



بررسی آزمایشگاهی جایگزینی درصدهای مختلف زئولیت با سیمان بر بهبود مشخصات مکانیکی و دوام بتن در دماهای بالا

رضانعلی ایزدی فرد^۱، مهرداد عبدی مقدم^۲

^۱ استادیار عمران، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران
^۲ دانشجوی دکتری، عمران، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸-۰۱-۲۹
بازنگری: ۱۳۹۸-۰۲-۳۰
پذیرش: ۱۳۹۸-۰۳-۱۷
ارائه آنلاین: ۱۳۹۸-۰۳-۲۷

کلمات کلیدی:

زئولیت
مشخصات مکانیکی
مشخصات دوام
دمای بالا
درصد جایگزینی با سیمان

خلاصه: یکی از مهمترین عوامل آلودگی محیط زیست تولید سیمان و یکی از عوامل آسیب به سازه‌های بتن آرمه دماهای بالا میباشد. در این مطالعه تاثیر جایگزینی ۱۰ و ۲۰ درصد وزنی سیمان با زئولیت بر مشخصات مکانیکی و دوام سازه‌های بتنی بررسی شده است. مشخصات مکانیکی شامل مقاومت فشاری و مقاومت کششی در حالت داغ و مشخصات دوام شامل جذب آب سطحی، عمق نفوذ آب، مقاومت الکتریکی و افت وزنی بتن حرارت دیده است. دماهای بررسی شده بازه دمایی ۲۸ تا ۸۰۰ درجه سانتیگراد است. نتایج نشان داد که جایگزینی سیمان با زئولیت موجب کاهش جزئی مقاومت فشاری و کششی ۲۸ و ۴۲ روزه بتن معمولی شده است. این بررسی در دماهای بالا نشان داد که اگرچه جایگزینی درصدی از سیمان با زئولیت مقاومت فشاری بتن معمولی را به میزان کمی کاهش داده است، در رابطه با مقاومت فشاری نرمال شده در بیشتر دماهای آزمایش موجب بهبود این پارامتر شده است. علاوه بر این، ملاحظه گردید برای جایگزینی ۱۰ و ۲۰ درصد وزنی سیمان با زئولیت مقاومت کششی بتن در دماهای بالا را به ترتیب ۲۱ و ۱۳ افزایش داده است. این بررسی در رابطه با مقاومت کششی نرمال شده بتن در دماهای بالا برای درصدهای یاد شده، به ترتیب افزایش ۲۲ و ۱۴ درصدی را نشان داد. در رابطه با مشخصات دوام بتن ملاحظه گردید که اگرچه افزایش دمای آزمایش مشخصات دوام بتن معمولی را دچار آسیب کرده است، جایگزینی زئولیت با سیمان موجب بهبود آن مشخصات شده است. نتایج به نحوی بود که بهترین عملکرد دوام بتن، در نمونه‌های حاوی درصدهای بالاتر زئولیت حاصل گردید.

۱- مقدمه

پیشرفت صنعت که توسط انسان روز به روز در حال رشد است، عامل اصلی آلودگی محیط زیست میباشد. در میان عوامل آلودگی هوا سهم تولید بتن ۶ درصد میباشد [۱]. یکی از اصلی ترین اجزای تولید بتن سیمان میباشد که تولید آن موجب صرف انرژی زیاد، تولید دی اکسید کربن و در نهایت تحمیل اثرات نامطلوبی به محیط زیست میگردد. بنابراین کاهش مصرف سیمان به صورت جایگزینی آن با موادی که آلودگی کمتری تولید میکنند در بلند مدت میتواند تاثیر چشمگیری بر کاهش آلودگی‌های محیط زیست داشته

باشد [۲]. پوزولان‌های طبیعی یکی از مرسوم ترین مواد جایگزین سیمان میباشد. افزایش مصرف پوزولان‌ها در صنعت ساخت و ساز به اندازه‌ای بوده که مشخصات شیمیایی و فیزیکی آن‌ها در آیین نامه‌های روز دنیا نیز ورود پیدا کرده است [۳]. کاربرد پوزولان به طور تجاری در ساخت و ساز در صورتی ممکن است که از نظر منابع تامین بوده و در دسترس باشد. زئولیت یک نوع پوزولان طبیعی بوده که منابع عمده آن در استان سمنان است. زئولیت منبع غنی از Al_2O_3 و SiO_2 هستند که با $Ca(OH)_2$ واکنش داده و منجر به تولید ژل C-S-H و آلومینات‌ها میشوند [۴].

علاوه بر زلزله و باد که سازه‌ها بایستی در برابر آنها مقاومت داشته

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: izadifard@eng.ikiu.ac.ir

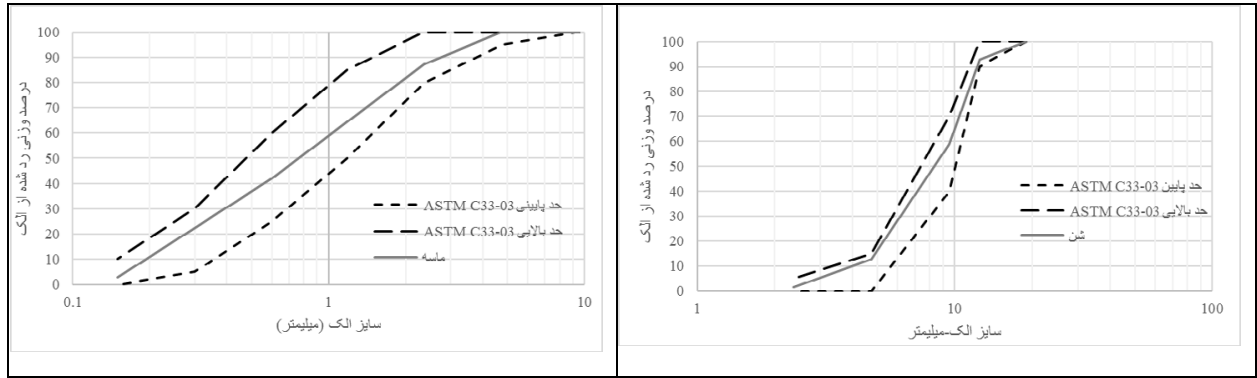


از بتن‌های مرجع بود. جایگزینی ۱۰ درصد وزنی ژئولیت مقاومت کششی ۲۸ روزه و ۹۰ روزه را افزایش داد و با جایگزینی ۱۵ درصد وزنی سیمان مقاومت کششی کاهش یافت [۲۰].

در رابطه با اثر دماهای بالا بر مشخصات مکانیکی نمونه‌های حاوی پوزولان، پون^۲ و همکاران با بررسی نمونه‌های ساخته شده از فلائی اش و اسلگ و مقایسه آنها به با نمونه بتن معمولی ملاحظه کردند که نمونه بتنی ساخته شده از فلائی اش به مقدار ۹۰ درصد و اسلگ به مقدار ۱۰ درصد وزنی سیمان، میتواند در دماهای بالا جایگزین مناسبی برای بتن معمولی باشد. بررسی ریز ساختار این نمونه بتنی در دماهای بررسی شده نیز تغییر چندانی را تجربه نکرده است [۲۰]. در مطالعه ای دیگر که ریز ساختار نمونه‌های دارای فلائی اش و اسلگ را در دماهای بالا بررسی کردند ملاحظه گردید که ترک حرارتی در ناحیه اتصال رخ نداده و ژل C-S-H در مقایسه با بتن معمولی کم‌تر آسیب دیده است [۲۲]. بررسی مشخصات مکانیکی و دوام نمونه‌های دارای سیلیکافیوم، فلائی اش و سرباره کوره آهن گداز در دماهای ۲۰۰، ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ درجه سانتیگراد نیز نشان داد که در دماهای کم‌تر از ۶۰۰ درجه سانتیگراد، نمونه‌های دارای فلائی اش و سرباره کوره آهن گداز بهترین عملکرد را دارند [۵].

نفوذ آب به درون بتن میتواند موجب آسیب به سازه‌های بتنی و کاهش عمر مفید آنها گردد. بنابراین برآورد میزان نفوذ آب به درون بتن میتواند معیار مناسبی از دوام سازه‌های بتنی تلقی گردد. یکی از روش‌های تعیین مشخصات دوام بتن روش جذب آب سطحی است. این روش بر پایه تمایل بتن در جذب و انتقال آب از حفرات بوده و هر اندازه که این ضریب کم تر باشد، دوام بتن نیز بیشتر است. این روش میتواند برای طبقه بندی کیفیت بتن استفاده نمود [۲۳]. استفاده از این روش برای تعیین مشخصات دوام بتن در مطالعات زیادی مورد توجه محققین قرار گرفته است [۲۰]، [۲۴]-[۲۶]. با کاربرد این روش جهت برآورد دوام نمونه‌های بتنی ساخته شده از ۱۰ و ۱۵ درصد ژئولیت نشان داد که این میزان جایگزینی با سیمان موجب بهبود مشخصات و دوام بتن معمولی در دمای محیط میگردد [۲۰]. از دیگر معیارهای تعیین دوام سازه‌های بتنی مقاومت الکتریکی میباشد. این معیار که به عبارتی تعیین کننده پتانسیل خوردگی آرماتورها درون بتن میباشد نیز در مراجع [۲۷]، [۲۸] برای ارزیابی

باشند، آتش سوزی نیز در صورت وقوع ممکن است خسارات جانی و مالی جبران ناپذیری را بر سازه تحمیل مینماید. بنابراین درک درست از رفتار بتن در دماهای بالا از اهمیت بالایی برخوردار است. سازه بتن آرمه در کنار داشتن مقاومت مناسب حین آتش سوزی، بایستی مشخصات دوام مناسبی نیز داشته باشد تا بتواند پس از آتش سوزی به بهره برداری خود ادامه دهد. بنابراین در بررسی اثر حرارت بر سازه‌ها دو سناریو مطرح میشود. در برخی مطالعات مشخصات مکانیکی نمونه‌هایی که دماهای مختلف را تجربه کردند پس از سرد شدن بررسی میگردد و این حالت مشخصات پسماند بتن را نشان میدهد [۵]-[۱۰]. نوع دیگر تعیین مشخصات مکانیکی بتن در حالت داغ است [۱۱]، [۱۲]. سناریو اول برای ارزیابی رفتار سازه پس از آتش سوزی و بازسازی سازه‌ها و حالت دوم برای طرحی ایمن حین آتش سوزی اهمیت دارد. با این توضیح که بحث دوام سازه‌ها با توجه به تعریف دوام که پس از آتش سوزی مطرح میشود، سناریو اول به کار گرفته میشود. مقایسه مقاومت فشاری بتن نرمال در دو حالت یاد شده توسط بالوچ^۱ و همکاران به طور آزمایشگاهی بررسی گردید و نتایج مقاومت فشاری بیشتری را برای حالت داغ نشان داد [۱۱]. انواع مختلفی از پوزولان‌ها در سرتاسر دنیا موجود میباشد که در سالیان گذشته مورد بررسی و ارزیابی محققین پیشین قرار گرفته است. در میان این مراجع عمده مطالعات به تاثیر این پوزولان‌ها بر مشخصات مکانیکی و دوام نمونه‌های بتنی در دمای محیط متمرکز بوده است. از آنجاییکه سیمان در کسب مقاومت بتن تاثیر به سزایی دارد، میزان جایگزینی بهینه ژئولیت با سیمان برای دستیابی به مقاومت کافی موضوع مهمی میباشد [۱۳]-[۱۶]. مهم‌ترین مشخصات مکانیکی بتن که در پایداری سازه بتنی تاثیر ویژه‌ای دارد، مقاومت فشاری و کششی آن میباشد. بررسی تاثیر جایگزینی بخشی از سیمان با ژئولیت بر مشخصات مکانیکی بتن در دمای معمولی نشان داده است که در برخی مطالعات افزایش [۱۷]-[۱۹] و در برخی دیگر کاهش [۱۵]، [۱۶]، [۲۰] آن مشاهده شده است. علت تفاوت در این نتایج در ترکیب شیمیایی ژئولیت استفاده شده میباشد که میتوان آن را به محل استخراج آن نسبت داد [۲۱]. بررسی مقاومت فشاری و کششی نمونه‌های ساخته شده از ژئولیت در دمای معمولی نشان داد که مقاومت فشاری نمونه‌های دارای ژئولیت تقریباً مشابه یا کمی پایین‌تر



شکل ۱: منحنی دانه بندی شن و ماسه مورد استفاده و حدود مجاز استاندارد ASTM
 Fig. 1. The grading curve of fine and coarse aggregate and allowable limits of ASTM

تاثیر جایگزینی بخشی از سیمان با زئولیت روشن شده است.

