

## Laboratory study of the effect of high temperatures on mechanical properties and energy absorption of concrete based calcium aluminate reinforced with hybrid fiber

Saeed kordi<sup>1</sup>, Fereydoun omidinasab<sup>2\*</sup>, Mehdi Dehestani<sup>3</sup>

1- Masters student, Department of Civil Engineering, Lorestan University, Khorramabad, Iran

2 -Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Lorestan University, Khorramabad, Iran

3 -Associate Professor, Department of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

### ABSTRACT

Structures are considered as one of the main sources and resources of each country, due to their long-term and continuous use and the need to preserve human lives, they must always have sufficient stability and safety. Accordingly, the behavior of concrete is subject to the high degree of temperature is very important. The use of high-alumina cement has attracted the attention of researchers because of the considerable weakness of conventional cements at temperatures above 300 ° C. In this study, using the cement of IRC40 calcium aluminate instead of conventional cement, the combination of two types of steel fibers and polypropylene fibers was used in the manufacture of concrete. The purpose of this study was to evaluate the effect of high temperatures on the mechanical properties of calcium aluminate cement concrete and calculate the energy absorption of concrete samples after depositing them in the vicinity of 600,110 and 800 degrees Celsius. In the same way, four mix composition based on the use of four levels of 0, 0.5, 1, and 1.5% hybrid fibers were used to make a total of 108 samples, including cube compressive specimens of 10 × 10 × 10 cm, cylindrical tensile specimens with a diameter of 10 and a height of 20 cm and flexural beams with dimensions of 6 × 8 × 32 cm. According to laboratory results, the use of 1.5% of the hybrid fiber increased the amount of mechanical properties, including compressive strength, tensile strength and flexural strength, as well as increased energy absorption.

### ARTICLE INFO

**Receive Date:** 22 February 2019

**Revise Date:** 01 December 2019

**Accept Date:** 11 June 2020

### Keywords:

Concrete

Calcium aluminate cement

High temperature

Mechanical properties

Steel fibers

Polypropylene fibers

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.172995.1790>

\*Corresponding author: Fereydoun omidinasab

Email address: omidinasab.f@lu.ac.ir

## بررسی آزمایشگاهی تاثیر درجه حرارت‌های بالا بر خصوصیات مکانیکی و جذب انرژی بتن مبتنی بر سیمان کلسیم آلومینات مسلح شده با الیاف ترکیبی

سعید کردی<sup>۱</sup>، فریدون امیدي نسب<sup>۲\*</sup>، مهدی دهستانی کلاگر<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه لرستان، دانشکده فنی و مهندسی، خرم‌آباد، ایران

۲- استادیار، دانشگاه لرستان، دانشکده فنی و مهندسی، خرم‌آباد، ایران

۳- دانشیار، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، دانشکده فنی و مهندسی، بابل، ایران

### چکیده

سازه‌ها ضمن اینکه به عنوان یکی از اصلی‌ترین منابع و سرمایه‌های هر کشور محسوب می‌شوند، به دلیل استفاده طولانی مدت و مداوم، و ضرورت حفظ جان انسان‌ها باید همواره پایداری و ایمنی کافی را دارا باشند. بر این اساس چگونگی رفتار بتن در معرض درجه حرارت‌های بالا از اهمیت بالایی برخوردار است. استفاده از سیمان‌های با آلومین بالا به دلیل ضعف قابل توجه سیمان‌های معمولی در دماهای بالاتر از ۳۰۰ درجه سلسیوس، مورد توجه محققین قرار گرفته است. در این مطالعه ضمن استفاده از سیمان کلسیم آلومینات IRC40 به جای سیمان معمولی، از ترکیب دو نوع الیاف فولادی و الیاف پلی‌پروپیلن، در ساخت بتن استفاده شده است. هدف از این پژوهش ارزیابی اثر درجه حرارت‌های بالا بر خصوصیات مکانیکی بتن ساخته شده از سیمان کلسیم آلومینات، و محاسبه جذب انرژی نمونه‌های بتنی پس از قراردمی آن‌ها در مجاورت دماهای ۱۱۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ درجه سلسیوس می‌باشد. در همین راستا از ۴ طرح اختلاط بر مبنای استفاده از چهار سطح الیاف ترکیبی به مقدار ۰، ۰،۵، ۱ و ۱،۵ درصد برای ساخت مجموعاً ۱۰۸ نمونه، شامل نمونه‌های فشاری مکعبی ۱۰×۱۰×۱۰ سانتی‌متر، نمونه‌های کششی استوانه‌ای با قطر ۱۰ و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر و تیرهای خمشی با ابعاد ۶×۱۸×۳۲ سانتی‌متر استفاده شد. مطابق با نتایج آزمایشگاهی مشاهده شد که استفاده از ۱،۵ درصد الیاف ترکیبی موجب افزایش قابل ملاحظه مقادیر خصوصیات مکانیکی شامل مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مقاومت خمشی و همچنین ارتقاء سطح جذب انرژی می‌گردد.

کلمات کلیدی: بتن، سیمان کلسیم آلومینات، درجه حرارت بالا، خصوصیات مکانیکی، الیاف فولادی، الیاف پلی‌پروپیلن

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	<a href="https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.172995.1790">https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.172995.1790</a>	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2020.172995.1790	۱۴۰۰/۰۶/۳۱	۱۳۹۹/۰۳/۲۲	۱۳۹۹/۰۳/۲۲	۱۳۹۸/۰۹/۱۰	۱۳۹۷/۱۲/۰۳
				فریدون امیدي نسب	*نویسنده مسئول:	
				omidinasab.f@lu.ac.ir	پست الکترونیکی:	

## ۱- مقدمه

بتن به علت داشتن خواصی مانند حالت خمیری قبل از سخت‌شدگی، مقاومت فشاری خوب و در دسترس بودن مصالح تشکیل دهنده آن، یکی از مهم‌ترین و رایج‌ترین مصالح ساختمانی است. در سال‌های اخیر استفاده از بتن‌های توانمند همزمان با رشد تکنولوژی افزایش داشته است. در همین راستا، تحقیقاتی به منظور بهبود ضعف این نوع بتن، شامل ضعف کشش و شکل‌پذیری در مقایسه با مقاومت فشاری، و خطرپذیری بیشتر آن در درجه حرارت‌های بالا در مقایسه با سایر انواع بتن انجام شده است [۱] و [۲].

مقاومت نامطلوب در برابر درجه حرارت‌های بالا در برخی از اجزا می‌تواند منجر به فروپاشی کل سیستم شود. قرار گرفتن بتن در دمای بالا (مانند حوادث آتش‌سوزی و ...) منجر به چندین اختلال شده و بتن تعدادی واکنش و تغییر را تجربه می‌کند که باعث ایجاد جداسازی پیش‌رونده ساختار ژل سیمان، کاهش دوام، افزایش احتمال انقباض ناشی از خشک‌شدگی، ترک‌های ساختاری و تغییر رنگ سنگدانه‌ها می‌گردد [۳]. بنابراین، با توجه به اثرات آتش و درجه حرارت‌های بالا بر خصوصیات فیزیکی و ایجاد تغییرات شیمیایی مضر در بتن، که منجر به تخریب آن می‌گردد، در نظر گرفتن این اثرات در طراحی مصالح و اعضای سازه‌ها الزامی است [۴]. همچنین در این موارد عوامل موثر بر عملکرد بتن تحت درجه حرارت‌های بالا مانند طرح اختلاط، نوع سنگدانه و ... باید در نظر گرفته شوند [۵]، [۶]. در میان تغییرات ریزساختاری و شیمیایی بتن در مقابل درجه حرارت‌های بالا، مهم‌ترین تغییر تجزیه فاز کلسیم سلیکات هیدرات و کلسیم هیدروکسید، در سیمان‌های پرتلند پس از مجاورت دماهای بیشتر از ۴۰۰ درجه سلسیوس می‌باشد. مسئله مقاومت حرارتی کامپوزیت‌های مبتنی بر سیمان با چندین رویکرد حل شده است [۷]. سیمان‌های کلسیم آلومینات به دلیل دارا بودن ویژگی‌های پیشرفته مانند گیرایی سریع، مقاومت در دماهای بالا، و مقاومت در برابر طیف گسترده‌ای از عوامل مهاجم شیمیایی کاربرد زیادی در صنعت دارد و در صنایع نسوز، لوله و ساخت و سازهای فاضلاب، کف‌های صنعتی و همچنین سدسازی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۸]. با بررسی‌های صورت گرفته روی سیمان‌های پرتلند و سیمان کلسیم آلومینات مشاهده شد که سیمان‌های کلسیم آلومینات دارای مقاومت فشاری بالاتر در محدوده دمایی ۲۰ تا ۸۰۰ درجه سلسیوس و نیز مدول الاستیسیته و سختی فشاری بیشتر نسبت به سیمان‌های پرتلند می‌باشند [۹].

