

مطالعه آزمایشگاهی تأثیر ساختار شیمیایی سنگ‌دانه‌ها بر مشخصات مکانیکی بتن‌های ژئولیت دار تحت اثر مخرب توامان کربناسیون- حریق در تونل‌های شهری

امیرحسین فاطمی

دانشجوی دکترا، دانشکده فنی مهندسی، واحد شاهرود، دانشگاه آزاد اسلامی، شاهرود، ایران.

احمد گنجعلی *

استادیار، دانشکده فنی مهندسی، واحد شاهرود، دانشگاه آزاد اسلامی، شاهرود، ایران.

رضا بابایی سمیرمی

استادیار، دانشکده فنی مهندسی، واحد شاهرود، دانشگاه آزاد اسلامی، شاهرود، ایران

پژمان امینیان

استادیار، دانشکده فنی مهندسی، واحد شاهرود، دانشگاه آزاد اسلامی، شاهرود، ایران.

چکیده

در شرایط دشوار تونل‌های شهری، به‌ویژه در مواجهه هم‌زمان با حریق و کربناسیون، بهبود عملکرد مکانیکی بتن از اهمیت بالایی برخوردار است. این پژوهش به بررسی تأثیر ترکیب شیمیایی سه نوع سنگ‌دانه (سیلیکا-آلومینا، اکسید کلسیم و کلسیت) بر رفتار مکانیکی بتن‌های حاوی ژئولیت تحت حرارت بالا و کربناسیون تسریع‌شده می‌پردازد. بتن‌ها با نسبت آب به مواد سیمانی ۰٫۴۵ و درصد‌های مختلف ژئولیت (۰، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد) ساخته شدند. نمونه‌ها پس از اختلاط و عمل‌آوری استاندارد، در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد حرارت داده شده و سپس در معرض محیط اشباع از دی‌اکسید کربن به مدت ۳، ۵۶ و ۹۰ روز قرار گرفتند. عمق کربناسیون با استفاده از محلول فنل‌فتالین تعیین شد و به‌منظور تحلیل مکانیزم‌های عملکرد، بررسی‌های ریزساختاری با روش‌های SEM و XRD نیز انجام گردید. نتایج نشان داد بتن ساخته‌شده با سنگ‌دانه سیلیکا-آلومینا و ۱۰ درصد ژئولیت، بیشترین مقاومت فشاری را داشته و حضور هم‌زمان سیلیس و آلومینا به افزایش تراکم ساختار کمک کرده است. در مقابل، سنگ‌دانه کلسیتی نسبت به کربناسیون آسیب‌پذیرتر بوده و کاهش مقاومت بیشتری نشان داد. تأثیر ژئولیت بر مقاومت کششی در تمامی طرح‌ها محدود بود. تحلیل‌های ریزساختاری نشان داد افزایش دما موجب تخریب ژل C-S-H، افزایش تخلخل و کاهش قلیائیت می‌شود که هم‌راستا با نتایج مکانیکی است. در مجموع، ترکیب سنگ‌دانه سیلیکا-آلومینا با ۱۰ درصد ژئولیت به‌عنوان گزینه‌ای مناسب برای بتن‌های مقاوم در برابر شرایط مخرب تونل‌های شهری معرفی می‌شود.

واژه‌های کلیدی: بتن، ژئولیت، ساختار شیمیایی سنگ‌دانه، حریق، کربناسیون.

۱- مقدمه

هم‌زمان، توجه پژوهشگران به مواد جایگزین سیمان افزایش یافته است. زئولیت طبیعی به دلیل ساختار بلوری، فعالیت پوزولانی و سطح ویژه بالا، به‌عنوان افزودنی مؤثر در بهبود خواص بتن شناخته شده است. آکچا و اوزیورت [۱۴] افت مقاومت بتن زئولیتی پس از حریق را ۳۰٪ کمتر گزارش کردند. هنری و دارما [۱۵] نشان دادند که رطوبت‌دهی مجدد می‌تواند ۸۰٪ مقاومت بتن آسیب‌دیده از حریق را بازیابی کند. محمد و همکاران [۱۶] افزایش ۳۷٪ مقاومت برشی در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد را گزارش کردند. یون و همکاران [۱۷] کاهش نفوذپذیری در برابر کلریدها و افزایش دوام در برابر حملات شیمیایی را مستند ساختند. همچنین، یعقوب و بیلی [۱۸] کاهش فقط ۲۵٪ مقاومت فشاری در بتن زئولیتی در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد را گزارش کردند.

در سال‌های اخیر نیز مطالعات جدیدی صورت گرفته است. در سال ۲۰۲۳، شاه و همکاران نشان دادند که ترکیب ۱۰٪ زئولیت، ۷٫۵٪ میکروسلیس و ۱۰٪ خاکستر بادی عملکرد حرارتی بتن را در دماهای بالا بهبود می‌دهد. مطالعه‌ای در سال ۲۰۲۴ توسط لی و همکاران، افزایش ۷٫۵٪ مقاومت فشاری با استفاده هم‌زمان از ۵۰٪ زئولیت و ۱٪ بیوچار بامبو را گزارش کرد. همچنین، در سال ۲۰۲۲، بررسی با طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی نشان داد که زئولیت می‌تواند کربناسیون را مهار و مقاومت بتن را در برابر آن افزایش دهد.

با وجود این مطالعات، اغلب تحقیقات گذشته، تأثیر زئولیت را بدون توجه به نوع و ساختار شیمیایی سنگ‌دانه‌ها بررسی کرده‌اند. این در حالی است که ترکیب شیمیایی سنگ‌دانه‌ها (نظیر سیلیکا-آلومینا، اکسید کلسیم و کلسیت) می‌تواند بر واکنش‌پذیری، تخلخل و دوام نهایی بتن تأثیرگذار باشد. به‌طور خاص، سنگ‌دانه‌های کلسیتی با CO_2 واکنش‌پذیرترند و ممکن است در شرایط کربناسیون و حرارت، عملکرد ضعیف‌تری از خود نشان دهند.

بنابراین هدف این پژوهش بررسی تأثیر ساختار شیمیایی سه نوع سنگ‌دانه بر مقاومت فشاری و کششی بتن‌های حاوی زئولیت تحت شرایط ترکیبی کربناسیون و حریق است. این مطالعه تلاش دارد ضمن پاسخ به خلأ مطالعاتی موجود، گزینه‌ای فنی و بهینه برای کاربرد در سازه‌های آسیب‌پذیر زیرزمینی مانند تونل‌های شهری معرفی کند.

سازه‌های بتنی در محیط‌های بسته و زیرزمینی مانند تونل‌های شهری، به دلیل شرایط خاص بهره‌برداری، تهویه محدود، و تماس مستقیم با آلاینده‌ها، از آسیب‌پذیرترین سازه‌ها در برابر فرایندهای مخرب محیطی محسوب می‌شوند [۱،۲]. در میان عوامل مختلف، کربناسیون و حریق دو عامل کلیدی در تخریب عملکرد سازه‌های بتنی هستند که آثار آن‌ها نه تنها به صورت مجزا بلکه به صورت ترکیبی نیز می‌تواند منجر به افت شدید مقاومت مکانیکی، کاهش دوام و افزایش خطر ریزش سازه‌ای شود [۳،۶].

