



Journal of Structural and Construction Engineering

www.jsce.ir



Evaluation of various content of steel fibers on improving the mechanical and durability properties of concrete at high temperatures

Mehrdad abdi moghadam¹, Ramezanali izadifard^{2*}

1- PhD candidate, Department of civil engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

2- Assistant Professor, Department of civil engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

ABSTRACT

One of the factors of damage and destruction of concrete structures is fire. Concrete structures, in addition to having the proper mechanical characteristics, they must have durability properties to use their capacity over their lifetime. In this study, the effect of various volume fraction of steel fibers on improving the mechanical and durability properties of concrete at various temperatures has been investigated. Mechanical properties including compressive and tensile strength of concrete in the hot condition and the durability characteristics of the concrete after cooling, including surface water absorption, the penetration depth of water, electrical resistance and weight loss have been investigated. This study covers 0.25 and 0.50% volume fraction of steel fibers and temperatures of 28 to 800 ° C. The results show that the increase in compressive strength and tensile strength due to the age of the samples was higher in fiber concrete than non-fibrous concrete. It was also observed that the addition of 0.25 and 0.5% of steel fibers at the tested temperatures improved the compressive and tensile strength in the range of 10 to 27% and 8 to 200%, respectively. In addition, application of these fibers has reduced the sorptivity coefficient, the penetration depth of water, the electrical resistance of concrete and the weight loss of concrete owing to the high temperature. The results of this study showed that, at temperatures below 500 °C specimens containing 0.25% of steel fiber and 500 °C onwards, specimens containing 0.50% of steel fiber had the best performance on the improvement of the mechanical and durability properties of normal concrete at high temperatures.

ARTICLE INFO

Receive Date: 08 January 2019

Revise Date: 08 March 2019

Accept Date: 23 April 2019

Keywords:

Mechanical Properties
Durability specifications
Steel fiber
Fiber volume fraction
High temperatures

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2019.166490.1757

*Corresponding author: Ramezanali izadifard.

Email address: izadifard@eng.ikiu.ac.ir

بررسی درصدهای مختلف الیاف فلزی جهت بهبود مشخصات مکانیکی و دوام بتن در دماهای بالا

مهرداد عبدی مقدم^۱، رضانعلی ایزدی فرد^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری سازه، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

۲- استادیار، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

چکیده

یکی از عوامل آسیب و تخریب سازه های بتنی آتش سوزی میباشد. سازه های بتنی علاوه بر داشتن مشخصات مکانیکی مناسب، میبایست خواص دوام قابل قبولی نیز داشته باشند تا در طول عمر مفید سازه از ظرفیت خود استفاده نمایند. در این مطالعه تاثیر درصدهای حجمی مختلفی از الیاف فلزی در بهبود مشخصات مکانیکی و دوام بتن در دماهای مختلف بررسی شده است. مشخصات مکانیکی شامل مقاومت فشاری و مقاومت کششی بتن در حالت داغ و مشخصات دوام بتن حرارت دیده شامل جذب آب سطحی، عمق نفوذ آب، مقاومت الکتریکی و افت وزنی در آزمایشگاه بررسی شده اند. این مطالعه مقادیر ۰،۲۵ و ۰،۵۰ درصد حجمی الیاف فلزی و دماهای ۲۸ تا ۸۰۰ درجه سانتیگراد را پوشش میدهد. نتایج نشان داده است که افزایش مقاومت فشاری و کششی ناشی از افزایش سن نمونه ها، در بتن الیافی بیش از بتن بدون الیاف بوده است. همچنین ملاحظه گردید که افزودن الیاف فلزی به میزان ۰،۲۵ و ۰،۵ درصد حجمی مقاومت فشاری را به در محدوده ۱۰ تا ۲۷ درصد و مقاومت کششی را در محدوده ۸ تا ۲۰۰ درصد در دماهای بررسی شده بهبود داده است. از طرف دیگر کاربرد الیاف فلزی در بتن توانسته است موجب کاهش جذب آب سطحی، عمق نفوذ آب و مقاومت الکتریکی بتن شده و از افت وزنی بتن ناشی از حرارت بکاهد. جمع بندی نتایج این مطالعه نشان داده است که در دماهای کم تر و بیش تر از ۵۰۰ درجه سانتیگراد، به ترتیب افزودن ۰،۲۵ و ۰،۵ درصد حجمی الیاف بهترین عملکرد را در بهبود مشخصات مکانیکی و دوام بتن معمولی داشته است.

کلمات کلیدی: مشخصات مکانیکی، مشخصات دوام، الیاف فلزی، درصد حجمی الیاف، حرارت

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
doi:	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
10.22065/JSCE.2019.166490.1757					
https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2019.166490.1757	۱۴۰۰/۰۲/۳۰	۱۳۹۸/۰۲/۰۳	۱۳۹۸/۰۲/۰۳	۱۳۹۷/۱۲/۱۷	۱۳۹۷/۱۰/۱۸
رضانعلی ایزدی فرد izadifard@eng.ikiu.ac.ir			* نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:		

۱- مقدمه

در میان مصالح مورد استفاده در ساخت و ساز، بتن به دلیل خواصی چون کم هزینه بودن و در دسترس بودن از پرکاربردترین آنهاست. این متریال ساختمانی از نظر عملکرد در دماهای بالا به علت خواصی همچون هدایت حرارتی پایین و غیرقابل اشتعال بودن در مقایسه با سایر مصالح مانند چوب یا فلز بهتر تلقی میگردد [۱]. ارزیابی مشخصات مکانیکی بتن برای دستیابی به مقاومت کافی در زمان باربری به هنگام آتش سوزی اهمیت ویژه ای دارد. در این شرایط اگر در پروسه طراحی تمهیدات لازم دیده نشده باشد، خسارات جانی و مالی جبران ناپذیری محتمل خواهد بود. از سازه های بتنی که در این شرایط آسیب دیده اند میتوان به ساختمان ۳۲ طبقه ویندسور^۱ در اسپانیا (۲۰۰۵)، ساختمان ۱۳ طبقه دانشکده معماری دانشگاه دلفت^۲ در هلند (۲۰۰۸)، برج ۲۴ طبقه گرینفل^۳ در لندن (۲۰۱۷) و آتش سوزی گسترده ای که اخیراً در کالیفرنیا اتفاق افتاده است اشاره کرد [۲]–[۵]. از راهکارهای بهبود مشخصات بتن در دماهای بالا میتوان به استفاده از الیاف فلزی که دارای نقطه ذوب و مقاومت کششی مناسبی هستند، اشاره کرد. سناریوهای متفاوتی برای ارزیابی رفتار بتن در دماهای بالا وجود دارد. در برخی بتن به دمای مورد نظر میرسد، مدت زمان معینی در این دما میماند و پس از آنکه به دمای محیط رسید مورد آزمایش قرار گرفته و مقاومت پسماند بتن برآورد میگردد [۶]–[۱۰]. نوع دیگری از این سناریو زمانیست که ارزیابی مشخصات بتن هنگامی که بتن داغ است انجام میگردد [۱۱]، [۱۲]. این حالت رفتار مشخص تری از بتن را در شرایط واقعی آتش سوزی و اعمال بار نشان می دهد. از نقطه نظر نرخ حرارتی نیز در یک سری از مطالعات نرخ افزایش حرارت مشابه آتش استاندارد [۱۳] بالا بوده و در برخی دیگر با نرخ های حرارتی پایین اعمال میگردد [۱۴]. صورت دیگری از آسیب سازه های بتنی، حین بهره برداری از آن و به علت نفوذ آب به درون بتن میباشد. نفوذ آب به درون بتن از یک طرف موجب زنگ زدگی و آسیب آرماتورها شده و از طرفی دیگر میتواند حامل موادی چون سولفات ها و کربنات ها باشد. در فصول سرد که یخ زدگی اتفاق می افتد نیز انبساط قطرات آب درون بتن موجب کاهش عمر مفید سازه می گردد. روش های متنوع و مختلفی برای ارزیابی مشخصات دوامی بتن ها موجود بوده که اکثر آنها بر پایه نفوذ آب به درون بتن میباشد. یکی از روش های تعیین مشخصات دوام بتن روش جذب آب سطحی است. این روش بر پایه تمایل بتن در جذب و انتقال آب از حفرات بوده و هر اندازه که این ضریب کم تر باشد، دوام بتن نیز بیشتر است. از این روش میتوان برای طبقه بندی کیفیت بتن استفاده نمود [۱۵]. استفاده از این روش برای تعیین مشخصات دوام بتن در مطالعات زیادی مورد توجه محققین قرار گرفته است [۱۵]–[۲۱].

در راستای سناریوی اول، مقاومت فشاری و کششی بتن البافی در دماهای بالا در سال ۲۰۱۷ توسط نواک و کوهوتکوا^۴ بررسی گردید. در این مطالعه الیاف فلزی، الیاف مصنوعی و ترکیب آنها مورد مطالعه قرار گرفت. آنها نشان دادند که کاربرد الیاف فولادی در بتن مقاومت پسماند کششی و فشاری بتن را افزایش داده و الیاف مصنوعی موجب کاهش خطر اسپالینگ ناشی از حرارت شده اند [۶]. مسعود و همکارانش (۲۰۱۵) با به کارگیری ۱ و ۱٫۵ درصد حجمی از الیاف فلزی در بتن های معمولی مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته نمونه ها را در دماهای ۲۵، ۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ بررسی نمودند. ملاحظه گردید که با افزایش دما، مقاومت فشاری پسماند و مدول الاستیسیته در همه نمونه ها کاهش یافته و افت مقاومت در نمونه های دارای الیاف از بتن معمولی کمتر بود. همچنین ملاحظه گردید که با افزایش درصد الیاف فلزی، پارامترهای بررسی شده در این مطالعه در تمامی دماها افزایش داشته است [۷]. الیاف فلزی در بازار در انواع مختلفی موجود میباشد. در سال ۲۰۱۸ مقاومت فشاری و کششی پسماند دو نوع الیاف فلزی قلابدار و صاف در درصدهای حجمی ۰٫۵ درصد و ۱ درصد، توسط خلیل بررسی گردید [۸]. آنها نشان دادند که در دماهای بالاتر از ۳۵۰ درجه سانتیگراد مقاومت فشاری نمونه های حاوی الیاف به میزان کمی افزایش داشته اند و الیاف قلابدار رفتار بهتری را در دماهای بالا داشته است. دباغ و دیندوست نیز با بررسی مقاومت فشاری و کششی بتن سبک حاوی الیاف فلزی در اشکال موجدار و قلابدار نشان داد که این الیاف تاثیر چندانی بر مقاومت فشاری بتن ندارند [۲۲]. از مشخصات اصلی الیاف فلزی که بر مشخصات بتن تاثیرگذار است، نسبت طول به عرض آنها میباشد. برای نشان دادن تاثیر این موضوع کیم و همکارانش (۲۰۱۵) درصدهای حجمی ۰٫۲۵، ۰٫۵ و ۱ درصد از این نوع الیاف را در دماهای ۳۰۰، ۵۰۰ و ۷۰۰ درجه بررسی کردند.