بتن معمولی در صورتی که دما از ۳۰۰ درجه سلسیوس تجاوز نکند دچار افت مقاومت محسوس نمی‌شود و مقاومت از دست رفته با هیدراتاسیون مجدد قابل بازیابی می‌باشد، اما در صورت بیش‌تر شدن دما از ۳۰۰ درجه سلسیوس، افت مقاومت غیرقابل بازگشت، چشمگیر خواهد بود [۱۰]. با بررسی‌های صورت گرفته روی عملکرد دمای بالای بتن مبتنی بر سیمان کلسیم آلومینات، گزارش شد که با افزایش دما افت مقاومت فشاری بتن مبتنی بر سیمان کلسیم آلومینات از بتن معمولی کمتر بود. اگرچه هر دو نوع بتن افت مقاومت فشاری مشابه و قابل توجهی را در دمای بالای ۶۰۰ درجه سلسیوس نشان دادند. همچنین با ملاحظات بصری صورت گرفته روی دو بتن مذکور آسیب فیزیکی و ریزساختاری کمتری نسبت به بتن معمولی، در بتن مبتنی بر سیمان کلسیم آلومینات تحت دمای‌های بالا مشاهده گردید [۹]. افزودن یک نوع الیاف به مخلوط بتن فقط می‌تواند باعث تقویت یک خاصیت خاص از خواص مکانیکی شده و در عین حال ممکن است باعث ضعف در برخی دیگر از ویژگی‌های بتن شود که با افزودن دو یا چند نوع الیاف می‌توان بر این ضعف‌ها غلبه کرد. بنابراین بررسی عملکرد بتن حاوی الیاف ترکیبی با توجه به کمبود مطالعات در این زمینه ضروری به نظر می‌رسد.

پیرو مطالعات محققان پیشین که در سال ۱۹۷۰ روی اثر دما بر مقاومت بتن انجام دادند، تعدادی پژوهش مرتبط با مقاومت حرارتی بتن انجام گرفت. در ابتدا تحقیقات بر روی تغییرات فیزیکی و شیمیایی بتن، همچون تجزیه کلسیم هیدرات  $Ca(OH)_2$ ، عدم چسبندگی سنگدانه - سیمان و کریستاله شدن کوارتز ( $SiO_2$ ) متمرکز بود. از سال ۱۹۷۰ اثر عوامل مختلف محیطی و مصالح بر مقاومت حرارتی بتن، از جمله به کارگیری سنگدانه‌های پایدار حرارتی، در بتن در معرض دماهای بالا بررسی شد [۱۱].

هنوز درک کاملی از پارامترهای کنترل‌کننده ترک‌یدن انفجاری وجود ندارد. یک درک کلی این است که علت این ترک‌یدن انفجاری، عدم توانایی بتن با مقاومت بالا برای انتقال فشار داخلی ایجاد شده از تبخیر آب آزاد و شیمیایی با افزایش دماست. هیچ یک از آیین‌نامه‌های ساختمانی این رفتار خاص بتن با مقاومت بالا را پوشش نداده‌اند [۱۲]. بنابراین اطلاع دقیق از رفتار این بتن در برابر آتش بسیار مهم است تا در فرآیند طراحی، امکان تامین سطح لازم ایمنی در برابر آتش وجود داشته باشد. تحقیقات زیادی برای ارائه فناوری-

هایی که باعث محافظت بتن در برابر آتش شوند، انجام شده است. از بین آن‌ها استفاده از الیاف پلی پروپیلن، موفقیت آمیز نشان داده شده است. الیاف پلی پروپیلن تقریباً در ۱۷۰ درجه سلسیوس ذوب می‌شوند، درحالی‌که گسیختگی بتن در دمای بین ۱۹۰ تا ۲۵۰ درجه سلسیوس رخ می‌دهد [۱۳]. ذوب شدن پلی پروپیلن و جذب جزئی آن توسط خمیر سیمان باعث ایجاد مسیریابی برای عبور گاز می‌شود. با ایجاد شبکه‌ای از این مسیرها، گازهای ایجاد شده در بافت بتن، می‌تواند به بیرون راه یافته و از بالا رفتن فشار جلوگیری کند. افزودن الیاف پلی پروپیلن بصورت محسوس باعث افزایش میزان مقاومت خمشی پسماند و مقاومت جداسازی بتن حتی پس از مجاورت دماهای بالا می‌گردد [۱۴]، و نفوذپذیری بتن را حداقل سه تا چهار برابر در دماهای تا کمتر از ۱۴۰ درجه افزایش می‌دهد [۱۵]. معمولاً استفاده از الیاف پلی پروپیلن به میزان ۰,۱ تا ۰,۵ درصد از حجم بتن برای بهبود عملکرد آن در دماهای بالا پیشنهاد می‌شود [۱۴]، [۱۶]، [۱۷].

استفاده از الیاف پلی پروپیلن برای جلوگیری از گسیختن بتن‌های توانمند در دماهای بالا، اولین بار در سال ۱۹۸۲ توسط کرشل [مکاتبات شخصی هرتس با کرشل، طبق مرجع ۱۸] پیشنهاد شد، اما هرتس [۱۸] در آن هنگام، آن را اساساً به عنوان یک موضوع تحقیقاتی رد کرد، زیرا بنا به نظر وی اولاً چگونگی خروج فاز مذاب پلی پروپیلن از محل آن در بتن جای تردید داشته و ثانیاً با توجه به نظریه‌های موجود، گسیختگی انفجاری از ریزساختار بتن آغاز می‌شود که بسیار کوچکتر از فاصله بین الیاف است. با وجود این، تجربیات مختلف سودمندی استفاده از الیاف پلی پروپیلن در جلوگیری از ترکیدن بتن را نشان داد. پس از اثبات عملی سودمندی الیاف پلی پروپیلن، هرتس نظریه دیگری را ارائه کرد که بر آن اساس با ذوب شدن الیاف، مقاومت کششی بتن کاهش می‌یابد، در نتیجه در عمق بتن ترک‌های حرارتی ایجاد می‌شود که باعث اعمال تنش‌های فشاری حرارتی (که دلیل گسیختگی بتن هستند) می‌گردد [۱۸]. ساختمان مرکز ژاپن در فرانکفورت، اولین ساختمانی است که از بتن توانمند مسلح به الیاف پلی پروپیلن ساخته شد [۱۹].

چو و همکاران [۲۰]، رابطه بین فشار بخار و کرنش ناشی از انبساط حرارتی بتن حرارت دیده را بررسی، و ترک‌هایی در نمونه‌های حرارت دیده در دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس مشاهده کردند. همچنین در سطح نمونه‌های بتنی توانمند تقویت شده با الیاف فولادی که در دماهای کمتر از ۳۰۰ درجه سلسیوس حرارت دیده بودند ترکی رویت نکردند اما در سطح نمونه‌هایی که در دماهای بالاتر از ۵۰۰ درجه حرارت دیده بودند ترک‌هایی بوجود آمده بود. بنابراین، افزایش شدید کرنش انبساط حرارتی در دمای بیش از ۴۰۰ درجه سلسیوس ممکن است منجر به ایجاد ترک‌ها بر اثر حرارت دادن شود.

تان و همکاران [۲۱] در مطالعاتی در این راستا، تاثیر درجه حرارت‌های بالا تا ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد را بر خصوصیات پسماند یک نوع بتن سبک مبتنی بر سیمان پرتلند را بررسی و افت بین ۵۰ تا ۷۰ درصدی در مقاومت فشاری بتن، پس از قرار گرفتن در معرض بیش‌ترین درجه حرارت گزارش کردند. کمپوزیت‌های سیمانی مبتنی بر سیمان آمیخته (سیمان پرتلند و خاکستر بادی) حاوی الیاف ترکیبی PVA و فولادی، توسط لیو و همکاران [۲۲] مورد آزمایش قرار گرفت. آن‌ها افت ۵۰ درصدی را در مقاومت فشاری بتن پس از مجاورت دمای ۸۰۰ درجه سلسیوس، با وجود استفاده از ماسه سیلیسی و سیمان پرتلند مشاهده کردند، که آن را می‌توان احتمالاً ناشی از اثر مثبت پوزولان خاکستر بادی و الیاف PVA دانست. بودنارووا و همکاران [۲۳]، رفتار کمپوزیت‌های مبتنی بر سیمان آمیخته (سیمان و پوزولان) با سنگدانه‌های بازالت یا سبک و تقویت شده با الیاف پلی پروپیلن و فولادی را بررسی کردند و یک افت در محدوده ۴۲ تا ۶۵ درصدی در مقاومت فشاری ناشی از بارگذاری در دمای ۸۰۰ درجه سلسیوس گزارش دادند. اخیراً مدل‌هایی نیز برای شبیه‌سازی رفتار مصالح تقویت شده با الیاف در دماهای بالا، ارائه شده است [۲۴-۲۶].

