Iranian Concrete Society

Evaluation of Mechanical and Durability Properties of Concrete Containing Sewage Sludge Ash(SSA) as a Substitute for Cement or Fine Aggregate

***Amirmahdi Nikmanesh*[1*] *, Amirmohammad Ramezanianpour*[2] *, Mohammad Shekarchizadeh*[3]**

1-M.Sc. of structural engineering. University of Tehran , nikmanesh.am@ut.ac.ir
2-Associate Professor. School of Civil Engineering, University of Tehran
3-Professor. School of Civil Engineering, University of Tehran
***Received**: 26 June 2023 **Revised**: 27 August 2023 **Accepted**: 18 November 2023*
Research paper

Abstract

As human communities grow and the number of treatment plants increases, efficiently managing large volumes of sludge becomes critical. With limited land available for sludge burial and environmental restrictions on using sludge in agriculture, incineration has emerged as a viable disposal method. Sewage sludge ash (SSA) has been increasingly used as a substitute for cement and stone materials in concrete and construction. However, previous studies have often neglected the durability properties of concretes containing SSA and the mechanical properties, especially when SSA replaces fine aggregate, and Characteristics such as tensile strength and elasticity modulus require further investigation.

The present research compiled in two steps. In the first phase, the mechanical and fresh properties of concrete samples containing SSA as a substitute for cement or fine aggregate were examined. Tests such as slump, compressive strength, tensile strength, and modulus of elasticity were performed to address inconsistencies in previous research. In the second phase, the durability properties of concrete samples containing SSA, which have been less studied so far, were investigated. Tests conducted include electrical resistivity, water penetration depth, water absorption, RCPT, and salt scaling of concrete exposed to de-icing chemicals.

Results indicate that replacing cement with SSA (up to 20%) or fine aggregate (up to 15%) in concrete reduces workability by 35% and 85%, respectively, and decreases mechanical properties by approximately 25% and 20%. Conversely, durability parameters improve by about 25% and 50%, respectively. Therefore, considering mechanical properties, the use of SSA in concrete as a replacement for cement or fine aggregate should be limited to 10% to 20%, depending on the application type, whether structural or non-structural.

Keywords: Sustainable development, sewage sludge ash, filler, pozzolan, durability.

***Corresponding Auther:** Amirmahdi Nikmanesh
Nikmanesh A. Ramezanianpour A. Shekarchizadeh M. Evaluation of Mechanical and Durability Properties of Concrete Containing Sewage Sludge Ash(SSA) as a Substitute for Cement or Fine Aggregate. Journal of Concrete Structures and Materials 2023; 8(2): 1-21. http://doi.org/10.30478/jcsm.2023.404095.1335
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

ارزیابی خواص مکانیکی و دوامی بتن‌های حاوی خاکستر لجن فاضلاب (SSA) به‌عنوان جایگزین سیمان و یا ریزدانه

امیرمهدی نیک منش[1*]، امیرمحمد رمضانیانپور[2]، محمد شکرچی زاده[3]

۱-کارشناسی ارشد مهندسی عمران، گرایش سازه، دانشگاه تهران

۲- دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران

۳- استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران

پست الکترونیکی نویسنده مسئول : nikmanesh.am@ut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۰۲، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۲/۱۸، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۲۷

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

با توسعه جامعه بشری و افزایش تعداد تصفیه‌خانه‌ها تصفیه و دفع لجن آن هم در حجم زیاد نیاز به یک مدیریت کارامد دارد. امروزه به دلیل کمبود زمین برای دفن لجن و محدودیت‌های زیست محیطی کاربرد لجن در کشاورزی سوزاندن به‌عنوان یک راه حل مناسب برای دفع لجن مطرح می‌باشد. خاکستر لجن تصفیه‌خانه فاضلاب یکی از موادی است که در سال‌های اخیر به‌عنوان جایگزین سیمان و سنگدانه در بتن و مصالح ساختمانی استفاده شده است. در پژوهش‌های پیشین صورت گرفته به ویژگی‌های دوامی بتن‌های حاوی خاکستر لجن فاضلاب کمتر پرداخته شده و همچنین خواص مکانیکی این نوع بتن‌ها به‌خصوص در جایگزینی خاکستر لجن به‌عنوان ریزدانه به صورت کامل مورد بررسی قرار نگرفته و مشخصاتی اعم از مقاومت کششی مدول الاستیسیته نیازمند بررسی بیشتر می‌باشد. لذا پژوهش حاضر در ۲ گام تدوین گردیده است.

در گام اول به بررسی خواص مکانیکی و خواص تازه نمونه‌های بتنی حاوی خاکستر لجن فاضلاب به‌عنوان ماده جایگزین سیمان وریزدانه پرداخته شد و آزمایش‌های متنوعی اعم از اسلامپ، مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مدول الاستیسیته بر روی نمونه‌ها صورت گرفت تا تناقضات موجود در پژوهش‌های پیشین برطرف گردد. در گام دوم به بررسی خواص دوامی نمونه‌های بتنی حاوی خاکستر لجن فاضلاب به‌عنوان ماده جایگزین سیمان وریزدانه که تاکنون کمتر مورد مطالعه قرار گرفته اند پرداخته شد. مقاومت الکتریکی عمق نفوذ آب جذب آب RCPT و پوسته شدن بتن در معرض سیکل‌های یخ زدن و آب شدن در مجاورت مواد یخزدا از جمله آزمایش‌هایی هستند که بر روی این بتن‌ها انجام گردید.

