

رفتار حرارتی نمونه های خمشی تقویت شده با چسب ها و الیاف FRP مختلف

علی صدر ممتازی

دانشیار گروه عمران دانشگاه گیلان
sadrmtazi@yahoo.com

حمید رضا کرامتی

- کارشناسی ارشد مهندسی سازه، پردیس دانشگاهی، دانشگاه گیلان

بهزاد طهمورسی

کارشناسی ارشد مهندسی سازه، دانشگاه گیلان

چکیده

استفاده از کامپوزیت‌های پلیمری مسلح به الیاف (FRP) به طور گسترده‌ای در صنعت ساخت و ساز روبه افزایش است. نسبت مقاومت به وزن بالا، مقاوم در برابر خوردگی و پایایی مناسب از دلایل اصلی انتخاب و طراحی FRP هستند. با این حال در صورت قرار گیری این مواد در معرض حرارت، تغییر در خواص مواد، بر عملکرد سازه‌های آن تاثیر می‌گذارد. هدف از این پژوهش بررسی اثر چسب‌های سیمانی و اپوکسی بر عملکرد حرارتی نمونه‌های خمشی بتنی تقویت شده با پارچه‌های بازالت (BFRP) و شیشه (GFRP) است. به همین منظور ۱۰۵ نمونه خمشی (۱۰۰×۱۰۰×۵۰۰ میلی متر) با نسبت آب به سیمان یکسان ساخته شد و به مدت یک و سه ساعت، تحت دماهای ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ درجه قرار گرفتند. نتایج نشان داد که با افزایش دما مقاومت خمشی نمونه‌های تقویت نشده تا ۴۸٪ افت داشت. همچنین مقاومت خمشی نمونه‌های آغشته به چسب سیمانی و اپوکسی به ترتیب تا ۴۷٪ و ۶۰٪ کاهش پیدا کرد. نتایج حاصله از مدل ارائه شده نشان داد که در دماهای کمتر از ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد مقاومت خمشی نمونه‌های آغشته به چسب سیمانی کمتر از نمونه‌های آغشته به چسب اپوکسی است اما با افزایش دما تا ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد، مقاومت خمشی برای نمونه‌های تقویت شده با پارچه بازالت و شیشه به ترتیب تا ۱/۳ و ۱/۱۵ برابر افزایش می‌یابد. همچنین نمودار نسبت مقاومت خمشی نمونه‌های تقویت شده با پارچه بازالت به پارچه شیشه برای نمونه‌های آغشته به چسب سیمانی در دمای بالاتر از ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد روندی صعودی داشت حال آنکه این روند برای نمونه‌های آغشته به چسب اپوکسی نزولی بود. واژه‌های کلیدی: پارچه بازالت، پارچه شیشه، چسب سیمانی، چسب اپوکسی، حرارت

امروزه بتن مهمترین و پرمصرف ترین مصالح ساختمانی در ساخت سازه‌های مختلف رو زمینی نظیر ساختمان‌ها، پل‌ها، سکوها و نیز سازه‌های زیر زمینی مانند تونل‌ها و خطوط لوله‌های بتنی است [۲ و ۱]. در سراسر دنیا سازه‌هایی وجود دارند که برای سکونت یا حمل و نقل مورد استفاده قرار می‌گیرند. این سازه‌ها دارای تنوع در کیفیت و عملکرد می‌باشند؛ ولی همگی در طول زمان دچار فرسودگی و تخریب می‌شوند [۳ و ۴]. تغییر یک سازه بتن آرمه وقتی لازم می‌شود که اعضاء سازه ای آن قادر به تامین مقاومت یا سرویس دهی لازم نباشند. در عمل این موقعیت هنگامی بوقوع می‌پیوندد که سازه‌های بتن آرمه‌ی موجود یا بعضی از اجزاء آن‌ها، در اثر دلایل متعددی نامناسب و نیازمند مقاوم سازی تشخیص داده شوند. این وضعیت نامناسب ممکن است به دلیل آسیب‌های فیزیکی، تغییر کاربری، خوردگی آرماتورها یا خطاهای بوجود آمده در زمان طراحی یا اجرا، حادث شده باشد [۵ و ۶]. با توجه به قرارگیری ایران در کمربند زلزله خیز آلپ- هیمالیا و ضرورت عملکرد صحیح سازه‌ها در برابر زلزله برای زمانی که سازه‌های بتن آرمه موجود به دلایل تغییرات آئین‌نامه‌ها به مرور زمان ضوابط خاص آئین‌نامه‌ها را ارضاء نمی‌کنند، یا سازه‌هایی که بر اساس آئین‌نامه‌های قدیمی ساخته شده‌اند و در شرایطی به دلیل تغییر کاربری یک ساختمان، ایجاد ضعف در بعضی از اجزای آن دیده شود، از طرفی به دلیل حساسیت خاص این‌گونه سازه‌ها در برابر بارهای دینامیکی مانند زلزله یا اعمال ضربه در اثر انفجار سازه شکننده بوده است. اخیراً روش‌های سنتی مقاوم سازی جای خود را به روش جدیدی از مقاوم سازی توسط کامپوزیت‌های پلیمری مسلح به الیاف (FRP) داده‌اند [۷ و ۸]. در دو دهه گذشته مواد FRP به عنوان یک نوآوری و مصالح بسیار امیدوارکننده برای مقاوم سازی و بهبود خواص ذاتی سازه‌های مهندسی عمران پدیدار شده‌اند. مواد FRP دلیل داشتن ویژگی‌هایی از جمله: نسبت مقاومت به وزن بالا، مقاومت در برابر خوردگی، عمل آوری در زمان کم، نسبتاً مقرون به صرفه و نصب آسان، کامپوزیت‌هایی بسیار عالی برای مقاوم سازی و تقویت اعضای سازه‌ای به شمار می‌روند.

سابقه استفاده از این مصالح در کشورمان نیز به دهه دوم خود رسیده است و کاربرد این پلیمرها فراتر از استفاده کنونی بوده و مطالعات انجام شده هنوز ناکافی هستند و نیاز به بررسی حدود کاربرد این مصالح در ساختمان‌ها همچنان وجود دارد.

