

Experimental Study of durability and the amount of steel fiberous concrete containing ferrock subjected to high temperature

S.M.M.Hosseini Ghaziani¹, S.H.Ghasemzadeh Mousavinejad^{2*} 

1. Associate Professor, Faculty of Engineering, University of Guilan.
2. M.Sc., Department of Civil-Structural Engineering, University Campus2, University of Guilan.

Abstract

The use of pozzolans is very necessary and inseparable for the sustainable development and better performance of the concrete industry. In the production of concrete, the combination of iron powder, fly ash, metakaolin and limestone powder under the name of ferrock is used as materials and substitutes for cement in different percentages. The compressive strength of this concrete is higher than normal concrete. This type of concrete is a very new concrete that few tests have been done on it in the world, so there is not a lot of information available about it. According to the studies, the most important features of this concrete are the use of iron waste, reduction of air and environmental pollution, cost savings and higher compressive strength than ordinary concrete. In this research, in order to protect the environment and reduce environmental pollution, fracking has been used as a relative substitute for cement. After obtaining the appropriate proportions, the ferrock mixture with percentages of 0, 3, 6, and 9 was considered as a substitute for cement. There were 8 tests in this research, 4 tests of the first category were carried out with the mentioned percentages of ferrock and 0% of steel fibers, but in the 4 tests of the second category, the volume of 1% of steel fibers was considered in the mixture. In this research, a total of 16 concrete samples were made, of which 8 of the first batch were used for pre-heating tests and 8 of the second batch were used to collect the results and performance of the concrete after heating. After making the concrete samples and performing the necessary processes, the concrete samples were molded and placed on the vibrating table in order to make them denser and prevent voids in the concrete. After vibrating for a sufficient time, the samples were placed in the open space for 24 hours and then placed in the water basin for the processing process. A group of samples was taken out of the pond after 7 days to perform compressive and tensile strength tests (at the age of 7 days, due to the freshness of the concrete, exposure to high heat was not done). After 28 days, the second batch was removed from the water and prepared for testing. The tests performed on these samples include compressive strength before and after heating, bending strength before and after heating, ultrasonic before and after heating, and water absorption before and after high heat. To test the performance of the samples after heating, the samples were placed in the furnace at a temperature of 450 degrees Celsius for 60 minutes (one hour) and after one hour, the samples were removed from the furnace and The samples were cooled at a temperature of 24 degrees Celsius. After the cooling of the samples, the tests were conducted on the samples, and the results indicated that the increase in the amount of ferrock leads to a 16% increase in the compressive strength before heating and improving its mechanical properties compared to ordinary concrete.

Review History

Received: Jan 26, 2024
Revised: Mar 23, 2024
Accepted: Nov 20, 2024

Keywords

Steel fibers
fiber concrete
high heat
ferrock and steel fiber
ferrock

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



مطالعه تجربی اثر میزان فراک و الیاف بر ویژگی‌های بتن در دماهای عادی و بالا

سید محمد مهدی حسینی قاضیانی^۱، سید حسین قاسم زاده موسوی نژاد^{۲*} 

۱. دانشیار، مهندسی عمران، فنی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد، پردیس دانشگاهی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

چکیده

تاریخچه داوری

استفاده از پوزولان‌ها برای توسعه پایدار صنعت بتن بسیار ضروری و جداناپذیر می‌باشد. در تولید بتن از ترکیب پودر آهن، خاکستر بادی، متاکائولن و پودر سنگ آهک تحت عنوان نام فراک به عنوان مصالح و جایگزین سیمان در درصد‌های مختلف استفاده شده است. میزان مقاومت فشاری این بتن نسبت به بتن معمولی دارای مقاومت بالاتری می‌باشد. از آنجا که فراک و بتن‌های ساخته شده از فراک نسبتاً جدید است و آزمایش‌های کمی روی آن صورت گرفته، پس اطلاعات کمی از آن در دسترس می‌باشد. مهمترین ویژگی‌های این بتن می‌توان به استفاده از ضایعات آهن، کاهش آلودگی هوا و محیط زیست، صرفه‌جویی در هزینه‌ها و مقاومت فشاری بالاتر نسبت به بتن معمولی است. در این پژوهش از فراک به عنوان جایگزین نسبی سیمان استفاده شده است. بعد از بدست آوردن نسبت‌های مناسب از مخلوط فراک، با درصد‌های ۰، ۳، ۶، ۹ به عنوان جایگزین سیمان در نظر گرفته شد. در این پژوهش از ۸ طرح اختلاط استفاده شد که ۴ دسته اول برای نمونه‌های قبل از حرارت و ۴ دسته دوم برای پس از حرارت در نظر گرفته شد. چهار طرح اختلاط اول با درصد‌هایی از فراک مذکور و با ۰ درصد الیاف فولادی ساخته شد اما در ۴ نمونه دسته دوم میزان ۱ درصد حجمی الیاف فولادی در مخلوط در نظر گرفته شد. آزمایش‌های انجام شده روی این نمونه‌ها شامل مقاومت فشاری، مقاومت کششی، جذب آب و اولتراسونیک قبل و بعد از حرارت بالا می‌باشد. نتایج بدست آمده حاکی از آن بود که با جایگزین کردن فراک به میزان ۹٪ مقاومت فشاری نیز به میزان ۱۶٪ شده است. نتایج سایر آزمایش‌های انجام شده نیز بیانگر عملکرد بهتر نمونه‌های ساخته شده حاوی فراک نسبت به بتن معمولی (کنترل) است.

کلمات کلیدی

فراک
الیاف فولادی
بتن الیافی
حرارت بالا
مقاومت بتن

۱- مقدمه

مسائل روز دنیا است [2]. در حال حاضر، به دلیل بحران انرژی و نیاز به صرفه‌جویی در مواد انرژی‌زا، تلاش‌های فراوانی برای بهبود فرایندهای تولید سیمان و افزایش کیفیت آن، بهینه‌سازی استفاده از مواد معدنی، بهبود بهره‌وری انرژی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای دنبال می‌شود. از همین رو در این پژوهش از پودر آهن، خاکستر بادی، متاکائولن و پودر سنگ آهک تحت نام فراک استفاده شده است. با جایگزینی فراک در بتن می‌توان علاوه بر جلوگیری از

امروزه روش‌های کاهش گازهای گلخانه‌ای مانند دی‌اکسید کربن، یک حوزه تحقیقاتی فعال است. سیمان بعد از آب دومین مواد پرمصرف بشر و چهارمین منبع بزرگ تولید دی‌اکسید کربن است [1]. استفاده از سیمان منجر به آلودگی‌های زیست‌محیطی نیز می‌شود به شکلی که برای تولید یک تن سیمان حدوداً میزان ۸ تن دی‌اکسید کربن تولید می‌شود که کاهش آلودگی‌های ناشی از آن یکی از

* 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.



