

بررسی اتصال پیش تنیده FRP به بتن با روش شیار زنی

عرفان شبانی

دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان.

علیرضا سلجوقیان

استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان.

داود مستوفی نژاد*

استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان.

چکیده

در مقاوم سازی سازه‌های بتن آرمه با ورق‌های تقویتی FRP، توجه به جدا شدگی زود رس ورق تقویتی از سطح بتن امری مهم و ضروری است. از جمله راه کارهای کاربردی در به تعویق انداختن جدا شدگی و استفاده‌ی کارا تر از مصالح می‌توان به استفاده از FRP پیش تنیده اشاره نمود. استفاده از FRP پیش تنیده مزایای مختلفی از جمله افزایش ظرفیت کلی عضو سازه‌ای، افزایش بار ترک خوردگی و کاهش نیرو در آرماتورها دارد. از طرفی در سال‌های اخیر محققین نشان داده‌اند که روش‌های شیار زنی می‌تواند تا حد مطلوبی پدیده‌ی جدا شدگی را به تعویق اندازد. بنابراین در این تحقیق با به کار گیری روش‌های شیار زنی در تقویت با ورق‌های FRP پیش تنیده، عملکرد اتصال ورق به بتن مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج حاصل از آزمایش برش مستقیم-اتصال پیش تنیده نشان داد که استفاده از گروه شیار ۱۵@۵ با پیش تنیدگی ۲۰ و ۳۰ درصد، منجر به افزایش مقاومت اتصال به ترتیب به میزان ۱۴۶ و ۱۹۵ درصد نسبت به نمونه‌ی مبنا می‌شود. در واقع استفاده‌ی هم زمان از تقویت خارجی با FRP پیش تنیده و روش‌های شیار زنی موجب عملکرد بسیار مطلوب سطح اتصال خواهد شد.

واژه‌های کلیدی: آزمایش برش مستقیم-اتصال پیش تنیده، کامپوزیت پیش تنیده‌ی FRP، رفتار اتصال، روش نصب خارجی، روش نصب خارجی روی شیار.

* نویسنده مسئول: dmstofi@iut.ac.ir

۱- مقدمه

داده شد که با افزایش میزان پیش تنیدگی، بار ترک خوردگی و ظرفیت باربری نهایی افزایش می‌یابد. در این مطالعه، به دلیل محدودیت ناشی از دستگاه، میزان پیش تنیدگی نهایتاً تا ۲۶ درصد کرنش نهایی ورق FRP افزایش یافت [۵].

به منظور بررسی اثرات بار خستگی بر تیر تقویت شده با FRP پیش تنیده، هفت تیر بتن آرمه (دو تیر بدون پیش تنیدگی و پنج تیر تقویت شده با ورق CFRP^۲ پیش تنیده با اتصال خارجی) مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان از افزایش ظرفیت تیر پیش تنیده تحت بار یک‌نواخت و بار خستگی نسبت به تیر غیر پیش تنیده داشت. همچنین در این تحقیق نشان داده شد که در تیرهای دارای تقویت پیش تنیده، حدود تغییرات کرنش در آرماتورها در طول آزمایش کمتر از تیر غیر پیش تنیده می‌باشد [۶].

در مطالعه‌ای دیگر تیرهای تقویت شده با میله‌های FRP پیش تنیده با روش نصب در نزدیک سطح (NSM^۳)، تحت آزمایش خمش چهار نقطه‌ای قرار گرفت. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که ظرفیت باربری در تیرهای پیش تنیده به میزان حداکثر ۱۰۴ درصد نسبت به حالت غیر پیش تنیده افزایش می‌یابد. علاوه بر این، مشاهده شد که خیز وسط دهانه در تیرهای پیش تنیده حداکثر ۳۶ درصد نسبت به تیرهای غیر پیش تنیده کاهش می‌یابد [۷].

در سال‌های اخیر به منظور بررسی رفتار اتصال بین ورق FRP پیش تنیده و بتن، آزمایش رها سازی نیروی پیش تنیدگی انجام شده است. در این آزمایش نیروی پیش تنیدگی به اندازه‌ای بزرگ‌تر از ظرفیت اتصال انتخاب شده و سپس این نیرو به طور تدریجی رها سازی می‌شود تا سطح اتصال به گسیختگی برسد. نتایج حاصل از این آزمایش نشان داد که به علت وقوع ترک‌های مورب و عمیق در بتن در تقویت پیش تنیده، ظرفیت اتصال افزایش می‌یابد. علاوه بر این، نتایج آزمایشگاهی نشان داد که اتصالات پیش تنیده تغییر شکل‌های بزرگ خارج از صفحه را تجربه می‌کنند [۸ و ۹].

مود گسیختگی غالب در تقویت خمشی با روش نصب خارجی در تقویت سازه‌های بتن آرمه با استفاده از کامپوزیت‌های FRP، جدا شدگی FRP از سطح بتن می‌باشد. بدین منظور برای به تعویق انداختن جدا شدگی، محققان روش‌های شیار زنی را به عنوان روشی جای‌گزین معرفی کرده‌اند [۱۰-۱۶].

در سال‌های اخیر استفاده از ورق FRP^۱ پیش تنیده به دلیل استفاده‌ی موثر و کارا تر از مصالح FRP مورد توجه محققین قرار گرفته است [۱]. تقویت پیش تنیده موجب ایجاد تنش‌های فشاری اولیه در سطح اتصال بین FRP و بتن می‌شود. پس از تقویت قسمت کششی عضو بتنی توسط FRP پیش تنیده و اعمال بارگذاری، تنش‌های کششی ایجاد شده در سطح اتصال، ابتدا تنش‌های فشاری اولیه‌ی ناشی از پیش تنیدگی را خشی کرده سپس سطح اتصال تحت کشش قرار خواهد گرفت. که موجب به تعویق انداختن پدیده‌ی جدا شدگی، افزایش بار ترک خوردگی، کاهش عرض ترک‌ها، افزایش بار خستگی، افزایش ظرفیت باربری تیر در لحظه‌ی تسلیم آرماتورهای طولی، کاهش کرنش آرماتورهای طولی، افزایش ظرفیت نهایی، افزایش ظرفیت برشی به واسطه‌ی نیروی محوری فشاری و جای‌گزینی مناسب برای پیش تنیدگی داخلی از دست رفته خواهد شد [۲ و ۳].

ورق تقویتی FRP را می‌توان با سه روش پیش خیز، استفاده از قاب خارجی و همچنین استفاده از مهار داخلی پیش تنیده نمود [۴]. در روش پیش خیز، پیش تنیدگی با ایجاد خیز منفی در تیر و تقویت آن ایجاد می‌شود. به دلیل سختی اجرا و میزان پیش تنیدگی کم، این روش منسوخ شده است. در روش استفاده از قاب خارجی، از یک سازه‌ی کاملاً مجزا جهت پیش تنیده کردن استفاده می‌گردد. به این صورت که ابتدا نیروی پیش تنیدگی به ورق FRP با استفاده از جک دستگاه اعمال می‌گردد. سپس ورق روی سطح تیر چسبانده شده و پس از گیرش و عمل آوری رزین، ورق FRP از فک دستگاه جدا می‌گردد. در روش استفاده از مهار داخلی، ابتدا یک طرف ورق تقویتی توسط مهار (عموماً فلزی) به انتهای سطح اتصال تیر مهار می‌شود. سپس طرف دیگر آن توسط دستگاه پیش تنیده‌ی متصل شده به تیر کشیده می‌شود تا پیش تنیدگی انجام شده و پس از مهار ورق FRP دستگاه جدا می‌شود. بنابراین در این روش لزوماً نیاز به مهار انتهایی می‌باشد [۴].

