

بررسی اثربخشی خاکستر لجن فاضلاب در کنترل واکنش قلیایی-سیلیسی و اثر هم‌افزایی آن با پوزولان‌های طبیعی

محمدجواد امیرجانی

دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌گان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

امیر محمد رمضانپور *

دانشیار دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌گان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

علی ملکی

دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌گان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

چکیده

لجن فاضلاب یکی از محصولات فرعی فرآیند تصفیه فاضلاب بوده که به دلیل وجود آلاینده‌های زیاد در آن و حجم تولید بسیار بالا، باید به روشی مناسب مدیریت شود. یکی از این روش‌ها، سوزاندن آن است. در دهه‌های اخیر تحقیقات بسیاری بر روی استفاده از خاکستر لجن فاضلاب در بتن به عنوان ماده جایگزین سیمان یا ریزدانه صورت گرفته است. از سویی دیگر، یکی از پدیده‌هایی که باعث بروز خرابی در بتن می‌شود، واکنش قلیایی-سیلیسی است. یکی از راه‌های کنترل این واکنش، استفاده از مواد مکمل سیمانی بوده که با مصرف قلیای خمیر سیمان، از تشکیل ژل قلیایی-سیلیسی و ایجاد انبساط جلوگیری می‌کند. به سبب عملکرد خاکستر لجن فاضلاب به عنوان یک ماده جایگزین سیمان در پژوهش‌های پیشین، احتمال دارد که این ماده بتواند با کاهش میزان قلیائیت، در کنترل این پدیده مؤثر باشد. این در حالی است که تا به امروز تحقیقات شایانی در این زمینه به عمل نیامده است. در این پژوهش به منظور بررسی این تأثیر، از خاکستر لجن فاضلاب به عنوان یک ماده جایگزین سیمان در درصدهای ۱۰، ۳۰ و ۵۰ به جهت کنترل واکنش قلیایی-سیلیسی استفاده شد. همچنین اثر دو پوزولان طبیعی تراس و پومیس بر بهبود خواص کنترلی خاکستر لجن فاضلاب سنجیده شد. نتایج نشان داد که تنها در ملات‌های حاوی ۵۰ درصد خاکستر، انبساط ناشی از این واکنش کنترل گردید. این در حالی است که با افزودن پوزولان‌های طبیعی تراس و پومیس با درصدهای ۵ و ۱۰، خواص خاکستر لجن فاضلاب در کنترل واکنش قلیایی-سیلیسی در درصدهای زیر ۳۰، بهبود چشمگیری یافت.

واژه‌های کلیدی: واکنش قلیایی-سیلیسی، خاکستر لجن فاضلاب، پوزولان، دوام.

* نویسنده مسئول: ramezani@ut.ac.ir

۱- مقدمه

در پژوهش‌های صورت گرفته، مشاهده شد که با افزودن خاکستر لجن فاضلاب به بتن، کارایی کاهش و زمان گیرش بتن تازه افزایش پیدا می‌کند. همچنین در درصد‌های پایین جایگزینی، مقاومت فشاری تقریباً برابر با نمونه شاهد بوده و در مقاومت کششی تغییری حاصل نشد [۲۱-۱۷]. همچنین مشاهده شد که دمای سوزاندن لجن فاضلاب یکی از عامل مهم در خواص خاکستر تولیدی است، به طوری که دمای مناسب بین ۸۰۰ تا ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد گزارش شده است [۲۲ و ۲۳]. از سویی دیگر، با افزایش روز افزون جمعیت جهان و رونق صنعت ساخت و ساز در دهه‌های اخیر، استفاده از بتن به‌عنوان پرمصرف‌ترین و پرکاربردترین ماده مورد استفاده در این صنعت، به شدت افزایش پیدا کرده است.

تولید سیمان به‌عنوان یکی از عناصر مهم تشکیل دهنده بتن نقش مهم و زیادی را در تولید گازهای گلخانه‌ای^۴ دارد ولی با این وجود، در مجموع بتن نسبت به دیگر مصالح از منافع بیشتری برخوردار است فلذا تحقیقاتی که امروزه بر روی بتن انجام می‌شود، به جهت کم کردن آثار منفی تولید و استفاده از آن است [۲۴]. از منافع زیست محیطی استفاده از بتن می‌توان به عمر مفید طولانی سازه‌های بتنی، خواص مطلوب مهندسی و استفاده از ضایعات در بتن اشاره کرد [۲۵ و ۲۶]. با وجود منافع زیاد این ماده، استفاده از بتن در شرایط مختلف همواره با چالش‌های زیادی در طول زمان همراه بوده است.

یکی از واکنش‌های مخرب که می‌تواند سلامت بتن را به خطر بیندازد، واکنش قلیایی-سیلیسی^۵ است. این واکنش ناشی از واکنش شیمیایی بین یون‌های قلیایی موجود در خمیر سیمان^۶ و برخی از مواد معدنی سیلیسی واکنش‌پذیر است که عموماً در سنگ‌دانه‌ها یافت می‌شود. وقوع این واکنش که باعث ایجاد ترک خوردگی در بتن می‌شود ممکن است از یک تا پنج سال به طول انجامد، بدین جهت به این پدیده سرطان بتن^۷ نیز گفته می‌شود [۲۷]. این پدیده برای اولین بار در تحقیقات استانتون^۸ در سال ۱۹۴۰ و بعد از مشاهده ترک‌ها در سازه‌های بتنی در کالیفرنیا مطرح شد [۲۸ و ۲۹].

از گذشته تاکنون به دلیل محدود بودن منابع آبی در کره زمین، همواره یکی از دغدغه‌های جوامع و کشورهای مختلف، تأمین آب مورد نیاز برای مصارف خود بر طبق توسعه پایدار بوده است. یکی از بهترین راه‌ها برای برگرداندن آب‌های استفاده شده به چرخه مصرف، تصفیه فاضلاب است [۳-۱]. لجن فاضلاب یکی از محصولات فرعی فرآیند تصفیه فاضلاب محسوب شده و از مراحل ته‌نشینی اولیه و ثانویه حاصل می‌شود. مقدار لجن تولیدی در فرآیند تصفیه فاضلاب بسیار بالا بوده و دارای وزن و حجم زیادی است. همچنین اکثر آلاینده‌ها و مواد بیولوژیکی موجود در فاضلاب‌ها در لجن فاضلاب تجمع پیدا کرده‌اند، به همین دلیل در صورتی که این لجن به نحوی مناسب مدیریت نشود می‌تواند ضررهای بسیاری به محیط‌زیست وارد کند. بدین جهت نیاز است تا از این محصول پس از پالایش^۱ به نحوی صحیح، دوباره استفاده شود [۴].

یکی از روش‌های مدیریت لجن فاضلاب، سوزاندن آن در دمای بالاست. در کشورهایی نظیر ژاپن که از سویی حجم لجن فاضلاب تولیدی بسیار بالا بوده و از سوی دیگر با کمبود زمین مواجه هستند، سوزاندن لجن یک راهکار بسیار مناسب به شمار می‌آید زیرا در این فرآیند حجم و وزن لجن کاهش چشم‌گیری پیدا خواهد کرد و در نهایت به تولید خاکستری معدنی و بدون پاتوژن^۲ می‌انجامد، ولی باز هم حاوی فلزات سنگین و مواد معدنی^۳ است پس باید راه‌کاری برای دفع یا استفاده مجدد از آن پیدا کرد [۷-۵]. یکی از کاربردهای این خاکستر که تا به امروز تحقیقات زیادی بر روی آن صورت گرفته است، استفاده در مهندسی عمران بوده که توانسته بسیاری از مشکلات موجود در این زمینه را مرتفع کند. از پژوهش‌های انجام شده در این زمینه، می‌توان به استفاده از لجن فاضلاب و خاکستر آن در تولید آجر [۸-۱۰]، فیلر در روسازی [۱۱]، تولید سرامیک [۱۲ و ۱۳]، تولید سنگ‌دانه [۱۶-۱۴]، فیلر بتن [۱۷] و به‌عنوان جایگزین سیمان در بتن و ملات [۲۱-۱۸] اشاره کرد.

^۵ Alkali-Silica Reaction (ASR)^۶ Cement paste^۷ Concrete Cancer^۸ Stanton^۱ Refining^۲ Pathogen^۳ Mineral^۴ Greenhouse Gas

تقویت خواص آن با استفاده از پوزولان‌های طبیعی تراس و پومیس سنجیده شد. همچنین تأثیر ریزی خاکستر، در واکنش پوزولانی، مقاومت فشاری و کنترل واکنش قلیایی-سیلیسی بررسی شد. در صورت اثبات تأثیر این خاکستر در کنترل این واکنش، از سویی از لجن فاضلاب تولیدی به نحوی مناسب استفاده خواهد شد و از سوی دیگر از مصرف سیمان کاسته خواهد شد و همچنین این واکنش مخرب کنترل خواهد شد.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مشخصات مصالح مصرفی

لجن مورد نیاز در این پژوهش، از محل دپوی لجن تصفیه‌خانه فاضلاب جنوب شهر تهران تهیه شد که این لجن، ترکیبی از لجن‌های مرحله ته‌نشینی اولیه و ثانویه فرآیند تصفیه فاضلاب بوده است. پس از آن، لجن برداشت شده، به جهت تهیه خاکستر در گرمخانه با دمای ثابت ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت یک ساعت سوزانده شد.