این آلودگی‌های زیست محیطی، کاهش مصرف سیمان را به همراه داشته باشد و می‌تواند بین ۸ تا ۱۱ درصد از میزان کربن دی اکسید که در تولید سیمان به وجود می‌آید را کاهش دهد. پس می‌توان بتن حاوی فراک را، بتن سبز و دوست‌دار محیط‌زیست دانست [3]. یکی دیگر از مشکلات علاوه بر میزان آلودگی‌های زیست محیطی، شکل‌پذیری پایین، سازه‌های بتنی به ویژه تحت تنش‌های کششی است. استفاده از مواد الیافی در مخلوط مصالح سیمانی و تولید کامپوزیت‌های سیمانی برای خاصیت شکل‌پذیری، انعطاف‌پذیری و ظرفیت کششی بالاتر است. پخش مواد الیافی مانند الیاف فلزی درون ماتریس سیمانی باعث ایجاد مقاومتی در ساختار بتن می‌شوند که تحت تنش‌های کششی عملکرد بهتری را ارائه می‌دهند. بتن الیافی به واسطه مقاومت کششی بالا و خاصیت کاهش احتمال بروز ترک، نسبت به بتن معمولی برتری دارد [4].

تاریخچه پیدایش فراک مربوط به سال ۲۰۱۵ است که توسط دیوید استون با فرمول زیر به ثبت رسید [3].



در سال ۲۰۱۹ ویجایان و همکاران در مطالعه‌ای به بررسی و جایگزینی فراک در درصدهای مختلف به جای سیمان پرداختند. آن‌ها در درصدهای ۴، ۸ و ۱۲ فراک را جایگزین سیمان در نمونه‌های ساخته شده کردند. پس از انجام آزمایش روی نمونه‌ها، نتایج حاکی از آن بود که نمونه‌های ساخته شده با فراک مقاومت مکانیکی بهتری نسبت به نمونه شاهد دارا بودند [3]. در سال ۲۰۲۲ پنگ ژانگ و همکاران اثر استفاده از خاکستربادی و پودر ضایعات مرمر به همراه الیاف فولادی بر مشخصات مکانیکی بتن را بررسی کردند و دریافتند که خواص بتن به دلیل خاکستربادی و پودر ضایعات مرمر بهبود یافته است و می‌تواند جایگزین ۳۰ درصد از کل مقدار ریزدانه شود [5]. در سال ۲۰۲۳ نیتین شینده و همکاران از فراک به عنوان جایگزین سیمان برای بررسی خواص مکانیکی بتن پرداختند. در این تحقیق، خواص مختلف بتن حاوی فراک در شرایط تازه و سخت شده بررسی و با نتایج بتن معمولی مقایسه شده است. نتایج بیانگر آن است در سن ۲۸ روز، مقاومت بتن حاوی فراک نسبت به نمونه شاهد ۱۳٫۵ درصد برای مقاومت فشاری، ۲۰ درصد برای مقاومت کششی شکافت استوانه و ۱۸ درصد برای مقاومت خمشی بیشتر از نمونه شاهد است [6]. پراویدا و همکاران در سال ۲۰۲۳ در ساخت بتن خود تراکم از فراک به عنوان جایگزین

بخشی از سیمان پرتلند استفاده کردند. خواص رئولوژیکی بتن تازه با استفاده از L-box، مخروط اسلامپ و تجهیزات V-funnel صورت گرفت. نمونه‌های بتن خودتراکم از طریق روش‌های غوطه‌وری در آب، قرار گرفتن در معرض CO₂ و همچنین ترکیبی از هر دو عمل‌آوری شد. نتایج بیانگر آن بود، در عمل‌آوری با CO₂ حدود ۴۰٪ از مقاومت بتن در چهار ساعت به دست آمد، در حالی که عمل‌آوری ترکیبی آب و CO₂ بتن با کیفیت بالاتر را تولید می‌کند. در جایگزینی ۱۰٪، مقادیر مقاومت فشاری با روش‌های عمل‌آوری در آب، CO₂ و ترکیبی به ترتیب ۲۱٫۹٪، ۲۵٫۹٪ و ۳۲٫۶٪ پس از ۲۸ روز افزایش یافت [7]. رنگریزان و همکاران در سال ۲۰۲۳ از الیاف فولادی با هدف تقویت بتن حاوی مواد پوزولانی استفاده کردند. در پژوهش مورد نظر یک پوزولان طبیعی با درصد وزنی ۱۵٪ و با خواص فیزیکی و شیمیایی مناسب برای جایگزینی بخشی از سیمان در بتن معرفی شد. نرخ رشد مقاومت فشاری این نمونه‌های حاوی پوزولان طبیعی بالاتر از دوده سیلیس و خاکستر بادی در سنین عمل‌آوری ۷ و ۲۱ روز بوده است. همچنین میزان ۱۵٫۵ درصد تولید CO₂ کمتر، با مقاومت فشاری بالاتر در مقایسه با بتن سیمانی ساده داشت [8].

خان و همکاران در سال ۲۰۱۴ طی مطالعه‌ای به بررسی عملکرد حرارتی، خاکستر بادی در درصدهای مختلف (۴۰ تا ۶۰ درصد جایگزین حجمی) به عنوان جایگزین سیمان پرداختند. پس از قرار دادن نمونه‌های ساخته شده تحت حرارت‌های مختلف به بررسی مقاومت فشاری و کششی پرداختند. نتایج حاکی از آن بود که با افزایش دما میزان مقاومت فشاری و کششی نسبت به نمونه کنترل روندی صعودی داشته است. نمونه‌ها پس از قرارگیری در معرض دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد، مقاومت فشاری به میزان ۱۳۵٪ و مقاومت کششی به میزان ۳۴٪ نسبت به نمونه شاهد را به همراه داشته است [9].

در پژوهش پیش رو ماده فراک که حاوی ترکیب معینی از پودر آهن، خاکستربادی، متاکائولن و پودر سنگ آهک است با درصدهای مختلف جایگزینی ۳٪، ۶٪ و ۹٪ به عنوان جایگزین بخشی از سیمان پرتلند استفاده شده است. از آنجا که فراک یک نوع ماده نسبتاً بدیع و تازه در صنعت بتن است و بواسطه عدم وجود مطالعات جامع در عملکرد این نوع بتن در حرارت، مطالعات بیشتر در این زمینه احساس می‌شود. نوع‌آوری این تحقیق

۲-۱-۵- سیمان

در این پژوهش از سیمان پرتلند تپ ۲ کارخانه سیمان هگمتان استفاده شده است. مشخصات شیمیایی سیمان مصرفی در جدول (۲) آورده شده است.

۲-۱-۶- سنگدانه

در این پژوهش شن مصرفی از نوع مخلوط رودخانه‌ای است به طوری که حداکثر اندازه دانه‌های آن ۱۲/۵ میلی‌متر، و جذب آب ۱/۱ درصد می‌باشد. شن مصرفی از کارخانه لوله‌سازی شمال رشت تهیه شده است. دانه‌بندی شن مصرفی که در شکل (۱) ارائه شده است بیانگر محدوده دانه‌بندی طبق ASTM C33 [10] است.