طیف گسترده ای از چسب‌های پایه پلیمری در مقاوم سازی با ورق‌های FRP به کار می‌روند که رایج‌ترین آن‌ها رزین‌های اپوکسی می‌باشند. از مزیت‌های رزین اپوکسی می‌توان به دسترسی آسان، سازگاری مناسب آن‌ها با الیاف تقویت کننده و خواص مکانیکی بالا اشاره نمود. اما در مقابل دارای معایبی از قبیل: (الف) هزینه نسبتاً بالا، (ب) آسیب برای کارگران، (پ) عدم تناسب با سطوح دارای رطوبت یا حرارت پایین، (ت) دشواری ارزیابی آسیب‌های متحمل شده بتن سالم مسلح به ژاکت FRP در پسا- زلزله و (ت) ضعف عملکرد در محیط‌های با حرارت بالا [۹]. یکی از مهمترین ویژگی‌های چسب‌های پایه پلیمری، دمای انتقال شیشه‌ای (Tg) است. در دماهای نزدیک به Tg تغییرات چشمگیری در مقاومت و سختی (کاهش مدول‌های برشی و کشسانی) رزین‌ها به وجود می‌آید، همچنین موجب افزایش پتانسیل انتشار بخارهای سمی می‌شود [۱۰].

به تازگی، انواع جدیدی از کامپوزیت‌های سیمانی مسلح به پارچه (TRCC) به عنوان جایگزین چسب‌های آلی در یکپارچه سازی عملکرد الیاف و نیز جهت برقراری پیوندی سازگارتر با سطح بتن و یا مصالح بنایی در حال آزمایش و گسترش می‌باشند. روش‌های مختلفی توسط پژوهشگران [۱۱ و ۱۲] بر روی چسب‌های معدنی به عنوان جایگزینی سازگارتر، با صرفه اقتصادی بیشتر و سالم برای محیط زیست، مورد مطالعه قرار گرفته‌اند.

Balaguru و Kurtz [۱۳] تیرهای تقویت شده با CFRP آغشته به دو نوع چسب اپوکسی و سیمانی را مقایسه کردند. نتایج نشان می‌دهد که چسب سیمانی در افزایش استحکام و طاقت تیرهای بتنی مسلح همانند چسب اپوکسی، با کاهش جزئی، در شکل پذیری موثر است. مکانیسم شکست از لایه لایه شدن ورق برای سیستم‌های

اپوکسی به پارگی ورق برای سیستم سیمانی تغییر کرد. این تغییر در مکانیسم به دلیل شکنندگی چسب سیمانی است که منجر به شکل گیری شکاف در کامپوزیت و تمرکز کرنش در ناحیه مشترک بین کامپوزیت و بتن می شود. سیستم های اپوکسی و سیمانی عملکرد قابل توجهی در افزایش مقاومت تیرهای بتنی مسلح فراهم داشتند. سیستم سیمانی و سیستم اپوکسی به خوبی موجب بهبود سختی پسا ترک می شوند.

Deng و Toutanji [۱۴] مقایسه بین چسب اپوکسی و سیمانی برای تیرهای بتن آرمه تقویت شده با پارچه کربن را بررسی کردند. این مطالعه تجربی شامل آزمایش دو گروه از فولاد تیرهای بتن آرمه بود. اولین گروه از تیرها با پارچه کربن متصل شده با یک چسب اپوکسی، و گروه دوم با چسب سیمانی تقویت شدند. اولین گروه از تیرها با ۲، ۳، و ۴ لایه هایی از پارچه کربن تقویت شدند، گروه دوم با ۲، ۳، ۴، و ۵ لایه پارچه کربن تقویت شدند. نتایج نشان داد که سیستم چسب سیمانی در افزایش مقاومت خمشی و طاقت تیرهای بتنی مسلح همانند چسب اپوکسی موثر است. مکانیسم شکست سیستم سیمانی، شکننده تر بود. پس از شکست تیرهای تقویت شده با چسب سیمانی، ترک خوردگی در کامپوزیت و حداقل تجمع کرنش (محل اتصال چسب به سطح بتن) نشان داد. مقادیر تجربی به خوبی با مدل تحلیلی دیگران تناسب داشت.

در این پژوهش اثر چسب های سیمانی و اپوکسی بر رفتار حرارتی (عملکرد مکانیکی و شکل پذیری) نمونه های خمشی بتنی تقویت شده با پارچه های بازالت و شیشه، تحت دماهای بالا (۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ درجه سانتی گراد) به مدت یک و سه ساعت قرار گیری، بررسی شد. نمونه های ساخته شده، با استفاده از دو نوع چسب خمیر سیمان و رزین اپوکسی به صورت تقویت در یک وجه منشور در یک لایه با پارچه، تقویت شدند.

۲- برنامه آزمایشگاهی

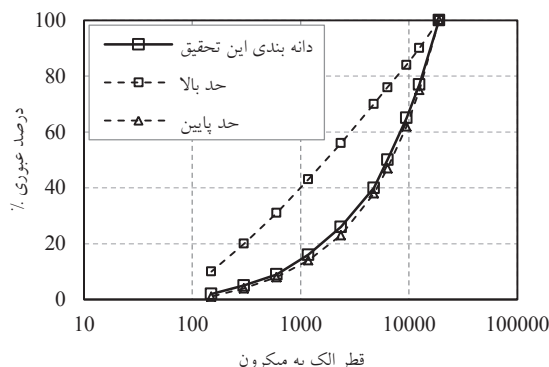
۲-۱- مصالح

سیمان به کار رفته در این تحقیق از نوع پرتلند تیپ ۴۲۵-۱ و منطبق بر الزامات ASTM C33 بود. شن و ماسه مصرفی از نوع شکسته و رودخانه ای به ترتیب با چگالی ۲/۶۹ و ۲/۶۱ و حداکثر اندازه ۱۹ میلی متر جهت ساخت بتن استفاده شد. دانه بندی مخلوط بتن مطابق با روش طرح اختلاط ملی بود که در شکل ۱ نشان داده شده است. مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه های مکعبی ۱۵۰×۱۵۰×۱۵۰ میلی متری پس از عمل آوری مطابق الزامات ASTM C109 برابر ۳۵ مگاپاسکال بود. طرح اختلاط بتن به صورت نسبت وزنی (سیمان: ماسه: شن: به ترتیب ۱: ۱/۸: ۲/۸۵) بود.

پارچه بازالت و شیشه به صورت یک لایه در ابعاد (۵۰۰×۱۰۰ میلی متر) به کار برده شدند. مشخصات پارچه بازالت (مقاومت کششی: ۲۸۰۰ MPa، مدول الاستیسیته: ۹۳ GPa، کشامدگی: ۲/۸٪، ضخامت: ۰/۲ میلی متر، وزن واحد سطح: ۲۲۰ gr/m²) و پارچه شیشه (مقاومت کششی: ۲۱۰۰ MPa، مدول الاستیسیته: ۷۱ GPa، کشامدگی: ۲/۶٪، ضخامت: ۰/۲۲، وزن واحد سطح: ۱۹۰ gr/m²) بود.

