرم‌افزار در آن جابه‌جایی وصله آزمون را ردیابی می‌کند (وصله جستجو^۴)، انتخاب می‌شود. نرم‌افزار با کمک تابع

¹ Single-shear pull test

² White

³ Test patch

⁴ Search patch

برازش^۱، محل وصله آزمون را در دو تصویر پیاپی ردیابی کرده و وصله‌ای را که دارای بیشترین مقدار تابع برازش است، به‌عنوان مکان جدید وصله‌ی آزمون در تصویر دوم در نظر می‌گیرد. پس از آن، فاصله افقی و عمودی بین وصله‌ی آزمون در هر دو تصویر به‌عنوان جابه‌جایی و به شکل یک ماتریس تعیین می‌گردد. با داشتن ماتریس جابه‌جایی، میدان کرنش در ناحیه مورد نظر حاصل می‌شود. در پژوهش پیش رو، تغییر شکل‌های ورق FRP در تمام نمونه‌ها با استفاده از تصویر برداری دیجیتال در حین آزمایش ثبت شدند. سپس تصاویر با استفاده از نرم افزار geoPIV_RG توسعه یافته در دانشگاه کمبریج [۲۲] مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. وصله‌های مورد استفاده در اندازه 128×128 پیکسل و فاصله ۳۲ پیکسل از همدیگر (مرکز به مرکز) انتخاب شدند. بر اساس پژوهش‌های پیشین، دقت PIV به شدت تابع اندازه و بافت وصله‌ها می‌باشد. با انتخاب وصله‌های 128×128 پیکسلی و بافت نمونه‌ها، دقت نتایج اندازه‌گیری جابه‌جایی این پژوهش بیش از $0.5 \mu\text{m}$ می‌باشد [۱۹].

۳- برنامه آزمایشگاهی

۳-۱- مشخصات مصالح

برای انجام آزمایش برش مستقیم تعداد ۱۲ نمونه منشور بتنی در ابعاد $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 350 \text{ mm}$ ساخته شد. برای به‌دست آوردن بتن با مقاومت فشاری در حدود 30 MPa ، از 350 kg/m^3 سیمان پرتلند تیپ ۲، 811 kg/m^3 ماسه، 887 kg/m^3 شن و 182 kg/m^3 آب استفاده شد. همچنین جهت ارزیابی مقاومت فشاری بتن، از هر طرح تعداد سه استوانه‌ی بتنی به ابعاد $300 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ ساخته شد. قالب‌ها بعد از ۲۴ ساعت باز شده و سپس نمونه‌ها به مدت ۲۷ روز در مخزن آب و آهک اشباع در شرایط استاندارد آزمایشگاهی عمل‌آوری شدند. سپس نمونه‌ها از آب خارج شده و تا زمان انجام آزمایش‌ها، در محیط آزمایشگاه نگهداری شدند. ورق‌های FRP استفاده شده در این پژوهش به روش نصب تر^۲ و با استفاده از پارچه تک‌جهته‌ی کربنی و رزین اپوکسی دو جزئی ساخته شدند که ویژگی‌های آنها در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱: مشخصات مکانیکی FRP

نوع ماده	نام محصول	ضخامت (mm)	مقاومت کششی (MPa)	مدول الاستیسیته (GPa)	کرنش گسیختگی (%)
الیاف	Kor-CFW200	۰/۱۱۱	۴۹۰۰	۲۳۰	۱/۸
رزین	EPIKOTE 828	-	۳۵	۴/۰	۲/۰

۳-۲- ساخت نمونه‌ها

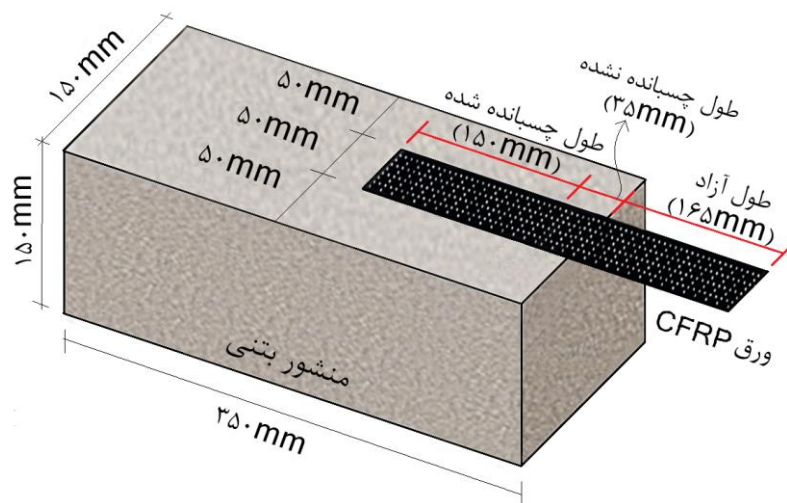
در این پژوهش، تنها روش چسباندن ورق‌های FRP به سطح بتن، به‌عنوان عامل تاثیرگذار بر طول موثر پیوستگی مورد آزمایش گرفته است و سایر عوامل موثر ثابت در نظر گرفته شده‌اند. نام‌گذاری نمونه‌ها به صورت A-B-C می‌باشد، A نشان‌دهنده روش اتصال ورق FRP به بتن است که می‌تواند CO (روش متداول)، یا FI (روش کاشت الیاف) باشد، B نشان‌دهنده نوع آماده‌سازی سطحی بستر بتن است که می‌تواند S (ماسه‌پاشی شده)، B (برس‌زنی شده) یا N (عدم آماده‌سازی سطحی بستر بتن) باشد، C نیز شماره مرجع هر نمونه در هر آزمایش یکسان می‌باشد (۱، ۲ یا ۳).

