



بررسی آزمایشگاهی میزان مقاومت در برابر آتش دال‌های بتن مسلح تقویت نشده و تقویت شده با CFRP

سعید بختیاری (نویسنده مسؤل)^۱

ارسلان کالالی^۲

فرهنگ فرحبد^۳

لیلا تقی اکبری^۴

چکیده

هدف اصلی این پروژه تحقیقاتی، ارزیابی میزان مقاومت در برابر آتش سیستم دال بتنی تقویت نشده و تقویت شده با CFRP در برابر حریق می‌باشد. برای این منظور، ابتدا یک دال بتنی در دو حالت تقویت نشده و تقویت شده با CFRP تحت دو الگوی مختلف، تحت بارگذاری ثقیلی در دمای محیط تا لحظه گسیختگی قرار گرفتند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که نوارهای CFRP چسبیده به دال بتنی توانستند ظرفیت باربری را به میزان زیادی افزایش دهند بنابراین این روش می‌تواند برای تقویت خمشی دال‌های بتنی مناسب باشد. در ادامه، دال بتنی تقویت نشده تحت یک بار ثقیلی ثابت بهره برداری قرار گرفت و سپس مطابق یک منحنی استاندارد دما-زمان، دمای آن در کوره افزایش یافت تا به گسیختگی برسد. سپس این دال بتنی تحت دو الگوی مختلف با CFRP تقویت شد و تحت آزمون مقاومت در برابر آتش به همین شیوه قرار گرفت. نتایج آزمون‌ها نشان داد که به علت انتظار باربری بیشتر و به تبع آن افزایش بار ثقیلی وارده ولی فقدان مقاومت CFRP در مقابل آتش، دال‌های بتنی تقویت شده در زمان بسیار کوتاهی گسیخته شدند. این موضوع اهمیت بسیار زیاد محافظت در مقابل آتش دال‌های بتنی تقویت شده با FRP را نشان می‌دهد تا بتوان با حفظ باربری دال در حین حریق، به مقادیر مقاومت در برابر آتش مورد نیاز آئین نامه‌های ساختمانی رسید.

کلیدواژگان: دال بتنی، مواد پلیمری مسلح شده با الیاف (FRP)، تقویت خمشی، باربری ثقیلی، مقاومت در برابر آتش

۱- مقدمه

پلیمرهای مسلح شده با الیاف (FRPs) به علت مزایای خود نسبت به مصالح موجود مانند مقاومت بالا، سادگی اجرا، سبکی و مقاومت در برابر خوردگی، دارای کاربردهای گسترده‌ای در مهندسی عمران هستند. یکی از

۱- عضو هیات علمی بخش مهندسی آتش مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، bakhtiyari@bhrc.ac.ir

۲- پژوهشگر بخش مهندسی آتش مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، a.kalali@bhrc.ac.ir

۳- عضو هیات علمی بخش مهندسی سازه مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، farhangfarahbod@yahoo.com

۴- پژوهشگر بخش مهندسی آتش مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، taghiakbari@bhrc.ac.ir



پرکاربردترین این نوع مصالح کامپوزیتی، نوارهای پلیمری مسلح شده با الیاف کربن (CFRP) است که به عنوان تقویت کننده خارجی با رزین اپوکسی به اعضای بتن مسلح چسبیده می شود [۱].

در ساختمان های بتنی، اگرچه سیستم CFRP دارای مزایای قابل توجهی است، ولی نگرانی هایی در خصوص عملکرد آن در دماهای بالا وجود دارد. در واقع، سختی و مقاومت FRP به میزان شدیدی در دماهای نسبتاً پایین افت می کند [۲-۳] یعنی زمانی که دما به دمای انتقال شیشه ای (Tg) ماتریس پلیمری می رسد که معمولاً بین ۵۵ تا ۱۲۰ درجه سلیسیوس قرار دارد. همچنین چسبندگی بین CFRP و بتن که برای اثرگذاری سیستم تقویت کننده ضروری است، به میزان قابل توجهی در دماهای بالاتر از Tg کاهش می یابد. مطالعاتی [۴-۶] در خصوص ارزیابی اثر دما بر روی چسبندگی CFRP به بتن انجام شده است و در آن مطالعات، مشاهده شده که با افزایش دمای رزین اپوکسی به بیش از ۶۰ الی ۷۰ درجه سلیسیوس، مقاومت چسبندگی سریعاً دچار افت می شود.

آزمون های مقاومت در برابر آتش انجام شده بر روی تیرها [۷-۹]، دال ها [۱۱-۱۰] و ستون های [۱۲-۱۳] بتن مسلح تقویت شده با CFRP، نشان دادند هنگامی که دما در رزین اپوکسی به مقدار Tg می رسد، عملکرد مرکب بین CFRP و بتن شروع به از بین رفتن می کند. آن آزمایش ها همچنین نشان دادند که اجرای درست یک سیستم مناسب محافظت در برابر آتش، قادر است زمان کمک موثر سیستم تقویت کننده CFRP به عضو بتن آرمه در یک حادثه آتش سوزی را افزایش دهد و امکان تامین زمان مقاومت در برابر آتش مورد نیاز در آئین نامه های ساختمانی را فراهم کند.

تقویت خارجی با استفاده از کامپوزیت های FRP، در انواع اعضای سازه های بتن آرمه مانند تیرها، ستون ها، دال ها، دیوارها و هم چنین سازه هایی نظیر پل ها، دودکش ها، تونل ها و سیلوها انجام می شود. سیستم تقویت خارجی با ورق های FRP به طور کلی به سه منظور اصلی تقویت خمشی، تقویت برشی و محصورکنندگی و افزایش شکل پذیری اعضای فشاری صورت می گیرد. با توجه به موضوع مورد بحث این تحقیق، صرفاً تقویت خمشی دال های بتن آرمه با استفاده از ورق های CFRP، مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

در ابتدای تحقیق، یک دال بتن مسلح، طراحی شده و سپس با مقادیر مختلف نوار CFRP تقویت شد. در ادامه، دال های بتنی تقویت نشده و تقویت شده تحت بارگذاری ثقلی در دمای محیط قرار گرفتند تا اثر CFRP افزایش ظرفیت باربری مشخص شود. سپس، میزان مقاومت در برابر آتش دال بتنی تقویت نشده و دال های بتنی تقویت شده با CFRP طبق آزمون استاندارد در کوره ارزیابی شد.

