

An Experimental Study on the Effect of High Temperatures on Performance of the Plastic Lightweight Concrete Containing Steel, Polypropylene and Glass Fibers

Morteza Khalily¹, Vahid Saberi*², Hamid Saberi², Vahid Mansouri¹, Abbasali Sadeghi³ and Ghasem Pachideh⁴

1- M.Sc, Department of Civil Engineering, University of Eyvanekey, Semnan, Iran

2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, University of Eyvanekey, Semnan, Iran

3- Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, Mashhad Branch, Islamic Azad University, Mashhad, Iran

4- Postdoctoral Research Assistant, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

ABSTRACT

Increasing demands for the use of lightweight concrete as well as blast-induced hazards in all over the world have led to performing extensive studies to achieve a better understanding of the behavior of the impact and heat-resistant lightweight concrete. In fact, the plastic concrete is of high ductility and low permeability whose compressive strength is much lower than that of the ordinary concrete. This type of concrete is obtained by mixing cement, sand, water and bentonite. Bentonite in this mixture is a type of clay that promotes its formation and stability. In this paper, the effect of steel, polypropylene and glass fibers on the post-heat strength (both tensile and compressive) of the plastic lightweight concrete has been investigated. To do so, after the process of heating on the specimens (exposure temperatures of 25, 100, 250, 500 and 700 °C), the compressive and tensile strength tests were conducted on the specimens. Accordingly, the results indicate that the addition of the steel fibers greatly affects the concrete strengths such that in some cases, the post-heat strengths of the concrete was enhanced by more than 40%. However, it was found that in contrast to the steel fibers, polypropylene and glass fibers leave insignificant effects on the post-heat performance, which is attributed to their physical and visual characteristics.

ARTICLE INFO

Receive Date: 29 October 2020

Revise Date: 17 January 2021

Accept Date: 29 May 2021

Keywords:

Plastic Lightweight Concrete

Steel Fiber

Polypropylene Fiber

Glass Fiber

Mechanical Properties

High Temperature

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.254752.2277>

*Corresponding author: Vahid Saberi

Email address: saberi.vahid@gmail.com

مطالعه‌ی آزمایشگاهی اثر دماهای بالا بر عملکرد بتن سبک پلاستیک حاوی الیاف‌های فولادی، پلی‌پروپیلن و شیشه

مرتضی خلیلی^۱، وحید صابری^{۲*}، حمید صابری^۳، وحید منصوری^۱، عباسعلی صادقی^۳ و قاسم پاچیده^۴

۱- کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه ایوانکی، ایوانکی، ایران

۲- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه ایوانکی، ایوانکی، ایران

۳- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران

۴- پژوهشگر پسادکتری سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

چکیده

با توجه به رشد روزافزون تقاضا برای استفاده از بتن سبک و همچنین گسترش حوادث تروریستی در اقصی نقاط جهان، پژوهش برای به دست آوردن نتیجه‌های بهینه از بتن سبک مقاوم در برابر ضربه و حرارت امری اجتناب‌ناپذیر است. بتن پلاستیک، بتنی با مقاومت بسیار کمتر از بتن معمولی، شکل‌پذیری زیاد و نفوذپذیری پایین است. این نوع بتن از مخلوط سیمان، شن و ماسه، آب و بنتونیت به دست می‌آید. بنتونیت در این اختلاط به عنوان نوعی خاک رس است که باعث شکل‌پذیری بتن شده و پایداری آن را ارتقاء می‌بخشد. در این مطالعه، تأثیر الیاف فولادی، پلی‌پروپیلن و شیشه در مقاومت کششی و فشاری بتن سبک پلاستیک مورد بررسی تحت دماهای بالا قرار گرفته است. پس از انتخاب طرح شاهد و انجام عملیات حرارتی بر روی نمونه‌ها (دماهای ۲۵-۱۰۰-۲۵۰-۵۰۰ و ۷۰۰ سانتی‌گراد)، آزمایش‌های مقاومت فشاری و کششی ۲۸ روزه روی نمونه‌ها انجام گرفت که با توجه به نتایج می‌توان دریافت کرد که الیاف فولادی در افزایش مقاومت فشاری و کششی بتن سبک پلاستیک بسیار مفید بوده به طوری که در بعضی از مراحل آزمایش مقاومت فشاری و کششی بتن پس از حرارت را به بیش از ۴۰٪ افزایش می‌دهد اما الیاف پلی‌پروپیلن و شیشه به خاطر خصوصیات فیزیکی و ظاهری که دارند در مقایسه با الیاف فولادی تأثیر اندکی در مقاومت فشاری و کششی بتن پس از حرارت داشته‌اند تا جایی که در دماهای ۵۰۰ و ۷۰۰ درجه، الیاف شیشه هیچ‌گونه تأثیری در افزایش مقاومت فشاری و کششی بتن سبک پلاستیک نداشته‌اند.

کلمات کلیدی: بتن سبک پلاستیک، الیاف فولادی، الیاف پلی‌پروپیلن، الیاف شیشه، مشخصات مکانیکی، دما بالا.

| شناسه دیجیتال: | | سابقه مقاله: | | | | |
|----------------|---|--------------|---------------|------------------------|-----------------|------------|
| doi: | https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.254752.2277 | چاپ | انتشار آنلاین | پذیرش | بازنگری | دریافت |
| | 10.22065/jsce.2021.254752.2277 | ۱۴۰۰/۱۲/۲۹ | ۱۴۰۰/۰۳/۰۸ | ۱۴۰۰/۰۳/۰۸ | ۱۳۹۹/۱۰/۲۸ | ۱۳۹۹/۰۸/۰۸ |
| | | | | وحید صابری | *نویسنده مسئول: | |
| | | | | Saberi.vahid@gmail.com | پست الکترونیکی: | |

۱- مقدمه

با توجه به اینکه موارد کاربرد بتن پلاستیک در مقایسه با بتن‌های معمولی بسیار کم بوده و به پروژه‌های خاص و عمدتاً اجرای دیوارهای آب‌بند محدود می‌شود، اکثر کارهای پژوهشی در این زمینه به تحقیقات انجام‌گرفته در پروژه‌های عملی محدود گردیده است. در ایران نیز مهم‌ترین پروژه‌ای که در آن بتن پلاستیک بکار رفته، پروژه سد کرخه بوده که دیوار آب‌بند آن از جنس بتن پلاستیک طراحی شده است. بر اساس آمار و داده‌های موجود، تراوش آب در داخل بدنه سدهای خاکی، نقش مهمی در رفتار سد ایفا می‌نماید به طوری که در نرخ‌های بالا، می‌تواند باعث خرابی در سد گردد. لذا به منظور افزایش پایداری ساختار چنین سدهایی، موضوع کنترل نشست و تراوش، از اهمیت بالایی برخوردار است. در حال حاضر، دو مشکل کاملاً به صورت بحرانی می‌باشند که برطرف نمودن آن‌ها از درجه اهمیت بالایی برخوردار است. راه حل اصلی برای حل این مشکلات، بهره‌گیری از دیوارهای نفوذناپذیر در خاک‌ریزها می‌باشد که در این راستا، نیاز است تا جایگزین‌های مناسبی برای مصالح سنتی استفاده گردند. برای برطرف نمودن این مشکلات، دو راهکار ذیل پیشنهاد گردیده است. راهکار اول مربوط می‌شود به توسعه روش‌های مقابله با تراوش که از طریق آن‌ها بتوان مخزن سدها را در برابر ناپایداری‌های ناشی از نشست آب، تقویت نمود. روش دوم نیز در خصوص کنترل مؤثر فشار بالای سدهای خاکی می‌باشد که منشأ آن احداث پی‌های عمیق در لایه پوششی می‌باشد. در راستای مرتفع نمودن این مسائل، نیاز است تا مصالح غیرقابل نفوذ انتخاب گردند که در میان آن‌ها، بتن پلاستیک ماده انعطاف‌پذیری با خصوصیات مناسب می‌باشد که رفتاری مابین خاک و بتن معمولی دارد. عمده استفاده از این مصالح در مواردی است که بهره‌گیری از بتن معمولی در دیوارهای آب‌بند سدها مقدور نیست [۱ و ۲].

در حال حاضر، به منظور ارتقاء خاصیت نفوذناپذیری و همچنین کاهش مدول الاستیسته مصالح دیواره‌های آب‌بند سدها، به طور عمده از بتن پلاستیک یا بتن‌های آسفالتی استفاده می‌گردد. بنتونیت یا ترکیب بنتونیت و خاک رس موادی هستند که به عنوان سخت‌کننده که در بتن‌های پلاستیک استفاده می‌گردند که به میزان قابل توجهی باعث بهبود مقاومت در برابر ترک‌خوردگی و نفوذناپذیری می‌گردند. به علاوه، با استفاده از این رویکرد، کارایی و روانی بتن نیز شرایط مطلوب‌تری خواهد یافت. همین امر باعث گردیده تا محققین مختلف، در صدد جایگزینی سیمان با این مواد برآیند که به واسطه آن‌ها علاوه بر بهبود در رفتار مصالح، هزینه‌های ساخت نیز کاهش می‌یابند [۲-۵]. مهم‌ترین خصوصیات بتن‌های پلاستیک عبارت‌اند از مدول الاستیسته نسبتاً پایین که قرابت قابل قبولی با مدول الاستیسته مصالح بدنه سد و فونداسیون آن دارد. به علاوه، نسبت مدول الاستیسته به مقاومت به میزان قابل توجهی کمتر از ۵۰۰ می‌باشد ولی این در حالی است که نفوذپذیری و دوام این ماده، دارای مقادیر محدودی می‌باشند. ضریب نفوذناپذیری این ماده بین ۷ تا ۱۰ سانتی‌متر بر ثانیه می‌باشد و مقاومت فشاری ۲۸ روزه آن نیز غالباً در حدود ۲ الی ۵ مگا پاسکال است. در دیواره‌های آب‌بند که در گذشته با استفاده از بتن‌های پلاستیک احداث می‌شدند، مقاومت فشاری عمدتاً دارای میزان کمتری بود که برای برطرف نمودن این مشکل، شا و وانگ پیشنهاد نمودند تا از مصالح سخت‌کننده نوینی استفاده گردد تا از طریق افزودن آن‌ها به بتن پلاستیک، ضعف‌های موجود در زمینه‌ی دوام و کارایی برطرف گردند [۶]. در رابطه با خصوصیات بتن پلاستیک، داده‌های متعددی از مقاومت فشاری محصور نشده که در محل یا آزمایشگاه ثبت گردیده‌اند موجود می‌باشند که این مقادیر بر مبنای نتایج آزمایش‌های انجام‌شده روی نمونه‌ی عمل‌آوری شده در شرایط نرمال می‌باشد [۷-۱۱]. در این مطالعات، مقاومت فشاری محصور نشده و مدول الاستیسته بررسی گردیدند تا بدین طریق اثر نسبت اختلاط در سنین مختلف را ارزیابی نمود. بررسی‌های انجام‌شده نشان دادند که میزان مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول الاستیسته، در پی افزایش میزان سیمان و کاهش درصد بنتونیت یا نسبت آب به سیمان، رشد خواهد نمود. لازم به ذکر است گرچه اطلاعات مذکور مفید بوده و طراحان را در فرایندهای تحلیل و طراحی یاری خواهند نمود، باید اثرات عوامل متعددی نظیر طرح اختلاط، نرخ بارگذاری، سن و شرایط عمل‌آوری طی فرآیند مدل‌سازی، به دقت لحاظ گردند. همچنین محققین متعددی، آزمایش‌ها گوناگونی به منظور بررسی رفتار مکانیکی و هدایت هیدرولیکی بتن پلاستیک تحت شرایط محصورشدگی مختلف را انجام داده‌اند. در این مطالعات، اثر پارامترهایی از قبیل محصورشدگی، سن نمونه و نسبت اختلاط بر قابلیت شکل‌پذیری الاستیک، مؤلفه‌های نیرو-تغییر مکان و نفوذپذیری مورد ارزیابی واقع شدند [۱۲-۱۸].

مردان و همکاران در سال ۱۳۹۱، طی پژوهشی که بر روی بتن پلاستیک انجام دادند، نتایج حاصله را به این صورت بیان کردند که با افزایش نسبت آب به سیمان، مقدار نفوذپذیری کاهش می‌یابد [۱۹]. جوشی و همکاران در سال ۲۰۱۲، گزارشی از نمونه‌های سیمانی- بنتونیتی منتشر نمودند که تحت گرادیان هیدرولیکی ۲۰۰۰ به مدت چهل روز قرار گرفته و هیچ‌گونه آثار ناشی از شستگی مصالح و تخریب در آن‌ها مشاهده نشده بود [۲۰]. همچنین روفینگ و همکاران ۲۰۱۲، طی پژوهشی، گرادیان هیدرولیکی بحرانی بتن پلاستیک را بررسی کردند [۲۱]. اسماعیلی و همکاران در سال ۱۳۹۵، در مقاله‌ای به تعیین و پیش‌بینی رفتار بتن پلاستیک در سدهای خاکی با استفاده آزمایش سه محوری پرداختند. در این مقاله سعی شد که پارامترهای مقاومتی بتن پلاستیک تحت آزمایش سه محوری تعیین شود [۲۲]. بلوری بزاز و عدالتی در سال ۱۳۹۲، در یک پروژه تحقیقاتی، رفتار مکانیکی بتن پلاستیک را تحت شرایط سه محوری و تک‌محوری مورد ارزیابی قرار دادند [۲۳].

