

Investigation of the mechanical properties of structural lightweight concrete and fiber reinforced concrete exposed to elevated temperatures

Khalil Arab Shahrab¹, Aboozar Mirzakhani^{2*}, Ehsan Kashi³, Nematollah Bakhshi⁴

1- Ph.D Candidate, Civil engineering department. Shahroud Branch, Islamic azad university, Shahroud, Iran.

2- Assistant Professor, Civil engineering department. Shahroud Branch, Islamic azad university, Shahroud, Iran.

3- Assistant Professor, Civil engineering department. Shahroud Branch, Islamic azad university, Shahroud, Iran.

4- PhD, Department of civil and environmental engineering (Concrete and Building Materials Laboratory), Amirkabir university of technology, Tehran. Iran.

ABSTRACT

Concrete is one of the most widely used materials in the current century. At high temperatures, due to high thermal stresses and low tensile strength, this material suffers from problems such as cracking, crumbling, or disintegration. In this research, concrete samples have been reinforced using steel and polypropylene fibers and subjected to different temperatures from 25 degrees to 800 °C, and compressive and tensile strength tests have been performed on the samples. In order to better examine the results, a concrete sample containing lightweight aggregate was also prepared and tested along with other samples. The test results showed that with the addition of steel and polypropylene fibers, the compressive strength up to the temperature of 200 °C is higher or similar to the control sample. Also, the tensile strength test results showed that samples containing steel fibers had the highest tensile strength at all temperatures. The results of the compressive and tensile strength test also displayed that at temperatures of 600 °C and above, the lightweight concrete sample has a higher or similar strength to the control sample. Polypropylene fibers start to melt at 400 °C, which has caused a drop in compressive and tensile strength in samples containing this type of fibers at temperatures above 400 °C.

ARTICLE INFO

Receive Date: 23 October 2023

Revise Date: 29 December 2023

Accept Date: 08 January 2024

Keywords:

Mechanical properties,
high temperatures,
light-weight concrete,
fiber reinforced concrete, steel
fibers,
Polypropylene fibers

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2024.421952.3248>

*Corresponding author: Aboozar Mirzakhani

Email address: Aboozar.mirzakhani@iau-shahrood.ac.ir

ارزیابی خواص مکانیکی پساحریق بتن سازه‌های سبک و الیافی

خلیل عرب شهراب^۱، ابودر میرزاخانی^{۲*}، احسان کاشی^۳، نعمت اله بخشی^۴

۱- دانشجوی دکترای گروه عمران، واحد شاهرود، دانشگاه آزاد اسلامی، شاهرود، ایران.

۲- استادیار گروه مهندسی عمران، واحد شاهرود، دانشگاه آزاد اسلامی، شاهرود، ایران.

۳- استادیار گروه مهندسی عمران، واحد شاهرود، دانشگاه آزاد اسلامی، شاهرود، ایران.

۴- دکتری مهندسی عمران، دانشکده عمران و محیط زیست (آزمایشگاه بتن و مصالح ساختمانی)، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

چکیده

بتن در حرارت‌های بالا به جهت تنش‌های حرارتی بالا و مقاومت کششی پایین آن دچار مشکلاتی از قبیل ترک‌خوردگی، قله‌کن شدن یا خرابی می‌شود. در این تحقیق، به روش آزمایشگاهی و با استفاده از الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن نمونه‌های بتنی تقویت شده است و تحت دماهای مختلف از ۲۵ درجه تا ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفته است و آزمون‌های مقاومت فشاری، کششی و خمشی برای تعیین مشخصات مکانیکی بر روی نمونه‌ها انجام شده است. همچنین جهت ارزیابی تاثیر الیاف بر رفتار بتن سبک، نمونه بدون الیاف بعنوان مرجع، آزمایش شد. جهت بررسی بهتر نتایج، یک نمونه بتن حاوی سبکدانه نیز تهیه و در کنار سایر نمونه‌ها مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که با اضافه شدن الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن، مقاومت فشاری تا دمای ۲۰۰ درجه بیش‌تر از نمونه شاهد یا مشابه آن است. همچنین نتایج مقاومت کششی نشان می‌دهد که نمونه‌های حاوی الیاف فولادی در تمامی سنین بیش‌ترین میزان مقاومت کششی را داشته است. نتایج مقاومت فشاری و کششی نمونه بتنی حاوی سبکدانه نیز نشان می‌دهد که در دماهای ۶۰۰ درجه به بالا، نمونه بتن سبک دارای مقاومت بالاتر و یا قابل مقایسه با نمونه شاهد است. الیاف پلی‌پروپیلن در دمای ۴۰۰ درجه شروع به ذوب شدن می‌کند که این باعث افت مقاومت فشاری و کششی در نمونه‌های حاوی این نوع الیاف در دمای بالاتر از ۴۰۰ درجه شده است. در مجموع در بین هر چهار نوع بتن، براساس نتایج آزمایشگاهی بدست آمده و با نگاهی به مسائل اجرایی و سازه‌ای می‌توان بتن الیافی حاوی الیاف فلزی را مناسب‌ترین گزینه جهت اجرای سازه‌هایی که خطر فرارگیری در معرض آتش و دماهای بالا در آنها وجود دارد، دانست.

کلمات کلیدی: بتن الیافی، الیاف فولادی، پلی‌پروپیلن، حرارت، بتن سبک

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://doi.org/10.22065/jsce.2024.421952.3248	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2024.421952.3248	۱۴۰۳/۰۶/۳۱	۱۴۰۲/۱۰/۱۸	۱۴۰۲/۱۰/۱۸	۱۴۰۲/۱۰/۰۸	۱۴۰۲/۰۸/۰۱
ابودر میرزاخانی					*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	
Aboozar.mirzakhani@iau-shahrood.ac.ir						

۱- مقدمه

بتن به دلیل دارا بودن مزیت‌هایی نسبت به مصالح ساختمانی دیگر، به عنوان پرمصرف‌ترین مصالح ساختمانی شناخته می‌شود و در اغلب کشورهای جهان نسبت مصرف بتن به فولاد از ده به یک نیز فراتر رفته است [۱].

از سوی دیگر همراه با گسترش شهرسازی و شهرنشینی با مشکلاتی به وجود خواهد آمد که احتمال خطر آتش سوزی را چه از نظر تعداد و چه از نظر ابعاد نسبت به گذشته بسیار افزایش خواهد داد. از بیشترین موارد آتش سوزی، آتش سوزی در ساختمان‌ها است و قسمت زیادی از این ساختمان‌ها دارای سازه‌های بتنی می‌باشند [۲]. بتن تا دمای حدود ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد عملکرد بسیار خوبی داشته و کاهش مقاومت بسیار ناچیزی را تجربه می‌کند. ساختمان‌های بتنی در دمای حدود ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد تقریباً تا یک ساعت می‌توانند مقاومت خود را در برابر آتش حفظ کنند. قدرت تخریب آتش ناشی از میزان انرژی حرارتی آزاد شده در هنگام آتش سوزی است. بخشی از این گرما در فضای آتش پخش می‌شود و مابقی در مواد ساختمانی و اعضاء جذب می‌شود. در نتیجه اعضای سازه‌ای استحکام مکانیکی خود را از دست می‌دهند و در یک دمای بحرانی تخریب می‌شوند و یا آسیب جدی به آن‌ها وارد می‌شود. میزان خسارت ناشی از آتش، ارتباط مستقیم با مدت و دمای ایجاد شده دارد [۳].

مقاومت بتن در برابر آتش، میزان توانایی بتن برای مقاومت و یا محافظت در برابر آتش است. این مقاومت شامل توانایی عضو بتنی برای ادامه انجام عملکرد سازه‌ای خاص خود هنگام آتش سوزی یا محدود کردن اثرات آتش و یا هر دو گزینه است. مدت زمانی را که یک عضو سازه‌ای مانند تیر، ستون، دیوار، کف یا سقف می‌تواند آتش را تحمل کند و در ASTM E119 [۵] نیز تعریف شده رتبه مقاومت آتش آن عضو نامیده می‌شود. در ویرایش ۲۰۰۰ آیین‌نامه بین‌المللی ساختمان (IBC-2000) [۶] نیز رتبه‌بندی آتش چنین تعریف شده است که رتبه بندی مقاومت در برابر آتش به معنای "مدت زمانی است که یک ساختمان یا جزء ساختمانی، توانایی مهار آتش خود را حفظ می‌کند، یا به انجام یک عملکرد سازه‌ای معین می‌پردازد و یا هر دو ویژگی را حفظ می‌کند. این آیین‌نامه روش‌های مختلفی را برای دستیابی به رتبه بندی مقاومت در برابر آتش، در دسترس قرار می‌دهد [۴]. اکثر فاکتورهای درجه بندی مقاومت در برابر آتش، بسته به نوع ساختمان و کاربری آن، توسط کدهای ساختمانی تعیین می‌شود.