انتخاب الیاف کربن در تقویت دال های بتنی در این تحقیق، به علت نسبت بالای مقاومت به وزن این الیاف و کاربرد گسترده آن در تقویت سازه های بتنی است. از طرف دیگر باید در نظر داشت که میزان خزش الیاف کربن در مقایسه با الیاف شیشه، بسیار کم و بنابراین برای تقویت دال بتنی در مقابل بارهای ثقلی مناسب تر است [۱]. همچنین در این تحقیق، خواص مکانیکی مصالح مورد استفاده در ساخت نمونه دال های آزمایشگاهی



مانند مقاومت فشاری بتن، مقاومت کششی میلگردهای فولادی و ... مطابق با روش‌های استاندارد آزمون اندازه‌گیری شد.

۲- برنامه آزمایشگاهی

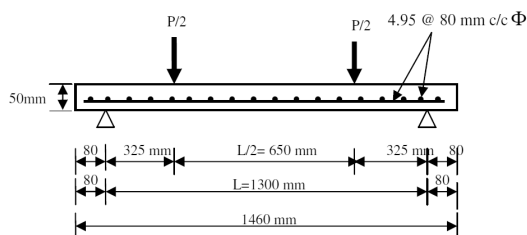
۲-۱- طراحی نمونه‌های آزمایشگاهی

به منظور بررسی مقاومت در برابر آتش دال‌های بتنی تقویت شده با CFRP، ۶ دال بتنی به شرح جدول ۱ ساخته شد. دال‌های آزمایشگاهی با در نظر گرفتن متغیرهای مقابل طراحی و ساخته شدند: ۱- تاثیر تقویت با CFRP؛ ۲- عرض نوارهای تقویت کننده CFRP (میزان تقویت) و ۳- دمای آزمایش (دمای محیط و قرارگیری در شرایط کوره به منظور ارزیابی مقاومت در برابر آتش).

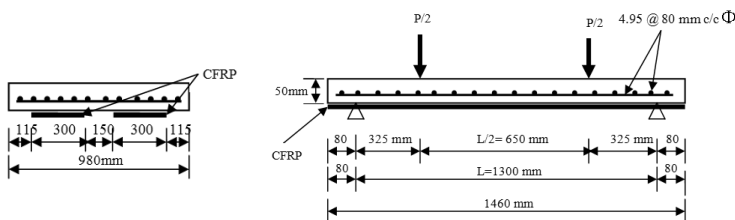
با توجه به استفاده از کوره مقاومت در برابر آتش یک متر مکعبی، نمونه دال‌های بتن مسلح مورد آزمایش با مقیاس ۱ به ۴ نسبت به نمونه واقعی مدل و با ضخامت ۵ سانتی‌متر، عرض ۹۸ سانتی‌متر و طول ۱۴۶ سانتی‌متر ساخته شدند. در طراحی دال‌های بتن مسلح در دو حالت تقویت نشده و تقویت شده با CFRP، از آئین نامه‌های ACI 318-11 [۱۴] و ACI 440.2R-08 [۱۵] استفاده شد. جزئیات نمونه‌ها، مکان اعمال بارها و موقعیت تکیه‌گاه‌ها در دو حالت تقویت نشده و تقویت شده به ترتیب در شکل‌های ۱ و ۲ مشخص شده است. همان‌گونه که در این شکل‌ها دیده می‌شود، طول دهانه باربر دال‌ها برابر ۱۳۰ سانتی‌متر می‌باشد. با توجه به مقیاس کردن نمونه‌ها، فولاد کششی دال‌ها از یک شبکه میلگرد جوش شده با قطر ۴/۹۵ میلی‌متر و فاصله ۸ سانتی‌متر از یکدیگر در هر دو جهت، تشکیل شده بود. برای حالت دال بتنی تقویت نشده، مقطع از نوع کم فولاد انتخاب شد تا گسیختگی خمشی آن شکل پذیر باشد یعنی ابتدا فولاد کششی جاری شده و سپس بتن در ناحیه فشاری، خرد شود. در حالت تقویت شده نیز میزان سطح مقطع CFRP به گونه‌ای انتخاب شد تا خرابی کششی در خمش که مطلوب و شکل پذیر است، اتفاق بیفتد یعنی ابتدا فولاد کششی تسلیم شده و سپس خرد شدن بتن ناحیه فشاری قبل از پارگی ورق CFRP رخ دهد.

جدول ۱- مشخصات نمونه‌های آزمایشگاهی.

تقویت شده با دو نوار تک لایه CFRP		بدون ورق تقویت	تیپ بندی نمونه‌ها	
عرض هر نوار برابر ۱۵ cm	عرض هر نوار برابر ۳۰ cm			
		●	CS-25	آزمون در دمای محیط
	●		25-FR1	
●			25-FR2	
		●	CS-Fire	آزمون در معرض آتش
	●		FR1-Fire	
●			FR2-Fire	



شکل ۱- مشخصات هندسی نمونه دال‌های تقویت نشده و جزئیات میلگردگذاری آن‌ها.



شکل ۲- مشخصات هندسی نمونه دال‌های تقویت شده با دو نوار طولی تک لایه به پهنای ۳۰۰ میلی‌متر.

۲-۲- مصالح

۱-۲-۲ بتن

برای ساخت بتن دال‌ها از سیمان پرتلند نوع ۱ و مصالح سنگی استاندارد استفاده شد. مقاومت فشاری



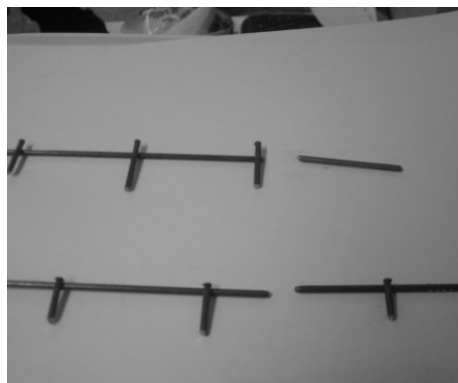
نمونه‌های بتنی استوانه‌ای در سن ۲۸ روزه و در زمان انجام آزمون دال‌ها (سن ۶ ماهه) به ترتیب برابر ۱۶ و ۲۰ مگاپاسکال بدست آمد. مقادیر بیان شده میانگین نتایج مقاومت فشاری سه آزمون است. مقاومت فشاری آزمون‌های استوانه‌ای مطابق استاندارد ASTM C 140-11 [۱۶] تعیین شد.