عباس لو و همکاران در سال ۲۰۱۳، به بررسی عملکرد بتن پلاستیک دیواره‌های آب‌بند با استفاده از دو نوع کانی رسی یعنی بنتونیت و سپولیت در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه پرداختند. همچنین در بعضی از طرح‌ها از ریزدانه سیلت نیز جهت بررسی تأثیر آن بر خصوصیات مکانیکی و فیزیکی بتن پلاستیک استفاده شد [۲۴]. ردی و همکاران در سال ۲۰۱۷، به بررسی آزمایشگاهی خواص مکانیکی بتن‌های پلاستیک با جایگزینی بنتونیت کلسیمی به جای سیمان پرداختند [۲۵].

کومار و همکاران در سال ۲۰۱۷، به بررسی خواص مکانیکی بتن‌های پلاستیک حاوی خاکستر بادی پرداختند. هدف اصلی این تحقیق، ارزیابی تأثیر افزودن بنتونیت و خاکستر بادی بر مقاومت فشاری و کششی بتن بود. ژانگ و همکاران در سال ۲۰۱۳ [۲۷] در یک بررسی آزمایشگاهی نشان دادند که افزایش حداکثر اندازه درشت‌دانه از ۱۲/۵ به ۱۹ میلی‌متر، مقاومت فشاری بتن پلاستیک را افزایش می‌دهد [۲۶].

پاشانگ‌پیشه و همکاران در سال ۲۰۱۹، در قالب مطالعات آزمایشگاهی به بررسی رفتار بتن پلاستیک تحت آزمایش‌ها تحکیم فشار سه‌محوری زهکشی نشده، پرداختند. در مطالعات آن‌ها، تأثیر عوامل مختلفی نظیر فشار محصورکننده، طرح اختلاط، شرایط و مدت‌زمان عمل‌آوری بر رفتار ماده مذکور از طریق بررسی پارامترهای پاسخ از قبیل مقاومت برشی مؤثر و کل، افزایش فشار آب حفره‌ای و مدهای گسیختگی، مورد ارزیابی واقع گردید. نتایج این تحقیقات مؤید این مطلب بود که هر گونه تغییری در تنش محصورکننده و طرح اختلاط نمونه‌های شامل سیمان و بنتونیت و همچنین اندازه سنگ‌دانه‌ها، به طرز محسوسی رفتار انقباضی-انساطی و متعاقباً اضافه فشار آب حفره‌ای را تحت تأثیر قرار می‌دهد [۲۸]. منصوری و همکاران در سال ۲۰۲۰، تأثیر الیاف مختلف را در مقاومت کششی، فشاری و درصد جذب آب بتن سبک پلاستیک مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به نتایج می‌توان گفت که الیاف فولادی در افزایش مقاومت فشاری و کششی بتن سبک پلاستیک حاوی الیاف بسیار مفید بوده به طوری که در بعضی از مراحل آزمایش، مقاومت فشاری و کششی بتن را به بیش از ۴۰٪ افزایش می‌دهد [۲۹].

بر اساس مطالعات انجام‌شده توسط باقری و همکاران، از مهم‌ترین الزامات استفاده از بتن‌های پلاستیکی در دیواره‌های آب‌بند سدها، مدول الاستیسته پائین این ماده که سازگاری مناسبی با خاک اطراف و همچنین مقاومت کافی برای مقابله با بارهای اعمالی، می‌باشد. بنابراین، یکی از موضوعات تحقیقاتی مهم در زمینه بتن پلاستیک به کاهش نفوذپذیری بدون افزایش در مدول الاستیسته مربوط می‌گردد. با توجه به اثرات مثبت میکرو سیلیس در کاهش نفوذپذیری بتن‌های معمولی و پر مقاومت، این محققین به بررسی میزان بهبود ایجادشده در نفوذناپذیری بتن با بهره‌گیری از میکرو سیلیس پرداختند. نتایج نشان دادند که زمانی که ۱۵ درصد میزان جایگزینی برای میکرو سیلیس در ملات در نظر گرفته می‌شود، ضریب نفوذپذیری تا حدود ۸۰ درصد کاهش می‌یابد. همچنین، بهره‌گیری از میکرو سیلیس مدول الاستیسته و مقاومت را افزایش داد گرچه بهبود حاصل‌شده در میزان نفوذناپذیری، بسیار چشمگیرتر بود [۳۰].

گأ و همکاران در سال ۲۰۱۱، به انجام ۴۰۵ آزمایش مقاومتی بر روی نمونه‌های گوناگون که دارای ۱۲ طرح اختلاط متفاوت می‌باشند پرداخته که ۳ زمان مختلف عمل‌آوری نیز برای آن‌ها در نظر گرفته شده است. با استفاده از نتایج تحلیل‌ها، سعی گردیده است تا رابطه‌ای کاربردی بین مقاومت فشاری و کششی بتن پلاستیک یافت گردد. بر اساس یافته‌های حاصل از انجام تحلیل‌ها، ملاحظه گردید که

روابط آماری میان مقاومت‌های مذکور موجود می‌باشند. بر این اساس، فرمولی مبتنی بر شاخص‌های مقاومتی پیشنهاد گردید که فرم کلی آن یک رابطه خطی مابین مقاومت فشاری بین و مدت‌زمان عمل‌آوری می‌باشد [۳۱]. پرماک و همکاران در سال ۲۰۱۷، اثر دماهای بالا بر بتن‌های حاوی الیاف فولادی و پلی پروپیلن را بررسی کردند. نوع بتن مورد استفاده از نوع بتن‌های با مقاومت بالا بوده و تحت چندین دمای مختلف آزمایش‌ها انجام شد. نتایج حاکی از آن است که با افزایش حرارت، رسانایی الکتریکی بتن کم شده و با سرد شدن تدریجی نمونه‌ها، این مقدار افزایش می‌یابد [۳۲].

سعیدی‌جم و عظیمی در سال ۲۰۱۸، به بررسی پارامترهای مقاومتی و دوام بتن پلاستیک حاوی الیاف پلی پروپیلن پرداختند. بدین منظور با حفظ شکل‌پذیری بتن پلاستیک، با افزودن الیاف پلی پروپیلن مقاومت آن افزایش یافته و برای این منظور طرح اختلاط با نسبت آب به سیمان ۱/۱۷ و نسبت بنتونیت به سیمان ۰/۱۲ و با درصد‌های مختلف الیاف شامل صفر، ۰/۲۵ و ۰/۵ درصد ساخته شده و نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری و کششی و نفوذپذیری با یکدیگر مقایسه شده است. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که مقاومت در سن ۲۸ روز به طور چشمگیری افزایش یافته است در حالی که در سنین اولیه تا ۷ روز مقاومت در حدود بتن معمولی بوده است و تأثیر افزودن الیاف در محدوده اشاره شده بر مقاومت کششی بیش از مقاومت فشاری بوده است. با افزودن الیاف به بتن پلاستیک شکل‌پذیری و مقاومت طاقت بر طبق نمودارهای تنش-کرنش، به طور قابل ملاحظه‌ای بهبود یافته است. همچنین برخلاف بتن معمولی با افزودن الیاف نفوذپذیری بتن افزایش یافته است [۳۳].

استفاده از الیاف در بتن، باعث بهبود مقاومت، شکل‌پذیری و دوام بتن می‌شود. بتن دارای خواص ضد حریق بوده لکن بیشترین نگرانی از سازه‌های بتن‌آرمه در زمان آتش‌سوزی مربوط به میلگردهاست. لذا یکی از پیشنهادها به منظور کاهش خطرات فوق، استفاده از مصالح جایگزین نظیر الیاف است. در این تحقیق به عنوان نوآوری، به مطالعه‌ی آزمایشگاهی اثر دماهای مختلف بر روی مشخصات مکانیکی بتن سبک پلاستیک حاوی الیاف فولادی، پلی پروپیلن و شیشه پرداخته شده است و اثر آن‌ها بر مقاومت کششی و فشاری بتن سبک پلاستیک در دماهای بالا مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- برنامه‌ی آزمایشگاهی

در این مطالعه تأثیر الیاف‌های فولادی، پلی پروپیلن و شیشه بر مقاومت کششی و فشاری بتن سبک پلاستیک پس از دماهای بالا مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور ۱۴ طرح اختلاط که در آن‌ها تمامی مشخصات مصالح سنگی و سیمانی ثابت بوده و فقط درصد الیاف (۰/۵٪ و ۱٪) و درصد بنتونیت (۵٪ و ۱۰٪) تغییر کرده است و دو طرح به عنوان طرح اختلاط شاهد (بتن فاقد الیاف حاوی ۵٪ بنتونیت و ۱۰٪ بنتونیت) در نظر گرفته شد و در تمامی نمونه‌های ساخته شده، از پوکه معدنی قره‌ه واقع در معادن شهرستان میانه استان آذربایجان شرقی-ایران به عنوان سبک دانه استفاده شده است. پس از انتخاب و ساخت کلیه طرح‌ها، عملیات حرارتی بر روی نمونه‌ها دماهای ۲۵-۱۰۰-۲۵۰-۵۰۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد انجام شده و پس از سرد شدن نمونه‌ها، آزمایش‌ها مقاومت فشاری و کششی بر روی نمونه‌ها انجام شد.

۲-۱- مشخصات مصالح طرح اختلاط

جدول (۱) مشخصات مصالح مورد استفاده در ساخت بتن‌های مورد آزمایش را نشان می‌دهد سیمان مصرفی در این تحقیق، سیمان تیپ II شاهرود می‌باشد که مشخصات شیمیایی و فیزیکی آن به ترتیب در جدول‌های (۲) و (۳) ارائه شده است. همچنین مشخصات مکانیکی الیاف‌های فولادی، پلی پروپیلن و شیشه در جدول (۴) ذکر شده است که الیاف فولادی بکار رفته در این پژوهش از شرکت صنایع مفتولی زنجان و همچنین روان کننده‌ی مورد استفاده از شرکت بتن شیمی خاتم تهیه شده است. مقدار روان کننده برای الیاف فولادی، پلی پروپیلن و شیشه به ترتیب معادل ۰/۵، ۰/۳۳ و ۰/۱ درصد می‌باشد. بنتونیت مصرفی در این تحقیق از معدن شرکت والی استان سمنان تهیه شده و مشخصات شیمیایی و فیزیکی آن در جدول‌های (۵) و (۶) آورده شده است. مطابق شکل (۱)، الیاف‌های مصرفی در آزمایش ارائه شده است.

جدول ۱: مشخصات مصالح مصرفی

| آب | سیمان | بنتونیت | پوکه معدنی | ماسه | روان کننده | الیاف فولادی |
|------------------|---------------|------------|----------------------|--------------------------------------|--|-------------------------|
| آب شرب شهر تهران | تیپ II شاهرود | معدن سمنان | منطقه آذربایجان شرقی | دو بار شور (طبیعی) معدن تیغاب ورامین | فوق روان ساز کربوکسیلاتی (BC20) شرکت بتن شیمی خاتم | شرکت صنایع مفتولی زنجان |

جدول ۲: مشخصات شیمیایی سیمان مصرفی (درصد)

| آنالیز شیمیایی | اکسید سیلیسیم (SiO ₂) | اکسید آلومینیوم (Al ₂ O ₃) | اکسید آهن (Fe ₂ O ₃) | اکسید کلسیم (CaO) | اکسید منیزیم (MgO) | سولفور تری اکسید (S ₂ O ₃) | آهک آزاد (Cao.f) |
|----------------|-----------------------------------|---|---|-------------------|--------------------|---|------------------|
| درصد | ۲۱/۴ | ۴/۵ | ۴/۰۷ | ۶۳/۶ | ۱/۵۴ | ۲/۳۵ | ۱/۲۳ |

جدول ۳: مشخصات فیزیکی سیمان مصرفی

| آنالیز فیزیکی | بلین (Blaine test, cm ² /gr) | انبساط طولی | زمان گیرش اولیه (Vicat test, minutes) | زمان گیرش ثانویه (Vicat test, minutes) |
|---------------|---|-------------|---------------------------------------|--|
| مشخصات فیزیکی | ۳۰۱۹ | ۰/۰۱۳ | ۱۵۷ | ۲۱۲ |

جدول ۴: مشخصات الیاف مصرفی

| نام | الیاف فولادی | الیاف شیشه | الیاف پلی پروپیلن |
|----------------------------|--------------|------------|-------------------|
| شکل | قلاب دار | صاف | صاف |
| طول (mm) | ۵۰ | ۱۸ | ۱۲ |
| قطر (μm) | ۱۰ | ۳۰-۱۵ | ۳۰-۲۰ |
| چگالی (g/cm ³) | ۷/۸ | ۲/۶ | ۰/۹ |



