



تأثیر چرخه یخ زدن - آب شدن بر مقاومت اتصال نمونه های بتی تقویت شده به روش های EBR و EBROG

مهدیه محمدی^{۱*}، داود مستوفی نژاد^۲

۱- دکتری عمران-سازه، کارمند شهرداری بهارستان اصفهان

۲- استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

* Mahdie.mohammadi67@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۲/۲۰

چکیده

در سال های اخیر استفاده زیادی از مواد پلیمری برای تقویت تیرها، ستون ها و دال ها شده است و تحقیقات زیادی به صورت عددی و آزمایشگاهی انجام گرفته است؛ ولی اطلاعات کمی در مورد دوام و پایایی آن ها 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. نمونه های بتی با ابعاد $150 \times 150 \times 350$ میلی متر با مقاومت فشاری ۳۵ مگاپاسکال ساخته شد و بعد از تقویت به دو روش (۱) نصب خارجی سطحی (EBR) و (۲) نصب خارجی سطحی روی شیار (EBROG)، در شرایط محیطی قرار گرفتند. شرایط محیطی شامل 200° و 500° چرخه یخ زدن-آب شدن است. چرخه یخ زدن-آب شدن با توجه به پیشنهاد استاندارد ASTM-C666 که دما به صورت متناوب از -18° تا $+4^{\circ}$ درجه سانتی گراد بالا رود و از دمای $+4^{\circ}$ به -18° درجه سانتی گراد کاهش یابد، انتخاب شد. همچنین در این استاندارد 300° چرخه پیشنهاد شده است که در این پژوهش سعی بر آن شد که تعداد چرخه های بالاتر (500° چرخه) و پایین تر (200° چرخه) از پیشنهاد آینن نامه مورد بررسی قرار گیرد. بعد از خارج کردن نمونه ها از شرایط محیطی از آزمایش برش مستقیم یک طرفه و نرم افزار GeoPIV استفاده شد. نتایج حاصل از آزمایش برش مستقیم شامل مقاومت پیوند اتصال به سطح بتن و نمودارهای بار-لغزش می باشد. نتایج نشان می دهد که روش EBROG به عنوان یک روش جایگزین بسیار مناسب نسبت به روش EBR است؛ به صورتی که ظرفیت برابری 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، جداشگی

۱. Externally bonded reinforcement

۲. Externally bonded reinforcement on groove

۱- مقدمه

مخربی داشته باشد و سبب کاهش مقاومت و شکل پذیری نمونه ها شود [5]. همچنین چرخه یخ زدن-آب شدن زمانی که بتن از کیفیت مطلوب برخوردار نباشد، می تواند آثار مخربی داشته باشد [6]. چاجس^۴ و همکاران [7] در سال ۱۹۹۵ به بررسی دوام تیرهای بتونی تقویت شده با استفاده از الیاف آرامید، شیشه و گرافیت به روش EBR پرداختند. به همین منظور ۲۴ عدد نمونه بتونی در معرض یخ زدن-آب شدن قرار گرفتند. نتایج نشان داد قرار دادن نمونه ها در محیط سبب کاهش پیوستگی بین سطح بتن و FRP شد و کاهش مقاومت نهایی ممکن است سبب تغییر مدد شکست تیرها شود. برای نمونه در تیرهای کنترل مشکل جدادشگی وجود نداشت در حالی که در همه تیرهای تقویت شده با الیاف آرامید نوع شکست به دلیل جدادشگی 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 یخ زدن-آب شدن بر پیوند بتن و الیاف FRP به روش EBR است، چرخه یخ زدن-آب شدن روی کامپوزیت های FRP در محدوده دمایی متداول ۲۰-۳۰ درجه سانتی گراد تأثیر ناچیزی دارد و حائز اهمیت نیست. برای نمونه، کامپوزیت های ساخته شده از فایبرهای شیشه ای که به طور متداول در دسترس هستند، در حدود ۰/۴٪ حفره دارند که اجازه یخ زدگی قابل توجهی را نداده و امکان هیچ گونه آسیب جدی را فراهم نمی کنند. 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، تنش های پسماند در کامپوزیت های FRP به دلیل تفاوت های موجود در ضرایب انبساط حرارتی در اجزای موجود ریز ساختار ماده، به وجود می آید؛ که این تنش ها منجر به تشکیل ریز ترک ها در رزین ماتریس، در سطح مشترک رزین و فایبر و یا در سطح مشترک رزین و بتن می شوند [8]. در این مقاله از روش سرعت سنجی تصویری ذرات (PIV) نیز استفاده شده است. این روش قابلیت ارزیابی میدان جایه جایی و تغییر