کربناسیون با نفوذ CO_2 و کاهش قلیائیت بتن، احتمال خوردگی میلگرد را بالا برده و زمینه‌ساز ترک خوردگی و تورم در سازه می‌شود [۴،۵]؛ در حالی که آتش‌سوزی با افزایش ناگهانی دما و تبخیر رطوبت داخلی، باعث تخریب ساختار میکروسکوپی خمیر سیمان می‌گردد [۲،۵].

در سناریوهای واقعی مانند حوادث آتش‌سوزی در تونل‌ها، بتن پیش‌کربناته شده معمولاً عملکرد ضعیف‌تری از خود نشان می‌دهد [۸،۹،۱۱]. از این رو، تحلیل دقیق رفتار بتن تحت اثر هم‌زمان کربناسیون و حریق نه تنها یک چالش پژوهشی، بلکه یک ضرورت مهندسی برای افزایش ایمنی سازه‌های شهری است [۳،۱۳].

مطالعات گسترده‌ای بر روی اثرات جداگانه این دو پدیده انجام شده است. پاده و گیمارائش [۱] مروری جامع بر تأثیر کربناسیون بر خواص بتن ارائه کردند. دل‌موت [۲] در بررسی آتش‌سوزی تونل مونت‌بلان، تخریب شدید بتن تحت حرارت را گزارش نمود. دو شوتر و تروه [۳] نخستین مطالعات ترکیبی بر کربناسیون و حریق را ارائه دادند. جونز و همکاران [۴] افت مقاومت فشاری ناشی از کربناسیون را تشریح کردند. اسمیت و همکاران [۵] نشان دادند که دماهای بالاتر از ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد به کاهش شدید مقاومت بتن می‌انجامد. لیو و همکاران [۶] و چن و همکاران [۷] تأیید کردند که بتن‌های پیش‌کربناته شده در برابر حرارت آسیب‌پذیرتر هستند. وانگ و همکاران [۸] با افزودن الیاف GFRP به بتن، بهبودهایی در عملکرد حرارتی گزارش کردند. تای و همکاران [۱۰] و یانگ و همکاران [۱۱] نیز افت شدیدتر در خواص مکانیکی بتن تحت اثر هم‌زمان را مشاهده کردند. همچنین لی و همکاران [۱۲] و هو و همکاران [۱۳] شرایط محیطی و دمایی را در تشدید کربناسیون مؤثر دانستند.

۲- مواد و روش‌ها

۱-۲- ساخت نمونه های بتنی

پودر عبوری از الک شماره ۲۰۰ مورد استفاده قرار گرفت. آنالیز شیمیایی زئولیت با استفاده از دستگاه XRF انجام شده و ترکیب عمده آن شامل SiO_2 ، Al_2O_3 ، Fe_2O_3 ، CaO ، MgO و مقدار جزئی K_2O و Na_2O بود. وزن مخصوص زئولیت حدود ۲٫۳۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب اندازه‌گیری شد. ترکیب شیمیایی و مشخصات فیزیکی سیمان و زئولیت در جدول ۱ ارائه شده است.

در این پژوهش، از سیمان پرتلند تیپ ۲ تولید کارخانه سیمان شرق با وزن مخصوص تقریبی ۳٫۱۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب و مطابق با استاندارد ASTM C150 استفاده شد. زئولیت مورد استفاده از نوع طبیعی کلینوپتیلولیت بوده که از معدن سبزوآر تهیه شده و به صورت

جدول ۱- ترکیب شیمیایی و مشخصات فیزیکی سیمان و زئولیت

ماده	SiO_2 (%)	Al_2O_3 (%)	Fe_2O_3 (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO_3 (%)	افت حرارتی (%)	چگالی (g/cm^3)	سطح ویژه (cm^2/g)
سیمان پرتلند	21.2	4.8	2.9	68.1	0.8	3.4	1.2	3.15	3200
زئولیت	66.5	12.4	1.8	4.2	1.1	0.4	2.0	2.35	2500

(۳٫۱۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب)، برای حفظ حجم معادل مواد سیمانی در هر طرح اختلاط، جرم معادل حجمی زئولیت محاسبه و جایگزین شد. همچنین، نسبت آب به مواد سیمانی (W/B) به جای نسبت آب به سیمان به عنوان معیار اصلی طراحی مورد استفاده قرار گرفت. طرح اختلاط‌های پیشنهادی در جدول ۲ ارائه شده است.

سنگ‌دانه‌ها، بسته به منبع معدنی‌شان، ساختار شیمیایی متفاوتی دارند که بر روی خصوصیات مکانیکی بتن تأثیر می‌گذارند. به طور کلی، ترکیب شیمیایی سنگ‌دانه‌ها شامل سیلیکا، آلومینا، اکسید آهن، اکسید کلسیم و در برخی موارد اکسیدهای منیزیم و پتاسیم است.

سنگ‌دانه معدن آبیگ قزوین: این سنگ‌دانه‌ها شامل درصد بیشتری از اکسید کلسیم CaO است که به چسبندگی و افزایش مقاومت بتن کمک می‌کند.

سنگ‌دانه معدن قم: این سنگ‌دانه‌ها حاوی مقادیر بیشتری از کانی‌های کلسیتی CaCO_3 می‌باشند.

۲-۲- آزمایش حریق و کربناسیون

نمونه‌ها به مدت ۲ روز در دمای ۵۵ درجه سانتی‌گراد در یک اجاق قرار داده شدند تا احتمال تکه‌تکه شدن ناپایدار در طول آزمایش‌های شبیه‌سازی حریق کاهش یابد. سپس نمونه‌ها به یک گرم کن القایی الکتریکی منتقل شدند (شکل ۱ الف).

برای ساخت بتن، ابتدا نسبت‌های مختلف مواد طبق طرح اختلاط مشخص می‌شود. قبل از افزودن مواد، مقداری آب به میکسر ریخته شده و به مدت چند ثانیه می‌چرخد تا از جذب آب توسط مواد سیمانی جلوگیری شود. سپس شن و ماسه به میکسر ۱۵۰ لیتری اضافه شده و پس از ۳۰ ثانیه مخلوط شدن، نیمی از آب طرح اضافه می‌شود. اختلاط به مدت یک دقیقه ادامه می‌یابد تا سنگ‌دانه‌ها آب مورد نیاز خود را جذب کنند. پس از آن، سیمان و زئولیت به تدریج طی ۱۵ ثانیه اضافه شده و یک دقیقه دیگر مخلوط می‌شوند تا ترکیب یکنواخت شود.

در مرحله بعد، باقی‌مانده آب و فوق‌روان‌کننده افزوده شده و اختلاط به مدت ۹۰ ثانیه دیگر برای رسیدن به بتن نهایی ادامه می‌یابد. پس از ساخت بتن، آن را در داخل قالب‌های استوانه‌ای با قطر ۱۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر ریخته و برای متراکم نمودن آن از میز لرزان استفاده گردید. ساخت نمونه‌ها مطابق با استاندارد ASTM-C-192 و در آزمایشگاه تکنولوژی بتن دانشگاه فردوسی مشهد صورت پذیرفت. پس از گیرش اولیه و بعد از باز کردن قالب‌ها، نمونه‌ها داخل حوضچه استغراق به مدت ۲۴ ساعت نگهداری شده و بعد از گذشت این مدت، تا زمان آزمایش در محفظه کربناسیون قرار گرفتند.

