بررسی آزمایشگاهی اثر دما بر مقاومت پیوستگی ورق‌های FRP و بتن

بهزاد عطاری[۱] ، محمدرضا توکلی زاده[۲]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد

Email: drt@um.ac.ir

خلاصه

امروزه استفاده از پلیمرهای مسلح شده با الیاف (FRP) برای تعمیر و تقویت سازه‌ها به‌طور گسترده‌ای رایج شده است. معمول‌ترین روش نصب FRP به اعضای بتن آرمه، روش نصب خارجی(EBR) است. در روش EBR مهم‌ترین چالش، پدیده نامطلوب جداشدگی زودهنگام ورق FRP از سطح بتن است. با توجه به اختلاف قابل توجه ضریب انبساط حرارتی FRP و بتن، ظرفیت باربری این سیستم در زمان مواجه با تنش‌های حرارتی، کاهش می‌یابد و ممکن است کارایی خود را از دست بدهد. در این پژوهش، تعدادی نمونه بتنی تهیه و به دو روش معمول (برس‌زنی، ماسه‌پاشی) و یک روش پیشنهادی، آماده‌سازی سطحی شدند و یک لایه ورق FRP کربنی به آنها چسبانده شد. سپس نمونه‌ها تحت تنش‌های حرارتی قرار گرفته و پس از رسیدن به دمای محیط، برای ارزیابی مقاومت پیوستگی، تحت آزمایش برش مستقیم قرار گرفتند.

نتایج نشان داد، مقاومت پیوستگی نمونه‌های آماده‌سازی سطحی شده به روش‌های معمول، در زمان مواجه با تنش‌های حرارتی تا دمای ۵۰°C تغییرزیادی نمی‌کند، اما با عبور از این دما این مقاومت تا ۵۰٪ کاهش می‌یابد. همچنین مقاومت پیوستگی نمونه‌های نصب شده با روش پیشنهادی نسبت به روش EBR، به میزان ۳۲٪ در دمای محیط افزایش یافت و در دماهای بالا ظرفیت خود را به‌خوبی حفظ کرد.

کلمات کلیدی: حرارت، مقاومت پیوستگی، FRP، جداشدگی زودهنگام

۱. مقدمه

در طی دو دهه گذشته استفاده از کامپوزیت‌های FRP به‌عنوان یک روش مقاوم‌سازی، بسیار گسترش یافته است[۱]. نسبت مقاومت به وزن بالا و نصب سریع، امتیاز اصلی این سیستم مقاوم‌سازی است[۲]. رایج ترین روش مقاوم‌سازی اعضای سازه‌ای با استفاده از کامپوزیت‌های FRP، روش EBR است. با وجود مزایای روش EBR از قبیل نصب سریع و آسان، ضعف اصلی این تکنیک جداشدگی زودهنگام FRP از سطح بتن و در نتیجه عدم استفاده از حداکثر ظرفیت FRP است[۳]. بر اساس گزارش‌های مالک و همکاران[۴] و کیم و همکاران[۵]، جداشدگی زودهنگام می‌تواند به‌دلیل وجود تنش‌های ناشی از بارهای مکانیکی و محیطی در میان سطح FRP و بتن باشد. بارهای محیطی می‌تواند ناشی از چرخه‌های تر و خشک شدن، چرخه‌های ذوب و یخبندان و یا تغییرات دما باشد[۶]. به‌دلیل تفاوت در ضریب انبساط حرارتی کامپوزیت CFRP ($\alpha f \approx -1\times10^{-6}$ °C) و بتن($\alpha c \approx 10\times10^{-6}$ °C)، در زمان قرار گیری این سیستم در دماهای بالا، تنش‌های حرارتی در میان سطح بتن و ورق CFRP به‌وجود می‌آیند. همچنین با افزایش دما مشخصات مواد تشکیل دهنده بتن، چسب و CFPR تغییر می‌کند. بخصوص رزین اپوکسی حساسیت بیشتری به دما دارد، به‌طوری که مقاومت و سختی آن در زمان مواجهه با دماهای در حدود دمای انتقال شیشه‌ای[۱] Tg آن، به‌شدت کاهش می‌یابد(دمای Tg برای اکثر اپوکسی‌های موجود در حدود ۴۵°C تا ۸۰°C است)[۷]. دو مسئله تفاوت در ضریب انبساط حرارتی مصالح CFRP با بتن و تغییر خواص مکانیکی کامپوزیت‌های CFRP در زمان مواجهه با دما، ممکن است بر میزان بار جداشدگی اثر بگذارد.

