

Experimental Nonlinear Flexural Capacity Curve of Fiber Reinforced Concrete under Direct Fire

Seyed Saeed Beheshti¹, Mohammad Safi^{*2}, Khosro Rahmani³

1- Energy Conversion Group, Mechanical Engineering Faculty, Shahid Beheshti University

2- Associate Professor, Dept. of civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

3- Material and Metallurgy Group, Mechanical Engineering Department, Shahid Beheshti University

ABSTRACT

In this article, the effects of the heating and cooling process on the flexural behavior and nonlinear capacity of these components have been investigated by conducting several tests on concrete beams with long and short polymer fibers exposed to direct fire. Based on this, it has been shown that the effect of direct flame can significantly change the ductility of the beam structure. It has been shown that the cooling phase of fire has a great effect on the reduction of ductility. The type of reinforcement and its amount in concrete beams make many changes on the flexural behavior and ductility of the structure. The results of the tests on 12 series of samples showed that increasing the number of long fibers beyond a certain limit can significantly increase the energy absorption capacity and durability of the structure in direct flame conditions, while short fibers had little effect on this issue. Most of them have helped to reduce the scaling of concrete superficially. In the results of this article, an algorithm for the design of flexural concrete beams based on the philosophy of the capacity spectrum method has been presented. This method can be used to evaluate existing structures against real fire scenarios.

ARTICLE INFO

Receive Date: 14 January 2024

Revise Date: 25 March 2024

Accept Date: 26 April 2024

Keywords:

*Fiber concrete
direct flame
ductility
flexural behavior
durability*

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2024.432873.3327>

*Corresponding author: Mohammad Safi

Email address: m_safi@sbu.ac.ir

منحنی ظرفیت غیرخطی خمشی آزمایشگاهی بتن الیافی تحت شعله مستقیم

سید سعید بهشتی^۱، محمد صافی^{۲*}، خسرو رحمانی^۳

۱- دانشجوی دکتری دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

۲و۳- دانشیار دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

چکیده

در این مقاله با انجام آزمایش‌های متعدد بر روی تیرهای بتنی با الیاف پلیمری بلند و کوتاه در معرض شعله مستقیم آتش، اثرات فرآیند گرم شدن و سرد شدن بر رفتار خمشی و ظرفیت شکل پذیری این اجزا مورد بررسی قرار گرفته است. بر این اساس نشان داده شده است که اثر شعله مستقیم می‌تواند شکل پذیری سازه را به میزان قابل توجهی تغییر دهد. فرآیند سرد شدن بتن پس از خاموش شدن آتش تاثیر بسیار زیادی بر کاهش شکل پذیری دارد. نوع تسلیح و میزان آن در تیرهای بتنی، بر رفتار خمشی و شکل پذیری سازه تغییرات زیادی ایجاد می‌کند. نتایج آزمایش‌ها روی ۱۲ سری نمونه نشان داد که افزایش میزان الیاف بلند از حد معینی به بعد می‌تواند ظرفیت جذب انرژی و دوام سازه را در شرایط شعله مستقیم بطور قابل ملاحظه‌ای افزایش دهد درحالی‌که الیاف کوتاه در این مساله تاثیر کمی داشته‌اند و بیشتر کمک به کاهش کنده شدن بتن به طور سطحی نموده‌اند. درنتیجه این مقاله الگوریتمی برای طراحی سازه‌های بتنی خمشی با تکیه بر فلسفه روش طیف ظرفیت ارائه شده است. از این روش می‌توان برای ارزیابی سازه‌های موجود در برابر سناریوهای واقعی آتش سوزی بهره برداری نمود.

کلمات کلیدی: بتن الیافی، شعله مستقیم، شکل پذیری، رفتار خمشی، دوام.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
doi:	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
https://doi.org/10.22065/jsce.2024.432873.3327	۱۴۰۳/۱۰/۳۰	۱۴۰۳/۰۲/۰۷	۱۴۰۳/۰۲/۰۷	۱۴۰۳/۰۱/۰۶	۱۴۰۲/۱۰/۲۴
محمد صافی m_safi@sbu.ac.ir			*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:		

۱- مقدمه

بتن دارای مشخصات و خواص بسیاری است که از جمله آن می توان به غیر اشتعال بودن آن و ضریب هدایت حرارتی پایین آن اشاره نمود. با این حال، در سازه های بتنی که در برابر آتش طراحی نشده اند، بعد از اعمال بار حرارتی، بتن دچار پدیده زوال و کنده شدن ناگهانی شده و مقاومت خود را از دست می دهد [۱]. با توجه به اهمیت بتن در ساخت و ساز و اهمیت حفظ پایداری آن در صورت آتش سوزی، تحقیقات در خصوص مواد بتن و افزودنی هایی که رفتار آن را بهبود می بخشد تبدیل به یک نیاز شده است [۲]. در مراحل اولیه آتش سوزی ظرفیت و سختی و تغییر شکل تحمیل شده در طول آتش سوزی روی بتن قابل توجهی ندارد. مقاومت مکانیکی بتن تا دمای ۲۸۰ درجه سانتیگراد افزایش می یابد و ظاهر خاکستری خود را حفظ می کند. از ۲۸۰ درجه سانتیگراد به بعد، توانایی ها و قابلیت های مکانیکی بتن کاهش می یابد، بطوری که تا رسیدن به دمای حدود ۴۰۰ درجه، ۱۵ درصد از مقاومت فشاری خود را از دست می دهد که مقدار قابل توجهی محسوب می شود [۳].

به منظور ارتقای رفتار بتن، استفاده از بتن های الیافی با مقاومت بالا که عملکرد فیزیکی و مکانیکی بتن را بهبود می بخشد، در حال افزایش است [۴]. در دسته ای از روش ها برای مقاوم نمودن در مقابل آتش، از پوشش ضد آتش به صورت ملات مقاوم در برابر آتش، بر روی سازه های بتنی استفاده شده است [۵]. البته تاثیر این ملات ها بر ضریب انتقال حرارت قابل تامل می باشد. به دلیل طیف گسترده ای از پارامترهای موثر که انواع بتن بر حسب طرح اختلاط، نوع سنگدانه، سن بتن و سایر موارد دارند، مدل کاملی از رفتار بتن در برابر آتش مستقیم ارائه نشده است. در تحقیقات اولیه بیشتر تمایل بر این بوده که مقادیر مشخصه مثل مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته اندازه گیری شوند. بیشتر کارهایی که تاکنون صورت گرفته روی نمونه هایی بوده که بدون بارگذاری تحت حرارت قرار می گرفتند اما نتایج تحقیقات بیشتر نشان داد که اگر گرمایش تحت یک تنش موجود صورت یا پیش بارگذاری انجام شود، کاهش مقاومت بیشتری رخ می دهد [۶].

در بتن تحت آتش سوزی در دمای بالا، بخار آب محبوس در بتن و سنگدانه ها، علت اصلی افزایش فشار بخار آب بوده و باعث کنده شدن ناگهانی بتن می شود. طبیعتاً مقاومت کششی بالا در پوشش بتن مسلح و در نزدیکی سطح آن می تواند باعث افزایش تاب آوری بتن در برابر آتش سوزی گردد. در صورتی که به نحوی بتوان فشار بخار داخل بتن را در حین آتش سوزی تخلیه نمود، دوام آن تحت آتش سوزی افزایش می یابد [۷]. بتن های الیافی به طور کلی چه با الیاف فلزی و چه با الیاف پلیمری، مقاومت کششی سطحی بتن را افزایش می دهند. الیاف پلیمری خاصیت دیگری نیز دارند، بدین صورت که در دمای بالا ذوب شده و با ایجاد مجاری تخلیه فشار بخار آب از داخل بتن، عملاً تاب آوری آن را به طور مضاعف بهبود می بخشد [۸]. خاصیت دیگر الیاف در بتن افزایش ظرفیت جذب انرژی است به طوری که با استفاده از الیاف شکل پذیری بتن افزایش یافته و در نتیجه مود خرابی سازه از حالت ترد به شکل پذیرتر سوق پیدا می نماید و این مساله باعث افزایش تاب آوری و بهبود سطح ایمنی جانی و جلوگیری و تاخیر فروریزش سازه می شوند [۹].

کاهانجی و همکاران (۲۰۱۶) خصوصیات مکانیکی چند نمونه تیر را در معرض شعله بررسی نمودند، آنها با ساخت نمونه های مختلف حاوی الیاف فلزی (۲٪ حجمی) و الیاف پلی پروپیلن (۴٪ حجمی) و اعمال بار با درصدهای ۲۰ و ۴۰ و ۶۰ درصد بصورت ثابت خصوصیات مکانیکی تیرها را بررسی نمودند. تنها تیرهایی دچار شکست نشدند که تا ۲۰ درصد اعمال بار انجام شد. البته کنده شدن مشهود بود. بر اساس این مطالعات آزمایشگاهی، تا ۴۰ درصد اعمال بار کمترین میزان مقاومت در برابر آتش و بیشترین کنده شدن و تا ۶۰ درصد بار، از بین رفتن فاجعه بار بتن ولی کنده شدن کمتر به علت ایجاد ترک و باز شدن منافذ بیشتر و خروج زودتر و بهتر بخار آب گزارش شده است [۱۰]. سرانو و همکاران (۲۰۱۶) تحقیقاتی را در زمینه بتن های حاوی الیاف فولادی و پلی پروپیلن تحت آتش انجام دادند. آنها تست فشار و کشش روی نمونه های استوانه ای انجام دادند. آزمایش آتش روی این نمونه ها بجای کوره الکتریکی در معرض مستقیم آتش بود. نتایج نشان داد که افزودن الیاف در بتن حدود ۱ الی ۲ درصد مقاومت را افزایش داده اما پس از رسیدن به مقاومت ماکزیمم، شکل پذیری آنها کم می شود [۱۱].