از نتایج به‌دست‌آمده می‌توان استنباط کرد که جایگزینی خاکستر لجن تصفیه‌خانه فاضلاب به جای سیمان (تا ۲۰ درصد) یا ریزدانه (تا ۱۵ درصد) در بتن منجر به کاهش کارایی به‌ترتیب تا حدود ۳۵ و ۸۵ درصد و افت خواص مکانیکی به‌ترتیب تا حدود ۲۵ و ۲۰ درصد و از طرف دیگر تا حدی باعث بهبود پارامترهای دوامی به‌ترتیب تا حدود ۲۵ و ۵۰ درصد می‌شود. لذا با ملاک قرار دادن خواص مکانیکی استفاده از این خاکستر در بتن به‌عنوان جایگزین سیمان یا ریزدانه می‌باید به ۱۰٪ تا ۲۰٪ بسته به کاربرد مورد نظر اعم از سازه‌ای یا غیر سازه‌ای محدود گردد.

واژه‌های کلیدی: توسعه پایدار، خاکستر لجن فاضلاب، پرکننده پوزولان، دوام.

مقدمه

لجن فاضلاب محصول جانبی تصفیه‌خانه فاضلاب شهری است که به دلیل دارا بودن عوامل بیماریزا و همچنین ترکیبات شیمیایی مضر از جمله فلزات سنگین می‌تواند برای زندگی انسان‌ها تهدیدکننده باشد[۱]. با توسعه جامعه بشری و افزایش تعداد تصفیه‌خانه‌ها تصفیه و دفع لجن آن هم در حجم زیاد نیاز به یک مدیریت کارآمد دارد. روش‌های اصلی دفع لجن را می‌توان به دو بخش اساسی روش‌های 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 زمین‌های کشاورزی تزریق به چاه‌های جذبی دفع سطحی به رودخانه‌ها و دریاها و ...) تقسیم بندی نمود [۲]. 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 [۳]. 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 درایران بسیاری از کشاورزان میل و رغبت زیاد جهت استفاده مجدد لجن در کشاورزی ندارند [۴].

در سال‌های اخیر سوزاندن به‌عنوان یک راه حل مناسب برای دفع لجن مطرح می‌باشد. این گزینه با توجه به شرایط محیطی کشور ما به‌خصوص شهرهای با تراکم جمعیتی زیاد (مانند تهران) به‌عنوان راهکاری مناسب برای مدیریت لجن به شمار می‌آید. فر ایند سوزاندن لجن به تولید خاکستر معدنی بی خطر و عاری از پاتوژن‌ها می‌انجامد [۵]. از دیگر مزایای سوزاندن می‌توان به کاهش ۹۰ درصدی حجم لجن از بین رفتن مواد سمی[2] از بین رفتن بو و سهولت مدیریت خاکستر حاصل اشاره کرد [۶].

از سوی دیگر پیشرفت مهندسی عمران و توسعه ساخت‌وساز به مرور زمان اثرات نامطلوبی راایجاد نموده است که می‌تواند جامعه بشری و حتی نسل‌های بعد را تحت تاثیر قرار دهد. یکی از این آثار استفاده از منابع تجدیدناپذیر جهت ساخت مصالح ساختمانی است. از دیگر آثار مخرب توسعه صنعت ساخت می‌توان به مشکلات زیست محیطی بوجود آمده اشاره کرد. امروزه بتن به‌عنوان پرمصرف ترین ماده در جهان مطرح می‌باشد؛ آلوده‌کننده‌ترین بخش از ساخت بتن مربوط به صنعت سیمان است [۷]. مطابق آمار حدود ۳۰ الی ۴۰ درصد تولید گازهای گلخانه‌ای منتشر شده ناشی از صنعت ساختمان است [۸]. همچنین ۴۰ تا ۵۰ درصد زباله‌ها و نخاله‌های تولید شده در جهان به‌صورت مستقیم یا غیرمستقیم مربوط به صنعت ساختمان می‌باشد [۹]. هشت درصد دی اکسید کربن موجود در اتمسفر مرتبط با صنعت سیمان می‌باشد [۱۰]. سیمان پرتلند که مهم ترین 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 اصلی‌ایجاد گازهای گلخان‌های به مقدار بسیار زیاد می‌باشد [۱۱].

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 پایین جایگزینی می‌باشد. در این میان پوزولان‌ها که از دیر باز به‌عنوان جایگزین و مکمل سیمان در ساخت‌وسازها مورد استفاده قرارگرفته‌اند می توانند مشکلات مربوط به محدودیت تولید این گازها را تا میزان زیادی حل نمایند. پوزولان‌ها توانسته‌اند 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 [۱۲].

حال با توجه به اینکه سوزاندن لجن و تبدیل آن به خاکستر راهکاری مناسب جهت مدیریت معضل لجن می‌باشد مدیریت خاکستر حاصل به‌عنوان محل بحث در بسیاری از پژوهش‌های مرتبط مطرح می‌باشد. یکی از مناسب‌ترین استفاده‌ها از خاکستر لجن تصفیه‌خانه

---

[1] Compost

[2] Toxics

[3] Sewage sludge ash

فاضلاب (SSA[۳]) استفاده در مصالح سازه‌ای می‌باشد. کاربرد این ماده می‌تواند به‌عنوان جایگزین سیمان و یا ریزدانه مطرح گردد. در صورت کاربرد این خاکستر به‌عنوان 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 بستگی بالایی به منشا لجن و فرآیند حرارت‌دهی 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 این رو به‌طور خاص در یک پژوهش برای اولین‌بار به بررسی محتوی لجن ۷ تصفیه‌خانه فاضلاب فعال شهر تهران پرداخته شد تا به بهترین محتوی شیمیایی و ترکیبات ممکن برای لجن خام دست پیدا شود. همچنین فرآیند حرارت‌دهی و سوزاندن که تا کنون درایران به‌طور مختصر به آن پرداخته شده است به‌طور مفصل‌تر مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده در پژوهش مذکور تصفیه‌خانه شهرک غرب به لحاظ محتوی تشکیل‌دهنده مطلوب‌ترین تصفیه‌خانه تهران می‌باشد. همچنین مناسب‌ترین دمای حرارت‌دهی برای نمونه‌های لجن خام به لحاظ فعالیت پوزولانی و واکنش‌پذیری دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد به‌دست‌آمده است. بالاترین درصد فعالیت پوزولانی خاکستر لجن فاضلاب سوزانده شده در دماهای مختلف نیز در این پژوهش در ۷ روز ۵۶ ٪ و در ۲۸ روز ۶۴ ٪ محاسبه گردید[۱۳].

