

ارزیابی پتانسیل واکنش زایی سنگدانه‌های مختلف بر پایه مطالعات پتروگرافی و مقایسه آن با آزمون‌های شیمیایی

پژمان کاظمی^۱، محمدرضا نیکودل^{۲*}، ماشاءالله خامه‌چیان^۳، سایمون مارتین کلارک^۴، شیما طاهری^۵، پریتوش گیری^۶،
بهزاد سعیدی رضوی^۷

پذیرش مقاله: ۹۸/۱۱/۱۲

دریافت مقاله: ۹۸/۰۶/۱۸

چکیده:

دوام بتن متأثر از عوامل مختلفی مانند اجزا تشکیل دهنده آن، عمل آوری، محیط قرارگیری و مدت سرویس دهی می‌باشد. واکنش زایی قلیایی-سیلیسی ایجاد شده درون بتن و فشار انبساطی و ترک‌دار شدن ناشی از واکنش مخرب تشکیل ژل سیلیسی-قلیایی می‌تواند به کوتاه‌تر شدن عمر بتن منجر شود. واکنش زایی قلیایی-سیلیسی یک واکنش تدریجی می‌باشد که می‌تواند بین محلول مغذی قلیایی بتن و انواع مختلفی از سنگدانه‌ها روی دهد. شناخت رفتار سنگدانه به‌عنوان اصلی‌ترین تشکیل دهنده بتن در شناخت مکانیسم واکنش زایی قلیایی-سیلیسی، کاهش پتانسیل واکنش زایی و حتی جلوگیری از آن ضروری می‌باشد. همه سنگدانه‌ها در برابر واکنش زایی سیلیسی-قلیایی آسیب‌پذیر نمی‌باشند بنابراین شناسایی سنگدانه‌های آسیب‌پذیر و انتخاب سنگدانه‌های با واکنش زایی کمتر در ساخت بتن می‌تواند در نهایت منجر به کم شدن و جلوگیری از مشکل واکنش زایی قلیایی-سیلیسی شود. هدف این تحقیق ارزیابی آسیب‌پذیری چهار سنگدانه مورد استفاده در بتن شامل: گرانیت (نماینده سنگ‌های آذرین درونی)، ریوداسیت (نشان‌دهنده سنگ‌های آذرین بیرونی) همچنین آهک و دولومیت (سنگ‌های رسوبی) می‌باشد. این مطالعه تحت شرایط تسریع شده بر اساس استاندارد ASTM C1260 و شرایط دمای اتاق انجام شد. آنالیز نمونه‌ها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی همراه با پراش کننده انرژی (SEM/EDX)، میکروسکوپ نوری، آنالیزهای XRD و XRF انجام شد. نتایج این تحقیق نشان داد که سنگدانه‌های ریوداسیتی و آهکی دارای پتانسیل واکنش زایی می‌باشند در حالی که سنگدانه‌های دولومیتی و گرانیتی مورد مطالعه فاقد واکنش زایی بوده‌اند.

کلمات کلیدی: واکنش قلیایی-سیلیسی، سنگدانه، بتن، آزمون‌های تسریع شده، پتروگرافی

^۱ دانشجویان زمین شناسی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

^۲ عضو هیات علمی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران nikudelm@modares.ac.ir

^۳ عضو هیات علمی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

^۴ عضو هیات علمی، دانشگاه مکواری، سیدنی

^۵ دانشجویان پسا دکتري، دانشگاه مکواری، سیدنی

^۶ دانشجویان پسا دکتري، دانشگاه مکواری، سیدنی

^۷ عضو هیئت علمی پژوهشگاه استاندارد، کرج

* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

یکی از عوامل کاهنده دوام بتن و کاهش مقاومت آن، انبساط و ترک‌های ایجادشده در بتن می‌باشد. مطالعه ترک‌های خود به خودی و درازمدت ساختارهای بتنی در امریکا از سال ۱۹۳۰ بررسی شده و نهایتاً مشخص گردیده است که علت این ترک‌ها، واکنش انبساطی بین سیمان و سنگ‌دانه می‌باشد (Stanton, 1940). واکنش زایی قلیایی سنگ‌دانه‌ها (Alkali Aggregate Reaction) به دو شکل واکنش زایی قلیایی-سیلیسی (Alkali Silica Reaction) و واکنش زایی قلیایی-کربناتی (Alkali Carbonate Reaction) دیده می‌شود. واکنش زایی سیلیسی-قلیایی (ASR) در بتن‌هایی دیده می‌شود که سنگ‌دانه‌های دارای اشکال فعال SiO_2 در شرایط مرطوب با قلیایی‌های سیمان (سدیم و پتاسیم) واکنش دهند و در نتیجه یک ژل سیلیسی-قلیایی را به وجود بیاورند. این ژل می‌تواند با جذب آب، افزایش حجم پیدا کرده و یک فشار داخلی بر بتن وارد کند که منجر به استرس و درنهایت ترک‌دار شدن بتن شود (Chatterji et al., 1989). ASR یک مشکل عمده برای دوام بتن می‌باشد و تخریب پیوسته ساختارهای مهم شامل سدها و ساختارهای هیدرولیکی، پیاده‌روها، پل‌ها، دیوارها، حائل‌ها و ساختارهای نیروگاه هسته‌ای را در پی دارد (Hobbs, 1988). سه عامل اصلی در وقوع واکنش زایی سیلیسی-قلیایی عبارتند از: (۱) مقدار کافی از قلیایی‌ها، (۲) حضور اشکال فعال کوارتز در سنگ‌دانه‌ها و (۳) رطوبت کافی. معمولاً سنگ‌دانه‌های واکنش‌زا به وسیله حضور دانه‌های بسیار ریز کوارتز و همچنین اشکال نامنظم آن (اوپال، کلسدونی) مشخص می‌شوند. سنگ‌دانه‌های با واکنش زایی آهسته، معمولاً انواع سنگ‌ها دارای کوارتز کریستالی شده (میلونیت، گرانیت، گنیس، کوارتزیت، گری وک، فیلیت و آرژیلیت) می‌باشند (Lindgård et al., 2010). بیشتر کارهای اولیه انجام شده درباره ACR، بر روی سنگ‌های آهک دولومیتی آرژیلیتی از منابع نزدیک کینگ استون، آنتاریو کانادا، می‌باشد. این

سنگ دارای ریزبافت‌های مشخص از بلورهای دولومیتی رومبیک نسبتاً درشت در زمینه‌ای از کلسیت میرمیکیتی و برخی از کانی‌های رسی است و برای مدتی فرض می‌شد که این مشخصه بافتی و ترکیبی مواد حساس به ACR می‌باشد. با این وجود، همه ترکیبات واکنش زایی کربناتی و بافت‌های آن‌ها، لزوماً انبساط پذیر نیستند. تحقیقات زیادی درباره مکانیسم ACR صورت گرفته است و اکثر فرضیه‌ها نقش دولومیتی شدن را برجسته نشان دادند؛ برخی نیز نتیجه گرفتند که دولومیتی شدن به تنهایی برای توضیح انبساط کافی می‌باشد (Min and Mingshu, 1993). برخی دیگر درباره این گونه نادر از AAR محتاط‌تر بودند و بیان کردند که تحقیقات پتروگرافی دقیق در برخی اوقات منجر به شناسایی شواهدی از ASR درون مواد کربناتی شده است (Katayama, 1992). انواع معینی از سنگ‌آهک‌های دولومیتی آرژیلیتی به عنوان انبساطی-قلیایی شناخته شده‌اند. سنگ‌های کربناته اساساً سنگ‌دانه بسیار عالی برای بتن را می‌سازند. واکنش بین سنگ‌دانه‌های درشت آهک دولومیتی و قلیایی‌های سیمان که باعث انبساط و ترک‌خوردگی بتن در حضور رطوبت می‌شود، نخستین بار در اوایل دهه ۱۹۶۰ توصیف شد (Hadley, 1961; Swenson and Gillott, 1960). انبساط ACR می‌تواند در ارتباط با ترکیبی از دو واکنش زیر باشد: از یک طرف فرایند دولومیتی شدن و از طرف دیگر اجزای سیلیسی محتوی رسی نیز می‌تواند در انبساط ایجادشده توسط تبلور بروسیت بین لایه‌ای تولیدشده در طول فرایند دولومیتی شدن، نقش داشته باشد (Katayama, 2004). انبساط بتن می‌تواند تأثیرات مخربی بر روی ساختمان‌ها و سازه‌ها در طی دوره سرویس‌دهی آن‌ها داشته باشد. پیش‌بینی و شناسایی سنگ‌دانه‌های مخرب می‌تواند به صنعت ساختمان‌سازی کمک کند تا خسارات ناشی از این پدیده را به حداقل برسانند (Lindgård et al., 2010). روش‌های مختلفی برای شناسایی سنگ‌دانه‌های واکنش‌زا وجود دارد، شامل آزمون‌های شیمیایی و مطالعات پتروگرافی. روش پتروگرافی به عنوان اولین مرحله در ارزیابی پتانسیل

از مواد سیمانی جایگزین (SCMs)، فوم سیلیس، خاکستر آتش‌فشانی، سرباره کوره ذوب‌آهن، متاکائولن و استفاده از نمک‌های لیتیومی می‌باشد (Malvar et al., 2002, Jen et al., 2019). هدف این تحقیق ارزیابی پتانسیل واکنش‌زایی چهار نوع سنگدانه مورد استفاده در پروژه‌های ساختمانی شامل گرانیت، ریوداسیت به عنوان نماینده سنگ‌های آذرین درونی و بیرونی و همچنین آهک و دولومیت به عنوان نماینده سنگ‌های رسوبی می‌باشد. در این تحقیق از آزمون تیرمالات بر اساس استاندارد ASTM C 1260 تحت شرایط تسریع شده و تسریع نشده (دمای اتاق)، آنالیزهای میکروسکوپ الکترونی و مطالعات پتروگرافی با استفاده از میکروسکوپ نوری و آنالیزهای XRD و XRF استفاده شده است.

