

## ارزیابی پایایی طولانی مدت بتن با الیاف پلیمری در دماهای بالا

گل آیم نظری

کارشناس ارشد، مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

جواد واثقی امیری

استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

### چکیده

در این مطالعه، رفتار بتن با مقاومت بالا حاوی الیاف پلی پروپیلن برای استفاده در تکنولوژی‌های جدید که نیاز به تحمل دماهای بالا برای مدت‌های طولانی دارند، مانند سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی حرارتی، مورد بررسی قرار گرفته است. هدف این پژوهش بررسی خواص مکانیکی بتن با مقاومت بالا حاوی الیاف پلی پروپیلن با طول و مقدار متفاوت پس از حرارت دیدن تا دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت زمان‌های ۲، ۶، ۲۴ و ۴۸ ساعت است. همچنین تأثیر استفاده از الیاف در جلوگیری از پوسته‌اندازی انفجاری بتن در دما و مدت زمان‌های مذکور بررسی شده است. نتایج این مطالعه نشان داد که بالاترین مقاومت فشاری مربوط به نمونه‌هایی است که حاوی ۰/۲۳ درصد از وزن سیمان الیاف پلی پروپیلن با طول ۱۲ میلی‌متر بودند، همچنین پدیده پوسته‌اندازی انفجاری در هیچ کدام از نمونه‌های حاوی الیاف پلی پروپیلن با مقادیر و طول‌های مختلف در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد مشاهده نشد.

**واژگان کلیدی:** بتن با مقاومت بالا، دمای بالا، الیاف پلی پروپیلن، مدت زمان در معرض حرارت قرار گرفتن

## مقدمه

بتن به طور کلی نسبت به سایر مصالح، رفتار بهتری در برابر دمای بالا نشان می‌دهد. این مقاومت بالا به دلیل ترکیب اجزای تشکیل‌دهنده بتن است. زمانی که سیمان و سنگدانه‌ها از نظر شیمیایی ترکیب می‌شوند، بتنی با هدایت حرارتی کم، ظرفیت حرارتی بالا و کاهش مقاومت کم با افزایش دما ایجاد می‌کنند. این ویژگی‌ها باعث می‌شود که انتقال حرارت در بتن به کندی صورت گیرد و مقاومت آن در برابر افزایش دما به آرامی کاهش یابد، بنابراین بتن نسبت به سایر مصالح در برابر صدمات ناشی از دمای بالا عملکرد بهتری دارد (Kodur, 2014; Kodur & Raut, 2010). مطالعات نشان داده‌اند که بتن با مقاومت بالا نسبت به بتن با مقاومت معمولی حساسیت بیشتری به حرارت دارد، که این حساسیت می‌تواند منجر به ترک‌خوردگی و پوسته‌اندازی انفجاری بتن شود. بر این اساس، مقاومت و مدول الاستیسیته بتن با مقاومت بالا در اثر افزایش دما به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد (Behbahani et al., 2012; Lee, 2017). مطالعات گذشته در مورد خواص بتن و عوامل تأثیرگذار بر رفتار آن در معرض دماهای بالا کمک بزرگی به شناخت بهتر رفتار بتن و بهبود خواص آن کرده‌اند. نتایج این مطالعات نشان داده است که نوع سنگدانه، نوع سیمان، نسبت آب به سیمان، نوع و میزان افزودنی‌های مورد استفاده، نوع آزمایش، میزان حرارت و عوامل دیگر بر خواص مکانیکی، فیزیکی و شیمیایی بتن پس از حرارت دیدن تأثیر می‌گذارند (Hager, 2013; Hager & Tracz, 2010; Kodur, 2014).

بتن نه تنها در صنعت ساخت و ساز کاربرد دارد، بلکه می‌تواند در تکنولوژی‌های جدیدی مانند سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی تجدیدپذیر، از جمله سیستم‌های ذخیره انرژی خورشیدی، نیز مفید واقع شود. این سیستم‌ها نه تنها باید قادر به تحمل بار باشند، بلکه مهم‌تر از همه، باید بتوانند در برابر دمای بالا برای دوره‌های زمانی مختلف در طول بهره‌برداری مقاومت کنند. بتن با مقاومت بالا به دلیل دو ویژگی مهم یعنی ظرفیت باربری بالا و قابلیت ذخیره‌سازی حرارتی قابل توجه، برای ساخت این سیستم‌ها بسیار مناسب است (Alonso et al., 2016).

در سال ۲۰۱۰ هگرا<sup>۱</sup> و تراز<sup>۲</sup> برنامه تحقیقاتی را برای تعیین طول بهینه الیاف با هدف ایجاد کانال‌هایی برای خروج بخار آب پس از ذوب شدن الیاف، طراحی کردند. آن‌ها برای بررسی تأثیر مقدار و طول الیاف پلی‌پروپیلن بر خواص بتن با مقاومت بالا در معرض دماهای بالا، الیاف پلی‌پروپیلن با طول‌های ۶، ۱۲ و ۱۹ میلیمتر و با مقایر ۰/۹ و ۱/۸ کیلوگرم بر مترمکعب را انتخاب کردند. نتایج نشان داد که هم طول و هم مقدار الیاف بر میزان تغییرات نفوذپذیری بتن در اثر حرارت تأثیرگذار است. بیشترین افزایش نفوذپذیری در بتن‌های گرم شده، در نمونه‌هایی مشاهده شد که در آن‌ها از الیاف با طول‌های ۱۲ یا ۱۹ میلیمتر و مقادیر ۱/۸ کیلوگرم بر مترمکعب استفاده شده بود. این نتیجه می‌تواند باعث کاهش تمایل بتن به پوسته‌اندازی انفجاری در دماهای بالا شود. با این وجود، مشخص شد که حضور الیاف پلی‌پروپیلن تأثیر چندانی در تغییرات مقاومت فشاری بتن ندارد. (Hager & Tracz, 2010). همچنین مالوک<sup>۳</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۷ تأثیر نوع و مقدار الیاف پلی‌پروپیلن بر تمایل به پوسته‌اندازی انفجاری بتن ناشی از حرارت را بررسی کردند. آن‌ها برای این آزمایش سه نوع الیاف پلی‌پروپیلن تک رشته‌ای، چند رشته‌ای و الیاف شبکه‌ای با طول‌های ۳، ۶، ۱۲ و ۲۰ میلی‌متر و با دوزهای مختلف را انتخاب کردند. نتایج نشان داد که با ثابت نگه‌داشتن پارامترهای مقاومت فشاری، اسلامپ و دما، افزودن الیاف پلی‌پروپیلن با طول بسیار کوتاه ۳ میلی‌متر با مقادیر مختلف در طرح اختلاط تأثیری در کاهش پدیده پوسته‌اندازی ندارد، زیرا الیاف با این طول کوتاه‌تر از آن هستند که پس از ذوب شدن بتوانند کانال‌های به هم پیوسته ایجاد کنند تا با خروج بخار آب، فشار منفذی کاهش یابد. همچنین، مشخص شد که الیاف با طول ۲۰ میلی‌متر تأثیر منفی در

