

آزمایش برش مستقیم-اتصال پیش تنیده جهت ارزیابی رفتار اتصال FRP پیش تنیده به بتن

عرفان شبانی^{*۱}، داود مستوفی نژاد^۲، علیرضا سلجوقیان^{*۳}

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲- استاد، دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

۳- استادیار، دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

پست الکترونیکی نویسندگان:

erfan.shabani@cv.iut.ac.ir -۱

dmostofi@iut.ac.ir -۲

a.saljoughian@iut.ac.ir -۳

چکیده:

متداول‌ترین مود گسیختگی در اتصال کامپوزیت FRP به بتن، جدا شدگی ورق تقویتی از سطح بتن است که کارایی این کامپوزیت را گاهی تا ۱۰ درصد ظرفیت کل کاهش می‌دهد. بنابراین محققین به دنبال راه کاری در راستای استفاده‌ی بهینه از این مصالح، به پیش تنیده کردن و تقویت با FRP پیش تنیده روی آورده‌اند. بنابر اهمیت این موضوع، تحقیق حاضر به مطالعه و آزمایش در این زمینه اختصاص یافته است. بدین منظور ۱۰ آزمایش بر روی نمونه‌های منشوری به ابعاد ۱۵۰×۱۵۰×۳۵۰ میلی متر انجام شد. جهت آماده سازی سطحی نمونه‌ها از روش نصب خارجی و نصب خارجی بر روی شیار استفاده گردید. هم‌چنین نمونه‌ها در سطوح مختلف ۰، ۲۰ و ۳۰ درصد کرنش نهایی ورق FRP پیش تنیده شدند. نتایج حاکی از آن بود که پیش تنیدگی کامپوزیت FRP و نصب با استفاده از روش نصب خارجی (EBR)، ظرفیت اتصال را تا ۷۰ درصد نسبت به نمونه‌ی بدون پیش تنیدگی افزایش می‌دهد. هم‌چنین استفاده از روش نصب خارجی روی شیار، EBROG، توانست به طور چشم گیری ظرفیت اتصال را تا ۱۲۳ درصد نسبت به نمونه‌ی تقویت شده با روش EBR در حالت بدون پیش تنیدگی بهبود بخشد.

واژگان کلیدی:

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

* علیرضا سلجوقیان، استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان.

ایمیل: a.saljoughian@iut.ac.ir (نویسنده‌ی مسئول مقاله)

* عرفان شبانی، دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان.

ایمیل: erfan.shabani@cv.iut.ac.ir (نویسنده‌ی مسئول مقاله)

Lap shear-prestressed bond test to evaluate prestressed FRP concrete joint

E. Shabani ^{۱*}, D. Mostofinejad ^۲, A. Saljoughian ^{۳*}

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

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

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

Abstract:

The use of FRP composites as an effective method for strengthening reinforced concrete structures has been a subject of research due to its numerous benefits. A common failure mode in the application of these composites is the debonding of the FRP sheet from the concrete surface, which can sometimes reduce the capacity of these composites to as low as ۱۰% of their total capacity. As a result, researchers have begun to prestress the FRP sheets and strengthen them with prestressed FRP to optimize the efficiency of these materials. A crucial aspect in the strengthening of a reinforced concrete member with an FRP sheet is the examination of the connection behavior between the FRP sheet and concrete. The significance of this issue has led to dedicated research and experimentation in this field. In this study, a prestress-lab shear test was employed for the first time to investigate the bond behavior of prestressed FRP composites-to-concrete joints. Additionally, the particle image velocimetry (PIV) method was used for result analysis. To verify the effectiveness of this method, eight tests were conducted on prism specimens measuring ۱۵۰×۱۵۰×۳۵۰ mm. The strengthening methods of the specimens involved the use of the external bonded reinforcement (EBR) and external bonded reinforcement on grooves (EBROG) methods. Furthermore, the specimens were prestressed at different levels, including ۰%, ۲۰%, and ۳۰% of the ultimate strain of FRP composites. This study examined the specimens in terms of bond strength capacity, failure mode, and stress and strain distribution on the joint surface. The results showed that prestressing increased the bond strength by ۷۰% in the EBR method. Moreover, the bond strength of EBROG specimen with ۲۰% prestressing increased by ۱۲۳% compared to the control specimen. These findings indicate that prestressing using the EBROG method is a viable technique for enhancing the performance of FRP-to-concrete joints.

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

۱ - مقدمه و تاریخچه تحقیقات

استفاده از کامپوزیت‌های FRP برای تقویت سازه‌های بتنی که ضعیف یا آسیب دیده‌اند یک روش پذیرفته شده در سراسر جهان است. اگرچه استفاده از FRP ممکن است در ابتدا گران به نظر برسد، اما می‌تواند در دراز مدت مقرون به صرفه باشد، زیرا به عملیات اجرایی و نگهداری کم‌تری نیاز دارد [۱].

کامپوزیت FRP فواید زیادی دارد، اما استفاده از آن با یک چالش عمده همراه می‌باشد. این چالش، جدا شدگی زود هنگام کامپوزیت FRP از سطح بتن است. جدا شدن سیستم تقویت در مقدار کرنش به مراتب کم‌تر از کرنش پارگی FRP مانع از استفاده حداکثری از ویژگی‌های منحصر به فرد این کامپوزیت جهت بهبود عملکرد عضو تقویت شده می‌شود که باعث اتلاف مصالح و افزایش هزینه‌های مقاوم سازی می‌گردد.

برای غلبه بر این مشکل، محققان روش‌های عملی و کارآمد مختلفی را برای به تاخیر انداختن جدا شدگی ورق‌های FRP از سطح بتن پیشنهاد کرده‌اند. یکی از این روش‌ها استفاده از ورق‌های FRP پیش تنیده است که می‌تواند عملکرد کامپوزیت FRP را بهبود دهد [۲-۳].

به دلیل ضعف بتن در کشش، تیرهای بتنی تحت اثر لنگر خمشی در ناحیه‌ی کششی دچار ترک خوردگی می‌شوند. بتن فقط می‌تواند حدود ۸-۱۴ درصد نیروی فشاری را در کشش تحمل کند. برای جلوگیری یا کاهش این ترک‌ها و کمبودهای ناشی از آن می‌توان با اعمال نیروی پیش تنیدگی حاصل از FRP پیش تنیده به سطح کششی تیر، کشش ناشی از بارگذاری خارجی را کاهش داده و یا به طور کامل خنثی نمود [۴].

تاثیر استفاده از کامپوزیت پیش تنیده FRP بر مقاومت اتصال نمونه‌های تقویت شده در سال‌های اخیر مورد بررسی قرار گرفته است [۵-۶]. آزمایش‌ها رها سازی نیروی پیش تنیدگی از جمله آزمایش‌های انجام شده در زمینه بررسی عملکرد مقاومت اتصال بوده است. در این آزمایش، نیروی پیش تنیدگی مقداری بزرگ در نظر گرفته می‌شود تا پس از رها سازی نیروی پیش تنیدگی از یک طرف، سطح اتصال گسیخته شود [۷-۸].

در مطالعه‌ی رفتار تیرهای بتن مسلح تقویت شده با استفاده از ورق‌های FRP پیش تنیده بررسی شد. در این تحقیق، تیرهای

مورد بررسی به سه دسته‌ی تیرهای دارای مهار مکانیکی انتهایی، تیرهای دارای مهار FRP انتهایی و تیرهای بدون مهار انتهایی تقسیم شدند. نیروی پیش تنیدگی ورق‌های FRP در این تیرها از ۲۵٪ تا ۵۰٪ مقاومت نهایی کامپوزیت تغییر داده شد. در این پژوهش، حالت‌های مختلف شکست، مانند گسیختگی FRP و جدا شدن آن از سطح بتن مشاهده گردید. نتایج نشان داد که مهار انتهایی می‌تواند به استحصال کامل ظرفیت FRP کمک کند [۹].

در تحقیق دیگری، تأثیر ورق CFRP پیش تنیده بر مقاوم سازی پنج تیر بتن مسلح به ابعاد $100 \times 150 \times 2200$ میلی متر مورد بررسی قرار گرفت. آن‌ها مشاهده کردند که بار ترک خوردگی، سختی خمشی و مقاومت تیر تقویت شده با FRP پیش تنیده افزایش یافته است. آن‌ها همچنین گزارش دادند که کرنش و تنش در لحظه‌ی گسیختگی نهایی تیر کاهش می‌یابد [۱۰].