به طور کلی، سازه های بتونی قبل از تقویت با الیاف FRP ممکن است ترک هایی داشته باشند و بعضی از این ترک ها بین سطح تماس بتون و این الیاف باشند [1]. یخ زدن آب در بین این ترک ها، ممکن است سبب جدادشگی FRP از سطح بتن، ایجاد ریز رفتار سازه های 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 در شدن از دمای ۲۵-۲۰ درجه سانتی گراد بررسی کرد؛ نتایج نشان داد چرخه یخ زدن-آب شدن تأثیر قابل توجهی در رفتار نمونه ها در مقایسه با تیرهای کنترل ندارد. چو^۵ و همکاران [3] در سال ۲۰۱۳ تأثیر یخ زدن-آب شدن، روی پوشش شن زیر انتخاب شده بین سطح تماس عرضه بتونی و FRP را بررسی کردند. ۸ نمونه بتونی با ابعاد $450 \times 100 \times 100$ میلی متر تحت ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ چرخه یخ زدن-آب شدن با شرایط دمایی بین ۱۸-۴ درجه سانتی گراد به مدت ۲ تا ۵ ساعت قرار گرفتند. نتایج، تفاوت تقریباً ۵٪ را در مقاومت شکست سطح تماس بتون FRP در ۳۰۰ چرخه یخ زدن-آب شدن قرار نگرفتند را با نمونه هایی 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 نمونه ها تأثیر چندانی ندارد و عرضه بتون FRP توانایی دوام در مقابل چرخه یخ زدن-آب شدن را دارد. گرین^۶ و همکاران [4] در سال ۲۰۰۳ به بررسی ۲۷ نمونه تیر بتن مسلح با ابعاد $1220 \times 150 \times 100$ میلی متر پرداختند. نمونه ها تحت ۵۰ و ۲۰۰ چرخه یخ زدن و آب شدن قرار گرفتند. نتایج نشان داد که چرخه یخ زدن-آب شدن تأثیر زیادی بر مقاومت نمونه های بتون مسلح و یا نمونه های تقویت شده با ورق های FRP ندارد. با این حال بعضی از پژوهشگران هم به این نتیجه رسیدند که چرخه یخ زدن-آب شدن می تواند آثار

^۱. Kaiser^۲. Cho^۳. Green

شايانى به تعمير و تقويت سازهای محصور شده با FRP در آب و هوای سرد کند.

۲- مراحل انجام آزمایش

۱- ساخت و تقويت نمونه‌ها

در اين مطالعه ۱۸ نمونه بتني با ابعاد $150 \times 150 \times 350$ ميلى متر با مقاومت فشاري ۳۵ مگاپاسکال ساخته شده است. طرح اختلاط بتني در جدول (۱) آورده شده است. نمونه‌ها به مدت ۲۸ روز در آب با دماي ۲۳ درجه سانتي گراد نگهداري شدند. علاوه بر نمونه‌های اصلی، نمونه‌های استوانه‌ای به ارتفاع ۲۰۰ و قطر ۱۰۰ ميلى متر برای تعیین مقاومت فشاري 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