هدف از این پژوهش بررسی رفتار حرارتی بتن الیافی مبتنی بر سیمان کلسیم آلومینات IRC40، که دارای مدول الاستیسیته، مقاومت و سختی فشاری بیشتر نسبت به سیمان پرتلند در دماهای بین ۲۰ تا ۸۰۰ درجه سلسیوس است می‌باشد. همچنین سعی شده در پایان آزمایش‌ها درصد بهینه الیاف ترکیبی پلی پروپیلن - فولادی، در هر آزمایش بصورت مجزا تعیین گردد. در این راستا علاوه بر مقاومت فشاری، سایر مشخصات مکانیکی که در بحث رفتار حرارتی بتن کمتر مورد بررسی قرار گرفته‌اند، شامل مقاومت کششی و مقاومت خمشی همراه با اندازه‌گیری جذب انرژی در نمونه‌های خمشی، پس از مجاورت دماهای ۱۱۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ درجه سلسیوس اندازه‌گیری و تحلیل شد.

## ۲- برنامه آزمایشگاهی

## ۲-۱- خصوصیات مصالح

به منظور ساخت نمونه‌های بتنی از سنگدانه‌های شکسته اطراف شهر خرم‌آباد با حداکثر اندازه ۱۹ میلی‌متر، دانه‌بندی شده طبق استاندارد ASTM C33 استفاده شده است. در این تحقیق از سیمان کلسیم آلومینات IRC40 با مشخصات مندرج در جدول ۱ استفاده شد. خصوصیات الیاف فولادی دو سر قلاب در جدول ۲ و خصوصیات الیاف پلی‌پروپیلن در جدول ۳ ارائه شده است. همچنین به منظور کاهش مصرف آب و افزایش کارایی مخلوط بتن، از یک فوق روان‌کننده با نام تجاری Dezobuild D-10 استفاده گردید.

جدول ۱: مشخصات شیمیایی و فیزیکی سیمان کلسیم آلومینات IRC40

خصوصیات شیمیایی	
MgO	<۱
Ti <sub>2</sub> O	<۴
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۱۵ - ۱۸
CaO	۳۷ - ۳۹
Si <sub>2</sub> O	۴ - ۵
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۳۷ - ۴۰
خصوصیات فیزیکی	
وزن مخصوص (gr/cm <sup>3</sup> )	۳,۲ - ۳,۳
مساحت سطح ویژه (cm <sup>2</sup> /gr)	۲۱۰۰ - ۲۸۰۰

جدول ۲: خصوصیات الیاف فولادی

نوع الیاف	طول (cm)	L/D	چگالی (Kg/m <sup>3</sup> )	مدول یانگ (GPa)	مقاومت کششی (MPa)
فولادی دو سر قلاب	۳,۵	۴۳,۷۵	۷۸۵۰	۲۰۰	۱۱۰۰

جدول ۳: خصوصیات الیاف پلی‌پروپیلن

نوع الیاف	طول (cm)	دمای ذوب (°C)	چگالی (Kg/m <sup>3</sup> )	قطر (mm)	مقاومت کششی (MPa)
پلی پروپیلن	۱,۲	۱۷۰	۹۱۰	۰,۰۲	۴۰۰

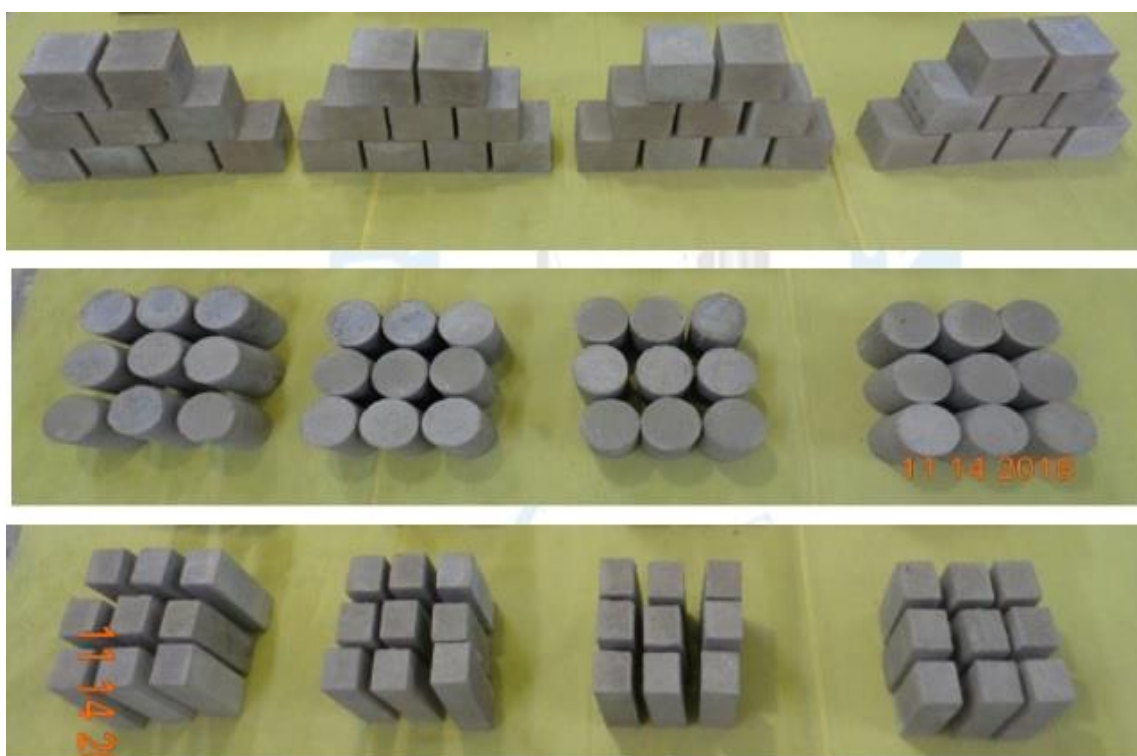
## ۲-۲- آماده‌سازی نمونه‌ها

در این تحقیق از ۴ طرح اختلاط بر اساس الیاف ترکیبی فولادی - پلی‌پروپیلن در ساخت نمونه‌ها استفاده شد. از الیاف ترکیبی با درصدهای ۰، ۰,۵، ۱ و ۱,۵ درصد حجم بتن و به نسبت ۷۵٪ الیاف فولادی و ۲۵٪ الیاف پلی‌پروپیلن، که با توجه به مطالعات پیشین [۲۷] و [۲۸] دارای بهترین عملکرد در بین سایر نسبت‌های ترکیب است، در ساخت بتن استفاده گردید. جهت ساخت نمونه‌ها پس از ترکیب مصالح خشک و الیاف ترکیبی، ۹۰ درصد آب بصورت تدریجی به مخلوط اضافه و ۱۰ درصد آب باقیمانده همراه با محلول فوق‌روان-کننده اضافه شد. پس از همگن شدن مخلوط آزمایش اسلامپ بر روی بتن تازه انجام شده، سپس قالب‌گیری نمونه‌ها انجام شد. به منظور تعیین خصوصیات مکانیکی نمونه‌های ساخته با این طرح اختلاط‌ها، برای هر دما از هر طرح اختلاط ۳ نمونه مکعبی با اضلاع ۱۰ سانتی‌متر، ۳ نمونه استوانه‌ای با قطر ۱۰ و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر و ۳ نمونه تیر منشوری به ابعاد ۳۲×۸×۶ سانتی‌متر ساخته شد. بر روی نمونه‌های

مکعبی، استوانه‌ای و تیر منشوری به ترتیب، آزمایش مقاومت فشاری بر اساس استاندارد ASTM C39، مقاومت کششی طبق استاندارد ASTM C496 و مقاومت خمشی مطابق ASTM C293 انجام شد. جزئیات طرح اختلاط‌های مورد استفاده جهت ساخت نمونه‌ها در جدول ۴ ارائه شده است. شکل ۱ نمونه‌های ساخته شده برای آزمایش‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۴: طرح اختلاط‌های استفاده شده در ساخت یک متر مکعب مخلوط بتن