در پژوهشی دیگر، مقاوم سازی ۱۵ تیر بتن مسلح به طول ۴ متر با استفاده از میلگردهای FRP پیش تنیده به روش NSM مورد بررسی قرار گرفت. نوع FRP و درصد پیش تنیدگی در این مطالعه متفاوت بودند. یافته‌ها نشان داد که بار ترک خوردگی با افزایش نیروی پیش تنیدگی به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. علاوه بر این، همه‌ی نمونه‌ها گسیختگی میلگرد FRP را نشان دادند [۱۱]. برخی از محققان از روش NSM برای تقویت تیرهای بتن مسلح با میلگردهای FRP استفاده کردند. نیروی پیش تنیدگی ایجاد شده در میلگردهای FRP در این پژوهش بین ۲۰ تا ۶۰ درصد مقاومت نهایی FRP بود. ایشان دریافتند که استحکام نهایی تیر با افزایش نیروی پیش تنیدگی افزایش می‌یابد. آن‌ها همچنین خاطر نشان کردند که شکل پذیری تیر تقویت شده با افزایش درصد پیش تنیدگی میلگردهای FRP کاهش می‌یابد [۱۲].

محققین از مهارهای غیر فلزی به جای مهارهای فولادی برای ارزیابی توانایی FRP پیش تنیده برای تقویت تیرها استفاده کردند. ایشان روشی را برای جای‌گزینی مهارهای فلزی پیشنهاد و آزمایش کردند. برای این منظور، ۹ تیر بتن مسلح را با انواع سیستم‌های مهار غیر فلزی مورد آزمایش قرار گرفتند. در پایان، ایشان به پیش تنیدگی پایدار در ورق‌های CFRP با تلفات پیش تنیدگی ناچیز با استفاده از مهارهای غیر فلزی توسعه یافته در این تحقیق دست یافتند [۱۳].

حاجی هاشمی و هم‌کاران [۱۴] از روش NSM برای تقویت تیرهای بتن آرمه توسط میلگرد FRP پیش‌تنیده استفاده کردند. ایشان سطوح مختلف پیش‌تنیدگی را از ۵٪ تا ۳۰٪ مقاومت نهایی میلگرد FRP اعمال کردند. ایشان گزارش دادند که استفاده از میلگرد FRP پیش‌تنیده، ظرفیت باربری نهایی تیرها را تا ۱۵٪ افزایش می‌دهد. علاوه بر این، مشاهدات آزمایشگاهی نشان داد که در نمونه‌های پیش‌تنیده عرض ترک بین ۲۲ تا ۵۲ درصد کاهش می‌یابد.

در تحقیقات پیشین آزمایش‌ها سازی نیروی پیش‌تنیدگی برای بررسی اثرات پیش‌تنیدگی در سطح بتن انجام شده است. نتایج نشان داد که با آزاد شدن نیروی پیش‌تنیدگی، تغییر شکل‌های بزرگی در خارج از صفحه‌ی اتصال ایجاد می‌شود. هم‌چنین ترک‌های مورب عمیق در عمق بتن مشاهده گردید [۱۵]. ابداع روش‌های شیار زنی توسط برخی از محققان دانشگاه صنعتی اصفهان از جمله تحقیقاتی بود که در زمینه‌ی تاخیر در پدیده‌ی جدا سازی انجام شد [۱۶-۱۸]. از جمله روش‌های شیار زنی می‌توان به روش نصب روی شیار (EBROG) [۱۶]، نصب داخل شیار (EBRIG) [۱۷] و نصب در داخل و روی شیار (EBRIOG) [۱۸] اشاره نمود.

روش نصب روی شیار شامل ایجاد شیارهای طولی در سطح مورد نظر، حذف گرد و غبار از سطح بتن، پر کردن شیارها با استفاده از رزین اپوکسی و چسباندن کامپوزیت‌های FRP روی سطح بتن می‌باشد [۱۶].

در مطالعات اخیر تاثیر روش‌های شیار زنی در المان‌های سازه‌ای بتنی مورد بررسی قرار گرفته است [۱۹]. محققین دانشگاه صنعتی اصفهان نشان داده‌اند که استفاده از روش نصب خارجی بر روی شیار تاثیر چشم‌گیری بر عملکرد عضو تقویت شده دارد. تحقیقات نشان داد روش EBROG با انتقال تنش‌های برشی به لایه‌های زیرین سطوح بتن باعث افزایش مقاومت می‌شود [۲۱-۱۹]. بنا بر آن چه گفته شد، استفاده از FRP پیش‌تنیده در مقاوم سازی اجزای سازه‌ای موجب استفاده‌ی موثرتر و کاراتر از مصالح FRP می‌گردد. به کارگیری این مهم در عمل مستلزم شناخت کامل رفتار اتصال FRP پیش‌تنیده به بتن می‌باشد. با توجه به تحقیقات انجام شده در این زمینه، نیاز به مطالعات بیش‌تر جهت

نمایان شدن تمامی ابعاد این مسئله احساس می‌شود. لذا در این تحقیق سعی شد تا با ارائه‌ی آزمایش برش مستقیم-اتصال پیش‌تنیده زمینه‌ی شناخت هرچه بهتر رفتار اتصال FRP پیش‌تنیده به بتن مهیا گردد.

۲- برنامه‌های آزمایشگاهی

لازمه‌ی انجام یک تحقیق، شناخت کافی از مصالح مصرفی، جزئیات نمونه‌ها، دستگاه آزمایش و هم‌چنین برنامه ریزی دقیق برای انجام آزمایش‌ها است. بنابراین در این بخش کلیه‌ی اطلاعات مرتبط با انجام آزمایش‌ها توضیح داده می‌شود.

۲-۱- مشخصات نمونه‌ها

برای بررسی رفتار اتصال FRP پیش‌تنیده با بتن، منشورهای بتنی با ابعاد $150 \times 150 \times 350$ میلی‌متر تهیه شدند. در این تحقیق از آزمایش برش مستقیم به عنوان آزمایشی متداول برای بررسی عملکرد اتصال ورق FRP به بتن استفاده شد. این آزمایش طبق استاندارد ASTM D5868 [۲۶] انجام گرفت. آزمایش بر روی سه طرف از منشور انجام شد، در حالی که ضلع چهارم به دلیل سطح نامنظم آن کنار گذاشته شد. همراه با هر منشور، نمونه‌های استوانه‌ای به ارتفاع ۲۰۰ میلی‌متر و قطر ۱۰۰ میلی‌متر، طبق استاندارد ASTM C39 [۲۷]، به منظور اندازه‌گیری مقاومت فشاری بتن ساخته شد. این نمونه‌ها به مدت ۲۸ روز در آب عمل‌آوری شدند. به منظور اندازه‌گیری مقاومت فشاری ۲۸ روزه‌ی بتن، سه نمونه‌ی استوانه‌ای آزمایش شدند. این در حالی است که مقاومت فشاری سه نمونه‌ی دیگر در روز انجام آزمایش برش مستقیم اندازه‌گیری شد.

۲-۲- مشخصات مصالح مصرفی در ساخت و تقویت نمونه‌ها

طرح اختلاط بتن برای نمونه‌ها بر اساس آیین‌نامه ACI 221 [۲۳] برای دست‌یابی به مقاومت فشاری ۳۰ مگا پاسکال در ۲۸ روز تنظیم گردید. حداکثر اندازه‌ی سنگ دانه‌ی مورد استفاده در این بتن، $12/5$ میلی‌متر بود. در این پژوهش از سیمان نوع ۲ محصول کارخانه اردستان استفاده گردید. نسبت وزن هر ماده در هر متر مکعب بتن در جدول ۱ نشان داده شده است. الیاف مورد استفاده در این پژوهش از نوع کربن با نام تجاری SikaWrap 300C می‌باشد. هم‌چنین به منظور اشباع کردن الیاف کربن از رزین اپوکسی شرکت کوانتوم ایران

در این تحقیق به منظور بررسی رفتار اتصال ورق FRP پیش تنیده به بتن، ۱۰ آزمایش برش مستقیم روی نمونه‌های منشور بتنی انجام گرفت. در این آزمایش‌ها، نمونه‌ها بر حسب درصد‌های مختلف پیش تنیدگی و روش نصب FRP روی سطح بتنی نام گذاری شدند. در تمامی نمونه‌ها از ورق FRP با عرض ۵۰ میلی متر استفاده شد. هم‌چنین طول اتصال در همه‌ی نمونه‌ها برابر ۲۰۰ میلی متر انتخاب شد. نام گذاری و مشخصات نمونه‌های مورد بررسی در این پژوهش در جدول ۳ ارائه شده است.