¹ Windsor Tower

² Delft University of Technology

³ Grenfell Tower

⁴ Novák, Kohoutková

نتایج نشان داد که تغییرات مقاومت کششی در دماهای بالاتر از ۳۰۰ درجه اتفاق می افتد. به طور مثال مقاومت کششی نسبی نمونه ای که دارای ۱ درصد حجمی الیاف فلزی با نسبت ابعادی ۶۰ بود در دماهای ۳۰۰، ۵۰۰ و ۷۰۰ درجه سانتیگراد به ترتیب برابر با ۷۰، ۵۴ و ۳۴ درصد و برای نسبت ابعادی ۸۰ به ترتیب برابر با ۷۵، ۶۵ و ۴۵ بود [۹]. قلهکی و همکاران نیز مشخصات مکانیکی نمونه های دارای ۰،۶ درصد الیاف فلزی و پلی پروپیلین را در دماهای ۲۵، ۱۰۰، ۲۵۰، ۵۰۰ و ۷۰۰ درجه بررسی کردند. آزمایشات در حالتی که نمونه ها به طور طبیعی سرد شده بودند انجام گردید و روند تغییرات مقاومت فشاری، کششی و خمشی این نمونه ها با تغییرات دما آرایه گردید. همچنین ملاحظه گردید که مقاومت فشاری و کششی نمونه های دارای الیاف فلزی به ترتیب ۴۰ و ۵۰ درصد بیشتر از نمونه حاوی الیاف پلی پروپیلین بود و مقاومت خمشی تقریباً یکسانی داشتند [۱۰].

بررسی مقاومت کششی نمونه های دارای الیاف فلزی در حالت داغ در سال ۱۹۸۹ بررسی گردید [۱۲]. در این مطالعه دماهای ۲۸، ۲۰۰، ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ درجه آزمایش شد و ملاحظه گردید که در تمامی دماهای بررسی شده الیاف فلزی مقاومت کششی بتن را در زمانی که بتن داغ است بهبود بخشیده است. در مطالعه آزمایشگاهی راو و همکارانش مقاومت فشاری، کششی و خمشی بتن را در حالت داغ و در دماهای ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ درجه بررسی شد. روند تغییرات مشخصات مکانیکی به نحوی بود که از دمای محیط تا دمای ۵۰ درجه سانتیگراد تمامی مشخصات مکانیکی بتن افزایش یافته و پس از این دما، روند کاهش داشته اند. همچنین ملاحظه گردید که بیشترین تاثیر الیاف فلزی در افزایش مقاومت خمشی بوده است (تا ۲۰ درصد) [۱۱].

در ارتباط با دوام سازه های بتنی، تاسدمیر^۵ (۲۰۰۳) نشان داد که روند تغییرات مقاومت فشاری بتن با روند میزان جذب آب سطحی رابطه ای معکوس دارد و سن بتن تاثیر ناچیزی بر نتایج داشته است [۱۶]. برای نشان دادن تاثیر سن بتن بر دوام بتن مطالعه ای بر روی نمونه هایی که ۲، ۳، ۶، ۹، ۱۲، ۲۴ ماه در محیط آزمایشگاه نگه داری شده اند انجام شد. ملاحظه گردید که برآورد ضریب جذب آب سطحی نمونه ۲۸ روزه میتواند تقریباً مناسبی از این پارامتر برای ماه های بعدی باشد [۲۱]. مطالعه آزمایشگاهی دوام نمونه های حاوی ۰،۲۵، ۰،۵۰، ۰،۷۵ و ۱،۰ درصد حجمی الیاف فلزی نیز در مرجع [۲۳] انجام گردید. نتایج نشان داد که افزایش درصد حجمی الیاف باعث کاهش جذب آب بتن می شود. از دیگر روش های بررسی مشخصات دوام بتن که به عبارتی پتانسیل خوردگی آرماتور موجود درون بتن را روشن مینماید میتوان به آزمون مقاومت الکتریکی بتن اشاره نمود. استفاده از این آزمون برای بررسی دوام بتن در مطالعات [۲۰]، [۲۴] مورد توجه واقع شده است.

اگرچه آزمایش بر روی بتن در حالت داغ سختی هایی دارد، درک درست و دقیق رفتار این ماده در زمان آتش سوزی نیز در این شرایط محقق میگردد. بررسی گسترده مطالعات پیشین نشان داده است که مطالعات محدودی مشخصات مکانیکی بتن را در این شرایط بررسی کرده اند و مطالعاتی که در این حوزه انجام شده است، دماهای محدودی را مورد مطالعه قرار داده اند. همچنین میزان بهبود مشخصات مکانیکی بتن معمولی در اثر افزودن الیاف فلزی در مطالعات پیشین به روشنی مشخص نشده است. آیین نامه هایی که اثر آتش سوزی را لحاظ کرده اند [۲۵]، [۲۶] نیز اطلاعاتی در رابطه با مشخصات مکانیکی بتن های الیافی ندارند بنابراین در این پژوهش در ابتدا مشخصات مکانیکی بتن از جمله مقاومت فشاری و مقاومت کششی در حالت داغ مورد آزمایش قرار میگردد و تاثیر درصدهای حجمی ۰،۲۵ و ۰،۵ درصد حجمی الیاف فلزی بر مشخصات مکانیکی بتن در دماهای ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۳۵۰، ۴۰۰، ۴۵۰، ۵۰۰، ۶۵۰ و ۸۰۰ درجه سانتیگراد بررسی میگردد. همچنین از آنجاییکه انتظار می رود بتن هایی که دماهای بالا را تجربه کرده اند در دوران بهره برداری دچار آسیب گردند، مشخصات دوام آنها با استفاده از آزمونهای جذب آب سطحی، عمق نفوذ آب، مقاومت الکتریکی و افت وزنی بررسی شده است.

۲- برنامه آزمایشگاهی

در این مطالعه، سه نوع بتن: یعنی بتن معمولی (N)، بتن با ۰،۲۵ درصد حجمی الیاف فلزی (St25) و بتن با ۰،۵ درصد الیاف فلزی (St50) در آزمایشگاه دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره) ساخته و آزمایش شدند. آزمایش های مشخصات مکانیکی شامل مقاومت

⁵ Tasdemir

فشاری و مقاومت کششی و آزمون‌های دوام شامل آزمون جذب آب سطحی، عمق نفوذ آب، مقاومت الکتریکی و افت وزنی بود. تمامی آزمایش‌ها در دماهای ۲۸، ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۳۵۰، ۴۰۰، ۴۵۰، ۵۰۰، ۶۵۰ و ۸۰۰ درجه انجام گردید. برای آزمایش مشخصات مکانیکی ۳ تکرار و برای آزمایش‌های دوام ۲ تکرار و در مجموع برای این پژوهش ۴۲۶ نمونه ساخته و آزمایش شدند. شکل ۱ تصویر تعدادی از نمونه‌های ساخته شده برای آزمایش را نشان می‌دهد.



شکل ۱: تصویر تعدادی از نمونه‌های ساخته شده برای آزمایش.

۲-۱ مشخصات مصالح مصرفی

برای ساخت نمونه‌های بتنی از سنگدانه آهکی با حداکثر اندازه ۱۹ میلی‌متر و ریزدانه با حداکثر اندازه ۴٫۷۵ میلی‌متر استفاده شده است. سیمان مورد استفاده در این مطالعه از نوع تیپ ۲ معمولی بوده و مشخصات شیمیایی آن در جدول ۱ ارایه شده است. الیاف استفاده شده نیز از نوع الیاف فلزی قلاب دار در دو انتها به طول ۳۰ میلی‌متر و قطر ۰٫۸ میلی‌متر با مقاومت کششی ۱۱۵۰ مگاپاسکال است (شکل ۲). برای دستیابی به اثر تغییرات حرارت بر مشخصات بتن، نمونه‌های مورد استفاده با یک طرح اختلاط و با شرایط یکسان آماده و عمل‌آوری شده‌اند. جدول ۲ طرح اختلاط و مشخصات مصالح تشکیل دهنده بتن مورد استفاده در این مطالعه را نشان داده است.

جدول ۱: آنالیز شیمیایی سیمان پرتلند تیپ ۲.

سایر اجزا	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SiO ₃	اجزا تشکیل دهنده
۱٫۴۹	۲۰٫۲۶	۵٫۲۸	۳٫۷۲	۶۳٫۲۴	۲٫۶۹	۰٫۲۵۸	۰٫۵۳۳	۲٫۵۴	درصد وزنی

جدول ۲: طرح اختلاط (kg/m³).

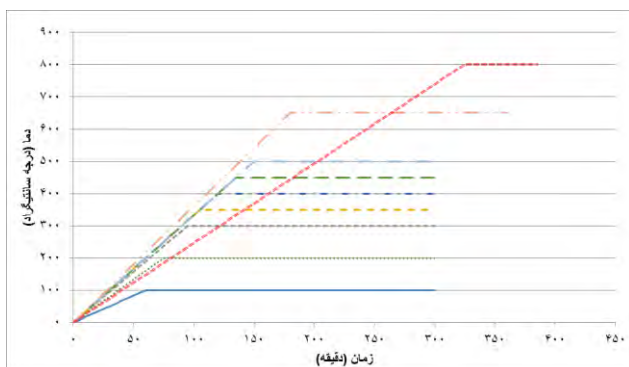


شکل ۲: تصویر الیاف فلزی.

