

بررسی اثر دمای حرارت دهی بر خواص خاکستر لجن فاضلاب (SSA)

و امکان سنجی استفاده از آن در مصالح بتنی

امیرمهدی نیک منش^۱، امیرمحمد رمضانپور^۲ و محمد شکرچی زاده^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه دانشکده عمران دانشگاه تهران

۲- عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی عمران دانشگاه تهران

۳- عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی عمران دانشگاه تهران

(nikmanesh.am@ut.ac.ir)

چکیده

امروزه بتن به عنوان پرمصرف ترین ماده در جهان مطرح می‌باشد. آلوده‌کننده‌ترین بخش از ساخت بتن مربوط به صنعت سیمان می‌باشد. ۷ درصد از دی اکسید کربن موجود در اتمسفر به دلیل تولید سیمان در جهان می‌باشد. یکی از بهترین راهکارها درخصوص بهبود خواص بتن از دیدگاه زیست محیطی، یافتن جایگزین‌های مناسب برای سیمان مصرفی در بتن است. در این میان، پوزولان‌ها که از دیر باز به عنوان جایگزین و مکمل سیمان در ساخت و سازها مورد استفاده قرار گرفته‌اند، توانسته‌اند از طریق جایگزینی با سیمان ضمن صرفه جویی در مصرف انرژی مورد نیاز در تولید سیمان و کاهش انتشارات آلاینده‌ها، مقاومت فشاری و دوام آن‌ها را نیز افزایش دهند. خاکستر لجن تصفیه خانه فاضلاب یکی از موادی است که در سالهای اخیر به عنوان جایگزین سیمان و مصالح سنگی در بتن و مصالح ساختمانی استفاده شده است. در این پژوهش به امکان سنجی استفاده از خاکستر لجن تصفیه خانه فاضلاب^۱ (SSA) در بتن پرداخته شده است. به طور خاص برای اولین بار به بررسی محتوی لجن تصفیه خانه های فاضلاب شهر تهران پرداخته شد. بدین منظور از تمامی تصفیه خانه های فعال شهر تهران نمونه گیری صورت گرفت و نتایج آنالیزهای شیمیایی همچون XRD و XRF ما را به سمت مطلوب ترین تصفیه خانه به لحاظ محتوی لجن راهنمایی کرد. در ادامه فرآیند حرارت دهی و سوزاندن که تاکنون به طور مختصر به آن پرداخته شده است، به طور مفصل تر مورد بررسی قرار گرفت تا بهینه ترین عملیات حرارتی ممکن را برای رسیدن به خواص مطلوب تر خاکستر ایجاد شود. در این راستا لجن خام تصفیه خانه منتخب در چهار دمای ۷۰۰، ۸۰۰، ۹۰۰ و ۱۰۰۰ درجه سوزانده شد و مجددا آزمایش های شیمیایی نظیر آنالیز XRD بر روی آن صورت گرفت. سپس نمونه های بتن و ملات با درصد های جایگزینی ۱۰ و ۲۰ درصد ساخته شد و آزمون مقاومت فشاری در سنین ۷ و ۲۸ روز برای بدست آوردن میزان فعالیت پوزولانی و همچنین میزان افت مقاومت بر روی آنها انجام شد. از نتایج بدست آمده می‌توان استنباط کرد تصفیه خانه شهرک غرب به لحاظ محتوی تشکیل دهنده، مطلوبترین تصفیه خانه و لجن تصفیه خانه مذکور دارای بالاترین شباهت به سیمان می‌باشد. همچنین مناسب ترین دمای حرارت دهی برای نمونه های لجن خام دمای ۸۰۰ درجه می‌باشد. در این دما فازهای سیلیسی دارای بیشترین واکنش پذیری می‌باشند و بالاترین پیک های سیلیسی آمورف در این دما مشاهده شده است. نتایج آزمون مقاومت فشاری و فعالیت پوزولانی نیز گواه بر همین مطلب می‌باشند. به طور کل می‌توان دریافت جاگزینی خاکستر لجن تصفیه خانه فاضلاب به جای سیمان منجر به افت مقاومت می‌شود. به طوری که با جایگزینی ۱۰ درصد خاکستر به جای سیمان با افتی در حدود ۱۰ درصد و با جایگزینی ۲۰ درصد با افتی در حدود ۳۵ درصد روبرو می‌شویم. لذا می‌توان از این ماده در ساخت بتن های غیر سازه ای و یا بتن های سازه ای با مقاومت پایین با درصد های جایگزینی تا ۲۰ درصد استفاده نمود.

کلمات کلیدی: خاکستر لجن فاضلاب، پوزولان، محیط زیست، توسعه پایدار.

۱. مقدمه

پیشرفت مهندسی عمران و توسعه ساخت و ساز به مرور زمان، اثرات نامطلوبی ایجاد نموده که می‌تواند جامعه بشری و حتی نسل‌های بعد را تحت تاثیر قرار دهد. یکی از این آثار، استفاده از منابع تجدید ناپذیر جهت ساخت مصالح ساختمانی است. امروزه بتن به عنوان پرمصرف‌ترین ماده در جهان مطرح می‌باشد. آلوده‌کننده‌ترین بخش از ساخت بتن مربوط به صنعت سیمان می‌باشد. مطابق آمار حدود ۳۰ الی ۴۰ درصد تولید گازهای گلخانه‌ای و ۴۰ تا ۵۰ درصد زباله‌ها و نخاله‌های تولید شده در جهان بصورت مستقیم یا غیر مستقیم مربوط به صنعت ساختمان است [۱]. ۷ درصد دی اکسید کربن موجود در اتمسفر به دلیل تولید سالانه ۴ میلیارد تن سیمان در جهان می‌باشد. سیمان پرتلند که مهم‌ترین نوع سیمان هیدرولیک مورد مصرف می‌باشد، نه تنها یکی از موادی است که با توجه به حجم زیاد تولید آن انرژی زیادی مصرف می‌شود، بلکه یکی از موجبات اصلی ایجاد گازهای گلخانه‌ای به مقدار بسیار زیاد می‌باشد [۲]. مصرف انرژی در تهیه سیمان و بتن مهمترین تأثیر تولید این مواد بر محیط زیست محسوب می‌شود؛ به طوری که تولید یک تن سیمان پرتلند به ۴/۱ گیگاژول انرژی نیاز دارد [۲].

یکی از بهترین راهکارها درخصوص بهبود خواص بتن از دیدگاه زیست محیطی، یافتن جایگزین‌های مناسب برای سیمان مصرفی در بتن است. در این میان، پوزولان‌ها که از دیر باز به عنوان جایگزین و مکمل سیمان در ساخت و سازها مورد استفاده قرار گرفته اند، می‌توانند مشکلات مربوط به محدودیت تولید را تا میزان زیادی حل نمایند. پوزولان‌ها توانسته اند از طریق جایگزینی با سیمان ضمن صرفه جویی در مصرف انرژی مورد نیاز در تولید سیمان و کاهش انتشارات آلانده‌ها، مقاومت فشاری و دوام آن‌ها را نیز افزایش دهند [۳].

خاکستر لجن تصفیه خانه فاضلاب یکی از موادی است که در سالهای اخیر به عنوان جایگزین سیمان در بتن و مصالح ساختمانی استفاده شده است. لجن فاضلاب محصول جانبی تصفیه خانه فاضلاب شهری است که به دلیل دارا بودن عوامل بیماری‌زا و همچنین ترکیبات شیمیایی مضر از جمله فلزات سنگین می‌تواند برای زندگی انسان‌ها تهدید کننده باشد [۴].