عموماً بتن با دو ماده اصلی خمیر سیمان هیدراته و سنگدانه شناخته می‌شود. رفتار و ویژگی بتن به وسیله رفتار مواد سازنده آن و اثر اندرکنش آن‌ها مشخص می‌شود [۷]. سیمان هیدراته یک ماتریس ژله‌ای و یک سیستم با حفره‌های مویینه است که این حفره‌ها در بسیاری از مواقع با آب و یا بخار آب پر شده و با نیروهای واندروالسی نگه داشته شده‌اند. آب موجود در این حفرات مویینه، آب مستعد تبخیر شدن نامیده می‌شود. علاوه بر آب مستعد، آب غیرقابل تبخیر نیز وجود دارد که این آب، آبی است که چسبندگی شیمیایی در خمیر سیمان ایجاد می‌کند و زمانی که دما بالا رفته و حالت خمیری رو به کاهش رود، در دسترس قرار می‌گیرد. با بالا رفتن دما در اثر آتش-سوزی، حالت خمیری بتن کاهش می‌یابد و رفتار سازه‌ای بتن روند کاهشی به خود می‌گیرد. بدین ترتیب مقاومت بتن در سازه تحت تاثیر قرار گرفته و با استمرار این شرایط ممکن است سازه دچار گسیختگی شود. با افزایش دما و رسیدن آن به حدود ۱۰۰ درجه سانتیگراد در خمیر سیمان، در ابتدا از دست رفتن آب مستعد تبخیر در حفره‌های باریک، صورت می‌گیرد. به محض اینکه دما به بالاتر از ۱۰۰ درجه سانتیگراد برسد، نرخ تبخیر فراتر می‌رود، وقتی که دما به ۱۲۰ درجه سانتیگراد برسد، فقط آب غیرمستعد تبخیر شدن وجود خواهد داشت. با افزایش دما، تجزیه ماده ژله‌ای شروع خواهد شد که این مسئله باعث دی‌هیدراته شدن ژل سیلیکات کلسیم می‌شود. حداکثر نرخ دی-هیدراته شدن در دمای ۱۸۰ درجه سانتیگراد است و این روند تا دمای ۳۰۰ درجه سانتیگراد ادامه می‌یابد. در دمای بین ۴۵۰ تا ۵۵۰ درجه سانتیگراد یک تجزیه سریع در پرتلندیت رخ می‌دهد. آبی که در ابتدا وظیفه چسبندگی شیمیایی را داشته است و تبخیر نشده است، در این مرحله تبخیر می‌شود. در بتن با دانه‌های آهکی در دمای بین ۶۰۰ تا ۹۰۰ درجه سانتیگراد یک کاهش وزن رخ می‌دهد که به علت فرایند تجزیه کربنات کلسیم است. در دمای فراتر از ۹۰۰ درجه سانتیگراد کاهش وزن دیگری صورت نمی‌گیرد و در دمای ۱۱۵۰ تا ۱۲۰۰ درجه سانتیگراد بتن ذوب می‌شود، در برخی موارد نیز رسیدن به این دما باعث دوده‌ای شدن دانه‌ها می‌شود [۲].

یکی از پارامترهای مهم در تقویت سازه‌های بتنی و کنترل کیفی مصالح آن، میزان مقاومت بتن است. در واقع میزان مقاومت بتن می‌تواند بسیاری از ویژگی‌های بتن از جمله میزان نفوذ پذیری، آب بند بودن، مقاومت، بتن در برابر هوازگی و ... را نشان دهد. مقاومت‌های مختلفی برای تعیین تعریف می‌شود. براساس بار اعمال شده به بتن امکان ایجاد تنش‌های خمشی، کششی، برشی و پیچشی در سازه‌های بتنی وجود دارد بنابراین می‌توان مقاومت بتن را نیز به انواع مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مقاومت خمشی و مقاومت برشی تقسیم کرد. از بین مقاومت‌های تعریف شده برای بتن مقاومت فشاری، خمشی و کششی اهمیت بیشتری دارد و عمدتاً بیش از سایرین مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. مهم‌ترین ویژگی بتن را می‌توان مقاومت فشاری آن دانست. مقاومت فشاری بتن، به معنای توانایی بتن در برابر بارهای محوری فشاری بتن است. در دماهای بالای که در آتش‌سوزی تجربه می‌شود، سیمان هیدراته موجود در بتن به تدریج آب می‌شود و دوباره به صورت بخار و سیمان به بتن باز می‌گردد. این امر منجر به کاهش مقاومت و مدول الاستیسیته بتن می‌شود. علاوه بر آن خرابی‌های ایجاد شده در ساختار بتن که سبب ایجاد ریزترک‌ها و حفرات متعدد در ساختار بتن بوده، سبب کاهش مقاومت فشاری بتن می‌گردند.

نسبت مقاومت نمونه‌های بتنی پس از قرارگیری در معرض دماهای بالا به مقاومت اولیه آن‌ها در دمای اتاق می‌باشد که می‌توان از آن‌ها به عنوان مشخصه‌ای برای کمی‌سازی رفتار بتن پس از قرارگیری در معرض آتش یا دماهای بالا استفاده کرد. عواملی نظیر مقاومت بتن در دمای اتاق (مقاومت اولیه بتن قبل از قرارگیری در معرض دماهای بالا)، نرخ گرمادهی به نمونه‌های بتنی، مدت زمان قرارگیری در معرض آتش و شدت آتش، بر مقاومت بتن‌های قرار گرفته در معرض آتش اثرگذار هستند [۸]. مقاومت پس‌ساحریق بتن از پارامترهای اساسی طراحی ایمن سازه‌ها در برابر آتش می‌باشد. تاکنون محققین مختلفی به بررسی مقاومت بتن در دماهای بالا پرداخته‌اند. به‌طور کلی می‌توان گفت که مقاومت بتن با بالا رفتن دما کاهش می‌یابد. اگر چه تاکنون رفتارهای متفاوتی از بتن‌های مختلف در دماهای بالا مشاهده گردیده است که عمدتاً مربوط به مقاومت‌های اولیه مختلف، نوع سنگدانه‌های مصرفی، نسبت آب به سیمان و ... می‌باشد. عمدتاً کاهش مقاومت به دلیل تغییرات شیمیایی و فیزیکی در ترکیبات بتن بدلیل قرار گرفتن در معرض حرارت‌های بالا می‌باشد [۹-۱۳] که سبب به وجود آمدن ریزترک‌ها و نیز ایجاد تنش داخلی در بتن بدلیل انبساط حرارتی سنگدانه‌ها می‌باشد. علاوه بر این تغییرات در شرایط هیدروترمال از طریق از دست رفتن آب آزاد و آب جذب شده زمانی که دما افزایش می‌یابد سبب تضعیف ماتریس سیمانی و ناحیه انتقال بین خمیر سیمان و سنگدانه‌ها می‌شود. این پدیده اکثراً در دماهای کمتر از ۳۰۰ درجه سانتیگراد اتفاق افتاده که سبب افت اولیه مقاومت بتن می‌شود [۱۲، ۱۴-۱۶].

در دماهای ۴۰۰ تا ۶۰۰ درجه سانتیگراد عامل کاهش مقاومت فشاری بتن را می‌توان دی‌هیدراته شدن کلسیم هیدروکسید (CH) [۱۷] و از دست رفتن سختی بتن بعلت تجزیه ژل سیلیکات کلسیم دانست [۱۸]. در دامنه حرارتی ۶۰۰ تا ۸۰۰ درجه سانتیگراد، عدم تطابق حرارتی بین ماتریس سیمانی و سنگدانه‌ها، تخلخل ساختار بتن را افزایش داده که این عامل در کنار عدم مقاومت سنگدانه‌ها، بعلت تجزیه کلسیم کربنات منجر به کاهش بیشتر مقاومت بتن می‌گردد [۱۹-۲۱].

نکته قابل توجه این است که در برخی از تحقیقات افزایش مقاومت فشاری پس‌ساحریق در دماهای اولیه در رنج ۱۰۰ تا ۳۰۰ درجه سانتیگراد پس از افت مقاومت چشمگیر در بتن گزارش شده است. افزایش مقاومت فشاری رخ داده در دماهای ۱۰۰ [۲۲] (شکل ۱)، ۲۰۰، [۲۳، ۲۴]، ۲۵۰ [۲۵] و بازه ۲۰۰ الی ۳۰۰ درجه سانتیگراد [۱۰] گزارش شده است. سخت شدگی ناشی از خشک شدن خمیر سیمانی بدلیل هیدراسیون بیشتر سیمان و عمل‌آوری توسط بخار داخلی که عملاً شبیه به محیط اتوکلاو در این بازه حرارتی عمل می‌کند بعنوان عوامل اصلی افزایش مقاومت فشاری در دماهای مذکور معرفی شده است [۱، ۱۸، ۲۶-۳۰].

در مجموع می‌توان مقاومت پسماند بتن را در سه بازه حرارتی مختلف به شرح ذیل دسته‌بندی کرد:

- دمای اتاق تا ۳۵۰ درجه سانتیگراد: افزایش جزئی مقاومت و پایداری اولیه
- ۳۵۰ تا ۸۰۰ درجه سانتیگراد: ناحیه افت مقاومت
- دمای بیش از ۸۰۰ درجه سانتیگراد: از دست رفتن کل مقاومت فشاری بتن.

تاکنون محققین مختلف اثر اضافه کردن الیاف گوناگون را بر خواص مکانیکی بتن‌های در معرض دماهای بالا ارزیابی کرده‌اند. ایدان^۱ و همکاران [۳۱] دمای ۴۰۰ درجه سانتیگراد را بعنوان سطح بحرانی گرمادهی بتن در نظر گرفتند. در تحقیق آن‌ها مشاهده شد که در دماهای بالای ۴۰۰ درجه سانتیگراد، فاکتورهای پسا حریق عموماً بالاتر از بتن معمولی می‌باشند. بتن‌های الیافی با یک درصد الیاف فولادی عملکرد بهتری نسبت به نمونه‌های بتن معمولی در معرض حداکثر دمای کمتر از ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد از خود نشان دادند.