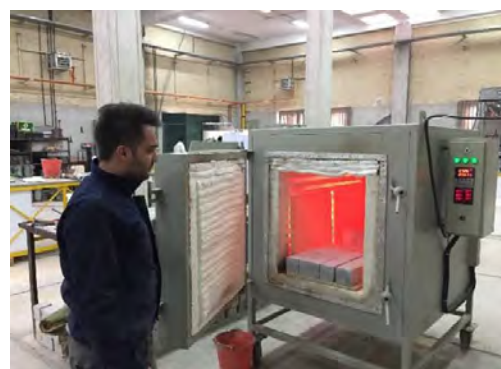
نام نمونه	سیمان	آب	شن	ماسه	الیاف
بدون الیاف فلزی (N)	۴۰۰	۲۰۰	۹۳۵	۷۶۵	۰
با ۰٫۲۵ درصد حجمی الیاف فلزی (St25)	۴۰۰	۲۰۰	۹۳۵	۷۶۵	۱۹٫۶۲
با ۰٫۵ درصد حجمی الیاف فلزی (St50)	۴۰۰	۲۰۰	۹۳۵	۷۶۵	۳۹٫۲۴

۲-۲ جزئیات طرح اختلاط و دستگاهها

به منظور اختلاط کامل اجزای بتن، ابتدا شن، ماسه و نصف سیمان به مدت یک دقیقه مخلوط شدند و در این فاصله الیاف فلزی طی چند مرحله و با مقادیر کم به میکسر اضافه شدند. افزودن الیاف به مخلوط بتنی به صورت یکباره منجر به تجمع الیاف در بخشی از میکسر شده و پدیده گلوله شدن الیاف را موجب میشود. در ادامه نصف آب و پس از آن تمام سیمان اضافه گردید. در نهایت ما بقی آب اضافه گردید و میکسر به مدت ۳ دقیقه کار کرد. پس از اختلاط کامل و تولید یک مخلوط همگن، بتن به داخل قالب ریخته شده و توسط میز لرزان متراکم گردید. پس از ۲۴ ساعت بتن‌ها از قالب در آمدند به مدت ۲۸ روز در آب عمل آوری شدند. بعد از بیرون آمدن از آب مقاومت فشاری و کششی نمونه‌ها در روز ۲۸ ام تعیین گردید و مابقی نمونه‌ها ۱۴ روز در محیط آزمایشگاه قرار گرفتند تا آب آزاد درون بتن به طور طبیعی خارج گردد. آزمایش‌های مقاومتی بتن در روز ۴۲ و علاوه بر دمای محیط در دماهای ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۳۵۰، ۴۰۰، ۴۵۰، ۵۰۰، ۶۵۰ و ۸۰۰ سانتی‌گراد انجام شده است. تامین دمای هدف توسط یک کوره الکتریکی با ظرفیت گرمایی ۱۲۰۰ درجه سانتیگراد انجام شده است (شکل ۳). برای جلوگیری از اسپالینگ، نرخ افزایش دما مابین ۱،۶۶ تا ۳،۶۱ درجه سانتیگراد بر دقیقه انتخاب گردید و منحنی زمان-گرمایش در شکل ۴ ترسیم شده است. نمونه‌ها به محض آنکه از کوره بیرون آمدند توسط یک جک فشاری با ظرفیت ۳۰۰۰ کیلو نیوتون مورد آزمایش مقاومت فشاری و مقاومت کششی قرار گرفتند. آزمایش بر روی نمونه‌های داغ به محض بیرون آوردن از کوره در مراجع [۶]، [۱۱]، [۱۲] انجام شده است. آزمایش‌های دوام نیز زمانی انجام گردید که نمونه‌ها در شرایط آزمایشگاهی سرد شده و به دمای محیط رسیده‌اند.



شکل ۴: منحنی زمان_دما.



شکل ۳: تصویر کوره الکتریکی.

۲-۳ آزمایش مشخصات مکانیکی

۲-۳-۱ آزمون مقاومت فشاری

در این مطالعه برای تعیین مقاومت فشاری، از نمونه های مکعبی ۱۰ سانتی‌متری استفاده شده و بر اساس استاندارد BSEN 12390-3 آزمایش شده است [۲۷]. آزمایش مقاومت فشاری در روزهای ۲۸ ام و ۴۲ و دمای محیط انجام شده و میانگین نتایج ۳ تکرار برای هر آزمایش، در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳: مقاومت فشاری ۲۸ روزه و ۴۲ روزه در دمای محیط.

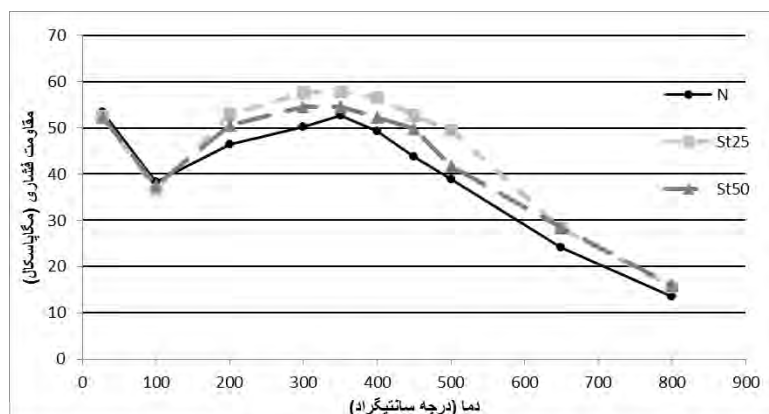
St50		St25		N		نام نمونه
۴۲	۲۸	۴۲	۲۸	۴۲	۲۸	سن نمونه (روز)
۵۲،۳۳	۴۳،۹۷	۵۲،۵۶	۴۴،۴۶	۵۳،۳۸	۴۷،۱۷	مقاومت فشاری (مگاپاسکال)

بررسی نتایج به دست آمده نشان میدهد که با افزایش سن نمونه مقاومت فشاری بتن معمولی ۱۳ درصد و مقاومت فشاری بتن الیافی در حدود ۱۹ درصد افزایش داشته است. از نظر تاثیر الیاف فلزی بر تغییرات مقاومت فشاری بتن نیز ملاحظه گردید که در آزمایش

انجام شده بر روی نمونه‌های ۲۸ روزه، افزودن ۰٫۲۵ و ۰٫۵ درصد حجمی الیاف فلزی به ترتیب موجب کاهش ۵٫۷۵ و ۶٫۷۹ درصدی مقاومت فشاری شده است. این درحالیست که در سنین بالاتر افزودن ۰٫۲۵ و ۰٫۵ درصد حجمی الیاف فلزی به ترتیب موجب ۱٫۵۴ و ۱٫۹۵ درصد کاهش در مقاومت فشاری بتن شده است. بنابراین افزودن این الیاف به بتن موجب کاهش مقاومت فشاری ۲۸ روزه و ۴۲ روزه شده است و افزودن درصدهای بیشتری از این الیاف موجب تشدید این کاهش شده است. یکی از عوامل مهم بر کسب مقاومت فشاری بتن، تراکم کامل بتن میباشد. کاربرد الیاف فلزی درون بتن موجب کاهش کارایی و در نهایت عدم تراکم کامل میشود. این موضوع را میتوان به عنوان یکی از عوامل کاهش مقاومت فشاری بتن در اثر افزودن الیاف فلزی برشمرد. از طرف دیگر در اثر افزودن الیاف به بتن پدیده ای به نام خاصیت توپی شدن^۶ الیاف ممکن است به وقوع بپیوندد. در این حالت از یکطرف خاصیت توپی شدن موجب ایجاد انفصال ساختار بتن و از طرفی موجب تمرکز تنش شده که شکست زود هنگام بتن را حاصل میگردد. همچنین ملاحظه گردید که در سنین بالاتر میزان افت مقاومت فشاری بتن ناشی از حضور الیاف فلزی کاهش یافته است. در این حالت با افزایش سن نمونه هیدراسیون سیمان کامل تر شده است. از آنجاییکه هیدراسیون در مقایسه با اثر الیاف سهم بیشتری بر مقاومت فشاری بتن دارد، تاثیر الیاف فلزی بر مقاومت فشاری بتن کاهش داشته است.

برای بررسی مشخصات مکانیکی نمونه‌ها در دمای بالا، بعد از آنکه دمای تمام بتن به طور یکنواخت به دمای هدف رسید، به وسیله پارو از کوره خارج شده و با قرارگیری بر روی میز متحرک تا جک منتقل شده است. سپس با استفاده از ابزارهای عایق حرارتی در زیر جک قرار گرفته است. برای حفظ دمای نمونه تمامی مراحل انتقال و بارگذاری در حدود ۲-۴ دقیقه انجام شده است. در مطالعات راو و همکاران مدت زمان مجاز برای انجام آزمایش به طوریکه دمای نمونه از دست نرود ۱۰ دقیقه توصیه شده است [۱۱]. با انجام آزمایش مقاومت فشاری در هر دما و ارایه میانگین نتایج ۳ تکرار نمودار ۵ ترسیم شده است. میانگین ضریب تغییرات^۷ در آزمایشات مقاومت فشاری در دماهای بررسی شده ۵٫۵۸ بود.

روند تغییرات مقاومت فشاری برحسب دمای آزمایش در بتن معمولی و الیافی مشابه میباشد. با افزایش دمای آزمایش به ۱۰۰ درجه سانتیگراد مقاومت فشاری نمونه‌های بررسی شده در مقایسه با نمونه آزمایش شده در دمای محیط تقریباً ۳۰ درصد افت کرده‌اند. از آنجاییکه در این دماها تغییرات چندانی در مقاومت سنگدانه و مقاومت الیاف رخ نمیدهد، این کاهش مقاومت به خاطر فشار داخلی ناشی از بخار آب بوده است. هنگامی که نمونه بتنی به صورت داغ مورد آزمایش قرار میگیرد، فشار داخلی ناشی از بخار آب آزاد به سمت بیرون و فشار جک به سمت داخل به بتن وارد میگردد. که این موضوع را میتوان توجیهی برای افت مقاومت فشاری بتن در این دما در نظر گرفت. در این دما مقاومت فشاری نمونه‌های N، St25 و St50 به ترتیب ۳۸٫۳۷، ۳۶٫۶۳ و ۳۷٫۵۱ مگاپاسکال میباشد که ملاحظه میگردد مشابه با دمای محیط، حضور الیاف فلزی در هر دو درصد افزوده شده موجب کاهش مقاومت فشاری شده است. با افزایش دما به بیشتر از ۱۰۰ درجه سانتیگراد، ملاحظه گردید که بتن مقاومت خود را در دمای ۳۵۰ درجه سانتیگراد دوباره به دست آورده است. علت افزایش مقاومت در دماهای کم‌تر از ۳۰۰ درجه سانتیگراد هیدراسیون سیمان به خاطر حرارت میباشد [۲۸].