از تراس جاجرود با بلین $6500 \text{ cm}^2/\text{gr}$ و وزن مخصوص $2/5 \text{ gr}/\text{cm}^3$ و پومیس خاش با بلین $4900 \text{ cm}^2/\text{gr}$ و وزن مخصوص $2/6 \text{ gr}/\text{cm}^3$ نیز به‌عنوان پوزولان‌های طبیعی استفاده شد. با توجه به داده‌های مرکز تحقیقات راه و مسکن و شهرسازی سنگ‌دانه‌های مورد نیاز، از معدنی واقع در شهر دامغان با وزن مخصوص $2/6 \text{ gr}/\text{cm}^3$ و جذب آب ۱/۷ درصد برداشت شد. به جهت انجام آزمایش تعیین شاخص فعالیت پوزولانی و مقاومت فشاری، از ماسه با وزن مخصوص $2/6 \text{ gr}/\text{cm}^3$ و جذب آب ۲/۴ درصد استفاده شد. همچنین از سیمان تپ دو ساوه با وزن مخصوص $3/15 \text{ gr}/\text{cm}^3$ استفاده شد. همچنین به منظور رسیدن به کارایی مناسب در طرح‌های اختلاط، از فوق‌روان‌کننده کربوکسیلاتی اتر استفاده شد. آنالیزهای XRF و XRD نیز به منظور شناسایی بهتر مصالح صورت پذیرفت که نتایج XRF در جدول ۱ و نتایج XRD در شکل ۱ ارائه شده است.

نتایج XRD نشان می‌دهند که خاکستر لجن فاضلاب از دو فاز اصلی کلسیت و کوارتز، تراس از آلپیت، پومیس از کوارتز و

پس از آن محققان زیادی بر روی استفاده از مواد مکمل سیمانی^۱ مانند پوزولان‌های طبیعی و مصنوعی در جهت کنترل واکنش قلیایی-سیلیسی پژوهش کردند [۳۶-۳۰]. نتایج حاکی از آن بود که استفاده از این مواد تأثیر بسزایی در کنترل این واکنش در هنگام استفاده از سنگ‌دانه واکنش‌زا دارد. اگرچه اکثر مواد مکمل سیمانی حاوی قلیا هستند و حتی ممکن است قلیای برخی از آن‌ها از قلیای موجود در سیمان مورد استفاده در بتن بیشتر باشد ولی اثر مثبت آن‌ها بر روی این واکنش، کاهش قلیای موجود در مایع حفره‌ای^۲ بتن با مصرف قلیاها است [۳۷].

در کشور ایران نیز با توجه به جغرافیای کشور و اقلیم‌های متفاوت آن و در نتیجه نیاز به سازه‌های ویژه مختلف مانند سدها، پل‌ها، سکوهای دریایی و اسکله‌ها، اهمیت توجه به سازه‌های بتنی با عمر مفید بالا الزامی می‌باشد و با توجه به اینکه در بسیاری از پروژه‌ها ممکن است مصالح در دسترس، مستعد واکنش‌زایی باشند، لزوم توجه به راهکارهای کنترل این واکنش در جهت افزایش عمر مفید سازه و استفاده از منابع نزدیک به پروژه‌ها، اهمیت پیدا می‌کند. برای نمونه می‌توان آزادراه تهران-شمال را نام برد که به جهت استفاده از روسازی بتنی، نیاز به مصالح سنگی در حجم بسیار بالا وجود داشت ولی منابع مصالح در اطراف پروژه به شدت مستعد واکنش‌زایی بودند [۳۸].

همانطور که بیان شد تحقیقات زیادی بر روی استفاده از لجن فاضلاب و خاکستر آن به عنوان مواد مکمل سیمانی صورت گرفته است ولی به صورت کلی در تأثیر این ماده بر روی دوام^۳ بتن تحقیقات اندکی صورت گرفته است، همچنین تا به امروز تحقیقی بر روی تأثیر خاکستر لجن فاضلاب بر روی واکنش قلیایی-سیلیسی انجام نشده است. با توجه به خواص مشاهده شده از خاکستر لجن فاضلاب در پژوهش‌ها، احتمال می‌رود که این خاکستر با مصرف قلیای موجود در خمیر سیمان، مانع از واکنش آن با سیلیس واکنش‌پذیر سنگ‌دانه‌ها شود و اثر مثبتی در کنترل این واکنش داشته باشد ولی لازم است که این موضوع مورد بررسی قرار گیرد. بدین جهت در این پژوهش، اثربخشی خاکستر لجن فاضلاب در کنترل واکنش قلیایی-سیلیسی و امکان‌سنجی

^۲ Durability

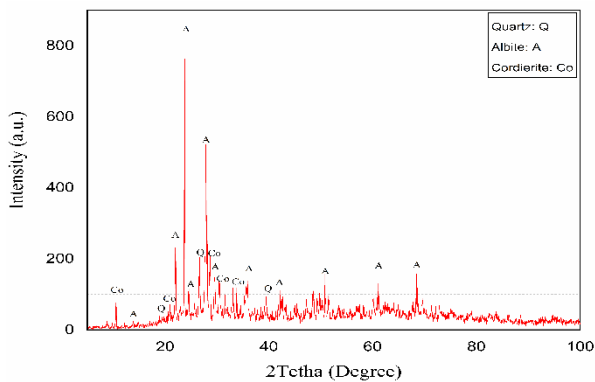
^۱ supplementary cementitious materials (SCMs)

^۲ Pore Solution

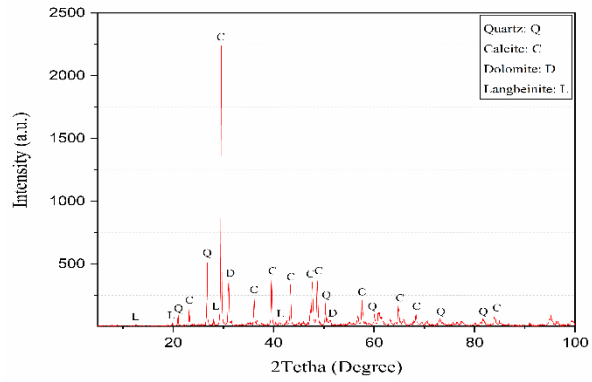
کلینوپتیلولیت و سنگ‌دانه مورد استفاده از کلسیت و کواتز تشکیل شده است.

جدول ۱- ترکیبات شیمیایی پوزولان‌ها و مواد مصرف شده در پژوهش

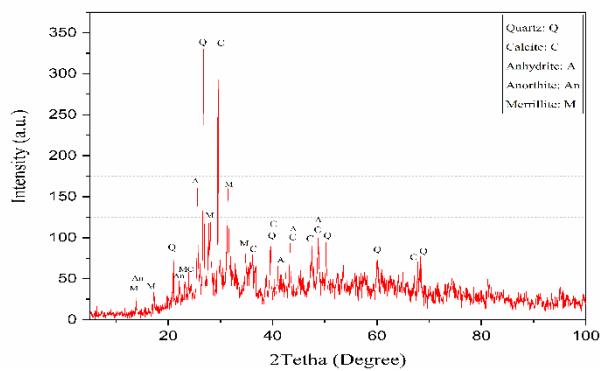
باقیمانده نامحلول	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	MgO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	SiO ₂	مواد مصرفی
۲/۵	۰/۵۲	۰/۳۵	۰/۲۱	۱/۸۹	۲/۱۲	۳/۲۳	۶۴/۱۰	۲۲/۹۱	سیمان
۷/۳	۲/۶۸	۱/۲۹	۱۱/۷۸	۴/۴۸	۳/۳۶	۸/۲۸	۲۲/۷۶	۳۳/۵۴	خاکستر لجن
۰/۲	۲/۱۰	۲/۹۳	۰/۱۰	۱/۳۹	۲/۰۴	۱۱/۷۱	۳/۸۱	۷۴/۵	تراس
۱/۱	۳/۳۵	۱/۸۰	۰/۰۹	۲/۱۹	۴/۷۳	۱۵/۲۰	۱۰/۶۴	۵۹/۴۴	پومیس
۳۱/۱	۰/۸۴	۰/۸۲	۰/۱۴	۰/۹۸	۱/۲۱	۳/۷۹	۳۹/۲۲	۲۰/۰۴	سنگ‌دانه



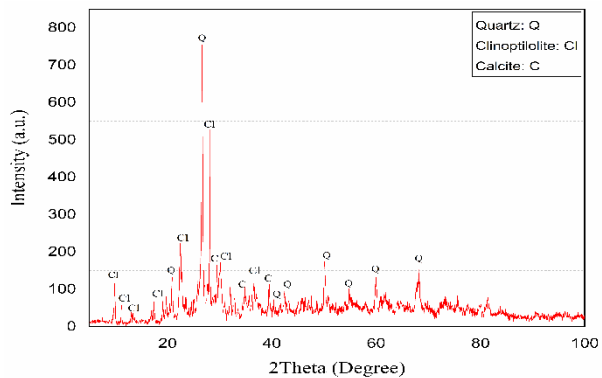
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۱- آنالیز XRD پوزولان‌ها و مواد مصرف شده، الف: سنگ‌دانه، ب: پومیس، ج: تراس، د: خاکستر لجن فاضلاب