از مهم‌ترین مشخصه‌های بتن الیافی ذکر شده افت بسیار آهسته مقاومت در دماهای بالاتر نسبت به بتن شاهد گزارش شده است [۳۲]. مقایسه بین اثر افزودن الیاف فولادی و شیشه‌ای بر مقاومت فشاری بتن در معرض دماهای بالا توسط مقدم و همکاران [۳۳] انجام شد. آن‌ها مشاهده کردند که مقاومت فشاری بتن معمولی و حاوی الیاف فولادی و شیشه با افزایش دما تا ۱۰۰ درجه سانتیگراد تغییر خاصی بدلیل عدم انجام فعل و انفعالات شیمیایی نداشته‌اند. در دماهای بالای ۱۰۰ درجه سانتیگراد، بتن‌های حاوی ۰/۲۵ درصد حجمی الیاف فولادی و شیشه به ترتیب ۹ تا ۲۷ درصد و ۱ تا ۱۸ درصد مقاومت فشاری پسا حریق بیشتری در معرض دماهای تا ۸۰۰ درجه سانتیگراد داشتند. بهبود مقاومت پسا حریق را می‌توان مربوط به خاصیت چسبندگی الیاف با ژل سیمان و سنگدانه‌ها دانست. در این تحقیق به طور متوسط مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی الیاف فولادی ۱۲/۹۵ درصد بیشتر از بتن‌های حاوی الیاف شیشه گزارش گردیده است.

همچنین در مخلوط‌های بتنی حاوی الیاف پلی پروپیلن نیز بهبود نسبی خواص مکانیکی پسا حریق بتن در معرض دماهای بالا مشاهده گردیده است. مقاومت فشاری نسبی بتن‌های حاوی الیاف پلی پروپیلن نسبت به بتن‌های بدون الیاف بهتر گزارش شده است. همچنین اثر الیاف پلی پروپیلن در بهبود مقاومت فشاری نسبت به مقاومت کششی دو نیم شدن در دماهای بالای ۲۰۰ درجه سانتیگراد بهتر بوده است [۲۸]. ایدان و همکاران [۳۱] نیز با تحقیقات خود تایید کردند که بتن‌های الیافی پلی پروپیلن مقاومت‌های مکانیکی پسا حریق بیشتری نسبت به بتن‌های شاهد بدون الیاف دارند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که الیاف پلی پروپیلن اثر فیزیکی - شیمیایی تجزیه خمیر سیمان زمانی که در معرض دماهای بالای ۴۰۰ درجه سانتیگراد قرار می‌گیرد را تا حدودی خنثی می‌کند.

با توجه آنچه که در تحقیقات بررسی شده است، نتیجه‌گیری شده است که عدم مقایسه رفتار چند نوع بتن پر کاربرد در معرض دماهای بالا بود. لذا هدف این پژوهش مقایسه خواص مکانیکی ۴ نوع بتن معمولی (شاهد)، بتن الیافی حاوی الیاف پلی پروپیلن، بتن الیافی حاوی الیاف فولادی و بتن سبک پس از قرارگیری در معرض دماهای بالا (۱۰۰، ۲۰۰، ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ درجه سانتیگراد) می‌باشد. نمونه‌ها پس از قرارگیری در معرض دماهای مذکور آماده‌سازی شده و خواص مکانیکی آن‌ها در سه آزمایش مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مقاومت خمشی با یکدیگر مقایسه می‌گردد.

۲- روش انجام تحقیق

همان‌طور که در بررسی تحقیقات گذشته در بخش مقدمه مشاهده گردید، اضافه کردن حتی یک جز نظیر الیاف پلی پروپیلن یا یک ماده جایگزین سیمان می‌تواند تاثیر بسزایی بر خواص بتن داشته باشد. لذا مقایسه رفتار بتن‌های مختلف تحت شرایط یکسان و در معرض عوامل مخرب نظیر دماهای بالا می‌تواند کمک شایانی به انتخاب بهترین گزینه در هر شرایطی داشته باشد. آنچه که در تحقیقات بررسی شده مقدمه مشاهده گردید عدم مقایسه رفتار چند نوع بتن پر کاربرد در معرض دماهای بالا بود. لذا در این پژوهش ۴ نوع بتن معمولی (شاهد)، بتن الیافی حاوی الیاف پلی پروپیلن، بتن الیافی حاوی الیاف فولادی و بتن سبک انتخاب گردیده که در یک برنامه تحقیقاتی آزمایشگاهی که مشروح آن در ادامه مطرح می‌گردد، خواص و رفتار آن‌ها در معرض دماهای بالا با یکدیگر مقایسه گردد.

¹ Eidan

۲-۱- مصالح مصرفی

۲-۱-۱- سیمان

برای تهیه نمونه‌های بتنی در این تحقیق، از سیمان تیپ دو استفاده شده است. مشخصات سیمان مورد استفاده در این تحقیق در جدول شماره ۱ و اجزای تشکیل‌دهنده آن در جدول شماره ۲ آمده است.

جدول ۱- مشخصات سیمان مورد استفاده

مشخصات فیزیکی	درصد وزنی	ترکیب شیمیایی
وزن مخصوص (gr/cm^3)	۶۳/۹۸	CaO
ریزی بلین (cm^2/gr)	۲۱/۴۴	SiO ₂
ریزی آزمایش BET (cm^2/gr)	۴/۷۳	Al ₂ O ₃
عبوری از الک ۴۵ میکرون (درصد)	۴/۲۵	Fe ₂ O ₃
گیرش اولیه (دقیقه)	۲/۳۵	SO ₃
گیرش نهایی (دقیقه)	۱/۴۰	MgO
	۰/۲۳	Na ₂ O
	۰/۶۵	K ₂ O
	۰/۹۳	L.O.I

۲-۱-۲- سنگدانه

طرح اختلاط استفاده شده برای انجام آزمایشات این پروژه شامل بتن معمولی، بتن الیافی و بتن سبک بوده است، لذا از سه گروه مختلف سنگدانه به شرح ذیل در ساخت مخلوطها استفاده گردید:

الف) شن طبیعی: شن طبیعی در دو اندازه سنگدانه ۱۹ میلی‌متر (بادامی) و ۹/۵ میلی‌متر (نخودی) برای ساخت نمونه‌های بتن معمولی و بتن الیافی استفاده شده است. تمامی سنگدانه‌های طبیعی مصرفی این پروژه از معادن قرضه حومه تهران تهیه شده و به‌گونه‌ای دانه‌بندی شده‌اند تا منحنی آن‌ها در محدوده مجاز بر اساس استاندارد ASTM C33 [۳۴] قرار گیرد. مشخصات فیزیکی شن مورد استفاده در جدول شماره ۲ درج شده است.

ب) ماسه طبیعی: ماسه طبیعی با حداکثر اندازه سنگدانه ۴/۷۵ میلی‌متر برای ساخت نمونه‌های بتن معمولی، بتن الیافی و بتن سبک استفاده شده است. تمامی سنگدانه‌های طبیعی مصرفی این پروژه از معادن قرضه حومه تهران تهیه شده و به‌گونه‌ای دانه‌بندی شده-

اند تا منحنی آن‌ها در محدوده مجاز بر اساس استاندارد ASTM C33 [۳۴] قرار گیرد. مشخصات فیزیکی ماسه مورد استفاده در جدول شماره ۲ درج شده است.

جدول ۲- مشخصات فیزیکی شن و ماسه مصرفی با دانه‌بندی استاندارد.

سنگدانه	جذب آب اشباع با سطح خشک (%)	وزن مخصوص (kg/m ³)	درصد بکارگیری در مخلوط‌های معمولی و الیافی
ماسه	۳/۵	۲۵۲۰	۶۰
شن نخودی	۲/۱	۲۵۸۰	۱۵
شن بادامی	۱/۹	۲۵۸۰	۲۵

ج) سنگدانه سبک: سبکدانه‌ای که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است از جنس رس منبسط شده می‌باشد که در دو اندازه ریز و درشت به‌عنوان جایگزین سنگدانه طبیعی در بتن معمولی برای ساخت بتن سبک سازه‌ای استفاده شده است. براساس آزمایشات انجام شده مشخصات سبکدانه‌های ریز و درشت استفاده شده در این تحقیق در جدول ۳ گزارش شده است.

جدول ۳- مشخصات سبکدانه‌های ریز و درشت

آزمایش	سبکدانه ریز	سبکدانه درشت
حداکثر قطر سنگدانه (میلی‌متر)	۴/۷۵	۹/۵
چگالی (kg/m ³)	۱/۴۴	۱/۴۱
جذب آب (درصد)	۵/۳۸	۷/۱۰

۳-۱-۲- الیاف مورد استفاده

الف) الیاف فولادی: الیاف فولادی مصرفی دارای انتهای قلابدار می‌باشد (شکل شماره ۱). خواص فیزیکی و مکانیکی الیاف فولادی مصرفی در جدول شماره ۴ آورده شده است.



شکل ۱ - الیاف فولادی مصرفی

جدول ۴ - خواص فیزیکی و مکانیکی الیاف فولادی

طول (mm)	قطر (mm)	L/D	مقاومت کششی (N/mm ²)	دانسیته (kg/dm ³)
۳۶	۰/۸۰	۴۵	>۱۲۰۰	۷/۸۵

ب) الیاف پلی پروپیلن: شکل شماره ۲ الیاف پلی پروپیلن را نشان می‌دهد. الیاف پلی پروپیلن مصرفی به طول ۱۲ میلی‌متر بوده و دارای خواص فیزیکی و مکانیکی مطابق جدول شماره ۵ می‌باشند.