<sup>1</sup> Hager

<sup>2</sup> Tracz

<sup>3</sup> Maluk

کارایی بتن دارد و بهترین طول، هم از نظر کارایی و هم از نظر کاهش پدیده پوسته‌اندازی انفجاری، طول‌های ۶ و ۱۲ میلی‌متر می‌باشد (Maluk et al., 2017). اباپیان<sup>۱</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۸ از یک نوع جدید الیاف پلی‌پروپیلن به نام الیاف ماکرو پلی‌پروپیلن مصنوعی با کارایی بالا استفاده کردند. آن‌ها این الیاف را با دوزهای ۱، ۲ و ۳ کیلوگرم بر مترمکعب در بتن با مقاومت بالا اعمال کردند و خواص مکانیکی بتن از جمله مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مقاومت خمشی را در دماهای ۲۵، ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ بررسی کردند. نتایج نشان داد که افزودن این الیاف به بتن با مقاومت بالا، مقاومت کششی و مقاومت خمشی بتن را افزایش می‌دهد که این تاثیر ممکن است ناشی از توزیع تنش‌های کششی و پیشگیری از رشد ترک در بتن باشد. همچنین، مشخص شد که افزودن این الیاف مقاومت فشاری بتن را تا حدی کاهش می‌دهد که این اتفاق ممکن است به دلیل افزایش تخلخل به علت حضور الیاف در طرح باشد. با این حال، زمانی که ۱ کیلوگرم بر مترمکعب الیاف اضافه شد، این کاهش ناچیز بود. افزودن بیش از ۱ کیلوگرم بر مترمکعب الیاف منجر به کاهش قابل توجه کارایی بتن تازه شد. بر اساس نتایج به دست آمده، گزارش شد که بهترین مقدار الیاف برای بهبود رفتار بتن در دماهای بالا بدون تاثیر منفی در کارایی بتن، ۱ کیلوگرم بر مترمکعب در بتن می‌باشد (Abaeian et al., 2018).

در دماهای حدود ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد به علت عدم تطابق کرنش حرارتی بین سنگدانه و خمیر سیمان، ریز ترک‌هایی در ناحیه انتقال بتن و خمیر سیمان ایجاد می‌شود. این پدیده باعث کاهش خواص مکانیکی بتن می‌شود. به همین دلیل، بررسی نوع سنگدانه مصرفی مناسب برای بتن‌هایی که در معرض دمای بالا قرار می‌گیرند، اهمیت ویژه‌ای دارد (Biolzi et al., 2008; Lau & Anson, 2006; Li et al., 1999; Lin et al., 1996; Ma et al., 2015). در سال ۱۹۹۸ چن<sup>۲</sup> و همکاران، بتن با مقاومت معمولی و بتن با مقاومت بالا با نسبت‌های آب به سیمان ۰/۶ و ۰/۳۵ و ۰/۲۸ را ساختند و نمونه‌ها را تا دماهای ۴۰۰، ۶۰۰، ۸۰۰ و ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد حرارت دادند و سپس مقاومت فشاری، کششی و ساختار منافذ آن‌ها را بررسی کردند. آن‌ها از نظر افت مقاومت بتن دما را به سه ناحیه ۲۰ تا ۴۰۰، ۴۰۰ تا ۸۰۰ و ۸۰۰ تا ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد تقسیم کردند. نتایج نشان داد که تا ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد مقاومت فشاری بتن افت ناچیزی دارد. همچنین بتن با نسبت آب سیمان ۰/۲۸ کمترین کاهش مقاومت را نشان داد. آن‌ها دریافتند که به علت عدم سازگاری کرنش حرارتی بین سنگدانه و خمیر سیمان در دماهای بالا، در بتن ریز ترک‌هایی رخ می‌دهد مقاومت کششی که نسبت به مقاومت فشاری به این ریز ترک‌ها حساس‌تر است، با شدت بیشتری کاهش می‌یابد. در مطالعه آن‌ها برخی از نمونه‌ها در دمای ۴۰۰ تا ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد دچار پوسته‌اندازی شدند که این پدیده به علت میزان رطوبت در نمونه‌ها رخ داد. رطوبت بالا یکی از عوامل تاثیر گذار در پدیده پوسته‌اندازی انفجاری است؛ به همین علت نمونه‌هایی که نسبت آب به سیمان بالاتری دارند بیشتر در معرض این پدیده قرار می‌گیرند (Chan et al., 1999).

فن<sup>۳</sup> و همکاران در سال ۲۰۰۱ نمونه‌های استوانه‌ای با طرح اختلاط مختلف ساختند و آن‌ها را تا دمای ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد حرارت دادند. آن‌ها دریافتند که بتن با نسبت آب به سیمان ۰/۲۲ کاهش مقاومت فشاری کمتری نسبت به بتن با نسبت آب به سیمان ۰/۵۷ دارد. با این حال، حساسیت نمونه‌هایی که رطوبت کمتری داشتند به پوسته‌اندازی انفجاری بیشتر بود. آن‌ها هنگام افزایش دما تا ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد مشاهده کردند که بتن با نسبت آب به سیمان ۰/۲۲ دچار پدیده پوسته‌اندازی انفجاری می‌شود، در حالی که بتن با نسبت آب به سیمان ۰/۳۳ در همان دما دست‌نخورده باقی می‌ماند (Phan et al., 2001). در سال ۲۰۰۴ چنگ<sup>۴</sup> و همکاران خواص مکانیکی بتن با مقاومت بالا را در معرض دماهای ۲۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ درجه

<sup>1</sup> Abaeian

<sup>2</sup> Chan

<sup>3</sup> Phan

<sup>4</sup> Cheng

سانتی گراد بررسی کردند. آن ها دو نوع سنگدانه سیلیسی و کربناتی را به عنوان یکی از متغیرهای این مطالعه تجربی نظر گرفتند. نتایج نشان داد که افزایش کرنش در سنگدانه های کربناتی بیشتر از سنگدانه های سیلیسی است. همچنین، در دماهای بالا پدیده پوسته اندازی انفجاری برای سنگدانه های کربناتی دیرتر اتفاق می افتد (Cheng et al., 2004). این نتیجه می تواند به دلیل بالا بودن ضریب انبساط حرارتی سنگدانه های کربناتی و تجزیه دیرتر آن ها باشد (Hager, 2013).

با این حال، مطالعات در زمینه تأثیر مدت زمان قرار گرفتن در معرض حرارت بر خواص بتن محدود است. به همین دلیل، تمرکز اصلی مطالعه حاضر بر روی بررسی خواص مکانیکی بتن با مقاومت بالا، حاوی الیاف پلی پروپیلن، پس از حرارت دیدن تا دمای ۴۰۰ درجه سانتی گراد به مدت زمان های مختلف ۲، ۶، ۲۴ و ۴۸ ساعت می باشد. هدف دیگر این پژوهش، بررسی تأثیر افزودن الیاف پلی پروپیلن با مقادیر و طول های مختلف به بتن با مقاومت بالا بر مقاومت فشاری بتن حرارت دیده و همچنین میزان کاهش پوسته اندازی انفجاری بتن با مقاومت بالا است.