در یک تحقیق سه تیر بتن آرمه با استفاده از ورق FRP پیش تنیده تقویت شد. در این آزمایش از روش مبتنی بر مهار داخلی جهت پیش تنیده کردن ورق تقویتی استفاده گردید. در این تحقیق نشان

³ Near Surface Method

¹ Fiber Reinforced Polymers

² Carbon Fiber Reinforced Polymers

روی نمونه‌های منشوری شکل با ابعاد $150 \times 150 \times 350$ میلی‌متر انجام شد. نمونه‌های منشوری شکل فاقد آرماتور بوده و برای تعیین مقاومت فشاری بتن از نمونه‌های استوانه‌ای با ابعاد 100×200 میلی‌متر استفاده گردید. طرح اختلاط بتن مطابق با آیین‌نامه‌ی ACI 221 [۲۰] تنظیم گردید. بدین منظور برای ساخت یک متر مکعب بتن با مقاومت فشاری هدف ۳۰ مگا پاسکال، به ترتیب از ۳۱۰، ۸۸۰، ۹۰۴ و ۲۱۶ کیلو گرم سیمان، شن، ماسه و آب استفاده شد. در این پژوهش، به منظور ساخت بتن از ماسه با دانه بندی در محدوده‌ی ۰-۵ میلی‌متر و شن با دانه بندی در بازه‌ی ۵-۱۲/۵ میلی‌متر استفاده گردید.

به منظور تقویت نمونه‌ها از پارچه‌ی الیاف کربن یک طرفه استفاده شد. مشخصات این الیاف مطابق با کاتالوگ کارخانه‌ی تولید کننده در جدول ۱ ارائه شده است [۲۱].

از طرف دیگر، به منظور اشباع نمودن الیاف کربن و اتصال هر چه بهتر بین کامپوزیت‌های FRP و سطح بتن از رزین دو جزئی تولید کارخانه‌ی کوانتوم استفاده گردید. مطابق با دستور العمل استفاده از رزین، نسبت اختلاط بین جزء الف و ب به میزان ۱ به ۳ رعایت شد [۲۲]. هم‌چنین برای عمل آوری و گیرش نهایی چسب، نمونه‌ها پس از مقاوم سازی به مدت ۷ روز در دمای آزمایشگاه نگه داری شدند. مشخصات این چسب در جدول ۱ ارائه شده است.

۲-۲- طبقه بندی و نام گذاری نمونه‌ها

به منظور اطمینان از صحت نتایج آزمایش‌های انجام شده، لازم است برای حالت‌های مختلف نمونه‌ی تکراری ساخته شده و تحت آزمایش قرار گیرد. برای این منظور، در تحقیق حاضر برای هر حالت دو نمونه‌ی مشابه ساخته و آزمایش شد. در حالتی که تفاوت نتایج آزمایش دو نمونه‌ی مشابه زیاد بود، از نمونه‌ی تکرار سوم استفاده گردید.

در این مطالعه، از ده نمونه‌ی برش مستقیم جهت انجام آزمایش و بررسی اهداف تعیین شده، استفاده گردید. نمونه‌ها از لحاظ نوع آماده سازی (EBR یا EBROG^۲) با یک دیگر متفاوت بودند. هم‌چنین به منظور بررسی اثرات ناشی از پیش تنیدگی از ترازهای ۰، ۲۰ و ۳۰ درصد کرنش نهایی FRP جهت پیش تنش اولیه

در سال‌های اخیر اثر تغییرات عرض و عمق شیار بر عملکرد اتصال FRP به بتن و تعیین ابعاد شیار بهینه برای استفاده در مقاوم سازی بررسی شد. هم‌چنین برای اعتبار سنجی روابط ارائه شده در تاریخچه، ۲۸ آزمایش برش مستقیم انجام شد. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که برای عمق شیارهای ۵، ۱۰ و ۱۵ میلی‌متر، به ترتیب عرض شیارهای ۱۰، ۵ و ۱۵ میلی‌متر بیش‌ترین مقاومت اتصال را دارند [۱۹-۱۷]. استفاده از ورق FRP پیش تنیده به منظور تقویت سازه‌های بتن آرمه، مستلزم شناخت رفتار اتصال ورق تقویتی به بتن می‌باشد. اتصال مناسب بین ورق FRP پیش تنیده و سطح بتن به منظور انتقال حداکثری تنش‌های پیش تنیدگی مستلزم استفاده از روش آماده سازی سطحی مناسب می‌باشد که توانایی انتقال نیروی پیش تنیدگی به بتن را داشته باشد و تحت اثر نیروی پیش تنیدگی دچار آسیب نشود.

استفاده از روش EBR در تحقیقات گذشته نشان داد که این روش آماده سازی سطحی توانایی لازم برای انتقال تنش‌های ناشی از پیش تنیدگی را ندارد؛ به طوری که میزان کارایی ورق FRP تا میزان ۱۰ درصد محدود می‌شود. در مقابل، استفاده از روش‌های شیار زنی به منظور آماده سازی سطحی، با انتقال تنش‌ها به لایه‌ها عمیق‌تر بتن، بستر مناسب برای استفاده‌ی موثرتر و کاراتر از ورق FRP را فراهم می‌کند. از طرفی استفاده از FRP پیش تنیده مزایای متعددی از جمله افزایش مقاومت اتصال به دنبال دارد. بنابراین روش‌های شیار زنی با فراهم آوردن بستری مناسب برای استفاده از FRP پیش تنیده این امکان را فراهم می‌سازد که ظرفیت اتصال بهبود یابد و در نتیجه مقاومت اتصال به طور چشم‌گیری افزایش یابد. بنابراین در این تحقیق از روش‌های شیار زنی در تقویت پیش تنیده استفاده گردید. هم‌چنین نحوه‌ی رفتار اتصال کامپوزیت FRP پیش تنیده به بتن با استفاده از روش‌های شیار زنی توسط آزمایش برش مستقیم_اتصال پیش تنیده مورد بررسی قرار گرفت.

۲- برنامه‌ی آزمایشگاهی

۲-۱- مشخصات نمونه‌ها و مصالح مصرفی

به منظور بررسی اهداف تعیین شده در قسمت قبل، ۱۰ آزمایش

² Externally Bonded Reinforcement On Grooves

¹ Externally Bonded Reinforcement

استفاده گردید. مطابق جدول ۲، نمونه‌ها به صورت a-bc نام گذاری شده‌اند. به این صورت که a بیان‌گر روش تقویت، b نشان دهنده درصد پیش تنیدگی و c نمایان‌گر تکرار نمونه می‌باشد. برای مثال نمونه‌ی EBR-0A بیان‌گر تکرار اول از نمونه‌ی تقویت شده با روش EBR در حالت بدون پیش تنیدگی می‌باشد (درصد پیش تنیدگی برابر صفر).