[1] Glass transition temperature

با وجود اهمیت موضوع، تا کنون تحقیقات محدودی در این زمینه صورت گرفته. در برخی پژوهش‌ها در مورد عملکرد باند در زمان قرار گیری در دماهای بالا و در برخی دیگر در مورد عملکرد باند پس از قرار گیری در دماهای بالا تمرکز شده است. در ادامه برخی از این پژوهش‌ها مرور می‌شود.

بلانتراک[۸] با استفاده از آزمایش برش دو طرفه[1] مقاومت پیوستگی نوارهای CFRP به بتن را در دماهای ۲۰°C، ۴۰°C، ۵۵°C و ۷۰°C، مورد سنجش قرار داد. رزین مورد استفاده برای چسباندن نوارهای CFRP به بتن دارای دمای Tg، ۶۲°C بود. مقاومت پیوستگی در دماهای ۴۰°C، ۵۵°C و ۷۰°C در مقایسه با دمای ۲۰°C، به‌ترتیب ٪۱۴۱، ٪۱۲۴ و ٪۸۲ به‌دست آمد. بلانتراک این نتایج غیر قابل انتظار را، یعنی افزایش مقاومت در دماهای ۴۰°C و ۵۰°C، و کاهش کم مقاومت در دمای ۷۰°C (بالاتر از دمای Tg چسب اپوکسی) را به‌دلیل ایجاد تنش‌های حرارتی ایجاد شده در میان سطح CFRP و بتن ناشی از تفاوت در ضریب انبساط حرارتی آنها دانست.

کلامر و همکاران[۹] گزارشی مشابه بلانتراک ارائه دادند. آنها در این تحقیق مقدماتی، با انجام آزمایش برش دوطرفه، مقاومت پیوستگی نوارهای CFRP به بتن را درمحدوده‌ی دمایی ۱۰°C- تا ۷۵°C مورد بررسی قرار دادند. برای ساخت نمونه‌ها، از بتن با مقاومت فشاری متوسط و رزین اپوکسی با دمای Tg ۶۲ استفاده شد. نمونه‌ها برای مدت ۱۲ ساعت قبل از بارگذاری تحت حرارت قرار گرفتند. همانند بلانتراک، کلامر نیز افزایش ۱۰ درصدی مقاومت پیوستگی تا دمای ۵۰°C و نیز کاهش ۳۶ درصدی مقاومت پیوستگی در دمای ۷۵°C را گزارش داد (میزان افزایش مقاومت در دمای ۵۰°C کمتر از مقدار پژوهش بلانتراک بود). مود شکست نیز مانند مشاهدات بلانتراک بود، یعنی شکست در لایه بتن در دمای محیط و شکست پیوستگی بین بتن و نوارهای CFRP در دماهای بالا.

ویو و همکاران [۱۰] یک آزمایش برش دو طرفه مشابه، در محدوده‌ی دمایی ۲۶°C تا ۵۰°C به‌منظور سنجش مقاومت پیوستگی CFRP به بتن انجام دادند. دمای Tg رزین اپوکسی مصرفی براساس نوع گیرش تعیین و مقدار آن ۳۸°C به‌دست آمد. در این پژوهش بر خلاف پژوهش‌های قبلی با افزایش دما یک کاهش مقاومت با شیب ثابت مشاهده شد (٪۶۰ کاهش مقاومت در دمای ۵۰°C). همچنین با افزایش دما تغییر مود شکست از ترکیب شکست در بتن و چسب در دمای محیط، به شکست در چسب در دمای بالا گزارش شد.

نامرو[۱۱] یک پژوهش آزمایشگاهی در مورد اثر دما بر مقاومت چسبندگی سه نمونه رزین اپوکسی به بتن انجام داد. دمای Tg رزین‌های اپوکسی ۶۵°C، ۷۵°C و ۱۶۵°C بودند. او در این پژوهش ابتدا دو بلوک بتنی را به‌وسیله رزین اپوکس به‌نحوی به یکدیگرچسباند تا تشکیل یک تیر بتنی را بدهند. سپس نمونه‌های ساخته شده را به‌مدت سه ساعت در معرض دمایی بین ۲۵°C تا ۲۰۰°C قرار داد و بعد از این تجربه گرمایی، نمونه‌ها را به‌مدت یک روز در دمای اتاق سرد کرد و در انتها تیرها را مورد آزمایش خمش سه محوری قرار داد. بر اساس نتایج مشخص شد، مقاومت چسبندگی ماتریس رزینی به بتن، به‌شدت به دمای Tg رزین‌ها وا بسته است، به شکلی که ظرفیت تیرها تا دماهای پایین تر از Tg سه نوع رزین اپوکسی تغییری نکرد اما با عبور از این دما به سرعت تا ٪۵۰ کاهش یافت و بعد از آن تقریبا ثابت ماند.

