Iranian Concrete Society

Investigating the Effect of Origin and Heating Temperature on the Properties of Sewage Sludge Ash (SSA) and the Feasibility of Using in Construction Materials

Amirmahdi Nikmanesh*
M.Sc. of structural engineering. University of Tehran
nikmanesh.am@ut.ac.ir

Amirmohammad Ramezanianpour
Associate Professor. School of Civil Engineering, University of Tehran

Mohammad Shekarchizadeh
Professor. School of Civil Engineering, University of Tehran
Research paper

Abstract

With the development of the human community and increasing number of treatment plants, the treatment and disposal of high volume of sludge requires efficient management. Nowadays, due to the lack of land for burying sludge and environmental limitations of using sludge in agriculture, incineration is considered as a proper solution for sludge disposal. Sewage sludge ash is one of the materials that has been used in recent years as a substitute for cement and stone materials in concrete and construction materials. The quality of the resulting ash depends heavily on the origin of the sludge and its incineration process. Regarding this, there is no codified information about the content of the sludge of Tehran wastewater treatment plants, with considering its usage in construction materials. Also, there are many discrepancies in the heating process and the optimal incineration temperature of sewage sludge ash in the sources. In the first step, by examining the sludge of Tehran wastewater treatment plants and performing chemical analyzes such as XRF and XRD, the best treatment plant in terms of constituent content was selected. Then, by burning sewage sludge at 700 to 1000 C and re-analyzing XRF and XRD, as well as calculating the percentage of pozzolanic activity of the resulted ash, the most optimal heating process was selected. The obtained results of this study indicated that heating the Shahrake Gharb wastewater treatment plant's sludge at 800°C produced the most desirable sludge ash in case of chemical composition and pozzolanic activity. So, in general, it can be seen that although sludge ash could not be classified as one of the types of strong pozzolans, but this ash can be used as a raw material for Portland cement production and also as a weak pozzolan in reactions. Therefore, it is possible to replace the sewage sludge ash in optimal percentages in the mortar and concrete with specified applications and as an alternative to cement, fine aggregate and filler.

Keywords: Sustainable development, sewage sludge ash, incineration, pozzolan.

***Corresponding Auther:** Amirmahdi Nikmanesh
Nikmanesh, A., Ramezanianpour, A., Shekarchizadeh, M. Investigating the Effect of Origin and Heating Temperature on the Properties of Sewage Sludge Ash (SSA) and the Feasibility of Using in Construction Materials. *Journal of Concrete Structures and Materials*, 2023; 8(1): 194-213.
http://doi.org/10.30478/jcsm.2023.403887.1334
2538-5828/ © 2023 The Authors. Published by Iranian Concrete Society
This is an open access article under the CC BY license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

انجمن علمی بتن ایران

دریافت مقاله: ۱۴۰۲-۰۴-۰۵

پذیرش مقاله: ۱۴۰۲-۰۸-۲۱

بررسی اثر منشا و دمای حرارت دهی بر خواص خاکستر لجن فاضلاب (SSA) و امکان سنجی استفاده از آن در مصالح ساختمانی

امیرمهدی نیک منش *

کارشناسی ارشد مهندسی عمران، گرایش سازه، دانشگاه تهران، تهران، ایران

(نویسنده مسئول)

nikmanesh.am@ut.ac.ir

امیرمحمد رمضانیانپور

دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران، تهران، ایران

محمد شکرچی زاده

استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران، تهران، ایران

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

چکیده

با توسعه جامعه بشری و افزایش تعداد تصفیه خانه ها، تصفیه و دفع لجن آن هم در حجم زیاد، نیاز به یک مدیریت کارامد دارد. امروزه به دلیل کمبود زمین برای دفن لجن و محدودیت های زیست محیطی کاربرد لجن در کشاورزی، سوزاندن بعنوان یک راه حل مناسب برای دفع لجن مطرح می‌باشد. 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.کیفیت خاکستر حاصل بستگی زیادی به منشا لجن و فرایند سوزاندن آن دارد. در همین راستا در پژوهش حاضر در ۲ گام به رفع خلاهای موجود پرداخته شد. در ابتدا با بررسی لجن تمامی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب تهران و انجام آنالیزهای شیمیایی از قبیل XRF و XRD بهترین تصفیه‌خانه به لحاظ محتوای تشکیل‌دهنده انتخاب گردید. در ادامه با سوزاندن لجن فاضلاب در دمای ۷۰۰ تا ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد و انجام مجدد آنالیزهای شیمیایی و همچنین محاسبه درصد فعالیت پوزولانی خاکسترهای بدست آمده، مطلوبترین دمای حرارت‌دهی انتخاب شد. از نتایج بدست آمده می‌توان استنباط کرد که با توجه به شرایط نمونه گیری این پژوهش، تصفیه خانه شهرک غرب به لحاظ محتوی تشکیل دهنده مطلوب ترین تصفیه خانه تهران می‌باشد. همچنین مناسب ترین دمای حرارت دهی برای نمونه‌های لجن خام به لحاظ فعالیت پوزولانی و واکنش‌پذیری، دمای ۸۰۰ درجه سانتیگراد می‌باشد. به طور کل می‌توان دریافت که اگرچه نمی‌توان خاکستر لجن را به عنوان یکی از انواع پوزولان های قوی طبقه‌بندی نمود، اما می‌توان از این خاکستر به عنوان ماده اولیه تولید سیمان پرتلند و همچنین به صورت یک پوزولان ضعیف در واکنشها استفاده نمود. بنابراین امکان جایگزینی خاکستر لجن تصفیه‌خانه فاضلاب، در درصدهای بهینه در ساختار ملات و بتن با کاربردهای خاص و به عنوان جایگزینی برای سیمان، ریزدانه و پرکننده وجود دارد.

کلمات کلیدی: توسعه پایدار، خاکستر لجن فاضلاب، پرکننده، پوزولان، سوزاندن.

۱- مقدمه

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 [۱]. با توسعه جامعه بشری و افزایش تعداد تصفیه خانه ها، تصفیه و دفع لجن آن هم در حجم زیاد، نیاز به یک مدیریت کارآمد دارد. بر اساس پیش بینی ها، ایران تا سال ۱۴۰۴ دارای ۸۰۰ تصفیه خانه فاضلاب شهری خواهد بود [۲]. به دلیل آنکه حجم لجن خشک تولید شده تصفیه خانه ها زیاد می‌باشد و مصرف مشخصی نیز برای آن‌ها تعریف نشده است، همیشه مشکل انباشت لجن خشک و تر در محوطه تصفیه خانه ها مطرح میباشد که به لحاظ زیست محیطی اثرات نامطلوبی دارد. از این رو مدیریت صحیح لجن تولیدی در تصفیه خانه ها ضروری می باشد [۳]. از طرف دیگر فرآوری مناسب لجن و آماده سازی آن برای دفع نهایی قسمت عمده هزینه های یک تصفیه‌خانه فاضلاب را در بر می‌گیرد. به عنوان مثال، در عمده کشورهای اروپایی بیش از ۵۰ درصد از هزینه های سرمایه گذاری و بهره برداری یک تصفیه خانه، صرف فرآوری و دفع لجن حاصل از آن می‌گردد[۴].

روش های اصلی دفع لجن را می توان به دو بخش اساسی روش های مناسب (کاربرد مناسب در زمین‌های کشاورزی، دفن بهداشتی، کمپوست[1] کردن، سوزاندن و استفاده در تولید مصالح ساختمانی) و روش‌های نامناسب (دفن غیر بهداشتی، کاربرد نامناسب در زمین های کشاورزی، تزریق به چاه های جذبی، دفع سطحی به رودخانه ها و دریاها و ...) تقسیم بندی نمود [۵]. دفع سطحی لجن حاصل از تصفیه فاضلاب در زمین نیازمند تامین تجهیزات خاص آن و همچنین اعمال قوانین و استانداردهای محیط زیستی و در نتیجه هزینه زیاد خواهد برد [۶]. از طرفی گزینه استفاده مجدد در کشاورزی نیز به علت وجود فلزات سنگین نیازمند به رعایت مقررات و استانداردهای محیط زیستی و بهداشتی است. مضاف بر اینکه در ایران بسیاری از کشاورزان میل و رغبت زیاد جهت استفاده مجدد لجن در کشاورزی ندارند [۷].

در سالهای اخیر 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 زیاد (مانند تهران) بعنوان راهکاری مناسب برای مدیریت لجن به شمار میآید. فرایند سوزاندن لجن به تولید خاکستر معدنی، بی خطر و عاری از پاتوژنها می‌انجامد [۸]. از دیگر مزایای سوزاندن می‌توان به کاهش ۹۰ درصدی حجم لجن، از بین رفتن مواد سمی[2] و فلزات سنگین، از بین رفتن بو و سهولت مدیریت خاکستر حاصل اشاره کرد [۹].

