

تعیین پتانسیل واکنش‌زایی سنگدانه‌های اطراف شهر تبریز و راهکارهای کاهش اثرات منفی آن‌ها بر خواص بتن

سهراب ویسه^۱ و علی دوستی^۲

^۱ عضو هیأت علمی مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، بخش مصالح و فرآورده های راه و ساختمان

^۲ کارشناس مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، بخش مصالح و فرآورده های راه و ساختمان

نویسنده مسئول: سهراب ویسه، veiseh@bhrc.ac.ir

چکیده

از آنجایی که سنگدانه‌ها بین ۶۰ تا ۷۵ درصد از حجم بتن را تشکیل می‌دهند، تاثیر زیادی بر خواص فیزیکی و شیمیایی بتن دارند. سنگدانه‌ها، نه تنها می‌توانند مقاومت بتن ساخته شده را تحت تاثیر قرار دهند بلکه خواص آنها به میزان زیادی بر دوام و رفتار سازه‌ای بتن تأثیرگذار است. در حقیقت، سنگدانه‌ها، کاملاً خنثی نیستند و خواص فیزیکی و شیمیایی آنها بر عملکرد بتن، مؤثر است. یکی از مشکلات مهم سنگدانه‌های منطقه تبریز، احتمال واکنش‌زایی قلیایی سیلیسی بین سیلیس سنگدانه‌ها و قلیایی‌های موجود سیمان در آب حفرة ای بتن در طول زمان است. به دلیل استفاده این سنگدانه‌ها در ساخت و سازهای مختلف به ویژه سازه‌های هیدرولیکی و اهمیت زیاد عدم بروز سیلیسی بین سنگدانه و سیمان، ارزیابی دقیق این مصالح از نظر واکنش‌زایی با قلیایی‌های سیمان از اهمیت قابل توجهی برخوردار است.

در این پژوهش واکنش‌زایی سنگدانه‌های سه معدن مختلف ناحیه تبریز با استفاده از آزمایش‌های سنگ‌شناسی مطابق با ASTM C295 و منشور ملات تسریع شده مطابق با ASTM C1260 بررسی شد. مشخص گردید که این سنگدانه‌ها پتانسیل واکنش‌زایی قلیایی سیلیسی زیادی دارند. به طوری که استفاده از سیمان‌های پوزولانی به عنوان یک راهکار به منظور کنترل این واکنش‌ها موثر واقع نگردید.

واژگان کلیدی: سنگدانه‌های واکنش‌زا، انبساط، واکنش قلیایی سیلیسی، تبریز

۱- مقدمه

قلیایی‌های سیمان، واکنش زیان‌آور ایجاد نماید و باعث انبساط شدید ملات یا بتن گردد. اگر چنین موادی در مقادیر زیان‌آور وجود داشته باشند، مصرف سنگدانه تنها به شرطی مجاز است که نشان داده شود با استفاده از سیمان حاوی قلیایی‌های کم یا با افزودن یک ماده خاص، از انبساط مضر حاصل از واکنش قلیایی سنگدانه جلوگیری می‌شود. در واقع بهترین روش برای ارزیابی مضر بودن یک سنگدانه در ایجاد واکنش قلیایی سیلیسی، مطالعه تاریخچه عملکرد آن در هنگام بهره برداری است. در این روش، بتن مورد ارزیابی باید حداقل ۱۵ سال تحت بهره‌برداری باشد. همچنین باید مقایسه‌هایی بین طرح اختلاط، اجزا و محیط اطراف بتن موجود و بتن پیشنهاد شده انجام شود. این روش نشان می‌دهد که آیا تمهیدات خاصی لازم است و یا این که آزمایش بتن یا سنگدانه مورد نیاز می‌باشد یا این که بدون اشکال می‌توان از سنگدانه‌ها استفاده نمود. در نبود چنین شرایطی، طرح یک آزمایش جامع به منظور کشف پتانسیل واکنش‌زایی قلیایی

اثرات خرابی ناشی از انجام و وقوع واکنش‌های قلیایی و انبساط ناشی از آن در بسیاری از کشورها مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است. مهندسان ساخت نیازمند روش‌های مناسب برای شناسایی عوامل ایجاد کننده واکنش‌های قلیایی سیلیسی (ASR (Alkali Silica Reaction)) و تعیین فعالیت سنگدانه‌ها قبل از استفاده از آنها در سازه‌ها بوده‌اند. به علاوه برای سن گدانه‌های فعال انبساط واکنش‌زایی به عوامل مختلفی همچون یون‌های موجود در آب حفرة ای بتن، نوع سیمان و پوزولان مصرفی، شرایط محیطی ساخت، منابع و محل تجمع یون‌ها به همراه رطوبت و دمای محیط وابسته است [۱-۳].

دوام بتن می‌تواند تحت تأثیر سنگدانه‌هایی قرار گیرد که در ترکیب بتن استفاده می‌شوند. سنگدانه برای مصرف در بتنی که در معرض رطوبت، شرایط مکرر جوی مرطوب یا در تماس با زمین مرطوب قرار خواهد گرفت، نباید حاوی موادی باشد که با

میزان کافی در آب حفره‌ای بتن و رطوبت کافی در بتن سیلیس فعال در سنگدانه: به طور کلی دو گروه کلی از کانی‌های سیلیسی وجود دارند که با قلیایی‌ها واکنش شدیدی انجام می‌دهند [۶-۷]: (۱) سیلیس‌های ناپایدار (شامل اوپال، کالدونی، تری‌دیمیت و کریستوبالیت) که شامل تعدادی از شکل‌های کوارتز نامنظم هستند و (۲) آلومینو سیلیکات‌های شیشه‌ای

سیلیس ماده‌ای است که در شرایط اسیدی و قلیایی شدید تجزیه و حل می‌شود. مطالعات مختلف نشان می‌دهد که در شرایط مساعد سیلیس‌های بی‌شکل در PH های بالا خیلی راحت‌تر از کوارتزهای بلورین حل می‌شوند [۸]. فراوان‌ترین نوع سنگدانه خطرناک مورد استفاده آنهایی هستند که حاوی سیلیس غیربلورین یا به طور ضعیف یا ناقص متبلور شده می‌باشند. اولین قدم در شناسایی واکنش‌زایی سنگدانه انجام بررسی سنگ‌شناسی است. به دلیل تفاوت تاریخچه زمین‌شناسی هر منطقه با منطقه دیگر این امکان وجود دارد که یک نوع سنگ در یک ناحیه واکنش‌زا و همان سنگ در ناحیه دیگری غیرواکنش‌زا تشخیص داده شود. بنابراین طبقه‌بندی سنگ‌ها به لحاظ واکنش‌زایی باید از الگوی محلی مختص به همان ناحیه یا بخش پیروی کند. بر اساس طبقه‌بندی RILEM AAR-1 [۹] سنگدانه به سه دسته زیر تقسیم می‌شوند: (۱) سنگدانه‌هایی که احتمال واکنش‌زایی کمی دارند (۲) سنگدانه‌هایی که از نظر واکنش‌زایی مشکوک هستند و (۳) سنگدانه‌هایی که احتمال واکنش‌زایی زیادی دارند. همچنین باید خاطر نشان کرد که علاوه بر خاصیت کانی شناسی سنگدانه، میزان تخلخل و نفوذپذیری سنگدانه نقش به‌سزایی در واکنش‌پذیری آنها ایفا خواهد کرد [۷، ۱۰].

وجود قلیایی‌ها به میزان کافی در آب حفره‌ای بتن: مهمترین منبع داخلی قلیایی بتن، سیمان است. در حالی که اجزای دیگری همچون سنگدانه، مواد سیمانی و افزودنی‌های معدنی و شیمیایی نیز ممکن است موجب افزایش قلیایی بتن شوند. از منابع مهم خارجی قلیایی بتن می‌توان مواد شیمیایی یخ‌زدا را نام برد. اگرچه پوزولان‌ها در ساختار خود دارای مقداری قلیایی هستند و این مسئله به لحاظ واکنش‌های سیلیسی قلیایی نکته‌ای منفی است، با این حال مطالعات اخیر نشان داده است که نهایتاً آنچه که موجب خواهد شد تا استفاده از پوزولان‌ها باعث کاهش انبساط ناشی از واکنش‌های قلیایی سیلیسی شود مربوط به کاهش مقدار قلیایی موجود در آب حفره‌ای بتن می‌باشد [۶]. به منظور بررسی قلیایی‌ها در آب حفره‌ای بتن بر

سیلیسی قبل از استفاده از سنگدانه مشکوک در بتن الزامی است [۴]. به طور کلی دو نوع واکنش قلیایی در سنگدانه‌ها شناخته شده است: الف) واکنش قلیایی سیلیسی که در سنگ‌ها و کانی‌های سیلیسی معین و شیشه‌های مصنوعی انجام می‌شود. ب) واکنش قلیایی کربناتی که در سنگ‌های آهکی دولومیتی، انجام می‌گیرد. سنگ‌های کربناتی که چنین واکنشی ایجاد می‌کنند، دارای بخش کربناتی شامل مقدار زیادی هم دولومیت و هم کلسیت است و مواد باقیمانده نامحلول در اسید دارای مقدار زیادی رس می‌باشد.

