

ارزیابی ویژگی‌های پوزولانی خاکستر لجن فاضلاب شهری بر اساس استاندارد ASTM C618

محمدامین ارشدترابی^۱، شهناز دانش^۲، محمدرضا توکلی‌زاده^۲

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران - محیط زیست دانشگاه فردوسی مشهد

۲- عضو هیئت علمی گروه مهندسی عمران دانشگاه فردوسی مشهد

چکیده:

انتخاب یک روش مناسب برای مدیریت لجن حاصل از تصفیه فاضلاب شهری با توجه به نوع منطقه و ملاحظات اقتصادی بسیار حایز اهمیت است. از جمله این روش‌ها که در بسیاری از کشورهای توسعه یافته نیز متداول است، سوزاندن لجن فاضلاب با هدف بازیابی انرژی است. ولی در این روش حدود یک سوم از مواد جامد لجن به شکل خاکستر باقی می‌ماند که دفع نهایی آن در محیط، مخاطرات زیست محیطی متعددی را به دنبال دارد. موضوع تحقیق حاضر، ارزیابی ویژگی‌های پوزولانی خاکستر لجن فاضلاب شهری است تا امکان استفاده از این خاکستر در تولید محصولات سیمانی (مانند ملات یا بتن) مورد بررسی قرار گیرد. در این ارتباط به بررسی ویژگی‌های فیزیکی (شامل نرمی ذرات، شاخص فعالیت پوزولانی، وزن مخصوص و مورفولوژی ذرات) و شیمیایی (شامل آزمایش XRF و افت حرارتی) خاکستر لجن پرداخته شد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که مورفولوژی نامنظم و سطح متخلخل ذرات خاکستر لجن سبب افزایش سطح مخصوص می‌گردد و این موضوع منجر به افزایش میزان جذب آب توسط این ذرات در مقایسه با سیمان پرتلند می‌شود. شاخص فعالیت پوزولانی اندازه‌گیری شده در سنین ۷ و ۲۸ روز به ترتیب ارقامی معادل ۷۹ و ۹۰ درصد را ارایه داد که الزامات استاندارد ASTM C618 را تامین می‌نماید. نتایج آنالیز شیمیایی نیز حاکی از آن بود که خاکستر لجن عمدتاً از اکسیدهای کلسیم، سیلیسیوم، آلومینیوم و آهن تشکیل شده است. به طور کلی نتایج این تحقیق دلالت بر آن دارد که رفتار خاکستر لجن به عنوان جایگزین سیمان، در محدوده بین مواد پوزولانی و پرکننده طبقه‌بندی می‌شود.

واژه های کلیدی : خاکستر لجن فاضلاب شهری، پوزولان، سیمان، ASTM C618.

۱- مقدمه

لجن نوعی محصول فرعی اجتناب ناپذیر است که در طی فرآیند تصفیه فاضلاب تولید می‌شود. دفع مستقیم لجن فاضلاب شهری به طبیعت، به دلیل دارا بودن مقادیر زیادی از پاتوژن‌ها، مواد شیمیایی، فلزات سنگین و نیز مواد آلی ناپایدار می‌تواند مسایل زیست محیطی حادی را به وجود آورد. متوسط تولید سرانه مواد جامد موجود در لجن فاضلاب، حدود ۳۵ تا ۸۵ گرم در روز گزارش شده است [۱]. بر این اساس برای شهری مانند مشهد با جمعیتی معادل سه میلیون نفر، اگر به طور کامل تحت پوشش شبکه جمع‌آوری و تصفیه فاضلاب قرار بگیرد، به طور متوسط روزانه ۱۸۰ تن لجن خشک تولید خواهد شد. بنابراین انتخاب یک استراتژی مناسب برای مدیریت لجن فاضلاب شهری با توجه به پتانسیل آن برای کاربری‌های مختلف، بسیار حایز اهمیت است. یکی از روش‌های استفاده مجدد از لجن فاضلاب، که در بسیاری از کشورهای توسعه یافته نیز متداول است، سوزاندن آن با هدف بازیابی انرژی می‌باشد. به عنوان مثال، میزان لجن سوزانده شده در کشورهای آلمان، فرانسه، آمریکا و ژاپن به ترتیب برابر ۱۴، ۲۰، ۲۵ و ۵۰ درصد از حجم لجن تولیدی است. با این حال، سوزاندن یک روش دفع کامل تلقی نمی‌شود زیرا که حدود ۳۰-۴۰ درصد از مواد جامد لجن به شکل خاکستر باقی می‌ماند که دفع نهایی آن در زمین مخاطرات زیست محیطی را به دنبال دارد [۲]. اگر برای این خاکسترها کاربری مناسبی یافت شود، دیگر نیازی به دفع نهایی آن نبوده و می‌توان اثرات زیست محیطی ناشی از تولید آن‌ها را کاهش داد. یکی از کاربری‌هایی که اخیراً مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته، استفاده از خاکستر لجن به عنوان ماده پوزولانی جایگزین بخشی از سیمان برای تولید مصالح ساختمانی است. کاربرد خاکستر لجن به عنوان یک ماده پوزولانی باید به نحوی انجام پذیرد که موجب کاهش ویژگی‌های فیزیکی، مکانیکی و پایایی محصولات مبتنی بر سیمان مانند ملات یا بتن نشود. پژوهش‌های انجام شده در این زمینه نشان می‌دهند که پارامترهایی نظیر درجه نرمی، مورفولوژی و ترکیبات شیمیایی موجود در خاکستر لجن از جمله عوامل مهمی به شمار می‌روند که می‌توانند بر استفاده یا عدم استفاده از این ماده به عنوان یک نوع پوزولان تاثیر گذار باشند [۳-۶]. فتوت و همکاران [۳] دریافتند که بالا بردن درجه حرارت و مدت زمان قرارگیری لجن در کوره، مقاومت فشاری طولانی مدت ملات حاوی خاکستر لجن را افزایش می‌دهد. مطالعه انجام شده توسط سیر و همکاران [۴] نشان داد که با جایگزینی خاکستر لجن، زمان‌های گیرش اولیه و نهایی افزایش می‌یابد. علاوه بر این مشخص گردیده که با افزایش درجه نرمی خاکستر لجن، مقاومت فشاری ملات سیمانی نیز افزایش می‌یابد [۵ و ۷]. یان و همکاران [۷] دریافتند که به ازای افزایش هر $100 \text{ m}^2/\text{kg}$ در درجه نرمی خاکستر لجن، مقاومت فشاری تقریباً پنج درصد افزایش می‌یابد.

