

تأثیر خاکستر لجن فاضلاب شهری به عنوان جایگزین سیمان بر خواص فیزیکی، مکانیکی و پایایی بتن

محمد امین ارشد ترابی^۱، شهناز دانش^{۲*}، محمد رضا توکلی زاده^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران-محیط زیست، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- دانشیار دانشکده مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد

۳- استادیار دانشکده مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد

*Sdanesh@um.ac.ir

تاریخ دریافت: [۹۴/۰۱/۲۹]

تاریخ پذیرش: [۹۴/۰۸/۱۳]

چکیده- در فرآیند تصفیه فاضلاب شهری مقدار قابل توجهی لجن تولید می‌شود. یکی از روش‌های مدیریت این نوع پسماند، سوزاندن آن به منظور بازیابی انرژی است. مشکل اصلی این روش چگونگی دفع یا استفاده دوباره از خاکستر باقی مانده پس از احتراق است. موضوع این پژوهش، علاوه بر شناسایی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاکستر لجن، بررسی اثر جایگزینی خاکستر لجن به جای سیمان بر ویژگی‌های فیزیکی، مکانیکی و پایایی بتن است. در این ارتباط به بررسی نقش سطوح مختلف جایگزینی (۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد وزنی)، سن عمل‌آوری (۷، ۲۸، ۹۱ و ۱۸۰ روز) و نسبت آب به مواد سیمانی (۰/۳۵، ۰/۴۵ و ۰/۵۵) پرداخته شد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که اثر جایگزینی خاکستر لجن به جای سیمان بر مقاومت فشاری، در سنین عمل‌آوری کوتاه مدت (۷ و ۲۸ روز) و بلند مدت (۹۱ و ۱۸۰ روز) کاملاً متفاوت است. مقاومت فشاری ۲۸ روزه برای نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۳۵، ۰/۴۵ و ۰/۵۵ به ترتیب در محدوده ۲۰-۴، ۱۵-۳ و ۱۰-۲ درصد کمتر از نمونه شاهد است. کران پایین دامنه‌های یاد شده به جایگزینی ۵، و کران بالا به جایگزینی ۲۰ درصدی خاکستر لجن به جای سیمان مربوط است. با این حال در دراز مدت (سن ۱۸۰ روز)، بیشترین مقاومت فشاری در نسبت جایگزینی ۱۵ درصد مشاهده شد. با افزایش نسبت جایگزینی خاکستر لجن به جای سیمان، میزان تخلخل افزایش و مقاومت ویژه الکتریکی بتن کاهش یافت. به طور کلی نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که رفتار خاکستر لجن به عنوان جایگزین سیمان در محدوده بین مواد پوزولانی و پرکننده طبقه‌بندی می‌شود.

واژگان کلیدی: خاکستر لجن فاضلاب شهری، بتن، مقاومت فشاری، پایایی، جذب آب.

۱- مقدمه

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. 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 دوباره از لجن فاضلاب، که در بسیاری از کشورهای توسعه یافته نیز متداول است، سوزاندن آن با هدف بازیابی انرژی

لجن فاضلاب 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 تولید شده، حدود ۳۵ تا ۸۵ گرم در روز گزارش شده است [1]. بر این اساس برای

افزایش درجه نرمی خاکستر لجن، مقاومت فشاری ملات سیمانی نیز افزایش می‌یابد [13,7]. پان و همکاران [13] دریافتند که به ازای افزایش هر $1000 \text{ m}^2/\text{kg}$ در درجه نرمی خاکستر لجن، مقاومت فشاری تقریباً پنج درصد افزایش می‌یابد. نتایج گارسز و همکاران [14] و پرز و همکاران [15] حاکی از آن است که افزایش نسبت جایگزینی خاکستر لجن به جای سیمان، باعث افزایش تخلخل کل و جذب آب ملات می‌شود.

تاکنون در ایران پژوهشی پیرامون تاثیر جایگزینی سیمان با خاکستر لجن بر پایایی بتن انجام نشده است. پس در این پژوهش با هدف بررسی اثر جایگزینی سیمان با خاکستر لجن بر پارامترهای فیزیکی، مکانیکی و پایایی بتن انجام شد. در این ارتباط به بررسی نقش سطوح مختلف جایگزینی (۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد وزنی)، سن عمل‌آوری (۷، ۲۸، ۹۱ و ۱۸۰ روز) و نسبت آب به مواد سیمانی (۰/۳۵، ۰/۴۵ و ۰/۵۵) بر مقاومت فشاری، تخلخل و مقاومت ویژه الکتریکی بتن پرداخته شد.

۲- مواد و روش‌ها

در این پژوهش برای تولید خاکستر لجن از لجن‌های خشک شده در بسترهای لجن خشک کن تصفیه خانه شهر بجنورد استفاده شد. این لجن‌ها در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد (به مدت پنج ساعت) سوزانده شد و پس از سرد شدن در دسیکاتور، به وسیله آسیاب ساچمه‌ای، پودر شد. رطوبت لجن جمع‌آوری شده برابر ۲۴ درصد و میزان مواد معدنی (مواد ثابت) آن پس از سوزاندن برابر ۳۰ درصد بود. برای ساخت نمونه‌های بتنی علاوه بر خاکستر لجن از سیمان پرتلند تیپ دو محصول شرکت زاوه تربت و برای افزایش روانی در مخلوط-های حاوی خاکستر لجن از فوق روان کننده‌ای با نام تجاری P.C.5000 (محصول شرکت رزین سازان فارس) با وزن مخصوص ۱/۰۵ نیز استفاده شد. سنگدانه‌های درشت مصرفی، دارای بیشینه اندازه ۱۲/۵ میلی‌متر نیمه شکسته با وزن مخصوص ۲/۵۸ بود. همچنین از ماسه طبیعی شکسته با وزن مخصوص ۲/۶۱ استفاده شد. منحنی دانه‌بندی سنگدانه‌ها برای ساخت مخلوط‌های بتنی در شکل (۱) ارایه شده است.