با نام تجاری ۳۳۰۱ Quantom-EPR استفاده شد. این رزین دارای دو جزء سفید و خاکستری می‌باشد که بایستی به نسبت ۳ به ۱ با یکدیگر مخلوط شوند. طبق کاتالوگ سازنده، زمان عمل آوری رزین بین ۵ تا ۷ روز در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد می‌باشد. مشخصات مکانیکی الیاف کربن و رزین مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۲ ارائه شده است [۲۳ و ۲۴].

۳-۲- طبقه بندی و نام گذاری نمونه‌ها

جدول ۱: وزن مصالح مصرفی برای ساخت یک متر مکعب بتن

وزن به ازای یک متر مکعب بتن (kg/m ³)	نوع مصالح
۳۱۰	سیمان
۸۸۰	شن (۵-۱۲/۵)
۹۰۴	ماسه (۰-۵)
۲۱۶	آب

جدول ۲: مشخصات مکانیکی الیاف و رزین مورد استفاده در این پژوهش [۲۳ و ۲۴].

نام تجاری	ضخامت (mm)	مقاومت کششی (MPa)	مدول الاستیسیته (MPa)	کرنش نهایی ورق (%)
SikaWrap ۳۰۰-C	۰/۱۷۱	۳۸۰۰	۲۴۲۰۰۰	۱/۵۵
Quantom-EPR ۳۳۰۱	-	۳۰	۴۵۰۰	۱/۵۰

جدول ۳: مشخصات نمونه‌های اتصال FRP به بتن

ردیف	نام نمونه	روش نصب FRP	درصد پیش تنیدگی (%)	شماره تکرار
۱	SC-۱	EBR	۰	۱
۲	SC-۲	EBR	۰	۲
۳	S۲۰-۱	EBR	۲۰	۱
۴	S۲۰-۲	EBR	۲۰	۲
۵	S۳۰-۱	EBR	۳۰	۱
۶	S۳۰-۲	EBR	۳۰	۲
۷	SG-۱	EBROG	۰	۱
۸	SG-۲	EBROG	۰	۲
۹	SG۲۰-۱	EBROG	۲۰	۱
۱۰	SG۲۰-۲	EBROG	۲۰	۲

۴-۲- آماده سازی نمونه‌ها

نمونه‌ها قبل از فرآیند تقویت به صورت سطحی آماده شدند. به منظور آماده سازی نمونه‌ها با روش EBR، از دستگاه فرز مجهز به صفحه سایش بتن برای حذف لایه‌ی نازک از سطح بتن استفاده گردید. سپس سطح توسط کمپرسور هوای فشرده از هرگونه گرد و غبار پاک سازی شده و در پایان FRP بر روی سطح بتنی چسبانده شد.

در این تحقیق دو نمونه با استفاده از روش EBROG تقویت شدند. در این روش، پس از ایجاد شیارهایی با ابعاد 10×10 میلی متر و طول ۲۰ میلی متر روی نمونه، سطوح با استفاده از کمپرسور هوای فشرده عاری از هرگونه گرد و غبار گردید. سپس داخل شیار با رزین پر شد و ورق FRP روی سطح اتصال و شیار چسبانده شد.

به منظور تقویت نمونه‌های پیش تنیده، با توجه به دهانه‌ی آزاد دستگاه، الیاف کربن به طول ۲۶۰۰ میلی متر برش داده شد (شکل ۱). ورق‌های فلزی به ابعاد 60×60 میلی متر به انتهای الیاف کربن متصل شدند تا آن‌ها را در فک دستگاه پیش تنیده قرار دهند. ورق‌های فلزی پس از خشک شدن چسب وارد فک شده و پیچ‌های فکی با آچار گشتاور سفت شدند. نمونه‌ها همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، با فاصله‌ی مشخصی مرتب شدند.



شکل ۲- چیدمان نمونه‌ها در دستگاه پیش تنیدگی

در ادامه یک لایه‌ی نازک چسب روی طول اتصال بتن قرار گرفت سپس سرتاسر طول FRP به رزین آغشته گردید. در همان زمان کامپوزیت FRP روی سطح بتن تنظیم شد. ۳۵ میلی متر اول از هر نمونه‌ی بتنی با پلاستیک مخصوص پوشانده شد تا در این طول بین FRP و سطح بتن اتصالی نباشد تا از تمرکز تنش در حین بارگذاری جلوگیری شود. بعد از انجام تنظیمات اولیه، با استفاده از جک هیدرولیکی نیروی جک دستگاه به ورق FRP اعمال گردید تا پیش تنیده گردد. میزان نیروی اعمال شده توسط جک دستگاه به ورق FRP توسط نیرو سنج کنترل گردید. پس از رسیدن نیرو به میزان پیش تنیدگی مورد نظر، انتهای میله‌ی متصل به فک توسط مهره ثابت شد تا از اتلاف نیروی پیش تنیدگی جلوگیری گردد. سپس نمونه‌ها در شرایط آزمایشگاهی نگه داری شدند تا گیرش چسب کامل شود. به منظور درک بهتر، قسمت‌های مختلف دستگاه در شکل ۲ نمایش داده شده است. پس از ۷ روز از چسباندن ورق FRP به بتن نیروی جک آزاد شد. ورق FRP در نقاط از پیش تعیین شده بریده شد (شکل ۳) تا نمونه‌ها از یکدیگر جدا شوند. سپس انتهای آزاد کامپوزیت FRP به ورق‌های فلزی با ابعاد 100×100 میلی متر متصل شد تا آن‌ها را در فک دستگاه برش مستقیم قرار دهد.



شکل ۱- دستگاه پیش تنیدگی به همراه FRP بریده شده

۲-۵- دستگاه آزمایش و تجهیزات

در بستر پیش تنیدگی انتقال نیرو از طریق جک هیدرولیکی به فک سمت چپ (نشان داده شده در شکل ۲) و سپس از فک به ورق FRP انجام می‌شود. برای اندازه گیری و اعمال نیروی پیش تنیدگی اولیه از نیرو سنج با ظرفیت ۷۰ کیلو نیوتن استفاده گردید. همان طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، نیرو سنج مذکور به صورت سری بین تکیه گاه و فک دستگاه قرار گرفت.

نمونه‌ها پس از آماده سازی و تقویت، برای آزمایش به دستگاه برش مستقیم منتقل شدند. ابتدا ورق‌های انتهایی نمونه داخل فک دستگاه قرار داده شد و سپس نمونه به طور کامل بین تکیه گاه‌ها قرار گرفت. نمونه‌ها با سرعت ۲ میلی متر در دقیقه تا زمان شکست بارگذاری شدند. برای تعیین میدان جابه‌جایی روی سطح باند با استفاده از روش PIV، عکس‌هایی از سطح نمونه در فواصل زمانی مشخص گرفته شد. در این روش، ابتدا سطح نمونه با سه لایه رنگ سفید پوشانده می‌شود. سپس رنگ‌های مشکی، آبی، سبز و قرمز به صورت تصادفی روی سطح پاشیده می‌گردد. از یک دوربین دیجیتال برای گرفتن عکس از سطح اتصال از شروع آزمایش تا لحظه‌ی شکست نهایی نمونه استفاده می‌شود. عکس‌ها توسط نرم افزار MATLAB برای عملیات PIV پردازش می‌شوند. همان طور که در شکل ۴ نشان داده شده است، این نرم افزار هر عکس را به شبکه‌هایی با ابعاد 128×128 پیکسل با فاصله‌ی مرکز تا مرکز 64 پیکسل تقسیم می‌کند. برای تبدیل واحد پیکسل به واحد میلی متر، تعداد پیکسل در هر 10 میلی متر اندازه گیری شده و در بردار ضرب می‌شود. سپس لغزش، کرنش و تنش در اتصال با استفاده از بردارهای تغییر مکان محاسبه می‌شوند. در بخش‌های بعدی نحوه‌ی محاسبه‌ی این پارامترها و ارائه‌ی نمودارهای مربوطه توضیح داده می‌شود.