شکل ۲ - الیاف پلی پروپیلن مصرفی

جدول ۵ - خواص فیزیکی و مکانیکی الیاف پلی پروپیلن

مقطع	طول (mm)	مقاومت کششی (N/mm ²)	افزایش طول	چگالی (kg/dm ³)
دایره	۱۲	۴۰۰	٪۱۲	۰/۹۱

۲-۲- نسبت‌های اختلاط

همان‌طور که در قسمت‌های قبلی نیز ذکر شد، هدف این پروژه مقایسه عملکرد بتن‌های معمولی، الیافی حاوی الیاف فلزی و پروپیلن و بتن سبک در معرض دماهای بالا می‌باشد. به همین منظور طرح مخلوط‌های مورد استفاده به دو دسته کلی زیر تقسیم‌بندی می‌شوند:

الف) بتن معمولی و بتن الیافی: برای طراحی طرح مخلوط این دسته در ابتدا بتن معمولی تحت عنوان OPC با در نظر گرفتن عیار سیمان ۴۲۵ کیلوگرم بر مترمکعب، نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ و ترکیب شن نخودی طبیعی ۱۵ درصد، شن بادامی طبیعی ۲۵ درصد و ماسه طبیعی ۴۰ درصد مطابق با جدول شماره ۶ بعنوان طرح پایه در نظر گرفته شد. پس از آن برای ساخت نمونه‌های الیافی فلزی (STF) و پروپیلن (PPF) به ترتیب به طرح پایه ۱ درصد حجمی الیاف فلزی و ۰/۵ درصد حجمی الیاف پلی پروپیلن اضافه گردید. لازم به ذکر است که در کلیه طرح‌های این دسته مقدار حباب هوای غیر عمدی مخلوط برابر ۱/۵ درصد حجمی بتن در نظر گرفته شد.

ب) بتن سبک: مطابق با توضیحات ارائه شده در بخش‌های قبلی و در جهت تطابق هر چه بیشتر مخلوط‌های در نظر گرفته شده در این تحقیق، طرح مخلوط بتن سبک نیز مشابه طرح مخلوط بتن پایه با در نظر گرفتن عیار سیمان ۴۲۵ کیلوگرم بر مترمکعب، نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ طراحی گردید. تفاوت طرح مخلوط بتن سبک و بتن پایه در به کارگیری سنگدانه‌های سبک معرفی شده در بخش ۲-۱ می‌باشد. در ساخت بتن سبک ترکیب سنگدانه‌ها شامل ۳۰ درصد سبکدانه ریز، ۲۵ درصد سبکدانه درشت و ۴۵ درصد ماسه طبیعی در نظر گرفته شده است.

جدول ۶- طرح اختلاط نمونه‌های بتنی

نوع طرح	سیمان (Kg/m ³)	آب آزاد (Kg/m ³)	الیاف فلزی (Kg/m ³)	الیاف پلی پروپیلن (Kg/m ³)	شن طبیعی (Kg/m ³)	لیکای سبک (Kg/m ³)	ماسه طبیعی (Kg/m ³)
OPC	۴۲۵	۱۹۱/۳	۰	۰	۶۷۹/۹	۰	۹۹۶/۲
STF	۴۲۵	۱۹۱/۳	۷۸/۵	۰	۶۶۹/۶	۰	۹۸۱
PPF	۴۲۵	۱۹۱/۳	۰	۴/۵۵	۶۴۷/۷	۰	۹۸۸/۶
LWC	۴۲۵	۱۹۱/۳	۰	۰	۰	۵۰۹	۷۳۵/۸

۲-۳- ساخت و آماده‌سازی نمونه‌ها

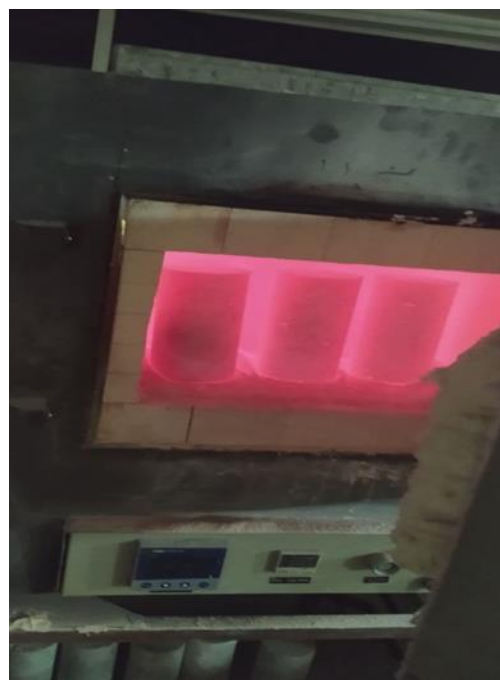
برای ساخت نمونه‌های بتنی از مخلوط کن ۶۰ لیتری آزمایشگاه بتن دانشگاه صنعتی امیرکبیر استفاده شد. روش مخلوط کردن مصالح به این صورت می‌باشد که در ابتدا ریزدانه‌ها و درشت‌دانه‌ها به مدت ۳۰ ثانیه با هم مخلوط شدند. سپس یک سوم وزنی آب اختلاط به مخلوط اضافه شده و به مدت ۳۰ ثانیه با هم مخلوط شدند. در ادامه سیمان و یک سوم الیاف (در صورت وجود) به مخلوط اضافه شده و به مدت دو دقیقه مخلوط شدند. نهایتاً بقیه آب و الیاف به مخلوط اضافه شده و به مدت ۱/۵ دقیقه مخلوط شدند. جهت تامین کارایی فوق روان کننده به میزان لازم به مخلوط اضافه شد. بتن تازه ساخته شده در قالب‌های پیش‌بینی ریخته شده و تراکم بتن در قالب‌ها با استفاده از میز و بیره آزمایشگاه انجام داده شد. قالب‌ها با گونی مرطوب و یک لایه پلاستیک پوشش داده شده و برای ۲۰ الی ۲۴ ساعت در دمای آزمایشگاه نگهداری شدند. پس از طی این مدت قالب‌ها باز شده و نمونه‌ها به وان‌های حاوی محلول آب‌آهک اشباع منتقل شده و در دمای 21 ± 2 درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند.

۲-۴- قرارگیری نمونه‌ها در معرض دماهای بالا

با توجه به هدف این تحقیق که بررسی و مقایسه عملکرد بتن‌های معمولی، الیافی و سبک در معرض دماهای بالا بود، از کوره آزمایشگاه بتن و مصالح ساختمانی دانشگاه صنعتی امیرکبیر استفاده گردید. پس از عمل‌آوری نمونه‌ها تا رسیدن به سن ۲۸ روز که ملاک ارزیابی نمونه‌های بتنی در این تحقیق قرار گرفته بود، کلیه آزمایشات پیش‌بینی شده در دمای اتاق (۲۵ درجه سانتیگراد) بر روی نمونه‌های اولیه از هر طرح مخلوط انجام گردید. پس از آن سری دوم نمونه‌ها تا رسیدن به دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد در آون آزمایشگاه قرار داده شده و پس از مدت ۳ ساعت قرارگیری در دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد مورد آزمایش قرار گرفتند. پس از این مرحله، در مراحل آتی نمونه‌های مورد نظر تا رسیدن به دماهای ۲۰۰، ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ درجه سانتیگراد در داخل کوره قرار گرفته و پس از مدت سه ساعت قرارگیری در دمای مورد نظر، کلیه آزمایشات لازم بر روی آن‌ها صورت پذیرفت.



شکل ۴- آون مورد استفاده جهت دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد.



شکل ۳- کوره مورد استفاده جهت دماهای بالای ۱۰۰ درجه سانتیگراد

۳- آزمایشات انجام شده

۱-۳- آزمایش مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری، متداول‌ترین آزمایش برای ارزیابی کیفیت بتن است. از آنجایی که از هر بتنی یک مقاومت حداقل انتظار می‌رود، لذا این آزمایش مهم و اساسی به شمار می‌رود. در واقع، مقاومت فشاری نمونه بتنی می‌تواند شمای کلی از کیفیت بتن را نشان دهد.

برای کنترل مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی مطابق استاندارد ۳۲۰۶ ملی عمل شده است. به منظور انجام این آزمایش نمونه‌های بتن استوانه با قطر ۱۰ و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر تهیه گردیده است. انجام این آزمایش در سنین ۲۸ روز بر روی نمونه‌هایی که در محیط آب‌آهک اشباع نگه‌داری شده‌اند، صورت پذیرفت. با توجه به این که برای این آزمایش از نمونه استوانه‌ای استفاده گردید و براساس هندسه این نمونه‌ها امکان بارگذاری قبل از آماده‌سازی سطح نمونه وجود نداشت، طبق استاندارد سطح فوقانی نمونه (سطح ماله‌کشی شده) را برش داده و با استفاده از گوگرد مذاب سطوح فوقانی و تحتانی نمونه‌های استوانه‌ای مطابق شکل ۵ کلاهک‌گذاری (کپینگ) شد. این کار سبب می‌شود که صفحه‌بارگذاری دستگاه بصورت کامل بر سطح نمونه سوار شده و از ایجاد تمرکز تنش و خطا در انجام آزمایش جلوگیری گردد.



شکل ۵- مراحل آماده‌سازی و نمونه‌های آماده شده برای آزمایش مقاومت فشاری.

۲-۳- آزمایش مقاومت کششی به روش دو نیم شدن (برزیلی)

به دلیل محدودیت‌هایی که در استفاده از روش کشش مستقیم برای اندازه‌گیری مقاومت کششی نمونه‌های بتنی وجود دارد، در اکثر تحقیقات از روش غیرمستقیم استفاده می‌کنند. یکی از روش‌های غیرمستقیم اندازه‌گیری مقاومت کششی، روش دو نیم شدن یا روش برزیلی است که مطابق با روش استاندارد ASTM C496 [۳۵] اندازه‌گیری می‌شود. در این روش نمونه‌های استوانه‌ای با ابعاد مشخص پس از عمل‌آوری به صورت افقی بین دو صفحه در داخل دستگاه فشار تک‌محوری قرار گرفته و به صورت خطی در راستای طول نمونه بارگذاری می‌شوند (شکل ۶). بر اثر بار اعمالی نمونه استوانه‌ای از وسط به دو نیم تقسیم شده و حداکثر باری که قادر به تحمل آن بوده است، ثبت می‌گردد. در نهایت مقاومت کششی از رابطه ۱ محاسبه می‌شود.

$$St = \frac{2 \times P}{\pi \times D \times L} \quad (1)$$

St: مقاومت کششی نمونه استوانه‌ای (مگاپاسکال)

P: حداکثر نیروی وارد شده بر نمونه استوانه‌ای (نیوتن)

D: قطر نمونه استوانه‌ای (میلی متر)

L: ارتفاع نمونه استوانه‌ای (میلی متر)

لازم به ذکر است که آزمایش مقاومت کششی به روش دونیم شدن بر روی نمونه‌های بتنی استوانه‌ای شکل با ابعاد 10×20 سانتیمتر که در آب آهک اشباع عمل‌آوری شده بودند، در سن ۲۸ روز انجام شد.