۲. مواد و روش‌ها

در این تحقیق ۴ نوع سنگ‌دانه مختلف شامل سنگ گرانیتی، سنگ ریوداسیتی و دو نوع سنگ رسوبی شامل دولومیت و آهک به منظور ارزیابی پتانسیل واکنش‌زایی قلیایی آن‌ها توسط مطالعات پتروگرافی و تست‌های انبساطی انتخاب گردیدند. در ابتدا با استفاده از مطالعات پتروگرافی و آنالیزهای XRD و XRF ترکیب کانی‌شناسی و بافتی نمونه‌های سنگ‌دانه مشخص گردید، سپس نمونه‌های سنگی توسط سنگ شکن فکی خرد و توسط الک‌های با اندازه مختلف دانه بندی شد. مقادیر باقی مانده روی هرالک در ظروف جداگانه‌های قرار داده شد تا بر اساس استاندارد‌های مورد استفاده در ساخت نمونه‌ها از آن‌ها استفاده شود. سنگهای گرانیتی مورد مطالعه از نوع گرانیت نه‌بندان بوده، نمونه‌های ریوداسیتی نیز از معدن قلعه خرگوشی در استان یزد گردآوری شدند. سنگهای دولومیتی مورد استفاده از برون‌زدگی دولومیت‌های سازند الیکا واقع در روستای سربندان شهرستان دماوند و نمونه‌های آهکی از ایالت نیوساوت ولز، شهر سیدنی در کشور استرالیا گردآوری شدند. آنالیزهای پتروگرافی با میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی (SEM) و میکروسکوپ الکترونی همراه با پراش‌کننده اشعه ایکس (SEM/EDS) صورت

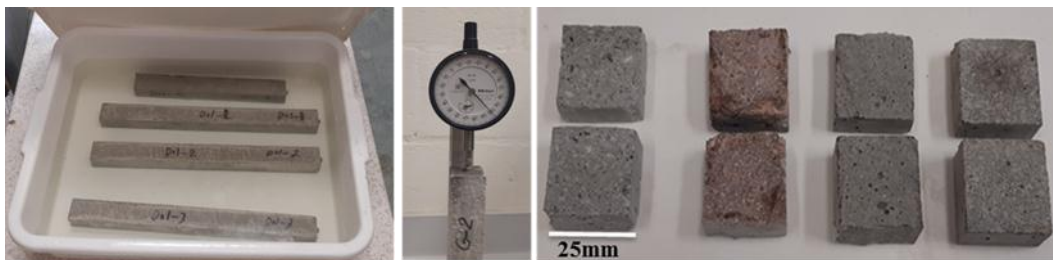
واکنش‌زایی قلیایی سنگدانه‌های بتن مورد استفاده قرار می‌گیرد و به دنبال آن آزمون‌های آزمایشگاهی تسریع شده برای تأیید نتایج گرفته‌شده باید انجام شوند (Ramos et al., 2016). برای تسریع انبساط تیرهای ملاتی یا بتنی آن‌ها را در معرض شرایط قلیایی و دمایی شدید قرار داده و میزان انبساط را با گذشت زمان اندازه می‌گیرند. آزمایش‌های تیر ملات تسریع شده (Accelerated Mortar Bar Test) و منشور بتنی تسریع شده (Accelerated Concrete Prism Test) از مؤثرترین روش‌های شناسایی پتانسیل واکنش‌زایی سنگ‌دانه‌ها می‌باشند و نتایج بسیار خوبی را نشان داده‌اند. از آزمون‌های پتروگرافی نیز می‌توان نتایج مؤثر و قابل‌اعتمادی را بسیار سریع‌تر از سایر روش‌ها به دست آورد (Lindgård et al., 2010, Murlidhar et al., 2016a). روش‌های آنالیزی مانند میکروسکوپ الکترونی با پراش‌کننده انرژی (SEM/EDX) یا تفریق اشعه ایکس (XRD) همراه با آزمون‌های پتروگرافی استاندارد به‌طور گسترده در شناسایی فرایندهای مخرب مواد ساختمانی مورد استفاده قرار می‌گیرند (Alonso and Turkington et al., 2003, López-Arce Martinez, 2003, and García-Guinea, 2005). از دهه ۱۹۸۰ استفاده از روش‌های پتروگرافی برای مطالعه نمونه‌های بتنی آغاز شده است (St John et al., 1998, French, 1991). روش‌های پتروگرافی با توسعه شناسایی اجزای واکنش‌زایی بتن، به شناسایی فرایندهای مخرب بتن کمک زیادی کرده‌اند (Rivard et al., 2002, Peterson et al., Kurtis et al., 1998, 2006). شناسایی اشکال فعال سیلیس کار بسیار پیچیده‌ای می‌باشد زیرا نمی‌توان با استفاده از میکروسکوپ نوری آن را به‌سادگی از سایر اشکال سیلیس مجزا کرد (St John et al., 1998). به این دلیل، تست‌های انبساطی به همراه روش‌های پتروگرافی برای ارزیابی واکنش‌زایی سنگ‌دانه‌ها توصیه شده‌اند (Shayan and Morris, Wigum et al., 1997, 2001). راه‌های گوناگونی برای کنترل ASR پیشنهاد شده (علاوه بر استفاده از سنگ‌دانه‌های غیر واکنش‌زا): استفاده از سیمان با قلیایی کم، محدود کردن محتوای قلیایی بتن، استفاده

گرفت. میکروسکوپ الکترونی مورد استفاده از نوع Zeiss EVO MA15 with a Tungsten (W) filament می باشد. آنالیزهای عنصری نیز توسط سیستم میکرو آنالیز اشعه ایکس انجام شد. آنالیزهای کمی و کیفی در یک ولتاژ تسریع شده 15 Kev و آنالیز داده ها نیز با استفاده از نرم افزار Aztec انجام شد. قبل از تصویربرداری با میکروسکوپ الکترونی، ابتدا نمونه ها تا حدی پولیش داده شده و توسط دستگاه BOC Edwards AUTO 306 Vacuum Coater یک غشای هادی کربنی (ده ثانیه در فشار 5×10^{-5} mbar) بر روی نمونه ها قرار گرفت.

۱-۲. ساخت نمونه ها

برای مطالعه و مقایسه واکنش زایی نمونه ها در شرایط تسریع نشده (دمای اتاق) با شرایط تسریع شده (دما ۸۰ درجه سانتی گراد، محلول ۱ مولار) ابتدا از هر چهار سنگ دانه بر اساس طرح اختلاط استاندارد ASTM C 1260 نمونه های ملاتی تهیه گردید (ASTM, 2007). بعد از ۲۴ ساعت این نمونه ها در آب با دمای اتاق قرار داده شدند و در فواصل زمانی ۱، ۵، ۹، ۱۴ و ۲۸ روز از زمان ساخت، نمونه های پودری از آنها تهیه و برای مطالعات XRF، XRD و SEM/EDX مورد استفاده قرار گرفت. همچنین برای تشخیص فازهای مینرالی موجود در ملات ساخته شده، از سیلیسیم با درجه خلوص ۹۸ درصد به عنوان شناساگر درونی و همچنین از الگوی طیفی کوارتز، پرتلندیت و سنگ دانه استفاده شده تا تحلیل پیک های به دست آمده از آنالیزها آسان تر صورت گیرد.

(Snellings, 2016). برای بررسی واکنش زایی نمونه ها در شرایط تسریع شده از آزمون تیر ملات تسریع شده (AMBT) بر اساس استاندارد ASTM C 1260 استفاده گردید. بر اساس این استاندارد تیرهای ملات با استفاده از سنگ دانه های با اندازه ۰/۱۲۵ تا ۵ میلی متر، سیمان تیپ ۱ و آب تقطیر شده ساخته شدند. نسبت کلی سنگ دانه، سیمان و آب به ترتیب برابر با ۲/۲۵، ۱ و ۰/۴۷ بوده است. از هر کدام از سنگ دانه ها چهار عدد تیر ملات (سه عدد برای اندازه گیری تغییرات طول و یک عدد برای برش و تهیه نمونه برای مطالعات میکروسکوپی و آنالیزهای XRD و XRF) آماده گردید (شکل ۱). بعد از ۲۴ ساعت ساعت قالب گیری، نمونه از قالب بیرون آورده شده و به مدت ۲۴ ساعت در آب با دمای ۸۰ درجه سانتی گراد نگهداری شده اند، سپس نمونه ها در ظرف محتوی محلول ۱ مولار سدیم هیدروکسید مستغرق شده و ظرف مورد نظر عایق بندی شده تا از بخار شدن محلول جلوگیری شود، ظروف محتوی نمونه ها بلافاصله به آون با دمای ثابت ۸۰ درجه سانتی گراد منتقل گردیدند. تغییرات طول نمونه به مدت ۱۴ روز و در بازه های زمانی ۱، ۵، ۹ و ۱۴ روزه اندازه گیری شد. برای مطالعات میکروسکوپی و همچنین آنالیزهای XRD، همزمان با اندازه گیری تغییرات طول نمونه ها یکی از چهار تیر ملات برش داده شد و جهت آماده سازی مقاطع نازک و همچنین تهیه نمونه برای آنالیزهای XRD و XRF به کارگاه مخصوص انتقال می یابد.



