

# تأثیر چرخه یخ زدن - آب شدن بر مقاومت اتصال نمونه‌های بتنی تقویت شده به روش‌های EBR و EBROG

مهديه محمدی<sup>۱\*</sup>، داود مستوفی نژاد<sup>۲</sup>

۱- دکتری عمران-سازه، کارمند شهرداری بهارستان اصفهان

۲- استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

\* Mahdie.mohammadi67@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۲/۲۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۱۰

## چکیده

در سال‌های اخیر استفاده زیادی از مواد پلیمری برای تقویت تیرها، ستون‌ها و دال‌ها شده است و تحقیقات زیادی به صورت عددی و آزمایشگاهی انجام گرفته است؛ ولی اطلاعات کمی در مورد دوام و پایایی آن‌ها در شرایط محیطی مختلف ارائه شده است. به همین منظور در این مقاله تأثیر یخ زدن و آب شدن بر مقاومت اتصال بتن-FRP بررسی شده است. نمونه‌های بتنی با ابعاد  $۳۵ \times ۱۵۰ \times ۱۵۰$  میلی‌متر با مقاومت فشاری ۳۵ مگاپاسکال ساخته شد و بعد از تقویت به دو روش (۱) نصب خارجی سطحی (EBR<sup>۱</sup>) و (۲) نصب خارجی سطحی روی شیار (EBROG<sup>۲</sup>)، در شرایط محیطی قرار گرفتند. شرایط محیطی شامل ۲۰۰ و ۵۰۰ چرخه یخ زدن-آب شدن است. چرخه یخ زدن-آب شدن با توجه به پیشنهاد استاندارد ASTM-C666 که دما به صورت متناوب از ۱۸- تا ۴+ درجه سانتی‌گراد بالا رود و از دمای ۴+ به ۱۸- درجه سانتی‌گراد کاهش یابد، انتخاب شد. همچنین در این استاندارد ۳۰۰ چرخه پیشنهاد شده است که در این پژوهش سعی بر آن شد که تعداد چرخه‌های بالاتر (۵۰۰ چرخه) و پایین‌تر (۲۰۰ چرخه) از پیشنهاد آیین‌نامه مورد بررسی قرار گیرد. بعد از خارج کردن نمونه‌ها از شرایط محیطی از آزمایش برش مستقیم یک طرفه و نرم‌افزار GeopIV استفاده شد. نتایج حاصل از آزمایش برش مستقیم شامل مقاومت پیوند اتصال FRP به سطح بتن و نمودارهای بار-لغزش می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که روش EBROG به عنوان یک روش جایگزین بسیار مناسب نسبت به روش EBR است؛ به صورتی که ظرفیت باربری این روش نسبت به روش EBR در شرایط محیطی استاندارد آزمایشگاهی و شرایط محیطی مختلف در حدود دو برابر روش EBR است.

**واژگان کلیدی:** نصب خارجی سطحی روی شیار، یخ زدن-آب شدن، مقاومت برشی اتصال، جداسدگی

۱. Externally bonded reinforcement

۲. Externally bonded reinforcement on groove

## ۱- مقدمه

به طور کلی، سازه‌های بتنی قبل از تقویت با الیاف FRP ممکن است ترک‌هایی داشته باشند و بعضی از این ترک‌ها بین سطح تماس بتن و این الیاف باشند [1]. یخ‌زدن آب در بین این ترک‌ها، ممکن است سبب جداسازی FRP از سطح بتن، ایجاد ریز ترک در ماتریس، تخریب در پیوند ماتریس-الیاف و حتی آسیب در خود الیاف شود؛ بنابراین تأثیر یخ زدن-آب شدن در رفتار سازه‌های تقویت شده باید در نظر گرفته شود. کیسر [2] در سال ۱۹۸۹ رفتار تیرهای ترک خورده و ترک نخورده تقویت شده به روش EBR را تحت ۱۰۰ چرخه یخ زدن-آب شدن از دمای ۲۵- تا ۲۰ درجه سانتی‌گراد بررسی کرد؛ نتایج نشان داد چرخه یخ زدن-آب شدن تأثیر قابل توجهی در رفتار نمونه‌ها در مقایسه با تیرهای کنترل ندارد. چو<sup>۲</sup> و همکاران [3] در سال ۲۰۱۳ تأثیر یخ زدن-آب شدن، روی پوشش شن زبر انتخاب شده بین سطح تماس عرشه بتنی و FRP را بررسی کردند. ۸ نمونه بتنی با ابعاد  $۱۰۰ \times ۱۰۰ \times ۴۵۰$  میلی‌متر تحت ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ چرخه یخ زدن - آب شدن با شرایط دمایی بین ۱۸- تا ۴ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲ تا ۵ ساعت قرار گرفتند. نتایج، تفاوت تقریباً ۵٪ را در مقاومت شکست سطح تماس بتن FRP در ۳۰۰ چرخه یخ زدن-آب شدن در مقایسه با نمونه‌هایی که در معرض یخ زدن-آب شدن قرار نگرفتند را نشان داد. این امر حاکی از آن است که چرخه یخ زدن-آب شدن روی نمونه‌ها تأثیر چندانی ندارد و عرشه بتن FRP توانایی دوام در مقابل چرخه یخ زدن-آب شدن را دارد. گرین<sup>۳</sup> و همکاران [4] در سال ۲۰۰۳ به بررسی ۲۷ نمونه تیر بتن مسلح با ابعاد  $۱۰۰ \times ۱۵۰ \times ۱۲۲۰$  میلی‌متر پرداختند. نمونه‌ها تحت ۰، ۵۰ و ۲۰۰ چرخه یخ‌زدن و آب‌شدن قرار گرفتند. نتایج نشان داد که چرخه یخ زدن-آب شدن تأثیر زیادی بر مقاومت نمونه‌های بتن مسلح و یا نمونه‌های تقویت شده با ورق‌های FRP ندارد. با این حال بعضی از پژوهشگران هم به این نتیجه رسیدند که چرخه یخ زدن-آب شدن می‌تواند آثار