ج) الیاف شیشه مصرفی



ب) الیاف پلی پروپیلن مصرفی



الف) الیاف فولاد مصرفی

شکل ۱: الیاف های مصرفی در آزمایش

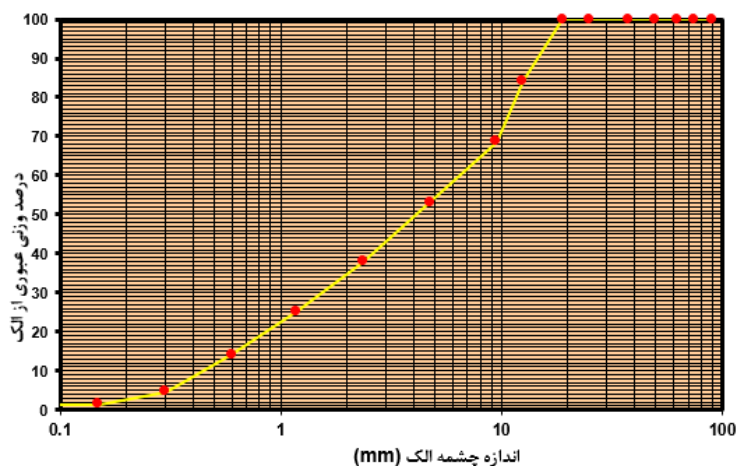
جدول ۵: مشخصات شیمیایی بنتونیت مصرفی

| Formula | L.O.I | Na | Na ₂ O | MgO | Al ₂ O ₃ | SiO ₂ | P ₂ O ₅ | SO ₃ | Cl |
|---------|-------|------|-------------------|-------|--------------------------------|------------------|-------------------------------|-----------------|------|
| Conc. % | ۹/۱۶ | ۰/۹۱ | ۱/۹۹ | ۴۰/۲۲ | ۱۱/۷۵ | ۶۳/۱۳ | ۰/۰۷ | ۰/۱۳ | ۱/۴۱ |

جدول ۶: مشخصات فیزیکی بنتونیت مصرفی

| وزن مخصوص | حد روانی | حد خمیری | شاخص خمیری |
|-----------|----------|----------|------------|
| ۲/۴۲ | ۱۸۰ | ۳۷ | ۱۴۳ |

شن و ماسه موردنیاز از معدن شرکت تیغاب شهرستان پاکدشت فراهم شده که در شکل (۲) مشخصات دانه بندی ماسه مورداستفاده در بتن‌ها نشان داده شده است. جهت سبک‌سازی بتن از پوکه معدنی قروه به‌عنوان درشت‌دانه استفاده شده است که از تمامی اندازه‌ها با نسبت معینی استفاده شده است که محدوده اندازه‌ها از ۵ تا ۲۰ میلی‌متر می‌باشد.



شکل ۲: منحنی دانه‌بندی ماسه

در جدول (۷) آنالیز فیزیکی سیمان مصرفی نیز آورده شده است.

جدول ۷: آنالیز فیزیکی سیمان مصرفی

| ردیف | شرح آزمایش | نتایج آزمایش | استاندارد ۳۸۹ ایران | استاندارد کارخانه | روش آزمایش |
|------|--|--------------|---------------------|-------------------|------------|
| ۱ | سطح بلین (سانتی متر بر گرم) | ۳۰۵۵ | حداقل ۲۸۰۰ | حداقل ۲۹۰۰ | ۳۹۰ |
| ۲ | آزمایش اتوکلاو (درصد) | ۰/۰۳۶ | حداکثر ۰/۸ | حداکثر ۰/۶ | ۳۹۱ |
| ۳ | زمان سوزن ویکات | | | | |
| ۱-۳ | شروع (دقیقه) | ۱۴۵ | حداقل ۴۵ | حداقل ۷۰ | ۳۹۲ |
| ۲-۳ | نهایی (سرعت) | ۳:۴۵ | حداکثر ۶ | حداکثر ۵ | ۳۹۲ |
| ۴ | مقاومت فشاری (کیلوگرم بر سانتی متر مربع) | | | | |
| ۱-۴ | ۱ روز | - | - | - | ۳۹۳ |
| ۲-۴ | ۲ روز | - | - | - | ۳۹۳ |
| ۳-۴ | ۳ روز | ۲۴۵ | حداقل ۱۰۰ | حداقل ۱۷۰ | ۳۹۳ |
| ۴-۴ | ۷ روز | ۳۱۰ | حداقل ۱۷۵ | حداقل ۲۵۰ | ۳۹۳ |
| ۵-۴ | ۲۸ روز | ۴۱۱ | حداقل ۳۱۵ | حداقل ۳۵۰ | ۳۹۳ |
| ۵ | حرارت هیدراتاسیون (کالری بر گرم) | | | | |
| ۱-۵ | ۷ روز | - | - | - | ۳۹۴ |
| ۲-۵ | ۲۸ روز | - | - | - | ۳۹۴ |

۲-۲- طرح اختلاط بتن مصرفی

مطابق جدول (۸) نسبت آب به سیمان در این تحقیق برابر ۰/۴ در نظر گرفته شده است. نحوه اختلاط الیاف فولادی، پلی پروپیلن و شیشه به نسبت حجم کلی بتن صورت گرفته است. در این تحقیق دو نمونه طرح اختلاط به عنوان نمونه شاهد در نظر گرفته شده که یک نمونه طرح بتن سبک پلاستیک حاوی ۵٪ بنتونیت (B5) و نمونه دیگر حاوی ۱۰٪ بنتونیت (B10) به عنوان جایگزین بخشی از سیمان مصرفی می باشد. کلیه آزمایشها حرارتی و مقاومتی نمونهها، در آزمایشگاههای کوره الکتریکی و تکنولوژی بتن دانشگاه سمنان صورت پذیرفت.

جدول ۸: جزئیات طرح اختلاط (kg/m^3)

| الیاف شیشه | الیاف پلی پروپیلن | الیاف فولادی | آب | بنتونیت | سیمان | پوکه | ماسه | نام نمونه |
|------------|-------------------|--------------|-----|---------|-------|------|------|-------------|
| . | . | . | ۱۸۰ | ۲۲/۵۰ | ۴۲۷/۵ | ۱۸۷۵ | ۳۵۸ | B5 |
| . | . | ۱۴۹ | ۱۸۰ | ۲۲/۵۰ | ۴۲۷/۵ | ۱۸۷۵ | ۳۵۸ | B5-SF-0.5 |
| . | . | ۲۹۸/۵ | ۱۸۰ | ۲۲/۵۰ | ۴۲۷/۵ | ۱۸۷۵ | ۳۵۸ | B5-SF-1.0 |
| . | ۱۷/۵ | . | ۱۸۰ | ۲۲/۵۰ | ۴۲۷/۵ | ۱۸۷۵ | ۳۵۸ | B5-PPF-0.5 |
| . | ۳۴/۵ | . | ۱۸۰ | ۲۲/۵۰ | ۴۲۷/۵ | ۱۸۷۵ | ۳۵۸ | B5-PPF-1.0 |
| ۴۹/۵ | . | . | ۱۸۰ | ۲۲/۵۰ | ۴۲۷/۵ | ۱۸۷۵ | ۳۵۸ | B5-GF-0.5 |
| ۹۹ | . | . | ۱۸۰ | ۲۲/۵۰ | ۴۲۷/۵ | ۱۸۷۵ | ۳۵۸ | B5-GF-1.0 |
| . | . | . | ۱۸۰ | ۴۵ | ۴۰۵ | ۱۸۷۵ | ۳۵۸ | B10 |
| . | . | ۱۴۹ | ۱۸۰ | ۴۵ | ۴۰۵ | ۱۸۷۵ | ۳۵۸ | B10-SF-0.5 |
| . | . | ۲۹۸/۵ | ۱۸۰ | ۴۵ | ۴۰۵ | ۱۸۷۵ | ۳۵۸ | B10-SF-1.0 |
| . | ۱۷/۵ | . | ۱۸۰ | ۴۵ | ۴۰۵ | ۱۸۷۵ | ۳۵۸ | B10-PPF-0.5 |
| . | ۳۴/۵ | . | ۱۸۰ | ۴۵ | ۴۰۵ | ۱۸۷۵ | ۳۵۸ | B10-PPF-1.0 |
| ۴۹/۵ | . | . | ۱۸۰ | ۴۵ | ۴۰۵ | ۱۸۷۵ | ۳۵۸ | B10-GF-0.5 |
| ۹۹ | . | . | ۱۸۰ | ۴۵ | ۴۰۵ | ۱۸۷۵ | ۳۵۸ | B10-GF-1.0 |

طبق جدول (۸) برای معرفی نمونهها از علائم اختصاری استفاده شده است. B نشان دهنده بنتونیت و اعداد مقابل آن درصد بنتونیت (B5 – B10) را نشان می دهد. PPF، SF^۱ و GF^۲ به ترتیب به معنی الیاف پلی پروپیلن، فولادی و شیشه و اعداد انتهایی (0.5 – 1.0) نشان دهنده درصد الیاف مصرفی در نمونهها می باشد.

۲-۳- روش آزمایش

عملآوری نمونهها مطابق استاندارد EN-12390-13 [۳۴] و بر روی بتنهای با سن ۲۸ روزه اعمال گردید. ابتدا به میزان موردنظر (طبق طرح اختلاط) مخلوط بتن به همراه الیاف و فوق روان کننده ساخته، سپس نمونهگیری بتنها در نمونههای استوانه‌ای ۲۰*۱۰ سانتیمتر به تعداد مجموعاً ۴۲۰ عدد (برای هر دما و هر آزمون ۳ عدد نمونه ساخته شد) انجام شد. هر قالب، در سه مرحله بتن‌ریزی و در هر بار ویبره گردید. پس از مدت ۲۴ ساعت قالبها باز و داخل حوضچه آب (دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد) قرار داده و نمونهها

¹ Polypropylene Fiber

² Steel Fiber

³ Glass Fiber

پس از مدت ۲۸ روز از داخل حوضچه‌ی آب خارج شده و سپس در کوره الکتریکی قرار داده شد. پس از عمل‌آوری نمونه‌ها، دماهای انتخابی برای انجام آزمایش در کوره‌ی الکتریکی به ترتیب ۷۵۰-۵۰۰-۲۵۰-۱۰۰-۲۵ درجه سانتی‌گراد مورد بررسی قرار گرفت. شکل‌های (۳) (الف) و (ب)، به ترتیب کوره‌ی الکتریکی و محل قرارگیری نمونه‌ها در آن را نشان می‌دهد. نرخ افزایش درجه حرارت تا رسیدن به دمای موردنظر برابر ۵ درجه سانتی‌گراد بر هر دقیقه انتخاب گردید. سپس نمونه‌ها به مدت یک ساعت، پس از رسیدن دمای داخلی کوره به دمای موردنظر، به منظور اینکه قسمت درونی بتن نیز به دمای مدنظر برسد و تمام نمونه هم دما شود، در دمای مطلوب قرار گرفتند. به علت اینکه کاهش دمای نمونه‌ها به آرامی صورت پذیرد، کوره به مدت یک ساعت نیز در حالت خاموش قرار داشته و سپس درب کوره باز شده و پس از چند دقیقه نمونه‌ها خارج شدند. این فرآیند، مانع از ایجاد شوک دمایی به نمونه‌ها می‌گردد. پس از انجام عملیات حرارتی، کلیه نمونه‌ها در زیر جک، تحت آزمایش مقاومت فشاری و کششی قرار گرفتند. سرعت بارگذاری ۰/۵ مگا پاسکال بر ثانیه بر طبق استاندارد EN-12390-13 انتخاب گردید. در شکل ۳، تصاویر نمونه‌ها پس از انجام عملیات حرارتی نشان داده شده است. بتن سبک پلاستیک در دماهای پایین (۲۵، ۱۰۰ و ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد) تغییر شکل ظاهری چندانی نداشته اما با افزایش دما به ۵۰۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد عمدتاً ترک‌های سطحی بر روی نمونه‌ها مشاهده شد و همچنین نمونه‌ها تردتر و شکننده‌تر شدند (شکل (۴)).



ب) محل قرارگیری نمونه‌ها در کوره



الف) کوره‌ی الکتریکی

شکل ۳: کوره‌ی الکتریکی و قرارگیری نمونه‌ها در آن



ب) نمونه‌ی الیاف شیشه‌ای



الف) نمونه‌ی الیاف پلی‌پروپیلن



شکل ۴: نمونه‌ی الیاف فولادی

شکل ۴: تصاویر نمونه‌ها پس از انجام عملیات حرارتی

در این مطالعه، تا دمای ۲۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد تغییری در شکل ظاهری نمونه‌ها مشاهده نشد. ولی با افزایش دما به ۵۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد همانطور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود پدیده‌ی پوسته‌شدگی و تغییر سطح مقطع نمونه از مربع به حالت قوس زدگی رخ داد.