۲- برنامه آزمایشگاهی

در این تحقیق ۳ طرح اختلاط مورد آزمایش و بررسی قرار گرفته است. بتن معمولی (N)، نمونه بتنی با طرح اختلاط مشابه بتن معمولی با این تفاوت که ۱۰ درصد وزنی سیمان با زئولیت جایگزین شده (ZE10) و نمونه بتنی با طرح اختلاط مشابه بتن معمولی با این تفاوت که ۲۰ درصد وزنی سیمان با زئولیت جایگزین شده (ZE20) است. آزمایش‌های مشخصات مکانیکی شامل مقاومت فشاری و مقاومت کششی و آزمون‌های دوام شامل آزمون جذب آب سطحی، عمق نفوذ آب، مقاومت الکتریکی و افت وزنی بود. تمامی آزمایش‌ها در دماهای ۲۸، ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۳۵۰، ۴۰۰، ۴۵۰، ۵۰۰، ۶۵۰ و ۸۰۰ درجه سانتیگراد انجام گردید. برای آزمایش مشخصات مکانیکی ۳ تکرار و برای آزمایش‌های دوام ۲ تکرار و در مجموع برای این پژوهش ۴۲۶ نمونه ساخته و آزمایش شدند.

۲-۱- مشخصات مصالح مصرفی

برای ساخت نمونه‌های بتنی از سنگدانه آهکی شکسته با حداکثر اندازه ۱۹ میلیمتر و ریزدانه با حداکثر اندازه ۴/۷۵ میلیمتر با مدول نرمی ۲/۸۱ استفاده شده است و منحنی دانه بندی آنها به همراه حدود مجاز آیین نامه ASTM C۳۳ [۲۹] در شکل ۱ ترسیم شده است. سیمان مورد استفاده در این مطالعه از نوع تیپ ۲ معمولی با رده مقاومتی ۴۹/۲ مگاپاسکال بود. زئولیت استفاده شده در این

دوام بتن مورد استفاده قرار گرفته است. یکی دیگر از مواردی که در هنگام بررسی مشخصات دوام بتن در دماهای بالا بررسی میگردد، افت وزنی نمونه‌های بتنی میباشد. در مطالعه‌ای آزمایشگاهی ملاحظه شد که افت وزنی بتن معمولی در دمای ۶۰۰ درجه سانتیگراد ۸ درصد و در ۸۰۰ درجه سانتیگراد ۱۴ درصد بوده است [۱۱]. در مطالعه ای دیگر اثر حرارت بر نمونه های بتنی داری پوزولان های پومیس و سیلیکا فیوم بررسی گردید و نتایج نشان داد که اگرچه نمونه‌های دارای سیلیکا فیوم مقاومت فشاری بتن را در این دماهای بهبود داده است، تلفات وزنی بیشتری را در مقایسه با بتن معمولی تجربه کرده اند [۱۰].

مرور گسترده مطالعات پیشین نشان داده است که مشخصات مکانیکی و دوام بتن‌های ساخته شده از زئولیت در دماهای بالا بررسی نشده است. همچنین بیشتر مطالعاتی که مشخصات مکانیکی بتن معمولی را در دماهای مختلف بررسی کرده‌اند، آزمایش بر روی نمونه‌های سرد شده انجام شده است. این درحالیست که درک درست از رفتار بتن در زمان آتش سوزی، زمانی به دست می‌آید که نمونه بتنی در حالت داغ آزمایش شود. بنابراین در این مطالعه مقاومت فشاری و کششی بتن معمولی در دماهای ۲۸-۸۰۰ درجه سانتیگراد آزمایش شده و تاثیر جایگزینی ۱۰ و ۲۰ درصد وزنی سیمان با زئولیت بر این مشخصات روشن شده است. همچنین از آنجاییکه انتظار می‌رود بتن‌هایی که دماهای بالا را تجربه کرده‌اند در دوران بهره‌برداری دچار آسیب گردند، مشخصات دوام آنها با استفاده از آزمون‌های جذب آب سطحی، عمق نفوذ آب، مقاومت الکتریکی و افت وزنی بررسی شده و

جدول ۱: مشخصات آنالیز شیمیایی سیمان و زئولیت
Table 1. Chemical analysis of Cement and Zeolite

اجزا تشکیل دهنده	سیمان	زئولیت
SiO ₂	۲۰/۲۶	۶۸/۹۵
Al ₂ O ₃	۵/۲۸	۱۱/۱۴
Fe ₂ O ₃	۳/۷۲	۰/۹۷
CaO	۶۳/۲۴	۴/۸۳
MgO	۲/۶۹	۰/۷۹
Na ₂ O	۰/۲۵۸	۰/۹۵
K ₂ O	۰/۵۳۳	۰/۹۰
SO ₃	۲/۵۴	۰/۰۶۸
سایر اجزا	۱/۴۹	۱۱/۴۰۲

جدول ۲: طرح اختلاط (kg/m³)
Table 2. Mix proportion of concrete

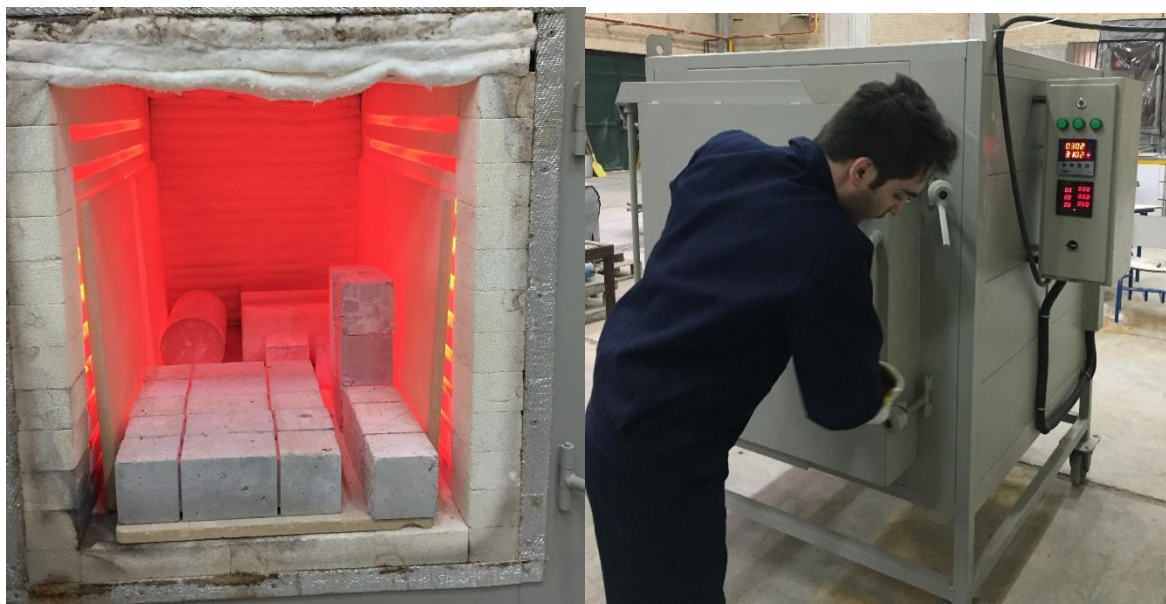
نام نمونه	سیمان	زئولیت	آب	شن	ماسه
بدون زئولیت (N)	۴۰۰	۰	۲۰۰	۹۳۵	۷۶۵
با ۱۰ درصد درصد وزنی سیمان زئولیت (Ze ₁₀)	۳۶۰	۴۰	۲۰۰	۹۳۵	۷۶۵
با ۲۰ درصد درصد وزنی سیمان زئولیت (Ze ₂₀)	۳۲۰	۸۰	۲۰۰	۹۳۵	۷۶۵

۲-۲- جزئیات طرح اختلاط و دستگاهها

پیش از مخلوط اجزا در میکسر، زئولیت و سیمان با یکدیگر به صورت خشک مخلوط شدند. به منظور اختلاط کامل اجزای بتن شن، ماسه و نصف مخلوط سیمان با زئولیت به مدت یک دقیقه در میکسر مخلوط شدند. در ادامه نصف آب و پس از آن تمام مخلوط سیمان با زئولیت به میکسر اضافه گردید. در نهایت ما بقی آب اضافه گردید و میکسر به مدت ۳ دقیقه کار کرد. پس از اختلاط کامل و تولید یک مخلوط همگن، بتن به داخل قالب ریخته شده و توسط میز لرزان متراکم گردید. اسلایپ نمونه های بر اساس استاندارد ASTM C143 [۳۱] تعیین گردید و برای نمونه های N، Ze₁₀ و Ze₂₀ به ترتیب ۳۸، ۲۹ و ۲۵ میلیمتر بود. پس از ۲۴ ساعت بتن ها از قالب

مطالعه از شرکت نگین پودر سمنان تهیه شده است و چگالی آن ۲/۳ گرم بر سانتیمتر بود. آب مورد نیاز برای ساخت نمونه ها نیز آب شرب شهر قزوین می باشد. آنالیز شیمیایی سیمان و پوزولان مصرفی در جدول ۱ ارائه شده است. که بر اساس معیار استاندارد ASTM C ۶۱۸ - ۰۵ [۳۰] در رابطه با مجموع مقادیر SiO₂، Al₂O₃ و Fe₂O₃ که بایستی بالاتر از ۷۰ درصد باشد، در این زئولیت ۸۱،۰۶ درصد بوده و این معیار تامین شده است.

برای دستیابی به اثر تغییرات حرارت بر مشخصات بتن، نمونه های مورد استفاده با یک طرح اختلاط و با شرایط یکسان آماده و عمل آوری شده اند. جدول ۲ طرح اختلاط و مشخصات مصالح تشکیل دهنده بتن مورد استفاده در این مطالعه را نشان داده است.