با توسعه جامعه بشری و افزایش تعداد تصفیه خانه‌ها، تصفیه و دفع لجن آنها در حجم بالا، نیاز به یک مدیریت کارآمد دارد. کشور ما ایران با توجه به تولید سالانه بیش از ۳۲ میلیارد مترمکعب فاضلاب و تصفیه تنها ۹ درصد آن، به سوی احداث تصفیه خانه‌های بیشتری پیش می‌رود. با افزایش شمار تصفیه خانه‌ها، ایران نیز مانند سایر کشورهای جهان، دیر یا زود با مشکل مدیریت لجن روبرو خواهد شد [۵]. بالا بودن میزان آب موجود در لجن، آلوده بودن لجن به پاتوژنها و فلزات سنگین، وجود مواد آلی ناپایدار در آن و ایجاد بوی تعفن موجب شده است که تصفیه و دفع لجن همواره بعنوان یک معضل اساسی در مدیریت لجن مطرح باشد [۶].

روش‌های اصلی دفع لجن را می‌توان به دو بخش اساسی روش‌های مناسب (کاربرد مناسب در زمین‌های کشاورزی، دفن بهداشتی، کمپوست کردن، سوزاندن و استفاده در تولید مصالح ساختمانی) و روش‌های نامناسب (دفن غیر بهداشتی، کاربرد نامناسب در زمین‌های کشاورزی، تزریق به چاه‌های جذبی و دفع سطحی به رودخانه‌ها و دریاها) تقسیم بندی نمود [۶].

در سالهای اخیر، در برخی کشورهای اروپایی و آسیایی (به خصوص ژاپن و سنگاپور) به دلیل کمبود زمین برای دفن و کاربردهای کشاورزی، سوزاندن بعنوان یک راه حل مناسب برای دفع لجن مطرح می‌باشد. این گزینه با توجه به شرایط محیطی کشور ما به خصوص شهرهای با تراکم جمعیتی بالا (مانند تهران) بعنوان راهکاری مناسب برای مدیریت لجن به شمار می‌آید. فرایند سوزاندن لجن به تولید خاکستری معدنی، بی‌خطر و عاری از پاتوژنها می‌انجامد [۵]. از دیگر مزایای سوزاندن می‌توان به کاهش ۹۰ درصدی حجم لجن، از بین رفتن توکسیک‌ها و فلزات سنگین، از بین رفتن بو و سهولت مدیریت ماده حاصل اشاره کرد [۷].

در این پژوهش به امکان سنجی استفاده از خاکستر لجن تصفیه خانه فاضلاب (SSA) در بتن پرداخته شده است. به طور خاص برای اولین بار به بررسی محتوی لجن تصفیه خانه‌های فاضلاب شهر تهران پرداخته شد تا به بهترین شرایط و خواص ممکن دست پیدا شود. همچنین فرآیند حرارت دهی و سوزاندن که تا کنون به طور مختصر مورد مطالعه قرار گرفته است، به طور مفصل تر مورد بررسی قرار داده شد تا بهینه‌ترین عملیات حرارتی ممکن را برای رسیدن به خواص مطلوب تر خاکستر ایجاد شود.

۲. مروری بر ادبیات فنی

لجن فاضلاب، به عنوان ماده باقیمانده تصفیه فاضلاب خانگی، ماده جامدی که در روش های مختلف تصفیه به منظور حذف آلاینده های معلق و محلول از فاضلاب از طریق جداسازی مواد جامد از مایع بدست می آید، [۸] به دلیل مشکلات زیست محیطی ناشی از آن امروزه بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۹].

۲-۱- انواع کاربردهای لجن فاضلاب در مهندسی عمران

اولین بار در پژوهشی، مونز و همکاران [۱۰] از خاکستر لجن فاضلاب در ملات استفاده کردند. همچنین نخستین بار تای [۱۱] در سال ۱۹۸۷ این ماده را در بتن به کار برد. شروع استفاده از این محصول در آجر، در پژوهش آلمان و برمن [۱۲] در سال ۱۹۸۴ ذکر شده است و در نهایت نیز باتی و رید [۱۳] در سال ۱۹۸۹ کاربرد این ماده به عنوان ریز دانه را بررسی کردند. به لحاظ زمانی، استفاده از خاکستر لجن فاضلاب، در روسازی، دیرترین کاربرد از این ماده در صنعت ساخت و ساز می باشد. آل سید و همکاران [۱۴] در ۱۹۹۵ کاربری این خاکستر را در روسازی آسفالتی بررسی کردند.

۲-۲- خواص فیزیکی و شیمیایی

مارتین و همکاران [۱۵] در تحقیق مروری خود ویژگی های نظیر چگالی و سطح مخصوص را مورد بررسی قرار داد. در کلیه پژوهش های صورت گرفته، چگالی خاکستر لجن بین ۲/۱۹ تا ۳ کیلوگرم بر مترمکعب بدست آمده که نمایانگر سبک تر بودن این ماده نسبت به سیمان با چگالی ۳/۱۵ کیلوگرم بر مترمکعب است. همچنین سطح مخصوص این ماده نیز بین ۱۶۰ تا ۶۰۰ متر مربع بر کیلوگرم می باشد. PH این ماده نیز در حدود ۶/۵ تا ۷/۵ بسته به منشأ لجن بدست آمده است.

۲-۳- کاربرد خاکستر لجن فاضلاب در ملات های سیمانی

چانگ [۱۶] در پژوهشی مشاهده کرد که با افزایش مقدار خاکستر لجن به جای سیمان، کارایی کاهش می یابد. بررسی نتایج گیرش در پژوهش چانگ نشان داده است که با افزایش درصد جایگزینی گیرش به تاخیر افتاده است. دلیل این پدیده وجود عناصر مزاحمی مثل Zn و P می باشد که باعث می شود هیدراسیون با تاخیر انجام گیرد و زمان گیرش بیشتر شود. نتایج آزمایش مقاومت فشاری طبق پژوهشی که چانگ [۱۶] انجام داد بر این نکته تاکید می کند که با افزایش درصد جایگزینی، مقاومت فشاری کم شده است. دلیل افت مقاومت در این پژوهش، ایجاد حفرات و تراکم کمتر محصولات بیان شده است. نتایج پژوهش مارتین [۱۵] نیز گویای این واقعیت بود که با افزایش درصد جایگزینی، مقاومت خمشی نیز کاهش پیدا می کند اما هر چه زمان بیشتر می گذرد این اختلاف بین مخلوط های جدید با مخلوط کنترل کمتر نمایان می شود.