در این پژوهش، زئولیت طبیعی به عنوان جایگزین بخشی از سیمان در چهار سطح (۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد وزنی) استفاده شد. با توجه به تفاوت چگالی زئولیت (۲٫۳۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب) و سیمان

جدول ۲- نسبت‌های طرح اختلاط بتن‌های ساخته شده

نمونه	آب/سیمان	شن (kg)	ماسه ریز (۰-۳ میلیمتر) (kg)	ماسه درشت (۳-۶ میلیمتر) (kg)	آب (kg)	سیمان (kg)	زئولیت (٪/سیمان) (kg)	زئولیت (kg)	فوق روان کننده (٪/سیمان)
بتن کنترل		۹۲۱	۶۹۴	۱۷۳	۱۸۰	۴۰۰	۰	۰	۱,۲۵
Ze :۰.۵		۹۲۱	۶۹۴	۱۷۳	۱۷۱	۳۸۰	۵	۱۴,۲	۲
Ze :۱.۰	۰,۴۵	۹۲۱	۶۹۴	۱۷۳	۱۶۲	۳۶۰	۱۰	۲۶,۹	۳
Ze :۱.۵		۹۲۱	۶۹۴	۱۷۳	۱۵۳	۳۴۰	۱۵	۳۸	۴
Ze :۲.۰		۹۲۱	۶۹۴	۱۷۳	۱۴۴	۳۲۰	۲۰	۴۷,۷	۵,۷۵

همچنین، یک محفظه فولادی به ابعاد ۸۰×۴۰×۴۰ سانتی متر (شکل ۱-ب) با استفاده از ورق فولادی و عایق کاری داخلی طراحی و ساخته شد. طراحی این محفظه با الهام از نمونه‌های مورد استفاده در مطالعات آزمایشگاهی مانند پژوهش یرگا [۱۹] انجام شده و برای انجام آزمون کرناسیون تسریع شده در نمونه‌های بتنی، به صورت کامل آب‌بندی گردید. در این آزمایش، غلظت CO₂ حدود ۰.۳±٪، رطوبت نسبی ۰.۵±٪، دما ۲±۳ درجه سانتی گراد بود. نمونه‌ها برای سنجش و آزمایش مقاومت ۳، ۵۶ و ۹۰ روزه با لحاظ کردن ۱ روز عمل آوری در حوضچه آب، به ترتیب تحت کرناسیون به مدت ۲، ۵۵ و ۸۹ روزه در محفظه واقع شدند.

۲-۳- روش تعیین عمق کرناسیون با فنل فتالین

به منظور تعیین مرز کرناسیون، از محلول فنل فتالین ۱٪ وزنی در الکل استفاده شد. پس از تکمیل چرخه‌ی حرارت‌دهی و کرناسیون و رسیدن نمونه‌ها به دمای محیط، هر نمونه در حالت تازه شکست با اره الماسی برش داده شد و محلول فنل فتالین به صورت قطره‌ای بر سطح تازه اعمال گردید.

- در نواحی غیرکربناته با قلیائیت بالا (pH > ۹.۵) تغییر رنگ به قرمز-ارغوانی رخ داد؛ نواحی کربناته بی‌رنگ باقی ماندند.
- عمق کرناسیون به صورت عمود بر سطح، از لبه نمونه تا مرز تغییر رنگ با کولیس دیجیتال اندازه‌گیری شد.
- برای کاهش خطا، در سه نقطه‌ی متمایز در پیرامون سطح شکست اندازه‌گیری انجام و میانگین آن‌ها گزارش شد؛ قرائت‌ها حدود ۶۰±۱۰ ثانیه پس از اعمال محلول ثبت گردید.

با توجه به مطالعات پیشین انجام شده درباره‌ی خواص مکانیکی باقی مانده بتن پس از تجربه دماهای بالا، در این پژوهش ۸۰۰ درجه سانتی گراد انتخاب و نرخ گرم شدن ۲۵ درجه سانتی گراد در دقیقه در نظر گرفته شد. هنگامی که دمای مورد نظر به دست آمد، به مدت ۱۲۰ دقیقه ثابت نگه داشته و سپس نمونه‌ها خارج شدند و اجازه داده شد تا به طور طبیعی تا رسیدن به دمای محیط خنک شوند. در ادامه نمونه‌ها به محفظه کرناسیون منتقل شدند.



الف) گرمکن القایی الکتریکی



ب) محفظه کرناسیون

شکل ۱- تجهیزات آزمایشگاهی

می‌توان به تغییرات شیمیایی و ریزساختاری ناشی از دمای بالا نسبت داد. حرارت موجب تجزیه هیدروکسید کلسیم Ca(OH)_2 و افزایش تخلخل در خمیر سیمان می‌شود. در دماهای بالاتر از ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد، Ca(OH)_2 به CaO و بخار آب تجزیه شده و در نتیجه قلیائیت بتن کاهش می‌یابد. این فرایند به‌طور مستقیم عمق کربناسیون را افزایش می‌دهد، چرا که جزء اصلی حفظ محیط قلیایی بتن کاهش یافته است. علاوه بر این، تشکیل ریزترک‌ها در اثر انبساط حرارتی، مسیر نفوذ CO_2 را باز کرده و سرعت کربناسیون را در سطح بتن افزایش می‌دهد.

نتایج آزمون فنل فتالین (شکل ۳) نشان می‌دهد که با افزایش مدت قرارگیری در محیط CO_2 (۳، ۷، ۱۴، ۱۹، ۳۱ و ۴۰ روز)، مرز کربناسیون به‌صورت یکنواخت به سمت داخل نمونه‌ها پیشروی داشته است. این روند در نمونه‌های حرارت‌دیده در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد و زمان ۱۲۰ دقیقه محسوس‌تر بوده و عمق بیشتری از ناحیه بی‌رنگ‌شده را نسبت به نمونه شاهد نشان داد.

افزایش عمق کربناسیون همچنین تحت تأثیر خروج آب و تخریب ژل C-S-H در دماهای بالا رخ داد که به افزایش نفوذپذیری گاز در بتن کمک کرده است.

بر اساس یافته‌های این مطالعه، عمق کربناسیون پس از ۱۸۰ دقیقه حرارت‌دهی در دماهای ۴۰۰، ۸۰۰ و ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد به‌ترتیب ۱۲/۹، ۱۵/۸ و ۲۴/۸ درصد افزایش یافت. همچنین افزایش زمان حرارت‌دهی از ۶۰ به ۱۸۰ دقیقه موجب افزایش عمق کربناسیون به میزان ۷/۵، ۷/۴ و ۲/۴ به‌ترتیب در همین دماها گردید. شایان ذکر است که کاهش مقاومت فشاری در نمونه‌های کربناته‌شده بیش از میزان افزایش عمق کربناسیون بود؛ به بیان دیگر، از دست‌رفتن ویژگی‌های مکانیکی بتن تحت حریق شدید، سهم بیشتری در کاهش عملکرد کلی بتن نسبت به افزایش عمق کربناسیون داشته است. در ادامه به بررسی تأثیر میزان زئولیت بر مقاومت فشاری و کششی نمونه‌های بتنی کربناته تحت اثر حریق پرداخته شده است.

۲-۳- سنگ‌دانه سیلیکا-آلومینا

آزمایش مقاومت فشاری مطابق استاندارد ASTM C39 به روش مخرب بر روی نمونه‌ها در سنین ۳، ۵۶ و ۹۰ روز با توجه به شرایط عمل‌آوری ۲۴ ساعت در قالب و سپس در حوضچه آب و در ادامه کربناسیون صورت گرفت.