شکل ۲: تصویر کوره الکتریکی.
Fig. 2. Electrical furnace

جدول ۳: مقاومت فشاری ۲۸ روزه و ۴۲ روزه در دمای محیط
Table 3. The compressive strength at ambient temperature (28 day and 42 day specimens)

Ze _{۲۰}		Ze _{۱۰}		N		نام نمونه
۴۲	۲۸	۴۲	۲۸	۴۲	۲۸	سن نمونه (روز)
۴۸/۹۳	۳۷/۲۷	۴۹/۴۳	۳۴/۱۶	۵۳/۳۸	۴۷/۱۷	مقاومت فشاری (مگاپاسکال)

در آمدند و به مدت ۲۸ روز در آب عمل آوری شدند. بعد از بیرون آمدن از آب و خشک کردن آب سطحی آنها مقاومت فشاری و کششی نمونه‌ها در روز ۲۸ام تعیین گردید و مابقی نمونه‌ها ۱۴ روز در محیط آزمایشگاه به دمای حدودی ۲۸ درجه سانتیگراد، قرار گرفتند تا آب آزاد درون بتن به طور طبیعی خارج گردد. آزمایش‌های مقاومتی بتن در روز ۴۲ و علاوه بر دمای محیط در دماهای ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۳۵۰، ۴۰۰، ۴۵۰، ۵۰۰، ۶۵۰ و ۸۰۰ سانتیگراد انجام شده است. تامین دمای هدف توسط یک کوره الکتریکی با ظرفیت گرمایی ۱۲۰۰ درجه سانتیگراد انجام شده است (شکل ۲). برای جلوگیری از اسپالینگ، نرخ افزایش دما مابین ۱/۶۶ تا ۳/۶۱ درجه سانتیگراد بر دقیقه انتخاب گردید و برای آنکه دمای بتن به طور یکنواخت به دمای هدف برسد به طور متوسط به مدت ۱۸۰ دقیقه در دمای موردنظر باقیماندند [۳۲]-[۳۵].

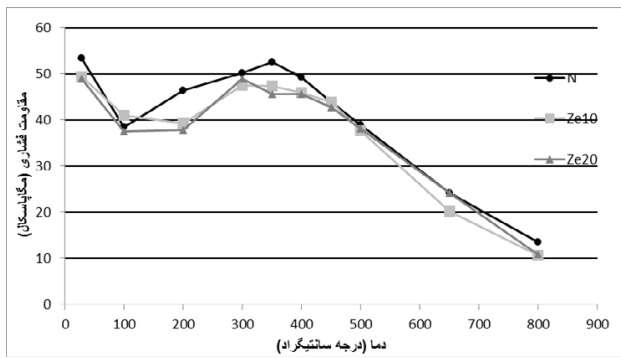
برای بررسی مشخصات مکانیکی نمونه‌ها در دمای بالا، بعد از آنکه دمای تمام بتن به طور یکنواخت به دمای هدف رسید، برای حفظ دمای نمونه تمامی مراحل انتقال و بارگذاری در حدود ۲-۴ دقیقه انجام شده است. در مطالعات راو و همکاران مدت زمان مجاز برای انجام آزمایش به طوریکه دمای نمونه از دست نرود ۱۰ دقیقه توصیه شده است [۳۶].

۲-۳- آزمایشات مشخصات مکانیکی

۲-۳-۱- آزمون مقاومت فشاری

در این مطالعه برای تعیین مقاومت فشاری، بر اساس استاندارد

در آمدند و به مدت ۲۸ روز در آب عمل آوری شدند. بعد از بیرون آمدن از آب و خشک کردن آب سطحی آنها مقاومت فشاری و کششی نمونه‌ها در روز ۲۸ام تعیین گردید و مابقی نمونه‌ها ۱۴ روز در محیط آزمایشگاه به دمای حدودی ۲۸ درجه سانتیگراد، قرار گرفتند تا آب آزاد درون بتن به طور طبیعی خارج گردد. آزمایش‌های مقاومتی بتن در روز ۴۲ و علاوه بر دمای محیط در دماهای ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۳۵۰، ۴۰۰، ۴۵۰، ۵۰۰، ۶۵۰ و ۸۰۰ سانتیگراد انجام شده است. تامین دمای هدف توسط یک کوره الکتریکی با ظرفیت گرمایی ۱۲۰۰ درجه سانتیگراد انجام شده است (شکل ۲). برای جلوگیری از اسپالینگ، نرخ افزایش دما مابین ۱/۶۶ تا ۳/۶۱ درجه سانتیگراد بر دقیقه انتخاب گردید و برای آنکه دمای بتن به طور یکنواخت به دمای هدف برسد به طور متوسط به مدت ۱۸۰ دقیقه در دمای موردنظر باقیماندند [۳۲]-[۳۵].



شکل ۳: تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌ها در دماهای مختلف
 Fig. 3. The variation of compressive strength of specimens with temperature

مقاومت فشاری نمونه‌های بررسی شده در مقایسه با نمونه آزمایش شده در دمای محیط تقریباً ۳۰ درصد افت کرده‌اند. افت مقاومت فشاری در این دما به خاطر اثر همزمان فشار بخار آب آزاد درون بتن به سمت بیرون و فشار جک به سمت داخل نمونه می‌باشد. در این دما مقاومت فشاری نمونه‌های N، Ze10 و Ze20 به ترتیب ۳۸/۳۷، ۴۰۳/۹۳ و ۳۷/۴۶ مگاپاسکال می‌باشد. ملاحظه می‌گردد برخلاف دمای محیط، جایگزینی درصدی از سیمان با زئولیت مقاومت فشاری بتن را در این دما بهبود داده است. با افزایش دمای آزمایش ملاحظه گردید که مقاومت فشاری بتن معمولی در دمای ۳۵۰ درجه سانتیگراد و نمونه‌های دارای زئولیت تا دمای ۳۰۰ درجه سانتیگراد روندی صعودی داشتند. اگرچه بیشترین مقاومت فشاری نمونه N در دمای محیط بود، بیشترین مقاومت فشاری نمونه‌های Ze10 و Ze20 با مقدار ۴۷،۴۶ و ۴۸،۹۶ مگاپاسکال در دمای ۳۰۰ درجه سانتیگراد بوده است. توجه این موضوع که مقاومت فشاری نمونه‌ها در این دما از دمای محیط بیشتر است، به علت تبخیر آب موجود در لایه‌های سیمان و ایجاد شرایطی مشابه عمل آوری به سبک اتوکلاو^۳ می‌باشد [۴۰]. به خاطر اینکه هیدراسیون کامل ذرات زئولیت نسبت به سیمان دیرتر تکمیل می‌گردد، ذرات زئولیت در این شرایط هیدراته شده و مقاومت بیشتری را به دست می‌آورند. از طرف دیگر با تبخیر آب آزاد میان لایه‌ای، لایه‌های سیمان منقبض شده و با ایجاد نیروی واندروالسی مابین این لایه‌ها باعث افزایش مقاومت فشاری میشوند [۴۱]. پس از پیک دوم نمودار روند رو به کاهش مقاومت فشاری تمامی نمونه‌ها ادامه داشته است به طوری که در دمای ۸۰۰ درجه

BSEN 3-12390 از نمونه‌های مکعبی ۱۰ سانتی‌متری استفاده شده است [۳۷]. آزمایش مقاومت فشاری در روزهای ۲۸ ام و ۴۲ و در دمای محیط انجام شده و میانگین نتایج ۳ تکرار برای هر آزمایش، در جدول ۳ ارائه شده است. میانگین ضریب تغییرات^۱ در آزمایشات مقاومت فشاری در دماهای بررسی شده ۵/۲۱ بود.

بررسی نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که با افزایش سن نمونه مقاومت فشاری بتن معمولی ۱۳/۱۷ درصد، مقاومت فشاری نمونه دارای ۱۰ درصد زئولیت ۴۴/۶۹ درصد و نمونه دارای ۲۰ درصد زئولیت ۳۱/۳۱ درصد افزایش داشته است. علت بیشتر بودن میزان افزایش مقاومت فشاری نمونه زئولیتی در مقایسه با بتن معمولی در این است که زئولیت به خاطر شکل ظاهری و سطح مقطع بیشتری که در مقایسه با سیمان دارد، آب بیشتری را درون خود ذخیره می‌نماید. این ویژگی به بتن‌های حاوی زئولیت قابلیت عمل آوری درونی^۲ را می‌دهد [۱۶]. بنابراین زئولیت در مقایسه با سیمان آب بیشتری را درون خود ذخیره دارد تا جهت هیدراسیون ذرات هیدراته نشده و کسب مقاومت بیشتر مصرف نماید. در ارتباط با اثر جایگزینی درصدی از سیمان با زئولیت ملاحظه گردید که در نمونه‌های ۲۸ روزه جایگزینی ۱۰ و ۲۰ درصد وزنی سیمان با زئولیت، مقاومت فشاری بتن را به ترتیب ۲۷/۵۸ و ۲۱ درصد کاهش داده است. علت این موضوع فعالیت پایین پوزولانی زئولیت طبیعی در مقایسه با سیمان و متفاوت بودن محصولات هیدراسیون زئولیت در مقایسه با سیمان می‌باشد [۲۰] [۳۸]. این درحالیست که در سنین بالاتر جایگزینی ۱۰ و ۲۰ درصد وزنی سیمان با زئولیت، مقاومت فشاری بتن را به ترتیب ۷/۴۱ و ۸/۳۳ درصد کاهش داد. بنابراین جایگزینی سیمان با زئولیت موجب کاهش مقاومت فشاری ۲۸ روزه و ۴۲ روزه شده است و با افزایش سن نمونه میزان کاهش مقاومت فشاری به علت واکنش تدریجی پوزولانی، کاهش یافته است. این روند تاییدی بر مطالعات گذشته است که نشان دادند، در سنین بالا مقاومت فشاری نمونه بتنی حاوی زئولیت برابر یا بیشتر از بتن معمولی می‌باشد [۳۹].

شکل ۳ روند تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های بررسی شده در این مطالعه را در دماهای مختلف نشان می‌دهد. بررسی این نمودار نشان می‌دهد که این روند در بتن معمولی و نمونه‌های حاوی زئولیت مشابه می‌باشد. با افزایش دمای آزمایش به ۱۰۰ درجه سانتیگراد

1 Coefficient of variation
 2 Internal curing ability

جدول ۴. مقاومت فشاری نرمال شده نمونه‌های بررسی شده و مقدار ارایه شده در آیین نامه‌های En و AISC
Table 4. The normalized compressive strength and provided figures by En and AISC

Ze ₂₀	Ze ₁₀	N	AISC ۳۶۰-۱۰	En ۱۹۹۲- ۱-۲	دما
۱	۱	۱	۱	۱	۲۸
۰/۷۷	۰/۸۳	۰/۷۲	۰/۹۵	۱	۱۰۰
۰/۷۷	۰/۷۹	۰/۸۷	۰/۹۰	۰/۹۷	۲۰۰
۱	۰/۹۶	۰/۹۴	۰/۸۴	۰/۹۱	۳۰۰
۰/۹۳	۰/۹۶	۰/۹۹	۰/۷۹	۰/۸۸	۳۵۰
۰/۹۳	۰/۹۳	۰/۹۲	۰/۷۳	۰/۸۵	۴۰۰
۰/۸۷	۰/۸۹	۰/۸۲	۰/۶۷	۰/۷۹	۴۵۰
۰/۷۸	۰/۷۶	۰/۷۳	۰/۶۰	۰/۷۴	۵۰۰
۰/۴۹	۰/۴۱	۰/۴۵	۰/۳۸	۰/۵۱	۶۵۰
۰/۲۲	۰/۲۲	۰/۲۵	۰/۱۵	۰/۲۷	۸۰۰
-	-	-	۰/۰۴	۰/۱۵	۱۰۰۰
-	-	-	۰	۰	۱۲۰۰

بسیار ناچیز است، کاربرد ژئولیت در سازه‌های بتنی با خطر آتش سوزی می‌تواند جایگزین مناسبی برای سیمان باشد.

