



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

B. Attari, M. Tavakkolizadeh*

Civil Engineering Department, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Khorasan Razavi, Iran

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 load-carrying capacity. Most existing theoretical models estimate bond strength based on the effective bond length. So, in order to achieve a satisfactory performance, it is important to determine the accurate value for the effective bond length of lap joints. 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 examined. The effective bond length and the bond strength of specimens were determined using single-shear pull test and adopting particle image velocimetry (PIV) method and they were compared with the existing specifications such as ACI and fib. The results showed that using fiber implantation method instead of the conventional EBR method reduced the effective bond length by 20% and increased the bond strength between FRP and concrete substrate by 34%.

Review History:

Received: 6/18/2018
Revised: 7/15/2018
Accepted: 7/16/2018
Available Online: 7/22/2018

Keywords:

Effective bond length
Fiber implantation
EBR
FRP
Particle image velocimetry (PIV)

1. INTRODUCTION

Determination of bond strength between FRP laminates and concrete is one of the important issues in the field of concrete members strengthening using FRP laminates [1, 2]. According to previous studies, the bond strength depends on several factors, such as surface preparation, concrete strength, FRP stiffness and thickness, and effective bond length [3, 4]. Increasing the bond length at first increases the load-carrying capacity, but beyond the effective bond length, cannot improve the capacity and prevent the FRP debonding from the concrete substrate. This has led many researchers to come up with methods for removing the phenomenon of FRP debonding and increasing the bond strength in the EBR method [5, 6].

2. METHODOLOGY

One method recently proposed by researchers to address the premature debonding of FRP laminate from the concrete substrate after exposure to elevated temperature is fiber implantation [7]. In order to prepared the specimens, first the holes with a diameter of 10 mm and a depth of 40 mm were drilled into the concrete, 50 mm apart and after cleaning inside the holes with the compressed air, carbon fiber strands with the length 80 mm are implanted inside the holes using epoxy resin so that half of their length buried inside the hole and other half stayed outside. Then, the free part of the strand

*Corresponding author's email: drt@um.ac.ir

was bent and adhered to the concrete surface in the direction of the applied tensile load. Finally, one layer of carbon fabric with 50 mm width was adhered to the concrete surface using epoxy resin with wet layup procedure on top of the implanted strands in order to develop a better bond.

In this research, four groups of specimens were prepared in order to evaluate the effect of fiber implantation method on reducing the effective bond length and improving the bonding behavior between concrete and FRP laminate. Two groups were prepared in conventional methods (sandblasting and wire brushing) and the other two ones were prepared with fiber implantation methods (with and without surface preparation). It should be noted that in this research, the effective bond length and bond strength of the specimens were obtained by using single-shear pull test and using particle image velocimetry (PIV) method.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Bond strength and failure modes

According to the results, the average bond strength of wire-brushed and sandblasted specimens did not vary significantly and in agreement with the value obtained from the Chen and Tang model. Also, the failure mode of all specimens prepared by these two methods was FRP debonding from the concrete substrate. This is despite the fact that the specimens prepared by fiber implantation method, compared with the specimens prepared by conventional methods, had a 34% increment in



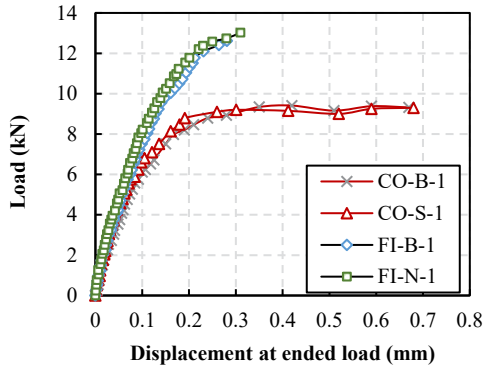


Fig. 1. Load-displacement curves of specimens

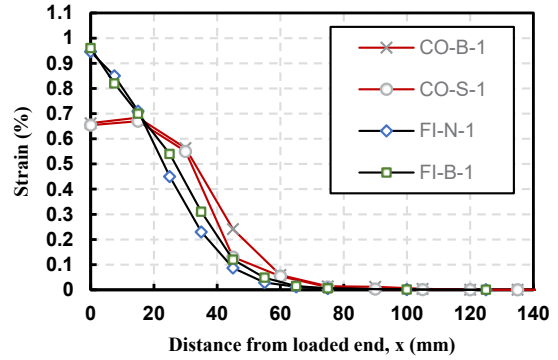


Fig. 2. Longitudinal strain profile of specimens

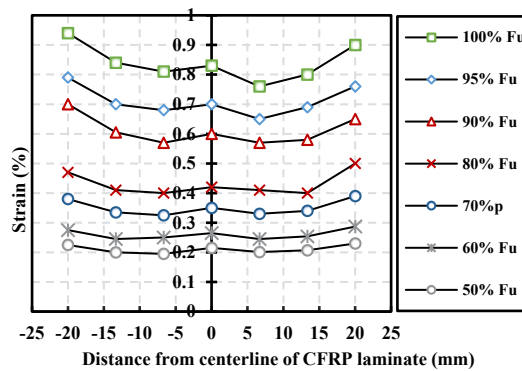


Fig. 3. Strain profiles along the width of FRP laminate corresponding to different load levels for fiber implanted specimen

bond strength, and the failure mode of all specimens was FRP rupture.