یرماک و همکاران (۲۰۱۷) اثر دماهای بالا بر بتن های حاوی الیاف فولادی و پلی پروپیلن را بررسی کردند. نوع بتن مورد استفاده از نوع بتن های با مقاومت بالا بوده و تحت چندین دمای مختلف آزمایش ها انجام شد. نتایج حاکی از آن بود که با افزایش حرارت، رسانایی الکتریکی بتن کم شده و با سرد شدن تدریجی نمونه ها، این مقدار افزایش می یابد [۱۲]. عبائیان و همکاران در سال ۲۰۱۸، الیاف پلی پروپیلن ماکروپلاستی با کارایی بالا را در مقادیر مصرف ۱، ۲ و ۳ کیلوگرم در متر مکعب مورد استفاده قرار دادند. آزمایش بر روی بتن سخت شامل مقاومت فشاری، استحکام کششی و انعطاف پذیری، در دماهای 25°C ، 100°C ، 200°C و 300°C با افزودن یک کیلوگرم الیاف به بتن انجام شد و در نتیجه آن، مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مقاومت خمشی به ترتیب به ۱۴، ۱۷ و ۸.۵ درصد افزایش یافت [۱۳].

بانرجی و همکاران (۲۰۲۰) آزمایش بر روی یک تیر با مقیاس نسبتا بزرگ با الیاف پلی پروپیلن و در معرض شعله مستقیم و بارگذاری همزمان را انجام دادند. در این تحقیق پنج تیر در مقیاس بزرگ و با نسبت های مختلف مخلوط ساخته شده و مورد ارزیابی قرار گرفتند. رفتار و عملکرد کنده شدن انفجاری در شرایط محیطی و آتش سوزی با متغیرهای آزمون شامل وجود الیاف پلی پروپیلن، سطح بار و سناریوی قرار گرفتن در معرض آتش مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمایش نشان داد که تیرها به شدت مستعد کنده شدن انفجاری در ناحیه فشاری در بخش طرفین تیر هستند. کاهش کنده شدن انفجاری، افزایش مقاومت فشاری و افزایش مقاومت در مقابل آتش و افزایش کنده شدن در قسمت هایی از تیر که فشرده می شوند از نتایج این آزمایش ها بود [۱۴].

با توجه به پیشینه تحقیقات مطالعه شده، در کارهای موجود تاثیر رفتار الیاف پلیمری پلی پروپیلن بر خصوصیات مکانیکی از جمله مقاومت فشاری و کششی و خمشی بصورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است [۱۵] و غالبا مقاومت کامپوزیت، در برابر دما در شرایط پس از حرارت در کوره استاندارد و سرد شدن آزمایش شده، یعنی نمونه ها پس از ساخت، در کوره در معرض حرارت قرار گرفته و سپس تحت انواع بارهای مکانیکی قرار داده شده و در مورد شکل پذیری و جذب انرژی و ضریب انتقال حرارت آن بحث و بررسی انجام شده است، بنابراین در آزمایش ها کمتر به صورت آزمایش شعله مستقیم و بارگذاری هم زمان پرداخته شده است و اطلاعات زیادی در مورد رفتار سازه در دمای بالا تحت بار ثابت وجود ندارد.

در اغلب آزمایش های این تحقیق با رویکرد کاربردی، سعی شده است که انواعی از بتن که رفتار غیرخطی شکل پذیرتری دارند و در برابر آتش سوزی دچار شکست ترد و ناگهانی نمی شوند بررسی و معرفی گردند. ارزیابی رفتار غیرخطی پیچیده بتن در برابر شعله مستقیم و میزان دقیق تر جذب انرژی و نیز پیدا کردن کامپوزیت هایی که افت ظرفیت جذب انرژی کمتری و ضریب انتقال حرارت کمتری در حوادث آتش سوزی و دماهای بالا داشته باشند، مساله بسیار مهم و از موضوعات مورد توجه روز می باشد. وجود نامعینی های متعدد در این ارزیابی آن را به یک مساله پیچیده تحقیقاتی تبدیل کرده که انجام آزمایش های مدون و هدفمند در این زمینه از ارزش بالایی برخوردار می باشد.

از طرفی در روش های نوین طراحی بر مبنای انرژی که به طور مستقیم انرژی ورودی به سازه و ظرفیت جذب انرژی آن مورد مقایسه قرار می گیرد، ارزیابی ظرفیت جذب انرژی توسط سازه در مقابل آتش و بار هم زمان که با واقعیت مطابقت داشته باشد، از اهمیت به سزایی برخوردار است. در این خصوص، وجود نامعینی های زیاد در پارامترهای موثر، امکان برآورد دقیق از میزان جذب انرژی کامپوزیت ها تحت دماهای بالا به روش های تحلیلی و شبیه سازی عددی بسیار پیچیده و مشکل می باشد. انتقال حرارت ناشی از آتش سوزی تحت اثر توام بارهای حرارتی و مکانیکی، یکی از مسایل مهم در طراحی سازه های بتنی با دیدگاه عملکردی، تاب آوری و دوام سازه محسوب می شود. بارهای ناشی از آتش در این سازه ها در سناریوهای متنوعی ممکن است ایجاد شوند. در ساختمان ها حفظ جان افراد و عدم ریزش سازه برای تامین زمان مورد نیاز برای تخلیه، هدف اصلی محسوب می شود [۱۶]. در سایر زیرساخت ها، تونل و سازه های زیر زمینی از نمونه فضاهای محصور می باشد که در آن، زمان مورد نیاز برای خاموش نمودن آتش و خارج نمودن افراد و دارایی ها کار بسیار مهمی بوده و لذا زمان دوام سازه از اهمیت بیشتری برخوردار می گردد [۱۷-۱۸].

با توجه به بررسی های فوق روی کارهای انجام شده، به نظر می رسد هنوز اطلاعات نسبتاً کمی در خصوص رفتار غیرخطی و شکل پذیری تیرهای بتنی در شرایط شعله مستقیم وجود دارد. تعدد نامعینی ها و عوامل موثر در این مورد نیاز به مطالعات بسیار بیشتری را می طلبد. همچنین بدلیل پیچیدگی و صعوبت آزمایش، در مورد منحنی های ظرفیت تیرهای بتن الیافی تحت شعله مستقیم تحقیقات مستقل تجربی زیادی وجود ندارد. در این پژوهش مطالعه آزمایشگاهی روی نمونه های بتن الیافی مختلف تحت میزان بارگذاری های متفاوت و به طور همزمان تحت آتش سوزی با شعله مستقیم برای تیرهای بتنی با تکیه گاه ساده صورت گرفته است. نتایج این آزمایش ها در طول فرآیند آتش سوزی و سپس خاموش شدن آتش و سرد شدن و با حفظ بارهای مکانیکی وارده با اندازه گیری دما و نیرو و تغییر شکل به صورت غیرخطی ثبت و ارائه و مورد بررسی و تحلیل و مقایسه با بتن معمولی قرار گرفته است. با استفاده از نتایج ثبت شده، منحنی های ظرفیت غیرخطی یا به نوعی سطوح شکست نمونه ها تهیه و ارائه گردیده است.

۲- مدل آزمایشگاهی شعله مستقیم

۲-۱- مشخصات فیزیکی و مکانیکی نمونه ها

در این مطالعه تعداد ۱۲ سری نمونه حاوی ترکیب الیاف میکرو یا کوتاه و ماکرو یا بلند از جنس پلی پروپیلن و همچنین بدون الیاف ساخته شده و تحت آزمایش شعله مستقیم و بار همزمان با سناریوهای مختلف قرار گرفتند. مشخصات الیاف مورد استفاده براساس نمونه ها و اطلاعات ارائه شده از سوی تولید کننده الیاف در جدول شماره ۱ آورده شده است.

جدول ۱- مشخصات فنی الیاف بلند و کوتاه مورد استفاده

نوع الیاف پلی پروپیلن	ماکرو سنتتیک (بلند مصنوعی)	میکرو سنتتیک (کوتاه مصنوعی)
مقاومت کششی (مگاپاسکال)	۲۵±۵۰۰	۲۵±۶۲۵
مدول الاستیسیته (گیگاپاسکال)	۵/۰±۵/۲۵	۰±۵/۲۵
ازدیاد طول (درصد)	۰±۱۰/۵	۰±۷/۴
تعداد رشته (تعداد در هر کیلوگرم)	۶۰۰۰	-
مقاومت اسیدی و قلیایی	عالی	عالی
جذب آب	ندارد	ندارد
وزن مخصوص (گرم بر سانتیمتر مکعب)	۰/۹۱	۰/۹۱
طول (میلیمتر)	۵۰	۱۸
قطر (میلیمتر)	۰/۴	۰/۲
رنگ	طوسی	سفید
دمای ذوب (سانتیگراد)	۱۷۰-۱۸۰	۱۶۰-۱۷۰
استاندارد مصالح	ASTM-D۷۵۰۸	ASTM-D۷۵۰۸