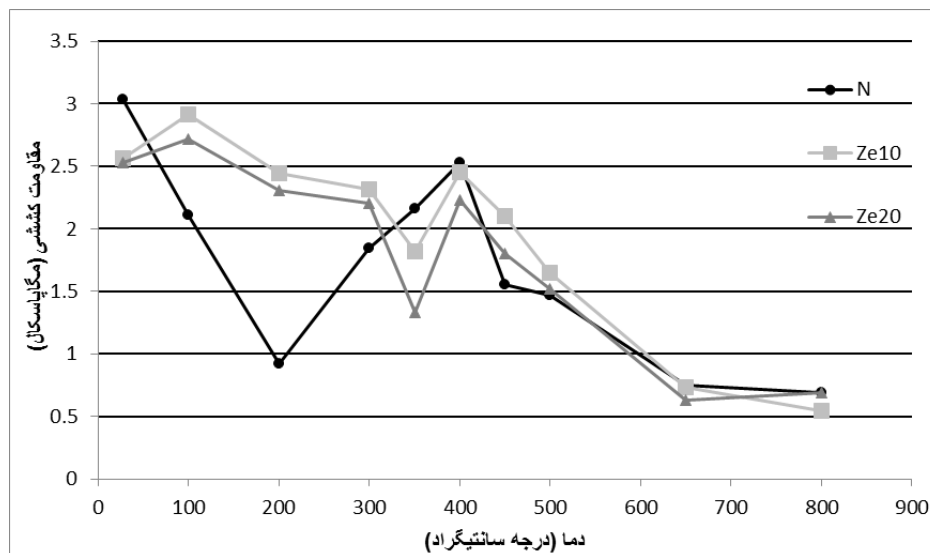
بررسی مقاومت فشاری بتن معمولی در آیین نامه‌هایی که اثر حرارت را بر مشخصات مکانیکی بتن در نظر گرفته‌اند، به صورت مقاومت نرمال شده مطرح شده است. مقاومت فشاری نرمال شده از تقسیم مقاومت فشاری در هر دما به مقاومت فشاری در دمای محیط محاسبه می‌گردد. در این آیین نامه‌ها مقادیر ارایه شده بر اساس آزمایشات انجام شده بر روی نمونه‌های سرد شده می‌باشد. جدول ۴ مقدار مقاومت فشاری نرمال شده بتن معمولی را با مقادیر ارایه شده توسط آیین نامه‌های 2-1-En1992 [۴۵] و 10-360 AISC [۴۶] مقایسه مینماید و مقادیر مرتبط با نمونه‌های بتنی ساخته شده از ژئولیت را نیز ارایه می‌دهد. مقایسه مقاومت فشاری نرمال شده ارایه شده در این دو آیین نامه نشان می‌دهد که آیین نامه AISC مقادیر محافظه کارانه‌تری را ارایه داده است. مقایسه مقاومت فشاری نرمال شده بتن معمولی با نمونه‌های دارای ژئولیت نیز به غیر از دماهای ۱۰۰ و ۲۰۰ درجه سانتیگراد که نمونه‌های حاوی ژئولیت، مقاومت

سانتیگراد مقاومت فشاری نمونه‌های N، Ze10 و Ze20 به ترتیب ۱۳/۵، ۱۰/۶۹ و ۱۰/۸۴ مگاپاسکال بود. عوامل مختلفی باعث کاهش مقاومت بتن در این محدوده می‌باشند که می‌توان به تبخیر آب محصور در لایه‌های ژل C-S-H در حدود دمای ۳۰۰°C، تجزیه $(OH)_2Ca$ به (CaO) و آب در دمای ۴۰۰°C، تجزیه C-S-H در ۶۰۰°C و در نهایت تبدیل $CaCO_3$ به CaO و CO_2 در محدوده دمایی ۷۰۰-۸۰۰ درجه سانتیگراد اشاره کرد [۴۲]-[۴۴].

در رابطه با مقایسه نمونه‌های Ze10 و Ze20 ملاحظه گردید که در دماهای کم‌تر از ۴۵۰ درجه سانتیگراد نمونه‌های Ze10 و در دماهای بالاتر از ۴۵۰ درجه سانتیگراد نمونه‌های Ze20 مقاومت فشاری بیشتری داشته‌اند به طوری که در این دماها می‌توان آن را معادل بتن معمولی در نظر گرفت. همچنین ملاحظه گردید که جایگزینی ۱۰ و ۲۰ درصد وزنی سیمان با ژئولیت در دماهای بررسی شده به طور متوسط مقاومت فشاری بتن را به ترتیب در حدود ۷/۸۹ و ۷/۶۷ درصد کاهش داده است. با توجه به اینکه این اختلاف مقدار ناچیزی بوده و به خصوص در دماهای بالاتر از ۴۰۰ درجه سانتیگراد

جدول ۵. مقاومت کششی ۲۸ و ۴۲ روزه در دمای محیط
Table 5. The tensile strength of specimens at ambient temperature (28 day and 42 day specimens)

Ze۲۰		Ze۱۰		N		نام نمونه
۴۲	۲۸	۴۲	۲۸	۴۲	۲۸	سن نمونه (روز)
۲/۵۳	۲/۴۵	۲/۵۶	۲/۴۶	۳/۰۳	۲/۵۷	مقاومت کششی (مگاپاسکال)



شکل ۴. تغییرات مقاومت کششی نمونه‌ها در دماهای مختلف
Fig. 4. The variation of tensile strength of specimens with temperature

استوانه ای به قطر ۱۵ سانتی متر و ارتفاع ۳۰ سانتی متر، و بر اساس استاندارد ASTM C 496/C 496M – 04 انجام شده است [۴۷]. آزمایش مقاومت کششی در روزهای ۲۸ ام و ۴۲ وم در دمای محیط انجام شده و میانگین نتایج ۳ تکرار برای هر آزمایش، در جدول ۵ ارایه شده است. میانگین ضریب تغییرات در آزمایشات مقاومت کششی در دماهای بررسی شده ۹،۳۶ بود.

بررسی نتایج به دست آمده نشان میدهد که با افزایش سن نمونه مقاومت کششی بتن معمولی، نمونه دارای ۱۰ درصد ژئولیت و نمونه دارای ۲۰ درصد ژئولیت به ترتیب ۱۷/۷۹، ۳/۹۴ و ۳/۲۳ درصد افزایش داشته است. در ارتباط با اثر جایگزینی درصدی از سیمان با ژئولیت ملاحظه گردید که جایگزینی ۱۰ و ۲۰ درصد وزنی سیمان با ژئولیت، مقاومت کششی ۲۸ روزه بتن را به ترتیب ۴/۳۱ و ۴/۶۹ درصد و مقاومت کششی ۴۲ روزه بتن را به ترتیب ۱۵/۵۶ و ۱۶/۴۸ درصد کاهش داده است. بنابراین جایگزینی سیمان با ژئولیت موجب کاهش

فشاری نرمال شده کمتری در مقایسه با بتن معمولی داشته اند، در سایر دماهای آزمایش یا موجب بهبود مقاومت فشاری نرمال شده شده اند و یا اختلاف بسیار ناچیزی با مقاومت فشاری نرمال شده بتن معمولی داشته‌اند. که این موضوع نیز اثر مثبت کاربرد ژئولیت را بر بهبود مشخصه مقاومت فشاری نرمال شده بتن روشن مینماید. مقایسه مقاومت فشاری نرمال شده نمونه‌های Ze10 و Ze20 ملاحظه گردید که در دماهای کم‌تر از ۴۵۰ درجه سانتیگراد نمونه‌های Ze10 و در دماهای بالاتر از ۴۵۰ درجه سانتیگراد نمونه‌های Ze20 مقاومت فشاری نرمال شده بیشتری داشته اند. با توجه به این موارد، میتوان در سازه‌های بتن آرمه حساس به آتش سوزی ژئولیت را جایگزین مناسبی برای سیمان دانست.

۲-۳-۲- آزمون مقاومت کششی

آزمایش مقاومت کششی به روش دونیم شدن، بر روی نمونه های

جدول ۶. مقاومت کششی نرمال شده نمونه‌های بررسی شده و مقدار ارایه شده در آیین نامه En
Table 6. The normalized tensile strength and provided figures by En

Ze20	Ze10	N	En1992-1-2	دما
۱	۱	۱	۱	۲۸
۱/۰۷	۱/۱۴	۰/۷۰	۱	۱۰۰
۰/۹۱	۰/۹۵	۰/۳۰	۰/۸۰	۲۰۰
۰/۸۷	۰/۹۱	۰/۶۱	۰/۶۰	۳۰۰
۰/۵۳	۰/۷۱	۰/۷۱	۰/۵۰	۳۵۰
۰/۸۸	۰/۹۶	۰/۸۳	۰/۴۰	۴۰۰
۰/۷۱	۰/۸۲	۰/۵۱	۰/۳۰	۴۵۰
۰/۶۰	۰/۶۴	۰/۴۹	۰/۲۰	۵۰۰
۰/۲۵	۰/۲۹	۰/۲۵	.	۶۵۰
۰/۲۷	۰/۲۱	۰/۲۳	.	۸۰۰

بخار آب ملاحظه گردید. که میتوان این پدیده را به اثر همزمان فشار بخار آب موجود در بتن به سمت بیرون و فشار جک به سمت نمونه مرتبط دانست. بررسی اثر پوزولان بر مقاومت کششی بتن در دماهای بررسی شده نشان داد که، زئولیت مقاومت کششی را در اکثر دماها بهبود داده است و در مواردی نیز که کم‌تر است اختلاف چندانی با مقاومت کششی بتن معمولی ندارد. همچنین ملاحظه گردید که در دماهای بالاتر از ۴۰۰ درجه سانتیگراد مقاومت کششی بتن معمولی و پوزولانی روندی نزولی داشتند به طوری که در دمای ۸۰۰ درجه سانتیگراد مقاومت کششی نمونه‌های N، Ze10 و Ze20 به ترتیب ۰/۶۹، ۰/۵۵ و ۰/۶۹ مگاپاسکال بود.

در رابطه با مقایسه نمونه‌های Ze20 و Ze10 ملاحظه گردید که در تمامی دماهای بررسی شده، نمونه دارای زئولیت کم‌تر، مقاومت کششی بیشتری داشته است و به طور متوسط در دماهای بررسی شده جایگزینی ۱۰ و ۲۰ درصد وزنی سیمان با زئولیت مقاومت کششی بتن را به ترتیب ۲۱/۸۸ و ۱۳/۵۱ درصد بهبود داده است. بنابراین کاربرد زئولیت در سازه‌های بتنی با خطر آتش سوزی میتواند جایگزین مناسبی برای سیمان باشد.