جدول ۱. مشخصات شیمیایی خاکستر بادی مصرفی

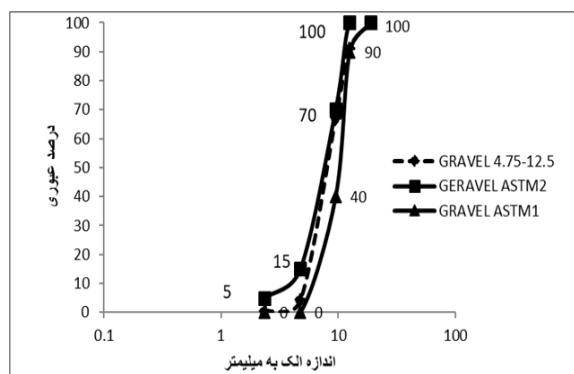
Table 1. Chemical characteristics of used FlyAsh

Compound	%
SiO ₂	88.15
Al ₂ O ₃	4.24
CaO	1.82
Fe ₂ O ₃	1.6
Na ₂ O	0.08
MgO	0.018
K ₂ O	0.51
SO ₃	0.02
L.O.I	3.23
TiO ₂	0.04

جدول ۲. مشخصات شیمیایی سیمان مصرفی

Table 2. Chemical characteristics of used cement

Compound	%
SiO ₂	21.32
Al ₂ O ₃	4.81
Fe ₂ O ₃	3.83
CaO	62.85
MgO	1.48
K ₂ O	0.69
Na ₂ O	0.47
SO ₃	2.32
L.O.I	2.04



شکل ۱. منحنی دانه بندی شن مصرفی

Fig. 1. Granulation curve of gravel

به استفاده از درصدهای مختلف جایگزینی فراک با سیمان و آثار آن در دوام بتن الیافی تحت تاثیر حرارت نسبتاً بالا می‌باشد.

۲- مصالح و برنامه آزمایشگاهی

۲-۱-۲- مصالح مصرفی

۲-۱-۱-۲- پودر آهن

پودر آهن از پرمصرف‌ترین پودرهای فلزی است. پودر آهن مصرفی در این پژوهش از نوع اتمیزه شده با آب است. در این روش فلز مذاب توسط اسپری‌های آب با فشار معمولاً بین ۳ تا ۲۰ مگاپاسکال تجزیه می‌شود. هدف در این روش با قطعه قطعه یا اتمیزه کردن فلز به ذره‌های بسیار ریز با سطح کاملاً کروی و تمیزی بالا برای تولید پودر آهن است. اندازه پودر آهن مصرف شده ۴۵ میکرون و از نوع اتمیزه شده است.

۲-۱-۲- خاکستر بادی

خاکستر بادی مصرفی دارای اندازه‌ای بین ۰٫۳ الی ۰٫۱۲ میکرون بود که میزان pH آن بین ۸ الی ۱۰ می‌باشد و دارای چگالی ۱/۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب و مطابق استاندارد ASTM618-class F است. مشخصات شیمیایی خاکستر بادی به شرح جدول (۱) است.

۲-۱-۳- پودر سنگ آهک

پودر سنگ آهک (Limestone Powder) نوعی پودر معدنی است که از کوبش سنگ آهک یا همان سنگ کربنات کلسیم با فرمول مولکولی CaCO₃ به دست می‌آید. پودر سنگ آهک از نظر ظاهری دارای رنگ سفید و حالت یک دست است. برای ساخت نمونه‌ها از پودر سنگ آهک دارای اندازه مش ۲۵۰۰ استفاده شد.

۲-۱-۴- الیاف

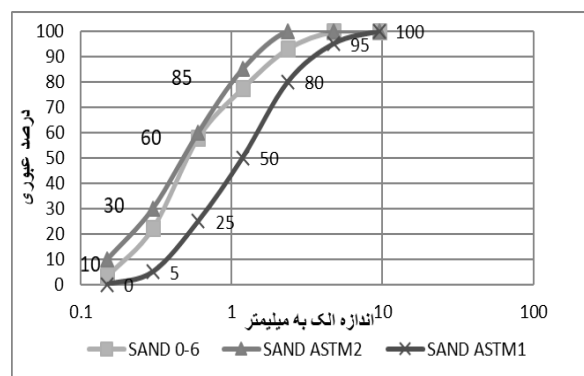
در ساخت نمونه‌ها از الیاف فولادی با مقدار حجمی ۱٪ برای بهبود خواص مکانیکی استفاده شده است. الیاف فولادی مصرفی دارای طول ۱۸ میلی‌متر، ضخامت ۰٫۶ میلی‌متر، وزن مخصوص ۷٫۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب، نقطه ذوب ۱۵۱۶ سانتی‌گراد و مدول الاستیسته ۱۸۵ گیگاپاسکال، مقاومت کششی ۱۱۰۰ مگاپاسکال است و همچنین قابلیت واکنش با قلیا را نیز ندارد.

مواد پوزولانی و همچنین الیاف فولادی در ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی، کارایی طرح‌های اختلاط تحت تاثیر حضور این مواد ممکن است کاهش یابد، از این رو با استفاده از فوق روان کننده با نام تجاری FARCO PLAST P10-3R روانی و کارایی مطلوب در مخلوط‌های آزمایشگاهی در این پژوهش از فوق روان کننده محصول شرکت شیمی ساختمان استفاده شده است که این فوق روان کننده نسل سوم بر پایه پلی کربوکسیلات‌های اصلاح شده است.

۲-۲- طرح اختلاط نمونه‌ها

همانطور که در شکل (۳) نشان داده شده است، این پژوهش مجموعاً ۸ طرح اختلاط در نظر گرفته شده و ۳۲ نمونه بتنی مکعبی و ۱۶ نمونه استوانه‌ای ساخته شد که از بین آن‌ها تعداد ۸ طرح اختلاط برای نمونه‌های قبل از قرارگیری تحت حرارت و انجام آزمایش‌های مکانیکی و سایر آزمایش‌ها در نظر گرفته شد و ۸ طرح دیگر نیز برای انجام آزمایش‌های بعد از حرارت ساخته شد. از پودر فراک با درصد‌های جایگزینی ۳٪، ۶٪ و ۹٪ استفاده شد. اجزای تشکیل دهنده فراک شامل ۶۰٪ پودر آهن، ۲۰٪ خاکستر بادی، ۱۲٪ متاکائولن و ۸٪ پودر سنگ آهک است. همچنین نمونه‌های آزمایشگاهی با توجه به درصد حجمی الیاف به دو گروه حاوی ۱٪ الیاف و نمونه‌های فاقد الیاف تقسیم شد. نمونه‌ها بعد از تکمیل ساخت و قالب‌گیری، توسط میز ویبره متراکم شد و بعد از ۲۴ ساعت از قالب خارج و در آب غوطه‌ور شد. طرح اختلاط F0 فاقد الیاف و پودر فراک است و به عنوان طرح کنترل (شاهد) در نظر گرفته شد. نسبت آب به مواد سیمانی برای تمامی طرح‌های اختلاط مقداری ثابت و برابر ۰٫۴ در نظر گرفته شد. در نامگذاری طرح‌های اختلاط حرف F به معنی پودر فراک و عدد پس از آن نشان دهنده درصد جایگزینی این ماده با سیمان پرتلند است. همچنین حرف S نشان دهنده حضور الیاف فولادی در طرح اختلاط و عدد پس از آن درصد حجمی الیاف را نشان می‌دهد. روش عمل‌آوری تمامی نمونه‌های آزمایشگاهی یکسان است و برای این منظور تا سن مورد نظر درون حوضچه آب با دمای تقریبی ۲۴ درجه سانتی‌گراد نگهداری شد. میزان نسبت آب به سیمان در طرح اختلاط برای ساخت نمونه‌ها در تمامی طرح‌ها یکسان در نظر گرفته شد و با توجه به حضور الیاف در نمونه‌ها میزان فوق روان کننده نیز در تمامی نمونه‌ها ثابت در نظر گرفته شد تا اسلامپ بتن در کلیه نمونه‌ها تقریباً یکسان باشد. طرح اختلاط نمونه‌های ساخته شده به شرح جدول (۳) می‌باشد.