نمونه‌های روش متداول: برای ساخت نمونه‌ها به این روش، ابتدا سطح بتن نمونه‌ها به روش ماسه‌پاشی یا برس‌زنی آماده‌سازی سطحی شد و بعد از تمیز کردن سطح بتن توسط جریان هوا، یک لایه پارچه کربنی تک‌جهته با عرض 50 mm و طول 150 mm به روش نصب تر و با استفاده از رزین اپوکسی بر روی سطح بتن قرار داده شد (طول ناحیه چسبانده شده دو برابر طول موثر به‌دست آمده

¹ Correlation function

² Wet layup

از رابطه چن و تنگ^۱ [۵] اختیار شد). لازم به ذکر است، بر اساس پیشنهاد پژوهشگران دیگر به منظور جلوگیری از ایجاد تمرکز تنش در ناحیه ابتدای بارگذاری شده، در تمام نمونه‌ها ورق FRP، ۳۵ mm بعد از لبه منشور بتنی به سطح چسبانده شد (شکل ۱) [۲۳ و ۲۴].

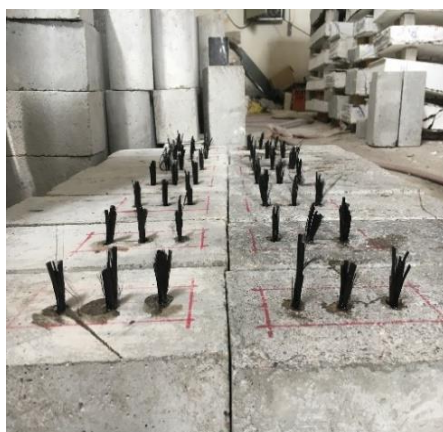


شکل ۱: مشخصات هندسی نمونه‌ها

نمونه‌های روش کاشت الیاف: برای اتصال بهتر ورق FRP به بتن و جلوگیری از پدیده نامطلوب جدا شدگی زود هنگام ورق FRP از سطح بتن مطابق شکل ۲، شش نمونه ساخته شد. نخست، بر روی سطح نمونه‌ها سوراخ‌هایی به قطر ۱۰ mm، عمق ۴۰ mm و فواصل ۵۰ mm از یکدیگر ایجاد شد و پس از تمیز کردن سوراخ‌ها با جریان هوا، شش دسته الیاف کربن جدا شده از پارچه الیافی کربنی (200 gr/m^2) به طول ۸۰ mm با استفاده از رزین اپوکسی، به صورت نیمی در سوراخ و نیمی به صورت آزاد درون سوراخ‌ها کاشته شد. سپس نیمی از الیاف در جهت بارگذاری بر روی سطح بتن چسبانده شد و بلافاصله یک لایه پارچه کربن تک جهته به روش نصب تر بر روی سطح بتن و الیاف کاشته شده، قرار داده شد تا با یکدیگر عمل‌آوری شوند و تشکیل یک سیستم یکپارچه را دهند.



(د)



(ب)



(الف)

شکل ۲: روش کاشت الیاف. (الف) ایجاد سوراخ‌ها. (ب) کاشت الیاف. (د) چسباندن الیاف در جهت بارگذاری بر روی سطح بتن.

¹ Chen and Teng

برای به دست آوردن میدان جابه‌جایی و کرنش نمونه‌ها با استفاده از روش PIV و پردازش تصویر، نیاز است در حین بارگذاری به طور متوالی از سطح نمونه تصویربرداری شود. به منظور تشخیص صحیح نقاط بوسیله نرم افزار، تصاویر دیجیتالی گرفته شده باید دارای نقاط قابل تفکیک برای نرم افزار باشند [۲۵]. از آنجایی که سطح بتن و ورق FRP دارای بافت مناسب و قابل تشخیص در تصاویر دیجیتالی نمی‌باشند، قبل از گیرش رزین اپوکسی، سطح ورق FRP و بتن توسط ماسه رنگی (اندازه ذرات بین ۰/۱۵ mm تا ۰/۳ mm) پوشانده شد (شکل ۳).



