

## بررسی تأثیر درجه حرارت بالا بر خواص سخت شده بتن خودتراکم حاوی افزودنی‌های پودری دو جزئی

جواد برنجیان  
استادیار دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل  
نینا تیلا  
کارشناس ارشد موسسه آموزش عالی طبری بابل  
محمد جواد طاهری امیری\*  
دانشجوی دکتری دانشگاه صنعتی بابل  
علی اشرفیان  
دانشجوی کارشناسی ارشد موسسه آموزش عالی طبری بابل

### چکیده

در این تحقیق به بررسی تأثیر درجه حرارت بالا بر خواص سخت شده بتن خودتراکم حاوی افزودنی‌های پودری مختلف پرداخته شده است. بدین منظور برای بتن خودتراکم شاهد (فاقد پوزولان) از طرح اختلاطی مطابق با دستورالعمل ACI 237R-07 استفاده شده است. ابتدا به منظور اطمینان از ارضای رواداری مربوط به کنترل کیفی بتن خودتراکم در حالت تازه، آزمایش‌های جریان اسلامپ، جعبه L، T<sub>50</sub> و قیف V، بر روی تمامی مخلوط‌های ساخته شده انجام گرفت. سپس بتن سخت شده حاوی مواد معدنی مختلف (متاکائولن، خاکستر بادی، زئولیت، دوده سیلیس) تحت درجه حرارت بالا (۳۰۰، ۵۰۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد) قرار داده شد و توسط آزمایش مقاومت فشاری در سن ۹۱ روزه، خواص مکانیکی بتن ارزیابی شده است. علاوه بر این آزمایش سرعت پالس فراصوتی (امواج اولتراسونیک) به عنوان یکی از روش‌های غیرمخرب برای تخمین مقاومت فشاری نمونه‌ها ارائه گردیده است.

واژه‌های کلیدی: بتن خود تراکم، خواص سخت شده، افزودنی‌های پودری، درجه حرارت بالا.

\* نویسنده مسئول: ali\_ashrafian@yahoo.com

## ۱- مقدمه

پرتلند معمولی و بیبره شده می‌باشد [۱۴-۱۶]. مطالعات مشابه دیگر، مرتبط با خطر حرارت بالا بر بتن خودتراکم بوسیله پژوهشگران مختلف انجام شده است. لی و همکاران، تاثیر دمای بالا بر بتن خودتراکم حاوی سرباره کوره آهنی با نسبت جایگزینی سیمان ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد را مورد بررسی قرار دادند. نتیجه این مطالعه نشان داد تا دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد مقاومت فشاری بتن پرتلند معمولی، بیشتر از نمونه حاوی سرباره بوده اما با افزایش دما به ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد، نمونه‌های حاوی ۰ تا ۵۰ درصد وزنی سرباره جایگزین سیمان، دچارافت مقاومت فشاری تا ۴۱ درصد مقاومت فشاری اولیه شده اند [۱۷]. مطالعه مشابه دیگری توسط پاتاگ و صدیق بر روی خواص سخت شده بتن خودتراکم حاوی پودر خاکستر بادی با نسبت جایگزینی ۳۰ تا ۵۰ درصد، در معرض دمای بالا انجام پذیرفته است. ایشان اثر دما بر بتن خودتراکم را در محدوده ۲۷ تا ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج نشان داد کاهش درصد جایگزینی پودر خاکستر بادی از ۵۰ به ۳۰، موجب درصد بهبود مقاومت فشاری و کششی ۲۸ روزه شده است. این پژوهش تحت دو محدوده دمایی ۲۷-۲۰۰ و ۲۰۰-۳۰۰ مورد بررسی بیشتر قرار گرفت که نتایج نشان داد این بهبود خواص سخت شده در دمای ۲۰۰ تا ۳۰۰ درمقایسه با ۲۷-۲۰۰ مشخص تر بوده است [۱۸]. فرس و همکاران، مطالعه‌ای بر روی رفتار بتن خودتراکم تحت دمای بالا انجام دادند. در این مطالعه، دو مخلوط خودتراکم و یک مخلوط بتن و بیبره شده در دمای ۱۵۰ تا ۶۰۰ درجه مورد بررسی قرار گرفت. ایشان گزارش کردند در محدوده دمایی ۱۵۰ تا ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد، ترک‌های ریزی برای اولین بار با توجه به خروج آب از هیدرات‌های مختلف به عنوان عامل افزایشده تخلخل مشاهده شد. برای بتن تحت شرایط دمایی بالاتر از ۳۰۰ درجه سانتی-گراد ریزساختار بتن رو به وخامت گذاشته که این امر در نتیجه تغییرات بلورها موجب افزایش تخلخل ۷ درصد شده است [۳]. هدف اصلی در این مقاله، تاثیر دمای بالا بر خواص مکانیکی بتن خودتراکم حاوی افزودنی‌های پودری متاکائولن، زئولیت، میکروسیلیس و پودر خاکستر بادی بوده است. از این رو در این مطالعه خواص مقاومتی سخت شده دراز مدت بتن خودتراکم تحت حرارت بالا شامل مقاومت فشاری و سرعت پالس اولتراسونیک تحت محدوده دمایی ۲۰-۳۰۰ و ۳۰۰-۷۰۰ درجه سانتی‌گراد مورد بررسی قرار گرفت.