۲-۴- کاربرد خاکستر لجن فاضلاب در بتن

والز و همکاران [۱۷] با مطالعه خواص فیزیکی بتن در سال ۲۰۰۴ نشان دادند استفاده از خاکستر لجن فاضلاب در بتن باعث کاهش چگالی می شود ولی با ثابت نگه داشتن درصد جایگزینی، با گذشت زمان چگالی بیشتر می شود. آنها همچنین در اندازه گیری تخلخل متوجه شدند که ابتدا با افزایش زمان تخلخل زیاد و سپس کم می شود همچنین با افزایش مقدار جایگزینی خاکستر، تخلخل زیاد می شود. از سوی دیگر با افزایش مقدار جایگزینی، جذب آب هم زیاد شده است که این امر به دلیل افزایش حفرات می باشد. مونز و همکاران [۱۸] در سال ۲۰۰۳ با مطالعه بر خواص بتن تازه به این مهم دست یافتند که استفاده از خاکستر لجن باعث کاهش کارایی بتن تازه و افزایش زمان گیرش می شود. با بررسی هایی که چانگ و همکاران [۱۶] بر روی خواص بتن سخت انجام دادند، این نتیجه به دست آمد که هر چه درصد جایگزینی بیشتر باشد افت مقاومت بیشتر است. آنها دریافتند درصد جایگزینی ۱۰ درصد می تواند برای بتن های مسلح و درصدهای بیشتر برای بتن های غیر سازه ای به کار رود. در پژوهش دیگری که فتوت و همکاران [۵] صورت دادند، مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه ها بعنوان معیار مناسبی برای مقایسه، نشان داد که در صورت جایگزینی ۱۰ درصد، کمترین کاهش را در مقاومت فشاری می توان مشاهده نمود.

۳. برنامه آزمایشگاهی

۳-۱- مصالح مصرفی

۳-۱-۱- سیمان

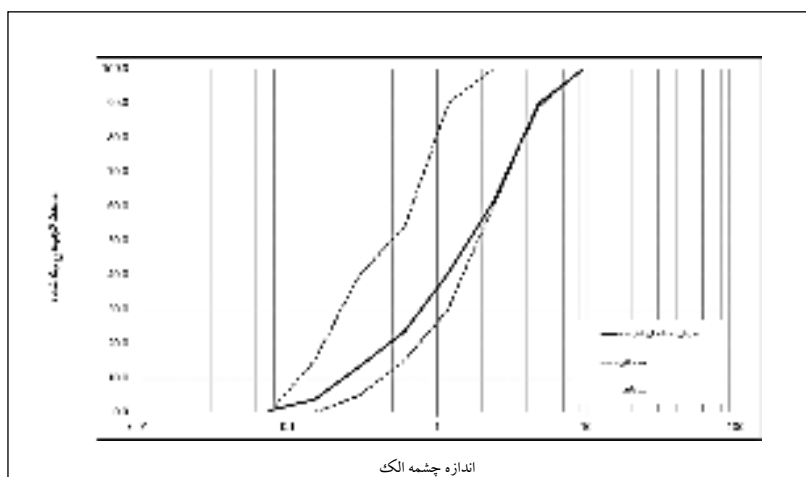
در این پژوهش از سیمان پرتلند تپ ۲ کارخانه ساوه مطابق با استاندارد ASTM C۱۵۰ استفاده شد. وزن مخصوص سیمان ۳/۱۱ گرم بر سانتی متر مکعب و مشخصات فنی و آنالیز شیمیایی آن طبق استاندارد ASTM C۱۱۴ در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱- آنالیز شیمیایی سیمان مورد استفاده

عناصر	مقدار (درصد)	عناصر	مقدار (درصد)
دی اکسید سیلیسیم	۲۰/۶۵	اکسید سدیم	۰/۵۲
اکسید آلومینیوم	۴/۰۰	اکسید پتاسیم	۰/۳۵
اکسید آهن	۴/۰۸	قلیایی معادل	۰/۷۵
اکسید کلسیم	۶۳/۲۲	دی اکسید کربن	۰/۰
اکسید منیزیم	۱/۵۳		
تری اکسید سولفور	۲/۲۲	سه کلسیم سیلیکات	۶۱
باقیمانده نامحلول	۰/۴۳	دو کلسیم سیلیکات	۱۳
افت وزنی در اثر حرارت	۱/۵۲	سه کلسیم آلومینات	۴
کلر	۰/۰۰۲	چهار کلسیم آلومینوفریٹ	۱۲

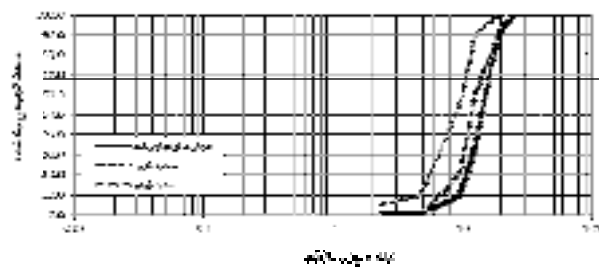
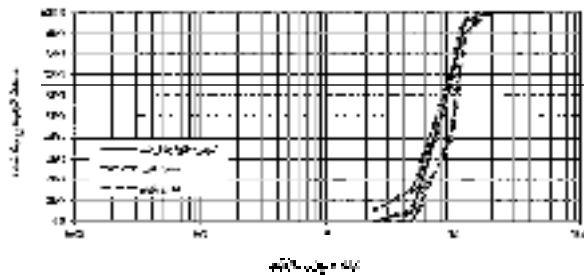
۳-۱-۲- مصالح سنگی

در این تحقیق از ماسه دوبار شور قرضه شهریار استفاده شده است که دانه بندی آن مطابق نمودار شکل ۱ بدست آمده است. درصد جذب آب این نوع ماسه بر اساس استاندارد ASTM C۱۲۷ برابر ۲/۹٪ بدست آمد.



شکل ۱- نمودار دانه بندی ماسه مورد استفاده

شن نخودی و بادامی از قرضه شهریار استفاده شده است که دانه بندی آن مطابق نمودارهای شکل ۲ و ۳ بدست آمده است. درصد جذب آب شن بر اساس استاندارد ASTM C۱۲۸ برابر ۱/۹٪ برای نخودی و ۲/۱٪ برای بادامی بدست آمد.



شکل ۲- نمودار دانه بندی شن بادی مورد استفاده

شکل ۳- نمودار دانه بندی شن نخودی مورد استفاده

برای ملات، بسته های ماسه استاندارد ۱۳۵۰ گرمی منطبق بر استاندارد DIN EN ۱۹۶-۱ مورد استفاده قرار گرفت.

آب مصرفی در بتن متعارف باید الزامات استاندارد ASTM C ۱۶۰۲ را رعایت کند. در این پژوهش از آب لوله کشی شهر تهران استفاده شده است. خواص فیزیکی آب مصرفی در جدول ۲ آمده است.

جدول ۲- خواص فیزیکی آب تهران [۱۸]

ویژگی	مقدار
رنگ	بی رنگ
بوی	بدون بو
چگالی	۱۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب
شدت آلودگی	۰.۰۵
میزان کلرید (بر حسب درصد)	۰.۰۰۱
میزان سولفات (بر حسب درصد)	۰.۰۰۱
میزان آهن (بر حسب میلی گرم بر لیتر)	۰.۰۵

در این پژوهش از فوق روان کننده مدل فرکوپلاست PN ۱۰ شرکت شیمی ساختمان استفاده شده است. مشخصات این افزودنی در جدول ۳ آمده است.

