

تأثیر محیط قلیایی بر مقاومت اتصال نمونه‌های بتنی تقویت شده به روش‌های EBR و EBROG

مهديه محمدی^۱، داود مستوفی نژاد^۲، مجید برقیان^{۳*}، مسعود فرزام^۴

- ۱- دانش‌آموخته‌ی دکترای مهندس عمران و سازه، دانشگاه تبریز
- ۲- استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان
- ۳- دانشیار دانشکده مهندسی عمران و سازه، دانشگاه تبریز
- ۴- استادیار دانشکده مهندسی عمران و سازه، دانشگاه تبریز

*barghian@tabrizu.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۹۵/۱۲/۲۳]

تاریخ دریافت: [۹۵/۰۸/۰۸]

چکیده

الیاف پلیمری تقویت شده (FRP^۱) در مقاوم‌سازی سازه‌های بتنی و فولادی، پل‌ها، مخازن و موارد دیگر به طور گسترده استفاده می‌شوند. وجود محیط‌های مخرب اعم از دمای بالا، محیط قلیایی، اسیدی و موارد دیگر امری اجتناب ناپذیر است و در برخی موارد خرابی‌های جبران ناپذیری را سبب می‌شوند. تأثیر شرایط محیطی مختلف بر مقاومت اتصال بین بتن و FRP به طور پراکنده بررسی و آزمایش شده است. با این وجود مطالعات در این زمینه کافی نیست. به همین منظور در این مقاله تأثیر محیط قلیایی در دماهای مختلف بر مقاومت اتصال بتن-FRP بررسی شده است. مراحل کار به ۴ قسمت تقسیم می‌شود: (۱) ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی، (۲) آماده‌سازی سطحی به دو روش نصب خارجی سطحی (EBR^۲) و نصب خارجی سطحی روی شیار (EBROG^۳)، (۳) تقویت نمونه‌ها با الیاف CFRP و قرار دادن آن‌ها در شرایط محیطی، (۴) بررسی مقاومت پیوند سطح بتن-FRP بعد از خارج کردن نمونه‌ها از شرایط محیطی. مقاومت فشاری نمونه‌ها در حدود ۳۵ مگاپاسکال و مدت زمان نگهداری نمونه‌ها در شرایط محیطی ۳۰۰۰ ساعت است. نتایج نشان می‌دهد که روش EBROG در شرایط محیطی مختلف عملکرد بهتری نسبت به روش EBR دارد و همچنین ظرفیت باربری نهایی نمونه‌های تقویت شده به روش EBROG در حدود ۵۰ درصد بیشتر از ظرفیت باربری نمونه‌های تقویت شده به روش EBR است.

واژگان کلیدی: EBROG، محیط قلیایی، دما، جداشدگی.

1 Fiber reinforced polymer
2 Externally bonded reinforcement
3 Externally bonded reinforcement on groove

۱- مقدمه

با توجه به مطالعات انجام شده، الیاف و میله‌های FRP با توجه به جنس‌شان شامل الیاف کربن، شیشه و یا آرامید مقاومت‌های مختلفی تحت تأثیر شرایط محیطی از خود نشان می‌دهند. در مورد تأثیر شرایط محیطی مختلف بر روی الیاف کربن - الیاف به کار برده شده در این مقاله نیز، مطالعات آزمایشگاهی مختلف انجام شده است. برای نمونه در سال ۲۰۱۰ پژوهشگران به طور گسترده روی ۵۲۵ نمونه که شامل هفت نوع الیاف (شامل الیاف یک و دو محوری شیشه، کربن و آرامید) و یک نوع چسب است آزمایش کششی انجام دادند. نمونه‌ها در ۹ محیط گوناگون با pHهای ۱۰، ۷، ۱۲/۵، ۷/۵، آب دریا، قرار گرفتن نمونه‌ها در مقابل اشعه‌ی فرابنفش، دمای ۵۰ و ۶۰ درجه‌ی سانتی‌گراد با رطوبت نسبی ۹۵٪ و خاک با رطوبت ۲۵٪ قرار گرفتند. آزمایش کشش محوری روی نمونه‌ها بعد از ۶۰۰۰، ۱۲۰۰۰ و ۲۰۰۰۰ ساعت انجام شد. نتایج نشان می‌دهد که ورق‌های CFRP نسبت به شرایط محیطی گوناگون دوام بالاتری دارند. پلیمرهای شیشه نسبت به سایر نمونه‌ها آسیب‌پذیرتر هستند و محیط قلیایی بیشترین تأثیر را روی این پلیمرها دارد [1]. همچنین مطالعات گسترده‌ای بر عملکرد مصالح FRP و پیوستگی FRP به سطح بتن زمانی که تحت تأثیر شرایط محیطی مختلف شامل آب نمک، رطوبت، محیط قلیایی، سیکل یخ زدن ذوب شدن، سوخت دیزل در مدت زمان‌های مختلف توسط پژوهشگران انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که شرایط محیطی مختلف بر صفحات CFRP تأثیر قابل توجهی نگذاشته است. در الیاف کربن تأثیر شرایط محیطی به گونه‌ای است که مقاومت کششی و مدول الاستیسیته از ۹۰٪ نسبت به حالت کنترل کمتر نشده است. الیاف شیشه نیز از دوام کمتری برخوردار هستند [2]. علاوه بر این تأثیر محیط قلیایی در دوره‌های ۰، ۳۰، ۶۰، ۱۲۰ و ۱۵۰ روز روی کامپوزیت‌های کربن و شیشه بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که محیط قلیایی تأثیر ناچیزی بر مقاومت کششی الیاف FRP می‌گذارد [3]. مطالعات انجام شده گویای این مطلب است که کامپوزیت‌های کربن بر خلاف کامپوزیت‌های شیشه به خودی خود در مقابل شرایط محیطی مختلف از مقاومت خوبی