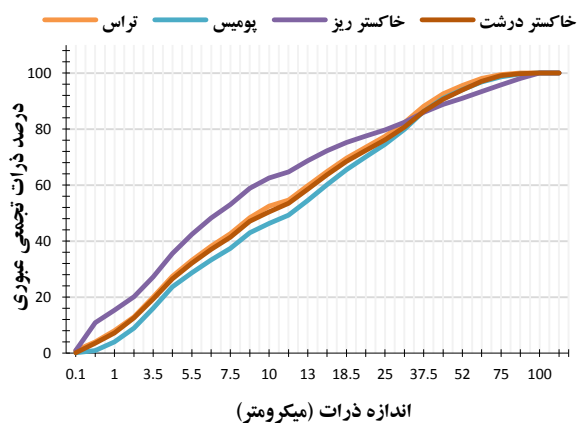
۲-۲- طرح کلی آزمایش‌ها

۱۱۰۰۰ cm²/gr، مجدداً آزمایش با درصدهای جایگزینی ۱۰، ۳۰ و

۵۰ انجام شد تا تاثیر ریزی خاکستر لجن فاضلاب در کنترل واکنش کلیایی-سیلیسی دیده شود. آزمایش تعیین شاخص فعالیت پوزولانی نیز برای خاکستر لجن فاضلاب، تراس و پومیس بر طبق استاندارد ASTM C311 [۴۱] انجام شد. پس از آن به جهت مشاهده اثر هم‌افزایی خاکستر و پوزولان‌های طبیعی، از ۵ درصد تراس به همراه ۱۰ و ۳۰ درصد خاکستر و از ۱۰ درصد پومیس به همراه ۱۰ و ۳۰

در این پژوهش ابتدا به جهت صحت‌سنجی و اطمینان از واکنش‌زایی سنگ‌دانه‌ها، از آزمایش ملات منشوری بر طبق استاندارد ASTM C1260 [۳۹] استفاده شد. پس از حصول اطمینان، ابتدا از خاکستر لجن فاضلاب با بلین ۴۹۰۰ cm²/gr و با درصدهای ۱۰، ۳۰ و ۵۰ به‌عنوان جایگزین سیمان و بر طبق استاندارد ASTM C1567 [۴۰] استفاده شد، پس از آن با افزایش نرمی خاکستر و رساندن به بلین

سنگ‌دانه‌ها، آزمایش ملات منشوری تسریع شده انجام شد. هدف از انجام این آزمایش تشخیص قابلیت واکنش‌زایی سنگ‌دانه‌ها در مدت ۱۶ روز می‌باشد که در طول این ۱۶ روز طول نمونه‌ها ثبت می‌شود.



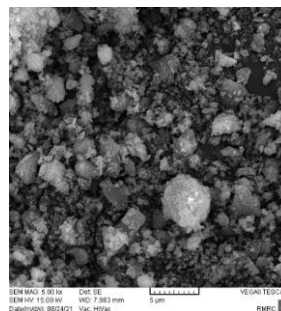
نمودار ۱- اندازه ذرات خاکستر لجن فاضلاب ریز، خاکستر لجن فاضلاب درشت، تراس و پومیس مورد استفاده

در حالت کلی قلیای موجود در سیمان یکی از عوامل تعیین کننده در این واکنش است، ولی در این آزمایش به دلیل اینکه نمونه‌های ساخته شده در محلول سدیم هیدروکسید قرار می‌گیرند، مقدار قلیای سیمان عاملی مؤثر نمی‌باشد. ملات مطابق با الزامات استاندارد ASTM C305 [۴۳] مخلوط و ۳ آزمون قالب‌گیری شد. در ادامه روند آزمایش باید تا سن ۱۴ روز نمونه‌ها، حداقل ۳ بار طول آن‌ها اندازه‌گیری شده و درصد انبساط محاسبه شود. پس از صحت سنجی واکنش‌زایی سنگ‌دانه‌ها و در مرحله دوم، از خاکستر لجن فاضلاب با بلین $4900 \text{ cm}^2/\text{gr}$ و با درصدهای ۱۰، ۳۰ و ۵۰ به عنوان جایگزین سیمان استفاده شد. روش انجام و طرح اختلاط این آزمایش کاملاً مشابه با آزمایش قبلی است تنها با این تفاوت که به جای مقدار سیمان بیان شده در استاندارد از درصدهای مختلف خاکستر لجن فاضلاب استفاده شد. سپس انبساط نمونه‌ها تا سن ۳۵ روز اندازه‌گیری و محاسبه شد. لازم به ذکر است که در نمونه‌های حاوی خاکستر لجن فاضلاب به منظور رسیدن کارایی ملات به کارایی طرح شاهد، به مقدار لازم از فوق‌روان‌کننده استفاده شد.

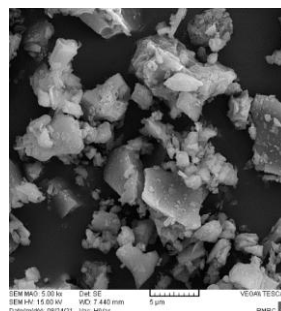
۲-۳-۲- آزمایش تعیین شاخص فعالیت پوزولانی

با توجه به نتایج به دست آمده از آزمایش ملات منشوری تسریع شده فاز اول و استفاده از خاکستر با بلین $4900 \text{ cm}^2/\text{gr}$ (خاکستر

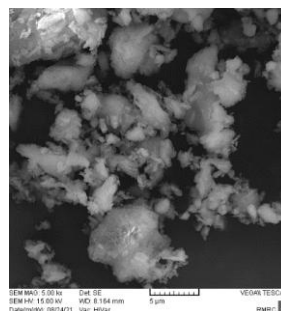
درصد خاکستر به صورت دو به دو استفاده شد. همچنین آزمایش مقاومت فشاری ملات با درصدهای خاکستر، تراس و پومیس استفاده شده در طرح‌های اختلاط پایانی، بر طبق استاندارد ASTM C109 [۴۲] انجام شد. همچنین با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از مورفولوژی پوزولان‌ها و ملات سخت شده به جهت مشاهده ژل قلیایی-سیلیسی عکس‌برداری شد و آنالیز نقطه‌ای (EDS) صورت گرفت. مورفولوژی پوزولان‌ها نیز در شکل ۲ تا ۴ نمایش داده شده است همچنین نمودار اندازه ذرات خاکستر لجن فاضلاب، تراس و پومیس در نمودار ۱ رسم شده است.



شکل ۲- مورفولوژی خاکستر لجن فاضلاب



شکل ۳- مورفولوژی پومیس



شکل ۴- مورفولوژی تراس

۲-۳-۳- طرح اختلاط، ساخت و عمل‌آوری نمونه‌ها

۲-۳-۱- آزمایش ملات منشوری ASTM C1260

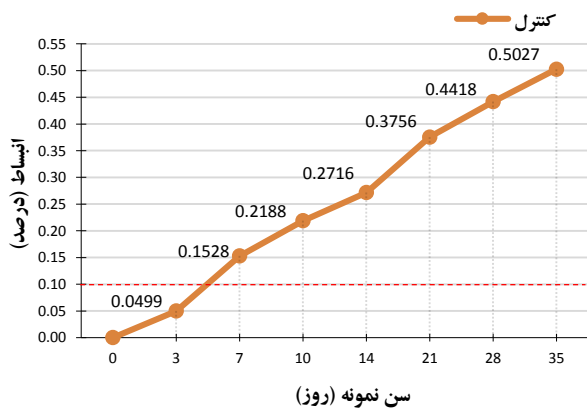
همانطور که بیان شد در ابتدا به جهت اطمینان از واکنش‌زایی

تمامی طرح‌های اختلاط ساخته شده، در جدول ۲ ارائه شده است.

۳- نتایج آزمایش‌ها و تحلیل داده‌ها

۳-۱- آزمایش ملات منشوری ASTM C1260

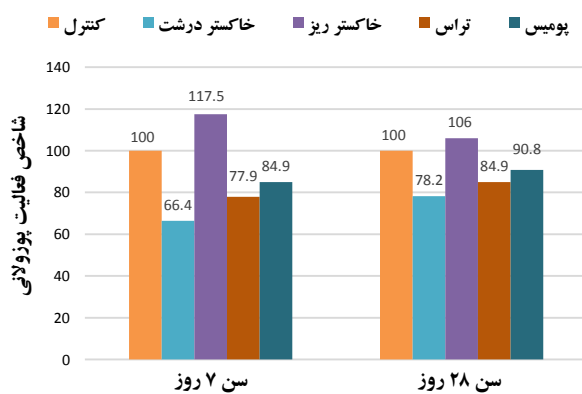
نتیجه انبساط ۳۵ روزه بر طبق استاندارد ASTM C1260 در نمودار ۲ ارائه شده است. همانطور که در نتایج مشاهده می‌شود، در سن ۷ روز، انبساط نمونه برابر با ۰/۱۵۲۸ درصد شده و از ۰/۱ درصد فراتر رفته است. انبساط بیش از ۰/۱ درصد بر طبق این استاندارد، نشان دهنده پتانسیل واکنش‌زایی سنگ‌دانه‌ها می‌باشد. البته سن معیار در این استاندارد، سن ۱۴ روز بوده که انبساط سنگ‌دانه‌های مورد استفاده در این سن، برابر با ۰/۲۷۱۶ درصد شده که نشان از پتانسیل واکنش‌زایی بالای سنگ‌دانه‌ها دارد.



نمودار ۲- نتایج انبساط ۳۵ روزه نمونه کنترل

۳-۲- آزمایش تعیین شاخص فعالیت پوزولانی

نتایج آزمایش تعیین شاخص پوزولانی برای خاکستر لجن فاضلاب درشت و ریز، تراس و پومیس به صورت شماتیک در نمودار ۳ رسم شده است.