جدول ۶ مقدار مقاومت کششی نرمال شده بتن معمولی را با مقادیر ارایه شده توسط آیین نامه En1992-1-2 [۴۸] مقایسه

مقاومت کششی ۲۸ روزه و ۴۲ روزه شده است و جایگزینی درصدی بیشتری از این پوزولان در سن ۲۸ روزه و ۴۲ روزه موجب تشدید آن شده است.

روند تغییرات مقاومت کششی در بتن معمولی و پوزولانی با تغییرات دمای آزمایش در شکل ۴ ارایه شده است. با افزایش دمای آزمایش تا ۲۰۰ درجه سانتیگراد، مقاومت کششی بتن معمولی به شدت کاهش یافته، از دمای ۲۰۰ درجه تا ۴۰۰ درجه سانتیگراد روندی صعودی داشته و از ۴۰۰ درجه به بعد روندی رو به کاهش داشته است. روند تغییرات مقاومت کششی نمونه‌های حاوی زئولیت نیز در تمامی دماهای آزمایش با هم مشابه میباشد. برخلاف دمای محیط که کاربرد زئولیت در بتن موجب کاهش مقاومت کششی شده است، در دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد به ترتیب جایگزینی ۱۰ و ۲۰ درصد وزنی از سیمان با زئولیت موجب بهبود مقاومت کششی بتن به مقدار ۳۸/۱۵ و ۲۸/۹۵ درصد شده است. میزان بهبود مقاومت کششی در دمای ۲۰۰ درجه سانتیگراد و برای نمونه‌های Ze10 و Ze20 به ترتیب ۱۶۴/۷۶ و ۱۴۹/۶۲ درصد بود. همانگونه که در نمودار ملاحظه میگردد در دماهای ۱۰۰ و ۲۰۰ درجه سانتیگراد، مقاومت کششی بتن معمولی افت شدیدی را تجربه کرده است. در این دماها و همزمان با شکست نمونه صدایی بلند همراه با آزاد سازی



شکل ۵. تصویر برخی از نمونه‌ها حین آزمون جذب آب سطحی
Fig. 5. Picture of some specimens during surface water absorption test

مینماید و مقادیر مرتبط با نمونه‌های بتنی ساخته شده از زئولیت را ارایه میدهد. مقایسه مقادیر تجربی و آیین نامه‌ای نشان میدهد که در دماهای ۱۰۰ و ۲۰۰ درجه سانتیگراد مقادیر آیین نامه و در سایر دماها مقاومت کششی نرمال شده تجربی، بیشتر بودند. در رابطه با تاثیر جایگزینی زئولیت با سیمان نیز ملاحظه گردید که در هر دو درصد جایگزینی مقاومت کششی نرمال شده بتن معمولی در دماهای بررسی شده بهبود داشته است. به طوریکه به طور متوسط جایگزینی ۱۰ و ۲۰ درصد وزنی سیمان با زئولیت، مقاومت کششی نرمال شده را ۴۹ و ۳۹ درصد بهبود داده است. بنابراین در رابطه با مقاومت کششی نرمال شده درصدهای جایگزینی کم‌تری از سیمان با زئولیت موثرتر بوده اند.

۴-۲- آزمایشات مشخصات دوام

بسیاری از سازه‌های بتن آرمه که آتش سوزی را در طول عمر خود تجربه کرده‌اند، پس از آتش سوزی بدون مقاوم سازی به کاربری خود ادامه میدهند. بنابراین آگاهی از اثرات قرارگیری در دماهای بالا بر دوام سازه‌های بتنی اهمیت ویژه ای دارد. در این مطالعه برخی از مشخصات دوام بتن از جمله مشخصات جذب آب سطحی، عمق نفوذ آب، مقاومت الکتریکی و افت وزنی در اثر قرارگیری در دماهای مختلف، آزمایش و بررسی شده است.

۴-۲-۱- آزمون ضریب جذب آب سطحی

آزمایش جذب آب سطحی بر روی نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۱۰ سانتیمتر انجام شده است. در این آزمایش هدف آن است که آب تنها از یک سطح بتن و با توجه به خواص مویینگی جذب شود. در این آزمایش، با اندازه گیری میزان آب جذب شده در بتن پس از فواصل زمانی ۳، ۶، ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعت از شروع آزمایش و استفاده از رابطه ۱، ضریب جذب آب سطحی بتن تعیین میگردد.

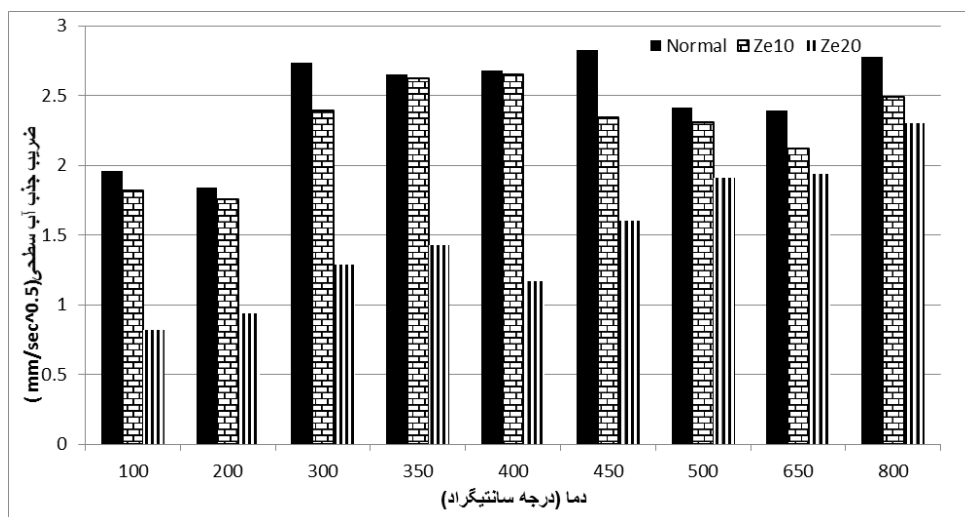
$$\bar{i} = \sqrt{t} + c \quad (1)$$

که در آن $i = \frac{m_i - m_0}{A \times \gamma_{water}}$ ، در این رابطه m_i وزن نمونه در هر یک از فواصل زمانی آزمایش (gr)، m_0 وزن نمونه پیش از قرارگیری در سینی (gr)، A سطح مقطع نمونه (mm^2)، γ_{water} وزن مخصوص آب ($10^{-3} gr/mm^3$)، t مدت زمان آزمایش (Sec)

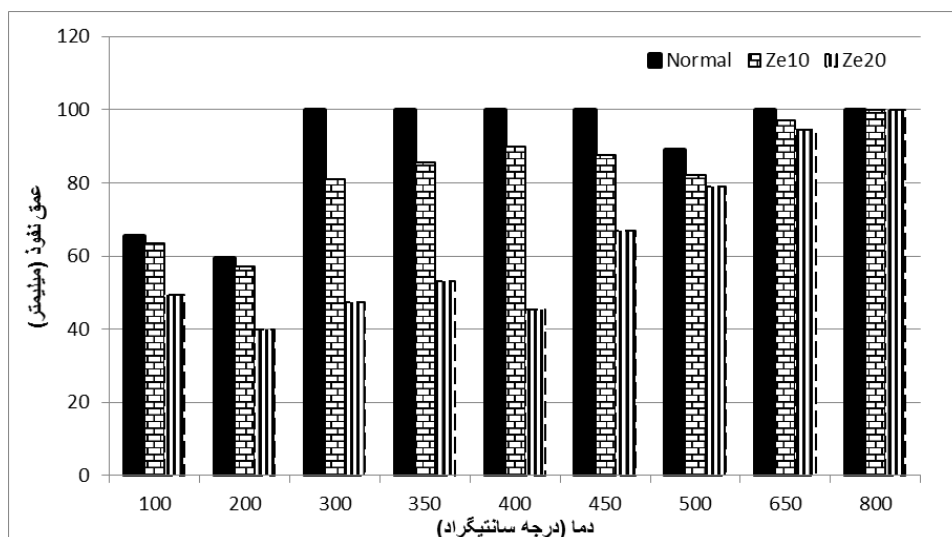
میباشد. با رسم نمودار \bar{i} در برابر \sqrt{t} مقدار ضریب S ($mm/sec^{0.5}$) برآورد میگردد [۲۴].

نمونه‌های بتنی یک هفته بعد از آنکه از کوره بیرون آمدند، در محیط آزمایشگاه به طور طبیعی سرد شدند. پیش از شروع آزمایش جذب آب سطحی، پیرامون آن‌ها به ارتفاع ۳ سانتیمتر از پایین نمونه توسط چسب عایق گردید، بر روی میله‌هایی به قطر ۵ میلی‌متر در کف سینی قرار داده شده و سپس سینی با آب به نحوی پرگردید که ۱٫۵ سانتیمتر نمونه زیر آب باشد. شکل ۵، برخی از نمونه‌ها را حین آزمایش نشان میدهد. برای تامین شرایط یکنواخت برای این آزمون و به منظور جلوگیری از کاهش ارتفاع آب درون سینی، در زمان‌های متناوب ارتفاع آب بررسی گردید و در مواردی که کاهش ملاحظه گردید، ارتفاع آب به تراز اولیه بازگردانده شد.

ضریب جذب آب سطحی در دماهای ۱۰۰-۸۰ درجه سانتیگراد برای نمونه‌های N، Ze10 و Ze20 در شکل ۶ ترسیم شده است. با توجه به این نمودار ملاحظه شده است که با افزایش دمای آزمایش از ۱۰۰ تا ۸۰ درجه سانتیگراد مقدار ضریب جذب آب سطحی نمونه‌های N، Ze10 و Ze20 به ترتیب ۴۲، ۳۷ و ۱۸۲ درصد افزایش داشته است. جایگزینی ۱۰ درصد وزنی سیمان با زئولیت نشان داده است که به طور متوسط در دماهای بررسی شده موجب کاهش ۸ درصدی این ضریب شده است. جایگزینی مقادیر بالاتری از سیمان با زئولیت، در تمامی دماهای بررسی شده این ضریب را



شکل ۶. تغییرات ضریب جذب آب سطحی با تغییرات دما
Fig. 6. The variation of the sorptivity coefficient with temperature



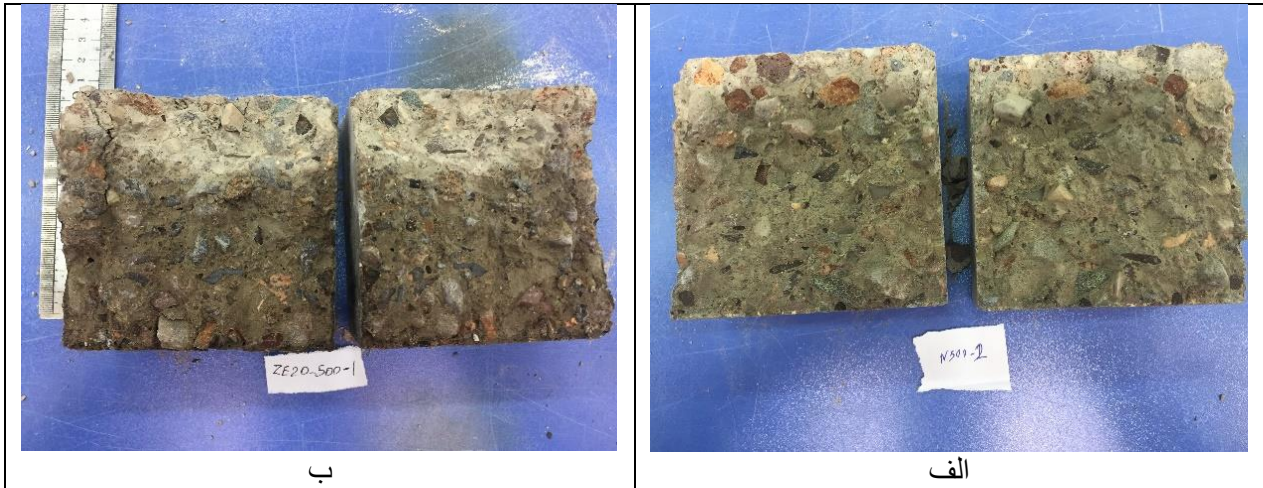
شکل ۷. تغییرات عمق نفوذ آب به درون بتن برای نمونه‌های بررسی شده
Fig. 7. The variation of water penetration depth with temperature

سطحی بتن، نمونه‌های دارای ۲۰ درصد وزنی سیمان بهترین عملکرد را در دماهای بررسی شده داشته‌اند.