برخوردار است و کمتر تحت تأثیر شرایط محیطی قرار می‌گیرند. علاوه بر این، رزین مورد استفاده برای اشباع این الیاف هم به طور جداگانه مورد بررسی قرار گرفته است. آزمایش‌های مختلف نشان می‌دهد که شرایط محیطی مختلف بر مقاومت کششی رزین تأثیر ناچیزی داشته است [3-4].

بعد از بررسی کامپوزیت‌های FRP نوبت به تأثیر شرایط محیطی بر ترکیب اتصال بتن به FRP می‌رسد. الیاف پلیمری تقویت شده‌ی کربن (CFRP¹) به طور گسترده‌ای در تقویت‌های خمشی، برشی استفاده می‌شوند. توماسو و همکارانش [5] در سال ۲۰۰۱، به بررسی رفتار عددی و آزمایشگاهی نمونه‌های بتنی تقویت شده با کامپوزیت‌های FRP با ابعاد ۱۰۰×۱۰۰×۷۰ میلی‌متر در دماهای بالا و پایین با استفاده از آزمایش خمش سه نقطه‌ای پرداختند. نمونه‌ها با دو نوع ورق CFR تقویت شده و در ۴ دمای متفاوت قرار گرفتند. نتایج نشان داد که با افزایش دما به بالاتر از ۴۰ درجه سانتی‌گراد ظرفیت بار کاهش پیدا می‌کند. سیلوا و بیسکایا [6] در سال ۲۰۰۸، به بررسی تأثیر رطوبت، محیط مه‌آلود نمکی و دما روی پاسخ خمشی تیرهای تقویت شده با کامپوزیت‌های CFRP و CFRP پرداختند. نتایج نشان داد که رطوبت و محیط نمکی تقریباً سبب کاهش ۲۰٪ مقاومت نهایی تیرها می‌شوند. المحمود و همکارانش [7] در سال ۲۰۱۴، به بررسی ۳۶ نمونه-ی بتنی با ابعاد ۱۵۰×۱۵۰×۶۰ میلی‌متر پرداختند. نمونه‌ها با صفحات FRP، ورق‌های FRP و میله‌های FRP مقاوم‌سازی شده و تحت تأثیر شرایط محیطی یخ زدن- ذوب شدن و آب شور قرار گرفتند. نتایج نشان داد که کاهش مقاومت پیوستگی، در نمونه‌های قرار گرفته شده در محلول نمک وجود دارد. در این نمونه‌ها هیچ گونه جداشدگی بتن مشاهده نشده است و این محیط روی چسب بین FRP و بتن و ویژگی‌های شیمیایی چسب، با کاهش ۴۸٪ ظرفیت بار، اثر گذاشته است. همچنین در ورق‌ها و صفحات FRP قرار گرفته شده تحت سیکل یخ زدن- ذوب شدن، کاهش مقاومت پیوستگی به ترتیب ۲۵/۳ و ۲۵/۳ درصد نیز رخ داده است. ینگ و همکارانش [3] در سال ۲۰۱۴ تأثیر سولفات‌ها را روی نمونه‌های تقویت شده با ورق-

1 Carbon fiber reinforced polymer

۲-۲- تقویت نمونه‌ها

نمونه‌ها به چهار گروه ۱۲ تایی A، B، C و D تقسیم شدند و هر گروه به دو زیر گروه ۶ تایی که به روش‌های EBR و EBROG تقویت شده‌اند، دسته‌بندی شدند. گروه A نمونه‌های کنترل شده و در محیط آزمایشگاه قرار گرفتند؛ گروه‌های B، C و D به ترتیب نمونه‌های قرار گرفته شده در محیط قلیایی با دماهای ۲۳، ۴۰ و ۶۰ درجه‌ی سانتی‌گراد است. در روش EBR سطح نمونه‌ها با استفاده از دستگاه سنگ فرز ساب زده شده به صورتی که سنگ دانه‌ها نمایان شدند. سپس سطح هر نمونه با استفاده از پمپ هوا از هر گونه گرد و غبار و آلودگی تمیز می‌شود. در ادامه محل چسباندن FRP بر 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. کامپوزیت CFRP از محصول SikaWrap-230C که از جنس الیاف کربن است، و همچنین چسب اپوکسی Sikadur-300 ساخته شده است. در روش EBROG دو شیار به طول ۲۰۰ میلی‌متر، عرض و عمق ۱۰ میلی‌متر روی سطح نمونه‌ها زده شد. فاصله‌ی بر تا بر شیارها ۸۰ 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 است روی سطح نمونه‌ها چسبانده می‌شوند و سپس با رزین اشباع می‌شوند. ورق‌های CFRP دارای طول ۷۳۵ میلی‌متر، عرض ۴۸ میلی‌متر و ضخامت ۰/۱۳۱ میلی‌متر بودند. طول ۷۳۵ میلی‌متر به سه قسمت تقسیم شد: (۱) طول اتصال موثر ۲۰۰ میلی‌متر بود که به سطح بتن چسبانده شد، (۲) برای جلوگیری از تمرکز تنش در ۳۵ میلی‌متر از ابتدای نمونه، CFRP در طول ۳۵ میلی‌متر از لبه‌ی نمونه‌ی بتنی به سطح بتنی چسبانده نشد [12-13] و (۳) ۵۰۰ میلی‌متر طول آزاد CFRP بود که در انتها به فک دستگاه برسد و در داخل آن قرار بگیرد.