شکل ۳: سطح پوشانده شده نمونه توسط ماسه رنگی

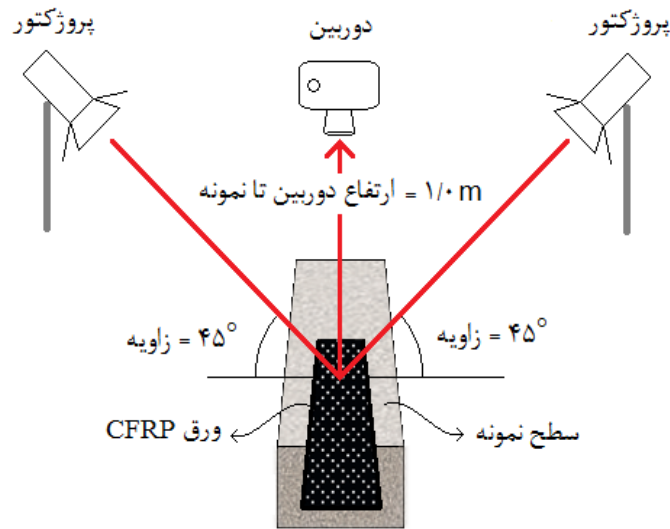
۳-۳- تجهیزات و روش انجام آزمایش

به منظور انجام آزمایش برش مستقیم، دستگاهی مطابق شکل ۴ ساخته شد. پس از قرارگیری نمونه‌ها در قاب نگهدارنده این دستگاه، یک جک هیدرولیکی با ظرفیت ۳۰۰ kN به وسیله گیره مخصوص نیروی کششی را بصورت یکنواخت و با نرخ بارگذاری ثابت تا لحظه شکست به ورق FRP وارد می‌کند.



شکل ۴: تصویر دستگاه برش مستقیم

در حین بارگذاری، با استفاده از یک دوربین Canon-EOS-1300D با تفکیک پذیری ۱۸/۰ مگاپیکسل (۵۱۸۴×۳۴۵۶ پیکسل) و مجهز به لنز Canon 18-55، از فاصله یک متری از سطح بالای نمونه‌ها تصویربرداری دیجیتالی انجام شد. همچنین به منظور حذف بازتاب نورهای نامناسب، از دو منبع نور مشابه با زاویه ۴۵° در دو طرف نمونه استفاده شد (شکل ۵).



شکل ۵: موقعیت دوربین و پروژکتورها نسبت به نمونه

۴- تحلیل نتایج

بار نهایی آزمایشگاهی (P_{exp})، مقاومت فشاری بتن (f'_c) و حالت شکست تمامی نمونه‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. همچنین بار نهایی محاسباتی (P_{cal})، با استفاده از رابطه چن و تنگ [۵] محاسبه و با بار نهایی آزمایشگاهی مقایسه شده است. رابطه چن و تنگ برای محاسبه بار نهایی به صورت زیر می‌باشد:

$$P_{cal} = \alpha \beta_w \beta_l \beta_f b_f L_e \sqrt{f'_c} \quad (1)$$

(۲)

$$\beta_w = \sqrt{\frac{2 - b_f/b_c}{1 + b_f/b_c}} \quad (3)$$

$$\beta_l = \begin{cases} 1.0 & \text{if } L_f \geq L_e \\ \sin \frac{\pi L_f}{2 L_e} & \text{if } L_f < L_e \end{cases} \quad (4)$$

$$L_e = \sqrt{\frac{E_f t_f}{\sqrt{f'_c}}} \quad (4)$$

ضرایب β_l و β_w که از روابط (۲) و (۳) محاسبه شده، به ترتیب تاثیر نسبت عرض ورق FRP به عرض منشور بتنی و تاثیر نسبت طول اتصال ورق FRP به طول موثر پیوستگی را در رابطه بار نهایی وارد می‌کنند. b_c عرض منشور بتنی و L_e طول موثر پیوستگی بوده که از رابطه (۴) حاصل می‌شود. همچنین t_f ، b_f ، L_f و E_f به ترتیب ضخامت، عرض، طول و ضریب کشسانی ورق FRP می‌باشد. بر اساس تحلیل آماری داده‌های تجربی جمع‌آوری شده توسط پژوهشگران، مقدار مناسب α برابر ۰/۴۲۷ به دست آمده است [۲۶]. بر اساس روابط فوق و مشخصات نمونه‌ها، بار نهایی محاسبه شده برای نمونه‌های با مقاومت فشاری بتن، ۳۰/۶ MPa و ۳۱/۲ MPa به ترتیب ۹/۱۸ kN و ۹/۲۷ kN برآورد شد.