سالوم و همکاران[۱۲] نتایج یک پژوهش آزمایشگاهی در زمینه مقاومت پیوستگی ورق‌های CFRP و GFRP به بتن، پس از قرار گیری در دماهای بالا را ارائه دادند. دمای Tg رزین اپوکسی مصرفی در حدود ۱۰۰°C بود. در این پژوهش تعدادی نمونه بتنی با ورق‌های CFRP و GFRP مقاوم‌سازی شدند و بعد از آن به‌مدت ۳ ساعت در دمای ۱۰۰°C و ۲۰۰°C قرار داده شدند. سپس مقاومت پیوستگی نمونه‌ها در دمای محیط و با استفاده از آزمایش pull-off مورد سنجش قرار گرفت. بر اساس نتایج، مقاومت پیوستگی در دمای ۲۰۰°C به‌طور چشم‌گیری کاهش پیدا کرد. همچنین کاهش مقاومت پیوستگی در نمونه‌های تقویت شده با ورق‌های CFRP بیشتر از نمونه‌های تقویت شده با ورق‌های GFRP بود.

با مرور پژوهش‌های گذشته می‌توان نتیجه گرفت، با افزایش دما (بیشتر از دمای Tg) مقاومت پیوستگی کاهش می‌یابد، اما مقدار این کاهش در پژوهش‌های مختلف متفاوت است. همچنین در مورد دماهای کمتر از Tg نتایج متناقض است. در برخی پژوهش‌ها با افزایش دما تا قبل از دمای Tg، مقاومت افزایش می‌یابد[۸، ۹] در حالی که در بعضی دیگر کاهش می‌یابد[۱۰]. روش انجام آزمایش مقاومت پیوستگی در پژوهش‌های مختلف متفاوت بوده و همچنین در هیچ یک از پژوهش‌ها راه کاری برای مقابله با پدیده نا مطلوب جداشدگی زودهنگام ورق CFRP از سطح بتن داده نشده است. در پژوهش حاضر، با انجام آزمایش برش مستقیم به‌عنوان یک رو استاندارد سنجش مقاومت پیوستگی، به بررسی دقیق تر اثر دما بر مقاومت پیوستگی

[1] Double-lap shear test

پرداخته شده. همچنین برای حذف پدیده نا مطلوب جداشدگی زودهنگام ورق CFRP از سطح بتن در دمای محیط و در زمان مواجهه با تنش‌های حرارتی، راهکاری ارائه شده است.

۲. برنامه آزمایشگاهی

۲-۱ مشخصات مصالح

برای انجام آزمایش برش یک طرفه تعداد ۱۸ نمونه منشور بتنی در ابعاد ۱۵۰×۱۵۰×۳۵۰ میلی‌متر ساخته شد. برای به‌دست آوردن بتن با مقاومت فشاری در حدود ۳۰ مگا پاسکال، از ۳۵۰ Kg/m3 سیمان پرتلند معمولی، ۸۱۱ Kg/m3 ماسه، ۸۸۷ Kg/m3 شن و ۱۸۲ Kg/m3 آب استفاده شد. همچنین جهت ارزیابی مقاومت فشاری بتن از هر میکسر تعداد سه استوانه بتنی به ابعاد ۱۵۰×۳۰۰ میلی متر تهیه شد. قالب‌ها بعد از ۲۴ ساعت باز شده و سپس به‌مدت ۲۸ روز در یک وان آب در شرایط استاندارد آزمایشگاهی عمل‌آوری شدند. بعد از آن نمونه‌ها از وان آب خارج شده و در شرایط آزمایشگاهی تا زمان آزمایش نگهداری شدند. کامپوزیت FRP استفاده شده در این پژوهش به روش چسباندن تر[1] و با استفاده از الیاف تک جهته کربن ساخته شد. برای چسباندن کامپوزیت FRP بر سطح بتن و همچنین برای فاز ماتریس کامپوزیت FRP از چسب اپوکسی دو جزئی با دمای Tg، ۵۸°C استفاده شد. مشخصات مکانیکی الیاف کربن و رزین اپوکسی بر اساس کاتالوگ تولید کننده در جدول۱ ارائه شده است.