3.2. Load-displacement behavior

Load-displacement curves of wire-brushed and sandblasted specimens showed similar behavior. As shown in Figure 1, first by increasing the load, the displacement was increased proportionally and after reaching to about 95% of the ultimate load, the rate of the increase in displacement significantly increased.

The load-displacement curves of fiber implantation specimens showed different behavior. So that, the slope of the curves from the beginning until the moment of failure was almost constant and the value of this slope was greater than the initial slope of conventional specimens' load-displacement curves, which indicates the more stiffness of this method (see Figure 1).

3.3. Longitudinal strain profile

By examining the longitudinal strain profiles of conventional specimens, it can be observed that the applied force to CFRP laminate was transferred to the concrete block in the length of about 75 mm (close to the effective bond length obtained by Chen and Teng's equation: 73 mm).

Also, by examining the longitudinal strain profile of fiber implantation specimens, it can be observed that, the effective

bond length for these specimens was about 60 mm (20% less than the specimens prepared by conventional methods), while the ultimate load in these specimens was 34% more than conventional specimens (see Figure 2).

3.4. Transverse strain profile

As shown in Figure 3, the strain distribution along the width of the FRP laminate was almost constant (especially in loads below 90% of the final load). This result shows a uniform transfer of load from a single-shear test device to FRP laminate (minor differences can be due to the difference in the thickness of the FRP laminates in wet layup systems). Also, the transverse strain profile of fiber implantation specimens showed that the strain on the two edges of the FRP laminate was relatively greater than the middle region, due to the lesser bond strength in these regions.

4. CONCLUSIONS

Based on the experimental and PIV analyses results of the current study, the following conclusions could be drawn:

- Average bond strength and effective bond length of a specimen prepared by wire brushing and sandblasting methods did not vary significantly and they were in the value obtained from the Chen and Tang model (ACI specification). The difference between the values obtained from the experimental and computational results was 4% and 3% for

the bond strength and effective bond length, respectively. Therefore, the use of sandblasting and wire brushing methods have not significantly differed in the bond capacity.

- The failure mode of all specimens prepared by wire brushing and sandblasting methods was the premature debonding of FRP laminate from the concrete substrate. However, in fiber implantation method due to the transfer of stress to the concrete depth, the good bond strength between FRP laminate and concrete was achieved, and the failure mode of all specimens prepared by this method was FRP rupture. Therefore, the use of fiber implantation method instead of conventional methods can be a good method to remove the premature debonding of FRP laminate from concrete substrate.

- The effective bond length of specimens prepared by fiber implantation method was 20% less than the specimens prepared by conventional methods and the bond strength of specimens prepared by fiber implantation method was 34% more than the specimens prepared by conventional methods. Therefore, the fiber implantation method compared to conventional methods transmits more load in a less bond length from FRP laminate to concrete.

- The bond strength and effective bond length of specimens prepared by fibers implantation method in both series with and without surface preparation showed similar results. Therefore, in fiber implantation method, no surface preparation required and it was possible to remove the premature debonding of FRP laminate from the concrete substrate only by fiber implantation and surface preparation operations and achieve the maximum capacity of the FRP

laminate.

REFERENCES

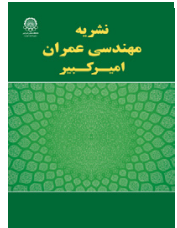
- [1] A. Caggiano, E. Martinelli, C. Faella, A fully-analytical approach for modelling the response of FRP plates bonded to a brittle substrate, *International journal of solids and structures*, 49(17) (2012) 2291-2300.
- [2] F. M. Mukhtar, R. M. Faysal, A review of test methods for studying the FRP-concrete interfacial bond behavior, *Journal of construction and building materials*, 169 (2018) 877-887.
- [3] J. Chen, J. Teng, Anchorage strength models for FRP and steel plates bonded to concrete. *Journal of structural engineering*, 127(7) (2001) 784-791.
- [4] V. Colotti, Effectiveness factors for bond strength in FRP shear strengthened RC beams, *Journal of materials and structures*, 49(12) (2016) 5031-5049.
- [5] 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.
- [6] A. Alipour, M. Tavakkolizadeh, S. Alizadeh, M. Ahmadi Jalayer, Experimental investigation on behavior of concrete beams strengthened with GFRP laminates using circular grooving and other traditional methods of surface preparation, *10th International congress on civil engineering, Tabriz, Iran* (2015).
- [7] 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).

HOW TO CITE THIS ARTICLE

B. Attari, M. Tavakkolizadeh, *Effective Bond Length Evaluation of Fiber Implantation Methods in EBR Applications Using Particle Image Velocimetry*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 52(1) (2020)31-34.