تاکنون در ایران پژوهشی پیرامون بررسی اثر پوزولانی خاکستر لجن فاضلاب شهری انجام نشده است. لذا تحقیق حاضر با هدف شناسایی ویژگی‌های پوزولانی خاکستر لجن مطابق با استاندارد ASTM C618 و مقایسه این ویژگی‌های با پوزولان‌های رایج و پر کاربرد میکروسیلیس و متاکائولن انجام گردید و در این ارتباط ویژگی‌های فیزیکی (شامل شاخص فعالیت پوزولانی، آب مورد نیاز، نرمی، وزن مخصوص و مورفولوژی ذرات) و شیمیایی (شامل شناسایی ترکیب شیمیایی و میزان افت حرارتی) مورد بررسی قرار گرفت.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مصالح مصرفی

در این پژوهش از سیمان پرتلند، خاکستر لجن فاضلاب شهری، ماسه استاندارد و آب، با ویژگی‌هایی که در ادامه ذکر می‌شود، استفاده گردید.

ماسه استاندارد

بر اساس استاندارد ملی ایران، ماسه استاندارد، ماسه‌ای طبیعی، دارای ذرات گرد گوشه و عاری از ناخالصی‌های آلی با توزیع مشخصی از اندازه ذرات است که می‌بایست میزان سیلیس آن حداقل ۹۸ درصد باشد. در این پژوهش از ماسه استاندارد تولید شده در شرکت آزمون استفاده گردید که به میزان ۹۹/۵ درصد سیلیس داشت.

مواد سیمانی

مواد سیمانی به کار رفته در این تحقیق شامل سیمان پرتلند تیپ دو محصول شرکت زاوه تربت، میکروسیلیس محصول شرکت فرو سلیس ایران، متاکائولین محصول شرکت آسان سرام و خاکستر لجن فاضلاب شهری است. برای تولید خاکستر لجن از لجن‌های خشک شده بر روی بسترهای لجن خشک کن تصفیه خانه فاضلاب شهر بجنورد استفاده شد. این لجن‌ها در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد (به مدت ۵ ساعت) سوزانده شده و پس از سرد شدن در دسیکاتور، توسط آسیاب ساچمه‌ای پودر گردید. رطوبت لجن جمع آوری شده از روی بسترها برابر ۲۴ درصد و میزان مواد معدنی (ثابت) آن پس از احتراق برابر ۳۰ درصد بود.

آب

برای ساخت ملات و خمیر سیمان از آب مقطر و برای عمل آوری نمونه‌های مورد بررسی از آب شرب شهر مشهد استفاده شد. دمای آب مصرفی در محدوده ۲۸-۲۵ درجه سانتی‌گراد قرار داشت.

۲-۲- روش انجام آزمایش‌ها

تعیین مورفولوژی ذرات

از میکروسکوپ الکترونی روبشی^۱ برای مشاهده شکل ذرات تشکیل دهنده سیمان، میکروسیلیس، متاکائولین و خاکستر لجن فاضلاب استفاده گردید. آزمایش SEM در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه فردوسی مشهد و توسط دستگاهی با نام تجاری LEO 1450 VP انجام شد. نمونه مربوط به مواد پوزولانی قبل از انجام آزمایش به مدت دو دقیقه با استفاده از آلیاژ طلا- جیوه و توسط دستگاهی با نام تجاری SC7620 پوشش داده شد و سپس در آب دیونیزه شده، معلق گردید. همچنین برای دیونیزه کردن نمونه سیمان از محلول اتانول استفاده گردید. حداکثر ولتاژ اعمال شده در طول زمان انجام آزمایش SEM برابر ۳۵ کیلو ولت بود.

مقدار آب مورد نیاز

ملات مورد استفاده برای آزمایش شاخص فعالیت پوزولانی از یک قسمت وزنی سیمان و ۲/۷۵ قسمت وزنی ماسه استاندارد تشکیل شد. برای نمونه شاهد (نمونه فاقد مواد پوزولانی) از نسبت آب به سیمان برابر با ۰/۴۸۵ (معادل ۲۴۲ میلی لیتر آب) استفاده گردید. برای نمونه‌های حاوی انواع مختلف مواد پوزولانی، مقدار آب مخلوط به وسیله آزمایش سیلان تعیین شد [۸]. آزمایش سیلان برای هر یک از انواع مواد پوزولانی جایگزین سیمان، مطابق با استاندارد ASTM C230 انجام گردید [۹].