های FRP با استفاده از آزمایش برش مستقیم آزمایش کردند. نتایج نشان داد که محیط قلیایی سبب کاهش مقاومت پیوند بین سطح بتن و FRP می‌شود. در بیشتر مطالعات بالا روش‌های تقویت بر اساس روش نصب در نزدیک سطح (NSM) و یا EBR بوده است. در سال‌های اخیر روش نوین EBROG برای اولین بار به وسیله مستوفی‌نژاد و محمود آبادی [8] در شرایط محیطی معمولی مورد استفاده قرار گرفت. بعد از آن این روش به صورت گسترده و پیوسته در تقویت خمشی و برشی نمونه‌های مختلف استفاده شد و با سایر روش‌های تقویت دیگر مقایسه شد. نتایج مطالعات مختلف نشان داد که روش EBROG ظرفیت باربری نهایی، شکل‌پذیری و جذب انرژی بالاتری را نسبت به روش‌های دیگر دارد [9-12].

در همه‌ی 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. به همین منظور در این مقاله علاوه بر آماده‌سازی سطحی به روش EBR از روش EBROG نیز استفاده می‌شود و نمونه‌ها در شرایط محیطی مختلف قرار می‌گیرند و با یکدیگر مقایسه می‌شوند.

۲- مراحل انجام آزمایش

۲-۱- ساخت نمونه‌ها

در این مطالعه ۳۶ نمونه‌ی بتنی با ابعاد ۳۵۰×۱۵۰×۱۵۰ 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 درجه‌ی 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 با مقاومت فشاری ۳۵ مگاپاسکال

Water (Kg/m ³)	Cement (Kg/m ³)	Gravel (Kg/m ³)	Sand (Kg/m ³)
216	422	803	902

Table 1. Concrete mix design (35 MPa)

1 Near surface method

جدول ۲. محیط قلیایی با توجه به استاندارد ASTM

D7705/D7705M		
Ca(OH) ₂ (gr/lit)	NaOH (gr/lit)	KOH (gr/lit)
118.5	0.9	4.2

Table 2. Alkali solution (according to ASTM D7705/D7705M)

۳-۱- آماده سازی محیط قلیایی

به منظور ایجاد محیطی که دارای سه دمای مختلف باشد از سه ظرف پلی اتیلن که نسبت به دمای بالا و محیط قلیایی مقاومت داشته باشند استفاده شد. ظروف دارای ابعاد ۱۰۰۰×۱۰۰۰×۲ میلی متر بودند و برای جلوگیری از تغییر شکل دادن ظروف، با استفاده از قوطی‌های شماره ۲، مهار شدند. در ظرف اول که دمای آن متناسب با دمای آزمایشگاه بود یک کف کش در وسط ظرف قرار گرفته بود که از ته نشین شدن مواد جلوگیری می‌کرد. در ظرف دوم و سوم علاوه بر کف‌کش، المنت‌هایی به منظور گرم کردن محیط قلیایی نیز تعبیه شد. دمای محلول قلیایی با استفاده از ترمومتر به صورت پیوسته اندازه‌گیری شد. یکی از مشکلات موجود، وجود سر آزاد کامپوزیت‌های متصل به نمونه‌ها بود که بسیار حساس و شکننده بودند. به همین منظور برای جلوگیری از آسیب رسیدن به سر آزاد موجود، از چوب‌هایی به طول ۱۰۰۰ میلی‌متر و عرض ۶۰ میلی‌متر در طول وان‌ها استفاده شد. در وسط چوب‌ها شیارهایی ایجاد شد که پلتهای فولادی به طور مستقیم در داخل شیارها قرار گرفتند. همچنین نمونه‌ها به گونه‌ای قرار گرفتند که از هر چهار وجه به اندازه‌ی ۵۰ میلی‌متر از یک‌دیگر فاصله داشته باشند. شکل (۲) چگونگی قرار دادن نمونه‌ها در وان پلی‌اتیلن و محیط قلیایی ساخته شده را نشان می‌دهد.