مخربی داشته باشد و سبب کاهش مقاومت و شکل‌پذیری نمونه‌ها شود [5]. همچنین چرخه یخ‌زدن-آب شدن زمانی که بتن از کیفیت مطلوب برخوردار نباشد، می‌تواند آثار مخربی داشته باشد [6]. چاجس<sup>۴</sup> و همکاران [7] در سال ۱۹۹۵ به بررسی دوام تیرهای بتنی تقویت شده با استفاده از الیاف آرامید، شیشه و گرافیت به روش EBR پرداختند. به همین منظور ۲۴ عدد نمونه بتنی در معرض یخ‌زدن-آب شدن قرار گرفتند. نتایج نشان داد قرار دادن نمونه‌ها در محیط سبب کاهش پیوستگی بین سطح بتن و FRP شد و کاهش مقاومت نهایی ممکن است سبب تغییر مد شکست تیرها شود. برای نمونه در تیرهای کنترل مشکل جداسازی وجود نداشت در حالی که در همه تیرهای تقویت شده با الیاف آرامید نوع شکست به دلیل جداسازی ورق از سطح بتن، و در الیاف گرافیت و شیشه شکست به دلیل کاهش پیوستگی بین سطح بتن-چسب-الیاف بود.

علاوه بر موارد بالا که مربوط به تأثیر چرخه یخ‌زدن-آب شدن بر پیوند بتن و الیاف FRP به روش EBR است، چرخه یخ زدن-آب شدن روی کامپوزیت‌های FRP در محدوده دمایی متداول ۲۰- تا ۳۰ درجه سانتی‌گراد تأثیر ناچیزی دارد و حائز اهمیت نیست. برای نمونه، کامپوزیت‌های ساخته شده از فایبرهای شیشه‌ای که به طور متداول در دسترس هستند، در حدود ۰/۴٪ حفره دارند که اجازه یخ‌زدگی قابل توجهی را نداده و امکان هیچ‌گونه آسیب جدی را فراهم نمی‌کند. در حالی که بتن و چسب با توجه به میزان آب موجود در آن‌ها نسبت به این فرآیند حساس هستند و علاوه بر این در دماهای پایین، تنش‌های پسماند در کامپوزیت‌های FRP به دلیل تفاوت‌های موجود در ضرایب انبساط حرارتی در اجزای موجود ریز ساختار ماده، به وجود می‌آید؛ که این تنش‌ها منجر به تشکیل ریز ترک‌ها در رزین ماتریس، در سطح مشترک رزین و فایبر و یا در سطح مشترک رزین و بتن می‌شوند [8]. در این مقاله از روش سرعت‌سنجی تصویری ذرات (PIV) نیز استفاده شده است. این روش قابلیت ارزیابی میدان جابه‌جایی و تغییر

۱. Kaiser

۲. Cho

۳. Green

۴. Chajes

شایانی به تعمیر و تقویت سازه‌های محصور شده با FRP در آب و هوای سرد کند.

## ۲- مراحل انجام آزمایش ۱-۱- ساخت و تقویت نمونه‌ها

در این مطالعه ۱۸ نمونه بتنی با ابعاد  $150 \times 150 \times 350$  میلی‌متر با مقاومت فشاری ۳۵ مگاپاسکال ساخته شده است. طرح اختلاط بتن در جدول (۱) آورده شده است. نمونه‌ها به مدت ۲۸ روز در آب با دمای ۲۳ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند. علاوه بر نمونه‌های اصلی، نمونه‌های استوانه‌ای به ارتفاع ۲۰۰ و قطر ۱۰۰ میلی‌متر برای تعیین مقاومت فشاری بتن ساخته شد.

جدول ۱. طرح اختلاط بتن استفاده شده

Water W/C (Kg/m <sup>3</sup> )	Cement (Kg /m <sup>3</sup> )	Sand (Kg /m <sup>3</sup> )	Gravel (Kg /m <sup>3</sup> )	Compressive strength (MPa)	Slump (mm)
0.57	216	380	1256	35	75- 100

Table 1. The concrete mix used

به منظور مقاوم‌سازی نمونه‌های بتنی، کامپوزیت CFRP از محصول SikaWrap-230C که از جنس الیاف کربن می‌باشد و هم‌چنین چسب اپوکسی Sikadur-300 به کار گرفته شده است. مشخصات الیاف و چسب در جدول (۲) آورده شده است. نمونه‌ها به دو روش EBR و EBROG تقویت شدند. در روش EBR سطح نمونه‌ها با استفاده از دستگاه سنگ فرز ساب زده شده به صورتی که سنگ دانه‌ها نمایان شوند. سپس سطح هر نمونه با استفاده از پمپ هوا از هر گونه گرد و غبار و آلودگی تمیز می‌شود. در ادامه محل چسباندن CFRP روی سطح نمونه مشخص می‌شود و یک لایه چسب روی سطح بتن زده می‌شود. ورق CFRP که پیشتر آماده شده روی سطح بتن چسبانده می‌شود و با رزین اشباع می‌شود.