ماسه مورد استفاده برای ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی با عنوان ماسه ۰-۶ و از نوع گرد گوشه می‌باشد. چگالی مخصوص ماسه مورد استفاده برابر 2611 Kg/m^3 و جذب آب آن ۲٫۴٪ است. طبق شکل (۲)، دانه‌بندی ماسه مصرفی ارائه شده در محدوده استاندارد ASTM C33 [9] می‌باشد.



شکل ۲. منحنی دانه‌بندی ماسه مصرفی

Fig. 2. Granulation curve of sand

۲-۱-۷- متاکائولن

استفاده از مواد افزودنی معدنی فقط جنبه اقتصادی ندارد و حتی در بعضی موارد، بتن حاوی مواد افزودنی گرانتر از بتن خودتراکم معمولی است. این موارد می‌توانند در بهبود خواص فیزیکی و دوام بتن نقش داشته و حتی بعضی از مواد افزودنی معدنی در بهبود رفتار بتن تازه نیز مانند کارایی و کاهش آب انداختن نقش موثری داشته باشد. متاکائولن یک سیلیکات آلومینیوم است که به رنگ سفید در دسترس افراد قرار دارد. ساختار این ماده بدون شکل و به حالت بلوری یا همان آمورف است که با هیدروکسید کلسیم به سرعت و با شدت زیاد وارد واکنش می‌شود و به دنبال این واکنش ترکیبات چسبنده و سیمانی به وجود می‌آید. مهمترین ماده برای ساخت متاکائولن برای بتن، رس کائولن می‌باشد. کائولن، ماده معدنی است که ابعاد آن بسیار کوچک بوده و به رنگ سفید مشاهده می‌شود. متاکائولن مصرفی برای ساخت نمونه‌ها دارای وزن مخصوص ۲۶۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب است.

۲-۱-۸- آب و فوق روان کننده

در این پژوهش از آب شرب آزمایشگاه بتن دانشکده فنی دانشگاه گیلان (شهر رشت) برای ساخت و همچنین عمل‌آوری نمونه‌های آزمایشگاهی استفاده شده است که معیارهای توصیه شده توسط ASTM C1602 [11] را رعایت می‌نماید. همچنین با توجه به استفاده ترکیبی از



شکل ۳. نمونه‌های مکعبی

Fig. 3. Cube samples

جدول ۳. طرح اختلاط نمونه‌های آزمایشگاهی

Table 3. Mixing plan of laboratory samples

No	Name	Cement (kg/m ³)	Ferrock (kg/m ³)	Water (kg/m ³)	Sand (kg/m ³)	Gravel (kg/m ³)	Steel Fiber (%)	SP (g)
1	F0	400	0	160	980.8	891.6	0	10
2	F3	388	12	160	980.8	891.6	0	10
3	F6	376	24	160	980.8	891.6	0	10
4	F9	364	36	160	980.8	891.6	0	10
5	F0S1	400	0	160	967.1	879.1	1	10
6	F3S1	388	12	160	967.1	879.1	1	10
7	F6S1	376	24	160	967.1	879.1	1	10
8	F6S1	364	36	160	967.1	879.1	1	10

عمل‌آوری تا سن ۲۸ روز براساس استاندارد ASTM C496 [13] انجام شده است. برای انجام این آزمایش نمونه استوانه‌ای به صورت افقی در زیر دستگاه قرار داده می‌شود و نیروی وارد بر آن باعث گسیختگی می‌شود که در این روش مسیر شکافت در راستای ارتفاع نمونه است (شکل ۵).

۳-۳- اولتراسونیک

سرعت پالس اولتراسونیک برای آزمونه‌ها بعد از گذشت مدت زمان ۲۸ روز مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. این آزمایش مطابق ASTM C597 [14] بوده است. در آرایش مولدها از روش مستقیم که مطلوب ترین نوع آرایش قرار گیری‌ها است استفاده شد و فرکانس پالس‌های ارسالی ۶۰ kHz بود. همچنین مدت انتقال پالس برحسب میکروثانیه و با دقت ۰/۱ میکروثانیه اندازه‌گیری شده است. بر اساس توصیه‌های مطرح است و با بالا رفتن درصد فراک در هر دو دسته منجر به افزایش مقاومت فشاری در نمونه‌ها شده است. نتایج بدست آمده از آزمایش مقاومت فشاری در شکل (۶) ارائه شده است.

۳- روند آزمایش‌ها

۳-۱- آزمایش فشاری

در پژوهش حاضر آزمایش مقاومت فشاری بر اساس استاندارد BS1881-116: 1983 [12] و پس از عمل‌آوری تا سنین ۷ و ۲۸ روز انجام شده است. برای انجام این آزمایش از نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۱۰۰ میلی‌متر استفاده شده است. همچنین این آزمایش روی نمونه‌های عمل‌آوری شده تا سن ۲۸ روز و پس از حرارت در کوره با دمای ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد (به مدت ۶۰ دقیقه) و خنک شده تدریجی در دمای محیط آزمایشگاه انجام شده است. در بارگذاری مقدار نیروی فشاری بیشتر که باعث ایجاد شکست نمونه‌ها شد، ثبت، از تقسیم نیروی فشاری حداکثر بر سطح مقطع نمونه مقاومت فشاری بدست آمد. در شکل (۴) چگونگی انجام آزمایش نشان داده شده است.