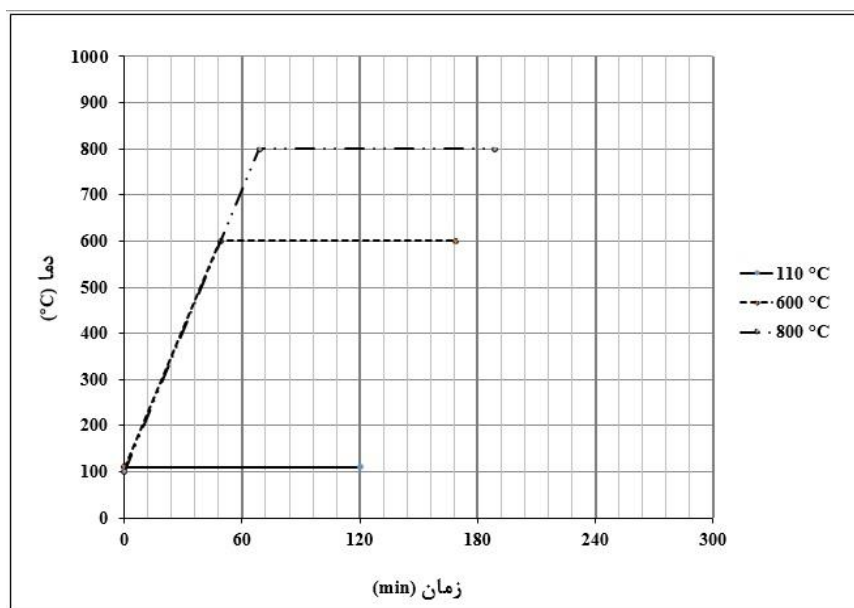
شماره	طرح اختلاط	آب (kg)	سیمان کلسیم آلومینات (kg)	درشت‌دانه (kg)	ریزدانه (kg)	الیاف فولادی (kg)	الیاف پلی‌پروپیلن (kg)	فوق روان‌کننده (kg)
۱	CAC - 0F	۲۲۶,۴	۵۶۶	۹۱۸	۶۶۷	۰	۰	۱,۱۳
۲	CAC - 0.5F	۲۲۶,۴	۵۶۶	۹۱۸	۶۶۷	۲۹,۴۴	۱,۱۴	۱,۱۳
۳	CAC - 1F	۲۲۶,۴	۵۶۶	۹۱۸	۶۶۷	۵۸,۸۸	۲,۲۸	۱,۱۳
۴	CAC - 1.5F	۲۲۶,۴	۵۶۶	۹۱۸	۶۶۷	۸۸,۳۲	۳,۴۲	۱,۱۳



شکل ۱: نمایی از نمونه‌های ساخته شده

## ۳-۲- عمل‌آوری و حرارت‌دهی

پس از گذشت ۲۴ ساعت از قالب‌گیری، نمونه‌ها از قالب خارج و برای عمل‌آوری به مدت ۲۸ روز درون حوضچه‌های آب قرار داده شدند. پس از پایان این مدت، نمونه‌ها از حوضچه‌های آب خارج و برای هوا خشک شدن، چند روز در معرض هوا محیط قرار گرفتند تا رطوبت موجود در سطح نمونه‌ها خشک گردد. در بخش‌های مربوط به حرارت‌دهی نمونه‌ها مانند: زمان نگه داشتن نمونه‌ها در هر دما، روند افزایش دما و ... از دستورالعمل‌های RIELM استفاده شد [۲۹ و ۳۰]. برای حذف کامل رطوبت سطح و درون نمونه‌ها پس از هوا خشک شدن، به مدت ۲۴ ساعت درون دستگاه آون الکتریکی با دمای ۱۱۰ درجه سلسیوس قرار گرفتند تا با تبخیر کامل رطوبت، مهیای قرار گرفتن در دماهای بالا شوند. برای حرارت‌دهی نمونه‌ها در دماهای بالا از کوره الکتریکی، با حجم محفظه حرارت‌دهی ۳۲ لیتر و حداکثر دمای کاری ۱۲۰۰ درجه سلسیوس استفاده شد. در این مرحله از حرارت‌دهی، نمونه‌های با دمای ۱۱۰ درجه سلسیوس از آون خارج و مستقیماً به کوره الکتریکی منتقل می‌شدند. از نرخ حرارت‌دهی ثابت و یکنواخت ۱۰ درجه سلسیوس در دقیقه برای رسیدن دمای کوره تا دماهای ۱۱۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ درجه سلسیوس استفاده شد و نمونه‌ها به مدت ۲ ساعت در هر دما قرار گرفتند تا دمای بتن در کلیه نقاط نمونه با دمای درون کوره یکسان گردد. پس از دو ساعت کوره خاموش شده و به منظور کاهش دمای تدریجی و یکنواخت و جلوگیری از وارد شدن تنش‌های حرارتی ناشی از سرد شدن سریع در محیط خارج کوره، نمونه‌ها پس از ۲۴ ساعت، و پس از رسیدن دمای آن‌ها به دمای اتاق از کوره خارج شدند. شکل ۲ نمودار حرارت‌دهی نمونه‌ها در دماهای بالا و شکل ۳ کوره الکتریکی مخصوص دماهای بالا را نشان می‌دهد.



شکل ۲: نمودار حرارت‌دهی نمونه‌ها



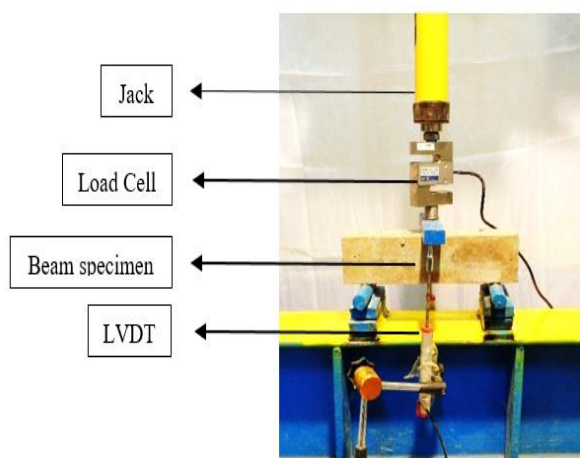
شکل ۳: کوره الکتریکی مخصوص دماهای بالا

## ۴-۲- آزمایش بتن تازه

بر روی بتن تازه، آزمایش اسلامپ با استفاده از مخروط ناقص آبرام و مطابق با استاندارد ASTM C143، صورت گرفت.

## ۵-۲- آزمایش‌های بتن سخت شده

برای ارزیابی مقدار مقاومت فشاری نمونه‌های حرارت‌دیده همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده است، از جک بتن‌شکن با ظرفیت ۲۰۰۰ کیلونیوتن استفاده شد. مقاومت فشاری بر اساس استاندارد ASTM C39 انجام پذیرفت. در این آزمایش مقدار حداکثر مقاومت فشاری تحمل شده در هر نمونه برداشت، و مقدار میانگین مقاومت فشاری ۳ نمونه هر طرح اختلاط در هریک از دماها، به عنوان مقاومت فشاری آن طرح اختلاط در آن دما گزارش گردید. آزمایش مقاومت کششی بر اساس استاندارد ASTM C496 با استفاده از جک بتن‌شکن، و با روش دو نیم شدن بر روی نمونه‌های حرارت‌دیده انجام گرفت. برای تعیین مقدار مقاومت خمشی هر یک از نمونه‌های حرارت‌دیده طبق استاندارد ASTM C293 عمل شد. در این آزمایش همانطور که در شکل ۵ نشان داده شده است با استفاده از جک خمشی بار بر مرکز دهانه هریک از تیرهای منشوری شکل وارد، و تا لحظه گسیختگی نمونه این بار به آرامی افزایش یافت. به منظور ترسیم منحنی‌های نیرو - جابه‌جایی و محاسبه مقادیر جذب انرژی توسط هریک از تیرها، حسگرهایی برای ثبت جابه‌جایی خطی در هر لحظه از بارگذاری خمشی، در طرفین تیرها تعبیه گردید.