شکل ۵: تغییر شکل ظاهری و پوسته شدن نمونه

۳- انجام آزمایش و بررسی نمونه‌ها

پس از گذشت حدود ۴۸ ساعت از پایان عملیات حرارتی و سرد شدن نمونه‌ها، آزمایش‌ها مقاومت فشاری و کششی نمونه‌ها مطابق استاندارد انجام شد.

۳-۱- آزمایش مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌ها طبق استاندارد ASTM C39 [۳۵] انجام شد. آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های استوانه‌ای به ابعاد ۱۰*۲۰ سانتی‌متر توسط جک هیدرولیک با ظرفیت ۲۰۰۰ کیلو نیوتن و سرعت بارگذاری ۰/۵ مگا پاسکال بر ثانیه انجام شد. در این تحقیق نمونه‌های عمل‌آوری شده در سن ۲۸ روز مورد آزمایش فشاری قرار گرفتند. بدین‌صورت که نمونه‌ها بعد از عمل‌آوری در حوضچه‌های عمل‌آوری شکل (۶) (الف) و پس از گذشت ۴۸ ساعت از پایان عملیات حرارتی، آزمایش مقاومت فشاری توسط جک هیدرولیکی مطابق شکل (۶) (ب) با ظرفیت ۲۰۰۰ کیلو نیوتن و سرعت بارگذاری ۰/۵ مگاپاسکال بر ثانیه نشان داده شده در شکل (۶) (ج) و (د) انجام شد. همان‌طور که در شکل‌های (۶) مشاهده می‌شود گسترش ترک به‌صورت کمربندی قطری صورت پذیرفته است.



ب) جک هیدرولیکی



الف) حوضچه‌ی عمل آوری



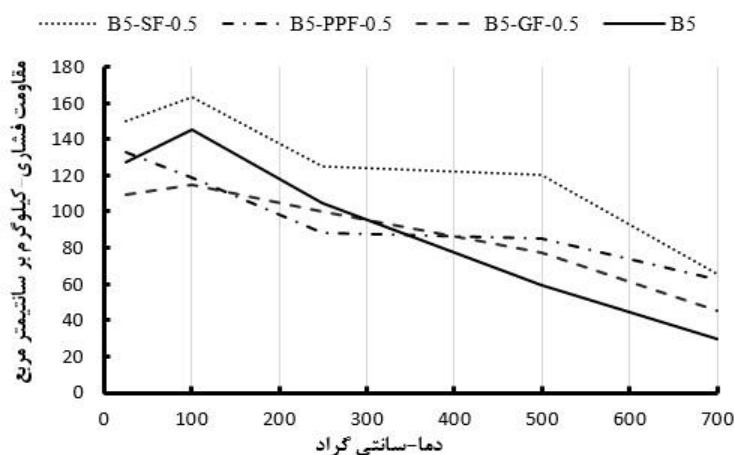
د) نحوه‌ی شکست نمونه زیر جک



ج) نحوه‌ی قرارگیری نمونه در زیر جک

شکل ۶: آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌ها

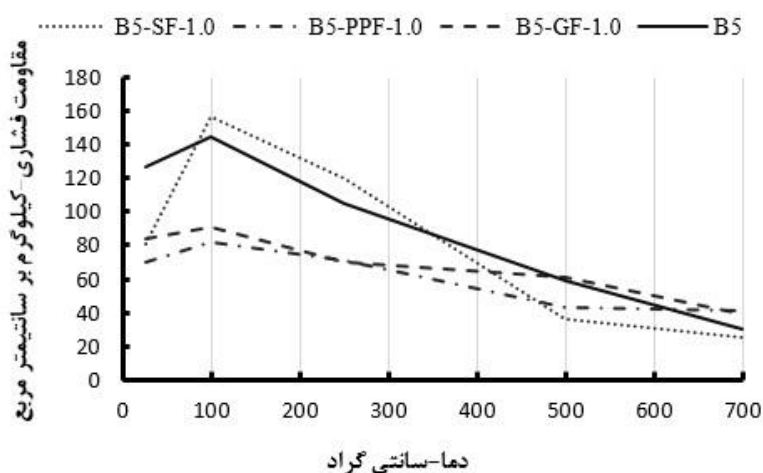
شکل‌های (۷) و (۸) مقاومت فشاری بتن حاوی ۵٪ بنتونیت با ۰/۵٪ و ۱٪ الیاف را تحت دماهای مختلف نشان می‌دهد. آنچه مشخص است به‌طور کلی با افزایش دما مقاومت فشاری نمونه‌ها کاهش یافته به‌طوری‌که در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد مقاومت فشاری نمونه شاهد به کمترین مقدار خود (۲۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع) رسیده که تقریباً ۲۰ درصد مقاومت فشاری در مقایسه با همان بتن (نمونه شاهد) در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد است. مطابق شکل (۷)، افزودن ۰/۵٪ الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن به بتن سبک پلاستیک در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد سبب افزایش تقریباً ۲۰ و ۵ درصدی مقاومت فشاری بتن سبک پلاستیک شده‌اند اما الیاف شیشه تا دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد که موجب افزایش تقریباً ۴۵٪ مقاومت فشاری شده است تأثیر مثبت دیگری در افزایش مقاومت فشاری بتن سبک پلاستیک نداشته است. افزایش مقاومت فشاری بتن سبک پلاستیک حاوی الیاف فولادی تا دمای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد تقریباً همان ۲۰٪ است که با توجه به اینکه مقاومت فشاری بتن سبک پلاستیک فاقد الیاف در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد تقریباً نصف مقاومت فشاری در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد شده است و مقاومت فشاری بتن سبک پلاستیک حاوی ۰/۵٪ الیاف تقریباً ۲۵٪ کاهش داشته در نتیجه ۰/۵٪ الیاف فولادی در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد مقاومت فشاری بتن سبک پلاستیک را تقریباً ۲ برابر در مقایسه با بتن فاقد الیاف افزایش داده است که بیشترین افزایش مقاومت فشاری در بین دیگر نمونه‌ها بوده است.



شکل ۷: مقاومت فشاری بتن حاوی ۵٪ بنتونیت و ۰/۵٪ الیاف

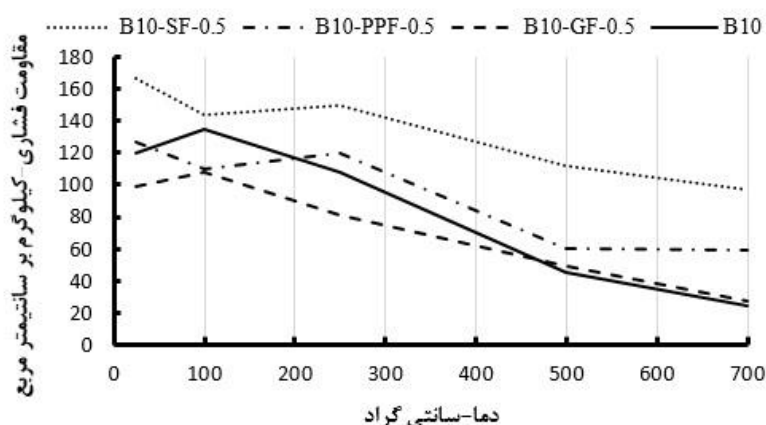
مقدار ۰/۵٪ الیاف پلی‌پروپیلن در دماهای ۱۰۰ و ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد تأثیر مثبتی در افزایش مقاومت فشاری نداشته و در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد مقاومت فشاری بتن سبک پلاستیک را تقریباً ۴۵٪ نسبت به نمونه شاهد افزایش داده است. در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد مقاومت فشاری تمامی نمونه‌های حاوی الیاف در مقایسه با دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد تقریباً کاهش بیش از ۵۰٪ را داشته‌اند اما نمونه فاقد الیاف تقریباً بیش از ۸۰٪ کاهش مقاومت فشاری را داشته است، در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد مقاومت فشاری بتن حاوی ۰/۵٪ الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن تقریباً برابر می‌باشند.

با توجه به شکل (۸) رفتار بتن سبک پلاستیک حاوی ۱٪ الیاف کاملاً با رفتار بتن حاوی ۰/۵٪ الیاف متفاوت می‌باشد، به طوری که در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد مقاومت فشاری بتن فاقد الیاف بیشتر از بتن سبک پلاستیک حاوی الیاف بوده است. در دمای ۱۰۰ و ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد بتن حاوی ۱٪ الیاف فولادی مقاومت فشاری بتن را تقریباً بیش از ۱۰٪ افزایش داده است اما با افزایش دما به ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد مقاومت فشاری بتن فاقد الیاف و بتن حاوی الیاف شیشه تقریباً مقاومت فشاری یکسانی داشته اما الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن تأثیر مثبتی در مقاومت فشاری پس از حرارت بتن سبک پلاستیک نداشته‌اند. در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد الیاف فولادی تأثیری در افزایش مقاومت فشاری بتن نداشته اما الیاف پلی‌پروپیلن و شیشه تقریباً مقاومت فشاری پس از حرارت بتن سبک پلاستیک را ۴۰٪ افزایش داده‌اند. بنابراین با جمع‌بندی نتایج حاصل از مقاومت فشاری بتن سبک پلاستیک حاوی ۵٪ بنتونیت در دماهای مختلف، می‌توان گفت که تقریباً در تمامی دماها بتن حاوی ۰/۵٪ الیاف فولادی، پلی‌پروپیلن و شیشه مقاومت فشاری بیشتری داشته است.



شکل ۸: مقاومت فشاری بتن حاوی ۵٪ بنتونیت و ۱٪ الیاف

شکل (۹) مقاومت فشاری بتن سبک پلاستیک حاوی ۱۰٪ بنتونیت و ۵٪ الیاف را نشان می‌دهد. با توجه به آن می‌توان گفت که الیاف فولادی در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد مقاومت فشاری بتن سبک پلاستیک را تقریباً به میزان ۴۰٪ در مقایسه با بتن شاهد افزایش می‌دهد. نمونه‌های حاوی الیاف پلی‌پروپیلن نیز در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد مقاومت فشاری بیشتری (حدوداً ۵٪ بیشتر) در مقایسه با بتن شاهد فاقد الیاف از خود نشان می‌دهند. برخلاف دیگر الیاف، الیاف شیشه مقاومت فشاری بتن را در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد را به میزان ۲۰٪ کاهش داده اما الیاف در بتن سبک پلاستیک حاوی ۵٪ الیاف و ۱۰٪ بنتونیت پس از تحمل حرارت ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد رفتار متفاوتی از خود نشان می‌دهند، بتن شاهد و بتن حاوی الیاف شیشه در مقایسه با دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد، مقاومت بیشتری در حدود ۱۰٪ برای بتن شاهد و ۹٪ برای بتن حاوی الیاف شیشه از خود به نمایش گذاشته اما بتن حاوی الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن با کاهش ۸۶٪ مقاومت فشاری روبه‌رو می‌شوند، ولی همچنان بتن حاوی الیاف فولادی در مقایسه با دیگر الیاف و بتن شاهد مقاومت فشاری بیشتری از خود نشان می‌دهد.

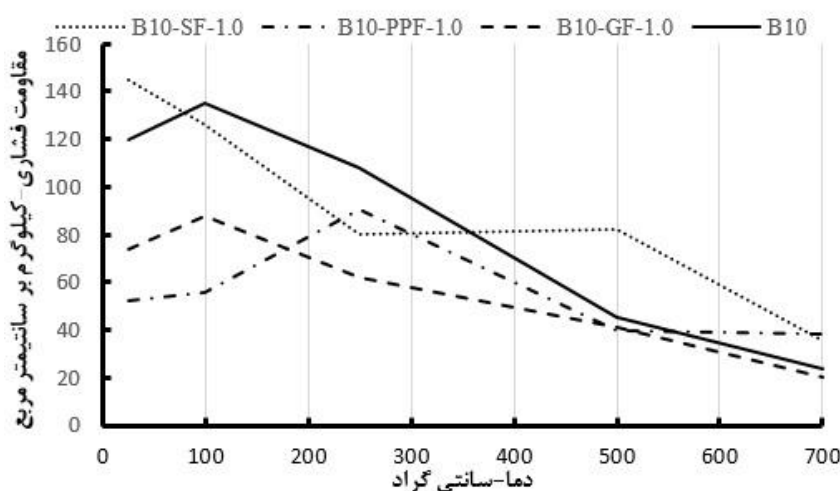


شکل ۹: مقاومت فشاری بتن حاوی ۱۰٪ بنتونیت و ۵٪ الیاف

مطابق شکل (۹) افزایش دمای بتن به ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد نتایج متفاوتی با دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد داشته و بتن حاوی الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن در دمای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد با افزایش مقاومت فشاری بتن سبک پلاستیک همراه بوده‌اند. حتی مقاومت فشاری بتن حاوی الیاف پلی‌پروپیلن حدوداً ۱۰٪ بیشتر از نمونه شاهد شده که این مقدار برای الیاف فولادی حدوداً ۴۰٪ بوده است. اما بتن شاهد و بتن حاوی ۵٪ الیاف شیشه در دمای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد با کاهش مقاومت فشاری همراه بوده‌اند که مقادیر کاهش مقاومت این دو نوع بتن به ترتیب ۸۰٪ و ۷۵٪ می‌باشد. بتن حاوی ۵٪ و ۱۰٪ بنتونیت در دماهای بالا ۵۰۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد در مقایسه با دیگر دماها رفتاری متفاوت داشته در دمای ۵۰۰ درجه تمامی نمونه‌ها با افت شدید حدوداً ۷۰٪ مقاومت فشاری همراه بوده اما نمونه‌های حاوی الیاف در مقایسه با بتن شاهد مقاومت فشاری بیشتری از خود نشان داده‌اند که برای الیاف فولادی نزدیک به ۳ برابر، پلی‌پروپیلن تقریباً ۳۵٪ و شیشه حدوداً ۵٪ افزایش مقاومت فشاری را در پی داشته‌اند و در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد تنها الیاف پلی‌پروپیلن تأثیر مثبت در افزایش مقاومت فشاری پس از حرارت بتن سبک پلاستیک در مقایسه با دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد داشته و تقریباً مقاومت فشاری بتن سبک پلاستیک را ثابت نگه‌داشته است و دیگر الیاف (فولادی و شیشه) نسبت به دمای ۵۰۰ درجه کاهش مقاومت را به همراه داشته اما در مقایسه با بتن شاهد همچنان مقاومت فشاری بتن را تقریباً حدود ۴ برابر بتن حاوی الیاف فولادی، ۳۵٪ الیاف پلی‌پروپیلن و ۵٪ الیاف شیشه افزایش داده‌اند.