شکل ۱. آزمون تیر ملات تسریع شده (ASTM, 2007)

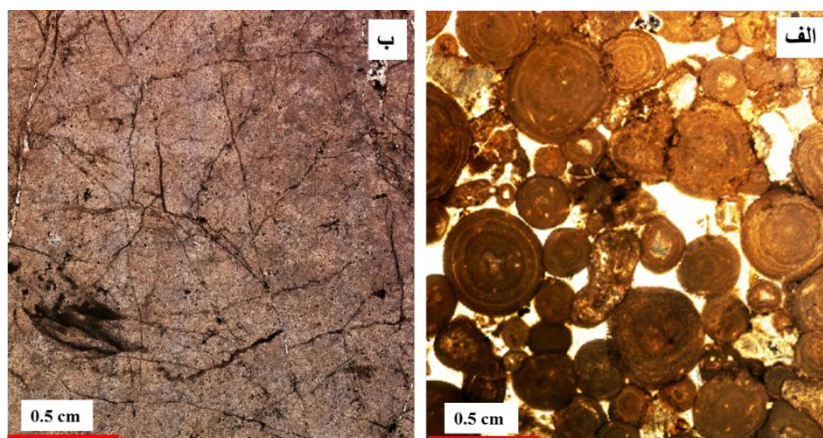
۳. نتایج و بحث

۳-۳. بررسی مقاطع میکروسکوپی سنگ‌دانه‌های مورد مطالعه

به همراه نتایج آزمون XRF

در شکل‌های (۲ و ۳) تصاویر مقاطع میکروسکوپی و در جدول (۱) درصد اکسیدهای هر چهار نوع سنگ‌دانه در آنالیز XRF نشان داده شده است. شکل (۲ الف) مربوط به تصویر مقطع میکروسکوپی سنگ‌دانه آهکی می‌باشد که در نور پلاریزان گرفته شده است. این سنگ‌دانه دارای بافت گرینستون بوده که متشکل از الئید، اونکوئید و اگرگات می‌باشد. فضای

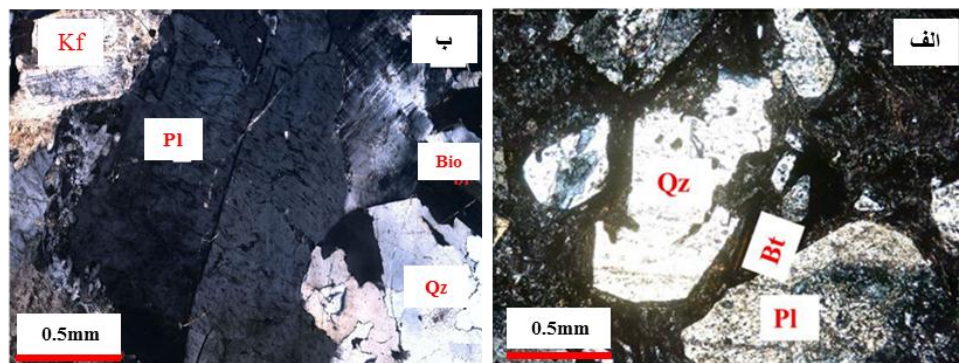
بین الئیدها توسط اینتراکلیست با سیمان کلسیتی پر شده است. شکل (۲ ب) سنگ‌دانه‌ی دولومیتی را نشان می‌دهد که دارای بافت اولیه الئید پکستون بوده که این بافت در اثر فرایندهای دیاژنزی از جمله شکستگی، انحلال -جانشینی (دولومیتی شدن) و پرشدگی شکستگی‌ها (با سیمان و بلورهای کلسیتی) از بین رفته و فقط هاله‌ای از الئیدها دیده می‌شود. در مقطع بلورهای ریز دولومیتی (بی‌شکل و نیمه شکل دار) همراه با میکرایت و در بخش‌هایی اسپارایت دیده می‌شود.



شکل ۲. تصویر مقطع میکروسکوپی سنگ‌دانه‌های رسوبی: مقطع میکروسکوپی نمونه آهکی در نور پلاریزان (الف)، مقطع میکروسکوپی نمونه دولومیتی در نور پلاریزان (ب).

در شکل (۳) تصاویر مقاطع میکروسکوپی مربوط به سنگ‌دانه آذرین بیرونی و آذرین درونی آورده شده است. همان‌طور که در شکل (۳ الف) مشاهده می‌شود که سنگ‌دانه ریوداسیتی دارای بافت پورفیری و ماتریکس شیشه‌ای تا میکروکریستالین می‌باشد. این نمونه دارای تجمع کانی‌های فنوکریست شامل فلدسپات پلاژیوکلاز (Pl) (۵۵٪ حجمی، ۱-۵ میلی‌متر)، کوارتز (Qz) (۲۵٪ حجمی، ۲-۴ میلی‌متر) و بیوتیت (Bt) (۱۵٪ حجمی، ۱-۲ میلی‌متر). سانیدین نیز کمتر از ۵٪

حجم نمونه را در برمی‌گیرد. همچنین آمفیبول (Am) نیز به‌طور معمول دارای حاشیه واکنشی اوپک می‌باشد که در برخی موارد در تمام فنوکریست گسترده شده‌اند. در شکل (۳ ب) تصاویر مربوط به سنگ‌دانه آذرین درونی آورده شده است. این نمونه دارای بافت درشت‌دانه می‌باشد که اجزای تشکیل‌دهنده آن شامل پلاژیوکلازها (۵۰) کوارتز (۳۵٪) بیوتیت (۱۰٪) و آمفیبول (۵٪) می‌باشد.



شکل ۳. مقطع میکروسکوپی نمونه سنگدانه آذرین بیرونی (الف)، نمونه سنگدانه آذرین درونی (ب)

انیدها باشد. با توجه به بررسی‌های پتروگرافی و آنالیزهای XRD و XRF اسامی زمین‌شناسی مربوط به هرکدام از سنگدانه‌ها تعیین گردید (جدول ۲).

در جدول (۱) نتایج آزمون XRF برای سنگدانه‌ها آورده شده است. وجود ۴/۸۴ درصد SiO_2 در سنگدانه‌های آهکی نسبت به سنگدانه‌های دولومیتی از موارد حائز اهمیت در این جدول می‌باشد که می‌تواند به علت وجود هسته‌های سیلیسی در

جدول ۱. نتایج آزمون XRF برای چهار سنگدانه‌های مورد مطالعه

Materials	Oxides (%)									
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	P_2O_5	TiO_2	Na_2O	K_2O	MnO
Granite	73.96	13.82	2.65	1.72	0.43	0.09	0.22	2.85	5.30	0.05
Rhyodacite	70.25	14.74	2.76	1.98	0.67	0.13	0.29	3.95	4.25	0.06
Limestone	4.84	1.25	0.80	51.35	0.64	0.10	0.06	0.22	0.10	0.18
Dolomite	0.15	0.03	0.59	31.19	20.80	0.04	—	0.03	0.01	0.03

جدول ۲. اسامی زمین‌شناسی سنگدانه‌ها

Aggregate Name	Dolomite	Limestone	Rhyodacite	Granite
Composition	Micrite Sparite dolomite	Calcite Ooid, Oncoid intraclast	Plagioclase-Quartz Sanidine-Biotite Amphibole	Feldspar- Quartz- Biotite- Amphibole

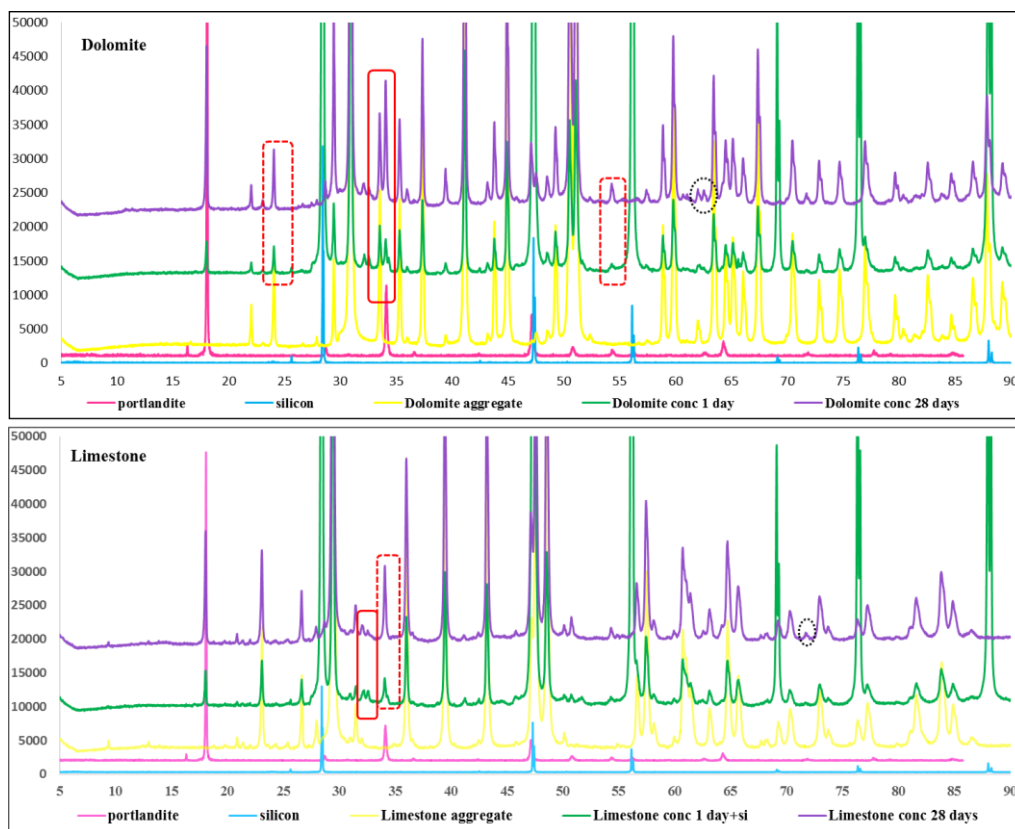
درجه تبلور کانی‌ها مختلف با افزایش سن بتن می‌باشد. چند نمونه از این افزایش شدت پیک‌ها با خطوط نقطه‌چین قرمز رنگ در شکل مشخص شده است. وجود پیک‌های جدید می‌تواند به علت واکنش مواد موجود و تولید محصولات جدید واکنشی در نمونه‌ها باگذشت زمان باشد که در شکل با دوائر سیاه رنگ مشخص شده است، به عنوان نمونه در الگوی مربوط به دوره ۲۸ روزه نمونه‌های دولومیتی در زاویه حدود