جدول ۱- مشخصات الیاف و چسب مورد استفاده در این تحقیق [۲۱ و ۲۲]

نام تجاری	ضخامت (mm)	مقاومت کششی (MPa)	مدول الاستیسیته (MPa)	کرنش نهایی (%)
SikaWrap 300-C	۰/۱۷۱	۳۸۰۰	۲۴۲۰۰۰	۱/۵۵
Quantom-EPR 3301	-	۳۰	۴۵۰۰	۱/۵۰

جدول ۲- مشخصات نمونه‌های اتصال FRP به بتن

ردیف	نام نمونه	روش نصب FRP	ابعاد شیار (میلی متر)	فاصله‌ی شیارها (میلی متر)	درصد پیش تنیدگی (%)	شماره تکرار
۱	EBR-0A	EBR	-	-	۰	۱
۲	EBR-0B	EBR	-	-	۰	۲
۳	GM-0A	EBROG	۵×۵	۱۵	۰	۱
۴	GM-0B	EBROG	۵×۵	۱۵	۰	۲
۵	EBR -20A	EBR	-	-	۲۰	۱
۶	EBR -20B	EBR	-	-	۲۰	۲
۷	GM -20A	EBROG	۵×۵	۱۵	۲۰	۱
۸	GM -20B	EBROG	۵×۵	۱۵	۲۰	۲
۹	GM-30A	EBROG	۵×۵	۱۵	۳۰	۱
۱۰	GM-30B	EBROG	۵×۵	۱۵	۳۰	۲

۳-۲- آماده‌سازی و تقویت نمونه‌های غیر پیش تنیده

پس از آماده‌سازی طرح اختلاط و سعی و خطا تا رسیدن به مقاومت فشاری هدف، بتن ریزی به منظور ساخت نمونه‌های منشوری آغاز شد. جهت ارزیابی مقاومت فشاری مشخصه‌ی ۲۸ روزه‌ی بتن و همچنین مقاومت بتن در روز آزمایش، در هر مرحله از بتن ریزی، شش نمونه‌ی استوانه‌ای ساخته شد.

پس از عمل‌آوری بتن، سطح نمونه‌ها جهت نصب کامپوزیت‌های FRP آماده‌سازی شد. به این صورت که در نمونه‌های EBR، ابتدا با دستگاه سایش، لایه‌ی نازک و ضعیف سطح بتن حذف می‌گردد. سپس توسط دستمال مرطوب و دستگاه باد نمونه کاملاً تمیز شده و آماده‌ی تقویت شود.

برای آماده‌سازی سطحی نمونه‌ها به روش شیار زنی از روش گروه شیار استفاده گردید. مطابق تاریخچه، در عرض‌های مختلف اتصال، گروه شیار ۱۵@۵ میلی متر به عنوان گروه شیار بهینه

معرفی گردید [۱۹]. بنابراین در این تحقیق در عرض اتصال ۵۰ میلی متر از گروه شیار ۱۵@۵ میلی متر استفاده گردید. در این گروه شیار، عرض و عمق شیار برابر با ۵ میلی متر و فاصله‌ی مرکز تا مرکز شیارها برابر با ۱۵ میلی متر می‌باشد. لازم به ذکر است که این شیارها در کل طول اتصال که برابر با ۲۰۰ میلی است، ایجاد می‌شود.

به منظور اجرای شیارها، ابتدا محل دقیق آن‌ها روی سطح بتن مشخص می‌شود. در ادامه، پس از مرطوب کردن سطح بتن، با استفاده از دستگاه شیار زن، شیارها روی سطح اتصال ایجاد می‌گردد. در این تحقیق عرض اتصال برابر ۵۰ میلی متر در نظر گرفته شده است که با توجه به این عرض، امکان ایجاد سه شیار طولی در زیر کامپوزیت‌های FRP وجود دارد. تصویری از نمونه‌ی آماده‌سازی شده با استفاده از روش شیار زنی در شکل ۱ قابل مشاهده می‌باشد.

نمونه‌ها و نوع آزمایش‌ها، دستگاه به صورت مناسب اصلاح شد. به طور مثال به منظور قرائت نیرو در هر لحظه، نیرو سنج به صورت سری بین ستون و فک دستگاه قرار داده شد (شکل ۲).



شکل ۲- نحوه‌ی قرار گیری نیرو سنج در دستگاه پیش تنیدگی

بنابراین به منظور پیش تنیده کردن کامپوزیت‌های FRP، پس از آماده سازی، سه نمونه به طور هم زمان در بستر پیش تنیدگی قرار گرفت. پس از آن، در روش EBR سطح نمونه‌ها با استفاده از لایه‌ی نازک چسب پوشانده شد (شکل ۳-الف). این در حالی است که در نمونه‌های EBROG، ابتدا داخل شیار با استفاده از رزین پر گردید. سپس طول FRP کاملا آغشته به رزین شده و نیروی پیش تنیدگی به ورق FRP اعمال شد. پس از اتصال FRP پیش تنیده به سطح بتن، نیروی جک قفل شد تا از هرگونه افت ناشی از پیش تنیدگی جلوگیری شود. نمونه‌ها در همین وضعیت به مدت ۷ روز نگه داری شدند تا عمل آوری چسب کامل شود. پس از عمل آوری چسب، نیروی داخل FRP مجدداً اندازه گیری شد. مشاهدات آزمایشگاهی نشان داد که نیروی پیش تنیدگی در سیستم به میزان کمتر از ۱ درصد دچار افت می‌شود. این افت پیش تنیدگی را می‌توان به تغییر شکل‌های احتمالی اتصالات و سایر اتلافات ناشی از دستگاه نسبت داد.

پس از انجام تمامی مراحل، نیروی پیش تنیدگی به طور تدریجی رها گردید تا تنش پیش تنیدگی به سطح اتصال FRP و بتن منتقل شود. در ادامه نمونه‌ها از یک‌دیگر جدا شدند تا آماده‌ی آزمایش برش مستقیم شوند (شکل ۳-ب).

۲-۵- آزمایش و عملیات پردازش تصویر (PIV)

به منظور انجام پردازش تصویر^۱ نمونه‌ها، لازم است سطح اتصال به



شکل ۱- اتصال آماده سازی شده با استفاده از روش شیار زنی

نحوه‌ی تقویت نمونه‌ی بدون پیش تنیدگی بدین صورت بود که در نمونه‌های بدون شیار، ابتدا سطح با استفاده از یک لایه‌ی نازک رزین پوشانده شد. سپس الیاف کربن روی سطح مورد نظر قرار گرفته و با استفاده از رزین اشباع شدند. این در حالی است که در نمونه‌های شیار دار، ابتدا داخل شیار کاملاً با رزین پر شده و سپس الیاف کربن بر روی شیارها قرار گرفته و با استفاده از رزین اشباع شدند. لازم به ذکر است که به منظور گیرش نهایی چسب، نمونه‌ها به مدت ۷ روز در دمای آزمایشگاه نگه داری شده و سپس تحت آزمایش برش مستقیم قرار گرفتند.

۲-۴- تقویت نمونه‌های پیش تنیده

بستر دستگاه پیش تنیدگی شامل یک تیر بتن آرمه و دو ستون فولادی انتهایی، به عنوان تکیه گاه دستگاه و دو فک نگه دارنده است. فک انتهایی دستگاه ثابت بوده (صرفاً با کاربری نگه دارنده و بدون ایجاد نیرو) و فک دیگر برای ایجاد و انتقال نیروی پیش تنیدگی به جک هیدرولیکی متصل می‌باشد. فاصله‌ی بین دو فک در بستر پیش تنیدگی برابر با ۲۶۰۰ میلی متر است که قابلیت کم و زیاد شدن را ندارد. بنابراین جهت جلوگیری از اتلاف کامپوزیت‌های FRP و بهینه کردن آزمایش، در هر مرتبه از پیش تنیدگی، هم زمان سه نمونه در بستر مذکور قرار گرفته و پیش تنیده شد.

