مجله علمی – پژوهشی مهندسی عمران مدرس دوره بیست و سوم، شماره۱، سال۱۴۰۲



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

مهدیه محمدی'\*، داود مستوفینژاد<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

### چکیدہ

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 ۱۵۰×۵۰۰×۳۰۰ میلی متر با مقاومت فشاری ۳۵ مگاپاسکال ساخته شد و بعد از تقویت به دو روش ۱) نصب خارجی سطحی (<sup>۱</sup>EBR) و ۲) نصب خارجی سطحی روی شیار (<sup>۱</sup>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 چرخه-مانتیگراد کاهش یابد، انتخاب شد. همچنین در این استاندارد ۳۰۰ چرخه پیشنهاد شده است که در این پژوهش سعی بر آن شد که تعداد چرخه-آزمایش برش مستقیم یک طرفه و نرمافزار ۲۰۰۲ چرخه استفاده شد. نتایج حاصل از آزمایش برش مستقیم شامل مقاومت پیوند اتصال FRP به مانتیگراد کاهش یابد، انتخاب شد. همچنین در این استاندارد ۳۰۰ چرخه پیشنهاد شده است که در این پژوهش سعی بر آن شد که تعداد چرخه-مسانتیگراد کاهش یابد، انتخاب شد. همچنین در این استاندارد ۳۰۰ چرخه پیشنهاد شده است که در این پژوهش سعی بر آن شد که تعداد چرخه-مسانتیگراد کاهش یابد، انتخاب شد. همچنین در این استاندارد ۳۰۰ چرخه پیشنهاد شده است که در این پژوهش سعی بر آن شد که تعداد چرخه-مسانتیگراد کاهش یابد، انتخاب شد. همچنین در این استاندارد ۳۰۰ چرخه پیشنهاد شده است که در این پژوهش سعی بر آن شد که تعداد چرخه-معرای 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 اخذش میباشد. نتایج نشان می مودش EBR در شرایط محیطی استاندارد آزمایشگاهی و شرایط محیطی مختلف در حدود دو برابر روش BRB است.

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

<sup>1.</sup> Externally bonded reinforcement

Y. Externally bonded reinforcement on groove

### ۱ - مقدمه

به طوركلي، سازه هاي بتني قبل از تقويت با الياف FRP ممكن است ترکهایی داشته باشند و بعضی از این ترکها بین سطح تماس بتن و اين الياف باشند [1]. يخزدن آب در بين اين ترک-ها، ممکن است سبب جداشدگی FRP از سطح بتن، ایجاد ریز ترک در ماتریس، تخریب در پیوند ماتریس-الیاف و حتی آسيب در خود الياف شود؛ بنابراين تأثير يخ 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 سانتی گراد 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 ۱۰۰×۱۰۰×۴۵۰ میلیمتر تحت ۵۰، ۰۱۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ چرخه یخ زدن – آب شدن با شرایط دمای<u>ی</u> بین ۱۸– تا ۴ درجه سانتی گراد 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 ۱۰۰×۱۵۰×۱۲۲۰ 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- آبشدن زمانی که بتن از کیفیت مطلوب برخوردار نباشد، می تواند آثار مخربی داشته باشد [6]. چاجس<sup>4</sup> و همکاران [7] در سال ۱۹۹۵ به بررسی دوام تیرهای بتنی تقویت شده با استفاده از الیاف آرامید، شیشه و گرافیت به روش BBR پرداختند. به همین منظور ۲۴ عدد نمونه بتنی در معرض یخزدن- آبشدن 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 جداشدگی وجود نداشت در شکست به دلیل جداشدگی ورق از سطح بتن، و در الیاف شکست به دلیل جداشدگی 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 تاثیر چرخه یخزدن-آب شدن بر پیوند بتن و الیاف FRP به روش EBR است، چرخه یخ زدن- آبشدن روی کامپوزیتهای FRP در محدوده دمایی متداول ۲۰– تا ۳۰ درجهی 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 ٪ ۲/۴ 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، تنشرهای 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 فايبر و يا در سطح مشترک رزين و بتن می شوند [8]. در اين 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

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٬ 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. کرنش ها 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 RBR از روش EBROG

۱.Adrian

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

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

در این مطالعه ۱۸ نمونه بتنی با ابعاد ۱۵۰×۱۵۰×۳۵۰ میلی متر با مقاومت فشاری ۳۵ مگاپاسکال ساخته شده است. طرح اختلاط بتن در جدول (۱) آورده شده است. نمونه ها به مدت ۲۸ روز در آب با دمای ۲۳ درجه سانتی گراد نگهداری شدند. علاوه بر نمونه های اصلی، نمونه های استوانه ای به ارتفاع ۲۰۰ و قطر ۱۰۰ میلی متر برای تعیین مقاومت فشاری بتن ساخته شد. جدول ۱. طرح اختلاط بتن استفاده شده

	W/C	Water (Kg/m3)	Cement (Kg /m3)	Sand (Kg /m3)	Gravel (Kg /m3)	Compressive strength (MPa)	Slump (mm)		
	0.57	216	380	1256	538	35	75- 100		
<b>Table 1.</b> The concrete mix used به منظور مقاومسازی نمونههای بتنی، کامپوزیت CFRP از									

به منظور مقاومسازی نمونههای بتنی، کامپوزیت CFRP از محصول SikaWrap-230C که از جنس الیاف کربن می باشد 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 قر نمونه با استفاده از پمپ هوا از هر گونه گرد و غبار و آلودگی تمیز می شود. در ادامه محل چسباندن CFRP روی سطح نمونه مشخص می شود و یک لایه چسب روی سطح بتن زده می شود. و با رزین اشباع می شود.