۲-۲-۲- فولاد

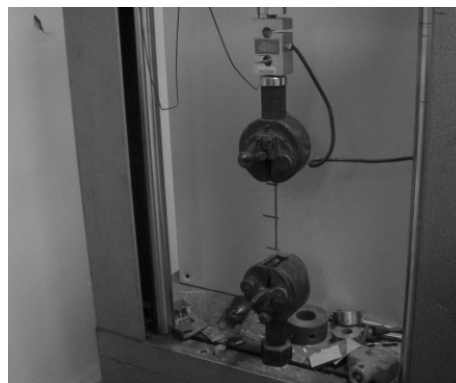
با توجه به مقیاس نمودن نمونه‌های آزمایشگاهی، مفتول‌های فولادی جوش شده جایگزین میلگردهای کششی دال‌ها شد. به منظور تعیین مشخصات مکانیکی مسلح کننده‌های فولادی مورد استفاده در ساخت دال‌های بتنی، آزمایش کشش ساده تک محوره مطابق با استاندارد ASTM A 370-11 [۱۷] بر روی نمونه میلگردهای خام و میلگردهای جوش شده انجام شد و نتایج بدست آمده که هر یک میانگین نتیجه دو آزمون بوده، در جدول ۲ ارائه شده است. بدیهی است جوشکاری سبب ایجاد سخت شدگی کرنش، افزایش تنش تسلیم و نهایی و کاهش ازدیاد طول نسبی فولاد خواهد شد. همچنین در انتهای آزمون کشش میلگردهای فولادی جوش شده، مشاهده شد که گسیختگی در موضع جوش رخ نداده است (شکل ۳).

جدول ۲- مشخصات مکانیکی نمونه میلگردهای فولادی خام (فاقد جوش) و جوش شده.

نوع میلگرد	قطر (mm)	مقاومت تسلیم (kg/cm^2)	مقاومت کششی (kg/cm^2)	ازدیاد طول (%)
خام	۴/۹۵	۴۱۸۵	۵۷۷۱	۱۸/۵
جوش شده	۴/۹۵	۵۶۴۰	۶۶۰۰	۱۲/۸



(ب)



(الف)

شکل ۳: آزمون کشش و نحوه گسیختگی میلگردهای فولادی جوش شده.

CFRP - ۳-۲-۲

برای تقویت دال‌ها از الیاف کربن به همراه رزین اپوکسی استفاده شد. بنابراین ماده مرکب حاصل از این اختلاط



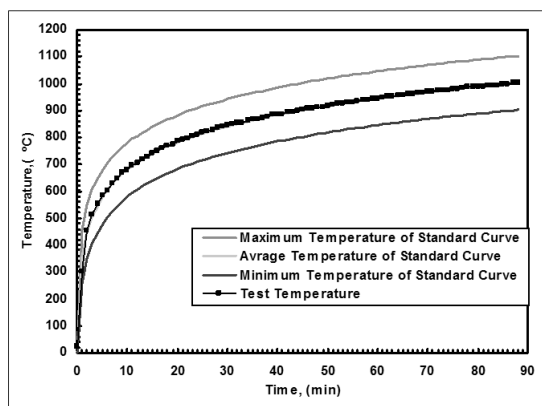
از نوع کامپوزیت CFRP می باشد که برای تقویت ۴ دال بتن مسلح مورد استفاده قرار گرفت. مشخصات هندسی و مکانیکی این الیاف کربن بر اساس مشخصات اعلامی توسط تولید کننده در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳: مشخصات هندسی و مکانیکی الیاف کربن.

چگالی (g/cm ³)	ضخامت الیاف (mm)	مدول الاستیسیته (GPa)	مقاومت کششی (MPa)	کرنش گسیختگی
۱/۸۱	۰/۱۷۶	۲۴۲	۴۱۲۷	۰/۰۱۵

۳-۲- سیستم انجام آزمایش و ابزاربندی ها

آزمون مقاومت در برابر آتش به وسیله یک کوره مقیاس متوسط (یک متر مکعب) انجام شد. در همه آزمون ها منحنی دما-زمان کوره مطابق با استاندارد BS EN 1363-1: 2012 [۱۸] افزایش یافت. دمای متوسط کوره به وسیله ترموکوپل های نصب شده در داخل کوره اندازه گیری و مقدار دمای به دست آمده از ترموکوپل ها و محدوده رواداری ها در شکل ۴ نمایش داده شده است. مطابق این شکل دیده می شود که در مدت آزمون، دمای متوسط کوره به طور دقیق در محدوده استاندارد واقع شده بود. در همه آزمون ها، بارگذاری قائم روی نمونه با استفاده از جک هیدرولیکی به صورت استاتیکی انجام شد. با توجه به نوع عملکرد دال بتنی، آزمون ها تا زمان شکست معیار ظرفیت باربری ادامه داده شدند و مقایسه ها بر این اساس انجام شدند.



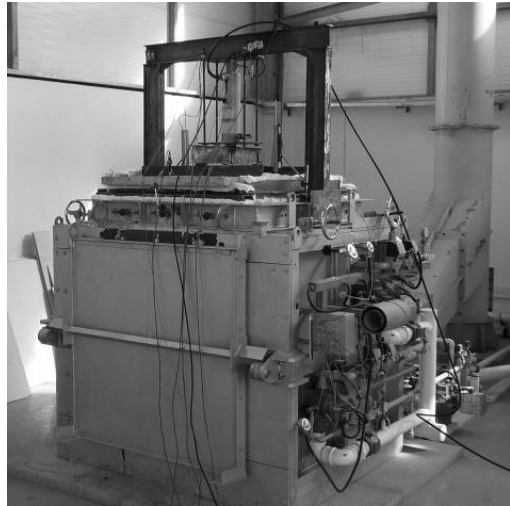
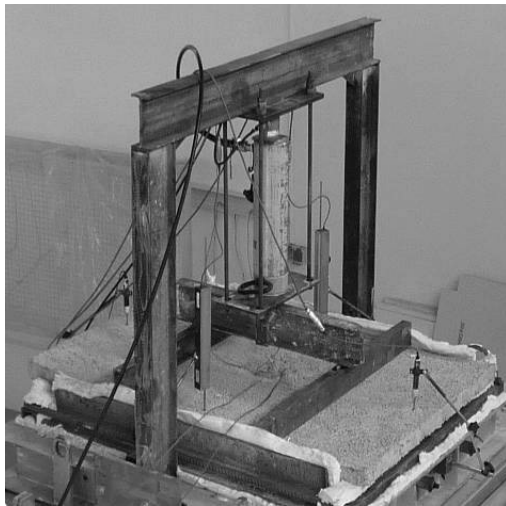
شکل ۴- منحنی دما-زمان کوره و مقایسه آن با منحنی استاندارد.

آزمون بارگذاری خمشی بر روی شش نمونه دال مطابق با استاندارد ASTM E 72 - 10 [۱۹] انجام شد. تغییرمکان قائم دال در محل تکیه گاه ها و در وسط دهانه به وسیله چهار تغییرمکان سنج اندازه گیری شد. کرنش در فولاد کششی دال، در دورترین تار فشاری بتن و در سطح خارجی FRP در وسط دهانه نیز به وسیله کرنش سنج های متصل به آنها در هر مرحله اندازه گیری و ثبت شد.