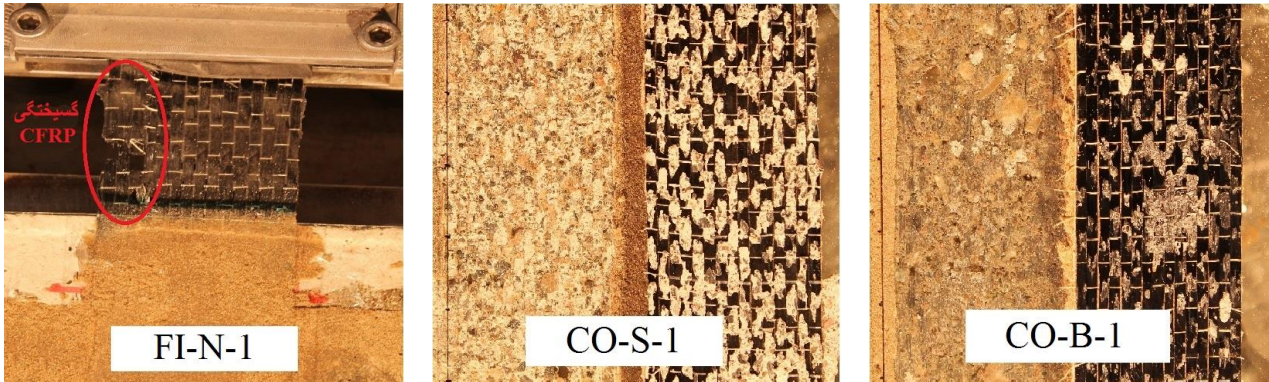
جدول ۲: جزئیات نمونه‌ها و نتایج آزمایش

نمونه آزمایش	f'_c (MPa)	P_{exp} (kN)	P_{exp}/P_{cal}	حالت شکست	متوسط P_{exp} (kN)	متوسط P_{exp}/P_{cal}
CO-B-1	۳۱/۲	۹/۴۱	۱/۰۱	جداشدگی		
CO-B-2	۳۱/۲	۹/۷۱	۱/۰۵	جداشدگی	۹/۵۷	۱/۰۴
CO-B-3	۳۱/۲	۹/۶۱	۱/۰۴	جداشدگی		
CO-S-1	۳۱/۲	۹/۳۰	۱/۰۰	جداشدگی		
CO-S-2	۳۱/۲	۹/۶۱	۱/۰۳	جداشدگی	۹/۴۷	۱/۰۳
CO-S-3	۳۱/۲	۹/۵۱	۱/۰۲	جداشدگی		
FI-N-1	۳۰/۶	۱۳/۰۲	-	گسیختگی		
FI-N-2	۳۰/۶	۱۲/۰۴	-	گسیختگی	۱۲/۶۷	-
FI-N-3	۳۰/۶	۱۲/۸۲	-	گسیختگی		
FI-B-1	۳۰/۶	۱۲/۶۲	-	گسیختگی		
FI-B-2	۳۰/۶	۱۳/۰۲	-	گسیختگی	۱۲/۴۵	-
FI-B-3	۳۰/۶	۱۱/۶۲	-	گسیختگی		

۱-۴ مقاومت پیوستگی و حالت شکست نمونه‌ها

بر اساس نتایج به‌دست آمده، متوسط مقاومت پیوستگی نمونه‌های برس‌زنی شده و ماسه‌پاشی شده مشابه یکدیگر و در حدود مقدار به‌دست آمده از رابطه چن و تنگ بود. همچنین، حالت شکست تمام نمونه‌ها در این دو روش، جداشدگی زود هنگام ورق FRP از سطح بتن بود (شکل ۶ الف و ب).

این درحالی است که مقاومت پیوستگی نمونه‌های ساخته شده به روش کاشت الیاف، در مقایسه با نمونه‌های ساخته شده به روش‌های متداول، به دلیل استفاده از حداکثر ظرفیت ورق FRP و عدم جداشدگی آن از سطح بتن (حالت شکست تمام نمونه‌ها در این روش مطابق شکل ۶ پ گسیختگی ورق FRP بود) ۳۴٪ افزایش یافت. لازم به ذکر است که نمونه‌های ساخته شده به روش کاشت الیاف در هر دو حالت با و بدون آماده‌سازی سطحی دارای مقاومت پیوستگی مشابه بودند. اختلاف مقاومت پیوستگی پیش‌بینی شده توسط رابطه چن و تنگ و مقدار به‌دست آمده از آزمایش، برای نمونه‌های ساخته شده به روش کاشت الیاف بسیار زیاد بود. دلیل این پدیده را می‌توان فرض جداشدگی ورق FRP از سطح بتن در رابطه چن و تنگ دانست، در حالی که در روش کاشت الیاف، شکست در اثر گسیختگی ورق FRP است. بنابراین استفاده از این رابطه برای روش کاشت الیاف معتبر نمی‌باشد.



(پ)

(ب)

(الف)

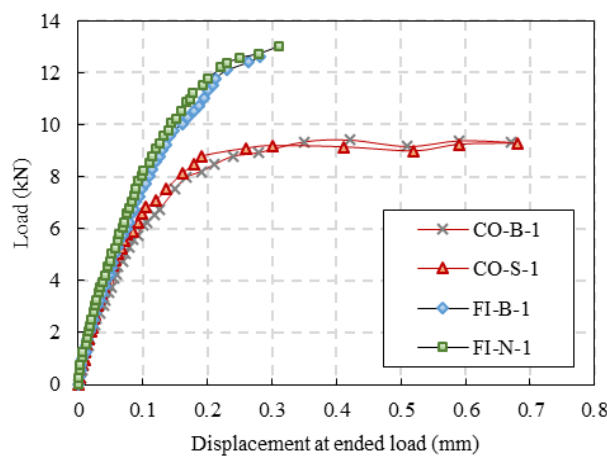
شکل ۶: حالت شکست نمونه‌ها. الف) جداسازی ورق FRP از سطح بتن در نمونه بر سزنی شده. ب) جداسازی ورق FRP از سطح بتن در نمونه ماسه پاشی شده. پ) گسیختگی ورق FRP در نمونه کاشت الیاف

۲-۴ نمودار بار-جابجایی

نمودار بار-جابجایی تمام نمونه‌ها با استفاده از نتایج حاصل از تحلیل PIV ترسیم و در شکل ۷ ارائه شده است. برای ترسیم این نمودارها، میانگین جابجایی پنج نقطه‌ای واقع در عرض ورق FRP در ابتدای ناحیه متصل شده به بتن و در سمت بارگذاری شده اندازه‌گیری شد. همچنین برای حذف خطای ناشی از تغییر شکل کشسان صفحه نگه‌دارنده، جابجایی بلوک بتنی نیز در طول آزمایش اندازه‌گیری و در محاسبات در نظر گرفته شد.