## برنامه آزمایشگاهی

### مصلح مصرف

شن مصرفی در این مطالعه از نوع شن شکسته با حداکثر قطر سنگدانه ۱۹ میلی متر و ماسه مصرفی، ماسه طبیعی شسته می باشد. علت محدودیت در حداکثر اندازه سنگدانه به دلیل کاهش اثر ناحیه انتقال و دستیابی به یک ماده همگن تر می باشد (بیگی و همکاران، ۱۳۹۳). منحنی دانه بندی سنگدانه های مصرفی در محدوده استاندارد ASTM-C33 (ASTM, 2003) انتخاب شده است. مدول نرمی حاصل از دانه بندی ماسه ۲/۸۸۵ می باشد که در محدوده تعیین شده در ASTM-C33 قرار می گیرد. جزییات مشخصات فیزیکی مصلح مصرفی در جدول ۱ نشان داده شده است. همچنین سنگدانه مصرفی در این مطالعه از نوع سنگ آهک است که از نظر کانی شناسی در دسته سنگ های کربناتی قرار می گیرد.

جدول ۱: مشخصات فیزیکی سنگدانه مصرفی جهت ساخت بتن

سنگدانه	درصد جذب آب	مدول نرمی	چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب)	حداکثر قطر سنگدانه (میلی متر)
شن	۱/۹۶	-	۲۶۵۰	۱۹
ماسه	۲/۵	۲/۸۸۵	۲۶۰۰	۴/۷۵

سیمان مصرفی در این مطالعه از نوع پرتلند تیپ دو است که از کارخانه سیمان کیاسر تهیه شده است. جدول ۲ حاوی مقادیر ترکیبات شیمیایی سیمان مصرفی بر اساس اطلاعات ارائه شده در کاتالوگ این کارخانه است. با مقایسه آنالیز ترکیبات شیمیایی سیمان مصرفی با محدودیت های استاندارد ۳۸۹، مشخص می شود که کلیه پارامترها در محدوده این استاندارد قرار می گیرند و مناسب است.

جدول ۲: آنالیز ترکیبات شیمیایی سیمان مصرفی

مشخصات شیمیایی	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	F. CaO	L.O. I (Loss On Ignition)
درصد	۶۴/۵۱	۲۰/۴۸	۵/۱۹	۳/۸۵	۱/۷۶	۰/۹۷	۰/۳۷	۲/۵	۰/۸	۰/۷

فوق روان کننده مورد استفاده در این مطالعه از شرکت شیمی ساختمان تهیه شده است و برای بتن با مقاومت بالا مناسب است. مشخصات این فوق روان کننده در جدول ۳ نشان داده شده است. در این مطالعه، برای کسب روانی مناسب، ۱/۲ درصد از وزن سیمان از این فوق روان کننده به طرح اختلاطها افزوده شد.

جدول ۳: مشخصات فوق روان کننده

مشخصات	ساختار
کوپلیمرهای اصلاح شده پلی کربوکسیلیک اسید	ترکیب شیمیایی
آنیونی	طبیعت یونی
سبز تیره	رنگ
مایع	حالت فیزیکی
۱/۱ ± ۰/۲	وزن مخصوص در دمای ۲۰ درجه سانتی گراد (بر حسب کیلوگرم برلیتر)
حداکثر ۵۰۰	کلراید (بر حسب پی پی ام)
درصد وزن سیمان ۰/۲ تا ۱/۶	میزان مصرف
۱ ± ۷	میزان PH
ASTM C494	استاندارد

الیاف مورد استفاده در این مطالعه از نوع پلی پروپیلن با طولهای ۶ و ۱۲ میلی متر می باشند، که در شکل ۱ نشان داده شده اند. جزئیات مربوط به مشخصات این الیاف در جدول ۴ ارائه شده است.



شکل ۱: الیاف پلی پروپیلن مصرفی با طولهای مختلف (الف) با طول ۶ میلی متر، (ب) با طول ۱۲ میلی متر

جدول ۴: مشخصات الیاف پلی پروپیلن

مشخصه	مقدار
رنگ	سفید
وزن مخصوص	۰/۹۱ کیلوگرم بر متر مکعب
دمای ذوب	۱۶۰-۱۷۰ درجه سانتی گراد
دمای اشتعال	۵۹۳ درجه سانتی گراد
میزان ازدیاد طول	۸۰ درصد
مقاومت کششی	۳۵۰-۴۰۰ مگاپاسکال
شکل فیزیکی	به صورت الیاف تک رشته‌ای
طول الیاف	۶ و ۱۲ میلی‌متر
قطر	حدود ۲۰ میکرون
جذب آب	در حدود صفر
مقاومت در برابر اسید و قلیایی	عالی
القای الکتریکی و حرارتی	پایین

آب مورد استفاده برای ساخت نمونه‌ها از آب آشامیدنی شهر بابل تهیه شده است که بر اساس استاندارد ASTM D1129 (ASTM, 2020a) دارای کیفیت لازم برای ساخت بتن است.

### طرح اختلاط

در این مطالعه، برای بررسی رفتار بتن با مقاومت بالا در معرض دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد با مدت زمان‌های مختلف، پنج طرح اختلاط انتخاب شده است. این طرح‌های اختلاط با نسبت آب به سیمان ثابت در حد ۰/۳ برای ساخت نمونه‌های با مقاومت تعیین شده است. به منظور دستیابی به روانی مناسب در فرآیند ساخت نمونه‌ها با استفاده از نسبت آب به سیمان کم، از فوق روان‌کننده با پایه پلی‌کربوکسیلات اصلاح شده به میزان ۱/۲ درصد از وزن سیمان استفاده شده است. برای ساخت نمونه‌ها از سنگدانه‌ها در حالت اشباع با سطح خشک یا <sup>۱</sup>(SSD) استفاده شد. از الیاف پلی‌پروپیلن در مقادیر ۰/۲۲ و ۰/۴۳ درصد از وزن سیمان با طول‌های ۶ و ۱۲ میلی‌متر نیز استفاده شده است. همچنین نمونه‌هایی بدون الیاف برای بررسی تفاوت ظاهری نمونه‌ها با یا بدون الیاف بعد از حرارت دیدن در مدت زمان‌های مختلف، ساخته شده است. جزییات طرح اختلاط انتخاب شده در جدول ۵ ارائه شده است.

