

Effect of high temperature and gradual cooling with air and fog on concrete containing steel fibers

Seyed Hosein Ghasemzadeh Mousavinejad^{1*} , Armin Mottaghi Pirmoosaei², Roohollah Asefi³

1. Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Guilan, Guilan, Iran.
2. M.Sc. in Civil Engineering-Structures, Instructor, Faculty of Engineering and Technology, Jihad Daneshgahi Higher Education Institute of Guilan, Guilan, Iran.
3. M.Sc. in Civil Engineering-Structures, Instructor, Faculty of Engineering and Technology, Jihad Daneshgahi Higher Education Institute of Guilan, Guilan, Iran.

Abstract

Fire can not only lead to many human and financial losses, but also can cause structures to collapse and destroy them. For this reason, it is necessary and inevitable to protect buildings against fire and conduct more research in the field of better understanding the effects of combining different materials with each other and obtaining materials with greater resistance to fire. Concrete and concrete structures are always used by construction engineers due to their resistance, availability and resilience against fire. Ordinary concrete loses its strength at high temperatures, and the use of unreinforced concrete is not very useful due to its brittleness and weakness in tensile strength. In concrete, the tensile strength is lower than its compressive strength, and for this reason, researchers are trying to increase the resistance to fire and heating by improving the tensile strength of concrete. Reinforcing concrete with rebar is always a solution to increase the tensile strength in concrete parts, one of the most important weaknesses of using rebar in concrete is that the reinforcements form a small part of the concrete cross-section and actually cause the concrete to be inhomogeneous. In this research, double-bent steel fibers have been used to overcome the mentioned weakness and reinforce the concrete. It should be noted that concrete containing steel fibers has favorable compressive and tensile strength due to the high tensile strength of steel fibers. In order to achieve this goal and achieve fiber concrete that has good fire resistance, we defined seven different mixing plans with different percentages of steel fibers and lubricants. Concrete samples were produced using double-bent steel fibers in amounts of 0.5, 1, and 1.2 percent by volume of concrete and superlubricant in 0.5, 1, and 1.3 percent by weight of cement, and then in Cubic molds with dimensions of 10x10x10 cm and cylindrical ones were sampled as standard, and after setting the cement, the 28-day-old concrete samples, after heating and placing inside the electric heater with different temperatures, were divided into two The method of gradual cooling with ambient air and fog spraying (water spraying) is similar to what firefighters do when extinguishing a fire, after measuring the amount of weight loss of the heated samples, the weight loss values were presented in the form of a diagram, then the samples were subjected to tests Compressive strength, tensile strength (Brazilian test) and ultrasonic wave speed (ultrasonic test) were placed, and the results and data of each of them for each mixing design were presented in the form of a diagram after examination and classification, so that the effect of high heat on Concrete containing steel fibers and super-lubricant should be determined. The results clearly showed the improvement of the tensile strength in three volume percentages of fibers by 14.6, 16.8 and 64.5%, respectively, compared to concrete without fibers, and also the compressive strength of concrete after bearing the heat of 250 degrees Celsius and cooling to the fogging method had 44.5, 31.6, and 9.3 percent, respectively, and in the gradual air cooling method, the compressive strength was 43.3, 44.9, and 50 percent, respectively.

Review History

Received: Jun 05, 2024

Revised: Sep 15, 2024

Accepted: Nov 20, 2024

Keywords

Fiber Reinforced Concrete (FRC)

Hooked-End Steel Fibers

Compressive Strength

Tensile Strength

(Brazilian Test)

Fog Spraying, Ultrasonic

* Corresponding Author Email: h.mosavi@guilan.ac.ir - ORCID: 0000-0002-8023-7694

اثر حرارت بالا و خنک سازی تدریجی با هوا و مه پاشی بر بتن حاوی الیاف فولادی

سید حسین قاسم زاده موسوی نژاد^{*۱}، آرمین متقی پیرموسائی^۲، روح اله آصفی^۳

۱. دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، گیلان، ایران.

۲. کارشناس ارشد مهندسی عمران- سازه، مربی، دانشکده فنی و مهندسی، موسسه آموزش عالی جهاد دانشگاهی گیلان، گیلان، ایران.

۳. کارشناس ارشد مهندسی عمران- سازه، دانشکده فنی و مهندسی، موسسه آموزش عالی جهاد دانشگاهی گیلان، گیلان، ایران.

چکیده

تاریخچه داوری

افزایش دما در حوادثی مانند آتش سوزی همواره یکی از دغدغه‌های مهندسان است که در صورت عدم مهار آتش سوزی، ممکن است به فروپاشی کلی سازه منجر شود. سازه‌های بتنی به دلیل مقاومت، در دسترس بودن و تاب آوری مناسب در برابر آتش سوزی همواره مورد استفاده مهندسان ساختمان هستند. مقاومت کششی بتن کمتر از مقاومت فشاری آن است و به همین دلیل پژوهشگران در تلاشند که با بهبود مقاومت کششی بتن، مقاومت آن را در برابر آتش سوزی و گرم شدن افزایش دهند. بتن حاوی الیاف فولادی به علت مقاومت کششی بالای فولاد، از مقاومت فشاری و کششی مطلوبی برخوردار است. در این پژوهش نمونه‌های بتن با استفاده از الیاف فولادی دوسر خم به مقادیر ۰/۵، ۱ و ۱/۲ درصد حجمی بتن و فوق روان کننده در درصدهای ۰/۵، ۱ و ۱/۳ درصد وزنی سیمان تولید شد و سپس نمونه‌های عمل آوری شده بتن ۲۸ روزه، پس از حرارت دهی با دماهای متفاوت به دو روش خنک شدن تدریجی با هوای محیط و مه پاشی (آب پاشی)، تحت آزمایش‌های مقاومت فشاری، مقاومت کششی (تست برزیلی) و سرعت موج عبوری امواج فراصوت (تست آلتراسونیک) قرار گرفت. نتایج بیانگر بهبود مقاومت کششی در سه درصد حجمی الیاف به ترتیب به مقدار ۱۴/۶، ۱۶/۸ و ۶۴/۵ درصد نسبت به بتن بدون الیاف شد و همچنین مقاومت فشاری بتن پس از تحمل گرمای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد و خنک‌سازی به روش مه پاشی به ترتیب دارای ۴۴/۵، ۳۱/۶ و ۹/۳ درصد و در روش خنک‌سازی تدریجی با هوا به ترتیب ۴۳/۳، ۴۴/۹ و ۵۰ درصدی مقاومت فشاری شد.

کلمات کلیدی

بتن الیافی
الیاف فولادی دوسر خم
مقاومت فشاری
مقاومت کششی (تست برزیلی)
مه پاشی
التراسونیک

۱- مقدمه

درجه حرارت و ظرفیت زیاد حرارتی است [2]. سرعت انتقال پایین حرارت توسط بتن آن را به محافظی برای سایر مصالح مجاور و جداکننده‌ای تبدیل نموده که نه تنها از پیشروی حریق جلوگیری می‌نماید بلکه از لایه‌های درونی خود نیز در مقابل آسیب‌ها و صدمات ناشی از حریق محافظت می‌نماید [3]. با وجود تمام محاسن بتن در مقابل گرمای ناشی از آتش و حریق، بزرگترین عیب بتن از دست دادن مقاومت خود در درجه

سازه‌های بتنی نسبت به سازه‌های فولادی در برابر آتش سوزی نیز از مقاوم مناسب و مطلوبی برخوردار هستند [1]. دلیل مقاومت مطلوب بتن در مقابل آتش مصالح تشکیل دهنده آن به ویژه سیمان و سنگدانه‌ها می‌باشد که پس از تکمیل واکنش شیمیایی سیمان و آب (هیدراتاسیون) و ترکیب مصالح با یکدیگر، ماده‌ای تولید می‌شود که دارای ضریب هدایت حرارت کم، تضعیف بالای شدت

* رایانامه نویسنده مسئول: h.mosavi@guilan.ac.ir - ORCID: 0000-0002-8023-7694

کپی‌رایت © ۲۰۲۵، انتشارات دانشگاه تربیت مدرس (TMU Press). این مقاله به صورت دسترسی آزاد منتشر شده و تحت مجوز بین‌المللی Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 قرار دارد (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>). بر اساس این مجوز، شما می‌توانید این مطلب را در هر قالب و رسانه‌ای کپی، بازنشر و بازآفرینی کنید و یا آن را ویرایش و بازسازی نمایید، به شرط آنکه نام نویسنده را ذکر کرده و از آن برای مقاصد غیرتجاری استفاده کنید.



