



دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی تکنیک تهران)

دوره ۴۸، شماره ۱، بهار ۱۳۹۵، صفحه ۳۹ تا ۵۲

Vol. 48, No. 1, Spring 2016, pp. 39-52



نشریه علمی پژوهشی امیرکبیر - مهندسی عمران و محیط زیست

AmirKabir Journal of Science & Research
Civil and Environmental Engineering
(ASJR-CEE)

مقاومت نهایی تیرهای بتنی تقویت شده با CFRP انعطاف پذیر و سخت، در دمای بالا و یخ زدگی

محمود نادری^{۱*}، سیامک اسمعیلی زاده^۲

۱- دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)

۲- دانشجوی ارشد سازه، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)

(دریافت: ۱۳۹۱/۱۱/۲۵، پذیرش: ۱۳۹۳/۰۶/۲۹)

چکیده

در سال‌های اخیر، استفاده از ورق‌های پلیمری مسلح شده با الیاف کربنی (CFRP)، به عنوان سیستمی برای مقاوم‌سازی سازه‌ها، رونق بیشتری یافته است. به نظر نویسندگان، یکی از مشکلات این سیستم می‌تواند عملکرد آن در شرایط دمای بالا و یخ زدگی باشد. به همین منظور در این مقاله، نتایج مطالعات انجام شده بر عملکرد تیرهای بتنی تقویت شده با CFRP در دماهای بالا و یخ زدگی ارائه شده است. برای این بررسی‌ها، ۲۴ تیر بتنی غیر مسلح به ابعاد $100 \times 100 \times 350$ میلیمتر، با بکارگیری سه رده مقاومتی بتن، ساخته شدند. پس از عملآوری، این تیرها با ورق‌های CFRP انعطاف‌پذیر و سخت، مقاوم‌سازی شدند. پس از سفت و سخت شدن چسب بکارگرفته شده برای چسباندن ورق‌های CFRP، نمونه‌ها در شرایط دمایی ۲۰-، ۵۰ و ۸۰ درجه سانتیگراد قرار داده شدند و آزمایش خمشی چهار نقطه‌ای روی آنها انجام شد. نتایج حاصله نشان می‌دهد که پارگی ورق‌های CFRP در دمای اتاق ناشی از ترک‌های خمشی و در دماهای بالا و پایین، ناشی از تنش‌های برشی بوده است. به نظر می‌رسد تغییرات دمایی موجود علاوه بر تأثیرش بر مقاومت چسبندگی بین ورق‌های CFRP، بر خواص مصالح نیز تأثیر جدی داشته باشد. بررسی مقاومت نهایی تیرهای تقویت شده نیز بیانگر آنست که با رسیدن چسب به دمای گذار شیشه‌ای (T_g) کاهش مقاومت نهایی، قابل توجه است. همچنین در این مقاله، نتایج به دست آمده از نمونه‌های آزمایشگاه‌ها، با نتایج حاصل از روش‌های تحلیلی مورد مقایسه قرار گرفته‌اند.

کلمات کلیدی:

CFRP، مقاوم‌سازی، دما، تیر بتنی، پارگی، مقاومت نهایی

۱- مقدمه

در سال های اخیر، مقاومت سازی سازه های موجود بطور فزاینده ای مهم شده است. دلایل مختلفی باعث این امر شده است که فرسودگی سازه ها، افزایش خطاهای طراحی و اجرایی از جمله این عوامل هستند. علاوه، بسیاری از سازه های موجود، به علت افزایش بار های وارده، نیاز به افزایش مقاومت دارند [۷].

از نقطه نظر محیط زیستی و اقتصادی نیز ترمیم، تعمیر، تقویت و مقاوم سازی سازه های موجود بر تخریب و دوباره سازی سازه ها ارجحیت دارد. همچنین در بسیاری از موارد، مقاوم سازی سازه ها کم هزینه تر و کم در دستر از نوسازی آن ها است. علاوه بر این، سرعت مقاوم سازی بیش از نوسازی بوده که باعث خارج شدن سازه از سرویس دهی برای مدت طولانی است [۲].

از جمله پیشرفت های اخیر در صنعت مقاوم سازی، استفاده از روکش های تقویت کننده پلیمر های مسلح شده با الیاف (FRP) است که برای مقاوم سازی سازه های بتنی، فولادی، بتنی و حتی چوبی به کار گرفته می شود. پذیرش روش مقاوم سازی با سیستم FRP ارتباط نزدیکی با سطح اعتماد مهندسان سازه، مسئولان و کارفرمایان به این روش دارد. اعتماد کافی می تواند از طریق انجام آزمایش های استاندارد و درک بهتر رفتار سازه های تقویت شده با FRP در شرایط مختلف بدست آید. درک درست از رفتار سازه در شرایط عادی، دمای بالا و دمای پایین، برای پذیرش این روش ضروری است [۳].

در سال ۲۰۰۳ میلادی، برای بررسی نیاز های تحقیقاتی در حوزه مواد FRP برای مقاوم سازی سازه های بتنی، کمیته ای تشکیل شد. در این بررسی ها مشخص شد که "دوام" و "مقاومت در برابر آتش" سیستم های FRP، نیازمند بررسی های جدی است. یکی از جنبه های "دوام" این بررسی ها که ارتباط نزدیکی با مقاومت در برابر آتش دارد، اثر دمای بالا بر رفتار سازه های تقویت شده با FRP است [۴].

در مطالعه ای دیگر که برای شناسایی و اولویت بندی اطلاعات مهم مرتبط با دوام ورق ها و میلگرد های FRP انجام شد، مشخص شد که اطلاعات موجود در رابطه با سازه های تقویت شده با FRP، زمانی که در معرض دماهای بالا و یا چرخه های یخ و ذوب قرار می گیرند، بسیار اندک است [۵].

در آئین نامه هایی از جمله 14 *fib*-Bulletin (2001) *fib*، ACI 440.2R-02 و نشریه شماره ۳۴۵ سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور، اثر آتش سوزی روی سازه های تقویت شده با FRP بصورت یک بار ویژه به شمار می رود که در آن سهم FRP در مقاومت، ناچیز در نظر گرفته می شود. این موضوع بدان معناست که پس از نبود FRP، سازه باید توانایی مقاومت در برابر بارهای وارده با ضرایب ایمنی مورد نظرا (ضرایب بار و مصالح) داشته باشد. اعتقاد بر این است که بدین ترتیب از ریزش ناگهانی سازه تقویت شده با FRP پس از بین رفتن یک باره چسبندگی بین بتن و FRP (بطور مثال در هنگام آتش سوزی و یا خرابکاری) جلوگیری می شود.

این پیشنهاد ها، مقدار حداکثر افزایش مقاومت حاصله را به تفاوت ضرایب ایمنی مربوط به ترکیب بارهای ویژه و ترکیب بارهای نهایی محدود می کند. در مطالعات صورت گرفته، مشخص شده است که چسبندگی موجود بین بتن و لایه FRP، در نزدیکی و یا بالای دمای گذار شیشه ای چسب یعنی T_g ، از بین می رود. رفتار FRP های تقویتی می تواند تحت تاثیر تغییرات دمایی محیط بهره برداری، به دلیل اختلاف زیاد بین ضرایب انبساط دمایی بتن و FRP باشد. وجود این اختلاف، تنش های حرارتی در محل اتصال FRP با چسب و چسب با بتن را موجب می شود که بر رفتار سازه تاثیر می گذارد. علاوه بر این، مشخصات فاز های مختلف بتن، چسب، FRP و مرز بین آنها تحت تاثیر قرار می گیرند. گفته می شود که افزایش دما، تاثیرات منفی خاصی روی چسب موجود، حتی در دماهای پایین تر از دمای گذار شیشه ای چسب دارد [۶].

هدف اصلی تحقیقاتی که نتایجش در این مقاله آورده شده است، درک صحیح از رفتار تیرهای بتنی مقاوم شده با CFRP انعطاف پذیر و سخت، تحت شرایط دمایی بالا و نیز یخ زدگی بوده است که با بکارگیری تیر های بتنی و چسباندن ورق های CFRP و تعیین مقاومت نهایی آنها در خمش، نوع شکست این نمونه ها نیز مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور ۲۴ نمونه تیر بتنی بدون آرماتور به ابعاد $100 \times 100 \times 350$ میلیمتر ساخته شدند. در این نمونه ها از سه رده مقاومتی بتن استفاده و سپس با CFRP سخت و انعطاف پذیر بصورت خمشی تقویت شده و تحت سیکل های تغییر دمایی 20°C ، 50°C و 80°C قرار گرفته و بوسیله دستگاه آزمون خمشی ۴ نقطه ای تست شده و با نمونه های شاهد قرار گرفته در محیط اتاقی از نظر مقاومت نهایی، نوع شکست و غیره مقایسه شدند.

۲- اثر گرما بر خواص مواد

یک سازه بتنی مقاوم شده با FRP از موادی مانند بتن، میلگرد، FRP و چسب تشکیل شده است. بعضی از این مواد بیشتر تحت تاثیر حرارت قرار می گیرند، بویژه مشخصات چسب بطور قابل توجهی حدود دمای گذار شیشه ای تغییر می کند.

دمای گذار شیشه ای دمایی است که در آن مواد بی شکل مانند شیشه یا پلیمرهایی با جرم مولکولی بالا، از حالت شکنندگی به حالت خمیری تبدیل می شوند [۱].

۲-۱- بتن

اثر گرما بر خواص بتن توسط بسیاری از پژوهشگران مورد بررسی قرار گرفته و بعضی ها به این نتیجه رسیده اند که گرما منجر به تبخیر آب از بتن و تغییرات در ترکیب شیمیایی و ساختار فیزیکی آن می شود. معمولاً این تغییرات محدود به خمیره سیمان هستند و سنگدانه ها تاثیر کمی می پذیرند. در دمای ۹۰ درجه سانتیگراد، مقاومت فشاری بتن به ۶۵ تا ۹۰ درصد مقاومت اولیه کاهش می یابد. این کاهش مقاومت عموماً به دلیل تبخیر آب آزاد بتن و از دست رفتن چسبندگی بین خمیره سیمان و سنگدانه ها به دلیل وجود اختلاف ضریب انبساط دمایی بین مواد است.

اثرات گرما بر چسب هایی که برای چسباندن FRP به بتن استفاده می شوند مانند مواد ماتریس است، چون در اصل آنها مشابه هستند. چسب ها رفتار متفاوتی در مقابل گرما داشته و ضرایب انبساط حرارتی متفاوتی دارند. به هر حال ضریب انبساط حرارتی چسب به مراتب پایین تر از مواد ماتریس است.