ف	مصر	۰	مه	ىت	کامبو ز	فنر	خصات	مشخ	۲	حدول

	5. 55		-3	•
Name	Туре	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

۲.White

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



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 سانتی گراد بالا رود و از دمای ۴+ به ۱۸ – درجه سانتی گراد 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

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-





Fig. 3. Specimens in the machine

# ۴- انجام آزمایش

۹-۱- آزمایش برش مستقیم
دستگاه آزمایش برش مستقیم ساخته شده در دانشگاه صنعتی
دستگاه آزمایش برش مستقیم ساخته شده در دانشگاه صنعتی
اصفهان در سال ۱۳۹۱ مجهز به یک جک هیدرولیکی ۲۰۰
کیلونیوتن 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 می گیرد. در تحقیق حاضر به منظور ارزیابی
میدان لغزش از روش VIV

مجله علمی – پژوهشی مهندسی عمران مدرس

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 بی سیم 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- نتايج

1-4- تحليل نتايج مقاومت جداشدگی

در جدول (۳) و نمودار میلهای شکل (۵) نتایج به دست آمده از آزمایش های انجام شده روی نمونه های 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 نمونه های قرار گرفته شده در محیط استاندارد می شود. می توان این کاهش مقاومت را ناچیز در نظر گرفت. نتایج گرفته شده مشابه نتایج

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

بعد از ۲۰۰ و ۵۰۰ چرخه یخزدن – آبشدن

Specimens	f <sub>c</sub> (MPa)	Ultimate bond load (kN)	Average bond stress (load/bond ed 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

۱/ سال ۱۴۰۲	/ شماره	يست و سوم	دوره ب	
	34.4	9.71	1.01	
EBR-500	34.7	10.27	1.07	
	25.2	0.22	0.06	

EBR-500	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

D

**Table 3.** Specifications of the specimens and test results شکل ۵– میانگین مقاومت جداشدگی CFRP از سطح بتن بعد از ۲۰۰ و ۵۰۰ چرخه یخزدن-آبشدن



Fig. 5. Bar charts for strengthened specimens در نمونههای EBR نوع شکست، جداشدگی ورق CFRP از سطح بتن است؛ در حالي كه ضخامت بـتن چسـبيده بـه ورق بسيار ناچيز است (شكل ۶). همچنين تـنش ميـانگين نمونـههـا تحت تأثیر شرایط محیطی از ۱/۰۷ در شرایط محیطی استاندارد به ۱/۰۴ و ۱/۹۷ مگایاسکال در ۲۰۰ و ۵۰۰ چرخه کاهش ییدا کرده است. در روش EBROG برخلاف روش EBR، چرخـه یخ زدن آب شدن سبب افزایش مقاومت پیوند به اندازه ۷ و ۱۳ درصد بعد از ۲۰۰ و ۵۰۰ چرخه نسبت به نمونه کنترل می شود. در این روش، نوع شکست در تمامی نمونه های قرار گرفته شده در ۲۰۰ و ۵۰۰ چرخه، یارگی ورق CFRP بود. و می توان این نوع شکست را دلیل افزایش مقاومـت پیوسـتگی در هـر دو چرخه دانست (شکل ۶). همچنین در نمونههای EBROG اندازه تـنش میـانگین در بـار مـاکزیمم از ۱/۹۵ مگاپاسـکال در محیط استاندارد به ۲/۰۸ و ۲/۳۲ مگاپاسکال در ۲۰۰ و ۵۰۰ چرخه افزایش یافته است.

تأثیر چرخه یخ زدن – آب شدن بر مقاومت اتصال نمونههای...

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

مهدیه محمدی و داود مستوفی نژاد

اف) EBROG ب EBROG (ف

Fig. 6. Different failure modes

۵-۲- بررسی منحنی های بار - لغزش ورق های تقویتی بررسی رفتار اتصال ورق های تقویتی نصب شده به سطح بتن در نمونه های آزمایشگاهی تحت برش مستقیم و به دست آوردن نمودار بار - لغزش، با استفاده از روش VIV در نرمافزار GeoPIV 2008 امکان پذیر است. لغزش، مقدار جابه جایی ورق تقویتی نسبت به بتن است. به منظور حذف حرکت احتمالی بتن و تغییر شکل های تکیه گاه و محاسبه جابه جایی مطلق ورق تقویتی، یک شبکه بندی 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 [11].