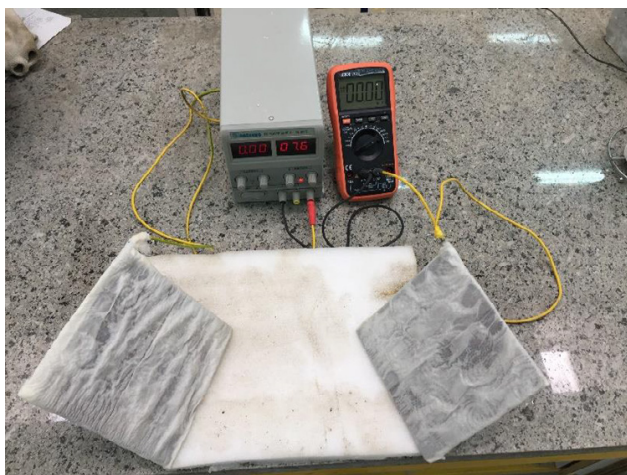
۲-۴-۲- آزمون عمق نفوذ آب

در این مطالعه میزان عمق نفوذ آب به درون بتن به خاطر خواص مویینگی تعیین شده است. در این آزمایش نمونه‌های مکعبی مشابه با نمونه‌های آزمایش شده در آزمون جذب آب سطحی آماده شدند و میزان نفوذ آب به درون نمونه پس از ۷۲ ساعت قرارگیری یک

بیشتر کاهش داده است. به طوریکه مقدار ضریب جذب آب سطحی نمونه‌های Ze20 به طور متوسط در دماهای بررسی شده به مقدار ۴۰ درصد کمتر از ضریب جذب آب سطحی نمونه بتن معمولی بود. دلیل کاهش این ضریب در اثر جایگزینی سیمان با زئولیت را میتوان به ریزتر بودن اجزای زئولیت در مقایسه با سیمان مرتبط دانست. این اجزای ریز فضاهای مویینه بتن را پر کرده و با کاهش خاصیت مویینگی موجب کاهش ضریب جذب آب سطحی بتن شده است. بنابراین میتوان نتیجه گیری کرد که در رابطه با آزمون جذب آب



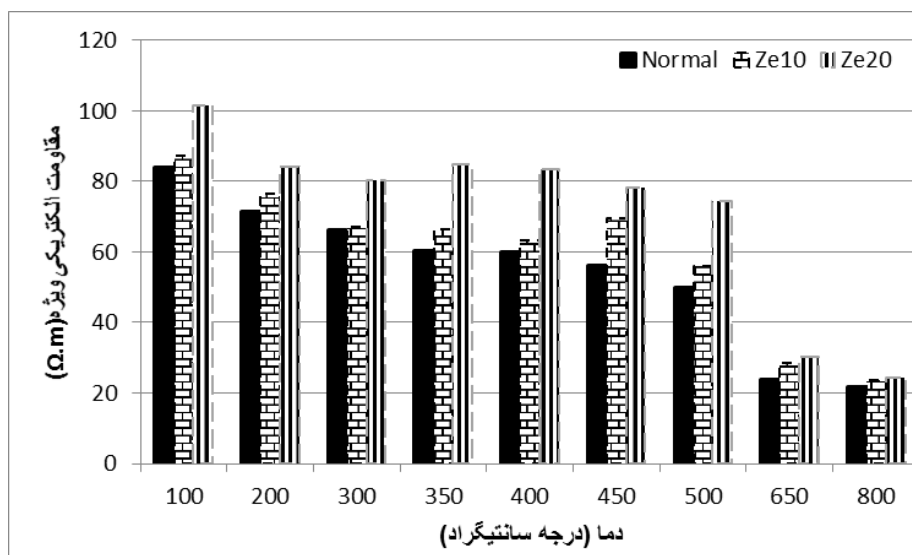
شکل ۸. پروفیل عمق نفوذ آب در دمای ۵۰۰ درجه سانتیگراد (الف) نمونه بتن معمولی، (ب) نمونه Ze20
 Fig. 8. The profile of specimens after the penetration depth test at 500 °C, a) Normal, b) Ze20



شکل ۹. تجهیزات آزمایش مقاومت الکتریکی
 Fig. 9. The equipment of electrical resistance test

وجه آن در معرض آب تعیین شد. بعد از گذشت این مدت زمان، پس از جداسازی چسب، نمونه‌ها توسط جک فشاری به دو نیم تقسیم شدند و میزان نفوذ آب به درون بتن قرائت گردید. عمق نفوذ آب در دماهای ۱۰۰-۸۰۰ درجه سانتیگراد برای نمونه‌های N ، Ze10 و Ze20 در شکل ۷ ترسیم شده است. با توجه به این نمودار ملاحظه شده است که افزایش دمای آزمایش به طور کلی موجب افزایش عمق نفوذ آب به درون بتن شده است. با افزایش دمای آزمایش از ۱۰۰ تا ۸۰۰ درجه سانتیگراد ملاحظه گردید که عمق نفوذ نمونه‌های N ، Ze10 و Ze20 به ترتیب ۵۳، ۵۸ و ۱۰۳ درصد افزایش یافته است. از طرف دیگر ملاحظه گردید که در تمامی دماهای آزمایش جایگزینی درصدی از سیمان با ژئولیت عمق نفوذ آب در بتن را کاهش داده است. در مجموع جایگزینی ۱۰ و ۲۰ درصد وزنی سیمان با ژئولیت به طور متوسط موجب کاهش ۹ و ۳۲ درصدی عمق نفوذ بتن معمولی در دماهای بالا شده است. نفوذ آب به درون بتن به ریزساختار بتن مرتبط می‌باشد. تاثیر بالای ژئولیت در کاهش عمق نفوذ نمونه‌ها نیز به خاطر اصلاح ریزساختار بتن توسط ژئولیت‌ها می‌باشد. در نمونه‌های حاوی ژئولیت، به خاطر فعالیت پوزولانی، $Ca(OH)_2$ موجود در ترکیب بتن مصرف شده و ژل CSH ثانویه تشکیل می‌گردد. بنابراین تخلل و نفوذ پذیری بتن کاهش می‌یابد [۱۶]، [۴۹]. از طرف دیگر ملاحظه شده است که نمونه‌های حاوی درصد‌های بالاتری از ژئولیت، بیشترین تاثیر را در

کاهش عمق نفوذ آب در بتن و در دماهای بالا داشته‌اند. در این شرایط، به خاطر کاربرد مقادیر بیشتری از ژئولیت، فضاهاى بیشتری از حفرات درون بتن پر میشود که در نهایت مانع از نفوذ آب به درون بتن میگردد. پروفیل عمق نفوذ آب برای نمونه‌های N و Ze20 در دمای ۵۰۰ درجه سانتیگراد در شکل ۸ ارایه شده است. مقایسه نمودارهای تغییرات ضریب جذب آب سطحی با عمق نفوذ نشان میدهد که این دو نمودار تشابه قابل قبولی داشته‌اند و با در اختیار داشتن یکی از این مقادیر، روند کلی تغییرات پارامتر بعدی روشن میگردد.



شکل ۱۰. تغییرات مقاومت الکتریکی ویژه بتن در دماهای مختلف
 Fig. 10. The variation of specific electrical resistance with temperature

۲-۴-۳- آزمون مقاومت الکتریکی

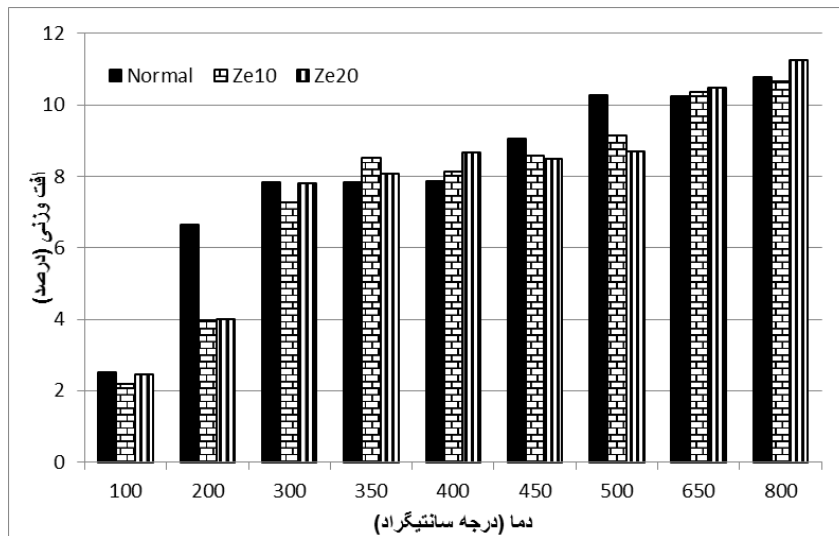
یکی از معیارهای بارز بررسی دوام بتن آزمون مقاومت الکتریکی میباشد [۳۸]. این آزمایش برای ارزیابی میزان نرخ خوردگی احتمالی نمونه‌های بتن مسلح در حمله کلرایدی و برای کنترل آسیب به آرماتورها میباشد. از طرفی دیگر مطالعات گذشته نشان داده‌اند که، افزایش مقاومت الکتریکی بتن را نشانی از کاهش نفوذپذیری آن دانست [۴۴]. آزمون مقاومت الکتریکی بر روی نمونه مکعبی به ابعاد ۱۰ سانتیمتر انجام شده است. نمونه‌های سرد شده در محیط آزمایشگاه ابتدا به مدت ۲۴ ساعت در آب غرقاب شدند و به محض خارج شدن از آب آزمایش شدند. یکی از معیارهای بارز بررسی دوام بتن آزمون مقاومت الکتریکی میباشد [۳۸]. شکل ۹، تجهیزات آزمایشگاهی آزمون مقاومت الکتریکی را نشان میدهد.