چسب مورد استفاده در این تحقیقات یک چسب دو جزئی است که رزین آن با نام تجاری اپیکوت ۸۲۸^۱ و جزء سخت کننده آن با نام تجاری اپیکور اف ۲۰۵^۲ شناخته می شود. رزین اپوکسی بر پایه دی گلیسریل اتر فنول و سخت کننده بر پایه جزء عمل آورنده آمینی است. طبق اطلاعات کارخانه تولید کننده چسب، نسبت استوکیومتری اختلاط این دو جزء بصورت ۵۸ جزء عمل آور به ازای ۱۰۰ واحد وزنی رزین اپوکسی است.

یکی از محققین تحقیقات گسترده ای بر روی دمای گذار شیشه ای (T_g) و همچنین مدول الاستیسیته اپوکسی مورد نظر با تغییر نسبت جزء سخت کننده انجام داده است. او این پارامترها را به عامل نسبت (r) مربوط کرده است. مقادیر مختلف نسبت اختلاط و r مربوط به هر کدام در جدول ۱ آورده شده است [۱۱].

جدول ۱: نسبت نمونه های رزین اپوکسی اپیکوت ۸۲۸ و جزء سخت کننده اپیکور اف ۲۰۵ [۱۱]

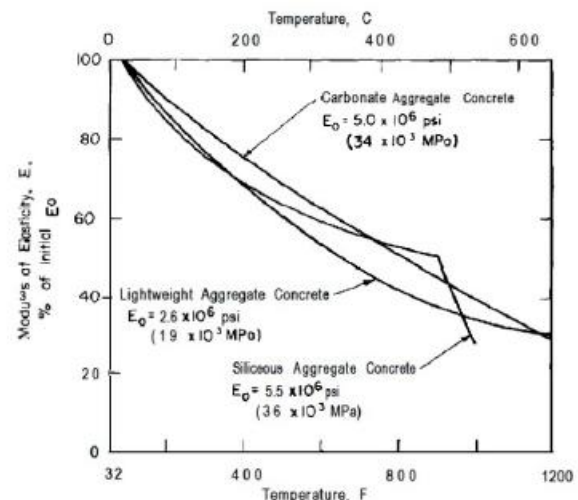
نسبت اپوکسی معادل با آمین (r) ^۳	جرم اپیکوت ۸۲۸ (گرم)	جرم اپیکور اف ۲۰۵ (گرم)	حجم آمین (قسمت درصد) ^۴
۰/۵	۳۱/۰	۹/۰	۲۹/۰
۰/۶	۲۹/۷	۱۰/۳	۳۴/۷
۰/۷	۳۲/۰	۱۲/۰	۴۰/۶
۰/۸	۲۴/۰	۱۱/۰	۴۵/۸
۰/۹	۲۹/۶	۱۵/۴	۵۲/۰
۱/۰	۲۵/۳	۱۵/۰	۵۹/۲
۱/۲	۲۲/۹	۱۶/۶	۶۹/۵
۱/۳	۲۲/۹	۱۷/۳	۷۵/۵

رابطه بین T_g و r در منحنی شکل (۲) رسم شده است. با توجه به این شکل، مشاهده می گردد که مقدار بیشینه T_g نزدیک به نسبت استوکیومتری ($r=1$) است و هرچه r از نسبت استوکیومتری فاصله می گیرد این مقدار کمتر می شود. همچنین رابطه بین مدول یانگ (E') و r در دمای ۲۰ درجه، در شکل (۳) رسم شده است [۱۱].

از شکل (۳) مشاهده می شود که مدول یانگ چسب در دمای بالا بطور قابل ملاحظه ای کاهش می یابد. همچنین این شکل نشان می دهد که

به همین منظور، در آئین نامه ACI 216-R89 (۲۰۰۱) نمودارهایی برای کاهش مقاومت فشاری بتن در دماهای بالا بر اساس نوع سنگدانه های بکار رفته در بتن ارائه شده است [۸].

همچنین گفته می شود مدول یانگ بتن با افزایش گرما به دلیل فقدان چسبندگی در ریز ساختارهای خمیره سیمان، کاهش می یابد. مقایسه نتایج تحقیقات مختلف انجام شده به دلیل تاثیرات رطوبت، خشک شدن بتن، بارگذاری اولیه و نرخ گرمادهی مشکل است. شکل (۱) اثر دماهای بالا بر مدول یانگ بتن های ساخته شده با سه نوع سنگدانه را نشان می دهد. این اطلاعات از مطالعاتی بدست آمده است که در آن از یک روش اپتیکی استفاده شده است. همچنین نشان داده شده است که نوع سنگدانه و مقاومت بتن تاثیر قابل توجهی بر مدول یانگ بتن در دماهای بالا ندارند [۹].



شکل ۱: اثر گرما بر مدول یانگ بتن ساخته شده با سنگدانه های مختلف [۹]

۲-۲- پلیمر های مسلح شده با الیاف FRP

اطلاعات در مورد مشخصات FRP در دماهای بالا محدود است. به علاوه، اثر گرما بر خواص مواد تشکیل دهنده FRP در تولیدات مختلف تفاوت دارد، چون FRP از چند نوع الیاف (شیشه، آرامید و کربن) و چند نوع ماتریس (وینیل استر، پلی استر و اپوکسی) تشکیل شده است. بویژه اینکه خواص ماتریس در دماهای بالا تغییر می کند که می تواند روی خواص FRP نیز تاثیر بگذارد. با افزایش دما، مقاومت انواع مختلف FRP، کاهش می یابد. همچنین باور این است که کاهش مقاومت کششی مصالح FRP، بیشتر از کاهش مقاومت الیاف است که دلیل آن وجود ماتریسی است که الیاف در آن قرار دارند.

همچنین روابطی برای تاثیر دما بر مقاومت کششی انواع FRP پیشنهاد شده است. بر اساس این روابط، با اینکه مقاومت کششی CFRP و AFRP تا 1000C بدون تاثیر می ماند، مقاومت کششی GFRP با افزایش دما بطور ناگهانی کاهش می یابد [۱۰].

۲-۳- چسب

1 EPIKOTE 828

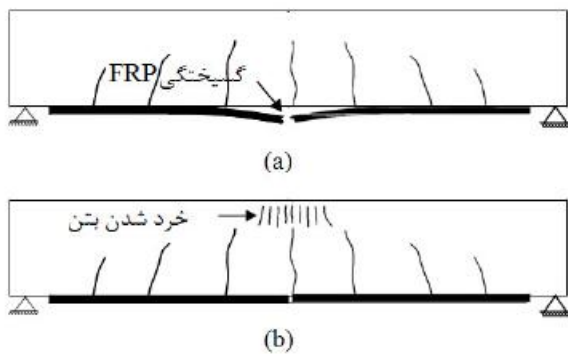
2 EPIKURE F 205

3 Epoxy equivalent amine ratio (r)

4 Amine content [pph]

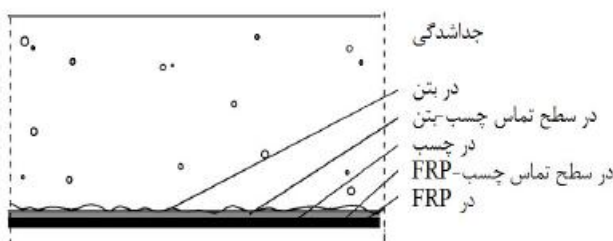
تیر همان حالات گسیختگی معمول در سازه های بتن مسلح معمولی است [۱۴ و ۱۵]. حالت اول گسیختگی خمشی معمولاً جاری شدن فولاد به دنبال گسیختگی FRP (شکل ۵ (a))، حالت دوم گسیختگی خمشی جاری شدن فولاد به دنبال خرد شدن بتن یا خرد شدن بتن بدون جاری شدن فولاد (شکل ۵ (b)) و حالت سوم گسیختگی خمشی گسیختگی خمشی، جداشدگی لایه FRP است.

گسیختگی FRP (گسیختگی خمشی) عموماً وقتی که لایه های FRP بخوبی در انتها مهار شده باشند و یا وقتی که نسبت فولاد و FRP به نسبت پایین باشد اتفاق می افتد. خرد شدن بتن بدون جاری شدن فولاد و یا جاری شدن فولاد به دنبال خرد شدن بتن (گسیختگی خمشی)، می تواند زمانی اتفاق افتد که نسبت فولاد و FRP زیاد باشد.

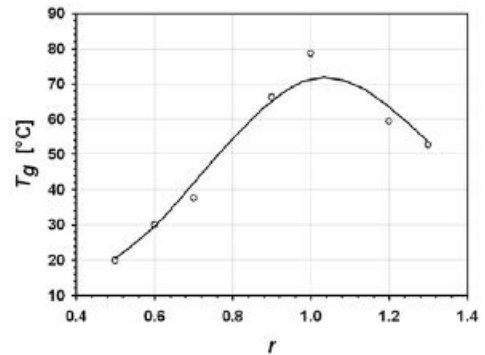


شکل ۵: گسیختگی خمشی در اثر گسیختگی FRP (a) و خرد شدن بتن (b)

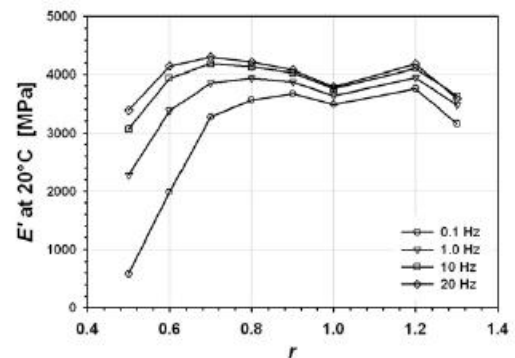
در اکثر موقعیت ها، جداشدگی لایه FRP از بتن، (گسیختگی خمشی) در سازه های بتنی مقاوم شده با FRP اتفاق می افتد. شروع جدا شدگی در تیر های مقاوم شده با FRP عموماً در ناحیه های با تمرکز تنش بالا در سطح تماس بتن با FRP صورت می گیرد. معمولاً این مناطق در انتهای لایه های FRP و در نزدیکی ترک های خمشی و برشی قرار دارند. این نوع مکانیزم ها عموماً موجب گسیختگی زودرس تیرهای مقاوم شده با FRP می شوند. در تئوری، جداشدگی می تواند به دلیل گسیختگی سطحی صورت گرفته در مرز بین بتن و چسب و یا سطح تماس چسب با FRP و یا گسیختگی همچسبی یعنی عدم توانایی یک ماده در مقابله با جداشدگی داخلی باشد. در حین گسیختگی همچسبی، ماده چسباننده که به دو سطح چسبیده است، نمی تواند آنها را در کنار هم نگه دارد (شکل ۶).