یکی از ملاحظات اصلی که مورد توجه بسیاری از مردم قرار گرفته است آلاینده‌های احتمالی حاصل از سوزاندن لجن فاضلاب می‌باشد. ورتر و اوگادا [3] در پژوهشی به بررسی اثرات سوزاندن لجن فاضلاب پرداختند . آن‌ها دریافتند با استفاده از فناوری های مدرن و موثر دودکش ها که در حال حاضر در کارخانه های سوزاندن وجود دارد، احتراق لجن فاضلاب می تواند محدودیت های انتشار انواع گاز را براورده کند. لذا به نظر می رسد که سوزاندن لجن فاضلاب علیرغم تصویر عمومی بد، چندان ضرر زیادی را به محیط زیست تحمیل نمی‌کند[۱۰].

از سوی دیگر پیشرفت مهندسی عمران و توسعه ساخت و ساز به مرور زمان، اثرات نامطلوبی را ایجاد می نماید که می‌تواند جامعه بشری و حتی نسل های بعد را تحت تاثیر قرار دهد. یکی از این آثار استفاده از منابع تجدید ناپذیر جهت ساخت مصالح ساختمانی است. از دیگر آثار مخرب توسعه صنعت ساخت می‌توان به مشکلات زیست محیطی بوجود آمده اشاره کرد. امروزه بتن به عنوان

---

[1] Composت

[2] Toxics

[3] Werther and Ogada

پرمصرف ترین ماده در جهان مطرح می‌باشد؛ آلوده‌کننده‌ترین بخش ساخت بتن مربوط به صنعت سیمان است [۱۱]. مطابق آمار حدود ۳۰ الی ۴۰ درصد تولید گازهای گلخانه‌ای منتشر شده ناشی از صنعت ساختمان است [۱۲]. همچنین ۴۰ تا ۵۰ درصد زباله ها و نخاله های تولید شده در جهان بصورت مستقیم یا غیر مستقیم مربوط به صنعت ساختمان می‌باشد [۱۳]. همچنین هشت درصد دی اکسید کربن موجود در اتمسفر مرتبط با صنعت سیمان می‌باشد [۱۴]. 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 [۱۵].

یکی از بهترین راهکارها درخصوص بهبود خواص بتن ازدیدگاه زیست محیطی، یافتن جایگزینهای مناسب برای سیمان مصرفی در بتن و سایر مصالح ساختمانی، حتی در درصدهای کم جایگزینی، می‌باشد. در این میان، پوزولان ها که از دیر باز به عنوان جایگزین و مکمل سیمان در ساخت و سازها مورد استفاده قرارگرفتهاند می توانند مشکلات مربوط به محدودیت تولید این گازها را تا میزان زیادی حل نمایند. پوزولان ها توانسته اند از طریق جایگزینی با سیمان ضمن صرفه جویی در مصرف انرژی مورد نیاز در تولید سیمان وکاهش انتشارات آلاینده‌ها، مقاومت فشاری و دوام آن‌ها را نیز افزایش دهند [۱۶].

در همین راستا پاولیک[۴] و همکاران با برآورد میزان انتشار گازهای گلخانه ای حاصل از تولید خاکستر لجن فاضلاب نتیجه گرفت که این میزان در مقایسه با تولید سیمان ۹۵ درصد کاهش یافته است. لذا می‌توان نتیجه گرفت جایگزینی خاکستر لجن فاضلاب به جای سیمان حتی در درصد های جایگزینی کم باعث کاهش تولید گاز CO_2 و سایر گازهای گلخانه ای می‌گردد که به لحاظ زیست محیطی بسیار مطلوب می‌باشد[۱۷].

حال با توجه به اینکه سوزاندن لجن و تبدیل آن به خاکستر راهکاری مناسب جهت مدیریت معضل لجن می‌باشد، مدیریت خاکستر حاصل به عنوان محل بحث در بسیاری از پژوهش های مرتبط مطرح می‌باشد. یکی از مناسب ترین استفاده ها از خاکستر لجن تصفیه خانه فاضلاب (SSA [۵])، استفاده در مصالح سازه ای می‌باشد. کاربرد این ماده می‌تواند به عنوان جایگزین سیمان و یا ریزدانه مطرح گردد. در صورت کاربرد این خاکستر به عنوان ماده پوزولانی و جایگزینی به جای سیمان، علاوه بر توجه به بعد محیط زیستی مربوط به مدیریت لجن، مشکلات زیست محیطی مرتبط با صنعت سیمان نیز تحت تاثیر قرار گرفته و این کاربرد خاصیت مثبت مضاعف را دارا می‌باشد.

کیفیت خاکستر حاصل وابستگی زیادی به منشا لجن و فرآیند حرارت دهی آن دارد. لجن حاصل از تصفیه‌خانه‌های فاضلاب طیف کیفی بسیار وسیعی دارند. این تفاوت عمده صرفا به محتوی و ترکیبات لجن تصفیه‌خانه‌های مختلف محدود نمی‌شود، بلکه حتی در فصول مختلف، ترکیبات تصفیه‌خانه‌های فاضلاب نیز متغیر می‌باشند. از طرف دیگر در پژوهش جامعی که ووک[۶] و همکاران بر روی لجن ۲ تصفیه خانه مختلف در زاگرب صورت دادند، بر اساس مشخصات مکانیکی ملات ها، بهترین دمای سوزاندن ۹۰۰ درجه سانتیگراد و بدترین ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد بدست آمد[۱۸]. به طور کل سوزاندن لجن فاضلاب در بازه دمایی ۳۰۰ تا ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد می‌تواند منجر به حصول خاکستری با خواص پوزولانی زیاد تا کم شود. در عمده پژوهش ها قاعده مشخصی برای دمای سوزاندن به دست نیامده است به طوری که سوزاندن لجن در دماهای ۷۰۰، ۸۰۰ و ۸۵۰ درجه سانتیگراد باعث تولید خاکسترهایی با خواص پوزولانی زیاد، متوسط و کم گردیده است [۱۹-۲۵]. در مجموع تناقض های زیادی بین بهترین دمای سوزاندن لجن در پژوهش های پیشین وجود دارد. مطلوب ترین دمای احتراق در پژوهش های اخیر به ترتیب ۸۰۰ درجه سانتیگراد[۲۷ و۲۶]،

---

[4] Pavlik

[5] Sewage sludge ash

[6] Vouk

۹۰۰ درجه سانتیگراد [۱۸] و ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد [۲۸] به دست آمده است.

روزانه بیش از ۲ میلیون مترمکعب فاضلاب در تهران تولید می شود. ظرفیت تصفیه خانه های فاضلاب تهران چیزی در حدود ۳۱۰۰۰۰ نفر می‌باشد که این عدد در حدود ۴ درصد جمعیت تهران را تشکیل می‌دهد [۲۹]. فرآیند تصفیه در تصفیه خانه های مورد بررسی در این پژوهش تفاوت هایی با یکدیگر دارند. روش تصفیه بیولوژیک در تمامی تصفیه خانه ها، بجز تصفیه خانه جنوب، از نوع فرآیند های هوازی و در تصفیه خانه جنوب از نوع بی هوازی می‌باشد. همچنین شیوه هوادهی و فرآیند تثبیت و ته نشینی در تصفیه خانه ها دارای اختلافاتی جزئی با یکدیگر است.

در حال حاضر از بین تصفیه خانه های فعال تهران، سه تصفیه خانه فاضلاب اکباتان، شهرک غرب و جنوب دارای بستر خشک کن می‌باشند و لجن حاصل از تصفیه فاضلاب آن‌ها خشک شده و به عنوان کود برای مصارف کشاورزی مورد استفاده قرار می گیرد. تصفیه خانه فاضلاب اکباتان، محلاتی و قیطریه دارای دستگاه فیلتر پرس بوده که لجن را خشک کرده و سپس به شکل کیک لجن درآورده و مورد استفاده قرار می دهند. متاسفانه سایر تصفیه خانه های فاضلاب تهران مقداری از لجن خود را به عنوان لجن برگشتی مورد استفاده قرار داده و مازاد آن را بدون تصفیه مناسب در مناطق کشاورزی پایین شهر، بیابانها و... رها می کنند.

در راستای اهداف این پژوهش به عنوان نقطه شروع به طور خاص در این تحقیق برای اولین بار به بررسی محتوی لجن ۷ تصفیه خانه فاضلاب فعال شهر تهران پرداخته شد تا به بهترین محتوی شیمیایی و ترکیبات ممکن برای لجن خام دست پیدا شود. همچنین فرآیند حرارت دهی و سوزاندن که تا کنون در ایران به طور مختصر به آن پرداخته شده است و در پژوهش های صورت گرفته در سایر کشور ها نیز نتایج ضد و نقیض میباشند، به طور مفصل تر مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت نیز فعالیت پوزولانی این خاکستر در مطلوب ترین حالت محاسبه و دامنه کاربرد و امکان سنجی استفاده از آن در مصالح ساختمانی و به طور مشخص در بتن تعیین گردید. امید است که مشاهدات و نتایج این تحقیق، پژوهشگران را به سمت اعمال عملیات حرارتی بهینه برای رسیدن به خواص مطلوب تر خاکستر راهنمایی کند.