جدول ۳- مشخصات فوق روان کننده

گواهی نامه	ASTM C ۴۹۴ Type F
رنگ	زرد - قهوه ای روشن
حالت فیزیکی	مایع
ترکیبات شیمیایی محصول	کوپلیم‌های اصلاح شده پلی کربوکسیلیک اسید
طبیعت یونی	آنیونی
کلراید (PPM)	۵۰۰
وزن مخصوص	۱.۵±۰.۰۲ گرم بر سانتی متر مکعب در ۲۰ درجه سانتی گراد

در این پژوهش از تمامی تصفیه خانه های فعال شهر تهران شامل تصفیه خانه های جنوب، شهرک غرب، اکباتان، محلاتی، قطریه، زرگنده و صاحبقرانیه نمونه برداری شد و با انجام آنالیزهای شیمیایی بهترین تصفیه خانه به لحاظ محتوی لجن انتخاب گردید. سپس با انجام دادن فرایند حرارت دهی در دماهای متفاوت و انجام مجدد آزمایش های شیمیایی و همچنین ساخت نمونه های بتن و ملات، بهترین فرایند و حرارت سوزاندن نیز انتخاب گردید.

۳-۲- طرح مخلوط ها

۵ طرح اختلاط بتن و ۵ طرح اختلاط برای ملات طراحی شد. طرح های مورد نظر ملات شامل جایگزینی ۲۰ درصد جایگزینی خاکستر لجن فاضلاب به جای سیمان می باشد. این طرح ها جهت انجام آزمایش فعالیت پوزولانی طبق استاندارد ASTM C ۲۷۰ و BS ۳۸۹۲ می باشند. از آنجا که در پژوهش های انجام شده پیشین بهترین درصد جایگزینی این خاکستر به جای سیمان در مخلوط های بتنی حدود ۱۰ درصد ذکر شده [۵ و ۱۵] ۵ طرح مخلوط بتنی نیز با درصد جایگزینی ۱۰ درصد تهیه گردید تا نتایج آن نیز در تصمیم گیری برای انتخاب بهترین فرایند حرارت دهی منظور گردد. قابل ذکر می باشد که قبل از هر طرح اختلاط درصد رطوبت مصالح سنگی در آزمایشگاه بدست آمده و آب اضافی اختلاط هر طرح برای رساندن سنگدانه ها به حال SSD جداگانه محاسبه شده است. طرح های اختلاط ملات و بتن این پژوهش در جداول ۴ و ۵ آمده است :

جدول ۴- طرح های مخلوط ملات در نظر گرفته شده

نام طرح	درصد جایگزینی	دمای سوزاندن	ماسه (gr)	سیمان (gr)	خاکستر (gr)	آب (ml)	آب اضافه (ml)	آب کل (ml)
۱	۲۰	شاهد	۱۳۵۰	۵۰۰	۰	۲۴۲	۰	۲۴۲
۲	۲۰	۷۰۰	۱۳۵۰	۴۰۰	۱۰۰	۲۴۲	۲۳	۲۶۵
۳	۲۰	۸۰۰	۱۳۵۰	۴۰۰	۱۰۰	۲۴۲	۲۳	۲۶۵
۴	۲۰	۹۰۰	۱۳۵۰	۴۰۰	۱۰۰	۲۴۲	۲۳	۲۶۵
۵	۲۰	۱۰۰۰	۱۳۵۰	۴۰۰	۱۰۰	۲۴۲	۲۳	۲۶۵

در تمامی طرح های اختلاط بتن نسبت آب به سیمان برابر ۵۰ درصد تعیین گردید و میزان استفاده از مصالح سنگی برای ماسه، شن بادی و شن نخودی به ترتیب برابر ۶۰، ۳۰ و ۱۰ درصد انتخاب گردید. حجم کل هر طرح برابر ۱۸ لیتر می باشد.

جدول ۵- طرح های مخلوط بتن در نظر گرفته شده

نام طرح	درصد جایگزینی	دمای سوزاندن	سیمان (kg)	خاکستر (gr)	ماسه (kg)	شن نخودی (kg)	شن بادی (kg)	آب کل (kg)	فوق روان کننده (g)
۱	۱۰	شاهد	۷	۰	۱۹،۳۸	۳،۵۴	۸،۱۳	۳،۵۲	۱۰
۲	۱۰	۷۰۰	۶،۴۸	۷۲۰	۱۹،۳۸	۳،۵۴	۸،۱۳	۳،۵۲	۲۵
۳	۱۰	۸۰۰	۶،۴۸	۷۲۰	۱۹،۳۲	۳،۵۳	۸،۱۲	۳،۵۸	۲۵
۴	۱۰	۹۰۰	۶،۴۸	۷۲۰	۱۹،۳۲	۳،۵۳	۸،۱۲	۳،۵۸	۲۵
۵	۱۰	۱۰۰۰	۶،۴۸	۷۲۰	۱۹،۳۲	۳،۵۳	۸،۱۲	۳،۵۸	۲۵

۳-۳- ساخت نمونه ها

ساخت نمونه های ملات و زمان اختلاط بر اساس استاندارد ASTM C ۲۷۰ و ASTM C 350 صورت گرفت. نمونه گیری ملات در قالب هایی مکعبی با ابعاد ۵۰ میلی متر انجام و هر نمونه در دو لایه به وسیله کوبه متراکم شد. از هر طرح ۳ قالب مکعبی نمونه گیری شد.

ساخت نمونه های بتن نیز بر اساس استاندارد ASTM C192 صورت گرفت. زمان اختلاط برای طرح ها به منظور مخلوط شدن کامل مصالح و بر اساس تجربه های قبلی حدود ۵ دقیقه در نظر گرفته شد.

همچنین نمونه گیری بتن نیز در قالب هایی مکعبی با ابعاد ۱۵۰ میلی متر انجام شد. نمونه ها به وسیله میز ویبره در ۳ لایه متراکم شدند. از هر طرح ۴ قالب مکعبی نمونه گیری شد.

۴-۳- شرایط عمل آوری نمونه ها

طبق استاندارد ASTM C192 آزمونه ها به مدت ۲۴ ساعت در قالب سپس تا زمان آزمایش در آب با دمای 23 ± 2 درجه سانتی گراد عمل آوری شدند.

۵-۳- برنامه آزمایش ها

۳-۵-۱- آزمایشهای لجن خام و خاکستر لجن فاضلاب

پس از نمونه گیری لجن خام از تصفیه خانه های ذکر شده در بند ۳-۱-۶، به منظور حصول نتایج بهتر از آنالیزهای شیمیایی، نمونه لجن همه تصفیه خانه ها ابتدا خشک و سپس آسیاب می شوند تا به پودری با حدود نرمی سیمان حاصل شود.



(ج)



(ب)



(الف)

شکل ۴- مقایسه لجن های خام تصفیه خانه های تهران

(الف) اکباتان، زرگنده (ب) شهرک غرب، جنوب (ج) محلاتی، قیطریه

به منظور جلوگیری از تغییر خواص ذاتی نمونه های لجن خام، خشک شدن در دمای ۵۰ درجه صورت گرفت. به همین منظور از خشک کن آزمایشگاه مصالح ساختمانی دانشگاه تهران برای این کار استفاده شد.

سپس نمونه های خشک شده توسط دستگاه آسیاب ساختمانی به مدت ۱ ساعت و با سرعت ۱۰۰ دور در دقیقه به ذرات کوچکتر از الک شماره ۲۰۰ تبدیل شدند تا واکنش زایی مطلوب تری حاصل گردد.



شکل ۶- آسیاب آزمایشگاه مصالح دانشگاه تهران



شکل ۵- خشک کن آزمایشگاه مصالح دانشگاه تهران

۳-۵-۱-آزمایش XRF

در پژوهش حاضر برای آزمایش XRF از دستگاه x-ray آزمایشگاه مرکزی دانشکده علوم دانشگاه تهران استفاده گردید. از هر تصفیه خانه به مقدار ۲۰ گرم پودر رد شده از الک شماره ۲۰۰ مورد آزمایش قرار گرفت.

