رویکردهای نوین در مهندسی عمران، دوره هفتم، شماره چهارم ۱۴۰۲، صفحه: ۵۳-۶۸

تعیین مشخصات مکانیکی انواع بتن الیافی در دماهای بالا

مصطفی خیابانی [*۱]، محمدرضا جواهری تفتی [۲]

*[*۱] دانشجوی دکتری مهندسی عمران- سازه، گروه مهندسی عمران، واحد تفت، دانشگاه آزاد اسلامی، تفت، ایران*

[۲] استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد تفت، دانشگاه آزاد اسلامی، تفت، ایران

(khmostfa64@gmail.com)

(تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۹/۰۱، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۱۱/۲۴)

چکیده

بتن پر مصرف‌ترین مصالح ساختمانی در جهان است. امروزه بتن های مختلفی با کاربردهای مختلف در صنعت وجود دارد. یکی از انواع بتن ها، بتن الیافی است.در این مطالعه چندین نمونه بتنی با الیاف فولادی، شیشه ای و پلی پروپیلن ساخته‌شده و تأثیر درصدهای حجمی و وزنی هر یک از الیاف-ها در بهبود مقاومت فشاری نمونه ها در دماهای مختلف بررسی شده است. به منظور بررسی نتایج و امکان مقایسه آن با رفتار بتن‌های معمولی، یک نوع بتن بدون الیاف با استفاده از مصالح رایج نیز ساخته شد و آزمایش‌های مشابه بر روی آن انجام گردید. بر اساس بررسی های انجام شده نتایج نشان داد که نمونه های بتنی با الیاف فولادی در مقایسه با سایر نمونه ها سطوح دمایی بالاتری را تحمل نمود و مقاومت بالاتری داشت. در نمونه ها به ترتیب با افزودن ۰/۲۵٪ و ۰/۵٪ حجمی الیاف فولادی به بتن، مقاومت فشاری نمونه در دماهای بالا بهبود یافت. نمونه های بتنی با عیار 3400Kg/m با افزایش درصد الیاف از ۰/۵٪ به ۰/۷۵٪ مقاومت کمی کاهش یافت. مقاومت فشاری بتن های حاوی الیاف فولادی ۲۰٪ بیشتر از بتن¬های حاوی الیاف پروپیلن است.

کلمات کلیدی

بتن الیافی، الیاف شیشه‌ای، الیاف پروپیلن، الیاف فولادی، مقاومت فشاری.

Determination of Mechanical Characteristics of Types of Fiber concrete at High Temperatures

Mostafa Khiyabani [1*]***, Mohammad Reza Javaheri Tafti*** [2]

[*1] *Ph.D. Can., Department of Civil Engineering, Taft Branch, Islamic Azad University, Taft, Iran*

[2] *Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Taft Branch, Islamic Azad University, Taft, Iran*

(khmostfa64@gmail.com)

(Date of received: 22/11/2023, Date of accepted: 13/02/2024)

ABSTRACT

Concrete is the most used construction material in the world. Today, there are various concretes with different applications in the industry. One of the types of concrete is fiber concrete. In this study, several concrete samples were made with steel, glass and polypropylene fibers and the effect of the volume and weight percentages of each of the fibers in improving the compressive strength of the samples at temperatures Different has been checked. In order to check the results and the possibility of comparing it with the behavior of normal concrete, a type of concrete without fibers was also made using common materials and similar tests were performed on it. Based on the investigations, the results showed that the concrete samples with steel fibers tolerated higher temperature levels and had higher resistance compared to other samples. In the samples, by adding 0.25% and 0.5% by volume of steel fibers to concrete, respectively, the compressive strength of the sample at high temperatures was improved. The strength of concrete samples with 3400 Kg/m was slightly decreased by increasing the percentage of fibers from 0.5% to 0.75%. The compressive strength of concrete containing steel fibers is 20% higher than that of concrete containing propylene fibers.

Keywords:

Fiber concrete, Glass fibers, Propylene fibers, Steel fibers, Compressive strength.

۱- مقدمه

بتن پرمصرف‌ترین مصالح ساختمانی در جهان است. میزان مصرف امروزه بتن در جهان بیش از شش میلیارد تن در سال است. دلایل متعددی را برای این موضوع می‌توان ذکر نمود. مقاومت بالای بتن در مقابل آب، برخلاف بسیاری از مصالح دیگر، از آن مصالحی مناسب برای کنترل و ذخیره کردن، حمل و انتقال آب ساخته است. از دلایل مهم دیگر کاربرد گسترده بتن، شکل‌پذیری عالی آن است، بنابراین می‌تواند با استفاده از قالب مناسب، به شکل موردنظر درآمده، برای ساخت اجزای مختلف سازه به کار رود. علت این امر خاصیت شکل‌پذیری بتن تازه است که به‌راحتی به درون قالب‌ها با شکل‌های مختلف ریخته می‌شود. پس از چند ساعت قالب بازشده و درجایی دیگر مصرف می‌شود و بتن به شکل موردنظر، و به‌صورت جسم سخت شده و مقاوم درمی‌آید[۱]. از دلایل دیگر کاربرد وسیع بتن در ساختمان و سازه‌های مختلف، سهولت دسترسی و ارزانی نسبی این مصالح است. مصالح اصلی تشکیل‌دهنده بتن، یعنی سیمان پرتلند و سنگدانه، امروزه تقریباً در همه‌جا در دسترس بوده و جزو مصالح نسبتاً ارزان محسوب می‌شود. به‌علاوه مقادیر زیادی از مواد زائد و ضایعات صنعتی می‌توانند مجدداً به‌عنوان مواد سیمانی یا سنگدانه در ساخت بتن مصرف شوند که به کاهش مصرف انرژی و حفظ محیط‌زیست کمک می‌کند. بتن می‌تواند برای تحمل بارها، شکل دادن فضاها، پوشش سطوح و پر کردن حجم‌ها در عموم سازه‌ها به کار رود. به نظر می‌آید کاربرد بتن به‌عنوان یک مصالح ساختمانی در آینده گسترش بیشتری نیز یابد[۲]. در عین حال استفاده مناسب از بتن، مستلزم آگاهی از مشخصات مواد، واکنش‌های بین تشکیل‌دهنده‌ها، رعایت نکات فنی مختلف در طرح اختلاط مواد و اجرا است، تا ماده‌ای با مشخصات فنی موردنظر، با مقاومت، دوام و عملکرد مناسب به دست آید. به این منظور یکی از مواردی که در سازه‌های بتنی در اغلب اوقات نیاز است، مقاومت کششی در اعضای بتنی است، تا با افزایش ظرفیت اعضا، مقاومت لازم به دست آید و از شکست ترد بتن جلوگیری شود. مسلح کردن بتن یکی از روش‌های اساسی در این صنعت به شمار می‌رود. با توسعه روزافزون مصرف بتن در انواع ساختمان‌ها و کمبود نسبی کارگران ماهر و یا سهل‌انگاری‌های آنان در کارگاه‌ها و یا به دلیل مزاحمت‌های جسمی و روحی و یا هزینه آرماتوربندی، به‌ویژه در مواضعی که تراکم میلگرد وجود دارد، درنهایت مشخصات مکانیکی مطلوب بتن حاصل نمی‌شود. بنابراین ساخت بتن بدون نیاز به آرماتوربندی، همواره راه‌حلی برای این معضل به نظر می‌رسید و ساختن چنین بتنی، هدف مهمی برای فناوران بتن بوده است که بتوانند با استفاده از مواد افزودنی شیمیایی مختلف و تغییر در مقادیر مصالح طرح اختلاط، به این مهم دست یابند و بتن را از نقص‌های اجرایی رها سازند. یکی از راه‌حل‌های اخیر صنعت، استفاده از بتن الیافی است[۹]. مقاومت‌های مکانیکی پسماند در دماهای مختلف و خطر ترکیدن بتن در آتش‌سوزی، برحسب الیاف استفاده‌شده می‌تواند بسیار متفاوت باشد. چند نوع الیاف از الیاف رایج برای این منظور هستند که می‌توانند اثرهای متفاوتی بر روی رفتار بتن در برابر آتش داشته باشند. به‌علاوه شرایط عمل‌آوری می‌تواند اثر قابل‌توجهی بر روی مقاومت بتن در برابر آتش بگذارد. بخصوص اگر شرایط عمل‌آوری باعث حفظ درصد بالای رطوبت در بتن شود، ممکن است خطر ترکیدن بتن در آتش‌سوزی به‌شدت افزایش یابد. موضوع مهم دیگر، بررسی امکان بهبود مقاومت بتن در برابر آتش است، تا بتوان ضمن حفظ خواص مفید آن، ضعف‌های موجود در زمینه‌ی مقاومت در برابر آتش (خصوصاً ترکیدن در دمای بالا) را رفع نمود. این‌ها سؤالاتی هستند که تحقیق بر روی آن‌ها نیاز است[۳]. بتن الیافی، در دنیا به‌شدت در حال گسترش است و حتی از آن به‌عنوان آینده بتن یاد می‌شود. بنابراین دستیابی به دانش فنی آن، از ابعاد مختلف، در کشور ضروری است. از طرف دیگر دانش فنی موجود در دنیا در خصوص رفتار بتن‌های الیافی در برابر آتش بسیار اندک است و پژوهش‌ها در این زمینه به‌تازگی در حال تعریف و توسعه است. بتن در سازه‌های مختلف، اعم از کاربری‌های معمولی مانند مسکونی، اداری، کاربری‌های صنعتی و ساختمان‌های خاص نظیر سیلوها، نیروگاه‌ها، سازه‌های هسته‌ای و غیره کاربرد عمده‌ای دارد. بسیاری از این ساختمان‌ها در معرض وقایع آتش‌سوزی احتمالی به علت‌هایی نظیر حوادث پیش‌بینی‌نشده، وقوع حوادث در فرایند تولید و غیره می‌باشند[۱۷]. مقاومت بتن در برابر آتش باید به‌گونه‌ای باشد که مقاومت مکانیکی خود در برابر دمای بالا را تا زمانی معقول (که بر اساس مقررات یا برحسب نیاز طرح تعیین می‌شود) حفظ کند. این در حالی است که برخلاف تصور عمومی، بتن همیشه هم مقاومت بالایی در برابر آتش ندارد و بخصوص به‌عنوان یک جمله کلی می‌توان گفت که هر چه تراکم و مقاومت مکانیکی بتن بالاتر باشد، درجه مقاومت آن در برابر آتش کمتر می‌شود. بنابراین با توجه به زمینه مساعد برای توسعه قابل‌توجه این نوع بتن در ساخت‌وساز، لازم است تا خواص مختلف آن به‌دقت بررسی و شناسایی‌شده و روش‌های بهبود آن توسعه یابد[۱۲].