هدف از این پژوهش بررسی واکنش‌زایی قلیایی سیلیسی سنگدانه‌های سه معدن در اطراف شهر تبریز به کمک آزمایش‌های آزمایشگاهی است. ابتدا به بررسی سازوکار واکنش ASR و مسائل مربوط به آن پرداخته شده است.

۲- سازوکار واکنش قلیایی سنگدانه

واکنش قلیایی سنگدانه عبارت است از تشکیل ژلی که از واکنش بین سیلیس واکنش‌زای موجود در سنگدانه و هیدروکسید پتاسیم و سدیم موجود در سیمان حاصل می‌شود. بر اثر جذب آب، این ژل انبساط می‌یابد و با ایجاد تنش منجر به تشکیل ترک‌هایی در بتن می‌شود. واکنش قلیایی کربناتی، بین قلیایی‌های موجود در سیمان و گروه مشخصی از سنگ‌های آهکی دولومیتی که در شرایط مرطوب قرار می‌گیرند، روی می‌دهد. در اینجا نیز انبساط حاصل باعث ایجاد ترک‌ها می‌شود و خرابی‌هایی در بتن به وجود می‌آید.

واکنش قلیایی- سیلیسی: واکنش قلیایی سیلیسی را اولین بار در دهه ۱۹۳۰، توماس استانتون (Stanton) مهندس امریکایی در ایالت کالیفرنیا در آمریکا، به هنگام بازرسی ترک‌خوردگی و انبساط بتن سازه‌ای در ساختمان‌های مدارس، پل‌ها، جاده‌ها و دیواره‌های ساحلی مشاهده و گزارش کرد [۵].

واکنش قلیایی سیلیسی بین سیلیس بی‌شکل فعال در سنگدانه‌ها و قلیایی‌های سیمان که به صورت محلول در آب حفره‌ای خمیر سیمان وجود دارد، رخ می‌دهد. در اثر این واکنش، ژل سیلیسی تشکیل و با جذب رطوبت، منبسط می‌شود. هنگامی که تنش داخلی ایجاد شده به بیش از مقاومت کششی بتن برسد، ترک‌خوردگی ایجاد می‌شود. این ترک‌ها خود می‌توانند محل نفوذ عوامل مخرب دیگر به داخل بتن شوند و خسارت تشدید گردد.

عواملی که باعث بروز پدیده واکنش قلیایی سیلیسی می‌شوند عبارتند از: سیلیس فعال در سنگدانه‌ها، وجود قلیائی‌ها به

اساس استاندارد باید از قلیایی معادل ($\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} = \text{Na}_2\text{O} +$) $0.658 \text{ K}_2\text{O}$ بر حسب درصد وزنی استفاده نمود.

رطوبت: عموماً برای رخداد واکنش قلیایی سیلیسی، یک منبع رطوبت مورد نیاز می باشد. این منبع رطوبت سبب شکل‌گیری ژل به همراه خسارت‌های ناشی از آن در طول تورم می‌شود. مشاهده شده است که در محیطی با رطوبت کمتر از 0.8% ، مشروط بر این که تنها منبع رطوبت، هوا باشد به‌طور کلی یا آسیبی اتفاق نخواهد افتاد و یا پیشرفت واکنش متوقف خواهد شد [۱۱]. بسیاری از صاحب‌نظران معتقدند چرخه‌های تر و خشک شدن متوالی می‌توانند موجب سرعت بخشیدن به واکنش قلیایی باشند.

۳- رابطه واکنش قلیایی سیلیسی سنگدانه با میزان قلیایی‌های سیمان

انجمن سیمان پرتلند در سال ۱۹۶۳ در نتیجه تحقیقات خود بر روی سازه‌های بتنی شاهراه‌ها در جورجیا و آلاباما که بتن آنها از شن‌های این مناطق و سیمان‌های دارای قلیایی معادل بیش از 0.6% درصد ساخته شده بودند. مشاهده گردید که به دلیل استفاده از سیمان با قلیایی معادل کم هیچ یک از سازه‌ها دچار ترک خوردگی نشده‌اند [۱۲-۱۴]. به‌طور کلی میزان واکنش‌زایی یک سنگدانه تابعی از مقدار قلیایی‌ها در آب حفره‌ای بتن می باشد و از طرف دیگر مقدار قلیایی آب حفره‌ای بتن تحت تأثیر نوع و مقدار مواد سیمانی مختلف قرار دارد. در واقع غلظت Na^+ ، K^+ و OH^- وابسته به مقدار سدیم و پتاسیم در سیمان و مواد سیمانی موجود در ترکیب بتن است. همواره برای یک سنگدانه مشخص حداکثری برای مقدار معادل قلیایی تعریف می‌شود که برای مقادیر کمتر از آن، سنگدانه واکنش نشان نخواهد داد. بنابراین با کاهش میزان pH آب حفره‌ای بتن می‌توان از رخداد واکنش سیلیسی قلیایی جلوگیری به عمل آورد [۱۵-۱۸]. مطابق ادبیات فنی حاضر محققین مختلفی این غلظت را ۲۰۰ تا ۳۰۰ میلی مول بر لیتر یا مقدار pH حدوداً $13/3$ تا $13/5$ گزارش کرده‌اند [۱۹-۲۳]. بر اساس نتایج آزمایشات لیمن (Leeman) و لوتنباخ (Lothenbach) مشاهده گردید که به جز قلیایی معادل نسبت K/Na نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است زیرا در مطالعات آنها مشاهده گردید سیمان‌های دارای قلیایی معادل یکسان با نسبت K/Na متغیر دارای انبساط‌های متفاوتی خواهند بود [۲۴-۲۵]. هو (Hou) و همکارانش [۲۶] گزارش کردند که یون‌های سدیم و پتاسیم در

واکنش ASR مشابه به هم عمل خواهند کرد منتها سرعت واکنش برای پتاسیم نسبت به سدیم بیشتر خواهد بود.

۴- راهکارهایی به منظور جلوگیری از واکنش سیلیسی قلیایی سنگدانه‌ها

در حالت کلی همواره جلوگیری از واکنش قلیایی سنگدانه قبل از ساخت بتن باید مورد توجه قرار گیرد. بنابراین شرایط محیطی به لحاظ رطوبتی، دمایی و منابع خارجی قلیایی باید مد نظر قرار گیرد. تحقیقات نشان داده است که رطوبت بالا (معمولاً بیشتر از 80% درصد)، دمای زیاد و حضور مواد قلیایی خارجی بر شدت و سرعت واکنش‌های قلیایی سیلیسی خواهد افزود. به غیر از تأثیر شرایط محیطی بر واکنش قلیایی سیلیسی، به سه روش اصلی می‌توان از واکنش قلیایی سیلیس انبساط‌زا جلوگیری به عمل آورد که عبارتند از: اجتناب از مصرف سنگدانه واکنش‌زا و یا جایگزینی آنها با سنگدانه‌های غیرفعال، محدود کردن میزان قلیایی سیمان به قلیائیت کمتر از 0.4% الی 0.6% درصد (یا $1/8 \text{ kg}/\text{m}^3$ الی $3/0 \text{ kg}/\text{m}^3$ برای بتن) یا به عبارتی استفاده از سیمان‌های کم قلیا و در نهایت استفاده از مواد افزودنی معدنی و شیمیایی همچون خاکستر بادی، پوزولان طبیعی تکلیس‌شده یا خام، سرباره کوره آهن‌گدازی آسیاب شده، دوده سیلیس، نمک‌های لیتیم و غیره.