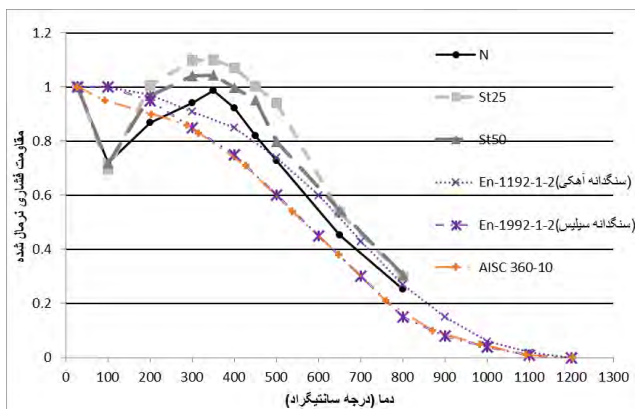
شکل ۵: تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌ها در دماهای مختلف.

⁶ Balling effect

⁷ Coefficient of variation

بیشترین مقاومت فشاری نمونه N در دمای محیط بود. این در حالیست که بیشترین مقاومت فشاری نمونه های St25 و St50 با مقدار ۵۷,۶۱ و ۵۴,۶۲ مگاپاسکال در دمای ۳۵۰ درجه سانتیگراد بوده است. در این دما مقاومت فشاری نمونه بدون الیاف از نظر حداکثری در تمامی دماها در رتبه دوم بود (۵۶,۶۳ مگاپاسکال). سناریوهای مختلفی برای توجیه کسب مقاوت بتن در این دماها مطرح میباشد. یکی از این عوامل خروج آب بین لایه ای و سخت شدن خمیره سیمان به خاطر انقباض لایهها است. این موضوع موجب ایجاد نیروی واندروالسی مابین لایههای خمیره سیمان شده و در نهایت مقاومت بتن را افزایش میدهد [۲۹]. یکی دیگر از عوامل افزایش مقاومت در دماهای ۱۰۰-۳۰۰ درجه سانتیگراد، هیدراسیون دوباره سیمان بوده که بیشترین نرخ آن در حدود دمای ۱۸۰ درجه سانتیگراد اتفاق می افتد [۳۰]. در سنین ۲۸ و ۴۲ روزه هیدراسیون حجم قابل توجهی از سیمان تکمیل نشده است. آب تبخیر شده درون بتن شرایطی مشابه با شرایط عمل آوری به سبک اتوکلاو^۸ ایجاد کرده که منجر به هیدراسیون دوباره سیمان موجود درون بتن، افزایش محصولات هیدراسیون و در نهایت افزایش مقاومت آن میگردد [۳۱]. در دماهای بالاتر از ۳۵۰ درجه سانتیگراد، مقاومت فشاری تمام نمونهها به طور مداوم کاهش می یابد تا زمانی که در ۸۰۰ درجه سانتیگراد به کمترین مقدار خودش برسد. در این دما مقاومت فشاری نمونههای N، St25 و St50 به ترتیب ۱۳,۵ ، ۱۵,۶۹ و ۱۶,۰۵ مگاپاسکال بود. عوامل مختلفی باعث کاهش مقاومت بتن در این محدوده میباشد که میتوان به تبخیر آب محصور در لایه های ژل C-S-H در حدود دمای ۳۰۰°C، تجزیه $Ca(OH)_2$ به CaO (و آب در دمای ۴۰۰°C، تجزیه C-S-H در ۶۰۰°C و در نهایت تبدیل $CaCO_3$ به CaO و CO_2 در محدوده دمایی ۷۰۰-۸۰۰ درجه سانتیگراد اشاره کرد [۳۲]-[۳۴].

از طرفی دیگر نتایج نشان داده است که اگرچه در دماهای ۲۸ و ۱۰۰ درجه مقاومت فشاری نمونههای دارای الیاف به میزان کمی از مقاومت فشاری بتن معمولی کم تر است، در سایر دماهای آزمایش افزودن این الیاف موجب بهبود مقاومت فشاری بتن شده است. در این محدوده دمایی، کاربرد الیاف فلزی به میزان ۰,۲۵ و ۰,۵ درصد حجمی به ترتیب مقاومت فشاری را در محدوده ۹,۸۴-۲۷,۸۲ و ۳,۷۹-۱۸,۸۸ درصد بهبود داده است. همچنین ملاحظه گردید که در دماهای پایین تر از ۶۵۰ درجه سانتیگراد نمونههای St25 به طور میانگین مقاومت فشاری را ۸ درصد بیشتر از نمونههای St50 بهبود داده اند. این در حالی است که در دماهای ۶۵۰ و ۸۰۰ درجه سانتیگراد این روند معکوس شده است به طوری که در این دماها مقاومت فشاری نمونه St25 به ترتیب ۱۶,۷۵ و ۱۶,۲۲ درصد و در نمونه St50 به ترتیب ۱۷,۹۷ و ۱۸,۸۸ درصد بیشتر از مقاومت فشاری بتن معمولی بوده است. در این دماها به دلیل آنکه پیوند ما بین سنگدانهها و ملات سیمان کاملاً گسسته شده است، درصدهای بیشتر الیاف فلزی در حفظ مقاومت بتن کارآمدترند. در شکل ۶ که تصویر نمونه St50 پس از تجربه دماهای ۵۰۰ و ۶۵۰ درجه سانتیگراد و آزمایش فشاری دیده میشود، صاف شدن انتهای قلاب الیاف و پیوستگی به وجود آمده به خاطر حضور الیاف مشهود است. همچنین ملاحظه میگردد که تغییر رنگ سنگدانهها و جداسدگی آنها از خمیره سیمان در دمای ۶۵۰ درجه سانتیگراد بسیار مشهود تر از دمای ۵۰۰ درجه سانتیگراد میباشد.



شکل ۷: تغییرات مقاومت فشاری نرمال شده با دما.



شکل ۶: مود شکست فشاری نمونه St50 در دماهای ۶۵۰ و ۵۰۰ درجه سانتیگراد.

⁸ Autoclave

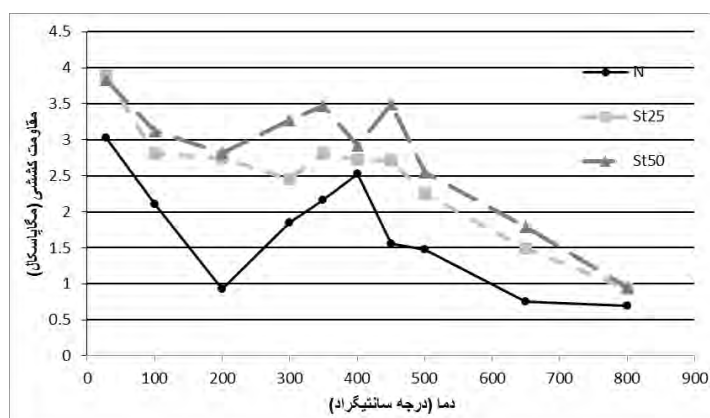
آیین نامه‌هایی که تغییرات مقاومت فشاری بتن در دماهای مختلف را بررسی کرده‌اند شامل استانداردهای EN-1192-1-2 [۲۵] و AISC 360-10 [۲۶] می‌باشند. در این استانداردها تغییرات نسبت مقاومت فشاری در هر دما به مقاومت فشاری در دمای محیط (مقاومت فشاری نرمال شده) ارایه شده است. در نمودار ۷ مقاومت فشاری نرمال شده بتن معمولی و بتن‌های الیافی ارایه شده است. مقایسه مقدار به دست آمده از آزمایش با مقادیر ارایه شده در این آیین‌نامه‌ها نشان می‌دهد که در دمای ۱۰۰ درجه که مقاومت فشاری نرمال شده بتن معمولی ۰٫۷ است در هیچ یک از این استانداردها دیده نشده است. اطلاعات ارایه شده در این استانداردها بر اساس نتایج به دست آمده از نمونه‌های سرد شده است. این درحالی است که در این مطالعه نمونه‌ها به صورت داغ مورد آزمایش گرفته‌اند. در این دما به خاطر اینکه بتن از داخل تحت فشار منفذی ناشی از بخار آب بوده و از طرفی دیگر تحت فشار جک قرار دارد این افت مقاومت تشدید شده است. در مقایسه نتایج تجربی با داده‌های این استانداردها ملاحظه می‌گردد که در بازه دمایی ۳۰۰ تا ۵۰۰ درجه سانتیگراد مقاومت فشاری نرمال شده آزمایشگاهی بتن معمولی مقادیر بیشتری داشته است. این در حالیست که در دماهای بالاتر از ۵۰۰ درجه سانتیگراد نتایج تجربی از مقادیر ارایه شده توسط استاندارد EN-1192-1-2 برای سنگدانه‌های آهکی کمی کمتر و از استاندارد AISC 360-10 بیشتر بوده است. همچنین بیشترین تطابق نتایج آزمایشگاهی با داده‌های استاندارد EN-1192-1-2 بوده است. در مقایسه استاندارد EN-1192-1-2 با AISC 360-10 ملاحظه می‌شود اگرچه مقاومت فشاری در استاندارد EN-1192-1-2 برای سنگدانه‌های سیلیسی در مقایسه با استاندارد AISC 360-10 تا قبل از دمای ۳۰۰ درجه کمتر است، بعد از این دما این دو استاندارد نتایج کاملاً مشابهی را ارایه داده‌اند. در بازه دمایی ۲۸-۱۰۰ درجه سانتیگراد الیاف فلزی اثری در بهبود مقاومت فشاری نرمال شده بتن نداشته است ولی در بازه دمایی ۱۰۰-۸۰۰ درجه سانتیگراد کاربرد الیاف فلزی موجب بهبود مقاومت فشاری نرمال شده بتن شده است. در این محدوده دمایی نمونه‌های حاوی ۲۵ و ۵۰ درصد حجمی الیاف فلزی مقاومت فشاری نرمال شده را به طور میانگین ۱۸٫۵۶ و ۱۲٫۴ درصد افزایش دادند.

۲-۳-۲ آزمون مقاومت کششی

آزمایش مقاومت کششی به روش دونیم شدن، بر روی نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۱۵ سانتی متر و ارتفاع ۳۰ سانتی متر، و بر اساس استاندارد ASTM C 496/C 496M – 04 انجام شده است [۳۵]. آزمایش مقاومت کششی در روزهای ۲۸ ام و ۴۲ وم در دمای محیط انجام شده و میانگین نتایج ۳ تکرار برای هر آزمایش، در جدول ۴ ارایه شده است. میانگین ضریب تغییرات^۹ در آزمایشات مقاومت کششی در دماهای بررسی شده ۹٫۲۴ بود.

جدول ۴: مقاومت کششی ۲۸ روزه و ۴۲ روزه نمونه‌ها در دمای محیط.