۲- مطالعات آزمایشگاهی

۲-۱- مصالح

۲-۱-۱- سیمان

با مد نظر قرار دادن این نکته که در این پژوهش خواص غیر متعارفی از نمونه های ملات و بتن مورد انتظار نبود و همچنین با توجه به مقایسه ای بودن عمده آزمایش‌ها و نتایج، لذا سیمان پرتلند تیپ ۲ ساوه در تمامی مراحل پژوهش مورد استفاده قرار گرفت. آنالیز شیمیایی سیمان مورد استفاده و همچنین فازهای تشکیل دهنده بر اساس استاندارد های ASTM C۱۱۴ مطابق جدول ۱ می‌باشد.

جدول ۱ - آنالیز شیمیایی سیمان پرتلند تیپ ۲ ساوه مطابق ASTM C114

اکسید	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2O	K_2O
مقدار (درصد)	65/20	00/4	08/4	22/65	53/1	22/2	52/0	35/0

فازهای تشکیل دهنده				سایر مشخصات		
نام	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF	L.O.I	قلیاییت معادل	باقیمانده نامحلول
مقدار (درصد)	٦١	١٣	٤	١٢	١.٥٢	٠.٤٣	٠.٧٥

۲-۱-۲- سنگدانه

ـ شن و ماسه

در این پژوهش از بسته های ۱۳۵۰ گرمی ماسه استاندارد مطابق با استانداردDIN EN196-1 برای آزمایش مقاومت فشاری ملات و محاسبه فعالیت پوزولانی خاکستر لجن فاضلاب استفاده گردید. همچنین شن و ماسه استفاده شده در این پژوهش از نوع دوبار شور قرضه واقع در جاده شهریار می‌باشد. مشخصات شن و ماسه مصرفی در جدول ۲ قابل مشاهده است.

جدول ۲ - مشخصات شن و ماسه مصرفی پژوهش

نوع	ماسه	شن نخودی	شن بادامی
نام	FA۱	CA۱	CA2
اندازه و ابعاد (میلی‌متر)	تا ۴,۷۵	تا ۱۲,۵	تا ۱۹
درصد جذب آب (٪)	۲,۹	۲,۱	۱.۹
مدول نرمی	۳,۳	–	–

۲-۱-۳- افزودنی

در پژوهش حاضر برای ایجاد روانی مورد انتظار از بتن، در تمامی فاز ها از فوق روان کننده نوع سوم پلی کربوکسیلاتی فرکوپلاست PN۹ استفاده گردیده است.

۲-۱-۴- خاکستر لجن فاضلاب

در این پژوهش از تمامی تصفیه خانه های فعال شهر تهران شامل تصفیه خانه های جنوب، شهرک غرب، اکباتان، محلاتی، قیطریه، زرگنده و صاحبقرانیه نمونه برداری شد. این عمل در بازه زمانی مهر و آبان ۹۷ صورت گرفت و از هر تصفیه خانه در حدود ۱۰ کیلوگرم لجن خشک برداشت و با انجام آزمایش های شیمیایی بهترین تصفیه خانه به لحاظ محتوی تشکیل دهنده لجن انتخاب گردید. سپس با انجام دادن فرایند حرارت دهی در دماهای متفاوت و انجام مجدد آزمایش‌های شیمیایی و همچنین ساخت آزمونه های ملات و انجام آزمایش های مربوط به فعالیت پوزولانی، بهترین فرایند و حرارت سوزاندن نیز انتخاب گردید.

۲-۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۲-۱- مطالعات ماهیتی و حرارتی لجن و خاکستر لجن فاضلاب

به منظور حصول نتایج بهتر از آنالیز های شیمیایی، نمونه لجن همه تصفیه خانه ها ابتدا خشک و سپس آسیاب شدند تا به پودری با حدود نرمی سیمان حاصل شود. به منظور جلوگیری از تغییر خواص ذاتی نمونه های لجن خام، حرارت دهی در دمای ۵۰ درجه سانتی گراد صورت گرفت.

همانگونه که در شکل ۱ نیز قابل مشاهده است، تفاوت محسوسی در رنگ و بافت لجن تصفیه خانه های مختلف وجود دارد. این تفاوت می‌تواند ناشی از منشا فاضلاب ورودی به تصفیه خانه و همچنین نوع فرآیند تصفیه اعمالی بر روی آن باشد.

شکل ۱- لجن تصفیه خانه های نمونه گیری شده پس از حرارت دهی در خشک کن تا دمای ۵۰ درجه سانتیگراد

در ادامه نمونه های خشک شده توسط دستگاه آسیاب به ذرات کوچکتر از الک شماره ۲۰۰ تبدیل شدند تا واکنشزایی مطلوبتری حاصل گردد. خاکستر های حاصل از حرارت دهی نمونه های لجن تصفیه خانه های مختلف تهران برای بررسی محتوی شیمیایی و فازهای تشکیل دهنده تحت آنالیزهای شیمیایی متفاوتی نظیر XRF و XRD قرار گرفتند.

پس از حصول نتایج مربوط به نمونه های لجن خام، بهترین تصفیه خانه به لحاظ محتوی لجن انتخاب گردید. سپس جهت دستیابی به بهترین فرآیند حرارت دهی، لجن خام تصفیه خانه مورد نظر در دماهای مختلف سوزانده شدند و مجددا مورد آنالیز شیمیایی قرار گرفتند. از آنجا که بهترین دمای سوزاندن در پژوهش های پیشین صورت گرفته بین ۸۰۰ تا ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد ذکر شده است، در این پژوهش ۴ دمای ۷۰۰، ۸۰۰ ، ۹۰۰ و ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد جهت سوزاندن لجن در نظر گرفته شد. خاکستر حاصل جهت تعیین میزان واکنش پذیری و بلوری بودن مجددا تحت آزمایش‌های XRD و XRF قرار گرفتند. مطابق شکل ۲ و به لحاظ مقایسه ظاهری، خاکستر لجن فاضلاب از سیمان تیره تر می‌باشد.

شکل ۲- مقایسه ظاهری سیمان (راست) و خاکستر لجن فاضلاب (چپ)

۲-۲-۲-طرح های مخلوط

جهت بررسی خاکستر لجن فاضلاب از منظر فعالیت پوزولانی و خواص مکانیکی، ۵ طرح مخلوط برای بتن و ۵ طرح مخلوط برای ملات طراحی شد. طرح های مورد نظر ملات جهت انجام آزمایش فعالیت پوزولانی طبق استاندارد ASTM C۳۱۱ می‌باشند. این طرح ها شامل آزمونه های ملات با ۲۰ درصد خاکستر لجن فاضلاب جایگزین شده به جای سیمان می‌باشند که در جدول ۳ قابل مشاهده میباشند.

جدول ۳ - طرح های مخلوط ملات برای آزمایش تعیین درصد فعالیت پوزولانی خاکستر لجن فاضلاب

نام طرح	درصد جایگزینی	دمای سوزاندن (درجه سانتیگراد)	ماسه (gr)	سیمان (gr)	خاکستر (gr)	آب (ml)
Control	۰	-	۱۳۵۰	۵۰۰	۰	۲۴۲
SSAM 1000 , 900 , 800 , 700	۲۰	۷۰۰، ۸۰۰، ۹۰۰ و ۱۰۰۰	۱۳۵۰	۴۰۰	۱۰۰	۲۴۲

از سوی دیگر 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 شد، لذا ۵ طرح مخلوط بتنی نیز با ۱۰ درصد جایگزینی خاکستر به جای سیمان تهیه گردید تا نتایج آن نیز در تصمیم گیری برای انتخاب بهترین فرآیند حرارت دهی منظور گردد. قابل ذکر می‌باشد که قبل از هر اختلاط هر طرح، درصد رطوبت مصالح سنگی در آزمایشگاه بدست آمده و آب اضافی اختلاط هر طرح مخلوط برای رساندن رطوبت سنگ‌دانه‌ها به حالت SSD جداگانه محاسبه شده است. طرح پایه بتن با مقاومت هدف ۴۰ مگاپاسکال و اسلامپ هدف ۱۲۰ میلی‌متر انتخاب گردید. همچنین در تمامی طرح های مخلوط بتن میزان استفاده از مصالح سنگی برای ماسه، شن بادامی و شن نخودی به طور حدودی به ترتیب برابر ۶۰، ۲۵ و ۱۵ درصد بر اساس تجربه های پیشین فرض گردید. طرح های مخلوط بتن در این گام پژوهش در جدول ۴ آمده است. نسبت آب به سیمان در این گام برابر ۰,۵ فرض گردیده است.

جدول۴- طرح‌های مخلوط بتن در نظر گرفته شده برای تعیین درصد فعالیت پوزولانی خاکستر لجن فاضلاب

نام طرح	درصد جایگزینی	دمای سوزندان (درجه سانتیگراد)	سیمان (kg/m^3)	خاکستر (kg/m^3)	ماسه FA1 (kg/m^3)	شن CA1 (kg/m^3)	شن CA2 (kg/m^3)	آب گل (kg/m^3)	فوق روان‌کننده (kg/m^3)
Control	۰	-	۴۰۰	۰	۱۱۰۰	۲۰۰	۴۵۰	۴۵۰	./۸
SSAC		۷۰۰، ۸۰۰							
700,800	۱۰		۳۶۰	۴۰	۱۰۹۷	۱۹۸	۴۴۸	۲۰۰	
900,1000		۹۰۰، ۱۰۰۰							۲

۲-۲-۳ - ساخت آزمونه ها

ساخت نمونه های ملات و زمان اختلاط بر اساس استانداردASTM C350 صورت گرفت. نمونه گیری ملات در قالب‌هایی مکعبی با ابعاد ۵۰میلی متر انجام و هر آزمونه در دو لایه به وسیله کوبه متراکم شد. آزمونه های بتنی نیز در ابعاد مکعب ۱۵۰ میلی‌متری تهیه گردید.