شاخص فعالیت پوزولانی

روش‌های متفاوتی برای ارزیابی فعالیت پوزولانی وجود دارد. این روش‌ها را می‌توان به دو دسته مستقیم و غیر مستقیم طبقه بندی کرد. در روش‌های مستقیم، تغییرات غلظت $Ca(OH)_2$ اندازه‌گیری می‌شود. در حالی که در روش‌های غیر مستقیم، خواص فیزیکی و مکانیکی ملات سیمان اندازه‌گیری می‌گردد. در این پژوهش، شاخص فعالیت پوزولانی مطابق با استاندارد ASTM C311 انجام شد [۸]. برای این منظور از سه آزمون مکعبی ۵۰ میلی‌متری در سنین ۷ و ۲۸ روزه استفاده گردید.

آنالیز شیمیایی

مواد سیمانی از جمله سیمان پرتلند را نمی‌توان توسط یک فرمول شیمیایی بیان نمود، زیرا هر نوع از این مواد، مخلوط پیچیده‌ای از تعدادی ترکیبات اصلی و ترکیبات فرعی هستند. با استفاده از روش XRF^۲ می‌توان درصد تقریبی هر یک از اکسیدهای کلسیم، سیلیسیم، آهن، آلومینیوم، منیزیم و گوگرد موجود در مواد سیمانی را به دست آورد. آنالیز شیمیایی سیمان در واحد کنترل کیفیت کارخانه سیمان زاوه تربت و آنالیز شیمیایی مواد پوزولانی (شامل میکروسیلیس، متاکائولین و خاکستر لجن فاضلاب) توسط دستگاه Axios Panalytical و در آزمایشگاه مقصود کاوان شرق انجام گردید.

نرمی مواد سیمانی

نرمی مواد سیمانی بر میزان آبگیری و گرمای آزاد شده اثر می‌گذارد. نرمی بیشتر، میزان آبگیری را افزایش می‌دهد و بنابراین روند رشد مقاومت را تسریع می‌کند. تاثیر نرمی سیمان بر مقاومت، اساسا در مدت هفت روز اول بروز می‌کند. در این پژوهش درجه نرمی مواد سیمانی به کمک آزمون نفوذ هوای بلین [۱۰] و روش جذب نیتروژن (BET^3) اندازه‌گیری شد. آزمایش بلین در واحد کنترل کیفیت کارخانه سیمان زاوه تربت و آزمایش BET توسط دستگاهی با نام تجاری Bel Belsorp mini II در آزمایشگاه

¹ Scanning Electron Microscope (SEM)

² X-ray Fluorescence (XRF)

³ Brunnauer, Emmett and Teller

فیزیک مواد جامد دانشگاه صنعتی شریف انجام شد. شایان ذکر است که نتایج حاصل از روش‌های مختلف، با هم قابل مقایسه نیستند.

سایر آزمایش‌ها

برای ارزیابی بهتر از رفتار پوزولانی خاکستر لجن فاضلاب شهری به عنوان پوزولان جایگزین سیمان و مقایسه آن با پوزولان‌های رایج میکروسیلیس و متاکائولین، آزمایش‌های تکمیلی نیز انجام گردید که در جدول شماره ۱ به صورت خلاصه ارائه شده است.

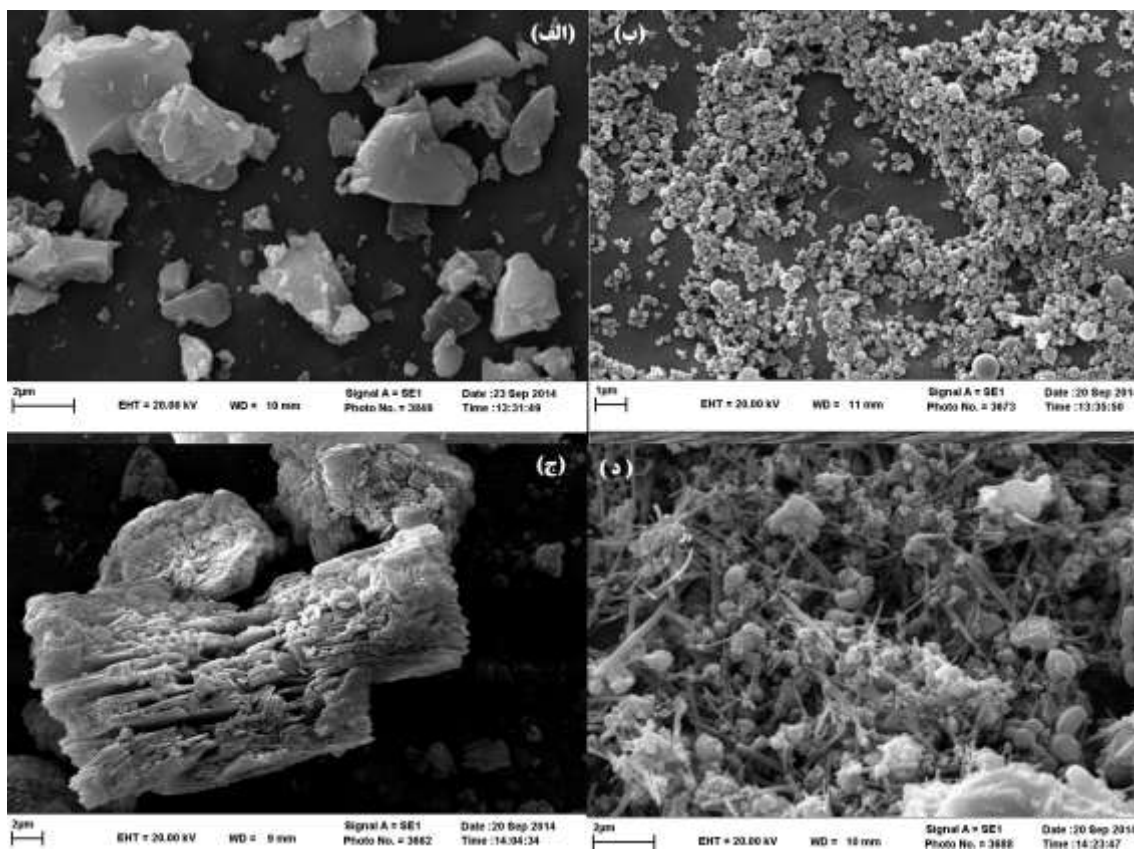
جدول ۱- روش‌های آزمایشگاهی به کار رفته برای ارزیابی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی

آزمایش	وزن مخصوص	افت وزنی سرخ شدن	باقی مانده الک ۴۵ میکرون	قطر متوسط
روش آزمایش / استاندارد	ASTM C188[11]	ASTM C114[12]	ASTM 311[9]	Laser Ab
شرکت / شناسه دستگاه	آزمون / CE171	آذر کوره 1200	آزمون	Shimadzu

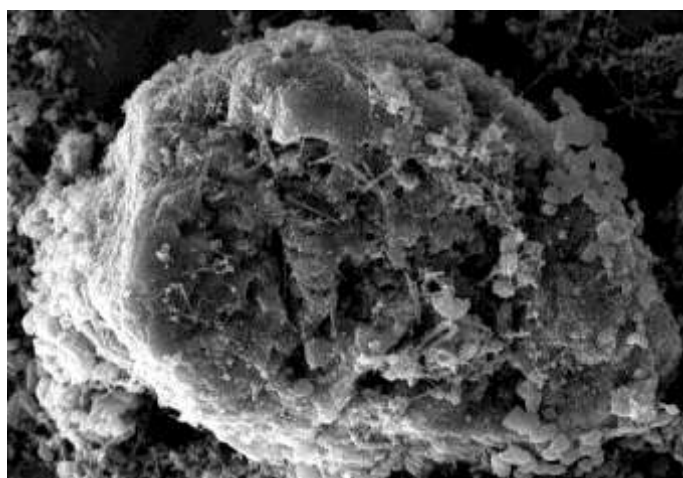
۳- نتایج و بحث

۳-۱- مورفولوژی ذرات

شکل ظاهری ذرات سیمان، میکروسیلیس، متاکائولین و خاکستر لجن فاضلاب شهری که با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی تهیه شده است، به ترتیب در شکل‌های الف-۱ تا د-۱ به تصویر در آمده است. همان گونه که در شکل الف-۱ می‌توان مشاهده کرد، ذرات سیمان از مواد معدنی تشکیل شده است که شکل هندسی منظمی دارند و سطح خارجی آن‌ها بدون تخلخل می‌باشد. شکل هندسی ذرات میکروسیلیس، کروی با سطح خارجی منظم (تصویر ب-۱) و ذرات متاکائولین به صورت ورقه‌ای با سطح خارجی منظم (تصویر ج-۱) است. این در حالی است که خاکستر لجن فاضلاب متشکل از ذرات نامنظمی است که در بیشتر موارد از تجمع ذرات کوچکتر تشکیل شده‌اند (شکل د-۱). این ذرات کوچکتر اغلب فاقد شکل هندسی مشخصی می‌باشند. در شکل ۲، تخلخل سطحی ذرات خاکستر لجن به وضوح قابل مشاهده است. این تخلخل باعث می‌شود تا درجه نرمی اندازه‌گیری شده به روش BET در مقایسه با روش بلین مقدار بیشتری را نشان دهد. مورفولوژی نامنظم ذرات خاکستر لجن فاضلاب مانع از ایجاد "اثر روغنی مانند" شده و می‌تواند در نسبت آب به مواد سیمانی ثابت، روانی مخلوط سیمانی حاوی خاکستر لجن را کاهش دهد. این در حالی است که کاهش روانی ملات سیمانی حاوی میکروسیلیس و متاکائولین بیشتر مربوط به سطح مخصوص بالای این ذرات است. نتایج آزمایش‌های انجام شده توسط پان و همکاران [۷] نشان می‌دهد که آسیاب کردن خاکستر لجن منجر به کاهش نامنظمی سطحی شده و ذرات به شکل کروی نزدیک می‌شوند اما تاثیری بر روی سطح مخصوص ذرات ندارد.



شکل ۱- مقایسه مورفولوژی سیمان، میکروسیلیس، متاکائولن و خاکستر لجن فاضلاب



شکل ۲- تخلخل سطحی موجود در ذرات خاکستر لجن

۳-۲- ترکیب شیمیایی

ترکیبات شیمیایی موجود در میکروسیلیس، متاکائولن و خاکستر لجن فاضلاب با استفاده از آزمایش XRF اندازه گیری شد. نتایج این اندازه گیری در جدول شماره ۲ ارائه گردیده است.