برای آزمون مقاومت در برابر آتش، دال بتنی روی سقف کوره قرار داده شد. ابتدا بارگذاری با استفاده از یک جک



هیدرولیکی در دو مقطع به صورت خطی بر روی دال انجام شد تا شرایط لازم برای یک آزمون چهار خطی فراهم شود. بار وارده در تمام مدت آزمون (از زمان روشن شدن کوره)، ثابت نگه داشته شد. اطراف نمونه در مقابل خروج حرارت و شعله به گونه‌ای عایق بندی شد که مانعی در برابر حرکت نمونه ایجاد نشود. برای این منظور طرفین نمونه و تکیه‌گاه‌ها با استفاده از عایق‌های پتویی سرامیکی به نحو مناسبی عایق بندی شدند. همچنین در نمونه‌های FR1-Fire و FR2-Fire که در آنها لایه تقویتی CFRP فاقد پوشش محافظ در مقابل آتش است، برای محافظت کرنش سنج‌های نصب شده روی سطح CFRP در برابر آتش، روی هر کرنش سنج با قطعه‌ای از عایق پتویی سرامیکی پوشیده شد و این عایق با استفاده از یک قطعه مش فولادی و سیم آرماتوربندی به دال بتنی متصل شد. نحوه قرارگیری دال بتنی روی سقف کوره و عایق بندی اطراف آن در شکل ۵ نشان داده شده است. در این مجموعه از آزمون‌های مقاومت در برابر آتش، دو ترموکوپل داخل هر نمونه در وسط دهانه قرار داده شد تا دمای مرکز نمونه (ترموکوپل شماره ۱) و دمای شبکه آرماتور داخل نمونه (ترموکوپل شماره ۲) اندازه‌گیری شود.



شکل ۵- نحوه استقرار دال بتنی روی سقف کوره به همراه تجهیزات بارگذاری و اندازه‌گیری.

۳- نتایج و بحث

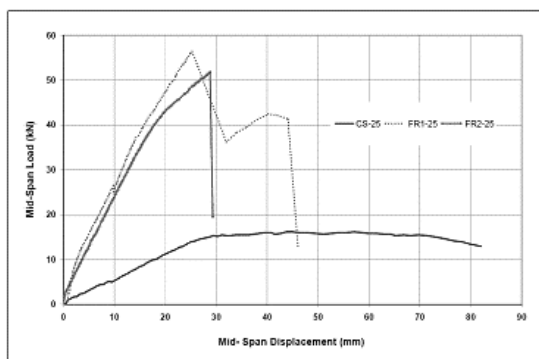
۳-۱- آزمون‌های بارگذاری ثقلی

سه نمونه دال در دمای محیط (حدود ۲۵ درجه سلیسیوس) تحت آزمون بارگذاری ثقلی قرار گرفتند. یک نمونه از نوع تقویت نشده (نمونه CS-25) و دو نمونه از نوع تقویت شده (نمونه‌های FR1-25 و FR2-25) بودند. در این آزمایش‌ها، بار قائم اعمالی به تدریج افزایش داده شد تا نمونه‌ها به گسیختگی برسند یعنی مقاومت آنها بعد از رسیدن به حد ماکزیمم، حداقل به میزان ۲۰٪ کاهش یابد.



۳-۱-۱- نمونه CS-25

نحوه انجام آزمون بارگذاری ثقلی بر روی نمونه تقویت نشده در دمای محیط به همراه منحنی تغییرات بار-تغییرمکان قائم بدست آمده، در شکل ۶ نشان داده شده است. در این شکل مشخص است که تسلیم میلگردهای کششی در تغییرمکان قائم وسط دهانه حدود $28/5$ میلی‌متر و میزان بار 15 kN رخ داده است. ضریب شکل‌پذیری تغییرمکانی این نمونه حدوداً برابر با $\mu = 28/5 / 82 = 2/9$ به دست آمد. گسیختگی خمشی این نمونه از نوع شکل‌پذیر بود و ابتدا فولادهای کششی تسلیم شدند و سپس بتن در ناحیه فشاری خرد شد.



(ب)



(الف)

شکل ۶: الف) نمونه CS-25 در حین آزمون بارگذاری ثقلی؛ ب) منحنی تغییرات بار-تغییرمکان قائم وسط دهانه برای نمونه‌های CS-25، FR1 و FR2 در دمای محیط.

۳-۱-۲- نمونه FR1-25

آزمون بارگذاری ثقلی بر روی نمونه دال بتنی تقویت شده با دو نوار CFRP به عرض 300 mm در دمای محیط انجام شد. اعمال بار حین آزمون با گام 5 kN صورت گرفت. در حین آزمون، پارگی FRP طی دو مرحله رخ داد (شکل ۷-الف): گسیختگی نوار اول، در بار 56 kN متناظر با تغییرمکان وسط دهانه حدود 25 میلی‌متر و گسیختگی نوار دوم پس از افت مقاومت دال، در بار 43 kN متناظر با تغییرمکان وسط دهانه حدود 40 میلی‌متر اتفاق افتاد. منحنی تغییرات بار-تغییرمکان قائم وسط دهانه این نمونه در شکل ۶-ب نمایش داده شده است. اگر تغییرمکان متناظر با 80% ظرفیت باربری حداکثر (در اینجا 30 میلی‌متر) به عنوان تغییرمکان نهایی نمونه در نظر گرفته شود و با توجه به آن که تغییرمکان حد تسلیم برابر 25 میلی‌متر می‌باشد، لذا ضریب شکل‌پذیری تغییرمکانی برای نمونه تقویت شده FR1-25، برابر $\mu = 25 / 30 = 1/2$ خواهد شد.



(ب)



(الف)

شکل ۷- نمونه‌های تقویت شده در انتهای آزمون بارگذاری ثقیلی: الف) FR1-25 و ب) FR2-25.

۳-۱-۳- نمونه FR2-25

آزمون بارگذاری ثقیلی بر روی نمونه دال بتنی تقویت شده با نوارهای CFRP به عرض ۱۵ cm در دمای محیط انجام شد. گسیختگی در نمونه تقویت شده FR2-25 طی دو مرحله رخ داد (شکل ۷-ب): در مرحله اول یکی از نوارهای FRP در بار حداکثر ۵۳ kN متناظر با جابجایی وسط دهانه ۲۸ میلی‌متر پاره شد و با ادامه بارگذاری، نوار دوم FRP نیز پس از افت مقاومت در بار حدود ۲۰ kN متناظر با تغییرمکان وسط دهانه حدود ۲۹ میلی‌متر از سطح بتن جدا شد. این جداشدگی به همراه قلوه کن شدن بخشی از بتن اتفاق افتاد. منحنی تغییرات بار-تغییرمکان قائم وسط دهانه این نمونه در شکل ۶-ب نمایش داده شده است. با توجه به این شکل، ضریب شکل پذیری تغییرمکانی در نمونه تقویت شده FR2-25 برابر $\mu = 19/29 = 1/53$ خواهد شد که بیش از نمونه تقویت شده قبلی است که پهنای نوارهای آن بزرگتر است.