DOI: [10.22060/ceej.2018.14617.5701](https://doi.org/10.22060/ceej.2018.14617.5701)





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

بهزاد عطاری، محمدرضا توکلی زاده^۱

^۱ گروه مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، خراسان رضوی، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۰۳-۲۸

بازنگری: ۱۳۹۷-۰۴-۲۴

پذیرش: ۱۳۹۷-۰۴-۲۵

ارائه آنلاین: ۱۳۹۷-۰۴-۳۱

کلمات کلیدی:

طول مؤثر پیوستگی

FRP

کاشت الیاف

نصب خارجی

سرعت سنجی تصویری ذرات

(PIV)

خلاصه: مقاومت پیوستگی بین ورق پلیمر مسلح با الیاف (FRP) و بتن، عامل اصلی مؤثر 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 مؤثر پیوستگی، تضمین کننده ی افزایش مقاومت پیوستگی نخواهد بود. بیشتر مدل های تئوری موجود، مقاومت پیوستگی را بر اساس طول مؤثر پیوستگی تخمین می زنند. بنابراین برای رسیدن به یک اتصال رضایت بخش، آگاهی از طول مؤثر پیوستگی اهمیت زیادی دارد. در این پژوهش، به منظور ارزیابی و مقایسه طول مؤثر 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 مؤثر 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 به جای روش های آماده سازی سطحی متداول، موجب کاهش طول مؤثر پیوستگی به میزان ۲۰٪ و افزایش مقاومت پیوستگی به میزان ۳۴٪ می گردد.

۱- مقدمه

مکانیکی و فیزیکی بتن، ضخامت و سختی ورق FRP و طول مؤثر پیوستگی^۳ تعیین می شود [۵-۷]. نیروی اعمال شده به ورق های FRP به طور عمده از طریق تنش های برشی ایجاد شده در میان سطح ورق FRP و بتن در یک طول محدود که طول مؤثر پیوستگی نامیده می شود، بین ورق FRP و سطح بتن منتقل می شود. افزایش طول اتصال می تواند باعث افزایش ظرفیت اتصال شود، زیرا افزایش طول اتصال موجب کاهش تنش های برشی موجود بین دو سطح ورق FRP و بتن می شود. با این حال

تعیین ظرفیت اتصال ورق FRP به بتن از مسائل مهم مقاوم سازی سازه های بتنی با استفاده از پلیمرهای مسلح شده با الیاف^۱ (FRP) به روش نصب خارجی^۲ (EBR) است که تاکنون پژوهش های گسترده ای در این زمینه صورت گرفته است [۱-۴]. بر اساس بررسی های متعدد، محققان دریافتند که ظرفیت اتصال به طور عمده توسط ویژگی های

1 Fiber Reinforced Polymer

2 Externally Bonded Reinforcement

3 Effective bond length

* نویسنده عهده دار مکاتبات: drt@um.ac.ir



آماده‌سازی سطحی معمول، می‌توان پدیده جداسازی را به تعویق انداخت و ظرفیت باربری و جابه‌جایی نهایی بالاتری را مشاهده کرد. ایجاد شیارهای طولی بر روی سطح بتن به‌عنوان یک راهکار دیگر در حذف پدیده جداسازی 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 روش در مقایسه با نمونه‌های آماده‌سازی سطحی شده به روش‌های معمول، مقاومت پیوستگی را به میزان ۸۰ درصد افزایش می‌دهد و پدیده جداسازی زود هنگام ورق FRP از سطح بتن را از بین می‌برد.

علی‌پور و توکلی‌زاده، روش شیارهای دایره‌ای را برای به تعویق انداختن پدیده‌ی جداسازی 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، جابه‌جایی 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 جداسازی 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 جداسازی 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 نیمی از الیاف در جهت بارگذاری بر روی سطح

افزایش طول اتصال به مقدار بیش از طول مؤثر پیوستگی، نمی‌تواند باعث افزایش ظرفیت اتصال شود [۸]. بنابراین، تعیین طول مؤثر 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 مؤثر پیوستگی و شکست جداسازی ورق FRP از سطح بتن محاسبه می‌کنند. بنابراین، مقدار مجاز ظرفیت به دست آمده از روابط آیین‌نامه‌ای بسیار کمتر از حداکثر ظرفیت گسیختگی FRP است. این مسأله باعث شده که بسیاری از پژوهشگران به دنبال ارائه روش‌هایی برای افزایش ظرفیت اتصال در روش EBR باشند.