شکل ۶: سطوح مختلف گسیختگی پوشش های بیرونی [۱۶]

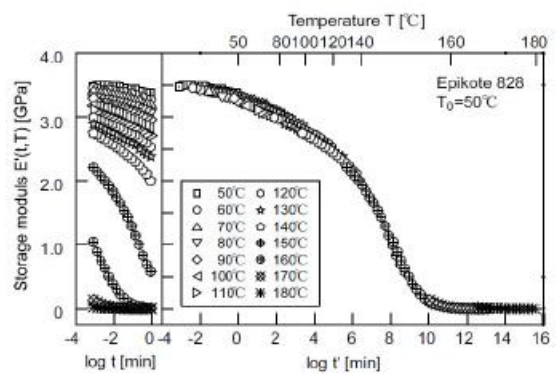


شکل ۲: دمای گذار شیشه ای اپیکوت ۸۲۸ و اپیکور اف ۲۰۵ بر حسب نسبت آمین به اپوکسی [۱۱]



شکل ۳: دمای گذار شیشه ای اپیکوت ۸۲۸ و اپیکور اف ۲۰۵ بر حسب نسبت آمین به اپوکسی [۱۱]

دمای گذار شیشه ای می تواند با افزایش سیکل های دمایی افزایش یابد [۱۲]. در این ارتباط، اثر دما بر روی چسب مورد استفاده در این تحقیقات نیز در شکل (۴) آورده شده است [۱۳].

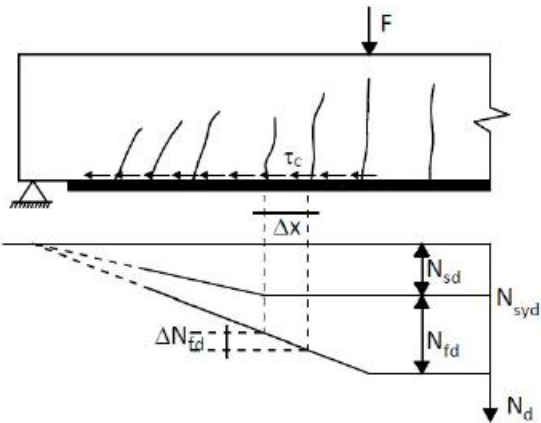


شکل ۴: اثر گرما بر مدول یانگ چسب اپیکوت ۸۲۸ [۱۳]

۳- مصالح و روش های آزمایش

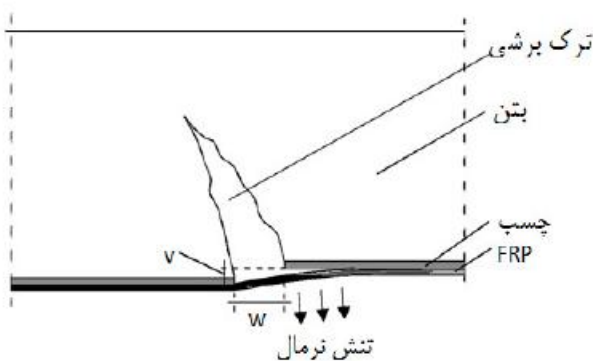
۳-۱- گسیختگی سازه های بتنی مقاوم شده با FRP در خمش برای پی بردن به اثرات دمای بالا و پایین بر عملکرد سازه های بتنی مقاوم شده با FRP، باید رفتار سازه های مقاوم شده با FRP در دماهای عادی مورد توجه قرار گیرد. بطور کلی حالات گسیختگی این سیستم ها را می توان به گسیختگی خمشی، گسیختگی برشی و جداشدگی لایه های FRP از بستر بتنی تقسیم نمود. گسیختگی خمشی و برشی یک

از طرفی تغییرات لنگر خمشی در طول تیر باعث تغییر نیروی قابل تحمل توسط طول کامل ورقه و منسوج FRP می‌شود که در شکل (۹) نشان داده شده است. تغییر تحمل نیرو در FRP در طول کوچک (ΔX) بوسیله تنش های برشی به بتن منتقل می‌شود. این تنش های برشی وقتی که ظرفیت چسبندگی در طول ΔX ناکافی باشد، موجب شروع جداشدگی می‌شود [۱۴ و ۱۵].



شکل ۹: تنش های برشی در بتن ناشی از بخش نیرو های FRP [۵]

جداشدگی می‌تواند در نوک ترک های برشی آغاز شود [۵ و ۶]. به دلیل شکل مورب ترک های برشی، هر دو نوع جابجایی افقی (w) و عمودی (v) می‌تواند در هر دو سوی ترک اتفاق بیفتد (شکل ۱۰). تغییر مکان عمودی موجب تنش های برشی عمود بر سطح بتن در یک سمت ترک می‌شود که می‌تواند در ترکیب با تنش های برشی در بتن که در قسمت قبل توضیح داده شد موجب آغاز جداشدگی FRP شود. این مسئله عموماً در جاهایی که ترکیب نیروی برشی و ممان خمشی زیاد بوده و ترک های مورب کم‌ترند، اتفاق می‌افتد [۱۴].

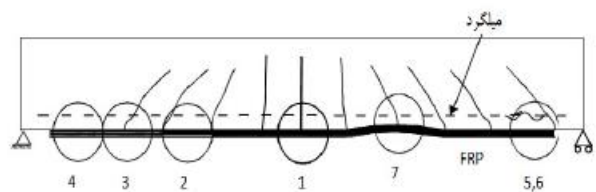


شکل ۱۰: جداشدگی موضعی نزدیک ترک های خمشی [۱۴]

۳-۲- مطالعات پیشین

در آزمایش خمشی اتصال بتن-FRP علاوه بر تنش های برشی، به دلیل انحنای نمونه، تحت تنش های نرمال عمود بر منطقه چسبیده نیز قرار می‌گیرد. در واقع، این انحنای سازه در بسیاری از اعضای مقاوم‌سازی

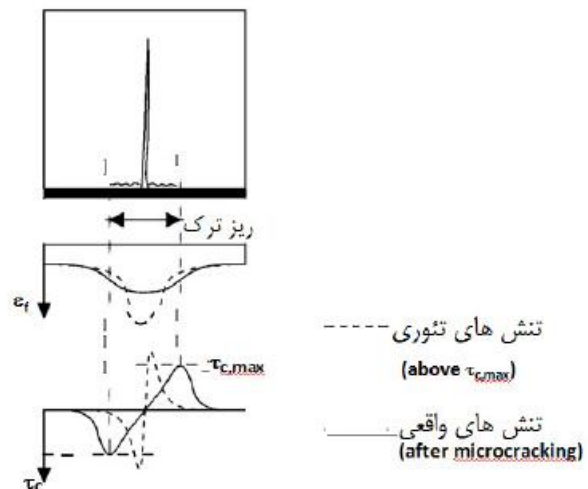
همچنین جداشدگی می‌تواند در نقاط مختلفی از طول تیر شروع شود که در شکل (۷) نشان داده شده است.



شکل ۷: حالات گسیختگی یک تیر بتن مسلح با FRP چسبیده بیرونی [۱۶]

- بر اساس بعضی طبقه بندی ها [۱۶]، حالت های گسیختگی که می‌توانند مورد مطالعه قرار گیرند عبارتند از:
۱. جداشدگی در ترک های خمشی
 ۲. جداشدگی به دلیل تنش های برشی زیاد
 ۳. جداشدگی در ترک های برشی
 ۴. جداشدگی در مهاری های انتهایی
 ۵. گسیختگی برشی در انتهای صفحه
 ۶. کنده شدن پوشش بتنی
 ۷. جداشدگی به دلیل ناهمواری سطح بتن

بعضی از محققین تعریف های خاصی برای مکانیزم جداشدگی عنوان نموده اند [۱۴]. وقتی بتن ترک می‌خورد تنش کششی در بتن باید توسط FRP و میلگرد تحمل شود که در نتیجه حداکثر تنش کششی در میلگرد و FRP در محل تقاطع با ترک اتفاق می‌افتد (شکل ۸). حداکثر تنش برشی در FRP نیز در دو انتهای نوک ترک (انتهای ترک در FRP) از طریق تنش برشی بین سطحی منتقل می‌شود. بسیاری از محققان عقیده دارند که این تنش ها تنها باعث جداشدگی موضعی در نزدیک نوک ترک شده و تنش برشی حد اکثر در بتن کاهش می‌یابد (شکل ۸). بنابراین احتمال اینکه این نوع جداشدگی باعث جداشدگی پیش رونده و گسیختگی تیر شود کم است [۵].