۳-۵-۲-آزمایش XRD

در ادامه برای آزمایش XRD از دستگاه x-ray آزمایشگاه اشعه ایکس دانشکده متالوژی دانشگاه تهران استفاده گردید. از هر تصفیه خانه به مقدار ۱۵ گرم پودر رد شده از الک شماره ۲۰۰ مورد آزمایش قرار گرفت.



شکل ۷- دستگاه xray دانشکده متالوژی دانشگاه تهران

پس از بدست آمدن نتایج مربوط به نمونه های لجن خام، بهترین تصفیه خانه به لحاظ محتوی لجن انتخاب می گردد. سپس جهت حصول به بهترین فرآیند حرارت دهی، لجن خام تصفیه خانه مورد نظر در دماهای مختلف سوزانده شده و مجدداً مورد آنالیز شیمیایی قرار گرفتند. از آنجا که بهترین دمای سوزاندن در پژوهش های صورت گرفته [۷ و ۱۹ و ۲۰] بین ۸۰۰ تا ۹۰۰ ذکر شده است، در این پژوهش ۴ دمای ۷۰۰، ۸۰۰، ۹۰۰ و ۱۰۰۰ درجه جهت سوزاندن لجن در نظر گرفته شد. نمونه های لجن خام تصفیه خانه مورد نظر در کوره آزمایشگاه ریخته گری دانشکده متالوژی دانشگاه امیرکبیر در ۴ دمای قید شده به مدت یک ساعت سوزانده شد و خاکستر حاصل مجدداً با دستگاه آسیاب آزمایشگاه مصالح ساختمانی به ذرات ریزتر جهت واکنش پذیری بهتر تبدیل شد.



شکل ۹- شکل ظاهری خاکستر لجن فاضلاب (چپ) و سیمان (راست)



شکل ۸- مقایسه ظاهری خاکستر حاصل از سوزاندن در ۴ دما

(پایین چپ : ۷۰۰ درجه پایین راست : ۸۰۰ درجه)
بالا چپ : ۹۰۰ درجه بالا راست : ۱۰۰۰ درجه)

خاکستر حاصل جهت تعیین میزان واکنش پذیری و کریستالی بودن مجدداً تحت آزمایش XRD قرار گرفت.

۳-۵-۲- آزمایش های ملات

۳-۵-۲-۱- مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری برای نمونه های ملات طبق استاندارد ASTM C109 صورت گرفته است. برای خاکستر حاصل از هر دما ۳ نمونه مکعبی ۵۰ میلی متری ملات حاصل از جایگزینی ۲۰ درصد خاکستر به جای سیمان ساخته می شود که یک نمونه در سن ۷ روز و ۲ نمونه در سن ۲۸ روز مورد آزمایش قرار گرفتند.

۳-۵-۲-۲- آزمایش درصد فعالیت پوزولانی

درصد فعالیت پوزولانی (PAI) یا درصد فعالیت مقاومتی (SAI) برای نمونه های ملات طبق استاندارد ASTM C270 مورد محاسبه قرار گرفت. این درصد برای هر نمونه برابر با حاصل تقسیم مقاومت نمونه های دارای خاکستر جایگزین شده بر مقاومت نمونه شاهد در همان زمان میباشد (رابطه ۱).

$$A = \text{مقاومت نمونه با جایگزینی خاکستر}$$

$$B = \text{مقاومت نمونه شاهد}$$

$$S.A.I = (A/B) \times 100 \quad (1)$$

۳-۵-۳- آزمایش های بتن

۳-۵-۳-۱- آزمایش روانی بتن

روانی بتن یا آزمایش اسلامپ بتن تازه برای هر یک از طرح اختلاط های ذکر شده در بالا طبق استاندارد ASTM C143 انجام پذیرفت. قابل ذکر است جهت مقایسه مطلوب تر مشخصات مکانیکی نمونه های ساخته شده، سعی در یکسان سازی حدودی اسلامپ طرح ها با هم شد. بدین منظور اسلامپ هدف برابر 12 ± 2 سانتی متر تعیین گردید.

۳-۵-۳-۲- مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری برای نمونه های بتن طبق استاندارد ASTM C39 صورت گرفته است. برای خاکستر حاصل از هر دما ۴ نمونه مکعبی ۱۵۰ میلی متری بتن حاصل از جایگزینی ۱۰٪ خاکستر به جای سیمان ساخته شد که دو نمونه در سن ۷ روز و دو نمونه نیز در سن ۲۸ روز مورد آزمایش قرار گرفتند.



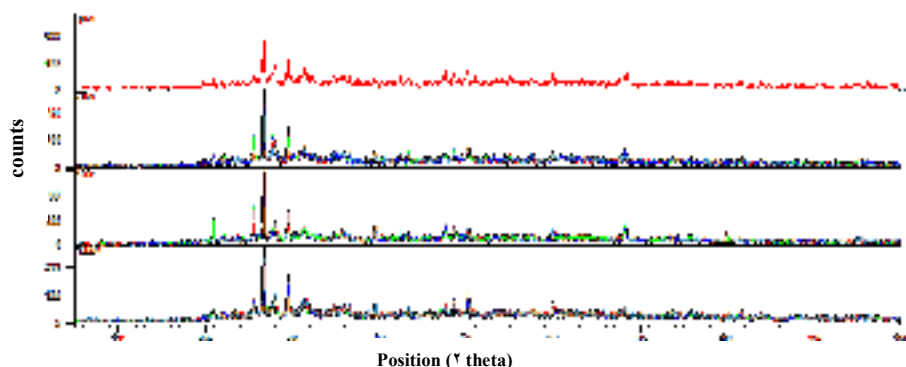
شکل ۱۰- جک مقاومت فشاری آزمایشگاه مصالح ساختمانی دانشگاه تهران

۴. نتایج و تحلیل و بررسی

۴-۱- نتایج آزمایش های لجن خام

۴-۱-۱- نتایج آزمایش XRD

نتایج نمونه های لجن خام تصفیه خانه ها در شکل ۱۱ به صورت مقایسه ای نشان داده شده است. همان طور که مشخص است فاز های سیلیسی تشخیص داده شده کم می باشد و پیک های سیلیسی نیز بر هم منطبق نیستند. همچنین عمده فاز های تشکیل شده حالت کریستالی داشته و واکنش پذیری مطلوبی ندارند. در تصفیه خانه های موجود، تصفیه خانه شهرک غرب، زرگنده، اکباتان و قیطریه به ترتیب مطلوبیت رتبه بندی می شوند.



شکل ۱۱- نتایج آزمایش XRD

۴-۲- نتایج آزمایش XRF

نتایج آزمایش XRF نمونه ها در جدول ۶ به طور خلاصه آورده شده است. فاز های تشکیل دهنده اصلی مواد به همراه درصد تشکیل دهنده آن به صورت کامل قابل مشاهده است. فاز های اصلی تشکیل دهنده $\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ می باشند که همان فاز های اصلی تشکیل دهنده سیمان نیز می باشند. مطابق استاندارد ASTM C ۶۱۸ جمع فاز های $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ بیانگر فعالیت پوزولانی ماده می باشد که مجموع این فاز ها در ردیف آخر جدول محاسبه و مقایسه شده است.