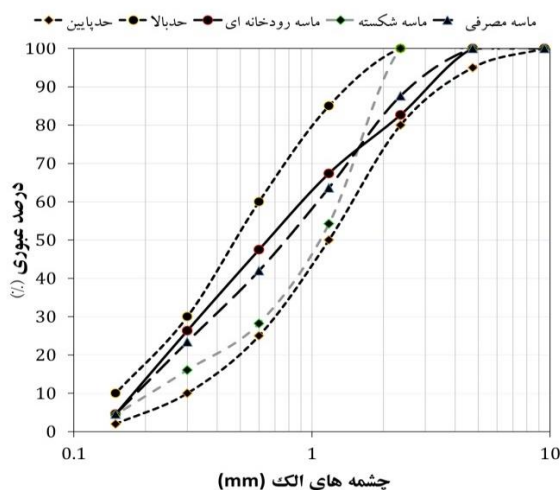
دوام سازه در برابر آتش به عنوان مشخصه یک ساختمان، برای تحمل آتش و حفاظت از آن تعریف می‌شود [۱]. قدرت تخریب آتش ناشی از میزان انرژی حرارتی آزاد شده در هنگام آتش سوزی است. بخشی از این گرما در فضای آتش پخش می‌شود و مابقی جذب مواد ساختمانی و اعضاء شده و در نتیجه اعضاء سازه ای استحکام مکانیکی خود را از دست می‌دهند و در یک دمای بحرانی تخریب و یا آسیب جدی به آنها وارد می‌شود. تراکم بالای آرماتور در سازه‌های ساخته شده با بتن خودتراکم ریسک تخریب و جاری شدن عضو سازه ای رو بیشتر میکند. میزان خسارت ناشی از آتش، ارتباط مستقیم با مدت و دمای ایجاد شده دارد [۲]. در صورت بروز آتش سوزی، بتن در معرض دمای بالا با ترک خوردگی، پوسته شدن و کاهش مقاومت و در نتیجه گسیختگی و فروپاشی درونی مواجه می‌شود [۳]. هنگامی که بتن تحت حرارت بالا قرار می‌گیرد، تغییرات فیزیکی-شیمیایی در آن ایجاد می‌شود. این تغییرات ابتدا در خمیر سیمان سخت شده رخ می‌دهد که از تجزیه هیدروکسید کلسیم در دمای ۴۰۰ درجه آغاز می‌گردد و تا خرابی ژل سیلیکات کلسیم هیدراته شده در دمای ۹۰۰ درجه ادامه می‌یابد. بتن در دمای بالا، به علت آب موجود در آن دچار خوردگی می‌شود. فشار بخار در بتن، بخصوص بتن‌های با چگالی بالا در اثر تنش‌های حرارتی موجب خوردگی شده است. برخی تحقیقات، فشار منفذی را برای بتن معمولی، کمتر از ۱ مگاپاسکال عنوان کرده اما در بتن خودتراکم این فشار ۲-۳ مگاپاسکال نیز بیشتر می‌شود [۵ و ۴]. توانایی‌ها و مشخصات فوق‌العاده بتن خودتراکم به سرعت آن را به یکی از انواع پرکاربرد بتن تبدیل کرده است. علاوه بر کاهش زمان اجرا و هزینه‌های آن، تراکم فوق‌العاده آن و پوشش کامل آرماتورها توسط بتن، باعث محافظت بهتر آرماتورها در سازه‌های بتن مسلح و در نتیجه افزایش طول عمر سازه بوده است [۶ و ۷]. مواد پودری جایگزین سیمان در این نوع بتن مانند متاکائولن، میکروسیلیس، زئولیت و پودر خاکستر بادی به علت خاصیت پوزولانی موجب کارایی بالا، گرانی مناسب و عدم جداشدگی سنگدانه‌ها شده است. تاثیر این مواد جایگزین سیمان بر خواص سخت شده بتن خودتراکم در کوتاه مدت و بلندمدت مورد توجه پژوهشگران مختلف در سراسر دنیا بوده است [۸-۱۳]. نتایج مطالعات نویسندگان نشان داده تاثیر حرارت ناشی از آتش سوزی بر بتن خودتراکم بسیار بیش تر از بتن

## ۲- مشخصات مصالح و کارهای آزمایشگاهی انجام شده

### ۲-۱- مصالح مورد استفاده

به طور کلی سنگدانه‌هایی که دارای منحنی دانه‌بندی پیوسته‌ای باشند، به گونه‌ای که برخی از اندازه دانه‌ها در آن‌ها بسیار کم و یا بسیار زیاد نباشد، رضایت بخش‌ترین نتایج را بدست می‌دهند. بدین منظور برای دانه‌بندی بتن خودتراکم آئین‌نامه ACI 237R-07 با توجه به حداکثر اندازه سنگدانه به کار رفته دو نوع منحنی دانه‌بندی پیشنهاد می‌دهد. برای حالتی که اندازه سنگدانه‌ها بزرگتر از ۱۲/۵ میلی‌متر باشد، دانه‌بندی برای بتن خودتراکم باید از نوع دانه‌بندی پیشنهادی ACI 302.1R استفاده شود و برای حالت دوم که حداکثر اندازه سنگدانه‌ها ۱۲/۵ میلی‌متر می‌باشد، از نوع دانه‌بندی پیشنهادی در ACI 211 استفاده گردد [۱۹]. شن به کار گرفته شده در ساخت بتن خودتراکم از نوع شکسته با حداکثر اندازه ۱۲/۵۰ میلی‌متر بوده است. همچنین چگالی ویژه شن بکار رفته برابر ۲/۵۹ بوده است. ماسه مصرفی در این پژوهش از دونوع شکسته دولومیتی و شسته رودخانه‌ای با مدول نرمی ۲/۷۹ می‌باشد. شکل (۱) منحنی دانه‌بندی ماسه مصرفی در این تحقیق را به تصویر کشیده است. همچنین مشخصات فیزیکی سنگدانه‌های مصرفی در این تحقیق در جدول شماره (۱) گزارش شده است. سیمان مورد استفاده از نوع سیمان