۳- نتایج آزمایشگاهی و بحث روی آن‌ها

۳-۱- مقاومت اتصال و حالت گسیختگی

مقاومت اتصال نمونه‌ها توسط دستگاه آزمایش برش مستقیم اندازه گیری شد. لازم به ذکر است در آزمایش برش مستقیم، مقاومت اتصال بین ورق تقویتی و سطح بتن مورد بررسی قرار می‌گیرد. همان طور که قبلاً بیان شد، اگر سطح آماده سازی شده

قابلیت انتقال تنش از ورق FRP به بتن را نداشته باشد، کارایی ورق FRP می‌تواند به ۱۰ درصد مقاومت کششی نهایی FRP محدود گردد. بنابراین انتخاب روش آماده سازی مناسب می‌تواند ظرفیت اتصال را تا چندین برابر افزایش دهد.

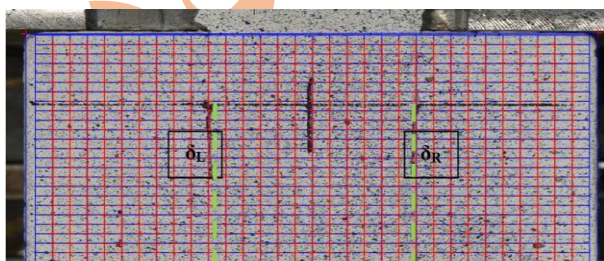


(الف)



(ب)

شکل ۳- (الف) جدا سازی نمونه‌های پیش تنیده در دستگاه پیش تنیده؛ (ب) آماده سازی نمونه‌ها جهت انجام آزمایش برش یک طرفه



شکل ۴- شبکه بندی نمونه‌ی بتنی همراه با مشخص کردن سطح اتصال

جدا شدگی و در نهایت افزایش مقاومت اتصال گردید. حالت شکست هر دو نمونه به صورت جدا شدگی ورق FRP از سطح بتن با عمق ۲ میلی متر بود. نحوه‌ی گسیختگی این نمونه‌ها در شکل ۶ نشان داده شده است.



(ب) (الف)

شکل ۶- نحوه‌ی گسیختگی نمونه‌های: (الف) S۲۰-۱؛ (ب) S۲۰-۲

نمونه‌ی S۳۰-۱ دارای ظرفیت اتصال ۱۳/۲۸ کیلو نیوتن بود. نمونه‌ی S۳۰-۲، تکراری از نمونه‌ی ۳۰ درصد پیش تنیده با روش EBR بود که ظرفیت اتصال آن ۱۴/۲ کیلو نیوتن اندازه‌گیری شد. میانگین ظرفیت اتصال آن‌ها ۱۳/۷ کیلو نیوتن محاسبه شد. نتایج نشان داد که نمونه‌های EBR با پیش تنیدگی ۳۰ درصد نسبت به نمونه‌ی شاهد ۶۸ درصد افزایش ظرفیت داشتند. با این حال، ظرفیت اتصال آن‌ها تقریباً مشابه نمونه‌های EBR با پیش تنیدگی ۲۰ درصد بود. در واقع اتصال EBR قادر نبوده نیروی ناشی از پیش تنیدگی ۳۰ درصد را منتقل کند. بنابراین، هر دو نمونه در ابتدا و انتهای اتصال، زمانی که نیروی پیش تنیدگی آزاد شد، شکست‌های موضعی داشتند (شکل ۷). در نهایت، سطح اتصال نتوانست در برابر نیروی مورد انتظار مقاومت کند و در نیرویی مشابه نمونه‌های با پیش تنیدگی ۲۰ درصد گسیخته شد.

همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، نحوه‌ی گسیختگی این نمونه‌ها جدا شدگی ورق تقویتی همراه با لایه‌ای از سطح بتن بود. طبق نتایج به دست آمده، عمق گسیختگی این نمونه‌ها تا ۶ میلی متر مشاهده شد.

برای بررسی و مقایسه رفتار اتصالات پیش تنیده و غیر پیش تنیده - FRP به بتن، ظرفیت بارگذاری و حالت شکست نمونه‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. مود شکست در بین نمونه‌ها به صورت جدا شدگی FRP به همراه لایه‌ی نازک بتن می‌باشد. نتایج آزمایش برش مستقیم در جدول ۴ نشان داده شده است. نمونه‌ی SC-۱، به عنوان نمونه‌ی شاهد، دارای ظرفیت اتصال ۸/۳۳ کیلو نیوتن بود. نمونه‌ی SC-۲ به عنوان تکرار نمونه‌ی اول انجام شد تا صحت نتایج را تأیید کند. ظرفیت اتصال تکرار دوم ۸/۰۲ کیلو نیوتن اندازه‌گیری شد که کمتر از ۵ درصد با نمونه اول تفاوت داشت. بنابراین، میانگین ظرفیت اتصال نمونه‌های تقویت شده با روش EBR، برابر با ۸/۲ کیلو نیوتن می‌باشد. حالت شکست این دو نمونه، جدا شدگی زود هنگام ورق FRP همراه با یک لایه نازک از بتن می‌باشد. شکست این دو نمونه در شکل ۵ نشان داده شده است.



(ب) (الف)

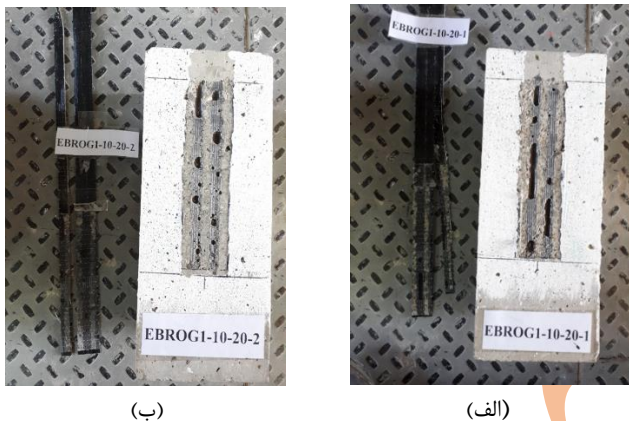
شکل ۵- نحوه‌ی گسیختگی نمونه‌های: (الف) CS-۱؛ (ب) CS-۲

ظرفیت اتصال نمونه‌ی S۲۰-۱ با یک لایه FRP ۲۰ درصد پیش تنیده، ۱۳/۸۴ کیلو نیوتن ثبت گردید. تکرار نمونه‌ی ۲۰ درصد پیش تنیده با روش EBR، دارای ظرفیت اتصال ۱۳/۹۳ کیلو نیوتن بود که کم‌تر از یک درصد با تکرار اول تفاوت داشت. میانگین ظرفیت اتصال این دو نمونه ۱۳/۹ کیلو نیوتن بود؛ که بهبود قابل توجهی (۰.۷۰٪) در مقایسه با نمونه‌ی شاهد داشت. دلیل این افزایش ظرفیت استفاده از ورق FRP پیش تنیده برای مقاوم سازی نمونه‌ی بتنی بود. پیش تنیدگی باعث ایجاد تنش‌های فشاری بر روی سطح بتن برابر با نیروی پیش تنیدگی ناشی از کامپوزیت FRP شد. این امر باعث افزایش مقاومت در برابر ترک خوردگی سطح بتن، به تاخیر انداختن پدیده‌ی

تقویت شده با روش شیار زنی را می‌توان دلیل این افزایش ظرفیت پنداشت. به عبارتی روش‌های شیار زنی با انتقال تنش به اعماق بتن موجب افزایش ظرفیت اتصال نسبت به نمونه‌ی EBR متناظر می‌شود؛ در نتیجه نیروی پیش‌تنیدگی ایجاد شده در نمونه‌ها تاثیر بیش‌تری در افزایش ظرفیت اتصال این نمونه‌ها داشته است. هم‌چنین حالت گسیختگی این نمونه‌ها، جدا شدگی ورق FRP از سطح بتن می‌باشد. در شکل ۸ تصویر گسیختگی این نمونه‌ها را می‌توان مشاهده نمود.