شکل ۱- تصویر الیاف بلند و کوتاه مسلح کننده مصنوعی از جنس پلی پروپیلن

نسبت آب به سیمان مورد استفاده در این مطالعه برای حصول مقاومت بالاتر مطابق جدول ۲، برابر با ۰/۳۵ در نظر گرفته شد. مصالح بکار رفته در نمونه ها شامل شن و ماسه و سیمان و ژل میکروسلیس و فوق روان کننده بوده است. سیمان مورد استفاده، سیمان پرتلند تیپ دو کارخانه سیمان تهران، با وزن مخصوص ۳۱۳۰ کیلوگرم بر مترمکعب بوده است. مصالح سنگی مورد استفاده از مصالح رودخانه ای که شامل مصالح سنگی ریزدانه با اندازه ۵-۰ میلیمتر، مصالح سنگی درشت دانه با اندازه ۱۲-۵ میلیمتر و ۱۹-۱۲ میلیمتر بوده است. مصالح سنگی ریز دانه دارای مدول نرمی، چگالی نسبی و جذب آب، به ترتیب به میزان ۲/۸۲ و ۲/۶۵ و ۲/۹۰ درصد مطابق با استانداردهای ASTM-C128 و ASTM-C136 می باشد. چگالی نسبی و جذب آب برای مصالح سنگی درشت دانه ۱۲-۵ میلیمتر به ترتیب به میزان ۲/۵ و ۲/۵٪ و برای مصالح درشت دانه ۱۹-۱۲ میلیمتر به ترتیب به میزان ۲/۶ و ۰/۲۱٪ مطابق با استاندارد ASTM ۱۲۷ C است. از آب آشامیدنی، جهت ساخت مخلوط های بتنی، استفاده گردید. ماده افزودنی مورد استفاده در این تحقیق، فوق روان کننده بر پایه پلی کربوکسیلات اثر است. برای ساخت نمونه های الیافی از دو دسته مخلوط استفاده شد، یکی برای نسبت الیاف کمتر و یکی برای نسبت الیاف بیشتر، مقادیر و نسبت های هر دو دسته در جدول شماره (۲) نمایش داده شده است.

جدول ۲- مشخصات مخلوط بتنی مورد استفاده در نمونه ها

مشخصات مصالح مصرفی	FRC ^۸ (Kg/m ^۳)	FRC ^{۱۲} (Kg/m ^۳)
شن	۷۴۴	۵۱۷
ماسه	۱۱۱۶	۵۴۴
سیمان	۴۰۰	۴۰۰
آب	۱۴۰	۱۴۰
فوق روان کننده کاهنده شدید آب HRWR	۱/۱۸	۱/۲۱
الیاف ماکرو پلی پروپیلن	۸	۱۲
الیاف میکرو پلی پروپیلن	۲	۳
نسبت آب به سیمان	۰/۳۵	۰/۳۵

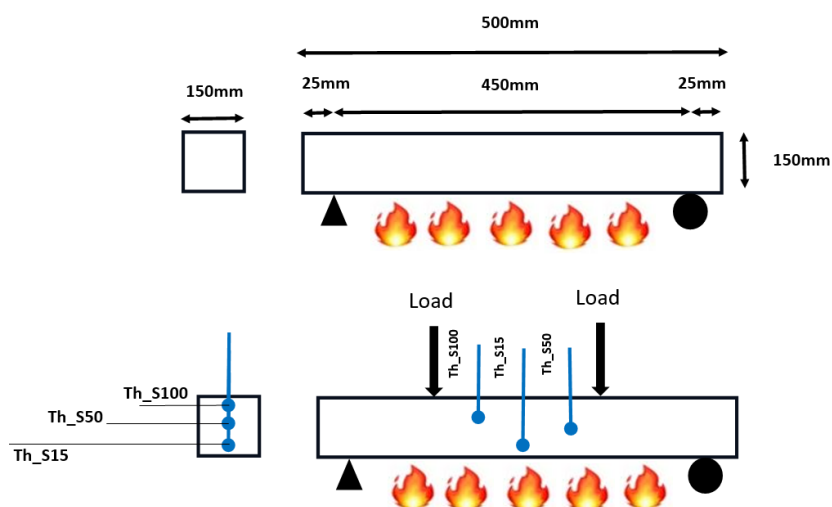
همچنین با انجام طرح های آزمایشی و به منظور حصول مقاومت بالاتر، از مجموع سنگدانه شن و ماسه، ۶۰٪ شن و ۴۰٪ ماسه استفاده و نحوه اختلاط الیاف ماکرو و میکرو پلی پروپیلن به نسبت حجمی کل بتن صورت گرفت. الیاف پلی پروپیلن ماکرو با درصد وزنی ۸ کیلوگرم در مترمکعب و الیاف پلی پروپیلن میکرو با درصد وزنی ۲ کیلوگرم در مترمکعب در دسته یک و الیاف پلی پروپیلن ماکرو ۱۲ کیلوگرم در مترمکعب و الیاف پلی پروپیلن میکرو با درصد وزنی ۳ کیلوگرم در مترمکعب در دو دسته اضافه شدند.

در عمل آوری نمونه ها مطابق استاندارد ملی ایران به شماره ۵۸۱ ISIRI [۱۹] ابتدا به میزان مورد نظر طرح اختلاط (مخلوط بتن به همراه الیاف و فوق روان کننده) ساخته، سپس نمونه گیری بتن براساس اندازه های متداول آئین نامه بتن ایران در نمونه های مکعبی ۱۵×۱۵×۵۰ سانتیمتر و نمونه های مکعبی ۱۵×۱۵×۱۵ سانتیمتر برای هر سناریو انجام شد. هر قالب، در سه مرحله بتن ریزی و در هر بار ویریه گردید. پس از مدت ۲۴ ساعت قالب ها باز و داخل حوضچه آب (دمای ۲۵ درجه سانتی گراد) قرار داده و نمونه ها پس از مدت ۲۸ روز از داخل حوضچه آب، به خارج و سپس در دستگاه برای آزمایش قرار داده شد. نرخ افزایش درجه حرارت شعله تا رسیدن به دمای مورد نظر براساس استاندارد ISO-834 انجام شد [۲۰].

۲-۲- دستگاه آزمایش و روش بارگذاری

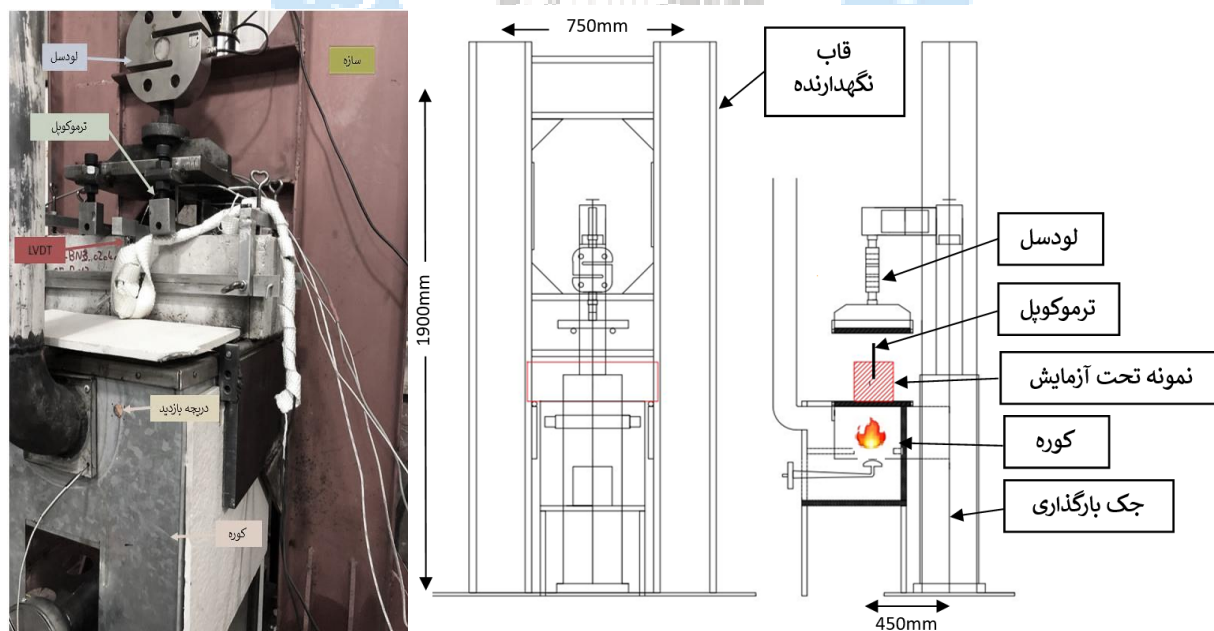
رفتار خمشی ۴ نمونه شاهد (PLC) در شرایط محیطی به صورت بارگذاری دو نقطه ای همانطور که در شکل شماتیک ۲ نشان داده شده است، مطابق با استاندارد ASTM C1609 ارزیابی شد [۲۱]. در این آزمایش، دو بار نقطه ای بر روی وجه بالایی نمونه به کمک یک سیستم فرمان پذیر (جک هیدرولیک و سروموتور) با ظرفیت ۱۰۰۰ کیلو نیوتن بر روی نمونه های شاهد اعمال شد. ۸ نمونه دیگر (FRC8, FRC12) تحت اثر ترکیبی آتش و بارگذاری مکانیکی ساخته و آزمایش شدند. سناریوهای بارگذاری و آزمایش برای نمونه های مختلف در جدول شماره ۳ ارائه شده است. مجموعه کوره و سیستم بارگذاری به گونه ای طراحی شده است که ممکن است یک عضو سازه

در طول یک حادثه آتش سوزی واقعی در معرض آن قرار گیرد. برای ایجاد شرایط دما و بارگذاری مکانیکی همزمان. جزئیات کوره در شکل ۳ نشان داده شده است.