گریس^۱ و همکاران نشان دادند استفاده از ورق‌های FRP عرضی (به شکل رکابی^۲) در سطح جانبی تیر تقویت شده با ورق FRP، راهکار مناسبی در به تعویق انداختن جداسازی 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^۳ و همکاران، استفاده از یک نوع مهارهای مکانیکی در انتهای ورق FRP را به‌عنوان روشی برای جلوگیری از جداسازی 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، جداسازی 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

1 Grace
2 U-Wrap
3 Firmo

ناحیه‌ای که نرم‌افزار در آن جابه‌جایی وصله آزمون را ردیابی می‌کند (وصله جستجو^۴)، انتخاب می‌شود. نرم افزار با کمک تابع برازش^۵، 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 به عنوان 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 تصویربرداری 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 ۱۲۸×۱۲۸ 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 ۱۲۸ × ۱۲۸ پیکسلی و بافت نمونه‌ها، دقت نتایج اندازه‌گیری جابه‌جایی این پژوهش بیش از ۰/۵ میکرومتر می‌باشد [۱۹].

۳- برنامه آزمایشگاهی

۳-۱- مشخصات مصالح

برای انجام آزمایش برش مستقیم تعداد ۱۲ نمونه منشور بتنی در ابعاد ۱۵۰ mm × ۱۵۰ mm × ۳۵۰ mm ساخته شد. برای به‌دست آوردن بتن با مقاومت فشاری در حدود ۳۰ 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 $300 \times 150 \text{ mm}^2$ 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^۶ و با استفاده از پارچه تک‌جهته‌ی کربنی و

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 زودهنگام 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 200°C افزایش داد.

در پژوهش پیش‌رو، به هدف ارزیابی اثر کاشت الیاف در کاهش طول مؤثر 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 مؤثر 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 دست یابی به میدان جابه‌جایی و کرنش ورق FRP از روش PIV استفاده شد. PIV ابتدا به عنوان 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].

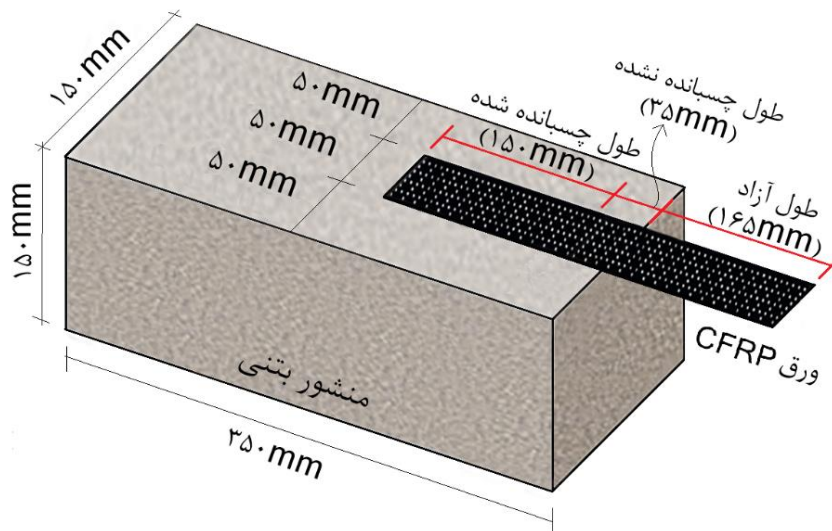
در فرآیند PIV، ابتدا ناحیه‌ی مورد بررسی در نخستین تصویر به تعدادی بخش‌های کوچکتر به صورت یک شبکه تقسیم بندی می‌شود (به هر بخش کوچک وصله آزمون^۳ گفته شده و اندازه آن بر مبنای پیکسل تعیین می‌شود). سپس یک وصله با ابعاد بزرگ‌تر به‌عنوان

4 Search patch
5 Correlation function
6 Wet layup

1 Single-shear pull test
2 White
3 Test patch

جدول ۱. مشخصات مکانیکی FRP
Table 1. Mechanical properties of FRP

نوع ماده	نام محصول	ضخامت (mm)	مقاومت کششی (MPa)	مدول الاستیسیته (GPa)	کرنش گسیختگی (%)
الیاف	Kor-CFW200	0/111	4900	230	1/8
رزین	EPIKOTE 828	-	35	4/0	2/0



شکل ۱. مشخصات هندسی نمونه‌ها
Fig. 1. Specimens dimensions

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 تک جهته با عرض ۵۰ mm و طول ۱۵۰ 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 مؤثر به دست آمده از رابطه چن و تنگ [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].

رزین اپوکسی دو جزئی ساخته شدند که ویژگی‌های آنها در جدول ۱ ارائه شده است.

۲-۳- ساخت نمونه‌ها

در این پژوهش، تنها روش چسباندن ورق‌های FRP به سطح بتن، به‌عنوان عامل تأثیرگذار بر طول مؤثر پیوستگی مورد آزمایش گرفته است و سایر عوامل مؤثر ثابت در نظر گرفته شده‌اند. نام‌گذاری نمونه‌ها به‌صورت 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



شکل ۲. روش کاشت الیاف. (الف) ایجاد سوراخ‌ها (ب) کاشت الیاف (ج) چسباندن الیاف در جهت بارگذاری بر روی سطح بتن.
 Fig. 2. Fiber implantation method: a) Hole preparation, b) Fiber implantation and c) Implanted strands direction