از دو چسب مختلف سیمانی و اپوکسی جهت اتصال پارچه های FRP به سطح نمونه های خمشی استفاده شد. چسب سیمانی دارای ۰/۰۵٪ حجمی الیاف ۶ میلی متری پلی پروپیلن (جهت افزایش مقاومت کششی یا خمشی) بود. مقاومت فشاری چسب سیمانی مطابق با استاندارد ASTM C109 انجام شد که پس از ۲۸ روز قرار گیری حوض آب، ۷۲ مگاپاسکال بود. مخلوط آن حاوی مواد ریز دانه به جهت نفوذ به پارچه های تقویت کننده، و نیز دارای ویسکوزیته و نسبت آب به سیمان پایین به جهت کسب مقاومت بالا و عملکرد مناسب در پایایی در دراز مدت است. طرح اختلاط چسب سیمانی به صورت وزنی (سیمان: دوده سیلیسی: آب: فوق روان کننده به ترتیب ۱: ۰/۲۵: ۰/۲: ۰/۰۱) بود. چسب اپوکسی تهیه شده از شرکت ایران کامپوزیت و به صورت دو بخشی با نسبت وزنی (رزین: هاردنر به ترتیب ۱: ۱/۲۵) و مشخصات (چگالی ۱/۴ gr/cc، حداکثر زمان عمل آوری: ۸ ساعت، مقاومت کششی: MPa

۶۲ و مدول الاستیسیته: $3/1 \text{ GPa}$ بود. در این مقاله چسب سیمانی و اپوکسی به ترتیب با حروف CI و EI معرفی شده اند.



شکل ۱- دانه بندی سنگدانه مصرفی

۲-۲- مقاوم سازی نمونه ها

به منظور بررسی اثر انواع پارچه FRP و چسب های سیمانی و اپوکسی در دماهای مختلف، ۱۰۵ نمونه خمشی بتنی با ابعاد $100 \times 100 \times 500$ میلی متر ساخته شد. نمونه های ساخته شده به دو دسته ۴۲ تایی تقسیم شدند و به ترتیب با پارچه بازالت و شیشه تقویت شدند، ۲۱ نمونه دیگر نیز به عنوان شاهد بدون تقویت تحت آزمایش قرار گرفتند.

نمونه ها پس از ۲۴ ساعت بتن ریزی، از قالب خارج شدند و برای تقویت با چسب اپوکسی، به مدت ۵۶ روز در مخزن آب آهک عمل آوری شدند. بعد از خارج کردن نمونه ها از مخزن و قرار گیری در هوای آزاد به مدت ۱۰ روز، سطح آن ها با یک برس سیمی به منظور ایجاد ناهمواری ملایم جهت در گیری بهتر چسب با سطح بتن پرداخت شد، پس از آن جهت از بین بردن گرد و خاک باقی مانده سطوح برس خورده تحت باد با فشار زیاد، قرار داده شدند. چسب اپوکسی دوقسمی شامل رزین و هاردنر بود که به مدت ۵-۷ دقیقه با نسبت های مشخص شده توسط کارخانه سازنده، توسط مخلوط کن، ترکیب شدند. بعد از آن یک سمت نمونه در چسب غوطه ور و با پارچه از پیش آغشته تقویت شد. به منظور اطمینان از عمل آمدگی کامل رزین اپوکسی، نمونه ها پس از ۷ روز تحت آزمایش قرار گرفتند.

برای تقویت با چسب سیمانی، بعد از ۲۸ روز نمونه ها از حوض آب خارج شدند و عملیات پرداخت مشابه قبل بر روی آن ها انجام شد. پس از آن، یک لایه مخلوط چسب سیمانی به سطح نمونه ها آغشته شد و در آخر پارچه های از پیش آغشته به چسب سیمانی نیز به سطح نمونه ها چسبانده شد (جهت نفوذ بهتر چسب به داخل پارچه ها از میز ویبره استفاده شد). بعد از گیرش اولیه چسب سیمانی (۷-۱۵ دقیقه)، نمونه ها به مدت ۲۴ در داخل پلاستیک بسته بندی شدند. سپس مجدداً به مدت ۲۸ در حوض آب قرار گرفتند. پس از خروج از حوض آب، به مدت ۱۰ روز در هوای آزاد قرار گرفته و آزمایش شدند [۱۵]. شکل ۲ مقاوم سازی نمونه ها را نشان می دهد.



شکل ۲- مقاوم سازی نمونه های خمشی

۳-۲- آزمایش مقاومت خمشی

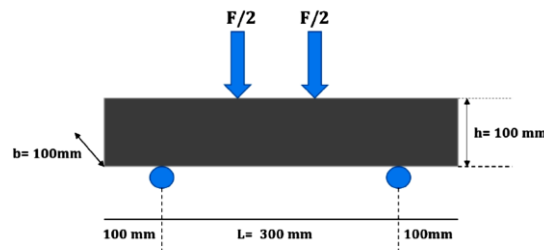
پس از عمل‌آوری نمونه‌های منشوری، تحت آزمون خمشی چهار نقطه ای مطابق استاندارد 78 ASTM قرار گرفتند. نمونه‌ها تحت بارگذاری تک محوره و با سرعت (۱ میلی‌متر بر دقیقه) بودند. شکل ۳ شماتیک اندازه‌گیری مقاومت خمشی را نشان می‌دهد.

۴-۲- سیستم حرارتی

نمونه‌های منشوری در دمای محیط و سه دمای ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد، به مدت یک و سه ساعت در کوره الکتریکی نشان داده شده در شکل ۴ قرار گرفتند.



شکل ۳- شماتیک اندازه‌گیری مقاومت خمشی



شکل ۴- کوره الکتریکی

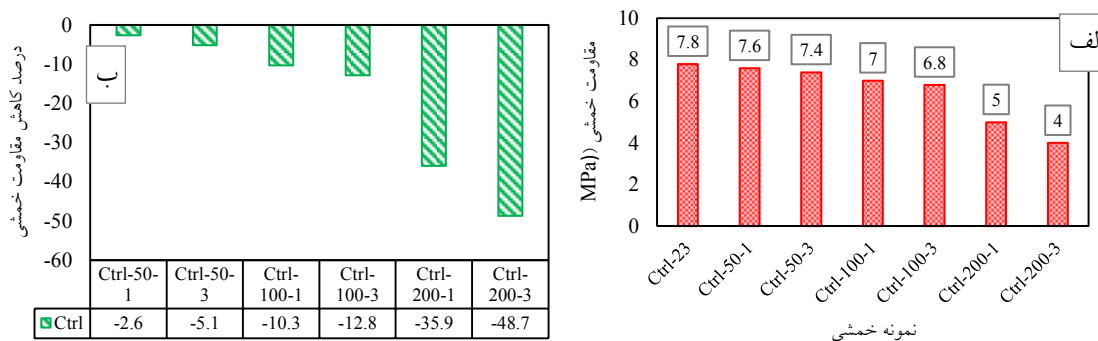
۳- بحث و بررسی نتایج

نتایج متوسط سه نمونه به عنوان مقدار نهایی مقاومت خمشی در نظر گرفته شد. در این پژوهش حرف اول، دوم و سوم نمونه‌ها به ترتیب نشان دهنده نوع پارچه FRP، نوع چسب، درجه حرارت و میزان قرارگیری در حرارت است به عنوان مثال: BCI-200-3 نشان دهنده نمونه تقویت شده با پارچه بازالت و چسب سیمانی که ۳ ساعت تحت حرارت ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد بوده است.