نمودار ۳- نتایج آزمایش تعیین شاخص فعالیت پوزولانی

درشت)، تصمیم گرفته شد که با افزایش ریزی خاکستر لجن فاضلاب با دستگاه آسیاب گلوله‌ای و رساندن آن به بلین cm^2/gr ۱۱۰۰۰ (خاکستر ریز)، تغییر خواص آن سنجیده شود. بدین منظور و به جهت مقایسه فعالیت پوزولانی هر دو خاکستر و همچنین مقایسه آن‌ها با تراس و پومیس، آزمایش تعیین شاخص فعالیت پوزولانی بر طبق استاندارد ASTM C311 و قالب‌گیری نمونه-ها بر طبق استاندارد ASTM C109 صورت گرفت که از هر طرح ۶ آزمون ساخته شد.

۳-۳-۲- آزمایش ملات منشوری ASTM C1567

پس از انجام آزمایش تعیین شاخص فعالیت پوزولانی و مشاهده تأثیر بسیار زیاد ریز کردن خاکستر لجن فاضلاب در افزایش واکنش پوزولانی و مقاومت فشاری، در فاز دوم آزمایش ملات منشوری تسریع شده، از خاکستر لجن فاضلاب ریز با درصد‌های ۱۰، ۳۰ و ۵۰ به‌عنوان جایگزین سیمان و بر طبق استاندارد ASTM C1567 استفاده شد و آزمایش‌ها همانند روش قبل صورت گرفت. پس از مشاهده نتایج فاز دوم آزمایش‌ها، به منظور افزایش اثربخشی خاکستر لجن فاضلاب تصمیم بر آن شد که از دو پوزولان تراس جاجرود و پومیس اسکندان و ترکیب جداگانه این دو با خاکستر لجن فاضلاب بدین منظور استفاده شود. در این پژوهش برای صحت‌سنجی و ارزیابی تراس و پومیس مورد استفاده و با توجه به درصد‌های پیشنهاد شده در مقالات، در فاز سوم آزمایش‌ها، دو طرح اختلاط با ۲۰ درصد تراس و ۲۰ درصد پومیس ساخته شد و نتایج به منظور ادامه آزمایش‌ها گردآوری شد. در فاز چهارم و پایانی این پژوهش، از افزودن تراس و پومیس به خاکستر لجن فاضلاب به منظور تقویت خواص کنترلی آن در واکنش قلیایی-سیلیسی استفاده شد. همچنین از خاکستر لجن فاضلاب ریز به منظور اثربخشی نسبی بهتر با توجه نتایج فاز دوم استفاده شد. درصد‌های جایگزینی تراس و پومیس با توجه به نتایج فاز سوم و مقدار انبساط ۱۴ روزه آن‌ها به ترتیب ۵ و ۱۰ درصد انتخاب شد. همچنین به مقدار ۱۰ درصد و ۳۰ درصد از خاکستر لجن فاضلاب استفاده شد. دلیل انتخاب این درصد‌ها، داشتن درصد انبساط نمونه‌های حاوی ۱۰ و ۳۰ درصد خاکستر ریز و بدون استفاده از تراس و پومیس بود که بدین صورت تأثیر ۵ درصد تراس و ۱۰ درصد پومیس علاوه بر ۱۰ و ۳۰ درصد خاکستر نمایان می‌شد.

مقاومت مشاهده شده و در نهایت در سن ۲۸ روز مقاومت کسب شده اندکی بیشتر از نمونه کنترل بوده است. در مورد پوزولان تراس مشاهده می شود که با افزایش زمان عمل آوری مقاومت نیز افزایش پیدا کرده است ولی در نهایت در سن ۲۸ روز مقاومت کسب شده از نمونه کنترل کمتر است. در نمونه حاوی پوزولان پومیس نیز همانند تراس، در سنین اولیه مقاومت کمتر از نمونه کنترل بوده ولی با افزایش سن عمل آوری، مقاومت افزایش پیدا کرده است.

همانطور که مشاهده می شود در هنگام استفاده از خاکستر درشت با بلین $4900 \text{ cm}^2/\text{gr}$ در کوتاه مدت (سن ۷ روز) کاهش مقاومت زیادی نسبت به نمونه کنترل مشاهده می شود ولی با گذشت زمان در روند کسب مقاومت، افزایش مشاهده می شود ولی در نهایت و در سن ۲۸ روز مقاومت آن از نمونه کنترل کمتر است. با افزایش نرمی خاکستر و رساندن به بلین $11000 \text{ cm}^2/\text{gr}$ ، خاکستر مقاومت اولیه بالایی از خود نشان داده ولی با افزایش زمان عمل آوری کاهش

جدول ۲- طرح اختلاط تمامی آزمایش ها

نام طرح	C*	10S*	30S	50S	10FS*	30FS	50FS	20P*	20T*	5T10FS	5T30FS	10P10FS	10P30FS
توضیحات طرح	شاهد	۱۰٪ خاکستر درشت	۳۰٪ خاکستر درشت	۵۰٪ خاکستر درشت	۱۰٪ خاکستر ریز	۳۰٪ خاکستر ریز	۵۰٪ خاکستر ریز	۲۰٪ پومیس	۲۰٪ تراس	۵٪ تراس+ ۱۰٪ خاکستر ریز	۵٪ تراس+ ۳۰٪ خاکستر ریز	۱۰٪ پومیس+ ۱۰٪ خاکستر ریز	۱۰٪ پومیس+ ۳۰٪ خاکستر ریز
سنگ دانه (g)	۱۳۲۰	۱۳۲۰	۱۳۲۰	۱۳۲۰	۱۳۲۰	۱۳۲۰	۱۳۲۰	۱۳۲۰	۱۳۲۰	۱۳۲۰	۱۳۲۰	۱۳۲۰	۱۳۲۰
آب (ml)	۲۷۵	۲۷۵	۲۷۵	۲۷۵	۲۷۵	۲۷۵	۲۷۵	۲۷۵	۲۷۵	۲۷۵	۲۷۵	۲۷۵	۲۷۵
سیمان (g)	۵۷۷	۵۷۸/۳	۴۱۰/۹	۲۹۳/۵	۵۷۸/۳	۴۱۰/۹	۲۹۳/۵	۴۹۹/۶	۴۹۹/۶	۴۹۸/۵	۴۱۱/۵۵	۴۹۹/۶	۲۵۲/۲
خاکستر درشت (g)	-	۵۷۷	۱۷۶/۱	۲۹۳/۵	-	-	-	-	-	-	-	-	-
خاکستر ریز (g)	-	-	-	-	۵۷۷	۱۷۶/۱	۲۹۳/۵	-	-	-	-	-	-
تراس (g)	-	-	-	-	-	-	-	-	۱۱۷/۴	-	-	-	-
پومیس (g)	-	-	-	-	-	-	-	۱۱۷/۴	-	-	-	-	-

* C: Control, S: Sewage Sludge Ash, FS: Fine Sewage Sludge Ash, T: Trass, P: Pumice

درشت است. در مجموع بهترین عملکرد مربوط به خاکستر ریز و بدترین عملکرد مربوط به خاکستر درشت بود. همچنین عملکرد پومیس بهتر از تراس مشاهده شد. بر اساس استاندارد ASTM C618 [۴۴] پوزولان یک ماده سیلیسی یا سیلیسی-آلومیناتی^۱

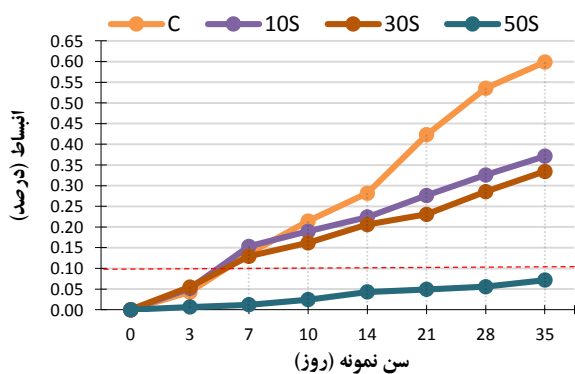
روند کسب مقاومت نیز افزایشی بوده و به نمونه کنترل نزدیک شده است. در بین پوزولان های آزمایش شده، بیشترین مقاومت در سنین ۷ و ۲۸ روز مربوط به خاکستر ریز بوده که از نمونه کنترل بیشتر است و کمترین مقاومت در سنین ۷ و ۲۸ مربوط به خاکستر

^۱ Siliceous-Aluminous

نمونه کنترل، نمونه 5T30FS است که حاوی ۵ درصد تراس و ۳۰ درصد خاکستر می‌باشد. با توجه به این موضوع که مقاومت فشاری در سن ۷ و ۲۸ روز نمونه 5T10FS بیشتر از نمونه 10P10FS است مشخص می‌شود که در درصد کم خاکستر (۱۰ درصد)، اثر هم‌افزایی تراس نسبت به پومیس در ترکیب با خاکستر بسیار بهتر بوده است، البته در سنین بالاتر، این اختلاف مقداری کمتر شده است ولی در نمونه 5T10FS، مقاومت فشاری در تمامی سنین از نمونه شاهد بیشتر است. در رابطه با مقدار بالاتر خاکستر (۳۰ درصد) نیز مشاهده می‌شود که مقاومت فشاری نمونه 5T30FS از نمونه 10P30FS بیشتر بوده که دوباره نشان از اثر هم‌افزایی مناسب تراس نسبت به پومیس دارد ولی هر دو نمونه مقاومتی کمتر از نمونه شاهد از خود نشان داده‌اند و البته اختلاف مقاومت آن‌ها نسبت به دو نمونه 5T10FS و 5T30FS کمتر می‌باشد.