در دنیا سنگدانه‌های سیلیسی معمول‌ترین نوع سنگدانه‌های مستعد به حمله قلیایی‌ها، به‌شمار می‌روند. واکنش‌زایی کانی‌های مختلف سیلیسی به نظم بلورین آنها بستگی دارد. اوپال ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) که ساختمان بسیار نامنظمی دارد، واکنش‌زاترین نوع سیلیس است. کوارتز (SiO_2) کرنش نیافته که ساختمان کریستالی بسیار منظمی دارد، معمولاً غیر واکنش‌زاست. فرم‌های دیگر سیلیس، مانند شیشه، کوارتز ریزبلور و کوارتز مخفی بلور، کوارتز کرنش یافته، کلسدونی، تریدمیت و کریستوبالت واکنش‌زایی متوسطی دارند. به همین منظور در جهت کاهش احتمال رخداد واکنش‌های سیلیسی قلیایی باید از کاربرد سنگدانه‌های واکنش‌زا در ساخت بتن اجتناب کرد و یا سنگدانه‌های واکنش‌زا با غیرواکنش‌زا جایگزین شوند. طبق مطالعات انجام شده توسط افشارنیا و پورساعی [۲۷] استفاده از خرده‌های لاستیک در بتن به دلیل عدم واکنش‌زایی با سنگدانه‌ها و سیمان و همچنین جذب انرژی زیاد، موجب کاهش انبساط و ترک خوردگی ناشی از واکنش قلیایی خواهد شد. همچنین استفاده از سنگدانه‌های شیشه‌ای

در داخل کشور در خصوص واکنش زایی مصالح سنگی مصرفی (بستر رودخانه زندان، سهرابی و مصالح حاصل از حفاری سرریز سد نیان) در سدهای شمیل و نیان واقع در قسمت شمال شرقی بندرعباس (قسمت شمال جاده بندرعباس-میناب) مشاهده گردید که این مصالح از واکنش زایی برخوردار بوده و در ادامه به منظور کنترل واکنش زایی از درصدهای مختلف دوده سیلیس (۵ درصد برای مصالح رودخانه سهرابی و ۱۰ درصد برای دو قرضه دیگر) استفاده گردید [۳۴]. در مطالعه دیگری بر روی مصالح قرضه (کارگاه هلتوشان) سد و تونل گاوشان در ۸۵ کیلومتری شمال کرمانشاه به منظور کنترل واکنش زایی از راهکارهای مختلفی همچون استفاده از دوده سیلیس، سیمان پوزولانی ویژه و ترکیب مصالح واکنش زا با مصالح غیر فعال استفاده گردید [۳۵].

در مورد افزودنی‌های شیمیایی، بر اساس مطالعات مختلف در دنیا به نظر می‌رسد که استفاده از مواد افزودنی شیمیایی در بتن یا ملات تأثیری بر واکنش‌های قلیایی سیلیسی نخواهند داشت مگر این که افزودنی مورد استفاده حاوی مقدار زیادی از قلیایی‌ها مانند سدیم، پتاسیم و لیتیم باشد. تنها افزودنی‌هایی که به نظر می‌رسد به لحاظ مقدار قلیایی خطرناک باشند آن‌هایی هستند که در شاتکریت به منظور زودگیری استفاده می‌شوند [۳۶-۳۷]. در مورد استفاده از حباب زاهای بعید است که تاثیر مستقیمی بر واکنش ASR و انبساط ناشی از آن داشته باشند. با این وجود شواهدی موجود است که نشان داده است تشکیل حباب‌های هوا منجر به کاهش یا تعویق انبساط خمیر سیمان خواهند شد [۳۸-۳۹]. به نظر می‌رسد مواد افزودنی حاوی لیتیم بر خلاف مواد شیمیایی دیگر در جهت کنترل انبساط خمیر سیمان ناشی از واکنش ASR بسیار مفید خواهند بود. فنگ (Feng) و همکارانش [۴۰] معتقدند که نمک‌های لیتیم قادر هستند تا از انبساط ناشی از واکنش‌های ASR جلوگیری کنند. در واقع به نظر می‌رسد که حضور یون Li^+ در آب حفره ای از طریق تشکیل یک لایه فیزیکی محافظ بر روی سیلیس فعال مانع از تجزیه آن (به عنوان اولین گام به منظور رخداد واکنش ASR) خواهد شد. البته باید خاطر نشان کرد که جلوگیری از واکنش سیلیس و در نتیجه کنترل انبساط ناشی از آن توسط نمک‌های لیتیم به موارد مختلفی بستگی دارد و با توجه به میزان واکنش‌زایی سنگدانه‌ها، نوع نمک لیتیم، مقدار قلیایی‌ها در آب حفره‌ای و مقدار مصرف نمک لیتیم متغیر است [۴۱].

بصورت پودر با دانه‌بندی و نسبت مناسب در خمیر سیمان در حضور سیلیس واکنش‌زا نه تنها واکنشی نخواهند داشت بلکه اثبات شده است که موجب کنترل واکنش‌های سیلیسی قلیایی خواهند شد. در این حالت پودر شیشه با پرتلدیت واکنش داده و علاوه بر تولید ژل C-S-H موجب افزایش فازهای آلومیناتی از جمله مونوسولفات خواهد شد. بنابراین پودر شیشه با افزایش فازهای آلومیناتی موجب کاهش احتمال تجزیه سیلیس بی‌شکل در سنگدانه‌های واکنش‌زا خواهد شد [۲۸].

استفاده از مواد سیمانی و پوزولان‌ها یکی از راه‌حل‌های موثر در جهت کاهش انبساط بتن به جهت واکنش‌های سیلیسی قلیایی است. بر اساس مطالعات مختلف مشخص شده است که پوزولان‌ها بدلیل واکنش قلیایی‌ها با محصولات هیدراسیون و نهایتاً کاهش قلیایی آب حفره‌ای قادر خواهند بود تا از انبساط‌های ناشی از واکنش ASR جلوگیری کنند. مقدار استفاده از پوزولان‌ها به جهت کنترل واکنش ASR وابسته به موارد زیر افزایش خواهد یافت:

- افزایش مقدار قلیایی‌های موجود در آب حفره‌ای خمیر سیمان
- افزایش قلیایی آب حفره‌ای به جهت استفاده از مواد سیمانی با میزان قلیایی‌های زیاد
- افزایش نسبت C/S در پوزولان مصرفی
- افزایش واکنش‌پذیری سنگدانه

به نظر می‌رسد که آن دسته از پوزولان‌هایی که دارای خاصیت قلیایی و اکسید کلسیم کم و سیلیس زیاد هستند دارای توانایی بیشتری در کم کردن قلیائیت آب حفره‌ای بتن هستند و با نسبت‌های کم از این مواد می‌توان بخوبی واکنش‌های قلیایی سیلیسی را کنترل نمود. به عکس برای استفاده از پوزولان‌هایی با خاصیت قلیایی زیاد که حاوی میزان زیادی کلسیم می‌باشند درصد استفاده بیشتری توصیه می‌گردد توماس و بلیژنسکی (Bleszynski) [۲۹-۳۱] در مورد تأثیر استفاده از دوده سیلیسی (۵ تا ۷/۵ درصد) بر غلظت قلیایی‌ها در خمیر سیمان اشاره می‌کنند که با مصرف این پوزولان غلظت قلیایی‌ها در آب حفره‌ای بتن به همراه انبساط آزمون‌ها ناشی از واکنش‌های قلیایی سیلیسی کاهش چشمگیری یافته است. در خصوص استفاده از پوزولان زئولیت نیز، به عنوان یکی از پوزولان‌های طبیعی موجود و مناسب در کشور [۳۲-۳۳] که در سالهای اخیر مورد تحقیق و استفاده قرار گرفته است مشخص گردید که استفاده از آن منجر به کاهش چشمگیر انبساط ناشی از واکنش قلیایی سیلیسی خواهد شد. براساس مطالعات موجود

۵- آزمایش‌های مورد استفاده به منظور ارزیابی

واکنش قلیایی سیلیسی

به طور کلی آزمایش‌های ارزیابی واکنش قلیایی-سیلیسی سنگدانه‌ها به دو دسته روش‌های مستقیم ارزیابی سنگدانه و روش‌های غیرمستقیم تقسیم بندی می‌شوند. روش مستقیم ارزیابی عبارت است از:

- آزمایش سنگ‌شناسی (ASTM C295) و آزمایش‌های غیرمستقیم عبارتند از:

۱) واکنش‌زایی قلیایی بالقوه ترکیب‌های سیمان - سنگدانه (روش منشور ملات)

۲) آزمایش کوتاه‌مدت روی منشور ملات در سود ۱ نرمال (ASTM C1260)

۳) آزمایش درازمدت بتن ساخته شده از سنگدانه‌های مورد نظر در بخار آب و سود ۱ نرمال (ASTM C1293)

باید خاطر نشان کرد که استاندارد ASTM C227 تقریباً به دلیل ضعف آن در پوشش نقش سنگدانه‌هایی که واکنش‌زایی کندی دارند قابل استفاده نیست. زیرا اندازه کوچک نمونه و شرایط آزمایش به گونه‌ای است که موجب افزایش استخراج قلیایی‌ها از منشور ملات خواهد شد [۴۲]. بر اساس مطالعات مختلف انجام شده در مورد روش‌های مختلف اندازه‌گیری پتانسیل واکنش قلیایی-سیلیسی [۲۹] آزمایشی که امروزه بیشتر برای ارزیابی تأثیر مواد سیمانی بر کنترل واکنش‌های قلیایی سیلیسی توصیه و استفاده می‌شود نمونه‌های منشور بتنی طبق استاندارد ASTM C1293 و یا آزمایش تسریع شده ملات طبق ASTM C1260 است. به همین منظور در مطالعه حاضر به منظور بررسی واکنش‌زایی سه معدن سنگدانه در شهر تبریز در مقابل واکنش قلیایی سیلیسی از آزمایش تسریع شده ملات مطابق استاندارد ASTM C1260 استفاده گردید.