- نمونه‌ها پیش از آزمون در $25 \pm 2^\circ\text{C}$ و $\text{RH} = 50 \pm 5\%$ برای ۲۴ ساعت نگهداری شدند تا اثر رطوبت سطحی بر پاسخ اندیکاتور به حداقل برسد.
- برای جلوگیری از خطای ناشی از گرمایش موضعی، عملیات برش با اهر الماسی خنک‌کاری شده انجام و از تماس مستقیم آب با سطح اندازه‌گیری پرهیز شد.
- این رویه مطابق با RILEM CPC-18 اجرا شد.

۲-۴- آزمایش‌های مکانیکی

این پژوهش شامل ۲ مرحله، با هدف درک میزان مقاومت فشاری و کششی نمونه‌های بتنی می‌باشد (شکل ۲). این مراحل عبارت است از:

۱. رفتار بتن‌های حاوی درصد‌های مختلف زئولیت.
 ۲. تغییر نوع سنگ‌دانه
- در مرحله اول علاوه بر بتن کنترل که بدون زئولیت تهیه گردید، ۴ طرح اختلاط حاوی درصد‌های مختلف زئولیت (۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪) با نسبت آب به مواد سیمانی ۰٫۴۵ فراهم می‌شود. همچنین به منظور بررسی دقیق‌تر در این مطالعات از سه نوع سنگ‌دانه استفاده شده است:

- سیلیکا-آلومینا (سنگ‌دانه معدن گرمسار)
- اکسید کلسیم (سنگ‌دانه معدن آبیگ قزوین)
- کلسیت (سنگ‌دانه معدن قم)



الف) آزمایش مقاومت فشاری

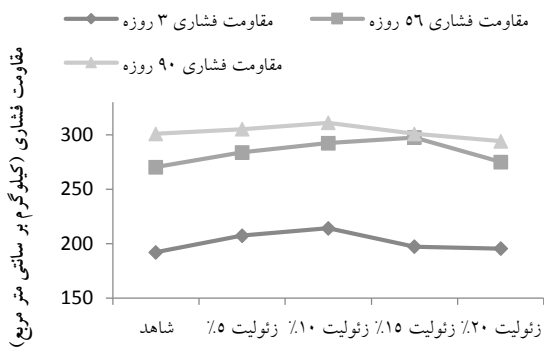
ب) آزمایش مقاومت کششی

شکل ۲- آزمایش‌های مکانیکی بتن

۳- نتایج آزمایشگاهی

۱-۳- عمق کربناسیون

کربناسیون تسریع‌شده در نمونه‌های بتنی آسیب‌دیده از حریق را



شاهد



روز ۳

شکل ۴- مقایسه تغییرات در مقاومت فشاری نمونه‌های کربناته با درصد‌های مختلف زئولیت برای سنگ‌دانه سیلیکا-آلومینا

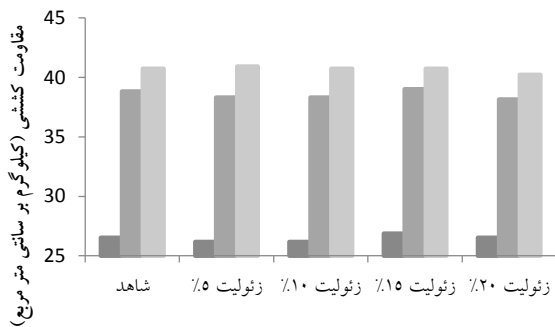
نتایج مقاومت کششی نمونه‌های کربناته در سنین مختلف برای سنگ‌دانه سیلیکا-آلومینا در شکل ۵ نمایش داده شده است.



روز ۷



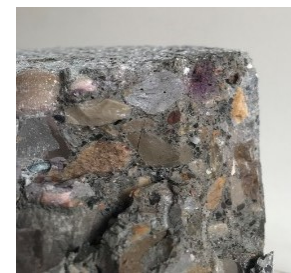
روز ۱۴



مقاومت کششی ۳ روزه ۵۶ روزه ۹۰ روزه



روز ۱۹



روز ۳۱

شکل ۵- مقایسه تغییرات در مقاومت کششی نمونه‌های کربناته با درصد‌های مختلف زئولیت برای سنگ‌دانه سیلیکا-آلومینا

همانطور که در شکل ۵ مشاهده می‌گردد افزایش زئولیت تغییر محسوسی در مقاومت کششی نمونه‌های بتن برای سنگ‌دانه سیلیکا-آلومینا ایجاد نمی‌کند. در نمونه‌های استوانه‌ای بتن حاوی ۵٪ زئولیت برای سنگ‌دانه سیلیکا-آلومینا مقاومت کششی ۳ روزه تغییری نسبت به نمونه شاهد ندارد، در نمونه‌های ۵۶ روزه کاهش ۱٪ و در نمونه‌های ۹۰ روزه افزایش ۰٫۰۵٪ مشاهده شده است.

۳-۳- سنگ‌دانه اکسید کلسیم

آزمایش مقاومت فشاری مطابق استاندارد ASTM C39 به روش مخرب بر روی نمونه‌ها در سنین ۳، ۵۶ و ۹۰ روز با توجه به شرایط عمل آوری ۲۴ ساعت در قالب و سپس در حوضچه آب صورت گرفت (شکل ۶).



روز ۴۰

شکل ۳- نتایج آزمون فنل‌فالتین برای نمونه‌های بتنی حرارت‌دیده در دمای ۸۰۰ °C به مدت ۱۲۰ دقیقه پس از فرارگیری در محیط کربناسیون تسریع شده به مدت‌های مختلف همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌گردد با افزایش درصد زئولیت مقاومت فشاری نمونه‌ها برای سنگ‌دانه سیلیکا-آلومینا افزایش می‌یابد. برای نمونه‌های ۳ روزه این افزایش تا افزودن ۱۰ درصد افزایش می‌یابد و سپس روند کاهشی دارد. برای نمونه‌های ۵۶ روزه روند افزایش تا ۱۵ درصد می‌باشد و سپس روند کاهشی دارد، و برای نمونه‌های ۹۰ روزه افزایش تا ۱۰ درصد می‌باشد و سپس روند کاهشی می‌باشد.

نسبت به نمونه شاهد ندارد، در نمونه‌های ۵۶ روزه کاهش ۱٪ و در نمونه‌های ۹۰ روزه افزایش ۰٫۰۵٪ مشاهده شده است.

۳-۴- سنگ‌دانه کلسیت

آزمایش مقاومت فشاری مطابق استاندارد ASTM C39 به روش مخرب بر روی نمونه‌ها در سنین ۳، ۵۶ و ۹۰ روز با توجه به شرایط عمل‌آوری ۲۴ ساعت در قالب و سپس در حوضچه آب صورت گرفت (شکل ۸).

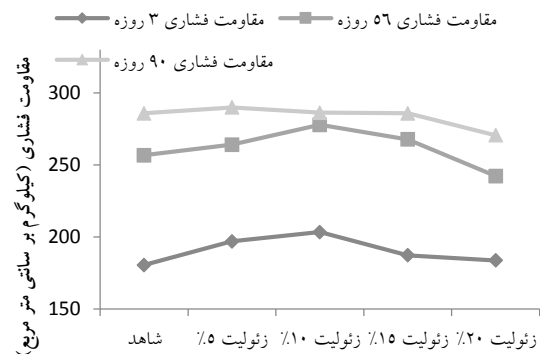


شکل ۸. مقایسه تغییرات در مقاومت فشاری نمونه‌های کربناته با درصد‌های مختلف زئولیت برای سنگ‌دانه کلسیت

همانطور که در شکل ۸ مشاهده می‌گردد با افزایش درصد زئولیت مقاومت فشاری نمونه‌ها برای سنگ‌دانه کلسیت افزایش می‌یابد. برای نمونه‌های ۳ روزه این رشد تا افزودن ۱۰ درصد زئولیت روی داده است و سپس روند کاهش دارد. برای نمونه‌های ۵۶ روزه روند افزایش تا ۱۵ درصد می‌باشد و سپس روند کاهش دارد، و برای نمونه‌های ۹۰ روزه افزایش تا ۱۰ درصد می‌باشد و سپس روند کاهش می‌باشد.