شکل ۷- نحوه‌ی گسیختگی نمونه‌های؛ (الف) S30-1؛ (ب) S30-2



شکل ۸- نحوه‌ی گسیختگی نمونه‌های؛ (الف) SG20-1؛ (ب) SG20-2

۳-۲- نمودارهای لغزش در عرض اتصال

محققین رابطه‌های (۱) و (۲) را جهت به دست آوردن لغزش در اتصال را ارائه کردند [۲۵].

$$S = \delta_{FRP} - \delta_{Concrete} \quad (1)$$

$$\delta_{Concrete} = \delta_L + \frac{\delta_R - \delta_L}{L} \times R \quad (2)$$

لغزش با تفاوت بین تغییر مکان مرکز ورق FRP و تغییر مکان بتن محاسبه می‌شود. تغییر مکان‌های بتن با استفاده از پارامترهای δ_L برای تغییر مکان لبه‌ی سمت راست، L فاصله‌ی بین المان‌های چپ و راست و R فاصله‌ی مرکز ورق FRP تا المان چپ، به دست می‌آید (شکل ۴). سطوح بار انتخاب شده به صورت درصدی از حداکثر باری که اتصال می‌تواند در برابر آن مقاومت کند، بیان می‌شود. فقط نمودارهای اولین نمونه

نمونه‌ی SG توانست باری معادل ۱۳/۵ کیلو نیوتن را تحمل کند. مشاهده می‌شود که ظرفیت اتصال دو نمونه‌ی SG و S20 تقریباً یکسان است. این بدان معناست که افزایش ظرفیت با استفاده از روش شیار زنی معادل این است که در روش EBR ورق FRP به میزان ۲۰ درصد پیش‌تنیده شود. از آن جایی که هزینه‌های پیش‌تنیدگی بالاست، در این سطح از افزایش ظرفیت استفاده از شیار به جای پیش‌تنیده کردن نمونه‌ی EBR مقرون به صرفه است.

مقاومت اتصال نمونه‌ی SG20-1 که با استفاده از یک لایه ورق FRP با پیش‌تنیدگی ۲۰ درصد که با استفاده از روش EBROG تقویت شده بود، برابر با ۱۸/۷۷ کیلو نیوتن اندازه‌گیری شد. لازم به ذکر است که شیارهای ایجاد شده در این نمونه دارای ابعاد ۱۰×۱۰ میلی‌متر و فاصله‌ی مرکز تا مرکز ۲۰ میلی‌متر می‌باشد. هم‌چنین نمونه‌ی SG20-2 که تکرار نمونه‌ی ۲۰ درصد پیش‌تنیده بود، نیروی ۱۷/۸۱ کیلو نیوتن را تحمل کرد. میانگین ظرفیت باربری نمونه‌های EBROG برابر با ۱۸/۳ کیلو نیوتن شد که نسبت به نمونه‌ی شاهد، افزایش ۱۲۳ درصدی را تجربه کرد. هم‌چنین نمونه‌ی شیار دار نسبت به نمونه‌های بدون شیار با پیش‌تنیدگی ۲۰٪ و ۳۰٪ حدود ۳۲ درصد افزایش داشت. علت این افزایش ظرفیت را می‌توان پیش‌تنیده شدن سطح بتن و به تعویق افتادن جدا شدگی دانست. در واقع بالا بودن مقاومت اتصال در نمونه‌ی

از هر گروه ارائه شده است، زیرا نتایج برای نمونه‌های تکراری مشابه است. مطابق شکل ۹(الف)، لغزش در نمونه‌ی کنترل از شروع بارگذاری به نسبت بار ۱۰۰٪ به حدود ۰/۱۱ میلی متر رسید. این بدان معنی است که یک ترک بر روی سطح باند ایجاد شده و زمانی که بار به حداکثر مقدار نزدیک شد ورق FRP شروع به جدا شدن از سطح بتن کرد. همین وضعیت برای نمونه‌های ۲۰ و ۳۰ درصد پیش

تنیده رخ داد، اما با افزایش نیروی پیش‌تنیدگی، شکاف کم‌تری بین پروفیل‌های لغزش در هنگام جدا سازی وجود داشت. در شکل ۹(د) مشاهده می‌شود که در نمونه‌ی شاهد شیار دار بیشینه کرنش به ۰/۴۵ رسیده است. در نمونه‌ی پیش‌تنیده‌ی شیار دار، بیشینه‌ی لغزش نسبت به نمونه‌های دیگر کاهش یافته است. در واقع وجود شیار باعث انتقال تنش‌های پیش‌تنیدگی به عمق‌های سخت‌تر بتن و در نهایت کاهش لغزش در نمونه شده است.

جدول ۴: نتایج حاصل از آزمایش نمونه‌ها

ردیف	نام نمونه	میزان پیش‌تنیدگی (%)	P _{Test} (kN)	P _{Avg} (kN)	افزایش ظرفیت اتصال نسبت به نمونه‌ی شاهد (%)	حالت گسیختگی	عمق جدا شدگی (mm)
۱	SC-۱	۰	۸/۳۳	۸/۲	-	DC	-
۲	SC-۲	۰	۸/۰۲	۸/۲	-	DC	-
۳	S۲۰-۱	۲۰	۱۳/۸۴	۱۳/۹	۷۰	DC/CC	۲
۴	S۲۰-۲	۲۰	۱۳/۹۳	۱۳/۹	۷۰	DC/CC	۲
۵	S۳۰-۱	۳۰	۱۳/۲۸	۱۳/۷	۶۸	DC/CC	۵
۶	S۳۰-۲	۳۰	۱۴/۲	۱۳/۷	۶۸	DC/CC	۳
۷	SG-۱	۰	۱۳/۷۶	۱۳/۵	۶۵	DC/CC	۱/۵
۸	SG-۲	۰	۱۳/۱۹	۱۳/۵	۶۵	DC/CC	۱/۵
۹	SG۲۰-۱	۲۰	۱۸/۷۷	۱۸/۳	۱۲۳	DC/CC	۱/۵
۱۰	SG۲۰-۲	۲۰	۱۷/۸۱	۱۸/۳	۱۲۳	DC/CC	۱/۵

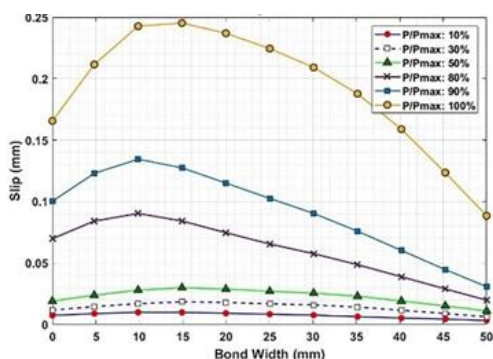
۳-۳- نمودارهای کرنش در عرض اتصال

مقدار کرنش، رابطه‌ی (۳)، با استفاده از معادله‌ی لغزش به دست آمده است. این معادله اجازه می‌دهد تا منحنی کرنش برای سطوح مختلف بار ترسیم شود. برای این منظور، از روش PIV در نرم افزار متلب استفاده شده است. در این رابطه، لغزش، شماره‌ی المان و مکان المان به ترتیب با s ، i و x نشان داده شده است [۲۵].

$$\varepsilon_i = \frac{S_{i+1/2} - S_{i-1/2}}{X_{i+1/2} - X_{i-1/2}} \quad (3)$$

در شکل ۱۰ نمودارهای کرنش در عرض اتصال نمونه‌ها نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱۰(ب)، حداکثر کرنش برای نمونه‌ی S۲۰ حدود ۱۱۰۰۰ میکرو استرین می‌باشد. در حالی که حداکثر کرنش در نمونه‌ی شاهد، مطابق شکل ۱۰(الف)، حدود ۴۲۰۰ میکرو استرین است. در واقع تقویت نمونه با ورق FRP با ۲۰ درصد پیش

تنیدگی موجب افزایش حدود دو برابری حداکثر کرنش گردید. نمونه‌ی S۳۰ حداکثر کرنشی مشابه با نمونه‌ی S۲۰ داشته است که علت آن را می‌توان گسیختگی موضعی این نمونه در هنگام رها سازی بار پیش‌تنیدگی ۳۰ درصد کرنش نهایی ورق FRP دانست. در بررسی نمودار نمونه‌های تقویت شده با روش شیار زنی مشاهده می‌شود کرنش در مقایسه با نمونه‌ی شاهد در نمونه‌ی بدون پیش‌تنیده و پیش‌تنیده به ترتیب ۱۶۰ و ۵۵ درصد افزایش داشته است. با بررسی نتایج می‌توان دریافت در نمونه‌های تقویت شده با استفاده از روش شیار زنی علی‌رغم افزایش ظرفیت اتصال، شکل پذیری و قابلیت تغییر شکل در تنش‌های بالا کاهش یافته است. علت آن است که ایجاد شیار در سطح بتن منجر به افزایش سطح اتصال بین ورق تقویتی و سطح بتن شده و سختی اتصال افزایش پیدا کرده است. از این جهت تحت تنش‌های یکسان در مقایسه با سایر نمونه‌ها، کرنش کمتری را متحمل شده است.