۲-۲-۴- شرایط عمل‌آوری آزمونه‌ها

آزمونه ها طبق استانداردASTM C192 به مدت ۲۴ ساعت در قالب و سپس تا زمان آزمایش در آب آهک اشباع با دمای ۲۳ ±۲ درجه سانتیگراد عمل‌آوری شدند.

۲-۲-۵- آزمایش‌ها

الف - آزمایش درصد فعالیت پوزولانی خاکستر لجن فاضلاب در ملات

طیف گسترده ای از روش های آزمایش برای ارزیابی فعالیت پوزولانی در استاندارد ها و مقالات گزارش شده است. این روش‌ها را می‌توان به عنوان روش مستقیم یا غیرمستقیم طبقه‌بندی کرد. روش های آزمایش غیرمستقیم یک ویژگی نمونه آزمایشی را اندازه می‌گیرد که نشانگر و نمایانگر میزان فعالیت پوزولانی می‌باشد. در همین راستا درصد فعالیت پوزولانی (PAI) یا درصد فعالیت مقاومتی (SAI) برای آزمونه های ملات طبق استاندارد ASTM C311 و BS 3892 بر اساس رابطه (۱) مورد محاسبه قرار گرفت. این درصد برای هر آزمونه برابر با حاصل تقسیم مقاومت آزمونه های دارای خاکستر جایگزین شده بر مقاومت آزمونه شاهد در همان زمان می‌باشد. برای خاکستر حاصل از هر دما ۶ آزمونه مکعبی ۵۰ میلی‌متری ملات حاصل از جایگزینی ۲۰ درصد خاکستر به جای سیمان ساخته شد که دو آزمونه در سن ۷ روز و ۴ آزمونه در سن ۲۸ روز مورد آزمایش قرار گرفتند.

$$S.A.I = (A / B) \times 100 \qquad (1)$$ (درصد فعالیت پوزولانی)

A = مقاومت آزمونه ملات حاوی ۲۰٪ خاکستر و B = مقاومت آزمونه ملات شاهد فاقد خاکستر

ب - آزمایش درصد کسب مقاومت خاکستر لجن فاضلاب در بتن

آزمایش مقاومت فشاری برای آزمونه های بتن طبق استاندارد ASTM C39 صورت گرفته است. برای خاکستر حاصل از هر دما ۴ آزمونه مکعبی ۱۵۰ میلی متری بتن حاصل از جایگزینی ۱۰٪ خاکستر به جای سیمان ساخته شد که دو آزمونه در سن ۷ روز و دو آزمونه نیز در سن ۲۸ روز مورد آزمایش قرار گرفتند. با الگو گرفتن از آیین نامه های گفته شده در بخش های قبل، از آنجاکه این آزمایش به صورت استاندارد در منبعی گفته نشده لذا به طور فرضی پارامتری به عنوان درصد کسب مقاومت تعریف کرده که به صورت حاصل تقسیم مقاومت آزمونه های حاوی خاکستر در هر زمان بر مقاومت آزمونه شاهد تعریف شده است که برای هر طرح بر اساس رابطه (۲) مورد محاسبه قرار گرفت.

$$S.G.I = (A / B) \times 100 \qquad (2)$$ (درصد کسب مقاومت)

A = مقاومت آزمونه بتن حاوی ۱۰٪ خاکستر و B = مقاومت آزمونه بتن شاهد فاقد خاکستر

[7] Strength Gain Index

۳- نتایج و بحث و بررسی

۳-۱- نتایج آزمایش XRF لجن خشک فاضلاب

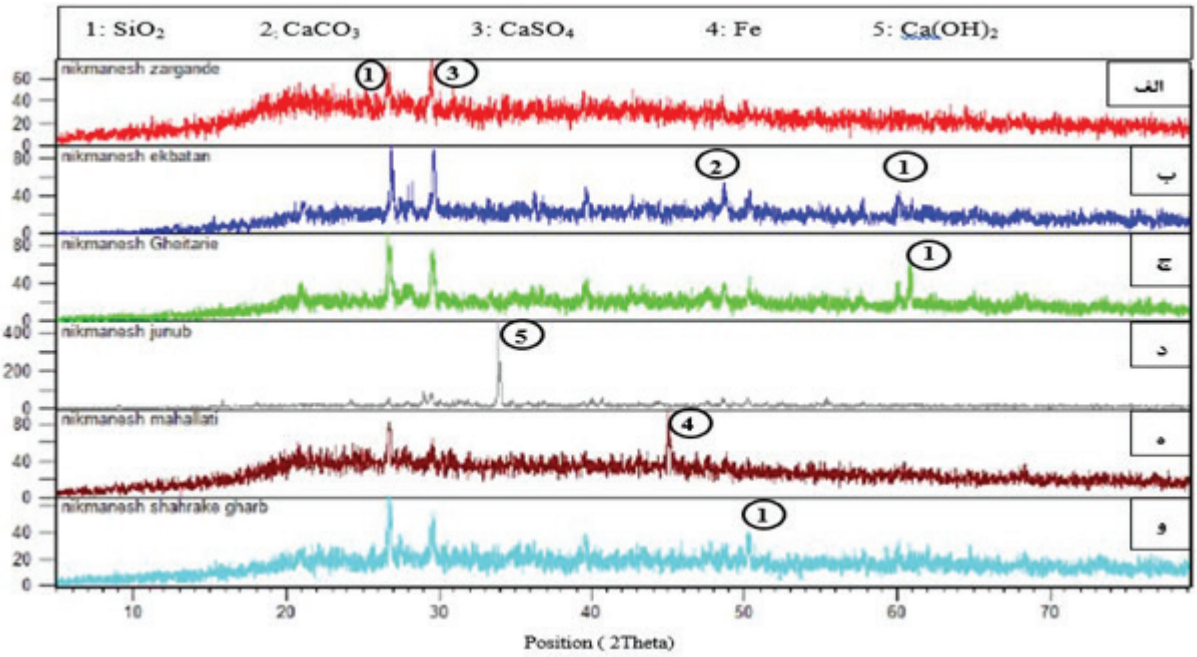
از نتایج آزمایش XRF که در جدول ۵ قابل مشاهده است می‌توان استنباط کرد که فازهای اصلی تشکیل دهنده لجن فاضلاب تصفیه خانه های تهران، Al_2O_3، SiO_2، Fe_2O_3، CaO و P_2O_5 می‌باشند که بعضا مشابه با فازهای اصلی تشکیل دهنده سیمان است. مطابق استاندارد ASTM C۶۱۸ جمع فازهای $Fe_2O_3+SiO_2+Al_2O_3$ بیانگر میزان فعالیت پوزولانی ماده می‌باشد که مجموع این فازها در ردیف آخر جدول محاسبه و مقایسه شده است. لذا در این بخش می‌توان استنباط کرد که تصفیه خانه شهرک غرب دارای بیشترین مواد تشکیل دهنده سیلیسی وآلومیناتی و دارای بیشترین خاصیت بالقوه پوزولانی می‌باشد از این منظر تصفیه خانه های قیطریه، اکباتان و جنوب در رتبه های بعدی قرار دارند. قابل ذکر است تفاوت های نسبتا زیاد در مقادیر اکسید های تشکیل دهنده تصفیه خانه های مورد بررسی عمدتا به تفاوت منشا فاضلاب ورودی و نوع و فرآیند تصفیه در تصفیه خانه بستگی دارد.