St50		St25		N		نام نمونه
۴۲	۲۸	۴۲	۲۸	۴۲	۲۸	سن نمونه (روز)
۳٫۸۳	۳٫۱۵	۳٫۸۸	۳٫۲۰	۳٫۰۳	۲٫۵۷	مقاومت کششی (مگاپاسکال)



شکل ۸: تغییرات مقاومت کششی بتن معمولی و الیافی در دماهای مختلف.

⁹ Coefficient of variation

بررسی نتایج به دست آمده نشان میدهد که با افزایش سن نمونه، مقاومت کششی بتن معمولی ۱۷ درصد و مقاومت کششی بتن الیافی در حدود ۲۱ درصد افزایش داشته است. در مقایسه با نتایج مرتبط با مقاومت فشاری مشاهده شد افزایش سن نمونه تاثیر بیشتری بر مقاومت کششی داشته است. از نظر تاثیر الیاف فلزی بر تغییرات مقاومت کششی بتن، ملاحظه گردید در آزمایش انجام شده بر روی نمونه‌های ۲۸ روزه، افزودن ۰٫۲۵ و ۰٫۵ درصد حجمی الیاف فلزی به ترتیب موجب ۲۴٫۵۲ و ۲۲٫۳۷ درصد بهبود مقاومت کششی شده است. در حالیکه در سنین بالاتر، نسبت‌های فوق به ۲۸٫۱۵ و ۲۶٫۳۱ درصد افزایش یافته است. بنابراین میزان بهبود مقاومت کششی بتن برای درصد‌های کم‌تر الیاف، بیشتر بوده است و در سنین بالاتر میزان بهبود مقاومت کششی بتن ناشی از حضور الیاف فلزی افزایش یافته است.

روند تغییرات مقاومت کششی در بتن معمولی و الیافی با تغییرات دمای آزمایش در شکل ۸ ارایه شده است. با افزایش دمای آزمایش تا ۲۰۰ درجه سانتیگراد مقاومت کششی نمونه‌های بررسی شده روندی نزولی داشته است. به طوریکه در این دما مقاومت کششی بتن بدون الیاف با ۷۰ درصد افت به ۰٫۹۲ مگاپاسکال رسیده است. افت مقاومت در این دما در نمونه‌های St25 و St50 نیز مشاهده شده است با این تفاوت که میزان افت مقاومت کششی در این نمونه‌ها به ترتیب به ۲۹٫۲۸ و ۲۶٫۴۵ درصد کاهش یافته است. در زمان آزمایش مقاومت کششی در دماهای ۱۰۰ و ۲۰۰ درجه سانتیگراد، انفجاری با صدای بلند همراه با خروج بخار آب مشاهده شد. این انفجار ناشی از اثر همزمان فشار خارجی جک و فشار داخلی بخار ناشی از تبخیر آب درون منافذ مویرگی بتن بوده است. این پدیده در زمان آزمایش در دمای ۲۰۰ درجه سانتیگراد شدیدتر بود که میتوان آن را به فشار بیشتر بخار در این دما مرتبط دانست. چنین پدیده انفجاری در آزمایشات نواک و کوهوتکوا^{۱۰} نیز هنگام آزمایش بر روی نمونه‌های بتن معمولی که در معرض دمای ۲۰۰ درجه سانتیگراد بودند مشاهده شد [۳۶]. به دلیل پیوستگی و ممانعت از رشد ترک در بتن ناشی از اثر پل زدن الیاف فلزی، شدت این پدیده در نمونه‌های دارای الیاف در مقایسه با بتن خالص کمتر و در نمونه‌های دارای درصد الیاف بیشتر باز هم کم‌تر بوده است. این موضوع را میتوان توجیهی بر افت مقاومت و بهبود مقاومت با کاربرد الیاف فلزی در این دماها دانست. در دماهای بالاتر از ۲۰۰ درجه سانتیگراد نیز مقاومت کششی بتن معمولی روندی رو به کاهش داشته و در دمای ۸۰۰ درجه سانتیگراد به کم‌ترین مقدار خود رسیده است. تصویر ۹ نمونه بتن معمولی که در معرض دمای ۸۰۰ درجه بوده است را پس از شکست نشان میدهد. در این تصویر گداختگی سنگدانه‌ها و خمیره سیمان مشهود است. خوردگی الیاف فولادی و ناسازگاری حرارتی بین الیاف، سنگدانه‌ها و خمیره سیمان از عوامل افت مقاومت در این دماها میباشد. علاوه بر تاثیر مثبت الیاف فولادی در کاهش پدیده انفجاری میتوان به بهبود مقاومت کششی در دماهای بررسی شده اشاره کرد. افزودن ۰٫۲۵ و ۰٫۵ درصد الیاف فلزی به بتن در دماهای بررسی شده مقاومت کششی را به ترتیب در محدوده ۸-۲۰۰ درصد و ۱۶-۲۰۵ درصد افزایش داده است. همچنین ملاحظه گردید که مقاومت کششی نمونه‌های St50 در مقایسه با نمونه‌های St25 در حدود ۳۰ درصد بیشتر است. از دیگر یافته‌های آزمایش میتوان به عدم جدا شدن نمونه استوانه‌ای حاوی الیاف فلزی پس از شکست کششی اشاره داشت که شاهدهی بر خاصیت پل زدگی الیاف میباشد. این در حالیست که نمونه‌های بدون الیاف در تمامی دماها پس از شکست به راحتی به دو نیم تقسیم شدند. در دمای ۸۰۰ درجه سانتیگراد به خاطر جداشدگی سنگدانه و خمیره سیمان و گسسته شدن الیاف، نقش پل زدن الیاف کاهش یافته است. تصویر ۱۰ که مربوط به نمونه St50 در دماهای ۶۵۰ و ۸۰۰ درجه است این موضوع را به خوبی نشان میدهد.



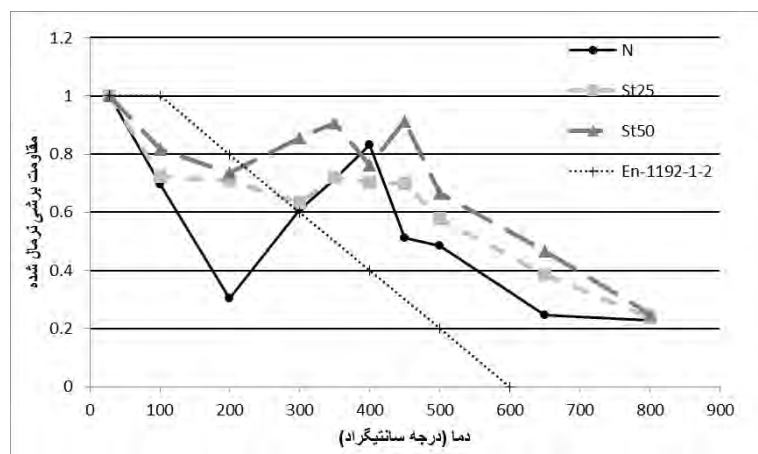
شکل ۷: شکسته شدن نمونه استوانه‌ای بتن بدون الیاف با هسته گداخته بلافاصله پس از آزمایش.

¹⁰ Novák, Kohoutková



شکل ۸: تصویر نمونه St50 پس از شکست کششی الف) دمای ۶۵۰ درجه سانتیگراد، ب) دمای ۸۰۰ درجه سانتیگراد.

تغییرات مقاومت کششی بتن معمولی و الیافی در دماهای مختلف در شکل ۱۱ ارائه شده و نتایج آن با داده‌های ارائه شده توسط استاندارد EN-1192-1-2 [۲۵] مقایسه شده است. در دمای ۱۰۰ درجه مقاومت کششی نرمال شده بتن معمولی و نمونه St25 در حدود ۰,۷ بود. افزودن الیاف فلزی به میزان ۰,۵ درصد حجمی موجب بهبود این مشخصه شده و مقاومت کششی نرمال شده را به ۰,۸ بهبود داده است. روند رو به کاهش مقاومت کششی نرمال شده نمونه‌های بررسی شده در این مطالعه تا دمای ۲۰۰ درجه ادامه داشته و در این دما مقاومت کششی نرمال شده نمونه‌های بتن معمولی، St25 و St50 به ترتیب برابر ۰,۳، ۰,۷۱ و ۰,۷۳ است. در این دما افزایش قابل توجه مقاومت کششی نرمال شده در اثر افزودن الیاف فلزی مشهود است. مقایسه نتایج آزمایشگاهی با آیین نامه یوروکد نشان می‌دهد که تا دمای ۳۰۰ درجه سانتیگراد نتایج تجربی کمتر از مقادیر ارائه شده در این آیین نامه می‌باشد و این استاندارد در این دماها مقاومت کششی بتن را دست بالا در نظر گرفته و از این دما به بعد نتایج این آیین نامه محافظه کارانه می‌باشد. اگرچه از دمای ۶۰۰ درجه به بعد یوروکد مقاومت کششی بتن را برابر صفر در نظر گرفته، نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که در دماهای ۶۵۰ و ۸۰۰ درجه سانتیگراد، مقاومت کششی بتن به ترتیب ۰,۲۵ و ۰,۲۳ آن در دمای محیط است. در همین دماها مقاومت کششی نرمال شده نمونه St25 به ترتیب ۰,۳۸ و ۰,۲۴ و برای نمونه St50 به ترتیب ۰,۴۷ و ۰,۲۵ می‌باشد. با توجه به نتایج آزمایشگاهی ملاحظه شده است که کاربرد ۰,۲۵ درصد حجمی الیاف فلزی مقاومت کششی نرمال شده را ۳,۷۸ تا ۱۳۲,۳۴ درصد و کاربرد ۰,۵ درصد حجمی از این الیاف مقاومت کششی نرمال شده را ۸,۴۶ تا ۱۴۱,۶۶ درصد بهبود داده است.



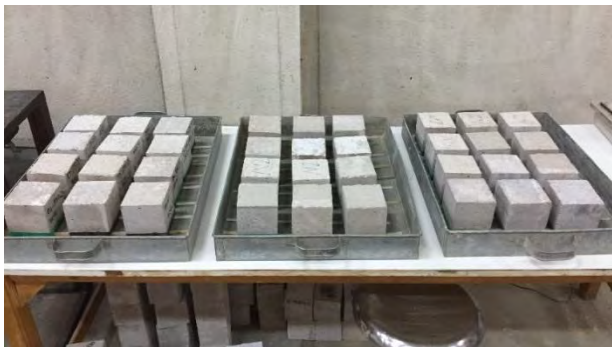
شکل ۱۱: تغییرات مقاومت کششی نرمال شده در دماهای مختلف.