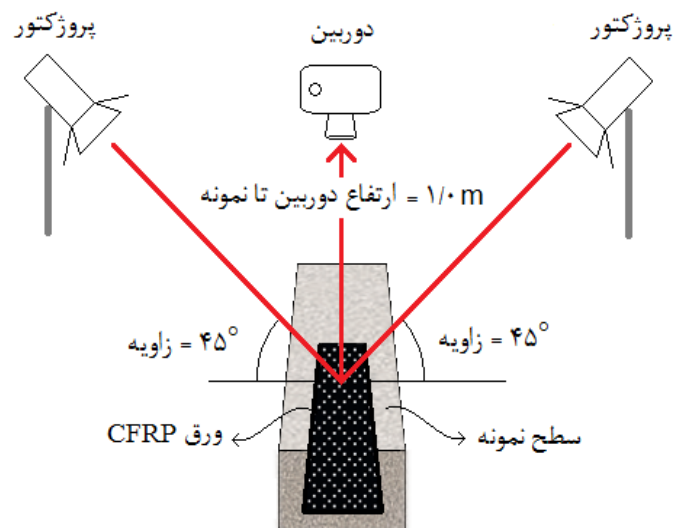
شکل ۳. سطح پوشانده شده نمونه توسط ماسه رنگی
 Fig. 3. Surface covered by colored sand

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. برای به‌دست 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 به وسیله 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

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



شکل ۴. تصویر دستگاه برش مستقیم
 Fig. 4. Image of the Single-shear pull test apparatus



شکل ۵. موقعیت دوربین و پروژکتورها نسبت به نمونه
 Fig. 5. Positions of camera and light projectors

مخصوص نیروی کششی را بصورت یکنواخت و با نرخ بارگذاری ثابت تا لحظه شکست به ورق FRP وارد می‌کند.

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).

نمی‌باشند، قبل از گیرش رزین اپوکسی، سطح ورق FRP و بتن توسط ماسه رنگی ریزدانه (اندازه ذرات بین ۰/۱۵ mm تا ۰/۳ mm) پوشانده شد (شکل ۳).

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 نگه دارنده ی این دستگاه، یک جک هیدرولیکی با ظرفیت ۳۰۰ kN به وسیله گیره

جدول ۲. جزئیات نمونه‌ها و نتایج آزمایش
Table 2. Details of specimens and test results

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	31/2	9/41	1/01	جداشدگی	9/57	1/04
CO-B-2	31/2	9/71	1/05	جداشدگی		
CO-B-3	31/2	9/61	1/04	جداشدگی		
CO-S-1	31/2	9/30	1/00	جداشدگی	9/47	1/03
CO-S-2	31/2	9/61	1/03	جداشدگی		
CO-S-3	31/2	9/51	1/02	جداشدگی		
FI-N-1	30/6	13/02	-	گسیختگی	12/67	-
FI-N-2	30/6	12/04	-	گسیختگی		
FI-N-3	30/6	12/82	-	گسیختگی		
FI-B-1	30/6	12/62	-	گسیختگی	12/45	-
FI-B-2	30/6	13/02	-	گسیختگی		
FI-B-3	30/6	11/62	-	گسیختگی		

۴- تحلیل نتایج

$$\beta_w = \sqrt{\frac{2 - b_f / b_c}{1 + b_f / b_c}}$$

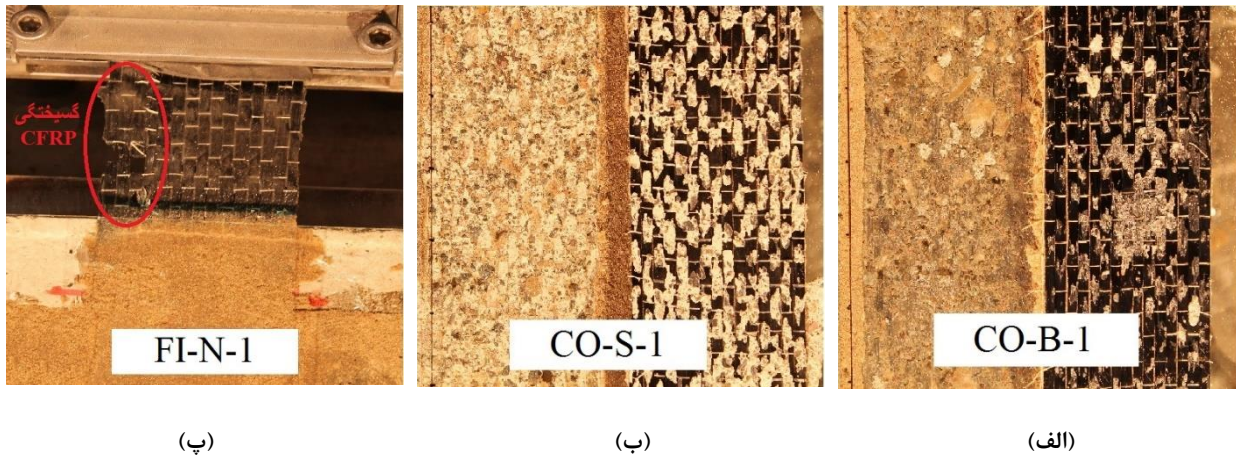
$$\beta_l = \begin{cases} 1.0 & \text{if } L_f \geq L_e \\ \sin \frac{\pi}{2} \frac{L_f}{L_e} & \text{if } L_f < L_e \end{cases}$$

$$L_e = \sqrt{\frac{E_f t_f}{\sqrt{f_c}}}$$

(۲) 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.