پرتلند تپ دو ساخت کارخانه سیمان مازندران (نکا) می‌باشد. دانسیته سیمان مذکور برابر با ۳/۱۵ بوده، همچنین خواص فیزیکی این نوع سیمان در جدول (۲) آورده شده است. منبع زئولیت استفاده شده در این تحقیق (نوع کلینوتیپولیت) از معادن شمال سمنان می‌باشد. زئولیت (ZE) مورد استفاده، چگالی ویژه ۲/۳ و زرد رنگ می‌باشد که در ساخت آزمون‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. خاکستر بادی (FA) مورد استفاده، با چگالی ویژه ۲/۲۲ و کرم رنگ می‌باشد و محصول کشور آفریقای جنوبی بوده که در ساخت آزمون‌ها مورد استفاده شده است. همچنین دوده سیلیس (SF) به کار رفته در این تحقیق از شرکت تولیدی آلیاژ فرو-سیلیکون ازنا، با چگالی ویژه ۲ و طوسی رنگ می‌باشد که در ساخت آزمون‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. متاکائولن (MK) با چگالی ویژه ۲/۶ و رنگ سفید در ساخت آزمون‌ها بکار گرفته شده است. آنالیز شیمیایی سیمان و پوزولان‌های بکار رفته در این پژوهش در جدول (۳) گزارش شده است. در این تحقیق از فوق روان‌کننده (SP) نسل سوم بر پایه پلی‌کربوکسیلات، استفاده شده است، این ماده، کدر و ابری رنگ بوده و در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد، وزن مخصوص آن ۱/۱ گرم بر سانتیمتر مکعب می‌باشد.



شکل ۱- نمودار منحنی دانه بندی ماسه

جدول ۱- مشخصات فیزیکی سنگدانه‌ها

سنگدانه	جنس	چگالی	درصد جذب آب	حداکثر قطر سنگدانه (mm)
شن (G)	شکسته دولومیت آمل	۲/۶۰	۱/۸	۱۲/۵
ماسه (S)	شکسته دولومیتی + شسته رودخانه‌ای	۲/۵۸	۲/۳	۵

جدول ۲- خواص فیزیکی سیمان تپ دو

مقدار مشخصه فیزیکی	مشخصات فیزیکی سیمان مازندران (نکا)
۱۰۰ دقیقه	زمان گیرش اولیه
۱۸۰ دقیقه	زمان گیرش نهایی
۲۲۰ kg/cm <sup>2</sup>	مقاومت ۳ روزه
۳۹۰ kg/cm <sup>2</sup>	مقاومت ۷ روزه
۵۲۰ kg/cm <sup>2</sup>	مقاومت ۲۸ روزه

جدول ۳- درصد ترکیبات شیمیایی سیمان و مواد پوزولانی مورد استفاده

مصالح	L.O.I	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	MgO	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>
سیمان	۱/۰۵	۰/۶۳	۰/۳۸	۲/۰۴	۱/۲	۶۴/۰۷	۳/۱۹	۴/۹۵	۲۱/۲۵
زئولیت	۱۰/۲۳	۱/۴۲	۲/۰۴	۰/۵۰	۱/۲۰	۱/۶۸	۱/۴۴	۱۳/۶۶	۶۷/۷۹
خاکستر بادی	۰/۷	۱/۴۰	۰/۲۴	۰/۱۳	۰/۶۳	۱/۰۵	۴/۹۸	۲۸/۸	۶۱/۳
دوده سیلیس	۱/۵۸	-	-	۰/۰۵	۱/۶	-	۰/۷۲	۱/۱۳	۹۳/۱۶
متاکائولن	۰/۷	۰/۰۳	۹/۱	-	۰/۰۳	۰/۰۹	۰/۸	۴۴/۷	۵۲/۱

## ۲-۲- طرح اختلاط

می‌شود. بنابراین ترکیبات دو جزئی مواد پودری به این صورت تعریف می‌شوند که علاوه بر سیمان، پودر دیگری نیز به عنوان جزء دوم وجود دارد که در تحقیق حاضر جایگزین درصدی از وزن سیمان شده است. در طرح اختلاط مورد استفاده برای این تحقیق، مقادیر جایگزینی برای مواد پودری متاکائولن و خاکستر بادی هر کدام ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد وزنی سیمان و برای مواد پودری دوده سیلیس و زئولیت هر کدام ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد وزنی سیمان می‌باشد. جدول (۴) شرح کامل برنامه طرح اختلاط را شرح داده است.

## ۳- نحوه عمل آوری و نگهداری نمونه‌ها

در این تحقیق نمونه‌های بتنی در داخل حوضچه آب در دمای  $20 \pm 5$  نگهداری شدند. و پس از ۹۱ روز از حوضچه خارج شده و در دستگاه گرمکن در دمای ۱۰۵ درجه سانتی گراد خشک شدند. پس از آن نمونه‌ها در داخل کوره تحت دمای ۳۰۰، ۵۰۰ و ۷۰۰ درجه سانتی گراد قرار گرفتند. نرخ افزایش دما برای نمونه‌ها  $1 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{min}$  تعیین شده است. برای حصول اطمینان از صحت نفوذ درجه حرارت در مرکز نمونه‌های بتنی، نمونه پس از قرار گرفتن تحت درجه حرارت‌های مذکور، به مدت ۱ ساعت در همان درجه حرارت نگهداشته شد. سپس دمای نمونه‌های حرارت دیده شده به آرامی به دمای محیط رسانده و تغییرات در خواص مکانیکی بتن با توجه به تأثیر درجه حرارت بالا بر روی نمونه‌های بتنی مورد بررسی قرار گرفته شد.