از آنجا که عمده تمرکز در پژوهش‌های پیشین صورت گرفته درایران و جهان معطوف بر کاربرد این خاکستر به‌عنوان ماده جایگزین سیمان بوده است در این پژوهش به امکان سنجی استفاده از خاکستر لجن تصفیه‌خانه فاضلاب در بتن به‌طور گسترده‌تر پرداخته شد که این استفاده به‌عنوان جایگزین سیمان و یا ریزدانه و به‌عنوان پرکننده می‌باشد. قابل ذکر است استفاده از لجن تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری و صنعتی به‌عنوان جایگزین مصالحی نظیر سیمان و غیره علاوه بر کاهش هزینه‌های اقتصادی کاهش کربن دی اکسید و گازهای گلخانه‌ای تولیدی و کاهش انرژی مصرفی در پروژه‌های عمرانی (به دلیل مصرف کمتر سیمان در هر مترمکعب بتن‌ریزی) باعث کاهش هزینه‌های تصفیه‌خانه‌های فاضلاب اعم از هزینه‌های تثبیت و دفع این مواد مازاد خواهد شد [۱۴].

با بررسی‌هایی که چانگ[۴] و همکاران بر روی خواص بتن سخت انجام دادند این نتیجه به‌دست آمد که هر چه درصد جایگزینی خاکستر لجن به جای سیمان بیشتر باشد افت مقاومت فشاری نمونه‌ها نیز بیشتر است. آن‌ها با توجه به افت مقاومت پیش آمده در بتن‌های حاوی خاکستر لجن دریافتند جایگزینی ۱۰ درصد می‌تواند برای بتن‌های مسلح و درصدهای بیشتر برای بتن‌های غیر سازه‌ای به کار رود [۱۵]. این افت مقاومت در پژوهش خوشروش و همکاران به وسیله کاربرد نانوسیلیس در ملات و بتن جبران گردید [۱۶]. همچنین ارشد ترابی و همکاران با جایگزینی ۵ تا ۲۰ درصد خاکستر لجن فاضلاب به جای سیمان دریافتند در ضمن افت خواص مکانیکی تا ۲۸ روز این خواص در سنین ۹۰ و ۱۸۰ روز دچار بهبود گردیده‌اند [۱۷]. از سوی دیگر عسگری در پژوهشی به بررسی مقاومت کششی نمونه‌های بتن حاوی خاکستر لجن پرداخت. وی مشاهده کرد که مقاومت کششی تمامی نمونه‌ها نسبت به نمونه‌ی شاهد فاقد لجن هم در در سنین ۷ روزه و هم ۲۸ روزه کاهش یافته است [۱۸].

از معدود پژوهش‌هایی که به برخی مشخصات دوامی بتن حاصل از جایگزینی خاکستر لجن به جای سیمان پرداخته شده توسط یاگو[۵] و همکاران صورت گرفته است. در این پژوهش نمونه‌های بتنی تحت آزمایش‌های چرخه‌های تر و خشک آب آب دریا و محلول سولفات و در ادامه آزمون اتوکلاو و کربناته شدن قرار گرفته است. نتایج این آزمایش‌ها کمک شایانی به تاثیر خاکستر لجن فاضلاب بر خواص دوامی بتن‌های حاوی این خاکستر نمی‌کند [۱۹]. عسگری در پژوهش دیگری با تهیه سه نمونه‌ی استوانه‌ای برای هر طرح

---

[4] Chang

[5] Yague

آن‌ها را تحت آزمایش نفوذپذیری آب قرار داد. بر طبق نتایج حاصله نمونه‌های بتنی حاوی ذرات خاکستر لجن نسبت به نمونه‌ی شاهد دارای نفوذپذیری کمتری می‌باشد [۱۸]. در مورد پارامترهای دوامی اعم از مقاومت الکتریکی و جذب آب نیز در پژوهش‌هایی دیگر به‌طور مختصر پرداخته شده که نتایج آن‌ها با یکدیگر کاملا متناقض می‌باشند.

لذا از آنجا که در پژوهش‌های پیشین صورت گرفته به ویژگی‌های دوامی بتن‌های حاوی خاکستر لجن فاضلاب کمتر پرداخته شده و یا نتایج به‌دست‌آمده دارای تناقضاتی است و همچنین خواص مکانیکی این نوع بتن‌ها به‌خصوص در جایگزینی به‌عنوان ریزدانه دارای کمبود اطلاعات می‌باشد در این پژوهش مشخصات مکانیکی و دوامی بتن‌های حاوی خاکستر لجن فاضلاب به‌عنوان جایگزین سیمان و ریزدانه مورد بررسی دقیق تر قرار گرفت.