با توجه به شکل (۱۰) می‌توان گفت که مقاومت فشاری بتن حاوی ۱٪ الیاف و ۱۰٪ بنتونیت در مقایسه با بتن حاوی ۵٪ و همان مقدار بنتونیت کاهش ۵ الی ۵۰٪ را به همراه داشته که این کاهش برای الیاف فولادی کمترین و برای الیاف پلی‌پروپیلن بیشترین مقدار بوده است. با مقایسه نتایج حاصل از آزمایش فشاری پس از حرارت بر روی نمونه‌ها مشاهده شد که رفتار بتن با ۱٪ الیاف کاملاً متفاوت نسبت به بتن حاوی ۵٪ الیاف بوده مطابق نمودار در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد بتن حاوی الیاف فولادی مقاومت فشاری بیشتری از خود نشان داده که تقریباً نزدیک به ۲۵٪ بیشتر از بتن شاهد و الیاف پلی‌پروپیلن و شیشه به ترتیب بیش از ۷۰٪ و یک‌سوم مقاومت فشاری بتن را کاهش داده است، بتن حاوی الیاف فولادی در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد تنها بتنی بوده که مقاومت فشاری آن

تقریباً نزدیک به ۸۰٪ کاهش یافته اما دیگر الیاف مقاومت فشاری بتن را نسبت به دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد تقریباً ۱۰٪ و ۵٪ به ترتیب برای الیاف شیشه و پلی‌پروپیلن افزایش داده‌اند.



شکل ۱۰: مقاومت فشاری بتن حاوی ۱۰٪ بنتونیت و ۱٪ الیاف

بتن حاوی ۱٪ الیاف فولادی در دمای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد با کاهش ۵۰٪ مقاومت فشاری در مقایسه با دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد همراه بوده ولی در بتن حاوی الیاف پلی‌پروپیلن نزدیک به ۲ برابر مقاومت فشاری بتن افزایش یافته بتن حاوی الیاف شیشه نیز رفتاری مشابه الیاف فولادی داشته با این تفاوت که کاهش مقاومت فشاری آن ۴۰٪ بوده است نکته قابل توجه در دمای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد این است که مقاومت فشاری بتن شاهد از دیگر نمونه‌ها بیشتر بوده است اما مقاومت فشاری نمونه شاهد (فاقد الیاف) در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد بیش از ۳۰٪ کاهش یافته اما الیاف فولادی در این دما تقریباً در مقاومت فشاری پس از حرارت بتن سبک پلاستیک تأثیر مثبت داشته و مقاومت فشاری بتن را در مقایسه با بتن شاهد حدوداً بیش از ۴۰٪ افزایش داده و در مقایسه با دمای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد تقریباً ثابت نگه داشته است. الیاف پلی‌پروپیلن و شیشه تأثیر مثبتی در مقاومت فشاری پس از حرارت بتن سبک پلاستیک نداشته و با افت تقریباً برابر، به یک مقدار نزدیک به هم رسیده که در مقایسه با مقاومت فشاری بتن شاهد حدوداً کمتر از ۱۰٪ کاهش مقاومت را داشته است.

رفتار الیاف پلی‌پروپیلن در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد با دیگر الیاف متفاوت می‌باشد به طوری که بتن حاوی ۱٪ الیاف پلی‌پروپیلن با افزایش مقاومت فشاری پس از حرارت همراه می‌باشد نزدیک به ۱۰٪ در مقایسه با دمای ۵۰۰ درجه و همچنین تقریباً ۱۵٪ در مقایسه با بتن شاهد. الیاف فولادی باینکه تأثیر مثبتی در مقاومت فشاری بتن سبک در مقایسه با بتن شاهد دارد اما در مقایسه با دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد با کاهش قابل ملاحظه‌ای همراه می‌باشد بتن حاوی الیاف شیشه نیز مانند بتن فاقد الیاف در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد با افت مقاومت فشاری پس از حرارت همراه می‌باشد که دلیل رفتار تقریباً مشابه بتن حاوی الیاف شیشه و بتن فاقد الیاف در دماهای بالا این است که الیاف شیشه هنگامی که در معرض حرارت قرار می‌گیرند سوخته و از بین می‌روند به عبارت دیگر در دماهای بالا الیافی در بتن حاوی الیاف شیشه باقی نمی‌ماند تا در مقابل ترک خوردن مقاومت کند. بنابراین می‌توان گفت که مقاومت فشاری بتن سبک پلاستیک حاوی ۱۰٪ بنتونیت در دماهای مختلف، در نمونه‌های حاوی ۵٪ الیاف فولادی، پلی‌پروپیلن و شیشه بیش از سایر نمونه‌ها است.

۳-۲- آزمایش مقاومت کششی

نحوه آزمایش کششی بر روی نمونه‌های استوانه‌ای شکل (۱۱) (الف) نشان داده شده است. جک هیدرولیکی مورد استفاده دارای ظرفیت ۲۰۰۰ کیلو نیوتن بوده و با سرعت ۰/۵ مگا پاسکال بر ثانیه بار را اعمال می‌کند. برای انجام آزمایش مقاومت کششی نمونه‌ها، از روش کشش غیرمستقیم یا روش برزلی بر طبق استاندارد ASTM C496 [۳۲] استفاده شد. روش انجام آزمایش بدین صورت است که نمونه به صورت افقی یا خوابیده در زیر جک قرار گرفته به طوری که هیچ‌گونه انحرافی در راستای خود ندارد. سپس جک هیدرولیک مورد نظر با

اعمال نیروی قائم، منجر به شکست نمونه می‌شود. با توجه به شکل (۱۱) (ب) و (ج)، ترک‌ها در وسط سطح مقطع نمونه‌ها ایجاد شده و در هر سه نوع بتن حاوی الیاف فولادی، پلی‌پروپیلین و شیشه در کنار دیواره سطح مقطع، ترک‌ها به صورت شاخه‌ای رشد یافت. بنابراین به لحاظ مقدار عرض ترک‌ها و شکل ظاهری آن، تفاوت چندانی بین نمونه‌ها مشاهده نمی‌شود مقاومت کششی بتن برحسب نیوتن بر سانتی-متر مربع طبق رابطه (۱) محاسبه می‌شود:

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi DL} \quad (1)$$

که در آن:

P = مقدار بار وارده (نیوتن)

D = قطر نمونه‌ی استوانه‌ای (۱۰ سانتی‌متر)

L = طول نمونه‌ی استوانه‌ای (۲۰ سانتی‌متر)



(ب) رشد ترک در نمونه‌ها

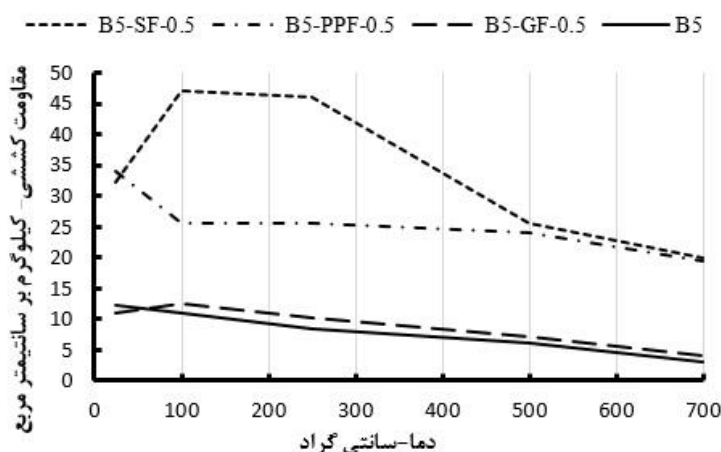


(الف) نحوه قرارگیری نمونه زیر جک



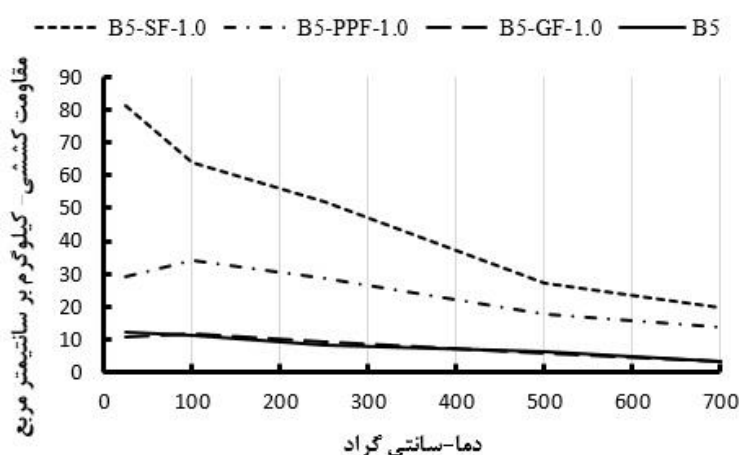
(ج) عملکرد الیاف پس از انجام آزمایش
شکل ۱۱: آزمایش مقاومت کششی

با توجه به شکل (۱۲) که روند تغییرات مقاومت کششی نمونه‌های بتن سبک پلاستیک حاوی ۵٪ بنتونیت و ۰/۵٪ الیاف فولادی، پلی‌پروپیلن و شیشه به ازای دماهای مختلف را نشان می‌دهد، می‌توان بیان کرد که بتن حاوی ۰/۵٪ الیاف فولادی در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد بیشترین مقاومت کششی (تقریباً چهار برابر مقاومت بتن فاقد الیاف) را داشته است، همچنین الیاف شیشه تأثیر ۱۰ تا ۱۵٪ در افزایش مقاومت کششی پس از حرارت بتن سبک پلاستیک را داشته و در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد نمونه حاوی الیاف پلی‌پروپیلن دارای بیشترین مقاومت کششی بوده که حدوداً سه برابر مقاومت کششی بتن فاقد الیاف و حدوداً ۲۰٪ بیشتر از بتن حاوی الیاف فولادی بوده است. مطابق شکل با افزایش دما کلیه نمونه‌ها با کاهش مقاومت کششی همراه بوده‌اند اما تغییرات الیاف مختلف متفاوت بوده مثلاً در دماهای ۱۰۰ و ۵۰۰ درجه مقاومت کششی بتن حاوی الیاف پلی‌پروپیلن تقریباً یکسان و نوسانات ۱ تا ۵٪ داشته است اما در بتن حاوی الیاف فولادی تنها در دماهای ۱۰۰ و ۲۵۰ روند کاهشی تقریباً ۲٪ بوده که با افزایش دما به ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد تقریباً مقاومت بتن حاوی الیاف پلی‌پروپیلن و فولادی یکسان شده که مستلزم کاهش ۵۰٪ مقاومت کششی بتن حاوی الیاف فولادی بوده است در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد مقاومت کششی پس از حرارت بتن حاوی ۰/۵٪ الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن تقریباً یکسان بوده و این اتفاق برای بتن حاوی الیاف شیشه و بتن فاقد الیاف نیز افتاده است. الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن تقریباً نزدیک به ۷ برابر مقاومت کششی پس از حرارت بتن سبک پلاستیک را افزایش داده‌اند.