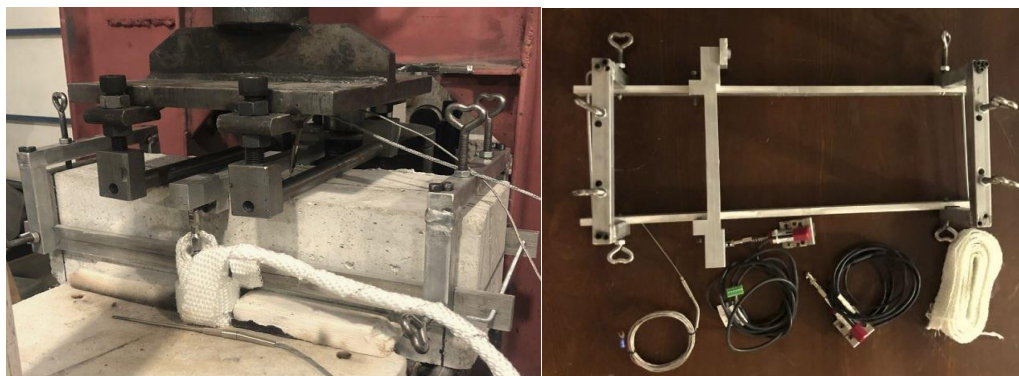
شکل ۲- تصویر شماتیک نمونه تحت بار و آرایش ترموکوپل ها

برای ثبت نتایج در طول آزمایش از ابزار دقیق اندازه گیری شامل، تغییرمکان سنج (LVDT) با حداکثر طول ۱۰ میلیمتر و با دقت ۰/۰۰۱ میلیمتر استفاده شد. این تغییرمکان سنج ها در دو طرف نمونه مستقر و میانگین عدد ثبت شده دو تغییرمکان سنج، ملاک عمل برای میزان جابجایی خمشی تیر مطابق شکل ۴ قرار گرفت. به علت عدم پایداری کرنش سنج در دماهای بالاتر از ۳۰۰ درجه، از کرنش سنج استفاده نگردید. برای اندازه گیری دما در نقاط مورد نظر در نمونه ها از ترموکوپل نوع K با دقت ۰/۱ درجه و با قطر ۱/۲ میلیمتر استفاده شد. جانمایی ترموکوپل ها در نمونه ها در فواصل ۱۵ و ۵۰ و ۱۰۰ میلیمتر از کف نمونه، مطابق شکل ۲ انجام شد.



شکل شماره ۳- سیستم سازه و کوره و بارگذاری نمونه

برای اندازه گیری تغییر مکان خمشی، با عنایت به محدودیت طول نمونه و تغییر مکان کم آن، از یک سیستم قاب و نگهدارنده که شامل الزامات استاندارد ASTM-C1609 باشد، مطابق شکل ۴ ساخته و استفاده شد. برای جلوگیری از نفوذ گرمای احتمالی به (LVDT) ها از نوارهای ابریشمی نسوز استفاده شد. همچنین برای اندازه گیری نیرو از لودسل ۳ تن و ۱۰ تن با دقت ۰/۱ کیلوگرم استفاده گردیده است.



شکل ۴ - سیستم قاب و نگهدارنده و تغییر مکان سنج ها (LVDT) در شرایط شعله مستقیم

جدول ۳- سناریوهای بارگذاری و آزمایش برای نمونه های مختلف

نام نمونه ها	وزن نمونه با سطح اشباع خشک (gr)	الیاف ماکرو (kg/m ³)	الیاف میکرو (kg/m ³)	مقاومت فشاری (Mpa)		مقاومت خمشی (MPa)
				نمونه بدون الیاف PLC	نمونه با الیاف FRC	
PCL100N	۲۵۹۷۵	.	.	۳۴/۸۴	۳۴/۸۴	۳/۷۵
PCL۷۰F	۲۶۲۷۰	.	.			۲/۶۳
PCL۴۰F	۲۶۱۴۶	.	.			۱/۵۱
PCL100PF	۲۵۹۹۰	.	.			۰/۹۴
FRCAL100N	۲۵۳۹۸	۸	۲	۳۲/۰۴	۳۱/۷۸	۵/۱۹
FRCAL۷۰F	۲۵۶۲۲	۸	۲			۳/۶۸
FRCAL۴۰F	۲۵۴۶۱	۸	۲			۲/۱۱
FRCAL100PF	۲۵۴۰۷	۸	۲			۱/۴۰
FRC۱۲L100N	۲۴۹۶۵	۱۲	۳	۳۳/۱۱	۲۹/۳۸	۵/۵۳
FRC۱۲L۷۰F	۲۳۹۱۰	۱۲	۳			۳/۹۴
FRC۱۲L۴۰F	۲۳۳۵۰	۱۲	۳			۲/۲۵
FRC۱۲L100PF	۲۳۴۵۴	۱۲	۳			۱/۸۸

۳- ارائه و تحلیل نتایج آزمایش

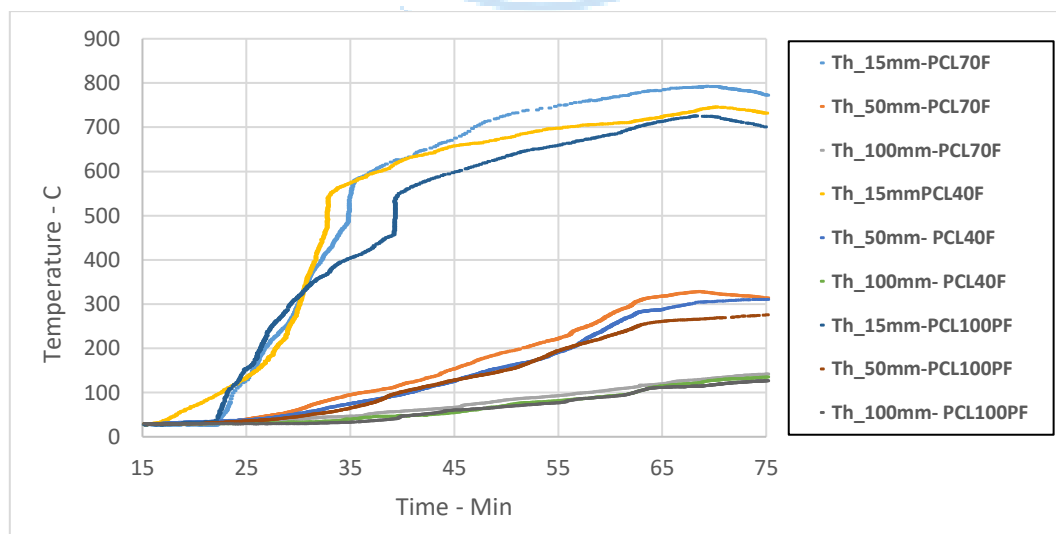
در این بخش مشاهدات و داده های بدست آمده در طول آزمایش ها برای تفسیر مقایسه ای پاسخ نمونه های ساخته شده ارائه و مورد بررسی قرار گرفته است. عملکرد نمونه، مقاومت در برابر آتش، نحوه کنده شدن بتن و مدت زمان های دوام و مکانیزم شکست نیز

براساس اطلاعات ثبت شده ارزیابی گردیده است. با توجه به نتایج مقاومت فشاری، اضافه نمودن الیاف باعث کاهش جزئی در مقاومت فشاری شده است (جدول ۳). برای ۸ کیلوگرم الیاف یک درصد کاهش و برای ۱۲ کیلوگرم الیاف ۱۱ درصد کاهش ثبت شده است که نشان می دهد استفاده از الیاف بیش از حد معینی منجر به اثرات منفی در مقاومت فشاری می شود.