در شکل ۶-ب، منحنی‌های بار-تغییرمکان قائم وسط دهانه برای سه نمونه FR1-25، CS-25، و FR2-25 با یکدیگر مقایسه شده است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، حداکثر ظرفیت باربری خمشی در نمونه‌های تقویت شده FR1-25 و FR2-25، به ترتیب $3/47$ و $3/28$ برابر مقدار مربوط به نمونه تقویت نشده CS-25 می‌باشد که نشان دهنده تاثیر قابل توجه CFRP در تقویت خمشی دال‌های بتنی است. از طرف دیگر، همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، در اثر تقویت با CFRP، شکل پذیری سیستم کاهش می‌یابد، چون CFRP فاقد شکل پذیری بوده و دارای رفتار تنش-کرنش خطی تا لحظه گسیختگی است.

۳-۲- آزمون‌های مقاومت در برابر آتش

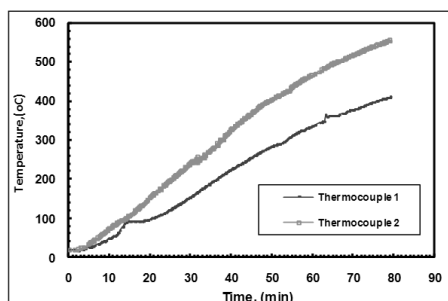
سه نمونه دال طبق جدول ۱ تحت آزمون مقاومت در برابر آتش قرار گرفتند. یک نمونه از نوع تقویت نشده (نمونه CS-Fire) و دو نمونه از نوع تقویت شده (نمونه‌های FR1-Fire و FR2-Fire) بودند. در این آزمایش‌ها، ابتدا بار قائم اعمالی به هر نمونه به تدریج افزایش داده شد تا به مقدار بار بهره‌برداری مربوط به آن برسد. بعد از ثابت



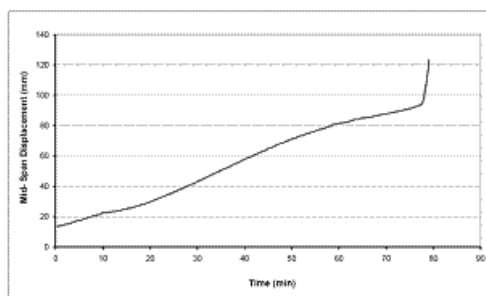
شدن بار قائم، دمای کوره مطابق منحنی استاندارد دما-زمان افزایش یافت تا نمونه‌ها به گسیختگی برسند یعنی دیگر قادر به تحمل بار قائم ثابت وارده به خود نباشند.

۳-۲-۱- نمونه CS-Fire

بار بهره برداری برای دال بتنی بدون تقویت با توجه به شرایطی که تنش در فولاد کششی مقطع دال به $0.8F_y$ مطابق با آیین نامه ACI 440.2R-08 برسد، محاسبه شده و برابر $9/5 \text{ kN}$ به دست آمد. قبل از آغاز آتش در کوره، بار به تدریج تا رسیدن به بار بهره‌برداری $9/5 \text{ kN}$ که متناظر با جابجایی وسط دهانه برابر $13/5$ میلی‌متر می‌باشد، افزایش یافت. سپس آتش در کوره تحت شرایطی که نمونه CS-Fire تحت بار ثابت $9/5 \text{ kN}$ قرار داشت، آغاز شده و با افزایش دمای کوره، تغییرمکان دال نیز به تدریج افزایش یافت. شکل ۸-الف منحنی تغییرات تغییرمکان وسط دهانه بر حسب زمان را نشان می‌دهد. دال بتنی CS-Fire با رسیدن دمای فولاد کششی به حدود 550°C ، دچار تغییرمکانی برابر با $123/4$ میلی‌متر در وسط دهانه و افت شدید در مقاومت خمشی شده که نهایتاً منجر به شکست نمونه شد.



(ب)



(الف)

شکل ۸-الف) منحنی تغییرات تغییرمکان وسط دهانه بر حسب زمان در نمونه CS-Fire و ب) منحنی دما-زمان ترموکوپل‌های متصل به نمونه CS-Fire.

با بالا رفتن دما در حین آزمون، به تدریج ترک خوردگی در سطح بالای قابل رویت دال توسعه یافت. آزمون در دقیقه ۷۹ به دلیل برآورده نشدن معیار ظرفیت باربری خاتمه یافت، به عبارت دیگر در این زمان، کاهش مقاومت نمونه در اثر افزایش دما به حدی بود که نمونه دیگر قادر به تحمل بار ثابت وارده نبود. شکل ۸-ب منحنی دما-زمان ترموکوپل‌های متصل به نمونه را نشان می‌دهد. در خصوص تحلیل شکست دال در دقیقه ۷۹ توضیحات مقابل قابل ذکر است: این دال بتن مسلح تقویت نشده در هنگام آزمون مقاومت در برابر آتش، تحت بار ثابت $9/5$ کیلونیوتن قرار داشت. با توجه به اینکه، حداکثر ظرفیت باربری این دال در دمای محیط برابر $16/15$ کیلونیوتن می‌باشد، بنابراین نسبت بار به مقاومت دال در شروع آزمون حدود $0/6$ بود. در زمان گسیختگی این دال در دقیقه ۷۹، دمای فولاد توسط ترموکوپل نصب شده، حدود 550 درجه سلیسیوس ثبت شد. در این

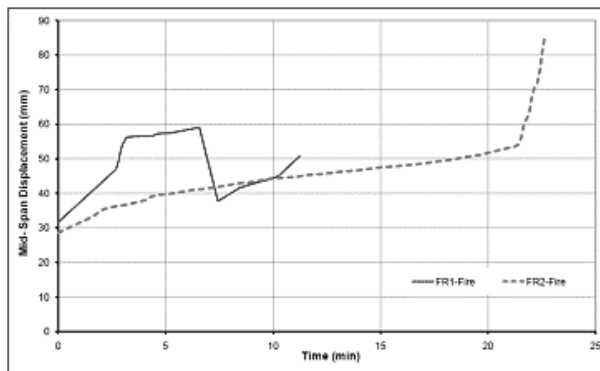


دما، مطابق آئین نامه 10-ANSI/AISC 360 [۲۰] مقاومت تسلیم فولاد به حدود ۰/۶ مقدار اولیه خود کاهش می‌یابد بنابراین در این دما، ظرفیت خمشی دال حدود ۴۰ درصد کاهش می‌یابد و از ۱۶/۱۵ کیلونیوتن به کمتر از بار وارده ۹/۵ کیلونیوتنی می‌رسد که به دنبال آن خرابی دال اتفاق می‌افتد که با نتایج آزمایشگاهی مشاهده شده، مطابقت دارد. لازم به ذکر است با توجه به اینکه عمق ناحیه فشاری این دال اندک بوده، ظرفیت خمشی دال تقریباً رابطه مستقیم با مقاومت تسلیم فولاد دارد.