شکل ۱۲: مقاومت کششی بتن حاوی ۵٪ بنتونیت و ۰/۵٪ الیاف

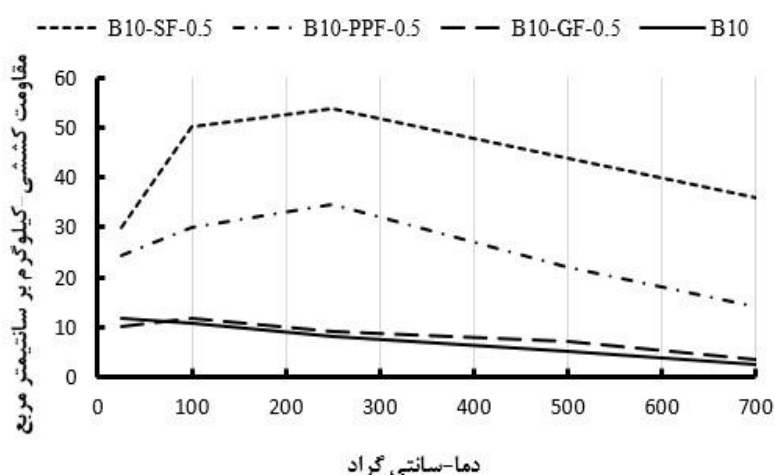
با توجه به شکل (۱۳) که روند تغییرات مقاومت کششی نمونه‌های بتن سبک پلاستیک حاوی ۵٪ بنتونیت و ۱٪ الیاف فولادی، پلی‌پروپیلن و شیشه به ازای دماهای مختلف را نشان می‌دهد، می‌توان بیان کرد که بتن حاوی ۱٪ الیاف فولادی در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد بیشترین مقاومت کششی را داشته است تقریباً ۶ برابر مقاومت بتن فاقد الیاف، همچنین الیاف شیشه در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد تأثیر مثبتی در مقاومت کششی بتن سبک پلاستیک نداشته (تقریباً ۱۰٪ کاهش مقاومت کششی در مقایسه با نمونه فاقد الیاف) اما در دماهای ۱۰۰ تا ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد تقریباً ۱٪ در افزایش مقاومت کششی پس از حرارت بتن سبک پلاستیک تأثیر داشته است و حتی در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد ۵٪ مقاومت کششی بتن را کاهش داده است مطابق شکل با افزایش دما کلیه نمونه‌ها با کاهش مقاومت کششی همراه بوده‌اند اما تغییرات الیاف مختلف متفاوت است به طوری که بتن حاوی الیاف پلی‌پروپیلن در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد در مقایسه با دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد مقاومت کششی حدوداً ۲۰٪ بیشتر داشته اما با افزایش دما مقاومت کششی بتن سبک پلاستیک حاوی ۱٪ الیاف پلی‌پروپیلن نیز کاهش می‌یابد در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد مقاومت کششی بتن فاقد الیاف و حاوی الیاف شیشه تقریباً برابر بوده و بیشترین مقاومت کششی مربوط به بتن سبک حاوی ۱٪ الیاف فولادی می‌باشد که تقریباً ۴۰٪ بیشتر از مقاومت کششی بتن حاوی الیاف پلی‌پروپیلن و ۶ برابر مقاومت بتن فاقد الیاف و حاوی الیاف شیشه است.



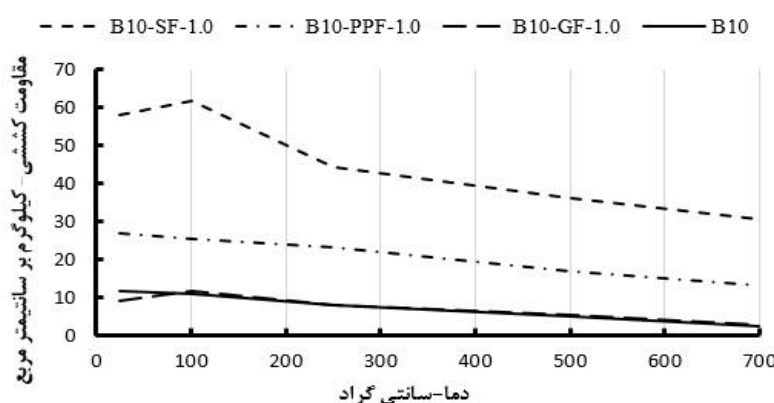
شکل ۱۳: مقاومت کششی بتن حاوی ۵٪ بنتونیت ۱٪ الیاف

بنابراین می توان گفت که رفتار کششی بتن سبک پلاستیک حاوی ۵٪ بنتونیت در دماهای حاوی الیاف با رفتار فشاری آن متفاوت بوده به طوری که در دماهای ۱۰۰ تا ۵۰۰ درجه سانتی گراد بتن حاوی ۱٪ الیاف فولادی مقاومت کششی بیشتری نسبت به بتن حاوی ۵٪ الیاف فولادی داشته اما در دمای ۷۰۰ درجه مقاومت یکسانی دارند در صورتی که این روند برای الیاف شیشه کاملاً متفاوت بوده یعنی در دماهای ۱۰۰ تا ۷۰۰ درجه بتن حاوی ۵٪ الیاف شیشه مقاومت کششی بیشتری در مقایسه با بتن حاوی ۱٪ الیاف شیشه داشته اما بتن حاوی الیاف پلی پروپیلن در دماهای مختلف رفتار متفاوتی دارد در دماهای ۲۵، ۵۰۰ و ۷۰۰ درجه سانتی گراد مقاومت کششی پس از حرارت بتن سبک پلاستیک حاوی ۵٪ الیاف پلی پروپیلن بیشترین مقاومت و در دماهای ۱۰۰ و ۲۵۰ درجه سانتی گراد بتن حاوی ۱٪ الیاف بیشترین مقاومت کششی را داشته است.

در شکل (۱۴) مقاومت کششی پس از حرارت نمونه های بتن سبک پلاستیک (۱۰٪ بنتونیت) حاوی ۵٪ الیاف نشان داده شده است با توجه به نتایج به دست آمده می توان گفت که مقاومت کششی بتن سبک پلاستیک (۱۰٪ بنتونیت) با مقاومت کششی بتن حاوی ۵٪ بنتونیت برابر بوده اما رفتار الیاف در بتن حاوی ۱۰٪ بنتونیت در مقایسه با بتن ۵٪ بنتونیت متفاوت است در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد الیاف فولادی بیشترین تأثیر در افزایش مقاومت کششی بتن داشته به طوری که در مقایسه با بتن فاقد الیاف حدوداً ۳ برابر مقاومت کششی بیشتری داشته و بعد الیاف پلی پروپیلن ۲ و نیم برابر و الیاف شیشه که مقاومت کششی کمتری در مقایسه با بتن فاقد الیاف داشته است با افزایش دمای بتن به ۱۰۰ درجه سانتی گراد مقاومت کششی بتن نیز افزایش یافته و الیاف نیز تأثیر مثبتی در افزایش مقاومت کششی بتن گذاشته به طوری که الیاف فولادی با افزایش ۶۰٪ مقاومت بتن بیشترین افزایش، الیاف پلی پروپیلن و شیشه نیز به ترتیب حدود ۴۰ و ۱۰٪ مقاومت بتن را در مقایسه با بتن سبک در دمای ۲۵ درجه افزایش داده اند اما در مقایسه با بتن فاقد الیاف بتن حاوی الیاف شیشه تقریباً مقاومتی برابر با نمونه شاهد داشته رفتار متفاوت الیاف فولادی و پلی پروپیلن در دمای ۲۵۰ درجه سانتی گراد نمود پیدا کرده به طوری که در مقایسه با مراحل قبل آزمایش، مقاومت کششی پس از حرارت بتن سبک پلاستیک حدود ۵ تا ۱۰٪ برای هر دو نمونه الیاف فولادی و پلی پروپیلن افزایش پیدا کرده است. ولی با افزایش دما تا ۵۰۰ درجه سانتی گراد به دلیل تردتر شدن بتن در مقایسه با دمای ۲۵۰ درجه مقاومت کششی بتن رو به کاهش گذاشته و در همه نمونه ها با درصد های مختلف کاهش یافته به ترتیب برای الیاف های مختلف درصد کاهش به میزان تقریبی ۲۰٪، ۳۰٪ و حدود ۱۰٪ برای الیاف فولادی، پلی پروپیلن و شیشه بوده است. افزایش دمای بتن به ۷۰۰ درجه سانتی گراد موجب ترد و شکننده تر شدن بتن شده و در نتیجه مقاومت کششی بتن در این دما به شدت کاهش می یابد، به طوری که در مقایسه با دمای ۲۵ درجه سانتی گراد به بیش از یک سوم برای بتن فاقد الیاف و بتن حاوی الیاف شیشه رسیده است اما مقاومت کششی پس از حرارت بتن سبک حاوی الیاف فولادی در مقایسه با دمای ۲۵ درجه سانتی گراد حدود ۵ تا ۱۰٪ افزایش پیدا کرده ولی مقاومت بتن حاوی الیاف پلی پروپیلن نیز در دمای ۷۰۰ درجه سانتی گراد در مقایسه با دمای ۲۵ درجه سانتی گراد حدود ۱۵٪ کاهش داشته است.



شکل ۱۴: مقاومت کششی بتن حاوی ۱۰٪ بنتونیت و ۵٪ الیاف



شکل ۱۵: مقاومت کششی بتن حاوی ۱۰٪ بنتونیت و ۱٪ الیاف

در شکل (۱۵) مقاومت کششی پس از حرارت نمونه‌های بتن سبک پلاستیک (۱۰٪ بنتونیت) حاوی ۱٪ الیاف نشان داده شده است با توجه به نتایج آزمایش مقاومت کششی پس از حرارت بتن سبک پلاستیک با افزایش حجم بنتونیت در بتن سبک پلاستیک از ۵ به ۱۰٪ تأثیر چندانی در مقاومت کششی نداشته و تنها ترکیب آن با الیاف فولادی مقاومت کششی پس از حرارت بتن سبک را در مقایسه با بتن حاوی ۵٪ بنتونیت تقریباً کمتر از ۵۰٪ افزایش داده است. دیگر الیاف تأثیر چندانی در مقاومت بتن سبک حاوی ۱۰٪ بنتونیت نداشته و حتی موجب کاهش مقاومت بتن سبک پلاستیک نیز شده‌اند. با به نتایج آزمایش مقاومت کششی پس از حرارت بتن سبک پلاستیک (۱۰٪ بنتونیت) حاوی الیاف می‌توان گفت الیاف فولادی بیشترین تأثیر در افزایش مقاومت کششی بتن سبک داشته به طوری که بتن سبک پلاستیک (۱۰٪ بنتونیت) حاوی ۱٪ الیاف فولادی حدود ۶ برابر مقاومت کششی پس از حرارت بتن فاقد الیاف از خود نشان داده که این عدد برای الیاف پلی‌پروپیلن حدود ۳ برابر و برای الیاف شیشه منفی ۱۰٪ بوده است یعنی بتن حاوی الیاف شیشه مقاومت کششی کمتری در مقایسه با بتن فاقد الیاف داشته این اعداد مربوط به دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد است. با افزایش دمای بتن به ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد مقاومت کششی پس از حرارت بتن سبک فاقد الیاف نزدیک به ۱۰٪ کاهش یافته اما بتن حاوی الیاف فولادی و شیشه نزدیک به ۵٪ افزایش مقاومت در مقایسه با دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد داشته با افزایش تقریباً ۵٪ مقاومت کششی بتن سبک حاوی الیاف شیشه تقریباً مقاومت کششی این نمونه با نمونه بتن فاقد الیاف برابر شده است. اما رفتار الیاف در دمای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد تغییر پیدا کرده به شکلی که بتن حاوی الیاف فولادی، شیشه و بتن فاقد الیاف با کاهش تقریبی ۲۰ و ۳۰٪ به ترتیب برای الیاف شیشه و بتن فاقد الیاف و بتن حاوی الیاف فولادی بوده اما الیاف پلی‌پروپیلن تقریباً مقاومت کششی بتن را ثابت نگاه داشته است افزایش دمای بتن به ۵۰۰ درجه

سانتی گراد موجب ترد شدن بتن و در نتیجه کاهش مقاومت کششی پس از حرارت آن شده که این کاهش مقاومت به ترتیب ۴۰، ۳۵، ۳۰ و ۲۰٪ برای بتن فاقد الیاف، بتن حاوی الیاف شیشه، پلی پروپیلن و فولادی بوده است همان طور که مشاهده می شود می توان گفت تقریباً مقاومت بتن فاقد الیاف و بتن حاوی الیاف شیشه تقریباً برابر بوده و همچنین بتن نسبت به دمای ۲۵ درجه سانتی گراد کاهش ۵٪ در مقاومت کششی خود مشاهده کرده است. در دمای ۷۰۰ درجه سانتی گراد نیز مقاومت کششی پس از حرارت بتن سبک پلاستیک (۱۰٪ بنتونیت) به دلیل ترد و شکننده شدن بتن کاهش یافته به طوری که مقاومت بتن فاقد الیاف و بتن حاوی الیاف شیشه بیش از ۷۰٪ در مقایسه با دمای ۲۵ درجه سانتی گراد کاهش داشته و این عدد برای الیاف فولادی و پلی پروپیلن تقریباً ۵۰٪ بوده است با این حال الیاف فولادی بیشترین تاثیر را در افزایش مقاومت کششی بتن داشته و در مقایسه با بتن فاقد الیاف تقریباً نزدیک به ۱۲ برابر مقاومت کششی بتن افزایش داشته است.