است. به عنوان نمونه، 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 ۴۰-۳۰ درصد از مواد جامد لجن به شکل خاکستر باقی می‌ماند که دفع نهایی آن در زمین مخاطرات زیست محیطی را به دنبال دارد [2]. اگر برای این خاکسترها کاربری مناسبی یافت شود، دیگر نیازی به دفع نهایی آن نبوده و می‌توان آثار 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 جایگزین بخشی از سیمان برای تولید مصالح ساختمانی است. جایگزینی خاکستر لجن به جای سیمان باید به گونه‌ای انجام پذیرد که موجب کاهش ویژگی‌های فیزیکی، مکانیکی و پایایی محصولات مبتنی بر سیمان مانند ملات یا بتن نشود. با مطالعه پژوهش‌های انجام شده در این زمینه می‌توان دریافت که مهمترین عوامل تاثیر گذار بر ویژگی‌های فیزیکی، مکانیکی و پایایی محصولات سیمانی، پارامترهایی مانند درصد جایگزینی، سن عمل‌آوری، درجه نرمی، مورفولوژی و ترکیبات شیمیایی موجود در خاکستر لجن است [5-7]. فتوت و همکاران [5] 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 به وسیله سیر و همکاران [6] نشان داد که با جایگزینی خاکستر لجن، زمان‌های گیرش اولیه و نهایی افزایش می‌یابد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که مقاومت فشاری مخلوط سیمانی حاوی خاکستر لجن در مقایسه با نمونه شاهد (در تمام سنین عمل‌آوری) کمتر است [5, 6, 8-10]. کونتاند و همکاران [11] دریافتند که مقاومت فشاری ۲۸ روزه ملات با جایگزینی ۲۵ و ۵۰ درصد خاکستر لجن به جای سیمان به ترتیب ۸ و ۱۸ درصد کمتر از نمونه شاهد است. این در حالی است که موزو و همکاران [12] افزایش ۸/۳ تا ۱۵/۳ درصدی را در مقاومت فشاری ملات حاوی ۱۵ درصد خاکستر لجن مشاهده کردند. این افزایش مقاومت به عمل‌آوری نمونه‌ها در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد نسبت داده شد. علاوه بر این مشخص شده که با

پژوهش در مجموع، ۱۵ طرح مخلوط بتنی بررسی شد. مقادیر هریک از اجزای تشکیل دهنده تیمارهای اختلاط در جدول (۲) آورده شده است. چگونگی آماده سازی و عمل آوری نمونه‌ها مطابق با استاندارد ASTM C192 انجام گرفت [16].

در این پژوهش از آزمایش‌های زمان گیرش، مقاومت فشاری، حجم فضای قابل نفوذ و مقاومت ویژه الکتریکی به عنوان معیارهایی برای ارزیابی رفتار پوزولانی خاکستر لجن به عنوان جایگزین سیمان در مخلوط بتنی استفاده شد. زمان گیرش اولیه و نهایی با استفاده از سوزن و ویکات مطابق با استاندارد ASTM C191 و با سه تکرار انجام شد [20]. برای انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری، حجم فضای قابل نفوذ و مقاومت ویژه الکتریکی از سه نمونه مکعبی ۱۰۰ میلیمتری در سنین ۷، ۲۸، ۹۱ و ۱۸۰ روز استفاده شد. آزمایش مقاومت فشاری (با استفاده از دستگاه بتن شکن محصول شرکت آزمون، SH300) بر اساس روش استاندارد BS 1881-116 [21] و آزمایش تعیین فضای قابل نفوذ نیز بر اساس روش استاندارد ASTM C642 انجام شد [22].

برای تعیین مقاومت ویژه الکتریکی بتن، دو صفحه مسی به همراه لایه نازکی از خمیر سیمان کم اسلاپ در دو طرف نمونه اشباع با سطح مرطوب قرار داده شد. مقاومت الکتریکی بین دو صفحه با استفاده از یک دستگاه اهم متر (Gilsun, DT-700D) با جریان مستقیم و فرکانس ۱۰ هرتز اندازه‌گیری و نتیجه به دست آمده به وسیله‌ی رابطه ۱ به مقاومت ویژه الکتریکی تبدیل شد.

$$\rho_c = \frac{R \times A}{L} \quad (1)$$

در رابطه بالا، ρ_c مقاومت ویژه الکتریکی بتن (اهم - متر)، R مقاومت الکتریکی قرائت شده از روی دستگاه اهم متر (اهم)، A سطح نمونه (متر مربع) و L فاصله بین دو صفحه تماس (متر) است. در تمامی آزمایش‌های انجام شده، میانگین سه نمونه مکعبی به عنوان نتیجه نهایی ثبت و گزارش شده است.

شکل ۱- منحنی دانه بندی سنگدانه بتن

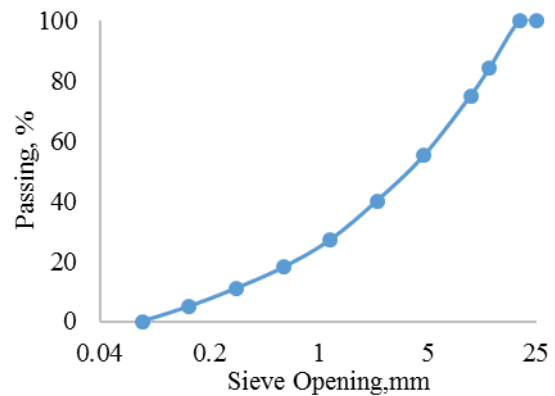


Fig.1- Gradation curves of aggregate

جدول ۱- روش‌های آزمایشگاهی و تجهیزات مورد استفاده برای تعیین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاکستر لجن

Property	Test method/standards	Manufacturer
Density	ASTM C188[17]	Azmoon CE-171
Particle size distribution	Laser granulometry	Shimadzu SALD-2101
Specific surface area	ASTM C204 (Blain)[18]	Azmoon CE-120
	Brunnauer Emmett and Teller (BET)	Bel Belsorp mini II
Loss On Ignition (LOI)	ASTM C114[19]	Azar Oven
Morphology	Scanning Electron Microscope (SEM)	LEO VP 1450
Chemical analysis	X-ray Fluorescence (XRF)	Panalypical Axios

Table1: Laboratory methods and equipment used to determine the physical and chemical characteristics of Sewage sludge ash(SSA)

روش‌های آزمایشگاهی و تجهیزات به کار گرفته شده برای تعیین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاکستر لجن فاضلاب شهری در جدول (۱) به صورت خلاصه ارائه شده است. به منظور ارزیابی رفتار پوزولانی خاکستر لجن در بتن، علاوه بر نمونه شاهد از جایگزینی ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصدی سیمان با خاکستر لجن، و نیز برای بررسی اثر نسبت آب به مواد سیمانی (w/b) بر ویژگی‌های فیزیکی، مکانیکی و پایایی بتن، از سه نسبت ۰/۳۵، ۰/۴۵ و ۰/۵۵ استفاده شد. بنابراین در این

جدول ۲- اجزای تشکیل دهنده تیمارهای اختلاط مورد بررسی، کیلوگرم بر متر مکعب بتن

No.	Cement [5]	SSA [4]	Water [3]	S.P.*	Gravel [2]	Sand [1]
1	400 [10]	-[9]	140[8]	1	816[7]	827[6]
2	380 [14]	20 [13]	140	1.2	815 [12]	825 [11]
3	360 [18]	40 [17]	140	1.3	813 [16]	823 [15]
4	340 [22]	60 [21]	140	1.6	811 [20]	822 [19]
5	320 [26]	80 [25]	140	2	810 [24]	820 [23]
6	400 [31]	- [30]	180 [29]	0.5	770 [28]	780 [27]
7	380 [35]	20 [34]	180	0.6	768 [33]	778 [32]
8	360 [39]	40 [38]	180	0.8	767 [37]	776 [36]
9	340 [43]	60 [42]	180	0.9	765 [41]	775 [40]
10	320 [47]	80 [46]	180	1.1	763 [45]	773 [44]
11	400 [52]	- [51]	220 [50]	-	723 [49]	733 [48]
12	380 [57]	20 [56]	220 [55]	-	722 [54]	731 [53]
13	360 [62]	40 [61]	220 [60]	-	720 [59]	729 [58]
14	340 [67]	60 [66]	220 [65]	0.3	718 [64]	728 [63]
15	320 [72]	80 [71]	220 [70]	0.5	717 [69]	726 [68]