جدول۱- مشخصات مکانیکی FRP

	ضخامت (mm)	مقاومت کششی (MPa)	مدول الاستیسیته (GPa)
الیاف	۰,۱۱۱	۳۹۰۰	۲۳۰
رزین اپوکسی	۰,۵-۰,۹	۳۰	۴,۵

۲-۲ ساخت نمونه‌ها

در این پژوهش نوع آماده‌سازی سطحی و دما به‌عنوان دو متغییر موثر بر مقاومت پیوستگی در نظر گرفته شده است. سایر عوامل موثر بر مقاومت پیوستگی ورق CFRP و بتن ثابت می‌باشند. نام‌گذاری نمونه‌ها به‌صورت A-B-C-D می‌باشد، A نشان‌دهنده روش اتصال ورق CFRP به بتن است که می‌تواند EBR یا FE باشد، B نشان‌دهنده نوع آماده‌سازی سطحی بستر بتن است که می‌تواند S(ماسه‌پاشی شده)، B(برس‌زنی شده) یا عدم وجود هیچکدام به معنای عدم آماده‌سازی سطحی بستر بتن باشد، C نشان‌دهنده دمای آزمایش به درجه سانتیگراد و D شماره مرجع هر نمونه در هر تست یکسان می‌باشد (۱ یا ۲).

برای ساخت نمونه‌های تقویت شده به روش EBR ابتدا سطح بتن نمونه‌ها به روش ماسه‌پاشی و برس‌زنی آماده‌سازی سطحی شد و بعد از تمیز کردن سطح بتن توسط جت هوا با استفاده از رزین اپوکسی یک لایه ورق CFRP با عرض و طول ۵۰mm و۱۵۰ mm به روش چسباندن تر بر روی سطح بتن چسبانده شد (طول ناحیه چسبانده شده دو برابر طول موثر به‌دست آمده از رابطه چن و تنگ[۱۳] اختیار شد). همچنین در این پژوهش برای اتصال بهتر ورق CFRP به بتن در دمای محیط و در هنگام مواجهه سیستم با تنش‌های حرارتی یک روش پیشنهادی (کاشت الیاف) ارائه گردید. مطابق شکل۱ برای تقویت نمونه‌ها به این روش ابتدا بر روی نمونه‌ها سوراخ‌هایی با قطر و عمق ۱۰mm و ۴۰mm و فواصل ۳۰mm از یکدیگر ایجاد شده و پس از تمیز کردن سوراخ‌ها با جت هوا، رشته‌های الیاف به طول ۸۰ میلیمتر با استفاده از رزین اپوکسی، درون سوراخ‌ها به‌صورت نیمی در سوراخ و نیمی آزاد کاشته می‌شود. نیمه‌ی آزاد الیاف نیز به‌صورت باد بزنی بر روی سطح بتن چسبانده می‌شود. بعد از چسباندن یک لایه ورق CFRP به روش چسباندن تر بر روی سطح بتن و الیاف کاشته شده، ورق CFRP با الیاف کاشته شده همپوشانی داشته و عملا ورق CFRP به بتن دوخته می‌شود.

[1] wet layup

الف ب ج

شکل ۱- مراحل انجام روش آماده سازی سطحی کاشت الیاف. الف) ایجاد سوراخ بر روی سطح بتن ب) کاشت الیاف در سوراخ ها با استفاده از رزین اپوکسی. ج) چسباندن قسمت آزاد الیاف بر روی سطح بتن

پس از عمل‌آوری رزین اپوکسی، به‌منظور ایجاد تنش‌های حرارتی در میان سطح ورق CFRP و بتن، نمونه‌ها به‌مدت ۳ ساعت در گرم‌خانه قرار داده شدند و بعد از آن به‌مدت یک روز در دمای محیط سرد شدند. دماهای مورد آزمایش در این پژهش ۲۵°C، ۵۰°C، ۱۰۰°C، ۱۵۰°C و ۲۰۰°C درجه می‌باشد.

۲-۳ تجهیزات و روش انجام آزمایش

تمام نمونه‌ها به‌مدت ۳ ساعت درون گرم‌خانه مجهز به فن حرارت دهی شدند. در طی حراردت دهی دمای درون گرم‌خانه توسط دماسنج دیجیتال با دقت ۰,۰۱ درجه سانتی‌گراد کنترول شد. برای انجام آزمایش برش یک طرفه، دستگاه مطابق شکل۲ طراحی شد. پس از ثابت شدن نمونه‌ها توسط قاب نگه‌دارنده دستگاه، یک جک هیدرولیکی با ظرفیت ۳۰۰kN به‌وسیله گیره مخصوص نیروی کششی را تا لحظه شکست به ورق CFRP انتقال می‌دهد. مقدار لغزش انتهای بارگزاری شده ورق CFRP نیز به‌وسیله یک LVDT با دقت ۰,۰۱mm اندازه گیری شد. همچنین از یک دیتا لاگر دیجیتالی برای کنترول لود سل و LVDT استفاده شد. همچنین جهت جلو گیری از تمرکز تنش در لبه بارگذاری شده منشور بتنی، ورقFRP بعداز ۳۵mm از لبه منشور بتنی بر روی سطح بتن چسبانده شد. ستاپ مشابه به‌منظور جلو گیری از این تمرکز تنش در پژوهش‌های دیگر گزارش شده است[۱۴].