جدول ۲ مشخصات فنی کامپوزیت مورد مصرف

Name	Type	Thickness (mm)	Tensile strength (MPa)	Elastic modules (GPa)
Fibers	SikaWrap 230 C	0.131	4300	238
Adhesive	Sikadur- 300	0.5-0.9	30	4.5

Table 2. Mechanical properties of fiber and epoxy matrix

در روش EBROG دو شیار به طول ۲۰۰ میلی‌متر، عرض

شکل را در شاخه‌های مختلف مهندسی دارد [17]. در روش PIV سطح مورد بررسی شبکه‌بندی می‌شود و بردار جابه‌جایی هر یک از نقاط شبکه توسط حداکثر مقدار تابع همبستگی در دو تصویر متوالی به دست می‌آید. عملیات PIV در حوزه فرکانس با در نظر گرفتن سری فوریه سریع هر نقطه از شبکه انجام می‌شود. اندازه هریک از اعضای شبکه تأثیر چشم‌گیری در دقت روش PIV دارد. آدریان<sup>۱</sup> [19] در سال ۱۹۹۱ این روش را در مکانیک سیالات توسعه داد. در این مطالعه با عکس‌برداری متوالی از سیال مورد نظر و شبکه‌بندی سیال و مقایسه عکس‌های متوالی به ارزیابی میدان جابه‌جایی پرداخت. وایت<sup>۲</sup> و همکاران [20] در سال ۲۰۰۳ با استفاده از روش PIV به ارزیابی تغییر شکل در نمونه‌های خاک پرداختند. این پژوهشگران با استفاده از دو روش فتوگرامتری و سرعت سنجی تصویری ذرات میدان تغییر شکل را ارزیابی کردند. حسینی و همکاران [15] در سال ۲۰۱۴ با استفاده از روش PIV به بررسی تغییر شکل، میدان کرنش و بازشدگی ترک‌ها در تیرهای تحت بارگذاری خمشی چهار نقطه‌ای پرداختند. در این مطالعه یک تیر بتنی و یک تیر فولادی تحت آزمایش خمش سه نقطه‌ای قرار گرفتند. کرنش‌ها و تغییر شکل نمونه‌ها به دو روش PIV و استفاده از LVDT بررسی شدند. نتایج نشان داد روش PIV در ارزیابی دقیق میدان جابه‌جایی مؤثر واقع شده است. نتایج به دست آمده هماهنگی خوبی با نتایج حاصل از LVDT و کرنش‌سنج‌های موجود داشت.

در همه موارد ذکر شده در بالا مشخص است که تاکنون تأثیر آماده‌سازی سطحی در مقاومت پیوند بتن FRP تحت تأثیر شرایط محیطی مختلف با استفاده از روش نوین EBROG انجام نشده است. در این روش برای آماده‌سازی سطحی از شیارزنی روی نمونه استفاده می‌شود که در ادامه به طور مفصل این روش توضیح داده خواهد شد. به همین منظور در این مقاله علاوه بر آماده‌سازی سطحی به روش EBR از روش EBROG [9-16] نیز استفاده می‌شود. نتایج این پژوهش می‌تواند کمک

۱. Adrian

۲. White

می‌شود. طبق این استاندارد آزمایش روی نمونه‌ها تا ۳۰۰ چرخه ادامه داشته باشد به طوری که مدول ارتجاعی دینامیکی به ۶۰ درصد مدول اولیه برسد. در این تحقیق از روش دوم برای آزمایش نمونه‌ها استفاده می‌شود (شکل ۲). چرخه در نظر گرفته شده شامل دو چرخه ۲۰۰ و ۵۰۰ چرخه می‌باشد. شکل (۳) چگونگی چیدمان نمونه‌ها را در دستگاه نشان می‌دهد. در بین نمونه‌ها از فاصله دهنده استفاده شده است.

شکل ۲. نمودار تغییرات چرخه یخ‌زدن-آب‌شدن

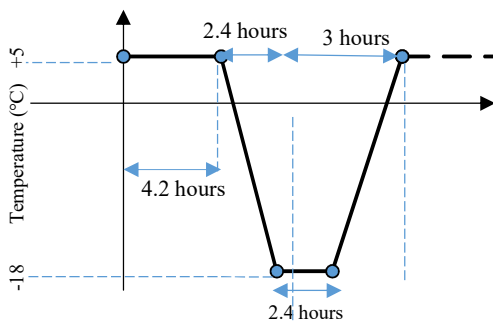


Fig. 2 .Freeze-thaw cycle

شکل ۳. چگونگی چیدمان نمونه‌ها در دستگاه یخ‌زدن-آب‌شدن



Fig. 3. Specimens in the machine

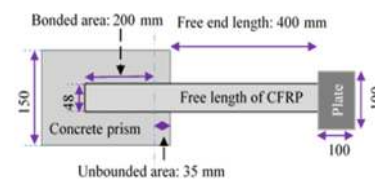
#### ۴- انجام آزمایش

##### ۴-۱- آزمایش برش مستقیم

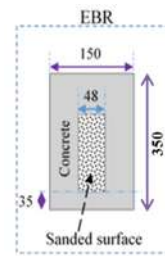
دستگاه آزمایش برش مستقیم ساخته شده در دانشگاه صنعتی اصفهان در سال ۱۳۹۱ مجهز به یک جک هیدرولیکی ۴۰۰ کیلو نیوتن است که نیروی لازم برای انجام آزمایش برش مستقیم را فراهم می‌کند. علاوه بر این دستگاه برای ثبت نیرو، مجهز به دو نیروسنج در بالا و پایین می‌باشد. نمونه بتنی تهیه شده در راستای طول در دستگاه محکم می‌شود و انتهای آزاد ورق CFRP توسط دو فک هیدرولیکی محکم شده و در معرض کشش قرار می‌گیرد. در تحقیق حاضر به منظور ارزیابی میدان لغزش از روش PIV استفاده شده است. به همین منظور