طرح های مقاومت بتن الیافی در برابر آتش، کلاً در دنیا جدید بوده و پژوهش‌های اندکی بر روی آن صورت گرفته است. این پروژه برای اولین بار در ایران انجام می‌شود و تاکنون پژوهش بر روی مقاومت بتن الیافی در برابر آتش به این شکل گسترده در ایران صورت نگرفته است. کار جدید این پژوهش کاربرد انواع الیاف و درصدهای حجمی مختلف الیاف در بتن است. نوآوری اصلی پژوهش حاضر، استفاده از الیاف جدیدی است که در صنعت با تکنولوژی جدید تولید می‌شود. در نهایت باید به این نکته اشاره کرد که این حجم از کارهای آزمایشگاهی تا به حال در یک زمان انجام نشده است چرا که انواع مختلف الیاف موجود در بازار در این پژوهش مورد بررسی قرارگرفته است[۵].

۱-۱- روش‌های ارزیابی رفتار مواد و مصالح در برابر آتش

یکی از نیازهای مهم در طرح و اجرای ساختمان‌ها، تأمین ایمنی در برابر آتش‌سوزی است. برای این منظور لازم است تا ساختمان به نحوی طراحی و اجرا شود که در صورت وقوع حریق، ایمنی جانی و مالی ساکنین به نحو منطقی و متناسب با کاربری ساختمان تأمین شود. ازجمله لازم است تا مصالح، مبلمان و تزئینات ساختمان‌ها به نحوی انتخاب شوند که از گسترش آسان و سریع آتش‌سوزی جلوگیری شود. محدودیت‌های مربوط به این قسمت نیز به نوع تصرف ساختمان بستگی دارد. به‌عنوان مثال در خصوص مبلمان و تزئینات داخلی، اگرچه در ساختمان‌های مسکونی شخصی نمی‌توان محدودیت زیادی ایجاد یا کنترل نمود، اما کنترل این موضوع در ساختمان‌های عمومی و خصوصاً تجمعی ضرورت دارد. همچنین باید اجزای ساختمان به‌طور متناسب با تصرف و ابعاد ساختمان، از مقاومت کافی در برابر آتش برخوردار باشند تا از ریزش ساختمان یا اجزای آن براثر حریق و یا گسترش ساده حریق به واحدها و ساختمان‌های مجاور جلوگیری شود. در این قسمت به‌طور خلاصه روش‌های آزمایش و طبقه‌بندی مصالح و اجزای ساختمانی ازنظر خطر آتش‌سوزی بحث می‌شود[۱۳].

۱-۲- آزمایش های آتش برای مواد، مصالح و اجزای ساختمان

در کل ارزیابی عملکرد محصولات ساختمانی در برابر حریق در دو حوزه اصلی زیر صورت می‌گیرد[۴].

الف - واکنش مواد در برابر آتش: به‌وسیله این آزمایش‌ها میزان مشارکت یک فراورده در گسترش حریق ارزیابی می‌شود.

ب - مقاومت در برابر آتش: توانایی یک فراورده یا عنصر ساختمانی برای ادامه عملکرد خود و جلوگیری از گسترش حریق از فضای محل وقوع به فضاهای مجاور، با آزمایش‌های مقاومت در برابر آتش ارزیابی می‌شود. آزمایش مقاومت در برابر آتش به مرحله گسترش‌یافته حریق مربوط است و در آن توانایی اجزای ساختمانی برای ادامه عملکرد خود و جلوگیری از گسترش حریق به فضاهای مجاور ارزیابی می‌شود.

واژه مقاومت در برابر آتش لزوم ارتباطی باقابلیت اشتعال مواد ندارد، کما اینکه مقاومت یک سازه چوبی می‌تواند بیشتر از مقاومت سازه فولادی باشد. برای انجام آزمایش مقاومت در برابر آتش اصولاً از سه نوع کوره افقی با دهانه حدود ۳×۴m، کوره عمودی با ابعاد تقریباً ۳×۳m و کوره ستونی به ارتفاع تقریباً ۳m استفاده می‌شود. برای مطالعات مقاومت در برابر آتش، باید عنصر ساختمانی موردنظر طبق یک رژیم استاندارد دما - زمان، در کوره مناسب مورد آزمایش قرار گیرد. در استاندارد بین‌المللی ISO 834 رژیم افزایش دما به شکل زیر تعریف شده است:

$$T = 345\log(8t + 1) + T_0 \qquad (۲)$$

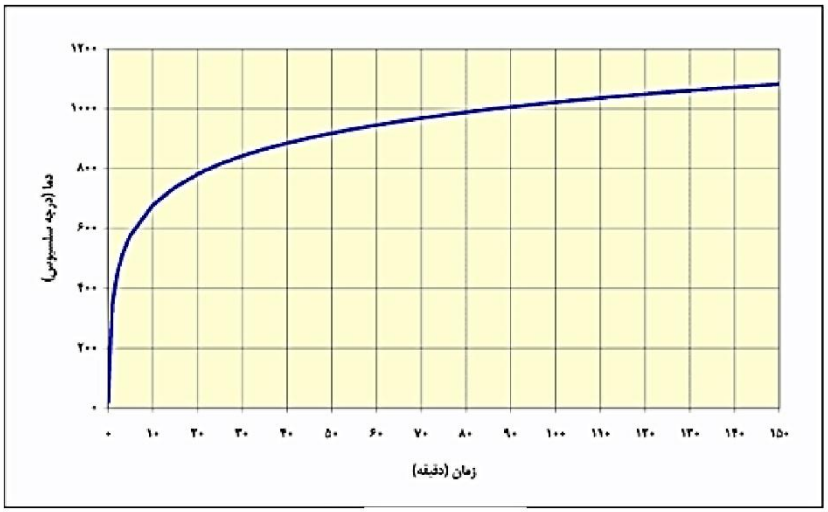
که در آن :

t = زمان آزمایش برحسب دقیقه،

T = دمای کوره به درجه سلسیوس در زمان t و

T_0 = دمای اولیه کوره برحسب درجه سلسیوس است.

منحنی دما- زمان مربوطه در شکل ۱ ارائه شده است. درجه الزامی مقاومت در برابر آتش توسط آیین‌نامه‌ها و مقررات ساختمانی تعیین می‌شود.



شکل۱ : منحنی دما-زمان برای آزمایش مقاومت در برابر آتش طبق ISO 834 [۴].