۴-۲ آزمایش مشخصات دوام

در این مطالعه ارزیابی مشخصات دوام بتن از طریق بررسی مشخصات جذب آب سطحی، عمق نفوذ آب، مقاومت الکتریکی و افت وزنی در اثر قرارگیری در دماهای مختلف، انجام شده است.

۴-۲-۱ آزمون ضریب جذب آب سطحی

برای این آزمون از نمونه های مکعبی به ابعاد ۱۰ سانتیمتر استفاده شد. برای تامین شرایط جذب آب تنها از یک سطح، پیرامون نمونه ها از کف آنها به ارتفاع ۳ سانتیمتر توسط چسب عایق شده و به منظور ایجاد سطح تماس مستقیم با آب و حرکت آزادانه آب در زیر نمونه ها، میله هایی به قطر ۵ میلیمتر در کف سینی قرار داده شده و بتن بر روی آنها قرار گرفته است (شکل ۱۲). در این آزمایش پس از آنکه پیرامون نمونه ها در برابر نفوذ آب عایق گردید نمونه ها وزن شدند و درون سینی قرار گرفتند. پس از فواصل زمانی ۳، ۶، ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعت از شروع آزمایش بعد از حذف آب سطحی، نمونه ها وزن شدند و دوباره درون سینی قرار گرفتند. از آنجاکه مدت زمان آزمایش طولانی بوده و امکان تبخیر آب وجود دارد، برای جلوگیری از تغییر در گرادیان فشار ناشی از افت ارتفاع آب، در زمان های متوالی به سینی آب اضافه شده است تا سطح آب به اندازه ارتفاع اولیه باقی بماند.



ب



الف

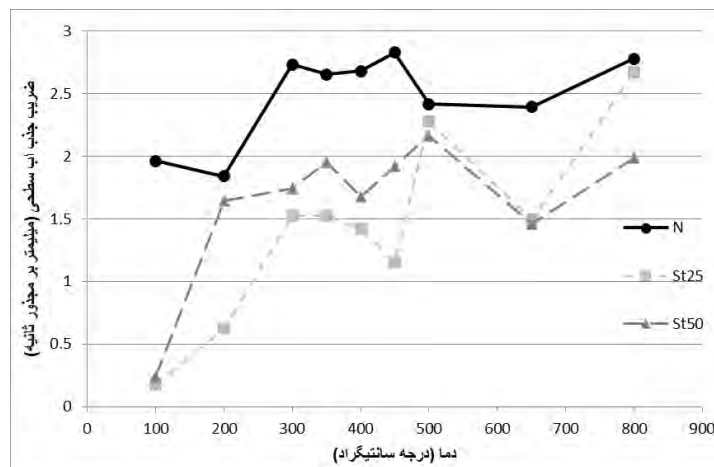
شکل ۱۲: تصویر آزمایش جذب آب سطحی (الف) آماده سازی نمونه ها در سینی پیش از ریختن آب، (ب) نمونه های حین آزمون.

با ثبت وزن نمونه ها در فواصل زمانی یاد شده و استفاده از رابطه ۱، ضریب جذب آب سطحی برای هر دما محاسبه شده است.

$$i = S \times \sqrt{t} + C \quad (1)$$

در این رابطه $i = \frac{m_i - m_0}{A \times \gamma_{water}}$ (mm/sec^{0.5})، S ضریب جذب آب سطحی، γ_{water} وزن مخصوص آب (mm³/gr^{10⁻³})، A (mm²) سطح مقطع در تماس با آب، t (Sec) مدت زمان تماس با آب، m_i (gr) وزن نمونه ها در هر بازه زمانی و m_0 (gr) وزن نمونه ها پیش از قرارگیری در سینی میباشد. با رسم نمودار i در برابر \sqrt{t} مقدار ضریب S (mm/sec^{0.5}) برآورد میگردد [۲۱]. که در این نمودار C عرض از مبدا میباشد و به عنوان یک ضریب ثابت لحاظ میگردد. تغییرات ضریب S با تغییرات دما در نمودار ۱۳ ترسیم شده است. ضریب جذب آب سطحی بتن معمولی در دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد ۱،۹۶ $\frac{mm}{sec^{0.5}}$ میباشد که با افزایش دمای آزمایش افزایش یافته و در دمای ۸۰۰ درجه سانتیگراد به ۲،۷۷ رسیده است. افزودن الیاف در تمام دماهای آزمایش این ضریب را کاهش داد. یکی از دلایل کاهش این ضریب در خاصیت الیاف برای پر کردن حفرات و کاهش راه های ارتباطی منافذ میباشد که در نتیجه خاصیت مویینگی و نفوذپذیری بتن کاهش میابد. اثرپذیری الیاف در میزان بهبود این مشخصه دوام بتن به دمای آزمایش و درصد الیاف به کار رفته وابسته است. در دماهای کم تر از ۵۰۰ درجه سانتیگراد نمونه هایی که حاوی ۰،۲۵ درصد حجمی از الیاف فولادی بیشترین تاثیر را بر بهبود ضریب جذب آب سطحی بتن داشته اند. در این محدوده دمایی ضریب جذب آب سطحی نمونه های St25 و St50 به ترتیب به طور متوسط ۵۰،۸۹ و ۳۴،۳۹ درصد از بتن

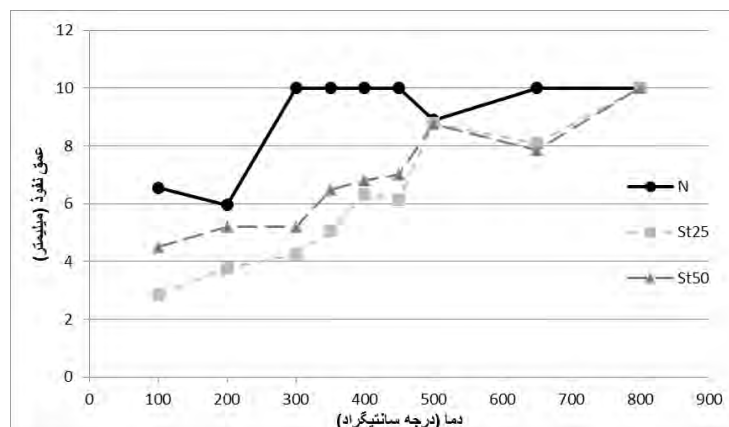
معمولی پایین تر بود. یکی از عوامل ایجاد حفرات و در نهایت جذب آب بیشتر در بتن انبساط الیاف و تولید حفرات اضافی در بتن میباشد. حرارت باعث انبساط الیاف فلزی شده که در نمونه‌های St50 که دارای تعداد بیشتری الیاف فلزی میباشد، انبساط بیشتر و در نتیجه حفرات بیشتری حاصل شده است. به این علت در دماهای کم‌تر از ۵۰۰ درجه سانتیگراد نمونه‌های دارای درصد کم‌تر الیاف، جذب آب سطحی کم‌تری داشته‌اند. اثبات دیگری از این توجیه در دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد مشهود است، به طوریکه ملاحظه میشود در این دما ضریب جذب آب سطحی هر دو نمونه الیافی یکسان بوده و تقریباً ۹۰ درصد نسبت به بتن معمولی کاهش یافته است. زیرا در این دما حرارت هنوز به اندازه‌ای نبوده که الیاف فلزی را دچار تغییر حجم قابل توجه نماید. در دماهای بیشتر از ۵۰۰ درجه سانتیگراد نیز حرارت موجب تجزیه C-S-H و پیوند سنگدانه‌ها و خمیره سیمان گسسته میشود. بنابراین در این محدوده دمایی همانطور که در بحث مقاومت فشاری نیز مطرح شد، حضور حجم بیشتر الیاف فلزی موجب قویتر شدن پیوند اجزای بتنی شده که جذب آب کم‌تر و در نهایت ضریب جذب آب سطحی کم‌تر را حاصل شده است.



شکل ۱۳: تغییرات ضریب جذب آب سطحی با تغییرات دما.

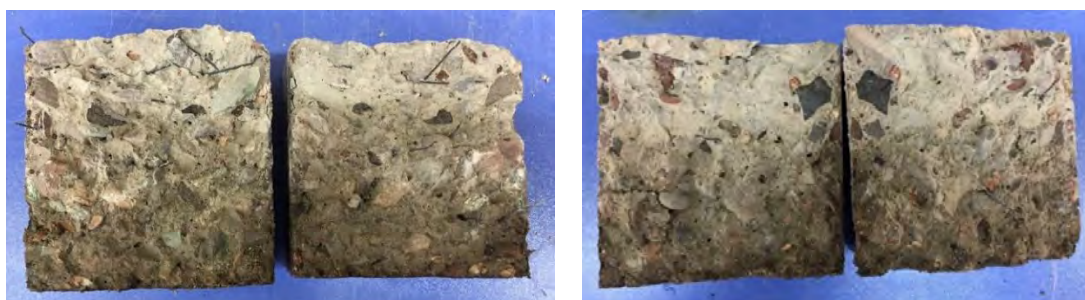
۲-۴-۲ آزمون نفوذ عمق نفوذ آب

به منظور تعیین عمق نفوذ آب ناشی از جذب آب سطحی، نمونه‌های مکعبی مشابه با نمونه‌های آزمایش شده در آزمون جذب آب سطحی آماده و به مدت ۷۲ ساعت درون سینی قرار گرفتند. پس از گذشت ۷۲ ساعت نمونه‌ها از سینی خارج شدند، چسب دور آنها باز گردید و در زیر جک به دو قسمت تقسیم شدند. تغییرات عمق نفوذ آب با افزایش درجه حرارت، برای بتن معمولی و بتن‌های دارای الیاف فلزی در شکل ۱۴ ترسیم شده است.



شکل ۱۴: تغییرات عمق نفوذ آب در دماهای مختلف.