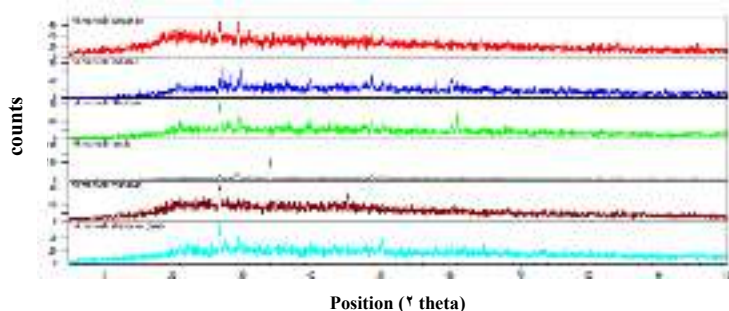
جدول ۶ - نتایج آزمایش XRF

شماره عنصر	نام	اکباتان (درصد)	قیطریه (درصد)	زرگنده (درصد)	جنوب (درصد)	محلای (درصد)	شهرک غرب (درصد)	صاحقرانیه (درصد)
12	MgO	۱/۰۹۷	۱/۳۱۶	۰/۵۷۴	۰/۷۲۴	۰/۷۵۷	۱/۱۴۹	۰/۸۴۹
13	Al ₂ O ₃	۱/۷۲۲	۱/۷۱۹	۰/۹۱۱	۰/۸۰۳	۰/۵۵۰	۲/۰۹۶	۱/۰۶۰
14	SiO ₂	۸/۱۳۷	۸/۷۹۰	۴/۸۷۷	۵/۳۷۶	۳/۵۵۱	۱۰/۵۴	۵/۷۴
15	P ₂ O ₅	۴/۰۵۸	۳/۲۵۷	۲/۶۵۰	۳/۰۳۴	۲/۸۵۶	۴/۴۴۹	۲/۹۲۱
16	SO ₃	۲/۷۹۳	۲/۴۸۶	۲/۲۰۱	۲/۹۱۳	۲/۰۱۶	۲/۹۶۶	۲/۲۳۴
20	CaO	۸/۳۰۶	۷/۶۹۵	۴/۱۵۷	۸/۷۹۶	۳/۴۳۵	۹/۲۰۷	۵/۰۹۶
26	Fe ₂ O ₃	۲/۴۴۱	۲/۱۷۶	۱/۲۲۸	۱/۴۲۳	۱/۵۱۴	۲/۹۶۴	۱/۶۳۱۹
L.O.I		۷۰/۱۵%	۷۰/۷۸%	۸۲/۴۴%	۷۱/۳۹%	۸۴/۴۸%	۶۵/۰۳%	۷۹/۲۴%
Al ₂ O ₃ +SiO ₂ +Fe ₂ O ₃		۱۲/۳	۱۲/۷	۷/۰	۷/۶	۵/۶	۱۵/۶	۸/۴
Al ₂ O ₃ +SiO ₂ +Fe ₂ O ₃ +CaO		۲۰/۵	۲۰/۴	۱۱/۲	۱۶/۴	۹/۰	۲۴/۸	۱۳/۵

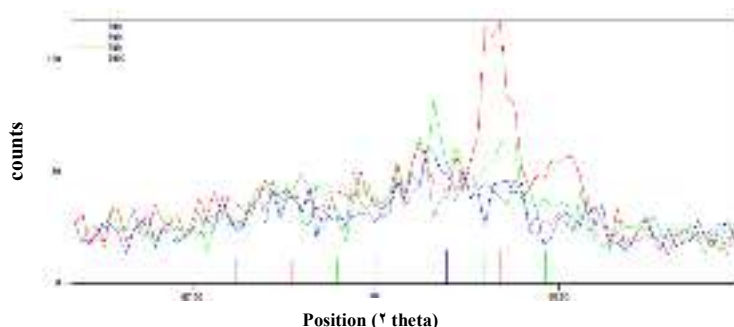
۴-۲- نتایج آزمایش های خاکستر لجن

۴-۲-۱- نتایج آزمایش XRD

نتایج نمونه های خاکستر لجن که در دماهای ۷۰۰، ۸۰۰، ۹۰۰ و ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد سوزانده شده در شکل ۱۲ و ۱۳ به صورت مقایسه ای نشان داده شده است. فاز های سیلیسی تشخیص داده شده به نسبت لجن خام بیشتر می باشد. همچنین بخشی از فاز های سیلیس کریستالی، آمورف شده است.



شکل ۱۲ - طیف کلی نمونه های سوزانده شده در ۴ دما



شکل ۱۳ - پیک های سیلیس در خاکستر سوزانده شده ۴ دمای مختلف

۳-۴- نتایج آزمایش های ملات

۳-۴-۱- شکل ظاهری

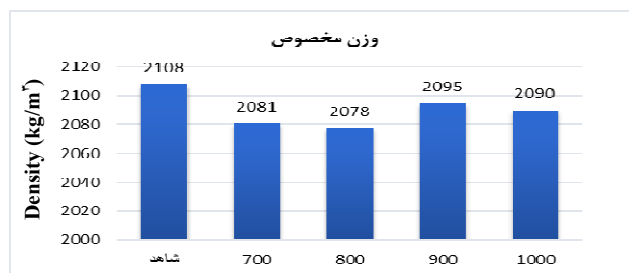
شکل ۱۴ تغییرات ظاهری نمونه های عادی ملات با نمونه های حاوی خاکستر را نشان می دهد. همانطور که انتظار می رود به علت تیره تر بودن خاکستر لجن از سیمان، نمونه های حاوی خاکستر لجن نیز ظاهری تیره تر دارند.



شکل ۱۴ - مقایسه ظاهری نمونه های ملات معمولی (راست) و نمونه های حاوی خاکستر لجن فاضلاب (چپ)

۳-۴-۲- وزن مخصوص

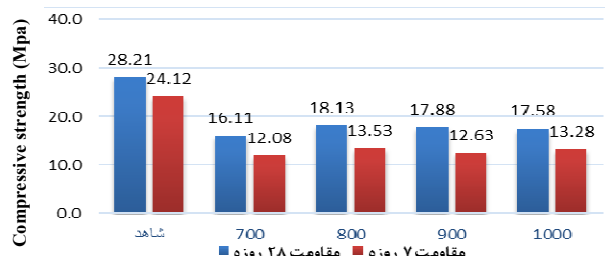
نمودار شکل ۱۵، وزن مخصوص های نمونه های مکعبی ساخته شده ملات را نشان می دهد. وزن مخصوص نمونه های حاوی خاکستر اندکی کاهش یافته است.



شکل ۱۵ - مقایسه وزن مخصوص نمونه های ملات معمولی و نمونه های حاوی خاکستر لجن فاضلاب

۳-۳-۴- مقاومت فشاری

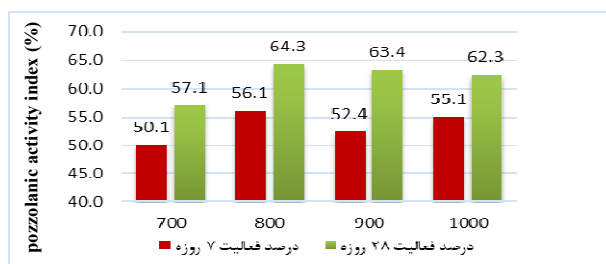
نتایج آزمون فشاری نمونه های شاهد و نمونه های حاوی خاکستر در سنین ۷ و ۲۸ روزه در نمودار شکل ۱۶ قابل مشاهده است. به طور کل مقاومت نمونه های حاوی خاکستر در مقایسه با نمونه شاهد کمتر می باشد.