شکل ۶- دستگاه و روش انجام آزمایش مقاومت کششی دو نیم شدن

۳-۳- مقاومت خمشی

از آنجایی که اعمال کشش محوری به نمونه بتنی مشکل می باشد مقاومت کششی بتن به روش‌های غیر مستقیم نظیر آزمایش خمش تعیین می گردد. این روش ها به مقاومت هایی منتهی می شود که از مقاومت واقعی تحت بار کششی محوری بیشتر می باشد. در آزمایش مقاومت خمشی تنش کششی ماکزیمم تئوریکی در تارهای پائینی تیر مورد آزمایش به وجود می آید که مدول گسیختگی نامیده می شود و در طراحی بزرگراه ها و روسازی فرودگاه ها به کار می رود.

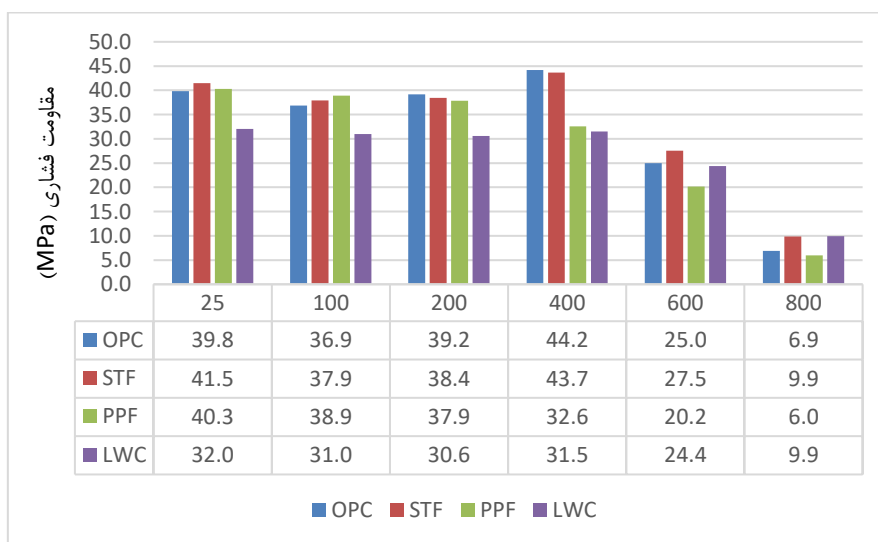
مقدار مدول گسیختگی به ابعاد تیر و بالاتر از همه به شکل بارگذاری بستگی دارد. امروزه بارگذاری لنگر خمشی ثابتی بین نقاط اعمال بار ایجاد می شود طوری که $3/1$ دهانه در معرض تنش ماکزیمم قرار می گیرد و در نتیجه در این منطقه است که تمایل به ترک خوردن به وجود می آید. بر طبق بند چهارم استاندارد ۴۹۰ ایران "فاصله بین نقطه تمرکز بار و نزدیکترین عکس العمل نباید از ارتفاع تیر کمتر باشد. دهانه نمونه آزمایشی باید حداقل سه برابر ارتفاع تیر مورد استفاده باشد. بار اولیه که می تواند سریعاً وارد شود حداکثر تا ۵۰ درصد بار گسیختگی نمونه است و از آن به بعد سرعت ازدیاد بار باید به نحوی تنظیم گردد که تنش تارهای انتهایی مقطع در هر دقیقه بیشتر از ۱۰ کیلوگرم بر سانتی متر مربع، افزایش نیابد".



شکل ۷- دستگاه و روش انجام آزمایش مقاومت خمشی سه نقطه‌ای

۴- نتایج بدست آمده ۴-۱- آزمایش مقاومت فشاری

میزان مقاومت فشاری به دست آمده در نمونه‌های بتنی مختلف در شکل ۸ نشان داده شده است.



شکل ۸- نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی در معرض دماهای بالا.

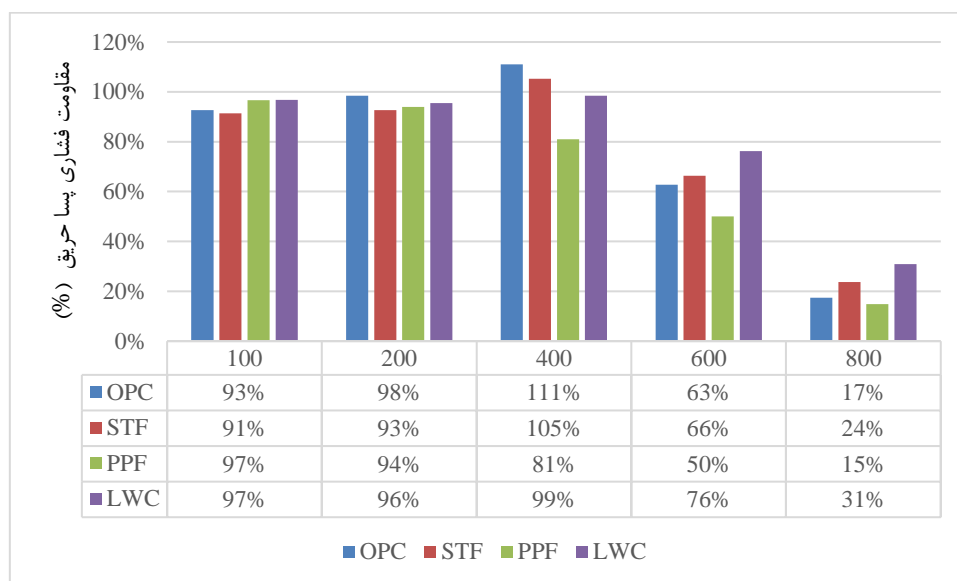
همان‌طور که در نمودار شکل فوق مشخص است، در دمای محیط و بدون اعمال هیچگونه حرارتی، مقاومت فشاری نمونه‌های شاهد و الیافی حاوی الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن تا حدودی به هم نزدیک بوده و اختلاف معناداری در بین آن‌ها وجود ندارد. در عوض

همان طور که قابل پیش بینی نیز بود مقاومت فشاری بتن سبک ساخته شده از سبکدانه‌های لیکا تقریباً ۲۰ درصد کمتر از بتن‌های شاهد و یافی بدست آمده است. دلیل این موضوع نیز تخلخل بالای سبکدانه‌های لیکا و به تبع آن ظرفیت باربری کمتر آن‌ها نسبت به سنگدانه‌های معمولی می‌باشد. پس از قرارگیری نمونه‌ها در محفظه آون با دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد و انجام آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های حرارت دیده، هر چهار نمونه بتنی ساخته شده دچار افت مقاومت فشاری نسبی شدند که در این بین نمونه بتن سبک با افت مقاومت فشاری ۳ درصدی و نمونه بتن یافی حاوی یاف فولادی با افت مقاومت فشاری ۸/۷ درصدی به ترتیب کم‌ترین و بیش‌ترین افت مقاومت فشاری را داشتند.

پس از انجام آزمایشات این مرحله و قرار گرفتن نمونه‌های بتنی در معرض دمای ۲۰۰ درجه سانتیگراد در داخل کوره و انجام آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه‌ها مشخص گردید که غیر از نمونه بتن یافی حاوی یاف پلی‌پروپیلن که افت مقاومت فشاری در حدود ۲/۶ درصدی و نمونه بتن سبک با افت مقاومت فشاری ناچیز ۱/۳ درصدی نسبت به دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد داشته‌اند، بقیه نمونه‌ها یعنی نمونه بتنی شاهد و یافی حاوی یاف فولادی افزایش مقاومت فشاری در حدود ۵ درصد نسبت به دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد داشته‌اند. دلیل افت مقاومت نمونه یافی حاوی یاف پلی‌پروپیلن مشخص است که با افزایش دما از ۱۰۰ به ۲۰۰ درجه سانتیگراد بخشی از یاف پلی‌پروپیلن ذوب شده و حفرات برجا مانده از آن‌ها سبب متخلخل شدن ساختار بتن و به تبع آن افت مقاومت فشاری نمونه بتنی شده است. در مورد بتن سبک نیز به نظر می‌رسد که افت مقاومت فشاری ناچیز رخ داده بیشتر مربوط به خطای آزمایش بوده و بتن سبک تاثیر چندانی از دمای ۲۰۰ درجه سانتیگراد نپذیرفته است. در دمای ۴۰۰ درجه سانتیگراد نیز تقریباً همان روند دمای ۲۰۰ درجه سانتیگراد به وقوع پیوسته است. به این صورت که افزایش دمای ۲۰۰ درجه‌ای از ۲۰۰ به ۴۰۰ درجه سانتیگراد سبب ذوب شدن اکثر یاف پلی‌پروپیلن موجود در ساختار بتن یافی شده و همین عامل افت مقاومت فشاری ۱۴ درصدی این بتن را نسبت به دمای ۲۰۰ درجه سانتیگراد به همراه داشته است. بر خلاف بتن حاوی یاف پلی‌پروپیلن، بتن شاهد ۱۲/۷ درصد، بتن یافی حاوی یاف فولادی با ۱۳/۸ درصد و بتن سبک با ۲/۹ درصد افزایش مقاومت فشاری نسبت به دمای ۲۰۰ درجه سانتیگراد را تجربه کردند به نحوی که مقاومت فشاری نمونه‌های شاهد و بتن یافی حاوی یاف فولادی حتی از مقاومت اولیه آن‌ها نیز بیشتر ثبت گردید. همان طور که در فصل دوم ذکر گردید برخی از محققین همچنین پدیده‌ای را در تحقیقات خود مشاهده کرده‌بودند و دلیل اصلی آن را سخت‌شدگی ناشی از خشک شدن خمیرسیمانی بدلیل هیدراسیون بیشتر سیمان و عمل‌آوری توسط بخار آب داخلی که عملاً شبیه به محیط اتوکلاو در این بازه حرارتی عمل می‌کند، اعلام کرده‌اند.