<sup>1</sup> Saturated Surface Dry

### جدول ۵: طرح اختلاط

HSC4	HSC3	HSC2	HSC1	HSC0	طرح
۰/۳۵	۰/۳۵	۰/۳۵	۰/۳۵	۰/۳۵	اسلامپ
۰/۳	۰/۳	۰/۳	۰/۳	۰/۳	نسبت آب به سیمان
۴۶۷/۵	۴۶۷/۵	۴۶۷/۵	۴۶۷/۵	۴۶۷/۵	سیمان (کیلوگرم بر مترمکعب)
۱۴۰/۲۵	۱۴۰/۲۵	۱۴۰/۲۵	۱۴۰/۲۵	۱۴۰/۲۵	آب (کیلوگرم بر مترمکعب)
۹۰۴/۱۴	۹۰۴/۱۴	۹۰۴/۱۴	۹۰۴/۱۴	۹۰۴/۱۴	شن (کیلوگرم بر مترمکعب)
۸۳۸/۱۱	۸۳۸/۱۱	۸۳۸/۱۱	۸۳۸/۱۱	۸۳۸/۱۱	ماسه (کیلوگرم بر مترمکعب)
۲	۱	۲	۱	۰	الیاف پلی پروپیلن (کیلوگرم بر مترمکعب)
۶	۶	۱۲	۱۲	۰	طول الیاف پلی پروپیلن (میلی متر)
۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	فوق روان کننده (درصد از وزن سیمان)

### ساخت و عمل آوری بتن

برای هر طرح، ۲۱ نمونه مکعبی به ابعاد  $10 \times 10 \times 10$  سانتی متر ساخته شد. پس از ۲۴ ساعت نگهداری در شرایط دمایی آزمایشگاه، نمونه‌ها از قالب‌ها خارج و به مدت ۲۸ روز در حوضچه‌های آب غوطه‌ور شدند تا فرآیند عمل آوری به طور کامل انجام پذیرد.

### روش انجام آزمایش‌ها

#### اسلامپ

اندازگیری روانی طرح اختلاط‌ها به عنوان یکی از عمومی‌ترین آزمایش‌های بتن تازه، با آزمایش اسلامپ طبق استاندارد ASTM-C143 (ASTM, 2020b) صورت گرفت.

### آزمایش حرارتی و منحنی دما-زمان

به منظور تاثیر میزان مدت زمان قرارگیری در معرض حرارت بر رفتار مکانیکی بتن در دمای ۴۰۰ درجه سانتی گراد، نمونه‌ها پس از پیش گرمایش ۲۴ ساعته در دمای ۱۰۰ درجه سانتی گراد، به ترتیب ۲، ۶، ۲۴ و ۴۸ ساعت در کوره در دمای ۴۰۰ درجه سانتی گراد حرارت داده می‌شوند. نرخ افزایش دما در کوره طبق استاندارد ISO-834، ۵ درجه بر دقیقه می‌باشد. تمامی نمونه‌های برای جلوگیری از شوک حرارتی و ایجاد ترک ناشی از شوک حرارتی و آسیب اضافه پس از حرارت دیدن در مدت زمان معلوم و خاموش کردن کوره در همان کوره بسته قرار می‌گیرند تا به طور آهسته تا دمای محیط سرد شوند.

### آزمایش مقاومت فشاری

آزمایش تعیین مقاومت فشاری بتن بر روی نمونه‌های مکعبی به ابعاد  $10 \times 10 \times 10$  سانتی متر، مطابق با استاندارد ASTM-C39، پس از ۲۸ روز عمل آوری در حوضچه آب انجام شد. هدف از این آزمایش، بررسی رفتار مکانیکی بتن قبل و بعد از قرارگیری در

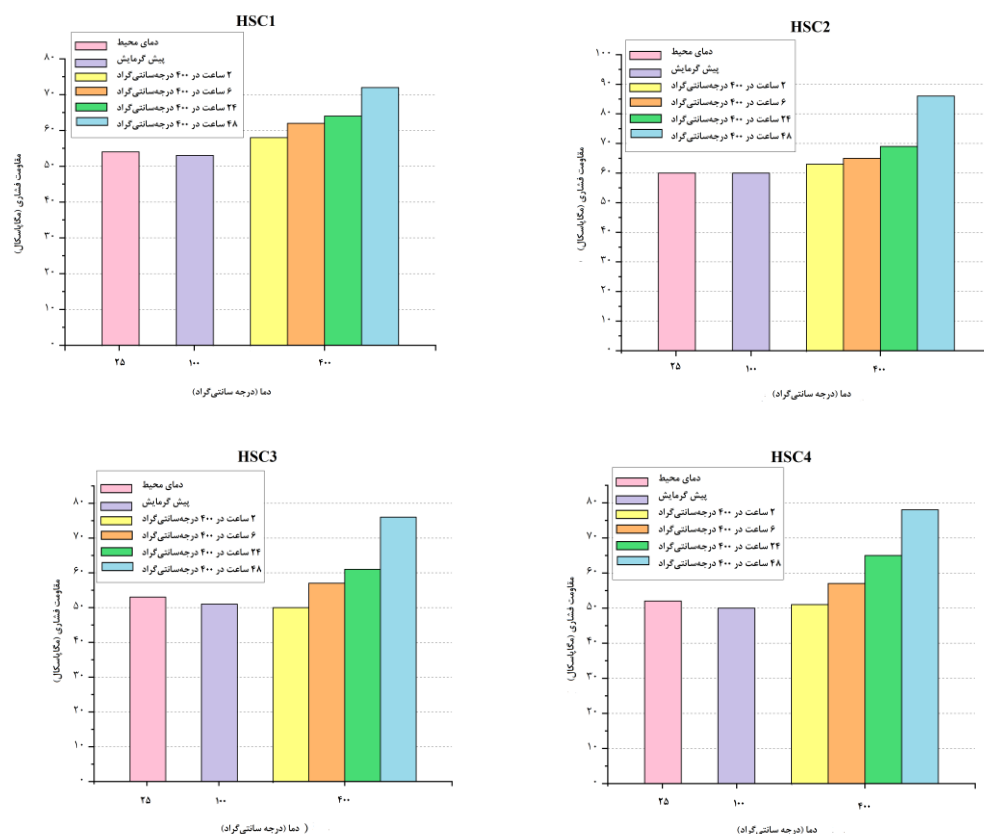
معرض دمای ۴۰۰ درجه سانتی گراد بود.