در شکل ۹ نتایج مقاومت کششی نمونه‌های کربناته در سنین مختلف برای سنگ‌دانه کلسیت ارائه شده است.

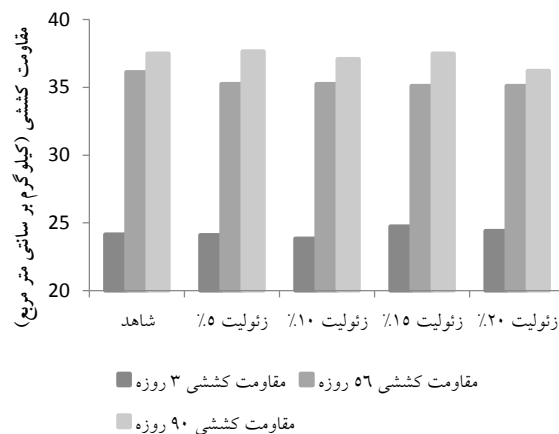
همانطور که در شکل ۹ مشاهده می‌گردد افزایش زئولیت تغییر محسوسی در مقاومت کششی نمونه‌های بتن برای سنگ‌دانه کلسیت ایجاد نمی‌کند. در نمونه‌های استوانه‌ای بتن برای سنگ‌دانه کلسیت حاوی ۵٪ زئولیت، مقاومت کششی ۳ روزه تغییری نسبت به نمونه شاهد ندارد، در نمونه‌های ۵۶ روزه کاهش ۱٪ و در نمونه‌های ۹۰ روزه افزایش ۰٫۰۵٪ مشاهده شده است.



شکل ۶. مقایسه تغییرات در مقاومت فشاری نمونه‌های کربناته با درصد‌های مختلف زئولیت برای سنگ‌دانه اکسید کلسیم

همانطور که در شکل ۶ مشاهده می‌گردد با افزایش درصد زئولیت برای سنگ‌دانه اکسید کلسیم مقاومت فشاری نمونه‌ها افزایش می‌یابد. برای نمونه‌های ۳ روزه این رشد تا افزایش ۱۰ درصدی زئولیت مشاهده شده و سپس روند کاهش روی داده است. برای نمونه‌های ۵۶ روزه روند افزایش تا ۱۵ درصد می‌باشد و سپس روند کاهش دارد، و برای نمونه‌های ۹۰ روزه افزایش تا ۱۰ درصد می‌باشد و سپس روند کاهش می‌باشد.

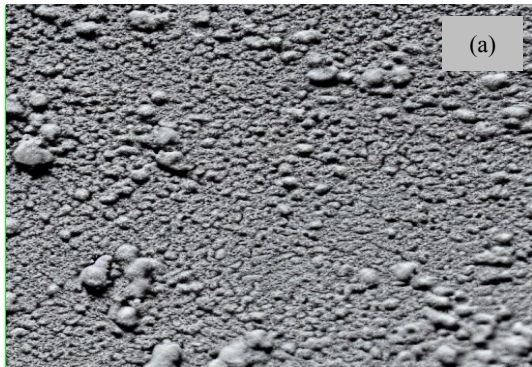
نتایج مقاومت کششی نمونه‌های کربناته در سنین مختلف برای سنگ‌دانه اکسید کلسیم در شکل ۷ نمایش داده شده است.



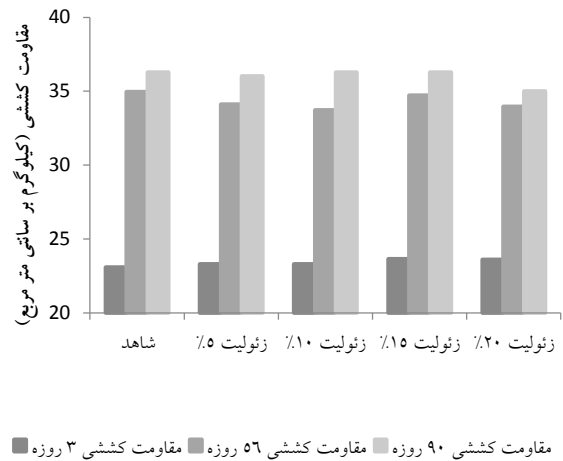
شکل ۷. مقایسه تغییرات در مقاومت کششی نمونه‌های کربناته با درصد‌های مختلف زئولیت برای سنگ‌دانه اکسید کلسیم

همانطور که در شکل ۷ مشاهده می‌گردد افزایش زئولیت تغییر محسوسی در مقاومت کششی نمونه‌های بتن برای سنگ‌دانه اکسید کلسیم ایجاد نمی‌کند. در نمونه‌های استوانه‌ای بتن برای سنگ‌دانه اکسید کلسیم حاوی ۵٪ زئولیت مقاومت کششی ۳ روزه تغییری

کاهش مقاومت فشاری و افزایش عمق کربناسیون در نتایج مکانیکی مطابقت دارد.



شکل ۱۰ = تصاویر SEM از نمونه‌های بتنی حرارت دیده در دماهای مختلف: (الف) 400°C ، (ب) 800°C و (ج) 1000°C شکل ۱۱ الگوهای XRD نمونه‌های بتنی در دماهای مختلف را نمایش می‌دهد. نتایج نشان داد که در حالت اولیه، قله‌های بارز $\text{Ca}(\text{OH})_2$ وجود داشت در حالی که قله CaCO_3 ضعیف‌تر بود. با افزایش دما از 400°C تا 800°C ، شدت قله $\text{Ca}(\text{OH})_2$ کاهش یافته و قله CaCO_3 افزایش یافت. پس از قرارگیری در دمای 1000°C ، قله $\text{Ca}(\text{OH})_2$ تقریباً از بین رفت و در مقابل قله CaCO_3 اندکی افزایش یافت. این روند بیانگر آن است که محتوای $\text{Ca}(\text{OH})_2$ بتن به تدریج تجزیه شده و هم‌زمان تشکیل CaCO_3 افزایش می‌یابد.