همان طور که براساس مطالعات و تحقیقات پیشین صورت گرفته قابل پیش‌بینی بود، افزایش دمای کوره از ۴۰۰ به ۶۰۰ درجه سانتیگراد و قرارگیری نمونه‌ها در معرض دمای ۶۰۰ درجه سانتیگراد سبب دی‌هیدراته شدن کلسیم هیدروکسید (CH) و از دست رفتن سختی بتن بعلت تجزیه ژل سیلیکات کلسیم (C-S-H) شده که نتیجه آن افت مقاومت فشاری شدیدی است که در همه نمونه‌های بتن شاهد، بتن یافی حاوی یاف فولادی و یاف پلی‌پروپیلن و بتن سبک رخ داده است. در این بین بیشترین افت مقاومت فشاری مربوط به بتن شاهد با ۴۳/۴ درصد و کمترین افت مقاومت فشاری مربوط به بتن سبک با ۲۱/۹ درصد نسبت به دمای ۴۰۰ درجه سانتیگراد بوده است. در نهایت با رسیدن دمای کوره به ۸۰۰ درجه سانتیگراد مقاومت فشاری همه نمونه‌ها با افت محسوسی به مقادیر کمتر از ۱۰ درجه سانتیگراد رسید. دلیل عمده افت مقاومت رخ داده با افزایش درجه حرارت از ۶۰۰ به ۸۰۰ درجه سانتیگراد را می‌توان ناشی از عدم تطابق حرارتی بین ماتریس سیمانی و سنگدانه‌ها که تخلخل ساختار بتن را افزایش داده در کنار عدم مقاومت سنگدانه‌ها، بعلت تجزیه کلسیم کربنات دانست که منجر به کاهش بیشتر مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی می‌گردد. مقایسه بتن شاهد و بتن یافی حاوی یاف فلزی نشان می‌دهد که با وجود مقاومت فشاری اولیه تقریباً یکسان این دو بتن در دمای محیط، پس از قرارگیری در دمای ۸۰۰ درجه سانتیگراد مقاومت پس‌احریق بتن یافی حاوی یاف فولادی در حدود ۴۳ درصد بیشتر از بتن معمولی بوده است. دلیل این موضوع را می‌توان به ظرفیت حرارتی بالای یاف فولادی برخلاف یاف پلی‌پروپیلن دانست که در دماهای بالا نیز عملکرد خود را حفظ کرده و مانع گسترش ترک‌ها و افت مقاومت

بتن شده است. از طرفی نمونه بتن سبک نیز بدلیل ساختار متخلخل سبکدانه لیکا تنش حرارتی کمتری تحمل کرده و همچنین بدلیل کربناتی نبودن سنگدانه‌های لیکا و اینکه خود سنگدانه‌های لیکا در دماهای بالا تولید می‌گردند و از مقاومت حرارتی بالایی برخوردار هستند افت مقاومت فشاری کمتری نسبت به سایر نمونه‌های بتنی از خود نشان دادند. در جهت مقایسه بهتر عملکرد نمونه‌های بتنی در معرض دماهای بالا در شکل شماره ۹ مقاومت فشاری پس‌ساحریق هر یک از نمونه‌ها در دماهای مختلف گزارش شده است. لازم به ذکر است که مقاومت فشاری پس‌ساحریق گزارش شده حاصل تقسیم مقاومت فشاری نمونه در دمای مورد نظر بر مقاومت فشاری نمونه در دمای محیط می‌باشد.

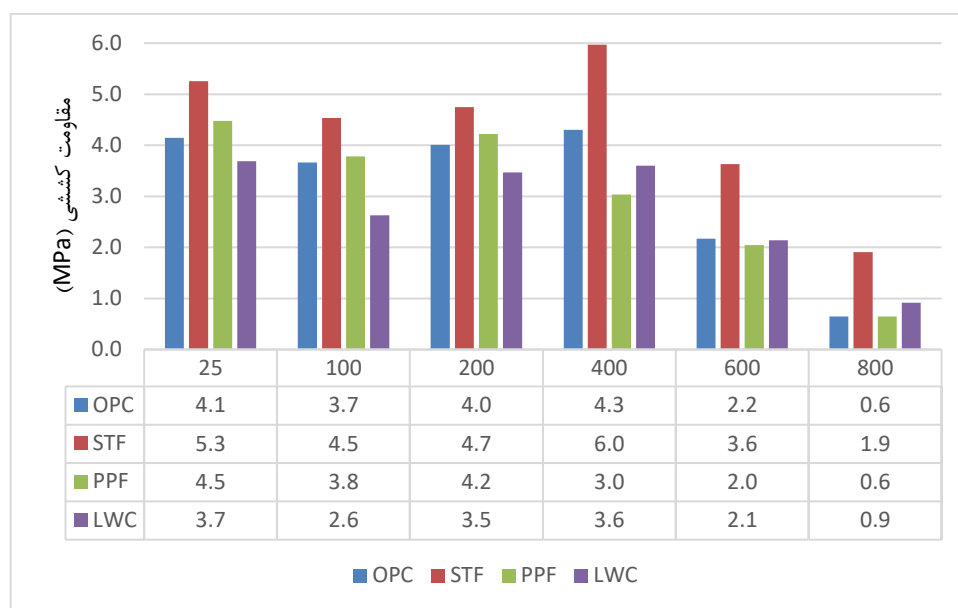


شکل ۹- مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی پس از قرارگیری در معرض دماهای بالا

۴-۲- آزمایش مقاومت کششی برزیلی (دو نیم شدن)

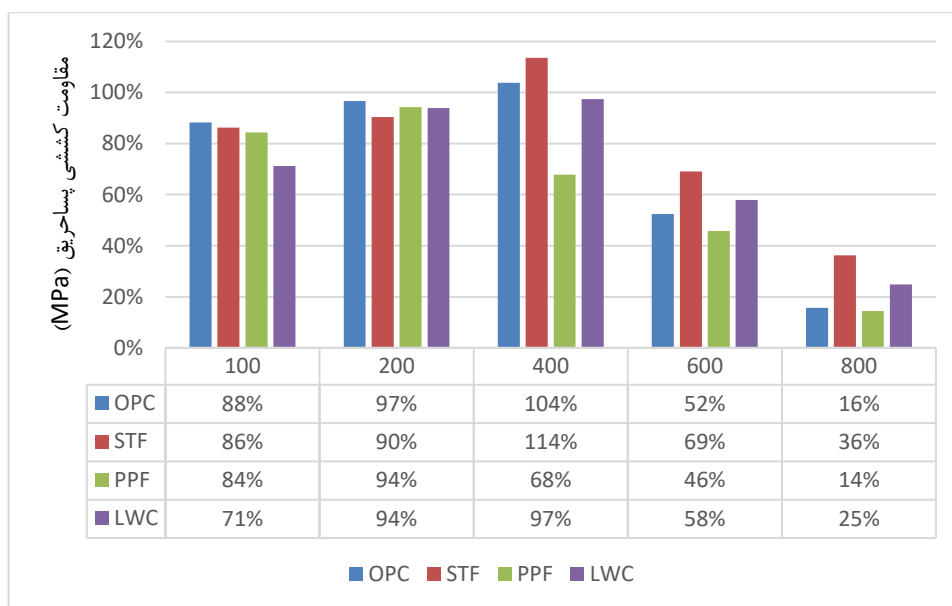
نتایج آزمون مقاومت کششی نمونه‌های بتنی مختلف در معرض دماهای بالا در شکل شماره ۱۰ نشان داده شده است. با توجه به نتایج مشاهده می‌شود که رفتار نمونه‌ها در مواجهه با دمای بالا تقریباً مشابه مقاومت فشاری است. نکته قابل توجه در نتایج، عملکرد نمونه‌های حاوی الیاف است. زمانی که یک نمونه بتنی تحت تنش‌های کششی قرار می‌گیرد، ریزترکهایی در آن ایجاد می‌شود که این ترک‌ها به مرور افزایش یافته و با افزایش تنش‌های کششی این ترک‌ها به یکدیگر متصل می‌شود و گسترش می‌یابند. در نهایت با رشد ترک‌ها نمونه بتنی دچار شکستگی کامل می‌شود (معمولاً به دو نیم تقسیم می‌شود). در بتن‌های حاوی الیاف، معمولاً شرایط کمی متفاوت است. به طوری که پس از ایجاد ریزترکه‌های اولیه در ساختار بتن، رشته‌های الیاف موجود در ترک بخشی از تنش‌های وارده را تحمل و منتقل می‌کنند. همین عامل سبب می‌شود که از سرعت گسترش ترک‌ها کاسته شده و بتن دیرتر دچار گسیختگی شود. در بتن‌هایی که از الیاف با مقاومت بالاتر نظیر الیاف فولادی و الیاف کربن استفاده می‌شود، با توجه به مقاومت کششی بالای این الیاف ممکن است مقاومت کششی نمونه حاوی الیاف بیش از نمونه بتنی فاقد الیاف شود. با توجه به نتایج بدست آمده مشاهده می‌شود که در دماهای اولیه به خصوص دمای اتاق، مقاومت کششی نمونه‌های بتن الیافی حاوی الیاف پلی پروپیلن تقریباً ۹/۷ درصد بیش‌تر از بتن معمولی است. با افزایش دما این نسبت به مرور کاسته شده که مهم‌ترین علت آن را می‌توان ذوب شدن رشته‌های الیاف پلی پروپیلن عنوان کرد. تا جایی که در دمای ۴۰۰ درجه‌سانتی‌گراد مقاومت کششی نسبی نمونه‌های حاوی الیاف پلی پروپیلن در حدود ۳۰ درصد مقاومت کششی نمونه بتنی شاهد شده است. با ذوب شدن الیاف پلی پروپیلن در بتن، ریزحفرات لوله‌مانندی در بتن به وجود می‌آید که مشابه به ریزترکه‌های ناشی از تنش عمل نموده و سبب افت شدید مقاومت کششی می‌گردد. برخلاف بتن الیافی حاوی الیاف پلی پروپیلن که در دمای پایین باعث افزایش مقاومت