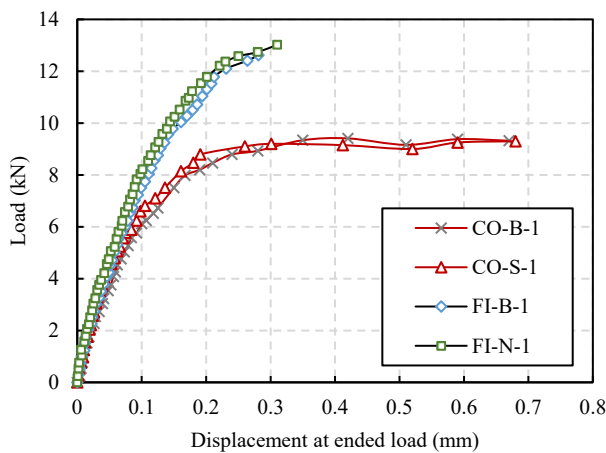
(۳) رابطه چن و تنگ برای محاسبه بار نهایی به صورت زیر می‌باشد:

$$(۴) \quad P_{cal} = \alpha \beta_w \beta_l b_f L_e \sqrt{f_c} \quad (۱)$$



شکل ۶. حالت شکست نمونه‌ها (الف) جداسازی ورق FRP از سطح بتن در نمونه برس‌زنی شده (ب) جداسازی ورق FRP از سطح بتن در نمونه ماسه‌پاشی شده (پ) گسیختگی ورق FRP در نمونه کاشت الیاف

Fig. 6. Failure modes of specimens: a) FRP debonding in wire brushed specimen, b) FRP debonding in sandblasted specimen and c) FRP rupture in fiber implanted specimen



شکل ۷. نمودار بار-جاب‌جایی نمونه‌ها در آزمایش برش مستقیم
Fig. 7. Load-displacement curves in Single-shear pull test

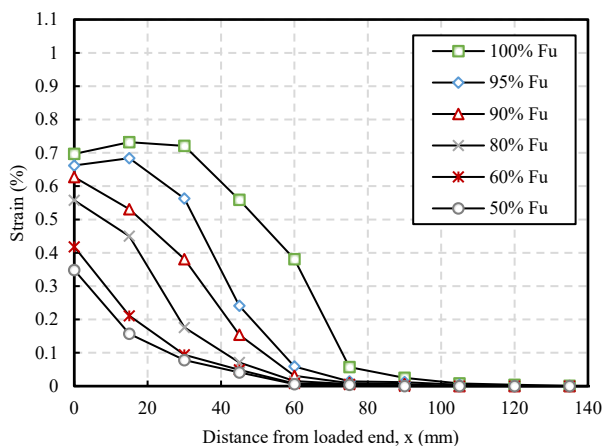
روش‌های متداول، به دلیل استفاده از حداکثر ظرفیت ورق FRP و عدم جداسازی آن از سطح بتن (حالت شکست تمام نمونه‌ها در این روش مطابق شکل ۶ پ گسیختگی ورق FRP بود) ۳۴٪ افزایش یافت. لازم به ذکر است که نمونه‌های ساخته شده به روش کاشت الیاف در هر دو حالت با و بدون آماده‌سازی سطحی دارای مقاومت پیوستگی مشابه بودند. 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

ضرایب بی‌بعد β_w و β_l که از روابط (۲) و (۳) محاسبه شده، به ترتیب تأثیر نسبت عرض ورق FRP به عرض منشور بتنی و تأثیر نسبت طول اتصال ورق FRP به طول مؤثر پیوستگی را در رابطه بار نهایی وارد می‌کنند. b_c عرض منشور بتنی و L_e طول مؤثر 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 به‌دست 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.

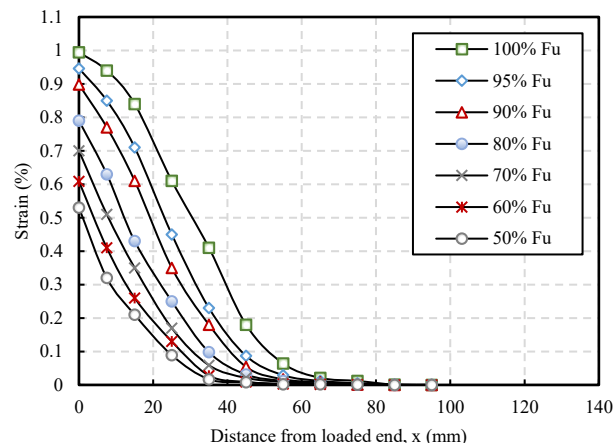
۴-۱ مقاومت پیوستگی و حالت شکست نمونه‌ها

بر اساس نتایج به‌دست آمده، متوسط مقاومت پیوستگی نمونه‌های برس‌زنی شده و ماسه‌پاشی شده مشابه یکدیگر و در حدود مقدار به دست آمده از رابطه چن و تنگ بود. همچنین، حالت شکست تمام نمونه‌ها در این دو روش، جداسازی 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