۳-۲-۲- نمونه‌های FR1-Fire و FR2-Fire

بار بهره‌برداری در نمونه‌های تقویت شده نیز با توجه به شرایطی که تنش شرایط بهره‌برداری در ورق CFRP مطابق با آئین نامه ACI440.2R-08 به میزان $0.33C_D C_E f_{fu}$ برسد، محاسبه شده است. CD، ضریب محیط برابر ۰/۶۵، CE، ضریب دوام برابر با ۱ و f_{fu} ، مقاومت کششی الیاف است. بنابراین بار بهره‌برداری در نمونه‌های تقویت شده FR1-Fire و FR2-Fire به ترتیب برابر با ۳۳ و ۲۴ کیلونیوتن بدست آمد.

شکل ۹ منحنی تغییرات تغییرمکان وسط دهانه بر حسب زمان را در نمونه‌های تقویت شده FR1-Fire و FR2-Fire نشان می‌دهد. در نمونه FR1-Fire قبل از آغاز آتش در کوره، بار به تدریج تا رسیدن به بار بهره‌برداری ۳۳ کیلونیوتن متناظر با جابجایی وسط دهانه برابر ۳۱/۶ میلی‌متر افزایش یافت. سپس با شروع آتش در کوره، بار ۳۳ کیلونیوتن ثابت نگه داشته شد. با بالا رفتن دمای کوره، تغییر شکل نمونه افزایش یافت و در جابجایی وسط دهانه برابر با ۴۳/۳ میلی‌متر، جدا شدن ورق تقویت CFRP از سطح بتن در وسط دهانه اتفاق افتاد که نهایتاً با گسیختگی مهاری و قلوه کن شدن بتن در یک انتها همراه بود (شکل ۱۰) که منجر به افت شدید مقاومت دال شده و به دنبال آن خرابی و گسیختگی دال اتفاق افتاد.

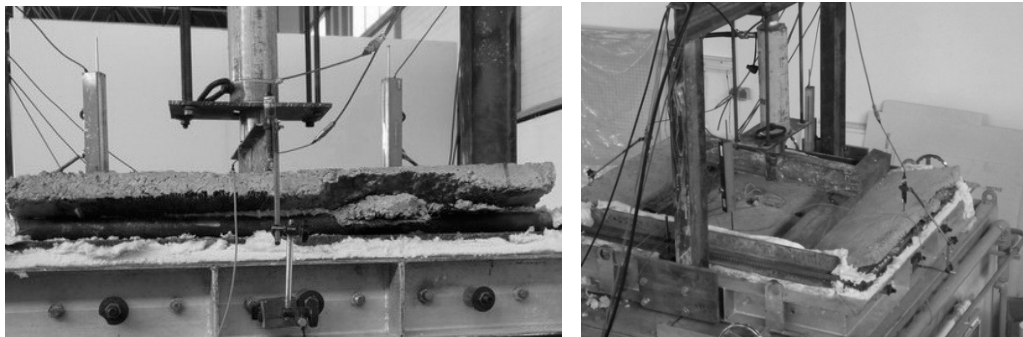


شکل ۹- منحنی تغییرات تغییرمکان وسط دهانه-زمان در نمونه‌های تقویت شده FR1-Fire و FR2-Fire.

این آزمون در دقیقه ۷ به دلیل پیچش تیرهای عرضی اعمال کننده بار به دال، متوقف شد و پس از خاموش کردن کوره و اصلاح سیستم اعمال بار و بارگذاری مجدد، کوره دوباره روشن شد. چهار دقیقه پس از آن، آزمون به دلیل عدم تحمل بار توسط دال خاتمه یافت، یعنی مقاومت نمونه در این زمان در اثر افزایش دما به مقداری



کمتر از بار وارده رسید. این نمونه در مجموع ۱۱ دقیقه در برابر آتش مقاومت کرد (شکل ۹).



شکل ۱۰- نمونه FR1-Fire در انتهای آزمون مقاومت در برابر آتش.

نمونه پس از خاتمه آزمون و سرد شدن، از کوره خارج شده و مورد بررسی قرار گرفت. همان گونه که در شکل ۱۱-الف مشاهده می شود، رزین نوار FRP در وسط دهانه که در معرض مستقیم آتش کوره قرار داشته، کاملاً از بین رفته است. با این وجود، در این قسمت ها الیاف کربنی قابل مشاهده است که به علت قرار گرفتن در کشش باعث انتقال نیرو به قسمت های انتهایی دال بتنی شده و با تمرکز نیرو در این قسمت ها، موجب قله‌کن شدن بتن شده است. به عبارت دیگر، اتصال قسمت های انتهایی نوار FRP در بیرون کوره به دال باعث شده تا علی‌رغم تخریب رزین در لایه FRP در وسط دهانه، نوار تا مدت بیشتری به تقویت دال ادامه داده و شکست کامل نمونه را تا حدودی به تأخیر بیندازد.



(ب)



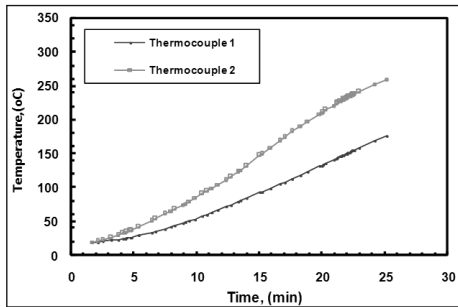
(الف)

شکل ۱۱- دال های تقویت شده پس از آزمون مقاومت در برابر آتش: (الف) نمونه FR1-Fire و (ب) نمونه FR2-Fire.