۳-۴- آزمایش ملات منشوری ASTM C1567

نتایج آزمایش‌های فاز اول تا چهارم در جدول ۳ ارائه شده است، و نمودارهای ۵ تا ۸ نتایج هر فاز را نشان می‌دهند. همانطور که در نمودار ۵ مشاهده می‌شود تنها نمونه 50S که حاوی ۵۰ درصد خاکستر لجن فاضلاب درشت می‌باشد توانسته در سن ۱۴ روز انبساط مجاز داشته باشد که این انبساط حتی در سن ۳۵ روز نیز کمتر از حد مجاز بوده است. با استفاده از درصد‌های کمتر، انبساط‌های بیش از ۰/۱ درصد در سن ۱۴ روز مشاهده می‌شود. انبساط نمونه‌های 10S و 30S در سن ۷ روز از انبساط مجاز عبور کرده‌اند و در سن ۱۴ روز، به ترتیب به ۰/۱۸۸۹ و ۰/۱۲۹۲ درصد رسیده‌اند و مشاهده می‌شود که انبساط نمونه حاوی ۳۰ درصد خاکستر از نمونه حاوی ۱۰ درصد خاکستر کمتر بوده است.

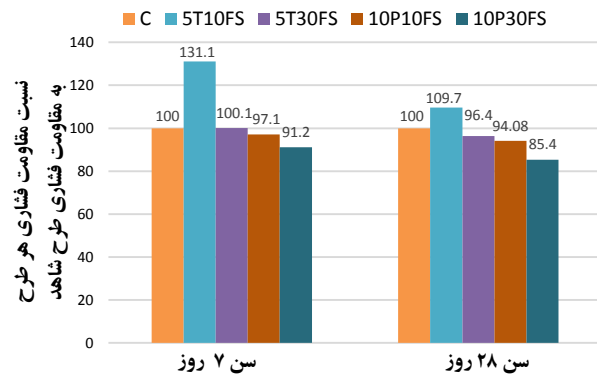


نمودار ۵- نتایج انقباض ۳۵ روزه فاز اول

است که باید مجموع اکسیدهای SiO_2 ، Al_2O_3 و Fe_2O_3 تشکیل دهنده آن بیش از ۷۰ درصد باشد. با توجه به جدول ۱ و شکل ۱ مشاهده می‌شود که خاکستر لجن فاضلاب یک ماده کلسیتی بوده و درصد زیادی از آن را آهک تشکیل داده است، پس بر اساس این استاندارد نمی‌توان خاکستر لجن را پوزولان نامید. خواص مشاهده شده از این خاکستر احتمالاً بیشتر مربوط به جنبه فیزیکی و پس از آن مربوط به خواص شبه سیمانی ناشی از وجود آهک در آن است.

۳-۳- آزمایش مقاومت فشاری

با توجه به نمودار ۴ که نسبت مقاومت فشاری هر ملات را نسبت به مقاومت فشاری نمونه شاهد نشان می‌دهد، مشاهده می‌شود که نمونه 10P30FS که از ۳۰ درصد خاکستر و ۱۰ درصد پومیس تشکیل شده است دارای کمترین مقاومت فشاری و نمونه 5T10FS که حاوی ۵ درصد تراس و ۱۰ درصد خاکستر است بیشترین مقاومت فشاری در سن ۲۸ روز را در بین مابقی طرح‌ها داشتند.

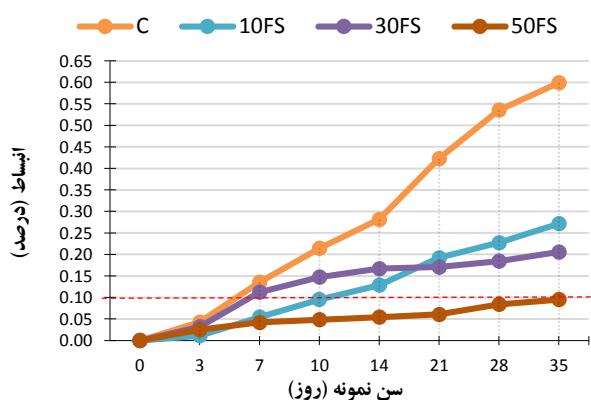


نمودار ۴- نتایج مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه ملات با درصد‌های جایگزینی فاز چهارم آزمایشات

با توجه به نتایج کسب شده از فاز چهارم که از ترکیب خاکستر با تراس و پومیس به جهت کنترل واکنش قلیایی-سیلیسی استفاده شده بود مشاهده شد که طرح‌های 5T30FS، 10P10FS و 10P30FS نتوانسته‌اند مانع از انبساط‌های غیرمجاز شوند، حال با توجه به نتایج مقاومت فشاری نمونه‌هایی که توانایی کنترل واکنش قلیایی-سیلیسی و حفظ تقریبی مقاومت فشاری نسبت به

جدول ۳- نتایج آزمایشات فاز اول تا چهارم بر طبق استاندارد ASTM C1567

درصد انبساط نمونه												
10P30FS	10P10FS	5T30FS	5T10FS	20T	20P	50FS	30FS	10FS	50S	30S	10S	C
سنگ نمونه شاهد	سنگ نمونه شاهد	سنگ نمونه شاهد	سنگ نمونه شاهد	سنگ نمونه شاهد	سنگ نمونه شاهد	سنگ نمونه شاهد	سنگ نمونه شاهد	سنگ نمونه شاهد	سنگ نمونه شاهد	سنگ نمونه شاهد	سنگ نمونه شاهد	سنگ نمونه شاهد
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳
۷	۷	۷	۷	۷	۷	۷	۷	۷	۷	۷	۷	۷
۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰
۱۴	۱۴	۱۴	۱۴	۱۴	۱۴	۱۴	۱۴	۱۴	۱۴	۱۴	۱۴	۱۴
۲۱	۲۱	۲۱	۲۱	۲۱	۲۱	۲۱	۲۱	۲۱	۲۱	۲۱	۲۱	۲۱
۲۸	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸	۲۸
۳۵	۳۵	۳۵	۳۵	۳۵	۳۵	۳۵	۳۵	۳۵	۳۵	۳۵	۳۵	۳۵

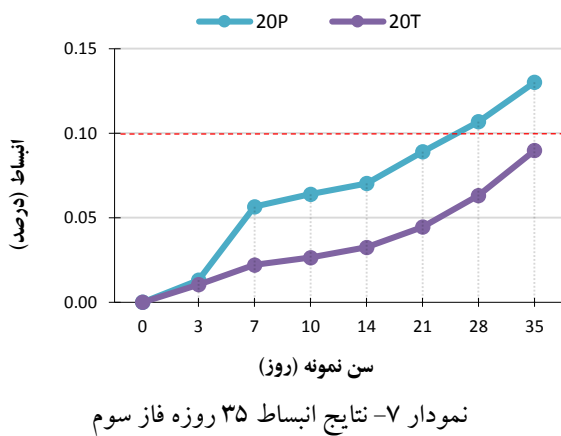


نمودار ۶- نتایج انبساط ۳۵ روزه فاز دوم

مقایسه استفاده از خاکستر لجن درشت و ریز که فاز اول و دوم آزمایش‌های را شامل می‌شوند در نمودارهای ۶-۱ تا ۶-۳ ارائه شده است. همانطور که در نمودارهای قیاسی مشاهده می‌شود

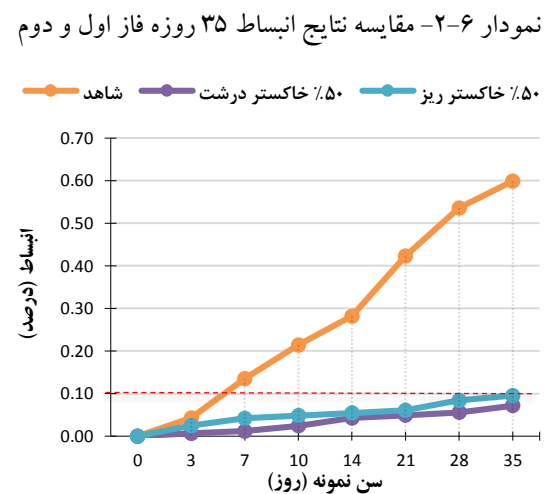
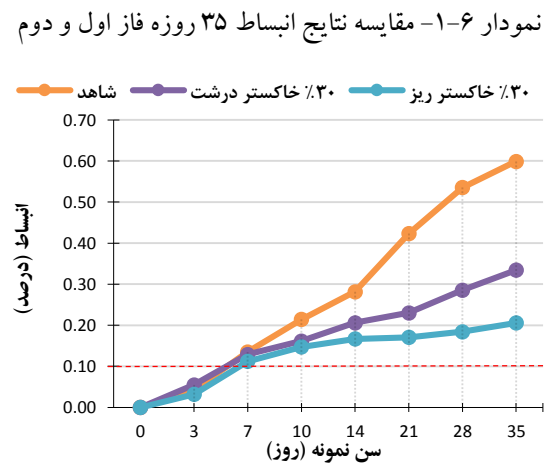
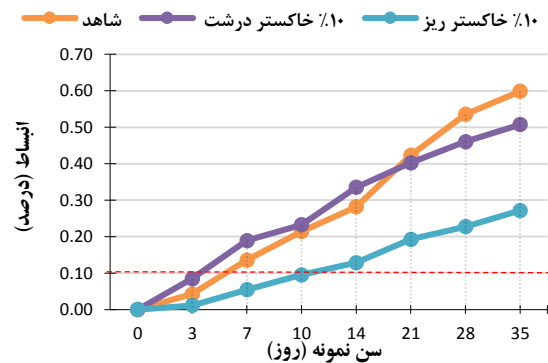
از نتایج به دست آمده در فاز دوم که در آن از خاکستر ریز استفاده شده بود، می‌توان مشاهده کرد که با استفاده از خاکستر لجن فاضلاب با نرمی بیشتر، باز هم تنها نمونه 50FS که حاوی ۵۰ درصد خاکستر ریز است توانسته انبساط ناشی از واکنش قلیایی-سیلیسی را در محدوده مجاز کنترل کند و حتی تا سن ۳۵ روز نیز انبساط مجاز مشاهده شد. ولی در نمونه‌های حاوی ۱۰ و ۳۰ درصد خاکستر، به ترتیب در سن ۱۴ و ۷ روز، انبساط‌ها از ۰/۱ درصد رد شدند. نکته قابل توجه این است که انبساط نمونه 30FS که حاوی ۳۰ درصد خاکستر است از انبساط نمونه 10FS که حاوی ۱۰ درصد خاکستر بوده تا سن ۱۴ روز بیشتر بوده ولی در سن ۲۱ روز انبساط آن کمتر شده است. نتایج این فاز در نمودار ۶ قابل مشاهده است.