* Super Plasticizer

Table 2. Mix proportions of Treatments, kg/m³

۳- نتایج و بحث

۳-۱- ویژگی‌های فیزیکی خاکستر لجن فاضلاب

شکل ظاهری ذرات سیمان و خاکستر لجن فاضلاب شهری با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی به ترتیب در شکل‌های ۲ و ۳ به تصویر در آمده است. همان‌گونه که در

شکل (۲) نیز مشاهده می‌شود، ذرات سیمان دارای شکل هندسی منظمی بوده و سطح خارجی آن‌ها بدون تخلخل است. در صورتی که خاکستر لجن فاضلاب متشکل از ذرات نامنظمی (فاقد شکل هندسی مشخص و یکسان در بین تمامی ذرات) است که در بیشتر موارد از تجمع ذرات کوچکتر تشکیل شده-

تخلخل سطحی ذرات خاکستر لجن به وضوح قابل مشاهده است که باعث می‌شود تا درجه نرمی اندازه‌گیری شده به روش BET در مقایسه با روش بلین بیشتر شود.

مقدار LOI خاکستر لجن در این پژوهش (۵ درصد)، در مقایسه با سیمان بیشتر است (جدول ۴). بر اساس استاندارد ASTM C618 بیشینه مقدار افت حرارتی برای مواد پوزولانی رده‌ی N برابر ۱۰ درصد و برای مواد پوزولانی رده‌ی C و F برابر ۶ درصد است [23]. بنابراین مقدار LOI خاکستر لجن نیازمندی‌های این استاندارد را تامین می‌نماید.

جدول ۳- ویژگی‌های فیزیکی خاکستر لجن فاضلاب و سیمان

Property	Dimension	SSA	Cement
Density	-	2.58	3.15
Particle size distribution	μm	1-80	-
Diameter	μm	8.5	80
Blain	m^2/kg	618	315
BET	m^2/kg	10156	-
LOI	%	5	1.15
Morphology	-	Irregular	Regular

Table 3: Physical properties of sewage sludge ash and cement

شکل ۴- توزیع اندازه ذرات خاکستر لجن فاضلاب

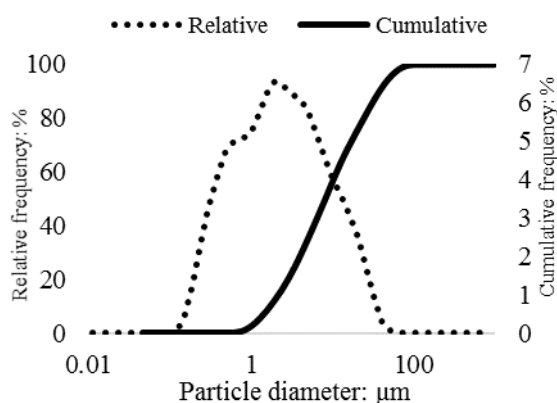


Fig.4- Particle size distribution of SSA

۳-۲- ویژگی‌های شیمیایی خاکستر لجن فاضلاب

ترکیب شیمیایی اصلی موجود در خاکستر لجن فاضلاب با استفاده از آزمایش XRF مشخص شد که نتایج آن در (جدول ۴) ارائه شده و با مقدار متوسط گزارش شده در سایر پژوهش-

اند (شکل ۳). ویژگی‌های فیزیکی خاکستر لجن فاضلاب در (جدول ۳) به صورت خلاصه ارائه و با سیمان پرتلند نیز مقایسه شده است. بر اساس نتایج به دست آمده توزیع اندازه ذرات خاکستر لجن در محدوده ۸۰-۱ میکرومتر قرار دارد و قطر متوسط آن‌ها برابر ۸/۵ میکرومتر تخمین زده شد (شکل ۴).

شکل ۲- مورفولوژی ذرات سیمان، ۱۰۰۰۰ برابر

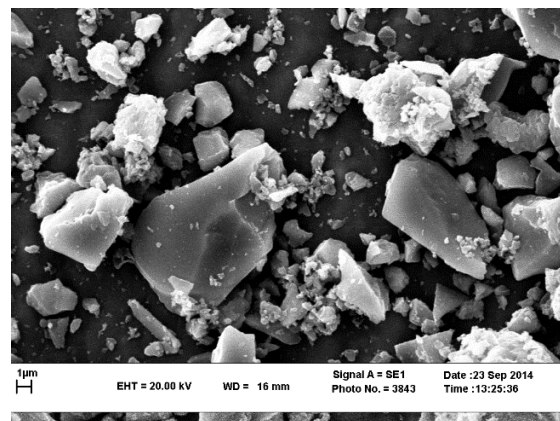


Fig.2- Particle morphologies of cement (10000x)

شکل ۳- مورفولوژی ذرات خاکستر لجن، ۱۰۰۰۰ برابر

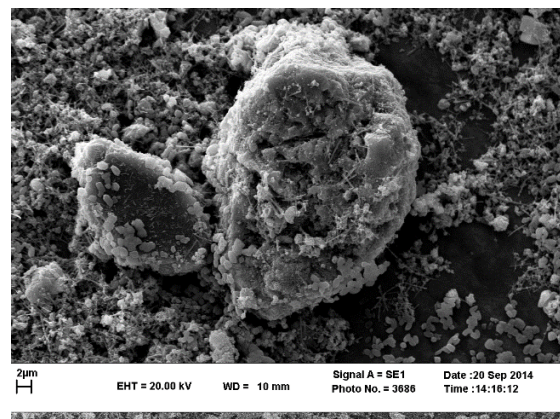


Fig.3- Particle morphologies of SSA(10000x)

سطح مخصوص ذرات خاکستر لجن به روش نفوذ هوای بلین و BET به ترتیب برابر ۶۱۸ و ۱۰۱۵۶ متر مربع بر کیلوگرم برآورد شد. مقدار نرمی بیشتر به دست آمده در روش BET می‌تواند به سطح متخلخل ذرات خاکستر لجن مربوط باشد. زیرا در روش بلین، ذرات مسطح و کروی فرض می‌شوند، در حالی که در روش BET، سطح مخصوص بر اساس شکل واقعی و میزان تخلخل سطحی به دست می‌آید. در شکل (۳)

۳-۳- زمان گیرش

نتایج به دست آمده در این پژوهش نشان می‌دهد که با افزایش درصد جایگزینی خاکستر لجن به جای سیمان، زمان‌های گیرش اولیه و نهایی به صورت خطی افزایش می‌یابد (شکل ۵). نتایج سایر پژوهشگران نیز نشان دهنده افزایش زمان گیرش سیمان هم‌زمان با افزایش درصد جایگزینی خاکستر لجن است [14,10,6]. این بدان معناست که استفاده از خاکستر لجن به عنوان جایگزین سیمان تاثیر قابل توجهی بر زمان‌های گیرش دارد. تاخیر در زمان‌های گیرش را می‌توان به افزایش جذب آب روی سطح ذرات خاکستر لجن و در نتیجه کاهش مقدار Ca(OH)_2 محلول نسبت داد که به دلیل مورفولوژی نامنظم و ریزتر بودن اندازه ذرات خاکستر لجن در مقایسه با سیمان رخ می‌دهد.