۲-۳. نتایج آزمایش‌های تسریع نشده

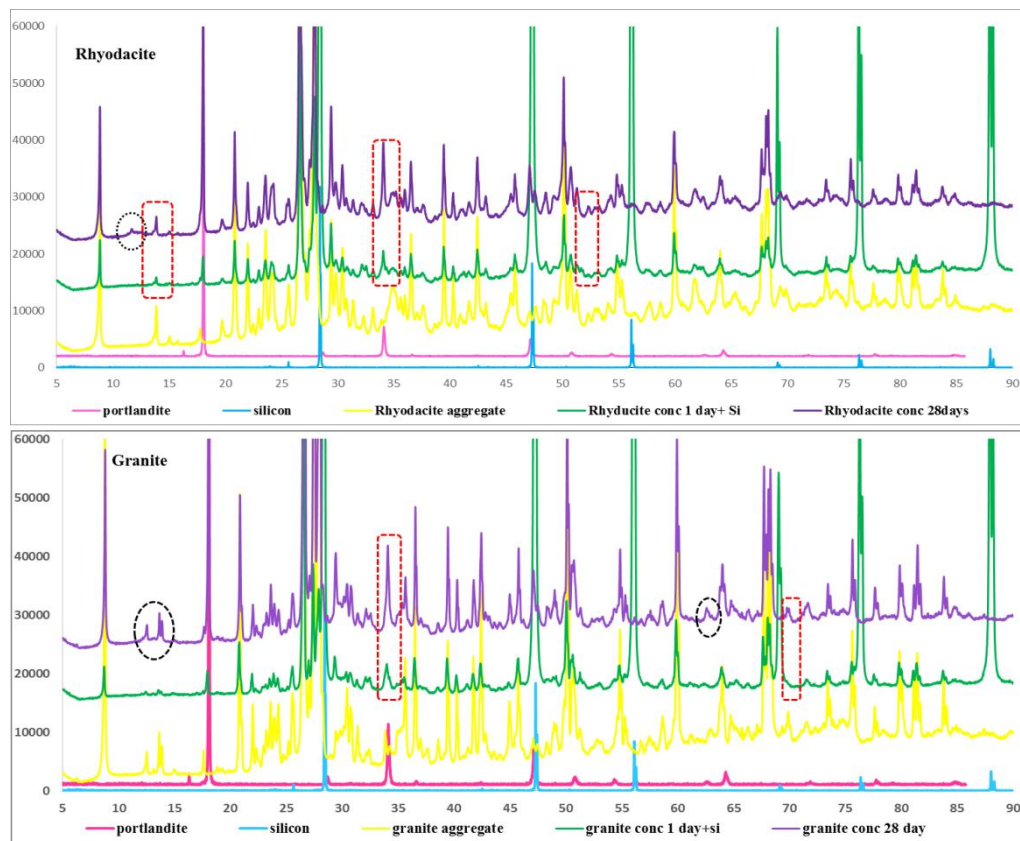
در شکل‌های (۴) و (۵) نتایج آزمون XRD برای چهار نوع سنگدانه و ملات ساخته شده با سیمان تیپ ۱ در دوره‌های زمانی مشخص شده (۱ و ۲۸ روز) آورده شده است. با توجه با شکل (۴) می‌توان نتیجه گرفت باگذشت زمان عمل‌آوری و افزایش سن بتن، شدت بیشتر پیک‌ها افزایش یافته که ناشی از واکنش بین مخلوط سنگدانه و سیمان و در نتیجه افزایش

ریوداسیتی، شدت پیک نمونه‌های ۲۸ روزه در زاویه حدود ۳۴ درجه بیش از دو برابر شدت همان پیک در نمونه‌های ۱ روزه می‌باشد که با توجه به الگوی طیفی پرتلندیت می‌توان این پیک را مربوط به رشد بلورهای پرتلندیت موجود در مخلوط نسبت داد. در الگوی مربوط به نمونه‌های گرانیتی ۲۸ روزه و در زاویه حدود ۱۳ درجه دو پیک کاملاً مشخص دیده می‌شود (دوایر نقطه‌چین سیاه‌رنگ) که در نمونه‌های ۱ روزه اثری از آنها دیده نمی‌شود. با توجه به الگوی طیفی سنگ‌دانه می‌توان نتیجه گرفت که وجود این پیک‌های جدید به علت افزایش تبلور مواد سنگ‌دانه‌ای موجود در بتن با افزایش سن بتن می‌باشد.

۶۳ درجه، دو پیک جدید به وجود آمده است که در نمونه‌های ۱ روزه اثری خاصی از آنها دیده نمی‌شود. این پیک‌های جدید با توجه به الگوی طیفی پرتلندیت می‌تواند ناشی از رشد بلورهای پرتلندیت باگذشت زمان باشد. با توجه به مطالعه دقیق نتایج آنالیزهای XRD مشاهده می‌شود که اکثر تغییرات شدت پیک‌ها مربوط به روند طبیعی رشد بتن باگذشت زمان می‌باشد و پیک‌های جدیدی که نشان‌دهنده محصولات کاملاً جدید و مشابه الگوی ژل سیلیسی-قلیایی باشد دیده نمی‌شود. در شکل (۵) نتایج آنالیز طیفی XRD نمونه‌های ریوداسیتی و گرانیتی آورده شده است. در این شکل چند نمونه از رشد پیک‌های مختلف با خطوط نقطه‌چین قرمز رنگ مشخص شده است، به‌عنوان مثال در نمونه‌های



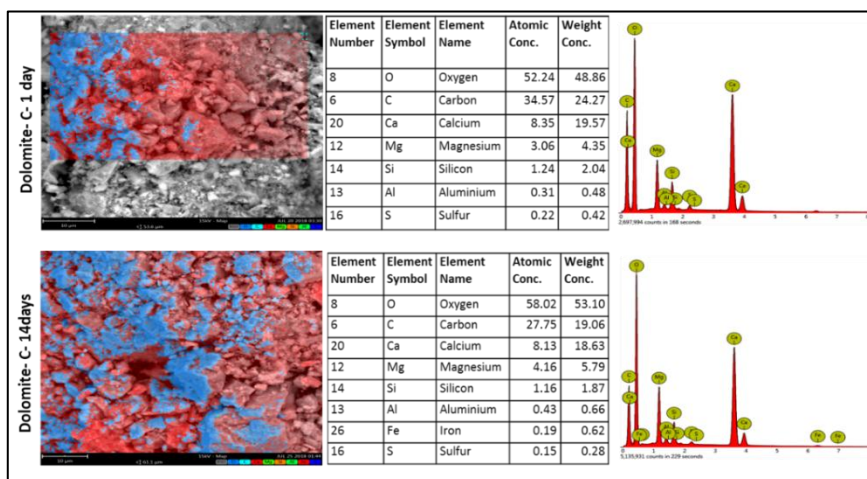
شکل ۴. نتایج آزمون XRD بر روی نمونه‌های دولومیتی (بالا) و آهکی (پایین) در شرایط تسریع نشده



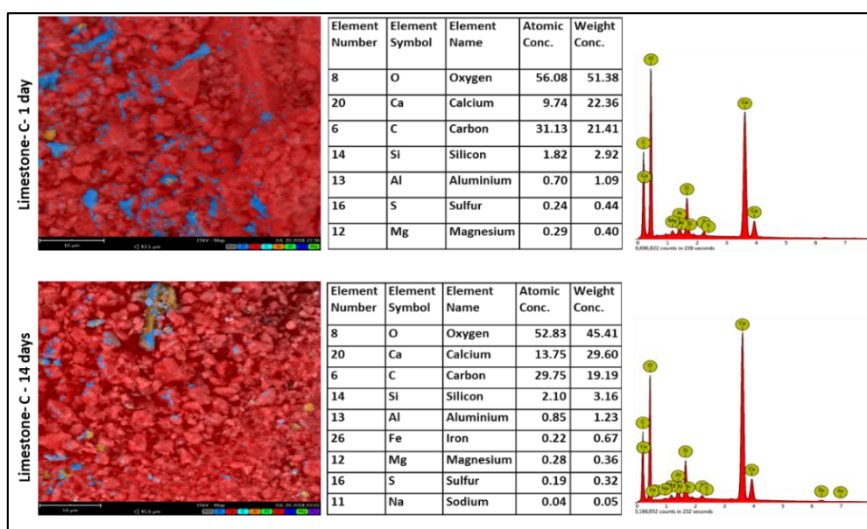
شکل ۵. نتایج آزمون XRD بر روی نمونه‌های و ریوداسیتی و گرانیته بعد از گذشت ۱ و ۲۸ روز عمل‌آوری

تشکیل مواد جدید در ملات ساخته‌شده باگذشت زمان می‌باشد وجود ندارد و الگوی طیفی نمونه‌ها بعد از گذشت ۱ و ۲۸ روز عمل‌آوری مشابه هم بوده و بیشتر تغییرات شدت پیک‌ها دیده می‌شود اما از نظر درصد عناصر موجود تفاوت چندانی بین این نمونه‌ها دیده نمی‌شود. تغییرات اندک مشاهده‌شده درصد عناصر می‌تواند مربوط به عدم یکنواختی نقاط عکس‌برداری شده باشد، زیرا با تغییر محل تصویربرداری امکان تغییر مقدار عناصر با توجه به مواد تشکیل‌دهنده وجود دارد. در اکثر نمونه‌ها درصد مقادیر یون‌های الکالی مانند سدیم و منیزیم باگذشت زمان بیشتر شده است. همچنین درصد مقادیر وزنی مربوط به یون آلومینیوم نیز باگذشت زمان کمتر شده است.