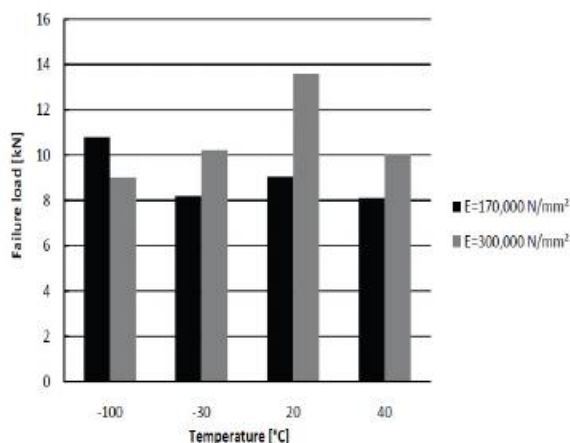
شکل ۸: جداشدگی موضعی نزدیک ترک های خمشی [۱۴]

با FRP انعطاف پذیر و یک نمونه با FRP سخت) در شرایط محیطی اتاق قرار گرفته، و دونمونه در دمای منفی ۲۰ درجه سانتیگراد، دونمونه در دمای مثبت ۵۰ درجه سانتیگراد که پایین تر از دمای گذار شیشه ای چسب یعنی مثبت ۷۰ درجه سانتیگراد و دو نمونه در دمای مثبت ۸۰ درجه سانتیگراد که بالاتر از دمای گذار شیشه ای چسب بود، مورد آزمایش قرار گرفتند. مشخصات این نمونه‌ها در جدول ۲ آورده شده است. هنگام تعیین مقاومت نمونه‌ها، آن‌ها روی یک تکیه گاه مفصلی و یک تکیه گاه غلتکی قرار گرفت و در یک سوم دهانه، بارگذاری شدند. طول دهانه بارگذاری نیز ۳۰ سانتیمتر انتخاب شد. برای نیمی از نمونه‌ها از CFRP انعطاف پذیر با پهنای ۵۰ میلیمتر، ضخامت یازده صدم میلیمتر و طول ۲۵۰ میلیمتر استفاده شد. همچنین برای نیمی دیگر از نمونه‌ها، از CFRP سخت با پهنای ۲۰ میلیمتر، ضخامت یک و دو دهم میلیمتر

جدول ۲: مشخصات نمونه‌های تیر بکار گرفته شده

سری	رده مقاومتی (MPa)	نوع CFRP	شرایط دمایی (°C)	سن بتن هنگام آزمایش (روز)
A	۲۰	انعطاف پذیر	۲۰	۵۳
	۲۰	انعطاف پذیر	-۲۰	۵۳
	۲۰	انعطاف پذیر	۵۰	۵۳
	۲۰	انعطاف پذیر	۸۰	۵۳
B	۳۰	انعطاف پذیر	۲۰	۶۷
	۳۰	انعطاف پذیر	-۲۰	۶۷
	۳۰	انعطاف پذیر	۵۰	۶۷
	۳۰	انعطاف پذیر	۸۰	۶۷
C	۴۰	انعطاف پذیر	۲۰	۵۳
	۴۰	انعطاف پذیر	-۲۰	۵۳
	۴۰	انعطاف پذیر	۵۰	۵۳
	۴۰	انعطاف پذیر	۸۰	۵۳
D	۲۰	سخت	۲۰	۵۳
	۲۰	سخت	-۲۰	۵۳
	۲۰	سخت	۵۰	۵۳
	۲۰	سخت	۸۰	۵۳
E	۳۰	سخت	۲۰	۶۷
	۳۰	سخت	-۲۰	۶۷
	۳۰	سخت	۵۰	۶۷
	۳۰	سخت	۸۰	۶۷
F	۴۰	سخت	۲۰	۵۳
	۴۰	سخت	-۲۰	۵۳
	۴۰	سخت	۵۰	۵۳
	۴۰	سخت	۸۰	۵۳

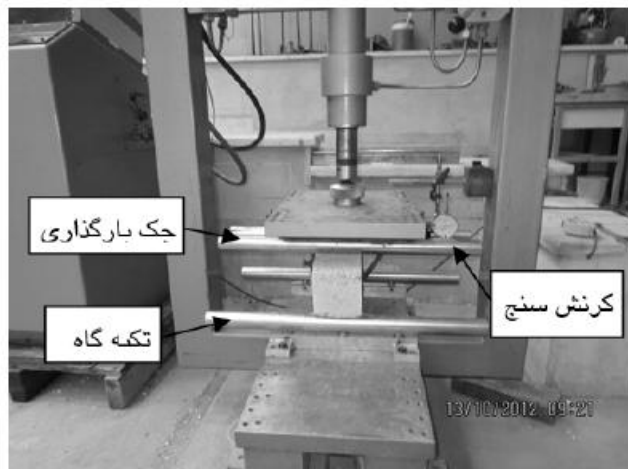
شده مانند دال‌ها و تیرها اتفاق می‌افتد. با بکارگیری نمونه‌های ۱۰۰×۱۰۰×۸۰ میلیمتری از بتن ساده، تحقیقاتی انجام شده است که نمونه‌ها در دمای اتاق با دو نوع ورق با مدول یانگ معمولی و بالا، مقاوم سازی شده و به ترتیب در دماهای منفی ۱۰۰ درجه سانتیگراد، منفی ۳۰، مثبت ۲۰ و مثبت ۴۰ درجه سانتیگراد مورد آزمایش قرار گرفتند. چسب مورد استفاده نیز دارای دمای گذار شیشه ای حدود ۶۰ درجه سانتیگراد بوده است [۱۷]. براساس این نتایج، در هر دو نوع FRP، مقاومت مشاهده شده پس از افزایش دما به ۴۰ درجه سانتیگراد، نسبت به مقاومت نهایی در دمای اتاق یعنی مثبت ۲۰ درجه سانتیگراد، کاهش می‌یابد. همچنین در هر دو نوع FRP، مقاومت مشاهده شده پس از کاهش دما به منفی ۳۰ درجه سانتیگراد، نسبت به مقاومت نهایی در دمای اتاق، کاهش می‌یابد. در دمای منفی ۱۰۰ درجه سانتیگراد، نمونه‌های مقاوم شده با FRP با مدول یانگ بالا مقاومت کمتری نسبت به دمای اتاق داشته، و نمونه‌های مقاوم شده با FRP با مدول یانگ معمولی، مقاومت بیشتری در مقایسه با نتایج متناظر در دمای اتاق نشان دادند. این یافته در شکل (۱۱) نشان داده شده است.



شکل ۱۱: مقاومت نهایی نمونه‌ها برای دو رده مدول یانگ CFRP در دماهای مختلف [۱۷]

۳-۳- نحوه انجام آزمایش

برای مطالعه تاثیر دما و رطوبت بر مقاومت تیرهای بتنی تقویت شده با ورقه‌های CFRP سخت و انعطاف پذیر، در مجموع ۳۰ نمونه تیر با ابعاد ۱۰۰×۳۵۰×۳۵۰ میلیمتری بدون میلگرد ساخته شد. برای تعیین ابعاد نمونه‌های بتنی از استاندارد ASTM C1609-05 [۱۸] استفاده شد که در آن طول نمونه‌ها باید در نهایت ۵۰ میلیمتر بیشتر از سه برابر عمق باشد و در هیچ شرایطی کمتر از ۳۵۰ میلیمتر نباشد. این تیرها تحت آزمایش خمشی چهار نقطه ای قرار گرفتند. نمونه‌ها بصورت شش سری چهار تایی از نمونه‌ها که هر کدام یک رده بتن بودند، ساخته شدند. رده‌های بتن مورد استفاده ۲۰، ۳۰ و ۴۰ مگاپاسکال بودند. برای هر رده مقاومت بتنی هشت تیر مشابه ساخته شد که در چهار دمای مختلف مورد آزمایش قرار گرفتند. از هر رده مقاومتی بتن دو نمونه (یک نمونه



شکل ۱۴: دستگاه تست خمش ۴ نقطه ای

ساعت باقیمانده و سپس قالب ها به آرامی باز شده و اطلاعات مربوط به تاریخ و مقاومت هر نمونه روی آن نوشته شده و به حوضچه آب انتقال یافته و به مدت ۲۸ عمل آوری شدند.

پس از ۲۸ روز نمونه‌ها از آب خارج شدند تا سطح آنها خشک شده و برای چسباندن CFRP آماده شوند. قبل از چسباندن ورقه های CFRP، سطح بتن بوسیله سمباده برقی برای از بین بردن لایه ضعیف رویی و گرد و غبار آماده شدند. سپس ورقه های CFRP به ابعاد مورد نظر بریده و با بکارگیری چسب مربوطه که شامل مخلوطی از مولفه های رزین اپوکسی و سخت کننده با اوزان توصیه شده می شدند، چسبانده شده و به مدت یک هفته، برای عمل آوری چسب در محیط آزمایشگاه نگهداری شدند. برای اعمال شرایط یخ زدگی به نمونه های تیرهای تقویت شده با CFRP، از دستورالعمل استاندارد [ASTM C884/C884M-98] ۱۹ استفاده شد. بر اساس این دستورالعمل، پس از عمل آوری اپوکسی، نمونه‌ها در معرض ۵ سیکل تغییر دما بین 25°C تا -21°C قرار داده می شوند. بنابراین پس از عمل آوری چسب اپوکسی، تیر های تقویت شده به مدت ۲۴ ساعت، درون فریزر با دمای 21°C - و سپس به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق ($23 \pm 1^{\circ}\text{C}$) قرار گرفت. این روند یک سیکل آزمایش را تشکیل می دادند.

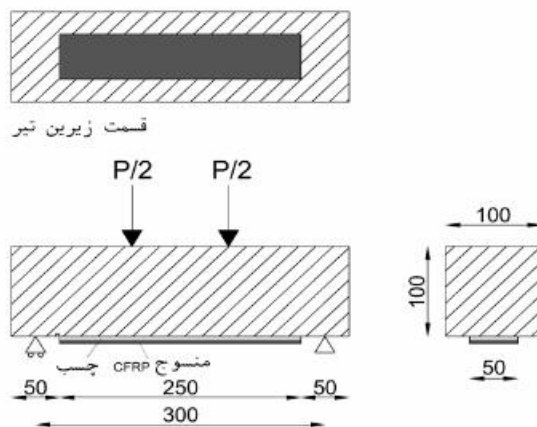
برای اعمال شرایط دمای بالا نیز نمونه های تیر های تقویت شده، به همان ترتیب با ۵ سیکل ۴۸ ساعته در درون اون قرار گرفت. برای یک سیکل نمونه هابه مدت ۲۴ ساعت در دمای 50°C و یا 80°C درجه و سپس به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق قرار داده می شوند. درون اون، سطح تقویت شده با CFRP رو به بالا قرار داده شدند.

۳-۳-۲- مشخصات مصالح

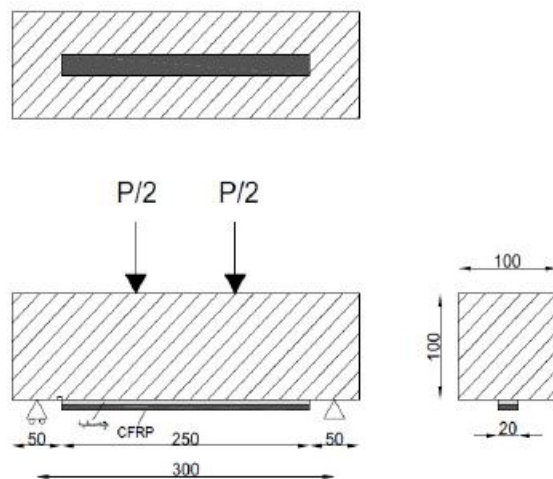
برای تعیین مقاومت فشاری، کششی و مدول یانگ بتن، طبق استاندارد های معمول عمل و نتایج در جدول ۳ ثبت شده اند.