بنابراین می توان گفت که تقریباً رفتار کششی بتن سبک پلاستیک حاوی ۱۰٪ بنتونیت همراه الیاف با رفتار فشاری آن متفاوت بوده به طوری که در دماهای ۲۵ و ۱۰۰ درجه سانتی گراد بتن حاوی ۱٪ الیاف فولادی مقاومت کششی بیشتری نسبت به بتن حاوی ۵٪ الیاف فولادی داشته تقریباً ۲ برابر برای دمای ۲۵ درجه سانتی گراد و ۲۲٪ برای ۱۰۰ درجه سانتی گراد اما در دمای ۲۵۰ تا ۷۰۰ درجه سانتی گراد مقاومت کششی پس از حرارت بتن حاوی ۵٪ الیاف فولادی تقریباً ۱۰ تا ۱۵٪ بیشتر از بتن حاوی ۱٪ الیاف فولادی بوده است در صورتی که این روند برای الیاف شیشه کاملاً متفاوت بوده یعنی در دماهای ۱۰۰ تا ۷۰۰ درجه بتن حاوی ۵٪ الیاف شیشه مقاومت کششی بیشتری در مقایسه با بتن حاوی ۱٪ الیاف شیشه داشته اما بتن حاوی الیاف پلی پروپیلن در دماهای مختلف رفتار متفاوتی دارد در دماهای ۱۰۰ تا ۷۰۰ درجه سانتی گراد مقاومت کششی پس از حرارت بتن سبک پلاستیک حاوی ۵٪ الیاف پلی پروپیلن بیشترین مقاومت (تقریباً ۱۰ تا ۱۵٪ بیشتر) و در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد تقریباً ۱۰٪ بتن حاوی ۱٪ الیاف مقاومت کششی بیشتری داشته است.

۴- رابطه‌ی پیشنهادی جهت تعیین مقاومت فشاری و کششی

با توجه به اینکه مقادیر به دست آمده از این تحقیق از پیوستگی مناسبی برخوردار بوده، با برازش منحنی های درجه اول برای هر نمودار، روابطی جهت تعیین مقاومت فشاری و کششی بتن های حاوی الیاف در جدول (۹) پیشنهاد شده است.

جدول ۹: روابط پیشنهادی جهت پیش‌بینی مقاومت نمونه‌ها

| نوع آزمایش | نام طرح | تابع رگرسیون | ضریب رگرسیون (R^2) |
|--------------|-------------|---------------------------|------------------------|
| مقاومت فشاری | B5 | $F'_c = -0.16 T + 145.23$ | 0.95 |
| | B5-SF-0.5 | $F'_c = -0.12 T + 163.91$ | 0.86 |
| | B5-SF-1.0 | $F'_c = -0.15 T + 131.93$ | 0.59 |
| | B5-PPF-0.5 | $F'_c = -0.09 T + 127.32$ | 0.89 |
| | B5-PPF-1.0 | $F'_c = -0.06 T + 80.22$ | 0.83 |
| | B5-GF-0.5 | $F'_c = -0.09 T + 120.27$ | 0.94 |
| | B5-GF-1.0 | $F'_c = -0.07 T + 91.03$ | 0.93 |
| | B10 | $F'_c = -0.17 T + 139.34$ | 0.94 |
| | B10-SF-0.5 | $F'_c = -0.09 T + 164.52$ | 0.92 |
| | B10-SF-1.0 | $F'_c = -0.14 T + 138.67$ | 0.88 |
| | B10-PPF-0.5 | $F'_c = -0.11 T + 128.87$ | 0.85 |
| | B10-PPF-1.0 | $F'_c = -0.03 T + 66.19$ | 0.22 |
| | B10-GF-0.5 | $F'_c = -0.12 T + 110.3$ | 0.96 |
| | B10-GF-1.0 | $F'_c = -0.09 T + 85.94$ | 0.92 |
| مقاومت کششی | B5 | $F_T = -0.01 T + 12.28$ | 0.99 |
| | B5-SF-0.5 | $F_T = -0.03 T + 44.18$ | 0.54 |
| | B5-SF-1.0 | $F_T = -0.09 T + 76.59$ | 0.95 |
| | B5-PPF-0.5 | $F_T = -0.02 T + 30.69$ | 0.74 |
| | B5-PPF-1.0 | $F_T = -0.03 T + 33.76$ | 0.89 |
| | B5-GF-0.5 | $F_T = -0.01 T + 12.59$ | 0.93 |
| | B5-GF-1.0 | $F_T = -0.01 T + 11.84$ | 0.96 |
| | B10 | $F_T = -0.01 T + 12.01$ | 0.99 |
| | B10-SF-0.5 | $F_T = -0.01 T + 43.83$ | 0.08 |
| | B10-SF-1.0 | $F_T = -0.05 T + 60.51$ | 0.91 |
| | B10-PPF-0.5 | $F_T = -0.02 T + 31.24$ | 0.51 |
| | B10-PPF-1.0 | $F_T = -0.02 T + 27.58$ | 0.99 |
| | B10-GF-0.5 | $F_T = -0.01 T + 11.77$ | 0.91 |
| | B10-GF-1.0 | $F_T = -0.01 T + 10.87$ | 0.87 |

با توجه به نتایج آزمایشات بدست آمده، می‌توان با برازش منحنی‌های درجه ۲، به پیش‌بینی مقاومت فشاری و کششی نمونه‌ها با توجه به نوع نمونه و دمای مربوطه پرداخت. جدول (۹)، معادلات پیشنهادی و ضریب رگرسیون معادالت را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ضریب رگرسیون اکثر روابط نزدیک به ۱ بوده است، لذا روابط پیشنهادی از دقت مناسبی برخوردارند. در این روابط F'_c و F_T مقاومت فشاری و کششی نمونه‌ها و T پارامتر مربوط به درصد اسیدی بودن محیط می‌باشد. روابط فوق برای طرح اختلاط موجود در این مقاله بوده، لذا جهت ارائه روابط بیشتر در آینده قابل‌ارائه است. برای مقاومت فشاری و کششی به ترتیب روابط (۲) و (۳) پیشنهاد شده است.

$$F'_c = -0.12 T + 110.3 \quad (۲)$$

$$F_T = -0.02 T + 27.58 \quad (۳)$$

۵- بررسی و تفسیر نتایج آزمایش‌ها

نتایج کلی حاصل از انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری و کششی بر روی نمونه‌ها، در ادامه ارائه شده است. با توجه به نتایج، می‌توان دریافت که در بتن‌های حاوی الیاف فولادی، پلی‌پروپیلن و شیشه‌ای تا دمای ۲۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد، به مقاومت بتن افزوده و از این‌دما به بعد از مقاومت بتن کاسته می‌شود.

در این مطالعه، در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد (دمای محیط) بتن حاوی ۵٪ بنتونیت و ۱٪ الیاف فولادی بیشترین مقاومت کششی را در مقایسه با دیگر الیاف از خود نشان داده است حدود ۷ برابر مقاومت کششی بتن حاوی ۱۰٪ بنتونیت و فاقد الیاف و حدود ۶ برابر بتن حاوی ۵٪ بنتونیت. همچنین بتن حاوی ۵٪ بنتونیت و ۰/۵٪ الیاف پلی‌پروپیلن نیز در مقایسه با دیگر نمونه‌های بتن حاوی الیاف

پلی پروپیلن با شرایط یکسان بیشترین مقاومت کششی (۳ برابر در مقایسه با بتن حاوی ۵٪ بنتونیت و کمتر از ۳ برابر برای بتن حاوی ۱۰٪ بنتونیت فاقد الیاف) از خود نشان داده و الیاف شیشه تأثیر مثبتی در افزایش مقاومت کششی بتن سبک پلاستیک نداشته است. در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد بتن حاوی ۵٪ بنتونیت و ۱٪ الیاف فولادی بیش از ۵/۵ و ۵ برابر مقاومت کششی در مقایسه با نمونه‌های شاهد حاوی ۵ و ۱۰٪ بنتونیت داشته که بیشترین افزایش مقاومت کششی در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد نیز بوده است و اما بتن حاوی الیاف پلی پروپیلن حاوی ۵٪ بنتونیت و ۱٪ الیاف پلی پروپیلن که ۳ برابر بتن فاقد الیاف و حاوی ۵ و ۱۰٪ بنتونیت بیشترین مقاومت کششی پس از حرارت در بین بتن حاوی الیاف پلی پروپیلن را داشته است. الیاف شیشه در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد در دو نمونه بتن حاوی ۵ و ۱۰٪ بنتونیت تقریباً مقاومت کششی یکسانی داشته و حدود ۱۵٪ مقاومت کششی بیشتری در مقایسه با بتن فاقد الیاف داشته‌اند.

در دمای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد بتن حاوی ۱۰٪ بنتونیت و ۰/۵٪ الیاف فولادی در مقایسه با بتن فاقد الیاف حاوی ۵ و ۱۰٪ بنتونیت بیش از ۶/۵ برابر مقاومت کششی بیشتری داشته که در مقایسه با دیگر نمونه‌ها در این دما بیشترین افزایش مقاومت کششی را دارا بوده است و همچنین مقاومت کششی بتن حاوی ۱۰٪ بنتونیت و ۰/۵٪ الیاف پلی پروپیلن بیش از ۴ برابر بتن‌های فاقد الیاف حاوی ۵ و ۱۰٪ بنتونیت بوده‌اند که در مقایسه با دیگر نمونه‌های حاوی الیاف پلی پروپیلن بیشترین مقاومت کششی را داشته‌اند. اما در مورد الیاف شیشه می‌توان گفت که بتن حاوی ۵٪ بنتونیت و ۰/۵٪ الیاف شیشه که ۱۰ و ۲۰٪ مقاومت کششی بیشتری در مقایسه با بتن فاقد الیاف و حاوی ۵ و ۱۰٪ بنتونیت داشته بیشترین مقاومت کششی در بین نمونه‌های حاوی الیاف شیشه را داشته است. در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد بتن حاوی ۵٪ بنتونیت و ۰/۵٪ الیاف فولادی در مقایسه با نمونه‌های فاقد الیاف و حاوی ۵ و ۱۰٪ بنتونیت به ترتیب ۲ و ۲/۵ برابر مقاومت کششی بیشتری داشته که بیشترین افزایش مقاومت کششی در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد بوده است. بتن حاوی ۵٪ بنتونیت و ۰/۵٪ الیاف پلی پروپیلن در مقایسه با نمونه‌های شاهد فاقد الیاف بیش از ۴۰ و ۸۰٪ به ترتیب برای بتن حاوی ۵ و ۱۰٪ بنتونیت مقاومت کششی پس از حرارت بیشتری داشته است که در مقایسه با دیگر نمونه‌های حاوی الیاف پلی پروپیلن و بیشترین مقاومت کششی را داشته است. و در مورد الیاف شیشه بتن حاوی ۵٪ بنتونیت و حاوی ۰/۵٪ الیاف شیشه در مقایسه با بتن فاقد الیاف و حاوی ۵ و ۱۰٪ بنتونیت به ترتیب ۳۰ و ۴۰٪ مقاومت کششی پس از حرارت بیشتری داشته است. در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد بتن حاوی ۱۰٪ بنتونیت و ۰/۵٪ الیاف فولادی در مقایسه با بتن حاوی ۵ و ۱۰٪ بنتونیت و فاقد الیاف بیش از ۱۲ و ۱۴ برابر مقاومت کششی بیشتری داشته است که در مقایسه با دیگر نمونه‌ها بیشترین مقاومت کششی در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد بوده است. همچنین بتن حاوی ۵٪ بنتونیت و ۰/۵٪ الیاف پلی پروپیلن در مقایسه با دیگر نمونه‌های حاوی الیاف پلی پروپیلن و همچنین بتن فاقد الیاف بیشترین مقاومت کششی را داشته است که حدوداً بیش از ۶/۵ و ۷/۵ برابر بوده است و اما بتن حاوی الیاف شیشه که بتن حاوی ۰/۵٪ الیاف شیشه و ۵٪ بنتونیت در مقایسه با بتن فاقد الیاف و حاوی ۵ و ۱۰٪ بنتونیت به ترتیب تقریباً ۳۵ و ۶۰٪ مقاومت کششی پس از حرارت بیشتری داشته است که بیشترین افزایش مقاومت کششی در بین نمونه‌های حاوی الیاف شیشه بوده است.