شکل ۵- اثر جایگزینی خاکستر لجن بر زمان‌های گیرش اولیه و نهایی

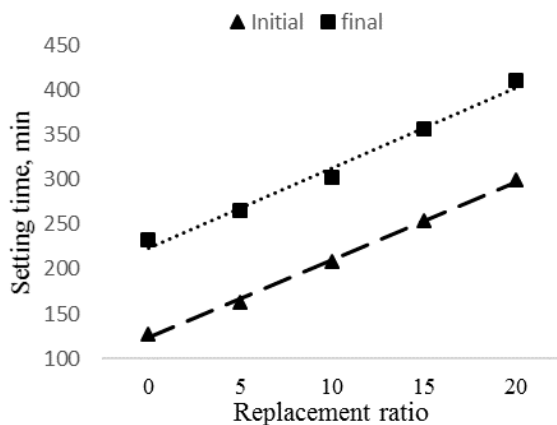


Fig. 5- Sludge ash substitution effect on the initial and final setting time

۳-۴- مقاومت فشاری

مقاومت فشاری برای نسبت‌های آب به مواد سیمانی ۰/۳۵، ۰/۴۵ و ۰/۵۵ به ترتیب در شکل‌های (۶ تا ۸) نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود برای تمام نسبت‌های w/b، با گذشت زمان عمل‌آوری، مقاومت فشاری افزایش می‌یابد. این موضوع نشان دهنده آن است که جایگزینی خاکستر لجن به جای سیمان مانع از افزایش مقاومت فشاری در طول زمان عمل‌آوری نمی‌شود. اثر جایگزینی خاکستر لجن به جای سیمان بر مقاومت فشاری در دو شرایط عمل‌آوری کوتاه مدت و بلند

ها و نیز آنالیز شیمیایی سیمان پرتلند مقایسه شده است. خاکستر لجن فاضلاب عمدتاً از اکسیدهای کلسیم، سیلیسیم، آلومینیوم و آهن تشکیل شده است (جدول ۴). بر اساس نتایج، مقدار CaO موجود در خاکستر لجن فاضلاب شهری در مقایسه با سایر پوزولان‌های شناخته شده مانند میکروسیلیس و خاکستر بادی بیشتر است. از سوی دیگر مقدار SiO_2 ، Al_2O_3 و Fe_2O_3 موجود در خاکستر لجن در مقایسه با این پوزولان‌ها بسیار کمتر است [24,25].

بر اساس استاندارد ASTM C311، مجموع اکسیدهای سیلیسیم، آلومینیوم و آهن برای انواع رده بندی مواد پوزولانی، باید بیشتر از ۷۰ درصد باشد [26]. این در حالی است که مجموع این اکسیدها در خاکستر لجن استفاده شده در این پژوهش کمتر از ۵۰ درصد بوده که نمی‌تواند الزامات استاندارد ASTM C311 را تامین نماید.

جدول ۴- مقایسه ترکیب شیمیایی خاکستر لجن فاضلاب و سیمان

Chemical composition	Sewage Sludge Ash		Cement
	Current study]	Mean of other studies[6]	
SiO_2	29.2	36.1	20.9
Al_2O_3	7.9	14.2	5.1
Fe_2O_3	4.5	9.2	3.9
CaO	37.8	14.8	63.6
Na_2O	1.2	0.9	0.3
K_2O	1.9	1.3	0.5
MgO	3.8	2.4	2.7
SO_3	3.4	2.8	1.6
P_2O_5	1.2	11.6	*
MnO	0.01	0.3	*
TiO_2	0.55	1.1	*
F	1.7	*	*
Cl	0.31	0.1	*

*: شناسایی نشده است.

Table 4: Chemical composition of SSA in current study compared to other SSA found in literature and cement

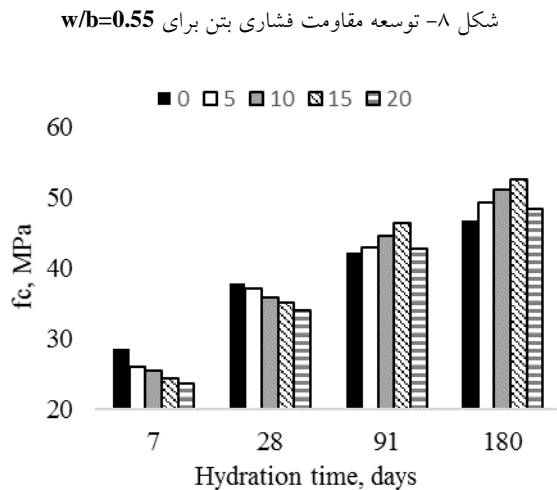


Fig. 8- Increasing the compressive strength of concrete for $w/b=0.55$

در تمامی تیمارهای اختلاط بعد از سن ۲۸ روز، با افزایش درصد جایگزینی خاکستر لجن تا میزان ۱۵ درصد، مقاومت فشاری افزایش می‌یابد. البته مقاومت فشاری در سطح جایگزینی ۲۰ درصد نیز بسیار نزدیک به نمونه شاهد است. با این حال مقدار آن در مقایسه با جایگزینی ۱۵ درصد کاهش یافته است. این کاهش مقاومت را می‌توان به اثر رقیق‌سازی سیمان نسبت داد. زیرا که مواد پوزولانی با محصولات هیدراتاسیون سیمان واکنش داده و ژل‌های سیلیکاته را تولید می‌کنند. با کاهش مقدار سیمان در واحد حجم بتن، هر چند که با افزایش مقدار خاکستر لجن همراه بوده است، به علت کاهش تولید محصولات هیدراتاسیون، مقاومت فشاری نیز کاهش می‌یابد. بر اساس نتایج به دست آمده از مقاومت فشاری دراز مدت می‌توان نتیجه گرفت که بیشینه نسبت جایگزینی خاکستر لجن به جای سیمان به ۱۵ درصد محدود می‌شود.