و عمق ۱۰ میلی‌متر روی سطح نمونه‌ها زده شد. فاصله بر تا بر شیارها ۱۸ میلی‌متر است. با استفاده از پمپ هوا درون هر شیار به خوبی از هر گونه گرد و غبار و آلودگی تمیز می‌شود. سپس داخل شیارها با رزین به صورت کامل پر می‌شود و ورق‌های CFRP که با ابعاد مشابه روش EBR می‌باشند روی سطح نمونه‌ها چسبانده می‌شوند و سپس با رزین اشباع می‌شوند [12-13]. شکل (۱-الف) شماتیک هندسی تقویت نمونه‌ها را نشان می‌دهد. در شکل (۱-ب و ۱-ج) به ترتیب مقاوم‌سازی به روش آماده‌سازی سطحی به طور رایج و به روش شیارزنی آورده شده است.

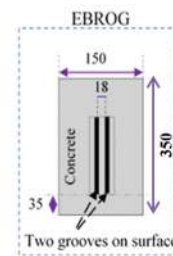
شکل ۱. شماتیک هندسی نمونه‌ی تقویت شده؛ الف) شماتیک کلی نمونه، ب) تقویت به روش EBR؛ ج) تقویت به روش EBROG



(a)



(b)



(c)

Fig. 1. Specifications of the specimens used; a) Specimen details, b) EBR method; c) EBROG method

##### ۳- شرایط محیطی چرخه یخ‌زدن-آب‌شدن

با توجه به استاندارد ASTM-C666 [16] برای تعیین مقاومت نمونه‌های بتنی در مقابل چرخه سریع یخ‌زدن-آب‌شدن دو روش وجود دارد. روش اول یخ‌زدن و آب‌شدن سریع در آب و روش دوم یخ‌زدن در آب و آب‌شدن در هوا است. چرخه آب و یخبندان در هر دو روش باید طوری باشد که دما به صورت متناوب از -۱۸ تا +۴ درجه سانتی‌گراد بالا رود و از دمای +۴ به -۱۸ درجه سانتی‌گراد کاهش یابد. زمان هر چرخه باید بین ۲ تا ۵ ساعت باشد. در روش اول کمتر از ۲۵ درصد از زمان و در روش دوم کمتر از ۲۰ درصد زمان برای فرایند آب استفاده

EBR-500	34.4	9.71	1.01		D
	34.7	10.27	1.07	0.09	D
	35.3	9.23	0.96		D
	35.1	8.54	0.89		D
EBROG-control	34.6	19.46	2.03	0.09	RD
	35.2	18.91	1.97		RD
	34.3	17.74	1.85		RD
EBROG-200	35.3	20.54	2.14	0.07	R
	34.9	20.29	2.11		R
	34.4	19.16	2.00		R
EBROG-500	34.7	22.57	2.35	0.03	R
	35.3	22.48	2.34		R
	35.1	21.96	2.29		R

Table 3. Specifications of the specimens and test results

شکل ۵- میانگین مقاومت جداشدگی CFRP از سطح بتن بعد از ۲۰۰ و

۵۰۰ چرخه یخ زدن-آب شدن

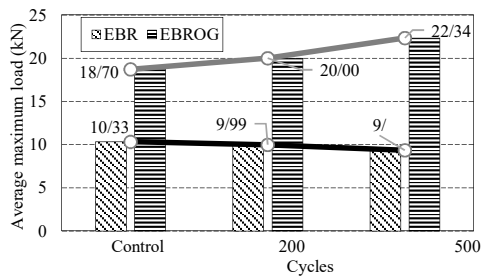


Fig. 5. Bar charts for strengthened specimens

در نمونه‌های EBR نوع شکست، جداشدگی ورق CFRP از سطح بتن است؛ در حالی که ضخامت بتن چسبیده به ورق بسیار ناچیز است (شکل ۶). همچنین تنش میانگین نمونه‌ها تحت تأثیر شرایط محیطی از ۱/۰۷ در شرایط محیطی استاندارد به ۱/۰۴ و ۰/۹۷ مگاپاسکال در ۲۰۰ و ۵۰۰ چرخه کاهش پیدا کرده است. در روش EBROG برخلاف روش EBR، چرخه یخ زدن آب شدن سبب افزایش مقاومت پیوند به اندازه ۷ و ۱۳ درصد بعد از ۲۰۰ و ۵۰۰ چرخه نسبت به نمونه کنترل می‌شود. در این روش، نوع شکست در تمامی نمونه‌های قرار گرفته شده در ۲۰۰ و ۵۰۰ چرخه، پارگی ورق CFRP بود. و می‌توان این نوع شکست را دلیل افزایش مقاومت پیوستگی در هر دو چرخه دانست (شکل ۶). همچنین در نمونه‌های EBROG اندازه تنش میانگین در بار ماکزیمم از ۱/۹۵ مگاپاسکال در محیط استاندارد به ۲/۰۸ و ۲/۳۲ مگاپاسکال در ۲۰۰ و ۵۰۰ چرخه افزایش یافته است.