## یافته‌ها

### تاثیر مدت زمان حرارت بر مقاومت فشاری بتن

در شکل ۲، نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌ها ارائه شده است این شکل مقایسه مقاومت فشاری نمونه‌ها با طرح اختلاط مختلف در شرایط متفاوت، از جمله دمای محیط، پس از پیش گرمایش و قرارگیری در مدت‌های ۲، ۶، ۲۴ و ۴۸ ساعت در معرض دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد. میزان رطوبت موجود در نمونه‌ها عامل اصلی پدیده پوسته‌اندازی بتن محسوب می‌شود. بنابراین، با اجرای پیش گرمایش نمونه‌ها در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد، آب آزاد موجود در نمونه‌ها تبخیر شده است. این اقدام منجر به کاهش میزان فشار منفذی، ناشی از تبخیر آب‌های مختلف، تا دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد شده است. طبق نتایج مشاهده می‌شود که مقاومت فشاری نمونه‌ها در هر چهار طرح اختلاط، پس از پیش گرمایش نسبت به مقاومت فشاری ۲۸ روزه قبل از پیش گرمایش تفاوت چندانی ندارند؛ زیرا تبخیر آب آزاد از ساختار بتن هیچ تاثیری در مقاومت فشاری آن ندارد. پس از پیش گرمایش، نمونه‌ها در مدت زمان‌های ۲، ۶، ۲۴ و ۴۸ ساعت در معرض دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند. در این مرحله، نمونه‌ها با نرخ افزایش دمای ۵ درجه بر دقیقه به ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد رسیدند. مطابق با نتایج تست‌های مقاومت فشاری، در تمام طرح‌های اختلاط و در تمام زمان‌های حرارت‌دهی در ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد، صرف نظر از مقدار الباف پلی پروپیلن، مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی در مقایسه با مقاومت فشاری در دمای محیط، ثابت و یا با افزایش همراه بود. این افزایش مقاومت به ویژه در نمونه‌هایی که ۴۸ ساعت در معرض حرارت ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفته بودند، مشهود بود.





شکل ۲: مقاومت فشاری طرح اختلاطها در مدت زمانهای مختلف در معرض حرارت قرار گرفتن

#### تاثیر طول و مقدار الیاف بر مقاومت فشاری بتن

با توجه به هدف این مطالعه که بتن با مقاومت بالا را مورد بررسی قرار داده است، باید توجه داشت که در شرایط دمایی بالا، بتن با مقاومت بالا به طور معمول بیشتر از بتن با مقاومت معمولی تحت تأثیر پوسته‌اندازی و ترک خوردگی قرار می‌گیرد. با اضافه کردن الیاف پلی‌پروپیلن، این اثرات منفی کاهش می‌یابد و خواص مکانیکی بتن در دماهای بالا بهبود می‌یابد. از یک سو، افزودن الیاف پلی‌پروپیلن در طرح اختلاط می‌تواند منجر به ایجاد تخلخل و کاهش کارایی و تراکم بتن شود، که به‌عواقبی همچون کاهش مقاومت فشاری بتن منتهی می‌شود. اما از سوی دیگر، با انتخاب مقدار مناسب این الیاف و تعیین طول‌ها، می‌توان این کاهش مقاومت را به حداقل رساند و در عین حال، اثر پوسته‌اندازی انفجاری بتن را کاهش داد. به عبارت دیگر، می‌توان با انتخاب مقادیر مناسب الیاف و تنظیم طول آن‌ها، کاهش مقاومت فشاری بتن را به حدی که قابل چشم‌پوشی باشد، کاهش داد. در این مطالعه، دو مقدار ۰/۲۲ و ۰/۴۳ درصد از وزن سیمان با طول‌های ۶ و ۱۲ میلی‌متر برای بررسی اثر طول و مقدار الیاف پلی‌پروپیلن بر مقاومت فشاری بتن در شرایط حرارت‌دیده تا ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد انتخاب شده است.

با توجه به نتایج مقاومت فشاری نمونه‌ها که مطابق جدول ۶ پس از پیش‌گرمایش در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد ارائه شده است، در هر چهار طرح اختلاط، تفاوت چندانی در مقاومت فشاری نسبت به حالت قبل از پیش‌گرمایش مشاهده نمی‌شود، زیرا در این

دما تنها آب آزاد تبخیر می شود و هیچ اثری بر روی الیاف ندارد، به ویژه با توجه به اینکه نقطه ذوب الیاف مصرفی ۱۶۰ تا ۱۷۰ درجه سانتی گراد است. بنابراین، در دمای ۱۰۰ درجه سانتی گراد، هیچ اتفاقی برای الیاف رخ نمی دهد و اثری بر مقاومت فشاری بتن ندارد. جزئیات مربوط به نتایج مقاومت فشاری بعد از قرار گرفتن در معرض دمای ۴۰۰ درجه سانتی گراد به مدت زمان های ۲، ۶، ۲۴ و ۴۸ ساعت برای هر طرح اختلاط در جدول ۶ ارائه شده است. مشاهده می شود که برای تمامی مدت های زمانی که نمونه ها در معرض دمای ۴۰۰ درجه سانتی گراد قرار گرفته اند، بهترین مقاومت فشاری مربوط به طرح اختلاط حاوی ۰.۲۳ درصد از وزن سیمان الیاف پلی پروپیلن با طول ۱۲ میلی متر است. بر اساس یافته ها، طرح اختلاط حاوی ۰.۲۳ درصد الیاف با طول ۱۲ میلی متر، بدون توجه به زمان حرارت دهی در دمای ۴۰۰ درجه سانتی گراد، عملکرد بهتری از نظر مقاومت فشاری نسبت به سایر طرح ها از خود نشان می دهد. این امر به دلیل ذوب شدن این الیاف در دمای حدود ۱۷۰ درجه سانتی گراد و ایجاد کانال های بهم پیوسته در ساختار بتن می باشد. علاوه بر این، تغییرات مقاومت فشاری در هر طرح اختلاط در زمان های مختلف حرارت دهی، به اندازه ای که بخار آب از ساختار بتن خارج شود، وابسته است.

جدول ۶: نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه ها

مقاومت فشاری نمونه ها بعد از ۲۸ روز عمل آوری در دمای محیط				
HSC4	HSC3	HSC2	HSC1	طرح اختلاط
۵۲	۵۳	۶۰	۵۴	مقاومت فشاری (مگاپاسکال)
مقاومت فشاری نمونه ها بعد پیش گرمایش در ۱۰۰ درجه سانتی گراد				
HSC4	HSC3	HSC2	HSC1	طرح اختلاط
۵۴	۵۱	۶۰	۵۳	مقاومت فشاری (مگاپاسکال)
۲ ساعت در ۴۰۰ درجه سانتی گراد				
HSC4	HSC3	HSC2	HSC1	طرح اختلاط
۵۱	۵۰	۶۳	۵۸	مقاومت فشاری (مگاپاسکال)
۶ ساعت در ۴۰۰ درجه سانتی گراد				
HSC4	HSC3	HSC2	HSC1	طرح اختلاط
۵۷	۵۷	۶۴	۶۲	مقاومت فشاری (مگاپاسکال)
۲۴ ساعت در ۴۰۰ درجه سانتی گراد				
HSC4	HSC3	HSC2	HSC1	طرح اختلاط
۶۵	۶۱	۶۹	۶۴	مقاومت فشاری (مگاپاسکال)
۴۸ ساعت در ۴۰۰ درجه سانتی گراد				
HSC4	HSC3	HSC2	HSC1	طرح اختلاط
۷۸	۷۶	۸۶	۷۲	میانگین مقاومت فشاری (مگاپاسکال)