۲- مطالعات آزمایشگاهی

۲-۱- مصالح

۲-۱-۱- سیمان

با مد نظر قرار دادن این نکته که در این پژوهش خواص غیرمتعارفی از نمونه‌های ملات و بتن مورد انتظار نبود و همچنین با توجه به مقایس‌های 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 تشکیل‌دهنده بر اساس استانداردهای ASTM C114 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)	۲۰/۶۵	۴/۰۰	۴/۰۸	۶۵/۲۲	۱/۵۳	۲/۲۲	۰/۵۲	۰/۳۵

فازهای تشکیل‌دهنده				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 بسته‌های ۱۳۵۰ گرمی ماسه استاندارد مطابق با استاندارد DIN 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 ریزدانه	شن نخودی	شن بادامی
نام	FA۱	CA۱	CA۲
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	–	–

۳-۱-۲- افزودنی

در پژوهش حاضر برای‌ایجاد روانی مورد انتظار از بتن در تمامی فازها از فوق روان کننده نوع سوم پلی کربوکسیلاتی فرکوپلاست PN9 استفاده گردیده است.

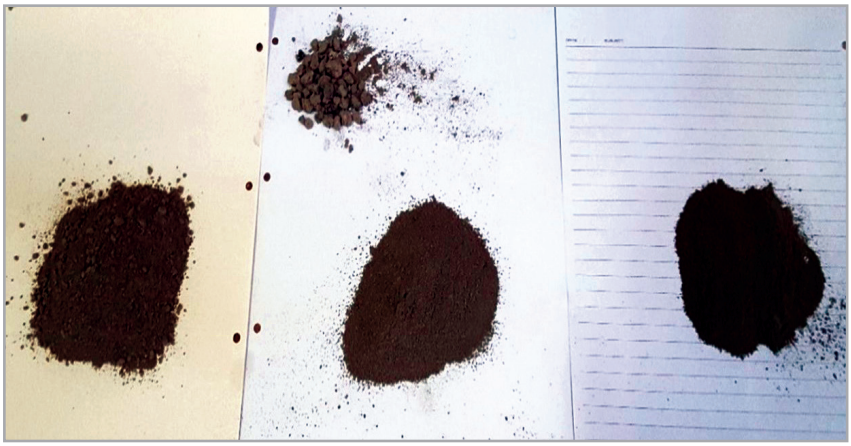
۲-۱-۴- خاکستر لجن فاضلاب

در گام اول این پژوهش از تمامی تصفیه‌خانه‌های فعال شهر تهران شامل تصفیه‌خانه‌های 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 تصفیه‌خانه در حدود ۱۰ کیلوگرم لجن خشک برداشت و با انجام آزمایش شیمیایی XRF و XRD بهترین تصفیه‌خانه به لحاظ محتوی تشکیل‌دهنده لجن (بالاتر بودن میزان Al2O3 SiO2 Fe2O3 و شدت و واکنش‌پذیری پیک‌های سیلیسی) انتخاب گردید. سپس با انجام دادن فر ایند حرارت‌دهی در دماهای متفاوت (۷۰۰ تا ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد) و انجام مجدد آزمایش شیمیایی XRF و XRD و همچنین ساخت نمونه‌های ملات و بتن و انجام آزمایش محاسبه شاخص فعالیت پوزولانی خاکستر لجن فاضلاب در ملات (استاندارد ASTM C311 و BS 3892) و آزمایش درصد کسب مقاومت خاکستر لجن فاضلاب در بتن بهترین فر ایند و حرارت سوزاندن لجن فاضلاب نیز انتخاب گردید. با توجه به نتایج حاصل تصفیه‌خانه شهرک غرب به‌عنوان بهترین تصفیه‌خانه به لحاظ ترکیبات شیمیایی تشکیل‌دهنده لجن و دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد به‌عنوان دمای مطلوب سوزاندن لجن به لحاظ‌ایجاد مطلوب‌ترین خواص پوزولانی انتخاب گردید [۱۳].

۲-۲- برنامه آزمایشگاهی

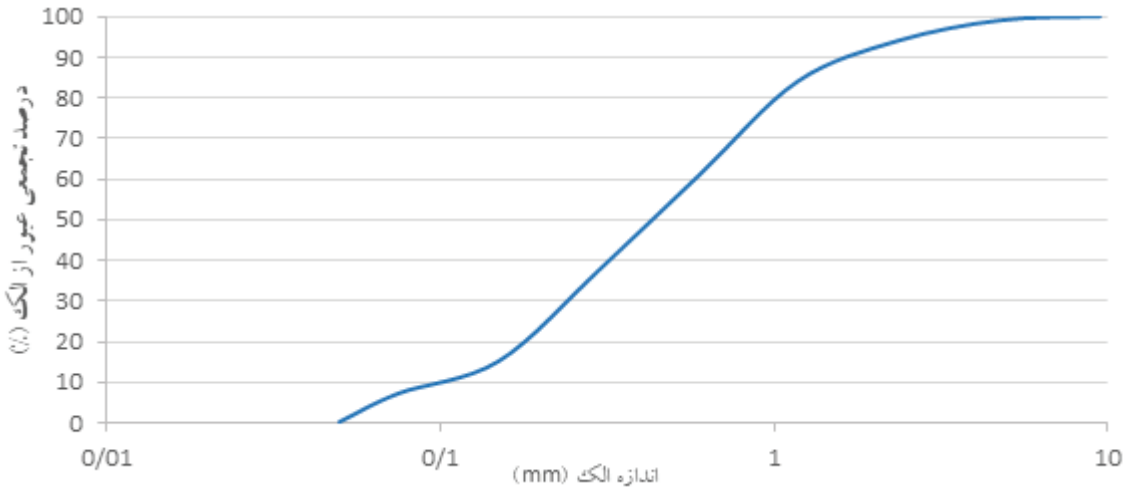
پس از دستیابی به مطلوب‌ترین خاکستر لجن ممکن به لحاظ محتوی شیمیایی حرارت زایی و همچنین خواص پوزولانی به امکان سنجی استفاده از این ماده به‌عنوان ماده جایگزین در بتن پرداخته شد. در این پژوهش جایگزینی این خاکستر به جای سیمان و ریزدانه (ماسه) در بتن معمولی مورد مطالعه قرار گرفت.