دوربین با دقت حسگر ۳۶ مگا پیکسل به کار گرفته شد. دوربین به فاصله یک متری از نمونه روی سه پایه نصب شده و عکس‌برداری با استفاده از شاسی بی‌سیم انجام شد. به منظور حذف اختلالات نوری و تأمین نور و روشنایی کافی در حین عکس‌برداری از دو پروژکتور با زاویه تقریبی ۴۵ درجه نسبت به محور بارگذاری نمونه استفاده شد. چیدمان آزمایش، محل قرارگیری دوربین و پروژکتورها در شکل (۴) نشان داده شده است.

شکل ۴- الف) شماتیک هندسی دستگاه برش مستقیم، ب) تنظیمات دستگاه برای انجام آزمایش PIV

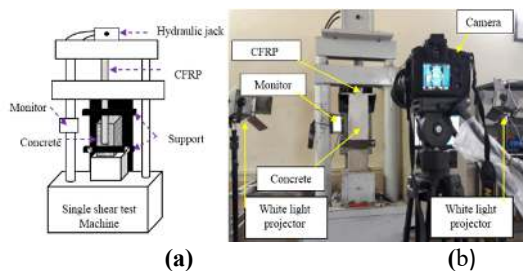


Fig. 4. a) Single shear test setup; b) Specimen test

## ۵- نتایج

### ۵-۱- تحلیل نتایج مقاومت جداشدگی

در جدول (۳) و نمودار میله‌ای شکل (۵) نتایج به دست آمده از آزمایش‌های انجام شده روی نمونه‌های این گروه نشان داده شده است. با توجه به نتایج، در روش EBR، افزایش تعداد چرخه یخ زدن-آب شدن از ۲۰۰ به ۵۰۰ چرخه سبب افت مقاومت پیوستگی به اندازه ۳ و ۶ درصد نسبت به نمونه‌های قرار گرفته شده در محیط استاندارد می‌شود. می‌توان این کاهش مقاومت را ناچیز در نظر گرفت. نتایج گرفته شده مشابه نتایج [4-5] می‌باشد.

جدول ۳. مقاومت جداشدگی، تنش میانگین و مود شکست نمونه‌های بتنی

بعد از ۲۰۰ و ۵۰۰ چرخه یخ زدن-آب شدن

Specimens	$f_c$ (MPa)	Ultimate bond load (kN)	Average bond stress (load/bonded area) (MPa)	SD of average bond stress	Type of failure
EBR-control	34.6	10.7	1.11	0.04	D
	35.2	10.43	1.09		D
	34.3	9.87	1.03		D
EBR-200	35.3	10.39	1.08	0.04	D
	34.9	9.87	1.03		D

میانگین گیری جابه‌جایی رخ داده در طرفین ورق تقویتی و در ارتفاع یکسان از لبه بتن محاسبه می‌شود. با استفاده از رابطه مذکور با حذف حرکت و جابه‌جایی احتمالی نمونه بتنی، می‌توان مقدار لغزش در لبه شروع اتصال ورق تقویتی در سمت انتهای بارگذاری شده را محاسبه کرد. با استفاده از روش PIV و تحلیل عکس‌های گرفته شده در نرم‌افزار GeoPIV 2008، لغزش در هر عکس به دست می‌آید. همچنین بار متناظر با هر عکس توسط مانیتور دیجیتال ثبت شده است و به این ترتیب، ترسیم منحنی بار-لغزش امکان‌پذیر شد. نکته دیگر که باید در تحلیل PIV دقت شود، تبدیل مقیاس است. در عکس‌هایی که در طول بارگذاری گرفته می‌شود، کوچک‌ترین واحد اندازه‌گیری پیکسل است و جابه‌جایی‌های به دست آمده در تحلیل PIV همه بر اساس پیکسل می‌باشند. به همین منظور برای تبدیل پیکسل به میلی‌متر نیاز به داشتن ضریب تبدیل مقیاس است. بنابراین ابتدا مطابق شکل خط‌کش مناسب مدرج پیش از بارگذاری به صورت افقی و عمودی روی نمونه قرار داده و عکس گرفته می‌شود. پس از تحلیل به کمک نرم‌افزار تعداد پیکسل‌های قرار گرفته شده در خطوط ۱۰ میلی‌متری در چندین نقطه اندازه گرفته شده و ضریب مقیاس که تبدیل‌کننده واحد پیکسل به میلی‌متر بود، در نتایج ضرب شده و جابه‌جایی‌ها تبدیل به میلی‌متر شدند. حدود ضرایب مقیاس در این پروژه بین ۱۳ تا ۱۵ پیکسل بر هر میلی‌متر بود (شکل ۷). نمودار میانگین بار-لغزش نمونه‌های این گروه در شکل (۸) نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش چرخه یخ‌زدن-آب‌شدن سختی نمونه در هر دو روش چه در ناحیه خطی و چه در ناحیه غیرخطی تغییری نمی‌کند. و فقط لغزش نمونه به صورت جزئی افزایش پیدا می‌کند. برای نمونه در نمودار نشان داده شده، لغزش در نمونه‌های EBR و EBROG از ۱/۰۷ و ۰/۸۲ در ۲۰۰ چرخه به ۱/۱۲ و ۰/۹۷ در ۵۰۰ چرخه افزایش پیدا می‌کند. به نظر می‌رسد چرخه یخ‌زدن آب‌شدن تأثیر ناچیزی بر رفتار اتصال نمونه‌های تقویت شده گذاشته است.