شکل ۵: جزئیات آزمایش مقاومت خمشی



شکل ۴: جک بتن‌شکن

## ۳- نتایج آزمایش‌ها

## ۱-۳- نتایج آزمایش اسلامپ بتن تازه

در جدول ۵ نتایج آزمایش اسلامپ برای هر ۴ طرح اختلاط CAC1.5F و CAC1F، CAC0.5F، CAC-0F که به ترتیب بتن‌های با ۰، ۵، ۱۰، ۱۵ درصد الیاف ترکیبی می‌باشند ارائه شده است. بیشترین مقدار اسلامپ برابر با ۲۱ سانتی‌متر برای طرح اختلاط CAC - 0F و کمترین مقدار آن ۱۰ سانتی‌متر بمرحله به طرح اختلاط CAC - 1.5F بود. با وجود اینکه مقدار اسلامپ در طرح اختلاط CAC - 1.5F از نصف بیشترین مقدار اسلامپ هم کمتر بود ولی میزان کارایی خیلی با طرح اختلاط فاقد الیاف تفاوتی نداشت، که می‌تواند عدم قطعیت آزمایش اسلامپ در نشان دادن کلیه جنبه‌های کارایی بتن را تأیید کند. شکل ۶ انجام آزمایش اسلامپ را نشان می‌دهد.



جدول ۵: نتایج آزمایش اسلامپ

شماره	طرح اختلاط	اسلامپ (cm)
۱	CAC - 0F	۲۱
۲	CAC - 0.5F	۱۸
۳	CAC - 1F	۱۳
۴	CAC - 1.5F	۱۰



شکل ۶: انجام آزمایش اسلامپ

## ۳-۲- نتایج آزمایش مقاومت فشاری

نتایج آزمایش مقاومت فشاری برای هر طرح اختلاط و در هر دما، با استفاده از میانگین نتایج این آزمایش برای ۳ نمونه ساخته شده برای هر طرح اختلاط محاسبه گردید. جدول ۶ نتایج این آزمایش را همراه با مقدار افت مقاومت در نمونه‌های ۶۰۰ و ۸۰۰ درجه نسبت به نمونه‌های ۱۱۰ درجه نشان می‌دهد.

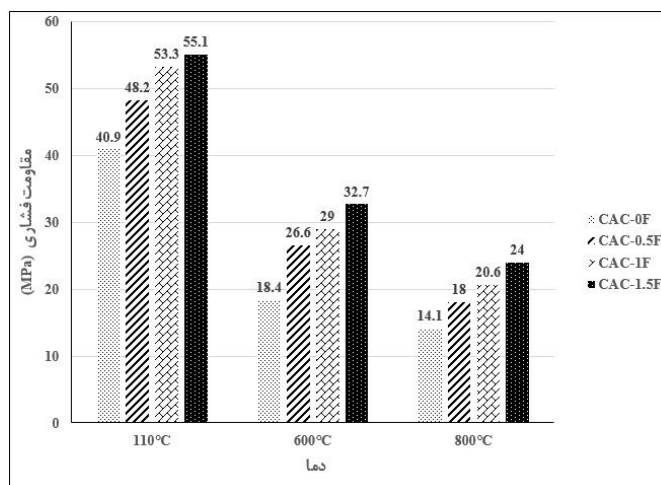
جدول ۶: نتایج آزمایش مقاومت فشاری (MPa)

شماره	طرح اختلاط	دمای ۱۱۰°C	دمای ۶۰۰°C	درصد افت مقاومت نسبت به دمای ۱۱۰°C	دمای ۸۰۰°C	درصد افت مقاومت نسبت به دمای ۱۱۰°C
۱	CAC - 0F	۴۰،۹	۱۸،۴	۵۵	۱۴،۱	۶۵،۵
۲	CAC - 0.5F	۴۸،۲	۲۶،۶	۴۴،۸	۱۸	۶۲،۷
۳	CAC - 1F	۵۳،۳	۲۹	۴۵،۶	۲۰،۶	۶۱،۴
۴	CAC - 1.5F	۵۵،۱	۳۲،۷	۴۰،۷	۲۴	۵۶،۴

در دماهای ۱۱۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ درجه سلسیوس، بیشترین مقدار مقاومت فشاری به ترتیب برابر ۵۵،۱، ۲۲،۷ و ۲۴ مگاپاسکال، و هر سه مقدار مربوط به طرح اختلاط CAC - 1.5F بود. در دو دمای ۶۰۰ و ۸۰۰ درجه سلسیوس، بیشترین افت مربوط به نمونه‌های بدون الیاف مشاهده شد. شکل ۷ مقایسه نتایج مقاومت فشاری در دماهای مختلف را نشان می‌دهد. در اثر افزایش دما و با زوال خمیر بتن و افزایش درصد تخلخل نمونه، نقش الیاف فولادی در جلوگیری از خرد شده بتن قابل ملاحظه بود. در این پژوهش افت مقاومت فشاری ۵۵ و ۶۵،۵ درصدی به ترتیب در دماهای ۶۰۰ و ۸۰۰ درجه سلسیوس نسبت به دمای ۱۱۰ درجه سلسیوس در بتن فاقد الیاف مشاهده شد که به نتایج تحقیقی که توسط برادران و نعمت‌زاده [۳۱] بر روی همین طرح اختلاط و دماهای یکسان صورت گرفته بود و برای دماهای مذکور افت ۵۰ و ۷۱ درصد ثبت شده بود، نزدیک بود. شکل ۸ تعدادی از نمونه‌های فشاری آزمایش شده را نشان می‌دهد.



شکل ۸: نمونه‌های فشاری تست شده



شکل ۷: مقایسه اثر الیاف بر نتایج آزمایش مقاومت فشاری

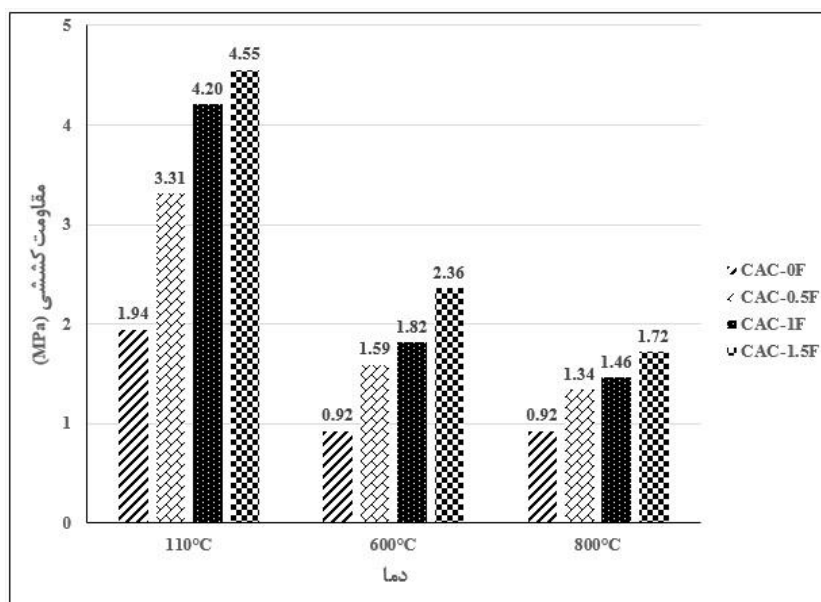
### ۳-۳- نتایج آزمایش مقاومت کششی

نتایج آزمایش مقاومت کششی برای هر طرح اختلاط و در هر دما، با استفاده از روش مقاومت تا دو نیم شدن، و از میانگین نتایج این آزمایش برای ۳ نمونه ساخته شده برای هر طرح اختلاط محاسبه گردید. جدول ۷ نتایج این آزمایش را همراه با مقدار افت مقاومت کششی در نمونه‌های ۶۰۰ و ۸۰۰ درجه نسبت به نمونه‌های ۱۱۰ درجه نشان می‌دهد.

جدول ۷: نتایج آزمایش مقاومت کششی (MPa)

شماره	طرح اختلاط	دمای ۱۱۰°C	دمای ۶۰۰°C	درصد افت مقاومت نسبت به دمای ۱۱۰°C	دمای ۸۰۰°C	درصد افت مقاومت نسبت به دمای ۱۱۰°C
۱	CAC-0F	۱۹,۹۴	۰,۹۲	۵۲,۵	۰,۹۲	۵۲,۵
۲	CAC-0.5F	۳,۳۱	۱,۵۹	۵۱,۹	۱,۳۴	۵۹,۶
۳	CAC-1F	۴,۲	۱,۸۲	۵۶,۸	۱,۴۶	۶۵,۲
۴	CAC-1.5F	۴,۵۵	۲,۳۶	۴۸,۳	۱,۷۲	۶۲,۲

با توجه به نتایج آزمایش مقاومت کششی، نقش الیاف در جهش قابل توجه مقاومت در نمونه‌های الیافی خصوصاً نمونه‌های با بیشترین مقدار الیاف، CAC-1.5F بسیار چشمگیر بود، بیشترین اثر در این افزایش مقاومت مربوط به الیاف‌های فولادی می‌باشد، چون بواسطه نقشی که در ایجاد دوختگی در محل گسیختگی ایفا می‌کند، باعث جلوگیری از گسترش ترک‌ها می‌شود. وجود الیاف در بهترین حالت باعث افزایش بیش از ۲,۵ برابری مقاومت کششی در دمای ۶۰۰ درجه در نمونه با ۱,۵ درصد الیاف نسبت به نمونه فاقد الیاف شده است. در پژوهشی که توسط خلیق و همکاران [۹] روی خصوصیات مکانیکی و سایر تغییرات ریزساختاری و ظاهری بتن کلسیم آلومینات در دماهای بالا تا ۸۰۰ درجه سلسیوس صورت گرفت، در مقاومت کششی بتن افت مقاومت ۵۰ و ۶۵ درصدی در دمای ۶۰۰ و ۸۰۰ درجه نسبت به دمای ۱۱۰ سلسیوس ثبت گردید که تا حدود زیادی با نتایج بدست آمده برای بتن فاقد الیاف در این مطالعه و کاهش بیش از نیمی از مقاومت کششی در دو دمای ۶۰۰ و ۸۰۰ درجه نسبت به دمای ۱۱۰ درجه نزدیک بود. شکل ۹ مقایسه بین مقدار مقاومت کششی مربوط به هر سطح الیاف ترکیبی در هر دما را نشان می‌دهد.