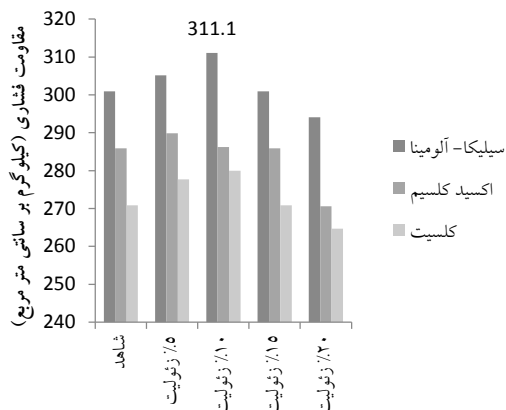
شکل ۹- مقایسه تغییرات در مقاومت کششی نمونه‌های کربناته با درصد‌های مختلف زئولیت برای سنگ‌دانه کلسیت

۳-۵- تحلیل‌های میکروساختاری بتن

پس از افزایش شدید دما ناشی از حریق، دو پارامتر کلیدی یعنی آب آزاد موئینه و آب جذب‌شده در ساختار بتن به سرعت از دست می‌روند. با افزایش دما از شرایط محیطی) حدود 25°C (تا دمای حدود 105°C ، بخشی از ژل C-S-H و بلورهای سوزنی شکل اترینگایت (Aft) خشک می‌شوند. در محدوده 100°C تا 300°C ، این فرایند همراه با کاهش محتوای آب ادامه می‌یابد. بلورهای هیدروکسید کلسیم $(\text{Ca}(\text{OH})_2)$ در بازه دمایی 380°C تا 500°C تجزیه شده و آب درونی خود را آزاد می‌کنند. همچنین، کریستال‌های کربنات کلسیم (CaCO_3) در محدوده 600°C تا 800°C دچار تجزیه شده و گاز CO_2 را آزاد می‌کنند.

شکل ۱۰ تصاویر SEM نمونه‌های بتنی در دماهای مختلف را نشان می‌دهد. در دمای 400°C (شکل ۱۰-الف)، ریزساختار بتن تقریباً دست‌نخورده باقی مانده و تنها ترک‌های ریز قابل مشاهده است. فرآورده‌های هیدراتاسیون از جمله ژل C-S-H همچنان حضور داشته و ساختار متراکم حفظ شده است. در دمای 800°C (شکل ۱۰-ب)، ترک‌های ریز و افزایش تخلخل به‌طور محسوس دیده می‌شود. در این شرایط، تجزیه $\text{Ca}(\text{OH})_2$ به CaO و بخار آب شدت گرفته و تغییرات ساختاری قابل توجهی ایجاد شده است. در دمای 1000°C (شکل ۱۰-ج)، تخریب ریزساختاری شدید بوده و تقریباً ژل C-S-H به‌طور کامل از بین رفته است. تصاویر SEM در این دما ترک‌های گسترده، افزایش چشمگیر تخلخل و فروپاشی کامل ماتریس سیمان را نشان می‌دهد. این تغییرات با

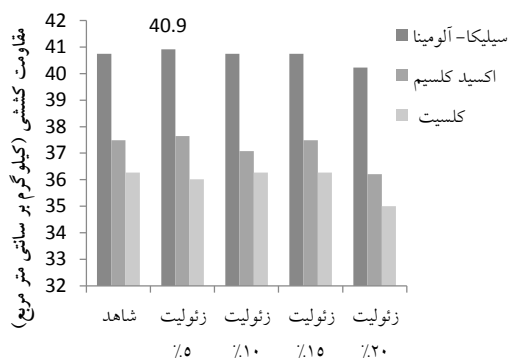
سنگ‌دانه‌ها اقدام به ترسیم نمودارهای زیر شده است:



شکل ۱۲- مقایسه مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی بر اساس

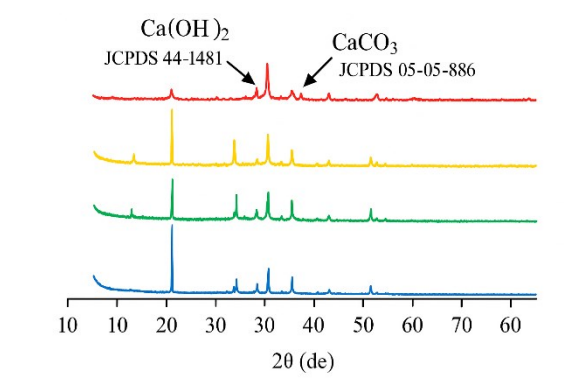
درصدهای مختلف زئولیت در سنگ‌دانه‌های مختلف

بر اساس نتایج ارائه شده در شکل ۱۲، در خصوص مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی بر اساس درصدهای مختلف زئولیت در سنگ‌دانه‌های مختلف، مشاهده شده است که بهترین عملکرد برای سنگ‌دانه‌های سیلیکا-آلومینا همراه با ۱۰٪ زئولیت روی داده است. این الگو با گزارش‌های Akca & Ozyurt (زئولیت و بهبود پایداری پس‌ساحریق) و Mohammed et al. (تقویت ماتریس در دماهای بالا) هم‌راستا است و نشان می‌دهد درصدهای میانی زئولیت به بهینه‌سازی تخلخل مؤثر و تراکم ماتریس کمک می‌کند [۱۴، ۱۶]. هم‌راستا با این موارد، به نظر می‌رسد حضور فازهای واکنش‌پذیر سیلیسی/آلومیناتی همراه با زئولیت، تراکم C(A)-S-H را در درصدهای میانی تقویت کرده و در دمای بالا پایداری بهتری فراهم می‌آورد.



شکل ۱۳- مقایسه مقاومت کششی نمونه‌های بتنی بر اساس

درصدهای مختلف زئولیت در سنگ‌دانه‌های مختلف



شکل ۱۱- الگوهای پراش پرتو ایکس (XRD) برای نمونه‌های

بتنی در دماهای مختلف

در مجموع، داده‌های حاصل از SEM و XRD نشان می‌دهند که قرارگیری بتن در دماهای بالا منجر به افزایش ریزترک‌ها، تخلخل بیشتر، تجزیه فازهای هیدراته و تغییر ترکیب معدنی می‌شود.

۴- تفسیر یافته‌ها

به منظور ارزیابی دقت و قابلیت اطمینان نتایج آزمایشگاهی، نمونه‌ها در سه تکرار آزمایش شدند و میانگین نتایج به‌عنوان مقدار نهایی گزارش گردید. همچنین برای جلوگیری از خطاهای سیستماتیک، دستگاه‌های آزمون قبل از هر نوبت آزمایش، کالیبره شده و آزمون‌ها طبق استانداردهای ASTM C39 (برای فشار) و ASTM C496 (برای کشش) انجام گردید. تطابق نتایج این پژوهش با روند گزارش شده در مطالعات پیشین مانند پژوهش‌های آکچا و اوزیورت [۱۴] و محمد و همکاران [۱۶] نیز مؤیدی بر اعتبار داده‌های به‌دست آمده است.

یکی از نکات مهم، کاهش مقاومت ۹۰ روزه نسبت به ۵۶ روزه در برخی گروه‌هاست. این رفتار را می‌توان با سه سازوکار توضیح داد: (۱) تداوم فرایند کربناسیون در منافذ و ITZ که با تشکیل فازهای کلسیتی ترد، بخشی از تراکم اولیه را به کاهش چقرمگی تبدیل می‌کند؛ (۲) ایجاد و رشد ریزترک‌های حرارتی باقی‌مانده از چرخه ۸۰۰°C که در طول زمان تحت انقباض خشک و تنش‌های داخلی فعال‌تر می‌شوند؛ و (۳) بازتوزیع رطوبت و تنش مؤین در خمیر سیمان کربناته‌شده. گزارش‌های تجربی مشابه نیز افت یا پایداری مقاومت در بازه‌های ۵۶-۹۰ روز را برای بتن‌های پیش‌کربناته/پس‌ساحریق نشان داده‌اند [۶، ۱۲، ۱۰].