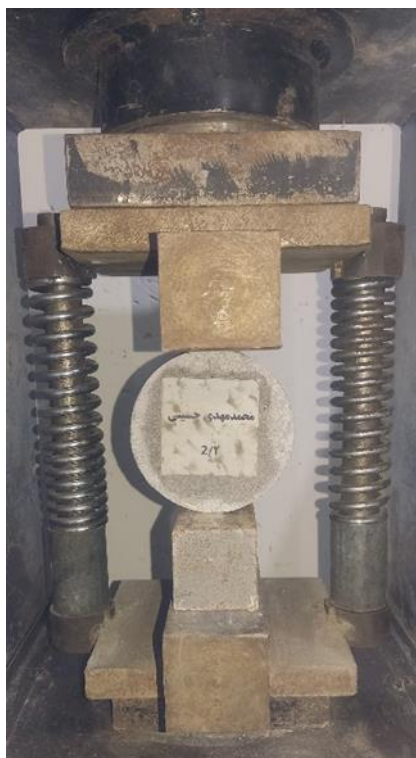
۳-۲- آزمایش مقاومت کششی به روش شکافت استوانه

آزمایش مقاومت کششی دو نیم شدن (آزمایش برزیلی) روی نمونه‌های استوانه‌ای با قطر ۱۰۰ و ارتفاع ۲۰۰ میلی‌متر پس از



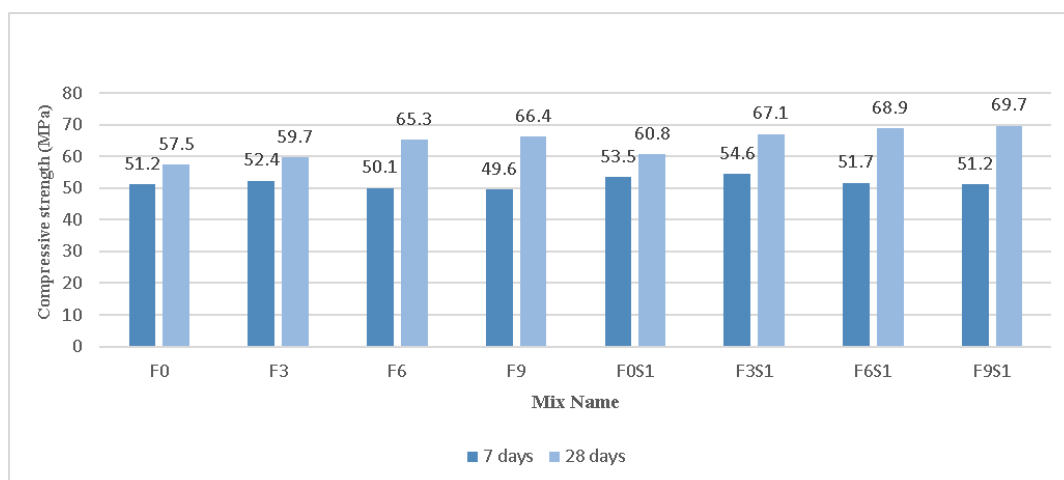
شکل ۴. آزمایش مقاومت فشاری

Fig. 4. Compressive strength test



شکل ۵. آزمایش مقاومت کششی به روش شکافت استوانه

Fig. 5. Tensile strength test by cylinder splitting method



شکل ۶. مقاومت فشاری بتن ۷ و ۲۸ روزه

Fig. 6. Compressive strength of 7 and 28 days concrete

همانطور که در شکل (۶) مشخص است نتایج نشان می‌دهد که به طور کلی، نمونه‌های ساخته شده در سن ۷ روز در مقایسه با نمونه کنترل دچار کاهش میزان مقاومت شده است. یکی از دلایلی که می‌توان به آن اشاره کرد وجود خاکستر بادی می‌باشد. از آنجا که خاکستر بادی به دلیل دارا بودن نوعی خاصیت پوزولانی موجب می‌شود که در سنین کم هیدراتاسیون در بتن با تاخیر صورت بگیرد و این فرایند موجب تاثیر منفی در رسیدن به مقاومت کافی در سنین کم می‌شود. طبق شکل (۷) بعد از گذشت ۲۸ روز، در طرح‌های F3 تا F9 نتایج حاکی از آن است که با افزایش جایگزینی فراک به جای سیمان، میزان مقاومت فشاری افزایش می‌یابد به طوری که بیشترین افزایش در نمونه‌های فاقد الیاف مربوط به طرح F9 است که در آن فراک جایگزین ۹ درصد از سیمان برای ساخت نمونه می‌باشد. این نمونه نسبت به نمونه F3 و F6 که هر کدام به ترتیب نشان دهنده افزایش مقاومت ۱۱ و ۱۴ درصدی هستند، بهترین عملکرد را نشان داده که دارای رشدی ۱۶ درصدی نسبت به نمونه کنترل یا شاهد است. این روند را می‌توان به دو دلیل دانست. یکی از دلایل را می‌توان به کامل شدن فرایند هیدراتاسیون بعد از گذشت زمان اشاره کرد. این فرایند که در سن ۷ روز به دلیل عدم تکمیل هیدراتاسیون تاثیر منفی روی مقاومت فشاری گذاشته بود بعد از گذشت زمان و تکمیل شدن این فرایند تاثیر مثبت خود را روی عملکرد نمونه‌های ساخته شده گذاشته و منجر به افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ها شده است. یکی دیگر از مواردی که می‌توان آن را موثر دانست، به دلیل اندازه ذرات مواد تشکیل دهنده فراک منجر به چسبندگی بالای مواد تشکیل دهنده نمونه‌ها شده است و این امر باعث افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ها می‌شود. طبق شکل (۶) در طرح‌های F3S1 تا F9S1 که علاوه بر فراک، از الیاف فولادی نیز در ساخت نمونه‌ها استفاده شد بیانگر این است که با توجه به وجود الیاف، به دلیل عدم تکمیل هیدراتاسیون ناشی از پوزولان، نمونه‌های ساخته شده نتوانستند نسبت به نمونه شاهد به مقاومت بالاتری برسند و از همین رو شاهد کاهش مقاومت در سن ۷ روز نسبت به نمونه کنترل هستیم بعد از گذشت ۲۸ روز منجر به میزان رشد مقاومت فشاری نمونه‌ها نسبت به نمونه کنترل به میزان ۱۱ درصد برای نمونه F3S1، رشد ۱۳ درصد برای F6S1 و رشد ۱۵ درصد برای F9S1 شد که دلیل آن را می‌توان وجود الیاف فولادی

در نمونه‌های ساخته شده دانست.

در بررسی عملکرد حرارتی، تعداد ۸ عدد از نمونه‌های ساخته شده را بعد از رسیدن به سن ۲۸ روز در کوره با حرارت ۴۵۰ درجه سانتی گراد به مدت ۶۰ دقیقه مورد آزمایش قرار داده شد که طبق شکل (۴)، آزمایش نتایج ۴ نمونه حاکی از آن بود که با افزایش میزان فراک به عنوان جایگزین سیمان رشد میزان مقاومت فشاری مشاهده می‌شود.