افزایش مقاومت فشاری بعد از سن ۲۸ روز در نمونه‌های حاوی خاکستر لجن با نتایج به دست آمده در سایر پژوهش‌ها [۶-۱۱، ۱۳ و ۱۴] مغایرت دارد. سیر و همکاران [۶] با استفاده از معادله فرت (و با چشم‌پوشی کردن از مقدار آبی که به وسیله‌ی ذرات خاکستر لجن جذب می‌شود) فقط در نظر گرفتن آب موثر، دریافتند که خاکستر لجن بر مقاومت‌های کوتاه مدت اثر منفی دارد. اما این اثر منفی با افزایش زمان عمل‌آوری و عبور از سن ۲۸ روز جبران شده و باعث می‌شود

مدت، متفاوت است. بر اساس نتایج به دست آمده مشاهده می‌شود که تا سن ۲۸ روز با افزایش درصد جایگزینی خاکستر لجن به جای سیمان، مقاومت فشاری کاهش می‌یابد. که با نتایج پژوهش‌های پیشین همخوانی دارد [5, 6, 10-8]. تاخیر بیشتر در زمان گیرش سیمان همزمان با افزایش درصد جایگزینی خاکستر لجن (که پیش‌تر به آن پرداخته شد)، احتمالاً روی مقاومت‌های اولیه تأثیر گذاشته و می‌تواند دلیلی بر کاهش مقاومت فشاری کوتاه مدت باشد.

میزان مقاومت تابعی از روند پر شدن منافذ به وسیله‌ی محصولات تولید شده در اثر هیدراتاسیون سیمان است. پس می‌توان نتیجه گرفت که در سنین پایین عمل‌آوری (تا سن ۲۸ روز)، واکنش‌های شیمیایی خاکستر لجن با سیمان بسیار کند انجام می‌شود.

شکل ۶- توسعه مقاومت فشاری بتن برای $w/b=0.35$

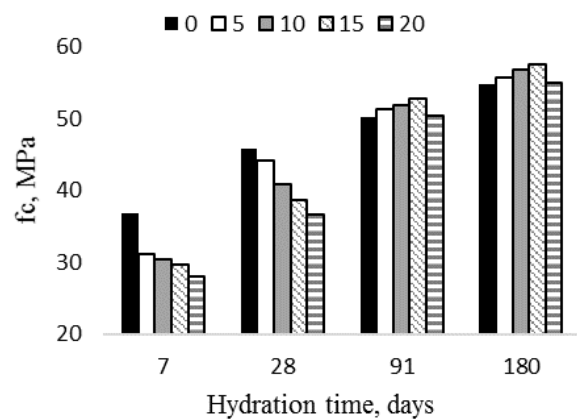


Fig. 6- Increasing the compressive strength of concrete for $w/b=0.35$

شکل ۷- توسعه مقاومت فشاری بتن برای $w/b=0.45$

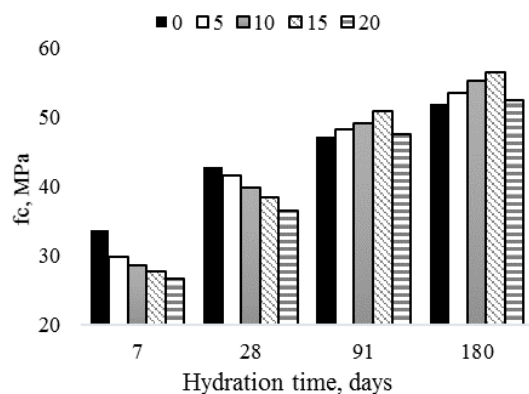


Fig. 7- Increasing the compressive strength of concrete for $w/b=0.45$

کوچکتر بوده و می‌تواند اثر پرکنندگی داشته باشد و ریز ساختار بتن را بهبود بخشد، اما در پایان برآیند اثر ترکیبی دو حالت پرکنندگی و پوزولانی، منجر به ایجاد یک جسم متراکم و کم تخلخل می‌شود. کند بودن واکنش پوزولانی خاکستر لجن برای تولید ژل‌های سیلیکاته که در بخش (۴-۳) نیز به آن پرداخته شد، تاثیر زیادی در تغییر حجم منافذ داشته و باعث می‌شود تا حجم منافذ قابل نفوذ در مقایسه با نمونه شاهد افزایش یابد.

بعد از سن ۲۸ روز، با افزایش درصد جایگزینی خاکستر لجن تا میزان ۱۰ درصد، حجم منافذ قابل نفوذ در مقایسه با نمونه شاهد کاهش می‌یابد. کوچکتر شدن اندازه لوله‌های موئین در خمیر سیمان در اثر تولید ژل‌های سیلیکاته می‌تواند دلیل این موضوع باشد. با افزایش میزان جایگزینی از ۱۰ تا ۲۰ درصد، حجم منافذ افزایش می‌یابد، هرچند که هنوز کمتر از نمونه شاهد است.

شکل ۹- اثر جایگزینی خاکستر لجن بر تخلخل بتن، $w/b=0.35$

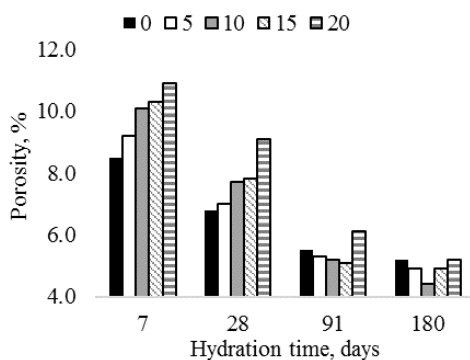


Fig. 9- Sludge ash substitution effect on the porosity of the concrete, $w/b=0.35$

شکل ۱۰- اثر جایگزینی خاکستر لجن بر تخلخل بتن، $w/b=0.45$

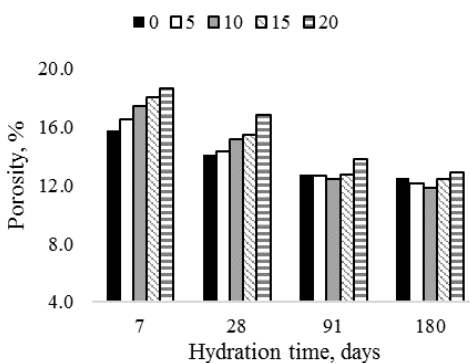


Fig. 10- Sludge ash substitution effect on the porosity of the concrete, $w/b=0.45$

که مقاومت‌های دراز مدت از مقدار مورد انتظار (بر اساس معادله فرت) نیز بیشتر گردد. نتیجه به دست آمده به وسیله‌ی این پژوهشگران فقط محاسباتی بوده، در حالی که در این پژوهش به استناد نتایج آزمایشگاهی، می‌توان بیان داشت که با ثابت نگه داشتن نسبت آب به مواد سیمانی و استفاده از فوق روان کننده (برای دستیابی به روانی یکسان)، مقاومت فشاری بعد از سن ۲۸ روز افزایش می‌یابد. این موضوع نیز احتمالاً به فعالیت پوزولانی آهسته و طولانی مدت خاکستر لجن مربوط است که سایر پژوهشگران نیز به آن اشاره کرده‌اند [11,7,6]

بنابراین به نظر می‌رسد که خاکستر لجن در مقایسه با سیمان دارای اثر مثبت طولانی مدت بر مقاومت فشاری است.