در این بخش به منظور بررسی تأثیر درجه حرارت بالا بر خواص سخت شده بتن خودتراکم حاوی مواد پودری، ۱۳ طرح اختلاط که شامل چهار نوع افزودنی (متاکائولن، دوده سیلیس، خاکستر بادی و زئولیت) با نسبت وزنی آب به مواد پودری (W/P) ۰/۳۴ می‌باشند، پیش‌بینی شده است. افزودنی‌های یاد شده به حالت ترکیبات دو جزئی مواد پودری به صورت وزنی جایگزین سیمان شده‌اند. به لحاظ تفاوت وزن مخصوص سیمان با افزودنی‌های معدنی مورد استفاده تا حدودی حجم خمیر سیمان تغییر می‌کند. این تغییر اگر چه در مقیاس انجام این تحقیق کوچک به نظر می‌رسد، ولی به منظور افزایش دقت در نتایج آزمایشگاهی و حصول اطمینان از اینکه تغییرات نتایج در دماهای مشابه، مربوط به تغییر جنس پودرهای مورد استفاده می‌باشد و نه تغییر حجم پودر، بنابراین ضرایب اصلاحی با توجه به وزن مخصوص افزودنی‌های معدنی مورد استفاده برای نسبت‌های ماسه و شن در نظر گرفته شده است.

عیار سیمان در طرح شاهد ۵۰۰ می‌باشد، در نتیجه مقدار مواد پودری در تمامی طرح‌ها ۵۰۰ کیلوگرم در متر مکعب ثابت نگه داشته شده است. با توجه به اینکه مواد پودری مورد استفاده در طرح شاهد فقط سیمان می‌باشد، این طرح با نام تک جزئی شناخته

جدول ۴- طرح اختلاط مخلوط‌های دو جزئی

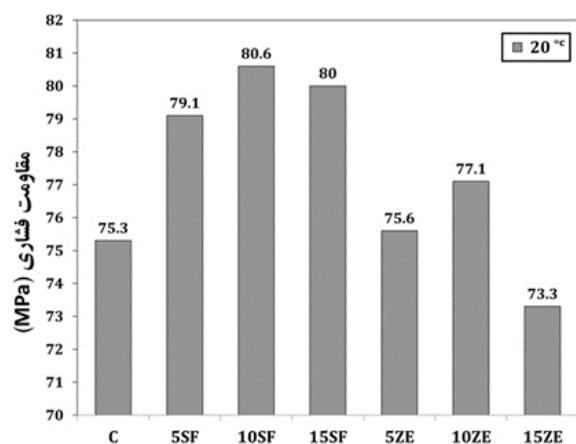
	TYPE	W/P	C	MK	FA	SF	ZE	G	S (1)	S (2)	SP
			kg / m <sup>3</sup>	kg / m <sup>3</sup>	kg / m <sup>3</sup>	kg / m <sup>3</sup>	kg / m <sup>3</sup>	kg / m <sup>3</sup>	kg / m <sup>3</sup>	kg / m <sup>3</sup>	kg / m <sup>3</sup>
۱	C	۰/۳۴	۵۰۰	۰	۰	۰	۰	۸۳۳/۰	۵۵۰/۲	۳۶۶/۸	۱
۲	10MK	۰/۳۴	۴۵۰	۵۰	۰	۰	۰	۸۲۳/۳	۵۴۳/۸	۳۶۲/۵	۱
۳	20MK	۰/۳۴	۴۰۰	۱۰۰	۰	۰	۰	۸۱۹/۱	۵۴۱/۰	۳۶۰/۷	۱/۴
۴	30MK	۰/۳۴	۳۵۰	۱۵۰	۰	۰	۰	۸۱۵/۰	۵۳۸/۳	۳۵۸/۹	۱/۵
۵	10FA	۰/۳۴	۴۵۰	۰	۵۰	۰	۰	۸۱۹/۲	۵۴۱/۱	۳۶۰/۷	۱
۶	20FA	۰/۳۴	۴۰۰	۰	۱۰۰	۰	۰	۸۱۱/۰	۵۳۵/۷	۳۵۷/۱	۰/۹
۷	30FA	۰/۳۴	۳۵۰	۰	۱۵۰	۰	۰	۸۰۲/۸	۵۳۰/۳	۳۵۳/۵	۰/۷
۸	5SF	۰/۳۴	۴۷۵	۰	۰	۲۵	۰	۸۲۱/۸	۵۴۲/۸	۳۶۱/۹	۱/۱
۹	10SF	۰/۳۴	۴۵۰	۰	۰	۵۰	۰	۸۱۶/۲	۵۳۹/۱	۳۵۹/۴	۱/۲
۱۰	15SF	۰/۳۴	۴۲۵	۰	۰	۷۵	۰	۸۱۰/۵	۵۳۵/۴	۳۵۶/۹	۱/۵
۱۱	5ZE	۰/۳۴	۴۷۵	۰	۰	۰	۲۵	۸۲۳/۸	۵۴۴/۱	۳۶۲/۷	۱/۱
۱۲	10ZE	۰/۳۴	۴۵۰	۰	۰	۰	۵۰	۸۲۰/۲	۵۴۱/۷	۳۶۱/۱	۱/۳
۱۳	15ZE	۰/۳۴	۴۳۵	۰	۰	۰	۷۵	۸۱۶/۶	۵۳۹/۳	۳۵۹/۶	۱/۶

## ۴- بررسی خواص رئولوژی بتن خودتراکم

## ۵- بررسی خواص سخت شده بتن خودتراکم

## ۱-۱- تحلیل نتایج مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری در سن ۹۱ روز بر روی نمونه‌های مکعبی به ابعاد ۱۰×۱۰×۱۰ سانتی‌متر انجام شد. نتایج آزمایش مقاومت فشاری در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد برای مخلوط‌های حاوی خاکستر بادی و متاکائولن در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۲- نمودار نتایج آزمایش مقاومت فشاری مخلوط‌های حاوی متاکائولن و خاکستر بادی در سن ۹۱ روز