همانطور که در نمودار ۷ مشاهده می‌شود ملات‌های حاوی ۲۰ درصد تراس و ۲۰ درصد پومیس به صورت کامل توانایی کنترل واکنش قلیایی-سیلیسی را از خود نشان داده‌اند. همچنین می‌توان مشاهده کرد که انبساط ملات حاوی تراس بسیار کمتر از ملات حاوی پومیس می‌باشد و به همین دلیل است که در فاز چهارم و پایانی آزمایش‌ها از ۵ درصد تراس و ۱۰ درصد پومیس به جهت مشاهده اثر هم‌افزایی به نمونه‌های حاوی ۱۰ و ۳۰ درصد خاکستر ریز افزوده شد. انبساط ۱۴ روزه نمونه حاوی ۲۰ درصد تراس و ۲۰ درصد پومیس به ترتیب ۰/۰۷۰۳ و ۰/۰۳۲۵ به دست آمد. همچنین نکته حائز اهمیت این است که انبساط ۱۴ روزه نمونه‌های حاوی ۵۰ درصد خاکستر ریز و درشت از انبساط ۱۴ روزه نمونه حاوی ۲۰ درصد پومیس کمتر و از نمونه حاوی ۲۰ درصد تراس بیشتر است.



نتایج فاز پایانی آزمایش‌ها در نمودار ۸ مشاهده می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که به صورت کلی با استفاده از دو پوزولان طبیعی تراس و پومیس، اثربخشی خاکستر لجن فاضلاب را در کنترل واکنش قلیایی-سیلیسی بهبود یافته به طوری که نمونه حاوی ۱۰ درصد پومیس و ۱۰ درصد خاکستر، نمونه حاوی ۱۰ درصد پومیس و ۳۰ درصد خاکستر و نمونه حاوی ۵ درصد تراس و ۳۰ درصد خاکستر، توانستند از انبساط‌های غیرمجاز جلوگیری کنند. افزودن ۵ درصد تراس به ملات حاوی ۱۰ درصد خاکستر باعث افزایش انبساط ملات شده ولی افزودن ۵ درصد تراس به ملات حاوی ۳۰ درصد باعث کاهش فاحش انبساط شده است. افزودن ۱۰ درصد تراس نیز به ملات حاوی ۱۰ و ۳۰ درصد خاکستر باعث کاهش انبساط شده است.

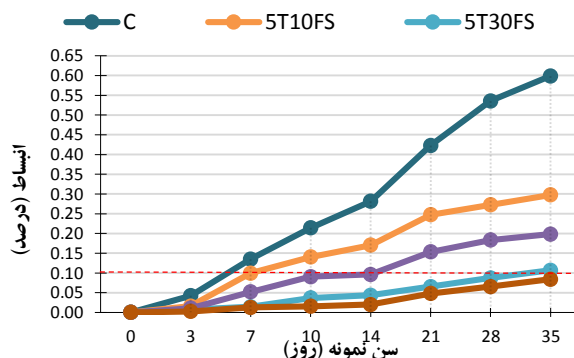
خاکستر ریز با درصد‌های جایگزینی ۱۰ و ۳۰، عملکرد بهتری در کنترل واکنش قلیایی-سیلیسی نسبت به خاکستر درشت نشان داده‌اند ولی در سن ۱۴ روز، انبساط هر دوی آن‌ها از حد مجاز فراتر رفته است در حالی که با درصد جایگزینی ۵۰، هر دو خاکستر توانسته‌اند انبساط را تا حد مجاز کاهش دهند. همچنین انبساط نمونه‌های حاوی این دو خاکستر بسیار به هم نزدیک بوده. ولی انبساط خاکستر درشت اندکی کمتر از خاکستر ریز مشاهده شده است.



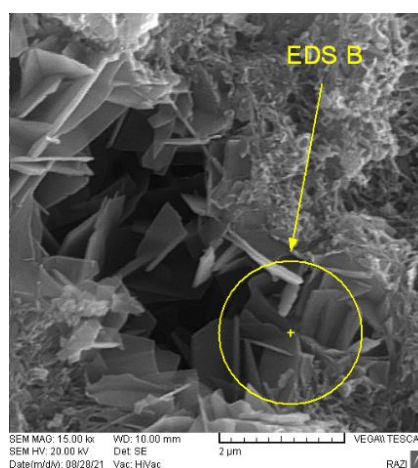
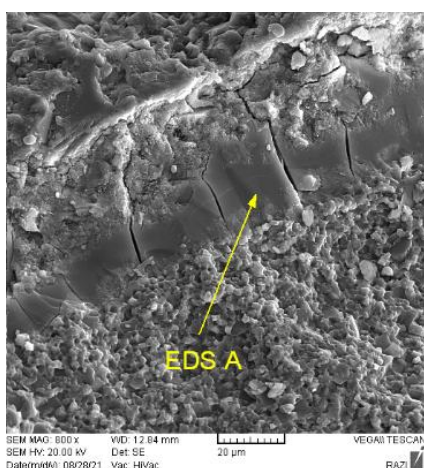
نمودار ۶-۳- مقایسه نتایج انقباض ۳۵ روزه فاز اول و دوم

۳-۵- آزمایش SEM, EDS, Map

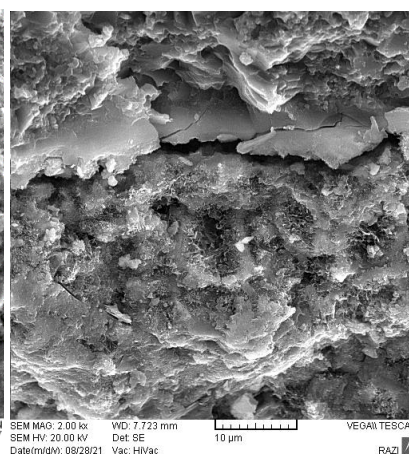
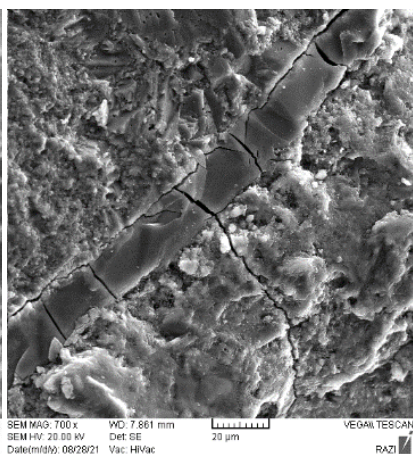
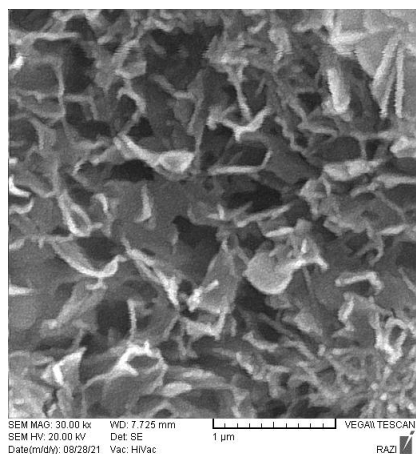
به جهت مشاهده ژل قلیایی-سیلیسی در ملات سخت شده در نمونه کنترل، از میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شد که در شکل ۱-۵ و ۲-۵ مشاهده می‌شود. همچنین از نقاط مشخص شده در عکس‌های SEM، آزمایش EDS (آنالیز نقطه‌ای) هم بر روی ژل آمورف و هم بر روی ژل کریستالی و آزمایش Map (آنالیز صفحه‌ای) بر روی ژل آمورف به منظور مشخص شدن ترکیبات آن انجام شد که در شکل‌های ۳-۵ و ۴-۵ قابل ملاحظه می‌باشد.