بر اساس نتایج، نمودار بار-جابجایی نمونه‌های بر سزنی شده و ماسه پاشی شده دارای رفتار مشابه بودند. به طوری که در ابتدای نمودار، با افزایش بار، جابجایی افزایش می‌یابد اما پس از رسیدن به یک بار خاص (در حدود ۹۵٪ بار نهایی)، مقدار بار تقریباً ثابت می‌ماند اما جابجایی به دلیل شروع و توسعه جداسازی ورق FRP از سطح بتن همچنان افزایش می‌یابد (شکل ۷). این رفتار مفهوم طول موثر پیوستگی را تایید می‌کند که با افزایش طول اتصال بیش از طول موثر پیوستگی، بار نهایی افزایش نمی‌یابد.

نمودار بار-جابجایی نمونه‌های ساخته شده به روش کاشت الیاف، نسبت به روش‌های متداول متفاوت بود. به طوری که، شیب نمودار از ابتدا تا لحظه شکست تقریباً ثابت بود (در این روش جداسازی رخ نمی‌دهد) و مقدار این شیب بیشتر از شیب اولیه نمودار بار-جابجایی روش‌های متداول بود که نشان دهنده سختی محوری اتصال بیشتر این روش می‌باشد. همچنین میزان جابجایی لحظه شکست در این روش، به مقدار چشمگیری کمتر از روش‌های متداول بود (شکل ۷).

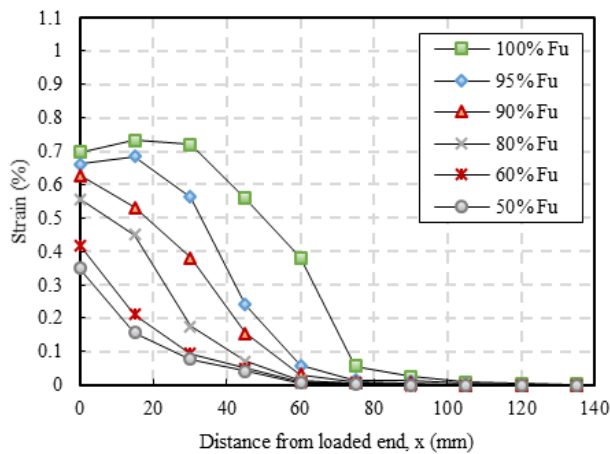


شکل ۷: نمودار بار-جابجایی نمونه‌ها در آزمایش برش مستقیم

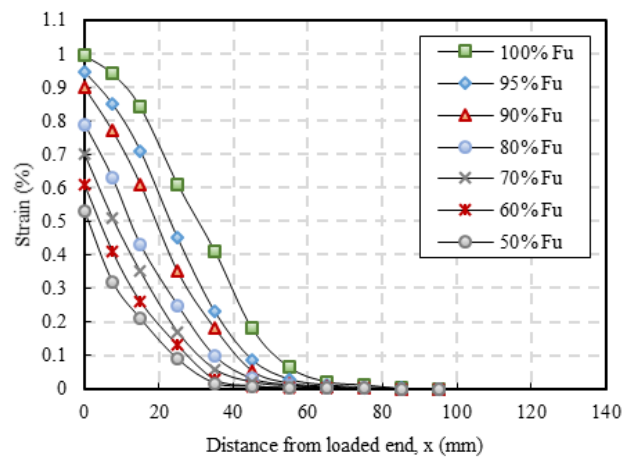
۳-۴ نیمرخ کرنش طولی

در شکل ۸، نیمرخ‌های کرنش طولی نمونه‌های CO-B-1 و FI-N-1 با استفاده از نتایج تحلیل PIV برای سطوح بار مختلف رسم شده است. لازم به ذکر است، با توجه به پژوهش صورت گرفته توسط یاوا^۱ و همکاران [۲۶] به دلیل وجود تمرکز تنش در ناحیه ابتدای اتصال ورق FRP به بتن، کرنش این نقطه به صورت مستقیم و با توجه به مقدار نیرو اعمالی و سطح مقطع و ضریب کشسانی ورق FRP محاسبه شده است. با بررسی نیمرخ کرنش طولی نمونه CO-B-1 می‌توان مشاهده کرد، نیروی وارده به ورق FRP، در طولی در حدود ۷۵mm از ابتدای ورق FRP به بتن انتقال می‌یابد، این مقدار با طول موثر پیوستگی حاصل از رابطه چن و تنگ هم‌خوانی دارد (طول موثر پیوستگی با استفاده از رابطه (۴) و با توجه به مشخصات نمونه‌ها ۷۳mm محاسبه شد).