بالا تر باعث آسیب شدید تری به بتن می شود و خنک سازی با آب موجب انبساط ناهمسان بتن، ترک خوردگی بیشتر و پوسته شدن بتن خواهد شد [11].

پاچیده در مقاله ای به بررسی مقاومت بتن حاوی فنرهای بازیافتی و بتن الیافی در معرض دمای بالا پرداخته است. در این مقاله بتن های سبک خود متراکم با الیاف هایی از جنس فنر بازیافتی، پلی پروپیلن و الیاف فولادی با درصدهای مختلف تحت دماهای مختلف ۲۵ الی ۷۰۰ درجه سانتی گراد قرار گرفته است و نتایج آنها بیان شده است [12].

تحقیقات پیشین نشانگر بهبود خواص مکانیکی و دوام بتن با استفاده از الیاف به ویژه الیاف فولادی در مقابل آتش سوزی است و به نوعی یکی از اصلی ترین نگرانی های مهندسی سازه های بتن آرمه در زمان آتش سوزی مربوط به آرماتورها است (مقاله اولش). پس در این پژوهش برای برطرف نمودن موارد بالا از بتن حاوی الیاف فولادی استفاده شد. حال برای شبیه سازی خاموش کردن آتش سوزی سازه های بتنی، خنک سازی توسط روش مه پاشی به مشابه سیستم های اطفای حریق نصب شده در ساختمان ها در نظر گرفته شد. با توجه به موارد مذکور هدف دیگر از استفاده همزمان بتن الیافی با خنک سازی به روش مه پاشی تحلیل مشخصات فیزیکی بتن فاقد الیاف و الیافی بوده است.

نمودار ۱ به بیان روند کلی انجام مقاله پرداخته است و در ادامه روش تحقیق مفصل مطرح خواهد شد.

۲- روش تحقیق

در مورد رفتار بتن در برابر افزایش دما و حریق استاندارد و آیین نامه قابل قبول و معتبری موجود نیست و فقط مطالعات اندکی در زمینه خنک سازی بتن حرارت دیده با هوا صورت گرفته است ولی مطالعات خنک سازی با دو روش خنک سازی و مقایسه داده های آنها نوآوری این پژوهش می باشد.



شکل ۱. نمایی از پخش شدن الیاف و قرارگیری آنها در عرض ترک

Fig. 1. A view of the spread of fibers and their placement across the crack

حرارت های بالا می باشد [4]. وجود میلگردها در سازه های بتن آرمه یکی از مهم ترین چالش هایی است که در هنگام آتش سوزی باعث ایجاد مشکلات در رفتار سازه می شود [5]. قلپکی و همکاران در پژوهشی بتن های حاوی الیاف های فولادی و پلی پروپیلن در دماهای بالا پرداختند و نتایج بیانگر بهبود ۴۰ درصدی مقاومت فشاری و ۵۰ درصدی مقاومت کششی بتن های حاوی الیاف فولادی نسبت به الیاف پلی پروپیلن در مواجهه با حرارت بالا بود در حالی که مقاومت خمشی آنها تقریباً یکسان بوده است [5]. به منظور رفع غیرهمگنی بتن و ایجاد شرایط مطلوب و همچنین کاهش ضعف مقاومت کششی بتن، در دهه های اخیر از الیاف فولادی آن استفاده می شود. الیاف فولادی در هنگام تشکیل ترک در بتن، در جهات متفاوت اتصالاتی را ایجاد می کنند و با مقاومت بالای کششی خود موجب محدود کردن عرض ترک و تشکیل ریز ترک های زیاد، نیروی کششی قابل تحمل توسط بتن را افزایش می دهند [6].

پاچیده و قلپکی در پژوهشی به استفاده از الیاف فولادی و پلی پروپیلن برای بهبود عملکرد تراورس های بتنی پرداختند [7]. شوای پنگ^۱ و همکاران در مطالعه ای به بررسی تاثیر الیاف فولادی (SFRC)^۲ با درصدهای مختلف در چهار طرح اختلاط برای انجام آزمایش های کششی به دو روش مستقیم و غیرمستقیم پرداختند [8].

آراتی کریشنا^۳ و همکاران خواص مکانیکی بتن مسلح با الیاف میکرو فولادی با مقاومت بالا در معرض دماهای بالا را ارزیابی کردند [9].

پاچیده و همکاران در مقاله ای به عملکرد بتن حاوی فنرهای بازیافتی در شرایط پس از آتش سوزی پرداختند. نتایج نشان داد که مقاومت فشاری و کششی آزمون ها با افزودن ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶ درصد فنر بازیافتی بهبود یافته است و همچنین تفاوت معنی داری بین مقاومت کششی بتن حاوی فنر و الیاف فولادی وجود نداشت [10].

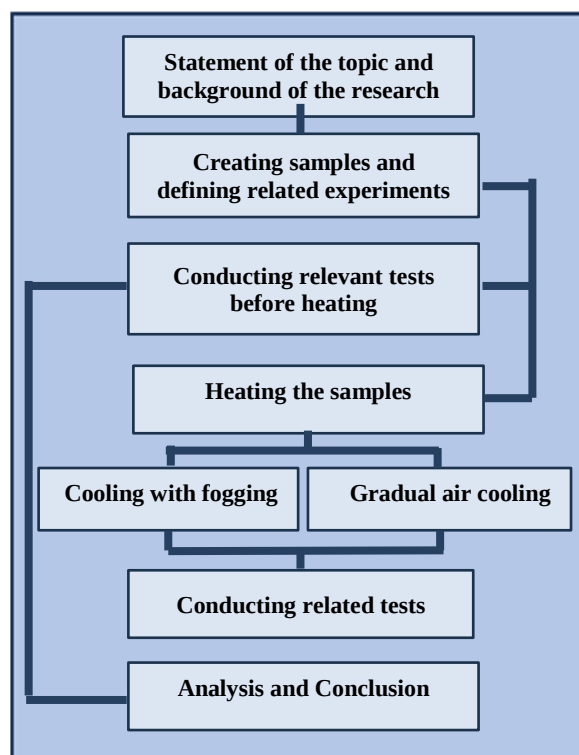
میانو^۴ و همکاران تحقیق تجربی در مورد انتقال حرارت و خواص مکانیکی بتن در معرض دمای بالا در هنگام فرآیند خنک سازی با آب پرداختند. نتایج حاکی از آن بود که گرمای

¹ Shuai Peng

² Steel Fiber Reinforced Concrete

³ Arathi Krishna

⁴ Jijun Miao



نمودار ۱. فرآیند انجام پژوهش

Chart.1. The process of doing research

بکاربرده و به ساخت بتن و نمونه گیری در قالب های مکعبی به ابعاد $100 \times 100 \times 100$ میلی متر پرداخته و پس از عمل آوری در سن ۲۸ روزه روی تعدادی از نمونه ها آزمایش مقاومت فشاری و تست آلتراسونیک بتن و همچنین آزمایش کشش غیرمستقیم (تست برزیلی) انجام خواهد پذیرفت سپس نمونه هایی از هر طرح اختلاط را در دستگاه های اوون^۱ (گرمخانه یا کوره الکتریکی) با سه درجه حرارت مختلف ۱۵۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ درجه سانتی گراد به مدت ۴ ساعت گرم خواهیم نمود و هر کدام از طرح اختلاط ها را به ۲ روش خنک سازی نموده روش اول خنک سازی به صورت مه پاشی (آب پاشی) یعنی پاشش اسپری نمودن قطرات ریز آب روی نمونه بتنی گرم شده با الهام گرفتن از آنچه که آتش نشان ها در آتش سوزی ها انجام می دهند و روش دوم خنک سازی خنک کردن نمونه ها با استفاده از هوای طبیعی و قرارگیری در محیط آزمایشگاه با دمای تقریبی ۲۵ درجه برای مدت زمانی می باشد، تا دمای نمونه های گرم شده کاهش یافته و هم دما با محیط اطراف شود.