لازم به ذکر است که بر اساس طبقه بندی ارائه شده در تاریخچه، روش پیش تنیدگی کامپوزیت‌های FRP در این پژوهش از نوع قاب خارجی است. کاربری و طراحی اولیه‌ی این دستگاه صرفاً برای تقویت تیر پیش بینی شده بود. در این تحقیق با توجه به ابعاد

^۱ Particle Image Velocimetry

بخش اول به بیان نتایج عینی مستقیم شامل مقاومت اتصال و مود گسیختگی می‌پردازد؛ و در بخش دوم نتایج حاصل از پردازش تصویر مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. در واقع در بخش دوم، رفتار اتصال با استفاده از نمودارهای لغزش، کرنش و تنش در عرض اتصال بررسی خواهد شد.

۳-۱- مقاومت اتصال و حالت گسیختگی

جهت مقایسه‌ی بهتر بین نمونه‌های مختلف، نمونه‌ی تقویت شده با روش نصب خارجی و بدون پیش تنیدگی به عنوان نمونه‌ی شاهد در نظر گرفته شد. از هر نمونه دو تکرار آزمایش شد و از میانگین تکرارها جهت مقایسه و بررسی نتایج استفاده گردید. نتایج حاصل آزمایش نمونه‌ها در جدول ۳ ارائه شده است.

همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، نمونه‌ی EBR-0 به عنوان نمونه شاهد توانست بار $8/2$ کیلو نیوتن را تحمل کند؛ نحوه‌ی گسیختگی این نمونه‌ها به صورت جدا شدگی ورق FRP از سطح بتن می‌باشد. این درحالی است که ظرفیت کششی ورق FRP طبق مشخصات ارائه شده در جدول ۱، حدود 25 کیلو نیوتن می‌باشد.

در تقویت با روش گروه شیار در حالت غیر پیش تنیده، ظرفیت اتصال به $15/3$ کیلو نیوتن رسید که نسبت به نمونه‌ی شاهد 87 درصد افزایش داشت. این افزایش به دلیل سطح تماس بیشتر کامپوزیت FRP با بتن می‌باشد.

استفاده از پیش تنش اولیه به میزان 20 درصد در نمونه‌ی EBR، منجر به افزایش ظرفیت این نمونه به $13/9$ کیلو نیوتن شد. به عبارت دیگر، مقاومت اتصال در این نمونه نسبت به نمونه‌ی مینا به میزان 70 درصد افزایش داشت.

مقایسه‌ی ظرفیت اتصال نمونه‌های EBR-20 و GM-0 نشان می‌دهد که نمونه‌ی GM-0 به میزان 9 درصد عملکرد بهتری نسبت به نمونه‌ی EBR-20 داشته است. از آن جایی که پیش تنیده کردن کامپوزیت FRP فرآیندی دشوار و پرهزینه می‌باشد، بنابراین در صورتی که صرفاً مقاومت اتصال مدنظر باشد، بر اساس نتایج آزمایشگاهی منطقی است که در صنعت از روش شیار زنی در حالت غیر پیش تنیده استفاده گردد. ولی در سایر اهداف مانند کاهش خیز غیر مجاز در سازه و کاهش عرض ترک‌ها، حالت پیش تنیده مطلوب‌تر خواهد بود.

صورت کامل با رنگ سفید پوشانده شده و نقاط رنگی بسیار ریز با تراکم بالا روی سطح اتصال پاشیده شود. این عملیات به منظور امکان تشخیص نقاط مختلف سطح از یک‌دیگر توسط نرم افزار می‌باشد.



(الف)



(ب)

شکل ۳- الف) نحوه‌ی تقویت نمونه‌ها در بستر پیش تنیدگی؛
ب) نمونه‌های تقویت شده

پس از گیرش نهایی چسب، نمونه‌ها تحت آزمایش برش-مستقیم قرار گرفتند. به این صورت که سطح اتصال نمونه‌ها تحت بار برشی قرار گرفت. برای این منظور، انتهای آزاد ورق تقویتی تا لحظه‌ی گسیختگی نهایی تحت اثر نیروی کششی قرار گرفت. در همین حین برای عملیات پردازش تصویر، در مراحل مختلف بارگذاری از سطح اتصال عکس برداری شد. پس از آن تصاویر سطح اتصال توسط کد نوشته در نرم افزار متلب مش بندی شد. سپس لغزش، کرنش و تنش‌های ایجاد شده در سطح اتصال محاسبه گردید.

۳- نتایج آزمایشگاهی و بحث روی آن‌ها

در این پژوهش نتایج آزمایشگاهی به دو بخش تقسیم می‌شود.

پیش تنیده کردن اتصال با ورق تقویتی FRP می‌باشد. لازم به ذکر است که ظرفیت اتصال این نمونه نسبت به نمونه EBR-20، ۴۵ درصد افزایش داشته است. بنابراین به جرات می‌توان گفت در صنعت استفاده از روش شیار زنی برای آماده سازی سطحی به منظور تقویت نمونه با استفاده از کامپوزیت‌های FRP پیش تنیده، نتایج به مراتب مطلوب‌تری نسبت به روش آماده سازی سطحی خواهد داشت.

در ادامه نمونه‌های تقویت شده با استفاده از کامپوزیت‌های FRP پیش تنیده به روش شیار زنی که هدف اصلی این پژوهش است، بررسی خواهد شد. نمونه GM-20 نشان‌گر نمونه‌ی تقویت شده با گروه شیار به همراه پیش تنیدگی ۲۰ درصد است. ظرفیت اتصال این نمونه برابر ۲۰/۲ کیلو نیوتن است که نسبت به نمونه‌ی شاهد ۱۴۶ درصد افزایش تجربه کرده است. این افزایش چشم‌گیر حاصل فراهم آمدن بستری مناسب توسط روش شیار زنی برای

جدول ۳- نتایج حاصل از آزمایش نمونه‌ها

ردیف	نام نمونه	میزان پیش تنیدگی (%)	P _{Test} (kN)	P _{Avg} (kN)	افزایش ظرفیت اتصال نسبت به نمونه‌ی شاهد (%)	حالت گسیختگی	عمق جدا شدگی (mm)
۱	EBR-0A	۰	۸/۳	۸/۲	-	DC*	-
۲	EBR-0B	۰	۸	۸/۲	-	DC	-
۳	GM-0A	۰	۱۳/۸	۱۵/۳	۸۷	DC/CC**	۲/۵
۴	GM-0B	۰	۱۴/۸	۱۵/۳	۸۷	DC/CC	۳
۵	EBR-20A	۲۰	۱۳/۸	۱۳/۹	۷۰	DC/CC	۲
۶	EBR-20B	۲۰	۱۳/۹	۱۳/۹	۷۰	DC/CC	۲
۷	GM-20A	۲۰	۲۰	۲۰/۲	۱۴۶	DC/CC	۵
۸	GM-20B	۲۰	۲۰/۳	۲۰/۲	۱۴۶	DC/CC	۳
۹	GM-30A	۳۰	۲۴	۲۴/۲	۱۹۵	DC/CC	۵
۱۰	GM-30B	۳۰	۲۴/۵	۲۴/۲	۱۹۵	DC/CC	۶