شکل ۱۶ - مقایسه مقاومت فشاری نمونه های ملات معمولی و نمونه های حاوی خاکستر لجن فاضلاب در سنین ۷ و ۲۸ روزه

۴-۳-۴- فعالیت پوزولانی

با توجه به استاندارد گفته شده در بند ۳-۴-۲ درصد فعالیت پوزولانی خاکستر به صورت حاصل تقسیم مقاومت نمونه های حاوی خاکستر در هر زمان بر مقاومت نمونه شاهد تعریف شده است. مقادیر به صورت مقایسه ای در جدول شکل ۱۷ قابل مشاهده است.



شکل ۱۷ - مقایسه فعالیت پوزولانی نمونه های ملات معمولی و نمونه های حاوی خاکستر لجن فاضلاب در سنین ۷ و ۲۸ روزه

۴-۴- نتایج آزمایش های بتن

۱-۴-۴- شکل ظاهری

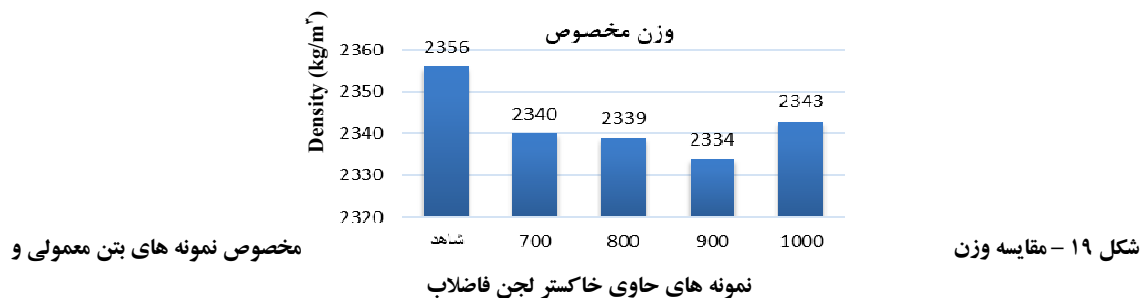
شکل ۱۸ تغییرات ظاهری نمونه های عادی بتن با نمونه های حاوی خاکستر را نشان می دهد. مانند نمونه های ملات، به علت تیره تر بودن خاکستر لجن از سیمان، نمونه های بتنی حاوی خاکستر لجن نیز به نسبت نمونه های شاهد، ظاهری تیره تر دارند.



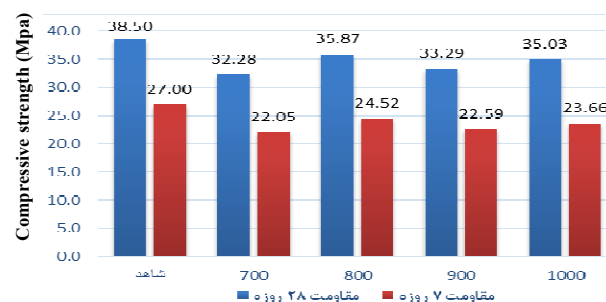
شکل ۱۸ - مقایسه ظاهری نمونه های بتن معمولی (راست) و نمونه های حاوی خاکستر لجن فاضلاب (چپ)

۲-۴-۴- وزن مخصوص

شکل ۱۹ وزن مخصوص های نمونه های مکعبی ساخته شده بتن را نشان می دهد. وزن مخصوص نمونه های حاوی خاکستر اندکی کاهش یافته است. همانطور که انتظار می رود به علت پایین تر بودن وزن مخصوص خاکستر لجن، وزن مخصوص بتن هم کاهش یافته است.

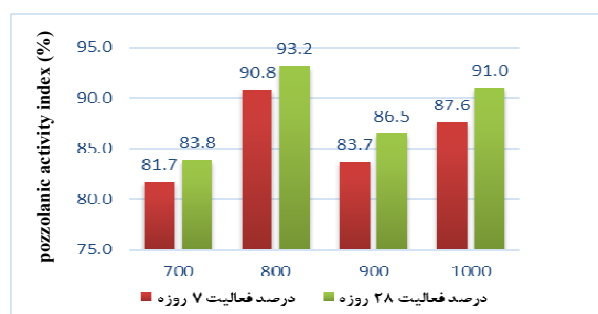


۴-۴-۳- مقاومت فشاری
نتایج آزمون فشاری نمونه های شاهد و نمونه های حاوی خاکستر در زمان ۷ و ۲۸ روزه در نمودار شکل ۲۰ قابل مشاهده است. به طور کل مقاومت نمونه های حاوی خاکستر در مقایسه با نمونه شاهد کمتر می باشد.



شکل ۲۰ - مقایسه مقاومت فشاری نمونه های بتن معمولی و نمونه های حاوی خاکستر لجن فاضلاب در سنین ۷ و ۲۸ روزه

۴-۴-۴- درصد فعالیت و افت مقاومت
شکل ۲۱ مقایسه ای از نسبت مقاومت فشاری نمونه های بتن حاوی ۱۰٪ جایگزینی خاکستر به جای سیمان نسبت به نمونه های شاهد می باشد. در تمامی نمونه های حاوی خاکستر افت مقاومت مشاهده می گردد.



شکل ۲۱ - مقایسه فعالیت پوزولانی نمونه های بتن معمولی و نمونه های حاوی خاکستر لجن فاضلاب در سنین ۷ و ۲۸ روزه

۵. نتیجه گیری و جمع بندی

در این پژوهش از خاکستر لجن فاضلاب به عنوان ماده جایگزین سیمان در ملات و بتن استفاده شد. پس از انجام آزمایش های متعدد و تحلیل بر نتایج آن ها، موارد زیر قابل استنباط می باشد:

- ۱- از مجموعه نتایجی که از آنالیز های شیمیایی موجود بر لجن خام تصفیه خانه های تهران بدست آمد می توان استنباط کرد که تصفیه خانه شهرک غرب دارای بیشترین مواد تشکیل دهنده سیلیسی و آلومیناتی و دارای بیشترین خاصیت پوزولانی می باشد. از این منظر تصفیه خانه های قطریه، اکباتان و جنوب در رتبه های بعدی قرار دارند. به لحاظ واکنش پذیر بودن تقریباً تمامی تصفیه خانه ها دارای فاز سیلیس کریستالی می باشد و نتیجه قاطعی نمی توان گرفت. همچنین عمده پیک های سیلیسی بر هم منطبق نمی باشند.
- ۲- پس از سوزاندن لجن خام در دماهای مختلف و انجام مجدد آزمایش های شیمیایی مشخص می شود که بهترین دمای حرارت دهی لجن خام فاضلاب دمای ۸۰۰ درجه می باشد. زیرا فازهای سیلیسی موجود در این دما بیش از همه از حالت کریستالی به سمت آمورف شدن پیشرفته اند و به لحاظ واکنش پذیری با آب و هیدراسیون، مطلوب تر می باشد.
- ۳- همچنین به طور کلی می توان دریافت که نمونه های حاوی خاکستر لجن به علت تیره بودن خود خاکستر نسبت به سیمان و همچنین کمتر بودن وزن مخصوص خاکستر نسبت به سیمان، دارای رنگ تیره تر و وزن مخصوص کمتری هستند.
- ۴- نتایج آزمایش های فعالیت پوزولانی خاکستر برای ملات و بتن نیز مبین مطلوب بودن دمای حرارت دهی ۸۰۰ درجه می باشد. نمونه های ساخته شده با خاکستر سوزانده شده در این دما دارای بالاترین نسبت مقاومت و کمترین افت مقاومتی می باشند. از این منظر دمای ۱۰۰۰ در رتبه بعدی قرار می گیرد. دمای ۷۰۰ نامطلوب ترین دما در این زمینه بدست آمد.
- ۵- با جایگزینی ۲۰٪ خاکستر به جای سیمان در ساخت ملات با افت مقاومتی در حدود ۳۰ - ۳۵٪ مواجه خواهیم شد که به نسبت افت بالایی محسوب می شود و در بخش سازه ای توصیه نمی شود. با جایگزینی حدود ۱۰٪ خاکستر به جای سیمان در بتن، با افتی در حدود کمتر از ۱۰٪ مواجه می شویم که افتی قابل قبول و قابل اغماض محسوب می شود.