خاکستر لجن حرارت دیده شده در دمای ۸۰۰ درجه ابتدا توسط دستگاه لس آنجلس آسیاب گردید و دانه بندی بر روی آن صورت گرفت. در این گام خاکستر رد شده از الک شماره ۲۰۰ به جهت جایگزینی سیمان و خاکستر باقی مانده با دانه بندی کنترل شده برای جایگزینی ریزدانه مورد استفاده قرار گرفت. شکل ۱ خاکسترهای لجن مورد استفاده در پژوهش با دانه بندی متفاوت برای جایگزینی سیمان و ریزدانه را نشان می‌دهد.



شکل ۱: خاکستر لجن فاضلاب با دانه بندی متفاوت

دانه بندی خاکستر لجن جایگزین ریزدانه در شکل ۲ قابل مشاهده است. مدول نرمی خاکستر مورد استفاده برابر ۲,۱ برای جایگزینی ریزدانه محاسبه گردید.



شکل ۲: دانه بندی خاکستر لجن فاضلاب جایگزینه ریزدانه

۲-۲-۱- طرح‌های مخلوط

به جهت بررسی خواص مکانیکی و دوامی بتن‌های حاوی خاکستر لجن فاضلاب ۵ طرح مخلوط بتن معمولی با درصدهای جایگزینی ۰٪ ۵٪ ۱۰٪ ۱۵٪ و ۲۰ درصد وزنی خاکستر به جای سیمان (SSA - Cx) تهیه و طراحی شد. همچنین ۴ طرح مخلوط بتن معمولی با درصدهای جایگزینی ۰ ۵ ۱۰و ۱۵ درصد وزنی خاکستر به جای ریزدانه (SSA - Ax)نیز در نظر گرفته شد. به جهت تاثیرگذاری خاکستر لجن فاضلاب بر روی خواص مکانیکی و همچنین کارائی بتن در پژوهش‌های پیشین درصدهای جایگزین بالاتر توصیه نشده اند.

نسبت آب به سیمان در تمامی طرح‌ها برابر ۰,۴۵ فرض شد و برای کنترل روانی از فوق روان کننده به میزان ۰,۲٪ مواد پودری (سیمان و خاکستر) استفاده گردید. دلیل انتخاب عیار سیمان زیاد بتن شاهد مشاهده محسوس تر افت خواص مکانیکی با افزودن میزان اندک خاکستر لجن می‌باشد. در مورد اسلامپ زیاد بتن شاهد نیز توجیه مشابهی وجود دارد. طرح‌های مخلوط این پژوهش در جدول ۳ قابل مشاهده است.

جدول ۳ : طرح مخلوط بتن معمولی با درصد جایگزینی مختلف خاکستر لجن فاضلاب به جای سیمان و ریزدانه

نام طرح	سیمان	خاکستر لجن	آب	ریزدانه	شن نخودی	شن بادامی	فوق روان کننده
	(Kg/m^3)	(Kg/m^3)	(Kg/m^3)	(Kg/m^3)	(Kg/m^3)	(Kg/m^3)	(Kg/m^3)
SSA – C0 (طرح شاهد)	۴۰۰	۰	۱۸۰	۱۰۴۵	۱۷۴	۵۲۲	۰,۸
SSA - C5	۳۸۰	۲۰	۱۸۰	۱۰۴۲	۱۷۴	۵۲۲	۰,۸
SSA - C۱۰	۳۶۰	۴۰	۱۸۰	۱۰۴۰	۱۷۴	۵۲۲	۰,۸
SSA - C۱۵	۳۴۰	۶۰	۱۸۰	۱۰۳۵	۱۷۴	۵۲۲	۰,۸
SSA - C۲۰	۳۲۰	۸۰	۱۸۰	۱۰۳۰	۱۷۴	۵۲۲	۰,۸
SSA – A۰ (طرح شاهد)	۴۰۰	۰	۱۸۰	۱۰۴۵	۱۷۴	۵۲۲	۰,۸
SSA - A۵	۴۰۰	۵۲,۲۵	۱۸۰	۹۹۲,۷۵	۱۷۴	۵۲۲	۰,۸
SSA - A۱۰	۴۰۰	۱۰۴,۵	۱۸۰	۹۴۰,۵	۱۷۴	۵۲۲	۰,۸
SSA - A۱۵	۴۰۰	۱۵۶,۷۵	۱۸۰	۸۸۸,۲۵	۱۷۴	۵۲۲	۰,۸

۲-۲-۲- ساخت آزمونه‌ها

ساخت نمونه های بتن بر اساس استاندارد ASTM C192 صورت گرفت. زمان اختلاط برای طرح‌ها به منظور مخلوط شدن کامل مصالح و بر اساس تجربه‌های قبلی حدود ۵ دقیقه درنظر گرفته شد. همچنین نمونه گیری بتن در قالب‌هایی مکعبی با ابعاد ۱۵۰میلی‌متر مکعبی با ابعاد ۱۰۰ میلی‌متر استوانه‌ای با ابعاد ۳۰۰×۱۵۰ میلی‌متر و استوانه‌ای با ابعاد ۲۰۰×۱۰۰ میلی‌متر انجام شد. نمونه‌ها به وسیله میز ویبره در ۲ لایه متراکم شدند.

۲-۲-۳- شرایط عمل آوری نمونه‌ها

آزمونه‌ها طبق استاندارد ASTM C192به مدت ۲۴ ساعت در قالب و سپس تا زمان آزمایش در آب آهک اشباع با دمای ۲± ۲۳ درجه سانتی‌گراد عمل آوری شدند.