Table 1. The concrete mix used

به منظور مقاوم‌سازی نمونه‌های بتني، 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 تقويت 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 آلوودگی 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 شiar به طول ۲۰۰ ميلى متر، عرض

شكل را در شاخه‌های مختلف مهندسی دارد [17]. در روش PIV سطح مورد بررسی شبکه‌بندی می‌شود و بردار جابه‌جایی هر یک از نقاط شبکه توسط حداقل مقدار تابع همبستگی در دو تصویر متواالی به دست می‌آید. عملیات PIV در حوزه فرکانس با در نظر گرفتن سری فوريه سريع هر نقطه از شبکه انجام می‌شود. اندازه هریک از اعضای شبکه تأثیر چشم‌گیری در دقت روش PIV دارد. آدریان^۱ [19] در سال ۱۹۹۱ این روش را در مکانیک سیالات توسعه داد. در این مطالعه با عکس‌برداری متواالی از سیال مورد نظر و شبکه‌بندی سیال و مقایسه عکس‌های متواالی به ارزیابی میدان جابه‌جایی پرداخت. وايت^۲ 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 خمیشی چهار نقطه‌ای پرداختند. در این مطالعه یک تیر بتني و یک تیر فولادی تحت آزمایش خمیش 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 همانگی خوبی با نتایج حاصل از LVDT و کرنش‌سنجی‌های موجود داشت.

در همه موارد ذکر شده در بالا مشخص است که تاکنون تأثیر آماده‌سازی سطحی در مقاومت پیوند بتن FRP تحت تأثیر EBROG شرایط محیطی مختلف با استفاده از روش نوین EBROG نشده است. در این روش برای آماده‌سازی سطحی از شیارزنانی 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

می شود. طبق این استاندارد آزمایش روی نمونه ها 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 نمونه ها استفاده می شود (شکل ۲). چرخه در نظر گرفته شده شامل دو چرخه ۲۰۰ و ۵۰۰ چرخه می باشد. شکل (۳) چگونگی چیدمان نمونه ها را در دستگاه نشان می دهد. در بین نمونه ها از فاصله دهنده استفاده شده است.

شکل ۲. نمودار تغییرات چرخه یخ زدن-آب شدن

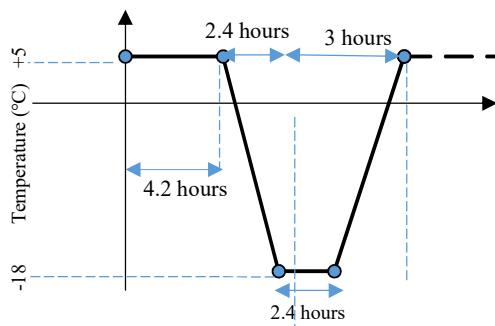


Fig. 2 .Freeze-thaw cycle

شکل ۳ چگونگی چیدمان نمونه ها در دستگاه یخ زدن-آب شدن



Fig. 3. Specimens in the machine

۴- انجام آزمایش

۱- آزمایش برش مستقیم

دستگاه آزمایش برش مستقیم ساخته شده در دانشگاه صنعتی اصفهان در سال ۱۳۹۱ مجهز به یک جک هیدرولیکی ۴۰۰ کیلونیوتن است که نیروی لازم برای انجام آزمایش برش مستقیم را فراهم می کند. علاوه بر این دستگاه برای ثبت نیرو، مجهز به دو نیروسنج در بالا و پایین می باشد. نمونه بتونی تهیه شده در راستای طول در دستگاه محکم می شود 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 PIV استفاده شده است. به همین منظور

و عمق ۱۰ میلی متر روی سطح نمونه ها زده شد. فاصله بر تا بر شیارها ۱۸ میلی متر است. با استفاده از پمپ هوا درون هر شیار به خوبی از هر گونه گرد و غبار و آلودگی تمیز می شود. سپس داخل شیارها با رزین به صورت کامل پر می شود و ورق های CFRP که با ابعاد مشابه روش EBR می باشند روی سطح نمونه ها چسبانده می شوند و سپس با رزین اشباع می شوند [12-13]. شکل (۱-الف) شماتیک هندسی تقویت نمونه ها را نشان می دهد. در شکل (۱-ب و ۱-ج) به ترتیب مقاومت سازی به روش آماده سازی سطحی به طور رایج و به روش شیارزنی آورده شده است.