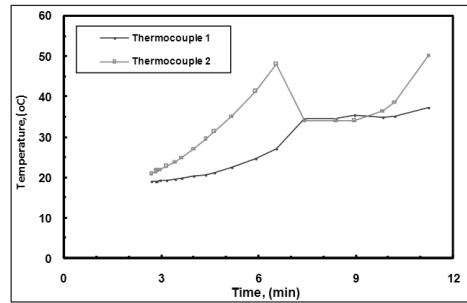
شکل ۱۲-الف منحنی دما-زمان ترموکوپل های متصل به نمونه FR1-Fire را نشان می دهد. همان گونه که مشاهده می شود دمای نمونه و مش فولادی چندان افزایشی نداشته و حتی پیش از رسیدن آنها به ۱۰۰ درجه سلیسیوس، آزمون به پایان رسیده است. دلیل این موضوع، بالا بودن بار وارد بر نمونه نسبت به نمونه بدون تقویت به علت وجود نوارهای FRP می باشد. به علت وجود تقویت کننده FRP، انتظارات باربری نسبت به نمونه



تقویت نشده بالاتر رفته و به علت ضعف شدید رزین FRP در دمای بالا، به سرعت کاهش مقاومت در حین آزمون مقاومت در برابر آتش رخ داده است. به عبارت دیگر در صورت عدم محافظت مناسب FRP در برابر آتش، دال‌های بتنی تقویت شده در صورت قرار گرفتن در معرض آتش سوزی در زمان بسیار کمتری نسبت به دال‌های تقویت نشده دچار خرابی و گسیختگی خواهند شد.



(ب)



(الف)

شکل ۱۲- منحنی دما-زمان ترموکوپل‌های متصل به نمونه‌ها: الف) دال FR1-Fire و ب) دال FR2-Fire.

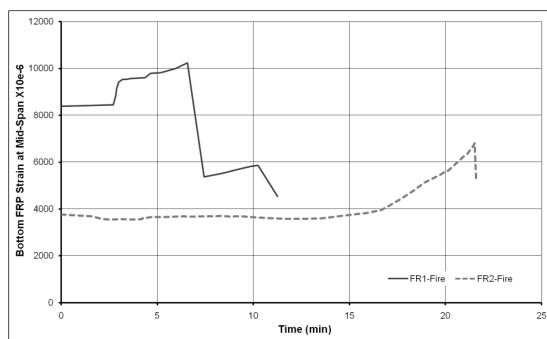
به همین ترتیب برای نمونه FR2-Fire نیز قبل از شروع آتش در کوره، بار به تدریج تا رسیدن به بار بهره‌برداری ۲۴ کیلونیوتن متناظر با جابجایی وسط دهانه برابر ۲۸/۶ میلی‌متر افزایش یافت. با شروع آتش در کوره، بار ۲۴ کیلونیوتن ثابت نگه داشته شد. با بالا رفتن دمای کوره، تغییر شکل نمونه افزایش یافت و در جابجایی وسط دهانه برابر با ۵۳/۶۵ میلی‌متر، جدا شدن ورق تقویت CFRP از سطح بتن اتفاق افتاد که منجر به کاهش قابل توجه مقاومت دال شد. پس از این خرابی، در ادامه آزمون و در تغییر مکان وسط دهانه برابر ۸۵/۲۴ میلی‌متر، دال به شکست و انهدام کامل رسید. آزمون FR2-Fire در دقیقه ۲۲ به دلیل برآورده نشدن معیار ظرفیت باربری خاتمه یافت یعنی در این زمان نمونه قادر به تحمل بارهای وارده نبود و دچار گسیختگی شد. شکل ۱۲-ب منحنی دما-زمان ترموکوپل‌های متصل به این نمونه را نشان می‌دهد. توضیحات ارائه شده برای FR1-Fire در خصوص دما در اینجا نیز به طور کلی صادق است، با این تفاوت که در اینجا به علت تقویت کمتر و به تبع آن، بار وارده پایین‌تر، دمای ترموکوپل‌های تعبیه شده داخل نمونه و زمان مقاومت در برابر آتش نسبت به نمونه قبلی افزایش نشان می‌دهد.

نمونه پس از خاتمه آزمون و سرد شدن، از کوره خارج شده و مورد بررسی قرار گرفت. در این نمونه نیز پس از بررسی دال بتنی، ترک خوردگی روی آن دیده شد و بررسی سمت در معرض آتش دال بتنی FR2-Fire نشان داد که رزین نوار تقویت کننده FRP کاملاً از بین رفته و الیاف کربن به صورت نامنظم نمایان است. شکل ۱۱-ب نمونه مذکور را پس از آزمون مقاومت در برابر آتش نشان می‌دهد.

منحنی تغییرات کرنش ورق تقویت در وسط دهانه بر حسب زمان در شکل ۱۳ ارائه شده است. نکته قابل توجه



در این شکل آن است که کرنش ورق CFRP در نمونه تقویت شده FR1-Fire در هنگام گسیختگی، حدود 5865×10^{-6} است که با توجه به کرنش گسیختگی 15000×10^{-6} ورق های CFRP، ملاحظه می شود که تنها از ۳۹٪ ظرفیت کششی ورق تقویت در شرایط بارگذاری بهره برداری این نمونه به هنگام شکست در اثر حریق استفاده شده است. حال آن که کرنش ورق CFRP در نمونه تقویت شده FR2-Fire در هنگام گسیختگی، حدود 6600×10^{-6} است که نسبت به کرنش گسیختگی CFRP، نشان دهنده استفاده از حدود ۴۴٪ ظرفیت کششی ورق تقویت در این نمونه به هنگام شکست به علت آتش می باشد. این موضوع در توافق با توضیحات ارائه شده در بالا در خصوص شکست ترد نمونه ها به علت تخریب رزین و عدم امکان استفاده از ظرفیت کامل FRP بر اثر آتش سوزی می باشد.



شکل ۱۳- منحنی تغییرات کرنش ورق تقویت در وسط دهانه بر حسب زمان در نمونه های FR1-Fire و FR2-Fire.

در انتها، خلاصه نتایج آزمون های مقاومت در برابر آتش در جدول ۴ نشان داده شده است.

جدول ۴- مدت زمان مقاومت دال های بتنی در برابر آتش تا شکست معیار ظرفیت باربری.