در ادامه نمونه های خنک شده مورد ارزیابی مکانیکی قرار می گیرد و نتایج بررسی ها ارائه خواهد شد. لازم به ذکر است که

در مورد رفتارهای بتن و مشخصات مکانیکی آن پس از حریق و گرما مطالعاتی انجام شده است اما با توجه به پژوهش های پیشین و مطالعات انجام شده روی بتن، مشاهده می شود که در دماهای بالا به ویژه در هنگام آتش سوزی دمای بتن نیز پس از مدتی افزایش می یابد و به علت انتقال دما به لایه های داخلی بتن تبخیر و منجر به ایجاد تنش کششی در داخل بتن می شود که موجب ایجاد ترک در سطح بتن شده و در دماهای بالای ۴۰۰ درجه سانتی گراد مولکول های آب در پیوند شیمیایی دچار تخریب می شوند که یکی از مهمترین پیامدها آنها کاهش مدول الاستیسیته و مقاومت بتن است [11].

در این پژوهش با بکارگیری الیاف فولادی به علت افزایش ظرفیت کششی بتن و جلوگیری از ترک خوردگی، کاهش ضخامت ترک (کنترل عرض ترک)، افزایش دوام بتن و بهبود انسجام و همگنی بتن با توزیع یکنواخت الیاف فولادی در بتن [13] و همچنین استفاده از روان کننده به منظور کاهش مقدار آب مصرفی و بهبود خواص مکانیکی بتن، به بررسی اثر گرم و سپس سرد شدن تدریجی با هوا و همچنین مه پاشی (آب پاشی) روی بتن حاوی الیاف فولادی دوسر خم ارزیابی می شود در ابتدا با تعریف طرح اختلاط های مدنظر میزان متفاوتی از الیاف و روان کننده را

¹ Oven

میلی متر، جذب آب ۰/۷ درصد با مدول نرمی ۲/۱۰ می‌باشند که پس از انجام آزمایش‌های دانه‌بندی بر اساس استاندارد ASTM C33/C33M (استاندارد ۳۰۲ کشور ایران) نمودار دانه‌بندی آنها در شکل‌های (۲ و ۳) آورده شده است [14].

پس از آزمایش دانه‌بندی با الک‌های استاندارد روی شن و ماسه مصرفی، منحنی دانه‌بندی مقایسه‌ای شن و ماسه مصرفی با منحنی دانه‌بندی استاندارد در شکل (۲ و ۳) نشان داده شده است که خطوط مشکی بیانگر دانه‌بندی مصالح مصرفی و خطوط آبی رنگ نشان دهنده حد بالا و پایین شن و ماسه طبق استاندارد ۳۰۲ ایران است.

۳-۱-۴- الیاف فولادی

الیاف استفاده شده در آزمایش‌های این پژوهش از جنس فولاد آلیاژی کم کربن به صورت الیاف سیمی دارای دو انتهای خمیده (دو سر خم) که موجب درگیری و چسبندگی بهتر الیاف به بتن و به ترتیب با قطر و طول ۰/۸ و ۵۰ میلی‌متر و مقاومت کششی بیش از ۹۵۰ مگاپاسکال، مدول الاستیسیته بیش از ۲۰۰ گیگاپاسکال می‌باشند که بر اساس استانداردهای ASTM A820-2011، BS EN 14889-12006 و ASTM 510M توسط شرکت استیل صنعت عصمت استان یزد در کشور ایران تولید شده‌اند [15, 16, 17].

قالب نمونه‌برداری برای انجام آزمایش کشش (تست برزیلی) استوانه‌ای استاندارد و به ابعاد 300×150 میلی‌متر می‌باشد.

۳- برنامه آزمایشگاهی

۳-۱-۱- مصالح مصرفی

در پژوهش جاری مصالح مصرفی شامل آب، سیمان، سنگدانه (شن و ماسه)، الیاف فولادی دوسر خم و همچنین روان کننده به عنوان ماده افزودنی برای کاهش آب مصرفی و اصلاح برخی پارامترهای بتن استفاده شده است.

۳-۱-۱-۱- آب مصرفی

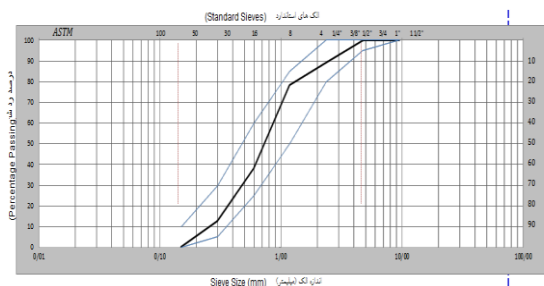
در بخش ساخت و عمل‌آوری نمونه‌ها از آب دارای PH حدوداً ۷/۵ برای انجام آزمایش‌های این پژوهش استفاده شد.

۳-۱-۲- سیمان مصرفی

سیمان مصرفی از نوع پرتلند تیپ II (دو) استاندارد می‌باشد.

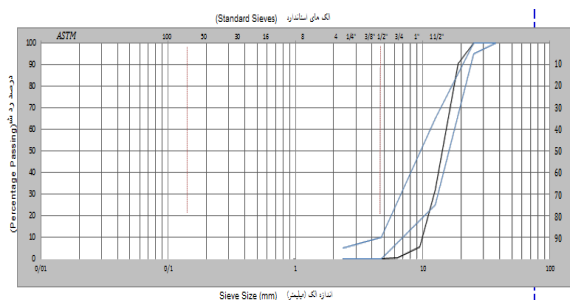
۳-۱-۳- سنگدانه‌های مصرفی (شن و ماسه)

سنگدانه‌های مصرفی به صورت دوبار شسته شده (دوبار شور) بوده است. شن‌های مصرفی دارای بیشترین قطر ۲۵/۴ میلی‌متر و با جذب آب ۰/۵ درصد و ماسه مصرفی دارای بیشترین قطر ۴/۷۵



شکل ۲. منحنی دانه‌بندی مقایسه‌ای ماسه با منحنی دانه‌بندی ماسه استاندارد

Fig 2. Comparative sand grading curve with standard sand grading curve



شکل ۳. منحنی دانه‌بندی مقایسه‌ای شن با منحنی دانه‌بندی شن استاندارد

Fig. 3. Comparative gravel grading curve with standard gravel grading curve

جدول ۱. طرح‌های اختلاط

Table 1. Mixing schemes

Lubricant (kg/m ³)	Steel fibers (kg)	coarse aggregate (kg/m ³)	fine aggregate (kg/m ³)	Cement (kg/m ³)	Water (Kg)	The name of the mixing scheme	number
0	0	1161	746	425.2	178.6	C	1
0	39/27	1161	746	425.2	178.6	SFRC 0.5 %	2
0	78.54	1161	746	425.2	178.6	SFRC 1%	3
0	94.25	1161	746	425.2	178.6	SFRC 1.2%	4
2.126	39.27	1161	746	425.2	178.6	SFRC 0.5 % + Pc 0.5 %	5
4.252	78.54	1161	746	425.2	178.6	SFRC 1%+ Pc 1%	6
5.528	94.25	1161	746	425.2	178.6	SFRC 1.2% + Pc 1.3%	7

۳-۱-۵- روان کننده مصرفی

ماسه ۱۱۶۱ و ۷۴۶ کیلوگرم بر متر مکعب بوده است. نمونه‌ها در شرایط تقریباً یکسانی متراکم و به مدت ۲۸ روز مطابق با استاندارد ASTM C192 در حوضچه آب، عمل آوری شد [18, 15, 19]. در جدول (۱) مقادیر هفت طرح اختلاط مد نظر آورده شده است. لازم به ذکر است که SFRC نماد الیاف فولادی و PC نماد روان کننده است.