* منظور از DC گسیختگی نمونه با جدا شدن ورق تقویتی از سطح بتن است

** منظور از DC/CC گسیختگی نمونه با جدا شدن ورق تقویتی به همراه لایه‌ی نازکی از بتن می‌باشد

گزارش شده است. مطابق با نتایج آزمایشگاهی، مود گسیختگی نمونه‌ی شاهد جدا شدن لایه‌ی نازک FRP و در سایر نمونه‌ها جدا شدگی به همراه لایه‌ی نازکی از سطح بتن می‌باشد. عمق جدا شدگی در نمونه‌های مختلف، متفاوت می‌باشد. بیشترین عمق جدا شدگی مربوط به نمونه‌های تقویت شده با استفاده از کامپوزیت‌های FRP پیش تنیده به روش EBROG است. به دلیل سطح اتصال بیش‌تر بین FRP و بتن در نمونه‌های تقویت شده با روش شیار زنی، عمق جدا شدگی در این نمونه‌ها بیش‌تر از نمونه‌های تقویت شده با استفاده از روش EBR می‌باشد. در نمونه‌های پیش تنیده در هنگام رها سازی نیروی پیش تنیدگی، ترک‌های مویی در المان کششی سطح اتصال ایجاد می‌شود. پس از بارگذاری برشی، در این حالت ترک‌ها در جهت مخالف حالت قبل اتفاق می‌افتد. این ترک‌ها موجب ایجاد سطح گسیختگی گوه‌ای شکل در سطح

در این پژوهش برای تقویت نمونه‌ها از کامپوزیت‌های FRP با ۳۰ درصد پیش تنیدگی نیز استفاده گردید. لازم به ذکر است که با توجه به عملکرد بهتر روش شیار زنی نسبت به روش EBR، تقویت نمونه‌ها با استفاده از کامپوزیت FRP با ۳۰ درصد پیش تنیدگی فقط با استفاده از روش شیار زنی انجام گرفت. طبق جدول نتایج، مقاومت اتصال نمونه‌ی GM-30 برابر با ۲۴/۲ کیلو نیوتن است. مقاومت اتصال در این نمونه نسبت به نمونه‌ی شاهد تقریباً سه برابر می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ظرفیت اتصال کامپوزیت‌های FRP به بتن در این نمونه، نزدیک به نیروی پارگی کامپوزیت‌های FRP می‌باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از کامپوزیت‌های FRP با ۳۰ درصد پیش تنیدگی همراه با روش شیار زنی منجر به استفاده‌ی بهینه از ظرفیت مصالح می‌شود. از طرف دیگر، مود گسیختگی نمونه‌های مختلف در جدول ۳

مقدار بیشینه لغزش افزایش داشته است؛ به طوری که لغزش در نمونه‌ی غیر پیش تنیده تقریباً برابر با ۰/۴۲ میلی متر و در نمونه‌ی پیش تنیده برابر با ۰/۵۲ میلی متر می‌باشد.

همچنین از شکل ۵ دریافت می‌شود که بیشینه‌ی لغزش در نمونه‌های EBR بیش‌تر از نمونه‌های EBROG است. در واقع در نمونه‌های تقویت شده با استفاده از روش EBROG، به دلیل سطح درگیری بیش‌تر بین FRP و سطح بتن، صلیبیت اتصال افزایش یافته و به دنبال آن لغزش ایجاد شده در این نمونه‌ها کاهش یافته است. به صورتی که در نمونه‌های تقویت شده با کامپوزیت-های FRP با پیش تنیدگی ۰، ۲۰ و ۳۰ درصد، مقدار لغزش بیشینه به ترتیب برابر با ۰/۱۵، ۰/۲۴ و ۰/۲۷ میلی متر می‌باشد.

بتن شده و در نهایت منجر به افزایش عمق جدا شدگی می‌گردد؛ به طوری که عمق جدا شدگی در نمونه‌ی GM-30 به ۶ میلی متر نیز رسیده است. تصاویری از نحوه‌ی گسیختگی نمونه‌های مختلف در شکل ۴ ارائه شده است.



(الف) (ب) (ج)



(د) (ه)

۳-۳- نمودارهای کرنش در عرض اتصال

شیب نمودار لغزش نشان‌گر کرنش در هر نقطه در اتصال است. بنابراین می‌توان نمودارهای کرنش را در نقاط مختلف از سطح اتصال به دست آورد. نمودارهای کرنش در عرض اتصال برای نمونه‌های مختلف در شکل ۶ نشان داده شده است.

با توجه به این که آزمایش برش مستقیم به صورت تغییر مکان کنترل می‌باشد، مقادیر کرنش بعد از بار حداکثر نیز ثبت شده است. از این رو، در نمودار کرنش نمونه‌ی مبنا مشاهده می‌شود که با افزایش نسبت بار به بار حداکثر، کرنش افزایش می‌یابد؛ ولی در لحظات نهایی با افزایش کرنش، مقدار بار کاهش یافته است. در صورتی که در سایر نمونه‌ها با افزایش بار، کرنش تا لحظه‌ی گسیختگی نهایی روند افزایشی دارد. به عبارت دیگر، اتصال EBR غیر پیش تنیده نسبت به سایر اتصالات، رفتار نرم و شکل پذیرتری از خود نشان داده است. در واقع در نمونه‌های پیش تنیده به علت کرنش منفی اولیه در نمونه، سطح اتصال اجازه‌ی کرنش اضافی را نداده و اتصال رفتار شکننده‌تری از خود نشان می‌دهد. از طرفی در نمونه‌ی تقویت شده با استفاده از روش EBROG نیز به علت افزایش سختی که در این نوع اتصال ایجاد می‌شود، رفتار نمونه به سمت شکننده پیش خواهد رفت.

۳-۴- نمودارهای تنش در عرض اتصال

با استفاده از مقاومت مصالح و روابط بین تنش و کرنش می‌توان نمودارهای تنش را برای هر نقطه از اتصال تحت بارهای مختلف

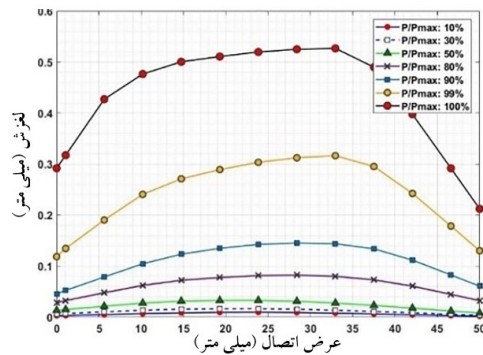
شکل ۴- نحوه‌ی گسیختگی نمونه‌های مختلف؛ (الف) EBR-0؛ (ب) EBR-20؛ (ج) GM-0؛ (د) GM-20؛ (ه) GM-30

۳-۲- نمودارهای لغزش در عرض اتصال

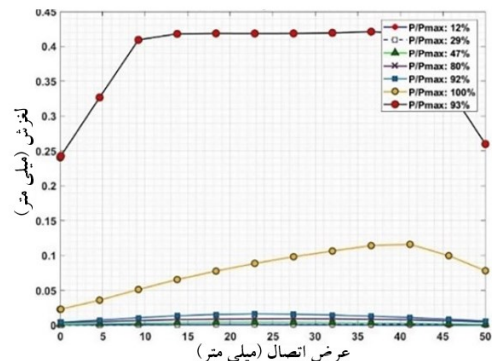
با استفاده از پردازش تصویر روی عکس‌های گرفته شده در حین آزمایش می‌توان نمودار لغزش را استخراج نمود. به این صورت که لغزش اتصال برابر با میزان جا به جایی بین ورق FRP و بتن اطراف آن است. با استفاده از نمودارهای لغزش می‌توان اطلاعات ارزشمندی از رفتار اتصال کامپوزیت‌های FRP به بتن به دست آورد. به عنوان مثال می‌توان از این نمودارها بیشینه‌ی لغزش را اندازه‌گیری نمود.