بر اساس مقایسه نتایج به دست آمده در حالت‌های مختلف

کلسیم Ca(OH)_2 موجود در سیمان، باعث تولید کلسیت CaCO_3 می‌شوند. این فرایند باعث کاهش مقاومت فشاری بتن در طولانی مدت می‌شود، به خصوص در سنگ‌دانه‌های کلسیتی که نسبت به کربناسیون حساس‌تر هستند. تأثیر کربناسیون دوگانه است: در سنین کوتاه ممکن است تراکم موضعی ناشی از تشکیل CaCO_3 در بخشی از منافذ، افت نفوذپذیری را رقم بزند؛ اما در بتن‌های تجربه‌کرده‌ی حرارتی زیاد، این پُرشدگی ترد اغلب با ریزترک‌های حرارتی و دکربناته‌شدن پیشین فازهای کلسیمی برهم‌کنش کرده و به کاهش چقرمگی، گسیختگی زودتر ITZ و افت مقاومت منتهی می‌شود. این روند در مطالعات اخیر روی بتن‌های پیش‌کربناته/پساحریق نیز گزارش شده است.

۵- نتیجه‌گیری

بر اساس مطالعات آزمایشگاهی صورت گرفته، در ادامه به بیان مهم‌ترین یافته‌های این پژوهش اقدام شده است:

- با افزایش درصد زئولیت مقاومت فشاری نمونه‌ها برای سنگ‌دانه سیلیکا-آلومینا افزایش می‌یابد. برای نمونه‌های ۳ روزه این رشد تا افزایش ۱۰ درصدی زئولیت مشاهده شده است و سپس روندی کاهشی دارد. برای نمونه‌های ۵۶ روزه روند افزایش تا ۱۵ درصد می‌باشد و سپس روند کاهشی دارد، و برای نمونه‌های ۹۰ روزه افزایش تا ۱۰ درصد می‌باشد و سپس روند کاهشی می‌باشد.
- افزایش زئولیت تغییر محسوسی در مقاومت کششی نمونه‌های بتن برای سنگ‌دانه سیلیکا-آلومینا ایجاد نمی‌کند.
- در نمونه‌های استوانه‌ای بتن حاوی ۵٪ زئولیت برای سنگ‌دانه سیلیکا-آلومینا مقاومت کششی ۳ روزه تغییری نسبت به نمونه شاهد ندارد، در نمونه‌های ۵۶ روزه کاهش ۱٪ و در نمونه‌های ۹۰ روزه افزایش ۰٫۰۵٪ مشاهده شده است.
- با افزایش درصد زئولیت برای سنگ‌دانه اکسید کلسیم مقاومت فشاری نمونه‌ها افزایش می‌یابد. برای نمونه‌های ۳ روزه این افزایش تا افزودن ۱۰ درصد افزایش می‌یابد و سپس روند کاهشی دارد. برای نمونه‌های ۵۶ روزه روند افزایش تا ۱۵ درصد می‌باشد و سپس روند کاهشی دارد، و برای نمونه‌های ۹۰ روزه افزایش تا ۱۰ درصد می‌باشد و سپس روند کاهشی می‌باشد.

بر اساس نتایج ارائه شده در شکل ۱۳، بر اساس تغییرات مقاومت کششی نمونه‌های بتنی بر اساس درصدهای مختلف زئولیت در سنگ‌دانه‌های مختلف مشاهده شده است که بهترین عملکرد برای سنگ‌دانه‌های سیلیکا-آلومینا همراه با ۵٪ زئولیت روی داده است. همچنین می‌توان بیان داشت:

- **سنگ‌دانه‌های سیلیکا-آلومینا:** این سنگ‌دانه‌ها به دلیل حضور سیلیس و آلومینا، که عناصر اصلی تشکیل دهنده ساختار کریستالی هستند، می‌توانند باعث افزایش مقاومت فشاری بتن شوند، به خصوص در درصدهای پایین زئولیت (تا ۱۰ درصد). سیلیس و آلومینا به کاهش نفوذپذیری و افزایش تراکم ساختار بتن کمک می‌کنند، که در نتیجه مقاومت در برابر حرارت و فشار بهبود می‌یابد. با این حال، با افزایش بیش از حد درصد زئولیت، افزایش تخلخل و کاهش عملکرد مکانیکی مشاهده می‌گردد. از طرفی، زئولیت در مقاومت کششی تغییر محسوسی ایجاد نمی‌کند زیرا کشش به مرزهای دانه‌ای و ریزساختار بتن وابسته است.
- **سنگ‌دانه‌های اکسید کلسیم:** این سنگ‌دانه‌ها به دلیل حضور کلسیم، تمایل به واکنش با زئولیت و ایجاد ترکیبات کلسیم-سیلیکات هیدرات (C-S-H) دارند که در افزایش مقاومت فشاری بتن مؤثر است. این ترکیب مقاومت بتن را در دماهای بالا بهبود می‌بخشد. هرچند، اثرات مشابه سنگ‌دانه‌های سیلیکا-آلومینا در مورد کاهش مقاومت با افزایش بیش از حد زئولیت مشاهده می‌شود. تغییرات در مقاومت کششی نیز چندان قابل توجه نیست.
- **سنگ‌دانه‌های کلسیت:** کلسیت به عنوان یک سنگ‌دانه آهکی، تحت تأثیر کربناسیون قرار می‌گیرد و در صورت افزایش زئولیت، ممکن است واکنش‌های شیمیایی با CO_2 محیط ایجاد کند. این فرایند می‌تواند منجر به افزایش تخلخل و کاهش مقاومت فشاری در بتن‌های کربناته شود. به دلیل حضور بیشتر کلسیم در کلسیت، مقاومت بتن در برابر حرارت بیشتر خواهد بود، اما کربناسیون در طول زمان می‌تواند به تضعیف ساختار بتن منجر شود.
- **تأثیر کربناسیون:** بتن‌هایی که تحت فرایند کربناسیون قرار گرفته‌اند، به دلیل واکنش CO_2 با هیدروکسید

• تحلیل‌های ریزساختاری (SEM و XRD) نشان دادند که افزایش دما موجب تخریب تدریجی زل C-S-H، افزایش تخلخل و کاهش قلیائیت می‌شود. این تغییرات میکروسکوپی با نتایج آزمایش‌های مکانیکی و روند افت مقاومت فشاری و کششی سازگار بود.

۵- مراجع

- [1] Pade, C., & Guimaraes, M. (2007). Effect of carbonation on concrete properties: A review. *Cement and Concrete Research*, 37(4), 593–599. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.12.004>
- [2] Delmotte, P. (2000). Fire in Mont Blanc Tunnel: Lessons learned. *Journal of Tunnel Fire Safety*, 3(2), 21–34.
- [3] De Schutter, G., & Taerwe, L. (1997). Effects of fire and carbonation on concrete strength. *Cement and Concrete Research*, 27(8), 1227–1239. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(97\)00110-8](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(97)00110-8)
- [4] Jones, M., Smith, R., & Brown, L. (2005). Impact of carbonation on compressive strength of concrete. *Journal of Concrete Research*, 12(4), 89–103.
- [5] Smith, A., Lee, H., & Cooper, D. (2010). Fire effects on the physical properties of concrete. *Fire Safety Journal*, 45(5), 321–334. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2010.06.004>
- [6] Liu, Y., Zhang, W., & Chen, X. (2019). Effects of carbonation on fire resistance of reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 205, 558–569. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.049>
- [7] Chen, X., Zhang, L., & Huang, Y. (2020). Impact of pre-carbonation on concrete's thermal performance. *Journal of Building Materials*, 45(3), 112–125.
- [8] Wang, J., Li, Y., & Yang, F. (2021). Fiber-reinforced concrete behavior under combined carbonation and fire exposure. *Materials Science and Engineering*, 678, 45–58.
- [9] Kim, H. J., Lee, J. S., & Choi, J. K. (2022). Thermal and chemical degradation of carbonated concrete under high temperature. *Materials Today: Proceedings*, 56, 1123–1130. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.01.112>
- [10] Tai, X., Zhou, K., & Chen, M. (2021). Combined deterioration of concrete due to carbonation and fire. *Journal of Construction Research*, 29(2), 133–144.
- [11] Yang, S., Kim, J., & Kwon, S. (2020). Mechanical degradation of concrete after sequential carbonation and fire. *Materials*, 13(12), 2783.