مدت ۵ الی ۶ دقیقه دیگر با سرعت کم ادامه یافت و سپس بلافاصله روی آنها آزمایش اسلامپ (کارایی بتن تازه) طبق استاندارد ASTM C143 M15 انجام گرفت که تمامی طرح‌های اختلاط دارای اسلامپی بین ۲/۵ الی ۵ سانتی متر بودند [3]. سپس سطح قالب‌های نمونه برداری به وسیله قلم مو نقاشی روغنکاری شد، قالب‌ها در سه مرحله پر شدند و هر مرحله با میله تخم‌خاک ۲۵ ضربه زده شد و تراکم یافت لازم به ذکر است که ساخت و عمل آوری نمونه‌ها مطابق استاندارد ASTM C192 انجام شد [19].

۳-۳- آزمون‌ها

۳-۳-۱- آزمون مقاومت فشاری

ابتدا آزمون مقاومت فشاری روی تمامی طرح‌های اختلاط بدون قرارگیری در گرما (نمونه‌های شاهد) پس از عمل آوری و خارج کردن از حوضچه آب و خشک شدن سطح و توزین نمونه‌ها انجام شد، سپس نمونه‌ها به مدت ۴ ساعت در اوون (کوره الکتریکی) در دماهای ۱۵۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ درجه سانتی گراد نگهداری شدند.

سرعت بارگذاری دستگاه جک فشاری ۰/۲ مگاپاسکال بر ثانیه تنظیم شد تا موجب شکست آنی نمونه‌ها نشود. پس از ثبت میانگین نتایج مقاومت فشاری آزمون‌های ۱۰۰×۱۰۰×۱۰۰ میلی‌متر

روان کننده استفاده شده در ساخت بتن‌های این پژوهش، روان کننده مایع قهوه‌ای رنگ نوع A و کاهنده مصرف آب بر پایه لیگنوسولفونات می‌باشد، استفاده از روان کننده موجب پخش بهتر و یکنواخت سیمان و الیاف در مخلوط بتن تازه می‌شود که توسط شرکت کلینیک بتن ایران تهیه شده است که استانداردهای ASTM EN-9342 C494, AASHTO M194 کشور آمریکا و استاندارد اتحادیه اروپا و ISIRI-2930 کشور ایران را دارد. این روان کننده بدون نیترات و غیراشتعال‌زا بوده و وزن مخصوص آن ۱/۲ تا ۱/۲۱ گرم بر سانتی متر مکعب در ۲۵ درجه سانتی گراد است. دمای انجماد آن مثبت ۲ درجه سانتی گراد بوده که در صورت یخ زدن با گرم کردن و هم زدن قابل بازیافت می‌باشد. استفاده از این روان کننده با توجه به مقدار مصرف آن می‌تواند تا ۲ درصد هوا وارد بتن نماید.

۳-۲- طرح‌های اختلاط و آزمون‌های آزمایشگاهی

برای انجام پژوهش حاضر ۱۰۸ نمونه مکعبی بتنی برای ساخت بتن‌های هر طرح اختلاط ابتدا با پیمان و وزن کردن هر یک از مصالح تشکیل دهنده بتن به روش وزنی بتن‌ها ساخته شدند، در طرح‌های دارای الیاف فولادی پس از مخلوط کردن بتن به مدت ۳ دقیقه الیاف به تدریج به مخلوط کن اضافه شده و پس از اضافه شدن تمام الیاف مورد نیاز، مخلوط کردن با دستگاه مخلوط کن بتن به ۱۰۰×۱۰۰×۱۰۰ میلی‌متر و ۲۰ نمونه استوانه‌ای استاندارد ۱۵۰×۳۰۰ میلی‌متر ساخته و مورد آزمایش قرار گرفت در مجموع از ۷ طرح اختلاط برای ساخت بتن نمونه‌ها بهره خواهیم برد که در تمامی طرح‌های اختلاط نسبت آب به سیمان برابر ۰/۴۲ مقدار سیمان مصرفی ۴۲۵/۲ کیلوگرم بر متر مکعب، به ترتیب شن و

۳-۳-۳- آزمون مقاومت کششی به روش غیر مستقیم (آزمایش کشش برزیلی)

۳-۳-۴- مقاومت کششی (آزمایش برزیلی)

مقاومت کششی بتن تاثیر زیادی در توسعه و عرض ترک‌های بوجود آمده در سازه‌های بتنی دارد. به علت دشوار بودن اندازه‌گیری کشش محوری یکنواخت، مقاومت کششی بتن اغلب با استفاده از آزمون شکافت نمونه استوانه‌ای split cylinder (آزمایش کشش برزیلی) برآورد می‌شود. در این آزمون از نمونه استوانه‌ای به ابعاد 150×300 میلی‌متر به صورت افقی در جک فشاری قرار داده می‌شود و نیروی فشاری (P) در امتداد دو سطح طولی استوانه بر آن وارد می‌شود. وقتی مقاومت کششی بتن به مقدار نهایی خود می‌رسد، نمونه از وسط به دو نیم شکافته می‌شود و در تئوری الاستیسیته ثابت می‌شود که تنش کششی در این حالت از فرمول (۲) بدست می‌آید.

$$f_{ct} = \frac{2P}{\pi dL} \quad (2)$$

در این رابطه به ترتیب P، d و L: نیروی یکنواخت فشاری وارد از بالا و پایین، قطر و طول نمونه استوانه‌ای می‌باشند [20,21]، سرعت بارگذاری برای انجام این آزمایش طبق استاندارد ASTM C597 بین ۷۰۰ الی ۱۴۰۰ کیلوپاسکال بر دقیقه یا ۰/۷ تا ۱/۴ مگاپاسکال بر دقیقه توصیه شده است که در این پژوهش سرعت ۰/۰۲ مگاپاسکال بر ثانیه برای انجام آزمایش مبنا قرار گرفت که نتایج در ادامه این پژوهش آورده شده است [22].

۴- بحث و تحلیل داده‌ها

در این بخش از پژوهش به اعلام، بررسی و تحلیل داده‌های حاصل از آزمایش‌ها خواهیم پرداخت.

۴-۱- آزمایش اسلامپ بتن تازه

آزمایش اسلامپ روی طرح اختلاط‌های مد نظر این پژوهش انجام گرفت که نتایج آن در نمودار (۲) نمایش داده شده است. نتایج آزمایش اسلامپ به وضوح تاثیر افزودن الیاف فولادی و روان کننده را نشان می‌دهد الیاف فولادی موجب کاهش اسلامپ و با افزودن روان کننده موجب افزایش اسلامپ شده است.

بر اساس ضرایب تبدیل موجود در مبحث نهم مقررات ملی ساختمان به مقاومت آزمونه‌های استاندارد استوانه‌ای به ابعاد 150×300 میلی‌متری طبق استاندارد ASTM تبدیل و به عنوان نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری ثبت و در بخش نتایج پژوهش آورده شده است.

۳-۳-۲- آزمون سرعت امواج فراصوت (آلتراسونیک بتن) UPV

دستگاه آلتراسونیک بتن مورد استفاده در این پژوهش ساخت شرکت controls کشور ایتالیا با مدل 58E4800 و دقت ۰/۱ میکرو ثانیه می‌باشد.

این آزمون روی ۹۸ نمونه با طرح‌های اختلاط معین در دو مرحله انجام پذیرفت که مرحله اول قبل از حرارت دادن به نمونه ها و مرحله دوم پس از قرارگیری نمونه‌ها در اوون و خنک‌سازی به وسیله مه‌پاشی و یا هوا انجام پذیرفت.