۱-۳- ارتباط خواص مصالح با رفتار آن‌ها در برابر آتش

مصالح ساختمانی را می‌توان به دو دسته کلی قابل سوختن و غیر قابل سوختن تقسیم کرد. برای بررسی و ارزیابی رفتار مصالح ساختمانی و بخصوص سازه ساختمان در برابر آتش، اطلاعات مربوط به تغییرات خواص حرارتی و مکانیکی این مصالح با دما موردنیاز است. اطلاعات در مورد خواص مصالح ساختمانی در دمای آتش‌سوزی، مثلاً دمای بین ۲۰°C تا ۱۰۰۰°C، که برای طراحی مناسب ایمنی در برابر آتش موردنیاز است، به‌آسانی در دسترس نیست. اغلب مصالح ساختمانی در سراسر این محدوده دمایی پایدار نیستند. آن‌ها طی گرم کردن محتمل تغییرات شیمی فیزیکی یا واکنش‌های شیمیایی می‌شوند، که همراه با تغییرات در ریزساختار و خواص آن‌ها است. خواص بتن در ۵۰۰°C کاملاً متفاوت از خواص آن در دمای اتاق است. به‌طور واضح، اطلاعات کلی قابل‌دسترس روی خواص مصالح ساختمانی در دمای اتاق به‌ندرت در طراحی ایمنی در برابر آتش قابل کاربرد است. بنابراین ضروری است که متصدی ایمنی در برابر آتش بداند که چطور بر پایه ملاحظات، داده‌های کم را که می‌تواند از منابع فنی جمع‌آوری شود، بسط دهد. ارتباط بین خواص مواد (مانند منحنی تنش کرنش، خواص ابعادی، چگالی و هدایت حرارتی) با تغییرات دما توسط هرمتی [۴]، آندربرگ [۵] و اشنایدر [۶] بحث شده است.

۱-۴- مقاومت بتن در برابر آتش

طبق دسته‌بندی ارائه‌شده توسط هرمتی [۴]، بتن یک ماده گروه L/A است. واژه بتن دربرگیرنده طیف وسیعی از مواد مختلف است که به‌وسیله هیدراسیون سیمان پرتلند (به‌عنوان چسباننده) تشکیل می‌شوند. بنابراین خواص بتن در دماهای مختلف به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای به خواص تشکیل‌دهنده‌ها، بخصوص خمیر سیمان و سنگدانه‌ها بستگی دارد. قرارگیری بتن در برابر آتش و بالا رفتن دمای آن باعث می‌شود مقاومت بتن بسته به نوع تشکیل‌دهنده‌ها و ریزساختار بتن کاهش یابد. همچنین تغییرات ساختاری تشکیل‌دهنده‌ها یا تجزیه آن‌ها می‌تواند منجر به تخریب لایه‌های بتن شود. مجموع این رفتارها منجر به کاهش مقاومت و نهایتاً گسیختگی یا شکست بتن در برابر آتش می‌شود. برخی خواص فیزیکی و حرارتی بتن‌های معمولی و سبک طبق آیین‌نامه ۲۰۰۳ IBC [۵] در دمای معمولی در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول۱: برخی خواص فیزیکی و حرارتی بتن‌های معمولی و سبک طبق آیین‌نامه IBC ۲۰۰۳ [۵].

خاصیت	بتن با وزن معمولی	بتن سبک سازه‌ای
چگالی (kg/m^3)	۲۳۲۲/۷	۱۷۶۲
هدایت حرارتی $(W/m.K)$	۱/۶۴	۰/۶۱
گرمای ویژه $(J/kg.K)$	۸۴۰	۸۴۰

۱-۵- خواص بتن الیافی در برابر آتش

تحقیق در مورد تأثیر آتش‌بر بتن و سازه‌های بتنی از حدود سال ۱۹۹۱ آغاز شد[۷]. و اساس این بررسی‌ها درباره ساختمان‌ها پایه‌ریزی شده بود. دامنه این تحقیقات به دو موضوع اصلی محدود می‌شود:

۱- شناخت رفتار پیچیده مصالح در برابر حریق

۲- ایمنی و ضریب اطمینان سازه‌ها در برابر آتش‌سوزی، حین و بعد از حریق [۸].

احداث اولین رآکتور اتمی در انگلستان در دهه ۱۹۶۲ بر اهمیت تحقیقات در زمینه رفتار بتن در دماهای بالا افزود. بخش عمده‌ای از خروجی این پژوهش‌ها در سری همایش‌های دوسالانه SMIRT و مجله پژوهشی مهندسی هسته‌ای و طراحی از سال ۱۹۰۱ منتشرشده است. تا حدود دو دهه گذشته عمده پژوهش‌ها در زمینه تأثیر آتش‌بر بتن، بر حوزه بتن معمولی متمرکزشده بود. از آن زمان، بررسی‌ها به بتن با مقاومت بالا نیز گسترش پیدا کرد [۱۱]. تا پیش از دهه ۱۹۲۰ دانشمندان با انجام آزمایش‌هایی به نتایج عجیبی رسیده بودند، و آن اینکه بتن در زمان تحمل دمای بالاتر از ۲۲۱ درجه سانتی‌گراد همچنان گسیخته نمی‌شود. علت عجیب بودن این نتایج آن بود که تفاوت کرنش سنگدانه‌ها و انبساط خمیر سیمان تحت حرارت آن‌قدر زیاد است که در محدوده کرنش‌های الاستیک قرار نمی‌گیرد. تا آنکه با معرفی پارامتر" کرنش حرارتی" پاسخ این سؤال پیدا شد. کرنش حرارتی در حین نخستین گرمایی (و نه سرما) که تحت بارگذاری به بتن می‌رسد، افزایش می‌یابد [۷]. ازآنجایی‌که دمای بالای ۲۲۱ درجه سانتی‌گراد صرفاً تابعی از دما و (نه زمان) است، مدل‌سازی ریاضی آن برای یک آتش‌سوزی کوتاه‌مدت، کاری آسان است. جهت ساده‌سازی بیشتر، با تحقیقاتی که Gabriel Alexander Khoury در کالج لندن انجام داده است، تا دمای ۲۲۴ درجه سانتی‌گراد، می‌توان صرف‌نظر از نوع سنگدانه‌ها و سیمان‌های پرتلند، از یک نوع مدل‌سازی بهره برد. مطابق تحقیقاتی که این دانشمند انجام داده است، کاهش مقاومت فشاری بتن تا دمای حدود ۲۲ درجه سانتی‌گراد، پس از سرد شدن قابل بازگشت است. بر این اساس، نرخ کاهش مقاومت گرمایی بتنی که تا دمای ۲۲۳-۲۲۲ درجه سانتی‌گراد گرم می‌شود، بیشتر از نرخ کاهش مقاومت گرمایی بتن در آغاز است. اکثر بتن‌ها، بیشترین کاهش مقاومت را در دمای ۲۲۳ درجه سانتی‌گراد تجربه می‌کنند، البته این موضوع به نوع سنگدانه‌ها و خمیر سیمان و طرح مخلوط نیز بستگی دارد [۷]. شبیه پدیده‌های دیگر، عوامل زیادی، پاسخ بتن به آتش را کنترل می‌کنند. ترکیب بتن از این لحاظ بااهمیت است، زیرا هم خمیر سیمان و هم سنگدانه شامل اجزایی هستند که براثر حرارت تجزیه می‌گردند. تراوایی بتن، اندازه قطعه و روند افزایش حرارت نیز بااهمیت می‌باشند، زیرا آن‌ها حاکم بر توسعه فشارهای داخلی، که از محصولات گازی ناشی از تجزیه ایجاد می‌شوند، هستند. آزمایش‌های آتش‌نشان داده‌اند که میزان ریزترک‌ها، و درنتیجه مقاومت بتن، تحت تأثیر شرایط آزمایش (یعنی آیا نمونه‌ها به صورت داغ و زیر بار آزمایش‌شده‌اند و یا بعد از سرد شدن و رسیدن به دما و رطوبت محیط تحت آزمایش قرارگرفته‌اند) نیز می‌باشند. همان‌طور که ذکر شد، رفتار واقعی بتن در معرض دمای زیاد، نتیجه چندین عامل هم‌زمان وابسته به هم است که تحلیل دقیق آن‌ها بسیار پیچیده است[۸]. قلهکی و همکاران[۱و۹] با بررسی مقاومت کششی بتن الیافی با الیاف فولادی نتایج زیر را عنوان کردند:

* در بتن‌های با عیارهای مختلف، با افزایش دما تا ۲۲۲ درجه، مقاومت کششی نمونه‌ها افزایش‌یافته اما از این دما به بعد، مقاومت رو به کاهش است.

* به دلیل انبساط حجمی الیاف‌های فولادی در دمای بالا، نمونه‌ی با عیار Kg/m3 ۲۲۰، در دمای ۲۲۰ درجه در داخل کوره کامل منهدم شده است. این بدین معنی است که چنین بتنی تاب تحمل این حرارت را ندارد.

* از نتایج استنباط می‌شود که الزاماً با افزایش عیار سیمان، مقاومت نمونه‌ها در آتش زیاد نمی‌شود بلکه ممکن است کاهش نیز یابد.

* در دمای محیط (۲۲ درجه سانتی‌گراد) مقاومت کششی نمونه‌ی با عیار ۲۲۴Kg/m۳ بیشتر از مقاومت کششی نمونه‌ی با عیار ۲۲۰Kg/m۳ است.