شکل۲- دستگاه برش مستقیم یک طرفه

۳. تحلیل نتایج

مقاومت فشاری بتن، بار نهایی، دمای آزمایش و مود شکست نمونه‌ها در جدول۱ ارائه شده است.

جدول۱- بار نهایی و حالت شکست نمونه‌ها

نمونه	دمای آزمایش (°C)	مقاومت بتن (MPa)	بار نهایی (kN)	متوسط بار نهایی (kN)	نسبت بار نهایی نمونه به نمونه آزمایش شده در دمای ۲۵	حالت شکست
EBR-B-25-1	۲۵	۳۱,۲	۹,۴۱	۹,۵۶	-۱,۵۶	جداشدگی
EBR-B-25-2	۲۵	۳۱,۲	۹,۷۱		۱,۵۶	جداشدگی
EBR-B-50	۵۰	۳۱,۲	۹,۶۱	-	۰,۵۲	جداشدگی
EBR-B-100	۱۰۰	۳۱,۲	۶,۱۸	-	-۳۵,۳۵	جداشدگی
EBR-B-150	۱۵۰	۳۱,۲	۵,۶۱	-	-۴۱,۳۱	جداشدگی
EBR-B-200	۲۰۰	۳۱,۲	۴,۷۹	-	-۴۹,۸۹	جداشدگی
EBR-S-25-1	۲۵	۳۱,۲	۹,۳۰	۹,۴۵	-۱,۵۸	جداشدگی
EBR-S-25-2	۲۵	۳۱,۲	۹,۶۱		-۱,۶۹	جداشدگی
EBR-S-50	۵۰	۳۱,۲	۹,۴۰	-	-۰,۵۳	جداشدگی
EBR-S-100	۱۰۰	۳۱,۲	۵,۶۱	-	-۴۰,۶۳	جداشدگی
EBR-S-150	۱۵۰	۳۱,۲	۵,۶	-	-۴۰,۴۷	جداشدگی
EBR-S-200	۲۰۰	۳۱,۲	۲,۷	-	-۷۱,۴۲	جداشدگی
FE-25-1	۲۵	۳۰,۶	۱۳,۰۲	۱۲,۷۱	-۲,۴۴	پاره شدگی
FE-25-2	۲۵	۳۰,۶	۱۲,۴۰		-۲,۴۴	پاره شدگی
FE-50	۵۰	۳۰,۶	۱۲,۸۲	-	۰,۸۶	پاره شدگی
FE-100	۱۰۰	۳۰,۶	۹,۸۵	-	-۲۲,۵۰	پاره شدگی
FE-150	۱۵۰	۳۰,۶	۹,۳۲	-	-۲۶,۶۷	پاره شدگی
FE-200	۲۰۰	۳۰,۶	۹,۱۲	-	-۲۸,۲۴	پاره شدگی

لازم به ذکر است نمونه EBR-S-200 به‌دلیل خطا در انجام آزمایش (قرار گیری نادرست نمونه در دستگاه و وجود خروج از محوری در نیروی کششی وارد به ورق CFRP) دارای بار نهایی بسیار کم بوده و در تحلیل نتایج از این نمونه استفاده نشده.