مصالح CFRP مورد استفاده در این تحقیقات محصول کارخانه Korea RE & T Co است که مشخصات پارچه CFRP (با نام تجاری Kor-CFW200) با مدول یانگ 230 GPa و مقاومت کششی

و طول 250 میلیمتر استفاده شد. باید توجه داشت که تمامی نمونه‌ها در همان دمای مورد نظر تحت آزمایش خمشی قرار گرفتند. تغییر مکان عمودی وسط دهانه نیز توسط کرنش سنج دستی اندازه گیری شد. برای انجام آزمون خمش، نمونه های قرار داده شده در اون و فریزر، تحت همان دما مورد آزمایش قرار گرفتند. دستگاه آزمون خمشی بصورت ۴ نقطه ای است که در شکل های (۱۲) تا (۱۴) نشان داده شده اند. برای اندازه گیری تغییر شکل وسط دهانه، کرنش سنجی در وسط دهانه و روی تیر نصب شد. مشخصات نمونه‌ها نیز در شکل های (۱۲) و (۱۳) و نحوه انجام آزمون نیز در شکل (۱۲) نشان داده شده است.



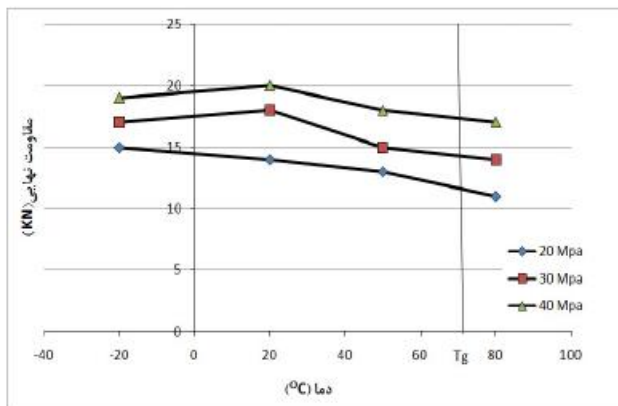
شکل ۱۲: مشخصات نمونه های تست خمشی CFRP انعطاف پذیر



شکل ۱۳: مشخصات نمونه های تست خمشی CFRP سخت

۳-۳-۱- مراحل ساخت نمونه ها

پس از انجام دانه بندی و طرح اختلاط بتن مورد نظر، برای هر رده مقاومتی، در یک مرحله قالب های آماده شده در سه لایه پر شده و هر بار با 25 ضربه متراکم شدند. همچنین به دیواره های قالب با چکش پلاستیکی ضربه هایی وارد آمد تا تراکم مناسب حاصل شود. سپس قالب ها روی میز لرزان قرار داده شدند و بوسیله ماله و یا خط کش فلزی سطوح بالایی تسطیح شدند. قالب ها در شرایط آزمایشگاهی به مدت ۲۴

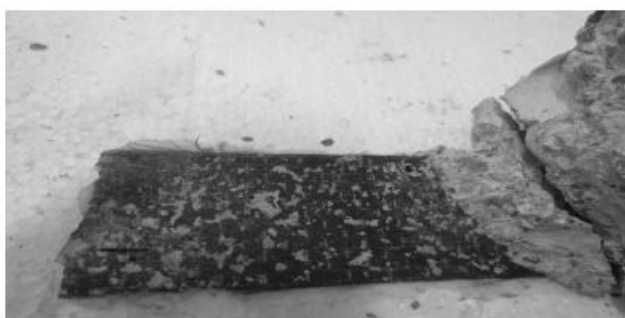


شکل ۱۶: مقاومت نهایی تیرهای بتنی تقویت شده با CFRP سخت بر حسب دما

پس از جداسازی، لایه نازکی از بتن چسبیده به لایه چسب باقی مانده است ولی همانگونه که در شکل (۱۸) نشان داده شده است، در دمای 80°C ، پس از جداسازی، بتن خیلی کمتری متصل به لایه چسب باقی مانده است که موید آن است که جداسازی از گسیختگی بتن به گسیختگی بین سطحی چسب، در سطح تماس چسب- بتن منتقل شده است.



شکل ۱۷: سطح گسیختگی پس از جداسازی در تیرهای تقویت شده سری A در دمای 20°C



شکل ۱۸: سطح گسیختگی پس از جداسازی در تیرهای تقویت شده سری A در دمای 80°C

از تصاویر نشان داده شده در شکل (۱۹) می توان مشاهده نمود که روند شکست در تیرهای قرار گرفته در دمای اتاق بصورت گسیختگی در وسط دهانه به دلیل وجود ترک های خمشی اتفاق افتاده است (شکل ۱۹a). همانگونه که در بخش های قبلی اشاره شد، در محل ترک خمشی، تنش کششی (و در نتیجه کرنش کششی) افزایش یافته و در دو سمت ترک

جدول ۳: مشخصات بتن مورد استفاده

مشخصات مکانیکی	MPa40	MPa30	MPa20
مقاومت فشاری (MPa)	۳۹/۵۵	۳۰/۷۵	۱۹/۶۸
مقاومت کششی (MPa)	۱۴/۶	۱۸/۳	۲۰/۸
مدول یانگ (MPa)	۲۹۵۵۸	۲۶۰۶۳	۲۰۸۵۲

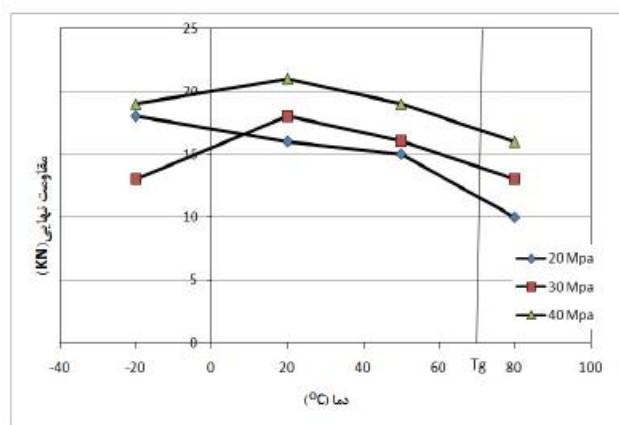
MPa ۴۹۰۰ و کرنش گسیختگی 0.021 بوده است. در این تحقیقات، برای رعایت استوکیومتری در اختلاط دو جزء چسب با توجه به توضیحات بخش ۱-۲، مقدار T_g و E' در دمای 20°C بصورت زیر می باشند:

$$T_g = +70^{\circ}\text{C}$$

$$E' = 3400\text{MPa}$$

۴- نتایج به دست آمده

۴-۱- مقاومت نهایی به عنوان تابعی از درجه حرارت
با مشاهده نتایج حاصل از انجام آزمون خمشی بر روی تیرهای تقویت شده با CFRP که در شکل های (۱۵) و (۱۶) نشان داده شده اند، مشخص است که در نمونه های قرار گرفته در دمای بالاتر از دمای اتاق، کاهش مقاومت نهایی رخ داده است. همچنین مشاهده می شود که این کاهش مقاومت، در نمونه های تقویت شده با ورقه های CFRP انعطاف پذیر در دمای 80°C نسبت به دمای 50°C بیشتر است. همچنین ملاحظه می شود که در نمونه های تقویت شده با CFRP سخت، این کاهش مقاومت با شیب کمتری ادامه می یابد. همچنین پیداست که مقاومت نهایی مربوط به دمای 20°C ، نسبت به مقاومت متناظر در دمای اتاق، افزایش مقاومت را در نمونه های با مقاومت فشاری $19/68\text{ MPa}$ و کاهش مقاومت نهایی را در نمونه های با مقاومت فشاری $30/75\text{ MPa}$ و $39/55\text{ MPa}$ را نشان می دهد.



شکل ۱۵: مقاومت نهایی تیرهای بتنی تقویت شده با CFRP انعطاف پذیر بر حسب دما

۴-۲- بررسی تیرهای با CFRP انعطاف پذیر

۴-۲-۱- تیرهای سری A

همانگونه که در شکل (۱۷) مشاهده می شود، در دماهای 20°C ، 50°C و 80°C ، گسیختگی جداسازی در بتن گسترش یافته و

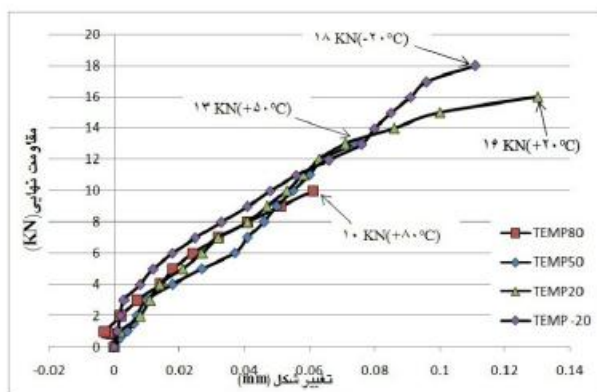


(d)

شکل ۱۹: سطح گسیختگی تیرهای سری A، (a) در دمای ۲۰°C، (b) در دمای ۲۰°C-، (c) در دمای ۵۰°C، (d) در دمای ۸۰°C

مسئله تغییر روند گسیختگی در نمونه های قرار گرفته در دماهای پایین و بالا را شاید بتوان به اختلاف ضریب انبساط حرارتی موجود بین بتن و CFRP که باعث ایجاد تنش های برشی اضافه بر تنش های برشی بارگذاری شده دانست که بدلیل عدم وجود فولاد برشی در تیر، باعث گسیختگی جداشدگی تحت تنش های برشی زیاد شده است.

نمودار مقاومت نهایی برحسب تغییر شکل نمونه های سری A در شکل (۲۰) نشان داده شده است. همانگونه که در این شکل قابل مشاهده است، میزان کاهش مقاوت نهایی در دمای ۵۰°C نسبت به دمای اتاق، حدود ۱۹ درصد و کاهش مقاوت نهایی در دمای ۸۰°C نسبت به دمای اتاق حدود ۳۸ درصد است. همچنین می توان مشاهده نمود که در دمای ۲۰°C- نسبت به دمای اتاق، افزایش حدود ۱۱ درصدی در مقاومت نهایی را شاهد هستیم که می تواند ناشی از خنثی شدن قسمتی از تنش های برشی بارگذاری، توسط تنش های برشی ناشی از تغییر درجه حرارت باشد.