۳-۱- نمونه‌های تقویت نشده (Ctrl)

شکل ۵- (الف) مقاومت خمشی نمونه‌های منشوری را نشان می‌دهد. با توجه به شکل واضح است که با افزایش درجه حرارت و مدت قرارگیری آن در حرارت مقاومت کاهش پیدا می‌کند [۱۶-۱۸]. به نظر می‌رسد که مقاومت خمشی تا دمای نزدیک به ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد چندان تحت تاثیر قرار نگرفته و مقدار اختلاف و افت مقاومت آن محسوس نیست، اما با افزایش دما تا ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد و نیز افزایش مدت زمان قرارگیری در آن دما مقاومت

افت محسوسی دارد. بیشترین مقاومت خمشی مربوط به نمونه بدون تقویت (شاهد) در دمای معمولی (Ctrl- 23) با مقدار ۷/۸ مگاپاسکال و کمترین مقدار مقاومت خمشی مربوط به نمونه (Ctrl- 200-3) با مقدار ۴ مگاپاسکال است. شکل ۵- (ب) درصد مقامت خمشی نمونه‌های بدون تقویت شده نسبت به نمونه Ctrl-23 را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش دما تا ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد مقاومت خمشی در حدود ۳۵٪ تا ۴۸٪ کاهش پیدا کرده است. میزان کاهش مقاومت تا ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد بین ۱۰٪ تا ۱۲/۵٪ بوده است، اما افت محسوس در حرارت بالا تر اتفاق افتاده است که حداقل مقدار حدود ۲۳٪ است. مطابق پژوهش انجام شده توسط Husem [۱۹] بر روی تاثیر حرارت بر مقاومت فشاری و مقاومت خمشی بتن‌های معمولی و بتن‌های با عملکرد بالا نشان داد که در دماهای بالای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد آب داخل بتن و همچنین آب داخل بافت ترکیبات بتن شروع به بخار شدن کرده و از آنجایی که برخی از حفرات و ریزکانال‌های بتن مسدود هستند و به بیرون راه ندارد، بخار آب در داخل آن‌ها گیر کرده و با افزایش دما میزان بخار افزایش یافته که موجب ایجاد فشار به دیواره‌های حفرات شده که موجب ایجاد ریز ترک شده و از آنجایی بتن مقاومت چندانی در برابر کشش ندارد این ترک‌های کششی موجب افت مقاومت خمشی می‌شود. میزان درصدد افت مقاومت خمشی برای نمونه‌های تحت یک و سه ساعت به ترتیب برای منشورهای ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد ۲/۶٪، ۲/۸٪ و ۲۰٪ است.



شکل ۵- الف) مقاومت خمشی نمونه‌های تقویت نشده، ب) نسبت مقاومت خمشی نمونه تقویت نشده به نمونه شاهد (Ctrl-23)

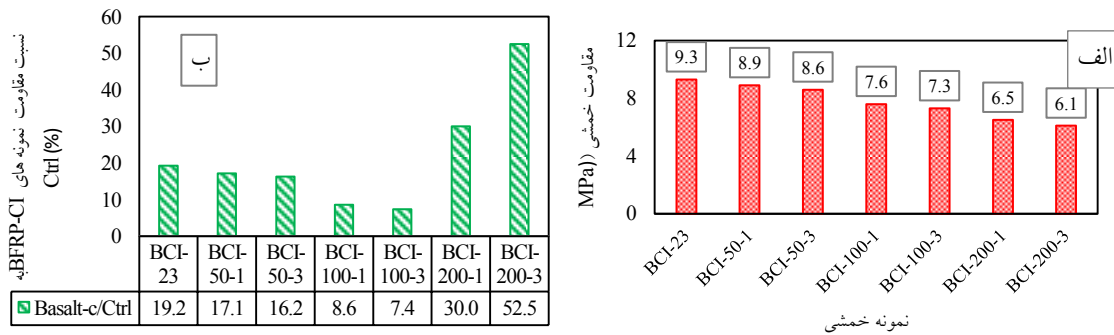
۳-۲- نمونه‌های تقویت شده با پارچه بازالت (BFRP)

۳-۲-۱- چسب سیمانی (CI)

شکل ۶- الف) مقاومت خمشی نمونه‌های تقویت شده با الیاف بازالت و چسب سیمانی را نشان می‌دهد. بیشترین مقدار مقاومت مربوط به نمونه Basalt- 23 بوده که مقدار آن برابر ۹/۳ مگاپاسکال است و کمترین مقدار آن مربوط به نمونه Basalt-200-3 بوده که مقدار آن برابر ۶/۱ مگاپاسکال است.

شکل ۶- ب) نسبت مقاومت خمشی نمونه‌های تقویت شده با پارچه بازالت-چسب سیمانی به مقاومت نمونه‌های تقویت نشده (شرایط دمایی یکسان) را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در تمام موارد و شرایط دمایی مقاومت خمشی نمونه‌های تقویت شده بالاتر است. در دمای محیط (۲۳ درجه سانتی‌گراد)، مقاومت خمشی ۱۹/۲٪ افزایش یافته است. در دما ۵۰ درجه سانتی‌گراد به ترتیب برای مدت زمان‌های یک و سه ساعته مقاومت خمشی ۱۷/۱٪ و ۱۶/۲٪ بیشتر بود که نشان دهنده پایداری حرارتی است. همچنین اثر مدت زمان ۲ ساعت، موجب کاهش ۳/۳۷٪ مقاومت شده است. برای حرارت ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد مقاومت خمشی در مدت زمان‌های یک و سه ساعت به ترتیب ۸/۱٪ و ۷/۴٪ بیشتر بود که تاثیر میزان دوساعت اختلاف حرارت، موجب کاهش ۳/۹۴٪ مقاومت شد. در دما ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد و میزان قرارگیری نمونه‌ها در مدت زمان یک و سه ساعت ۳۰٪ و ۵۲/۵٪ بود.