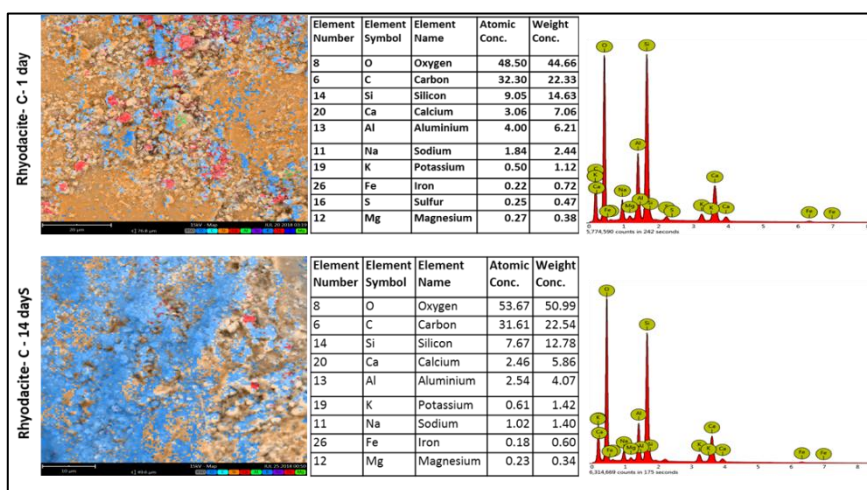
با بررسی دقیق‌تر پیک‌های مربوط به نمونه‌ها در زمان‌های مختلف تغییر چشمگیری در پیک‌ها مشاهده نشد که می‌تواند دلیلی بر عدم تشکیل فاز جدید در نمونه‌های بتنی نگهداری شده در شرایط دمایی و شیمیایی نرمال (دمای اتاق، PH نرمال بتن) و عدم واکنش‌پذیری آن‌ها در کوتاه‌مدت باشد. از آنجاکه انحلال‌پذیری سیلیس در شرایط محیطی با PH طبیعی بسیار آهسته و تقریباً انحلال ناپذیر می‌باشد (Broekmans, 2004)، بنابراین عدم واکنش زایی سنگ‌دانه‌های گرانیته و ریوداسیتی در نمونه‌های عمل‌آوری شده در شرایط تسریع نشده قابل توجه می‌باشد. در اشکال (۶ تا ۹) نتایج آزمون SEM/EDX برای نمونه‌های بتنی ۱ روزه تا ۲۸ روزه آورده شده است. از مقایسه نتایج آنالیز SEM/EDX بر روی نمونه‌های مختلف مشاهده می‌شود که فازهای مینرالی جدید که نشان‌دهنده



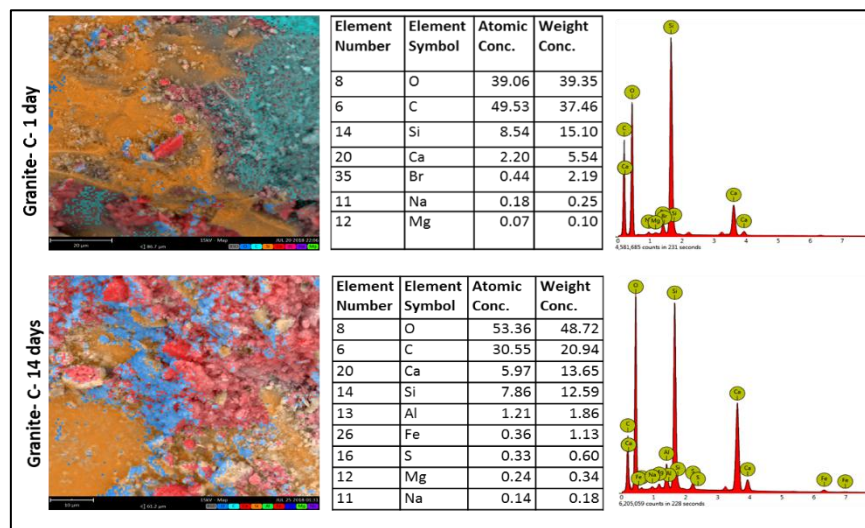
شکل ۶. نتایج آزمون SEM/EDX بر روی نمونه‌های دولومیتی (۱ و ۱۴ روزه) در شرایط تسریع نشده



شکل ۷. نتایج آزمون SEM/EDX بر روی نمونه‌های آهکی (۱ و ۱۴ روزه) در شرایط تسریع نشده



شکل ۸. نتایج آزمون SEM/EDX بر روی نمونه‌های ریوداستیتی (۱ و ۱۴ روزه) در شرایط تسریع نشده



شکل ۹. نتایج آزمون SEM/EDX بر روی نمونه‌های گرانیتی (۱ و ۱۴ روزه) در شرایط تسریع نشده

۳-۳. نتایج آنالیزهای انجام شده بر روی سنگدانه‌های

مختلف در شرایط تسریع شده بر اساس استاندارد ASTM C

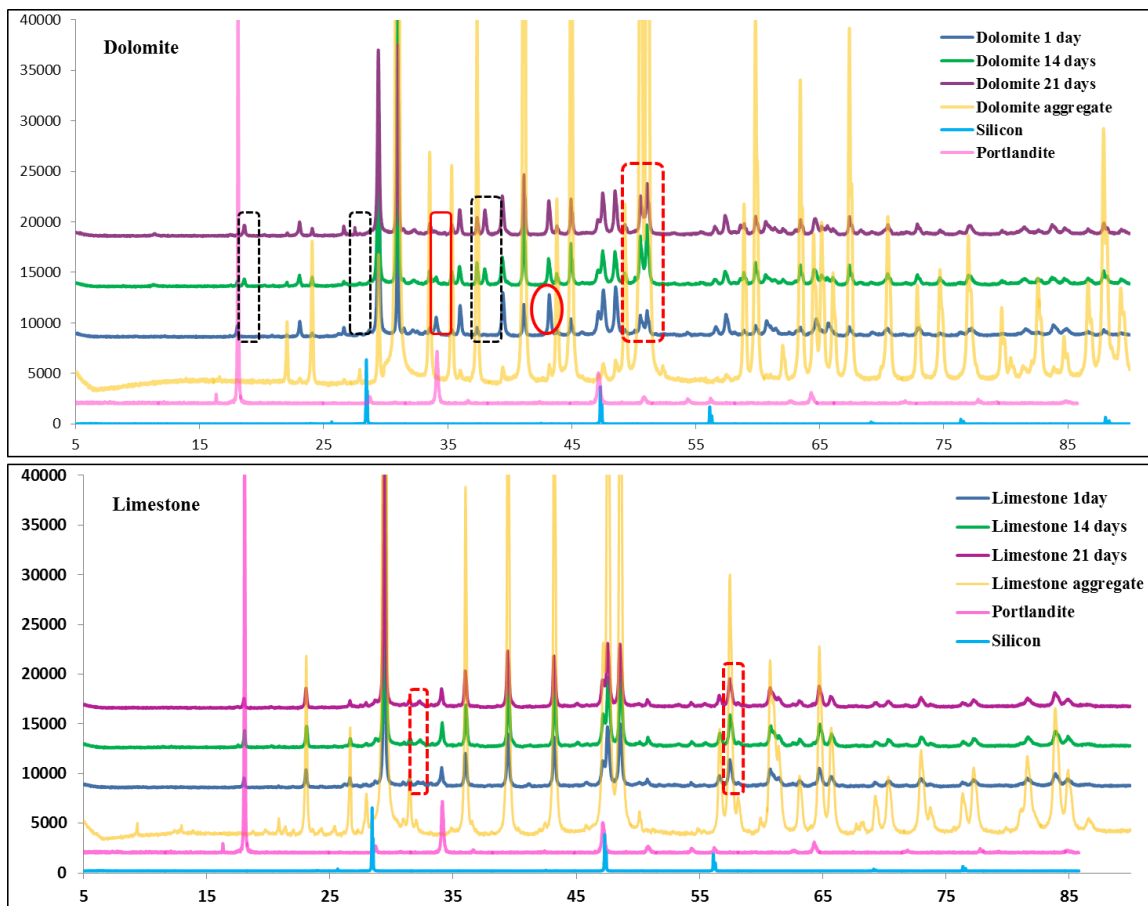
1260

۳-۳-۱. نتایج آنالیزهای XRD

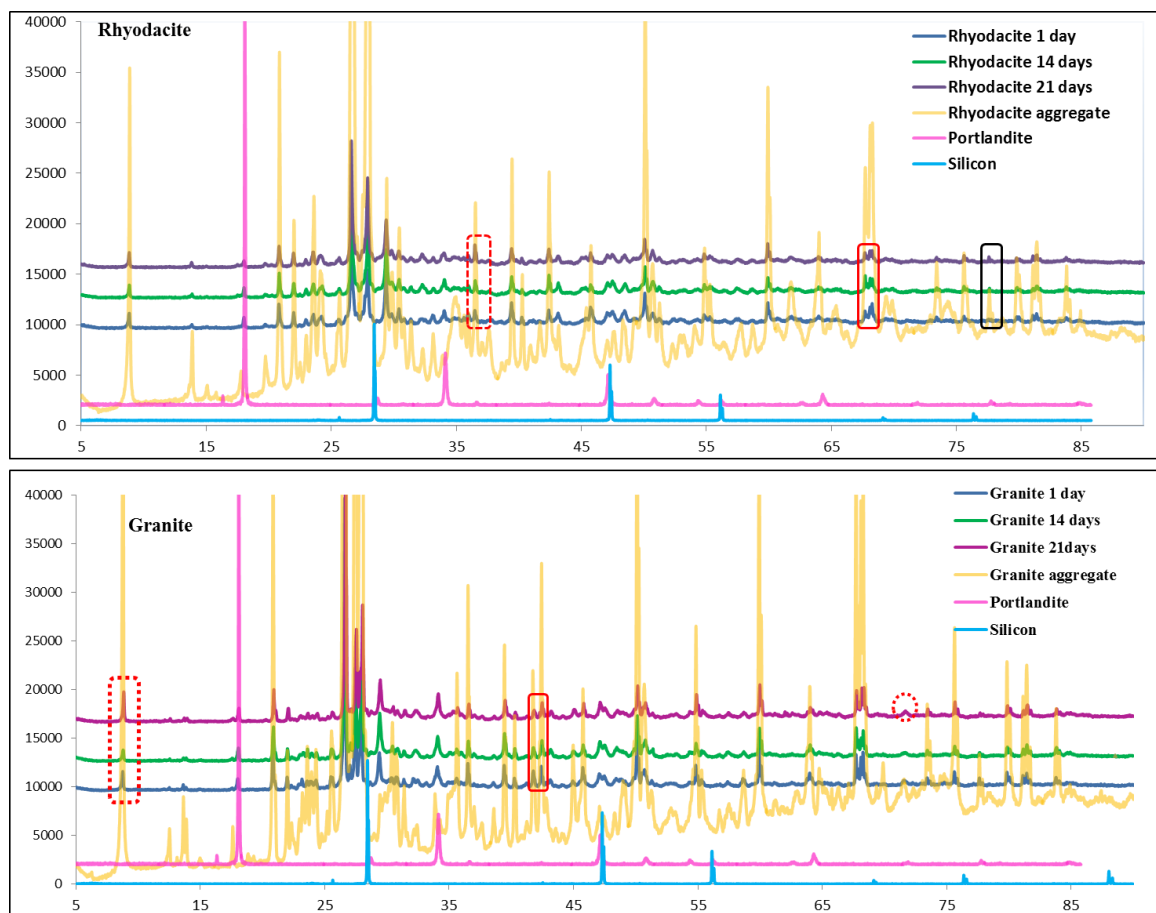
نتایج آنالیزهای XRD بر روی نمونه‌های ساخته شده بر اساس استاندارد ASTM C 1260 در فواصل زمانی مختلف عمل آوری، در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) آورده شده است. در شکل (۱۰) نتایج آنالیز XRD بر روی سنگدانه آهکی و دولومیتی، الگوی طیفی سیلیس و پرتلندیت به همراه نمونه‌های ساخته شده بعد از گذشت ۱، ۱۴ و ۲۸ روز نشان داده شده است. همان‌طور که در نمونه‌های دولومیتی و آهکی مشاهده می‌شود تغییرات شدت پیک‌ها خیلی شدید نبوده با این وجود افزایش و کاهش شدت پیک‌ها در الگوی مربوط به هر کدام دیده می‌شود. افزایش پیک‌ها با خطوط نقطه چین قرمز رنگ، کاهش پیک‌ها با خطوط ممتد قرمز رنگ و پیدایش پیک‌های جدید با خطوط به رنگ سیاه نشان داده شده است به عنوان مثال در نمونه‌های دولومیتی و در پیک‌های ۱۴ و ۲۱ روزه می‌توان پیک جدیدی را در زوایای حدود ۱۸ درجه و ۳۸ درجه مشاهده کرد که با خطوط نقطه چین سیاه رنگ مشخص شده‌اند. از آنجاکه این پیک‌های جدید منطبق بر الگوی طیفی سنگدانه مربوطه و همچنین پرتلندیت نمی‌باشند می‌توان نتیجه گرفت که ناشی از برهمکنش این دو ماده و