- افزایش زئولیت تغییر محسوس در مقاومت کششی نمونه‌های بتن برای سنگ‌دانه اکسید کلسیم ایجاد نمی‌کند.
- در نمونه‌های استوانه‌ای بتن برای سنگ‌دانه اکسید کلسیم حاوی ۵٪ زئولیت مقاومت کششی ۳ روزه تغییری نسبت به نمونه شاهد ندارد، در نمونه‌های ۵۶ روزه کاهش ۱٪ و در نمونه‌های ۹۰ روزه افزایش ۰٫۰۵٪ مشاهده شده است.
- با افزایش درصد زئولیت مقاومت فشاری نمونه‌ها برای سنگ‌دانه کلسیت افزایش می‌یابد. برای نمونه‌های ۳ روزه این رشد تا افزایش ۱۰ درصدی زئولیت روی داده است و سپس روند کاهش دارد. برای نمونه‌های ۵۶ روزه روند افزایش تا ۱۵ درصد می‌باشد و سپس روند کاهش دارد، و برای نمونه‌های ۹۰ روزه افزایش تا ۱۰ درصد می‌باشد و سپس روند کاهش می‌باشد.
- افزایش زئولیت تغییر محسوس در مقاومت کششی نمونه‌های بتن برای سنگ‌دانه کلسیت ایجاد نمی‌کند.
- در نمونه‌های استوانه‌ای بتن برای سنگ‌دانه کلسیت حاوی ۵٪ زئولیت مقاومت کششی ۳ روزه تغییری نسبت به نمونه شاهد ندارد، در نمونه‌های ۵۶ روزه کاهش ۱٪ و در نمونه‌های ۹۰ روزه افزایش ۰٫۰۵٪ مشاهده شده است.
- بر اساس نتایج مرتبط با مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی بر اساس درصد‌های مختلف زئولیت در سنگ‌دانه‌های مختلف مشاهده شده است که بهترین عملکرد برای سنگ‌دانه‌های سیلیکا-آلومینا همراه با ۱۰٪ زئولیت روی داده است.
- بر اساس نتایج مرتبط با مقاومت کششی نمونه‌های بتنی بر اساس درصد‌های مختلف زئولیت در سنگ‌دانه‌های مختلف مشاهده شده است که بهترین عملکرد برای سنگ‌دانه‌های سیلیکا-آلومینا همراه با ۵٪ زئولیت روی داده است.
- بر اساس مقایسه نهایی گزینه‌ها مشاهده شده است که بر اساس معیارهای فنی مقاومت کششی و فشاری برترین گزینه استفاده از سنگ‌دانه سیلیکا-آلومینا همراه با ۱۰٪ زئولیت بوده است.
- آزمون فل‌فالتین نشان داد که دمای بالا موجب افزایش محسوس عمق کربناسیون شده و این افزایش با زمان ماند حرارت‌دهی بیشتر تشدید گردید. با این حال، کاهش مقاومت فشاری ناشی از حریق شدید، سهم بیشتری در افت عملکرد کلی بتن نسبت به افزایش عمق کربناسیون داشت.

- [12] Li, H., Xu, G., & Zhang, J. (2022). Effects of thermal exposure on pre-carbonated concrete. *Advances in Concrete Construction*, 13(5), 389–397.
- [13] Hu, Y., Sun, L., & Ma, Z. (2023). Influence of environmental CO₂ concentration on concrete carbonation rate. *Environmental Materials Research*, 11(3), 210–219.
- [14] Akca, K., & Ozyurt, N. (2018). Fire resistance of natural zeolite-incorporated concrete. *Construction and Building Materials*, 173, 370–377.
- [15] Henry, M., & Darma, I. S. (2015). Rehydration effect on fire-damaged concrete. *Cement and Concrete Composites*, 63, 38–44.
- [16] Mohammed, A. A., Abbas, A., & Sherif, M. (2019). Mechanical behavior of pozzolanic concrete exposed to high temperature. *Construction and Building Materials*, 213, 377–386.
- [17] Poon, C. S., Shui, Z. H., & Lam, L. (2004). Effect of microstructure of ITZ on chloride-induced corrosion. *Cement and Concrete Research*, 34(1), 29–36.
- [18] Yaqub, M., & Bailey, C. (2017). Behavior of zeolite-based concrete at elevated temperatures. *Fire and Materials*, 41(4), 399–410.
- [19] Jerga, J. (2004). Physico-mechanical properties of carbonated concrete. *Construction and Building Materials*, 18(8), 645–652.

Experimental Investigation of Aggregate Chemical Structure on the Mechanical Performance of Zeolite-Based Concretes under Combined Carbonation–Fire Exposure in Urban Tunnels

Amirhossein Fatemi

Department of Civil Engineering, Sha.C., Islamic Azad University, Shahrood, Iran.

Ahmad Ganjali *

Department of Civil Engineering, Sha.C., Islamic Azad University, Shahrood, Iran.

Reza Babaei Semiromi

Department of Civil Engineering, Sha.C., Islamic Azad University, Shahrood, Iran.

Pejman Aminian

Department of Civil Engineering, Sha.C., Islamic Azad University, Shahrood, Iran.

Abstract

carbonation, improving the mechanical performance of concrete is of great importance. This study investigates the effect of the chemical composition of three types of aggregates (silica–alumina, calcium oxide, and calcite) on the mechanical behavior of zeolite-containing concretes subjected to high temperature and accelerated carbonation. Concretes were produced with a water-to-binder ratio of 0.45 and varying zeolite contents (0, 5, 10, 15, and 20%). After mixing and standard curing, the specimens were heated to 800 °C and subsequently exposed to a CO₂-saturated environment for 3, 56, and 90 days. The carbonation depth was determined using a phenolphthalein solution, and microstructural analyses were performed through SEM and XRD techniques to clarify the underlying mechanisms. The results showed that concrete produced with silica–alumina aggregates and 10% zeolite exhibited the highest compressive strength, as the coexistence of silica and alumina contributed to enhanced structural densification. In contrast, concretes with calcitic aggregates were more vulnerable to carbonation, leading to greater strength reduction. The influence of zeolite on tensile strength was limited across all mixes. Microstructural observations confirmed that elevated temperatures caused decomposition of C–S–H gel, increased porosity, and reduced alkalinity, which were consistent with the mechanical test results. Overall, the combination of silica–alumina aggregates with 10% zeolite is recommended as an effective option for producing concretes resistant to the deteriorative conditions of urban tunnels.

Keywords: Concrete, zeolite, chemical structure of aggregate, fire, carbonation.

* Corresponding Author: Ahmad.ganjali@iau.ac.ir