با توجه به نتایج به نظر می‌رسد که در حرارت‌های بالا مقاوم سازی با مصالح سیمانی، به طور مناسبی می‌تواند طاقت خمشی و تحمل در برابر حرارت نمونه را بهبود بخشد.



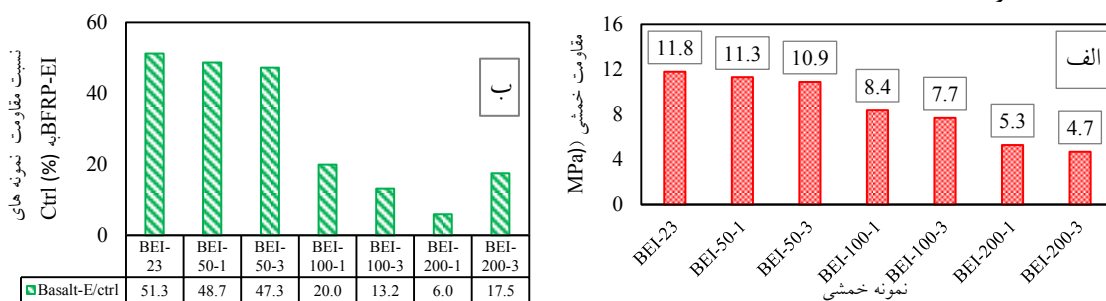
شکل ۶- الف) مقاومت خمشی نمونه های BFRP-CI، ب) نسبت مقاومت نمونه های BFRP-CI به مقاومت نمونه های Ctrl (هم دم)

۳-۲-۲- چسب اپوکسی (EI)

شکل ۷- الف) مقاومت خمشی نمونه های تقویت شده با پارچه بازالت و چسب اپوکسی را نشان می دهد. مشاهده می شود که دما موجب کاهش مقاومت تا حدود ۷ مگاپاسکال شده است.

شکل ۷- ب) نسبت مقاومت خمشی نمونه های تقویت شده با پارچه بازالت و چسب اپوکسی به نمونه های تقویت نشده (شرایط دمایی یکسان) را نشان می دهد. مشاهده می شود که در تمام موارد و شرایط دمایی مقاومت خمشی نمونه های تقویت شده نسبت به نمونه های خمشی تقویت نشده بالاتر است.

در دمای محیط (۲۳ درجه سانتی گراد)، مقاومت خمشی ۵۱/۲٪ افزایش یافته است. در حرارت ۵۰ درجه سانتی گراد به ترتیب برای مدت زمان های یک و سه ساعته میزان مقاومت خمشی ۴۸٪ و ۴۷٪ بیشتر بود، که نشان می دهد حرارت ۵۰ درجه سانتی گراد اثر محسوسی بر پیوند بین پارچه و سطح بتن نمونه منشوری نداشته است. قرارگیری دو ساعت بیشتر نمونه در دمای ۵۰ درجه سانتی گراد، موجب کاهش ۳/۵٪ مقاومت می شود. مقاومت خمشی در دمای ۱۰۰ درجه سانتی گراد، در مدت زمان های یک و سه ساعت به ترتیب ۲۰٪ و ۱۳/۲٪ درصد مقاومت بیشتر بود که تاثیر میزان دو ساعت اختلاف حرارت موجب کاهش ۱۰٪ مقاومت می شود. در این دما با توجه به رسیدن اپوکسی به دمای انتقال شیشه ای کاهش مقاومت محسوسی مشاهده می شود و مقدار اختلاف مقاومت بر اثر مدت زمان قرارگیری نیز قابل توجه است. در دما ۲۰۰ درجه سانتی گراد و قرارگیری نمونه ها در به مدت زمان یک و سه ساعت ۶٪ و ۱۷/۵٪ درصد مقاومت بالاتر بود. همچنین اختلاف زمان دو ساعته نمونه موجب کاهش ۱۱/۳٪ مقاومت شد.



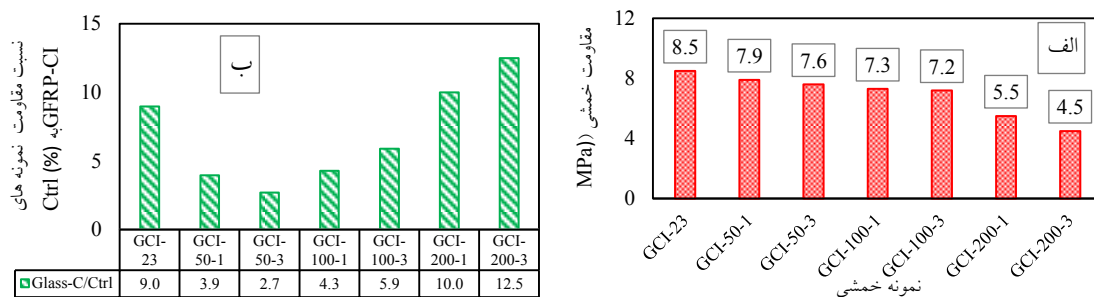
شکل ۷- الف) مقاومت خمشی نمونه های BFRP-EI، ب) نسبت مقاومت خمشی نمونه های BFRP-EI به مقاومت نمونه های Ctrl (هم دم)

۳-۳- نمونه های تقویت با پارچه شیشه (GFRP)

۳-۳-۱- چسب سیمانی (CI)

شکل ۸- الف) مقاومت خمشی نمونه های تقویت شده با پارچه شیشه و چسب سیمانی تحت شرایط دمایی مختلف را نشان می دهد. با افزایش دما مقاومت خمشی کاهش یافته است. بیشترین مقدار مقاومت مربوط به نمونه Glass-23 و کمترین آن Glass-200-3 است که به ترتیب برابر ۸/۵ و ۴/۵ مگاپاسکال است.

شکل ۸- (ب) نسبت مقاومت خمشی نمونه‌های تقویت شده با پارچه شیشه و چسب سیمانی به نمونه‌های تقویت نشده (Ctrl) را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در تمام شرایط دمایی مقاومت خمشی نمونه‌های تقویت شده نسبت به نمونه‌های خمشی تقویت نشده بالاتر است. در دمای محیط (۲۳ درجه سانتی‌گراد)، مقاومت خمشی ۸/۵٪ افزایش یافته است. در دما ۵۰ درجه سانتی‌گراد به ترتیب برای مدت زمان‌های یک و سه ساعته، مقاومت خمشی ۳/۹٪ و ۲/۷٪ بالاتر بود. همچنین اثر مدت زمان ۲ ساعته موجب کاهش ۳/۸٪ مقاومت شده است. در دما ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد نیز مقاومت خمشی در مدت زمان‌های یک و سه ساعت به ترتیب ۴/۳٪ و ۵/۹٪ مقاومت بیشتر بود که تاثیر میزان دوساعت اختلاف حرارت موجب کاهش ۱/۵٪ مقاومت شد. در دما ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد و میزان قرارگیری نمونه‌ها در مدت زمان یک و سه ساعت ۱۰٪ و ۱۲/۵٪ بود.