به طور کلی، رفتار پوزولانی خاکستر لجن شبیه به خاکستر بادی است. با این تفاوت که در طولانی مدت، میزان افزایش مقاومت فشاری در بتن حاوی خاکستر بادی، بیشتر است. این وجه تمایز نیز به احتمال زیاد می‌تواند به مقدار کمتر فاز غیر بلوری (آمورف) اکسیدهای سیلیسیوم، آهن و آلومینیوم موجود در خاکستر لجن مربوط باشد.

۳-۵- حجم فضای قابل نفوذ

۳-۵-۱- تاثیر نسبت جایگزینی بر تخلخل بتن حاوی خاکستر لجن فاضلاب

حجم فضای قابل نفوذ در تمامی نسبت‌های w/b ، به صورت درصدی از حجم نمونه، در شکل‌های (۹ تا ۱۱) نشان داده شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که با افزایش سن عمل‌آوری از ۷ تا ۱۸۰ روز، درصد فضای قابل نفوذ در بیشتر تیمارها کاهش می‌یابد. بنابراین جایگزینی سیمان با خاکستر لجن مانع از انجام واکنش‌های هیدراتاسیون نمی‌شود. با این حال، مانند مقاومت فشاری، اثر جایگزینی خاکستر لجن به جای سیمان بر روند پر شدن منافذ در دو محدوده زمانی قبل و بعد از ۲۸ روز، متفاوت است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که تا سن عمل‌آوری ۲۸ روز، با افزایش درصد جایگزینی خاکستر لجن به جای سیمان، حجم فضای قابل نفوذ برای تیمارهای مورد مطالعه افزایش یافته است.

اگرچه اندازه ذرات خاکستر لجن در مقایسه با سیمان

که با افزایش نسبت جایگزینی، حرکت یونها در نمونه بتنی نیز افزایش یافته و مقاومت ویژه الکتریکی کاهش یابد. با این حال در سن ۱۸۰ روز، مقاومت ویژه الکتریکی برای نمونه‌های حاوی ۱۰ درصد خاکستر لجن از سایر سطوح جایگزینی بیشتر بوده و برای نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۳۵، ۰/۴۵ و ۰/۵۵ به ترتیب حدود ۳۷، ۱۴ و ۱۱ درصد بیشتر از نمونه شاهد است. بر اساس نتایج به دست آمده از تخلخل و مقاومت ویژه الکتریکی می‌توان بیان داشت که حداکثر نسبت جایگزینی خاکستر لجن به جای سیمان به ۱۰ درصد محدود می‌شود.

همچنین می‌توان مشاهده نمود که برای تمام سطوح جایگزینی و نسبت‌های متفاوت w/b ، با افزایش سن عمل‌آوری، مقاومت ویژه الکتریکی افزایش می‌یابد که علت آن را می‌توان به کاهش تخلخل و نفوذپذیری بتن نسبت داد. افزایش در مقاومت ویژه الکتریکی در سنین اولیه ناچیز است، ولی در سنین بالاتر کاملاً چشمگیر می‌شود.

۳-۶-۲- تاثیر نسبت w/cm بر مقاومت ویژه الکتریکی بتن حاوی خاکستر لجن فاضلاب

نسبت آب به مواد سیمانی نقش بسیار مهمی در شکل‌گیری ریز ساختار خمیر سیمان و تمرکز یونها در حفرهای متعلق به ریز ساختار برعهده دارد. با توجه به شکل‌های (۱۲ تا ۱۴) می‌توان دریافت که با افزایش w/b ، مقاومت ویژه الکتریکی بتن کاهش می‌یابد. کاهش در مقاومت الکتریکی را می‌توان به افزایش حجم فضاهای خالی موجود در بتن نسبت داد. مقاومت ویژه الکتریکی نمونه شاهد با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۳۵ در مقایسه با تیمارهای با نسبت آب به مواد سیمانی برابر ۰/۴۵ و ۰/۵۵ به ترتیب به میزان ۲۲۴-۱۵۲ و ۳۵۲-۲۵۰ درصد بیشتر است. کران پایین مربوط به سن عمل‌آوری ۷ روز و کران بالا مربوط به سن عمل‌آوری ۱۸۰ روز است. این موضوع نشان می‌دهد که تخلخل اولیه تاثیر به‌سزایی در مقاومت ویژه الکتریکی نهایی دارد. به گونه‌ای که با افزایش تخلخل اولیه، که در اثر افزایش w/b به وجود می‌آید، قابلیت بهبود ریز ساختار بتن نیز کاهش می‌یابد. این موضوع برای نسبت‌های مختلف جایگزینی خاکستر لجن به جای سیمان نیز قابل مشاهده است.

شکل ۱۱- اثر جایگزینی خاکستر لجن بر تخلخل بتن، $w/b=0.55$

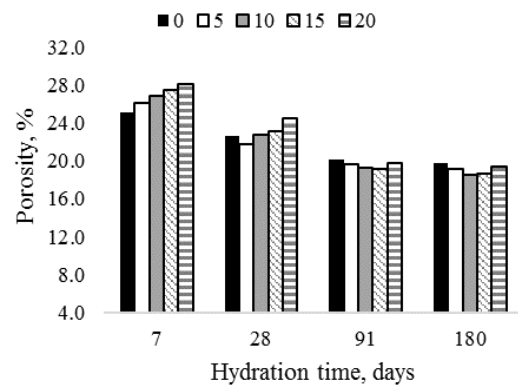


Fig.11- Sludge ash substitution effect on the porosity of the concrete, $w/b=0.55$

۳-۵-۲- تاثیر نسبت w/cm بر تخلخل بتن حاوی خاکستر لجن فاضلاب

با توجه به نتایج مندرج در شکل‌های (۹ تا ۱۱) می‌توان دریافت که افزایش نسبت w/b منجر به افزایش تخلخل کلی نمونه‌های بتنی در تمام نسبت‌های جایگزینی می‌شود. علاوه بر این، افزایش نسبت w/b کاهش مقاومت فشاری را نیز در پی داشته است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که برای بررسی اثر پوزولانی خاکستر لجن بر ویژگی‌های مکانیکی و پایایی بتن سخت شده، ثابت نگه داشتن نسبت آب به مواد سیمانی بسیار تاثیر گذار است. اگرچه که موجب می‌شود تا مقدار بیشتری فوق روان کننده مصرف شود.