شکل ۲. الف) قرار دادن نمونه‌ها در ظرف؛ ب) آماده سازی محیط قلیایی

(وان ۱ و ۲) (الف)

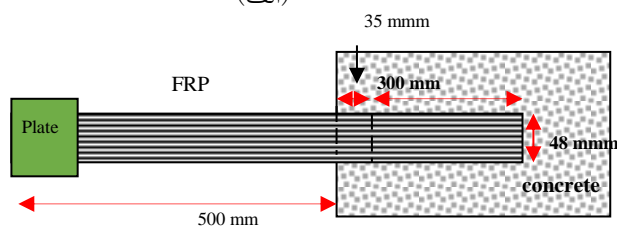


(a)

شکل ۱. الف) شماتیک هندسی نمونه‌ی تقویت شده؛ ب) تقویت به روش

EBR؛ ج) تقویت به روش EBROG

(الف)



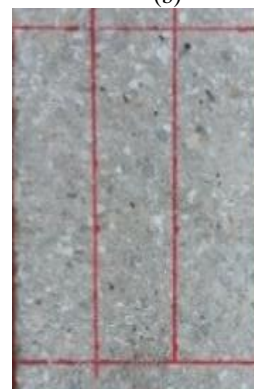
(a)

(ج)

(ب)



(c)



(b)

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

شکل (۱) شماتیک هندسی تقویت نمونه‌ها و روش‌های تقویت EBR و EBROG را نشان می‌دهد. در ۱۰۰ میلی‌متر انتهای طول آزاد ورق CFRP، پلتهای فولادی با ابعاد ۱۰۰×۱۰۰×۲ میلی‌متر چسبانده شد. پلتهای فولادی برای جلوگیری از لهیدگی الیاف CFRP زمانی که در فک دستگاه قرار می‌گیرند، تعبیه شدند. بعد از هفت روز از چسباندن CFRP روی سطح نمونه‌های بتنی، نمونه‌ها در شرایط محیطی قرار گرفتند.

۳- شرایط محیطی

استاندارد ACI 440 9R-15 [14] دمای پیشنهادی در محیط قلیایی را ۶۰-۲۰ درجه‌ی سانتی‌گراد پیشنهاد می‌کند. در این مقاله یک محیط قلیایی با سه دمای ۲۳، ۴۰ و ۶۰ درجه‌ی سانتی‌گراد در نظر گرفته شد. محیط قلیایی با توجه به استاندارد ASTM D7705/D7705M [15] شامل ترکیبات جدول (۲) است.

انجام شد. شکل (۳) شماتیک هندسی نمونه‌ی قرار گرفته شده در دستگاه و تنظیم آزمایش را نشان می‌دهد.

۵- نتایج

۵-۱- تحلیل نتایج

جدول (۳) بیشینه بار جداشدگی و نوع شکست را در نمونه‌های تقویت شده با الیاف CFRP به دو روش EBR و EBROG در شرایط محیطی مختلف نشان می‌دهد.

شکل ۳. الف) تنظیمات دستگاه برای انجام آزمایش؛ ب) شماتیک هندسی

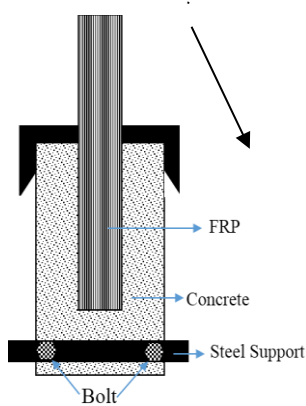
منشور بتنی

(الف)



(a)

(ب)



(b)

Fig. 3. a) Single shear test setup; b) Specimen detail

در جدول (۳) نوع شکست با حروف اختصاری D¹

(ب)



(b)

Fig. 2. a) Specimens in the container; b) Preparing an alkaline environment (container 1 & 2)

pH محلول با استفاده از pH سنج مرتب تنظیم شد. به منظور جلوگیری از تبخیر آب از در پوش‌های پلاستیکی استفاده شد و علاوه بر این میزان آب موجود در ظرف در هر دوره تنظیم شد.

۴- انجام آزمایش

۴-۱- خارج کردن نمونه‌ها از محیط و آماده سازی آنها

نمونه‌ها به مدت ۳۰۰۰ ساعت در محیط قلیایی قرار گرفتند و سپس خارج شدند. بعد از خارج کردن نمونه‌ها سطح آنها تمیز شده و یک روز در معرض هوا قرار گرفتند تا سطح آنها کاملاً خشک شود.

۴-۲- 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 است. نمونه‌ی 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. از آن جایی که بار وارد شده به صورت خارج از محور بر نمونه اعمال می‌شود، برای جلوگیری از چرخش انتهای نمونه به کمک دو بولت ۱۶ میلی‌متری و یک شمش فولادی محکم شده تا نیروی عکس‌العمل لازم برای خنثی کردن بار خارج از محور تأمین شود. طبق توصیه‌ی آیین نامه‌ی ASTM D3039 [16] آزمایش‌های برش مستقیم مورد نظر به صورت کنترل- تغییر مکان و با سرعت ۲ mm/min

علاوه بر جدول (۳)، نمودار میله‌ای نشان داده شده در شکل (۴) به مقایسه‌ی میانگین بیشینه بار جداسدگی FRP از سطح نمونه‌های بتنی آماده شده به دو روش EBR و EBROG در شرایط محیطی و در محیط آزمایشگاه می‌پردازد. همان‌گونه که مشخص است در حالت کلی نمونه‌های تقویت شده به روش EBROG ظرفیت باربری نهایی در حدود ۲ برابر بیشتر نسبت به نمونه‌های EBR دارند. برای نمونه میانگین بیشینه ظرفیت باربری نهایی در نمونه‌های EBR-C به مقدار ۹/۹۱ است در حالی که در نمونه‌های EBROG-C این مقدار ۱۸/۵۰ است. با توجه به شکل مشاهده می‌شود که در هر دو روش EBR و EBROG شرایط محیطی در دمای ۲۳ درجه‌ی سانتی‌گراد، به ترتیب سبب افت مقاومت به میزان ۲۰/۶۸ و ۲/۷۵ درصد شده است.