شکل ۹: مقایسه اثر الیاف بر نتایج مقاومت کششی

#### ۳-۴- نتایج آزمایش مقاومت خمشی

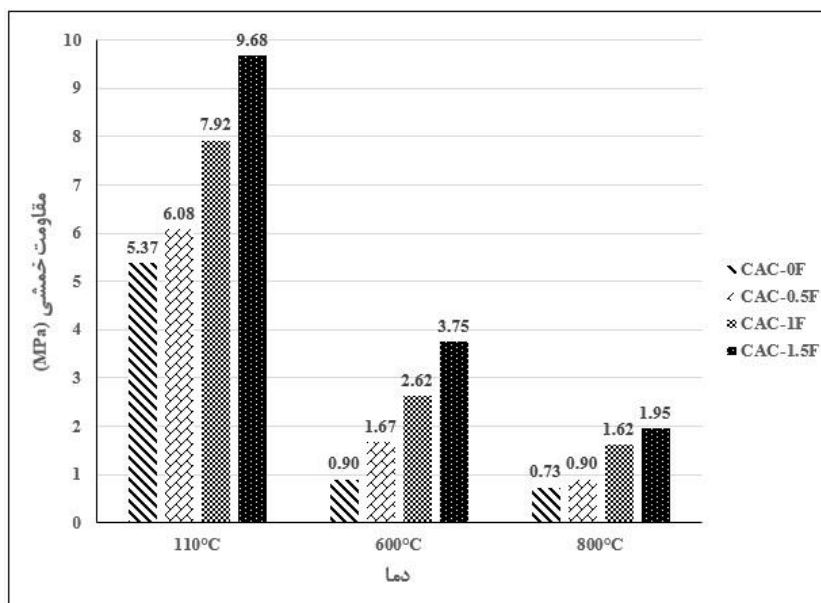
نتایج آزمایش مقاومت خمشی برای هر طرح اختلاط و در هر دما، با استفاده از میانگین نتایج این آزمایش برای ۳ نمونه ساخته شده برای هر طرح اختلاط در جدول ۸ نشان داده شده است. در این جدول همچنین مقادیر افت مقاومت خمشی در نمونه‌های ۶۰۰ و ۸۰۰ درجه نسبت به نمونه‌های ۱۱۰ درجه نشان داده شده است.

جدول ۸: نتایج آزمایش مقاومت خمشی (MPa)

شماره	طرح اختلاط	دمای ۱۱۰°C	دمای ۶۰۰°C	درصد افت مقاومت نسبت به دمای ۱۱۰°C	دمای ۸۰۰°C	درصد افت مقاومت نسبت به دمای ۱۱۰°C
۱	CAC-0F	۵,۳۷	۰,۹	۸۳,۲	۰,۷۳	۸۶,۴
۲	CAC-0.5F	۶,۰۸	۱,۶۷	۷۲,۶	۰,۹	۸۵,۲
۳	CAC-1F	۷,۹۲	۲,۶۲	۶۶,۹	۱,۶۲	۷۹,۶
۴	CAC-1.5F	۹,۶۸	۳,۷۵	۶۱,۳	۱,۹۵	۷۹,۸

نتایج آزمایش مقاومت فشاری نشان می‌دهد که در هر ۳ دمای آزمایش، بیشترین مقدار مقاومت خمشی متعلق به طرح اختلاط CAC-1.5F می‌باشد که برای دماهای ۱۱۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ درجه سلسیوس به ترتیب ۹,۶۸، ۳,۷۵ و ۱,۹۵ مگاپاسکال تعیین شده است. مانند مقاومت کششی، نقش الیاف در نمونه‌های خمشی هم بسیار محسوس بود. اثر الیاف در دمای ۶۰۰ درجه نمود بیشتری داشت، در این دما مقاومت خمشی در نمونه حاوی ۱,۵ درصد الیاف ترکیبی بیش از ۴ برابر در نمونه بدون الیاف بود. در نمونه‌های الیافی متناسب با افزایش درصد الیاف، میزان افت سریع مقاومت که در نمونه‌های فاقد الیاف پس از رسیدن به حد نهایی مقاومت اتفاق می‌افتاد، کاهش یافت. افزایش دما از ۱۱۰ به ۶۰۰ و ۸۰۰ درجه سلسیوس مقاومت خمشی را به ترتیب به میزان حدود ۸۳ و ۸۶ درصد در نمونه فاقد الیاف، و حدود ۶۷ و ۸۰ درصد در نمونه با ۱ درصد الیاف ترکیبی کاهش داد که علی‌رغم عدم وجود مطالعات کافی و با شرایط یکسان در این زمینه، در تحقیقی که توسط لاو و انسون [۳۳] روی بتنی با مقاومت فشاری مشابه و دماهای یکسان با این پژوهش صورت گرفته است، افت مقاومت خمشی ۷۰ و ۸۵ درصد در نمونه فاقد الیاف و ۶۷ و ۸۷ درصد در نمونه با ۱ درصد الیاف به ترتیب برای دو دمای ۶۰۰ و ۸۰۰ درجه

نسبت به دمای ۱۱۰ درجه سلسیوس مشاهده شد که می تواند نقش مخرب افزایش دما در عملکرد انواع بتن را نشان دهد. شکل ۱۰ مقایسه بین مقادیر مقاومت خمشی مربوط به هر طرح اختلاط و هر دما را بصورت جداگانه نشان می دهد.



شکل ۱۰: مقایسه اثر الیاف بر نتایج مقاومت خمشی

### ۵-۳- نتایج جذب انرژی تیرهای خمشی

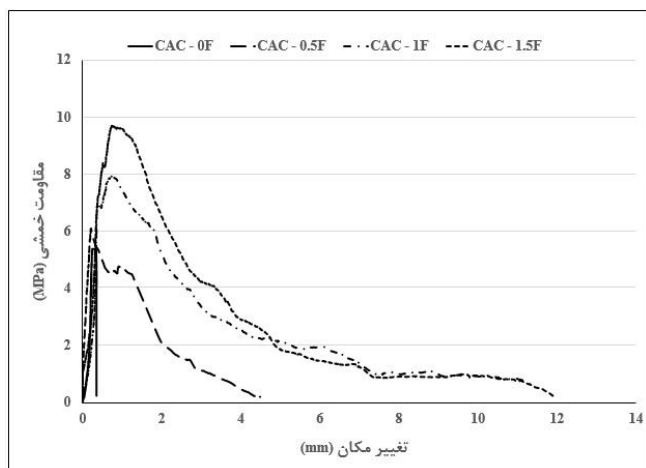
نتایج پارامتر جذب انرژی برای تیرهای خمشی با استفاده از منحنی نیرو - تغییر مکان ترسیم شده برای هر طرح اختلاط و در هر دما، در جدول ۹ نشان داده شده است. در این جدول همچنین مقادیر افت جذب انرژی در نمونه های ۶۰۰ و ۸۰۰ درجه نسبت به نمونه های ۱۱۰ درجه نشان داده شده است.