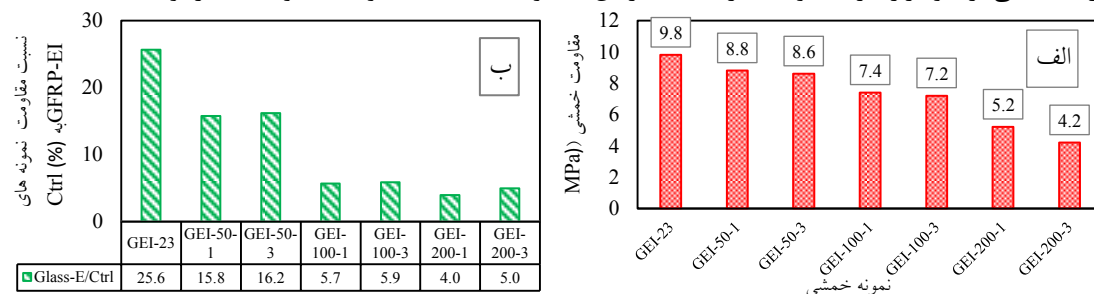


شکل ۸- (الف) مقاومت خمشی نمونه‌های GFRP-CI، (ب) نسبت مقاومت خمشی نمونه‌های GFRP-CI به مقاومت نمونه‌های Ctrl (هم دما)

۳-۳-۲- چسب اپوکسی (EI)

شکل ۹- (الف) مقاومت خمشی نمونه‌های تقویت شده با پارچه شیشه و چسب اپوکسی تحت شرایط دمایی مختلف را نشان می‌دهد. با افزایش حرارت مقاومت خمشی کاهش یافته است. بیشترین مقدار مقاومت مربوط به نمونه Glass-23 بوده که مقدار آن برابر ۹/۸ مگاپاسکال است و کمترین مقدار آن مربوط به نمونه Glass-200-3 بوده که مقدار آن برابر ۴/۲ مگاپاسکال است. مشاهده می‌شود که حرارت موجب کاهش حدود ۵ مگاپاسکال شده است.

شکل ۹- (ب) نسبت مقاومت خمشی نمونه‌های تقویت شده با پارچه شیشه و چسب اپوکسی به نمونه‌های Ctrl را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در تمام موارد و شرایط دمایی مقاومت خمشی نمونه‌های تقویت شده نسبت به نمونه‌های خمشی تقویت نشده بالاتر است. در دمای محیط (۲۳ درجه سانتی‌گراد)، مقاومت خمشی تا ۲۵/۶٪ افزایش یافته است. در دما ۵۰ درجه سانتی‌گراد به ترتیب برای مدت زمان‌های یک و سه ساعته میزان مقاومت خمشی ۱۵/۸٪ و ۱۶/۲٪ بالاتر بود که میزان پایداری در برابر حرارت را نشان می‌دهد، دما ۵۰ درجه سانتی‌گراد اثر محسوسی بر پیوند بین پارچه و سطح بتن نمونه منشوری نداشته است. اثر مدت زمان دو ساعته موجب کاهش ۲/۳٪ مقاومت شده است. در دما ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد نیز مقاومت خمشی در مدت زمان‌های یک و سه ساعت به ترتیب ۵/۷٪ و ۵/۹٪ مقاومت بیشتر بود که تاثیر میزان دوساعت اختلاف حرارت موجب کاهش ۲/۷٪ مقاومت شد. در این دما توجه به رسیدن اپوکسی به دمای انتقال شیشه‌ای کاهش مقاومت محسوسی مشاهده می‌شود. در دما ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد و قرارگیری نمونه‌ها در به مدت زمان یک و سه ساعت ۴٪ و ۵٪ مقاومت بالاتر بود.



شکل ۹- (الف) مقاومت خمشی نمونه‌های GFRP-EI، (ب) نسبت مقاومت خمشی نمونه‌های GFRP-EI به مقاومت نمونه‌های Ctrl (هم دما)

۴- حالت شکست نمونه‌های منشوری

شکل ۱۰ شکست نمونه‌های خمشی را بعد بارگذاری نشان می‌دهد. شکست نمونه‌های آغشته به چسب سیمانی، به صورت ترد و ناگهانی بود. در برخی موارد جداسدگی بین پارچه تقویت کننده و سطح بتن نمونه مشاهده شد. نمونه‌های آغشته به چسب اپوکسی به نسبت رفتار انعطاف پذیرتری را از خود به نمایش گذاشتند. در سه نمونه منشوری، افزایش مقاومت خمشی نمونه تقویت شده نسبت به نمونه شاهد اندک بود که شروع به رشد ریز ترک‌ها در نمونه منشوری تقویت شده، قبل از وارد عمل شدن سیستم مقاوم سازی شده، می‌تواند دلیل آن باشد. در نمونه‌های شاهد نیز شکست به صورت ایجاد ریز ترک، رشد و توسعه آن در راستای نیرو (عمود بر راستای طولی نمونه)، اتفاق افتاد.



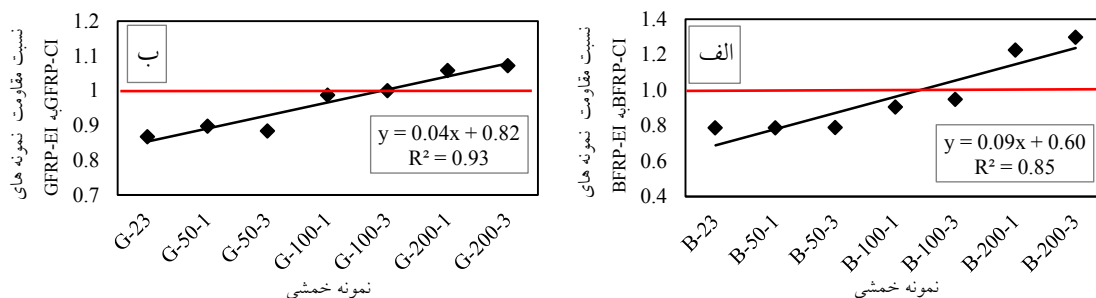
(ب)

(الف)

شکل ۱۰- نمونه‌های در معرض دمای معمولی (۲۰ درجه سانتی‌گراد) تقویت شده با پارچه بازالت و: (الف) چسب سیمانی، (ب) چسب اپوکسی