تشکیل محصول جدیدی باشند. برای نمونه‌های دولومیتی و در زاویه حدود ۳۴ درجه، کاهش شدت پیک با افزایش سن بتن مشاهده می‌شود که با توجه به الگوی طیفی پرتلندیت می‌توان گفت که مربوط به دی پلیمریزه شدن بلورهای پرتلندیت می‌باشد. اگرچه ثابت شده است که محصولات ASR می‌توانند فاز بلوری داشته باشند، اما در نمونه‌های مطالعه شده به وسیله XRD قابل تشخیص نبوده‌اند که می‌تواند منعکس کننده این نکته باشد که مقدار محصولات ASR تولید شده کم بوده و پایین‌تر از حد تشخیص توسط XRD می‌باشد (Dähn et al., 2016; Shi et al., 2018). در شکل (۱۱) نتایج آنالیز XRD برای نمونه‌های ریوداسیتی و گرانیتی نشان داده شده است. افزایش شدت پیک‌ها با خطوط نقطه چین قرمز رنگ، کاهش شدت پیک‌ها با خطوط ممتد قرمز رنگ و ایجاد پیک‌های جدید با خطوط نقطه چین سیاه رنگ نشان داده شده است. با افزایش سن بتن شدت بیشتر پیک‌ها افزایش یافته با این وجود پیک‌های اندکی نیز وجود دارند که با گذشت زمان از شدت آن‌ها کاسته شده و کم‌کم از بین می‌روند که مربوط به رشد یا کاهش بلورهای مربوطه در بتن باشد. در نمونه‌های گرانیتی در زاویه حدود ۸ درجه و در نمونه‌های ریوداسیتی در زاویه حدود ۳۷ درجه رشد پیک‌ها با گذشت زمان نشان داده شده است. در زاویه حدود ۶۸ درجه نمونه‌های ریوداسیتی و در زاویه حدود ۴۲ درجه نمونه‌های

گرانیتی، کاهش شدت پیک‌ها را با گذشت زمان نشان داده‌شده است.



شکل ۱۰. نتایج آزمون XRD برو روی نمونه‌های بتن دولومیتی (بالا) و آهکی (پایین) در شرایط تسریع شده



شکل ۱۱. نتایج آزمون XRD بر روی نمونه‌های بتن گرانیتی و ریوداسیتی در شرایط تسریع شده

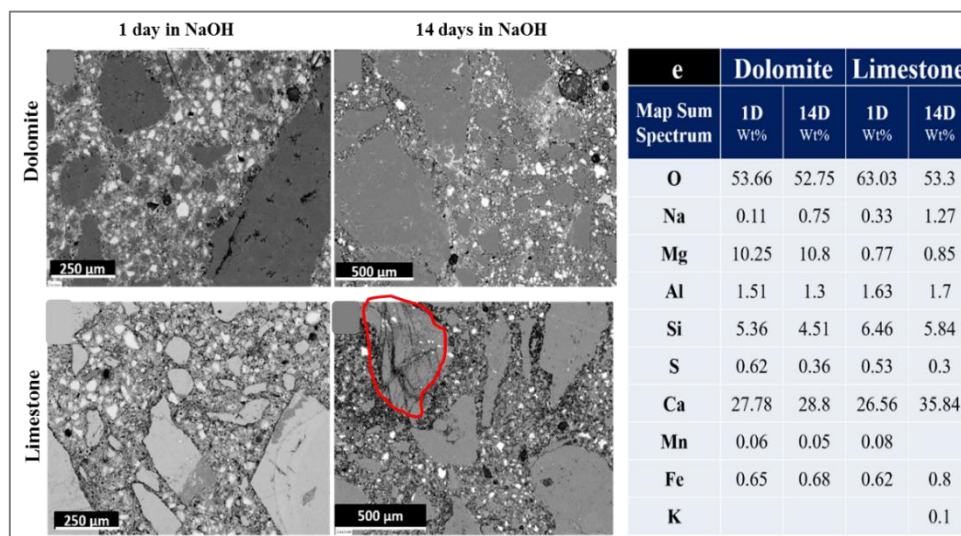
۳-۲-۳. نتایج آنالیزهای SEM

نتایج مربوط به آنالیز میکروسکوپ الکترونی نمونه‌های دولومیتی و آهکی در شکل (۱۲) آورده شده است. تصویر میکروسکوپ الکترونی نمونه‌ها بعد از ۱ و ۱۴ روز به همراه مقادیر درصد وزنی عناصر سازنده آورده شده است. با توجه به بررسی تصاویر میکروسکوپ الکترونی گرفته شده و همچنین مقادیر درصد وزنی عناصر سازنده بتن دولومیتی، تغییرات محسوسی در شکل سنگ‌دانه‌ها از نظر گسترش ترک‌های قبلی و ایجاد ترک‌های جدید که مقدمه واکنش زایی قلیایی سنگ‌دانه‌ها می‌باشند مشاهده نمی‌شود که نتایج آزمون XRD نیز مؤید این مطلب می‌باشد. همان‌طور که در نمونه آهکی ۱۴ روزه مشاهده می‌شود، سنگ‌دانه باگذشت زمان دچار تخریب شدید شده که با دایره قرمز رنگ مشخص شده است. این تخریب سنگ‌دانه موجود در بتن می‌تواند نشانه وقوع واکنش‌های انبساطی در این نمونه‌ها باشد (Jen et al.,

2019). سنگ‌های آهکی به علت بافت و ترکیب شیمیایی خود معمولاً از سنگ‌های دولومیتی واکنش زایی کمتری نشان می‌دهند اما طبقه‌بندی کلی نوع سنگ در رابطه با فعالیت قلیایی، قابل‌اعتماد نیست. بسته به شرایط تاریخچه زمین‌شناسی، یک نوع سنگ ممکن است در یک منطقه یا کشور، بی‌ضرر (خشتی) و در جای دیگر فعال باشد، بنابراین طبقه‌بندی نهایی بر اساس ارزیابی‌های پتروگرافی به همراه تجربیات بین‌المللی و یا منطقه‌ای باید دنبال شود (RILEM, 2003). دولومیتی شدن باعث تولید بافت میرمیکیتی شده که این بافت از لکه‌های بروسیت ($>3\mu\text{m}$) و کلسیت درون حاشیه واکنشی، همراه با هاله کربناتی کلسیت در اطراف خمیره سیمان تشکیل شده است. قلیایی‌ها به دولومیت ریزدانه حمله کرده و محصولات جامدی مانند کلسیت و صفحات هگزاگونالی بروسیت را تشکیل می‌دهد. نقش دولومیتی شدن، باز کردن کانال‌هایی برای حرکت رطوبت و محلول‌ها

آزمایشگاهی که دارای واکنش‌زایی قلیایی بوده اند، ریزبلورهای کوارتز مخفی شده در خمیره بتن همراه با ددولومیتی شدن، از عوامل اصلی انبساط نمونه‌های کربناتی آزمایش شده می‌باشند (Katayama, 2004).

به درون سنگ می‌باشد. با این وجود هیچ شاهده‌ی که نشان دهد ددولومیتی شدن باعث ایجاد ترک‌های انبساطی در خمیره سیمان شود وجود ندارد. مطالعات پتروگرافی و مشاهدات میکروسکوپی که توسط محققین مختلف صورت گرفته است، نشان داده است که در بیشتر نمونه‌های کربناتی کارگاهی و



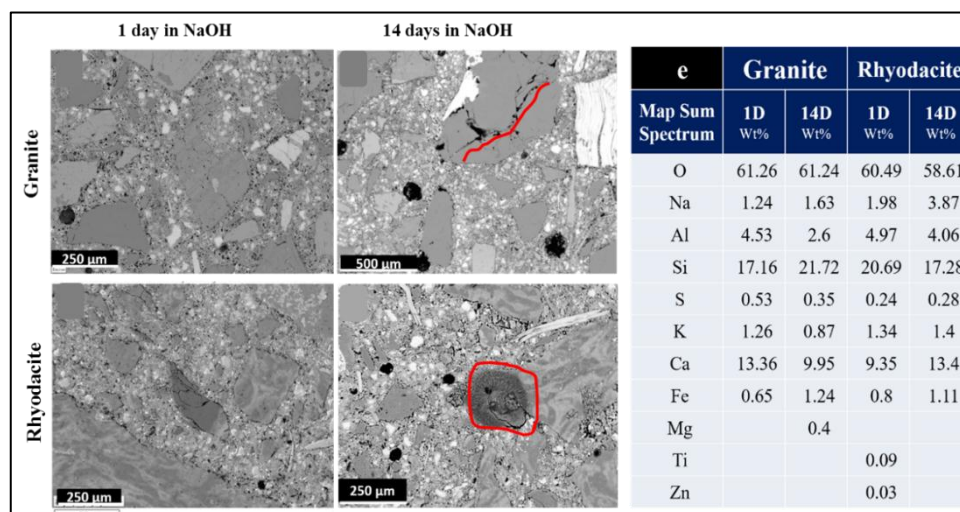
شکل ۱۲. تصاویر میکروسکوپ الکترونی نمونه‌های بتن دولومیتی (بالا) و آهکی (پایین) بعد از ۱ و ۱۴ روز از قرار گرفتن در NaOH به همراه مقدار عناصر سازنده