کششی و در دمای بالا باعث کاهش چشمگیر آن می‌شود، بتن ییافی حاوی الیاف فولادی همواره عملکرد مناسبی از خود نشان داده است. همان‌طور که گفته شد، استفاده از الیاف پر مقاومت نظیر الیاف فولادی می‌تواند ظرفیت کششی مقطع را بهبود بخشد. همان‌طور که در نمودار مشاهده می‌شود، استفاده از الیاف فولادی در دمای اتاق در حدود ۲۹ درصد مقاومت کششی را افزایش داده است. همچنین مقاومت بالای فولاد در برابر حرارت سبب شده است که این نمونه‌ها در تمامی دماهای اعمال شده دارای بیش‌ترین میزان مقاومت خمشی نسبت به سایر نمونه‌ها باشند. به عنوان نمونه، پس از قرارگیری نمونه‌های مختلف در معرض دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد، مقاومت کششی نمونه بتنی حاوی الیاف فلزی در حدود ۲۱۷ درصد بیش‌تر از نمونه بتن معمولی است.



شکل ۱۰- مقاومت کششی نمونه‌های بتنی پس از قرارگیری در معرض دماهای بالا

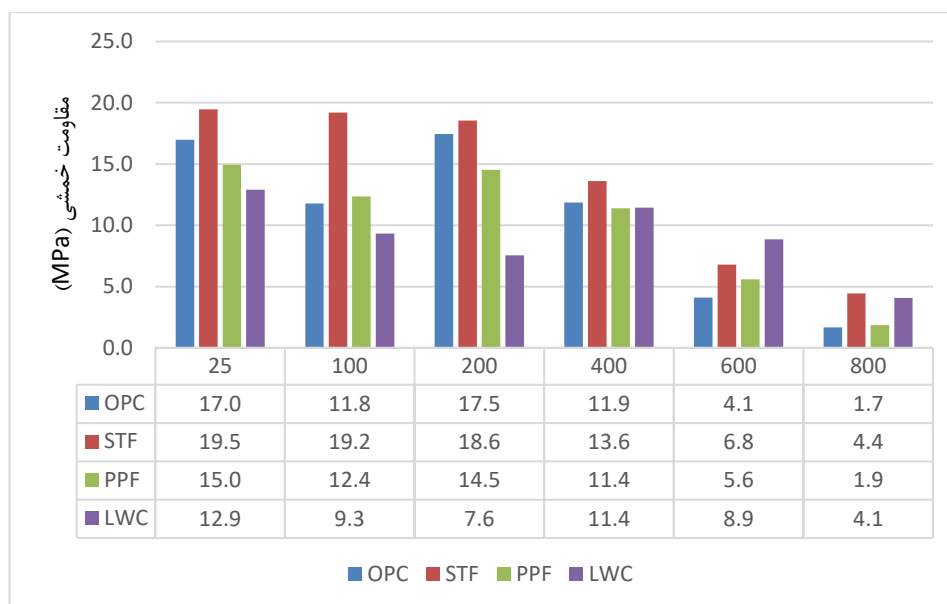
در ادامه و در جهت روشن شدن تاثیر دماهای مختلف بر روی عملکرد کششی هر یک از نمونه‌ها، مقاومت کششی نسبی هر نمونه نسبت به مقاومت کششی آن در دمای اتاق محاسبه و در نمودار شکل ۱۱ گزارش شده است. با توجه به نتایج بدست آمده مشاهده می‌شود که قرارگیری نمونه‌ها در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد سبب افت نسبتاً شدید مقاومت کششی گشته است که دلیل آن را می‌توان مشابه آزمایش مقاومت فشاری تغییرات در شرایط هیدروترمال از طریق از دست رفتن آب آزاد و آب جذب شده دانست. پس از آن در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد، مقاومت کششی نمونه‌ها افزایش یافته و این روند تا دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد برای کلیه نمونه‌ها به غیر از نمونه‌های حاوی الیاف پلی پروپیلن ادامه پیدا کرده است. همان‌طور که پیش از این نیز گفته شد، سخت‌شدگی ناشی از خشک شدن خمیر سیمانی به دلیل هیدراسیون بیش‌تر از سیمان و عمل‌آوری توسط بخار داخلی را می‌توان عامل افزایش مقاومت کششی دانست که برای بتن ییافی حاوی الیاف پلی پروپیلن این عامل تحت شعاع ذوب رشته‌های الیاف پلی پروپیلن قرار گرفته است. با افزایش دما تا ۶۰۰ درجه کلیه نمونه‌های بتنی به دلیل دهیدراته شدن کلسیم هیدروکسید و از دست رفتن سختی بتن به علت تجزیه ژل سیلیکات کلسیم دچار افت شدیدی در مقاومت کششی شدند که این افت در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد و به دلیل عدم تطابق حرارتی بین ماتریس سیمانی و سنگدانه‌ها تخریب ساختار بتن را افزایش داده که این عامل در کنار عدم مقاومت سنگدانه‌ها به علت تجزیه کلسیم کربنات ادامه پیدا کرده است. در نهایت همان‌گونه که در نتایج مقاومت کششی مشاهده می‌شود، نمونه بتن ییافی حاوی الیاف فولادی عملکرد مناسبی داشته و پس از قرارگیری در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد، توانسته است بیش از یک سوم مقاومت کششی اولیه خود را حفظ نماید.



شکل ۱۱- مقاومت کششی نسبی نمونه‌های بتنی پس از قرارگیری در معرض دماهای بالا

۳-۴- آزمایش مقاومت خمشی

یکی از مشخصه‌های مهم نمونه‌های بتنی از اعضای مانند تیرها و ستون‌ها در سازه، مقاومت خمشی است. نتایج مقاومت خمشی نمونه‌های مورد آزمایش در این تحقیق در نمودار شکل ۱۲ آمده است. نتایج مقاومت خمشی نمونه‌ها نشان می‌دهد با افزایش دما، میزان مقاومت خمشی در تمامی نمونه‌ها کاهش می‌یابد. از طرفی مشاهده می‌شود که نمونه‌های حاوی الیاف فولادی بهترین عملکرد را در تمامی دماها در مقاومت خمشی داشته است. پس از این نمونه، نمونه حاوی الیاف پلی‌پروپیلن و شاهد قرار دارند. تا دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد، کم‌ترین میزان مقاومت خمشی برای نمونه بتن سبک بدست آمده است. این در حالی است که در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد، مقادیر مقاومت خمشی نمونه بتن سبک‌مشابه با نمونه شاهد و نمونه حاوی الیاف پلی‌پروپیلن بدست آمده است. با افزایش دما به ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد، میزان مقاومت خمشی در نمونه‌های حاوی الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن به جهت ذوب الیاف و در نمونه شاهد به جهت از بین رفتن بخشی از ساختار ژل با افت قابل توجه رو به رو می‌شود. این در حالی است که در نمونه بتن سبک به دلیل وجود حفرات، میزان افت مقاومت کم‌تر است و در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد نمونه بتن سبک توانسته است بیش‌ترین میزان مقاومت خمشی را نسبت به سایر نمونه‌ها کسب کند. در این حالت کم‌ترین میزان مقاومت مربوط به نمونه بتن شاهد است. با افزایش دما به ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد، نمونه حاوی الیاف پلی‌پروپیلن و نمونه شاهد دچار افت مقاومت شدید شده و دارای کم‌ترین مقادیر مقاومت هستند. این در حالی است که در این دما نمونه‌های حاوی الیاف فولادی و نمونه بتن سبک دارای مقادیر مقاومت بیش‌تری هستند و کم‌تر دچار افت شده است. بنابراین در حالت کلی می‌توان گفت استفاده از الیاف فولادی باعث مقاومت خمشی اولیه بالاتر و افت کم‌تر مقاومت خمشی در تمامی سنین شده است.