همچنین با توجه به نیمرخ کرنش نمونه FI-N-1، طول موثر پیوستگی برای این نمونه در حدود ۶۰mm است (۲۰٪ کمتر از نمونه‌های ساخته شده با روش‌های متداول)، این در حالی است که بار نهایی در این نمونه ۳۴٪ بیشتر از نمونه‌های ساخته شده با روش‌های متداول است. بنابراین روش کاشت الیاف در مقایسه با روش‌های متداول، به دلیل پیوستگی بهتر بین ورق FRP و بتن و در نتیجه انتقال تنش به لایه‌های عمیق‌تر و مقاوم‌تر بتن، بار بیشتری را در طولی کمتر از ورق FRP به بتن انتقال می‌دهد.



(ب)

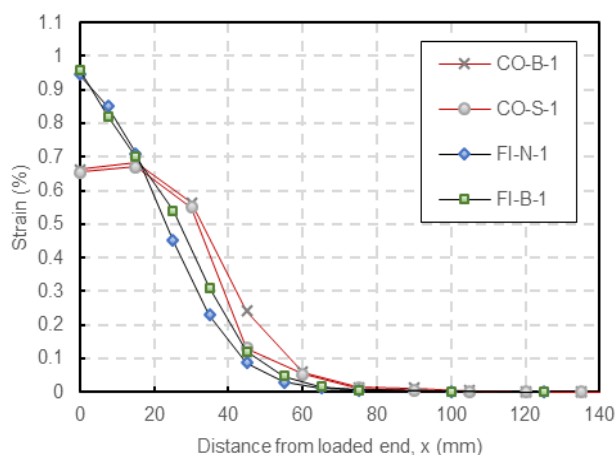


(الف)

شکل ۸- نیمرخ کرنش طولی، در طول ورق FRP. (الف) نمونه FI-B-1. (ب) نمونه CO-B-1

به منظور مقایسه بهتر طول موثر پیوستگی نمونه‌ها، پروفیل کرنش طولی تمام نمونه‌ها در ۹۵٪ بار نهایی آنها در شکل ۹ رسم شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، نمونه‌های ساخته شده به روش کاشت الیاف در مقایسه با نمونه‌های ساخته شده به روش‌های متداول، دارای طول موثر کمتر و کرنش بیشینه بیشتر می‌باشند.

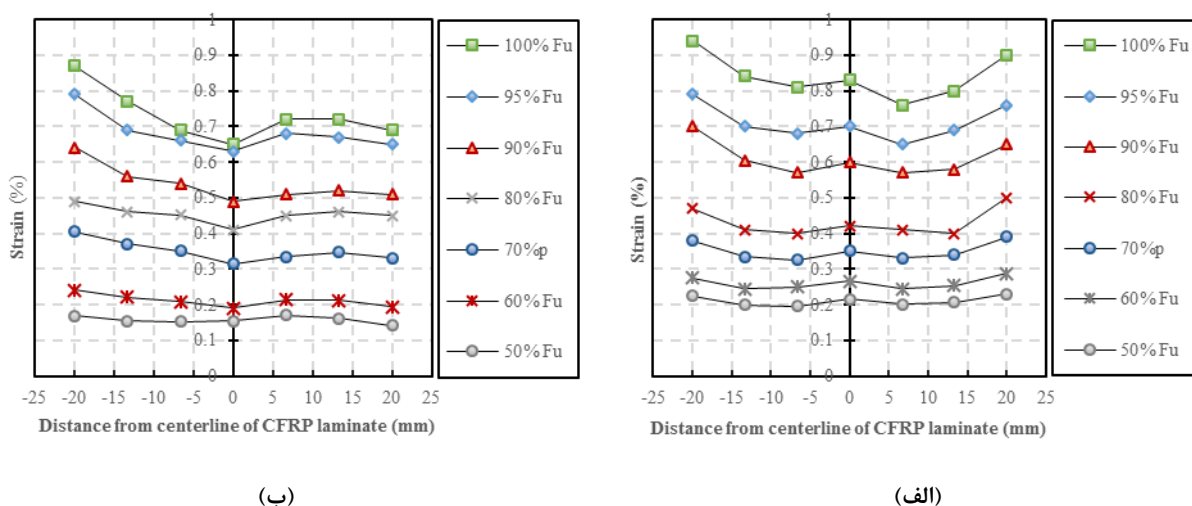
¹ Yao



شکل ۹- نیمرخ کرنش طولی، در طول ورق FRP نمونه‌ها

۴-۴ نیمرخ کرنش عرضی

یکی از مزایای تکنیک PIV دستیابی به کل میدان کرنش است. در این پژوهش به منظور بررسی دقیق‌تر ویژگی‌های روش کاشت الیاف و همچنین اطمینان از صحت انجام آزمایش برش مستقیم، نیمرخ کرنش عرضی ورق FRP نمونه‌ها در فاصله ۱۵ mm از ابتدای ناحیه چسبانده شده سمت بارگذاری شده، برای سطوح بار مختلف محاسبه شد. نیمرخ کرنش عرضی دو نمونه CO-B-1 و FI-B-1 در شکل ۱۰ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، توزیع کرنش در عرض ورق FRP تقریباً ثابت است (بخصوص در بارهای کمتر از ۹۰٪ بار نهایی)، این نتیجه نشان دهنده توزیع یکنواخت نیرو از گیره مخصوص دستگاه برش مستقیم به ورق FRP می‌باشد (اختلافات جزئی می‌تواند به دلیل اختلاف ضخامت ورق FRP در روش چسباندن تر باشد). همچنین در نیمرخ کرنش عرضی نمونه‌ی ساخته شده به روش کاشت الیاف، کرنش در دو لبه ورق FRP نسبتاً بیشتر از ناحیه میانی بوده، که به دلیل سختی کمتر پیوند در این نواحی است.