مقایسه‌ی نتایج نشان داد که افت مقاومت به روش EBR در حدود ۷/۵ برابر روش EBROG است. با افزایش دما به میزان ۴۰ درجه‌ی سانتی‌گراد افزایش مقاومت در هر دو روش مشاهده شد. ینگ و همکارانش [3] در دمای ۴۰ درجه‌ی سانتی‌گراد و در محیط سولفاتی برای نمونه‌های تقویت شده به روش EBR به نتایج مشابه رسیدند و افزایش مقاومت نمونه‌های تقویت شده (۶/۴ درصد) بعد از ۶۰ روز و کاهش مقاومت نمونه‌های تقویت شده بعد از ۹۰ روز (۴/۴ درصد) را مشاهده کردند. با افزایش دما به ۶۰ درجه‌ی سانتی‌گراد افت مقاومت در هر دو روش مشاهده شد؛ با این تفاوت که در روش EBR میانگین میزان افت مقاومت ۱۹/۶٪ و در روش EBROG این مقدار ۳/۶٪ نسبت به شرایط معمولی است.

شکل ۴. مقایسه‌ی میانگین بیشینه بار جداسدگی

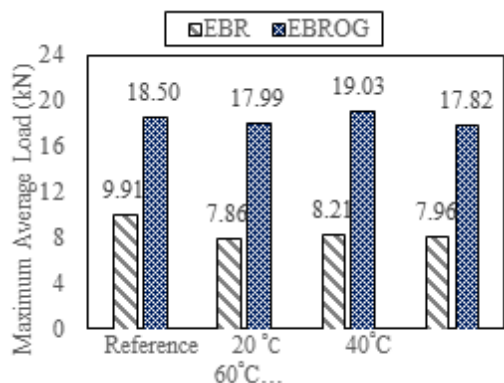


Fig. 4. Comparison of maximum average load

(جداسدگی FRP از سطح بتن)، RD^۱ (پارگی ورق FRP از انتهای بارگذاری و جداسدگی ورق ناشی از ضربه‌ی پاره شدگی) و R^۲ (پاره شدگی ورق FRP از انتهای بارگذاری) نشان داده شده است. همچنین نامگذاری نمونه‌ها با کدگذاری مشخص شده است. به طور نمونه کد EBROG-A23-1 نشان دهنده‌ی نمونه‌ی تقویت شده به روش EBROG که در محیط قلیایی با دمای ۲۳ درجه‌ی سانتی‌گراد قرار گرفته است. عدد ۱ نشان‌دهنده‌ی نمونه‌ی اول است. برای هر آزمایش دو تکرار به منظور افزایش دقت نتایج گذاشته شد. در واقع حرف A^۳ نشان دهنده‌ی محیط قلیایی می‌باشد و حرف C^۴ نشان دهنده‌ی نمونه‌های کنترل که در شرایط معمولی قرار گرفتند.

جدول ۳. بیشینه بار جداسدگی و نوع شکست

Specimens	Compressive strength (MPa)	Load capacity (kN)	Type of Failure
EBR-C-1	34.6	10.71	D
EBR-C-2	35.7	9.14	D
EBR-C-3	34.3	9.87	D
EBROG-C-1	34.2	18.73	R
EBROG-C-2	34.9	18.85	RD
EBROG-C-3	33.8	17.91	R
EBR-A23-1	34.6	8.84	D
EBR-A23-2	35.7	7.20	D
EBR-A23-3	34.3	7.55	D
EBROG-A23-1	34.2	18.59	R
EBROG-A23-2	34.9	18.38	R
EBROG-A23-3	33.8	17.00	RD
EBR-A40-1	34.6	8.92	D
EBR-A40-2	35.7	7.50	D
EBR-A40-3	34.3	8.20	D
EBROG-A40-1	34.2	18.42	R
EBROG-A40-2	34.9	18.38	R
EBROG-A40-3	33.8	20.28	R
EBR-A60-1	34.6	8.46	D
EBR-A60-2	35.7	8.05	D
EBR-A60-3	34.3	7.38	D
EBROG-A60-1	34.2	16.87	RD
EBROG-A60-2	34.9	18.12	R
EBROG-A60-3	33.8	18.45	R

Table 3. Maximum load and type of failure

- 1 Ruptur-debonding
- 2 Rupture
- 3 Alkali
- 4 Control

۲-۵- تفسیر نتایج

شکل مشخص است که میانگین میزان جذب انرژی در نمونه-های تقویت شده به روش EBROG نسبت به روش EBR در شرایط معمولی و محیط قلیایی با دماهای متفاوت به ترتیب در حدود ۳/۵ و ۵/۲ برابر است.