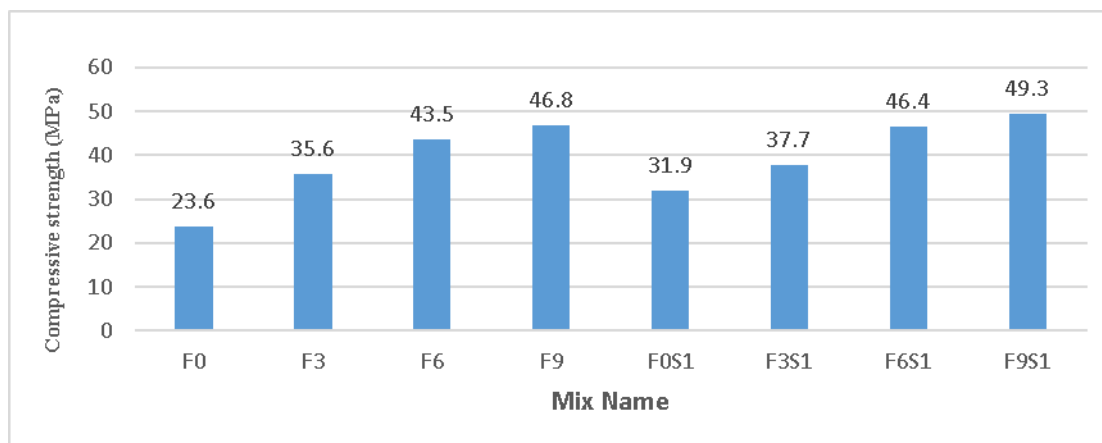
با توجه به شکل (۷) نتایج بیانگر افزایش میزان مقاومت فشاری بعد از قرارگیری در کوره است، به طوری که در مقدار فراک ۳ درصد و ۶ درصد در نمونه ساخته شده منجر به افزایش مقاومت به میزان ۵۰ و ۸۴ درصدی شده است و این میزان در نمونه ساخته شده با فراک ۹ درصد نسبت به نمونه کنترل به بیشترین حالت خود یعنی به میزان ۹۸ درصد افزایش یافته است. بیشترین مقاومت فشاری در بین تمامی نمونه‌های ساخته شده مربوط به F9S1 است که این نمونه حاوی ۹ درصد فراک به عنوان جایگزین سیمان و ۱ درصد الیاف فولادی می‌باشد که میزان ۴۹٫۳ مگاپاسکال را ثبت کرده است.

از دلایل افت مقاومت فشاری نسبت به قبل از حرارت می‌توان آن را به تبخیر شدن آب آزاد و آب ژل یا ژئولیتی (آب جذب شده) در دماهای ۱۰۰ و ۱۸۰ نسبت داد و بعد از آن با بالاتر رفتن حرارت آب بین لایه ای C-S-H و نیز مقداری از آبی که به صورت شیمیایی ترکیب یافته و حاصل C-S-H و هیدرات های سولفوآلومینات است، از بین می‌رود و باعث تاثیر منفی و کاهش میزان مقاومت فشاری بتن می‌شود.

۳-۴- مقاومت کششی به روش شکافت استوانه

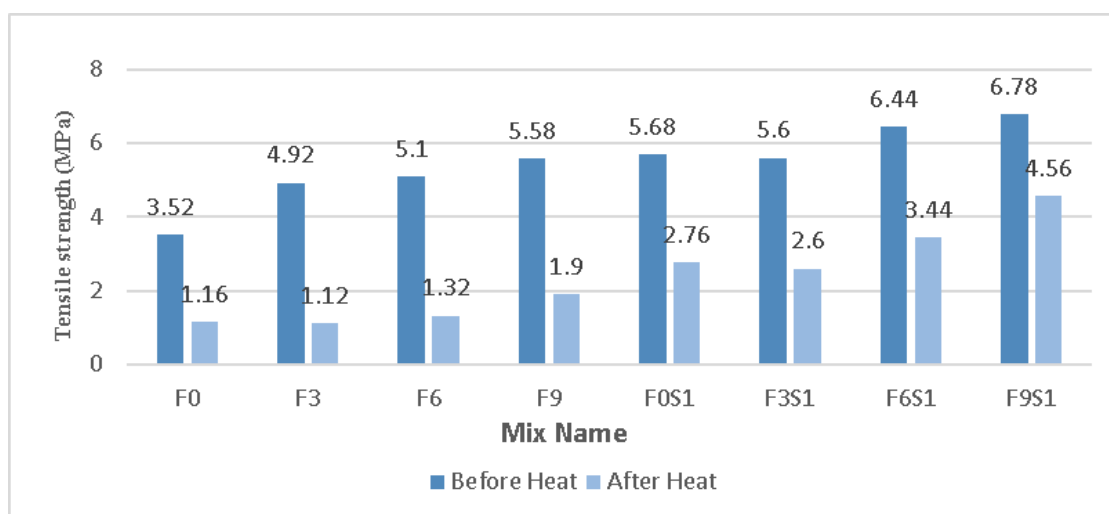
نتایج آزمایش مقاومت کششی قبل و بعد از حرارت بر روی نمونه‌ها در شکل (۸) ارائه شده است.

آزمایش مقاومت کششی دو نیم شدن روی نمونه‌های استوانه‌ای با قطر ۱۰۰ و ارتفاع ۲۰۰ میلی‌متر پس از عمل‌آوری تا سن ۲۸ روز براساس استاندارد ASTM C496 [11] قبل و بعد از از حرارت در کوره انجام شده است. برای انجام این آزمایش نمونه استوانه‌ای به صورت افقی در زیر دستگاه قرار داده می‌شود و نیروی P باعث گسیختگی می‌شود و مسیر شکافت در راستای ارتفاع نمونه می‌باشد. نتایج بدست آمده از آزمایش مقاومت کششی