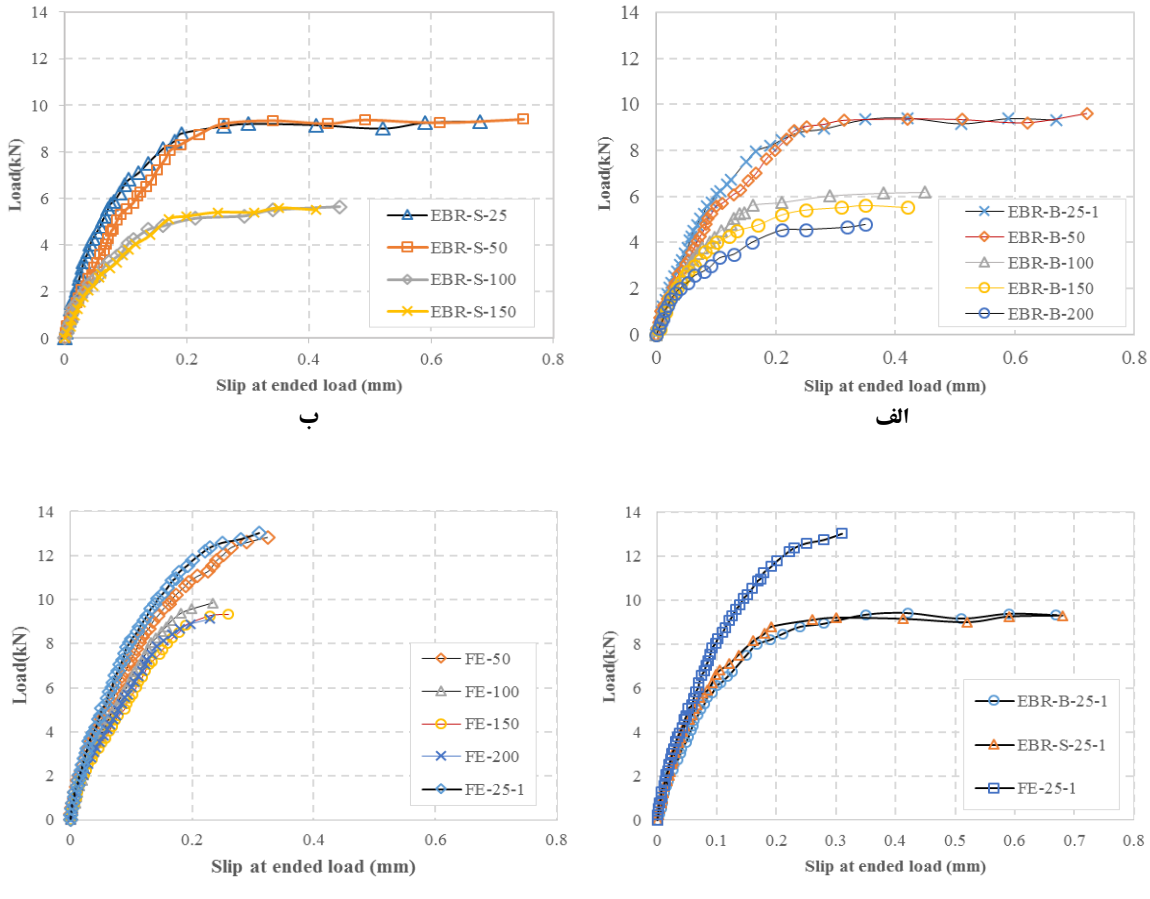
۳-۱ مقاومت پیوستگی و حالت شکست

با توجه به نتایج، مقاومت پیوستگی نمونه‌های برس‌زنی شده و ماسه‌پاشی شده مشابه یکدیگر است، به‌طوری که تا قبل از رسیدن دمای نمونه‌ها به دمای Tg رزین اپوکسی(Tg= ۵۸°C)، مقاومت پیوستگی تغییری نداشته و پس از این دما به‌میزان چشم‌گیری کاهش می‌یابد. به‌طور مثال مقاومت نمونه EBR-B-50 نسبت به نمونه EBR-B-25-1 تغییری نداشته اما مقاومت نمونه EBR-B-100 و EBR-B-200 به ترتیب ٪۳۵ و ٪۵۰ نسبت به نمونه آزمایش شده در دمای محیط کاهش یافته است. نمونه‌های مقاوم‌سازی شده به روش کاشت الیاف در مجموع مقاومت پیوستگی را نسبت به روش EBR، ٪۳۲ در دمای محیط افزایش داد و در دماهای بالا مقاومت پیوستگی را به خوبی حفظ کردند، به‌طوری که مقاومت پیوستگی نمونه‌ی FE-200،

۹٫۱۲ kN به‌دست آمد که نسبت به نمونه ی EBR-B-25، بدون تغییر و نسبت به نمونه EBR-B-200، ۹۰٪ افزایش یافت. همچنین حالت شکست تمامی نمونه‌های مقاوم‌سازی شده به دو روش ماسه‌پاشی و برس‌زنی، جداشدگی ورق CFRP از سطح بتن بود، در حالی که حالت شکست نمونه‌های مقاوم‌سازی شده به روش کاشت الیاف در تمام نمونه‌ها گسیختگی ورق CFRP بود.

۳-۱ نمودار بار-لغزش

نمودار بار-لغزش تمام نمونه‌ها ترسیم و در شکل‌های ارائه شده است. لازم به ذکر است لغزش در ابتدای ناحیه چسبانده شده ورق CFRP به بتن اندازه گیری گردیده.