(e)

شکل ۹- نمودار لغزش در عرض ورق تقویتی؛ (الف) CS؛ (ب) S۲۰؛ (ج) S۳۰؛ (د) SG؛ (ه) S۲۰

$$\tau_i = E_f t_f \frac{S_{i+1/2} - S_{i-1/2}}{X_{i+1/2} - X_{i-1/2}} \quad (4)$$

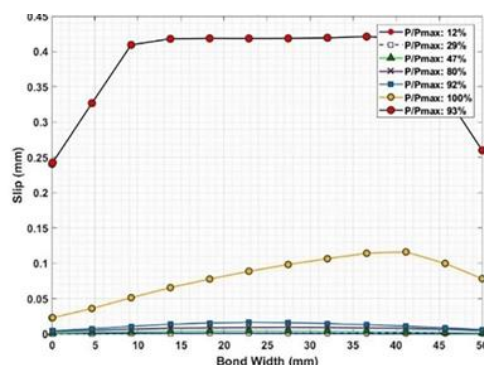
۴-۳- نمودارهای تنش در عرض اتصال

معادله‌ی تنش، رابطه‌ی (۴)، با ضرب مقدار کرنش به دست آمده از قسمت قبل در سختی ورق FRP به دست آمده است. این معادله امکان محاسبه‌ی منحنی تنش در امتداد طول ورق FRP را برای سطوح مختلف بار فراهم می‌کند. برای این منظور از روش PIV در نرم افزار متلب استفاده شده است [۲۵].

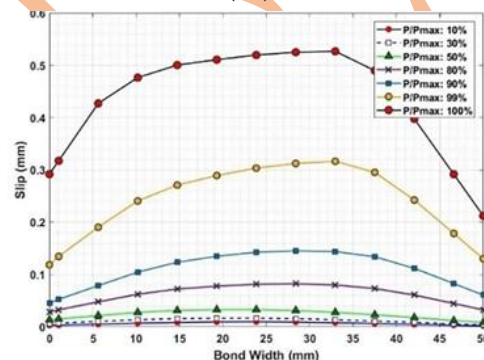
در رابطه‌ی فوق، τ_i معرف تنش برشی در واحد طول، E_f مدول الاستیسیته‌ی ورق تقویتی و t_f ضخامت ورق تقویتی می‌باشد.

این نمودار تغییرات تنش در عرض اتصال در فاصله‌ی ۲۰ میلی متری از ابتدای اتصال را نشان می‌دهد. به عبارتی نمودار تنش در عرض اتصال بیان‌گر میزان تنش ایجاد شده در نقاط عرضی اتصال به ازای بارهای مختلف اعمال شده می‌باشد.

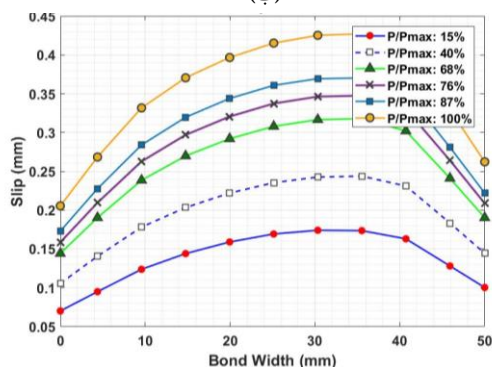
در شکل ۱۱ نمودارهای تنش در عرض اتصال نمونه‌های مختلف نشان داده شده است. با توجه به نمودار شکل ۱۱ (الف) مشاهده می‌شود که با افزایش میزان بارگذاری، تنش در اتصال افزایش یافته است؛ به طوری که بیش‌ترین سطح تنش مربوط به حالت بارگذاری ۹۰ درصد می‌باشد. به طور مشابه در نمونه‌ی دارای پیش تنیدگی ۲۰ درصد همین روند رخ داده است؛ با این تفاوت که بیش‌ترین سطح تنش در میزان بار ۸۰ درصد بار نهایی اتفاق افتاده است.



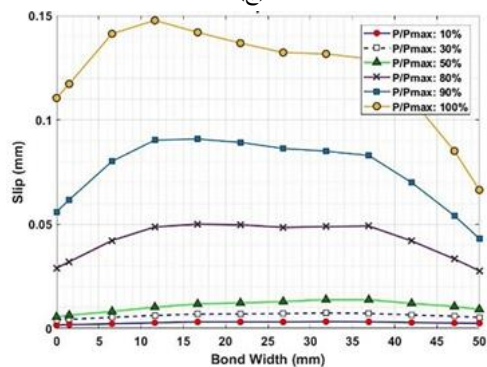
(الف)



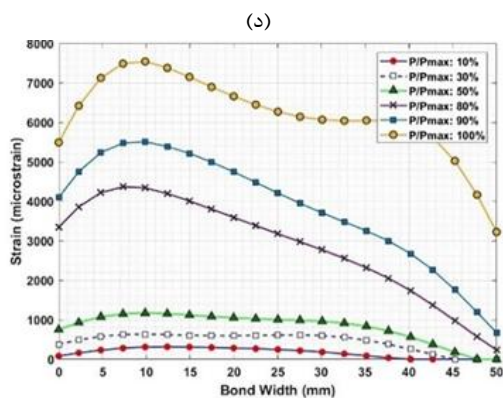
(ب)



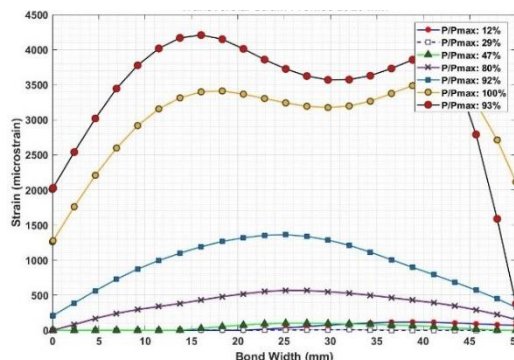
(ج)



(د)



(د)

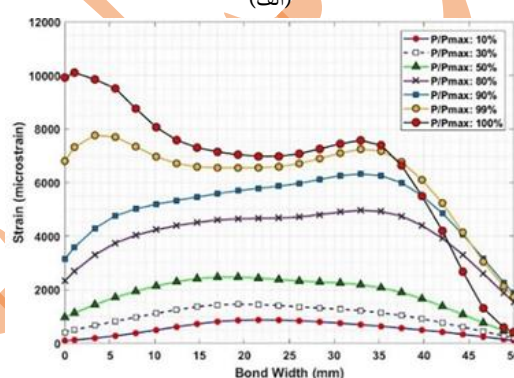


(ه)

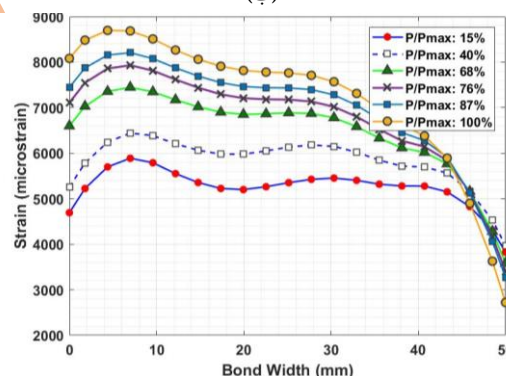
شکل ۱۰- نمودار کرنش در عرض ورق تقویتی؛ (الف) CS؛ (ب) S^{۲۰}؛ (ج) S^{۳۰}؛ (د) SG؛ (ه) SG^{۲۰}

لازم به ذکر است که در نمونه‌ی S^{۳۰} بیش‌ترین سطح تنش در نسبت بار ۵۰ درصد رخ داده است که به علت گسیختگی موضعی اتصال در هنگام رها سازی نیروی پیش تنیدگی می‌باشد. در روش EBROG، حداکثر تنش در حالت غیر پیش تنیده در سطح بار ۵۰ درصد رخ داده است. این در حالی است که در نمونه دارای ۲۰ درصد پیش تنیدگی، حداکثر تنش در سطح بار ۹۰ درصد ایجاد شده است که نشان از ظرفیت اتصال در پذیرش نیروی پیش تنیده‌ی اولیه می‌باشد.