جدول ۵ - آنالیز شیمیایی XRF نمونه های لجن فاضلاب تصفیه خانه های تهران

مقدار اکسید (٪)	اکباتان	قیطریه	زرگنده	جنوب	محلاتی	شهرک غرب	صاحبقرانیه
MgO	۱,۱۰	۱,۲۲	۰,۵۷	۰,۷۲	۰,۷۶	۱,۱۵	۰,۸۵
Al_2O_3	۱,۷۲	۱,۷۲	۰,۹۱	۰,۸۰	۰,۵۵	۲,۱۰	۱,۰۶
SiO_2	۸,۱۴	۸,۷۹	۴,۸۹	۵,۳۸	۳,۵۵	۱۰,۵۴	۵,۷۴
P_2O_5	۴,۰۶	۳,۲۶	۲,۶۵	۳,۰۳	۲,۸۶	۴,۵۰	۲,۹۲
SO3	۲,۷۹	۲,۴۹	۲,۲۰	۲,۹۱	۲,۰۲	۲,۹۷	۲,۲۳
CaO	۸,۲۱	۷,۷۰	۴,۱۶	۸,۸۰	۳,۷۴	۹,۲۱	۵,۰۹
Fe_2O_3	۲,۴۴	۲,۱۸	۱,۲۳	۱,۴۲	۱,۵۱	۲,۹۶	۱,۶۴
$Al_2O_3+SiO_2+Fe_2O_3$	۱۲,۳۰	۱۲,۷۰	۷,۰۰	۷,۶۰	۵,۶۰	۱۵,۶۰	۸,۴۰

۳-۲- نتایج آزمایش XRD لجن خشک فاضلاب

در ادامه به جهت بررسی واکنش پذیری لجن تصفیه خانه های تهران، با انجام آزمایش XRD بر روی آزمونه های پودری آماده شده مطابق بند ۲-۲-۱ ، به بررسی نتایج پرداخته شد. نتایج آزمایش XRD در شکل ۳ قابل مشاهده است. ۳ پیک اصلی تشخیص داده شده در اکثر نمونه ها سیلیس یا SiO_2 (۱) و کلسیت $CaCO_3$(۲) و انیدریت $CaSO_4$ (۳) می‌باشند. همان طور که در شکل ۳ نیز مشخص است فاز های سیلیسی تشخیص داده شده محدود می‌باشد و پیک های سیلیسی نیز عمدتا بر هم منطبق نیستند و همگی دارای شدت بسیار کمی هستند. همچنین از آنجا که طیف موجود دارای قله های متراکم و تیز می‌باشد، عمده فازهای تشکیل شده حالت بلورین داشته و واکنش پذیری مطلوبی ندارند. در بین تصفیه خانه های موجود، تصفیه خانه شهرک غرب، اکباتان و قیطریه به لحاظ شدت قله های موجود سیلیسی و میزان واکنش پذیری سیلیس به ترتیب مطلوبیت رتبه بندی میشوند.



شکل ۳- طیف XRD لجن خام تصفیه خانه های تهران شامل : الف) زرگنده، ب) اکباتان، ج) قیطریه، د) جنوب، ه) محلاتی، و) شهرک غرب

پس از بررسی نتایج مربوط به نمونه های لجن خام، بهترین تصفیه خانه به لحاظ محتوای تشکیل دهنده لجن و زیادتر بودن پتانسیل بالقوه خواص پوزولانی، تصفیه خانه شهرک غرب، انتخاب گردید. سپس به جهت حصول بهترین فرآیند حرارت دهی، لجن خام تصفیه خانه مورد نظر در دماهای مختلف اعم از ۷۰۰، ۸۰۰ ، ۹۰۰ و ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد سوزانده شد و خاکستر حاصل جهت تعیین میزان اکسید های تشکیل دهنده، واکنش پذیری و بلورین بودن مجددا تحت آزمایش های XRD وXRF قرار گرفت. قابل ذکر است روند کاهش دما پس از حرارت دهی نیز می تواند بر میزان واکنش پذیری خاکستر تاثیر بسزایی داشته باشد.

۳-۳- نتایج آزمایش XRF خاکستر لجن فاضلاب

مطابق نتایج قابل مشاهده در جدول ۶ می‌توان گفت که اکسید های اصلی تشکیل دهنده خاکستر لجن مشابه لجن خام می‌باشد با این تفاوت که درصد این اکسیدها در خاکستر بالاتر از خود لجن می‌باشد. در دمای ۸۰۰ درجه سانتیگراد مقدار مجموع اکسیدهای سیلیس، آلومینیوم و آهن خاکستر لجن چیزی در حدود ۴۸ درصد می‌باشد. بر اساس استاندارد ASTMC618 مجموع اکسیدهای سیلیسیوم، آلومینیوم و آهن برای انواع رده بندی مواد پوزولانی، باید بیشتر از ۷۰ درصد باشدکه این مجموع برای پوزولانهای میکروسیلیس و متاکائولن به ترتیب برابر حدودا ۹۸ و ۹۶ ٪ می‌باشد و خاکستر موجود نمی‌تواند محدودیت های این استاندارد را تامین نماید. از سوی دیگر بر اساس استاندارد ASTMC618 حداکثر میزان SO_3 در مواد پوزولانی رده N برابر ۴ درصد و مواد پوزلانی رده F و C برابر ۵ درصد می‌باشد با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۶ میزان اکسید گوگرد موجود در خاکستر لجن در مقایسه با بیشینه مجاز ارائه شده برای تمام رده بندی مواد پوزلانی کمتر بوده و از این لحاظ الزامات استاندارد را تامین می نماید. از طرفی میزان قلیائیت کل که بر اساس استاندارد ASTM C311 برابر با Na2O+0.658K2O است، در خاکستر لجن فاضلاب (حدود ۰٫۵درصد) در مقایسه با میکروسیلیس (۰٫۰۶درصد) و متاکائولن (۰٫۰۵ درصد) بسیار بیشتر است. قلیاییت موجود در مواد

سیمانی و پودری باید حتما کنترل شود، زیرا در صورت استفاده به همراه سنگ‌دانه‌های سیلیسی فعال در بتن می توانند باعث انبساط مخرب شوند. بیشینه مجاز ارائه شده در استاندارد برای مواد سیمانی برابر ۰٫۶درصد است. بنابراین الزامات آیین نامه ای توسط خاکستر موجود رعایت شده است.

وزن مخصوص خاکستر لجن فاضلاب سوزانده شده در دمای ۸۰۰ درجه سانتیگراد طبق ASTM C188 برابر ۲٫۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب بدست آمد. همچنین سطح مخصوص این خاکستر به روش جذب ازت (BET) برابر ۱۵۴۳٫۸ متر مربع بر کیلوگرم بدست آمده است. قابل ذکر است سطح ویژه خاکستر لجن بر خلاف پوزولان های رایج مانند میکروسیلیس و متاکائولن تابع شرایط آماده سازی آن می‌باشد و مقدار مشخصی ندارد. در این پژوهش فرآیند آسیاب کردن و غربالگری صورت گرفته نقش بسزایی در سطح مخصوص زیاد خاکستر دارد.

به طور کل می‌توان نتیجه گرفت که اگرچه نمی‌توان بر اساس مواد تشکیل دهنده خاکستر لجن را به عنوان یکی از انواع مواد پوزولانی قوی طبقه بندی نمود، اما می‌توان از این خاکستر به عنوان ماده اولیه تولید سیمان پرتلند و همچنین به صورت یک پوزولان ضعیف در واکنشها استفاده نمود.

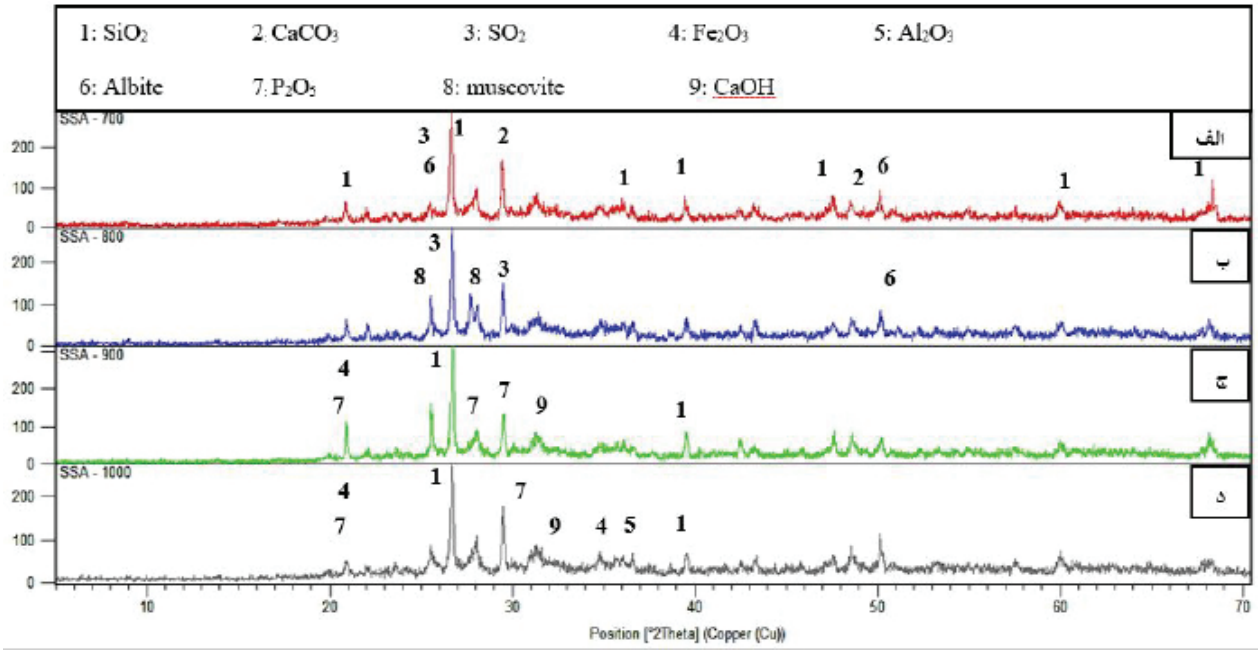
جدول ۶ - آنالیز شیمیایی XRF نمونه های خاکستر لجن فاضلاب تصفیه خانه های تهران