۶- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، تأثیر الیاف فولادی، پلی پروپیلن و شیشه بر مقاومت کششی و فشاری پس از حرارت بتن سبک پلاستیک مورد بررسی قرار گرفته است. پس از انتخاب طرح شاهد و انجام عملیات حرارتی بر روی نمونه‌ها در دماهای ۲۵-۱۰۰-۲۵۰-۵۰۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد، آزمایش‌های مقاومت فشاری و کششی بر روی نمونه‌ها انجام گرفت که نتایج ذیل حاصل شد:

* در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد (دمای محیط) بتن حاوی ۱۰٪ بنتونیت و ۰/۵٪ الیاف فولادی بیشترین مقاومت فشاری را در مقایسه با دیگر الیاف از خود نشان داده است به طوری که حدود ۴۰٪ بیشتر از مقاومت فشاری بتن حاوی ۱۰٪ بنتونیت و فاقد الیاف و حدود ۳۰٪ بیشتر از بتن حاوی ۵٪ بنتونیت است. همچنین بتن حاوی ۰/۵٪ الیاف پلی پروپیلن نیز در مقایسه با دیگر نمونه‌های بتن حاوی الیاف پلی پروپیلن با شرایط یکسان بیشترین مقاومت فشاری (۵٪) در مقایسه با بتن حاوی ۵٪ بنتونیت و کمتر از ۵٪ برای بتن حاوی ۱۰٪ بنتونیت فاقد الیاف) از خود نشان داده و الیاف شیشه تأثیر مثبتی در افزایش مقاومت فشاری بتن سبک پلاستیک نداشته است.

* در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد بتن حاوی ۵٪ بنتونیت و ۰/۵٪ الیاف فولادی بیش از ۱۰ و ۲۰٪ مقاومت فشاری بیشتری در مقایسه با نمونه‌های شاهد حاوی ۵ و ۱۰٪ بنتونیت داشته که بیشترین افزایش مقاومت فشاری در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد نیز بوده است اما بتن حاوی الیاف پلی‌پروپیلن و شیشه در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد تأثیر مثبتی در افزایش مقاومت فشاری بتن سبک پلاستیک نداشته‌اند.

* در دمای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد بتن حاوی ۱۰٪ بنتونیت و ۰/۵٪ الیاف فولادی در مقایسه با بتن فاقد الیاف حاوی ۵ و ۱۰٪ بنتونیت حدود ۳۸ و ۴۲٪ مقاومت فشاری بیشتری داشته که در مقایسه با دیگر نمونه‌ها در این دما بیشترین افزایش مقاومت فشاری را داشته است و همچنین بتن حاوی ۱۰٪ بنتونیت و ۰/۵٪ الیاف پلی‌پروپیلن تنها نمونه حاوی الیاف پلی‌پروپیلن می‌باشد که در دمای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد موجب افزایش ۱۰٪ مقاومت فشاری بتن سبک پلاستیک گردیده است و در مورد الیاف شیشه نیز می‌توان گفت که الیاف شیشه تأثیر مثبتی در افزایش مقاومت فشاری بتن سبک پلاستیک نداشته است.

* در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد بتن حاوی ۵٪ بنتونیت و ۰/۵٪ الیاف فولادی در مقایسه با نمونه‌های فاقد الیاف و حاوی ۵ و ۱۰٪ بنتونیت به ترتیب ۲ و ۲/۵ برابر مقاومت فشاری بیشتری داشته که بیشترین افزایش مقاومت فشاری در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد بوده است. بتن حاوی ۵٪ بنتونیت و ۰/۵٪ الیاف پلی‌پروپیلن در مقایسه با نمونه‌های فاقد الیاف بیش از ۴۰ و ۸۰٪ به ترتیب برای بتن حاوی ۵ و ۱۰٪ بنتونیت مقاومت فشاری پس از حرارت بیشتری داشته است که در مقایسه با دیگر نمونه‌های حاوی الیاف پلی‌پروپیلن و بیشترین مقاومت فشاری را داشته است. و در مورد الیاف شیشه بتن حاوی ۵٪ بنتونیت و حاوی ۰/۵٪ الیاف شیشه در مقایسه با بتن فاقد الیاف و حاوی ۵ و ۱۰٪ بنتونیت به ترتیب ۳۰ و ۴۰٪ مقاومت فشاری پس از حرارت بیشتری داشته است.

* در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد بتن حاوی ۱۰٪ بنتونیت و ۰/۵٪ الیاف فولادی در مقایسه با بتن حاوی ۵ و ۱۰٪ بنتونیت و فاقد الیاف بیش از ۲/۵ و ۳ برابر مقاومت فشاری بیشتری داشته است که در مقایسه با دیگر نمونه‌ها بیشترین مقاومت فشاری در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد بوده است. همچنین بتن حاوی ۵٪ بنتونیت و ۰/۵٪ الیاف پلی‌پروپیلن در مقایسه با دیگر نمونه‌های حاوی الیاف پلی‌پروپیلن و همچنین بتن فاقد الیاف بیشترین مقاومت فشاری را داشته است که حدوداً بیش از ۱/۵ و ۲ برابر بوده است و اما بتن حاوی الیاف شیشه که بتن حاوی ۰/۵٪ الیاف شیشه و ۵٪ بنتونیت در مقایسه با بتن فاقد الیاف و حاوی ۵ و ۱۰٪ بنتونیت به ترتیب تقریباً ۵۰ و ۳۲٪ مقاومت فشاری پس از حرارت بیشتری داشته است که بیشترین افزایش مقاومت فشاری در بین نمونه‌های حاوی الیاف شیشه می‌باشد.

مراجع

- [1] Wang, Q, Sun, W, and Xiong, H. 4e Plastic Concrete Cut-Off Wall, *China Water Power Press*, Beijing, China, (2008).
- [2] Gholhaki, M, Pachideh, G, Rezayfar, O. 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, (2017), pp. 167-179.
- [3] Mahboubi, A, and Ajorloo, A. Experimental study of the mechanical behavior of plastic concrete in triaxial compression, *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, No. 2, (2005), pp. 412-419.
- [4] Zhang, C, Chen, Y, and Guo, Y. Clay concrete for cutoff wall in earth dam, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 36, No. 12, (2005), pp. 1464-1469.
- [5] Hinchberger, S, Weck, J, and Newson, T. Mechanical and hydraulic characterization of plastic concrete for seepage cutoff walls, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 47, No. 4, (2010), pp. 461-471.
- [6] Sha A. M, and Wang, Z. J. Microstructure of mastic aggregate interface in cement emulsified asphalt concrete, *Journal of Changan University*, Vol. 4, No. 28, (2008).
- [7] Kazemian, S, Ghareh, S, and Torkanloo, L. Investigation of plastic concrete bentonite changes on its physical properties. *Procedia Eng.* Vol. 145, (2016), pp. 1080-1087.
- [8] Soroush, A, and Soroush, M. Parameters affecting the thickness of bentonite cake in cutoff wall construction: Case study and physical modeling. *Can. Geotech. J.* Vol. 42 No. 2, (2005), pp. 646-654.
- [9] Hajjighasemi, A. A. Investigation of allowable hydraulic gradient in plastic concrete. *M.Sc. thesis*, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Tehran, (1998).

- [10] Kahl, T. W, Kauschinger, J. L, and Perry, E. B. Plastic concrete cutoff walls for earth dams. *Technical Rep. No. REMR-GT-15*. Washington, DC: USACE, (1991).
- [11] Hutchinson, M. T, Daw, G. P, Shotton, P. G, and James, A. N. The properties of bentonite slurries used in diaphragm walls and their control. In Proc., Diaphragm Walls and Anchorages: *Conf. on Institution of Civil Engineering*, 33–39. London: ICE Publishing, (1975).
- [12] PashangPisheh, Y, and Mir Mohammad Hosseini, S. M. Stress-strain behavior of plastic concrete using monotonic triaxial compression tests. *J. Central South Univ. Tech.* Vol. 19, No. 4, (2012), pp. 1125–1131.
- [13] Hinchberger, S, Weck, J, and Newson, T. Mechanical and hydraulic characterization of plastic concrete for seepage cut-off walls. *Can. Geotech. J.* Vol. 47 No. 4, (2010), pp. 461–471.
- [14] Mahboubi, A, and Ajorloo A. Experimental study of the mechanical behavior of plastic concrete in triaxial compression. *J. Cem. Concr. Res.* Vol. 35, No. 2, (2005), pp. 412–419.
- [15] Naderi, M. Effects of different constituent materials on the properties of plastic concrete. *Int. J. Civ. Eng.* Vol. 3, No. 1, (2005), pp. 10–19.
- [16] Ra'fat Pour, A. Comparison of plastic concrete behavior under uniaxial and triaxial tests for slumps of 150 and 175 mm. *M.Sc. thesis*, Dept. of Civil Engineering, Isfahan Univ. of Technology, (2005).
- [17] Spandar, K. Experimental investigation of plastic concrete behavior under confining pressures. *M.Sc. thesis*, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Amirkabir Univ. of Technology (Tehran Polytechnic), (2001).
- [18] Yu, Y, Pu, J, and Ugai, K. Study of mechanical properties of soil cement mixture for a cutoff wall. *Soils Found.* Vol. 37, No. 4, (1997), pp. 93–103.
- [19] Mardan, F, Soltani, F, Bagheri, B. Comparison of the effect of bentonite, celonite and silica on compressive strength and permeability of plastic concrete, *First National Conference on Concrete Industry*, Kerman, International Center for Advanced Science and Technology and Environmental Sciences, (2012).
- [20] Joshi, K, Kechavarzi, C, Sutherland, K, Soga, K. Laboratory and In Situ Tests for Long-term Hydraulic Conductivity of a Cement-Bentonite Cut-off Wall. *J. Geotech Geoenviron Eng.* Vol. 133, (2012), pp. 632 -672.
- [21] Ruffing, D.G, Evans, J.C. Construction and In-Situ Hydraulic Conductivity Evaluation of a Deep Soil-Cement-Bentonite Cut-off Wall. *Geo-Congress*, Vol. 232, (2012), pp. 1333 -1323.
- [22] Esmaili, M, Noori Gheydari, M. H, Abbasi, P. Determination and prediction of the behavior of plastic concrete in soil dams using three-axis test, International Conference on Civil Engineering, Tehran, *Permanent Secretariat of the Conference*, (2015).
- [23] Bolori Bazzaz, J, Edalati, A. Mechanical behavior of plastic concrete under the three-axis and single axial conditions, *Seventh National Civil Engineering Congress*, Zahedan, University of Sistan and Baluchestan, (2013).
- [24] Abbaslou, H, Ghanizadeh, A.R, Tavana Amlashi, A. The Compatibility of Bentonite/Sepiolite Plastic Concrete Cut-Off Wall Material. *Construction and Building Materials.* Vol. 122, (2013), pp. 1136 -1173.
- [25] Reddy, G, Rao, R, Reddy, K. Experimental Investigation of Strength Parameters of Cement and Concrete by Partial Replacement of Cement with Indian Calcium Bentonite. *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)*. Vol. 3, No. 2, (2017).
- [26] Kumar, B.P, Ranga Rao, V, Reddy, K. Effect on Strength Properties of Concrete by Partial Replacement of Cement with Calcium Bentonite and Fly Ash. *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)*. Vol. 3, No. 2, (2017), pp. 262 -266.
- [27] Zhang, P, Guan, Q, Li, Q. Mechanical Properties of Plastic Concrete Containing Bentonite. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology.* Vol. 6, No. 2, (2013), pp. 1317 -1322.
- [28] PashangPisheh, Y, Majdedin S.M, Hosseini, M.M. Experimental Investigation of Mechanical Behavior of Plastic Concrete in Cutoff Walls, *J. Mater. Civ. Eng.*, Vol. 31, No. 1, (2019).
- [29] Mansouri, V, saberi, H, pachideh, G, khalily, M. Experimental Investigation into Effect of Type of Fibers on Durability and Mechanical Properties of Plastic lightweight concrete. *Journal of Concrete Structures and Materials.* (2020).
- [30] Bagheri, A.R, Alibabaie, M, Babaie, M. Reduction in the permeability of plastic concrete for cut-off walls through utilization of silica fume, *Construction and Building Materials*, Vol. 22, (2008), pp.1247–1252,
- [31] Danying Gao, Shuaiqi Song and Liangming Hu, Relationships of Strengths and Dimensional effect of Plastic Concrete, *Advanced Materials Research.* (2011), pp. 1029-1037.
- [32] Yermak, N, Pliya, P, Beaucour, A-L. Simon, A, Noumowe, A. Influence of steel and/or polypropylene fibres on the behaviour of concrete at high temperature: Spalling, transfer and mechanical properties, *Construction and Building Materials*, Vol. 132, (2017), pp. 240-250.
- [33] Saeidijam, S, Azimi, A. Assessing of Strength Parameters and Permeability of Polypropylene Fiber Reinforced Plastic Concrete, *concrete research*, Vol.10, No. 1, (2018), pp. 131-144.
- [34] *NF EN 12390-13 AFNOR*, Testing hardened concrete, in: Determination of Secant Modulus of Elasticity in Compression, pages 18–455. (2013).

[35] Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens, *ASTM C469/C496. M*, (2011).