شکل ۷. مقاومت فشاری بتن ۲۸ روزه بعد از حرارت

Fig. 7. 28-day compressive strength of concrete after heating

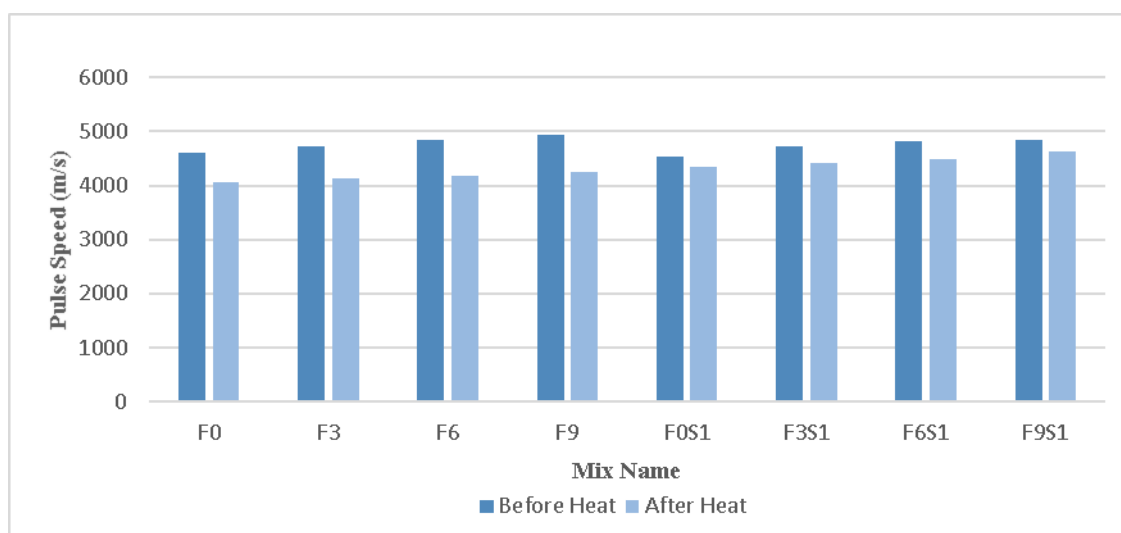


شکل ۸. مقاومت کششی بتن ۲۸ روزه قبل و بعد از حرارت

Fig. 8. Tensile strength of 28 days concrete before and after heating

فراک دچار افت مقاومت کششی به میزان ۴٪ شده است که با بررسی کلی روند علت احتمالی آن را می‌توان نقص در عدم یکنواخت بودن مصالح سنگدانه داخل نمونه و یا تراکم مناسب دانست. با بالا رفتن میزان فراک مقاومت کششی نیز افزایش یافته است به طوری که در طرح حاوی ۶٪ و ۹٪ فراک به ترتیب منجر به افزایش ۱۳ و ۶۳ درصدی مقاومت کششی شده است. در نمونه‌های دارای الیاف فولادی با توجه به وجود الیاف، سبب افزایش مقاومت کششی شده است و بهترین عملکرد آن مربوط به طرح F9S1 است که سبب افزایش مقاومت قابل توجهی شده است به گونه‌ای که به میزان ۶۳٪ نسبت به نمونه کنترل دچار افزایش مقاومت کششی شده است. به طور کلی افزایش میزان فراک در نتایج قبل و بعد از حرارت بیانگر عملکرد مثبت آن می‌باشد.

به روش شکافت استوانه نشان می‌دهد که میزان مقاومت با بالا رفتن میزان فراک در نمونه‌ها، روند افزایشی را داشته است. در نتایج قبل از قرارگیری در معرض حرارت، نمونه‌های ساخته شده با فراک نتایج بهتری نسبت به نمونه شاهد داشته است به طوری که این میزان در نمونه حاوی ۳٪ فراک ۳۹٪، در نمونه ۶٪ فراک ۴۴٪ و در نمونه ۹٪ فراک به میزان ۵۸٪ مقاومت کششی افزایش یافته است. با افزودن الیاف فولادی به نمونه‌ها و تاثیر مثبت الیاف بر نتایج، این روند همچنان پا بر جا بوده و باعث افزایش نسبت به نمونه کنترل دارای الیاف شده است که بهترین آن مربوط به طرح F9S1 است به طوری که باعث افزایش ۱۹٪ نسبت به نمونه کنترل دارای الیاف و افزایش ۹۲٪ نسبت به نمونه کنترل فاقد الیاف شده است. نتایج بعد حرارت بیانگر آن است که، نمونه F3S1 حاوی ۳٪



شکل ۹. سرعت پالس اولتراسونیک نمونه ها

Figure 9: Ultrasonic pulse speed

دانست. نتایج آزمایش اولتراسونیک با مقاومت فشاری بیانگر نتایج واحد و همسویی هستند به طوری که با افزایش میزان فراک تراکم بتن نسبت به نمونه کنترل افزایش یافته است و از سویی مقاومت فشاری آن نیز دچار افزایش شد.

۳-۶- جذب آب

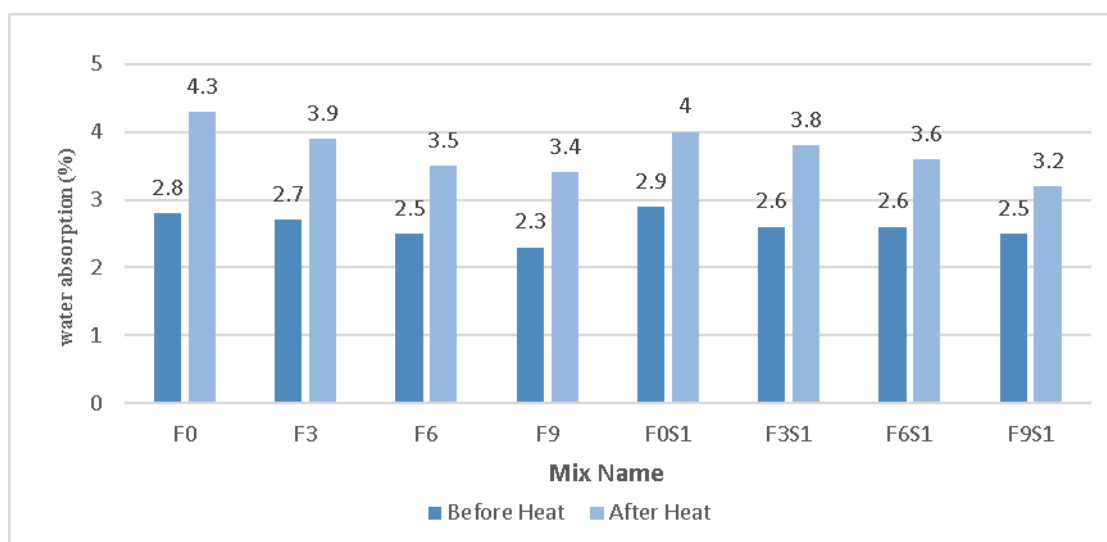
آزمایش جذب آب برای هر دو طرح شاهد و نمونه‌های حاوی فراک، پس از عمل‌آوری در سن ۲۸ روز انجام شده است. نتایج بدست آمده برای قبل و بعد از حرارت این آزمایش در شکل (۱۰) ارائه شده است.

همانطور که نتایج نشان می‌دهد مشخص است با افزایش درصد فراک در نمونه‌ها، میزان نفوذپذیری کاهش یافته است به طوری که میزان درصد جذب آب از ۲٫۸ در نمونه شاهد به ۲٫۷، ۲٫۵ و ۲٫۳ برای نمونه‌های حاوی ۳، ۶ و ۹ درصد بدون الیاف قبل از حرارت افزایش یافته است و همینطور برای نمونه‌های حاوی ۱ درصد الیاف با درصدهای ۳، ۶ و ۹ نیز میزان نفوذپذیری کاهش پیدا کرده است. که این امر را ناشی از متراکم‌تر شدن بتن نسبت به نمونه کنترل و فاقد فراک می‌توان دانست. بعد از قرارگیری در معرض حرارت این میزان نفوذپذیری در نمونه کنترل نسبت به قبل از حرارت به میزان ۵۳٪ افزایش یافته است و در نمونه‌های حاوی فراک بعد از حرارت نسبت به قبل از حرارت این مقدار به ترتیب به ۴۴٪، ۴۷٪ و ۴۸٪ افزایش یافته است.

۳-۵- اولتراسونیک

بعد از گذشت ۲۸ روز عمل‌آوری آزمایش اولتراسونیک روی نمونه‌های مکعبی (قبل و بعد از حرارت) صورت گرفت که نتایج بدست آمده مطابق شکل (۹) می‌باشد.