۶- آزمون‌ها

۶-۱- مواد مورد استفاده

سنگدانه مصرفی: به منظور بررسی واکنش‌زایی قلیایی سنگدانه‌های اطراف شهر تبریز به ترتیب از ریزدانه‌های سه معدن پر مصرف در شهر تبریز با نام‌های طریقت، فتح المبین و سرام استفاده شد. به همین منظور نمونه‌برداری به روش استاندارد از کارگاه‌های یاد شده انجام شد. در آزمایش‌ها از این نمونه‌ها استفاده گردید. نمونه‌برداری از سنگدانه‌های ریز در محل کارگاه از زیر نوار نقاله صورت پذیرفت و سپس در آزمایشگاه به منظور ساخت منشورهای ملات سنگدانه ریز مطابق استاندارد ASTM C1260، دانه‌بندی گردیدند. به منظور انجام مطالعات میکروسکوپی سنگدانه‌های ریزتر از الک ۲/۳۶mm و فراکسیون سنگدانه‌های باقی‌مانده بر روی الک ۱/۱۸ استفاده شده و برای تهیه مقاطع نازک و مطالعه میکروسکوپی به آزمایشگاه کانی‌شناسی دانشکده مهندسی معدن دانشگاه تهران منتقل شد. نتایج مطالعات میکروسکوپی سنگدانه‌ها به تریب در بخش ۸ ارائه شده است.

سیمان: به منظور اندازه‌گیری پتانسیل واکنش قلیایی سیلیسی مطابق استاندارد ASTM C1260 باید از سیمانی استفاده گردد که بعداً در پروژه‌های ساخت مورد استفاده قرار خواهد گرفت. به همین منظور در مطالعه حاضر از دو نوع سیمان پرمصرف در منطقه آذربایجان یعنی سیمان تیپ II صوفیان و سیمان پوزولانی صوفیان استفاده گردید که در جدول ۱ آنالیز شیمیایی هر یک گزارش شده است. در ضمن مقدار درصد انبساط اتوکلاو برای هر دو نمونه سیمان پس از محاسبه کمتر از ۰/۲ درصد گزارش گردید.

جدول ۱- آنالیز شیمیایی سیمان‌های مورد استفاده

نوع سیمان	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	L.O.I	Na ₂ O+0.658K ₂ O
سیمان تیپ II صوفیان	۲۱/۳	۶۳/۰	۳/۲	۵/۲	۲/۰	۲/۲	۲/۲	۰/۴۷
سیمان پوزولانی صوفیان	۳۷/۶	۵۶/۰	۳/۸	۵/۲	۲/۰	۲/۰	۳/۰	-

پرتلند پوزولانی صوفیان، مقدار کل مواد قلیایی راهنمای مناسبی نیست، زیرا قسمتی از قلیایی‌ها در این مواد ممکن است در شکل‌های معدنی ضعیفی ترکیب شده و به درون محلول ملات بتن به صورت یون‌های قلیایی آزاد شوند. مقدار معادل قلیایی در این سیمان‌ها که شامل هر دو نوع معادل

همچنین در مورد مقدار قلیایی سیمان پوزولانی صوفیان لازم به ذکر است که به طور کلی مقدار معادل قلیایی در سیمان‌های پرتلند راهنمای قابل اطمینانی برای پتانسیل واکنش‌پذیری آنها در حضور سنگدانه‌های واکنش‌پذیر است. اما در مورد سیمان‌های غیرپرتلندی یا سیمان‌های آمیخته (همچون سیمان

قرار می‌گیرند. طول این منشورها در بازه‌های ۳، ۷، ۱۰، ۱۴ و ۲۸ روز خوانده می‌شود و مقدار انبساط آنها مطابق رابطه (۱) اندازه‌گیری می‌گردد:

$$\text{طول ثانویه (برحسب میلیمتر)} = [\text{درصد انبساط منشور} \times 100] / 250 \text{ (طول اولیه (برحسب میلیمتر))} \quad (1)$$

چنانچه درصد انبساط بعد از ۱۴ روز بیشتر از ۰/۲ درصد شود، سنگدانه پتانسیل واکنش قلیایی - سیلیسی دارد و بهتر است روش‌های دیگری نیز برای اثبات این امر مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۲- وسایل و تجهیزات لازم به منظور انجام آزمایش انبساط منشور ملات طبق استاندارد ASTM C1260

این روش آزمون امکان تشخیص قابلیت واکنش قلیایی سیلیسی سنگدانه مورد مصرف در بتن را که ممکن است سبب بروز انبساط درونی و مخرب گردد فراهم می‌کند. این روش به ویژه ممکن است برای سنگدانه‌هایی که دیر واکنش نشان می‌دهند مناسب باشد. اگر چه به نظر می‌رسد که این روش به منظور ارزیابی عملکرد ترکیب سنگدانه با مواد سیمانی مناسب نیست. افزایش دمای رویارویی ملات‌ها با هیدروکسید سدیم یک مولار تا ۸۰ درجه سلسیوس عاملی است که برای تسریع آزمایش در نظر گرفته شده است و در حالت طبیعی برای سازه بتنی چنین اتفاقی نخواهد افتاد و همین باعث کاهش میزان اعتبار این آزمایش است. به منظور اطمینان از واکنش‌زایی

قلیایی یعنی در سیمان پرتلند و در تفاله‌های آتشفشانی و یا مواد پوزولانی است، با اندک خطایی برابر یا بیشتر از مقدار قلیایی‌ها در سیمان پرتلند است. از جدول ۱ مشاهده می‌شود که معادل قلیایی سیمان تیپ II صوفیان کمتر از ۰/۶ درصد محاسبه شده است که در گروه سیمان‌های کم قلیا قرار خواهد گرفت.

آب مصرفی: از آب شرب برای ساخت نمونه‌های منشوری ملات استفاده شده است.

۲-۶- طرح‌های اختلاط ساخته شده

در مطالعه حاضر به منظور بررسی واکنش‌زایی سنگدانه‌های ریز سه معدن مختلف با دو نوع سیمان از شش طرح اختلاط مختلف مطابق جدول ۲ استفاده گردید.

جدول ۲- طرح مخلوط ملات‌های استفاده شده در آزمایش ASTM C1260

شماره طرح	نام معدن مورد استفاده	نوع سیمان مصرفی
C1	طریقت	سیمان تیپ II صوفیان
C2	فتح المبین	سیمان تیپ II صوفیان
C3	سرام	سیمان تیپ II صوفیان
C4	طریقت	سیمان پوزولانی صوفیان
C5	فتح المبین	سیمان پوزولانی صوفیان
C6	سرام	سیمان پوزولانی صوفیان

روش استاندارد ASTM C1260: در این روش، سنگدانه ریز و یا درشتی که قرار است ارزیابی گردد، در صورت نیاز خرد و در اندازه‌های ۰/۱۵ میلی‌متر تا ۴/۷۵ میلی‌متر دانه‌بندی شده و به نسبت مشخصی طبق استاندارد با هم ترکیب می‌گردد. این سنگدانه را به نسبت ۲/۷۵ به ۱ با سیمانی که مطابق الزامات استاندارد ASTM C150 است و همچنین حداکثر انبساط آن در آزمایش اتوکلاو مطابق استاندارد ASTM C151، ۰/۲ درصد است ترکیب می‌کنند و با نسبت آب به سیمان ۰/۴۷۵، ملات نسبتاً روانی را می‌سازند. این ملات در منشورهایی به ابعاد ۲۵×۲۵×۲۸۵ میلی‌متر که در دو سر آنها یک پین به منظور اندازه‌گیری دقیق طول منشور قرار داده شده است ریخته می‌شود (شکل ۲). منشورهای ساخته شده بعد از یک روز از قالب خارج شده و در حمام آبی که دمای آن به طور تدریجی به ۸۰⁰C رسانده می‌شود، قرار می‌گیرد. بعد از ۲۴ ساعت قرارگیری منشورها در حمام آب، طول آنها به عنوان طول اولیه خوانده می‌شود. منشورها در محلول سود (NaOH) یک نرمال