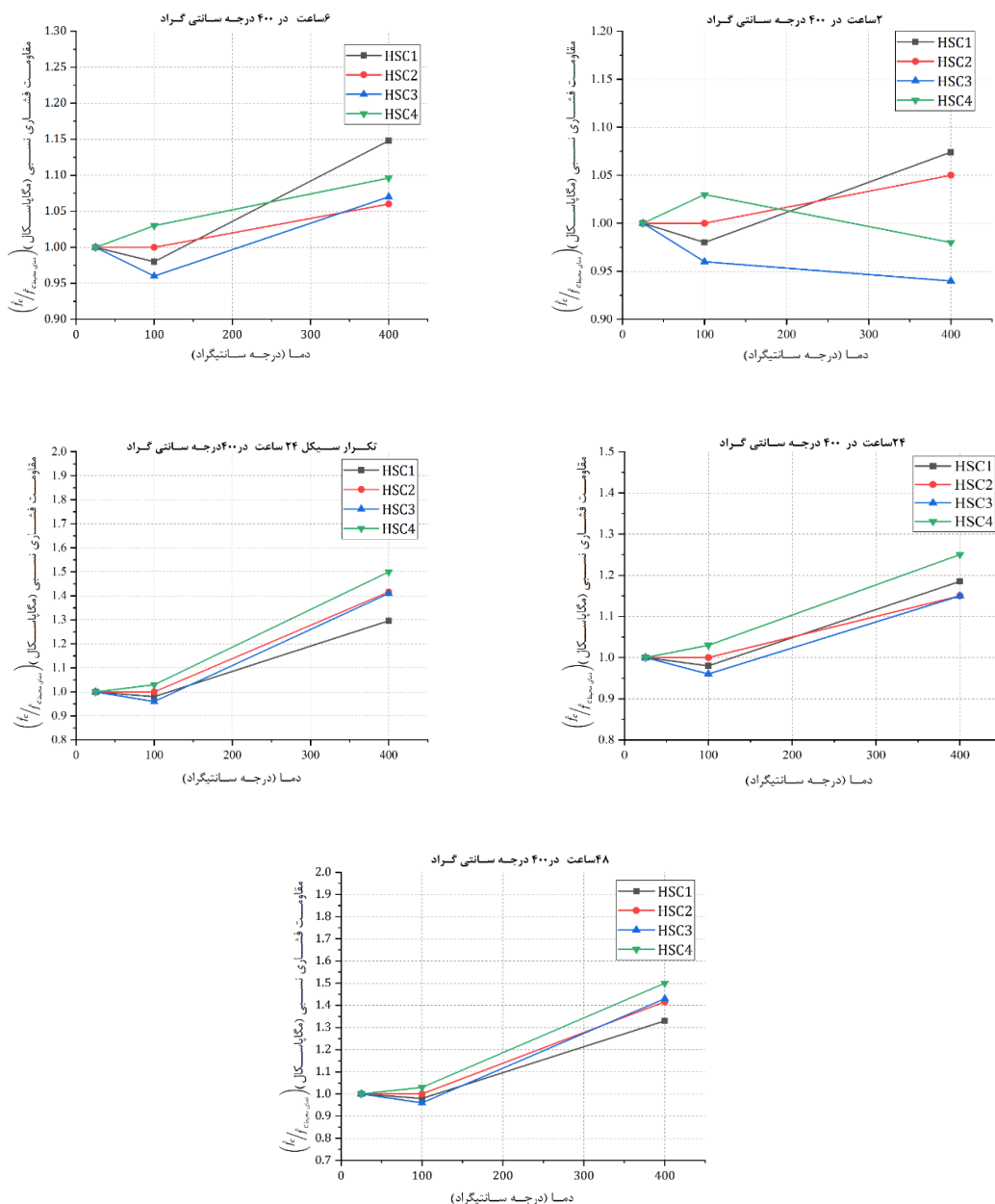
طرح های اختلاط حاوی الیاف با طول ۱۲ میلی متر نسبت به طول ۶ میلی متر، مقاومت فشاری بهتری در تمامی مدت زمان های در معرض حرارت قرار گرفتن از خود نشان دادند. این امر به دلیل طول کوتاه تر الیاف ۶ میلی متر است که نمی توانند کانال های بهم

پیوسته لازم برای خروج بخار آب را ایجاد کنند. الیاف ۱۲ میلی‌متر با ایجاد کانال‌های به هم پیوسته بیشتر با ذوب الیاف، امکان خروج بخار آب بیشتر در دماهای بالا را فراهم می‌کنند و باعث کاهش فشار منفذی، عدم بروز ترک حرارتی و جلوگیری از پدیده پوسته‌اندازی بتن می‌شوند. استفاده از ۰/۲۳ درصد از وزن سیمان الیاف پلی‌پروپیلن نسبت به سایر طرح‌ها، بهبود قابل توجهی در مقاومت بتن ایجاد کرده است. این نتیجه نشان می‌دهد که با افزودن الیاف، عملکرد بتن بهبود می‌یابد. با این حال، افزودن بیش از ۰/۲۳ درصد الیاف منجر به کاهش مقاومت فشاری بتن می‌شود، هرچند که الیاف باعث کاهش فشار منفذی و جلوگیری از پدیده پوسته‌اندازی بتن هستند. علت آن است که استفاده بیش از حد الیاف در طرح اختلاط باعث ایجاد یک سطح مشترک ضعیف بین بتن و الیاف پلی‌پروپیلن به واسطه‌ی چسبندگی سطحی ضعیف این الیاف می‌شود. همچنین، افزودن بیش از اندازه این الیاف، باعث کاهش کارایی بتن نیز خواهد شد (Abaeian et al., 2018; Ríos et al., 2018).

#### مقاومت فشاری نسبی نمونه‌ها

برای مقایسه بهتر مقاومت فشاری نمونه‌ها پس از قرارگرفتن در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت زمان‌های مختلف، مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی در شرایط مختلف نسبت به مقاومت فشاری نمونه‌ها در دمای محیط نرمالیزه شده‌اند. نتایج مربوط به مقایسه مقاومت فشاری نسبی هر طرح اختلاط برای هر مدت زمان در شکل ۳ نشان داده شده است. بر اساس این نتایج، مقاومت فشاری نمونه‌ها پس از ۴۸ ساعت قرارگرفتن در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد، ۳۰ تا ۵۰ درصد افزایش یافته است. نتایج به دست آمده در این بخش با نتایج مطالعات سرانو<sup>۱</sup> و همکاران منطبق هم‌خوانی دارد، آن‌ها نمونه‌های بتنی حاوی الیاف پلی‌پروپیلن با درصدهای مختلف را در معرض مستقیم آتش قرار دادند و مقاومت فشاری نمونه‌ها را بعد از قرار گرفتن در معرض آتش با مقاومت فشاری نمونه‌ها در حالت دمای محیط مقایسه کردند. طبق نتایج سرانو، مقاومت فشاری نمونه‌های تمامی طرح اختلاط‌ها بعد از حرارت دیدن افزایش یافت (Serrano et al., 2016).