جدول ۲- مقایسه ترکیب شیمیایی پوزولان های میکروسیلیس، متاکائولن و خاکستر لجن فاضلاب (درصد)

MgO	MnO	TiO ₂	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	P ₂ O ₅	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	نوع پوزولان
-----	-----	------------------	------------------	-------------------	-----------------	-------------------------------	-----	--------------------------------	--------------------------------	------------------	-------------

میکروسیلیس	۹۶/۲	۱/۱	۰/۷	۰/۴	-	۰/۱	۰/۰۳	۰/۰۴	۰/۴	-	۰/۰۲
متاکائولین	۵۷/۲	۳۶/۶	۱/۸	۰/۳	-	۰/۰۴	۰/۰۲	۰/۰۵	۱/۶	۰/۰۳	۰/۷
خاکستر لجن	۲۹/۲	۷/۹	۴/۵	۳۷/۸	۱/۲	۳/۴	۱/۲	۱/۹	۰/۵	۰/۰۱	۳/۸

به طور کلی خاکستر لجن فاضلاب شهری ماده‌ای چند فازی است که از چندین ترکیب معدنی در فاز بلوری و نیز موادی در فاز آمورف تشکیل شده است. این در حالی است که بیشتر ذرات میکروسیلیس و متاکائولن در فاز آمورف قرار دارند. ترکیبات شیمیایی گزارش شده در جدول شماره ۲ نشان می‌دهد که خاکستر لجن فاضلاب عمدتاً از اکسیدهای کلسیم، سیلیسیوم، آلومینیوم و آهن تشکیل شده است. همچنین می‌توان مشاهده کرد که مقدار SiO_2 ، Al_2O_3 و Fe_2O_3 موجود در خاکستر لجن در مقایسه با سایر پوزولان‌ها شناخته شده مانند میکروسیلیس و متاکائولن بسیار کمتر است. بر اساس استاندارد ASTM C618، مجموع اکسیدهای سیلیسیوم، آلومینیوم و آهن برای انواع رده بندی مواد پوزولانی، باید بیشتر از ۷۰ درصد باشد [۱۳] که این مجموع برای پوزولان‌های میکروسیلیس و متاکائولن به ترتیب برابر ۹۸ و ۹۶/۶ درصد می‌باشد. این در حالی است که مجموع این اکسیدها در خاکستر لجن مورد استفاده در این پژوهش کمتر از ۵۰ درصد است و نمی‌تواند الزامات استاندارد ASTM C618 را تامین نماید. با این حال، مقدار CaO موجود در خاکستر لجن (۳۷/۸ درصد) در مقایسه با میکروسیلیس (۰/۴ درصد) و متاکائولین (۰/۳ درصد) بسیار بیشتر است. چنانچه کلسیم در فاز بلوری باشد، مانند آن چه در سیمان پرتلند و سرباره کوره‌های آهن گدازی وجود دارد، می‌تواند ویژگی‌های هیدرولیکی از خود نشان دهد. ولی از آن جایی که خاکستر لجن فاقد ویژگی‌های هیدرولیکی است، می‌توان چنین نتیجه گرفت که تمام یا بخش زیادی از CaO موجود در خاکستر لجن به شکل غیر بلوری است. بر اساس استاندارد ASTM C618 حداکثر میزان SO_3 در مواد پوزولانی رده N برابر ۴ درصد و مواد پوزولانی رده C و F برابر ۵ درصد می‌باشد. با توجه به نتایج ارائه شده در جدول شماره ۲ میزان اکسید گوگرد موجود در خاکستر لجن در مقایسه با بیشینه مجاز ارائه شده برای تمام رده بندی مواد پوزولانی کمتر بوده و از این لحاظ الزامات استاندارد ASTM C618 را تامین می‌نماید. میزان قلیابیت کل که بر اساس استاندارد ASTM C311 برابر است با $Na_2O + 0.658 K_2O$ ، در خاکستر لجن فاضلاب (۲/۵ درصد) در مقایسه با میکروسیلیس (۰/۰۶ درصد) و متاکالوین (۰/۰۵ درصد) نیز بسیار بیشتر است. افزایش مقدار کل قلیابیت در خاکستر لجن احتمالاً به دلیل میزان و نوع املاحی است که در فاضلاب وجود داشته، یا در فرآیند تصفیه فاضلاب به کار رفته و یا اینکه در مسیر جمع آوری فاضلاب توسط فاضلاب‌های خاصی (مانند فاضلاب صنایع کوچک) به شبکه ورود پیدا کرده است. قلیابیت موجود در مواد سیمانی باید کنترل شود، زیرا طی استفاده به همراه سنگدانه‌های سیلیسی فعال در بتن می‌تواند باعث انبساط مخرب شوند. بیشینه مجاز ارائه شده در استاندارد ASTM C311 برای مواد سیمانی برابر ۰/۶ درصد است. بنابراین به دلیل وجود مقادیر قابل توجهی از ترکیبات قلیابی در خاکستر لجن، میزان جایگزینی آن به جای سیمان باید محدود گردد. جدول شماره ۳ مقایسه ترکیبات شیمیایی موجود در خاکستر لجن فاضلاب و سیمان پرتلند را نمایش می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌گردد، ترکیب شیمیایی خاکستر لجن شباهت زیادی با ترکیب سیمان پرتلند تپ دو دارد. بر این اساس می‌توان چنین استنباط نمود که اگرچه به لحاظ ترکیبات شیمیایی نمی‌توان خاکستر لجن را به عنوان یکی از انواع مواد پوزولانی طبقه بندی نمود اما می‌توان از این خاکستر به عنوان ماده اولیه تولید سیمان پرتلند استفاده کرد. لازم به ذکر است که مقدار بیشتر برخی از مواد مانند سولفات در ترکیب شیمیایی خاکستر لجن در مقایسه با سیمان، می‌تواند استفاده از این خاکستر را برای تولید سیمان پرتلند با محدودیت مواجه نماید که اثبات این امر نیاز به انجام مطالعات بیشتر دارد.