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

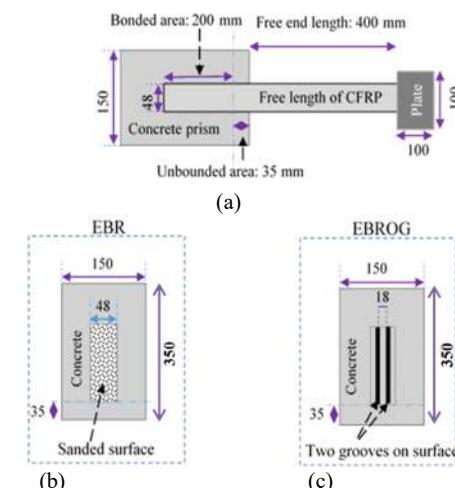


Fig. 1. Specifications of the specimens used;
a)Specimen details, b) EBR method; c) EBROG method

۳- شرایط محیطی چرخه یخ زدن-آب شدن

با توجه به استاندارد ASTM-C666 [16] برای تعیین مقاومت نمونه های بتونی در مقابل چرخه سریع یخ زدن-آب شدن دو روش وجود دارد. روش اول یخ زدن و آب شدن سریع در آب و روش دوم یخ زدن در آب و آب شدن در هوا است. چرخه آب و یخ بندان در هر دو روش باید طوری باشد که دما به صورت متناوب از -18°C تا $+4^{\circ}\text{C}$ درجه سانتی گراد بالا رود و از دمای $+4^{\circ}\text{C}$ به -18°C 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

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

دوربین با دقت حسگر ۳۶ مگا پیکسل به کار گرفته شد. دوربین به فاصله یک متری از نمونه روی سه پایه نصب شده و عکس برداری با استفاده از شاسی بی سیم انجام شد. به منظور حذف اختلالات نوری و تأمین نور و روشنایی کافی در حین عکس برداری 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

Table 3. Specifications of the specimens and test results
شکل ۵- میانگین مقاومت جداشده CFRP از سطح بتن بعد از ۲۰۰ و ۵۰۰ چرخه بخزدن-آب شدن

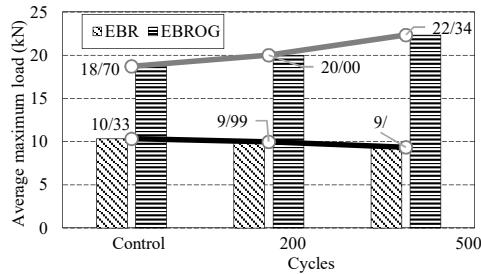


Fig. 5. Bar charts for strengthened specimens

در نمونه‌های EBR نوع شکست، جداشده‌ی 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 بخزدن 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 ماقزیم از ۱/۹۵ مگاپاسکال در محیط استاندارد به ۲/۰۸ و ۲/۳۲ مگاپاسکال در ۲۰۰ و ۵۰۰ چرخه افزایش یافته است.

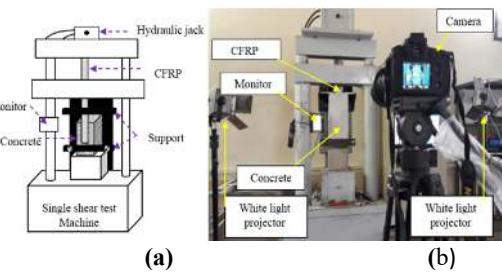


Fig. 4. a) Single shear test setup; b) Specimen test

۵- نتایج

۱-۵- تحلیل نتایج مقاومت جداشده

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 بخزدن-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 [۴-۵] می‌باشد.