شکل ۱۰: نیمرخ کرنش عرضی در فاصله ۱۵mm از ابتدای بارگذاری شده ورق FRP. الف) نمونه FI-B-1. ب) نمونه CO-B-1

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش، طول موثر پیوستگی در روش نصب خارجی با استفاده از کاشت الیاف و روش‌های متداول آماده‌سازی سطحی (برس‌زنی و ماسه‌پاشی) مورد ارزیابی قرار گرفت و با روابط پیشنهادی توسط آیین‌نامه کمیته ۴۴۰ انجمن بتن آمریکا مقایسه شد. نمونه‌های ساخته شده به این روش، در دو دسته با و بدون آماده‌سازی سطحی ساخته شد. همچنین نمونه‌های ساخته شده به روش‌های متداول، در دو دسته آماده‌سازی سطحی شده به روش ماسه‌پاشی و برس‌زنی ساخته شدند. سپس مقاومت پیوستگی و طول موثر پیوستگی نمونه‌ها، با استفاده از آزمایش برش مستقیم و به کمک روش سرعت سنجی تصویری ذرات مورد ارزیابی قرار گرفت. بر اساس تجزیه و تحلیل نتایج تجربی پژوهش حاضر، می‌توان نتیجه‌گیری‌های زیر را انجام داد:

✓ طول موثر پیوستگی و مقاومت پیوستگی نمونه‌های ساخته شده به روش برس‌زنی و ماسه‌پاشی مشابه یکدیگر و همخوان با مقادیر محاسبه شده از رابطه چن و تنگ (آیین‌نامه‌ی انجمن بتن آمریکا) به دست آمد. اختلاف مقادیر به دست آمده از نتایج آزمایشگاهی و محاسباتی (رابطه چن و تنگ)، به ترتیب ۴ و ۳ درصد برای مقاومت و طول موثر پیوستگی بود. بنابراین، استفاده از روش آماده‌سازی سطحی برس‌زنی و ماسه‌پاشی تفاوت چشمگیری در ظرفیت پیوستگی بین ورق FRP و سطح بتن نداشته و رابطه‌های موجود با تقریب خوبی مقاومت و طول موثر پیوستگی را پیش‌بینی می‌کند.

✓ حالت شکست تمام نمونه‌های ساخته شده به روش‌های برس‌زنی و ماسه‌پاشی، جداشدگی ورق FRP از سطح بتن بود. این درحالی است که در روش کاشت الیاف به دلیل انتقال تنش به عمق بتن و بهره‌گیری از مقاومت بتن در عمق آن، پیوستگی مناسبی بین ورق FRP و بتن حاصل شده و در نتیجه حالت شکست تمام نمونه‌ها در این روش، گسیختگی ورق FRP می‌باشد. بنابراین، استفاده از روش کاشت الیاف می‌تواند راه‌کار مناسبی در حذف پدیده نامطلوب جداشدگی زود هنگام ورق FRP از سطح بتن باشد.

✓ طول موثر پیوستگی در روش کاشت الیاف ۲۰٪ کمتر از روش‌های متداول و مقاومت پیوستگی در این روش ۳۴٪ بیشتر از روش‌های متداول به دست آمد. بنابراین روش کاشت الیاف نسبت به روش‌های متداول، بار بیشتری را در طولی کمتر از ورق FRP به بتن انتقال می‌دهد.

✓ مقاومت پیوستگی و طول موثر پیوستگی نمونه‌های ساخته شده به روش کاشت الیاف در هر دو دسته با و بدون آماده‌سازی سطحی، دارای نتایج مشابه بودند. بنابراین در روش کاشت الیاف، نیاز به هیچگونه آماده‌سازی سطحی نبوده و به‌سادگی می‌توان پدیده جداشدگی ورق FRP از سطح بتن را حذف نمود و به بیشترین ظرفیت باربری عضو تقویت شده با ورق FRP دست یافت.

مراجع

- 1) A. Caggiano, E. Martinelli, C. Faella, A fully-analytical approach for modelling the response of FRP plates bonded to a brittle substrate, *International Journal of Solids and Structures*, 49(17) (2012) 2291-2300.
- 2) M.R.T. Arruda, J.P. Firmo, J.R. Correia, C. Tiago, Numerical modelling of the bond between concrete and CFRP laminates at elevated temperatures, *Journal of Engineering Structures*, 110 (2016) 233-243.
- 3) Y. Wu, X.S. Xu, J.B. Sun, C. Jiang, Analytical solution for the bond strength of externally bonded reinforcement, *Composite structures*, 94(11) (2012) 3232-3239.
- 4) F. M. Mukhtar, R. M. Faysal, A review of test methods for studying the FRP-concrete interfacial bond behavior, *Journal of Construction and Building Materials*, 169 (2018) 877-887.
- 5) J. Chen, J. Teng, Anchorage strength models for FRP and steel plates bonded to concrete. *Journal of Structural Engineering*, 127(7) (2001) 784-791.