مقدار اکسید (٪)	دمای سوزاندن ۷۰۰	دمای سوزاندن ۸۰۰	دمای سوزاندن ۹۰۰	دمای سوزاندن ۱۰۰۰
MgO	۱٫۷۲	۱٫۸۴	۱٫۹۵	۱٫۷۷
Al_2O_3	۴٫۰۹	۵٫۶۱	۴٫۱۹	۴٫۳۶
SiO_2	۲۴٫۷۷	۳۲٫۶۳	۳۱٫۶۲	۲۶٫۴۰
P_2O_5	۹٫۸۱	۹٫۲۳	۸٫۴۵	۷٫۹۶
SO_3	۳٫۱۶	۳٫۲۲	۳٫۹۰	۴٫۲۱
CaO	۲۱٫۱۸	۲۳٫۸۵	۲۳٫۰۲	۲۱٫۱۹
Fe_2O_3	۷٫۴۱	۹٫۶۶	۸٫۸۹	۸٫۵۶
$Al_2O_3+SiO_2+Fe_2O_3$	۳۶٫۲۷	**۴۷٫۹**	۴۴٫۷	۳۹٫۳۲

۳-۴- نتایج آزمایش XRD خاکستر لجن فاضلاب

نتایج آزمایش XRD نمونه های خاکستر لجن که در دماهای ۷۰۰، ۸۰۰، ۹۰۰ و ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد سوزانده شده در شکل ۴ به صورت مقایسه ای نشان داده شده است. با توجه به طیف موجود، فازهای اصلی تشخیص داده شده در دماهای مختلف، سیلیس(SiO2) ، کلسیت (CaCO3)، آلبیت ((Na(AlSi3O8)، هماتیت (Fe2O3)، اکسید آلومینیوم (Al2O3) و اکسید سولفور (SO2) می‌باشند. همان گونه که از شکل مشخص است فاز های سیلیسی تشخیص داده شده به نسبت لجن خام بیشتر و دارای شدتی بسیار بالاتر (حدود ۴برابر) می‌باشد. همچنین بخشی از فازهای سیلیس بلوری، به علت حرارت داده شده به صورت آمورف درآمده است. پیک اصلی سیلیس (SiO2) در زاویه($2\Theta = 26.6445^\circ$) رویت گردیده است. از آنجا که الگوی XRD از مواد بلورین قله های نوک تیز نزدیک به هم با تراکم زیاد را نشان می دهد در حالی که در مواد آمورف این قله ها به صورت تکی

و با پهنای بیشتر نمایان است، می توان نتیجه گرفت که خاکستر سوزانده شده در ۹۰۰ درجه سانتیگراد و ۷۰۰ درجه سانتیگراد به ترتیب بیشترین میزان سیلیس بلوری را دارا می‌باشد. همچنین خاکستر سوزانده شده در ۸۰۰ درجه سانتیگراد و ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد دارای سیلیس بلوری کمتری بوده و از نظر واکنش پذیری مطلوب تر هستند. از آنجا که در بخش قبل میزان اکسید سیلیس در دمای ۸۰۰ درجه سانتیگراد بالاترین میزان در بین دماهای سوزاندن بود، لذا به نظر میرسد واکنش پذیری فاز سیلیسی در دمای ۸۰۰ درجه از سایر دماها بیشتر می‌باشد. عدم کنترل دقیق دمای سوزاندن در طی عملیات حرارتی، عدم پخش یکنواخت حرارت در کل نمونه لجن و کالیبره نبودن دمای کوره های مورد استفاده از جمله علل احتمالی تناقض های موجود در نتایج می‌باشد. همچنین قابل ذکر است که ترکیبات متفاوت لجن مورد استفاده در پژوهش های مختلف با یکدیگر متفاوت بوده و امکان دستیابی به خواص مطلوب برای هر یک متفاوت از دیگری می‌باشد.



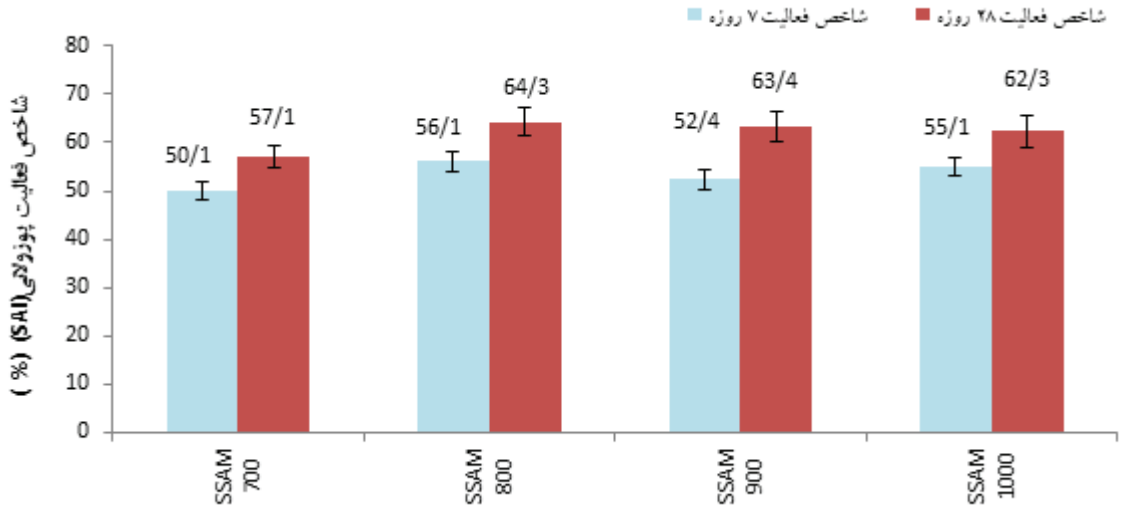
شکل ۴ - طیف XRD خاکستر لجن فاضلاب تصفیه خانه شهرک غرب سوزانده شده در دماهای مختلف سوزاندن، الف) ۷۰۰درجه، ب) ۸۰۰ درجه، ج) ۹۰۰ درجه، د) ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد.

۳-۵- نتایج آزمایش فعالیت پوزولانی خاکستر لجن فاضلاب در ملات

فعالیت پوزولانی خاکستر در این پژوهش با استفاده از شاخص فعالیت مقاومتی[8] یا (SAI) مطابق ASTM C311 و BS 3892 ارزیابی شد. مقاومت فشاری آزمونه های طرح شاهد به همراه ۴ طرح مخلوط ملات با ۲۰ ٪ جایگزینی خاکستر لجن حرارت دیده شده در ۴ دمای مختلف به جای سیمان اندازه گیری شد. نتایج آزمون تعیین شاخص فعالیت پوزولانی آزمونه های حاوی خاکستر در سنین ۷ و ۲۸ روزه در شکل ۵ قابل مشاهده است. همانگونه که در شکل ۵ مشخص است فعالیت پوزولانی خاکستر لجن فاضلاب در ۷ روز بین ۵۰ تا ۵۶ ٪ و در ۲۸ روز بین ۵۷ تا ۶۴ ٪ بدست آمده است. این مقادیر در پژوهش ترابی به ترتیب ۷۹ و ۹۰ درصد[۳۰]،

[8] Strength activity index

در پژوهش دوناتلو و همکاران ۶۴ و ۷۸ درصد[۳۱]، در پژوهش عسگری ۵۴ و ۶۲ درصد[۳۲]، در پژوهش خوشروش و همکاران ۷۵ و ۸۷ درصد[۳۳] و در سایر پژوهش ها طبق بررسی لین و همکاران بین ۵۰ تا ۹۰ درصد برای ۷ روزه و بین ۶۰ تا ۹۵ درصد برای ۲۸ روزه می‌باشد[۳۴-۳۷]. فعالیت پوزولانی این خاکستر را می‌توان با پوزولان هایی از قبیل زئولیت مقایسه کرد. طبق استاندارد ASTM C618 برای قرار گرفتن ماده در دسته پوزولان‌ها، این درصد میباید بیش از ۷۵٪ برای سن ۲۸ روز باشد که خاکستر این پژوهش اندکی از محدوده پایین تر می‌باشد. دلیل اصلی کم بودن فعالیت پوزولانی این ماده دارا بودن میزان کمتری مواد سیلیسی و اکسید های $Fe_2O_3+SiO_2+Al_2O_3$ می‌باشد. همچنین بلوری بودن فازهای تشکیل دهنده خاکستر، به خصوص سیلیس یکی دیگر از دلایل کاهش مقاومت و فعالیت پوزولانی این خاکستر می‌باشد. با توجه به مطالب گفته شده در بعضی منابع، وجود مقادیر زیاد P_2O_5 و SO_3 نیز با توجه به تاثیر منفی بر فرآیند هیدراته شدن می‌تواند یکی از عوامل تاثیرگذار بر افت خواص مقاومتی باشد. باتوجه به نتایج بدست آمده خاکستر لجن حرارت داده شده در دمای ۸۰۰ درجه سانتی گراد دارای بالاترین درصد فعالیت پوزولانی می‌باشد. خاکستر حرارت داده شده در دماهای ۹۰۰ و ۱۰۰۰ در رده های بعدی قرار می‌گیرند و خاکستر لجن حرارت داده شده در دمای ۷۰۰ درجه سانتی گراد دارای پایین ترین درصد فعالیت پوزولانی می‌باشد.