جدول ۳. مقاومت جداشده‌ی، تنش میانگین و مود شکست نمونه‌های بتنی بعد از ۲۰۰ و ۵۰۰ چرخه بخزدن-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	D
		34.9	9.87	1.03	D

میانگین گیری جابه جایی رخ داده در طرفین ورق تقویتی و در ارتفاع یکسان از لبه بتن محاسبه می شود. با استفاده از رابطه مذکور با حذف حرکت و جابه جایی احتمالی نمونه بتنی، می 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 نرم افزار GeoPIV 2008 دقت شود، تبدیل مقیاس است. در عکس هایی که در طول بارگذاری گرفته می شود، کوچکترین واحد اندازه گیری پیکسل است و جابه جایی های به دست آمده در تحلیل PIV همه بر اساس پیکسل می باشند. به همین منظور برای تبدیل پیکسل به میلی متر نیاز به داشتن ضریب تبدیل مقیاس است. بنابراین ابتدا مطابق شکل خط کش مناسب مدرج پیش از بارگذاری به صورت افقی و عمودی روی نمونه قرار داده و عکس گرفته می شود. پس از تحلیل به کمک نرم افزار تعداد پیکسل های قرار گرفته شده در خطوط 10×10 میلی متری در چندین نقطه اندازه گرفته شده و ضریب مقیاس که تبدیل کننده واحد پیکسل به میلی متر بود، در نتایج ضرب شده و جابه جایی ها تبدیل به میلی متر شدند. حدود ضرایب مقیاس در این پروژه بین ۱۳ تا ۱۵ پیکسل بر هر میلی متر بود (شکل ۷). نمودار میانگین بار لغزش نمونه های این گروه در شکل (۸) نشان داده شده است. همان طور که ملاحظه می شود با افزایش چرخه یخ زدن - آب شدن سختی نمونه در هر دو روش چه در ناحیه خطی و چه در ناحیه غیر خطی تغییری نمی کند. و فقط لغزش نمونه به صورت جزئی افزایش پیدا می کند. برای نمونه در نمودار نشان داده شده، لغزش در نمونه های EBR و EBR OG از ۱/۰۷ و ۰/۸۲ در ۲۰۰ چرخه به ۱/۱۲ و ۰/۹۷ در ۵۰۰ چرخه افزایش پیدا می کند. به نظر می رسند چرخه یخ زدن آب شدن تأثیر ناچیزی بر رفتار اتصال نمونه های تقویت شده گذاشته است.

شکل ۶. انواع مود شکست در نمونه های تقویت شده به دو روش (الف) EBR، (ب) EBR OG



Fig. 6. Different failure modes

۲-۵- 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 PIV در نرم افزار 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 512×512 پیکسل روی ورق نظر گرفته شد شکل (۶) و مقدار لغزش از رابطه ۱ محاسبه شد [21]

$$\text{لغزش} = \frac{\delta_{بن}(\text{بن}) + \delta_{بن}(\text{بن داست})}{2} \quad (1)$$