شکل ۵. انواع شکست در نمونه‌های تقویت شده: EBR: (الف) شرایط معمولی؛ (ب) محیط قلیایی با دمای ۲۳ °C (ج) ۴۰ °C و (د) ۶۰ °C درجه‌ی سانتی-گراد؛ EBROG: (ه) پارگی ورق CFRP؛ (و) پارگی ورق CFRP به همراه جداشدگی آن از سطح بتن؛

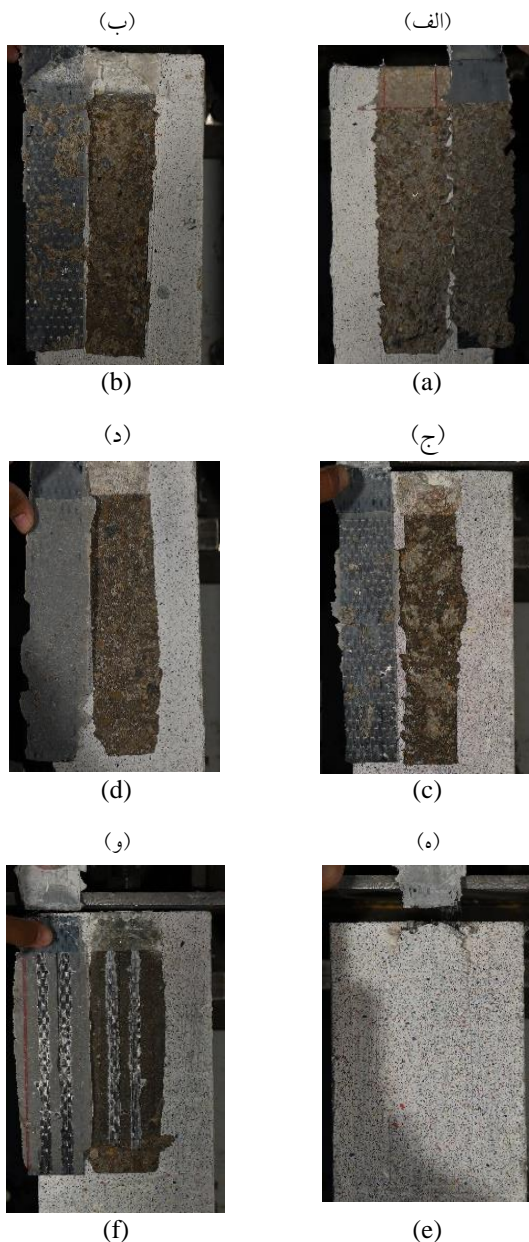


Fig. 5. Typical debonding modes of FRP-concrete joints for EBR method; a) control specimen; b) AE at 23 °C; c) AE at 40 °C; d) AE at 60 °C; EBROG method; e) CFRP rupture; f) CFRP rupture accompanied by debonding in specimen.

شرایط محیطی بر نوع شکست نمونه‌های تقویت شده به روش EBR تأثیرگذار است. شکل ۵ (الف-د) نشان می‌دهد که در شرایط معمولی جداشدگی ورق CFRP به همراه لایه‌ی ضخمی از بتن است در حالی که در محیط قلیایی و با افزایش دما جدا شدگی CFRP از سطح بتن به سمت جداشدگی بین بتن و لایه‌ی چسب رخ می‌دهد و در دمای ۶۰ °C درجه‌ی سانتی-گراد دیگر اثری از بتن روی ورق CFRP نیست. غیابی و همکارانش [17] شرایط مشابه را برای تأثیر رطوبت در مصالح بنایی گزارش دادند. در نمونه‌های تقویت شده به روش EBROG دو نوع شکست وجود دارد؛ حالت اول پارگی ورق CFRP به همراه جداشدگی ورق ناشی از ضربه‌ای که در حین پارگی به وجود می‌آید شک (۵-ه) و در حالت دوم تنها پارگی ورق CFRP رخ می‌دهد شکل (۵-و). همان-گونه که در جدول (۲) مشاهده شد بیش از ۹۰ درصد نمونه-های تقویت شده به روش شیپارزنی، پارگی ورق CFRP را تجربه کردند و به نظر می‌رسد در این روش شرایط محیطی بر نوع شکست تأثیرگذار نیست.

۶- انرژی شکست

بیشینه نیروی منتقل شده توسط اتصال CFRP به سطح بتن در شرایط محیطی معمولی را می‌توان به انرژی شکست خاص (Γ_f) سطح اتصال مرتبط نمود [18] که این انرژی برای هر نمونه با توجه به رابطه‌ی (۱) به دست می‌آید:

$$F_{deb} = b_f \sqrt{2E_f t_f \Gamma_f} \quad (1)$$

در رابطه‌ی بالا F_{deb} بیشینه بار قبل از جداشدگی، b_f ، t_f و E_f به ترتیب پهنا، ضخامت و مدول الاستیسیته‌ی ورق FRP است. با توجه به رابطه‌ی (۱) انرژی شکست برابر است با:

$$\Gamma_f = \frac{F_{deb}^2}{2b_f^2 E_f t_f} \quad (2)$$

شکل (۶) اندازه‌ی میانگین انرژی شکست را در شرایط محیطی معمولی و قلیایی با دماهای متفاوت نشان می‌دهد. با توجه به

ساعت می‌شود. میزان کاهش در حدود ۱۹/۶ درصد برای نمونه‌های EBR و ۳/۶ درصد برای نمونه‌های EBROG در دمای ۶۰ درجه‌ی سانتی‌گراد (بالاترین دما) نسبت به محیط کنترل است.