مدت زمان مقاومت در برابر آتش (دقیقه)	مشخصات نمونه			نام نمونه
	میزان بار بهره برداری (کیلوگرم)	عرض ورق تقویت CFRP (سانتی متر)	نوع	
۷۹	۹۵۰	-	تقویت نشده	CS-Fire
۱۱	۳۳۰۰	۳۰	تقویت شده	FR1-Fire
۲۲	۲۴۰۰	۱۵	تقویت شده	FR2-Fire

۵- نتیجه گیری

با توجه به نتایج حاصل از آزمایش های سازه ای بر روی دال بتن مسلح بدون تقویت و تقویت شده با CFRP در دو حالت دمای محیط و در معرض آتش، موارد زیر قابل نتیجه گیری است:



۱- مشخص شد که تقویت کننده CFRP اثر قابل توجهی در افزایش ظرفیت باربری خمشی دال بتن مسلح دارد. در نمونه‌های آزمون شده در این برنامه آزمایشگاهی، در اثر تقویت با نوارهای تک لایه CFRP با دو پهنای مختلف، مقاومت خمشی دال به میزان ۲۲۸ تا ۲۴۷ درصد افزایش یافت. البته باید توجه داشت از آنجا که منحنی تنش- کرنش CFRP تا حد گسیختگی به شکل خطی است، حضور CFRP باعث کاهش شکل پذیری و تغییر مکان حد گسیختگی سیستم می‌شود.

۲- تقویت یک دال بتن مسلح با CFRP باعث افزایش ظرفیت باربری ثقلی دال می‌شود و به تبع آن، بار بهره برداری وارده به دال می‌تواند افزایش یابد. از طرف دیگر، CFRP عملکرد بسیار ضعیفی در دماهای بالا دارد به گونه‌ای که رزین اپوکسی آن که نگهدارنده الیاف کربن در کنار یکدیگر می‌باشد در دمایی کمتر از ۱۰۰ درجه سلیسیوس، مقاومت و استحکام لازم خود را از دست می‌دهد و به دنبال آن، از هم پاشیدگی CFRP و جداسازی الیاف اتفاق می‌افتد. اثر دو عامل بالا، باعث می‌شود که زمان مقاومت در برابر آتش یک دال بتن مسلح تقویت شده با CFRP نسبت به حالت تقویت نشده خیلی کمتر باشد. در اینجا، زمان مقاومت در برابر آتش دال بتن مسلح تقویت نشده برابر ۷۹ دقیقه بود که این مدت برای نمونه‌های مشابه ولی تقویت شده با مقادیر مختلف CFRP، به ۱۱ الی ۲۲ دقیقه کاهش یافت. این موضوع اهمیت زیاد محافظت از CFRP در برابر حریق را زمانی که از آن برای تقویت ثقلی دال‌های بتنی در یک ساختمان استفاده می‌شود، آشکار می‌سازد.

۳- در تقویت خارجی یک دال بتن مسلح با نوارهای CFRP، اگر بتوان بر روی دو انتهای نوارها، عایق حرارتی مناسبی تامین کرد یا از اتصالات مکانیکی استفاده نمود، در هنگام آتش سوزی، ابتدا در قسمت‌های میانی، الیاف کربن از هم جدا شده ولی اتصال انتهای این الیاف به سطح زیر کار، امکان استفاده از ظرفیت باربری آنها و به تبع آن، افزایش زمان مقاومت در برابر آتش را امکانپذیر خواهد کرد. به عبارت دیگر، طول میانی نوارهای CFRP که تحت حرارت بالا قرار می‌گیرد تبدیل به کابلی شده که در دو انتهای خود درگیر است. این سیستم تقویت کننده تا زمانی در باربری مشارکت دارد که در مناطق انتهایی خود از سطح زیر کار بتنی جدا شود.

مراجع

- [1] Hollaway, LC. A review of the present and future utilisation of FRP composites in the civil infrastructure with reference to their important in-service properties, Construct Build Mater, 24, 2010, 2419–2445.
- [2] Dodds, N, Gibson, AG, Dewhurst, D, Davies, JM. Fire behaviour of composite laminates, Compos A Appl Sci Manuf, 31, No.7, 2000, 689–702.
- [3] Correia, JR, Gomes, MM, Pires, JM, Branco, FA. Mechanical behaviour of pultruded glass fibre reinforced polymer composites at elevated temperature: experiments and model assessment, Compos Struct, 98, 2013, 303–313.
- [4] Gamage, JCPH, Al-Mahaidi, R, Wong, MB. Bond characteristics of CFRP plated concrete members under elevated temperatures, Compos Struct, 75, 2006, 199–205.
- [5] Leone, M, Matthys, S, Aiello, MA. Effect of elevated service temperature on bond between



- FRP EBR systems and concrete, *Compos Part B: Eng*, 40, No.1, 2009, 85–93.
- [6] Ahmed, A, Kodur, VKR. Effect of bond degradation on fire resistance of FRP-strengthened reinforced concrete beams, *Compos Part B: Eng*, 42, 2011, 226–237.
- [7] Williams, BK, Kodur, VKR, Green, MF, Bisby, L. Fire endurance of fiber-reinforced polymer strengthened concrete T-beams, *ACI Struct J*, 105, No.1, 2008, 60–67.
- [8] Ahmed, A, Kodur, V. The experimental behaviour of FRP-strengthened RC beams subjected to design fire exposure, *Eng Struct*, 33, No.7, 2011, 2201–2211.
- [9] Palmieri, A, Matthys, S, Taerwe, L. Experimental investigation on fire endurance of insulated concrete beams strengthened with near surface mounted FRP bar reinforcement, *Compos Part B: Eng*, 43, No.3, 2012, 885–895.
- [10] Williams, B, Bisby, L, Kodur, V, Green, M, Chowdhury, E. Fire insulation schemes for FRP-strengthened concrete slabs, *Compos A Appl Sci Manuf*, 37, 2006, 1151–1160.
- [11] Lopez, C, Firmo, JP, Correia, JR, Tiago, C. Fire protection systems for reinforced concrete slabs strengthened with CFRP laminates, *Construct Build Mater*, 47, 2013, 324–333.
- [12] Bisby, LA, Green, MF, Kodur, VKR. Fire endurance of FRP-confined concrete columns, *ACI Struct J*, 10, No.6, 2005, 883–891.
- [13] Chowdhury, EU, Bisby, LA, Green, MF, Kodur, VKR. Investigation of insulated FRP wrapped reinforced concrete columns in fire, *Fire Saf J*, 42, 2007, 452–460.
- [14] American Concrete Institute Committee 318. Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary, ACI 318 (2011).
- [15] American Concrete Institute Committee 440. Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures, ACI 440.2R (2008).
- [16] American Society for Testing and Materials. Standard Test Methods for Sampling and Testing Concrete Masonry Units and Related Units, ASTM C 140 (2011).
- [17] American Society for Testing and Materials. Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products, ASTM A 370 (2011).
- [18] British Standards Institution. Fire resistance tests, Part 1: General requirements, BS EN 1363-1 (2012).
- [19] American Society for Testing and Materials. Standard Test Methods of Conducting Strength Tests of Panels for Building Construction, ASTM E 72 (2010).
- [20] American Institute of Steel Construction. Specification for Structural Steel Buildings, ANSI/AISC 360 (2010).