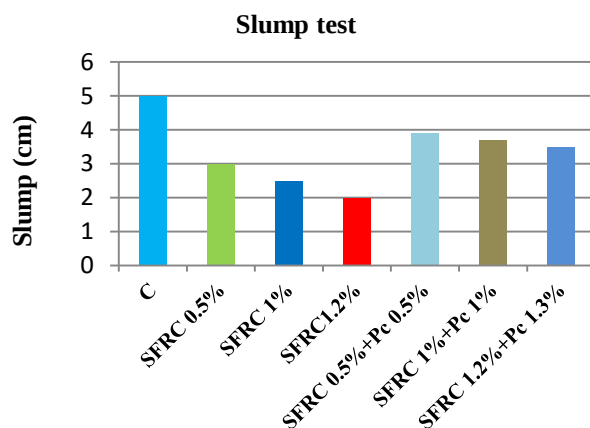
فرکانس پالس‌های ارسالی دستگاه ۵ هرتز (فرکانس متوسط) با مدت زمان انتقال پالس عبوری برحسب میکروثانیه تنظیم شد. به منظور بالا بردن دقت آزمون و اتصال بهتر ترنس دیوسر با نمونه بتنی در سطوح تماس نمونه از گریس نسوز استفاده شد، سپس با بهره‌گیری از روش آزمایش تماسی، تعداد ۴ قرائت از زمان عبور پالس در هنگام ثابت شدن پالس روی یک عدد معین در نقاط مختلف نمونه بتنی انجام شد و یک قرائت با میانگین‌گیری برای هر وجه نمونه مکعبی و در مجموع ۲ قرائت به عنوان مدت زمان پالس عبوری برای هر نمونه مکعبی بتن ثبت شد، لازم به ذکر است که سرعت عبور امواج برای هر نمونه مکعبی، متوسط سرعت در دو جهت عمود بر هم در نظر گرفته شد. پس از محاسبه زمان انتقال پالس و با توجه به اینکه طول مسیر انتقال امواج ۱۰۰ میلی‌متر بوده است، با استفاده از فرمول (۱) بر اساس استاندارد ایران، سرعت انتقال پالس فراصوت در نمونه مکعبی، پس از تبدیل بر حسب کیلومتر بر ثانیه محاسبه شد که در قسمت‌های بعدی پژوهش نتایج حاصله آورده شده است.

$$V = \frac{l}{t} \quad (1)$$

v: سرعت انتقال پالس فراصوت برحسب km/s

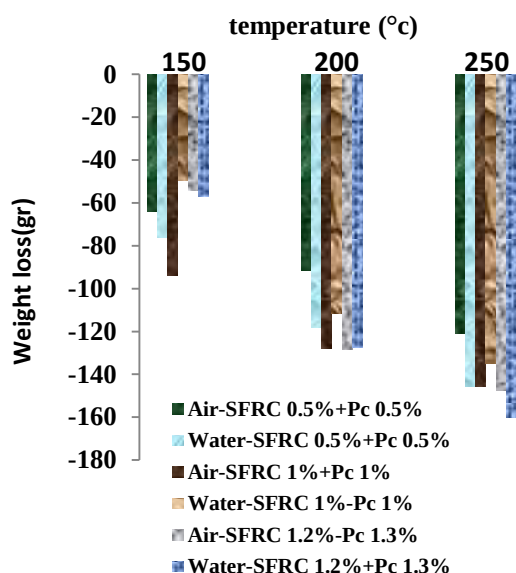
l: طول مسیر انتقال برحسب mm

t: مدت زمان انتقال پالس در بتن بر حسب μs است.



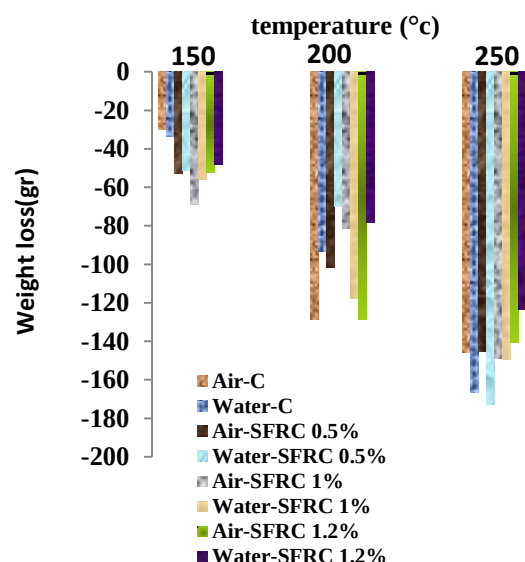
نمودار ۲. اسلامپ نمونه ها

Chart. 2. Slump samples



نمودار ۴. کاهش وزن نمونه ها در دماهای مختلف

Chart. 4. Weight loss of samples at different temperatures



نمودار ۳. کاهش وزن نمونه ها در دماهای مختلف

Chart. 3. Weight loss of samples at different temperatures

۲-۴- میزان کاهش وزن نمونه ها

پس از عمل آوری بتن ها، در سن ۲۸ روزه نمونه ها از حوضچه عمل آوری خارج شدند و در کوره الکتریکی با دماهای ۱۵۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ به مدت ۴ ساعت قرار گرفته و بلافاصله پس از آن نمونه ها به ۲ روش مه پاشی و قرارگیری در دمای محیط آزمایشگاه خنک سازی و مجدداً توزین شدند که نتایج در نمودار (۳ و ۴) آمده است.

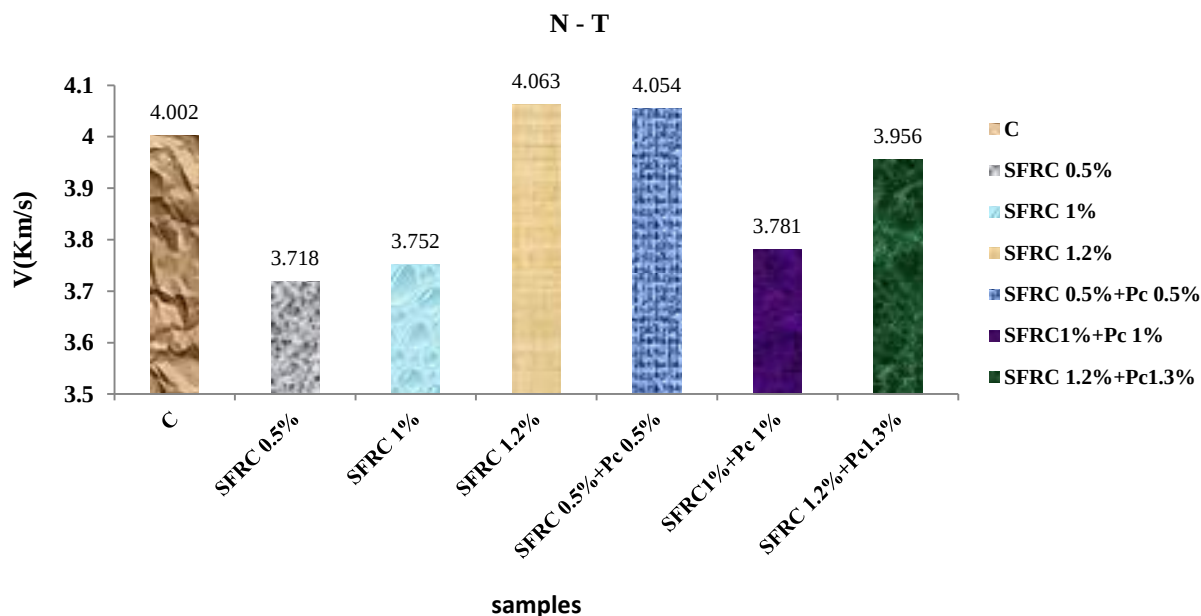
۳-۴- آزمایش مقاومت فشاری و آزمایش آلتراسونیک نمونه ها

بدون قرارگیری در گرما (نمونه های شاهد)