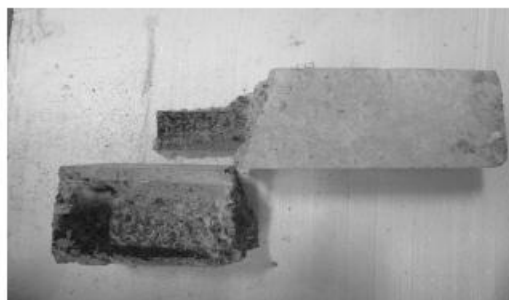
شکل ۲۰: منحنی بار- تغییر شکل برای تیرهای سری A، در دمای ۲۰°C، ۲۰°C-، ۵۰°C و ۸۰°C

باید توجه داشت که هرگاه دما تغییر می کند، تفاوت ضریب انبساط حرارتی بتن ($\alpha_c \approx 10^{-6} / ^\circ C$) و CFRP ($\alpha_f \approx -1 \times 10^{-6} / ^\circ C$) جهت امتداد طولی ییاف) گسترش تنش های حرارتی را در بتن و FRP

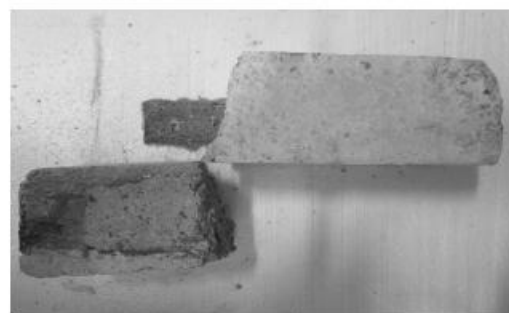
سطح چسبیده بتن و FRP، کاهش می یابد. اگر تنش برشی مخرب چسبندگی از یک مقدار بحرانی تجاوز کند، ترک های بین سطحی ایجاد شده و در نتیجه موجب بازپخش کرنش های FRP می شود. شاید بتوان چنین نتیجه گرفت که با وجود جداشدگی موضعی، پیوستگی ترک ها در ترک های خمشی، باعث گسیختگی چسبندگی (نوع سوم گسیختگی) نمی شود [۱۶]. همچنین براساس شکل های (b) و (c) ۱۹ در بقیه تیرهای تقویت شده، گسیختگی در قسمت ۱/۳ دهانه و زیر بار اتفاق افتاده است که ناشی از تنش های برشی زیاد است. تعریف این نوع ترک ها بوسیله بازشدگی افقی و عمودی ترک مشخص می شود که باعث آغاز پوسته شدن می شود. تنش های پوسته شدن همان تنش های نرمال هستند که در بخش های قبلی اشاره شد. تغییر مکان عمودی موجب تنش های برشی عمود بر سطح بتن در یک سمت ترک می شود که می تواند در ترکیب با تنش های برشی در بتن، موجب آغاز جداشدگی FRP شود. این مسئله عموماً در جاهایی که ترکیب نیروی برشی و لنگر خمشی زیاد و ترک های مورب کم ترند، دیده می شود [۱۴].



(a)



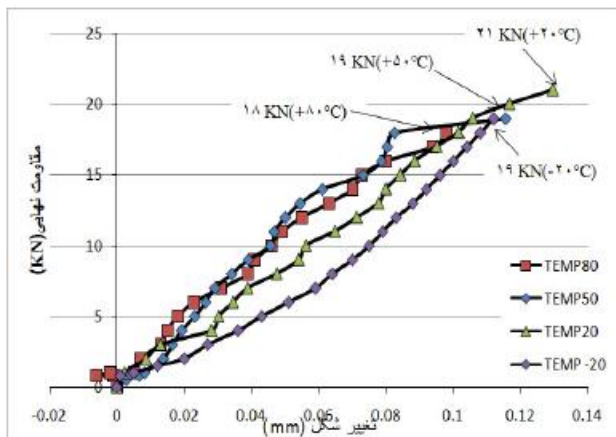
(b)



(c)

5 Peeling action

شده است. میزان کاهش مقاومت نهایی در دمای $+50^{\circ}\text{C}$ نسبت به دمای اتاق حدود ۵ درصد و کاهش مقاومت نهایی در دمای $+80^{\circ}\text{C}$ نسبت به دمای اتاق حدود ۱۰ درصد است و در دمای -20°C نسبت به دمای اتاق شاهد کاهش ۱۰ درصدی مقاومت نهایی هستیم.



شکل ۲۲: منحنی بار- تغییر شکل برای تیرهای سری C، در دمای 20°C ، -20°C ، 50°C و 80°C

۴-۳- نتایج تیرهای تقویت شده با CFRP سخت

۴-۳-۱- تیرهای سری D

در این سری از نمونه‌ها نیز همانند تیرهای تقویت شده با CFRP انعطاف پذیر در دماهای -20°C ، $+20^{\circ}\text{C}$ و $+50^{\circ}\text{C}$ گسیختگی جداشدگی در بتن گسترش می یابد و پس از جداشدگی، لایه نازکی از بتن چسبیده به لایه چسب باقی می ماند (شکل ۲۳) ولی در دمای $+80^{\circ}\text{C}$ پس از جداشدگی، بتن متصل به لایه چسب باقی نمی ماند (شکل ۲۴).



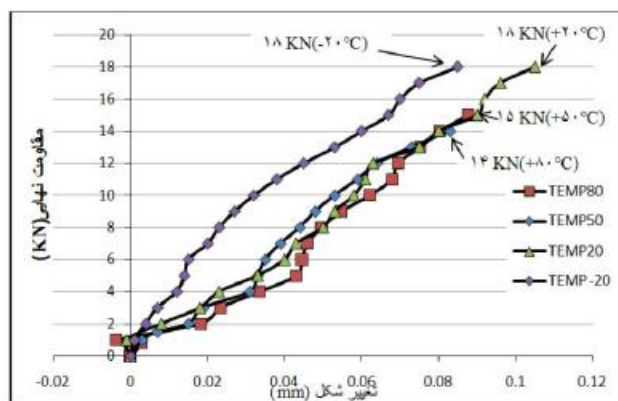
شکل ۲۳: سطح گسیختگی پس از جداشدگی در تیرهای سری D در دمای 20°C

روند گسیختگی در تیرهای مقاوم شده با CFRP سخت در دمای $+20^{\circ}\text{C}$ بصورت گسیختگی بتن و در دماهای بالا و پایین بصورت گسیختگی بین سطحی FRP است. نمودار مقاومت نهایی بر حسب تغییر شکل نمونه های سری D در شکل (۲۵) نشان داده شده است. از این شکل پیداست که مقدار کاهش مقاومت نهایی در دمای $+50^{\circ}\text{C}$ نسبت به دمای اتاق، حدود ۷ درصد و کاهش مقاومت نهایی در دمای $+80^{\circ}\text{C}$

باعث می شود. عدد منفی ضریب انبساط حرارتی CFRP به معنای انقباض ماده در اثر افزایش دما و انبساط آن بر اثر کاهش دما است [۱]. برای بررسی این مطلب، یک مدل سینماتیک توسط دی توماسو و همکاران^۶ مطرح شده است که می تواند برای محاسبه تنش برشی در بتن و تنش نرمال در FRP مورد استفاده قرار گیرد [۱۷]. لذا شاید بتوان گفت که در زمان بارگذاری نمونه، این تنش های اولیه همراه بارگذاری خارجی روی نمونه اثر می گذارند. نکته دیگری که باید مورد توجه قرار گیرد، کاهش مدول یانگ چسب در زمان افزایش دما است که می تواند اثری بر مقاومت چسبندگی سطح تماس بتن- چسب بگذارد. باید عنایت داشت که گرما علاوه بر اینکه بر رفتار تک تک ماده ها تاثیر می گذارد بر خواص چسبندگی بین مواد مختلف در اتصال FRP- چسب- بتن نیز اثرگذار است. به نظر می رسد در دماهای نزدیک و یا بالای T_g ، مقاومت چسبندگی سطحی بتن بطور قابل توجهی کاهش یافته و باعث می شود تا مقاومت نهایی نمونه ها در دماهای بالا، کاهش یابد.

۴-۲- تیرهای سری B

نتایج این بخش از بررسی ها، در شکل (۲۱) نشان داده شده است. از شکل (۲۱) مشاهده می شود که روند گسیختگی در این سری از تیرها همانند تیر های سری A است، با این تفاوت که اختلاف مقاومت نهایی در دماهای $+50^{\circ}\text{C}$ و $+80^{\circ}\text{C}$ نسبت به دمای اتاق کمتر شده است. میزان کاهش مقاومت نهایی در دمای $+50^{\circ}\text{C}$ نسبت به دمای اتاق، حدود ۱۷ درصد و کاهش مقاومت نهایی در دمای $+80^{\circ}\text{C}$ نسبت به دمای اتاق حدود ۲۲ درصد و مقاومت نهایی در دمای -20°C برابر با مقاومت نهایی در دمای اتاق است.