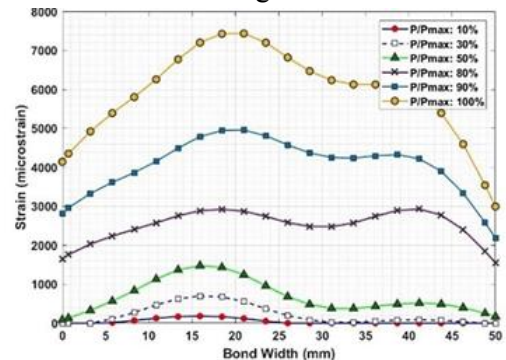
در نمودار تنش در عرض اتصال نمونه‌ی S^{۲۰} که در شکل ۱۱(ب) نشان داده شده، مشاهده می‌شود که حداکثر تنش در این نمونه نسبت به نمونه‌ی شاهد بیش از ۲ برابر افزایش داشته است. این در حالی است که میزان تنش بیشینه در نمونه‌ی S^{۳۰} نسبت به نمونه‌ی شاهد بیش از ۵۰ درصد کاهش یافته است. هم‌چنین نتایج حاکی از آن است که بیش‌ترین تنش در نمونه‌ی SG^{۲۰} رخ داده است. لازم به ذکر است که به دلیل عدم ظرفیت اتصال EBR برای تحمل نیروی پیش تنیدگی ۳۰ درصد و گسیختگی موضعی نمونه هنگام آزاد سازی نیروی پیش تنیدگی، نمودارهای تنش در دو نمونه‌ی S^{۲۰} و S^{۳۰} متفاوت می‌باشد.

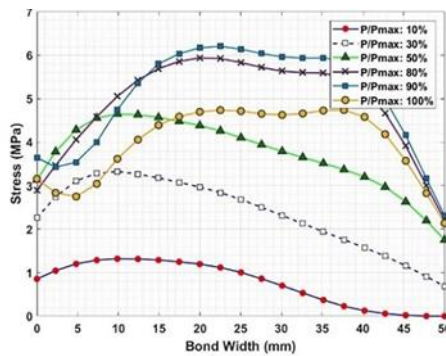


(ب)



(ج)





(e)

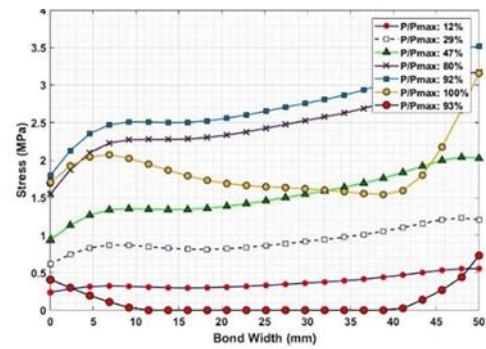
شکل ۱۱- نمودار تنش در عرض ورق تقویتی؛ (الف) CS؛ (ب) S₂₀؛ (ج) S₃₀؛ (د) SG؛ (ه) S_{G20}

در نمودار مرتبط با نمونه‌ی شاهد مشاهده می‌شود که تنش در عرض ورق تقویتی با روندی تقریباً یکسان در عرض اتصال افزایش یافته است. به عبارت دیگر، تغییرات تنش از لبه‌ی اتصال به سمت داخل روند نسبتاً منظم دارد. این در حالی است که در نمونه‌های EBR پیش‌تنیده، تغییرات تنش در عرض اتصال بسیار نامنظم می‌باشد؛ به طوری که تنش از وسط ورق به سمت لبه‌ها افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است که در نمونه‌ی EBROG، این مسئله به چشم نمی‌آید. می‌توان گفت در اتصال EBR به دلیل صاف و صیقلی بودن سطح اتصال، در المان‌هایی از اتصال افت نیروی پیش‌تنیدگی اتفاق افتاده و موجب بالا و پایین شدن تنش در عرض اتصال شده است. از طرف دیگر، در اتصال EBROG با توجه سطح درگیری بیشتر ورق FRP با بتن به دلیل شیارهای موجود، این مسئله بسیار کم رنگ شده است.

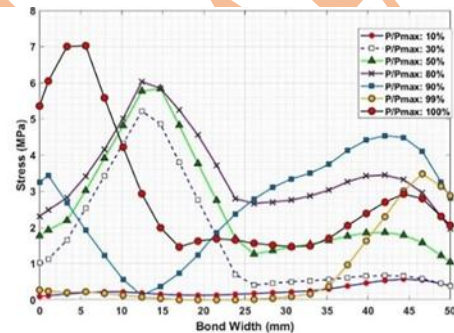
۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به منظور بررسی اتصال پیش‌تنیده‌ی FRP به بتن از آزمایش برش مستقیم-اتصال پیش‌تنیده استفاده گردید. در این تحقیق نمونه‌ها با دو روش EBR و EBROG آماده‌سازی شدند و نتایج آن‌ها از جمله ظرفیت اتصال و نمودارهای عرضی کرنش، تنش و لغزش با یکدیگر مقایسه شدند. نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق به شرح زیر می‌باشد.

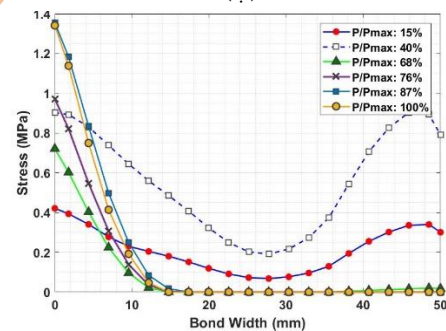
۱- استفاده از FRP پیش‌تنیده در اتصال منجر به ایجاد تنش-های فشاری در سطح بتن و به دنبال آن افزایش مقاومت اتصال FRP



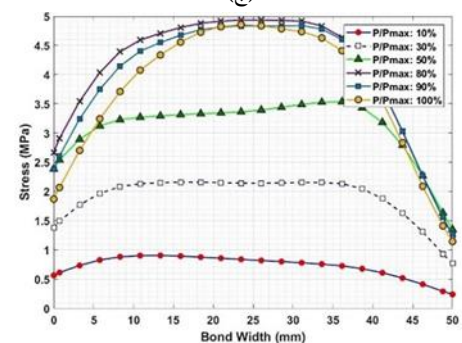
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

منابع

- [۱] ACI Committee ۴۴۰, ۲R-۱۷, ۲۰۱۷. Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures, *American Concrete Institute (ACI)*, <https://doi.org/10.14359/51700867>
- [۲] Ueda, T., and Dai, J., ۲۰۰۱. Interface Bond Between FRP Sheets and Concrete Substrates Properties, Numerical Modelling and Roles in Member Behaviour, *Progress in Structural Engineering and Materials*, ۷ (۱), pp. ۲۷-۴۳ <https://doi.org/10.1002/pse.187>
- [۳] El-Hacha, R., Wight, R. G., and Green, M. F., ۲۰۰۱. Prestressed Fiber-Reinforced Polymer Laminates for Strengthening Structures, *Progress in Structural Engineering and Materials*, Vol. ۳, No. ۲, pp. ۱۱۱-۱۲۱ <https://doi.org/10.1002/pse.76>
- [۴] Lin, T. Y., and Burns, N. H., ۱۹۶۳. Design of Prestressed Concrete Structures, *Book Design of prestressed concrete structures*, Series Design of prestressed concrete structures, ed., Editor eds., Wiley New York
- [۵] Michels, J., Zile, E., Czaderski, C., Motavalli, M., ۲۰۱۴. Debonding Failure Mechanisms in Prestressed CFRP/Epoxy/Concrete Connections, *Engineering Fracture Mechanics*, ۱۳۲ pp. ۱۶-۳۷ <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2014.10.012>
- [۶] Shabani, E., Mostofinejad, D., Saljoughian, A., ۲۰۲۳. Bond behavior of prestressed FRP sheet-concrete joints: Comparison of EBROG and EBR methods, *Construction and Building Materials*, ۴۰۰ pp. ۱۳۲۷۵۲ <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132752>
- [۷] Moshiri, N., Czaderski, C., Mostofinejad, D., Motavalli, M., ۲۰۲۱. Bond resistance of prestressed CFRP strips attached to concrete by using EBR and EBROG strengthening methods, *Construction and Building Materials*, ۲۶۶ pp. ۱۲۱۲۰۹ <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121209>
- [۸] Moshiri, N., Martinelli, E., Czaderski, C., Mostofinejad, D., Hosseini, A., Motavalli, M., ۲۰۲۳. Bond Behavior of Prestressed CFRP Strips-to-Concrete Joints Using the EBROG Method: Experimental and Analytical Evaluation, *Journal of Composites for Construction*, ۲۷ (۱) pp. ۰۴۰۲۲۱۰۴. <https://doi.org/10.1061/jccof2.cceeng-3851>
- [۹] Garden, H. N., and Hollaway, L. C., ۱۹۹۸. An Experimental Study of the Failure Modes of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Prestressed Carbon Composite Plates, *Composites Part B: Engineering*, ۲۹ (۴), pp. ۴۱۱-۴۲۴. [https://doi.org/10.1016/s1359-8348\(97\)0043-7](https://doi.org/10.1016/s1359-8348(97)0043-7)

به بتن شد. به عنوان مثال، مقاومت اتصال نمونه‌های تقویت شده با ورق FRP با ۲۰ درصد پیش تنیدگی به روش EBR به میزان ۷۰ درصد نسبت به نمونه‌های بدون پیش تنیدگی افزایش یافت.