در شکل ۵ نمودارهای لغزش در عرض اتصال برای نمونه‌های مختلف در فاصله‌ی ۲۰ میلی متری از ابتدای اتصال ترسیم شده است. با توجه به شکل ۵ مشاهده می‌شود که لغزش در عرض اتصال روند تقریباً مشابهی را طی کرده است. به طوری که در نمونه‌های EBR و EBROG با افزایش درصد پیش تنیدگی،

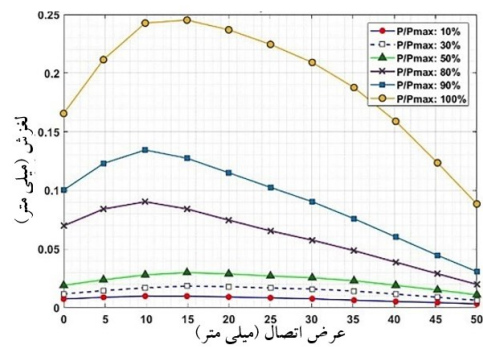
رسم نمود. نمودارهای تنش در عرض اتصال برای نمونه‌های مختلف در شکل ۷ قابل مشاهده است. در نمونه‌ی EBR-0 مقدار بیشینه‌ی تنش در نسبت بار به بار حداکثر ۹۲ درصد داده است. در نمونه‌ی تقویت شده با استفاده از کامپوزیت‌های FRP با پیش تنیدگی ۲۰ درصد، بیشینه‌ی تنش در نسبت بار به بار حداکثر ۱۰۰ درصد اتفاق افتاده است.



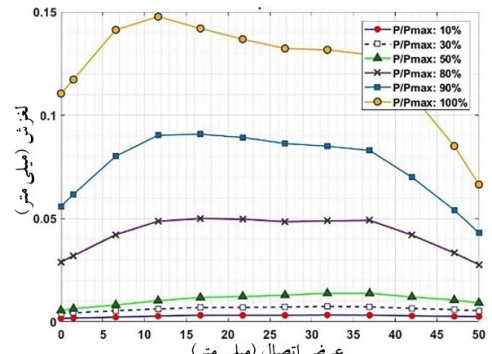
(ب)



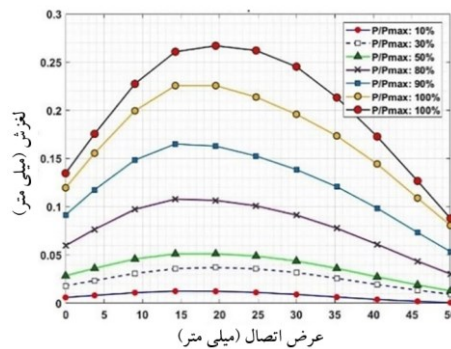
(الف)



(د)



(ج)

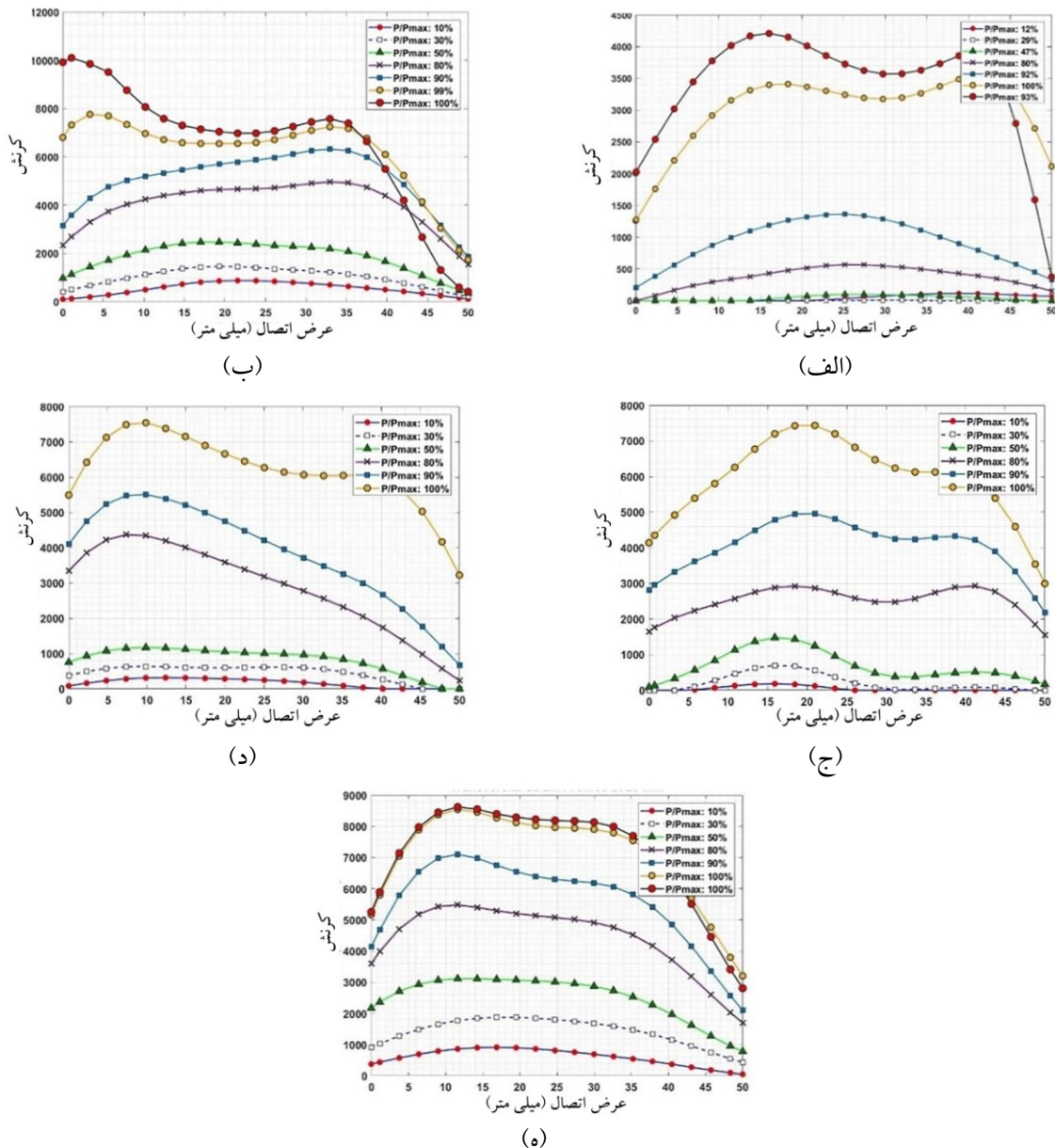


(ه)

شکل ۵- نمودارهای لغزش در عرض اتصال؛ (الف) EBR-0؛ (ب) EBR-20؛ (ج) GM-0؛ (د) GM-20؛ (ه) GM-30