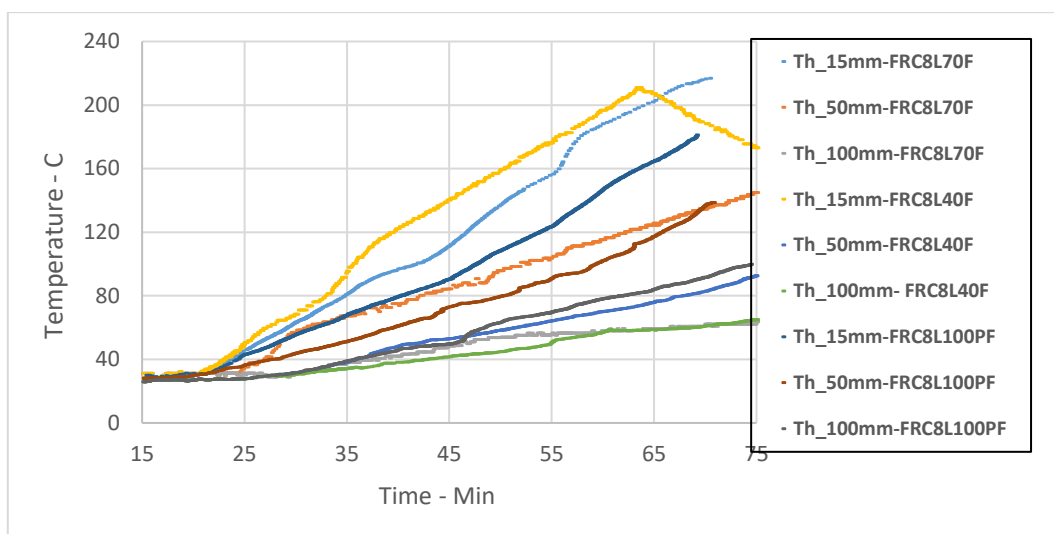
۳-۱- رفتار حرارتی

یکی از پارامترهای مهم تحلیل و طراحی در برابر آتش، محاسبه دمای داخل سازه است که مطابق استاندارد BS-EN-1991-1-2 (2002) انجام شده است [۲۲]. در بتن، محاسبه توزیع دما به علت تاثیرپذیری از پارامترهای مختلف، به سادگی قابل انجام نمی باشد. به همین ترتیب محاسبه توزیع دما در بتن های الیافی پیچیده تر خواهد بود. دمای اندازه گیری شده در محل های مختلف (عمق ۱۵ و ۵۰ و ۱۰۰ میلیمتر) در نمونه های مورد آزمایش (شکل ۲) به عنوان تابعی از زمان قرار گرفتن در معرض آتش نشان داده شده است. نمونه ها تا ۴۵ دقیقه در معرض آتش یکسان قرار گرفتند، بنابراین افزایش دمای نمونه ها را می توان با هم مقایسه نمود. دما در نمونه ها با زمان در معرض آتش قرار گرفتن افزایش می یابد. دمای اندازه گیری شده به یک مقدار اوج رسیده و سپس طبق سناریوی هدفمند گرمایش-سرمایش (خاموش کردن کوره) اعمال شده روی نمونه ها، شروع به کاهش می کند. دمای اندازه گیری شده در نمونه های PCL40F و PCL100PF در عمق ۱۵ میلیمتری (شکل ۵) به علت کنده شدن شدید (اسپالینگ) نمونه و در معرض آتش مستقیم قرار گرفتن ترموکوپل افزایش شدیدی را نشان داده است. تفاوت در افزایش دما در نمونه های بدون الیاف را می توان به میزان کنده شدن نسبت داد، به عبارت دیگر شدت کنده شدن در افزایش دما تاثیر به سزایی داشته که این موضوع عمدتاً به سطوح بارگذاری مربوط است. دمای بتن در نمونه ها در لایه های دورتر از سطح زیرین در معرض آتش کمتر از لایه های نزدیک به سطح در معرض آتش است. این موضوع را می توان به هدایت حرارتی کم و گرمای ویژه بالای بتن نسبت داد که انتقال دما به لایه های داخلی بتن را به تاخیر می اندازد. مطابق نمودار رسم شده در شکل ۵، دما در عمق ۱۰۰ میلیمتری بعد از خاموش کردن کوره (فاز سرد شدن) به علت وجود گرادیان دما و گذر حرارت به مناطق مرطوب (بالاتر) به صورت صعودی ادامه یافته و با گذشت زمان نزولی شده است. در عمق ۱۵ میلیمتری به علت نزدیک بودن با منبع دما، تقریباً بلافاصله بعد از خاموش شدن کوره، دما شروع به کاهش می کند. (شکل ۶)

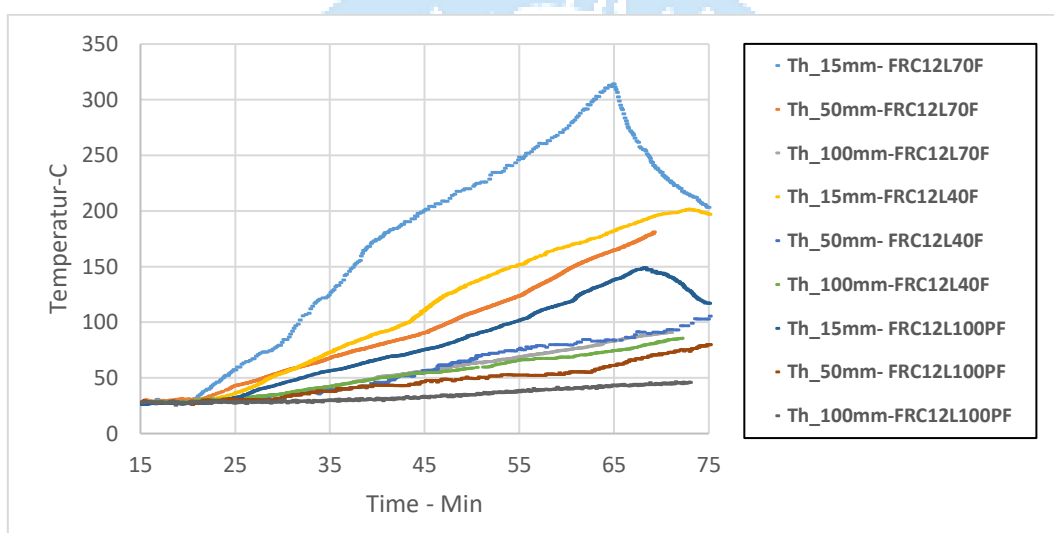
دمای نمونه های الیافی FRC8 , FRC12 در عمق ۱۵ میلیمتری به علت عدم کنده شدن شدید، افزایش زیادی را در مقایسه با نمونه های بدون الیاف تجربه نکردند. ولی فقط نمونه FRC12L70 در عمق ۱۵ میلیمتری به علت کنده شدن دمای بیشتری را تجربه کرد. (شکل ۷)



شکل ۵ - دمای نمونه های بتن بدون الیاف PLC در اعماق مختلف ترموکوپل و تحت بارگذاری های مختلف



شکل ۶ - دمای نمونه های با الیاف FRC8 در اعماق مختلف ترموکوپل و تحت بارگذاری های مختلف



شکل ۷ - دمای نمونه های با الیاف FRC12 در اعماق مختلف ترموکوپل و تحت بارگذاری های مختلف

بررسی و تجزیه و تحلیل داده‌های دمای اندازه‌گیری شده از آزمایش‌ها نشان می‌دهد که سطح بار، سناریوی قرار گرفتن در معرض آتش و حضور الیاف پلی پروپیلن ماکرو و میکرو در نمونه‌ها تأثیر عمده‌ای بر پیشرفت دما در تیرهای با بتن الیافی دارد. تأثیر این عوامل بر پاسخ حرارتی را می‌توان به پیشرفت ترک خوردگی و کنده شدن نمونه‌ها نسبت داد. روند افزایش دما در نمونه‌های بدون الیاف PCL تفاوت زیادی با نمونه‌های با الیاف FRC دارد، این موضوع البته بستگی زیادی به موضوع کنده شدن لایه‌های بتن دارد، به طوری که با کنده شدن شدید در نمونه‌های PCL شاهد افزایش دمای لایه‌های عمیق‌تر بوده و روند افزایش دما شدیدتر می‌باشد. این روند مورد انتظار است، زیرا وجود الیاف پلی پروپیلن در نمونه‌های FRC به کاهش کنده شدن کمک می‌کند و بنابراین از دست دادن سطح مقطع در هنگام قرار گرفتن در معرض آتش را به حداقل می‌رساند و در نتیجه افزایش دما در لایه‌های داخلی را کاهش می‌دهد.

۳-۲- بررسی رفتار خمشی تیرهای بتنی

برای بررسی رفتار خمشی تیرها، میزان انحراف میانه دهانه همه نمونه ها در سطوح بارگذاری ۷۰ و ۴۰ درصد ظرفیت نهایی نمونه شاهد مربوطه اندازه گیری شد. پاسخ انحراف بار در نمونه ها با آزمایش خمش و به کمک LVDT اندازه گیری شد. پاسخ میزان انحراف در اثر بار برای همه نمونه های ساخته شده تا مرحله شکست در شکل های ۸، ۹ و ۱۰ رسم شده است.

در حالت عادی و بدون قرار گرفتن نمونه در معرض آتش، میزان بار حداکثر قابل تحمل توسط سازه با افزایش الیاف افزایش یافته است به طوری که نسبت به بتن ساده، حداکثر ظرفیت باربری با ۸ کیلوگرم الیاف ماکرو ۴۶ درصد و با ۱۲ کیلوگرم الیاف ماکرو ۶۲ درصد بیشتر شده است. با اعمال ۴۰ درصد بار حداکثر و قراردادن نمونه ها در معرض شعله مستقیم، این افزایش ها به ترتیب ۳۳ و ۴۲ درصد بدست آمده است. با اعمال ۷۰ درصد بار حداکثر و قراردادن نمونه ها در معرض شعله مستقیم، این افزایش ها به ترتیب به اعداد ۴۲ و ۵۳ درصد رسیده است. این نتایج نشان می دهد که در تراز بارگذاری بالاتر، تاثیر الیاف در ظرفیت باربری در سناریوی آتش سوزی قابل ملاحظه تر می باشد. در شرایط پس از سرد شدن تاثیر الیاف باعث ۵۷ و ۸۶ درصد افزایش ظرفیت باربری می شود. بنابراین بیشترین تاثیر الیاف به حالت پس از سرد شدن اختصاص می یابد.

توجه شود که براساس نتایج بدست آمده از آزمایش ها، ظرفیت باربری در شرایط پس از سرد شدن کمترین میزان را دارا بوده و لذا حالت بحرانی محسوب می گردد. کاهش ظرفیت باربری پس از سرد شدن نسبت به حالت عادی برای نمونه های بدون الیاف و با ۸ و ۱۲ کیلوگرم الیاف ماکرو، به ترتیب ۷۳، ۷۱ و ۶۹ درصد بوده است که نشان دهنده تاثیر متوسط ۷۰ درصدی در کاهش ظرفیت باربری پس از سرد شدن در مقطع تیر بتنی دارد.