استفاده از الیاف فیبری به روش‌های مختلف جهت تقویت و مقاوم‌سازی سازه‌ها بتنی استفاده می‌شود. بسیاری از خواص بتن شامل: مقاومت فشاری، سهولت تهیه، فرم پذیری و غیره، سبب افزایش استفاده از این ماده شده است. تصور بر این است که بتن در مقابل حرارت‌های زیاد ناشی از آتش‌سوزی مقاوم است، ولی مطالعات انجام‌شده در این زمینه، نشان‌دهنده آسیب‌پذیری این ماده در برابر حرارت‌های زیاد است[۲].

کاهش رطوبت و افت وزنی، نابودی هیدروکسید کلسیم (Ca(OH)۲)، هیدرات سیلیکات کلسیم (CSH) و تغییر رنگ در تحقیقات گذشته بر روی بتن‌های در معرض حرارت مشاهده شده است[۱۰-۱۱].

بررسی‌های حداد و آبانده[۱۲] بر روی مقاومت پیوستگی بتن‌های حاوی الیاف، تحت اثر سیکل‌های متوالی گرم و سرد شدن، نشان داد که اثر سیکل‌های مذکور بر نمونه‌های شاهد نسبت به نمونه‌های بتنی الیافی بیشتر است. چان و همکارش [۱۳] بتن‌های توانمند حاوی میکروسیلیس و فلای‌اش، در معرض حرارت ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت‌زمان یک ساعت که به صورت تدریجی خنک شده بودند، را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که افت مقاومت فشاری در نمونه‌های بتنی توانمند در مقایسه با نمونه‌های شاهد، زیادتر بوده، ولی همچنان مقاومت فشاری باقی‌مانده نمونه‌های بتنی توانمند در مقایسه با نمونه‌های شاهد بیشتر است. مطالعات الغادی و الزایدین [۱۴] بر روی مقاومت فشاری در نمونه‌های بتنی استوانه‌ای و مکعبی در معرض حرارت‌های ۲۰۰ ، ۴۰۰ و ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد نشان داد که در نمونه‌های بتنی در معرض حرارت‌های ۲۰۰ و ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد تأثیر چندانی بر مقاومت فشاری باقی‌مانده نداشته، ولی دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد، تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای داشته است. همچنین بررسی اشکال نمونه‌های بتنی نشان داد که نمونه‌های مکعبی نسبت به نمونه‌های استوانه‌ای در هنگام مواجهه با حرارت‌های زیاد از عملکرد بهتری به دلیل توزیع نامناسب حرارت در داخل بافت بتن برخوردار می‌باشند. بررسی‌های دمیرل و آگوچان [۱۵] بر روی نمونه‌های بتنی حاوی پومیس - میکروسیلیس و پومیس که در معرض دمای ۴۰۰-۸۰۰ درجه سانتی‌گراد قرارگرفته و به‌طور تدریجی خنک شده بودند، نشان داد که مقاومت فشاری تمامی نمونه‌ها در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد در مقایسه با مقاومت فشاری در دمای اتاق افزایش داشته، ولی با افزایش دما از این مقدار، افت مقاومت فشاری مشاهده شد. همچنین نمونه‌های حاوی پومیس- میکروسیلیس در مقایسه با نمونه‌های حاوی پومیس، از افت بیشتری در مقاومت فشاری برخوردار بودند. تحقیقات بهنود و قندهاری [۱۶] بر روی نمونه‌های بتنی حاوی الیاف پلی‌پروپیلن در معرض حرارت‌های زیاد نشان داد که مقاومت فشاری در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد افزایش، ولی در سایر دماها دچار کاهش گردیده است. مقاومت کششی به دلیل ذوب الیاف پلی پروپیلن و ایجاد فضاهای خالی در تمامی دماها کاهش یافته است. همچنین مقایسه مقاومت کششی و فشاری در مواجهه با حرارت نشان داد که، مقاومت کششی حساس‌تر بوده و حضور الیاف پلی‌پروپیلن عملکرد بیشتری بر مقاومت فشاری دارد. بررسی‌های دوگنسی و همکاران [۱۷] بر مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی حاوی الیاف فولادی در معرض دماهای ۹۰۰، ۱۰۰۰، ۱۱۰۰ و ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد که پس از مواجهه با حرارت به طور آهسته در معرض هوا خنک شده بودند، نشان داد که نمونه شاهد دارای بیشترین مقادیر درصد افت مقاومت فشاری در تمامی نمونه‌ها بوده و همچنین حضور الیاف فولادی در نمونه‌های بتنی در معرض دماهای بالای ۱۰۰۰°C در مقایسه با دمای ۹۰۰ و ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد، تأثیر چندانی بر مقاومت فشاری باقی‌مانده نداشته است. هدف از این پژوهش، شناخت رفتار و مقاومت چند نوع بتن الیافی، با مصالح موجود در ایران، در برابر آتش و در دمای بالا است. اثر سه نوع الیاف فولادی، شیشه‌ای و پلی‌پروپیلن بر روی رفتار بتن در برابر آتش آن در دمای بالا بررسی می‌شود. ازآنجایی‌که مقاومت فشاری بتن بر روی مقاومت آن در برابر آتش تأثیرگذار است، آزمایش‌ها برای دو رده مقاومتی مختلف، یکی مقاومت معمولی و دیگری مقاومت نسبتاً بالا، صورت خواهد گرفت. به منظور بررسی بهتر نتایج و امکان مقایسه آن با رفتار بتن‌های معمولی، یک نوع بتن سنتی (بدون الیاف) با استفاده از مصالح رایج نیز ساخته و آزمایش‌های مشابه بر روی آن انجام خواهد شد.

۲- برنامه آزمایشگاهی

جهت انجام پروژه بررسی عملکرد بتن الیافی در دماهای بالا (تحت حرارت شدید) ابتدا مطابق با فرض‌های موجود برای عیار ۴۰۰Kg/m۳ نسبت اجزای بتن منطبق با روش‌های استاندارد موجود در جهان مشخص شد. در این طرح روش استاندارد کمیته بتن آمریکا (ACI)[۱۸] مورد استفاده قرار گرفته شد.

۲-۱- *مشخصات الیاف*

در این بخش مشخصات الیاف استفاده شده در این پژوهش ارائه شده است.

جدول۲ : مشخصات فیزیکی الیاف شیشه[۲].

طول (mm)	قطر (mm)	طول به قطر	وزن مخصوص (gr/cm^3)	مدول الاستیسیته (GPa)	مقاومت کششی (MPa)	کرنش شکست (درصد)
۱۲	۰/۰۱۳	۹۲۳	۲,۶	۸۰	۲۰۰۰	۲ - ۳/۵

شکل۲ : الیاف شیشه مصرفی[۲]

جدول۳: خواص فیزیکی و مکانیکی الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن[۹].

	مقطع	طول (mm)	قطر (mm)	طول / قطر	مقاومت کششی (MPa)	چگالی (kg/m^3)	مدول الاستیسیته (GPa)
الیاف فولادی	دایره	۵۰	۰/۸	۶۲/۵	>۱۲۰۰	۷۸۵۰	۱۶۰
الیاف پلی پروپیلن	دایره	۳۶	بسیار ناچیز	-	۴۰۰	۹۱۰	۳/۵ – ۳/۹

الف- الیاف فولادی مصرفی ب- الیاف پلی پروپیلن مصرفی

شکل۳ : الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن مصرفی[۹].

۲-۲- نمونه‌گیری،آماده‌سازی قالب‌ها و نحوه تراکم نمونه‌های بتنی

جهت تعیین عملکرد بتن الیافی در حرارت بالا در این طرح مبادرت به ساخت نمونه‌های مکعبی بتنی ۱۵×۱۵×۱۵cm مطابق با استاندارد BS انگلستان گردید. به این منظور قالب‌های مکعبی استاندارد ۱۵×۱۵×۱۵cm به‌اندازه مناسب روغن‌کاری گردیده و پیچ‌های مربوطه قالب‌ها ثابت و محکم گردیدند. سپس جهت نمونه‌گیری از مخلوط بتن تازه ساخته‌شده قالب به سه لایه مساوی (فرضی و تقریبی) تقسیم می‌شود و نمونه‌گیر با اشراف به این تقسیم‌بندی سه بار قالب را پر می‌کند و هر بار ۳۵ ضربه به بتن داخل قالب جهت تراکم مناسب با چکش استاندارد (رامر) وارد می‌آورد. لازم به ذکر است که شدت ضربه‌ها در لایه‌ی اول به نحوی است که رامر به کف قالب برخورد نکند اما در لایه دوم و سوم نحوه ضربه زدن باید به‌گونه‌ای باشد که چکش به لایه پایین‌تر نفوذ نماید. لایه‌ی آخر پس از تراکم با ۳۵ ضربه، سطح آن توسط ماله صاف گردیده و برای اطمینان از عدم کرمو شدگی تعداد سه ضربه به هر طرف قالب وارد می‌آید. پس از ۲۴ ساعت می‌توان قالب را باز نموده و نمونه مکعبی را به داخل حوضچه آب منتقل نمود. لازم به تذکر است که قالب پس از اتمام نمونه‌گیری نباید جابجا شود و همچنین سطح زیر آن تراز باشد[۱۹].