هم‌چنین مشاهده می‌شود که در نمونه‌های تقویت شده با استفاده از کامپوزیت‌های FRP با ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد پیش تنیدگی به روش EBROG بیشینه‌ی تنش برشی به ترتیب در نسبت بار به بار حداکثر ۸۰، ۹۰ و ۱۰۰ درصد رخ داده است. با توجه به شکل ۵ مشاهده می‌شود مقدار حداکثر کرنش در نمونه‌ی شاهد حدود ۴۳۰۰ میکرو استرین می‌باشد. کرنش بیشینه در نمونه‌ی EBR-20

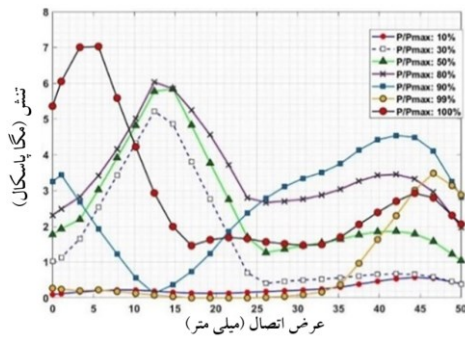
به حدود ۱۰۰۰۰ میکرو استرین رسیده است. که نسبت به نمونه‌ی شاهد ۱۳۳ درصد رشد یافته است. این در حالی است که کرنش بیشینه در نمونه‌های EBROG بدون پیش تنیدگی به ۷۵۰۰ میکرو استرین رسیده است. شایان ذکر است بیشینه کرنش برشی در نمونه‌ی EBROG با ۳۰ درصد پیش تنیدگی حدود ۸۷۰۰ میکرو استرین می‌باشد که نسبت به نمونه‌ی شاهد ۱۰۲ درصد افزایش یافته است.



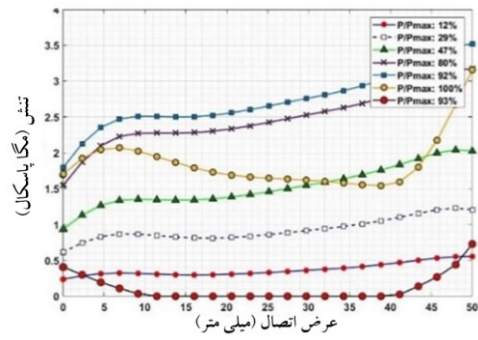
شکل ۶- نمودارهای کرنش در عرض اتصال؛ (الف) EBR-0؛ (ب) EBR-20؛ (ج) GM-0؛ (د) GM-20؛ (ه) GM-30

با توجه به موارد مذکور می‌توان گفت حداکثر درصد پیش تنیدگی قابل اعمال بر اتصال زمانی است که تنش بیشینه در اتصال در لحظه‌ی نسبت بار به بار حداکثر ۱۰۰ درصد اتفاق افتاده باشد. بنابراین نهایت پیش تنیدگی در اتصال EBR تحت شرایط موجود در این پژوهش برابر با ۲۰ درصد کرنش نهایی ورق FRP می‌باشد و این پارامتر در اتصال EBROG به ۳۰ درصد افزایش می‌یابد. با توجه به شکل ۷ مشاهده می‌شود که تنش برشی بیشینه در نمونه‌های پیش تنیده نسبت به نمونه‌های غیر پیش تنیده افزایش یافته است. به طور مثال، در نمونه‌ی شاهد حداکثر تنش برشی برابر ۳/۵ مگا پاسکال می‌باشد. با پیش تنیده کردن ورق FRP میزان تنش برشی حداکثر به ۷ مگا پاسکال رسیده است. بنابراین این افزایش در نمونه‌های EBROG حدود ۱۰۰ درصد بوده است. این در حالی است که در نمونه‌های EBROG تنش بیشینه به میزان ۱۲۸ درصد نسبت به نمونه‌ی شاهد افزایش یافته است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که تنش برشی نمونه‌ی EBROG-30 نسبت به نمونه‌ی EBROG-0 حدود ۶۰ درصد افزایش داشته است. لازم به ذکر است که در نمونه‌ی EBR-20، نمودارهای تنش در عرض اتصال روند بی‌نظمی را طی می‌کند. به طوری که تنش نامساوی در عرض اتصال رخ داده که علت آن را می‌توان در افت پیش تنیدگی ایجاد شده در اتصال EBR دانست. این در حالی است

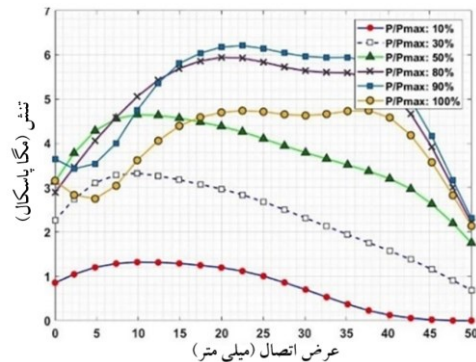
که اتصالات EBROG به علت سطح درگیری بیشترین FRP و بتن، انتقال تنش‌ها به اعماق بتن روند منظم به خود گرفته است.



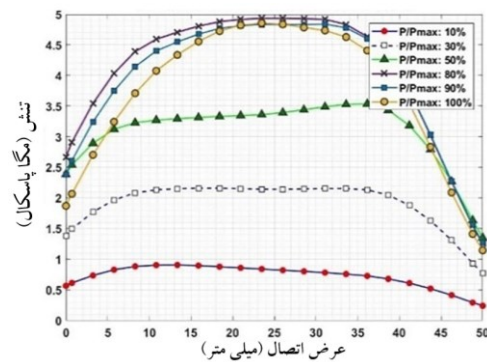
(ب)



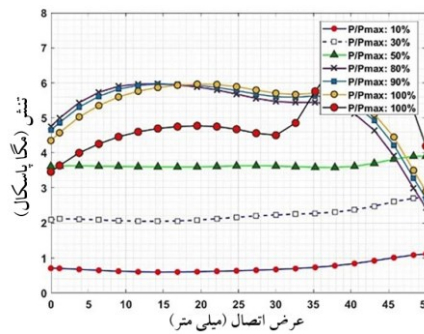
(ف)



(د)



(ج)



(ه)

شکل ۷- نمودارهای تنش در عرض اتصال؛ (الف) EBR-0؛ (ب) EBR-20؛ (ج) GM-0؛ (د) GM-20؛ (ه) GM-30

۴- خلاصه و نتیجه گیری

به نمونه‌ی EBR-0 حدود ۷۰ درصد افزایش یافته است. استفاده از اتصال پیش تنیده در نمونه‌های تقویت شده با استفاده از روش شیار زنی، مقاومت اتصال را به میزان چشم‌گیری افزایش می‌دهد. برای مثال مقاومت اتصال نمونه‌ی GM-30 تقریباً سه برابر مقاومت اتصال نسبت به نمونه‌ی شاهد می‌باشد. بیشینه‌ی لغزش با افزایش درصد پیش تنیدگی افزایش می‌یابد. به طور مثال بیشینه‌ی لغزش مربوط به نمونه‌ی GM-30 برابر با ۰/۲۷ میلی متر بود که نسبت به نمونه‌ی غیر پیش تنیده ۸۰ درصد افزایش داشته است.