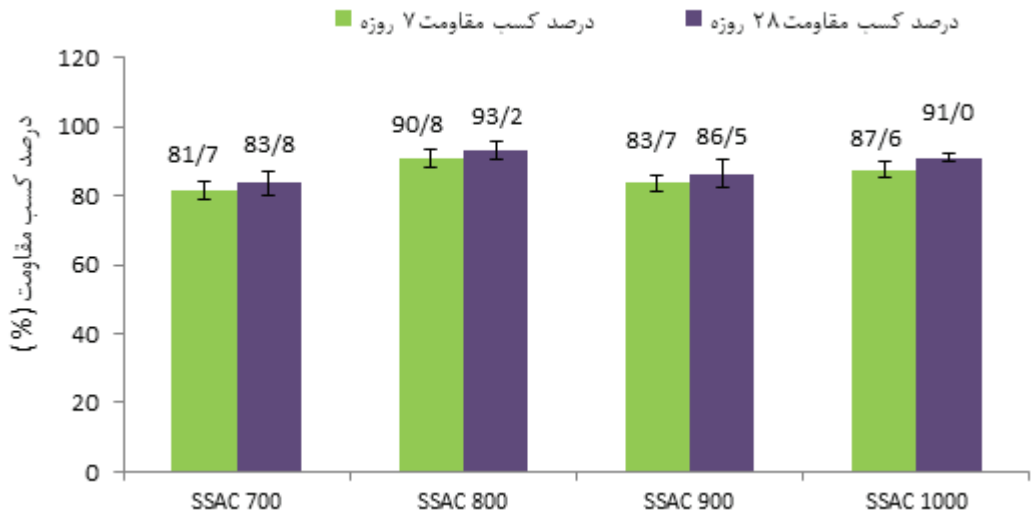


شکل ۵ - مقایسه درصد فعالیت پوزولانی آزمونه های ملات حاوی خاکستر لجن فاضلاب سوزانده شده در دماهای مختلف در سنین ۷ و ۲۸ روز

۳-۶- نتایج آزمایش کسب مقاومت خاکستر لجن فاضلاب در بتن

درصد کسب مقاومت آزمونه های بتن حاوی خاکستر حرارت داده شده در دماهای ۷۰۰ تا ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد در سن ۷ و ۲۸ روز در شکل ۶ نمایش داده شده است. همانگونه که در شکل ۶ مشخص است درصد کسب مقاومت خاکستر لجن فاضلاب موجود در آزمونه بتنی در ۷ روز بین ۸۱ تا ۹۱ ٪ و در ۲۸ روز بین ۸۳ تا ۹۳ ٪ بدست آمد. این مقادیر در پژوهش فتوت به ترتیب برابر ۸۰ و ۸۵ درصد] ۸ [در پژوهش ارشد ترابی و همکاران به ترتیب برابر ۸۵ و ۹۰ درصد [۳۰] و در پژوهش عسگری به ترتیب برابر ۷۲ و ۷۵ درصد بدست آمده است [۳۲]. تفاوت محتوای تشکیل دهنده لجن در تصفیه خانه های مختلف و همچنین تغییر محتوای شیمیایی در فصول مختلف، فرآیند حرارت دهی و شیوه آماده سازی خاکستر از عمده دلایل احتمالی تفاوت در نتایج پژوهش های مختلف با یکدیگر می‌باشد. افت مقاومت این خاکستر در بتن نیز همانند افت فعالیت پوزولانی در ملات به علت کم بودن میزان مواد سیلیسی

و اکسید های آهن و آلومینیوم و همچنین بلوری بودن فازهای تشکیل دهنده خاکستر به خصوص سیلیس می‌باشد. باتوجه به نتایج بدست آمده خاکستر لجن حرارت داده شده در دمای ۸۰۰ درجه سانتی گراد دارای کمترین افت مقاومت می‌باشد. خاکستر حرارت داده شده در دماهای ۱۰۰۰ و ۹۰۰ درجه سانتیگراد در رده های بعدی قرار می‌گیرند و خاکستر لجن حرارت داده شده در دمای ۷۰۰ درجه سانتی گراد دارای بالاترین افت مقاومتی می‌باشد. لذا با توجه به نتایج **بالا تصفیه خانه شهرک غرب** به عنوان تصفیه خانه مطلوب و **دمای ۸۰۰ درجه سانتیگراد** به عنوان دمای احتراق مطلوب انتخاب می‌گردد.



شکل ۶ – مقایسه درصد کسب مقاومت آزمونه های بتن حاوی خاکستر لجن فاضلاب سوزانده شده در دماهای مختلف در سنین ۷ و ۲۸ روز

نتیجه‌گیری

در گام ابتدایی این پژوهش خواص لجن و خاکستر لجن و همچنین فرایند حرارت دهی مورد مطالعه قرار گرفت و سپس امکان سنجی استفاده از این خاکستر در بتن معمولی مورد ارزیابی واقع گردید. در این گام به نتایج زیر دست یافته شد:

لجن خام تصفیه خانه های فاضلاب تهران عمدتا از CaO، F_e2O_3، SiO_2، Al_2O_3 و P_2O_5 تشکیل شده‌اند. درصد اکسید های موثر در فعالیت پوزولانی اعم از سیلیسیوم، آلومینیوم و آهن در لجن فاضلاب بسیار کم می‌باشد اما در مقایسه با یکدیگر، تصفیه خانه شهرک غرب با عنایت به منشا فاضلاب ورودی و نوع و فرآیند تصفیه دارای بالاترین میزان اکسید های فوق بوده و از این حیث دارای مطلوبیت زیادتری می‌باشد. از طرفی فاز های سیلیسی تشخیص داده شده در لجن خام بسیار محدود می‌باشد و حالت بلورین داشته و واکنش پذیری مطلوبی ندارند. در تصفیه خانه های موجود، تصفیه خانه شهرک غرب، زرگنده، اکباتان و قیطریه به لحاظ شدت پیک های موجود سیلیسی و واکنش پذیری آن‌ها به ترتیب مطلوبیت رتبه بندی میشوند. لذا با توجه به نتایج بدست آمده، تصفیه خانه شهرک غرب به عنوان تصفیه خانه مطلوب انتخاب گردید.

پس از عملیات حرارت دهی لجن تصفیه خانه منتخب، بالاترین میزان اکسید سیلیس، آهن و آلومینیوم در بین خاکستر های لجن سوزانده شده در دماهای مختلف حدود ۴۸٪ و متعلق به خاکستر سوزانده شده در دمای ۸۰۰ درجه سانتیگراد بوده است. از طرفی خاکستر سوزانده شده در ۸۰۰ درجه سانتیگراد و ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد دارای سیلیس بلورین کمتری در آزمایش XRD بوده و از نظر واکنش پذیری مطلوب تر هستند.

درصد فعالیت مقاومتی (SAI) خاکستر لجن فاضلاب سوزانده شده در ملات در دماهای مختلف این پژوهش، پس از ۷ روز بین ۵۰ تا ۵۶ ٪ و در ۲۸ روز بین ۵۷ تا ۶۴ ٪ بدست آمد که در این بین خاکستر سوزانده شده در دمای ۸۰۰ درجه دارای بالاترین درصد فعالیت مقاومتی می‌باشد (۵۶٪ در سن ۷ روز و ۶۴٪ در سن ۲۸ روز). همچنین درصد کسب مقاومت خاکستر لجن فاضلاب موجود در آزمونه بتنی در ۷ روز بین ۸۱ تا ۹۱ ٪ و در ۲۸ روز بین ۸۳ تا ۹۳ ٪ بدست آمد که در این بین آزمونه های دارای خاکستر سوزانده شده در دمای ۸۰۰ درجه سانتیگراد مطلوبیت بالاتری داشتند. لذا با توجه به نتایج بدست آمده، **دمای ۸۰۰ درجه سانتیگراد** به عنوان دمای سوزاندن نهایی انتخاب گردیده است. به طور کل می‌توان دریافت که اگرچه نمی‌توان خاکستر لجن را به عنوان یکی از انواع پوزولان های قوی طبقه بندی نمود، اما می‌توان از این خاکستر به عنوان ماده اولیه تولید سیمان پرتلند و همچنین به صورت یک پوزولان ضعیف در واکنشها استفاده نمود. بنابراین امکان جایگزینی خاکستر لجن تصفیهخانه فاضلاب، در درصدهای بهینه به عنوان جایگزینی برای سیمان، ریزدانه و پرکننده در ساختار ملات و بتن وجود دارد. همچنین کاربرد این خاکستر در مصالح و اعضایی که خواص مقاومتی آن‌ها در اولویت نبوده و پارامترهای مکانیکی با کاربرد این خاکستر نیز در سطح قابل قبول باشد توصیه می‌گردد.