شکل ۶. انواع مود شکست در نمونه‌های تقویت شده به دو روش

(الف) EBR، (ب) EBROG



Fig. 6. Different failure modes

## ۵-۲- بررسی منحنی‌های بار-لغزش ورق‌های تقویتی

بررسی رفتار اتصال ورق‌های تقویتی نصب‌شده به سطح بتن در نمونه‌های آزمایشگاهی تحت برش مستقیم و به دست آوردن نمودار بار-لغزش، با استفاده از روش PIV در نرم‌افزار GeoPIV 2008 امکان‌پذیر است. لغزش، مقدار جابه‌جایی ورق تقویتی نسبت به بتن است. به منظور حذف حرکت احتمالی بتن و تغییر شکل‌های تکیه‌گاه و محاسبه جابه‌جایی مطلق ورق تقویتی، یک شبکه‌بندی به ابعاد ۵۱۲×۵۱۲ پیکسل روی ورق تقویتی و دو شبکه در طرفین ورق، روی بتن به همین ابعاد در نظر گرفته شد شکل (۶) و مقدار لغزش از رابطه ۱ محاسبه شد [21].

$$\delta_{\text{لغزش}} = \frac{\delta_{\text{بتن(چپ)}} + \delta_{\text{بتن(راست)}}}{2} - \delta_{\text{ورق تقویتی}} \quad (1)$$

شکل ۶. محاسبه لغزش

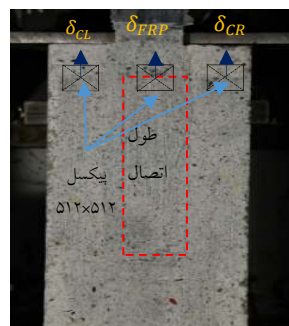


Fig. 6. Slip calculation

در این رابطه مقدار جابه‌جایی مرکز ورق تقویتی در عرض در نظر گرفته می‌شود. مقدار جابه‌جایی متوسط بتن با

شکل ۸. مقایسه نمودار بار-لغزش نمونه تقویت شده

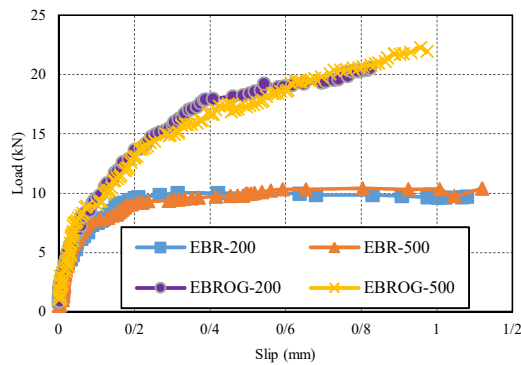


Fig. 8. Load-Slip curves

شکل ۹. مقایسه تنش ماکزیمم در چرخه‌های مختلف یخزدن-آب‌شدن

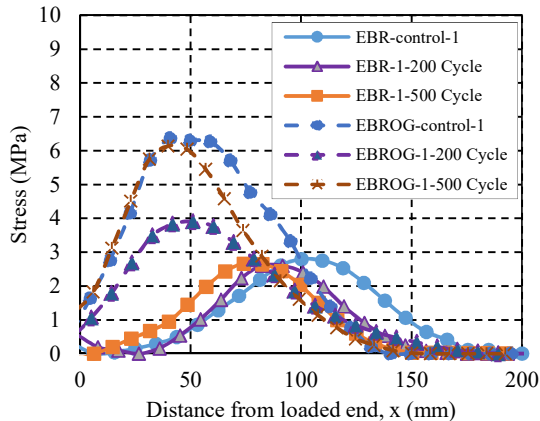


Fig. 9. Comparison of maximum stress measurements along the CFRP-concrete bond in different control and experimental conditions

## ۷- نتیجه‌گیری

هدف از انجام مقاله حاضر، بررسی تأثیر آماده‌سازی سطح روی رفتار اتصال سطح بتن-FRP در آزمایش برش مستقیم در شرایط محیطی یخزدن-آب‌شدن و مقایسه آن با شرایط محیطی معمولی بوده است. به همین منظور، منشورهای بتنی با ابعاد  $150 \times 150 \times 350$  میلی‌متر ساخته شد و به روش‌های EBR و EBROG تقویت شدند. نتایج نشان می‌دهد:

۱- در حالت کلی، در محیط استاندارد و در شرایط محیطی نمونه‌های تقویت شده به روش EBROG ظرفیت باربری در حدود  $1/5$  برابر بیشتر از ظرفیت باربری نمونه‌های تقویت شده به روش EBR را تجربه کردند.

۲- مقایسه نتایج نشان می‌دهد در روش EBROG به واسطه وجود شیارهای طولی در سطح نمونه، نه تنها ظرفیت پیوند