(Katayama, 2004). در شکل (۱۳) تصاویر میکروسکوپ الکترونی از نمونه‌های گرانیتی و ریوداسیتی بعد از گذشت ۱ روز از قرار گرفتن در محلول سدیم هیدروکسید در کنار تصاویر مربوط به گذشت ۱۴ روز از زمان قرار گرفتن نمونه‌ها در شرایط تسریع شده آورده شده است. در تصاویر مربوط به سنگدانه گرانیتی با گذشت زمان ریزترک‌های موجود در سنگدانه‌ها گسترش پیدا می‌کند به طوری که بعد از گذشت ۱۴ روز این ترک‌ها به وضوح دیده می‌شوند. تشدید شدن پدیده ترک‌دار شدن کانی‌های موجود در سنگدانه به ویژه کانی‌های کوارتزی می‌تواند حرکت محلول مغذی بتن را به درون سنگدانه تسهیل کند و تشکیل ژل سیلیسی-قلیایی را در درز و شکاف کانی‌های موجود در سنگدانه موجب شود. تشکیل ژل و انبساط آن می‌تواند موجب افزایش تنش داخلی در نمونه شده و در نهایت منجر به انبساط بیش از ظرفیت بتن و تخریب آن گردد (Rajabipour et al., 2015). در موضوع

با توجه به اطلاعات به دست آمده از آنالیز XRF سنگدانه‌های دولومیتی و آهکی مورد مطالعه در این تحقیق مشاهده می‌شود که مقدار اکسید سیلیسیم در نمونه‌های آهکی بیش از ۳۰ برابر نمونه‌های دولومیتی می‌باشد؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که تخریب سنگدانه‌های آهکی مورد مطالعه و واکنش‌زایی قلیایی آن‌ها به علت وجود نهران بلورهای کوارتز موجود در سنگدانه‌های آهکی می‌باشد. در سنگ دولومیتی بدون کانی‌های سیلیسی، فرایندهای انبساط، کاملاً نامشخص می‌باشند بنابراین فرایند ددولومیتی شدن به تنهایی نمی‌تواند توجیه‌کننده واکنش‌زایی قلیایی سنگدانه‌های کربناتی باشد (Min and Mingshu, 1993). واکنش‌زایی قلیایی-کربناتی در ارتباط با فرایند ددولومیتی شدن، اجزای سیلیسی موجود در سنگدانه یا خمیره بتن و محتوی رسی می‌باشد که می‌تواند در انبساط ایجاد شده توسط تبلور بروسیت بین لایه‌ای در طول فرایند ددولومیتی شدن نقش داشته باشد

واکنش زایی سنگ‌دانه‌ها، در دسترس بودن محلول منفذی قلیایی برای کوارتز به‌ویژه انواع فعال آن بسیار حیاتی می‌باشد. یکی دیگر از شواهد واکنش زایی سنگ‌دانه‌ها با گذشت زمان افزایش نسبتاً بالای درصد یون کلسیم نسبت به سیلیسیم می‌باشد که می‌تواند نشان‌دهنده پیشرفت فرایند واکنش زایی در نمونه‌ها باشد. آنالیزهای میکروسکوپ الکترونی نشان داد که نسبت کلسیم به سیلیسیم بعد از گذشت ۱۴ روز از شروع آزمایش بر روی نمونه‌های مختلف دچار تغییرات زیادی گردیده است به طوری که این مقدار در نمونه‌های آهکی، ۴۹ درصد، در نمونه‌های ریوداسیتی ۷۱ درصد و در نمونه‌های دولومیتی ۲۳ درصد افزایش داشته است، در حالی که در نمونه‌های گرانیتی این مقدار ۴۱ درصد کاهش یافته است. سنگ‌دانه‌های ریوداسیتی در مقایسه با سنگ‌دانه‌های گرانیتی، در زمان کوتاه‌تری متبلور شده‌اند بنابراین بسیاری از کانی‌های فرصت کافی برای تشکیل بلورهای خیلی درشت را پیدا نکرده‌اند و بافت شیشه‌ای و ریزبلورین در زمینه سنگ مشاهده

می‌شود. یکی از کانی‌های اصلی سازنده این سنگ‌ها کوارتز می‌باشد که محاسبه ویژگی‌های بافتی و مینرالی آن نقش بسیار مهمی در پیش‌بینی واکنش زایی سنگ‌دانه حاوی آن خواهد داشت. مقادیر شاخص واکنش زایی کوارتز (Quartz Reaction Index) به‌وسیله جمع درصد‌های کوارتز در سنگ‌دانه‌ها توسط مساحت سطحی ویژه به دست می‌آید. نتایج بررسی شاخص واکنش زایی کوارتز نشان داد که در کوارتز تولیدشده به‌وسیله فرایندهای متامورفیک، کاهش اندازه دانه به‌طور چشمگیری واکنش زایی قلیایی را به‌وسیله افزایش مساحت سطح دانه‌های کوارتز در دسترس برای واکنش زایی، افزایش می‌دهد (del Amo and Pérez, 2001). همان‌گونه که در نمونه‌های ریوداسیتی ۱۴ روزه مشاهده می‌شود، در مرز بین سنگ‌دانه و خمیره سیمان ترک‌های انبساطی تشکیل شده است که می‌تواند محلی برای تمرکز و تجمع محلول منفذی قلیایی در کنار سنگ‌دانه و تشکیل ژل سیلیسی قلیایی در این محل گردد.



شکل ۱۳. تصاویر میکروسکوپ الکترونی از نمونه‌های گرانیتی و ریوداسیتی بعد از گذشت ۱ و ۱۴ روز عمل‌آوری به همراه درصد عناصر تشکیل‌دهنده

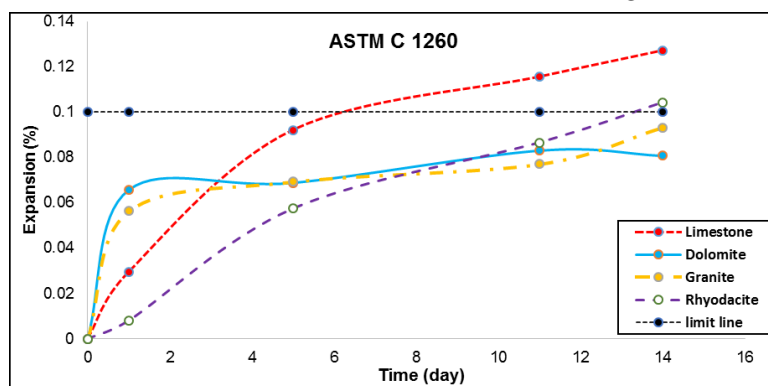
۳-۳-۳. آزمون تیر ملات تسریع شده (ASTM C 1260)

آزمون تیر ملات تسریع شده بر اساس استاندارد ASTM C1260 انجام گردید. تیرهای ملات با استفاده از سنگ‌دانه‌های با اندازه ۰/۱۲۵ میلی‌متر تا ۵ میلی‌متر، سیمان تیپ ۱ و آب تقطیرشده ساخته شدند. نسبت کلی سنگ‌دانه، سیمان و آب به

ترتیب برابر با ۲/۲۵، ۱ و ۰/۴۷ بوده است. از هرکدام از سنگ‌دانه‌ها چهار تیر ملات آماده گردید. بعد از ۲۴ ساعت قالب‌گیری، نمونه از قالب بیرون آورده شده و به مدت ۲۴ ساعت در آب با دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند. تغییرات طول نمونه به مدت ۱۴ روز و در بازه‌های زمانی ۱،

نمونه‌های آهکی و ریوداسیتی در محدوده ۰/۱ تا ۰/۲ می‌باشند، بنابراین به‌عنوان سنگدانه‌های با پتانسیل واکنش‌زایی منظور می‌گردند و برای اطمینان از نتایج به‌دست‌آمده، آزمون‌های انبساطی طولانی‌مدت مانند آزمون منشور بتن باید انجام شود. نمونه‌های دولومیتی و گرانیتی در محدود انبساطی کمتر از ۱/ درصد قرار دارند بنابراین می‌توان آن‌ها را سنگدانه‌های غیر واکنش‌زا نامید.