مقاومت الکتریکی ویژه از رابطه ۳ محاسبه می شود [۵۰]. در این رابطه R مقاومت الکتریکی (Ω)، A سطح مقطع بتن (m^2)، L طول نمونه و r مقاومت الکتریکی ویژه بتن (Ωm) میباشد. مقاومت الکتریکی بتن در دو جهت عمود بر هم نمونه ها اندازه گیری و در نهایت میانگین گیری شده است و نتایج در شکل ۱۰ ارایه شده است.

$$r = \frac{R \times A}{L} \quad (2)$$

با توجه به این نمودار ملاحظه میگردد که روند تغییرات مقاومت

الکتریکی ویژه بتن معمولی و بتن‌های دارای زئولیت مشابه بود. افزایش دمای آزمایش مقاومت الکتریکی ویژه را کاهش داده است. تا دمای ۵۰۰ درجه سانتیگراد مقاومت الکتریکی ویژه با نرخ پایین و پس از آن با نرخ بالاتری افزایش داشته است. علت کاهش شدید مقاومت الکتریکی ویژه در این دماها به خاطر گسترش شدید ترک‌ها میباشد که از دمای ۵۰۰ درجه سانتیگراد به بعد تشدید یافته است. این روند به شکلی بود که با افزایش دمای آزمایش از ۱۰۰ تا ۸۰۰ درجه سانتیگراد، مقاومت الکتریکی ویژه نمونه‌های N، Ze10 و Ze20 به ترتیب ۷۴، ۷۳ و ۷۶ درصد کاهش یافت است که میتوان آن را به افزایش تخلخل و گسترش ترک‌های ناشی از حرارت مرتبط دانست. همچنین ملاحظه گردید که جایگزینی ۱۰ و ۲۰ درصد وزنی سیمان با زئولیت در دماهای بررسی شده، مقاومت الکتریکی ویژه بتن را به طور متوسط به ترتیب ۹ و ۳۲ درصد افزایش داده است. علت بهبود مشخصات دوام نمونه‌های دارای پوزولان را میتوان به ابعاد ریز آنها نسبت داد. این اجزای ریز فضاهای خالی مابین بتن را پر کرده و با کاهش تخلخل و نفوذپذیری بتن، باعث کاهش جریان عبوری و در نهایت افزایش مقاومت الکتریکی بتن شده‌اند. جایگزینی درصدی بیشتری از پوزولان با سیمان نیز چون فضای بیشتری از درون بتن را پر میکند، با کاهش جریان عبوری مقاومت الکتریکی بیشتری دارد. علاوه بر این استفاده از این پوزولان در کاهش افت مقاومت نیز موثر



شکل ۱۱. تغییرات افت وزنی بتن در دماهای مختلف
Fig. 11. The variation of weight loss with temperature

۵۰۰ درجه بودند با دمای ۱۰۰ درجه و برای نمونه‌های N، Ze10 و Ze20 به ترتیب ۳۰۸، ۳۱۷ و ۲۵۲ درصد را نشان می‌دهد. با توجه به این موارد میتوان نتیجه گرفت که در دماهای بالا نمونه بتن معمولی در مقایسه با دمای ۱۰۰ درجه افت کمتری را تجربه کرده است و در میان نمونه‌های ژئولیتی، نمونه حاوی درصدهای بیشتری از ژئولیت عملکرد بهتری را داشته‌اند. در رابطه با تاثیر جایگزینی درصدی از سیمان با ژئولیت بر افت وزنی بتن در هر دما، نمیتوان روند ثابتی را گزارش نمود. به طور مثال در دماهای ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۵۰ و ۵۰۰ درجه سانتیگراد نمونه‌های ژئولیتی و در سایر دماهای بررسی شده نمونه بتن معمولی افت وزنی کمتری را تجربه کرده‌اند. با این حال میتوان نتیجه گیری نمود که به غیر از دمای ۲۰۰ درجه سانتیگراد که افت وزنی نمونه‌های ژئولیتی به طور قابل توجهی کم‌تر از بتن معمولی است، در سایر دماها اختلاف قابل توجهی میان افت وزنی نمونه‌های ژئولیتی و معمولی دیده نشده است.

۵- نتیجه گیری

در این مطالعه تاثیر جایگزینی ۱۰ و ۲۰ درصد وزنی سیمان با ژئولیت جهت بهبود مشخصات مکانیکی و دوام بتن در محدوده دماهای ۲۸ تا ۸۰۰ درجه سانتیگراد بررسی گردید. مشخصات مکانیکی نمونه‌ها در حالت داغ و مشخصات دوام آن‌ها پس از سرد شدن در دمای محیط بررسی گردید. نتایج این مطالعه نشان داده

بوده است. به طور مثال در بتن معمولی نمونه‌ای که دماهای ۴۰۰، ۵۰۰ و ۶۵۰ درجه سانتیگراد را تجربه کرده است در مقایسه به نمونه‌ای که دمای ۱۰۰ درجه را تجربه کرده است به ترتیب ۲۹، ۴۰ و ۷۱ درصد، کاهش یافته است. در همین دماها و در نمونه دارای ۱۰ درصد وزنی سیمان ژئولیت، مقاومت الکتریکی ۲۷، ۳۶ و ۶۷ درصد و در حالت استفاده از ۲۰ درصد وزنی سیمان ژئولیت ۱۸، ۲۷ و ۷۰ درصد کاهش یافته است. در نتیجه جایگزینی ۲۰ درصد وزنی سیمان با ژئولیت، میتواند راهکار مناسبی جهت بهبود مشخصات مقاومت الکتریکی ویژه بتن که معیاری از خوردگی آرماتورها میباشد، باشد.

۲-۴-۳- آزمون افت وزنی

در این مطالعه افت وزنی نمونه‌های مکعبی به ابعاد ۱۰ سانتیمتر در اثر قرارگیری در دماهای ۱۰۰-۸۰۰ درجه سانتیگراد تعیین و در نمودار ۱۱ ترسیم شده است. بررسی نمودارها نشان میدهد که با افزایش دمای آزمایش، درصد افت وزنی نمونه‌های بتن معمولی و نمونه‌های حاوی ژئولیت روندی صعودی داشته‌اند. مقایسه افت وزنی نمونه‌ها در دمای ۸۰۰ درجه در مقایسه با دمای ۱۰۰ درجه در نمونه‌های N، Ze10 و Ze20 به ترتیب ۳۲۸، ۳۸۵ و ۳۵۵ درصد افزایش داشته است. این مقایسه مابین دمای ۶۵۰ با ۱۰۰ درجه و در نمونه‌های N، Ze10 و Ze20 به ترتیب ۳۰۷، ۳۷۳ و ۳۲۵ درصد را نشان میدهد. همچنین، مقایسه افت وزنی نمونه‌هایی که در دمای

است:

در بررسی مشخصات دوام بتن ملاحظه گردید که افزایش دمای آزمایش موجب اثرات نامطلوبی بر این مشخصه شده است. با افزایش دمای آزمایش از ۱۰۰ تا ۸۰۰ درجه سانتیگراد ضریب جذب آب سطحی نمونه های N، Ze10 و Ze20 به ترتیب ۳۷، ۱۸۲ و درصد افزایش یافته است. در همین بازه دمایی، عمق نفوذ نمونه ها به ترتیب ۵۳، ۵۸ و ۱۰۳ درصد افزایش یافته است و مقاومت الکتریکی ویژه نمونه های N، Ze10 و Ze20 به ترتیب ۷۴، ۷۳ و ۷۶ درصد کاهش یافته است. در آزمون ضریب جذب آب سطحی جایگزینی ۱۰ و ۲۰ درصد وزنی سیمان با زئولیت در دماهای بررسی شده به طور متوسط و به ترتیب موجب ۸ و ۴۰ درصد بهبود این مشخصه شده است. این بررسی در آزمون های عمق نفوذ و مقاومت الکتریکی بتن برای جایگزینی ۱۰ و ۲۰ درصد وزنی سیمان با زئولیت به ترتیب بهبود ۹ و ۳۲ درصدی را نشان داده است. مقایسه افت وزنی نمونه ها در دمای ۸۰۰ درجه در مقایسه با دمای ۱۰۰ درجه در نمونه های N، Ze10 و Ze20 به ترتیب ۳۲۸، ۳۸۵ و ۳۵۵ درصد افزایش داشته است.

بنابراین با توجه به توضیحات فوق میتوان نتیجه گیری کرد که علاوه بر اینکه از زئولیت میتوان جهت حفظ مشخصات مکانیکی سازه های بتن آرمه با خطر آتش سوزی استفاده نمود، مشخصات دوام بسیار قابل قبولی را برای سازه های بتن آرمه فراهم مینمایند. از طرفی دیگر بررسی مشخصات مکانیکی و دوام نشان داد که به ترتیب جایگزینی ۱۰ و ۲۰ درصد وزنی سیمان با زئولیت، بهترین عملکرد را در دماهای بالا نتیجه داده است. از آنجایی که در جهت ملاحظات محیط زیستی به دنبال کاهش مصرف سیمان هستیم و جایگزینی تا ۲۰ درصد وزن سیمان با زئولیت در مجموع رفتار قابل قبولی را در دماهای بالا نشان داده است، توصیه میشود که در طرح اختلاط سازه های بتن آرمه حتی در شرایط حساس به آتش سوزی تا ۲۰ درصد وزنی سیمان را با زئولیت جایگزین نمود.

منابع

- [1] J.S. Damtoft, J. Lukasik, D. Herfort, D. Sorrentino, E.M. Gartner, Sustainable development and climate change initiatives, Cement and concrete research, 38(2) (2008) 115-127.
- [2] M. Valipour, M. Yekkalar, M. Shekarchi, S. Panahi,

جایگزینی ۱۰ و ۲۰ درصد وزنی سیمان با زئولیت مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن معمولی را به ترتیب ۷/۴۱ و ۸/۳۳ درصد و مقاومت فشاری ۴۲ روزه بتن معمولی را به ترتیب ۲۷/۵۸ و ۲۱ درصد کاهش داده است. علاوه بر این ملاحظه گردید که مقاومت فشاری ۴۲ روزه بتن معمولی، نمونه Ze10 و نمونه Ze20 به ترتیب ۱۳/۱۷، ۴۴/۶۹ و ۳۱/۳۱ درصد از نمونه بتنی ۲۸ روزه بیشتر بود.

روند تغییرات مقاومت فشاری بتن معمولی و زئولیتی در دماهای مختلف مشابه بود و جایگزینی ۱۰ و ۲۰ درصد وزنی سیمان با زئولیت در دماهای بررسی شده به طور متوسط مقاومت فشاری بتن را به ترتیب در حدود ۷/۸۹ و ۷/۶۷ درصد کاهش داده است. همچنین ملاحظه گردید که در دماهای کم تر از ۴۵۰ درجه سانتیگراد نمونه های Ze10 و در دماهای بالاتر از ۴۵۰ درجه سانتیگراد نمونه های Ze20 مقاومت فشاری بیشتری داشته اند.

بررسی مقاومت فشاری نرمال شده نشان داد که به غیر از دماهای ۱۰۰ و ۲۰۰ درجه سانتیگراد که نمونه های حاوی زئولیت، مقاومت فشاری نرمال شده کمتری در مقایسه با بتن معمولی داشته اند، در سایر دماهای آزمایش یا موجب بهبود مقاومت فشاری نرمال شده شده اند و یا اختلاف بسیار ناچیزی با مقاومت فشاری نرمال شده بتن معمولی داشته اند. مقایسه مقاومت فشاری نرمال شده نمونه های Ze10 و Ze20 در دماهای بررسی شده نیز روندی مشابه با نتایج مقاومت فشاری را نشان داد.