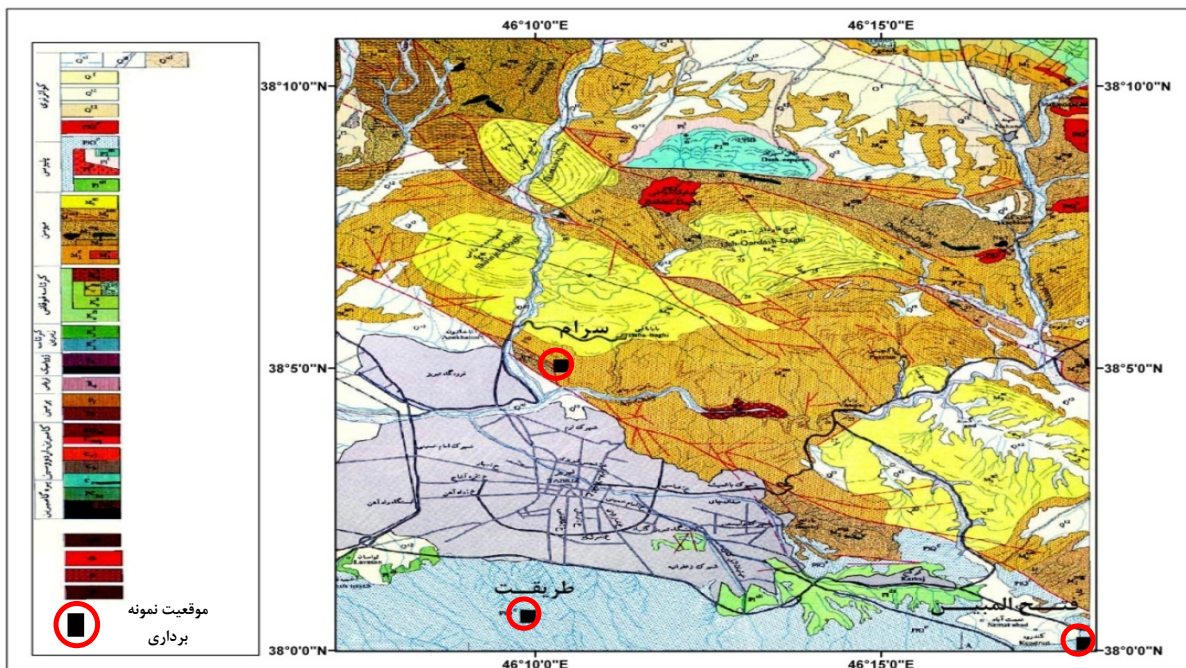
کانی‌های رسی، کلسیت، سربیسیت و کوارتزهای دانه ریز دیده می‌شود. داسیت‌ها، ریوداسیت‌ها و ریولیت‌ها گسترش بیشتری در منطقه سه‌پند دارند و به طور عمده به صورت گنبد‌های منفرد آتشفشانی و یا آگلومرا و برش‌های آتشفشانی مشاهده می‌شوند که در نمونه دستی، اغلب به رنگ قهوه‌ای روشن تا خاکستری و خاکستری روشن هستند. در داسیت‌ها کانی‌های اصلی شامل پلاژیوکلازهای شکل‌دار تا نیمه شکل‌دار هستند و با منطقه‌بندی و بافت غربالی به صورت درشت بلور در اندازه‌های ۱ تا ۵ میلی‌متر در متنی دانه‌ریز یا شیشه‌ای قرار دارند. در مورد ریوداسیت‌ها و ریولیت‌ها کانی‌شناسی این سنگ‌ها شامل درشت بلورهای کوارتز، پلاژیوکلاز، فلدسپات قلیایی و بیوتیت است. در ادامه با توجه به نمونه برداری انجام شده از سه کارگاه مختلف تولید شن و ماسه در شمال (کارگاه سرام)، جنوب (کارگاه طریقت) و جنوب شرقی (کارگاه فتح المبین) در اطراف شهر تبریز هر سه کارگاه به لحاظ زمین‌شناسی با یکدیگر مقایسه شده است (شکل ۳).

سنگدانه انجام آزمایش‌های سنگ‌شناسی، آزمایش بر روی منشورهای ملاتی ASTM C227 یا آزمایش درازمدت روی بتن ساخته شده از سنگدانه‌های مورد نظر در بخار آب و سود ۱ نرمال ASTM C1293 توصیه می‌گردد.

۷- نتایج و بحث

۷-۱- بررسی‌های سنگ‌شناسی

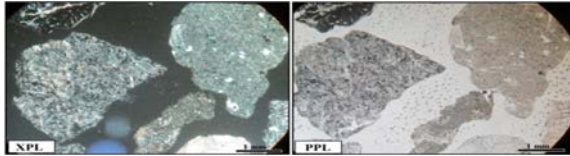
با توجه به مطالعات پتروگرافی، سنگ‌های آتشفشانی منطقه مورد مطالعه را می‌توان به انواع آندزیت، تراکی آندزیت، داسیت، ریوداسیت و ریولیت تقسیم‌بندی کرد. سنگ‌های آندزیتی و تراکی آندزیتی در نمونه دستی، طیف متنوعی از رنگ‌های خاکستری روشن، قهوه‌ای، سرخ و سبز تیره دارند. کانی‌های اصلی آندزیت‌ها شامل پلاژیوکلاز و هورنبلند است در تراکی آندزیت‌ها عمده کانی‌های تشکیل‌دهنده سنگ، پلاژیوکلاز است که به دو صورت شکل‌دار تا نیمه شکل‌دار همراه با ناحیه‌بندی و همچنین بی‌شکل با حاشیه تحلیل یافته و دگرسان شده به



شکل ۳- نقشه زمین‌شناسی مرتبط با موقعیت کارگاه‌های تولید شن و ماسه مورد مطالعه

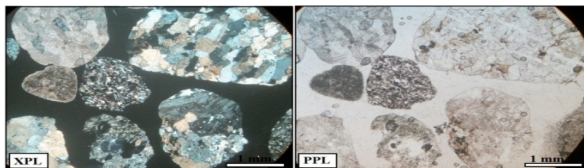
بافت میکروپورفیری هستند (شکل ۴). در این قطعات، کانی‌های درشت بلور شامل فلدسپات‌های پلاژیوکلاز، فلدسپات قلیایی، هورنبلند و بیوتیت می‌باشند. علاوه بر این آثاری از شیشه آتشفشانی در برخی قطعات سنگی یافت می‌شود. از قطعات سنگی که بالقوه واکنش‌زا محسوب می‌شوند، می‌توان به

سنگدانه‌های ریز معدن طریقت: در این سنگدانه خرده‌سنگ‌هایی با ماهیت رسوبی و دگرگونی یافت نشد و اکثریت قریب به اتفاق خرده‌سنگ‌ها، ماهیت آذرین داشته و به زیرگروه آتشفشانی تعلق دارند. همچنین ترکیب سنگ‌شناسی غالب قطعات سنگی در نمونه، در محدوده آندزیت تا تراکی آندزیت با



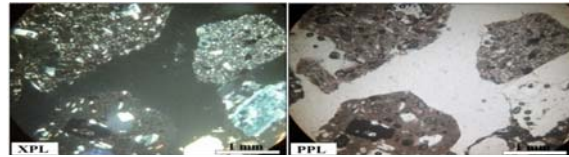
شکل ۵- تصویر میکروسکوپی تعدادی از ذرات بالقوه واکنش‌زا در سنگدانه‌های کارگاه فتح‌المبین
(تصویر XPL در حالت نیکل‌های عمود بر هم و تصویر PPL در حالت نیکل‌های موازی با هم گرفته شده است)

سنگدانه‌های ریز معدن سرام: شکل ۶ تصاویر میکروسکوپی ذرات باقی‌مانده بر روی الک ۱/۱۸ میلی‌متر از محصول ماسه این معدن را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود بخش عمده این سنگدانه از قطعات خرده سنگی تشکیل شده و تنها چند قطعه تک‌کانی از نوع کوارتز، فلدسپات و کلسیت یافت می‌شود. قطعات خرده‌سنگی، ماهیت آذرین و رسوبی دارند و قطعات دگرگونی حضور ندارند. سنگ‌های آذرین از زیرگروه نفوذی و آتشفشانی است. در این بین، قطعات با ترکیب دیوریتی تا کوارتزدیوریتی و گرانیتی در مجموعه سنگ‌های نفوذی مشاهده می‌شود. ترکیب غالب قطعات آتشفشانی مجموعه در حد آندزیت تا داسیت و در مواردی تراکیتی است. در خمیره سنگ‌های آتشفشانی، شیشه آتشفشانی ناچیز و قابل چشم‌پوشی است. کوارتز، فلدسپات‌های پلاژیوکلاز و قلیایی و کانی‌های مافیک از نوع بیوتیت، آمفیبول و پیروکسن، تشکیل‌دهنده‌های اصلی قطعات آذرین محسوب می‌شوند. قطعات با ماهیت رسوبی، عمدتاً از نوع سنگ آهک بوده و در برخی از این قطعات که مقدار ناچیزی محسوب می‌شوند، آثار دولومیتی شدن ضعیف دیده می‌شود. مشابه نمونه‌های پیشین، در این نمونه نیز، شواهد مشخصی از حضور تردیمیت و اوپال یافت نشد. با این حال به دلیل مواد آتشفشانی با ترکیب اسیدی در این سنگدانه‌ها احتمال دارد این دانه‌ها در تماس با قلیایی‌های سیمان واکنش‌زایی نشان دهند بنابر این توصیه می‌شود با آزمایش منشور ملات بررسی کامل‌تری انجام شود.