میزان تغییر شکل تسلیم سازه در حالت عادی و بدون قرار گرفتن نمونه در معرض آتش، نیز با افزایش الیاف افزایش یافته است به طوری که نسبت به بتن ساده، حداکثر تغییر شکل تسلیم با ۸ کیلوگرم الیاف ماکرو ۳/۸ برابر و با ۱۲ کیلوگرم الیاف ماکرو ۶/۵ برابر بیشتر شده است. با اعمال ۴۰ درصد بار حداکثر و قراردادن نمونه ها در معرض شعله مستقیم، این افزایش به ترتیب ۴/۷ و ۵/۳ برابر بدست آمده است که نشان می دهد، در این تراز بارگذاری، افزایش مصرف الیاف تاثیر کمتری در افزایش تغییر شکل نقطه تسلیم داشته است. با اعمال ۷۰ درصد بار حداکثر و قراردادن نمونه در معرض شعله مستقیم، این افزایش به ترتیب به اعداد ۱۸ و ۵ درصد رسیده است که نتیجه قبلی در مورد تراز بارگذاری کمتر را برای افزایش میزان الیاف تأیید می نماید و نشان می دهد که الیاف بیشتر تاثیری در افزایش کرنش تسلیم نگذاشته اند. در شرایط پس از سرد شدن تاثیر الیاف باعث ۲ و ۴ برابر شدن تغییر شکل در لحظه تسلیم شده است.

حداکثر تغییر شکل غیرخطی سازه در شروع گسیختگی در حالت عادی و بدون قرار گرفتن نمونه در معرض آتش، میزان آن نیز با افزایش الیاف افزایش یافته است به طوری که نسبت به بتن ساده، حداکثر تغییر شکل تسلیم با ۸ کیلوگرم الیاف ماکرو ۲۳/۸۹ برابر و با ۱۲ کیلوگرم الیاف ماکرو ۵/۶ برابر بیشتر شده است. با اعمال ۴۰ درصد بار حداکثر و قراردادن نمونه ها در معرض شعله مستقیم، این افزایش ها به ترتیب ۱/۳ و ۹/۰ برابر بدست آمده است که نشان می دهد در این تراز بارگذاری، افزایش مصرف الیاف به ۱۲ کیلوگرم، تاثیر زیادی در افزایش حداکثر تغییر شکل غیرخطی سازه در شروع گسیختگی داشته است. با اعمال ۷۰ درصد بار حداکثر و قراردادن نمونه ها در معرض شعله مستقیم، این افزایش ها به ترتیب به اعداد ۷ و ۸۸۰ درصد رسیده است که نتیجه قبلی در مورد تراز بارگذاری کمتر را برای افزایش میزان الیاف تأیید می نماید و نشان می دهد که مصرف الیاف تا حدی بیشتر در این جا تاثیر بهتری نگذاشته اند ولی پس از افزایش صرف آن به ۱۲ کیلوگرم در مترمکعب، افزایش بسیار چشمگیر بوده است. در شرایط پس از سرد شدن تاثیر الیاف باعث ۲/۲ و ۵/۷ برابر شدن تغییر شکل شده است. این نتایج تطابق خوبی با نتایج آزمایش تیر بتنی انجام شده توسط بانرجی داشته است [۱۴].

توجه شود که براساس نتایج بدست آمده از آزمایش ها، حداکثر تغییر شکل غیرخطی سازه در شرایط پس از سرد شدن بیشترین میزان را دارا بوده و نشان گر رفتار شکل پذیرتر در این مرحله می باشد. افزایش تغییر شکل تسلیم پس از سرد شدن نسبت به حالت عادی برای نمونه های بدون الیاف و با ۸ و ۱۲ کیلوگرم الیاف ماکرو، به ترتیب ۳، ۲ و ۱/۸ برابر بوده است. بنابراین درصد افزایش حداکثر تغییر شکل غیرخطی سازه با افزایش میزان الیاف نسبت مخالف از خود نشان داده است.

جدول ۴- تغییر شکل تسلیم و گسیختگی و بار حداکثر متناظر نمونه های با ۱۲ کیلوگرم بر مترمکعب الیاف ماکرو در سناریوهای مختلف

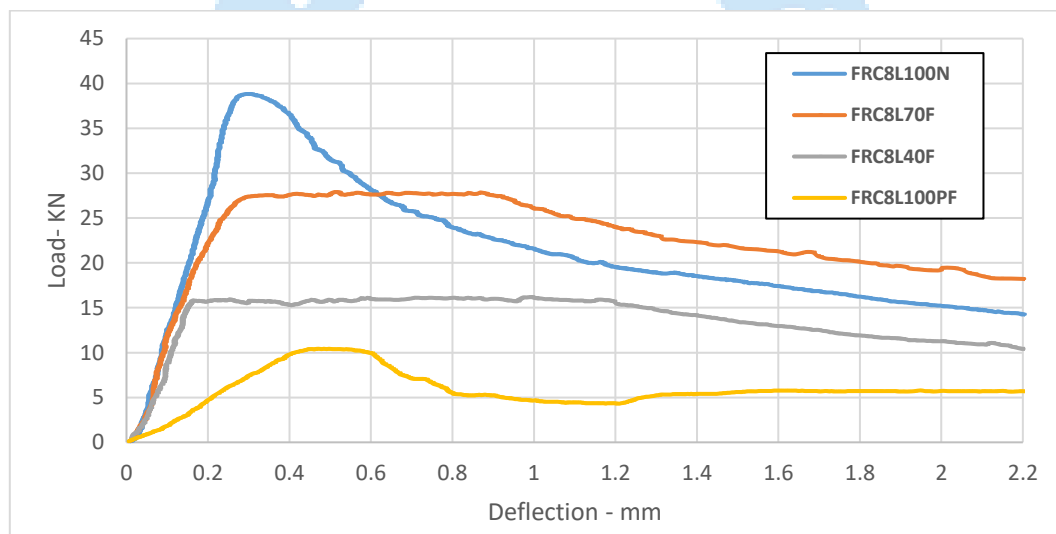
عنوان / نام نمونه	FRC12-100N	FRC12-40F	FRC12-70F	FRC12-100PF
بار حداکثر (کیلو نیوتن)	۴۲	۱۷	۲۹	۱۳
تغییر شکل تسلیم (میلی متر)	۰/۳۹	۰/۱۶	۰/۲۳	۰/۷۹
تغییر شکل گسیختگی (میلی متر)	۰/۵۶	۹/۴۴	۸/۴۵	۱/۶۰

جدول ۵- تغییر شکل تسلیم و گسیختگی و بار حداکثر متناظر نمونه های با ۸ کیلوگرم بر مترمکعب الیاف ماکرو در سناریوهای مختلف

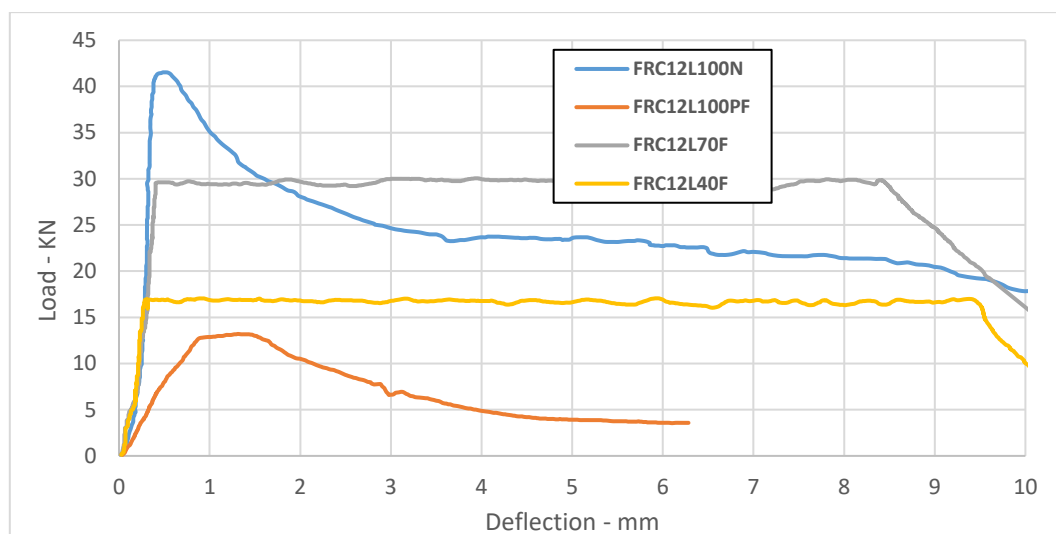
عنوان / نام نمونه	FRC8-100N	FRC8-40F	FRC8-70F	FRC8-100PF
بار حداکثر (کیلو نیوتن)	۳۸	۱۶	۲۷	۱۱
تغییر شکل تسلیم (میلی متر)	۰/۲۳	۰/۱۴	۰/۲۶	۰/۴۱
تغییر شکل گسیختگی (میلی متر)	۰/۲۹	۱/۳۱	۰/۹۲	۰/۶۲

جدول ۶- تغییر شکل تسلیم و گسیختگی و بار حداکثر متناظر نمونه های بدون الیاف ماکرو در سناریوهای مختلف