۲-۲-۴- آزمایش‌ها

پس از ساخت هر طرح ۳ دسته آزمایش بر روی نمونه‌ها صورت پذیرفت؛ دسته اول آزمایش‌های بتن تازه دسته دوم آزمایش‌های مکانیکی و دسته آخر نیز مربوط به آزمایش‌های دوامی می‌باشد.

- **آزمایش اسلامپ**

آزمایش اندازه‌گیری اسلامپ بلافاصله پس از ساخت مخلوط بر روی بتن تازه با کمک قیف اسلامپ و بر اساس ASTM C143 صورت پذیرفت.

در دسته دوم به جهت بررسی میزان اثرگذاری خاکستر لجن بر روی خواص مکانیکی بتن ۳ آزمایش مرتبط با مشخصات مکانیکی بتن ترتیب داده شد و تاثیر خاکستر بر این خواص و پارامترها به‌طور جداگانه بررسی گردید. این آزمایش‌ها عبارتنداز:

● **آزمایش مقاومت فشاری بتن**

آزمایش مقاومت فشاری بتن بر روی آزمونه‌های مکعبی ۱۵۰ میلی‌متری بتن برای هر طرح انجام شد. این آزمایش بر روی ۲ آزمونه در سنین ۷ ۹۰ روز و بر روی ۳ آزمونه در سن ۲۸ روز با الگو گرفتن از استاندارد ASTM C39 صورت گرفت.

● **آزمایش مقاومت کششی بتن**

پارامتر مقاومت کششی از جمله مواردی است که در بتن‌های دارای خاکستر لجن کمتر مورد بررسی قرار گرفته است این آزمایش بر طبق استاندارد ASTM C496 بر روی آزمونه‌های استوانه‌ای ۳۰۰×۱۵۰ میلی‌متری انجام گرفت. آزمایش پس از ۲۸ روز عمل آوری بر روی ۲ آزمونه صورت پذیرفت و نتایج به صورت مقایس‌های مورد تحلیل قرار گرفت.

● **آزمایش تعیین مدول الاستیسیته بتن**

مدول الاستیسیته بتن که با Ec نمایش داده می‌شود خاصیتی از بتن می‌باشد که با ضریب زاویه یا همان تانژانت منحنی تنش_ کرنش (تغییر طول نسبی) بتن برابر است. در این آزمایش ۳ چرخه بارگذاری و باربرداری تا حدود تخمینی ۴۰٪ بار شکست هر نمونه در سن ۲۸ روز بر روی ۲ آزمونه استوانه‌ای ۳۰۰×۱۵۰ میلی‌متری بر اساس استاندارد ASTM C۴۶۹ و یا مطابق استانداردایران شماره ۶۰۴۷ اعمال شد. در نهایت مدول الاستیسیته از رابطه (۱) به‌دست می آید.

$$Ec = (S2 - S1) / (\varepsilon 2 - 0.000050) \quad (1)$$

که در آن Ec مدول ارتجاعی برحسب مگا پاسکال؛ S2 تنش وارده برای ۴۰ درصد بار نهائی؛ 1S تنش وارده برای کرنش طولی ۰,۰۰۰۰۵۰ و ε2 کرنش‌ایجادشده توسط تنش S۲ می‌باشد.

همان‌طور که پیشتر گفته شد تمرکز عمده پژوهش‌های پیشین انجام شده بر روی خواص مکانیکی بتن‌های حاوی خاکستر لجن بوده است لذا در بخش سوم سعی شد با طراحی آزمایش‌های متنوع به ابعاد مختلف پارامترهای دوامی بتن نیز پرداخته شود. ۵ آزمایش متفاوت در این بخش در نظر گرفته شد که به شرح زیر می‌باشند:

● **آزمایش تعیین مقاومت الکتریکی بتن**

سهولت یا سختی عبور جریان الکتریکی از بتن اشباع می‌تواند نشان‌های از نفوذپذیری آن دربرابر آب و به ویژه انتشار و مهاجرت یونی (به ویژه یون کلرید) باشد. برای محاسبه این پارامتر آزمایش مقاومت الکتریکی ۴ نقطه‌ای ونر[6] بر روی آزمونه‌های عمل آوری شده در سن ۲۸ روز بر اساس استاندارد AASHTO T358 انجام شد. برای هر طرح ۲ آزمونه و بر روی هر آزمونه ۳ بار این آزمایش انجام شد و نتایج به صورت میانگین مورد تحلیل قرار گرفتند.

● **آزمایش جذب آب بتن**

جذب آب و نفوذپذیری بتن رابطه نزدیکی با ویژگی‌های ساختار منافذ آن در خمیر سیمان و شدت ریز ترک‌ها در مرز سنگدانه‌ها و خمیر سیمان دارد. برای بررسی این پارامتر آزمایش جذب آب کوتاه مدت (نیم ساعته و یک ساعته) و بلند مدت (۲۴ ساعته و

[6] Wenner

۷۲ ساعته) با الگوبرداری از استاندارد ASTM C642 بر روی ۲ قرص بتنی ۵۰×۱۰۰ میلی‌متری در سن ۲۸ روز صورت گرفت.

- **آزمایش عمق نفوذ آب تحت فشار در بتن**

میزان عمق نفوذ آب در بتن نمایانگر نفوذپذیری بتن مقدار و حجم منافذ و ارتباط بین منافذ در بتن می‌باشد و از این حیث از اهمیت بالای برخوردار است. برای این آزمایش طبق BS EN ۱۲۳۹۰-۸ ۲ عدد آزمونه ی مکعبی به بعد ۱۵۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد. آزمونه‌ها پس از عمل آوری در سن ۲۸ روزه مورد آزمایش قرار گرفتند.