جدول ۳- مقایسه ترکیبات شیمیایی سیمان پرتلند تپ دو و خاکستر لجن فاضلاب

ترکیب شیمیایی (درصد)	P_2O_5	Na_2O	K_2O	SO_3	MgO	CaO	Fe_2O_3	Al_2O_3	SiO_2
سیمان	-	۰/۳۳	۰/۴۵	۱/۵۶	۲/۶۶	۶۳/۶۲	۳/۹۹	۵/۰۷	۲۰/۸۶
خاکستر لجن	۱/۲	۱/۲	۱/۹	۳/۴	۳/۸	۳۷/۸	۴/۵	۷/۹	۲۹/۲

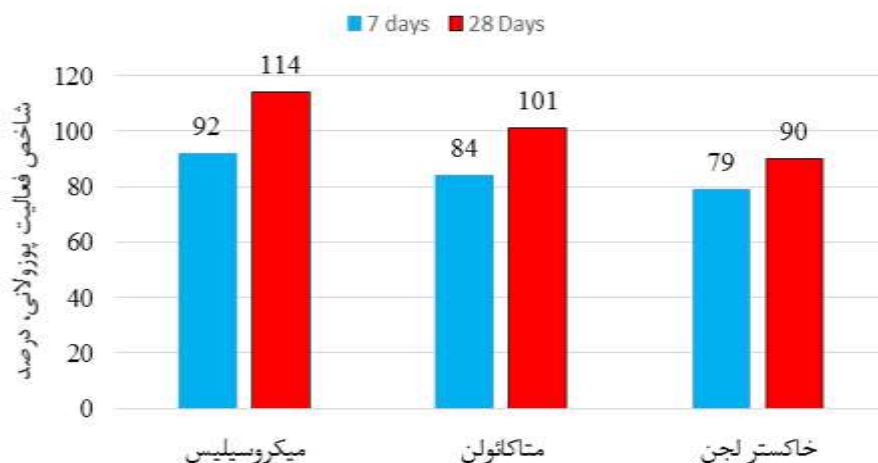
مقدار آب مصرفی برای ساخت ملات سیمان با روانی سیلان برابر با 110 ± 5 درصد در مقایسه با ملات سیمان شاهد (ملات بدون مواد پوزولانی) و نیز میزان آب مورد نیاز برای انواع مواد پوزولانی مورد بررسی در این پژوهش در جدول شماره ۴ ارائه شده است. بر اساس استاندارد ASTM C618 بیشینه مجاز برای میزان آب مصرفی برای پوزولان‌های رده N برابر ۱۱۵ درصد و برای پوزولان‌های رده F و C برابر ۱۰۵ درصد می‌باشد. براساس نتایج به دست آمده (جدول شماره ۴)، می‌توان مشاهده کرد که اگرچه میزان آب مصرفی برای ملات حاوی خاکستر لجن در مقایسه با میکروسیلیس و متاکائولین بیشتر است اما الزامات مربوط به بیشینه مجاز مواد پوزولانی رده N را تامین می‌نماید. افزایش میزان آب مصرفی ملات حاوی خاکستر لجن فاضلاب در مقایسه با ملات حاوی میکروسیلیس و متاکالوئین را می‌توان به سطح زبر و تخلخل سطحی ذرات خاکستر لجن نسبت داد.

جدول ۴- مقایسه میزان آب مصرفی برای مواد پوزولانی مختلف

ماده پوزولانی	میکروسیلیس	متاکائولین	خاکستر لجن فاضلاب
آب مصرفی (گرم)	۲۵۴	۲۳۷	۲۷۶
میزان آب مورد نیاز (درصد)	۱۰۵	۹۸	۱۱۴