شکل ۷- الف) تبدیل مقیاس پیکسل به میلی‌متر؛ ب) شبکه‌بندی نمونه

همراه با مشخص کردن سطح اتصال

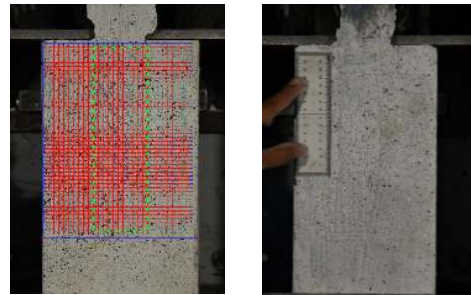


Fig. 7. PIV method

## ۵-۲- بررسی منحنی‌های تنش حداکثر در طول ورق تقویتی

در شکل (۹) مقایسه تنش‌های کنترل و تنش‌های ۲۰۰ و ۵۰۰ چرخه در هر دو روش EBR و EBROG آورده شده است. در نمونه‌های EBR حداکثر تنش ماکزیمم در دو چرخه ۲۰۰ و ۵۰۰ چرخه یخزدن-آب‌شدن به ترتیب  $2/45$  و  $2/09$  مگاپاسکال است و نتایج حاکی از کاهش  $14/7$  درصدی تنش برشی در نمونه‌های تقویت شده به این روش است. در حالی که در نمونه‌های EBROG افزایش تنش برشی حداکثر از ۴ به ۶ مگاپاسکال در چرخه‌های ۲۰۰ و ۵۰۰ چرخه وجود دارد و نه تنها کاهشی مشاهده نشد بلکه افزایش تنش در حدود ۳۳ درصد وجود دارد. علاوه بر این مشاهده می‌شود که نمونه‌های EBROG تنشی در حدود سه برابر تنش برشی نسبت به نمونه‌های EBR تحمل می‌کنند. در تمامی نمونه‌های EBROG شکست از نوع پارگی ورق FRP بوده و از حداکثر ظرفیت کششی ورق استفاده شده است. در نمونه‌های EBR شکست از نوع جداسازی ورق از سطح بتن می‌باشد. در هر دو روش مشخص است که با افزایش چرخه یخزدن-آب‌شدن تنش ماکزیمم در طول محدودتری از نمونه رخ می‌دهد. در نمونه‌ها EBR و EBROG اندازه‌ی تنش ماکزیمم در ۲۰۰ و ۵۰۰ چرخه به ترتیب در طول  $91,82$ ،  $51$  و  $39$  میلی‌متر رخ می‌دهد.

- externally reinforced with composite fabrics. *Construction and Building Materials*, 9(3).
- [8] Mohammadi, M. 2018. Environmental effects on the debonding of FRP-to-concrete surface using EBROG and EBR techniques Ph.D. thesis, Iran, Tabriz.
- [9] Mostofinejad, D., and Hajirasouliha. M.J. 2013. Effect of concrete strength and groove dimension on performance of grooving method to postpone debonding of FRP sheets in strengthened concrete beams. *IJST. Transactions of Civil Engineering*. 37(C2): 219-232.
- [10] Mostofinejad, D., and Moghaddas, A. 2014. Bond efficiency of EBR and EBROG methods in different flexural failure mechanisms of FRP strengthened RC beams. *Construction and Building Materials*. 54: 605-614.
- [11] Mostofinejad, D., and Tabatabaei, A. 2013. Experimental study on effect of EBR and EBROG methods on debonding of FRP sheets used for shear strengthening of RC beams. *Composites: Part B*. 45(1): 1704-1713.
- [12] Mostofinejad, D., and Shameli, S.M. 2013. Externally bonded reinforcement in grooves (EBRIG) technique to postpone debonding of FRP sheets in strengthened concrete beams. *Construction and Building Materials*. 38: 751-758.
- [13] Mostofinejad, D., Shameli, S.M., and Hosseini, A. 2012. Experimental study on the effectiveness of EBROG method for flexural strengthening of RC beams," *Proc. Proceedings of sixth international conference on FRP composites in civil engineering*, Rome, Italy.
- [14] Mostofinejad, D., and Mahmoudabadi, E. 2010. Grooving as Alternative Method of Surface Preparation to Postpone Debonding of FRP Laminates in Concrete Beams. *Journal of Composites for Construction*. 14(6): 804-811.
- [15] Hosseini, A., Mostofinejad, D., Hajialilue-Bonab, M. 2014. Displacement and strain field measurement in steel and RC beams using particle image velocimetry. *J Eng Mech*. 140 (11).
- [16] Hosseini, A., and Mostofinejad, D. 2013. Experimental investigation into bond behavior of CFRP sheets attached to concrete using EBR and EBROG techniques. *Composites Part B*. 51: 130-139.
- [17] ASTM C310-71. 1971. Standard test method
- افزایش می‌یابد؛ بلکه امکان افزایش ظرفیت پیوند در شرایط محیطی در مدت زمان بررسی شده نسبت به محیط استاندارد وجود دارد. در حالی که در روش EBR، کاهش مقاومت رخ داده و هیچ‌گونه افزایش مقاومتی وجود نداشت. به نظر نگارنده، کاهش ظرفیت پیوند برای نمونه‌های EBROG در مدت زمان‌های طولانی‌تر به‌طور قطع وجود دارد ولی این افزایش زمان سبب می‌شود که نمونه‌های EBR مقاومت ناچیزی در مقابل بارگذاری داشته باشند و عملاً امکان مقایسه وجود نداشته باشد.
- ۳- شیب نمودار بار-لغزش نشان دهنده سختی اتصال است. در نمونه‌های EBR سختی اتصال در حدود ۵۰ درصد سختی اتصال نمونه‌های EBROG می‌باشد. در چرخه یخ‌زدن-آب شدن در هر دو روش تقویت چه در ناحیه خطی و چه در ناحیه غیرخطی تغییر محسوسی در سختی ایجاد نشد.
- ۸- مراجع**
- [1] FIB, 2001. Externally bonded FRP reinforcement for RC structures. *FIB Bulletin* 14. International Federation for Structural Concrete.
- [2] Kaiser, H., 1989. *Bewehren von stahlbeton mit kohlenstoffserverstärkten epoxiharzen*. Ph.D. thesis, Diss ETH Nr. 8918. EMPA, Zurich, Switzerland.
- [3] Cho, K., S.Y. Park, S.T. Kim, J.R. Cho, and B.S. Kim, 2013. Freeze-Thaw Effect on Coarse Sand Coated Interface between FRP and Concrete Engineering. 5: 807-815.
- [4] Green, M.F., K.A. Soudki., and M.M. Johnson, 1997. Freeze-thaw behaviour of reinforced concrete beams strengthened by fibre-reinforced sheets. *Proceedings of the Annual Conference of the Canadian Society for Civil Engineering*, Sherbrooke, Qué, pp. 31-39.
- [5] H. Toutanji, P. Balaguru, Durability characteristics of concrete columns wrapped with FRP tow sheets. *1998 Materials Science Journal of Materials in Civil Engineering*, DOI:10.1061/(ASCE)0899 1561(1998)10:1(52).
- [6] Green, M.F., Dent, A.S., and Bisby, L.A. 2003. Effect of freeze-thaw cycling on the behavior of reinforced concrete beams strengthened in flexure with fiber reinforced polymer sheets. *Civil Engineering*. 30: 1081-1088.
- [7] Chajes, M.J., T.A. Thomson, J. Farschman and A. Cory. 1995. Durability of concrete beams