۲- اتصال آماده سازی شده با روش EBR نتوانست نیروی حاصل از پیش تنیدگی ۳۰ درصد را به بتن منتقل کند و دچار گسیختگی موضعی در انتهای اتصال شد. بنابراین در این نمونه افزایش ظرفیت اتصال نسبت به نمونه‌ی ۲۰ درصد پیش تنیده مشاهده نشد. ولی به دلیل مکانیزم متفاوت گسیختگی در این دو نمونه، نمودارهای رفتاری تنش و کرنش در عرض اتصال آن‌ها متفاوت شد.

۳- مقاومت اتصال در نمونه‌های تقویت شده با استفاده از روش EBROG برابر با ۱۸/۳ کیلو نیوتن می‌باشد که نسبت به نمونه‌ی شاهد ۱۲۳ درصد افزایش تجربه کرده است. این افزایش چشم گیر مربوط به عملکرد مطلوب شیار در توزیع و انتقال تنش‌های پیش تنیدگی در اعماق بتن می‌باشد.

۴- با توجه به مراحل انجام شده در این تحقیق برای آزمایش نمونه‌ی تقویت شده با ورق FRP پیش تنیده و نتایج حاصل، می‌توان ادعا کرد که این آزمایش به منظور بررسی رفتار اتصال در نمونه‌های پیش تنیده، امکان تجزیه و تحلیل دقیق رفتار اتصال را فراهم می‌کند. این روش در تحقیقات آینده می‌تواند به عنوان یک ابزار قابل اعتماد برای پژوهشگران در این حوزه مورد استفاده قرار گیرد.

۵- در این تحقیق اثر تقویت نمونه‌ها با کامپوزیت FRP پیش تنیده بر روی دو روش آماده سازی سطحی بررسی شد. نتایج حاکی از عملکرد بهتر نمونه‌ی تقویت شده با روش EBROG نسبت به نمونه‌ی تقویت شده با روش متداول EBR بود. بنابراین پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آینده بر روی اتصالات پیش تنیده با استفاده از روش EBROG و در سطوح پیش تنیدگی بالاتر تمرکز بیشتری شود.

هم‌چنین پیشنهاد می‌شود که در تحقیقات آینده استفاده از روش‌های پیش تنیدگی بر تیرهای واقعی با لایه‌های FRP بیش‌تر مورد بررسی قرار گیرد. علاوه بر این، از آن جایی که نتایج نشان‌دهنده عملکرد اتصال مناسب نمونه‌های تهیه شده با استفاده از روش EBROG است، ارزیابی سطوح پیش تنیدگی قابل اعمال در این روش ارزشمند خواهد بود.

[۲۰] Saljoughian, A., and Mostofinejad, D., ۲۰۱۶. Axial-flexural interaction in square RC columns confined by intermittent CFRP wraps, *Composites Part B: Engineering*, ۸۹, pp. ۸۵-۹۵. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.10.047>

[۲۱] Saljoughian, A. and Mostofinejad, D., ۲۰۱۸. Grooving methods in square RC columns strengthened with longitudinal CFRP under cyclic axial compression, *Engineering Structures*, ۱۷۴, pp. ۷۲۴-۷۳۵. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.08.007>

[۲۲] ACI ۳۱۱.۱-۹۱, ۲۰۰۹. Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight and Mass Concrete (Reapproved ۲۰۰۹), *American Concrete Institute*, Farming Hills, MI, USA. <https://doi.org/10.14359/1.987>

[۲۳] <http://www.sika.com>

[۲۴] <http://www.quantumEPR3301.co.uk>

[۲۵] Moghaddas, A., Mostofinejad, D., and Ilia, E., ۲۰۱۹. Empirical FRP-Concrete Effective Bond Length Model for Externally Bonded Reinforcement on the Grooves, *Composites Part B: Engineering*, ۱۷۲, pp. ۳۲۳-۳۲۸. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.05.068>

[۲۶] ASTM D۵۸۶۸-۰۱, ۲۰۱۴. Standard Test Method for Lap Shear Adhesion for Fiber Reinforced Plastic (FRP) Bonding, *West Conshohocken, pa.* <https://doi.org/10.1520/D5868-01R14>

[۲۷] ASTM C ۳۹-۰۵, ۲۰۰۹. Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, *American Standard Test Method (ASTM)*.

[۱۰] Shang, S., Zou, P. X., Peng, H., and Wang, H., ۲۰۰۵. Avoiding De-bonding in FRP Strengthened Reinforced Concrete Beams Using Prestressing Techniques, In Proceedings of the International Symposium on Bond Behaviour of FRP in Structures (BBFS), *Hong Kong, China*, pp. ۳۲۱-۳۲۸.

[۱۱] Nordin, H., and Taljsten, B., ۲۰۰۶. Concrete Beams Strengthened with Prestressed Near Surface Mounted CFRP, *Journal of Composites for Construction*, ۱۰ (۱) pp. ۶۰-۶۸ [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1090-2688\(2006\)10:1\(60\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1090-2688(2006)10:1(60))

[۱۲] Gaafar, M. A., and El-Hacha, R., ۲۰۰۷. Prestressing Concrete Beams Using NSM FRP Technique, *Proceedings of International Symposium on Fiber-Reinforced Polymer Reinforcement in Concrete Structures*. FRPRCS-۸, Partas, Greece.

[۱۳] Kim, Y. J., Wight, R.G. and Green, M. F., ۲۰۰۸. Flexural Strengthening of RC Beams with Prestressed CFRP Sheets: Development of Nonmetallic Anchor Systems, *Journal of Composites for Construction*, ۱۲ (۱), pp. ۳۵-۴۳. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1090-2688\(2008\)12:1\(35\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1090-2688(2008)12:1(35))

[۱۴] Hajihashemi, A., Mostofinejad, D., and Azhari, M., ۲۰۱۱. Investigation of RC Beams Strengthened with Prestressed NSM CFRP Laminates, *Journal of Composites for Construction*, ۱۵ (۶), pp. ۸۸۷-۸۹۵. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)cc.1943-5614.0000225](https://doi.org/10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000225)

[۱۵] Czaderski, C., ۲۰۱۲. Strengthening of Reinforced Concrete Members by Prestressed Externally Bonded Reinforcement with Gradient Method, Ph.D. Thesis, ETH Zürich, Zürich, Switzerland.

[۱۶] Mostofinejad, D., and Mahmoudabadi, E., ۲۰۱۰. Grooving as Alternative Method of Surface Preparation to Postpone Debonding of FRP Laminates in Concrete Beams, *Journal of Composites for Construction*, ۱۴ (۶), pp. ۸۰۴-۸۱۱. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)cc.1943-5614.0000117](https://doi.org/10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000117)

[۱۷] Mostofinejad, D., and Shameli, S. M., ۲۰۱۳. Externally Bonded Reinforcement in Grooves (EBRIG) Technique to Postpone Debonding of FRP Sheets in Strengthened Concrete Beams, *Construction and Building Materials*, ۳۸, pp. ۷۵۱-۷۵۸. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.030>

[۱۸] Saljoughian, A., and Mostofinejad, D., ۲۰۲۰. RC Columns Longitudinally Strengthened via Novel EBRIG Technique, *Structural Concrete*, ۲۱(۱۲), pp. ۵۷۰-۵۸۶. <https://doi.org/10.1002/suco.201900151>

[۱۹] Saljoughian, A., and Mostofinejad, D., ۲۰۱۸. Grooving Methods in Square RC Columns Strengthened with Longitudinal CFRP Under Cyclic Axial Compression, *Engineering Structures*, ۱۷۴, pp. ۷۲۴-۷۳۵. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.08.007>