آزمایش اولتراسونیک نوعی آزمایش غیرمخرب است که سرعت پالس اولتراسونیک روی نمونه‌های آزمایشگاهی محاسبه و، که نتایج آن در شکل (۹) ارائه شده است. نتایج حاکی از آن است که با بالا رفتن میزان فراک میزان سرعت پالس اولتراسونیک نیز افزایش یافته است که این افزایش سرعت پالس بیانگر استفاده از پودر آهن و پوزولان‌ها در اجزای سازنده فراک و اندازه و ریزی ذرات تشکیل دهنده فراک، منجر به افزایش میزان سرعت پالس ها نیز شده است. بیشترین میزان سرعت پالس در نمونه‌های قبل از حرارت مربوط به نمونه F9 می‌باشد که مقدار آن ۴۹۲۶ متر بر ثانیه و کمترین آن نیز مربوط به نمونه F0S1 به مقدار ۴۵۴۶ می‌باشد. این سرعت در نمونه‌هایی که در معرض حرارت قرار گرفتند بیشترین آن مربوط به F9S1 به میزان ۴۶۲۱، و کمترین آن نیز مربوط به نمونه کنترل با سرعت ۴۰۵۷ متر بر ثانیه می‌باشد. در نمونه‌های ساخته شده از فراک میزان سرعت پالس‌ها نسبت به سرعت پالس در نمونه کنترل افزایش یافته است که می‌توان دلیل آن را پر شدن تخلخل‌ها و ترک‌های موجود در نمونه‌های ساخته شده



شکل ۱۰. میزان جذب آب نمونه ها قبل و بعد از حرارت

Fig. 10. The amount of water absorption before and after heating

۴- نتایج بدست آمده از آزمایش اولتراسونیک برای نمونه های قبل و بعد از حرارت در مدت ۲۸ روز بیانگر سرعت بیشتر پالس اولتراسونیک نسبت به نمونه کنترل است و این بیانگر این موضوع است که فراک قابلیت پر کنندگی تخلخل و ترک های موجود در بتن را دارد.

۵- نتایج آزمایش جذب آب پس از گذشت ۲۸ روز نیز نشان دهنده درصد جذب آب پایین تر و افزایش تراکم بتن در نمونه های ساخته شده حاوی فراک نسبت به نمونه کنترل می باشد. این فرایند در نمونه های قبل و بعد از حرارت دیده می شود. پس این اتفاق را بیانگر عملکرد مطلوب فراک در مقابل جذب آب و همچنین همسو بودن نتایج بدست آمده دانست.

قدردانی نویسندگان

نویسندگان از حمایت معنوی دانشگاه قدردانی می کنند.

تعارض منافع

برای نویسندگان هیچ گونه تعارض منافی وجود ندارد.

سهم نویسندگان

سهم هر یک از نویسندگان با هم برابر است.

منابع مالی

نویسندگان از منابع مالی شخص یا نهادی استفاده نکرده اند.

۴- نتایج

در این پژوهش سعی شد از فراک به عنوان جایگزین درصدی برای سیمان در درصدهای مختلف از فراک در بتن به منظور کمک به محیط زیست و جلوگیری از آلودگی های آن استفاده شود. آزمایش های مقاومت فشاری، جذب آب و اولتراسونیک روی نمونه ها انجام شد. همین طور آزمایش قرارگیری در معرض حرارت نیز انجام شد تا بانک اطلاعاتی مناسبی از عملکرد بتن دارای فراک تهیه شود.

۱- نتایج نشان دهنده آن است که به طور کلی با افزایش درصد جایگزینی فراک به عنوان جایگزین سیمان مقاومت فشاری در سنین کم به دلیل خاصیت پوزولانی فراک دچار کاهش مقاومت می شود ولی با رسیدن سن بتن به ۲۸ روز این روند معکوس شده و شاهد افزایش ۱۶ درصدی مقاومت فشاری در بتن حاوی ۹ درصد فراک نسبت به نمونه کنترل شده است.

۲- بعد از قرارگیری نمونه ها در معرض حرارت ۴۵۰ درجه سانتی گراد، نتایج آزمایش مقاومت فشاری بیانگر روند صعودی بودند که این میزان در بالاترین آن، رشد ۹۸ درصدی نسبت به نمونه کنترل مشاهده شده است

۳- در نتایج به دست آمده از مقاومت کششی قبل و بعد از قرارگیری در معرض حرارت، نیز با افزایش میزان فراک، میزان مقاومت کششی نیز افزایش چشمگیری پیدا کرده و این را می توان به عملکرد مطلوب فراک نسبت داد.

References

- [1] Huntzinger, D.N. & Eatmon, T.D. 2009. A life-cycle assessment of Portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative Technologies. *Journal of Cleaner Production*, 17(7), pp. 668–675.
- [2] Jones, R., McCarthy, M. & Newlands, M. 2011. Fly Ash Route to Low Embodied CO₂ and Implications for Concrete Construction. Paper presented at the *World of Coal Ash (WOCA) Conference*, Denver, Colorado.
- [3] Vijayan, D.S., Arvindan, S. & Janarthanan, T.S. 2019. Evaluation of ferrock: A greener substitute to cement. *Materials Today: Proceedings*, 22, pp. 781-787.
- [4] Zhang, P., Han, S., Ng, S. & Wang, X.-H. 2018. Fiber-Reinforced Concrete with Application in Civil Engineering. *Advances in Civil Engineering*, 2018, Article ID 1698905, 4 pages.
- [5] Karthik, J., Prathibha, V.S. & Anand Kumar, G. 2022. Determination of properties and environment due to the usage of Flyash and Marble Waste Powder in concrete. *Materials Today: Proceedings*, 65, pp. 1367-1374.
- [6] Shinde, N., Gobinath, R., Chidambaram, S. & Shewale, M. 2023. An experimental investigation on concrete blocks using Ferrock as a green binding material. *Materials Today: Proceedings*.
- [7] Pravitha, J., Ninija Merina, R. & Subash, N. 2023. Mechanical properties and microstructural characterization of ferrock as CO₂-negative material in self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 396, p. 132289.
- [8] Rangrazian, M., Madandoust, R., Mahjoub, R. & Raftari, M. 2023. Experimental investigations on the engineering properties of pozzolanic concrete reinforced with fibers and the reduction of CO₂ emissions: A case study on local mineral pozzolan. *Materials Today Communications*, 34, p. 105129.
- [9] Khan, M.S. & Abbas, H. 2014. Effect of Elevated Temperature on the Behavior of High Volume Fly Ash Concrete. *Structural Engineering*, 19, pp. 1825–1831.
- [10] ASTM (American Society for Testing and Materials) 2008. *C33/C33M-08, Standard Specification for Concrete Aggregates*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- [11] ASTM (American Society for Testing and Materials) 2022. *C1602, Standard Specification for Mixing Water Used in the Production of Hydraulic Cement Concrete*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- [12] BSI (British Standards Institution) 2002. *BS EN 12390-3, Testing hardened concrete. Compressive strength of test specimens*. London, UK: BSI.
- [13] ASTM (American Society for Testing and Materials) 1996. *C496-96, Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- [14] ASTM (American Society for Testing and Materials) 2022. *C597, Standard Test Method for Ultrasonic Pulse Velocity Through Concrete*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- [15] Abu-Qudias, S.A. 2005. Effect of concrete mixing parameters on propagation of ultrasonic waves. *Construction and Building Materials*, 19(3), pp. 257-263.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم؟

Hosseini Ghaziani, S.M.M. and Ghasemzadeh Mousavinejad, S.H., 2025. Experimental Study of durability and the amount of steel fibrous concrete containing ferrock subjected to high temperature. *Modares Civil Engineering journal*, 25(4), pp.21-32.

DOI: 10.22034/25.4.3