در این پژوهش برای هر طرح ۲ نمونه و در مجموع ۱۴ عدد

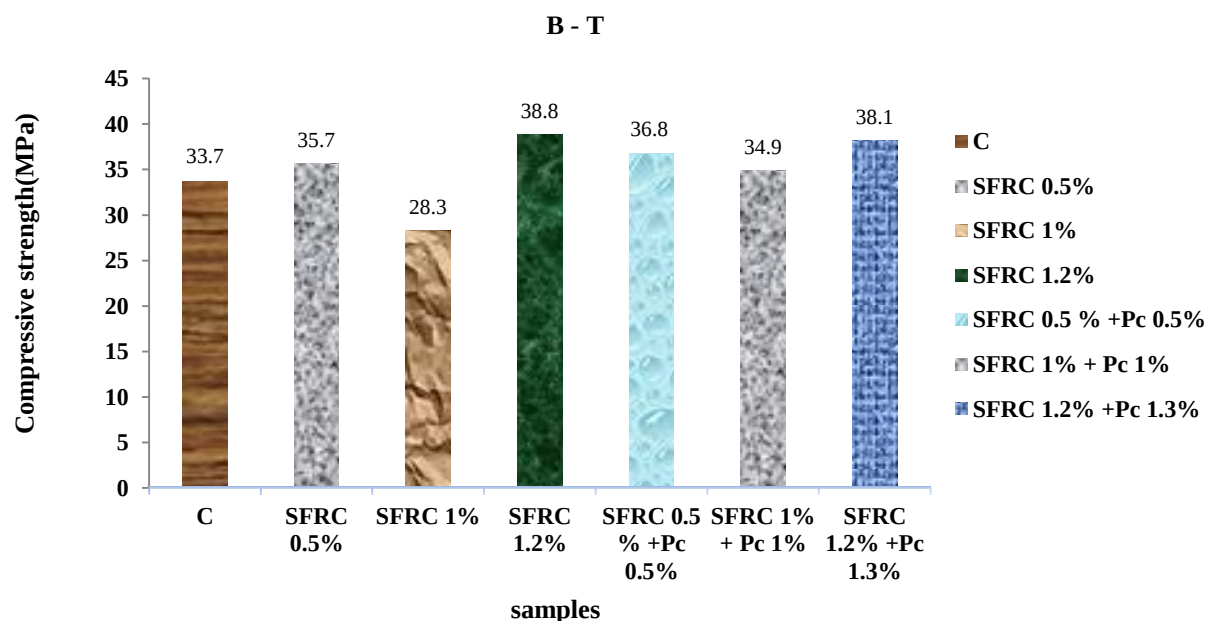
نمونه مکعبی بتن با هفت مدل طرح اختلاط، به عنوان طرح شاهد ساخته شد که در سن ۲۸ روزه آزمایش مقاومت فشاری و آلتراسونیک روی آنها انجام گرفت.

جواب های بدست آمده برای هر طرح در نمودارهای (۵ و ۶) آورده شده است. با توجه به آن مشاهده می شود که افزودن الیاف فولادی به میزان ۰/۵ و ۱/۲ درصد حجمی بتن موجب افزایش سرعت پالس آلتراسونیک می شود.



نمودار ۵. آزمایش سرعت اولتراسونیک طرح شاهد (بدون حرارت)

Chart. 5. Ultrasonic speed test of the control samples (without heat)



نمودار ۶. مقاومت فشاری نمونه‌های طرح شاهد (بدون حرارت)

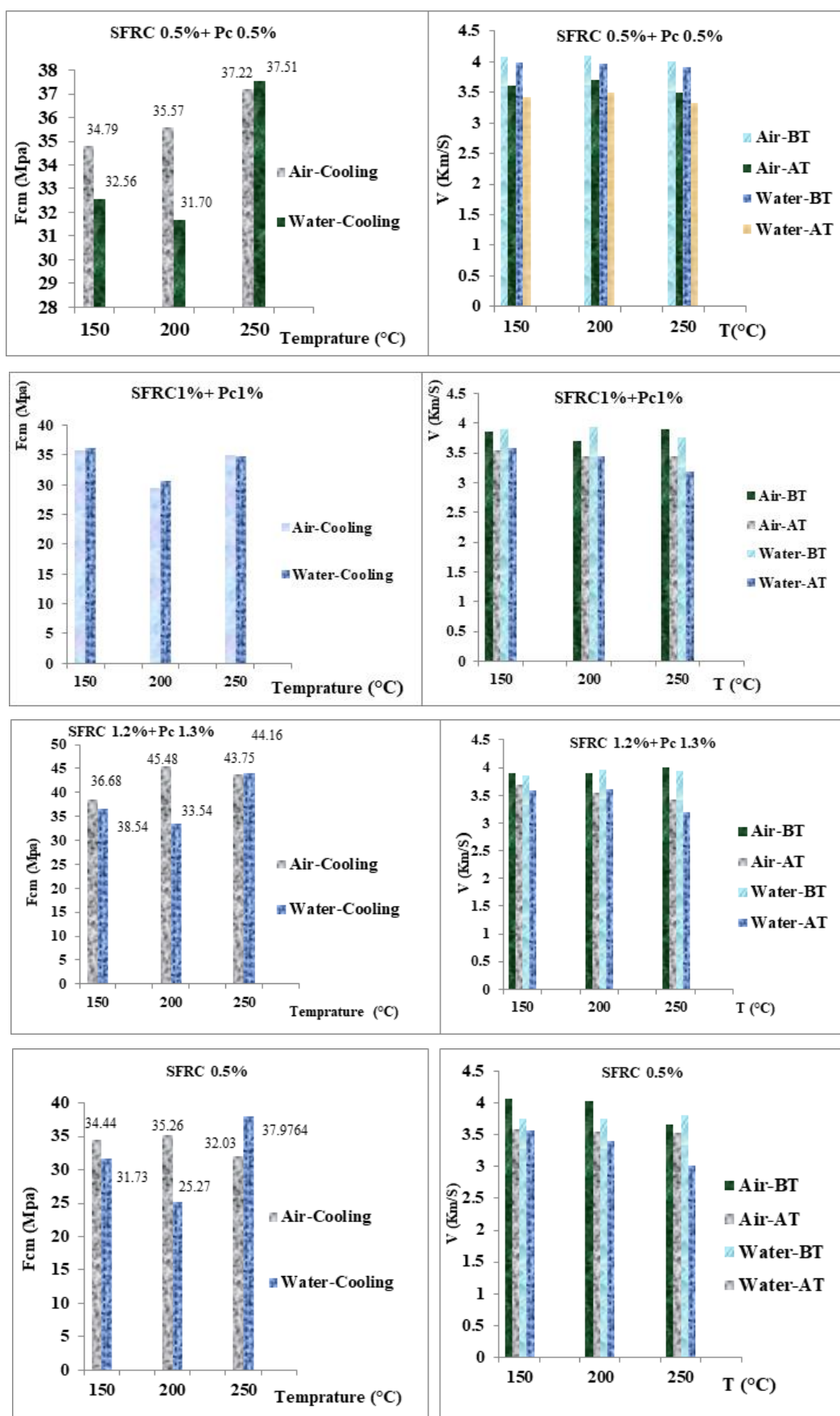
Chart. 6. Compressive strength of control samples (without heating)

روش مه‌پاشی (آبیاشی) با قطرات ریز آب شرب مورد استفاده در ساخت نمونه‌ها با استفاده از شیلنگ و نازل آبیاش پودری به صورت اسپری قطرات ریز آب روی نمونه با دبی ۰/۱ لیتر در ثانیه و با الهام گرفتن از آنچه آتشنشان‌ها در مواجهه با آتش‌سوزی انجام می‌دهند انجام شد تا نمونه‌ها به دمای محیط برسند. که نتایج پس از دسته بندی در نمودار (۷) آورده شده است.