- for resistance of concrete to freezing and thawing. American Society for Testing and Materials. West Conshohocken.PA. ASTM International.
- [18] Arefian. B., and Mostofinejad, D. 2021. Experimental Investigation and Modeling of FRP–Concrete Joint Bond Strength Based on Failure Depth. American Society of Civil Engineers (ASCE), **25**(6): 0402105
- [19] Adrian R. J. 1991. Particle-imaging methods for experimental fluid mechanics. Annu. Rev. Fluid Mech. **23**(1): 261–304.
- [20] White, D. J., Take, W. A., and Bolton, M. D. 2003. Soil deformation measurement using particle image velocimetry (PIV) and photogrammetry. Geotechnique. **53**(7): 619–631.

## Effect of Freeze–Thaw Cycles on FRP-Concrete Bond Strength in EBR and EBROG Systems

Mohammadi Mahdie<sup>1</sup>, Mostofinejad Davood<sup>2</sup>

1- PhD in Civil Engineering, Tabriz University

2- Professor., Dept. of Civil Engineering, Isfahan Univ. of Technology (IUT)

\*Mahdie.mohammadi67@yahoo.com

### Abstract

Numerous studies have been devoted to the investigation of the deterioration and behavior of fiber-reinforced polymer (FRP) sheets (made from a variety of materials such as carbon, glass, or aramid) bonded onto the concrete substrate under a variety of adverse environments. Results indicate that environmental conditions might exercise significant and undesirable effects on FRP-concrete bond performance. In many corrosive environments, there are the potential risks of premature debonding and failure of the bonding interface in externally bonded FRP-strengthened concrete structures. The effects of freeze–thaw cycles on the fiber-reinforced polymer (FRP)-to-concrete bond strength were investigated using the particle image velocimetry (PIV) technique. For this purpose, 18 specimens were prepared, including 12 specimens strengthened with carbon FRP (CFRP) strips as well as six control specimens subjected to 200 and 500 freeze–thaw cycles, each consisting of four steps according to ASTM C 666. In the first stage, the temperature was held constant at 5°C for 4.2 h. The next step involved rapid freezing to –18°C for 2.4 h. In the third step, the temperature was held constant at –18°C for 2.4 h. Finally, the temperature was raised and maintained at 5°C for 3 h in the fourth step. The freeze–thaw under wet conditions was selected in order to create harsher conditions than the dry freeze–thaw conditions would. According to ASTM C 666, the specimens were stored in saturated lime water from the time of their removal from the molds until the time of freezing and thawing tests started. In addition, the nominal freezing and thawing cycle consisted of alternately lowering the temperature of the specimens from +5 to –18°C and raising it from –18 to +5°C in not less than 2 nor more than 5 h. The freezing and thawing chamber was equipped with a user defined program. The temperature range of the chamber was –30°C to +65°C. The temperature was controlled by a sensor, which can be immersed either into the sample or into the water in which the sample was placed. The specimens were strengthened via externally bonded reinforcement (EBR) and externally bonded reinforcement on grooves (EBROG) methods. After the concrete prisms had been subjected to 200 and 500 freeze–thaw cycles, they were placed in the single shear test machine. During each test run, a tensile force was applied to the FRP composite while the concrete block was restrained from movement. The single shear test machine consisted of a hydraulic jack with a capacity of 400 kN that provided the required force for the single shear test. Moreover, a load-cell with a capacity of 50 kN was used to measure the force applied to the specimens. In the current investigation, the specimens were subjected to a quasi-static loading of 2 mm/min in accordance with ASTM D3039/D3039M. The results of PIV measurements revealed that, compared with the specimens strengthened via the EBR method, the EBROG-strengthened specimens exhibited considerably enhanced bond performance. When subjected to 200 and 500 freeze–thaw cycles, the EBR-strengthened specimens experienced a 3% and 9% decrease in their bond strength, respectively; the EBROG-strengthened specimens experienced no decrease in bond strength and increases in the range of 7%–19% when subjected to 200 and 500 cycles, respectively.

**Keywords:** EBROG, Debonding, Freeze–thaw cycles; Fiber-reinforced polymer (FRP); Durability; Bond behavior