(1) 
$$\frac{\frac{\kappa_{i}(\gamma_{i})+\delta_{i}(\gamma_{i})}{2}}{m\lambda d} = \frac{\delta_{i}(\gamma_{i})}{2} - \frac{\delta_{i}(\gamma_{i})}{2} + \frac{$$



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

میانگین گیری جابهجایی رخ داده در طرفین ورق تقویتی و در ارتفاع يكسان از لبه بتن محاسبه مي شود. با استفاده از رابطه مذكور با حذف حركت و جابهجايي احتمالي نمونه بتني، مي توان مقدار لغزش در لبه شروع اتصال ورق تقویتی در سمت انتهای بارگذاری شده را محاسبه کرد. با استفاده از روش PIV و تحلیل عکس های 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 اندازه-گیری پیکسل است و جابهجاییهای به دست آمده در تحلیل PIV همه بر اساس پیکسل می باشند. 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 تبدیل کننده واحد پیکسل به میلیمتر بود، در نتایج ضرب شده و جابه-جاییها 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 می شود 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 جزئي افزايش پيدا ميكند. براي نمونه در نمودار نشان داده شده، لغزش در نمونههای EBR و EBROGاز ۱/۰۷ و ۱/۰۲ 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.

#### دوره بیست و سوم / شماره ۱/ سال ۱۴۰۲









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

### ۷- نتیجه گیری

هدف از انجام مقاله حاضر، بررسی تأثیر آمادهسازی سطح روی رفتار اتصال سطح بنن-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 معمولی یوده است. به همین منظور، منشورهای بتنی با ابعاد BBROG تقویت شدند. نتایج نشان می دهد:

۱- در حالت کلی، در محیط استاندارد و در شرایط محیطی نمونههای تقویت شده به روش EBROG ظرفیت باربری در حدود ۱/۵ برابر بیشتر از ظرفیت باربری نمونههای تقویت شده به روش EBR را تجربه کردند.

۲- مقایسه نتایج نشان میدهـد در روش EBROG بـه واسـطه وجود شیارهای طولی در سطح نمونه، نـه تنهـا ظرفیـت پیونـد

#### مجله علمی – پژوهشی مهندسی عمران مدرس

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

همراه با مشخص کردن سطح اتصال





۵-۲- بررسی منحنیهای تنش حـداکثر در طـول ورق تقویتی

در شکل (۹) مقایسه تنش های کنتـرل و تـنش.هـای ۲۰۰ و ۵۰۰ چرخه در هر دو روش EBR وEBROG آورده شده است. در نمونه های EBR حداکثر تنش ماکزیمم در دو چرخه ۲۰۰ و ۵۰۰ چرخه یخزدن-آبشدن به ترتیب ۲/۴۵ و ۲/۰۹ مگاپاسکال است و نتایج حاکی از کاهش ۱۴/۷ درصدی تـنش برشی در نمونه های تقویت شده به این روش است. در حالی که در نمونههای EBROG افزایش تنش برشی حداکثر از ۴ بـ ۶ مگاپاسکال در چرخههای ۲۰۰ و ۵۰۰ چرخه وجود دارد و نـه تنها کاهشی مشاهده نشد بلکه افزایش تـنش در حـدود ۳۳ درصد وجود دارد. علاوه بر این مشاهده می شود که نمونه های EBROG تنشى در حدود سه برابر تنش برشى نسبت به نمونـه-های 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 جداشدگی ورق از سطح بنن میاشد. در هر دو روش مشخص است که با افزایش چرخیه یخزدن-آبشدن تنش ماکزیمم در طول محدودتری از نمونه رخ میدهد. در نمونه ها ی EBR و EBROG اندازهی تنش ماکزیمم در ۲۰۰ و ۵۰۰ چرخه به ترتیب در طول ۹۱،۸۲، ۵۱ و ۳۹ میلیمتر رخ میدهد.

مهدیه محمدی و داود مستوفی نژاد

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 هیچ گونه افزایش مقاومتی وجود نداشت. به نظر نگارنده، کاهش ظرفیت پیوند برای نمونههای EBROG در مدت زمان-های طولانی تر به طور قطع وجود دارد ولی این افزایش زمان سبب می شود که نمونه های EBR مقاومت ناچیزی در مقابل بارگذاری داشته باشند و عمالاً امکان مقایسه وجود نداشته

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 kohlenstoffserverstarkten 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

دوره بیست و سوم/ شماره ۱/ سال ۱۴۰۲

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. Ge'otechnique. 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 fiberreinforced 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  $-18^{\circ}$ C and raising it from -18 to  $+5^{\circ}$ 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  $-30^{\circ}$ C to  $+65^{\circ}$ 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 EBRstrengthened specimens experienced a 3% and 9% decrease in their bond strength, respectively; the EBROGstrengthened 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