۵، ۹ و ۱۴ روزه اندازه‌گیری شد (شکل ۱۴). اگر میانگین تغییرات طول تیرهای ملات مربوط به هر سنگدانه‌ها بزرگ‌تر از ۰/۱ درصد باشد، این سنگدانه دارای پتانسیل واکنش‌زایی خواهد بود. برای اطمینان از نتایج به‌دست‌آمده از آزمون تیر ملات توصیه‌شده است که آزمون‌های انبساطی طولانی‌مدت مانند آزمون منشور ملات (ASTM C 1293) نیز بر روی نمونه‌های انجام شود (Thomas et al., 2006). همان‌طور که در شکل (۱۴) مشاهده می‌شود، میزان انبساط



شکل ۱۴. نمودار تغییرات طول نمونه‌ها بر اساس استاندارد ASTM C 1260

آهکی دارای مقادیر نسبتاً بالای اکسید سیلیسیم (۴/۸۴) می‌باشند. تصاویر SEM و نتایج آزمون انبساطی سنگدانه‌های آهکی در مدت ۱۴ روز نشان داد که این سنگدانه‌ها به علت وجود مقادیر زیاد کوارتز نهان بلور در زمینه سنگدانه، دارای پتانسیل واکنش‌زایی قلیایی می‌باشد. نمونه‌های دولومیتی دارای مقادیر بسیار کمتر اکسید سیلیسیم (۰/۱۵٪) نسبت به نمونه‌های آهکی می‌باشند، همچنین نسبت بالای تغییرات یون کلسیم به سیلیسیم در نمونه‌ها بعد از گذشت ۱۴ روز از شروع واکنش می‌تواند یکی از نشانه‌های پیشرفت واکنش‌زایی سنگدانه‌ها باشد به طوری که این مقدار در نمونه‌های ریوداسیتی بیشترین مقدار را داشته است در حالیکه در نمونه‌های گرانیتی این مقدار کاهش قابل ملاحظه را نشان می‌دهد. از آنجاکه بسیاری از محققین پتانسیل واکنش‌زایی قلیایی سنگدانه‌های کربناتی را به وجود کوارتز نهان بلور یا ریزبلور در خمیره این سنگ‌ها نسبت می‌دهند، عدم واکنش‌زایی

۴. نتیجه‌گیری

هدف از این پژوهش بررسی پتانسیل واکنش‌زایی سنگدانه‌های آذرین شامل گرانیت و ریوداسیت و همچنین سنگدانه‌های رسوبی شامل آهک و دولومیت با تاکید بر نقش مطالعات پتروگرافی سنگدانه‌ها و آزمون‌های شیمیایی می‌باشد. بررسی‌های پتروگرافی و ارزیابی پتانسیل واکنش‌زایی نمونه ملات ساخته‌شده با سنگدانه‌ها، شامل آنالیزهای SEM، EDX، XRD، XRF و میکروسکوپ نوری به همراه آزمون شیمیایی تسریع شده و تسریع نشده (۲۴ درجه سانتی‌گراد) می‌باشد. نتایج آنالیزهای شیمیایی و پتروگرافی به‌دست‌آمده از نمونه‌های نگهداری شده در شرایط تسریع نشده نشان داد که باگذشت زمان تا ۱۴ و ۲۸ روز تغییر چشمگیری در خصوصیات و ترکیب شیمیایی نمونه ملات نگهداری شده در این شرایط مشاهده نمی‌شود. نتایج آنالیز پتروگرافی، شیمیایی و آزمون‌های انبساطی نمونه‌های نگهداری شده در شرایط تسریع شده نشان داد که نمونه‌های

هم در آزمون‌های انبساطی این امر دیده می‌شود. در محلول منفذی سیمان مقاومت کمتری نسبت به گرانیته از خود نشان داد که مقادیر بالای نسبت کلسیم به سیلیسیم در نمونه های ریوداسیتی نسبت به نمونه های گرانیته بعد گذشت ۱۴ روز در محلول سدیم هیدروکسید نیز موید این مطلب می باشد. بنابراین تشکیل ژل سیلیسی و انبساط نمونه های ریوداسیتی محتمل تر بوده ، ازاین رو این سنگ‌دانه‌ها را می توان به‌عنوان سنگ‌دانه‌های با پتانسیل واکنش زایی در نظر گرفت. **تقدیر و تشکر** در پایان آزمایشگاه زمین‌شناسی مهندسی دانشگاه تربیت مدرس و همچنین از دانشکده علوم زمین دانشگاه مکواری استرالیا، تقدیر و تشکر می‌گردد.

سنگ‌دانه دولومیتی قابل توجه می‌باشد که هم در نتایج SEM سنگ‌دانه‌های گرانیته موردبررسی دارای درشت‌بلورهای کوارتز و فلدسپات به همراه بیوتیت و مقدار اندکی آمفیبول می‌باشند. با توجه به مطالعات پتروگرافی مشخص گردید که مقادیر کوارتز ریزبلور در نمونه‌ها بسیار اندک می‌باشد. نتایج آزمون‌های انبساطی و تصاویر SEM نشان دادند که اگرچه برخی ریزترک‌ها در کانی‌های کوارتزی ممکن است گسترش یابد اما مقادیر انبساط ایجادشده در این نمونه‌ها کمتر از ۰/۱ درصد می‌باشد، ازاین رو این سنگ‌دانه‌ها را نباید سنگ‌دانه‌های با پتانسیل واکنش زایی در نظر گرفت. نتایج آنالیزهای پتروگرافی و آزمون‌های انبساطی نشان داد که سنگ‌دانه‌های ریوداسیتی به علت بافت زمینه ریزدانه تا شیشه‌ای و مقادیر بالای کوارتز ریزبلور نسبت به هجوم یون‌های قلیایی موجود

منابع

- Alonso, E., Martinez, L., 2003. The role of environmental sulfur on degradation of ignimbrites of the Cathedral in Morelia, Mexico. *Build. Environ.* 38, 861–867.
- Broekmans, M.A.T.M., 2004. Structural properties of quartz and their potential role for ASR. *Mater. Charact.* 53, 129–140.
- Chatterji, S., Thaulow, N., Jensen, A.D., 1989. Studies of alkali-silica reaction. Part 5. Verification of a newly proposed reaction mechanism. *Cem. Concr. Res.* 19, 177–183.
- Dähn, R., Arakcheeva, A., Schaub, P., Pattison, P., Chapuis, G., Grollmund, D., Wieland, E., Leemann, A., 2016. Application of micro X-ray diffraction to investigate the reaction products formed by the alkali-silica reaction in concrete structures. *Cem. Concr. Res.* 79, 49–56.
- French, W.J., 1991. Concrete petrography: a review. *Q. J. Eng. Geol. Hydrogeol.* 24, 17–48.
- Hobbs, D.W., 1988. Alkali-silica reaction in concrete. Thomas Telford Publishing.
- Jen, G., Hay, R., Ostertag, C.P., 2019. Multi-scale evaluation of hybrid fiber restraint of alkali-silica reaction expansion in concrete. *Constr. Build. Mater.* 211, 1117–1126.
- Katayama, T., 1992. A critical review of carbonate rock reactions—Is their reactivity useful or harmful. In: *Proceeding of the 9th International Alkali-Aggregate Reactions Conference*, London, Concrete Society, Slough, Publ. CS-104. pp. 508–518.
- Katayama, T., 2004. How to identify carbonate rock reactions in concrete. *Mater. Charact.* 53, 85–104.
- Kurtis, K.E., Monteiro, P.J.M., Brown, J.T., Meyer-Ilse, W., 1998. Imaging of ASR gel by soft X-ray microscopy. *Cem. Concr. Res.* 28, 411–421.
- Lindgård, J., Nixon, P.J., Borchers, I., Schouenborg, B., Wigum, B.J., Haugen, M., Åkesson, U., 2010. The EU “PARTNER” Project—European standard tests to prevent alkali reactions in aggregates: final results and recommendations. *Cem. Concr. Res.* 40, 611–635.
- López-Arce, P., García-Guinea, J., 2005. Weathering traces in ancient bricks from historic buildings. *Build. Environ.* 40, 929–941.
- Lukschová, Š., Příkryl, R., Pertold, Z., 2009. Evaluation of the alkali-silica reactivity potential of sands. *Mag. Concr. Res.* 61, 645–654.
- Malvar, L.J., Cline, G.D., Burke, D.F., Rollings, R., Sherman, T.W., Greene, J.L., 2002. Alkali-silica reaction mitigation: state of the art and recommendations. *Mater. J.* 99, 480–489.
- Min, D., Mingshu, T., 1993. Mechanism of dedolomitization and expansion of dolomitic rocks. *Cem. Concr.*

- Res. 23, 1397–1408.
- Murlidhar, B.R., Mohamad, E.T., Armaghani, D.J., 2016. Potential alkali silica reactivity of various rock types in an aggregate granite quarry. *Measurement* 81, 221–231.
- Peterson, K., Gress, D., Van Dam, T., Sutter, L., 2006. Crystallized alkali-silica gel in concrete from the late 1890s. *Cem. Concr. Res.* 36, 1523–1532.
- Rajabipour, F., Giannini, E., Dunant, C., Ideker, J.H., Thomas, M.D.A., 2015. Alkali-silica reaction: current understanding of the reaction mechanisms and the knowledge gaps. *Cem. Concr. Res.* 76, 130–146.
- Ramos, V., Fernandes, I., Silva, A.S., Soares, D., Fournier, B., Leal, S., Noronha, F., 2016. Assessment of the potential reactivity of granitic rocks—Petrography and expansion tests. *Cem. Concr. Res.* 86, 63–77.
- RILEM, T.C., 2003. 191-ARP: 'Alkali-reactivity and prevention-Assessment, specification and diagnosis of alkali-reactivity', RILEM Recommended Test Method AAR-1: Detection of potential alkali-reactivity of aggregates-Petrographic method. *Mater. Struct.* 36, 480–496.
- Rivard, P., Fournier, B., Ballivy, G., 2002. The damage rating index method for ASR affected concrete—a critical review of petrographic features of deterioration and evaluation criteria. *Cem. Concr. Aggregates* 24, 1–11.
- Scrivener, K., Snellings, R., Lothenbach, B., 2018. A practical guide to microstructural analysis of cementitious materials. Crc Press.
- Shafaatian, S., 2012. Innovative methods to mitigate alkali-silica reaction in concrete materials containing recycled glass aggregates.
- Shayan, A., Morris, H., 2001. A comparison of RTA T363 and ASTM C1260 accelerated mortar bar test methods for detecting reactive aggregates. *Cem. Concr. Res.* 31, 655–663.
- Shi, Z., Shi, C., Zhang, J., Wan, S., Zhang, Z., Ou, Z., 2018. Alkali-silica reaction in waterglass-activated slag mortars incorporating fly ash and metakaolin. *Cem. Concr. Res.* 108, 10–19.
- St John, D.A., Poole, A.B., Sims, I., 1998. Concrete petrography: a handbook of investigative techniques.
- Standard, A., 2007. Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method).
- Stanton, T.E., 1940. Influence of cement and aggregate on concrete expansion. *Eng. News-Record*.
- Thomas, M., 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.* 36, 1842–1856.
- Turkington, A. V, Martin, E., Viles, H.A., Smith, B.J., 2003. Surface change and decay of sandstone samples exposed to a polluted urban atmosphere over a six-year period: Belfast, Northern Ireland. *Build. Environ.* 38, 1205–1216.
- Wigum, B.J., French, W.J., Howarth, R.J., Hills, C., 1997. Accelerated tests for assessing the potential exhibited by concrete aggregates for alkali-aggregate reaction. *Cem. Concr. Compos.* 19, 451–476.