جدول ۹: نتایج جذب انرژی تیرهای خمشی (KJ)

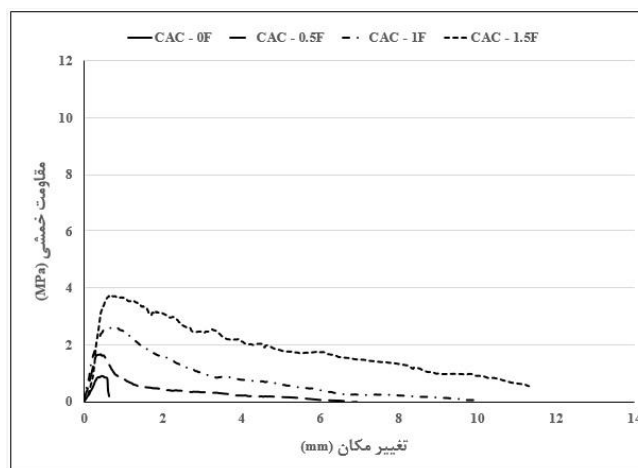
شماره	طرح اختلاط	دمای ۱۱۰°C	دمای ۶۰۰°C	درصد افت مقاومت نسبت به دمای ۱۱۰°C	دمای ۸۰۰°C	درصد افت مقاومت نسبت به دمای ۱۱۰°C
۱	CAC-0F	۸,۲۰	۰,۴۱	۹۵	۰,۸۴	۸۹,۸
۲	CAC-0.5F	۱۲,۵۵	۲,۸۵	۷۷,۳	۱,۶۵	۸۶,۹
۳	CAC-1F	۳۷,۲۵	۸,۶۶	۷۶,۸	۳,۸۶	۸۹,۶
۴	CAC-1.5F	۴۰,۵۳	۲۳,۵۵	۴۱,۹	۶,۴۴	۸۴,۱

در محاسبه پارامتر جذب انرژی به وضوح نقش بسیار زیاد افزایش درجه حرارت در افت جذب انرژی به چشم خورد، بیشترین میزان افت در دمای ۸۰۰ درجه و مربوط به نمونه بدون الیاف بود که مقدار افت مقاومت حدود ۹۰ درصد را داشت. دلیل افزایش جذب انرژی در نمونه های الیافی، نقش آن ها در افزایش حداکثر مقدار نیروی تحمل شده و همچنین تاثیر آن ها در تغییر نوع شکست، از شکست ترد نمونه های بدون الیاف و افت مقاومت سریع آن ها به شکست نرم در نمونه های الیافی و افت تدریجی مقاومت بود. در واقع وجود الیاف در نمونه خمشی باعث دوختگی در محل گسیختگی و مقاومت در برابر گسترش ترک شد. شکل ۱۱، شکل ۱۲ و شکل ۱۳، منحنی های نیرو

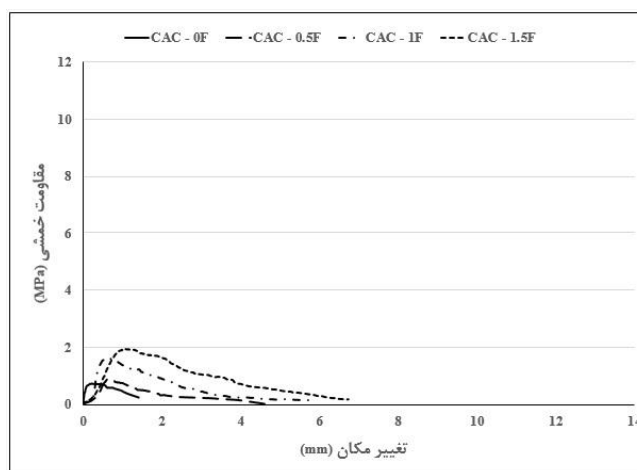
– تغییر مکان کلیه نمونه‌ها را، به ترتیب در دماهای ۱۱۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ درجه سلسیوس نشان می‌دهد. در هر ۳ دما، منحنی‌های مربوط به طرح اختلاط CAC – 1.5F، دارای بیشترین مقاومت و همچنین بیشترین مقدار جابه‌جایی هستند.



شکل ۱۱: منحنی‌های نیرو – تغییر مکان دمای ۱۱۰ درجه سلسیوس



شکل ۱۲: منحنی‌های نیرو – تغییر مکان دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس



شکل ۱۳: منحنی‌های نیرو – تغییر مکان دمای ۸۰۰ درجه سلسیوس

### ۳-۶- ملاحظات بصری

پس از حرارت‌دهی در درجه حرارت‌های بالا و پایان زمان ۲۴ ساعته سرد شدن نمونه‌ها، ملاحظه شد که همزمان با بالا رفتن دمای نمونه‌ها، رشد ترک‌ها، بازشدگی‌ها و فروریختگی‌ها در نمونه‌ها افزایش پیدا کرده است. در دمای ۱۱۰ درجه تقریباً هیچگونه ترک یا فروریختگی در نمونه‌های الیافی و فاقد الیاف مشاهده نشد ولی در نمونه‌های مربوط به دمای ۶۰۰ درجه، ترک‌های ریز قابل رویت بود. افزایش تعداد ترک‌ها و بازشدگی دهانه آن‌ها در نمونه‌های دمای ۸۰۰ درجه سلسیوس بسیار محسوس بود، همچنین در برخی نمونه‌ها فروریختگی‌هایی در گوشه‌ها مشاهده گردید که نشان از تمرکز تنش‌های حرارتی در کنج‌ها دارد. رنگ نمونه‌های بتنی بر اثر افزایش درجه حرارت تغییر پیدا کرده بود که البته در نمونه‌های مربوط به دمای ۱۱۰ درجه سلسیوس این تغییر رنگ محسوس نبود ولی در نمونه‌های مربوط به نمونه‌های ۶۰۰ درجه سلسیوس رنگ بتن به قرمز متمایل شده بود که می‌توان آن را ناشی از وجود آهن در سنگدانه‌های سیلیسی دانست، همچنین در نمونه‌های ۸۰۰ درجه رنگ بتن به خاکستری روشن تبدیل شده بود. شکل ۱۴ روند گسترش ترک‌ها و تغییر رنگ بتن را در اثر افزایش درجه حرارت نشان می‌دهد.



شکل ۱۴: تغییر رنگ و گسترش ترک‌ها بر اثر افزایش درجه حرارت بتن

#### ۴- نتیجه گیری

در این تحقیق، خصوصیات مکانیکی شامل: مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مقاومت خمشی و میزان جذب انرژی تیرهای خمشی، در بتن ساخته شده از سیمان کلسیم آلومینات IRC40 و سنگدانه‌های سیلیسی، در قالب ۴ طرح اختلاط که در آن‌ها از الیاف ترکیبی فولادی - پلی پروپیلن به مقدار ۰،۵، ۱، ۱،۵ و درصد حجم بتن استفاده، و در مجاورت ۳ دمای ۱۱۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ درجه حرارت دیده بود، تعیین شد. مطابق نتایج حاصل از انجام آزمایش‌ها می‌توان موارد زیر را بیان نمود:

۱- بر اساس نتایج آزمایش مقاومت فشاری، همزمان با افزایش مقدار الیاف، مقدار مقاومت افزایش یافت و نمونه‌های دارای ۱،۵ درصد الیاف ترکیبی بیشترین مقادیر مقاومت فشاری را داشتند. تاثیر الیاف در دماهای ۶۰۰ و ۸۰۰ درجه همزمان با زوال خمیر بتن، در حفظ انسجام نمونه‌ها بیش تر بود. با افزایش درجه حرارت تا ۶۰۰ و ۸۰۰ درجه سلسیوس، مقدار میانگین افت مقاومت به ترتیب ۴۶ و ۶۱ درصد، نسبت به نمونه‌های ۱۱۰ درجه سلسیوس تعیین شد. بیش ترین افت مقاومت هر دما در نمونه‌های طرح اختلاط CAC - 0F مشاهده شد.

۲- مطابق با نتایج حاصل از تست مقاومت کششی و مقاومت خمشی، میزان تاثیر الیاف در افزایش مقاومت بسیار زیاد بود. بیشترین مقدار مقاومت در هر دو آزمایش در نمونه‌های با بیش ترین مقدار الیاف ترکیبی مشاهده شد. در نمونه‌های فاقد الیاف شکست ترد و افت مقاومت بسیار سریع صورت گرفت ولی متناسب با مقدار الیاف شکست نمونه نرم و افت مقاومت تدریجی گردید. در آزمایش مقاومت کششی مقدار میانگین افت مقاومت در دماهای ۶۰۰ و ۸۰۰ درجه سلسیوس به ترتیب حدود ۵۲ و ۶۰ درصد، و در آزمایش مقاومت خمشی میانگین افت مقاومت در این دو دما به ترتیب ۷۱ و ۸۳ درصد، نسبت به نمونه‌های ۱۱۰ درجه سلسیوس ثبت شد.