شکل ۶- تصویر میکروسکوپی برخی از ذرات تشکیل دهنده و بالقوه واکنش‌زا در محصولات کارگاه سرام
(تصویر XPL در حالت نیکل‌های عمود بر هم و تصویر PPL در حالت نیکل‌های موازی با هم گرفته شده است)

قطعات آتشفشانی با خمیره حاوی شیشه سالم تا دگرسان، اشاره نمود. در کل این سنگدانه‌ها ممکن است با قلیایی سیمان واکنش‌زایی با وجود آوردن و بررسی بیشتری در مورد واکنش‌زایی آنها پیشنهاد می‌شود.



شکل ۴- تصویر میکروسکوپی ذرات بالقوه واکنش‌زا در سنگدانه‌های کارگاه طریقت.

(بر طبق مطالعات میکروسکوپی این ذرات بین ۲۰ تا ۲۵ درصد کل قطعات را شامل می‌شوند. تصویر XPL در حالت نیکل‌های عمود بر هم و تصویر PPL در حالت نیکل‌های موازی با هم گرفته شده است)

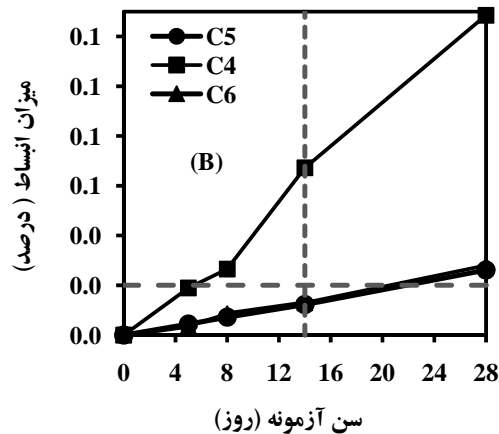
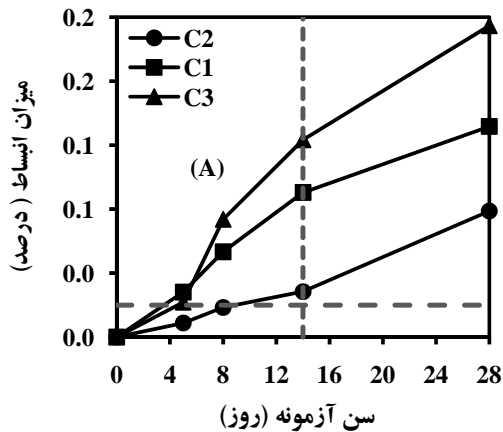
سنگدانه‌های ریز معدن فتح‌المبین: در نمونه‌های گرفته شده از این معدن بخش عمده خرده‌سنگ‌ها ماهیت آذرین دارند و اکثر آنها در زیرگروه آتشفشانی قرار می‌گیرند. کمتر از ۱۰ درصد از قطعات خرده‌سنگی ماهیت رسوبی دارند و شامل سنگ‌های کربناتی و تک‌کانی‌هایی از کلسیت هستند. سنگ‌های کربناتی از نوع آهکی هستند و در یک مورد ماهیت دولومیتی نشان می‌دهند. قطعات آتشفشانی دارای تنوع بافتی و کانی‌شناسی هستند. به طور کلی، این قطعات در مقایسه با نمونه طریقت، دگرسانی پیشرفته‌تری نشان دادند و بر خلاف آن، قطعات سالم و کم‌دگرسان شده، کمتر یافت می‌شود (شکل ۵). درشت بلورهای مهم در قطعات خرده‌سنگی انواع فلدسپات و کانی‌های مافیک دگرسان شده، هستند. خمیره‌ی این سنگ‌ها شامل ترکیبی از کانی‌های حاصل از دگرسانی مانند سریسیت، کلریت، کلسیت، کانی‌های رسی و بقایایی از کانی‌های فلدسپاتی و مافیک هستند. کمتر از ۱۰ درصد از قطعات آتشفشانی در نمونه دارای خمیره شیشه‌ای دگرسان با ترکیب سیلیسی در حد متوسط می‌باشند. مقدار شیشه آتشفشانی که می‌تواند بالقوه واکنش‌زا باشد، در این نمونه در مقایسه با نمونه طریقت، اندک است. در کل این سنگدانه‌ها به طور بالقوه واکنش‌زایی با قلیایی سیمان دارند و پیشنهاد می‌شود بررسی تکمیلی در مورد واکنش‌زایی قلیایی آنها انجام شود.

۷-۲- واکنش‌زایی قلیایی بالقوه سنگدانه به روش منشور

ملات

شکل ۷، واکنش‌زایی سنگدانه‌های مختلف در ترکیب با سیمان تیپ II و سیمان پوزولانی صوفیان مقایسه شده است. چنانچه مشاهده می‌گردد پس از مدت زمان ۱۴ روز برای طرح‌های ساخته شده با سیمان پرتلند تیپ II، مقدار درصد انبساط برای تمامی سه معدن بیشتر از ۰/۲ درصد گزارش شده و سنگدانه واکنش‌زا محسوب می‌گردند. استفاده از سیمان پرتلند پوزولانی به جای سیمان پرتلند تیپ II به عنوان راهکاری به منظور کنترل مقدار انبساط‌ها موجب گردید تا مقدار انبساط ۱۴ روزه برای طرح‌های C5 و C6 کاهش یافته و زیر محدوده مجاز و در ناحیه مشکوک (انبساط‌های بین ۰/۱ و ۰/۲ درصد) قرار گیرد. در حالی که طرح با کد C4 همواره دارای انبساطی بیشتر از حد مجاز است. بنابراین مطابق استاندارد ASTM C1260 سنگدانه ریز هر سه معدن مورد آزمایش در صورت استفاده از سیمان تیپ II صوفیان واکنش‌زا تشخیص داده شده و استفاده از آنها

در ساخت بتن مجاز نمی‌باشد. در صورت استفاده از سیمان پرتلند پوزولانی این امکان فراهم خواهد شد تا سنگدانه با کدهای C5 و C6 در منطقه مشکوک به واکنش‌زایی قرار گیرند. به منظور اطمینان از واکنش‌زایی تمامی طرح‌ها چنانچه خوانده انبساط آزمونه‌ها تا زمان ۲۸ روز ادامه داده شود مشاهده خواهد شد که مقدار درصد انبساط آزمونه‌ها برای تمامی طرح‌ها بعد از گذشت ۲۸ روز از ۰/۲ درصد (با شبیهی مشابه زمان‌های گذشته) فراتر رفته است بنابراین به دلیل واکنش‌زایی شدید سنگدانه‌های استفاده شده با قلیایی‌ها استفاده از آنها در ساخت بتن مجاز نمی‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌گردد سنگدانه‌های موجود در این مطالعه (به ویژه سنگدانه‌های معدن طریقت) بر خلاف مطالعات مشابه موجود در کشور [۳۴-۳۵] (سنگدانه‌های قرصه تونل گاوشان و سنگدانه‌های سد نیان و شمیل) از واکنش‌زایی بیشتری برخوردار می‌باشند. به طوری که استفاده از سیمان پوزولانی به عنوان یک راهکار مناسب جهت جلوگیری از انبساط مناسب نبوده است.