شکل ۱۲- مقاومت خمشی نمونه‌های بتنی پس از قرارگیری در معرض دماهای بالا

۵- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر، به بررسی تاثیر الیاف فولادی و پلی پروپیلن بر خواص مکانیکی بتن حاوی سیمان پرتلند معمولی پرداخته شد. برای بررسی بهتر و نتیجه گیری مناسب، یک نمونه بتن شاهد و نمونه بتن سبک نیز تهیه شد و نتایج آزمایش‌های این نمونه‌ها با نمونه‌های حاوی الیاف مقایسه شد. خلاصه نتایج بدست آمده در این تحقیق به شرح زیر است:

۱- نمونه‌های حاوی الیاف فولادی و پلی پروپیلن (به ویژه نمونه‌های حاوی الیاف فولادی) تا دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد مقاومت فشاری بیش‌تر و یا قابل مقایسه با بتن معمولی نشان داده‌اند. بتن سبک نیز با وجود اینکه مقاومت فشاری اولیه آن در حدود ۲۰ درصد از بتن معمولی و بتن‌های الیافی کمتر بود اما با افزایش دما تا ۲۰۰ درجه افت مقاومت فشاری نسبی کمتری خصوصاً نسبت به بتن الیافی حاوی الیاف پلی پروپیلن داشته است.

۲- در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد، نمونه‌های بتن معمولی و حاوی الیاف فولادی افزایش مقاومت فشاری را نشان می‌دهند که این مهم ناشی از شرایط مشابه اتوکلاو داخلی است. بر خلاف این دو بتن، نمونه‌های حاوی الیاف پلی پروپیلن افت مقاومت را نشان می‌دهند که به علت ذوب شدن رشته‌های الیاف و ایجاد حفرات مویینه در نمونه می‌باشد. همچنین نمونه‌های بتن سبک نیز با کسب ۹۹ درصد از مقاومت اولیه خود تغییر چندانی نشان نداده است.

۳- در دمای ۶۰۰ و ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد، تمامی نمونه‌ها یک افت قابل توجه در مقاومت فشاری را نشان داده است که ناشی از تجزیه ژل C-S-H تحت حرارت بالا است. در این بین نمونه حاوی الیاف پلی پروپیلن به دلیل ذوب شدن رشته‌های الیاف بیشترین کاهش مقاومت نسبت به مقاومت اولیه خود را نشان داده است.

۴- در آزمایش تعیین مقاومت کششی به روش دو نیم شدن تقریباً روند عملکرد نمونه‌ها شبیه به آزمایش مقاومت فشاری است. تنها تفاوت ملاحظه شده عملکرد مناسب نمونه بتن الیافی حاوی الیاف فولادی بود که توانست در حدود ۳۶ درصد مقاومت اولیه خود را پس از قرارگیری در معرض دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد حفظ نماید.

۵- در آزمایش مقاومت خمشی نیز نمونه بتن الیافی حاوی الیاف فولادی بهترین عملکرد را پس از قرارگیری در معرض دماهای مختلف داشته است. نمونه بتن سبک نیز با اینکه در دمای محیط کمترین مقاومت را در بین نمونه‌های تحقیق دارا بوده اما پس از قرارگیری در معرض دماهای بالا خصوصاً دمای ۶۰۰ و ۸۰۰ درجه سانتیگراد بهترین عملکرد پس از بتن الیافی حاوی الیاف فولادی را از خود نشان داده است.

مراجع

- [1] P. Monteiro, (2000), *Concrete: microstructure, properties, and materials*. McGraw-Hill Publishing, 2006.
- [2] G. A. Houry, (2013), "Effect of fire on concrete and concrete structures," *Progress in structural engineering & materials*, vol. 2, no. 4, pp. 429-447.
- [3] F. Ali, A. Nadjai, G. Silcock, and A. Abu-Tair, (2004) "Outcomes of a major research on fire resistance of concrete columns," *Fire safety journal*, vol. 39, no. 6, pp. 433-44.
- [5] *ASTM Designation E 119-88, (1994), Standard Methods of Fire Tests of Building Construction and Materials, Section 4, Vol. 04.07, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA.*
- [6] M. Paz, W. Leigh, M. Paz, and W. Leigh, (2004), "International building code IBC-2000," *Structural Dynamics: Theory & Computation*, pp. 757-781.
- [7] T. Z. Harmathy, (1993), "Fire safety design and concrete,".
- [8] V. Kodur, (2014), "Properties of concrete at elevated temperatures," *International Scholarly Research Notices*, vol. 2014.
- [9] H. Zhao, F. Liu, and H. Yang, (2020), "Residual compressive response of concrete produced with both coarse and fine recycled concrete aggregates after thermal exposure," *Construction & Building Materials*, vol. 244, p. 118397.
- [10] H. W. Iqbal, R. A. Khushnood, W. L. Baloch, A. Nawaz, and R. F. Tufail, (2020), "Influence of graphite nano/micro platelets on the residual performance of high strength concrete exposed to elevated temperature," *Construction & Building Materials*, vol. 253, p. 119029.
- [11] Y.-S. Tai, H.-H. Pan, and Y.-N. Kung, (2011), "Mechanical properties of steel fiber reinforced reactive powder concrete following exposure to high temperature reaching 800 C," *Nuclear Engineering & Design*, vol. 241, no. 7, pp. 2416-2424.
- [12] M. Abid, X. Hou, W. Zheng, and R. R. Hussain, (2017), "High temperature and residual properties of reactive powder concrete—A review," *Construction & Building Materials*, vol. 147, pp. 339-351.
- [13] M. Alexander, A. Bentur, and S. Mindess, (2017), *Durability of concrete: design and construction*. CRC Press.
- [14] J. Xiao and G. König, (2004), "Study on concrete at high temperature in China—an overview," *Fire safety journal*, vol. 39, no. 1, pp. 89-103.
- [15] K. Behfarnia and M. Shahbaz, (2018), "The effect of elevated temperature on the residual tensile strength and physical properties of the alkali-activated slag concrete," *Journal of Building Engineering*, vol. 20, pp. 442-454.
- [16] C.-S. Poon, S. Azhar, M. Anson, and Y.-L. Wong, (2001), "Comparison of the strength and durability performance of normal-and high-strength pozzolanic concretes at elevated temperatures," *Cement & concrete research*, vol. 31, no. 9, pp. 1291-1300.
- [17] F. Varona, F. J. Baeza, D. Bru, and S. Ivorra, (2018), "Influence of high temperature on the mechanical properties of hybrid fibre reinforced normal and high strength concrete," *Construction & Building Materials*, vol. 159, pp. 73-82.
- [18] J. Xie, Z. Zhang, Z. Lu, and M. Sun, (2018), "Coupling effects of silica fume and steel-fiber on the compressive behaviour of recycled aggregate concrete after exposure to elevated temperature," *Construction & Building Materials*, vol. 184, pp. 752-764.
- [19] H. Dilbas, M. Şimşek, and Ö. Çakır, (2014), "An investigation on mechanical and physical properties of recycled aggregate concrete (RAC) with and without silica fume," *Construction & Building materials*, vol. 61, pp. 50-59.
- [20] V. Afroughsabet and T. Ozbakkaloglu, (2015), "Mechanical and durability properties of high-strength concrete containing steel and polypropylene fibers," *Construction & building materials*, vol. 94, pp. 73-82.
- [21] F. Hasan-Nattaj and M. Nematzadeh, (2017), "The effect of forta-ferro and steel fibers on mechanical properties of high-strength concrete with and without silica fume and nano-silica," *Construction & Building Materials*, vol. 137, pp. 557-572.
- [22] S. Ahmad, Y. S. Sallam, and M. A. Al-Hawas, (2014), "Effects of key factors on compressive and tensile strengths of concrete exposed to elevated temperatures," *Arabian journal for science & engineering*, vol. 39, pp. 4507-4513.
- [23] L. T. Phan and L. Phan, (1996), *Fire performance of high-strength concrete: a report of the state-of-the-art*. National Institute of Standards and Technology Gaithersburg, MD.
- [24] S. R. Sarhat and E. G. Sherwood, (2013), "Residual mechanical response of recycled aggregate concrete after exposure to elevated temperatures," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 25, no. 11, pp. 1721-1730.

- [25] Y. Xu, Y. Wong, C. S. Poon, and M. Anson, (2001), "Impact of high temperature on PFA concrete," *Cement & concrete research*, vol. 31, no. 7, pp. 1065-1073.
- [26] J. Vieira, J. Correia, and J. De Brito, (2011), "Post-fire residual mechanical properties of concrete made with recycled concrete coarse aggregates," *Cement & Concrete Research*, vol. 41, no. 5, pp. 533-541.
- [27] B. Chen and J. Liu, (2004), "Residual strength of hybrid-fiber-reinforced high-strength concrete after exposure to high temperatures," *Cement & Concrete Research*, vol. 34, no. 6, pp. 1065-1069.
- [28] A. Behnood and H. Ziari, (2008), "Effects of silica fume addition and water to cement ratio on the properties of high-strength concrete after exposure to high temperatures," *Cement & Concrete Composites*, vol. 30, no. 2, pp. 106-112.
- [29] Y.-F. Chang, Y.-H. Chen, M.-S. Sheu, and G. C. Yao, (2006), "Residual stress-strain relationship for concrete after exposure to high temperatures," *Cement & concrete research*, vol. 36, no. 10, pp. 1999-2005.
- [30] A. M. Neville and J. J. Brooks, (1987), *Concrete technology*. Longman Scientific & Technical England.
- [31] J. Eidan, I. Rasoolan, A. Rezaeian, and D. Poorveis, (2019), "Residual mechanical properties of polypropylene fiber-reinforced concrete after heating," *Construction & Building Materials*, vol. 198, pp. 195-206.
- [32] A. Lau and M. Anson, (2006), "Effect of high temperatures on high performance steel fibre reinforced concrete," *Cement & concrete research*, vol. 36, no. 9, pp. 1698-1707.
- [33] M. A. Moghadam and R. A. Izadifard, (2020), "Effects of steel and glass fibers on mechanical and durability properties of concrete exposed to high temperatures," *Fire Safety Journal*, vol. 113, p. 102978.
- [34] ASTM Standard C33, 2003e1, "Specification for Concrete Aggregates," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2003,
- [35] ASTM C496 / C496M-17, Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017