تشکر و قدردانی

بدینوسیله از انستیتو مصالح ساختمانی دانشگاه تهران و آزمایشگاه مصالح ساختمانی دانشگاه تهران کمال تقدیر و تشکر را داشته که در این مهم بنده را همراهی و حمایت نمودند.

منابع

[۱] مسافری, م.؛ مصداقی نیا و ندافی، ۱۳۸۱، «مدیریت لجن تصفیه خانه های فاضلاب شهری ایران در افق ۱۴۰۰» ، پنجمین همایش ملی بهداشت محیط تهران.

[۲] پازوکی، م.، تکدستان، ا. و آقاجانی یاسینی، ا. ۱۳۸۷، بررسی استفاده از پساب حاصل از تصفیه فاضلاب جهت مصارف مختلف صنعتی با توجه به درجه تصفیه و استاندارد زیست محیطی، دومین همایش ملی آب و فاضلاب با رویکرد بهره برداری، تهران، دانشگاه صنعت آب و برق، شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور.

[3] Jamshidi, A., Mehrdadi, N. and Jamshidi, M., 2011. Application of sewage dry sludge as fine aggregate in concrete

[4] Rulkens, W., 2008. Sewage sludge as a biomass resource for the production of energy: overview and assessment of the various options. Energy & Fuels, 22(1), pp.9-15.

[۵] اخباری ، علوی مقدم، ۱۳۸۳،«بررسی استانداردهای *EPA* آمریکا در خصوص استفاده از لجن تصفیه خانه های فاضلاب در زمین‌های کشاورزی » ، یازدهمین کنفرانس دانشجویان عمران کشور.

[6] Metcalf & Eddy, Burton, F.L., Stensel, H.D. and Tchobanoglous, G., 2003. Wastewater engineering: treatment and reuse. McGraw Hill.

[۷] سروستانی،م.، فاضلی، م. ۱۳۸۵ « امکان سنجی استفاده مجدد از باقیمانده های حاصل از آبگیری لجن تصفیه خانه های آب در آبیاری فضای سبز و کشاورزی (مطالعه موردی تصفیه خانه های ۳ و ۴ تهران)»، کنفرانس مدیریت منابع آب ایران.

[۸] فتوت، ع. ؛ علوی مقدم، م.ر.؛ مکنون، ر. و سبط، م. ۱۳۸۶،» تاثیر جایگزینی خاکستر لجن تصفیه خانه فاضلاب به جای سیمان بر مقاومت فشاری بتن» ، سومین کنگره ملی مهندسی عمران, تبریز.

[9] Tantawy, M.A., El-Roudi, A.M., Abdalla, E.M. and Abdelzaher, M.A., 2012. Evaluation of the pozzolanic activity of sewage sludge ash. ISRN Chemical Engineering, 2012.

[10] Werther, J. and Ogada, T., 1999. Sewage sludge combustion. Progress in energy and combustion science, 25(1), pp.55-116.

[۱۱] قالیبافان، م. ۱۳۸۲ ،» بتن و محیط زیست»، فصلنامه انجمن بتن ایران ، سال سوم ، شماره ۱۱.

[12] Fischedick, M., Roy, J., Acquaye, A., Allwood, J., Ceron, J.P., Geng, Y., Kheshgi, H., Lanza, A., Perczyk, D., Price, L. and Santalla, E., 2014. Industry In: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Technical Report.

[13] Construction Waste Market - Global Industry Analysis, Size, Share, Growth, Trends, and Forecast 2017 – 2025

[14] Lehne, J. and Preston, F., 2018. Making Concrete Change. Innovation in Low-carbon Cement and Concrete.

[۱۵] شکرچی زاده، م.؛ میرزایی، ز. ۲۰۱۰، « آموزش مهندسی بتن و سیمان با رویکرد توسعه پایدار و حفظ محیط زیست» ، نشریه دانشکده فنی، شماره ۴۳.

[۱۶] صبور، م. یکه لر، م. و نیکروان، م، ۲۰۱۴ ،»بررسی نقش مصرف نانوسیلیس در بتن بر عملکرد زیست محیطی و اقتصادی آن» ، فصلنامه مهندسی عمران فردوسی ، شماره ۲۵.

[17] Pavlík, Z., Fořt, J., Záleská, M., Pavlíková, M., Trník, A., Medved, I., Keppert, M., Koutsoukos, P.G. and Černý, R., 2016. Energy-efficient thermal treatment of sewage sludge for its application in blended cements. Journal of Cleaner Production, 112, pp.409-419.

[18] Vouk, D., Nakic, D., Stirmer, N. and Cheeseman, C., 2018. 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), pp.1458-1467.

[19] Wang, K.S., Chang, Y.S., Lin, K. and Huang, Z.Q., 1999. The sintering characteristics of incinerator residues form municipal sewage sludge. In Proceedings of the 9th Annual Meeting Sanitary Engineering (p. 211).

[20] D.H. Tseng, S.C. Pan, Enhancement of pozzolanic activity and morphology of sewage sludge ash by calcinations, J. Chinese Inst. Environ. Eng. 10 (4) (2000) 261–270.

[21] Donatello, S., Freeman-Pask, A., Tyrer, M. and Cheeseman, C.R., 2010. Effect of milling and acid washing on the pozzolanic activity of incinerator sewage sludge ash. Cement and Concrete Composites, 32(1), pp.54-61.

[22] Chen, C.H., Chiou, J. and Wang, K.S., 2006. Sintering effect on cement bonded sewage sludge ash. Cement and Concrete Composites, 28(1), pp.26-32.

[23] Garcés, P., Carrión, M.P., García-Alcocel, E., Payá, J., Monzó, J. and Borrachero, M.V., 2008. Mechanical and physical properties of cement blended with sewage sludge ash. Waste management, 28(12), pp.2495-2502.

[24] Cyr, M., Coutand, M. and Clastres, P., 2007. Technological and environmental behavior of sewage sludge ash (SSA) in cement-based materials. Cement and Concrete Research, 37(8), pp.1278-1289.

[25] Zeng, D.H. and Pan, S.Z., Li,"The study of the characteristics of sewage sludge ash and the development of reclamation techniques,". In Proceedings of the 12th Annual Meeting Sanitary Engineering (p. 221).

[26] Liu, M., Zhao, Y., Xiao, Y. and Yu, Z., 2019. Performance of cement pastes containing sewage sludge ash at elevated temperatures. Construction and Building Materials, 211, pp.785-795.

[27] Naamane, S., Rais, Z. and Taleb, M., 2016. The effectiveness of the incineration of sewage sludge on the evolution of physicochemical and mechanical properties of Portland cement. Construction and Building Materials, 112, pp.783-789.

[28] Lin, K.L., Chiang, K.Y. and Lin, D.F., 2006. Effect of heating temperature on the sintering characteristics of sewage sludge ash. Journal of hazardous materials, 128(2-3), pp.175-181.

[۲۹] میرحسینی، گ. ۱۳۸۶، « بررسی وضعیت دفع لجن تصفیه خانه‌های فاضلاب تهران و مقایسه کیفیت آن برای استفاده در زمین با استانداردهای معتبر»، دانشکده عمران دانشگاه امیرکبیر.

[۳۰] ارشد ترابی محمد امین، دانش شهناز، توکلی زاده محمدرضا. تاثیر خاکستر لجن فاضلاب شهری به عنوان جایگزین سیمان بر خواص فیزیکی، مکانیکی و پایایی بتن. مهندسی عمران مدرس. ۱۳۹۶؛ ۱۷ (۱) :۱-۱۲

[31] Donatello, S., Tyrer, M. and Cheeseman, C.R., 2010. Comparison of test methods to assess pozzolanic .activity. Cement and Concrete Composites, 32(2), pp.121-127

[۳۲] عسگری، س. ۱۳۹۶، «بررسی استفاده از خاکستر لجن تصفیه خانه فاضلاب در ساختار بتن به عنوان پرکننده و یا ماده جایگزین سیمان»، دانشکده عمران دانشگاه تهران.

[۳۳] خوشروش, امین, بهادری, هادی, مناف پور, علیرضا. (۱۳۹۳). بررسی عملکرد خاکستر لجن فاضلاب با و بدون نانو ذرات سیلیس در خواص مصالح پایه سیمانی خودتراکم. مجله آب و فاضلاب, ۶۶-۷۵, ۲۴(۵) .

[34] Lynn, C.J., Dhir, R.K., Ghataora, G.S. and West, R.P., 2015. Sewage sludge ash characteristics and potential for use in concrete. Construction and Building Materials, 98, pp.767-779.

[35] Khawal, Pandurang, and Govind Sangwai. "Sewage Sludge Ash as a Partial Replacement of Cement in Concrete." Techno-Societal 2018. Springer, Cham, 2020. 543-550.

[36] Cong, X., Lu, S., Gao, Y., Yao, Y., Elchalakani, M., & Shi, X. (2020). Effects of microwave, thermomechanical and chemical treatments of sewage sludge ash on its early-age behavior as supplementary cementitious material. Journal of cleaner production, 258, 120647.

[37] Hsu, Chin-Wei, and Chun-Tao Chen. "Strength development of cement pastes with alkali-activated dehydrated sewage sludge." Construction and Building Materials 255 (2020): 119243.