(ب)



(الف)

شکل ۸. نیمرخ کرنش طولی، در طول ورق FRP (الف) نمونه FI-B-1، (ب) نمونه CO-B-1
 Fig. 8. Longitudinal strain profile, along the FRP sheet: a) FI-B-1 specimen and b) CO-B-1 specimen

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 جداشدگی رخ نمی‌دهد) و مقدار این شیب بیشتر از شیب اولیه نمودار بار-جاب‌جایی روش‌های متداول بود که نشان دهنده‌ی 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).

۴-۳- نیمرخ کرنش طولی

در شکل ۸، نیمرخ‌های کرنش طولی نمونه‌های CO-B-1 و FI-B-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 یالو^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

فرض جداشدگی ورق FRP از سطح بتن در رابطه چن و تنگ دانست، درحالی که در روش کاشت الیاف، شکست در اثر گسیختگی ورق FRP است. بنابراین استفاده از این رابطه برای روش کاشت الیاف معتبر نمی‌باشد.

۴-۲- 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 نقطه‌ی 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 برس‌زنی شده و ماسه‌پاشی 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 جداشدگی ورق FRP از سطح بتن همچنان افزایش می‌یابد (شکل ۷). این رفتار مفهوم طول مؤثر پیوستگی را تأیید می‌کند که با افزایش طول اتصال بیش از طول مؤثر

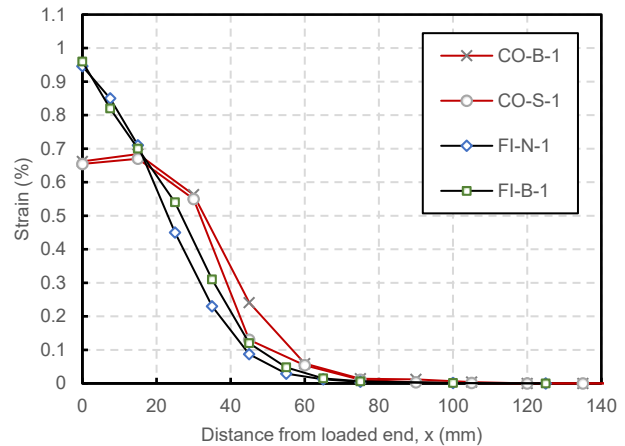
نیمرخ کرنش عرضی ورق FRP نمونه‌ها در فاصله ۱۵ mm از ابتدای ناحیه چسبانده شده سمت بارگذاری شده، برای سطوح بار مختلف محاسبه شد. نیمرخ کرنش عرضی دو نمونه CO-B-1 و FI-B-1 در شکل ۱۰ ارائه شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، توزیع کرنش در عرض ورق FRP تقریباً ثابت است (بخصوص در بارهای کمتر از ۹۰٪ بار نهایی)، 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.

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش، طول مؤثر پیوستگی در روش نصب خارجی با استفاده از کاشت الیاف و روش‌های متداول آماده‌سازی سطحی (برس زنی 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 برس زنی ساخته شدند. سپس مقاومت پیوستگی و طول مؤثر 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 مؤثر پیوستگی و مقاومت پیوستگی نمونه‌های ساخته شده به روش برس زنی 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 مؤثر پیوستگی بود. بنابراین، استفاده از روش آماده‌سازی سطحی برس زنی و ماسه‌پاشی تفاوت چشمگیری در ظرفیت پیوستگی بین ورق FRP و سطح بتن نداشته و رابطه‌های موجود با تقریب خوبی مقاومت و طول مؤثر پیوستگی را پیش‌بینی می‌کنند.

حالت شکست تمام نمونه‌های ساخته شده به روش‌های برس زنی



شکل ۹. نیمرخ کرنش طولی، در طول ورق FRP نمونه‌ها
Fig. 9. Longitudinal strain profiles, along the FRP sheets