– مود شکست در نمونه‌های تقویت شده به روش EBR به صورت جداشدگی ورق از سطح بتن است. با افزایش دما میزان بتن چسبیده به ورق FRP کمتر و کمتر می‌شود و در دمای ۶۰ درجه‌ی سانتی‌گراد جدا شدگی بین لایه‌ی چسب و سطح بتن اتفاق می‌افتد.

– در نمونه‌های تقویت شده به روش EBROG مود شکست به دو صورت است: الف) پاره شدن ورق FRP به همراه جدا شدگی آن از سطح بتن و ب) پارگی ورق. در نمونه‌های EBROG برای بیش از ۹۰ درصد نمونه‌ها پارگی ورق CFRP مشاهده شد. همچنین نتایج نشان داد که تغییرات دما بر مود شکست نمونه‌های تقویت شده به روش EBROG تأثیری ندارد.

References

۸- مراجع

- [1] Saadatmanesh; H; Tavakkolizadeh; M; and Mostofinejad; D; “Environmental Effects on Mechanical Properties of Wet Lay-Up Fiber-Reinforced”; *ACI Materials Journal*; 107(3), 2010, 267-275.
- [2] Cromwell; J.R; Harries; K.A; Shahrooz; B.M; “Environmental durability of externally bonded FRP materials intended for repair of concrete structures”; *Construction and Building Materials*; 25(5), 2011, 2528–2539.
- [3] Yingwu; Z; Zhiheng; F; Jia; u; Lili; S; and Feng; X; “Bond behavior of FRP-to-concrete interface under sulfate attack: An experimental study and modeling of bond degradation”; *Construction and Building Materials*; 85, 2015, 9-21.
- [4] D’Antino; T; Pellegrino; C; “Bond between FRP composites and concrete: Assessment of design procedures and analytical models”; *Composites: Part B*; 60, 2014, 440–456.
- [5] Di Tommaso; A; Neubauer; U; Pantuso; A; and Rostasy; F; “Behaviour of adhesively bonded concrete-CFRP joints at low and high temperatures”; *Mechanics of Composite Materials*; 4, 2001,
- [6] Silva; Manuel A.G; Biscaia; Hugo; “Degradation of bond between FRP and RC beams”; *Composite Structures*; 85, 2008, 164–174.
- [7] Al-Mahmoud; Mechling a; Jean-Michel; Shaban; Mohamed; “Bond strength of different strengthening systems – Concrete elements under freeze–thaw cycles

همچنین محیط قلیایی با دمای ۲۳ درجه‌ی سانتی‌گراد سبب افت میزان انرژی جذب شده در هر دو روش EBR و EBROG به میزان ۳۶/۷ و ۵/۴ درصد نسبت به شرایط معمولی شده است. در دمای ۴۰ درجه‌ی سانتی‌گراد مقدار جذب انرژی برای هر دو حالت افزایش می‌یابد؛ و با افزایش دما به ۶۰ درجه‌ی سانتی‌گراد انرژی شکست دوباره کاهش می‌یابد. میزان این کاهش در روش EBR و EBROG، ۳۵/۲ و ۷/۱ است. نتایج حاصل برتری روش EBROG را نسبت به روش EBR نشان می‌دهد.

شکل ۶. اندازه‌ی میانگین انرژی شکست به روش EBR و EBROG

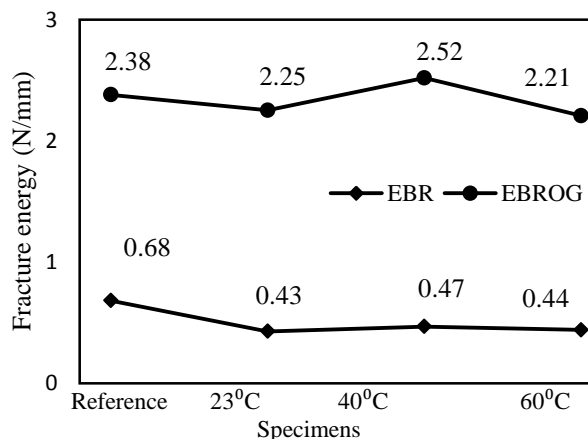


Fig. 6. Average of fracture energy for EBR and EBROG specimens

۷- نتیجه‌گیری

در این پژوهش ۴۸ منشور بتنی با ابعاد ۳۵۰×۱۵۰×۱۵۰ میلی‌متر با مقاومت فشاری ۳۵ مگاپاسکال ساخته شدند و با الیاف CFRP به روش‌های EBR و EBROG تقویت شدند. نمونه‌ها در شرایط محیطی معمولی و قلیایی با دماهای ۲۳ و ۴۰ و ۶۰ درجه‌ی سانتی‌گراد به مدت ۳۰۰۰ ساعت قرار گرفتند و سپس از محیط خارج شدند و آزمایش برش مستقیم روی آن‌ها انجام شد. با توجه به آزمایش‌های انجام شده نتایج آزمایشگاهی عبارتند از:

– مقاومت جداشدگی به روش EBROG در حدود ۲ برابر روش EBR است.