- **آزمایش** RCPT [۷]

RCPT یک روش آزمایش استاندارد برای نشان دادن مقاومت بتن در برابر نفوذ یون کلرید به صورت الکتریکی است. استاندارد ASTM C1202 روشی را برای تعیین سریع نفوذپذیری یون کلراید در بتن سخت شده ارائه می‌دهد. در این روش درطی ۶ ساعت شدت جریان عبوری از قرص بتنی به قطر ۱۰۰ میلی‌متر و ارتفاع ۵۰ میلی‌متر در سن ۳۰۰روز به‌دست‌آمده است.

- **آزمایش پوسته پوسته شدن بتن تحت چرخه یخ زدن و آبشدن در مجاورت محلول آب و نمک**

به جهت بررسی مقاومت سطحی در برابر نفوذ عوامل مخرب آزمایش پوسته شدن در مجاورت نمک یخ‌زدا ترتیب داده شد. این آزمایش بر اساس استاندارد ASTM C672 انجام گردید و درجه تخریب سطح پس از هر ۵ چرخه تا حد ۵۰ چرخه در معرض مواد یخ‌زدا (محلول کلسیم کلرید ۴ درصد) که روی قطعه ریخته می‌شود گزارش شد. نمونه‌های نمایش داده شده در شکل ۳ برای آزمایش مهیا گشته اند.

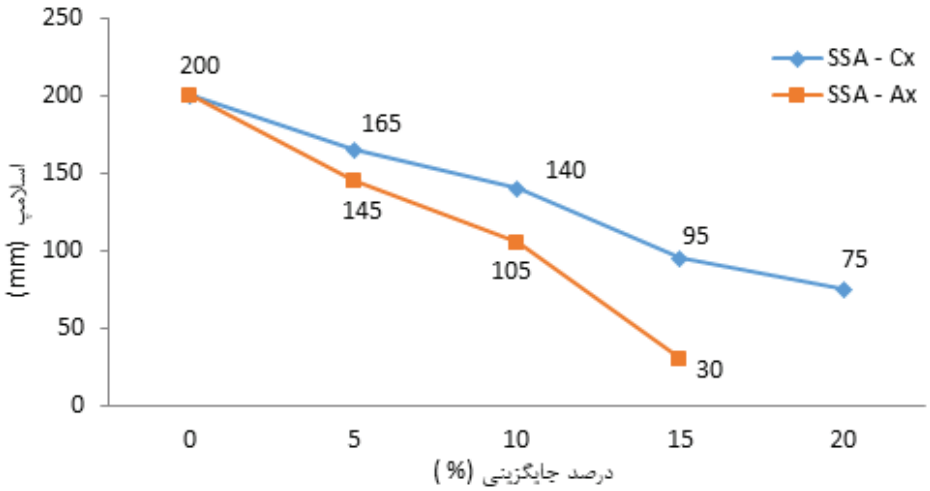
شکل ۳: آزمونه‌های بتنی آماده شده برای آزمون پوسته شدن در مجاورت نمک یخ‌زدا

[7] Rapid Chloride Permeability Test

نتایج و بحث و بررسی

۳-۱- نتایج آزمایش اسلامپ

همان گونه که در شکل ۴ مشاهده می‌شود استفاده از خاکستر لجن فاضلاب در بتن منجر به کاهش قابل‌توجه کارایی گردیده که این کاهش بستگی به میزان استفاده از این خاکستر دارد و بین این دو پارامتر ارتباط مستقیمی برقرار است. علت این کاهش روانی را می‌توان به بافت خشن و زبر و همچنین مورفولوژی نامنظم تر ذرات خاکستر لجن نسبت داد که منجر به افزایش میزان جذب آب در سطح خارجی این ذرات می‌شود. از طرفی با توجه به آزمایش اندازه‌گیری سطح مخصوص به روش جذب ازت[8] درجه نرمی خاکستر لجن (۱۵۴۳,۸(m2/kg به مراتب بیشتر از درجه نرمی سیمان پرتلند تیپ دو است. همچنین مدول نرمی خاکستر جایگزین شده با سیمان نیز (۲,۱) در مقایسه با ریزدانه مورد استفاده (۳,۳) کمتر می‌باشد. همین موضوع باعث می‌شود تا با افزایش درصد جایگزینی خاکستر لجن به جای سیمان یا ریزدانه سطح مخصوص و به تبع آن میزان جذب آب خمیر سیمانی افزایش یابد. این موضوع می‌تواند بر کارایی بتن تازه تاثیرگذار باشد. اما باید یادآور شد که فرای ریزتر بودن ذرات خاکستر لجن در مقایسه با سیمان و ریزدانه پارامتر تاثیر گذارتر در کاهش روانی بتن موفولوژی نامنظم و همچنین تخلخل بالای ذرات این خاکستر می‌باشد [۱۷].