شکل۳- نمودار بار لغزش نمونه‌ها. الف- نمودار بار-لغزش نمونه‌های ماسه‌پاشی شده. ب- نمودار بار-لغزش نمونه‌های برس‌زنی شده. ج- نمودار بار-لغزش نمونه‌های روش کاشت الیاف. د- نمودار بار-لغزش نمونه‌ها در دمای ۲۵ °C.

با مقایسه نمودار بار-لغزش نمونه‌های ماسه‌پاشی شده و برس‌زنی شده رفتار مشابهی دیده می‌شود. در این نمونه‌ها ابتدا با افزایش بار لغزش افزایش می‌یابد و پس از رسیدن به یک مقدار خاص(تقریبا ۹۵٪ بار نهای)، بار افزایش زیادی نداشته اما لغزش همچنان افزایش می‌یابد(شکل۳- الف و ب). بنابراین می‌توان مشاهده کرد، طول باند بیشتر باعث افزایش ظرفیت نشده است، این رفتار تایید کننده مفهوم طول موثر باند است (طول موثر باند به دست آمده از رابطه چن و تنگ در حدود ۷۴mm است). نکته قابل توجه دیگر این است که با افزایش دما تا قبل از دمای Tg رزین اپوکسی، شکل نمودار بار-لغزش نمونه‌ها تغییر نکرده اما با عبور از این دما شیب اولیه نمودارها کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده کاهش سختی محوری نمونه‌ها می‌باشد. با مشاهده نمودار

بار-لغزش نمونه‌های تقویت شده به روش کاشت الیاف رفتار متفاوتی دیده می‌شود. شیب نمودار بار-لغزش برای این نمونه‌ها تقریبا تا لحظه گسیختگی ثابت بوده و با افزایش دما، کاهش شیب و کاهش سختی محوری کمتری، نسبت به نمونه‌های دو روش قبل مشاهده می‌شود(شکل۳- ج). همچنین با مقایسه نمودار بار-لغزش نمونه‌ها، در یک دمای یکسان (به‌طور مثال در دمای ۲۵)، نمونه‌های تقویت شده به روش کاشت الیاف در مقایسه با دو روش دیگر دارای مقاومت نهایی و سختی بیشتر و شکل پذیری کمتر می‌باشند(شکل۳- د).

۴. نتیجه‌گیری

در این تحقیق اثر تنش‌های حرارتی و نوع آماده‌سازی سطحی بر مقاومت پیوستگی ورق‌های CFRP و بتن، چسبانده شده به روش EBR مورد بررسی قرار گرفت. روش‌های آماده‌سازی سطحی مورد نظر در این پژوهش، ماسه‌پاشی، برس‌زنی و یک روش پیشنهادی(کاشت الیاف در بتن) و دماهای مورد بررسی ۲۵°C، ۵۰°C، ۱۰۰°C، ۱۵۰°C و ۲۰۰°C بود. به این منظور۱۸ منشور بتنی به روش‌های گفته شده تقویت شد و پس از قرار گرفتن در معرض تنش‌های حرارتی، در دمای محیط تحت آزمایش برش یک طرفه قرار گرفتند.

بر اساس تجزیه و تحلیل نتایج تجربی پژوهش حاضر، می‌توان نتیجه‌گیری‌های زیر را انجام داد:

۱. دو روش آماده‌سازی سطحی برس‌زنی و ماسه‌پاشی، چه در دمای محیط و چه در زمان مواجهه با تنش‌های حرارتی دارای مقاومت پیوستگی و رفتار مشابه هستند.

۲. مقاومت پیوستگی و سختی محوری نمونه‌های آماده‌سازی سطحی شده به روش برس‌زنی، در مجموع تا دمای کمتر از Tg رزین اپوکسی کاهش نیافتند اما با عبور از این دما به‌شدت دچار کاهش مقاومت و سختی شدند. به‌عنوان مثال مقاومت پیوستگی نمونه‌های برس‌زنی شده در دماهای ۱۰۰°C، ۱۵۰°C و ۲۰۰°C به‌ترتیب ٪۳۵، ٪۴۱ و ٪۵۰ نسبت به دمای محیط(۲۵°C)،کاهش یافت. درحالی که مقاومت پیوستگی نمونه تست شده در دمای ۵۰°C، ٪۰٫۵ نسبت به دمای ۲۵°C افزایش یافت. نتایج روش ماسه‌پاشی نیز مشابه بود.