۳-۳- شاخص فعالیت پوزولانی

از رایج‌ترین روش‌های اندازه‌گیری درصد فعالیت پوزولانی، مقایسه مقاومت فشاری است. مطابق با استاندارد ASTM C618، چنانچه نسبت مقاومت فشاری ملات حاوی ۲۰ درصد (وزنی) پوزولان به مقاومت فشاری ملات شاهد، حداقل برابر ۷۵ درصد باشد، نشان دهنده عملکرد مطلوب ماده پوزولانی است. در شکل شماره ۳ درصد فعالیت پوزولانی نمونه‌ها در سنین ۷ و ۲۸ روز بر اساس مقایسه مقاومت فشاری ارائه شده است. با توجه به بیشتر بودن درصد فعالیت پوزولانی در سنین ۷ و ۲۸ روز، در مقایسه با حداقل مقدار ارائه شده در استاندارد ASTM C618، به نظر می‌رسد که استفاده از خاکستر لجن تصفیه خانه فاضلاب شهری به عنوان ماده‌ای با ویژگی‌های پوزولانی در تولید محصولات سیمانی (مانند ملات یا بتن) امکان پذیر باشد. با این حال نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که شاخص فعالیت پوزولانی خاکستر لجن در مقایسه با میکروسیلیس و متاکائولن بسیار کمتر است. به طوری که پس از گذشت ۲۸ روز از سن عمل آوری، مقاومت فشاری ملات حاوی ۲۰ درصد خاکستر لجن همچنان کمتر از نمونه شاهد است. علت کمتر بودن شاخص فعالیت پوزولانی خاکستر لجن در مقایسه با میکروسیلیس و متاکائولن را می‌توان به کمتر بودن اکسید سیلیسوم موجود در خاکستر لجن و نیز سطح متخلخل و زبر ذرات خاکستر لجن نسبت داد. کاهش اکسید سیلیسیوم منجر به کاهش تولید ژل‌های سیلیکاته شده و از سوی دیگر افزایش تخلخل سطحی ذرات منجر به افزایش جذب آب در سطح ذرات و کاهش تولید محصولات هیدراتاسیون می‌گردد. علاوه بر آن، وجود فلزات سنگین در ترکیب شیمیایی خاکستر لجن نیز می‌تواند از علل کاهش فعالیت پوزولانی به شمار رود. وجود این گونه عناصر می‌تواند زمان‌های گیرش سیمان را به تاخیر بیاندارد.



شکل ۳- مقایسه شاخص فعالیت پوزولانی میکروسیلیس، متاکائولن و خاکستر لجن

۳-۳- سایر ویژگی‌ها

به منظور مقایسه بهتر، سایر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی مواد سیمانی (شامل سیمان پرتلند تپ دو، میکروسیلیس، متاکائولن و خاکستر لجن فاضلاب) در جدول شماره ۵ آورده شده است.

جدول ۵- مقایسه سایر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی مواد سیمانی

ویژگی	واحد	سیمان	میکروسیلیس	متاکائولن	خاکستر لجن
وزن مخصوص	-	۳/۱۵	۲/۲۷	۲/۳۹	۲/۵۸
LOI	%	۱/۵	۱/۱	۱/۷	۵/۰
سطح مخصوص (روش Blain)	m ² /kg	۳۲۰	۳۳۰۰	۹۱۶	۶۱۸
سطح مخصوص (روش BET)	m ² /kg	*	۲۰۹۰۰	۱۶۸۰۰	۱۸۱۵۶
باقی مانده روی الک ۴۵ میکرون	%	۵/۵	۳/۷	۶/۵	۱۸/۳
قطر متوسط ذرات	μm	۸۰	۰/۱۳	۲۷	۸/۵

مقدار LOI خاکستر لجن مورد آزمایش در این پژوهش (۵ درصد)، در مقایسه با مقادیر به دست آمده برای سیمان، میکروسیلیس و متاکائولن بیشتر است. افزایش مقدار LOI را می‌توان به وجود ترکیبات حاوی کربنات‌ها و بی‌کربنات‌ها در خاکستر لجن نسبت داد. بر اساس استاندارد ASTM C618 بیشینه مقدار افت حرارتی برای مواد پوزولانی رده‌ی N برابر ۱۰ درصد و برای مواد پوزولانی رده F و C برابر ۶ درصد است. بنابراین مقدار LOI خاکستر لجن فاضلاب اگرچه در مقایسه با سیمان، میکروسیلیس و متاکائولین بیشتر است، با این حال نیازمندی‌های استاندارد ASTM C618 را تامین می‌نماید. همان‌طور که در بخش‌های قبلی نیز بیان گردید، در این پژوهش، درجه نرمی مواد پوزولانی با استفاده از دو روش نفوذ هوای بلین و جذب نیتروژن (BET) اندازه‌گیری شد. درجه نرمی خاکستر لجن بر اساس روش‌های بلین و BET به ترتیب برابر ۶۱۸ و ۱۸۱۵۶ متر مربع بر کیلوگرم به دست آمد. مقدار نرمی بیشتر به دست آمده در روش BET می‌تواند به مورفولوژی نامنظم و سطح متخلخل ذرات خاکستر لجن مربوط باشد. زیرا در روش بلین، ذرات کروی و مسطح فرض می‌گردند در حالی که در روش BET، سطح مخصوص ذرات بر اساس شکل واقعی و میزان تخلخل سطحی به دست می‌آید. همان‌طور که در جدول شماره ۵ نیز مشاهده می‌شود، درجه نرمی خاکستر لجن (۶۱۸ مترمربع بر کیلوگرم) به مراتب بیشتر از درجه نرمی سیمان پرتلند تپ دو (۳۱۵ مترمربع بر کیلوگرم) است و همین موضوع باعث می‌شود تا با جایگزینی خاکستر لجن به جای سیمان، سطح مخصوص و به تبع آن میزان جذب آب خمیر سیمانی افزایش یابد. این موضوع باعث می‌شود تا میزان آب مورد نیاز برای رسیدن به یک روانی (سیلان) مشخص افزایش یابد.