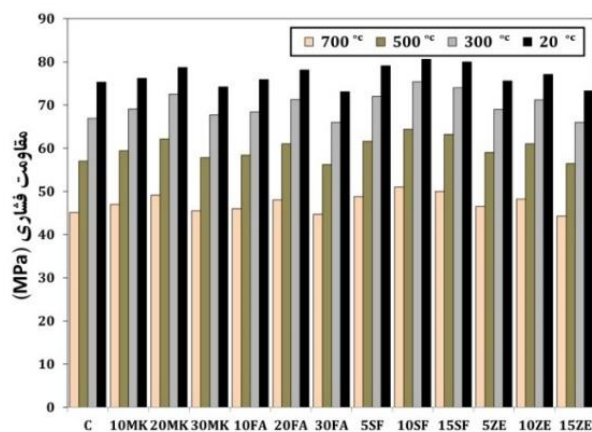
مقایسه نتایج آزمایش مقاومت فشاری در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد برای مخلوط‌های متاکائولن و خاکستر بادی نشان می‌دهد که جایگزینی هر یک از پوزولان‌های یاد شده تا ۲۰ درصد، سبب افزایش

در این تحقیق ابتدا طرح‌های اختلاط با توجه به معیارهای کارایی آیین‌نامه افنارک [۲۰] برای بتن تازه مورد بررسی قرار گرفته شد. به دلیل مشخصات ویژه بتن خودتراکم، مخلوط‌های بتن خودتراکم توسط آزمایش‌های بتن تازه از جمله آزمایش جریان اسلامپ، قیف V شکل، جعبه L شکل و آزمایش T<sub>50</sub> مورد کنترل واقع شده‌اند. نتایج آزمایش‌های بتن تازه در جدول (۵) گزارش شده است.

جدول ۵- نتایج آزمایش‌های بتن تازه

نام طرح	T <sub>50</sub>	جعبه L شکل	قیف V شکل	جریان اسلامپ
C	۳	۰/۷۶	۷/۵	۶۴۰
10MK	۳	۰/۷۶	۸/۵	۶۱۰
20MK	۴	۰/۸۳	۱۱	۶۷۰
30MK	۴/۵	۰/۸۹	۱۳	۶۵۰
10FA	۳	۰/۷۷	۷/۵	۶۵۰
20FA	۲/۸	۰/۸۳	۶/۵	۶۷۰
30FA	۲/۷	۰/۸۴	۵	۶۸۰
5SF	۳	۰/۷۷	۹	۶۶۰
10SF	۳	۰/۷۶	۹/۵	۶۳۰
15SF	۲/۹	۰/۷۶	۱۱	۶۲۰
5ZE	۳/۵	۰/۷۹	۱۰	۶۳۰
10ZE	۴	۰/۸	۱۱	۶۴۰
15ZE	۴/۵	۰/۸۲	۱۳	۶۲۰

در تمامی طرح‌ها، باعث کاهش مقاومت فشاری شده است. با توجه به نتایج ذکر شده در شکل‌ها با افزایش درجه حرارت از ۲۰ تا ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد، کاهش مقاومتی حدود ۱۱ درصد در طرح شاهد و در مخلوط‌های حاوی پوزولان کاهش مقاومتی حدود ۸/۱۶ درصد حاصل شده است. بررسی نتایج حاکی از آن است که درصد کاهش مقاومت فشاری در طرح‌های حاوی پوزولان نسبت به طرح شاهد کمتر می‌باشد، زیرا با جایگزینی پوزولان، نفوذپذیری و در نتیجه آب حفره‌ای کم می‌شود.

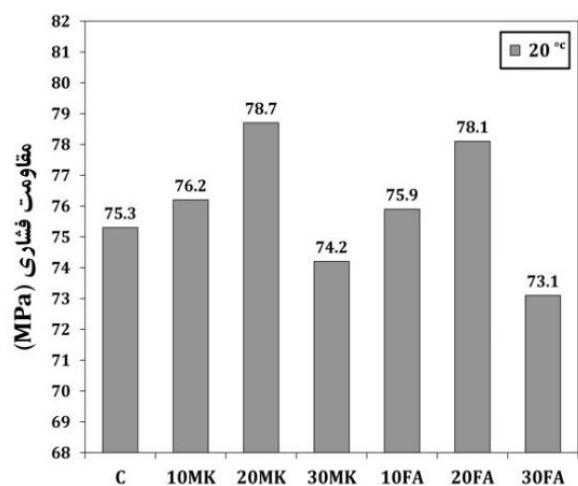


شکل ۴- نمودار نتایج آزمایش مقاومت فشاری مخلوط‌های دو جزئی تحت درجه حرارت بالا در سن ۹۱ روز

با توجه به آنچه در رابطه با تجزیه شیمیایی هیدروکسید کلسیم در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد و سیلیکات کلسیم در دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد گفته شد، افت مقاومت طرح‌های حاوی مقادیر مختلف هر یک از پوزولان‌ها در دماهای مختلف اینگونه تفسیر می‌شوند:

بر اساس نتایج به دست آمده، طرح حاوی 10SF بهترین عملکرد را از خود نشان داده است که این مورد همان طوری که قبلاً گفته شد به دلیل بهبود ریز ساختار خمیر سیمان در اثر استفاده از پوزولان و کاهش ریزترک‌ها می‌باشد. به طور کلی وقتی قسمتی از هیدراتاسیون انجام شده باشد، خمیر شامل سیستمی از حفرات موئینه است که مقدار حفرات موئینه به نسبت آب به سیمان و درجه هیدراتاسیون بستگی دارد، با افزایش درجه هیدراتاسیون، طوری که حفرات موئینه در اثر ایجاد ژل جدید مسدود شده و به قسمت‌های جداگانه تبدیل شوند، خمیر بهبود می‌یابد. استفاده از پوزولان‌ها عملکرد یاد شده را بهبود بخشیده است.