عمق نفوذ آب در دمای ۱۰۰ درجه با افزودن ۰,۲۵ و ۰,۵ درصد الیاف فلزی به ترتیب ۵۶,۴۸ و ۳۱,۲۹ درصد کاهش یافته است. با افزایش دمای آزمایش به ۲۰۰ درجه عمق نفوذ بتن معمولی به میزان اندکی کاهش داشته و پس از آن روندی صعودی داشته به طوریکه در دماهای ۳۰۰ تا ۴۵۰ درجه سانتیگراد تقریباً تمام سطح نمونه را آب فرا گرفته است. این درحالیست که کاربرد الیاف فلزی در تمامی دماهای آزمایش به غیر از دمای ۸۰۰ درجه سانتیگراد که بتن الیافی نیز اشباع شده است، در کاهش عمق نفوذ آب موثر بوده است. این کاهش به نحوی بوده است که کاربرد ۰,۲۵ و ۰,۵ درصد از این الیاف به ترتیب و به طور میانگین موجب کاهش ۵۷,۵ و ۵۴ درصدی عمق نفوذ شده است. مقایسه میزان تاثیر پذیری این درصد الیاف فلزی در دماهای مطالعه شده نشان داده است که مشابه با آزمون جذب آب سطحی در دماهای کمتر از ۵۰۰ درجه سانتیگراد نمونه St25 و پس از آن نمونه St50 بیشترین تاثیر را داشته است. علاوه بر این مشاهده شد که مشابه با آزمون مقاومت کششی، بیشترین تاثیر کاربرد الیاف فلزی در بهبود مشخصات بتن در دمای ۲۰۰ درجه سانتیگراد اتفاق افتاده است. در این دما افزودن ۰,۲۵ و ۰,۵ درصد الیاف فلزی عمق نفوذ آب را به بیش از ۵۰ درصد کاهش داده است. پروفیل عمق نفوذ آب در دماهای ۵۰۰ درجه سانتیگراد، در تصویر ۱۵ نشان داده شده است.



ب

الف

شکل ۹: پروفیل عمق نفوذ آب در دمای ۵۰۰ درجه سانتیگراد (الف) نمونه St25، (ب) نمونه St50.

۲-۴-۳ آزمون مقاومت الکتریکی

آزمون مقاومت الکتریکی بر روی نمونه مکعبی به ابعاد ۱۰ سانتیمتر انجام شده است. ابتدا نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در آب غرقاب شدند و به محض خارج شدن از آب آزمایش شدند. مقاومت الکتریکی ویژه از رابطه ۳ محاسبه می‌شود [۳۷].



ب



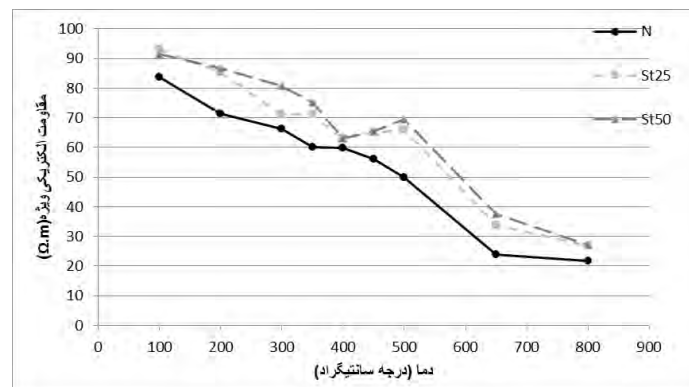
الف

شکل ۱۰: آزمون مقاومت الکتریکی (الف) غرقاب نمونه‌ها، (ب) تجهیزات آزمایش مقاومت الکتریکی

در این رابطه R مقاومت الکتریکی (Ω)، A سطح مقطع بتن (m^2)، L طول نمونه و r مقاومت الکتریکی ویژه بتن ($\Omega.m$) میباشد. در این آزمایش مقاومت الکتریکی بتن در دو جهت عمود بر هم در نمونه ها اندازه گیری و در نهایت میانگین گیری شده است و نتایج در نمودار ۱۷ ارائه شده است.

$$r = \frac{R \times A}{L} \quad (2)$$

نتایج نشان داده است که مقاومت الکتریکی ویژه بتن معمولی با افزایش درجه حرارت روندی کاملاً کاهشی داشته به طوری که از ۸۳۸٫۶ اهم متر در دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد با ۷۴ درصد افت به ۲۱۶٫۸۴ اهم متر در دمای ۸۰۰ درجه سانتیگراد رسیده است که میتوان آن را به افزایش تخلخل و ترک های بتن ناشی از حرارت مرتبط دانست. این روند در بتن های الیافی نیز تکرار شده است. افزودن الیاف فلزی در بتن موجب افزایش مقاومت الکتریکی ویژه بتن شده اند و کاربرد درصد های بالاتری از الیاف نیز، مقاومت الکتریکی ویژه بتن را بهبود بیشتری داده است. به طور میانگین کاربرد ۰٫۲۵ و ۰٫۵ درصد الیاف فلزی در دماهای بررسی شده در این مطالعه، مقاومت الکتریکی ویژه را به ترتیب ۱۹ و ۲۴٫۷۵ درصد افزایش داده است. علاوه بر این استفاده از این الیاف در کاهش افت مقاومت نیز موثر بوده است. به طور مثال در بتن معمولی نمونه ای که دماهای ۵۰۰، ۶۵۰ و ۸۰۰ درجه سانتیگراد را تجربه کرده است در مقایسه به نمونه ای که دمای ۱۰۰ درجه را تجربه کرده است به ترتیب ۴۰٫۳۹، ۷۱٫۴۲ و ۷۴٫۱۴ درصد، کاهش یافته است. در همین دماها و در حضور ۰٫۲۵ درصد الیاف فلزی، مقاومت الکتریکی ۲۹٫۱۸، ۶۳٫۶۴ و ۷۱٫۱۱ درصد و در حالت استفاده از ۰٫۵ درصد الیاف فلزی ۲۴٫۱۴، ۵۸٫۸۹ و ۷۰٫۳۴ درصد کاهش یافته است. این موضوع به خاطر حفظ یکپارچگی ساختار بتن در حضور الیاف بوده است. بنابراین از دو دیدگاه کاهش افت مقاومت الکتریکی و افزایش مقاومت الکتریکی در حضور الیاف فلزی، نتیجه میگردد که این نوع الیاف در بهبود مشخصات مقاومت الکتریکی بتن موثر میباشد.



شکل ۱۷: تغییرات مقاومت الکتریکی ویژه بتن در دماهای مختلف.

۲-۴-۴ آزمون افت وزنی

برای پیدا کردن میزان افت وزنی بتن در هر دما نمونه های مکعبی به ابعاد ۱۰ سانتیمتر پیش و پس از قرار دادن در کوره، وزن شدند و درصد افت وزنی آنها در نمودار ۱۸ ارائه شده است. مشاهده شده است که افزایش دما باعث کاهش وزن بتن شده و افزودن الیاف فولادی از شدت کاهش وزن بتن معمولی کاسته است. علت اصلی کاهش وزن در محدوده دمایی ۱۰۰ تا ۲۰۰ درجه سانتیگراد به دلیل تبخیر آب موئینه و آب آزاد در منافذ مویرگی بتن بوده و افت وزنی بتن در این بازه دمایی از سایر بازه دماها بیشتر بوده است. در بازه دمایی ۳۰۰ تا ۴۰۰ درجه سانتیگراد، نرخ افزایش افت وزنی کاهش یافته زیرا آب ترکیب شیمیایی در ملات سیمان جدا و تبخیر میگردد. بعد از این دما نرخ افت وزنی دوباره افزایش می یابد. در محدوده دمای ۳۰۰ تا ۴۰۰ درجه سانتیگراد، کاهش وزن به علت تجزیه $Ca(OH)_2$ به Cao و آب است [۳۸]. کاهش وزن بتن در دماهای ۶۵۰ درجه سانتیگراد نیز میتواند ناشی از تجزیه ژل کلسیم سیلیکات هیدرات (C-S-H) باشد. دمای ۸۰۰ درجه سانتیگراد نیز با توجه به تجزیه اجزای سنگدانه، سنگدانه ها ناپایدار می شوند و لایه بیرونی بتن به شدت

آسیب می بیند و از بین می رود که باعث کاهش وزن بیشتر بتن می شود. افزودن ۰,۲۵ درصد و ۰,۵ درصد از الیاف فولادی افت وزنی بتن را در دماهای بررسی شده به ترتیب در حدود ۴۴,۹-۵,۱۳ درصد و ۵۹,۱۴-۳,۸۹ درصد کاهش داده است.

۳- نتیجه گیری

در این مطالعه تاثیر استفاده از الیاف فلزی در بهبود مشخصات مکانیکی و دوام بتن در دماهای مختلف بررسی گردید. مشخصات مکانیکی نمونه‌ها در حالت داغ و مشخصات دوام آن‌ها در در دمای محیط بررسی گردید. میزان الیاف به کار رفته در بتن ۰,۲۵ و ۰,۵ درصد حجمی و دماهای بررسی شده محدوده ۲۸ تا ۸۰۰ درجه سانتیگراد را پوشش داده است. نتایج این مطالعه نشان داده است:

با افزایش سن نمونه، مقاومت فشاری بتن معمولی و الیافی در دمای محیط ۱۳ و ۱۹ درصد افزایش داشته است. همچنین ملاحظه گردید که در دمای محیط و ۱۰۰ درجه سانتیگراد افزودن الیاف فلزی به بتن موجب کاهش مقاومت فشاری شده و افزودن درصدهای بیشتری از این الیاف موجب تشدید این کاهش شده است.

در دماهای بالاتر از ۱۰۰ درجه سانتیگراد، کاربرد ۰,۲۵ و ۰,۵ درصد حجمی از الیاف فلزی مقاومت فشاری بتن را به ترتیب در محدوده ۱۰-۲۷ و ۴-۱۹ درصد بهبود داده است. تا دمای ۵۰۰ درجه سانتیگراد نمونه St25 و پس از آن نمونه St50 بیشترین تاثیر را بر بهبود مقاومت فشاری بتن داشته است.

با افزایش سن نمونه، مقاومت کششی بتن معمولی و الیافی در دمای محیط به ترتیب ۱۷ تا ۱۹ درصد افزایش داشته است. همچنین افزودن الیاف فلزی به بتن موجب افزایش مقاومت کششی بتن در تمامی دماهای آزمایش به مقدار ۸ تا ۲۰۰ درصد شده است و مقاومت کششی نمونه‌های با ۰,۵ درصد الیاف به طور میانگین در دماهای بررسی شده ۳۰ درصد بیشتر از نمونه‌های St25 بوده است.

روند کلی تغییرات مقاومت فشاری و کششی بتن مشابه است. در ابتدا روندی نزولی داشته، پس از آن افزایش مقاومت ملاحظه شده و دوباره روند رو به افت مقاومت مشاهده شده است.

در آزمون جذب آب سطحی افزایش دمای آزمایش از ۱۰۰ تا ۸۰۰ درجه سانتیگراد موجب افزایش نفوذپذیری بتن و در نهایت افزایش ضریب جذب آب سطحی شده است. استفاده از الیاف فلزی به عنوان راهکاری مفید در جهت کاهش این پارامتر معرفی شده است. در دماهای کم‌تر از ۵۰۰ درجه سانتیگراد مشابه با نتایج آزمون مقاومت فشاری نمونه‌های St25 و در دماهای بالاتر از ۵۰۰ درجه سانتیگراد نمونه St50 بهترین عملکرد را داشته است.