۴-۴- آزمایش مقاومت فشاری بتن پس از حرارات دادن و

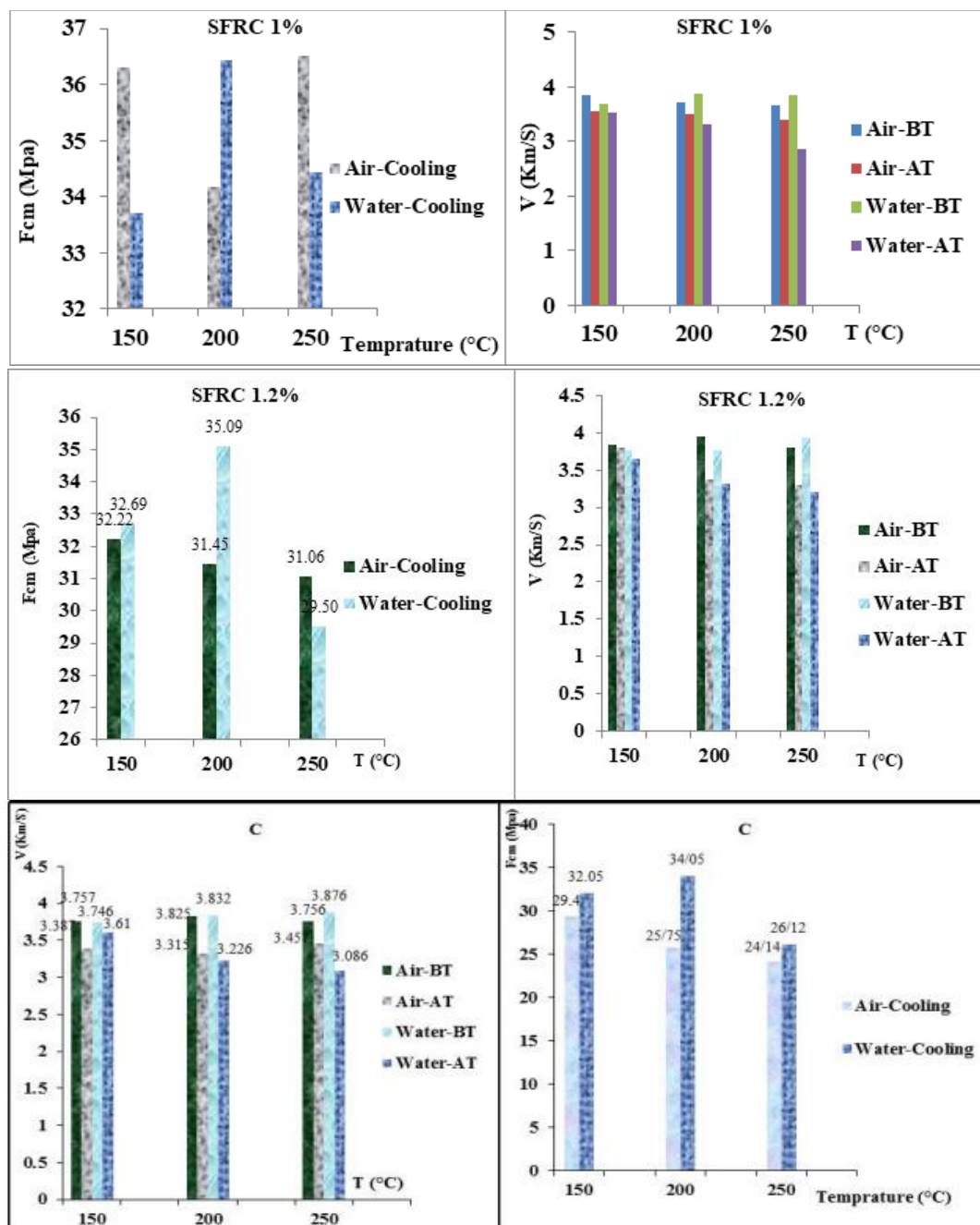
تحمل گرما

جواب آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌ها پس از قرارگیری به مدت ۴ ساعت در کوره الکتریکی (اوون) و پس از آن خنک‌سازی با هوا یعنی قرارگیری در محیط آزمایشگاه تا رسیدن به دمای محیط (حدوداً ۲۵ درجه سانتی‌گراد) و همچنین خنک‌سازی به



نمودار ۷. نتایج آزمون مقاومت فشاری و تست فراصوت برای طرح های اختلاط

Chart. 7. Results of ultrasonic and compressive strength tests



ادامه نمودار ۷. نتایج آزمون مقاومت فشاری و تست فراصوت برای طرح های اختلاط

Continue of Chart. 7. Results of ultrasonic and compressive strength tests

به طوری که با افزودن ۰/۵ درصد الیاف فولادی نسبت به نمونه های بدون الیاف و پس از تحمل دمای ۲۵۰ درجه سانتی گراد در حالت خنک سازی تدریجی با هوا ۴۳/۳ درصد و در حالت خنک سازی به روش مه پاشی ۴۴/۵ درصد افزایش مقاومت فشاری نمونه ها ملاحظه شد و در کل مقاومت فشاری بتن در هنگام استفاده از الیاف فولادی به مقدار ۰/۵ درصد حجمی بتن و در دماهای ۱۵۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ درجه سانتی گراد، در هنگام خنک سازی با هوا ۳۲/۸ درصد و در روش مه پاشی با آب ۱۶/۲ درصد نسبت به بتن بدون الیاف افزایش

با توجه به داده های به دست آمده مشاهده شد که افزودن الیاف فولادی در شرایط یکسان آزمایشگاهی موجب تغییر مقاومت فشاری بتن می شود به طوری که افزودن الیاف فولادی به مقدار ۰/۵ و ۱/۲ درصد حجمی به بتن به ترتیب موجب افزایش ۷/۵ و ۱۴ درصدی مقاومت فشاری می شود.

با توجه به داده های به دست آمده از قسمت آزمایشگاهی این پژوهش مشاهده شد که افزودن الیاف فولادی به نمونه های بتن موجب افزایش مقاومت فشاری پس از مواجهه با حرارت می شود

شد و در ادامه نمونه‌ها در دستگاه اوون در مقابل حرارت با دماهای مختلف قرار گرفتند و به دو صورت خنک‌سازی شدند که روش اول خنک‌سازی به شکل مه پاشی و روش دوم خنک‌سازی تدریجی با هوا است. سپس نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری، آزمایش آلتراسونیک و آزمایش برزلی برای نمونه‌های خنک شده نیز تکرار شد. با تحلیل و بررسی نتایج ۷ طرح اختلاط بدست آمده مشخص شد که افزودن الیاف فولادی به میزان ۰/۵ و ۱/۲ درصد حجمی بتن موجب افزایش سرعت پالس آلتراسونیک می‌شود.

افزودن الیاف فولادی به نمونه‌های بتن موجب افزایش مقاومت فشاری پس از مواجهه با حرارت می‌شود به طوری که با افزودن ۰/۵ درصد الیاف فولادی نسبت به نمونه‌های بدون الیاف و پس از تحمل دمای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد در حالت خنک‌سازی تدریجی با هوا ۴۳/۳ درصد و در حالت خنک‌سازی به روش مه پاشی ۴۴/۵ درصد افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ها ملاحظه شد.

در کل مقاومت فشاری بتن در هنگام استفاده از الیاف فولادی به مقدار ۰/۵ درصد حجمی بتن و در دماهای ۱۵۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد، در هنگام خنک‌سازی با هوا ۳۲/۸ درصد و در روش مه پاشی با آب ۱۶/۲ درصد نسبت به بتن بدون الیاف افزایش ملاحظه شد.

همچنین مقاومت فشاری بتن پس از تحمل گرمای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد و خنک‌سازی به روش مه‌پاشی برای مقادیر ۱ و ۱/۲ درصد به ترتیب دارای ۳۱/۶ و ۹/۳ درصد و در روش خنک‌سازی تدریجی با هوا به ترتیب ۴۴/۹ و ۵۰ درصدی مقاومت فشاری شد. نتایج در بحث آزمایش مقاومت کششی نیز نشان می‌دهد اضافه کردن ۱/۲ درصد الیاف فولادی باعث افزایش مقاومت کششی نمونه‌ها در مقابل نمونه بتن بدون الیاف می‌شود.