<sup>1</sup> Serrano



شکل ۳: مقاومت فشاری نسبی هر طرح اختلاط برای هر مدت زمان

### تاثیر الیاف پلی پروپیلن بر تغییرات ظاهری

همان طور که در شکل ۴ مشاهده می شود، بتن با مقاومت بالا که بدون الیاف است دچار پدیده پوسته اندازی انفجاری شده است. هنگام حرارت دیدن، بتن شروع به از دست دادن آب موجود در ساختار خود می کند. زمانی که سرعت تبخیر آب بیشتر از سرعت

خروج بخار آب از سطح بتن شود، پدیده پوسته‌اندازی رخ می‌دهد. این پدیده در بتن با مقاومت بالا بیشتر اتفاق می‌افتد، زیرا ساختار متراکم‌تر این نوع بتن مانع حرکت بخار آب درون آن می‌شود و فشار منفذی داخلی ایجاد می‌کند.



شکل ۴: تغییرات ظاهری نمونه‌های شاهد بدون الیاف بعد از حرارت دیدن

همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، برخلاف بتن با مقاومت بالا و بدون الیاف، نمونه‌های حاوی الیاف پلی‌پروپیلن با مقادیر و طول‌های مختلف در تمامی مدت زمان‌های قرارگرفتن در معرض دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد هیچ ترک قابل توجه یا پدیده پوسته‌اندازی انفجاری نشان نداده‌اند. این امر به این دلیل است که الیاف با هر مقدار و طول خود، با ذوب شدن کانال‌های لازم برای خروج بخار آب را ایجاد کرده و عامل اصلی پدیده، یعنی فشار بخار آب، را از بین برده‌اند.



شکل ۵: نتیجه ظاهری نمونه‌های قرار گرفته در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد در مدت زمان‌های مختلف

### بحث و نتیجه‌گیری

در این مطالعه، رفتار بتن با مقاومت بالا در برابر دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲، ۶، ۲۴ و ۴۸ ساعت مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که برخلاف انتظار، قرارگیری بتن در معرض دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد در زمان‌های مختلف، نه تنها باعث افت مقاومت فشاری آن نشد، بلکه منجر به افزایش مقاومت نیز گردید. این پدیده ناشی از آن است که در دماهای پایین‌تر از ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد، تجزیه هیدروکسید کلسیم به طور قابل توجهی آغاز نمی‌شود و آهک زنده حاصل از این تجزیه، پس از خنک

شدن نمونه، آسیبی به آن وارد نمی‌کند (Hager, 2013; Mehta & Monteiro, 2006). بنابراین، فشار بخار ایجاد شده عاملی است که موجب آسیب به بتن با مقاومت بالا می‌شود. در این مطالعه با کنترل سرعت افزایش دما و همچنین افزودن الیاف پلی‌پروپیلن به طرح اختلاط، که با ذوب شدن در دماهای ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد، کانال‌های به هم پیوسته ایجاد می‌کند، امکان خروج بخار آب از ساختار بتن فراهم شده است. این اقدام با کاهش فشار منفذی در ساختار بتن، نه تنها مانع کاهش مقاومت فشاری بتن در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌شود، بلکه حتی موجب افزایش آن نیز شده است. دلیل افزایش مقاومت فشاری بتن در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد به ساختار خمیر سیمانی باز می‌گردد که بخشی از آن، از دانه‌های هیدراته‌نشده تشکیل شده است. این دانه‌ها به دلیل ایجاد شرایط اتوکلاو داخلی در اثر دمای بالا و تبخیر آب، امکان هیدراته شدن بدون حضور آب را پیدا می‌کنند. این پدیده اثرات آسیب حرارتی به بتن را خنثی کرده و خواص مکانیکی آن را بهبود می‌بخشد. این موضوع به ویژه در بتن با مقاومت بالا، که نفوذپذیری کمی دارد و در برابر حرکت رطوبت مقاومت می‌کند، بیشتر صدق می‌کند. دلایل ذکر شده با نتایج آزمایش‌های کدور مطابقت دارند (Kodur, 2014). افزایش بیشتر مقاومت فشاری نمونه‌ها در شرایط قرارگرفتن ۴۸ ساعته در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد به این دلیل است که مدت زمان بیشتر، فرصت هیدراته شدن کامل دانه‌های هیدراته‌نشده سیمان را فراهم می‌کند. عدم کاهش و حتی افزایش مقاومت فشاری مشاهده شده در تست نمونه‌هایی که برای مدت‌های مختلف در معرض دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند، با نتایج مطالعات هگر و همکاران، کودر<sup>۱</sup> و همکاران، ماء<sup>۲</sup> و همکاران و ریس<sup>۳</sup> و همکاران مطابقت دارد (Hager, 2013; Kodur, 2014; Ma et al., 2015; Ríos et al., 2018). نتایج نشان داد که استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن باعث جلوگیری از پدیده پوسته‌اندازی بتن می‌شود. الیاف با مقدار ۰.۲۳ درصد از وزن سیمان، بهترین مقاومت فشاری را در تمام مدت زمان‌های قرارگیری در معرض حرارت نشان داده‌اند. الیاف با طول بلندتر نیز مقاومت بهتری را در تمامی مدت زمان‌های قرارگیری در معرض حرارت از خود نشان داده‌اند. دلیل این امر این است که الیاف بلندتر پس از ذوب شدن در دمای ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد، کانال‌های به هم پیوسته بیشتری ایجاد می‌کنند و امکان خروج بخار آب بیشتری را در دماهای بالا فراهم می‌سازند. نتایج به دست آمده در این بخش با نتایج تحقیقات مالوک و همکاران همخوانی دارد (Maluk et al., 2017). طبق این نتایج، بهترین طرح اختلاط بدون تأثیر منفی بر کارایی و مقاومت فشاری، حاوی ۰.۲۳ درصد از وزن سیمان الیاف با طول ۱۲ میلی‌متر است. این مقدار الیاف ضمن جلوگیری از پوسته‌اندازی بتن، با ایجاد امکان خروج بخار آب از ساختار بتن با مقاومت بالا، باعث بهبود مقاومت فشاری بتن در مدت زمان‌های طولانی‌تر قرار گرفتن در معرض دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد شده است. با توجه به اینکه مطالعه در زمینه مدت زمان قرار گرفتن در معرض حرارت جدید است، تعمیم این موضوع می‌تواند نتایج جدیدی را برای استفاده در تکنولوژی‌های نوین فراهم آورد. برای تعمیم نتایج به دست آمده در این مطالعه، پیشنهادات زیر ارائه می‌شود:

- برای بررسی اینکه آیا کاهش مقاومت در سیکل‌های حرارتی بعدی رخ می‌دهد یا خیر، نیاز به انجام تکرار سیکل‌های حرارتی بیشتر است. در صورت وقوع کاهش مقاومت، باید تعداد سیکل‌هایی که این کاهش ادامه دارد، بررسی شود.
- بررسی تأثیر مدت زمان‌های بیشتر در معرض دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد بر مقاومت فشاری بتن.
- بررسی دیگر خواص مکانیکی بتن از جمله مقاومت کششی، مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته در شرایط مطرح شده مطالعه حاضر.