در این پژوهش تاثیر استفاده از روش‌های شیار زنی در اتصال پیش تنیده‌ی FRP به بتن بررسی شد. به منظور آماده‌سازی سطحی نمونه‌ها از گروه شیار ۱۵@۵ میلی متر استفاده گردید. در ادامه با استفاده از پردازش تصویر، نمودارهای لغزش، کرنش و تنش در عرض اتصال مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از این پژوهش به شرح زیر است. پیش تنیدگی در اتصال EBR موجب افزایش مقاومت اتصال گردید. به طوری که مقاومت اتصال در نمونه‌ی EBR-20 نسبت

“Using NSM pre-stressed rebars for flexural strengthening of RC beams subjected to constant loading.” *Structures*, 43, pp. 1478-1491. 2022.

[8] Moshiri, N., Czaderski, C., Mostofinejad, D., Motavalli, M., “Bond resistance of prestressed CFRP strips attached to concrete by using EBR and EBROG strengthening methods”, *Construction and Building Materials*. 266, pp. 121209. 2021.

[9] Moshiri, N., Martinelli, E., Czaderski, C., Mostofinejad, D., Hosseini, A., Motavalli, M., “Bond Behavior of Prestressed CFRP Strips-to-Concrete Joints Using the EBROG Method: Experimental and Analytical Evaluation”, *Journal of Composites for Construction*. 27(1), pp. 04022104. 2023

[10] Mostofinejad, D., and Mahmoudabadi, E., “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. 2010.

[11] Mostofinejad, D., and Shameli, S. M., “Externally Bonded Reinforcement in Grooves (EBRIG) Technique to Postpone Debonding of FRP Sheets in Strengthened Concrete Beams”, *Construction and Building Materials*, 38, pp. 751-758. 2013.

[12] Saljoughian, A., and Mostofinejad, D., “RC Columns Longitudinally Strengthened via Novel EBRIOG Technique”, *Structural Concrete*, 21(12), pp. 570-586. 2020.

[13] Shabani, E., Mostofinejad, D., Saljoughian, A., “Bond behavior of prestressed FRP sheet-concrete joints: Comparison of EBROG and EBR methods”, *Construction and Building Materials*. 400 pp.132752. 2023.

[14] Moghaddas, A., Mostofinejad, D., and Ilia, E., “Empirical FRP-Concrete Effective Bond Length Model for Externally Bonded Reinforcement on the Grooves”, *Composites Part B: Engineering*, 172, pp. 323-328. 2019.

[15] Saljoughian, A. and Mostofinejad, D., “Using grooving and corner strip- batten techniques for seismic strengthening of square reinforced concrete columns with fiber-reinforced polymer composites.” *Structural Concrete*, 21(5), pp. 2066-2082. 2020.

[16] Saljoughian, A. and Mostofinejad, D., “Behavior of RC columns confined with CFRP using CSB method under cyclic axial compression” *Construction and Building Materials*, 235, p. 117786. 2020.

[17] Zolfaghari, S., Mostofinejad, D., Fantuzzi, N., Luciano, R. and Fabbrocino, F., “Experimental evaluation of FRP-concrete bond using externally-

- بررسی نمودارهای کرنش در عرض اتصال نشان داد که نمونه‌های غیر پیش تنیده نسبت به نمونه‌های پیش تنیده، رفتار شکل‌پذیرتری داشته‌اند.

- به علت تنش‌های نامساوی در عرض اتصال نمونه‌ی EBR پیش تنیده، نمودار تنش در عرض اتصال روند بی نظمی را به خود گرفت. این در حالی است که نمودار تنش در اتصالات EBROG، روندی منظمی را طی کرد؛ که علت آن مکانیزم انتقال تنش موثرتر در روش EBROG نسبت به EBR بود.

- با توجه به نتایج حاصل از این پژوهش پیشنهاد می‌شود که در تحقیقات آتی از تعداد لایه‌های بیش‌تر به منظور تقویت استفاده شود. هم‌چنین به منظور استفاده از تکنیک پیش تنیدگی در صنعت، پیشنهاد می‌شود که تیرهای بتن آرمه با FRP پیش تنیده به روش EBROG تقویت و آزمایش شوند.

۵- مراجع

[1] ACI Committee 440.2R-17 “Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures”, American Concrete Institute (ACI). 2017.

[2] El-Hacha, R., Wight, R. G., and Green, M. F., “Prestressed Fiber- Reinforced Polymer Laminates for Strengthening Structures”, *Progress in Structural Engineering and Materials*, 3(2), pp. 111-121. 2001.

[3] Kim, Y. J., Wight, R.G. and Green, M. F., “Flexural Strengthening of RC Beams with Prestressed CFRP Sheets: Development of Nonmetallic Anchor Systems”, *Journal of Composites for Construction*, 12(1), pp. 35-43. 2008.

[4] Saadatmanesh, H., and Ehsani, M. R., “RC Beams Strengthened with GFRP Plates. I: Experimental Study”, *Journal of Structural Engineering*, 117(11), pp. 3417-3433. 1991.

[5] Abdulhameed, S.S., Wu, E. and Ji, B., “Mechanical prestressing system for strengthening reinforced concrete members with prestressed carbon-fiber-reinforced polymer sheets.” *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 29(3), p.04014081. 2015.

[6] Peng, H., Zhang, J., Shang, S., Liu, Y. and Cai, C.S., “Experimental study of flexural fatigue performance of reinforced concrete beams strengthened with prestressed CFRP plates.” *Engineering structures*, 127, pp. 62-72. 2016.

[7] Mansouri, S., Morshed, R. and Mostofinejad, D.,

bonded reinforcement on grooves (EBROG) method.” Composite Structures, 310, p.116693. 2023.

[18] Zolfaghari, S., Mostofinejad, D., Fantuzzi, N., Fabbrocino, F. and Luciano, R., “Fracture prevention and repair via FRP-to-concrete joint using externally-bonded reinforcement on grooves (EBROG) technique.” Procedia Structural Integrity, 47, pp.398-407. 2023.

[19] Ghahsareh, F. M., Mostofinejad, D., Groove Classification in EBROG FRP-to-Concrete Joints, Construction and Building Materials. 275 (2021) 122169.

[20] ACI 211.1-91, “Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight and Mass Concrete (Reapproved 2009)”, American Concrete Institute, Farming Hills, MI, USA, 2009.

[21] <http://www.sika.com>.

[22] <http://www.quantomEPR3301.co.uk>.

Investigation of prestressed FRP joint via Grooving Method

E. Shabani

PhD student, Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology (IUT), Isfahan, Iran.

A. Saljoughian

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

D. Mostofinejad *

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

Abstract

In the strengthening of RC structures with fiber-reinforced polymer (FRP) sheets, it is crucial to prevent the premature debonding of the FRP composites from the concrete surface. One effective method for delaying debonding and enhancing material usage is the use of pre-stressed FRP composites. This technique provides several benefits, such as increasing the overall capacity of the structure, enhancing cracking capacity, reducing strain in the longitudinal rebars, and etc. Recent research has demonstrated that grooving methods can effectively delay the debonding. Consequently, this study investigates the bond behavior between concrete and prestressed FRP sheets strengthened using grooving methods. The results from the lap shear- prestressed test revealed a substantial increase in performance when using the 5@15 groove class with 20% and 30% prestressing. In comparison to the reference specimen, there was an increase of 146% and 195%, respectively. This indicates that the utilization of prestressed FRP with grooving methods can significantly enhance bond capacity.

Keywords: Lap shear -prestressed test; prestressed FRP composites; bond behavior; externally bonded reinforcement method; externally bonded reinforcement on grooves method.

* Corresponding Author: dmostofi@iut.ac.ir