قدردانی

از آزمایشگاه کنترل استقامت بابت همکاری در انجام آزمایشات مربوط به این پژوهش تشکر می‌نمایم.

تاییدهای اخلاقی

هیچگونه مداخلات انسانی و حیوانی در این پژوهش اعمال نشده است.

تعارض منافع

تعارض منافی ندارد.

ملاحظه شد. مقاومت فشاری نمونه‌ها در هنگام به کارگیری ۱ درصد الیاف فولادی نسبت به نمونه‌های بدون الیاف در دمای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد در روش خنک‌سازی با هوا ۴۴/۹ درصد و در حالت مه‌پاشی با آب ۳۱/۶ درصد افزایش مشاهده شد و همچنین در حالت افزودن ۱/۲ درصد حجمی الیاف فولادی به بتن در دمای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد شاهد افزایش ۵۰ درصدی مقاومت فشاری در مقایسه با نمونه‌های فاقد الیاف فولادی بودیم و مقاومت فشاری بتن حاوی الیاف به مقدار ۱/۲ درصد حجمی بتن، در دماهای ۱۵۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد، در حالت خنک‌سازی با هوا ۳۳/۴ درصد و در حالت خنک‌سازی با مه پاشی ۹/۳ درصد افزایش یافته است.

با توجه به نتایج فوق و بررسی جواب آزمایش‌های این پژوهش مشاهده می‌شود که مقاومت کششی و فشاری بتن‌های حاوی الیاف فولادی پس از مواجهه با دمای بالا به مراتب نسبت به بتن فاقد الیاف بهبود و افزایش یافته است و همچنین مقاومت فشاری و کششی بتن حاوی الیاف فولادی در حالتی که بتن پس از گرم شدن و تحمل حرارت بالا، به تدریج توسط هوا و به طور طبیعی خنک سازی شد نسبت به حالتی که با مه‌پاشی (در بتن دارای الیاف فولادی و همچنین در بتن فاقد الیاف فولادی) خنک‌سازی شد، مقاومت بهتری از خود نشان داد که بنظر این مسئله می‌تواند به علت انقباض و انبساط ناهمسان لایه‌های بتن خارجی و داخلی هنگام خنک‌سازی باشد که موجب ایجاد ترک‌های بیشتر و تنش در لایه‌های بتن شده و در کل موجب کاهش مقاومت بتن می‌شود.

۴-۵- آزمایش مقاومت کششی

با توجه به نتایج آزمایش برزلی برای درصدهای مختلف بتن الیافی فولادی که در این پژوهش بررسی شد، افزودن الیاف فولادی با درصدهای ۰/۵، ۱ و ۱/۲ حجمی بتن به ترتیب موجب افزایش ۱۴/۶، ۶/۸ و ۶۴/۵ درصد مقاومت کششی نسبت به بتن بدون الیاف شده است. نتایج نشان داد که با افزودن ۱/۲ درصد الیاف فولادی بیشترین مقاومت کششی نسبت به بتن بدون الیاف به دست آمد.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش پس از بیان مسئله و مطالعه مطالبی که در حوزه موضوع مطرح هستند تصمیم بر آن شد که برای بهبود خواص مکانیکی بتن از روان کننده و الیاف فولادی با ۷ طرح اختلاط مختلف استفاده شود. نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری، آزمایش آلتراسونیک و آزمایش برزلی نمونه‌ها قبل از حرارت دادن بررسی

سهم نویسندگان

منابع مالی

هر سه نویسنده به یک اندازه در این مقاله سهیم هستند.

تمامی هزینه ها به صورت شخصی و توسط نویسندگان پرداخت شده است.

References

1. Netinger Grubeša, I., Marković, B., Gojević, A. & Brdarić, J. 2018. Effect of hemp fibers on fire resistance of concrete. *Construction and Building Materials*.
2. Vitorino, H., Vila Real, P., Couto, C. & Rodrigues, H. 2024. Parametric analysis of post-earthquake fire resistance of reinforced concrete frames without seismic design. *Engineering Structures*.
3. Düzgün, O. A. & Küçük, E. N. 2024. Post-fire seismic performance of reinforced concrete structures. *Structures*.
4. Ba, G., Song, M., Zhang, B. & Cui, G. 2024. Residual flexural capacity of corroded reinforced concrete beams after exposure to fire. *Structures*.
5. Gholhaki, M., Pachideh, G. & Rezaee far, O. 2017. Experimental Study on Mechanical Properties of Concrete Containing Steel Fibres and Polypropylene in high temperatures. *Journal of Structural and Construction Engineering*, pp. 167-179.
6. Subramanian, S., Davis, R. & Thomas, B. S. 2024. Full-scale static behaviour of prestressed geopolymer concrete sleepers reinforced with steel fibres. *Construction and Building Materials*.
7. Pachideh, G. & Gholhaki, M. 2019. Using steel and polypropylene fibres to improve the performance of concrete sleepers. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*, pp. 690-702.
8. Peng, S., Zong, F., Gao, S., Li, Y., Ma, Z. & Yu, G. 2023. Study on dynamic splitting tensile mechanical properties and microscopic mechanism analysis of steel fiber reinforced concrete. *Structures*.
9. Krishna, A., Apoorva, J., Goutham, K., Greeshma, A. & Harikrishnan, R. 2023. Mechanical properties of high-strength micro steel fibre reinforced concrete subjected to high temperatures. *Materials Today: Proceedings*.
10. Pachideh, G., Gholhaki, M. & Moshtagh, A. 2018. Performance of concrete containing recycled springs in post-fire conditions. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*, pp. 3-16.
11. Miao, J., Huang, S., Chen, S., Chen, M. & Chen, Q. 2023. Experimental research on heat transfer and mechanical properties of concrete subjected to elevated temperature during the water-cooling process. *Journal of Building Engineering*.
12. Pachideh, G., Gholhaki, M., Ramezani-pour, A. A. & Moshtagh, A. 2013. Strength of SCLC recycle springs and fibers concrete subject to high temperatures. *Structural Concrete*, pp. 285-299.
13. Qin, D., Pan, P., Su, Q., Liu, J. & Zhang, J. 2022. A comprehensive review on fire damage assessment of reinforced concrete structures. *Case Studies in Construction Materials*.
14. ASTM-C33. 2023. *Standard Specification for Concrete Aggregates*. s.l.:s.n.
15. Ding, Y. & Kusterle, W. 2000. Compressive Stress-Strain Relationship of Steel Fiber-Reinforced Concrete at Early Age. *Cement and Concrete Research*.
16. ASTM A510/A510M. 2018. *Standard Specification for General Requirements for Wire*. s.l.:s.n.
17. ASTM A820. 2011. *Standard Specification for Steel Fibers for Fiber-Reinforced Concrete*. s.l.:s.n.
18. Wang, Q. S., Chen, M. S., Wang, T. J. & Lu, G. Z. 2008. Experiment on Mechanical Properties of Steel Fiber Reinforced Concrete and Application in Deep Underground Engineering. *Journal of China University of Mining & Technology*.
19. ASTM-C192. 2019. *Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory*. s.l.:s.n.
20. ASTM-C597. 2023. *Standard Test Method for Ultrasonic Pulse Velocity Through Concrete*. s.l.:s.n.
21. ASTM-C143. 2015. *Slump of Hydraulic-Cement Concrete*. s.l.:s.n.
22. BS-EN14889. 2006. *Fibres for concrete Polymer fibres. Definitions, specifications and conformity*. s.l.:s.n.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم؟

Ghasemzadeh Mousavinejad, S.H., Mottaghi Pirmoosaei A. and Asefi, R., 2025. Effect of high temperature and gradual cooling with air and fog on concrete containing steel fibers. *Modares Civil Engineering journal*, 25(5), pp.35-47.

DOI: 10.22034/25.5.2