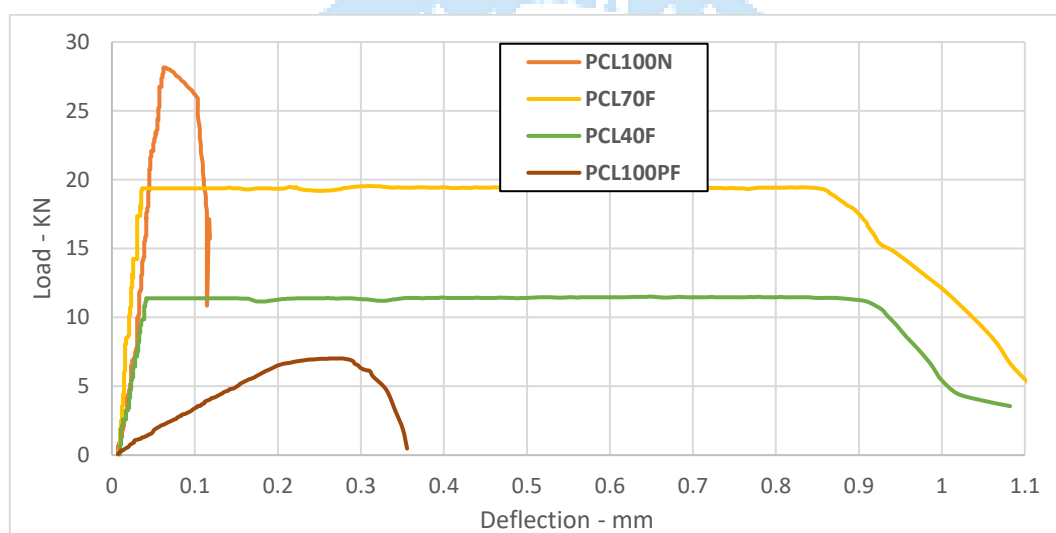
عنوان / نام نمونه	100N-PCL	40F-PCL	70F-PCL	100PF-PCL
بار حداکثر (کیلو نیوتن)	۲۶	۱۲	۱۹	۷
تغییر شکل تسلیم (میلی متر)	۰/۰۶	۰/۰۳	۰/۲۲	۰/۲۰
تغییر شکل گسیختگی (میلی متر)	۰/۱۰	۰/۹۳	۰/۸۶	۰/۲۸



شکل ۸- نمودار پاسخ خمشی نمونه های (FRC8) با الیاف تحت آتش مستقیم و بار همزمان ۴۰ و ۷۰ درصد



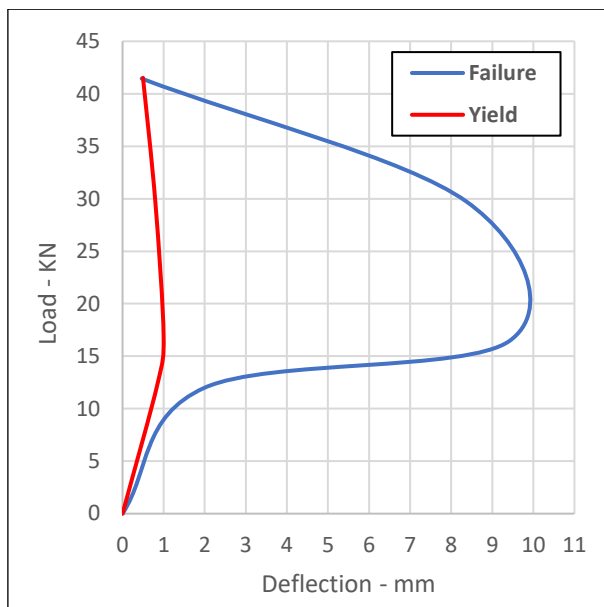
شکل ۹ - نمودار پاسخ خمشی نمونه های (FRC12) با الیاف تحت آتش مستقیم و بار همزمان ۴۰ و ۷۰ درصد



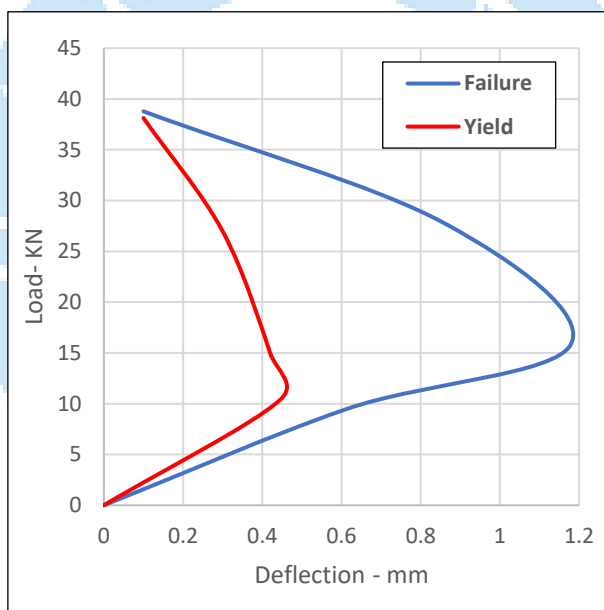
شکل ۱۰ - نمودار پاسخ خمشی نمونه های بدون الیاف (PCL) تحت آتش مستقیم و بار همزمان ۴۰ و ۷۰ درصد

۳-۲- استخراج منحنی ظرفیت غیرخطی خمشی

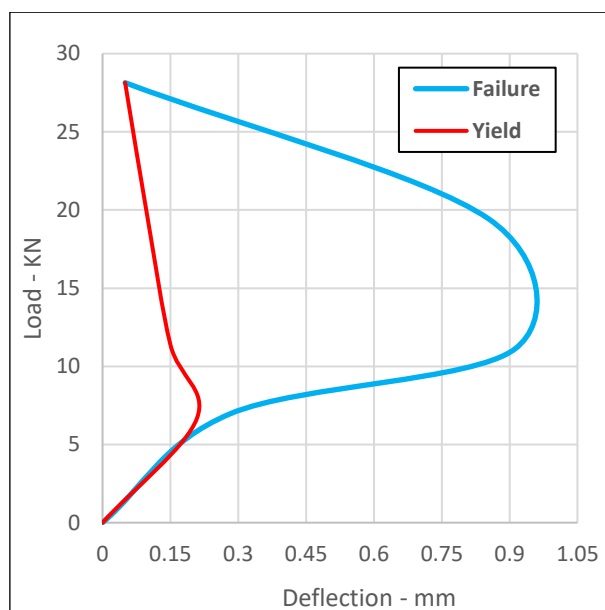
با استفاده از نتایج آزمایشات بدست آمده از نمونه های مختلف و در سناریوهای بارگذاری متفاوت، منحنی های ظرفیت بار - تغییرمکان برای نمونه های الیافی با ۸ و ۱۲ کیلوگرم الیاف ماکرو و نمونه بتن ساده در شکل های ۱۱ تا ۱۳ ترسیم شده است. نقاط ترسیم کننده این منحنی ها حد نهایی شکست و افت نیروی قابل تحمل نمونه ها هستند و حالت حدی نهایی آن ها محسوب می شوند. با استفاده از این منحنی ها و توسعه آن می توان ظرفیت باربری نهایی مقاطع بتن الیافی را به صورت واقعی تحت بارگذاری آتش سوزی مستقیم محاسبه کرد و برای کنترل مقاطع موجود و طراحی مقاطع جدید از آن استفاده نمود. با توجه به این که این منحنی ها براساس نیرو و تغییرشکل هستند و کل فرآیند گرم شدن و سرد شدن را دربرمی گیرند، می توان برای پایش ایمنی مقاطع بتنی قرارگرفته در معرض آتش که اطفای حریق شده اند نیز از آن ها استفاده نمود.



شکل ۱۱ - منحنی های حداکثر ظرفیت تسلیم و شکست نمونه های بتن الیافی (FRC12)



شکل ۱۲ - منحنی های حداکثر ظرفیت تسلیم و شکست نمونه های بتن الیافی (8FRC)

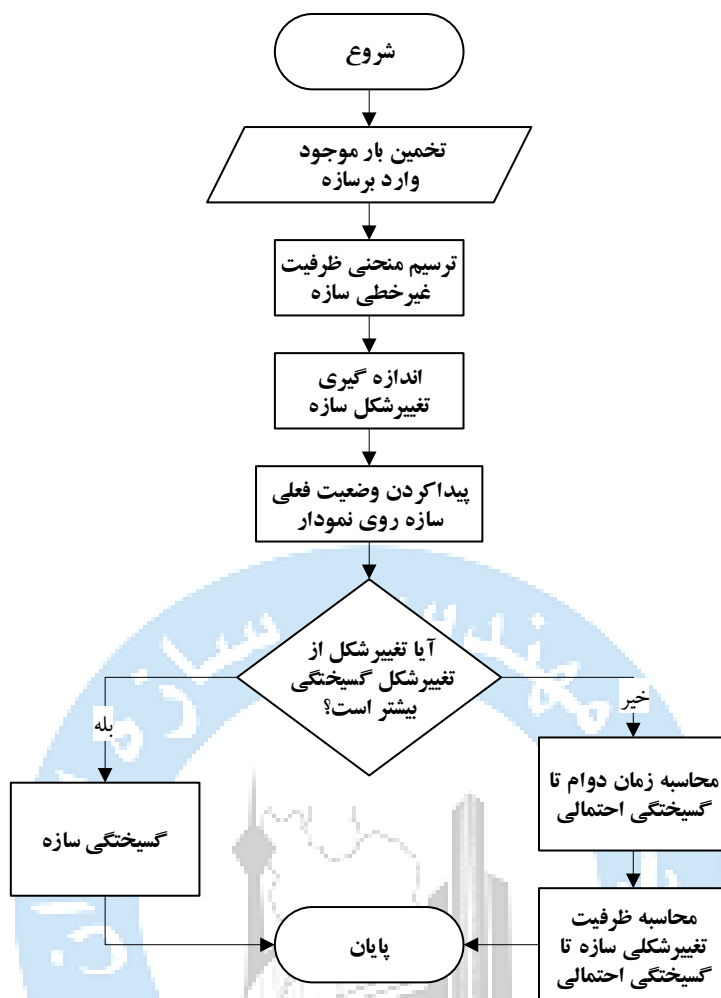


شکل ۱۳ - منحنی های حداکثر ظرفیت تسلیم و شکست نمونه های بتن معمولی (PLC)

۳-۳- ارزیابی تیر بتنی به روش منحنی ظرفیت تحت شعله مستقیم

با استفاده از منحنی های بدست آمده از آزمایش تیر تحت شعله مستقیم که برای سطح تسلیم و حالت حدی نهایی شکست ترسیم شده است، می‌توان با الگوریتم زیر ارزیابی سازه های بتنی موجود در برابر آتش سوزی را انجام داده و علاوه بر تخمین ظرفیت باربری باقیمانده نسبت به پیش بینی زمان دوام سازه اقدام کرد. جزئیات این الگوریتم پیشنهادی به صورت زیر می باشد:

- تخمین سطح بار وارده به سازه براساس شرایط عادی بهره برداری آن
- ترسیم منحنی ظرفیت سازه با فرض قسمت پلاستیک خطی و مشخص نمودن نقطه باربری نهایی
- اندازه گیری تغییر شکل نسبی سازه پس از آتش سوزی.
- رسم وضعیت تغییر شکلی در نمودار بدست آمده قبلی و پیدا کردن شرایط فعلی سازه.
- پیش بینی گسیختگی یا پایداری سازه در شرایط ارزیابی شده. در این حالت اگر میزان تغییر شکل سازه بیشتر از تغییر مکان نقطه تسلیم روی منحنی باشد، ممکن است سازه در فرآیند سرد شدن دچار گسیختگی شود.
- پیش بینی مدت دوام سازه تا زمان گسیختگی احتمالی براساس مدل ارائه شده.