شکل ۶. محاسبه لغزش

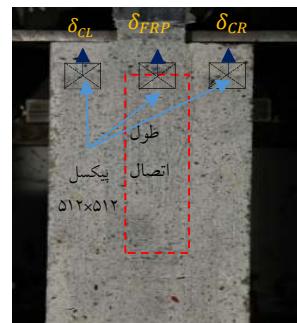


Fig. 6. Slip calculation

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

شکل ۸. مقایسه نمودار بار-لغزش نمونه تقویت شده

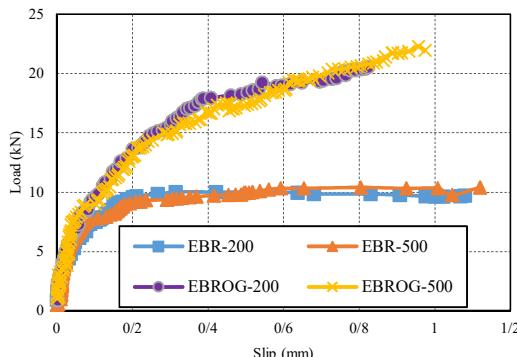


Fig. 8. Load-Slip curves

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

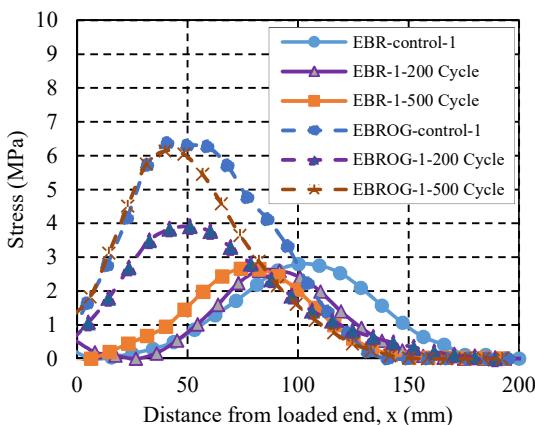


Fig. 9. Comparison of maximum stress measurements along the CFRP-concrete bond in different control and experimental conditions

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 بتونی 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

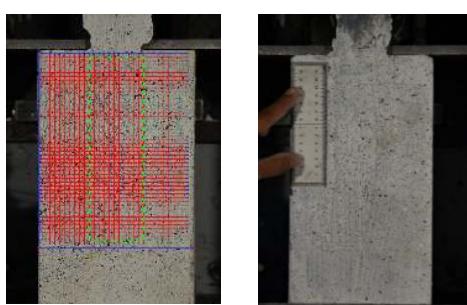


Fig. 7. PIV method

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

در شکل (۹) مقایسه تنش‌های کنترل و تنش‌های 200 و 500 چرخه در هر دو روش EBR و EBROG آورده شده است. در نمونه‌های EBR حداکثر تنش ماکریم در دو چرخه 200 و 500 چرخه یخ‌زدن-آب‌شدن به ترتیب $2/45$ و 209 مگاپاسکال است و نتایج حاکی از کاهش $14/7$ درصدی تنش برشی در نمونه‌های EBROG افزایش تنش برشی حداکثر از 4 به 6 مگاپاسکال در چرخه‌های 200 و 500 چرخه وجود دارد و نه تنها کاهشی مشاهده نشد بلکه افزایش تنش در حدود 33 درصد وجود دارد. علاوه بر این مشاهده می‌شود که نمونه‌های EBROG تنشی در حدود سه برابر تنش برشی نسبت به نمونه 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 جدادگی ورق از سطح بتن می‌باشد. در هر دو روش مشخص است که با افزایش چرخه یخ‌زدن-آب‌شدن تنش ماکریم در طول محدودتری از نمونه رخ می‌دهد. در نمونه‌ها EBR و EBROG اندازه‌ی تنش ماکریم در 200 و 500 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 for externally reinforced with composite fabrics. Construction and Building Materials, 9(3).
- 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 رخداده و هیچ‌گونه افزایش مقاومتی وجود نداشت. به نظر نگارنده، کاهش ظرفیت پیوند برای نمونه‌های EBROG در مدت زمان طولانی تر به طور 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- شب نمودار بار-لغزش نشان دهنده سختی اتصال است. در نمونه‌های EBR سختی اتصال در حدود ۵۰ درصد سختی اتصال نمونه‌های EBROG می‌باشد. در چرخه یخ زدن-آب شدن در هر دو روش تقویت چه در ناحیه خطی و چه در ناحیه غیرخطی تغییر محسوسی در سختی ایجاد نشد.
- ## -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, Québec. 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. *Ge'otechnique*. **53**(7): 619–631.

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

Mohammadi Mahdie¹, Mostofinejad Davood²

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