- 6) V. Colotti, Effectiveness factors for bond strength in FRP shear-strengthened RC beams, *Journal of Materials and Structures*, 49(12) (2016) 5031–5049.
- 7) Z. Wu, S. Islam, H. Said, A three-parameter bond strength model for frp-concrete interface, *Journal of reinforced plastics and composites*, 28(19) (2009) 2309-2323.
- 8) H. Diab, Z. Wu, Nonlinear constitutive model for time-dependent behavior of FRP-concrete interface, *Composites science and technology*, 67(11-12) (2007) 2323-2333.
- 9) ACI 440.2R, Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures, American Concrete Institute, (2008).
- 10) Externally bonded FRP reinforcement for RC structures, fib Bulletin 14, International Federation for Structural Concrete, (2001).
- 11) Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening, CNR-DT200, (2004).
- 12) N. F. Grace, G. Sayed, A. Soliman and K Saleh, Strengthening reinforced concrete beams using fiber reinforced polymer (FRP) laminates, *ACI Structural Journal*, 96 (1999).
- 13) J. Firmo, J.R. Correia, D. Pitta, C. Tiago, M. Arruda, Experimental characterization of the bond between externally bonded reinforcement (EBR) CFRP strips and concrete at elevated temperatures, *Cement and Concrete Composites*, 60 (2015) 44-54.
- 14) M. Eftekhar, M. Yaghoubi , Hole drilling technique for delaying debonding of FRP laminates from strengthened concrete beams, 4th Iranian Concrete National conference, Tehran, Iran, (2012) in persian.
- 15) D. Mostofinejad, E. Mahmoudabadi, Grooving as alternative method of surface preparation to postpone debonding of FRP laminates in concrete beams, *Journal of Composites for Construction*, 14(6) (2010) 804-811.
- 16) A. Alipour, M. Tavakkolizadeh, S. Alizadeh, M. Ahmadi Jalayer, Experimental investigation on behaviour of concrete beams strengthened with GFRP laminates using circular grooving and other traditional methodes of surface prepration, 10th Internationa congress on civil engineering, Tabriz, Iran (2015) in persian.
- 17) B. Attari, M. Tavakkolizadeh, An Experimental Investigation on Effect of Temperature on Bond between FRP Laminates and Concrete, 11th International Congress on Civil Engineering, Tehran, Iran, (2018) in persian.
- 18) R.J. Adrian, Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics, *Annual review of fluid mechanics*, 23(1) (1991) 261-304.
- 19) D. White, W. Take, M. Bolton, Soil deformation measurement using particle image velocimetry (PIV) and photogrammetry, *Geotechnique*, 53(7) (2003) 619-631.
- 20) C. Slominski, M. Niedostatkiewicz, J. Tejchman, Application of particle image velocimetry (PIV) for deformation measurement during granular silo flow, *Powder Technology 1* (173) (2007) 1-18.
- 21) M. Hajjalilue-Bonab, H. Azarnya-Shahgoli, Y. Sojoudi, Soil deformation pattern around laterally loaded piles, *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, 11(3) (2011) 116-125.
- 22) D. White, W. Take ,GeoPIV: Particle Image Velocimetry (PIV) software for use in geotechnical testing, (2002) .
- 23) M. Ali-Ahmad, K. Subramaniam, M. Ghosn, Experimental investigation and fracture analysis of debonding between concrete and FRP sheets, *Journal of engineering mechanics*, 132(9) (2006) 914-923.
- 24) C. Mazzotti, M. Savoia, B. Ferracuti, An experimental study on delamination of FRP plates bonded to concrete, *Construction and Building Materials*, 22(7) (2008) 1409-1421.
- 25) A. Hosseini, and D. Mostofinejad, Experimental investigation into bond behavior of CFRP sheets attached to concrete using EBR and EBROG techniques, *Composites Part B: Engineering*, 51 (2013) 130-139.
- 26) J. Yao, J. Teng, J. Chen, Experimental study on FRP-to-concrete bonded joints, *Composites Part B: Engineering*, 36(2) (2005) 99-113.

Effective Bond Length Evaluation of Fiber Implantation Methods in EBR Applications Using Particle Image Velocimetry

ABSTRACT

The bond strength between fiber reinforced polymer (FRP) laminates and concrete is the main factor affecting the behavior of concrete members strengthened by externally bonded reinforcement (EBR) method. The bond strength depends on several factors, such as surface preparation, concrete strength, FRP stiffness and thickness and effective bond length. According to previous studies, using a bond length longer than the effective bond length, will not increase the connection load carrying capacity. Most existing theoretical models estimate bond strength based on the effective bond length. So, in order to achieve a satisfactory connection, it is important to determine the accurate value for the effective bond length of the lap joint. In this study, in order to evaluate and compare the effective bond length of fiber implantation method and the conventional EBR method, 12 concrete specimens were prepared and tested. Then, the effective bond length and the bond strength of the specimens were obtained by using single-shear pull test and using particle image velocimetry (PIV) method and compared with the existing specifications such as ACI and fib. The results showed that, using fiber implantation method instead of the conventional EBR method, would reduce the effective bond length by 20% and increase the bond strength between FRP and concrete substrate by 34%.

KEYWORDS

Effective bond length, Fiber implantation, EBR, FRP, Particle Image Velocimetry (PIV).