<sup>1</sup> Kodur

<sup>2</sup> Ma

<sup>3</sup> Ríos



- بررسی رفتار ریزساختار بتن با مقاومت بالا طبق شرایط دیگر ارائه شده در این مطالعه توسط آزمایش‌های SEM<sup>1</sup>، VTNRD<sup>2</sup>، DTA و TGA، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. زیرا ساختار پیچیده بتن باعث می‌شود که بتن در شرایط‌های مختلف رفتار متفاوتی از خود نشان دهد. با بررسی رفتار ریزساختاری، می‌توان جزئیات تغییرات در فرایند آزمایش را مشاهده کرد و علت رفتار بتن در هر شرایط را پیدا کرد.
- شرایط این مطالعه می‌تواند برای دماهای بالاتری مانند ۶۰۰، ۸۰۰ و ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد تعمیم داده شود. با این حال، باید توجه داشت که برای دماهای بالاتر، عوامل آسیب‌زا دیگری نیز ممکن است ایجاد شود که نیاز به کنترل دقیق تر دارد.

## منابع

- بیگی، مرتضی حسینعلی؛ رحمانی، ابراهیم و نیک‌بین، ایمان محمدپور. (۱۳۹۳). تکنولوژی عالی بتن. انتشارات علوم رایانه.
- Abaeian, R., Behbahani, H. P., & Moslem, S. J. (2018). Effects of high temperatures on mechanical behavior of high strength concrete reinforced with high performance synthetic macro polypropylene (HPP) fibres. *Construction and Building Materials*, 165, 631-638.
- Alonso, M. C., Vera-Agullo, J., Guerreiro, L., Flor-Laguna, V., Sanchez, M., & Collares-Pereira, M. (2016). Calcium aluminate based cement for concrete to be used as thermal energy storage in solar thermal electricity plants. *Cement and Concrete Research*, 82, 74-86.
- ASTM, *Standard Terminology Relating to Water*, in *ASTM D1129-13(2020)*. 2020: ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM, *Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete*, in *ASTM C143*. 2020: ASTM International, West Conshohocken, PA
- ASTM, (2003). Standard specification for concrete aggregates. *Philadelphia, PA: American Society for Testing and Materials*.
- Behbahani, H. P., Nematollahi, B., Sam, A. R. M., & Lai, F. (2012). Flexural behavior of steel-fiber-added-RC (SFARC) beams with C30 and C50 classes of concrete. *International Journal of Sustainable Construction Engineering and Technology*, 3(1), 54-64.
- Biolzi, L., Cattaneo, S., & Rosati, G. (2008). Evaluating residual properties of thermally damaged concrete. *Cement and Concrete Composites*, 30(10), 907-916.
- Chan, Y., Peng, G., & Anson, M. (1999). Residual strength and pore structure of high-strength concrete and normal strength concrete after exposure to high temperatures. *Cement and Concrete Composites*, 21(1), 23-27.
- Cheng, F.-P., Kodur, V., & Wang, T.-C. (2004). Stress-strain curves for high strength concrete at elevated temperatures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 16(1), 84-90.
- Hager, I. (2013). Behaviour of cement concrete at high temperature. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*(1).
- Hager, I., & Tracz, T. (2010). The impact of the amount and length of fibrillated polypropylene fibres on the properties of HPC exposed to high temperature. *Archives of Civil Engineering*, 56(1), 57-68.
- Kodur, V. (2014). Properties of concrete at elevated temperatures. *International Scholarly Research Notices*, 2014.
- Kodur, V., & Raut, N. (2010). Performance of concrete structures under fire hazard: emerging trends. *The Indian Concrete Journal*, 84(2), 23-31.
- Lau, A., & Anson, M. (2006). Effect of high temperatures on high performance steel fibre reinforced concrete. *Cement and Concrete Research*, 36(9), 1698-1707.

<sup>1</sup> Scanning Electron Microscope

<sup>2</sup> Variable Temperature X-Ray Powder Diffractometry

- Lee, J.-H. (2017). Influence of concrete strength combined with fiber content in the residual flexural strengths of fiber reinforced concrete. *Composite Structures*, 168, 216-225.
- Li, X., Li, Z., Onofrei, M., Ballivy, G., & Khayat, K. H. (1999). Microstructural characteristics of HPC under different thermo-mechanical and thermo-hydraulic conditions. *Materials and structures*, 32, 727-733.
- Lin, W.-M., Lin, T., & Powers-Couche, L. (1996). Microstructures of fire-damaged concrete. *Materials Journal*, 93(3), 199-205.
- Ma, Q., Guo, R., Zhao, Z., Lin, Z., & He, K. (2015). Mechanical properties of concrete at high temperature—A review. *Construction and Building Materials*, 93, 371-383.
- Maluk, C., Bisby, L., & Terrasi, G. P. (2017). Effects of polypropylene fibre type and dose on the propensity for heat-induced concrete spalling. *Engineering Structures*, 141, 584-595.
- Mehta, P. K., & Monteiro, P. (2006). Concrete: microstructure, properties, and materials. (*No Title*).
- Phan, L. T., Lawson, J. R., & Davis, F. L. (2001). Effects of elevated temperature exposure on heating characteristics, spalling, and residual properties of high performance concrete. *Materials and structures*, 34, 83-91.
- Ríos, J. D., Cifuentes, H., Leiva, C., García, C., & Alba, M. D. (2018). Behavior of high-strength polypropylene fiber-reinforced self-compacting concrete exposed to high temperatures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(11), 04018271.
- Serrano, R., Cobo, A., Prieto, M. I., & de las Nieves González, M. (2016). Analysis of fire resistance of concrete with polypropylene or steel fibers. *Construction and Building Materials*, 122, 302-309.



## Evaluation of the Long-Term Stability of Concrete with Polymer Fibers at High Temperatures

**Golayem Nazari**

**M.Sc., Civil Engineering, Department of Civil  
Engineering, Noshirvani University of Technology,  
Babol, Mazandaran, Iran**

**Javad Vaseghi Amiri**

**Professor, Department of Civil Engineering,  
Noshirvani University of Technology, Babol,  
Mazandaran, Iran**

### **Abstract**

In this study, the behavior of high-strength concrete containing polypropylene fibers has been investigated for use in new technologies that require exposure to high temperatures for long periods of time, such as thermal energy storage system. It examines the mechanical properties of high-strength concrete containing polypropylene fibers with different lengths and amounts after heating to 400°C for 2, 6, 24, and 48 hours. Additionally, the effect of using fibers on explosive spalling of concrete at 400°C for the mentioned durations is investigated. The results indicated that the compressive strength of the specimens increased after heating to 400°C. The specimens with 0.23% of the cement weight in 12 mm long polypropylene fibers exhibited the highest compressive strength. Explosive spalling was not observed in any specimens containing polypropylene fibers with different amounts and lengths at 400°C.

**Keywords:** High Strength Concrete, High Temperature, Polypropylene Fibers, Exposure Time of High Temperatures