نمودار ۸- نتایج انسیط ۳۵ روزه فاز چهارم



شکل ۱-۵- SEM نمونه شاهد، ترک در مرز سنگ‌دانه و خمیر سیمان

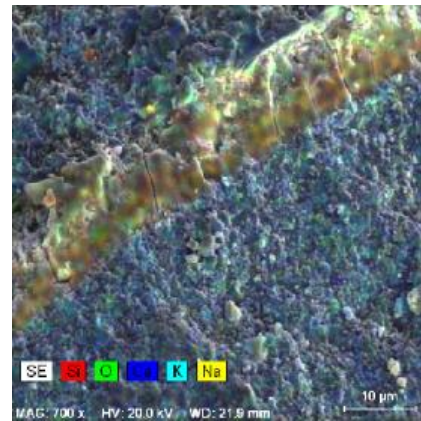


شکل ۲-۵- SEM نمونه شاهد، ترک داخل سنگدانه

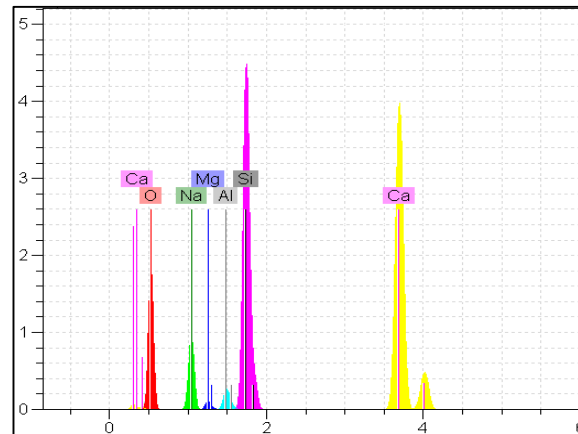
سنگ‌دانه تشکیل شده و با ایجاد فشار، باعث ترک خوردگی سنگ‌دانه و گسترش آن شده است و با بزرگ‌نمایی این عکس می‌توان فاز کریستالی ژل ASR را مشاهده کرد که به صورت گسترده در داخل سنگ‌دانه تشکیل شده است. در شکل ۴-۵، نتایج EDS نشان می‌دهد که بیشترین فاز تشکیل دهنده ژل قلیایی-سیلیسی آمورف و کریستالی، سیلیس و بعد از آن کلسیم است که

به صورت کلی، ژل ASR به دو صورت آمورف و کریستالی دیده می‌شود. در شکل ۱-۵ مشاهده می‌شود که در مرز سنگ‌دانه و خمیر سیمان، ژل قلیایی-سیلیسی آمورف تشکیل شده است که ظاهر آن دارای ترک خوردگی‌های بسیاری است. با بزرگ‌نمایی بر روی این ترک‌ها می‌توان فاز کریستالی این ژل را نیز مشاهده کرد. در شکل ۲-۵ مشاهده می‌شود که ژل قلیایی-سیلیسی داخل یک

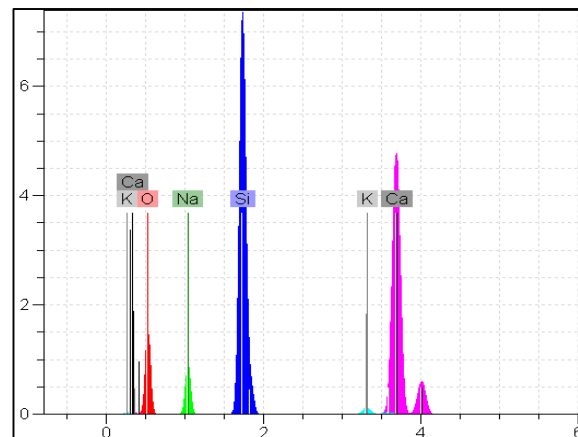
نتیجه آزمایش Map نیز این موضوع را صحنه می گذارد.



شکل ۳-۵- Map نمونه شاهد، ترک در مرز سنگ دانه و خمیر سیمان



EDS A



EDS B

شکل ۳-۵- EDS A و EDS B نمونه شاهد، ترک در مرز سنگ دانه و خمیر سیمان

خاکستر به عنوان جایگزین سیمان، انبساط‌های ناشی از این واکنش کنترل شدند.

- با افزایش نرمی خاکستر تأثیر ملموسی در کنترل واکنش قلیایی-سیلیسی مشاهده نشد.

- افزایش نرمی خاکستر تأثیر بسزایی بر شاخص فعالیت پوزولانی دارد به نحوی که در هنگام استفاده از خاکستر با بلین کمتر، مقاومت فشاری ۲۸ روزه کمتر از نمونه کنترل مشاهده شد در حالی که با استفاده از خاکستر با بلین بالاتر، مقاومت فشاری ۲۸ روزه بیشتر از نمونه شاهد مشاهده گردید.

- شاخص فعالیت پوزولانی تراس و پومیس به نسبت خاکستر با نرمی پایین، بیشتر بوده و از خاکستر با نرمی بالا عملکرد ضعیف-تری از خود نشان دادند.

- تراس و پومیس به عنوان دو پوزولان طبیعی که در پژوهش‌های گذشته اثربخشی بالقوه آن‌ها در کنترل واکنش قلیایی-سیلیسی مشاهده شده، تأثیر مثبتی بر خواص کنترلی خاکستر لجن فاضلاب در کنترل این واکنش از خود نشان دادند، به نحوی که با افزودن ۱۰ درصد پومیس به ۱۰ و ۳۰ درصد خاکستر، انبساط‌های ایجاد شده در سن ۱۴ به ترتیب ۲۵ و ۸۸ درصد کاهش و با افزودن ۵ درصد تراس به ۳۰ درصد خاکستر، انبساط ایجاد شده در سن ۱۴ روز را ۶۶ درصد کاهش داد به طوری که انبساط‌ها در محدوده مجاز قرار داشته و باعث کنترل واکنش قلیایی-سیلیسی شده است. ولی با این وجود، افزودن ۵ درصد تراس به ۱۰ درصد خاکستر باعث افزایش ۳۲ درصدی انبساط ۱۴ روزه شد.

- افزودن ۵ درصد تراس به ۱۰ درصد خاکستر ریز، باعث افزایش مقاومت فشاری آن در سن ۷ و ۲۸ روز نسبت به نمونه شاهد شد. افزودن ۵ درصد تراس به ۳۰ درصد خاکستر نیز باعث افزایش مقاومت فشاری نسبت به نمونه شاهد در سنین اولیه شد ولی در سنین بالاتر اندکی کمتر از آن مشاهده شد.

- افزودن ۱۰ درصد تراس به ۱۰ درصد خاکستر ریز، باعث کاهش مقاومت در سنین اولیه شد که روند کاهش در سنین بالاتر افزایش پیدا کرد. افزودن ۱۰ درصد تراس به ۳۰ درصد خاکستر نیز باعث کاهش مقاومت در تمامی سنین شد که روند کاهشی مقاومت در افزایش زمان عمل‌آوری مشاهده شد.

- به صورت کلی می‌توان بیان کرد که نمونه 5T30FS (حاوی ۵ درصد تراس و ۳۰ درصد خاکستر) از سویی واکنش قلیایی-

۴- نتیجه گیری

- خاکستر لجن فاضلاب دارای اثربخشی کمی در کنترل واکنش قلیایی-سیلیسی است به طوری که تنها با استفاده از ۵۰ درصد

(مشاور)، دانشکده مهندسی عمران دانشگاه فردوسی مشهد.

- [7] Werther J, Ogada T. Sewage sludge combustion. *Progress in energy and combustion science*. 1999 Feb 1;25(1):55-116.
- [8] Alleman JE, Berman NA. Constructive sludge management: biobrick. *Journal of Environmental Engineering*. 1984 Apr;110(2):301-11.
- [9] Tay JH. Bricks manufactured from sludge. *Journal of Environmental Engineering*. 1987 Apr;113(2):278-84.
- [10] Weng CH, Lin DF, Chiang PC. Utilization of sludge as brick materials. *Advances in environmental research*. 2003 May 1;7(3):679-85.
- [11] Al Sayed MH, Madany IM, Buali AR. Use of sewage sludge ash in asphaltic paving mixes in hot regions. *Construction and Building Materials*. 1995 Feb 1;9(1):19-23.
- [12] Endo H, Nagayoshi Y, Suzuki K. Production of glass ceramics from sewage sludge. *Water Science and Technology*. 1997 Jan 1;36(11):235-41.
- [13] Merino I, Arévalo LF, Romero F. Preparation and characterization of ceramic products by thermal treatment of sewage sludge ashes mixed with different additives. *Waste Management*. 2007 Jan 1;27(12):1829-44.
- [14] Tanaka H, Suzuki T, Yoshigae T, Takehana N. Producing crystallized slag from sewage sludge ash. *RESEARCH AND DEVELOPMENT-KOBE-*. 1993;43:17-17.
- [15] Bhatti JI, Reid KJ. Compressive strength of municipal sludge ash mortars. *Materials Journal*. 1989 Jul 1;86(4):394-400.
- [16] Tay JH, Yip WK, Show KY. Clay-blended sludge as lightweight aggregate concrete material. *Journal of Environmental Engineering*. 1991 Nov;117(6):834-44.
- [17] Tay JH. Sludge ash as filler for Portland cement concrete. *Journal of Environmental Engineering*. 1987 Apr;113(2):345-51.
- [18] Monzó J, Paya J, Borrachero MV, Córcoles A. Use of sewage sludge ash (SSA)-cement admixtures in mortars. *Cement and Concrete Research*. 1996 Sep 1;26(9):1389-98.
- [19] Garcés P, Carrión MP, García-Alcocel E, Payá J, Monzó J, Borrachero MV. Mechanical and physical properties of cement blended with sewage sludge ash. *Waste management*. 2008 Dec 1;28(12):2495-502.