شکل ۱۴ - الگوریتم ارزیابی تیرهای بتنی موجود در برابر آتش سوزی مستقیم

با استفاده از این الگوریتم و بدست آوردن منحنی های ظرفیت تیرهای بتنی یا سازه های خمشی مشابه مانند دال های یکطرفه، می توان با رسم منحنی های تقاضا براساس تحلیل های سازه ای نسبت به کنترل دوام و ظرفیت سازه در برابر آتش سوزی مستقیم به روش طیف ظرفیت نیز اقدام نمود.

۴- جمع بندی و پیشنهادات

در این مطالعه ۱۲ سری نمونه تیرهای بتنی با ترکیبات مختلف الیاف مصنوعی بلند و کوتاه مورد بررسی آزمایشگاهی تحت بارگذاری و شعله مستقیم همزمان مورد بررسی قرار گرفت. براساس نتایج آزمایشات انجام شده، عمده گسیختگی تیرهای بتنی ساده و الیافی در زمان سرد شدن آن ها رخ داده است که نشان می دهد فرآیند کامل بارگذاری حرارتی شعله مستقیم و سرد شدن پس از آن باید به صورت یکپارچه در بررسی رفتار غیرخطی این سازه ها در نظر گرفته شود. نتایج نشان داد که شرایط خرابی و سرد شدن نمونه ها در فرآیند گرم شدن و سرد شدن سازه با نمونه های تحت آزمایش کوره و بارگذاری نمونه سرد شده تفاوت محسوسی دارد. البته در آزمایشات کوره امکان بررسی تاریخچه رفتار نمونه تحت بارگذاری در طول فرآیند گرم شدن و سرد شدن وجود ندارد. حداکثر ظرفیت باربری نمونه ها در آزمایش شعله مستقیم برای نمونه های با ۱۲ و ۸ کیلوگرم الیاف و بدون الیاف نسبت به آزمایش با کوره به ترتیب ۳۱، ۴۵ و ۷۰ درصد افزایش نشان داده است. این موضوع در مورد شکل پذیری هم صادق بوده است و نشان می دهد که آزمایش بارگذاری نمونه های سرد شده حرارت دیده در کوره دقت مناسبی ندارد و ظرفیت ها را دست پایین نشان می دهد.

نتایج اندازه‌گیری تغییرشکل غیرخطی نشان داد که استفاده از الیاف در مقادیر تا ۱۲ کیلوگرم بر متر مکعب باعث افزایش نزدیک به ۱۰ برابری ظرفیت تغییرشکل قبل از گسیختگی شده است. این موضوع نشان می‌دهد که تسلیح با الیاف دارای توزیع تصادفی در مخلوط بتن شکل‌پذیری قابل توجهی در رفتار خمشی ایجاد می‌نماید.

با استفاده از منحنی‌های بدست آمده از آزمایش تیر تحت شعله مستقیم که برای سطح تسلیم و حالت حدی نهایی شکست تهیه شده است، الگوریتم ارزیابی تیرهای بتنی موجود در برابر آتش سوزی ارائه گردید که با استفاده از آن علاوه بر تخمین ظرفیت باربری باقیمانده می‌توان نسبت به پیش‌بینی زمان دوام سازه اقدام نمود. بدیهی است که انجام آزمایش‌های بیشتر با سناریوهای مختلف و طرح‌های اختلاط متفاوت می‌تواند منحنی‌های ظرفیت دقیق‌تر و جامع‌تری را بدست بدهد. نتایج این تحقیق پیشنهادی در جهت تدوین این منحنی‌ها و انجام طراحی و کنترل سازه‌ها به صورت واقعی‌تر و دقیق‌تر تحت سناریوهای آتش سوزی مستقیم در اعضای بتنی می‌باشد.

سپاسگزاری

این پژوهش در آزمایشگاه تخصصی سازه و زلزله دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست دانشگاه شهید بهشتی انجام شده که بدینوسیله از حمایت‌های دانشگاه در این پروژه قدردانی می‌گردد.

مراجع

- [1] I. Hager (2013) Behavior of cement concrete at high temperature, *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*, vol.61, no. 1, pp. 145–154.
- [2] Ahmed GN, Hurst JP. (1997) An analytical approach for investigating the causes of spalling of high-strength concrete at elevated temperatures. In: *Proceedings of the international workshop on fire performance of high-strength concrete*, NIST special publication 919, p. 95–108.
- [3] SC.D. Eamon, E. Jensen (2013) Reliability analysis of reinforced concrete columns exposed to fire, *Fire Saf. J.* 62, 221–229
- [4] Won Jong-Pil, Choi Sek-Won, Lee Sang-Woo, Jang Chang-Il, Lee Su-Jin. (2010) Mix proportion and properties of fire-resistant wet-mixed high-strength polypropylene fiber-reinforced sprayed polymer cement composites. *Compos Struct*, 92:2166–72.
- [5] Won Jong-Pil, Choi Seok-Won, Park Chan-Gi, Jang Chang-Il. (2007) High strength polymer-modified repair cementitious composite for fire protection. *Polymer Compos*, 15(5):379–88.
- [6] Hertz D. (2003) Limits of spalling of fire-exposed concrete. *Fire Saf. J.*, 38:103–16.
- [7] Kalifa P, Menneteau FD, Quenard D. (2000) Spalling and pore pressure in HPC at high temperatures. *Cem Concr Res*, 30:1–13.
- [8] Khoury GA. (2000) Effect of fire on concrete and concrete structures. *Prog Struct Mat Eng*, 2:429–47
- [9] Soulioti, D. V., Barkoula, N. M., Paipetis, A., & Matikas, T. E. (2011) Effects of Fiber Geometry and Volume Fraction on the Flexural Behaviour of Steel-Fiber Reinforced Concrete. *Strain*, 47(s1), 535-541. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1475-1305.2009.00652.x>.
- [10] C. Kahanji F. Ali A. Nadjai (2016) Explosive spalling of ultra-high-performance fiber reinforced concrete beams under fire, *Journal of Structural Fire Engineering*, Vol. 7 Issue 4 pp. 328 - 348,
- [11] Serrano, Ruben. Cobo, Alfonso. Prieto, Maria Isabel. Gonzalez, Maria de las Nieves. (2016) Analysis of fire resistance of concrete with polypropylene or steel fibers, *Construction and Building Materials*. Volume 122, pages 302-309.
- [12] Yermak, N. Pliya, P. Beaucour, A-L. Simon, A. Noumowe, A. (2017) Influence of steel and/or polypropylene fibers on the behavior of concrete at high temperature: Spalling, transfer and mechanical properties”, *Construction and Building Materials*, Volume 132, pages 240-250.

- [13] Reza Abaeian, Hamid Pesaran Behbahani, Shahram Jalali Moslem (2018) Effects of high temperatures on mechanical behavior of high strength concrete reinforced with high performance synthetic macro polypropylene (HPP) fibers 165 631–638
- [14] Srishti Banerji, Venkatesh Kodur, Roya Solhmirzaei (2020) Experimental behavior of ultra-high-performance fiber reinforced concrete beams under fire conditions, *Engineering Structures* 208 110316
- [15] Kodur VKR, Bilodeau A, Hoff GC. (2004) Optimization of the type and amount of polypropylene fibers for preventing the spalling of lightweight concrete subjected to hydrocarbon fire. *Cem Concr Compos*, 26(2):163–74
- [16] Gabriel AK. (2002) Passive fire protection in tunnel. *Concr Constr Ind*, 37(2):31–6.
- [17] International research institute of cooperation between industry and academia (2002) Exfoliation of the concrete tunnel of shinkansen and spalling of concrete structures, University of Tokyo, Tokyo, Japan.
- [18] ITA Working group No. 6. (2004) maintenance and repair, Guidelines for structural fire resistance for road tunnels.
- [19] ISIRI581 (2015) concrete-making curing concrete test specimens in the laboratory- code of practice, 2nd.revision.
- [20] International Organization for Standardization, ISO 834-1 (1999) Fire Resistance Test - Elements of Building Construction, Part 1: General Requirements, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [21] ASTM C1609 (2006) Structural Test method for flexural performance of fiber reinforced concrete (using beam with third point loading). American Society of Testing and Materials, p. 1–8.
- British Standards Institution (2002) Eurocode 1, Actions on Structures, General Actions: Actions on Structures Exposed to Fire, BSI, London.