۳. حالت شکست تمام نمونه‌های برس‌زنی شده و ماسه‌پاشی شده جداشدگی ورق CFRP از سطح بتن بود، بنابر این این دو روش آماده‌سازی سطحی چه در دمای محیط و چه در زمان مواجه باتنش‌های حرارتی در استفاده کردن از حداکثر ظرفیت CFRP ناتوان هستند. بنابراین با توجه به این نتیجه و نتیجه‌ی۲، استفاده از این روش آماده‌سازی سطحی مخصوصا برای مکان‌هایی که احتمال قرار گرفتن در معرض تنش‌های حرارتی بالا تر از Tg رزین اپوکسی را دارد، توصیه نمی‌شود.

۴. حالت شکست نمونه‌های آماده‌سازی سطحی شده به روش کاشت الیاف به‌طور کامل پاره‌شدگی ورق CFRP بود. همچنین حداکثر کاهش مقاومت این روش نسبت به نمونه تست شده در دمای ۲۵°C، ٪۲۷ بود و کاهش سختی این روش بسیار کم بود. این موضوع نشان دهنده‌ی عملکرد خوب روش کاشت الیاف، در حفظ ظرفیت ورق CFRP در زمان مواجهه با تنش‌های حرارتی است.

۵. مقاومت پیوستگی نمونه‌های تقویت شده به روش پیشنهادی کاشت الیاف در دماهای ۲۵°C، ۵۰°C، ۱۰۰°C، ۱۵۰°C و ۲۰۰°C نسبت به نمونه‌های تقویت شده به روش معمول EBR(آماده‌سازی سطحی شده به روش برس‌زنی)، در دماهای یکسان به ترتیب ٪۳۲، ٪۳۳، ٪۵۹، ٪۶۶ و ٪۹۰ افزایش یافت. بنابراین استفاده از این روش جایگذین خوبی برای روش معمول EBR بوده و با افزایش تنش‌های حرارتی، استفاده از این روش کارایی بیشتری دارد.

۵. مراجع

1. Teng, J., et al. (2002), *"strengthened RC structures"* Frontiers in Physics, p. 266.
2. ACI 440.2R-08 (2008), *"Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures"*,American Concrete Institute.
3. Oehlers, D.J. and J.P. Moran (1990), *"Premature failure of externally plated reinforced concrete beams"* Journal of Structural Engineering, 116(4): p. 978-995.
4. Malek, A.M., H. Saadatmanesh, and M.R. Ehsani (1998), *"Prediction of failure load of R/C beams strengthened with FRP plate due to stress concentration at the plate end"* ACI structural Journal, 95: p. 142-152.
5. Kim, Y.J., et al. (2012), *"Fracture Characteristics of Notched Concrete Beams Shear-strengthened with CFRP Sheets Subjected to High Temperature"* Special Publication, 286: p. 1-20.
6. Burke, P.J., L.A. Bisby, and M.F. Green (2013), *"Effects of elevated temperature on near surface mounted and externally bonded FRP strengthening systems for concrete"*. Cement and Concrete Composites, 35(1): p. 190-199.
7. Klamer, E., D. Hordijk, and A. de Boer (2007) *"FE-analyses to study the effect of temperature on debonding of externally bonded CFRP"* in Proceedings of 8th International Symposium on Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures *(FRPRCS-8)*.
8. Blontrock, H. (2003), *"Analysis and modeling of the fire resistance of concrete elements with externally bonded FRP reinforcement"*, Ph. D. thesis, Ghent Univ., Ghent, Belgium.
9. Klamer, E.L., D.A. Hordijk, and H.J. Janssen (2005), *"The influence of temperature on the debonding of externally bonded CFRP"* Special issue of ACI, 230: p. 1551-70.
10. Wu, Z., et al. (2005), *"Temperature effect on bonding and debonding behavior between FRP sheets and concrete"* J. Soc. Mater. Sci, 54(5): p. 474-480.
11. Namrou, A.R. (2013), *"An experimental investigation into the behavior of concrete elements rerofitted with NSM composite strips at elevated temperatures"*. University of Colorado at Denver.
12. Al-Salloum, Y.A., H.M. Elsanadedy, and A.A. Abadel (2011), *"Behavior of FRP-confined concrete after high temperature exposure"* Construction and Building Materials, 25(2): p. 838-850.
13. Chen, J.F. and J. Teng (2001), *"Anchorage strength models for FRP and steel plates bonded to concrete"* Journal of Structural Engineering, 127(7): p. 784-791.
14. Ali-Ahmad, M., K. Subramaniam, and M. Ghosn (2006), *"Experimental investigation and fracture analysis of debonding between concrete and FRP sheets"*. Journal of engineering mechanics, 132(9): p. 914-923.