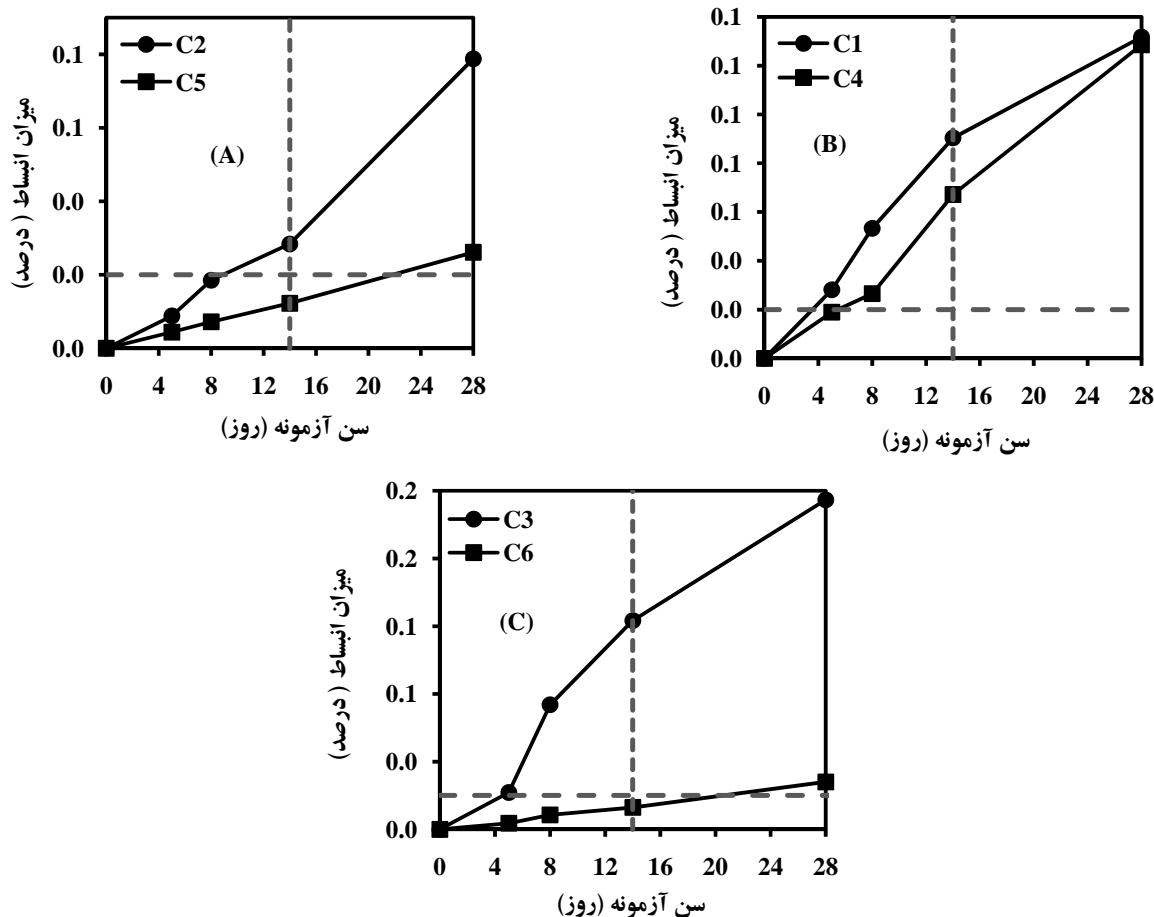
شکل ۷- مقایسه واکنش‌زایی سنگدانه‌های مختلف در برابر (A) سیمان تیپ II صوفیان (B) سیمان پرتلند پوزولانی صوفیان

طوری که مقدار این کاهش برای طرح C6 بیشتر از بقیه گزارش شده است. در این حالت استفاده از سیمان پوزولانی به جای سیمان تیپ II پس از ۱۴ روز برای طرح‌های C1، C2 و C3 به ترتیب موجب ۵۷، ۲۵ و ۹۰ درصد کاهش انبساط آزمونه‌ها شده است. منتها مطابق شکل بدلیل واکنش‌زایی شدید سنگدانه مقدار کاهش انبساط برای طرح C4 کافی نبوده است. با ادامه روند آزمایش تا مدت زمان ۲۸ روز تأثیر نوع سیمان بر انبساط ناشی از سنگدانه طرح C2 و C3 بیشتر از C1 گزارش شده است. در واقع در این حالت به نظر می‌رسد که با ادامه روند واکنش‌های قلیایی سیلیسی به جز سنگدانه‌های

به منظور بررسی تأثیر نوع سیمان بر واکنش قلیایی سیلیسی، همانطور که پیشتر توضیح داده شد از دو نوع سیمان پرتلند تیپ II با معادل قلیایی ۰/۴۷ و سیمان پرتلند پوزولانی استفاده گردید. همانطور که در ادبیات فنی گفته شد استفاده از سیمان‌های پوزولانی یکی از راهکارهای مناسب جهت کنترل انبساط ناشی از واکنش‌های قلیایی سیلیسی می‌باشد به همین منظور در مطالعه حاضر از سیمان پوزولانی بجای سیمان معمولی استفاده گردید. مطابق شکل ۸ مشاهده می‌گردد که برای کلیه طرح‌های مختلف با مصرف سیمان پوزولانی به جای سیمان تیپ II مقدار انبساط در آزمونه‌ها کاهش یافته است. به

شدت واکنش‌زایی سنگدانه‌ها تا حدی است که استفاده از سیمان پوزولانی راه حل کافی برای کنترل واکنش‌زایی به شمار نمی‌آید.

معدن طریقت، برای دو معدن دیگر فاصله میان نمودارها افزایش یافته است. با نگاهی به شیب نمودارها در طول مدت اندازه‌گیری مشخص می‌شود که شیب نمودارها با گذشت زمان تقریباً ثابت باقی مانده است و فرق چندانی نکرده است. بنابراین



شکل ۸- مقایسه واکنش‌زایی سنگدانه‌های مختلف به تفکیک مربوط به معدن (A) فتح المبین (B) طریقت و (C) سرام با استفاده از سیمان تیپ II صوفیان و سیمان پرتلند پوزولانی صوفیان

واکنش‌زایی قلیایی استفاده شود. همچنین از مقایسه نتایج آزمون‌ها چنین نتیجه‌گیری می‌شود که استفاده از سیمان پوزولانی به عنوان راهکاری در جهت کاهش مقدار انبساط آزمون‌ها موثر واقع شده است. با این وجود به دلیل واکنش‌زایی شدید سنگدانه‌های مورد استفاده مقدار انبساط آزمون‌ها همچنان بیش از مقدار مجاز قرار گرفت. مطابق نتایج به دست آمده سنگدانه‌های یکی از معادن (واریزه‌های سنگ‌های آتشفشانی سهند) چنان واکنش‌زایی زیادی دارد که استفاده از سیمان پوزولانی نیز قادر به کاهش انبساط آن در عمر ۲۸ روز نشد. در مجموع استفاده از سنگدانه‌های اطراف شهر تبریز برای

۸- نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج آزمایش‌های سنگ‌شناسی و منشور ملات تسریع شده مطابق ASTM C1260 می‌توان اظهار نظر کرد که بیشتر سنگدانه‌های منطقه تبریز برای ایجاد واکنش قلیایی استعداد زیادی دارند. زیرا محدودیت موجود برای انبساط آزمون‌ها در استاندارد (مقدار ۰/۲ درصد) برای هیچ یک از طرح‌ها برآورده نشد. بنابراین در صورت اجرای پروژه‌های بزرگ در این منطقه از کشور باید هنگام انتخاب مصالح سنگدانه‌ها از نظر قابلیت واکنش‌زایی به طور کامل بررسی شوند. در صورت لزوم باید به کمک نتایج آزمون‌های لازم از مواد افزودنی برای کنترل

[۱۳] ویسه، سهراب، ۱۳۷۷، سنگدانه‌های واکنش‌زا با قلیایی‌های خمیر سیمان، مجموعه مقالات کارگاه آموزشی آسیب‌دیدگی‌های سازه‌های بتنی، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن.

[۱۴] ویسه، سهراب، خدابنده، ناهید، ۱۳۸۰، بررسی موردی کیفیت سنگدانه‌های استان تهران برای ساخت بتن، اولین کنفرانس بین‌المللی بتن و توسعه، مرکز همایش‌های صدا و سیما.

[15] Böhm, M., Baetzner, S., 2008, The effect of the alkalinity of the pore solution on ASR, in: Broekmans, M.A.T.M., Wigum, B.J., (Eds.), 13th International Conference on Alkali-Aggregate Reactions in Concrete, Trondheim, Norway, pp. 501-510.

[16] Rivard, P., Bérubé, M. A., Ollivier, J. P., Ballivy, G., 2003, Alkali mass balance during the accelerated concrete prism test for alkali-aggregate reactivity, *Cem. Concr. Res.*, Vol. 33, pp. 1147-1153.

[17] Leemann, A., Lothenbach, B., 2008, The influence of potassium-sodium ratio in cement on concrete expansion due to alkali-aggregate reaction, *Cem. Concr. Res.*, Vol. 38, pp. 1162-1168.