مقاومت فشاری شده است و جایگزینی بیش از مقدار یاد شده، کاهش مقاومت فشاری نسبت به طرح شاهد را در پی داشته است. نتایج آزمایش مقاومت فشاری در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد برای مخلوط‌های حاوی دوده سیلیس و زئولیت در شکل (۳) نشان داده شده است. همان طور که قابل رویت می‌باشد، بیشترین مقاومت فشاری در جایگزینی ۱۰ درصد پوزولان‌های مذکور حاصل شده است و افزایش بیش از این مقدار تا حدودی باعث کاهش مقاومت فشاری شده است. تسریع انجام واکنش‌ها در طرح‌های حاوی دوده سیلیس به دلیل وجود مقادیر بالای سیلیس فعال در دوده سیلیس بوده که باعث شده است بتن حاوی دوده سیلیس نسبت به بتن شاهد افزایش مقاومت چشمگیری را نشان دهد.

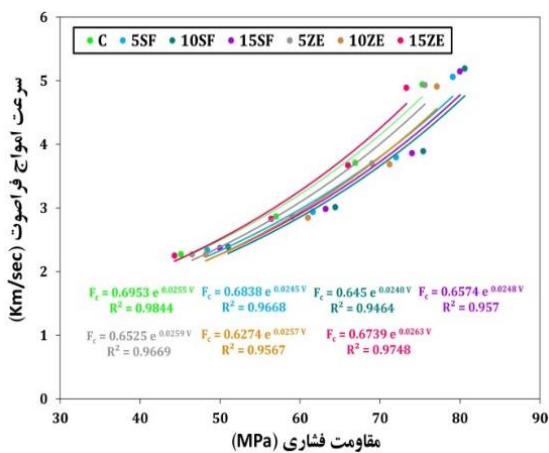


شکل ۳- نمودار نتایج آزمایش مقاومت فشاری مخلوط‌های حاوی دوده سیلیس و زئولیت در سن ۹۱ روز

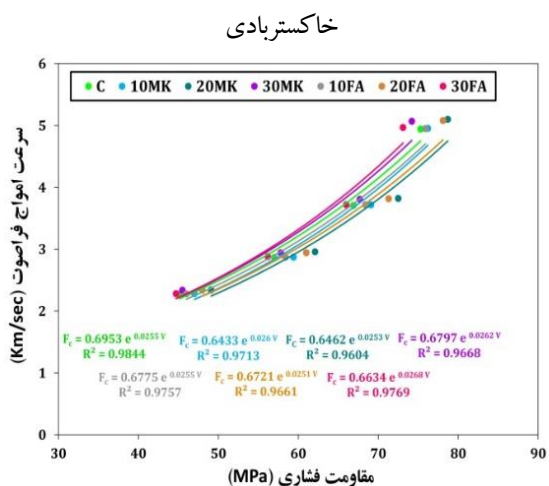
دلیل این نتایج این است که برای انجام واکنش پوزولانی، هیدروکسید کلسیم، مصرف و سیلیکات‌های کلسیم و آلومینیم تولید می‌شود. با افزایش مقادیر جایگزینی پوزولان‌ها، تقریباً تمامی هیدروکسید کلسیم موجود در خمیر سیمان مصرف شده و جایگزینی بیش از این اندازه پوزولان نه تنها واکنش پوزولانی را در پی نخواهد داشت، بلکه با کاهش عیار سیمان، باعث کاهش مقاومت فشاری شده است. در شکل (۴) نتایج آزمایش مقاومت فشاری برای مخلوط‌های دو جزئی حاوی متاکائولن، خاکسترآبادی، دوده سیلیس و زئولیت در دماهای مختلف آورده شده است. در این قسمت، افزایش دما از ۲۰ درجه سانتی‌گراد تا ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد، ۳۰۰ تا ۵۰۰ و ۵۰۰ تا ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد

## ۵-۲- تحلیل نتایج آزمایش سرعت امواج فراصوتی

منحنی تغییرات مقاومت فشاری با سرعت امواج فراصوتی در شکل (۶) و (۷) نمایش داده شده است. به کمک برازش منحنی، رابطه‌ای مبتنی بر تغییرات مقاومت فشاری با سرعت امواج اولتراسونیک در سن ۹۱ روزه بتن ارائه گردیده است. رابطه بین مقاومت فشاری و سرعت امواج فراصوتی از یک رابطه نمایی تبعیت می‌کند. به طور کلی تر آزمایش سرعت امواج فراصوتی هرچه محیط مورد آزمایش چگال‌تر باشد، سرعت انتقال امواج بیشتر خواهد بود. برداشت از شکل (۶) و (۷) بدین صورت می‌باشد که با افزایش مقاومت فشاری، سرعت عبور امواج فراصوتی نیز افزایش یافته است که این مورد با توجه به کاهش ریزترک‌ها و کنترل تشکیل حفرات موئنه در استفاده از پوزولان‌ها و تأثیر مثبت آن بر مقاومت فشاری منطقی به نظر می‌رسد.