۲-۳- نحوه اضافه کردن الیاف به مخلوط بتن

جهت اضافه کردن،الیاف مورد استفاده در این طرح که شامل سه نوع الیاف پلی‌پروپیلن، شیشه و فولادی بود از ابتدا در طراحی طرح اختلاط سعی شد از یک بتن با اسلامپ بالا استفاده شود تا از پدیده جمع شدگی و گلوله شدن الیاف، به‌خصوص برای الیاف‌های پلی‌پروپیلن و شیشه‌ای جلوگیری به عمل آید. همچنین سعی شد با توجه به توصیه شرکت سازنده و سایر مقالات، الیاف در یک زمان مشخص از مخلوط کردن بتن و به‌صورت ذره ذره وارد مخلوط بتن در حال ساخت گردد[۱۰].

۲-۴- نحوه شکستن نمونه‌های بتن

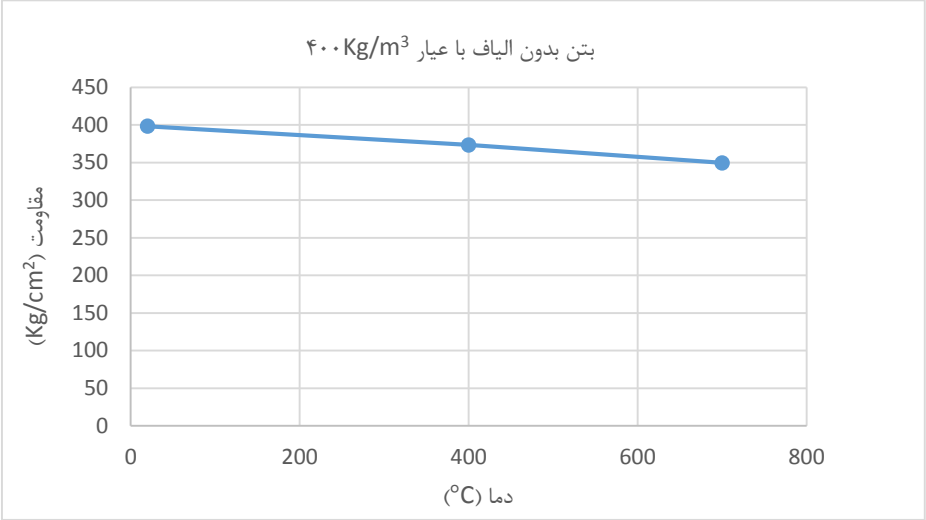
برای مقایسه مقاومت فشاری نمونه‌ها از دستگاه جک بتن شکن شرکت آزمون با ظرفیت حداکثر ۲۰۰t on استفاده گردید. پس از باز کردن قالب و قرار دادن نمونه‌ها به مدت ۲۸ روز در زیر آب، در روز بیست و هشتم نمونه‌ها از آب خارج شده و به مدت دو الی سه ساعت پیش از قرار گرفتن در کوره در حالت انتظار قرار گرفتند تا آب موجود در خود را از دست بدهند و تا حدودی خشک گردند. سپس ابتدا نمونه‌هایی که قرار است به دمای ۷۰۰°C برسند و پس از آن نمونه‌هایی که قرار است به دمای ۴۰۰°C برسند در داخل کوره قرار می‌گیرند در ضمن نمونه‌های ۴۰۰°C پیش از رفتن به داخل کوره به مدت نیم ساعت در جلوی بخاری گرم می‌شوند تا از بروز شوک حرارتی (ورود یک‌باره به ۲۰۰°C) تا حد ممکن جلوگیری به عمل آید[۱۵]. به جهت سرد شدن نمونه‌ها به‌طور کامل مدت ۲۴ ساعت نمونه‌ها مطابق با مراحل گفته‌شده در قسمت کوره رها شدند و در روز ۲۹ ام برای شکستن به زیر جک قرار گرفتند. نمودارها به دو صورت داده‌های آزمایشگاهی را نمایش می‌دهند. ابتدا هر داده به‌دست‌آمده از آزمایش‌ها به صورت نقطه‌ای در نمودارهایی که محور افقی آن نشان‌دهنده دما و محور قائم نمودار نشان‌دهنده مقاومت نمونه مکعبی بتن است آورده شده است سپس میانگین تغییرات مقاومت نمونه‌های مکعبی در نمودارها به صورت خطی رسم شده است[۱۴]. در ادامه نتایج آزمایش‌ها برای هر الیاف و با درصدهای مشخص‌شده در نمودارها بر حسب تغییرات دما نشان داده شده است. لازم به ذکر است که در این نمودارها، دما برحسب درجه سانتی‌گراد و مقاومت نمونه‌های مکعبی بتن بر حسب کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع است.

۳- نتایج و بحث

در این پژوهش برای بررسی مقاومت بتن الیافی در دماهای مختلف از سه نوع الیاف شیشه‌ای پروپیلن و فولادی در بتن استفاده شده است. در ساخت نمونه‌های بتنی با الیاف شیشه‌ای و پروپیلن از ۳ درصد مختلف الیاف، شامل نیم درصد، دو درصد و سه و نیم درصد وزنی استفاده شد. اما در الیاف فولادی از درصد حجمی استفاده شد که شامل درصدهای بیست‌وپنج صدم درصد، نیم درصد و ۷۵ صدم درصد حجمی بتن است.

۳-۱- نتایج نمونه های بتنی بدون الیاف

داده‌های آزمایشگاهی مربوط به نمونه‌های مکعبی بتنی بدون الیاف با عیار ۴۰۰Kg/m̃ در شکل ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است تغییرات مقاومت نمونه‌ها با افزایش دما، نرخ کاهشی ثابت دارند. با افزایش دما، مقاومت نمونه‌های بتنی با عیار ۴۰۰Kg/m̃ نسبت به نمونه‌های بتنی با عیار ۲۵۰Kg/m̃ روند کاهشی بیشتری دارد.



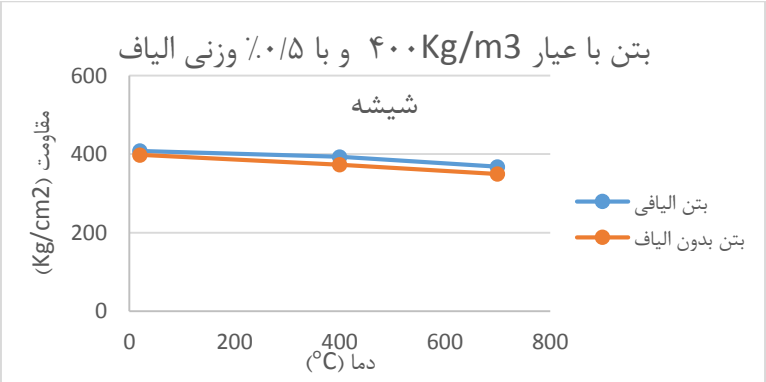
شکل۴ : تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی با عیار ۴۰۰Kg/m̃ و بدون الیاف در دماهای مختلف.

۳-۲- نتایج نمونه های بتن الیافی با عیار ۴۰۰Kg/m3

در این بخش نتایج آزمایش‌ها بر روی نمونه‌های بتنی با عیار ۴۰۰Kg/m3 و با الیاف مختلف شامل الیاف شیشه‌ای پروپیلن و فولادی ارائه شده است.

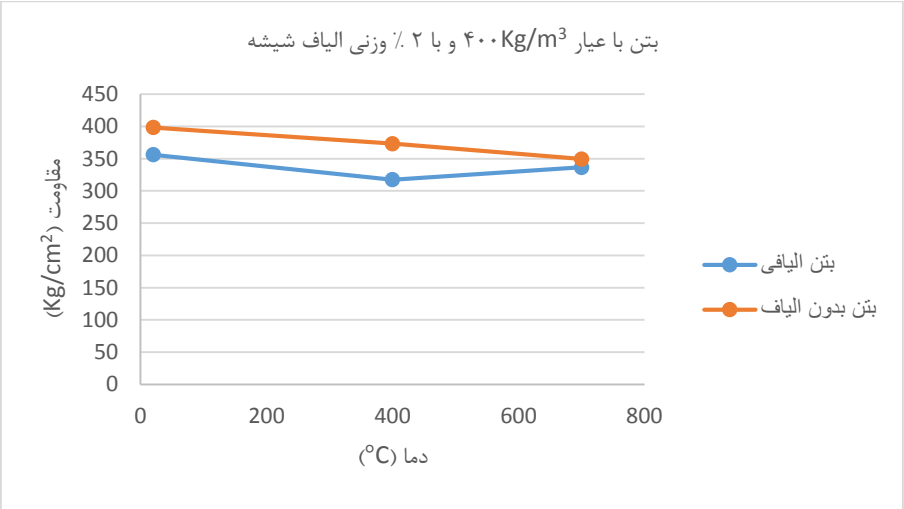
الف- الیاف شیشه

شکل ۵ نتایج نمونه‌های بتنی با عیار ۴۰۰Kg/m3 و نیم درصد وزنی الیاف شیشه‌ای ارائه شده است. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود مقاومت این نمونه‌ها در دمای محیط برابر ۴۱۰Kg/cm2 حاصل شده است. مقاومت این نمونه‌ها در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد به ۳۹۰Kg/cm2 کاهش یافته است و در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد مقاومت میانگین نمونه‌ها به ۳۷۰Kg/cm2 رسیده است.