[18] Leemann, A., Lothenbach, B., 2008, The Na₂O-equivalent of cement: a universal parameter to assess the potential alkali-aggregate reactivity of concrete? in: Broekmans, M.A.T.M., Wigum, B.J., (Eds.), 13th International Conference on Alkali-Aggregate Reactions in Concrete, Trondheim, Norway, pp. 909-919.

[19] Diamond, S., Barneyback, R.S., Struble, L.J., 1981, On the physics and chemistry of alkali-silica reactions, 5th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, Cape Town, pp. 252-222.

[20] Kollek, J.J., Varma, S.P., Zaris, C., 1986, Measurement of OH⁻ concentrations of pore fluids and expansion due to alkali-silica reaction in composite cement mortars, 8th International Congress on the Chemistry of Cement, Rio de Janeiro, pp. 183-189.

[21] Thomas, M.D.A., 1996, Review of the effect of fly ash and slag on alkali-aggregate reaction in

[22] Kagimoto, H., Inoshita, I., Kawamura, M., 2004, Threshold OH⁻ concentration in pore solution of mortar using alkali reactive aggregates, in: M. Tang, M. Deng (Eds.), 12th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Beijing, China, pp. 728-735.

[23] Shehata, M.H., Thomas, M.D.A., 2006, Alkali release characteristics of blended cements, *Cem. Concr. Res.*, Vol. 36, pp. 1166-1175.

[24] Leemann, A., Lothenbach, B., 2008, The influence of potassium-sodium ratio in cement on concrete expansion due to alkali-aggregate reaction, *Cem. Concr. Res.*, Vol. 38, pp. 1162-1168.

[25] Leemann, A., Lothenbach, B., 2008, The Na₂O-equivalent of cement: a universal parameter to assess

استفاده در بتن‌هایی که در معرض رطوبت قرار می‌گیرند، مجاز نیست.

۹- منابع

[1] Diamond, S., et al. 1981, On the physics and chemistry of alkali-silica reactions, 5th Conf. Alkali Aggregate Reaction in Concrete, pp. 1-11.

[2] Buck, A. D., Houston, B. J., Pepper, L., 1953, Effectiveness of mineral admixtures in preventing excessive expansion of concrete due to alkali-aggregate reaction, *Journal of the American Concrete Institute*, Vol. 30, pp. 11-60.

[3] Ramlochana, T., Thomasa, M., Gruberb, K. A., 2003, The effect of metakaolin on alkali-silica reaction in concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, pp. 339-344.

[4] Kashi, M. G., 2005, Mitigation of Alkali-Silica Reactivity (ASR) for Saymareh Dam Project, Soil, Rock & Structures Consulting Engineers.

[5] Stanton, T.E., 1940, Expansion of concrete through reaction between cement and aggregate, *Proc. Am. Soc. Civ. Eng.* Vol. 66, pp. 1781-1811.

[6] Lindgård, J., Andiç-Çakır, O., Fernandes, I., Rønning, T. F., Thomas, M. D. A., 2012, Alkali-silica reactions (ASR), Literature review on parameters influencing laboratory performance testing, *Cement and Concrete Research*, Vol. 42, pp. 223-243.

[7] St John, D.A., Poole, A.B., Sims, I., 1998, *Concrete Petrography—A Handbook of Investigative Techniques*, Arnold, U.K, p. 474.

[8] Dove, P.M., Rimstidt, J.D., 1994, Silica-water interactions, in: P.J. Heaney, C.T. Prewitt, G.V. Gibbs (Eds.), *Silica: physical behaviour, geochemistry and materials applications Reviews in Mineralogy*, Mineralogical Society of America, pp. 259-308.

[9] Alkali-reactivity and prevention—assessment, specification and diagnosis of alkali-reactivity, 2003, RILEM recommended test method AAR-1, detection of potential alkali-reactivity of aggregates—petrographic method, *Mater. Struct.* Vol. 36, pp. 480-496.

[10] Broekmans, M.A.T.M., 2002, The alkali-silica reaction, mineralogical and geochemical aspects of some Dutch concretes and Norwegian mylonites, PhD. Thesis, in: University of Utrecht, pp. 144.

[11] Larive, C., Laplaud, A., Coussy, O., 2002, The role of water in alkali-silica reaction, in: Bérubé, M.-A., Fournier, B., Durand, B., (Eds.), 11th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, Québec, Canada, pp. 61-69.

[۱۲] ویسه، سهراب، خدابنده، ناهید، ۱۳۸۲، شناسایی و تعیین کیفیت مواد و مصالح محلی قشم، ماهنامه قشم، سال نهم.

[۳۴] بلوری، آرش، حاجی آقابابایی، محمد، ۱۳۸۸، بررسی تاثیر میکروسلیس بر کاهش واکنش‌زایی قلیایی سیلیسی سنگدانه‌های بتن سدهای شمیل و نیان، اولین کنفرانس بین‌المللی تکنولوژی بتن، تبریز.

[۳۵] صدقی، پژمان، ۱۳۸۸، واکنش قلیایی سنگدانه‌ها در بتن با نگرشی به تونل گاوشان، اولین کنفرانس ملی بتن، تهران.

[36] Mehta, P.K., 1985, Studies on chemical resistance of low water/cement ratio concretes, *Cem. Concr. Res.*, Vol. 15, pp. 969–978.

[37] Rixom, R., Mailvaganam, N., 1999, *Chemical Admixtures for Concrete*, Taylor & Francis, p. 437.

[38] Jensen, A.D., Chatterji, S., Christensen, P., Thaulow, N., 1984, Studies of alkali-silica reaction—part II effect of air-entrainment on expansion, *Cem. Concr. Res.*, Vol. 14, pp. 311–314.

[39] Hagelia, P., 2004, Origin of map cracking in view of the distribution of air voids, strength and ASR-gel, in: Tang, M., Deng M., (Eds.), 12th International Conference on Alkali-Aggregate reaction in Concrete, International Academic Publishers—World Publishing Corporation, Beijing, China, pp. 870–881.

[40] Feng, X., Thomas, M.D.A., Bremner, T.W., Balcom, B.J., Folliard, K.J., 2005, Studies on lithium salts to mitigate ASR-induced expansion in new concrete: a critical review, *Cem. Concr. Res.*, Vol. 35, pp. 1789–1796.

[41] Kim, T., Olek, J., 2016, The effects of lithium ions on chemical sequence of alkali-silica reaction, *Cement and Concrete Research*, Vol. 79, pp. 159–168.

[42] Thomas, M.D.A., Fournier, B., Folliard, K., Ideker, J., Shehata, M., 2006, Test methods for evaluating preventive measures for controlling expansion due to alkali-silica reaction in concrete, *Cem. Concr. Res.*, Vol. 36, pp. 1842–1856.

the potential alkali-aggregate reactivity of concrete? in: Broekmans, M.A.T.M., Wigum, B.J., (Eds.), 13th International Conference on Alkali-Aggregate Reactions in Concrete, Trondheim, Norway, pp. 909–919.

[26] Hou, X., Struble, L.J., Kirkpatrick, R.J., 2004, Formation of ASR gel and the roles of C-S-H and portlandite, *Cem. Concr. Res.*, Vol. 34, pp. 1683–1696.

[27] Afshinnia, K., Poursaee, A., 2015, The influence of waste crumb rubber in reducing the alkali-silica reaction in mortar bars, *Journal of Building Engineering*, Vol. 4, pp. 231-236.

[28] Zheng, K., 2016, Pozzolanic reaction of glass powder and its role in controlling alkali-silica reaction, *Cement and Concrete Composite*, Vol. 67, pp. 30–38.

[29] Thomas, M.D.A., 2011, The effect of supplementary cementing materials on alkali-silica reaction: a review, *Cem. Concr. Res.*, Vol. 41, pp. 1224–1231.

[30] Taylor, H.F.W., 1990, *Cement Chemistry*, Academic Press, London, p. 491.

[31] Thomas, M.D.A., Bleszynski, R.F., 2001, The use of silica fume to control expansion due to alkali-aggregate reactivity in concrete—a review, in: Mindess, S., Skalny, J., (Eds.), *Materials Science of Concrete VI*, American Ceramics Society, Westerville, OH, pp. 377–434.

[32] Ahmadi, B., Shekarchi, M., 2010, Use of natural zeolite as pozzolanic material in cement and concrete composites, *Cement and concrete composite*, Vol. 32, pp. 134-141.

[33] Najimi, M., Sobhani, J., Ahmadi, B., Shekarchi, M., 2012, An experimental study on durability properties of concrete containing zeolite as a highly reactive natural pozzolan, *Construction and Building Materials*, Vol. 35, pp. 1023-1033.