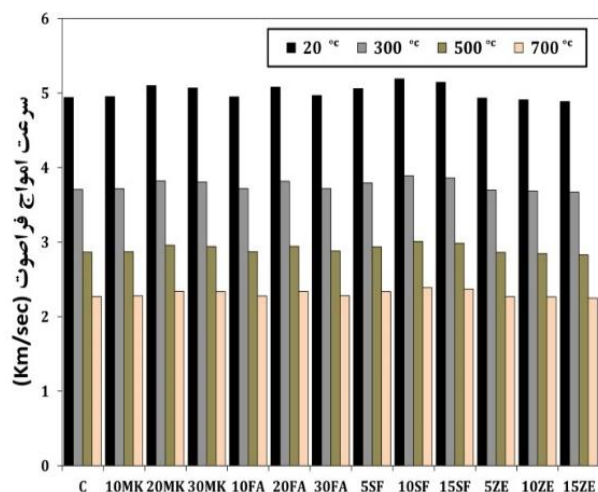


شکل ۶- نمودار نتایج آزمایش سرعت امواج فراصوتی در مقابل آزمایش مقاومت فشاری مخلوط‌های حاوی متاکائولن و خاکستر بادی



شکل ۷- نمودار نتایج آزمایش سرعت امواج فراصوتی در مقابل آزمایش مقاومت فشاری مخلوط‌های حاوی زئولیت و دوده سیلیس

نتایج آزمایش سرعت امواج فراصوتی بر روی نمونه‌های بتنی در شکل (۵) آورده شده است. نتایج ثبت شده در این قسمت حاصل از میانگین سه نمونه بتنی از هر مخلوط می‌باشد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، با افزایش دما خصوصاً در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد، کاهش چشم‌گیری در نتایج آزمایش حاصل شده است. از طرف دیگر نتایج نشان می‌دهد تغییر جنس مواد پودری در مقادیر مشابه، تأثیر معناداری بر نتایج این آزمایش در پی نداشته است. پر واضح است که سرعت امواج فراصوتی به طور مستقیم با ریزترک‌های ایجاد شده در داخل بتن ارتباط دارد. به نحوی که با گسترش ترک‌ها، سرعت امواج فراصوتی کاهش می‌یابد، با توجه به اینکه یکی از مهم‌ترین دلایل وجود ریزترک به لحاظ تشکیل حفرات موئنه در طی عملیات هیدراتاسیون می‌باشد، استفاده از مقادیر مختلف پوزولان باعث کاهش ریزترک‌ها و کنترل تشکیل حفرات موئنه شده که در نتیجه همان‌طور که در نتایج به چشم می‌رسد با جایگزین کردن پوزولان امواج فراصوتی افزایش یافته است و در مقادیر بالاتر جایگزینی (طرح‌های حاوی متاکائولن و خاکستر بادی) به دلیل کاهش بیش از اندازه عیار سیمان، این نتایج کاهش یافته است. بنابراین در مخلوط‌های حاوی پوزولان، کاهش سرعت امواج فراصوتی در مقایسه با مخلوط شاهد کمتر می‌باشد که این مورد با توجه به موارد بالا و مطالبی که در قسمت نتایج مقاومت فشاری در رابطه با کنترل توسعه ریزترک‌ها در اثر استفاده از پوزولان گفته شد، تفسیر می‌شود.



شکل ۵- نمودار نتایج آزمایش سرعت امواج فراصوتی مخلوط‌های دو جزئی تحت درجه حرارت بالا در سن ۹۱ روز

## ۶- نتیجه گیری

۱- نتایج آزمایش مقاومت فشاری در دمای ۲۰ درجه سانتی گراد برای مخلوط‌های متاکائولن و خاکستر بادی نشان می‌دهد که جایگزینی هر یک از پوزولان‌های یاد شده تا ۲۰ درصد، سبب افزایش مقاومت فشاری شده است و جایگزینی بیش از مقدار یاد شده کاهش مقاومت فشاری نسبت به طرح شاهد را در پی داشته است.

۲- نتایج آزمایش مقاومت فشاری در دمای ۲۰ درجه سانتی گراد برای مخلوط‌های حاوی دوده سیلیس و زئولیت حاکی از آن است که بیشترین مقاومت فشاری در جایگزینی ۱۰ درصد پوزولان‌های مذکور حاصل شده است و افزایش بیش از این مقدار تا حدودی باعث کاهش مقاومت فشاری شده است.

۳- افزایش دما از ۲۰ درجه سانتی گراد تا ۳۰۰ درجه سانتی گراد، ۳۰۰ تا ۵۰۰ و ۵۰۰ تا ۷۰۰ درجه سانتی گراد در تمامی طرح‌ها باعث کاهش مقاومت فشاری شده است.

۴- با افزایش درجه حرارت از ۲۰ تا ۳۰۰ درجه سانتی گراد، کاهش مقاومتی حدود ۱۱ درصد در طرح شاهد و در مخلوط‌های حاوی پوزولان کاهش مقاومتی حدود ۸/۱۶ درصد حاصل شده است. درصد کاهش مقاومت فشاری در طرح‌های حاوی پوزولان نسبت به طرح شاهد کمتر می‌باشد.

۵- در دمای ۳۰۰ تا ۵۰۰ درجه سانتی گراد، کاهش مقاومتی حدود ۲۴/۳۰ درصد در طرح شاهد و در مخلوط‌های حاوی پوزولان، کاهش مقاومتی بین ۲۰/۰۹ تا ۲۳/۱۲ درصد حاصل شده است. با افزایش دما از ۵۰۰ به ۷۰۰ درجه سانتی گراد این کاهش دما در طرح شاهد به ۴۰/۱۰ درصد و در طرح‌های حاوی پوزولان به محدوده ۳۶/۷۲ تا ۳۹/۴۰ درصد رسیده است. این نتایج حاکی از آن است که افت مقاومت فشاری در طرح‌های حاوی پوزولان نسبت به طرح شاهد کمتر می‌باشد.

۶- طرح حاوی SF۱۰ به ترتیب بهترین مقاومت فشاری را در حرارت‌های بالا از خود نشان داده‌اند.