۵- مقایسه نتایج

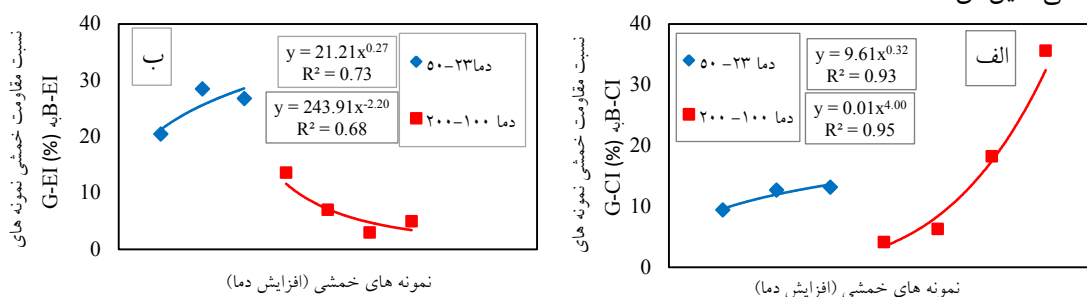
شکل ۱۱- (الف)، نسبت مقاومت خمشی نمونه‌های BFRP-CI به نمونه‌های BFRP-EI را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در دماهای پایین (کمتر از ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد) نسبت مقاومت نمونه‌های آغشته به چسب سیمانی کمتر از نمونه‌های آغشته به چسب اپوکسی است. اما با افزایش حرارت تا دمای شیشه‌ای شدن چسب اپوکسی، اختلاف مقاومت کاهش یافته و در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد مقاومت خمشی نمونه‌های آغشته به چسب سیمانی مقاومتری بیشتر از نمونه‌های آغشته به چسب اپوکسی دارند. به طوری که مقاومت نمونه‌های BFRP-CI در مقایسه با نمونه‌های BFRP-EI در دما ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت یک و سه ساعت به ترتیب ۱/۲ و ۱/۳ برابر بالاتر بود. شکل ۱۱- (ب) نسبت مقاومت خمشی نمونه‌های GFRP-CI به مقاومت GFRP-EI را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در روند در این شکل مشابه شکل ۱۱- (الف) است. مقاومت خمشی نمونه‌های GFRP-CI تحت حرارت ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت یک و سه ساعت ۱/۱ و ۱/۱۵ برابر بالاتر بود.



شکل ۱۱- نسبت مقاومت خمشی: (الف) نمونه‌های BFRP-CI به مقاومت BFRP-EI، (ب) نمونه‌های GFRP-CI به مقاومت GFRP-EI

شکل ۱۲- (الف) نسبت مقاومت خمشی نمونه‌های B-CI به G-CI و شکل ۱۲- (ب) نسبت مقاومت خمشی نمونه‌های B-EI به G-EI را نشان می‌دهد. در هر دو شکل مقدار نسبت مثبت است که بیان‌گر بالا بودن مقاومت خمشی تقویت شده با الیاف بازالت است.

در دمای ۲۳-۵۰ درجه سانتی‌گراد مقاومت نمونه‌های آغشته به چسب سیمانی کمتر از چسب اپوکسی است، اما با افزایش دما (۱۰۰-۲۰۰ درجه سانتی‌گراد)، نسبت مقاومت با شدت بیشتری صعودی می‌شود به طوری که در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد در مدت سه ساعت، نمونه‌های آغشته به چسب سیمانی نسبت مقاومت بالایی را کسب کرده‌اند. این موضوع بیان‌گر تاثیر مثبت و بالا بودن تحمل پذیری چسب سیمانی در دماهای زیاد است. در شکل ۱۲- (ب) سیستم تقویت با اپوکسی در دمای (۱۰۰-۲۰۰ درجه سانتی‌گراد) نمودار روندی نزولی دارد که ضعف رزین اپوکسی دلیل آن است.



شکل ۱۲- نسبت مقاومت خمشی: نمونه‌های B-CI به G-CI، (ب) نسبت مقاومت خمشی نمونه‌های B-EI به G-EI

۶- نتیجه گیری

در این پژوهش رفتار حرارتی (عملکرد مکانیکی و شکل پذیری) نمونه‌های خمشی بتنی تقویت شده با الیاف بازالت و شیشه تحت دماهای (۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد) به مدت یک و سه ساعت قرارگیری، بررسی شد. نتایج حاصل از آزمایش نشان داد:

- عملکرد مقاومتی نمونه‌های مقاوم سازی شده با چسب اپوکسی در دماهای کمتر از ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد (کمتر از دمای شیشه‌ای شدن) بیشتر از چسب سیمانی بود.

- افزایش حرارت موجب کاهش حداقل ۲/۶٪ و حداکثر ۴۸٪ مقاومت خمشی در نمونه‌های تقویت نشده، می‌شود. در نمونه‌های تقویت شده با الیاف بازالت و چسب سیمانی و چسب اپوکسی به ترتیب، افزایش دما موجب کاهش ۳۴٪ و ۶۰٪ مقاومت شد، این اثر کاهش مقاومت در نمونه‌های تقویت شده با الیاف شیشه به ترتیب ۴۷٪ و ۵۷٪ بود.

- مقاومت نمونه‌های تقویت شده با چسب سیمانی برای الیاف بازالت و الیاف شیشه نسبت به نمونه‌های تقویت نشده با شرایط دمایی برابر، به ترتیب حداقل ۷/۴٪ و ۲/۷٪ بالاتر بود. این مقدار برای نمونه‌های تقویت شده با چسب اپوکسی به ترتیب ۶٪ و ۴٪ بود. با افزایش دما تا ۲۰۰ درجه نسبت حداقل مقاومت نمونه‌های تقویت شده با چسب سیمانی به چسب اپوکسی، به ترتیب برای الیاف بازالت و شیشه ۱/۲ و ۱/۱ برابر بالاتر بود.

- استفاده از چسب معدنی در برخی موارد منجر به شکست و همچنین جداشدگی چسب شده است، که استفاده از تدابیر بهتر اتصال بین لایه مقاوم سازی و سطح بتن موجب کاهش این اثرات می‌شود.

- در حرارت‌های کمتر از ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد نسبت مقاومت نمونه‌های مقاوم شده با چسب سیمانی کمتر از چسب اپوکسی است اما با افزایش حرارت روند نسبت مقاومت صعودی است و مخصوصاً در دما ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد در مدت سه ساعت، نمونه‌های چسب شده با چسب سیمانی نسبت مقاومت بالایی را کسب کرده‌اند. که اثر مثبت و بالا بودن تحمل پذیری در برابر حرارت توسط چسب سیمانی را نشان می‌دهد.