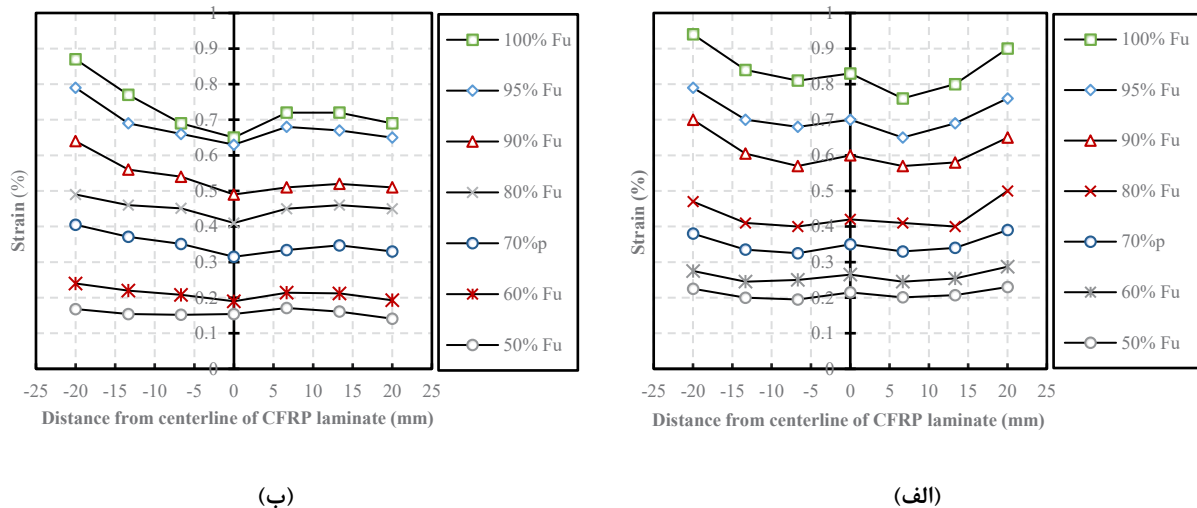
مؤثر پیوستگی حاصل از رابطه چن و تنگ هم‌خوانی دارد (طول مؤثر پیوستگی با استفاده از رابطه (۴) و با توجه به مشخصات نمونه‌ها ۷۳ mm محاسبه شد).

همچنین با توجه به نیمرخ کرنش نمونه FI-N-1، طول مؤثر پیوستگی برای این نمونه در حدود ۶۰ mm 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.

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

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،



شکل ۱۰. نیمرخ کرنش عرضی در فاصله ۱۵ mm از ابتدای بارگذاری شده ورق FRP (الف) نمونه FI-B-1 (ب) نمونه CO-B-1
Fig. 10. Transverse strain profile at a distance of 15 mm from the beginning of the loaded FRP sheet: a) FI-B-1 specimen and b) CO-B-1 specimen.

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 modeling 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,

و ماسه پاشی، جداسدگی ورق FRP از سطح بتن بود. این درحالی است که در روش کاشت الیاف به دلیل انتقال تنش به عمق بتن و بهره گیری از مقاومت بتن در عمق آن، پیوستگی مناسبی بین ورق FRP و بتن حاصل شده و در نتیجه حالت شکست تمام نمونه ها در این روش، گسیختگی ورق FRP می باشد. بنابراین، استفاده از روش کاشت الیاف می تواند راهکار مناسبی در حذف پدیده نامطلوب جداسدگی زود هنگام ورق FRP از سطح بتن باشد.

طول مؤثر پیوستگی در روش کاشت الیاف ۲۰٪ کمتر از روش های متداول و مقاومت پیوستگی در این روش ۳۴٪ بیشتر از روش های متداول به دست آمد. بنابراین روش کاشت الیاف نسبت به روش های متداول، بار بیشتری را در طولی کمتر از ورق FRP به بتن انتقال می دهد.

مقاومت پیوستگی و طول مؤثر پیوستگی نمونه های ساخته شده به روش کاشت الیاف در هر دو دسته با و بدون آماده سازی سطحی، دارای نتایج مشابه بودند. بنابراین در روش کاشت الیاف، نیاز به هیچ گونه آماده سازی سطحی نبوده و به سادگی می توان پدیده جداسدگی 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

- investigation on effect of temperature on bond between FRP laminates and concrete, 11th International congress on civil engineering, Tehran, Iran, (2018).
- [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 173(1) (2007) 1-18.
- [21] M. Hajialilue-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, Technical Report No: CUED/D-SOILS/TR322. Cambridge University, Cambridge, UK (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.
- 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, Farmington Hills, USA, (2008).
- [10] fib Bulletin 14, Externally bonded FRP reinforcement for RC structures, International federation for structural concrete, Lausanne, Switzerland, (2001).
- [11] CNR-DT200, Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening, National Research Council, Rome, Italy, (2004).
- [12] N. F. Grace, G. Sayed, A. Soliman, K. Saleh, Strengthening reinforced concrete beams using fiber reinforced polymer (FRP) laminates, ACI structural journal, 96(5), (1999) 865-875.
- [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).
- [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 behavior of concrete beams strengthened with GFRP laminates using circular grooving and other traditional methods of surface preparation, 10th International congress on civil engineering, Tabriz, Iran (2015).
- [17] B. Attari, M. Tavakkolizadeh, An experimental

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

B. Attari, M. Tavakkolizadeh, Effective Bond Length Evaluation of Fiber Implantation Methods in EBR Applications Using Particle Image Velocimetry, Amirkabir J. Civil Eng., 52(1) (2020) 123-134.

DOI: 10.22060/ceej.2018.14617.5701