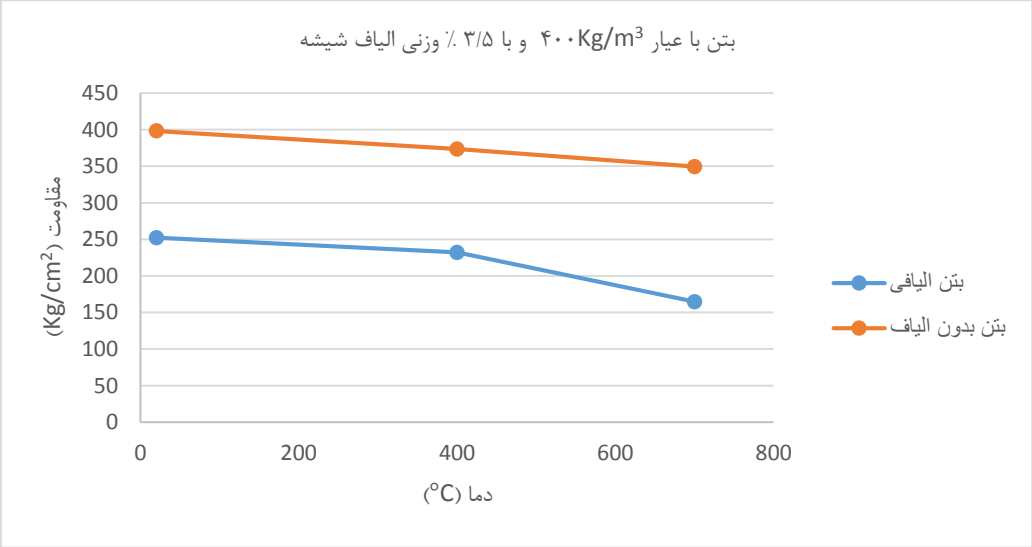
شکل۵ : تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی با عیار ۴۰۰Kg/m̃ و ۰/۵٪ وزنی الیاف شیشه در دماهای مختلف

در شکل ۶ نتایج نمونه‌های بتنی با عیار ۴۰۰Kg/m3 و دو درصد وزنی الیاف شیشه‌ای ارائه شده است. مقاومت این نمونه‌ها در دمای محیط برابر ۳۶۰ Kg/cm2 شده است. مقاومت این نمونه‌ها در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد به مقدار ۳۲۵ Kg/cm2 کاهش یافته است و در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد مقاومت میانگین نمونه‌ها ۳۴۰Kg/cm2 شده است. در این نمودار افزایش مقاومت نمونه‌های بتنی در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد نسبت به دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد مشاهده می‌شود.



شکل۶ : تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی با عیار ۴۰۰Kg/m̃ و ۲٪ وزنی الیاف شیشه در دماهای مختلف

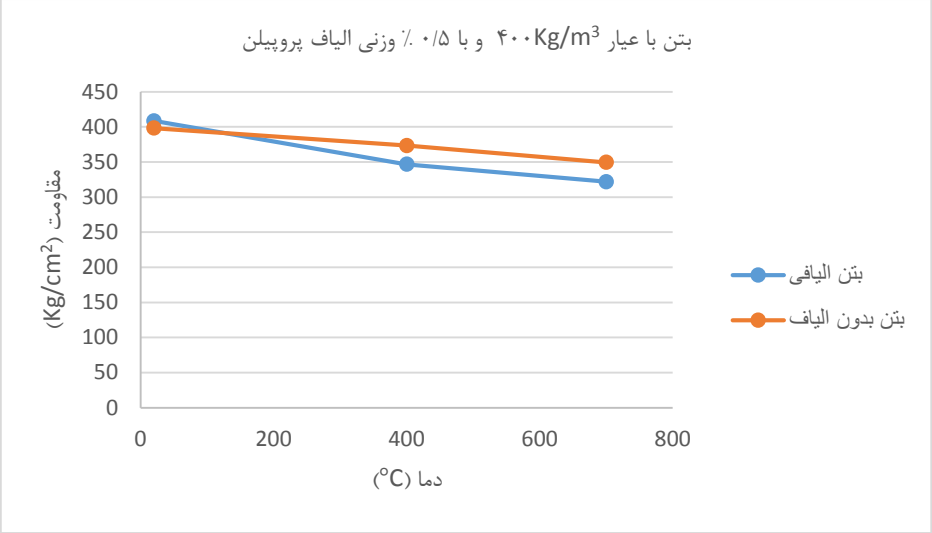
در شکل ۷ نتایج نمونه‌های بتنی با عیار ۴۰۰Kg/m3 و سه ونیم درصد وزنی الیاف شیشه‌ای ارائه شده است. مقاومت این نمونه‌ها در دمای محیط برابر ۲۵۰Kg/cm2 شده است. مقاومت این نمونه‌ها در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد به مقدار ۲۳۰Kg/cm2 کاهش یافته است و در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد مقاومت میانگین نمونه‌ها ۱۶۰ Kg/cm2 شده است.



شکل۷ : تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی با عیار ۴۰۰Kg/m̃ و ۳/۵٪ وزنی الیاف شیشه در دماهای مختلف.

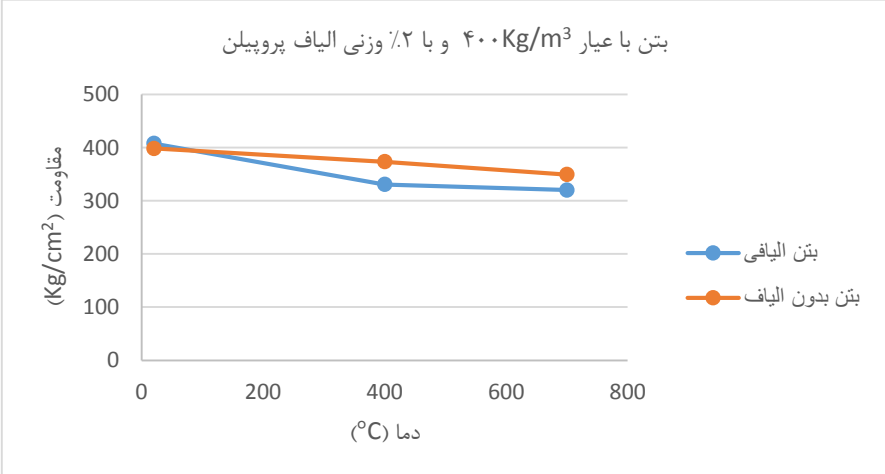
ب- الیاف پلی پروپیلن

در شکل ۸ تغییرات مقاومت نمونه‌های مکعبی بتنی با عیار ۴۰۰Kg/m̆ و با نیم درصد وزنی الیاف پروپیلن نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است مقاومت نمونه‌ها دارای نرخ کاهش با افزایش دما می‌باشند. مقاومت این نمونه‌ها در دمای معمولی ۴۱۰Kg/cm̆ و در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد میانگین مقاومت‌ها ۳۵۰Kg/cm̆ و در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد مقاومت میانگین نمونه‌ها تقریباً ۳۲۵Kg/cm̆ شده است که این نشان‌دهنده روند کاهشی ثابتی در نمونه‌ها با افزایش دمای آزمایش است.



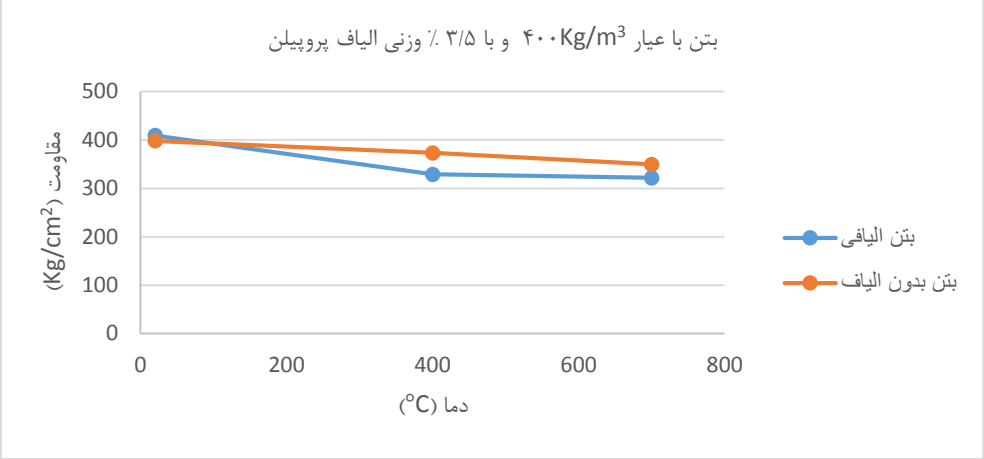
شکل۸ : تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی با عیار ۴۰۰Kg/m̆ و ۰/۵٪ وزنی الیاف پروپیلن در دماهای مختلف.