– افزایش دما سبب کاهش مقاومت جداشدگی بعد از ۳۰۰۰

- [12] Hosseini; A; Mostofinejad; D; "Experimental investigation into bond behavior of CFRP sheets attached to concrete using EBR and EBROG techniques"; *Composites Part B*; 51, 2013, 130-139.
- [13] Mazzotti; C; Savoia; M; Ferracuti; B; "An experimental study on delamination of FRP plates bonded to concrete." *Construction and Building Materials*; 22(7), 2008, 1409-1421
- [14] ACI (American Concrete institute); "Guide to accelerated conditioning protocols for durability assessment of internal and external fiber reinforced polymer (FRP) reinforcement"; ACI 440.9R-15; 2015, American concrete institute.
- [15] ASTM D7705/D7705M; "Standard Test Method for Alkali Resistance of Fiber Reinforced Polymer (FRP) Matrix Composite Bars used in Concrete Construction"; 2012, West Conshohocken, PA.
- [16] ASTM D3039/D3039M, "Tensile properties of polymer matrix composite materials"; 2000.
- [17] Ghiassi; B; Marcari; G; Oliveira; D.V; Lourenço; P.B; "Water degrading effects on the bond behavior in FRP-strengthened Masonry"; *Composites: Part B*, 54, 2013, 11-19.
- [18] Del Prete; L; Bilotta; A; Nigro; E; "Performances at high temperature of RC bridge decks strengthened with EBR-FRP"; *Composites: Part B*, 2015, 68, 27-37.
- and salt water immersion exposure" *Construction and Building Materials*; 70, 2014, 399-409.
- [8] Mostofinejad; D; and Mahmoudabadi; E; "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.
- [9] Mostofinejad; D; Moghaddas; A; "Bond efficiency of EBR and EBROG methods in different flexural failure mechanisms of FRP strengthened RC beams"; *Construction and Building Materials*; 54, 2014, 605-614.
- [10] Mostofinejad; D; Tabatabaei; A; "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), 2013, 1704-1713.
- [11] Mostofinejad; D; Shamel; S.M; "Externally bonded reinforcement in grooves (EBRIG) technique to postpone debonding of FRP sheets in strengthened concrete beams"; *Construction and Building Materials*; 38, 2013, 751-758.

Alkali effect on the bond-strength of FRP-concrete bond in EBR and EBROG methods

Mohammadi Mahdie¹, Mostofinejad Davood², Barghian Majid^{*3}, Farzam Masood⁴

1- Graduate student of Civil Engineering, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Tabriz

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

3- Associate Prof., Dept. of Civil Engineering, Univ. of Tabriz

4- Assistant Prof., Dept. of Civil Engineering, Univ. of Tabriz

*barghian@tabrizu.ac.ir

Abstract:

Various researches have been performed regarding the deterioration and behavior of fabrics made from carbon, glass and aramid in different environmental conditions. Carbon fibers reinforced polymer (FRP) are very corrosion resistant. The CFRP laminates are extremely useful in very corrosive atmospheres, such as marine and aggressive chemical atmospheres. They have been advanced over the years because of their high strength, light weight, long-term durability and high resistance to deterioration. The very thin (0.2 - 0.4 mm) laminates are very easy to apply and can be applied in cross directions without any difficulty. Environmental conditions impact on the bond strength of FRP-to-concrete has sparsely been investigated. The sources of CFRP bond deterioration can originate from alkaline attack and thermal expansion. Alkaline attack occurs at the interface of the concrete and a CFRP laminates with the resulting damage to the matrix of the CFRP laminates. Also, alkali aggregate reaction can lead to the destruction of concrete elements. However, studies in this field are not enough and for externally bonded FRP materials, no such long term test results are available yet. Severe corrosion damage can often be prevented by a correct treatment of the structure against chemical influences or aggressive environmental effects. Methods such as the externally bonded reinforcement (EBR), despite of their advantages, have a problem known as the premature debonding of FRP from concrete substrate. In this method the surface of concrete is sanded and cleaned. After the preparation of the surface, the layer of epoxy is applied uniformly on the surface of concrete. Then, FRP is installed on the surface and saturated with epoxy. In other hand, a new strengthen method is the externally bonded reinforced on grooves (EBROG) method that consists of grooves on the surface of concrete. In this method, grooves with a proper length, width and depth are catted on the concrete surface; then the concrete surface and the grooves are cleaned with an air pressure. Later, grooves are filled with an appropriate epoxy. At the end, FRP sheets are installed with a proper epoxy on the concrete surface. In this paper, the effect of environmental conditions, including three alkaline environments with temperatures of 23°C, 40°C and 60°C, was investigated on the bond strength of FRP-to-concrete. The specimens were strengthened with two methods: EBR and EBROG. Samples were kept in environmental conditions for 3000 hours. Single-shear tests were conducted to evaluate the bond behavior of FRP-to-concrete. Experimental results showed that the specimens strengthened by the EBROG method - in the alkali environment with different conditions - experienced up to 50 % higher than ultimate bond loads compared with the specimens which were strengthened by the EBR method. In the EBR method, the bond failure mode changed from concrete delamination in laboratory condition to epoxy-concrete interface separation in alkali immersion with different temperatures. On the other hand, in the EBROG method environmental conditions had not effect on the mode of failure and more than 90% of specimens experienced FRP rupture. As a whole, the alkali environment caused a sudden drop in the bond strength of FRP-to-concrete substrate.

Keywords: EBROG, alkaline environment, Temperature, Debonding.