۴- نتیجه گیری

مهمترین نتایج حاصل از این پژوهش را می‌توان به صورت ذیل خلاصه نمود:

- ۱) خاکستر لجن فاضلاب از ذرات نامنظمی تشکیل شده است که سطح خارجی ذرات آن در مقایسه با سیمان پرتلند، میکروسیلیس و متاکائولین از تخلخل و زبری بیشتری برخوردار است.
- ۲) وجود اکسیدهای سیلیسیوم، آلومینیوم و آهن در ترکیب شیمیایی خاکستر لجن فاضلاب شهری، کاربرد این خاکستر را به عنوان ماده‌ای با خواص پوزولانی امکان پذیر می‌نماید. با این حال، بیشتر بودن میزان ترکیبات قلیایی، گوگرد، فسفر و روی در خاکستر لجن در مقایسه با سیمان پرتلند و سایر پوزولان‌ها، یکی از چالش‌های پیش رو برای استفاده از خاکستر لجن به عنوان پوزولان جایگزین سیمان می‌باشد.

- ۳) اگرچه میزان اکسیدهای سیلیسیوم، آلومینیوم و آهن موجود در خاکستر لجن در مقایسه با میکروسیلیس و متاکائولن کمتر بوده و الزامات استاندارد ASTM C618 را تامین نمی‌کند، اما ترکیب شیمیایی خاکستر لجن شباهت زیادی به سیمان پرتلند تیپ دو دارد و در نتیجه شاید بتوان از خاکستر لجن در فرآیند تولید این نوع سیمان استفاده نمود.
- ۴) تخلخل سطحی بیشتر ذرات خاکستر لجن در مقایسه با میکروسیلیس و متاکائولن باعث می‌شود تا میزان آب مورد نیاز برای ساخت ملات استاندارد حاوی این خاکستر افزایش یابد.
- ۵) به دلیل افزایش میزان آب مصرفی و کمتر بودن اکسیدهای SiO_2 ، Al_2O_3 و Fe_2O_3 در خاکستر لجن فاضلاب در مقایسه با میکروسیلیس و متاکائولن، شاخص فعالیت پوزولانی خاکستر لجن کمتر از سایر پوزولان‌ها می‌باشد. با این حال الزامات استاندارد ASTM C618 را تامین می‌نماید.
- ۶) به طور کلی نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که رفتار خاکستر لجن فاضلاب شهری در محدوده‌ای بین مواد پوزولانی و مواد پرکننده طبقه بندی می‌شود.

۵- مراجع

- [1]. Davis, R., "The impact of EU and UK environmental pressures on the future of sludge treatment and disposal", Water and Environment Journal, Vol.10, 1996, 65-69.
- [2]. Lundin, M., Olofsson, M., Pettersson, G., & Zetterlund, H., "Environmental and economic assessment of sewage sludge handling options", Resources, Conservation and Recycling, Vol. 41, 2004, 255-278.
- [3]. Fotovat, A., Moghadam, M. R. A., Maknoon, R., & Sebt, M. H., "Laboratory study on application of municipal sludge ash in construction materials. Paper presented at the Proceedings of IWA special conference on Facing Sludge Diversities, Challenges, Risks and Opportunities, 2007.
- [4]. Cyr, M., Coutand, M., & Clastres, P., "Technological and environmental behavior of sewage sludge ash (SSA) in cement-based materials", Cement and Concrete Research, Vol. 37, 2007, 278-289.
- [5]. Nai-Qian Feng a, Gai-Fei Peng, "Applications of natural zeolite to construction and building materials in China", Construction and Building Materials 19 579-584, 2005 .
- [6]. Pan, S. C., Tseng, D. H., C.Lee., "Influence of the fineness of sewage sludge ash on the mortar properties", Cement and Concrete Research, Vol. 33, 2003, 1749-1754.
- [7]. Lin, K., Chang, W., Lin, D., Luo, H., Tsai, M., "Effects of nano-SiO₂ and different ash particle sizes on sludge ash-cement mortar", Journal of Environmental Management, Vol.88, 2008, 708-714.
- [8]. ASTM C230, "Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement", 2003.
- [9]. ASTM C311, "Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use in Portland-Cement Concrete", 2002.
- [10]. ASTM C204, "Standard Test Method for Fineness of Hydraulic Cement by Air-Permeability Apparatus", 2000.
- [11]. ASTM C188, "Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement", 2003.
- [12]. ASTM C114, "Standard Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement", 2004.
- [13]. ASTM C618, "Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete", 2012.

Evaluation of sewage sludge ash pozzolanic properties based on the standard ASTM C618

Abstract

A suitable method selection to managing sludge that produced in municipal wastewater treatment according to the type of area and economic considerations are important. One of these methods, which are common in many developed countries, is incineration of sludge for energy recovery. Sludge incineration produces considerable amount of ash which should be disposed. The main aim of this study was to investigate pozzolanic properties of sewage sludge ash to take advantage of this ash in cement production industry be investigated. . For this purpose, physical properties (such as fineness, strength activity index, density and morphology) and chemical properties (such as XRF and LOI) were investigated. The results showed that morphological irregularities of the sewage sludge ash grains caused increase in specific surface area and resulted in increased water demand, which affects the workability of mortars. Strength activity index measured at the ages of 7 and 28 days respectively 79 and 90 percent that meet the requirements of ASTM C618 stopped. Chemical analysis indicated that sludge ash is composed mainly of silica, aluminium and iron oxides. The results of this study show that sewage sludge ash classified between pozzolanic and filler materials.

Keywords: Sewage sludge ash, Pozzolanic material, Cement, ASTM C618.