شکل ۹ تغییرات مقاومت نمونه‌های مکعبی بتنی با عیار ۴۰۰Kg/m3 و دو درصد وزنی الیاف پروپیلن نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است مقاومت نمونه‌ها دارای نرخ کاهش با افزایش دما می‌باشند. مقاومت این نمونه‌ها در دمای معمولی ۴۰۵ Kg/cm2 و در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد میانگین مقاومت‌ها ۳۳۰ Kg/cm2 و در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد مقاومت میانگین نمونه‌ها تقریباً ۳۲۵ Kg/cm2 شده است که این نشان‌دهنده روند کاهشی مقاومت با افزایش دمای آزمایش در بازه دمای محیط تا ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد بیشتر از بازه‌ی دمای ۴۰۰ تا ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد است.



شکل۹ : تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی با عیار ۴۰۰Kg/m̆ و ۲٪ وزنی الیاف پروپیلن در دماهای مختلف.

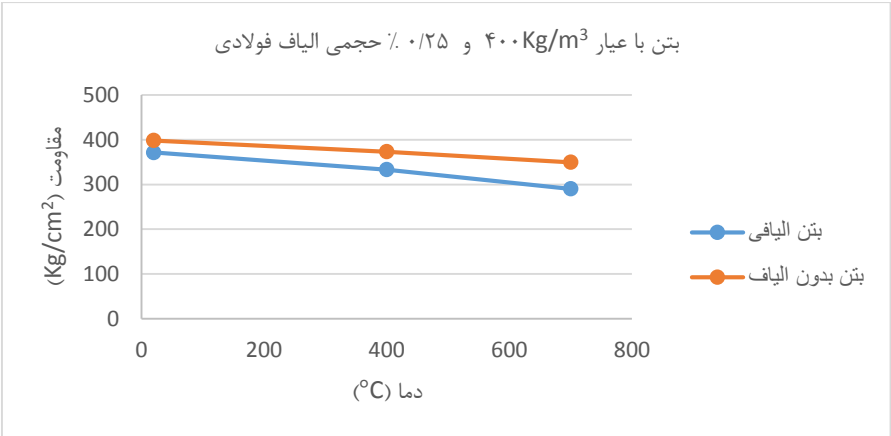
شکل ۱۰ تغییرات مقاومت نمونه‌های مکعبی بتنی با عیار ۴۰۰ Kg/m3 و سه و نیم درصد وزنی الیاف پروپیلن نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است مقاومت نمونه‌ها دارای نرخ کاهش با افزایش دما می‌باشند. مقاومت این نمونه‌ها در دمای معمولی ۴۰۵ Kg/cm2 و در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد میانگین مقاومت‌ها ۳۳۵ Kg/cm2 و در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد مقاومت میانگین نمونه‌ها تقریباً ۳۲۵ Kg/cm2 شده است که این نشان‌دهنده روند کاهشی تقریباً ثابتی در نمونه‌ها با افزایش دمای آزمایش است.



شکل ۱۰: تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی با عیار ۴۰۰Kg/m3 و ۳/۵٪ وزنی الیاف پروپیلن در دماهای مختلف.

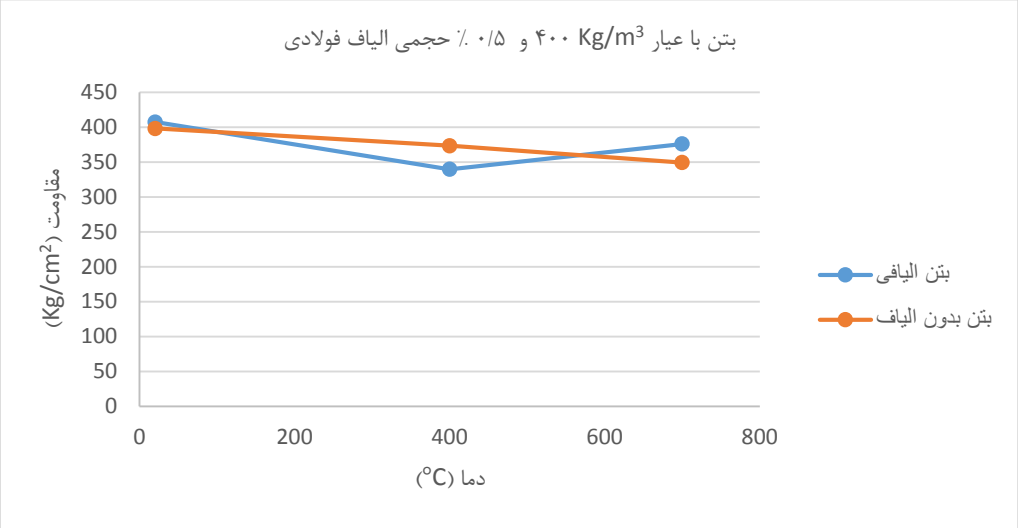
ج- الیاف فولادی

نتایج مقادیر آزمایشگاهی و تغییرات مقاومت مکعب‌های بتنی با عیار ۴۰۰Kg/m3 و با الیاف فولادی در شکل‌های ۱۱ تا ۱۳ نشان داده شده است. برخلاف نمونه‌های قبلی با الیاف شیشه و پروپیلن که مقادیر الیاف در طرح اختلاط بر حسب درصد وزنی سیمان بودند، در این نمونه‌ها مقادیر الیاف برحسب درصد حجمی محاسبه شده است. منحنی تغییرات مقاومت نمونه‌های مکعبی بتنی با عیار ۴۰۰Kg/m3 و با ۰/۲۵ درصد الیاف فولادی در شکل ۱۱ نشان داده شده است. اختلاف کمی بین هر یک از نمونه‌ها در یک دما مشاهده می‌شود. در اینجا نیز روند کاهشی مقاومت با افزایش دما وجود دارد. میانگین مقاومت این نمونه‌ها در دمای معمولی ۳۷۵ Kg/cm2 و در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد میانگین مقاومت‌ها ۳۳۰Kg/cm2 و در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد مقاومت میانگین نمونه‌ها تقریباً ۲۹۰ Kg/cm2 شده است.



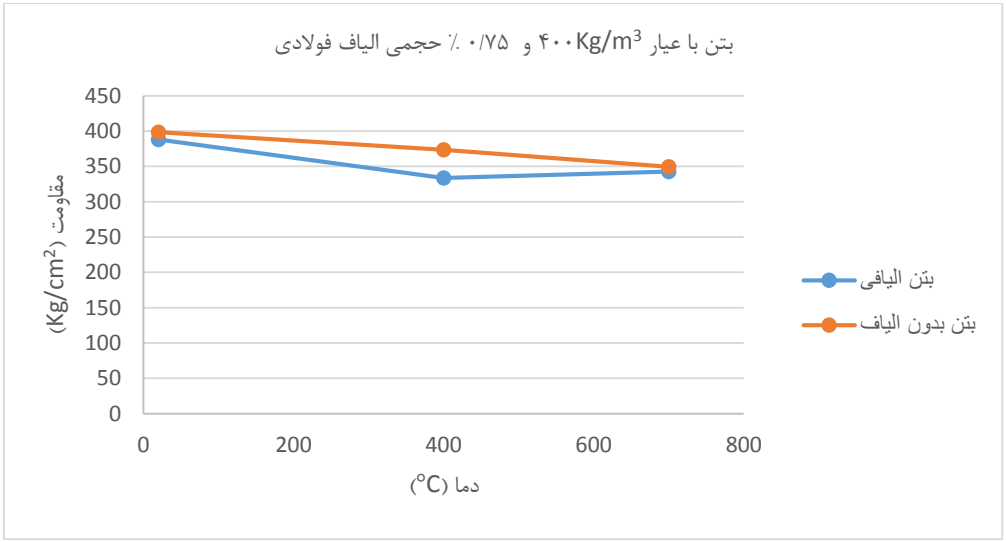
شکل۱۱ : تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی با عیار ۴۰۰Kg/m3 و ۰/۲۵٪ حجمی الیاف فولادی در دماهای مختلف

شکل ۱۲ منحنی تغییرات مقاومت نمونه‌های مکعبی با ۰/۵ درصد حجمی الیاف فولادی نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقاومت نمونه‌ها با افزایش دما از دمای محیط به ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد کاهش یافته است، اما با افزایش دما از ۴۰۰ به ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی بتن افزایش یافته است. میانگین مقاومت این نمونه‌ها در دمای معمولی ۴۰۷Kg/cm۲ و در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد میانگین مقاومت‌ها ۳۴۷ Kg/cm۲ و در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد مقاومت میانگین نمونه‌ها تقریباً ۳۸۰ Kg/cm۲ شده است.