۷- تشکر و قدردانی

از آزمایشگاه بتن و مصالح ساختمانی دانشگاه گیلان بابت فراهم نمودن امکانات آزمایشگاهی برای این مقاله تشکر و قدردانی می‌گردد.

۸- مراجع

- [1] McCormac, J.C. and Brown, R.H., 2015. *Design of reinforced concrete*. John Wiley & Sons.
- [2] Sadrmomtazi Ali, Tahmouresi Behzad, and Kohani Khoshkbijari, Reza. (2016). *An Investigation on Mechanical Properties and Durability of Concrete Containing Silica Fume and Fly Ash*. *Civil Engineering Journal* 2, 5, 189-196.
- [3] Mostofinejad, D. and Talaeitaba, S.B., (2006). *Finite element modeling of RC connections strengthened with FRP laminates*. *Iranian Journal of Science & Technology, Transaction B, Engineering*, 30(B1), pp.21-30.
- [4] Teng, J.G., Chen, J.F., Smith, S.T. and Lam, L., (2002). *FRP: strengthened RC structures*. *Frontiers in Physics*, 1.
- [5] Tzoura, E. and Triantafyllou, T.C., 2016. *Shear strengthening of reinforced concrete T-beams under cyclic loading with TRM or FRP jackets*. *Materials and Structures*, 49(1-2), pp.17-28.
- [6] سازمند، ا.، مالک ش.، و ساعدی داریان، ا. (۱۳۹۰). بهسازی اجزاء و اتصالات پایه های قابی شکل بتن آرمه پل ها با بهره گیری از مواد کامپوزیت، نشریه مهندسی عمران و نقشه برداری (دانشکده فنی)، ۴۵، ۲، ۱۷۹-۱۹۰.
- [7] Tetta, Z.C., Koutas, L.N. and Bournas, D.A., 2015. *Textile-reinforced mortar (TRM) versus fiber-reinforced polymers (FRP) in shear strengthening of concrete beams*. *Composites Part B: Engineering*, 77, pp.338-348.
- [8] Nilimaa, J., Bagge, N., Blanksvärd, T. and Täljsten, B., 2015. *NSM CFRP Strengthening and Failure Loading of a Posttensioned Concrete Bridge*. *Journal of Composites for Construction*, 20(3), p.04015076.
- [9] Di Ludovico, M., Prota, A. and Manfredi, G., (2010). *Structural upgrade using basalt fibers for concrete confinement*. *Journal of composites for construction*, 14(5), pp.541-552.
- [10] Kodur, V.K.R. and Bisby, L.A., (2005). *Evaluation of fire endurance of concrete slabs reinforced with fiber-reinforced polymer bars*. *Journal of structural engineering*, 131(1), pp.34-43.
- [11] Reddy, D.V., Sobhan, K. and Young, J., (2006). *Effect of fire on structural elements retrofitted by carbon fiber reinforced polymer composites*. In *31st conference on our world in concrete & structures* (pp. 16-17).
- [12] Trapko, T., (2013). *Fibre reinforced cementitious matrix confined concrete elements*. *Materials & Design*, 44, pp.382-391.
- [13] Kurtz, S. and Balaguru, P., (2001). *Comparison of inorganic and organic matrices for strengthening of RC beams with carbon sheets*. *Journal of Structural Engineering*, 127(1), pp.35-42.
- [14] Toutanji, H. and Deng, Y., (2007). *Comparison between organic and inorganic matrices for RC beams strengthened with carbon fiber sheets*. *Journal of Composites for Construction*, 11(5), pp.507-513.
- [۱۵] صدر ممتازی، ع.، خبازنیا، م.، و باران دوست ج. (۱۳۹۵). بررسی تاثیر چسب آلی و معدنی بر رفتار مکانیکی و شکل پذیری استوانه های دورپیچ شده با انواع پارچه FRP. کنفرانس ملی پلیمر در صنایع راه و ساختمان، اردیبهشت ۱۳۹۵ - دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران.
- [16] Ye, G., Liu, X., De Schutter, G., Taerwe, L. and Vandeveld, P., (2007). *Phase distribution and microstructural changes of self-compacting cement paste at elevated temperature*. *Cement and Concrete Research*, 37(6), pp.978-987.
- [17] Kodur, V.K.R., Cheng, F.P., Wang, T.C. and Sultan, M.A., (2003). *Effect of strength and fiber reinforcement on fire resistance of high-strength concrete columns*. *Journal of Structural Engineering*, 129(2), pp.253-259.
- [18] Aslani, F. and Samali, B., (2014). *Constitutive relationships for steel fibre reinforced concrete at elevated temperatures*. *Fire Technology*, 50(5), pp.1249-1268.
- [19] Husem, M., (2006). *The effects of high temperature on compressive and flexural strengths of ordinary and high-performance concrete*. *Fire Safety Journal*, 41(2), pp.155-163.

Thermal Behavior of Flexural Specimens Strengthened with Various Adhesives and FRPs

Ali Sadrumontazi¹, Hamidreza Kramati², Behzad Tahmouresi³

1. Associate Professor of Civil Engineering Department, University of Guilan

2. M.Sc. in Structural of Civil Engineering, University Campus, University of Guilan

3. M.Sc. in Structural Engineering, University of Guilan

Abstract

The use of fiber reinforced polymer (FRP) composites is ever growing in the construction industry. High strength-weight ratio, corrosion resistance and suitable durability are the main criteria for FRP selection and design. However, in case of high temperature exposure, change in the material properties affects the overall structure performance. The aim of this study is to evaluate the effect of cement and epoxy adhesives on the thermal performance of concrete flexural specimens strengthened with basalt (BFRP) and glass (GFRP) fabrics. Therefore, 105 flexural specimens (100 × 100 × 500 mm) were made by a constant water-cement ratio; and were kept under the 50°, 100° and 200°, for a period of one and three hours, respectively. The results show that increasing the temperature led to decreased flexural strength of unreinforced specimens by 48%. Also, flexural strength of cement and epoxy adhesives impregnated specimens decreased up to 47% and 60% respectively. Results from the presented model shows at temperatures lower than 100 °C, flexural strength of cement adhesive impregnated specimens was lower than epoxy adhesive impregnated specimens; but at 200 °C, flexural strength of specimens strengthened with basalt and glass fabrics increases 1.3 and 1.15, respectively. Also, curve for flexural strength of specimens strengthened with basalt fabrics compared to glass fabrics had an ascending trend, while it had a descending trend for epoxy adhesive impregnated specimens.

Keywords: Basalt Fabric, Glass Fabric, Cementitious adhesive, Epoxy adhesive, Heat