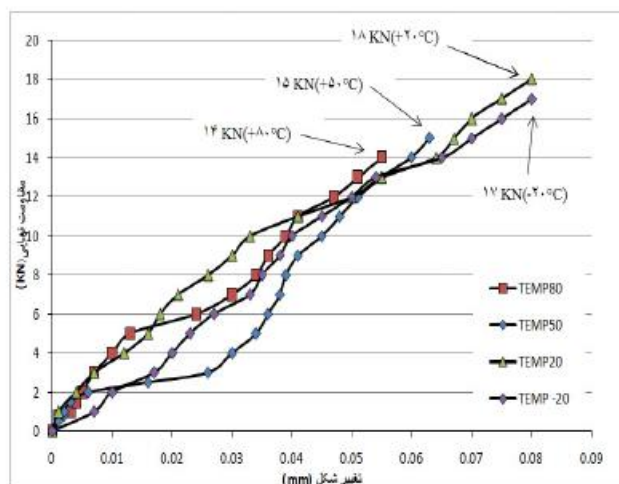


شکل ۲۱: منحنی بار- تغییر شکل برای تیرهای سری B، در دمای 20°C ، -20°C ، 50°C و 80°C

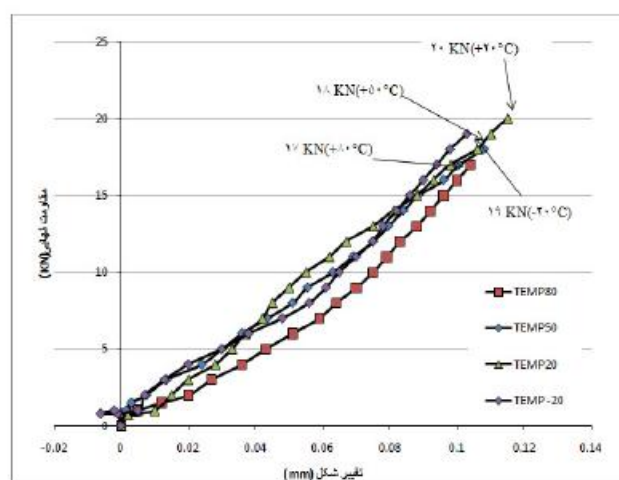
۴-۲-۳- تیرهای سری C

نمودار مقاومت نهایی بر حسب تغییر شکل نمونه های سری C در شکل (۲۲) نشان داده شده است. از شکل (۲۲) پیداست که روند گسیختگی در این سری از تیرها همانند سری A و B است، با این تفاوت که اختلاف مقاومت نهایی در دماهای $+50^{\circ}\text{C}$ و $+80^{\circ}\text{C}$ نسبت به دمای اتاق کمتر

مقاومت نهایی در دمای $+80^{\circ}\text{C}$ نسبت به دمای اتاق کمتر شده است. میزان کاهش مقاومت نهایی در دمای $+50^{\circ}\text{C}$ نسبت به دمای اتاق حدود ۱۰ درصد و کاهش مقاومت نهایی در دمای $+80^{\circ}\text{C}$ نسبت به دمای اتاق حدود ۱۵ درصد است. همچنین در دمای -20°C نسبت به دمای اتاق شاهد کاهش حدود ۵ درصد مقاومت نهایی هستیم.



شکل ۲۶: منحنی بار- تغییر شکل برای تیرهای سری E در دمای 80°C و 50°C ، -20°C ، 20°C



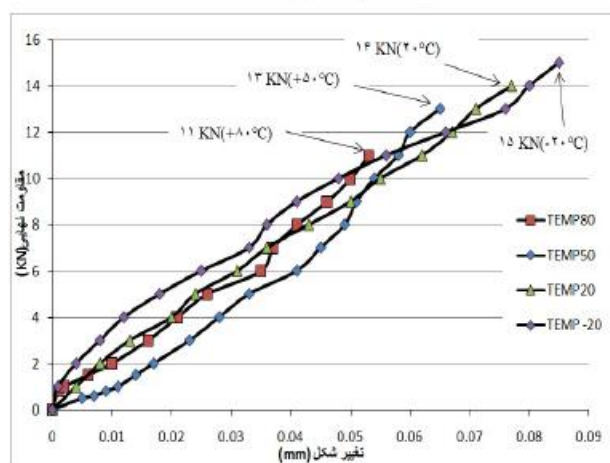
شکل ۲۷: منحنی بار- تغییر شکل برای تیرهای سری F در دمای 80°C و 50°C ، -20°C ، 20°C

۵- مقایسه نتایج آزمایشگاهی با تحلیل آئین نامه ای برای مقایسه نتایج آزمایشگاهی با نتایج متناظر آئین نامه های طراحی از آئین نامه 02-R2-440ACI و همچنین نشریه ۳۴۵ سازمان برنامه استفاده شده است. هر دو آئین نامه، به منظور اعمال شرایط محیطی، جدول مشابهی را مورد استفاده قرار می دهند که در جدول ۴ نشان داده شده است. نتایج تحلیل بوسیله این آئین نامه ها و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی در جداول ۴ تا ۸ آورده شده است.

نسبت به دمای اتاق حدود ۲۱ درصد است. در دمای -20°C نسبت به دمای اتاق شاهد افزایش حدود ۷ درصدی مقاومت نهایی هستیم.



شکل ۲۴: سطح گسیختگی پس از جدایشگی در تیرهای سری A در دمای 50°C



شکل ۲۵: منحنی بار- تغییر شکل برای تیرهای سری D در دمای 80°C و 50°C ، -20°C ، 20°C

۴-۳-۲- تیرهای سری E

نمودار مقاومت نهایی برحسب تغییر شکل نمونه های سری E در شکل (۲۶) نشان داده شده است. از این شکل پیداست که روند گسیختگی در این سری از نمونه ها همانند سری D است، با این تفاوت که اختلاف مقاومت نهایی در دماهای $+50^{\circ}\text{C}$ نسبت به دمای اتاق بیشتر شده و مقدار کاهش مقاومت نهایی در دمای $+50^{\circ}\text{C}$ نسبت به دمای اتاق حدود ۱۷ درصد و کاهش مقاومت نهایی در دمای $+80^{\circ}\text{C}$ نسبت به دمای اتاق حدود ۲۲ درصد است. همچنین مشاهده می شود که در دمای -20°C نسبت به دمای اتاق شاهد کاهش حدود ۶ درصدی مقاومت نهایی هستیم.

۴-۳-۳- تیرهای سری F

نمودار مقاومت نهایی برحسب تغییر شکل نمونه های سری F در شکل (۲۷) نشان داده شده است. براساس این شکل، روند گسیختگی در این سری از تیرها همانند سری های D و E است، با این تفاوت که اختلاف مقاومت نهایی در دمای $+50^{\circ}\text{C}$ نسبت به دمای اتاق بیشتر و اختلاف

جدول ۶: مقایسه نتایج آزمایشگاهی با تحلیل نثریه ۳۴۵ تیرهای مقاوم شده با CFRP انعطاف پذیر

مقاومت فشاری استوانه ای نمونه (MPa)	دمای آزمایش °C	مقاومت نهایی نمونه های تیر در آزمایشگاه (MPa)	مقاومت نهایی بدست آمده از نثریه ۳۴۵	درصد اختلاف نتایج آزمایشگاهی و نثریه ۳۴۵
۱۹/۶۸	۲۰	۱۶	۱۵/۰۶	۵/۸۸
	۵۰	۱۳	۱۴/۱۵	-۸/۸۵
	۸۰	۱۰	۱۴/۱۵	-۴۱/۵۰
	-۲۰	۱۸	۱۴/۱۵	۲۱/۳۹
۳۰/۷۵	۲۰	۱۸	۱۹/۱۶	-۶/۴۴
	۵۰	۱۴	۱۷/۱۹	-۲۲/۷۹
	۸۰	۱۵	۱۷/۱۹	-۱۴/۶۰
	-۲۰	۱۸	۱۷/۱۹	۴/۵
۳۹/۵۵	۲۰	۲۱	۲۱/۵۱	-۲/۴۳
	۵۰	۱۹	۱۹/۲۷	-۱/۴۲
	۸۰	۱۸	۱۹/۲۷	-۷/۰۶
	-۲۰	۱۹	۱۹/۲۷	-۱/۴۲

آئین نامه بتن ایران (آبا) است.

جدول ۷: مقایسه نتایج آزمایشگاهی با تحلیل نثریه ۳۴۵ تیرهای مقاوم شده با CFRP سخت

مقاومت فشاری استوانه ای نمونه (MPa)	دمای آزمایش °C	مقاومت نهایی نمونه های تیر در آزمایشگاه (MPa)	مقاومت نهایی بدست آمده از ACI 02-440	درصد اختلاف نتایج آزمایشگاهی با نثریه ۳۴۵
۱۹/۶۸	۲۰	۱۶	۱۲/۱۳	۱۷/۹۴
	۵۰	۱۳	۱۱/۷۵	۹/۶۳
	۸۰	۱۰	۱۱/۷۵	-۶/۸۰
	-۲۰	۱۵	۱۱/۷۵	۲۱/۶۷
۳۰/۷۵	۲۰	۱۸	۱۶/۲۵	۹/۷۲
	۵۰	۱۴	۱۴/۵۴	-۲/۸۵
	۸۰	۱۵	۱۴/۵۴	۹/۱۳
	-۲۰	۱۷	۱۴/۵۴	۱۴/۴۷
۳۹/۵۵	۲۰	۲۱	۱۸/۴۳	۷/۸۵
	۵۰	۱۹	۱۶/۴۹	۱۳/۲۱
	۸۰	۱۸	۱۶/۴۹	۸/۳۸
	-۲۰	۱۹	۱۶/۴۹	۱۳/۲۱

جدول ۴: ضرایب کاهش محیطی برای مصالح FRP [۷۱]

نثریه ۳۴۵		ACI 440-02	
۰/۹۵	کربن-اپوکسی	شرایط محیطی ملازم	محیط داخلی
۰/۷۵	شیشه-اپوکسی		
۰/۸۵	آرامید-اپوکسی		
۰/۸۵	کربن-اپوکسی	شرایط محیطی	محیط خارجی (پل ها، پایه ها و گاراهای پارکینگ بدون حصار)
۰/۶۵	شیشه-اپوکسی	متوسط و شدید	
۰/۷۵	آرامید-اپوکسی		
۰/۸۵	کربن-اپوکسی	شرایط محیطی	محیط خورنده (تاسیسات شیمیایی و انتقال فاضلاب)
۰/۵	شیشه-اپوکسی	بسیار شدید و فوق	
۰/۷	آرامید-اپوکسی	العاده شدید	

طبق آئین نامه R2-440ACI، اگر سیستم FRP در یک محیط به نسبت ملازم مانند فضای داخلی قرار بگیرد، ضریب کاهش نزدیک به ۱ است و اگر سیستم FRP در یک محیط خورنده و در معرض طولانی مدت رطوبت بالا، چرخه های یخ و ذوب، آب شور و یا مواد قلیایی قرار بگیرد باید از ضریب کاهش پایین تری استفاده شود.