شکل۱۲ : تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی با عیار ۴۰۰Kg/m۳ و ۰/۵٪ حجمی الیاف فولادی در دماهای مختلف.

در شکل ۱۳ منحنی تغییرات مقاومت نمونه‌های مکعبی بتنی با عیار ۴۰۰Kg/m۳ و با ۰/۷۵ درصد الیاف فولادی نشان داده شده است. روند کاهشی مقاومت با افزایش دما در بازه بین دمای محیط و دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد وجود دارد اما اختلاف کمی بین نمونه‌های آزمایش‌شده در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد با نمونه‌های آزمایش‌شده در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد مشاهده می‌شود. میانگین مقاومت این نمونه‌ها در دمای معمولی ۳۸۶Kg/cm۲ و در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد میانگین مقاومت‌ها ۳۴۲Kg/cm۲ و در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد مقاومت میانگین نمونه‌ها تقریباً ۳۴۸Kg/cm۲ شده است.



شکل۱۳: تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی با عیار ۴۰۰Kg/m۳ و ۰/۷۵٪ حجمی الیاف فولادی در دماهای مختلف

۴- جمع بندی و نتیجه گیری

در واقع در این پژوهش ۴ نوع بتن مختلف در دماهای محیط، ۴۰۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد مورد آزمایش قرار گرفتند که از هر نوع بتن و در هر دما سه نمونه مورد آزمایش قرار گرفته است و مقاومت آن‌ها در دماهای مختلف به دست آمد. نمونه‌های مکعبی بتنی با ابعاد ۱۵×۱۵×۱۵cm با مصالح متداول موجود ساخته شد. پس از باز کردن قالب و قرار دادن نمونه‌ها در زیر آب به مدت ۲۸ روز، نمونه‌ها از آب خارج شده و به مدت دو الی سه ساعت پیش از قرار گرفتن در کوره در حالت انتظار قرار گرفتند تا حدودی خشک گردند. سپس ابتدا نمونه‌هایی که قرار است به دمای ۷۰۰°C برسند و پس از آن‌ها نمونه‌هایی که قرار است به ۴۰۰°C برسند در داخل کوره قرار گرفتند. به جهت سرد شدن نمونه‌ها به طور کامل مدت ۲۴ ساعت نمونه‌ها مطابق با مراحل گفته شده در فصل ۳ رها شدند و در روز ۲۹ ام برای شکستن زیر جک قرار گرفتند. در ادامه نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی بتن الیافی نیز به صورت نمودارهایی ارائه شد.

مهمترین یافته‌های این تحقیق عبارتند از:

۱- نوع الیاف مورد استفاده در بتن الیافی تاثیر قابل توجهی در بهبود مقاومت فشاری نمونه بتنی در حرارت‌های مختلف دارد. نمونه‌های بتنی با الیاف فولادی بهترین عملکرد و نمونه‌های بتنی با الیاف شیشه بدترین عملکرد در برابر آتش دارند.

۲- درصد الیاف مورد استفاده در بتن الیافی، در میزان مقاومت فشاری نمونه‌ها در حرارت‌های بالا موثر است. در نمونه‌های بتنی با الیاف فولادی، به ترتیب با افزودن ۰/۲۵٪ و ۰/۵٪ حجمی الیاف فولادی به بتن، مقاومت فشاری نمونه در دماهای بالا بهبود یافته است. لیکن در این نمونه‌ها با افزایش درصد الیاف از ۰/۵٪ به ۰/۷۵٪، مقاومت کمی کاهش یافته است.

۳- در نمونه‌های بتنی با عیار ۴۰۰Kg/m3 و با الیاف شیشه‌ای، با افزایش درصد الیاف در بتن مقاومت بتن در تمام دماها کاهش یافته است.

۴- در نمونه‌های بتنی با عیار ۴۰۰Kg/m3 و با الیاف شیشه‌ای، روند کاهشی مقاومت با افزایش دما همراه است اما در نمونه‌های با ۲ درصد الیاف شیشه و در دمای ۷۰۰ درجه نسبت به دماهای پایین‌تر افزایش غیرعادی مقاومت مشاهده می‌شود.

۵- در نمونه‌های بتنی با عیار ۴۰۰Kg/m3 و با الیاف پروپیلن با افزایش درصد الیاف در بتن مقاومت تغییری نکرده است و با افزایش دما کاهش مقاومت در تمام حالات تقریباً یکسان بوده است.

۶- در نمونه‌های بتنی با عیار ۴۰۰Kg/m3 با الیاف فولادی، مقاومت بتن با افزایش درصد الیاف در بتن از ۰/۲۵ درصد به ۰/۵ درصد افزایش یافته ولی با افزایش درصد الیاف از ۰/۵ درصد به ۰/۷۵ درصد مقاومت کمی کاهش یافته است. مقاومت نمونه‌ها در افزایش دما از ۴۰۰ به ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد روند مشخصی ندارد.

۵- مراجع

1- Qolheki, M. and Pachideh, Qh. and Nakhdi, E. and Alavi, M., 2016, **Laboratory study of tensile strength of fiber concrete with metal fibers at different temperatures**, In: The 4th International Congress of Civil Engineering, Architecture and Urban Planning. Tehran: Shahid Beheshti University.

2-Kikha, A., 2006, **Effect of high temperature on compressive and tensile strength of concretes containing glass fibers**, Concrete research, 10, 1, 63-73.

3-Mander, J. B., et al., 1986, **THEORETICAL STRESS-STRAIN MODEL FOR CONFINED CONCRETE**, Journal of Structural Engineering, 114.

4- Leppanen, J., 2006, **Concrete subjected to projectile and fragment impacts: Modelling of crack softening and strain rate dependency in tension**, International Journal of Impact Engineering, 32, 11, 1828–1841.

5- PARK, R. and PAULAY, T., 1975, **Reinforced Concrete Structures**, Canada: Wiley.

6- Wight, J. K. and MacGregor J. G., 2009, **Reinforced concrete Mechanics and Design**, London: Pearson Education.

7- Husem, M., 2006, **The effects of high temperature on compressive and flexural strengths of ordinary and high-performance concrete**, Fire Safety Journal, 41, 2, 155-163.

8- Sakr, K. and El-Hakim, E., 2005, **Effect of high temperature or fire on heavy weight concrete properties**, Cement and concrete research, 35, 3, 590-596.
9- Qolheki, M. and Pachideh, Qh. and Rezaeifar, O., 2016, **Laboratory study of mechanical characteristics of concrete containing steel fibers and polypropylene at high temperatures**, Scientific-research journal of structural and construction engineering, 4, 3, 167-179.
10- Fletcher, I. A. and Welch, S. and Torero, J. L. and Carvel, R. O. and Usmani, A., 2007, **Behaviour of concrete structures in fire**, Thermal science, 11, 2, 37-52.
11- Yüzer, N. and Aköz, F. and Öztürk, L. D., 2004, **Compressive strength–color change relation in mortars at high temperature**, Cement and Concrete Research. 34, 10, 1803-1807.
12- Haddad, R. H. and Ra'ed, M. A., 2004, **Effect of thermal cycling on bond between reinforcement and fiber reinforced concrete**, Cement and Concrete Composites, 26, 6, 743-752.
13- Chan, Y. N. and Luo, X. and Sun, W., 2000, **Compressive strength and pore structure of high-performance concrete after exposure to high temperature up to 800 C**, Cement and Concrete Research, 30, 2, 247-251.
14- Al Qadi, A. N. and Al-Zaidyeen, S. M., 2014, **Effect of fibre content and specimen shape on residual strength of polypropylene fibre self-compacting concrete exposed to elevated temperatures**, Journal of King Saud University-Engineering Sciences, 26, 1, 33-39.
15- Demirel, B. and Keleştemur, O., 2010, **Effect of elevated temperature on the mechanical properties of concrete produced with finely ground pumice and silica fume**, Fire Safety Journal. 45, 6, 385-391.
16- Behnood, A. and Ghandehari, M., 2009, **Comparison of compressive and splitting tensile strength of high-strength concrete with and without polypropylene fibers heated to high temperatures**, Fire Safety Journal, 44, 8, 1015-1022.
17- Düğenci, O. and Haktanir, T. and Altun, F., 2015, **Experimental research for the effect of high temperature on the mechanical properties of steel fiber-reinforced concrete**, Construction and Building Materials, 75, 82-88.
18- American Concrete Institute, 2014, **Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary**, Detroit: MI.