افزودن الیاف فلزی به بتن معمولی در تمامی دماهای آزمایش نفوذپذیری آب را کاهش داده است. در این آزمایش نیز مشابه آزمون جذب آب سطحی در دماهای کم‌تر و بیشتر از ۵۰۰ درجه سانتیگراد به ترتیب نمونه St25 و St50 بهترین عملکرد را داشته است.

افزایش دمای آزمایش به شدت باعث کاهش مقاومت الکتریکی ویژه بتن معمولی شده است. به طوریکه، افزایش دمای آزمایش از ۱۰۰ به ۸۰۰ درجه سانتیگراد مقاومت ویژه الکتریکی بتن را ۷۴ درصد کاهش داده است.

افزودن الیاف فلزی به مقدار ۰,۲۵ و ۰,۵ درصد به طور میانگین در دماهای بررسی شده مقاومت الکتریکی ویژه را به ترتیب ۱۹ و ۲۵ درصد افزایش بخشیده است.

افزایش دمای آزمایش موجب کاهش وزنی نمونه‌ها شده است. الیاف فلزی در این رابطه نیز موثر بوده اند و افزودن ۰,۲۵ و ۰,۵ درصد از آنها به ترتیب درصد کاهش وزنی بتن معمولی را در محدوده ۵-۴۵ و ۴-۵۹ درصد کاهش داده است.

بنابراین با توجه به توضیحات فوق میتوان نتیجه‌گیری کرد که در دماهای کم‌تر از ۵۰۰ درجه سانتیگراد افزودن ۰,۲۵ درصد حجمی از الیاف فلزی میتواند راهکار مناسبی جهت بهبود مشخصات مکانیکی و دوام بتن باشد درحالیکه در دماهای بالاتر از ۵۰۰ درجه سانتیگراد، درصدهای بیشتری از این الیاف توصیه میگردد.

تشکر و قدردانی

بدینوسیله از همکاری و مساعدت گروه مهندسی عمران دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) به ویژه زحمات آقای مهندس محمد فلاح شیروانی مسئول آزمایشگاه کمال تشکر و قدردانی را داریم.

مراجع

- [1] Xing, Z. Beaucour, A.-L. Noumowe, A. and Ledesert, B. (2015). Aggregate's influence on thermophysical concrete properties at elevated temperature. *Constr. Build. Mater.*, vol. 95, pp. 18–28.
- [2] Fletcher, I. A. Borg, A. Hitchen, N, and Welch, S. (2006). Performance of concrete in fire: a review of the state of the art, with a case study of the Windsor tower fire.
- [3] Meacham, B. Engelhardt, M. and Kodur, V. (2009). Collection of data on fire and collapse, faculty of architecture building, delft university of technology. in Proc. of NSF Engineering Research and Innovation Conference, Honolulu, Hawaii.
- [4] Ewen, S. "Grenfell Lessons," *Firefighter*, pp. 14–15, 2017.
- [5] Wikipedia, (2018). Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/2018_California_wildfires.
- [6] Novák, J. and Kohoutková, A. (2017). Fibre reinforced concrete exposed to elevated temperature. in IOP Conference Series: *Materials Science and Engineering*, vol. 246, no. 1, p. 12-45.
- [7] Masoud, M. A. (2015). Compressive Strengths And Modulus Of Elasticity Of Steel Fiber Reinforced Concrete Under Different Temperature Conditions. Master of Engineering. Universitas Muhammadiyah Surakarta.
- [8] Khalil, L. W. I. (2018). Influence of high temperature on steel fiber reinforced concrete. *J. Eng. Sustain. Dev.*, vol. 10, no. 2, pp. 139–150.
- [9] Kim, J. and Lee, G.-P. (2015). Evaluation of mechanical properties of steel-fibre-reinforced concrete exposed to high temperatures by double-punch test. *Constr. Build. Mater.*, vol. 79, pp. 182–191.
- [10] Gholhaki, M. Pachideh, Gh. and Rezayfar, O. (2017). An experimental study on mechanical properties of concrete containing steel and polypropylene fibers at high temperatures. *Journal of structural and construction engineering*. vol. 4, no. 3, pp. 167–179.
- [11] Rao, K. S. and Narayana, S. R. K. A. L. (2013). Comparison of performance of standard concrete and fibre reinforced standard concrete exposed to elevated temperatures. *Am. J. Eng. Res.*, vol. 3, pp. 20–26.
- [12] Faiyadh, F. I. and Al-Ausi, M. A. (1989). Effect of elevated temperature on splitting tensile strength of fibre concrete. *Int. J. Cem. Compos. Light. Concr.*, vol. 11, no. 3, pp. 175–178.
- [13] Yermak, N. Pliya, P. Beaucour, A.-L. Simon, A. and Noumowé, A. (2017). Influence of steel and/or polypropylene fibres on the behaviour of concrete at high temperature: Spalling, transfer and mechanical properties. *Constr. Build. Mater.*, vol. 132, pp. 240–250.
- [14] Aslani, F. and Samali, B. (2014). Constitutive relationships for steel fibre reinforced concrete at elevated temperatures. *Fire Technol.*, vol. 50, no. 5, pp. 1249–1268.
- [15] Uysal, M. and Akyuncu, V. (2012). Durability performance of concrete incorporating Class F and Class C fly ashes. *Constr. Build. Mater.*, vol. 34, pp. 170–178.
- [16] Tasdemir, C. (2003). Combined effects of mineral admixtures and curing conditions on the sorptivity coefficient of concrete. *Cem. Concr. Res.*, vol. 33, no. 10, pp. 1637–1642.
- [17] Leung, H. Y. Kim, J. Nadeem, A. Jaganathan, J. and Anwar, M. P. (2016). Sorptivity of self-compacting concrete containing fly ash and silica fume. *Constr. Build. Mater.*, vol. 113, pp. 369–375.
- [18] Mendes, A. Sanjayan, J. G. Gates, W. P. and Collins, F. (2012). The influence of water absorption and porosity on the deterioration of cement paste and concrete exposed to elevated temperatures, as in a fire event. *Cem. Concr. Compos.*, vol. 34, no. 9, pp. 1067–1074.

- [19] Chen, J. J. Kwan, A. K. H. and Jiang, Y. (2014). Adding limestone fines as cement paste replacement to reduce water permeability and sorptivity of concrete. *Constr. Build. Mater.*, vol. 56, pp. 87–93.
- [20] Beglarigale, A. Ghajeri, F. Yiğiter, H. and Yazıcı, H. (2014). Permeability Characterization of Concrete Incorporating Fly Ash. 11th International congress on advances in civil engineering. İstanbul.
- [21] Kubissa, W. and Jaskulski, R. (2013). Measuring and time variability of the sorptivity of concrete. *Procedia Eng.*, vol. 57, pp. 634–641.
- [22] Dabbagh, H. and Mohammaddoost, H. (2017). Influence of fiber geometry on the mechanical properties of structural steel fiber lightweight concrete made with Scoria aggregate. *Journal of structural and construction engineering*. vol. 4, no 1. pp. 17–25.
- [23] Afroughsabet, V. and Ozbakkaloglu, T. (2015). Mechanical and durability properties of high-strength concrete containing steel and polypropylene fibers. *Constr. Build. Mater.*, vol. 94, pp. 73–82.
- [24] Kakooei, S. H. Akil, M. Jamshidi, M. and Rouhi, J. (2012). The effects of polypropylene fibers on the properties of reinforced concrete structures. *Constr. Build. Mater.*, vol. 27, no. 1, pp. 73–77.
- [25] B. S. EN, 1-2: 2004 Eurocode 2: Design of concrete structures-Part 1-2: General rules-Structural fire design. (2004). Eur. Stand. London.
- [26] AISC 360-10. (2010). Chicago, IL.
- [27] B. Standard, Testing hardened concrete, Compressive Strength Test Specimens. (2009) BS EN, pp. 12390–12393.
- [28] Xiao, J. Xie, Q. and Xie, W. (2018). Study on high-performance concrete at high temperatures in China (2004–2016)-An updated overview. *Fire Saf. J.*, vol. 95, pp. 11–24.
- [29] Castillo, C. (1987). Effect of transient high temperature on high-strength concrete. Rice University, Houston, Texas.
- [30] Naus, D. J. The effect of elevated temperature on concrete materials and structures-a literature review. (2006). Oak Ridge National Laboratory (United States). Funding organisation: .
- [31] Morsy, M. S. Rashad, A. M. and Shebl, S. S. Effect of elevated temperature on compressive strength of blended cement mortar. (2008). *Build Res J*, vol. 56, no. 2–3, pp. 173–185.
- [32] Peng, G.-F. and Huang, Z.-S. (2008). Change in microstructure of hardened cement paste subjected to elevated temperatures,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 22, no. 4, pp. 593–599.
- [33] Khoury, G. A. Anderberg, Y. Both, K. Fellingner, J. Høj, N. P. and Majorana, C. (2007). Fib bulletin 38: fire design of concrete structures—materials, structures and modelling, state-of-the art report. Fed. Int. du beton, Lausanne, Switz.
- [34] Rashad, A. M. Bai, Y. Basheer, P. A. M. Collier, N. C. and Milestone, N. B. (2012). Chemical and mechanical stability of sodium sulfate activated slag after exposure to elevated temperature. *Cem. Concr. Res.*, vol. 42, no. 2, pp. 333–343.
- [35] C. ASTM, 496/C 496M-04. (2004). Stand. Test Method Split. Tensile Strength Cylind. Concr. Specimens. C. ASTM, “496/C 496M-04,” *Stand. Test Method Split. Tensile Strength Cylind. Concr. Specimens*, 2004.
- [36] Novak, J. and Kohoutkova, A. (2018). Mechanical properties of concrete composites subject to elevated temperature,” *Fire Saf. J.*, vol. 95, pp. 66–76.
- [37] Silva, P. C. Ferreira, R. M. and Figueiras, H. (2011). Electrical resistivity as a means of quality control of concrete—influence of test procedure,” in International Conference on Durability of Building Materials and Components. Porto. Portugal. vol. 12.
- [38] Zheng, W. Li, H. and Wang, Y. (2012). Compressive behaviour of hybrid fiber-reinforced reactive powder concrete after high temperature,” *Mater. Des.*, vol. 41, pp. 403–409.