جدول ۵: مقایسه نتایج آزمایشگاهی با تحلیل آئین نامه ACI 02-440 تیرهای تقویت شده با CFRP انعطاف پذیر

مقاومت فشاری استوانه ای نمونه (MPa)	دمای آزمایش °C	مقاومت نهایی نمونه های تیر در آزمایشگاه (MPa)	مقاومت نهایی بدست آمده از ACI 02-440	درصد اختلاف نتایج آزمایشگاهی با ACI 02-440
۱۹/۶۸	۲۰	۱۶	۱۵	۶/۲۵
	۵۰	۱۳	۱۵	-۱۵/۳۸
	۸۰	۱۰	۱۵	-۵۰/۰۰
	-۲۰	۱۸	۱۵	۱۶/۷۶
۳۰/۷۵	۲۰	۱۸	۱۸/۱۸	-۱/۰۰
	۵۰	۱۴	۱۵/۴۵	-۱۰/۳۶
	۸۰	۱۵	۱۵/۴۵	-۳/۰۰
	-۲۰	۱۸	۱۵/۴۵	۱۴/۱۷
۳۹/۵۵	۲۰	۲۱	۲۴/۱	-۱۴/۷۶
	۵۰	۱۹	۲۴/۱	-۲۶/۸۴
	۸۰	۱۸	۲۴/۱	-۳۳/۸۹
	-۲۰	۱۹	۲۴/۱	-۲۶/۸۴

در نثریه ۳۴۵ سازمان مدیریت، شرایط محیطی مورد استفاده طبق تعریف

دیده نمی‌شود که احتمالاً ناشی از مشارکت کمتر تنش‌های حرارتی در مقاومت برشی کلی است، ولی نمونه‌های مقاوم شده با CFRP سخت که در دمای 20°C قرار گرفته‌اند، در هر سه رده مقاومتی بتن، مقاومت کمتری از خود نشان دادند.

روند شکست تیرهای بتنی مقاوم شده با CFRP انعطاف‌پذیر بدین صورت است که در دماهای 20°C و $20^{\circ}\text{C} +$ پس از جاداشدگی CFRP، لایه نازکی از بتن چسبیده به لایه چسب باقی می‌ماند (گسیختگی در بتن)، در حالیکه در دمای 50°C و $80^{\circ}\text{C} +$ پس از جاداشدگی، بتن خیلی کمتری باقی می‌ماند (گسیختگی بین سطحی چسب-بتن).

روند شکست تیرهای بتنی مقاوم شده با CFRP سخت بدین صورت است که در دماهای 20°C و $20^{\circ}\text{C} +$ پس از جاداشدگی CFRP، لایه نازکی از بتن چسبیده به لایه چسب باقی می‌ماند (گسیختگی در بتن)، در حالیکه در دمای 50°C و $80^{\circ}\text{C} +$ پس از جاداشدگی بتن خیلی کمتری متصل به چسب روی CFRP باقی مانده (گسیختگی بین سطحی چسب-بتن) و در دمای $80^{\circ}\text{C} +$ پس از جاداشدگی هیچ بتن و چسبی روی CFRP باقی نمی‌ماند (گسیختگی بین سطحی چسب-CFRP).

در دمای 20°C در هر سه رده مقاومتی بتن، نتایج آزمایشگاهی تیرهای مقاوم شده با CFRP انعطاف‌پذیر تطابق بهتری با مقاومت بدست آمده از روابط آئین نامه های ACI440-02 و نشریه ۳۴۵ نشان دادند. در دماهای 50°C و $80^{\circ}\text{C} +$ ، در هر سه رده مقاومتی بتن، نتایج آزمایشگاهی تیرهای بتنی مقاوم شده با CFRP سخت، تطابق بهتری با مقاومت بدست آمده از روابط آئین نامه های ACI440-02 و نشریه ۳۴۵ نشان دادند. در دمای 20°C در هر سه رده مقاومتی بتن، نتایج آزمایشگاهی تیرهای بتنی مقاوم شده با CFRP سخت، تطابق بهتری با مقاومت بدست آمده از روابط آئین نامه های ACI440-02 نشان دادند.

۷- مراجع

- [1] "راهنمای طراحی و ضوابط اجرایی بهسازی ساختمان های بتنی موجود با استفاده از مصالح تقویتی FRP" نشریه شماره ۳۴۵ سازمان مدیریت و برنامه ریزی.
- [2] Ernst L. Klamer & Dick A. Hordijk, "The influence of temperature on RC beams strengthened with externally bonded CFRP reinforcement",
- [3] Tuakta, C. and Buyukozturk, O., "Deterioration of FRP/concrete bond system under variable moisture conditions quantified by fracture mechanic", Composite Part B: Engineering, Vol.42, No.2, pp.145-154, 2011.
- [4] Harries, K. A., Porter, M. L., and Busel, J. P., "FRP materials and concrete - search needs", Concrete International, 25(10), 69-74, 2003.
- [5] Karbhari, V. M., Chin, J. W., Hunston, D., Benmokrane, B., Juska, T., Morgan, R., Lesko, J.

جدول ۸: مقایسه نتایج آزمایشگاهی با تحلیل آئین نامه ACI 02-440 تیرهای مقاوم شده با CFRP سخت

درصد اختلاف نتایج آزمایشگاهی بدست آمده از با نشریه ۳۴۵	مقاومت نهایی نمونه های تیر در آزمایشگاه (MPa)	دمای آزمایش نمونه (MPa)	مقاومت فشاری	مقاومت نهایی
۲۸/۳۲	۱۱/۴۷	۱۶	۲۰	۲۸/۳۲
۲۱/۰۶	۱۰/۲۶	۱۳	۵۰	۲۱/۰۶
۶/۷۰	۱۰/۲۶	۱۱	۸۰	۶/۷۰
۳۱/۶۰	۱۰/۲۶	۱۵	-۲۰	۳۱/۶۰
۱۶/۹۵	۱۴/۹۵	۱۸	۲۰	۱۶/۹۵
۴/۴۵	۱۳/۳۸	۱۵	۵۰	۴/۴۵
۱۶/۴۰	۱۳/۳۸	۱۴	۸۰	۱۶/۴۰
۲۱/۲۹	۱۳/۳۸	۱۷	-۲۰	۲۱/۲۹
۱۵/۴۵	۱۶/۹۱	۲۰	۲۰	۱۵/۴۵
۲۰/۳۷	۱۵/۱۳	۱۹	۵۰	۲۰/۳۷
۱۱/۰۰	۱۵/۱۳	۱۷	۸۰	۱۱/۰۰
۲۰/۳۷	۱۵/۱۳	۱۹	-۲۰	۲۰/۳۷

۶- نتیجه گیری

از مطالب آورده شده می‌توان نتیجه گرفت که گرما هم بر روی مقاومت نهایی و هم بر روی نوع رفتار گسیختگی تیرهای بتنی تقویت شده با CFRP تاثیر می‌گذارد. تصور اینست که تاثیر افزایش دما بر روی پخش تنش برشی در بتن، ناشی از سه عامل مهم: گسترش تنش‌های حرارتی در نتیجه اختلاف ضریب انبساط حرارتی، کاهش سختی چسب و کاهش مقاومت چسبندگی سطح تماس چسب-بتن، در دماهای بالا است.

همچنین می‌توان گفت که میزان کاهش مقاومت نهایی در دمای 80°C نسبت به مقاومت نهایی در دمای اتاق، با بالا رفتن رده مقاومت بتن کاهش یافته و مقدار کاهش مقاومت نهایی در دمای اتاق تا رده مقاومتی $30/79\text{ MPa}$ افزایش یافته و پس از آن کاهش می‌یابد.

تیرهای تقویت شده با CFRP انعطاف‌پذیر، در هر سه رده مقاومتی بتن، نسبت به تیرهای تقویت شده با CFRP سخت، در دماهای 20°C و 50°C ، مقاومت نهایی بالاتری از خود بروز دادند.

تیرهای تقویت شده با CFRP قرار گرفته در دمای 50°C و 80°C ، در هر سه رده مقاومتی بتن و هر دو نوع CFRP، مقاومت نهایی کمتری داشتند. نمونه‌های بتنی با CFRP انعطاف‌پذیر با رده مقاومتی بتن $19/68\text{ MPa}$ که در دمای 20°C قرار گرفته‌اند، مقاومت نهایی بالاتری را نسبت به نمونه‌های دمای اتاق نشان دادند که می‌تواند ناشی از کنش تنش‌های حرارتی بر خلاف تنش‌های بارگذاری باشد. این مسئله در نمونه‌های با رده مقاومتی $30/79\text{ MPa}$ و $39/55\text{ MPa}$

- the 2nd International Congress. Naples: fib, 2006.
- [13] Miyano, Y., Nakada, M., Watanabe, N., Murase, T. and Muki, "Time-Temperature Superposition Principle for Tensile and Compressive Strengths of Unidirectional CFRP", Proceedings of 2003 SEM Annual Conference & Exposition on Experimental and Applied Mechanics (SEM 2003).
- [14] Matthys, S. , "Structural behaviour and design of concrete members strengthened with externally bonded FRP reinforcement.", Diss. Ghent University, 2000.
- [15] Teng, J. G., et al., "FRP strengthened RC structures.", West Sussex, England, John Wiley & Sons, 2002.
- [16] fib. fib Bulletin 14., "Externally bonded FRP reinforcement for RC structures.", Lausanne, Fédération internationale du béton, 2001.
- [17] Di Tommaso, A., Neubauer, U., Pantuso, A., and Rostásy, F. S. , "Behavior of adhesively bonded concrete-CFRP joints at low and high temperatures.", *Mechanics of Composite Materials*, 37(4), 327-338, 2001.
- [18] ASTM C1609-05, " Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading)".
- [19] ASTM C 884/C 884M – 98, "Standard Test Method for Thermal Compatibility Between Concrete and an Epoxy-Resin Overlay".
- J., Sorathia, U., and Reynaud, D. , "Durability Gap Analysis for fiber-reinforced polymer composites in civil infrastructure.", *Journal of Composites for Construction*, 7(3), 238-247, 2003.
- [6] Plecnik, J. M., Bresler, B., Cunningham, J. D., and Iding, R. , "Temperature effects on epoxy adhesives.", *Journal of Structural Division*, 106(1), 99-113, 1980.
- [7] ACI 440.2R-02. , "Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures.", American Concrete Institute, 2002.
- [8] Bažant, Z. P. and M. F. Kaplan. , "Concrete at high temperatures: Material properties and mathematical models.", *Concrete design and constructions series*. Essex, Longman Group Limited, 1996.
- [9] ACI 216-89, "Guide for Determining the Fire Endurance of Concrete Elements, ACI Committee 216 Report", American Concrete Institute, 1989.
- [10] Saafi, M. , "Effect of fire on FRP reinforced concrete members.", *Composite Structures*, 58, 11-20, 2002.
- [11] Chung J , "Nanoscale characterization of epoxy interphase on copper microstructures. ", *BAM Dissertation Series*, Volume 15, 2006.
- [12] Leone, M., Aiello, M. A., and Matthys, S., "The influence of service temperature on bond between FRP reinforcement and concrete.", June 5, 2006. Fédération Internationale du Béton - Proceedings of