۳-۶- مقاومت ویژه الکتریکی

۳-۶-۱- تاثیر نسبت جایگزینی خاکستر لجن بر مقاومت ویژه الکتریکی

نتایج به دست آمده از آزمایش مقاومت ویژه الکتریکی نشان می‌دهد که با افزایش نسبت جایگزینی خاکستر لجن به جای سیمان، مقاومت ویژه الکتریکی در تمام سنین عمل‌آوری کاهش می‌یابد (شکل‌های ۱۲-۱۴). مقاومت ویژه الکتریکی بتن وابسته به تخلخل بتن است. با افزایش نسبت جایگزینی خاکستر لجن به جای سیمان، حجم فضای قابل نفوذ افزایش می‌یابد. علاوه بر این، ترکیب شیمیایی مواد سیمانی نیز می‌تواند بر مقاومت ویژه الکتریکی تاثیر گذار باشد. مقدار بیشتر برخی از ترکیبات موجود در خاکستر لجن در مقایسه با سیمان (مانند کلر، فسفر، منیزیم، روی و غیره) این امکان را فراهم می‌آورد

۴- نتیجه گیری

- خاکستر لجن فاضلاب از ذراتی با مورفولوژی نامنظم تشکیل شده است. ترکیب شیمیایی خاکستر لجن با سایر پوزولان‌های متداول مانند خاکستر بادی و میکروسیلیس متفاوت است اما به ترکیب شیمیایی سیمان پرتلند تیب دو شباهت دارد.

- با افزایش نسبت جایگزینی خاکستر لجن به جای سیمان (۰-۲۰ درصد وزنی)، زمان‌های گیرش اولیه و نهایی به صورت خطی افزایش می‌یابد. نتایج به دست آمده در این پژوهش نشان می‌دهد که جایگزینی ۲۰ درصد خاکستر لجن مناسب نیست، زیرا باعث می‌شود تا زمان گیرش نهایی (۴۱۱ دقیقه) از بیشینه مقدار مجاز تعیین شده به وسیله ASTM C150 (۳۷۵ دقیقه) تجاوز نماید.

- با افزایش مقدار خاکستر لجن در بتن، مقاومت فشاری کوتاه مدت (سن ۷ و ۲۸ روز) کاهش می‌یابد. در حالی که در دراز مدت (سن ۹۱ و ۱۸۰ روز) سبب افزایش مقاومت فشاری نسبت به نمونه شاهد (نمونه بدون خاکستر لجن) می‌شود. این موضوع را می‌توان به رفتار پوزولانی آهسته خاکستر لجن فاضلاب نسبت داد.

- مقاومت فشاری ۲۸ روزه برای نسبت‌های جایگزینی ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد به ترتیب ۴-۲، ۵-۱۱، ۷-۱۵ و ۲۰-۱۰ درصد کمتر از نمونه شاهد مشاهده شد. کران پایین دامنه‌های یاد شده مربوط به w/b برابر ۰/۵۵ و کران بالا مربوط به w/b برابر ۰/۳۵ است. بر اساس نتایج می‌توان بیان داشت که اثر منفی جایگزینی خاکستر لجن بر مقاومت فشاری کوتاه مدت در تیمارهای با نسبت آب به مواد سیمانی بیشتر، کمتر است.

- بیشترین مقاومت فشاری دراز مدت (سن ۱۸۰ روز) در نسبت جایگزینی ۱۵ درصد خاکستر لجن به جای سیمان مشاهده گردید که برای نسبت‌های آب به مواد سیمانی ۰/۳۵، ۰/۴۵ و ۰/۵۵ به ترتیب ۵، ۸ و ۱۲ درصد بیشتر از نمونه شاهد است.

- فعالیت پوزولانی آهسته خاکستر لجن فاضلاب باعث می‌شود که میزان تخلخل (حجم فضای قابل نفوذ در بتن) تا سن ۲۸ روز، با افزایش نسبت جایگزینی افزایش یابد. پس از سن ۲۸

با این تفاوت که با افزایش نسبت جایگزینی، دامنه تغییرات از سن ۷ روز تا ۱۸۰ روز بزرگتر می‌شود. افزایش دامنه تغییرات همزمان با افزایش نسبت جایگزینی را می‌توان به وجود مواد قابل یونیزه شدن در خاکستر لجن فاضلاب نسبت داد.

شکل ۱۲- اثر جایگزینی خاکستر لجن بر مقاومت ویژه الکتریکی بتن،

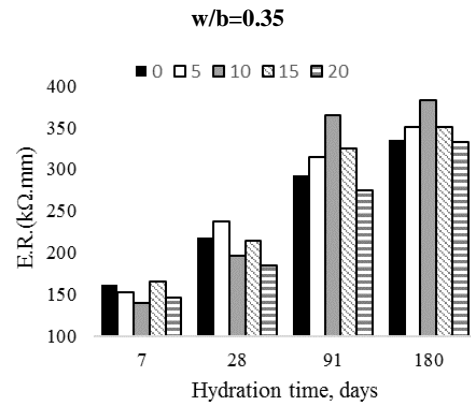


Fig.12- Sludge ash substitution effect on the electrical resistivity of the concrete, w/b=0.35

شکل ۱۳- اثر جایگزینی خاکستر لجن بر مقاومت ویژه الکتریکی بتن،

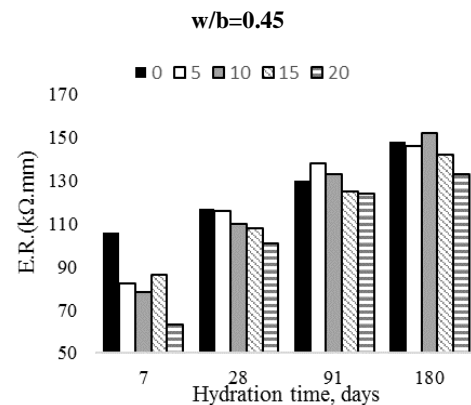


Fig.13- Sludge ash substitution effect on the electrical resistivity of the concrete, w/b=0.45

شکل ۱۴- اثر جایگزینی خاکستر لجن بر مقاومت ویژه الکتریکی بتن،

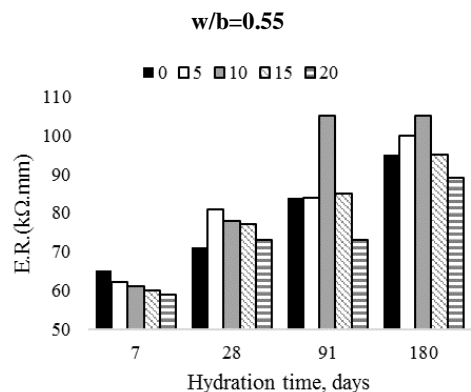


Fig.14- Sludge ash substitution effect on the electrical resistivity of the concrete, w/b=0.55