۳- افزایش دما بیشترین تاثیر را در پارامتر جذب انرژی و افت آن داشت. نقش افزودن الیاف به دلیل کاهش رشد ترک‌های مویی و فشار حفره توسط الیاف پلی پروپیلن و همچنین دوختگی بتن با الیاف فولادی در محل گسیختگی، در ارتقای سطح جذب انرژی بسیار قابل توجه بود. میانگین سطح جذب انرژی در دماهای ۶۰۰ و ۸۰۰ درجه سلسیوس، به ترتیب حدود ۷۳ و ۸۸ درصد، نسبت به نمونه‌های ۱۱۰ درجه سلسیوس کاهش نشان داد.

- ۴- متناسب با افزایش درجه حرارت، تعداد و بازشدگی ترک‌ها در نمونه‌ها افزایش می‌یابد. در نمونه‌های مربوط به دمای ۱۱۰ درجه سلسیوس هیچگونه ترک و فروریختگی مشاهده نشد، اما در نمونه‌های ۶۰۰ و ۸۰۰ درجه سلسیوس ترک‌هایی در سطح نمونه ایجاد شده بود که بازشدگی و تعداد آن‌ها در نمونه ۸۰۰ درجه بیشتر و حتی در موارد بدون الیاف فروریختگی‌هایی نیز بوجود آمده بود.
- ۵- در رنگ نمونه‌های با دمای ۱۱۰ درجه تغییر خاصی حاصل نشده بود اما در نمونه‌های حرارت دیده در دمای ۶۰۰ درجه، بتن به علت وجود آهن در سنگدانه‌های سیلیسی قرمز رنگ، و در دمای ۸۰۰ درجه به خاکستری متمایل شد.

## مراجع

- [1] Behbahani, H.P. Nematollahi, B. Mohd Sam, A.R. Lai, F. (2012). Flexural behavior of steel-fiber-added-RC (SFARC) beams with C30 and C50 classes of concrete. *International Journal of Sustainable Construction Engineering & Technology*, Volume 3, Pages 54-64.
- [2] J.-H. Lee, (2017). Influence of concrete strength combined with fiber content in the residual flexural strengths of fiber reinforced concrete. *Composite Structures*, Volume 168, Pages 216-225.
- [3] Hua, Yang. Hui, Zhao. Faqi, Liu. (2018). Residual Cube Strength of Coarse RCA Concrete after Exposure to Elevated Temperatures. *Fire and Materials Journal*, Volume 42, Pages 424-435.
- [4] Memon, S.A. Shah, S.F.A. Khushnood, R.A. Baloch, W.L. (2019). Durability of sustainable concrete subjected to elevated temperature—A review. *Constr. Build. Mater*, Volume 199, Pages 435–455.
- [5] Behfarnia, K. Shahbaz, M. (2018). The effect of elevated temperature on the residual tensile strength and physical properties of the alkali-activated slag concrete. *J. Build. Eng*, Volume 20, Pages 442–454.
- [6] Khaliq, W. Anis Khan, H. (2015). High temperature material properties of calcium aluminate cement concrete. *Constr. Build. Mater*, Volume 94, Pages 475–487.
- [7] Vejmelková, E. Černý, R. (2013). Thermal properties of PVA-Fiber reinforced cement composites at high temperatures. *mechanics and materials*, Volume 377, Pages 45-49.
- [8] Mohmel, S. (2001). The influence of microsilica on the course of hydration of monocalcium aluminate. In: *international conference on calcium aluminate cements*. Edinburg (Escocia), Pages 319–30.
- [9] Khaliq, W. Khan, H.A. (2015). High temperature material properties of calcium aluminate cement concrete. *Construction and Building Materials*, Volume 94, Pages 475-487.
- [10] Cree, D. Green, M. Noumowe, A. (2013). Residual strength of concrete containing recycled materials after exposure to fire: a review. *Construction and Building Materials*, Volume 45, Pages 208-223.
- [11] Lea, F.C. Stradling, R. (1922). The resistance to fire of concrete and reinforced concrete. *Journal of the Society of Chemical Industry Banner*, Volume 41, Pages 395R-396R.
- [12] Phan, L. T. (2002). High Strength Concrete at high temperature: An Overview. In: *Utilization of High Strength/High Performance Concrete*. Leipzig, Pages 501-518.
- [13] Kalifa, P. Menneteau, F. D. Quenard, D. (2000). Spalling and Pore Pressure in HPC at High Temperatures. *Cement and Concrete Research*, Volume 30, Pages 1915-1927.
- [14] Gao, D. Yan, D. Li, X. (2012). Splitting strength of GGBFS concrete incorporating with steel fiber and polypropylene fiber after exposure to elevated temperatures. *Fire Saf. J*. Volume 54, Pages 67–73.
- [15] Zeiml, M. Leithner, D. Lackner, R. Mang, H.A. (2006). How do polypropylene fibers improve the spalling behavior of in-situ concrete. *Cem Concr. Res*, Volume 36, Pages 929–942.
- [16] Shihada, S. (2011). Effect of polypropylene fibers on concrete fire resistance. *J. Civ. Eng. Manage*, Volume 17, Pages 259–264.
- [17] Aydın, S. Yazıcı, H. Baradan, B. (2008). High temperature resistance of normal strength and autoclaved high strength mortars incorporated polypropylene and steel fibers. *Constr. Build. Mater*, Volume 22, Pages 504–512.
- [18] Hertz, K. D. (2003). Limits of spalling of fire exposed concrete. *Fire Safety Journal*, Volume 38, Pages 103-116.
- [19] Kalifa, P. (2001). High temperature behavior of HPC with polypropylene fibers: from spalling to microstructure. *Cement and Concrete Research*, Volume 31, Pages 1487-1499.
- [20] Choe, G. Kim, G. Yoon, M. Hwang, E. Nam, J. Guncunski, N. (2019). Effect of moisture migration and water vapor pressure build-up with the heating rate on concrete spalling type. *Cement and Concrete Research*, Volume 116, Pages 1-10.
- [21] Tan, X. Chen, W. Wang, J. Yang, D. Qi, Y. Ma, Y. Wang, X. Ma, S. Li, Ch. (2017). Influence of high temperature on the residual physical and mechanical properties of foamed concrete, *Construction and Building Materials*, Volume 135, Pages 203-211.

- [22] Liu, J.-Ch. Tan, K.H. (2017). Fire resistance of strain hardening cementitious composite with hybrid PVA and steel fibers. *Construction and Building Materials*, Volume 135, Pages 600-611.
- [23] Bodnárová, L. Hroudová, J. Brožovsky, J. Zach, J. Valek, J. (2017). Behaviour of cement composites with lightweight and heavyweight aggregates at high temperatures. *Period. Polytech. Civ. Eng*, Volume 61, Pages 272-281.
- [24] Caggiano, A. Etse, G. (2015). Coupled thermo-mechanical interface model for concrete failure analysis under high temperature. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Volume 289, Pages 498-516.
- [25] Luccioni, B. et al. (2018). Experimental and numerical analysis of blast response of high strength fiber reinforced concrete slabs. *Engineering Structures*, Volume 175, Pages 113-122.
- [26] Caggiano, A. Schicchi, D.S. Etse, G. Ripani, M. (2018). Meso-scale response of concrete under high temperature based on coupled thermo-mechanical and pore-pressure interface modeling. *Engineering Failure Analysis*, Volume 85, Pages 167-188.
- [27] Ruby, S. Geethanjali, G. Varghese, C.J. Priya, P.M. (2014). Influence of Hybrid Fiber on Reinforced Concrete. *International Journal of Advanced Structures and Geotechnical Engineering*, Volume 03, Pages 40-43.
- [28] Jameran, A. Ibrahim, S. Yazan, S. Rahim, A. (2015). Mechanical properties of steel-polypropylene fibre reinforced concrete under elevated temperature. *Procedia Engineering*, Volume 125, Pages 818-824.
- [29] RILEM TC 129-MHT. (2000). *Test methods for mechanical properties of concrete at high temperatures, Part 4 – Tensile strength for service and accident conditions*, Mater. Struct. 33, Pages 219-223.
- [30] RILEM TC 129-MHT. (1995). *Test methods for mechanical properties of concrete at high temperatures – compressive strength for service and accident conditions*, Mater. Struct. 28, Pages 410-414.
- [31] Baradaran-Nasiri, A. Nematzadeh, M. (2017). The effect of elevated temperatures on the mechanical properties of concrete with fine recycled refractory brick aggregate and aluminate cement. *Construction and Building Materials*, Volume 147, Pages 865-875.
- [32] Lau, A. Anson, M. (2006). Effect of high temperatures on high performance steel fibre reinforced concrete. *Cement and Concrete Research*, Volume 36, Pages 1698-1707.