[۲۰] ارشد ترابی، محمدامین؛ شهناز دانش و محمدرضا توکلی - زاده، ۱۳۹۳، اثر خاکستر لجن فاضلاب به عنوان ماده پوزولانی بر خواص مکانیکی بتن، سومین کنفرانس و نمایشگاه بین‌المللی صنعت سیمان، انرژی و محیط زیست، تهران، دانشگاه تهران.

سیلیسی را تا سن ۱۴ روز به صورت کامل کنترل کرده و از سوی دیگر مقاومت فشاری را در حدود مقاومت فشاری نمونه شاهد حفظ کرده است، بهترین طرح اختلاط ساخته شده در بین مابقی طرح‌ها است.

در مجموع می‌توان گفت که خاکستر لجن فاضلاب قابلیت استفاده در بتن به عنوان کنترل‌کننده واکنش قلیایی-سیلیسی را به صورت تنها نداشته و بهتر است از پوزولان‌های دیگر در ترکیب با آن به منظور بهبود خواص استفاده کرد. در صورت استفاده از این خاکستر، هم مقدار سیمان مصرفی و آلودگی‌های ناشی از تولید آن کاهش پیدا خواهد کرد، هم از لجن فاضلاب تولیدی در تصفیه‌خانه‌ها به نحوی مناسب استفاده خواهد شد و در نهایت از وقوع این واکنش مخرب در بتن که باعث آسیب دیدن بسیاری از سازه‌ها شده است، جلوگیری می‌شود.

۵- مراجع

- [۱] افشاری، سجاده؛ محمدجواد خانجانی و حبیبه قدسی، ۱۳۹۸، بررسی عملکرد تصفیه‌خانه‌ی فاضلاب، پنجمین همایش بین‌المللی مهندسی عمران، معماری و شهرسازی با رویکرد توسعه پایدار، شیراز، مرکز راهکارهای دستیابی به توسعه پایدار.
- [۲] تکدستان، افشین؛ علی اکبر عظیمی و علی ترابیان، ۱۳۸۵، بررسی میزان تولید لجن فاضلاب در ایران و روشهای کاهش تولید لجن در فرایندهای بیولوژیکی هوازی تصفیه فاضلاب، سومین همایش ملی بحرانهای زیست محیطی ایران و راهکارهای بهبود آنها، اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی - واحد علوم و تحقیقات مرکز اهواز.
- [3] Tchobanoglous G, Burton FL, Stensel HD. *Wastewater engineering. Management*. 1991;7:1-4.
- [4] Metcalf L, Eddy HP, Tchobanoglous G. *Wastewater engineering. Treatment, disposal, and reuse*. New York: McGraw-Hill; 1979.
- [5] Ciešlik BM, Namieśnik J, Konieczka P. Review of sewage sludge management: standards, regulations and analytical methods. *Journal of Cleaner Production*. 2015 Mar 1;90:1-5.
- [۶] ارشد ترابی، م. (۱۳۹۴)، "تأثیر کاربرد خاکستر لجن فاضلاب شهری به عنوان پوزولان جایگزین بخشی از سیمان بر ویژگی‌های فیزیکی، مکانیکی و پایایی بتن"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی محیط زیست، دانش، ش. (استاد راهنما)، توکلی‌زاده، م.

- دانشگاه تهران.
- [33] Barger GM, Hulshizer AJ, Popovics S, Call BM, Jaber TM, Prusinski J, Carrasquillo RL, Jensen JS, Ravina D, Cook JE, Jordan ES. Use of Raw or Processed Natural Pozzolans in Concrete.
- [34] Mohammadi, Afshin and Ghiasvand, Ebrahim, 1398, Effect of cement based products containing Trass on expansion due to alkali silica reaction (ASR), Eleventh National Congress on Civil Engineering, Shiraz
- [35] Gökçe HS, Şimşek O, Korkmaz S. Reduction of alkali-silica reaction expansion of mortars by utilisation of pozzolans. Magazine of concrete research. 2013 Apr;65(7):441-7.
- [36] Ramasamy U, Tikalsky P. Evaluation report of hess pumice. Concrete and Materials Research and Evaluation Laboratory Department of Civil and Environmental Engineering. The University of UTAH. 2012 Jun 11.
- [37] Thomas M. The effect of supplementary cementing materials on alkali-silica reaction: A review. Cement and concrete research. 2011 Dec 1;41(12):1224-31.
- [38] شیخی، عباس؛ مجتبی عسکری؛ مجید حیدری و علیرضا آسفی، ۱۳۹۸، ارائه برخی از تجربیات فنی و اجرایی بدست آمده از روسازی بتنی در منطقه یک آزادراه تهران شمال، سومین کنفرانس ملی رویه‌های بتنی، تهران.
- [39] ASTM C1260-21, Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2021.
- [40] ASTM C1567-21, Standard Test Method for Determining the Potential Alkali-Silica Reactivity of Combinations of Cementitious Materials and Aggregate (Accelerated Mortar-Bar Method), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2021.
- [41] ASTM C311 / C311M-18, Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use in Portland-Cement Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018.
- [42] ASTM C109 / C109M-21, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50 mm] Cube Specimens), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2021.
- [43] ASTM C305-20, Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020.
- [44] ASTM C618-19, Standard Specification for
- [21] Cyr M, Coutand M, Clastres P. Technological and environmental behavior of sewage sludge ash (SSA) in cement-based materials. Cement and Concrete Research. 2007 Aug 1;37(8):1278-89.
- [22] Tantawy MA, El-Roudi AM, Abdalla EM, Abdelzaher MA. Evaluation of the pozzolanic activity of sewage sludge ash. International Scholarly Research Notices. 2012;2012.
- [۲۳] نیک منش، امیرمهدی و رمضانپور، امیرمحمد و شکرچی زاده، محمد، ۱۳۹۸، بررسی اثر دمای حرارت دهی بر خواص خاکستر لجن فاضلاب (SSA) و امکان سنجی استفاده از آن در مصالح بتنی، یازدهمین کنفرانس ملی بتن، تهران
- [۲۴] پیدایش، منصور، ۱۳۸۴، بتن و تعامل آن با محیط زیست، دومین کنفرانس بین‌المللی بتن و توسعه، تهران، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن.
- [۲۵] شکرچی زاده، محمد، میرزایی، زانیار. آموزش مهندسی بتن و سیمان با رویکرد توسعه پایدار و حفظ محیط زیست. نشریه دانشکده فنی، ۱۳۸۸؛ ۴۳(۲).
- [۲۶] صفری، نیلوفر و مریم میرابی، ۱۳۹۵، بررسی و ارزیابی بتن-های سازگار با محیط زیست، سمینار ملی بتن‌های سازگار با محیط زیست.
- [27] Mehta PK, Monteiro PJ. Concrete microstructure, properties and materials. 2017.
- [28] Stanton TE. Influence of cement and aggregate on concrete expansion. Engineering News-Record. 1940 Feb 1.
- [29] Stanton TE. Expansion of concrete through reaction between cement and aggregate, Proc. Am. Soc. Civ. Eng. 66 (10) (1940) 1781-1811.
- [30] Shayan A, Diggins R, Ivanusec I. Effectiveness of fly ash in preventing deleterious expansion due to alkali-aggregate reaction in normal and steam-cured concrete. Cement and Concrete Research. 1996 Jan 1;26(1):153-64.
- [۳۱] حامدی راد، محمدمین و سیدسجاد میرولد، ۱۳۹۸، بررسی اثر سرباره ایران بر واکنش زایی قلیایی-سیلیسی سنگ‌دانه‌های بتن، یازدهمین کنفرانس ملی بتن، تهران- مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، انجمن بتن ایران.
- [۳۲] صدرممتازی، علی؛ امید علی‌دوست؛ نامی غفاریا و محراب پورنصیر، ۱۳۸۷، واکنش سیلیسی-قلیایی (ASR) در بتن حاوی سنگ‌دانه‌های شیشه‌ای و اثر پوزولان‌های مختلف بر میزان واکنش‌پذیری، چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، تهران،

Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019.

Studying the ability of sewage sludge ash in controlling alkali-silica reaction and its synergic behavior with natural pozzolans

Mohammad Javad Amirjani

MSc. Candidate, Faculty of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

Amir Mohammad Ramezaniyanpour *

Associate Professor, Faculty of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

Ali Maleki

MSc. Candidate, Faculty of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

Abstract

Sewage sludge is one of the byproducts of sewage treatment, which due to its pollutant components, should be managed properly. One of the common methods for this purpose is incineration. In recent decades, many studies have been done on using sewage sludge ash (SSA) as a supplementary cementitious material (SCMs) in concrete. On the other hand, one phenomenon leading to deterioration of concrete is alkali-silica reaction (ASR). An effective way to control this reaction is by using SCMs, that could prevent the formation of alkali-silica gel and expansion in concrete by consuming alkalis available in the cement paste. According to results of previous research on using SSA as an SCM, it is possible that it could prevent ASR in concrete by decreasing the alkali content. However, very few studies have been done on this issue. In this study, SSA was used as a replacement for cement at 10, 30 and 50% levels in order to assess its ability to control ASR. In addition, the effect of trass and pumice as natural pozzolans in improving resistance against ASR was investigated. The results revealed that only at 50% replacement level, SSA was able to control the ASR expansion in mortars. However adding 5% trass or 10% pumice improved this ability to a considerable extent.

Keywords: Alkali-Silica Reaction, Sewage Sludge Ash, Pozzolan, Durability.

* Corresponding Author: ramezaniyan@ut.ac.ir