جایگزینی ۱۰ و ۲۰ درصد وزنی سیمان با زئولیت مقاومت کششی ۲۸ روزه بتن را به ترتیب ۴/۳۱ و ۴/۶۹ درصد و مقاومت کششی ۴۲ روزه بتن را به ترتیب ۱۵/۵۶ و ۱۶/۴۸ درصد کاهش داده است. همچنین ملاحظه گردید که مقاومت کششی ۴۲ روزه بتن معمولی، Ze10 و Ze20 به ترتیب ۱۷/۷۹، ۳/۹۴ و ۳/۲۳ درصد از نمونه بتنی ۲۸ روزه بیشتر بود.

بررسی مقاومت کششی بتن نشان داد که زئولیت تاثیر قابل توجهی بر بهبود مقاومت کششی و مقاومت کششی نرمال شده بتن در دماهای بالا داشته است. جایگزینی ۱۰ و ۲۰ درصد وزنی سیمان با زئولیت مقاومت کششی را به ترتیب ۲۱/۸۸ و ۱۳/۵۱ درصد و مقاومت کششی نرمال شده را به ترتیب ۴۹ و ۳۹ درصد بهبود داده است.

- slag binders at high temperature, *Cement and Concrete Composites*, 86 (2018) 9-18.
- [13] M. Valipour, F. Pargar, M. Shekarchi, S. Khani, Comparing a natural pozzolan, zeolite, to metakaolin and silica fume in terms of their effect on the durability characteristics of concrete: A laboratory study, *Construction and Building Materials*, 41 (2013) 879-888.
- [14] T. Markiv, O. Huniak, K. Sobol, Optimization of concrete composition with addition of zeolitic tuff, *Вісник Національного університету Львівська політехніка. Теорія і практика будівництва*, (781) (2014) 116-120.
- [15] K. Samimi, S. Kamali-Bernard, A.A. Maghsoudi, M. Maghsoudi, H. Siad, Influence of pumice and zeolite on compressive strength, transport properties and resistance to chloride penetration of high strength self-compacting concretes, *Construction and Building Materials*, 151 (2017) 292-311.
- [16] M. Najimi, J. Sobhani, B. Ahmadi, M. Shekarchi, An experimental study on durability properties of concrete containing zeolite as a highly reactive natural pozzolan, *Construction and Building Materials*, 35 (2012) 1023-1033.
- [17] B. Ahmadi, M. Shekarchi, Use of natural zeolite as a supplementary cementitious material, *Cement and Concrete Composites*, 32(2) (2010) 134-141.
- [18] D. Nagrockiene, G. Girskas, Research into the properties of concrete modified with natural zeolite addition, *Construction and Building Materials*, 113 (2016) 964-969.
- [19] S.Y. Chan, X. Ji, Comparative study of the initial surface absorption and chloride diffusion of high performance zeolite, silica fume and PFA concretes, *Cement and Concrete Composites*, 21(4) (1999) 293-300.
- [20] A.A. Ramezaniapour, R. Mousavi, M. Kalhori, J. Sobhani, M. Najimi, Micro and macro level properties of natural zeolite contained concretes, *Construction and Building Materials*, 101 (2015) 347-358.
- [21] T. Perraki, G. Kakali, F. Kontoleon, The effect of natural zeolites on the early hydration of Portland cement, Microporous and mesoporous materials, 61(1-3) (2003) 205-212.
- [22] C. Karakurt, İ.B. Topçu, Effect of blended cements with natural zeolite and industrial by-products on rebar Environmental assessment of green concrete containing natural zeolite on the global warming index in marine environments, *Journal of Cleaner Production*, 65 (2014) 418-423.
- [3] C. Astm, 618-05: Specifications for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, American Society for Testing and Materials (ASTM International), 100 (2005) 19428-12959.
- [4] R. Madandoust, J. Sobhani, P. Ashoori, Concrete made with zeolite and metakaolin: A comparison on the strength and durability properties, (2013).
- [5] C.-S. Poon, S. Azhar, M. Anson, Y.-L. Wong, Comparison of the strength and durability performance of normal- and high-strength pozzolanic concretes at elevated temperatures, *Cement and concrete research*, 31(9) (2001) 1291-1300.
- [6] É. Lublój, K. Kopecskó, G.L. Balázs, Á. Restás, I.M. Szilágyi, Improved fire resistance by using Portland-pozzolana or Portland-fly ash cements, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 129(2) (2017) 925-936.
- [7] K.V. Teja, T. Meena, A.N. Reddy, Investigation on Metakaolin and Silicafume Incorporated Concrete under Elevated Temperature, *IJCMS*, 7 (2018).
- [8] M. Morsy, Y. Al-Salloum, H. Abbas, S. Alsayed, Behavior of blended cement mortars containing nano-metakaolin at elevated temperatures, *Construction and Building materials*, 35 (2012) 900-905.
- [9] M. Saridemir, M. Severcan, M. Ciflikli, S. Celikten, F. Ozcan, C. Atis, The influence of elevated temperature on strength and microstructure of high strength concrete containing ground pumice and metakaolin, *Construction and Building Materials*, 124 (2016) 244-257.
- [10] B. Demirel, O. Keleştemur, Effect of elevated temperature on the mechanical properties of concrete produced with finely ground pumice and silica fume, *Fire Safety Journal*, 45(6-8) (2010) 385-391.
- [11] W.L. Baloch, R.A. Khushnood, S.A. Memon, W. Ahmed, S. Ahmad, Effect of elevated temperatures on mechanical performance of normal and lightweight concretes reinforced with carbon nanotubes, *Fire technology*, 54(5) (2018) 1331-1367.
- [12] Z. Pan, Z. Tao, Y. Cao, R. Wuhner, T. Murphy, Compressive strength and microstructure of alkali-activated fly ash/

- Engineering, 8 (2016) 231-242.
- [35] F. Vodák, K. Trtik, O. Kapičková, Š. Hošková, P. Demo, The effect of temperature on strength–porosity relationship for concrete, *Construction and building materials*, 18(7) (2004) 529-534.
- [36] K. S. Rao, S. R. K. A. L. Narayana, Comparison of Performance of Standard Concrete And Fibre Reinforced Standard Concrete Exposed To Elevated Temperatures, *Am. J. Eng. Res*, 3 (2013) 20-26.
- [37] B. Standard, Testing hardened concrete, Compressive Strength of Test Specimens, BS EN, (2009) 12390-12393.
- [38] F.A. Sabet, N.A. Libre, M. Shekarchi, Mechanical and durability properties of self consolidating high performance concrete incorporating natural zeolite, silica fume and fly ash, *Construction and Building Materials*, 44 (2013) 175-184.
- [39] H. Eskandari, M. Vaghefi, K. Kowsari, Investigation of mechanical and durability properties of concrete influenced by hybrid nano silica and micro zeolite, *Procedia Materials Science*, 11 (2015) 594-599.
- [40] J. Xiao, Q. Xie, W. Xie, Study on high-performance concrete at high temperatures in China (2004–2016)-An updated overview, *Fire safety journal*, 95 (2018) 11-24.
- [41] C. Castillo, Effect of transient high temperature on high-strength concrete, 1987.
- [42] G.-F. Peng, Z.-S. Huang, Change in microstructure of hardened cement paste subjected to elevated temperatures, *Construction and Building Materials*, 22(4) (2008) 593-599.
- [43] F. Fingerloos, Buchbesprechung: fib Bulletin 38: Fire design of concrete structures–materials, structures and modelling, *Beton-und Stahlbetonbau*, 102(9) (2007) 662-662.
- [44] Rashad, Y. Bai, P. Basheer, N. Collier, N. Milestone, Chemical and mechanical stability of sodium sulfate activated slag after exposure to elevated temperature, *Cement and Concrete Research*, 42(2) (2012) 333-343.
- [45] E.C.f. Standardization, Design of concrete structures—Part 1-2: General rules—Structural fire design, EN 1992 Eurocode 2, (2004).
- [46] ANSI, AISC 360-10, Chicago, IL, (2010).
- [47] C. ASTM, 496/C 496M-04. 2004, Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical corrosion and high temperature resistance of concrete, *Construction and Building Materials*, 35 (2012) 906-911.
- [23] M. Wilson, M. Carter, W. Hoff, British Standard and RILEM water absorption tests: A critical evaluation, *Materials and Structures*, 32(8) (1999) 571-578.
- [24] W. Kubissa, R. Jaskulski, Measuring and time variability of the sorptivity of concrete, *Procedia Engineering*, 57 (2013) 634-641.
- [25] M. Mahdikhani, O. Bamshad, M.F. Shirvani, Mechanical properties and durability of concrete specimens containing nano silica in sulfuric acid rain condition, *Construction and building materials*, 167 (2018) 929-935.
- [26] M. Jalal, A.R. Pouladkhan, H. Norouzi, G. Choubdar, Chloride penetration, water absorption and electrical resistivity of high performance concrete containing nano silica and silica fume, *Journal of American science*, 8(4) (2012) 278-284.
- [27] S. Kakooei, H.M. Akil, M. Jamshidi, J. Rouhi, The effects of polypropylene fibers on the properties of reinforced concrete structures, *Construction and Building Materials*, 27(1) (2012) 73-77.
- [28] Beglarigale, F. Ghajeru, H. Yigiter, H. Yazici, Permeability characterization of concrete incorporating fly ash, in: *Proceedings of the 11th International Congress on Advances in Civil Engineering*, Istanbul, Turkey, 2014.
- [29] C. ASTM, Standard specification for concrete aggregates, Philadelphia, PA: American Society for Testing and Materials, (2003).
- [30] C. Astm, 618-05: Specifications for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, American Society for Testing and Materials (ASTM International), 100 (2005) 19428-12959.
- [31] C. Take, slump tests for every test cylinders in accordance with ANSI, ASTM C143.
- [32] Behnood, H. Ziari, Effects of silica fume addition and water to cement ratio on the properties of high-strength concrete after exposure to high temperatures, *Cement and Concrete Composites*, 30(2) (2008) 106-112.
- [33] G. Baker, The effect of exposure to elevated temperatures on the fracture energy of plain concrete, *Materials and structures*, 29(6) (1996) 383.
- [34] C.C. dos Santos, J.P.C. Rodrigues, Calcareous and granite aggregate concretes after fire, *Journal of Building*

- zeolite, Archives of civil and mechanical engineering, 16 (2016) 554-562.
- [50] P.C. Silva, R.M. Ferreira, H. Figueiras, Electrical resistivity as a means of quality control of concrete–influence of test procedure, in: International Conference on Durability of Building Materials and Components, Portugal, 2011, pp. 12-15.
- Concrete Specimens. West Conshohocken (PA): ASTM International.
- [48] B. EN, 1-1. Eurocode 2: Design of concrete structures–Part 1-1: General rules and rules for buildings, European Committee for Standardization (CEN), (2004).
- [49] T. Markiv, K. Sobol, M. Franus, W. Franus, Mechanical and durability properties of concretes incorporating natural

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

R.A. Izadifard, M. Abdi Moghadam, Evaluation of various content of zeolite on the mechanical and durability properties of concrete at high temperatures, Amirkabir J. Civil Eng., 52(9) (2020) 2321-2338.

DOI: [10.22060/ceej.2019.16166.6145](https://doi.org/10.22060/ceej.2019.16166.6145)