- [11] Coutand, M., Cyr, M., &Clastres, P., *Use of sewage sludge ash as mineral admixture in mortars*, Proceedings of the ICE-Construction Materials, Vol. 159, 2006, 153-162.
- [12] Monzo, J., Paya, J., Borrachero, M., &Peris-Mora, E., *Mechanical behavior of mortars containing sewage sludge ash (SSA) and Portland cements with different tricalcium aluminate content*, Cement and Concrete Research, Vol. 29(1), 1999, 87-94.
- [13] 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.
- [14] Garcés, P., Pérez Carrión, M., García-Alcocel, E., Payá, J., Monzó, J., & Borrachero, M., *Mechanical and physical properties of cement blended with sewage sludge ash*, Waste management, Vol.28, 2008, 2495-2502.
- [15] Pérez-Carrión, M., Baeza-Brotons, F., Payá, J., Saval, J., Zornoza, E., Borrachero, M., *Potential use of sewage sludge ash (SSA) as a cement replacement in precast concrete blocks*, Materiales de Construcción, Vol.64, 2014, 825-832.
- [16] ASTM C192, *Standard Practice for Making and Curing Concrete Specimens in the Laboratory*, 2002.
- [17] ASTM C188, *Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement*, 2003.
- [18] ASTM C204, *Standard Test Method for Fineness of Hydraulic Cement by Air-Permeability Apparatus*, 2000.
- [19] ASTM C114, *Standard Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement*, 2004.
- [20] ASTM C191, *Standard Test Method for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle*, 2004.
- [21] BS 1881-116, *Testing Concrete. Mithode for determination of compressive strength of concrete cubes*, 1983.
- [22] ASTM C642, *Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete*, 2013.
- [23] ASTM C618, *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*, 2012.
- [24] Waddell, J. J., *Concrete construction handbook*: McGraw-Hill Companies, 1974.
- [25] Ahmaruzzaman, M., *A review on the utilization of fly ash*. Progress in energy and combustion science, Vol.36, 2010, 327-363.
- [26] ASTM C311, *Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use in Portland-Cement Concrete*, 2002.

روز، با افزایش نسبت جایگزینی تا میزان ۱۰ درصد، حجم فضای قابل نفوذ در مقایسه با نمونه شاهد کاهش می‌یابد. با افزایش سطح جایگزینی از ۱۰ تا ۲۰ درصد، تخلخل نمونه‌ها افزایش یافته اما همچنان کمتر از نمونه شاهد است.

مقاومت ویژه الکتریکی بتن حاوی خاکستر لجن فاضلاب متأثر از دو پارامتر تخلخل و ترکیب شیمیایی مواد سیمانی است. با افزایش تخلخل و افزایش مواد قابل یونیزه شدن (در اثر افزایش نسبت جایگزینی خاکستر لجن به جای سیمان)، مقاومت ویژه الکتریکی بتن کاهش می‌یابد.

۵- تقدیر و تشکر

از آقای مهندس محمد حسین یوسفی نژاد به پاس همکاری در ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی و از شرکت سیمان زاوه تربت به پاس همکاری در تعیین ویژگی‌های فیزیکی خاکستر لجن فاضلاب قدردانی می‌شود.

References

۶- 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Pan, S. C., Tseng, D. H., C. Lee, & Lee, C., *Influence of the fineness of sewage sludge ash on the mortar properties*, Cement and Concrete Research, Vol. 33, 2003, 1749-1754.
- [8] Tay, J.-H., *Sludge ash as filler for Portland cement concrete*, Journal of Environmental Engineering, Vol. 113, 1987, 345-351.
- [9] Chen, M., Blanc, D., Gautier, M., Mehu, J., & Gourdon, R., *Environmental and technical assessments of the potential utilization of sewage sludge ashes (SSAs) as secondary raw materials in construction*, Waste management, Vol. 33, 2013, 1268-1275.
- [10] Pinarli, V. and R. Dhir, *Sustainable Waste Management-Studies on the use of sewage sludge ash in the construction industry as concrete material*. Proceedings Sustainable Construction. Use of incinerator ash, London, 2000: p. 415-425.

The effect of municipal sewage sludge ash as replacement of cement on physical, mechanical and durability properties of concrete

M.A Arshad Torabi¹, S. Danesh^{2*}, M.Tavakkolizadeh³

1- M.Sc.Student., Civil Eng. Dept., Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad

2- Associate Prof., Civil Eng. Dept., Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad

3- Assistant Prof., Civil Eng. Dept., Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad

*Sdanesh@um.ac.ir

Abstract:

Direct discharge of domestic wastewater (sewage) to the environment or into absorbing wells has caused many problems including surface and groundwater pollution. To reduce such problems, the number of wastewater treatment plants has increased significantly in Iran during the last two decades. During wastewater treatment, a significant amount of sludge, composed of organic and mineral material, is produced. This sludge, if not handled and disposed properly, can create serious environmental and health issues. One environmentally attractive way of dealing with such wastes is to use them in different types of applications. In this regard, many economical and beneficial methods have been developed to reuse sludge. Incineration of sludge for energy recovery or the use of sludge ash in cement-based construction materials are among these methods. Sludge incineration produces considerable amount of ash which should be disposed. However the ash can be used as cement substitute in production of cement-based material. The subject of using sludge ash as cement substitute has been investigated by a few researcher with the conclusion that the usage of ash can affect the final cement-based product quality. Based on their experimental results, the use of sludge ash tends to decrease the workability of fresh mortar or concrete, and to increase the cement setting time. Also a decrease in compressive strength of mortar or concrete was reported. However, it should be mentioned that no research has yet been done to investigate the effects of sludge ash replacement on mechanical and durability properties of concrete. The main aim of this study was to investigate the effects of sludge ash usage as cement substitute on physical, mechanical and durability properties of concrete. For this purpose, the effects of three key parameters: replacement level (0-20%, by weight), curing times (7, 28, 91 and 180 days) and water-cementitious material ratio (0.35, 0.45 and 0.55) were investigated. The sludge used in this research was obtained from one of the local wastewater treatment plants, which subsequently was dried and then was incinerated at 800°C to produce ash. The ash was in general, made up of irregular grains which were aggregates of smaller particles. Also, the ash was composed mainly of calcium, silica and aluminium oxides. The results showed that increasing the amount of sludge ash induced higher mortar setting times as compared to the control samples, using Vicat test. The effect of ash content on mechanical properties of concrete samples was carried out by compressive strength tests. Results indicated that for 7 and 28 days curing time, concrete samples containing a mixture of sludge ash and cement yielded lower compressive strength values than those samples using only cement (without any ash content). However, for curing times greater than 28 days, the increase in ash content of concrete samples (in the range of 0-15% by weight) led to an increase in compressive strength. Water absorption and electrical resistivity tests were conducted to determine the durability of concrete containing sewage sludge ash. As blending percentages of ash content increased from 5% to 20% (by weight), electrical resistivity of concrete samples decreased for regardless of the applied curing times. This phenomenon might be the result of increased porosity and material ionization.

Keywords: Municipal sewage sludge ash, Concrete, Compressive strength, Durability, Water absorption.