پس به طور کل می توان استنباط کرد بهترین خاکستر حاصل، خاکستر حاصل از سوزاندن لجن خام تصفیه خانه شهرک غرب در دمای ۸۰۰ درجه می باشد. با جایگزینی تا حدود ۱۰ درصد این خاکستر میتوان با افت مقاومتی قابل قبول، در بتن های سازه ای مورد استفاده قرار گیرد. اما با جایگزینی های بین ۱۰ تا ۲۰ درصد کاربرد این خاکستر در بخش سازه ای توصیه نمی شود و بیشتر در بتن های غیر سازه ای میتوان استفاده مطلوب تری کرد. جایگزینی های بالاتر از ۲۰ درصد این خاکستر در ملات و در بتن اعم از سازه ای و غیر سازه ای به دلیل افت مقاومت بسیار زیاد آن توصیه نمی گردد.

۶. منابع

- [۱] قالیبافان، م. (۱۳۸۲). "بتن و محیط زیست". فصلنامه انجمن بتن ایران، سال سوم، شماره ۱۱.
- [۲] شکرچی زاده، م.، میرزایی، ز. (۲۰۱۰). "آموزش مهندسی بتن و سیمان با رویکرد توسعه پایدار و حفظ محیط زیست". نشریه دانشکده فنی، شماره ۴۳.
- [۳] صبور، م.، یکه لر، م.، نیکروان، م. (۲۰۱۴). "بررسی نقش مصرف نانوسیلیس در بتن بر عملکرد زیست محیطی و اقتصادی آن". فصلنامه مهندسی عمران فردوسی، شماره ۲۵.
- [۴] مسافری، م.، مصداقی نیا، ندافی. (۱۳۸۱). "مدیریت لجن تصفیه خانه های فاضلاب شهری ایران در افق ۱۴۰۰". پنجمین همایش ملی بهداشت محیط تهران.

- [۵] فتوت، ع.، علوی مقدم، م.، مکنون، ر.، سبط، م. (۱۳۸۶). "تاثیر جایگزینی خاکستر لجن تصفیه خانه فاضلاب به جای سیمان بر مقاومت فشاری بتن". سومین کنگره ملی مهندسی عمران، تبریز.
- [۶] اخباری، علوی مقدم. (۱۳۸۳). "بررسی استانداردهای EPA آمریکا در خصوص استفاده از لجن تصفیه خانه های فاضلاب در زمینه های کشاورزی". یازدهمین کنفرانس دانشجویان عمران کشور.
- [۷] Tantawy, M., El-Roudi, A., M. Abdalla, E., Abdelzaher, M. (۲۰۱۲). "Evaluation of the pozzolanic activity of sewage sludge ash". ISRN Chemical Engineering.
- [۸] تکدستان، ا.، پازوکی، م. (۱۳۸۷). "لزوم کاربرد مقررات، استاندارد و محدودیت زیست محیطی در کاربرد لجن فاضلاب در کشاورزی در کشور ایران". سومین کنگره ملی بازیافت و استفاده از منابع آلی تجدید شونده در کشاورزی، خوراسگان.
- [۹] حسینی، پ.، بهادری، ه.، حسینی، پ. (۱۳۸۸). "کاربرد لجن فاضلاب به عنوان یک خاکستر بیولوژیکی در بتن و اکتیواسیون آن با استفاده از نانوذرات". سومین همایش تخصصی مهندسی محیط زیست، تهران.
- [۱۰] Monzó, J. Paya, J. Borrachero, M. Córcoles, A. (۱۹۹۶). "Use of sewage sludge ash (SSA)-cement admixtures in mortars". Cement and Concrete Research, vol. ۲۶, no. ۹, pp. ۱۳۸۹-۱۳۹۸.
- [۱۱] Tay, J. (۱۹۸۷). "Sludge ash as filler for Portland cement concrete". Journal of Environmental Engineering, vol. ۱۱۳, no. ۲, pp. ۳۴۵-۳۵۱.
- [۱۲] Alleman, J. Berman, N. (۱۹۸۴). "Constructive sludge management: biobrick". Journal of Environmental Engineering, vol. ۱۱۰, no. ۲, pp. ۳۰۱-۳۱۱.
- [۱۳] Bhatti, J. Reid, K. (۱۹۸۹). "Compressive strength of municipal sludge ash mortars". Materials Journal, vol. ۸۶, no. ۴, pp. ۳۹۴-۴۰۰.
- [۱۴] Cyr, M. Coutand, M. Clastres, P. (۲۰۰۷). "Technological and environmental behavior of sewage sludge ash (SSA) in cement-based materials". Cement and Concrete Research, vol. ۳۷, no. ۸, pp. ۱۲۸۷-۱۲۸۹.
- [۱۵] Chang, F. Lin, J. Tsai, C. Wang, K. (۲۰۱۰). "Study on cement mortar and concrete made with sewage sludge ash". Water Science and Technology, vol. ۶۲, no. ۷, pp. ۱۶۹۳-۱۶۹۸.
- [۱۶] Valls, S. Yagüe, A. Vázquez, E. Mariscal, C. (۲۰۰۴). "Physical and mechanical properties of concrete with added dry sludge from a sewage treatment plant". Cement and concrete research, vol. ۳۴, no. ۱۲, pp. ۲۲۰۳-۲۲۰۸.
- [۱۷] Monzó, J. Payá, J. Borrachero, M. Gírbés, I. (۲۰۰۳). "Reuse of sewage sludge ashes (SSA) in cement mixtures: the effect of SSA on the workability of cement mortars". Waste Management, vol. ۲۳, no. ۴, pp. ۳۷۳-۳۸۱.
- [۱۸] پاکروان، ع. (۱۳۸۴). "بررسی تغییرات مقاومت فشاری و لایه بندی بتن غلطکی در محیط های شور دارای Na^+, K^+, Cl^- ". پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست.
- [۱۹] Vouk, D. (۲۰۱۸). "Influence of combustion temperature on the performance of sewage sludge ash as a supplementary cementitious material". Journal of Material Cycles and Waste Management 20.3, 1458-1467.
- [۲۰] Naamane, S., Rais, Z. Taleb, M. (۲۰۱۶). "The effectiveness of the incineration of sewage sludge on the evolution of physicochemical and mechanical properties of Portland cement". Construction and Building Materials, ۱۱۲ ۷۸۳-۷۸۹.