۷- با افزایش دما خصوصاً در دمای ۷۰۰ درجه سانتی گراد، کاهش چشم‌گیری در نتایج آزمایش سرعت امواج فراصوتی حاصل شده است. از طرف دیگر تغییر جنس مواد پودری در مقادیر مشابه تأثیر معناداری بر نتایج این آزمایش در پی نداشته است.

۸- در مخلوط‌های حاوی پوزولان، با افزایش دما کاهش سرعت امواج فراصوتی در مقایسه با مخلوط شاهد کمتر می‌باشد.

## ۷- مراجع

- [1] Standard, A. S. T. M. "Standard test method for measurement of fracture toughness." ASTM, E1820-01 (2001): 1-46.
- [2] Bakhtiyari, S., et al. "Self-compacting concrete containing different powders at elevated temperatures—Mechanical properties and changes in the phase composition of the paste." *Thermochimica acta* 514.1 (2011): 74-81
- [3] Fares, Hanaa, et al. "High temperature behaviour of self-consolidating concrete: microstructure and physicochemical properties." *Cement and Concrete Research* 40.3 (2010): 488-496.
- [4] Uysal, Mucteba, Kemalettin Yilmaz, and Metin Ipek. "Properties and behavior of self-compacting concrete produced with GBFS and FA additives subjected to high temperatures." *Construction and Building Materials* 28.1 (2012): 321-326.
- [5] Mydin, Md Azree Othuman, and Y. C. Wang. "Mechanical properties of foamed concrete exposed to high temperatures." *Construction and Building Materials* 26.1 (2012): 638-654.
- [6] Ozawa, K. "High performance concrete based on the durability design of concrete structures." *The Second East Asia-Pasific Conference on Structural Engineering & Construction*. 1989.
- [7] Okamura, Hajime, and Masahiro Ouchi. "Self-compacting concrete." *Journal of advanced concrete technology* 1.1 (2003): 5-15.
- [8] Aggarwal, Paratibha, et al. "Self-compacting concrete-procedure for mix design." *Leonardo electronic journal of practices and technologies* 12 (2008): 15-24.
- [9] Zhao, Hui, et al. "The properties of the self-compacting concrete with fly ash and ground granulated blast furnace slag mineral admixtures." *Journal of Cleaner Production* 95 (2015): 66-74.
- [10] Ponikiewski, Tomasz, and Jacek Gołaszewski. "The influence of high-calcium fly ash on the properties of fresh and hardened self-compacting concrete and high performance self-compacting concrete." *Journal of Cleaner Production* 72 (2014): 212-221
- [11] Wongkeo, Watcharapong, et al. "Compressive strength and chloride resistance of self-compacting concrete containing high level fly ash and silica fume." *Materials & Design* 64 (2014): 261-269.



- [12] Khatib, J. M. "Performance of self-compacting concrete containing fly ash." *Construction and Building Materials* 22.9 (2008): 1963-1971.
- [13] AzariJafari, Hessam, et al. "Enhancing Workability Retention of Concrete Containing Natural Zeolite by Superplasticizers' Combination." *Special Publication 302* (2015): 416-424.
- [14] Persson B. Fire resistance of SCC. *Mater Struct* 2004;37:575-84.
- [15] Liu, Xian, et al. "On the mechanism of polypropylene fibres in preventing fire spalling in self-compacting and high-performance cement paste." *Cement and Concrete Research* 38.4 (2008): 487-499.
- [16] Annerel, Emmanuel, Luc Taerwe, and Paul Vandavelde. "Assessment of temperature increase and residual strength of SCC after fire exposure." *5th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*. 2007.
- [17] Li, Qingtao, Zhuguo Li, and Guanglin Yuan. "Effects of elevated temperatures on properties of concrete containing ground granulated blast furnace slag as cementitious material." *Construction and Building Materials* 35 (2012): 687-692.
- [18] Pathak, Neelam, and Rafat Siddique. "Effects of elevated temperatures on properties of self-compacting-concrete containing fly ash and spent foundry sand." *Construction and Building Materials* 34 (2012): 512-521.
- [19] Okamura, Hajime. "Ozawa, and Kazumasa: 'Mix Design for Self-Compacting Concrete' Concrete Library of JSCE No. 25." (1995).
- [20] EFNARC, Specification. "Guidelines for self-compacting concrete." EFNARC, UK ([www.efnarc.org](http://www.efnarc.org)) (2002): 1-32.

## Investigation of the Effect of Elevated Temperatures on Hardened Properties of Self-Compacting Concrete Containing Mineral Binary Admixtures

J. Berennjian

Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology  
N. Tila

M.Sc., Tabari Institute of Higher Education, Babol, Iran

M. J. Taheri Amiri\*

Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology

A. Ashrafian

M.Sc. Student, Tabari Institute of Higher Education, Babol, Iran

### Abstract

This paper investigated the effects of elevated temperatures on hardened properties of self-compacting concrete (SCC) containing mineral admixture. For this purpose, self-compacting concrete control (non-pozolan) specimen of ACI 237R-07 mix design has been used in accordance with instructions. First, in order to ensure the satisfaction of tolerance related to quality control of SCC in fresh mode; slump flow, L box, T50 and V funnel flow time were performed. Then the hardened specimens containing various minerals admixture (metakaolin, fly ash, silica fume and zeolite) were exposed to high temperatures (300 , 500, 700 °C) at 91 days to evaluate hardened properties. Furthermore the ultrasonic pulse velocity test as non-destructive methods to estimate the compressive strength of specimen is presented.

**Keywords:** Self-compacting Concrete, Hardened properties, Mineral admixture, Elevated temperatures.

---

\* Corresponding Author: ali\_ashrafian@yahoo.com