شکل ۴ : اسلامپ نمونه‌های بتن حاوی خاکستر لجن فاضلاب جایگزین شده به جای سیمان (لوزی) و ریزدانه (مربع)

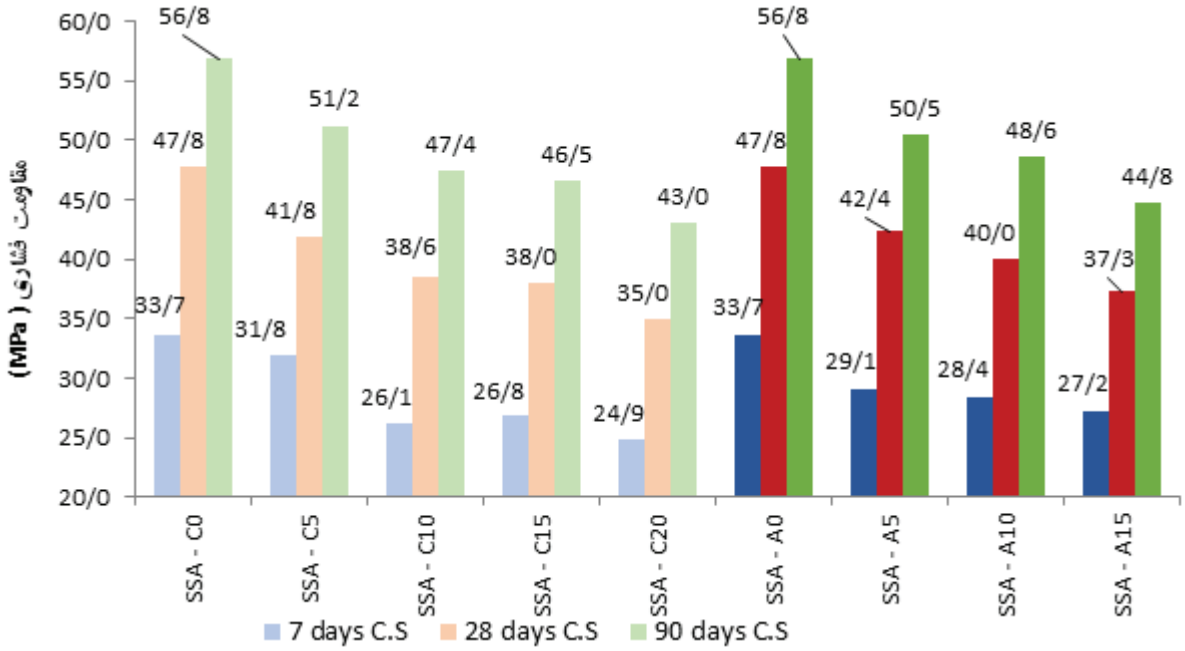
۳-۲- نتایج آزمایش مقاومت فشاری

در شکل ۵ تأثیر میزان خاکستر لجن فاضلاب بر مقاومت فشاری بتن پس از ۷ ۲۸ و ۹۰ روز عمل آوری نشان داده شده است. نتایج نمایانگر آن است که مقاومت فشاری در تمامی درصدهای جایگزینی SSA در مقایسه با مخلوط کنترل (SSA - C0 / A0) کاهش یافته است. اصلی ترین دلیل این افت مقاومت شاخص فعالیت پوزولانی پایین خاکستر می‌باشد. به‌طور دقیق تر می‌توان گفت علاوه بر کاهش محصولات هیدراته به دلیل میزان اکسیدهای پوزولانی آمورف کمتر خاکستر واکنش زایی بین مواد پودری و محصولات هیدراته ضعیف تر بوده و حاصل مقاومت فشاری کمتری می‌باشد. همچنین بر اساس پژوهش‌های پیشین آزمونه‌های بتنی حاوی خاکستر لجن فاضلاب دارای تخلخل زیادتر به نسبت نمونه شاهد می‌باشند که خود عاملی موثر در افت خواص مکانیکی بتن می‌باشد. مقاومت ذاتی کمتر ذرات نسبت به ریزدانه‌های موجود در پژوهش عامل کاهش مقاومت فشاری آزمونه‌های حاوی خاکستر جایگزین شده به جای ریزدانه می‌باشد.

[8] BET

برای همه طرح‌های مختلف پس از ۲۸ و ۹۰ روز عمل آوری مقاومت فشاری در مقایسه با دوره قبل (۷ روزه) افزایش یافته است. با این حال مقاومت فشاری در مقایسه با بتن شاهد هنوز پایین تر می‌باشد. زیرا از آنجا که مواد پوزولانی با محصولات هیدراته سیمان واکنش می‌دهد و ژل‌های سیلیکاتی را تولید می‌کنند با کاهش مقدار سیمان در واحد حجم بتن و افزایش مقدار خاکستر لجن به علت واکنش محدود پوزولانی این خاکستر و نیز کاهش تولید محصولات هیدراته سیمان مقاومت‌های مکانیکی کاهش میابند. از طرفی کاهش مقدار سیمان در واحد حجم بتن باعث می‌شود تا دمای ناشی از هیدراته شدن کاهش یابد. این کاهش دما به نوبه خود می‌تواند منجر به فعالیت کمتر ذرات خاکستر لجن در انجام واکنش‌های پوزولانی و تولید ژل‌های سیلیکاته شود. لذا با افزایش مقدار خاکستر لجن و کاهش مقدار سیمان عامل کاهش دمایی نیز می‌تواند باعث کاهش سرعت هیدراته شدن شود. در سنین پایین عمل آوری واکنش‌های شیمیایی خاکستر لجن با هیدروکسید کلسیم حاصل از هیدراته شدن سیمان بسیار آهسته انجام می‌شود. با افزایش زمان عمل آوری واکنش پوزولانی قوی صورت می‌گیرد که حاصل تولید سیلیکات کلسیم و سیلیکات آلومینیوم بیشتر می‌باشد که باعث بهبود خاصیت مقاومت بتن می‌شود. نتایج پژوهش حاصل منطبق با عمده پژوهش‌های پیشین موجود می‌باشد [۲۰ و ۲۱]. اما در مواردی مغایرت‌هایی با تحقیقات اندکی نیز که در آن‌ها مقاومت نمونه‌های حاوی خاکستر لجن مشابه [۲۲] یا بیشتر از نمونه‌های شاهد به‌دست‌آمده است به چشم میخورد [۱۷ و ۲۳].

۳-۳- مقاومت کششی و مدول الاستیسیته

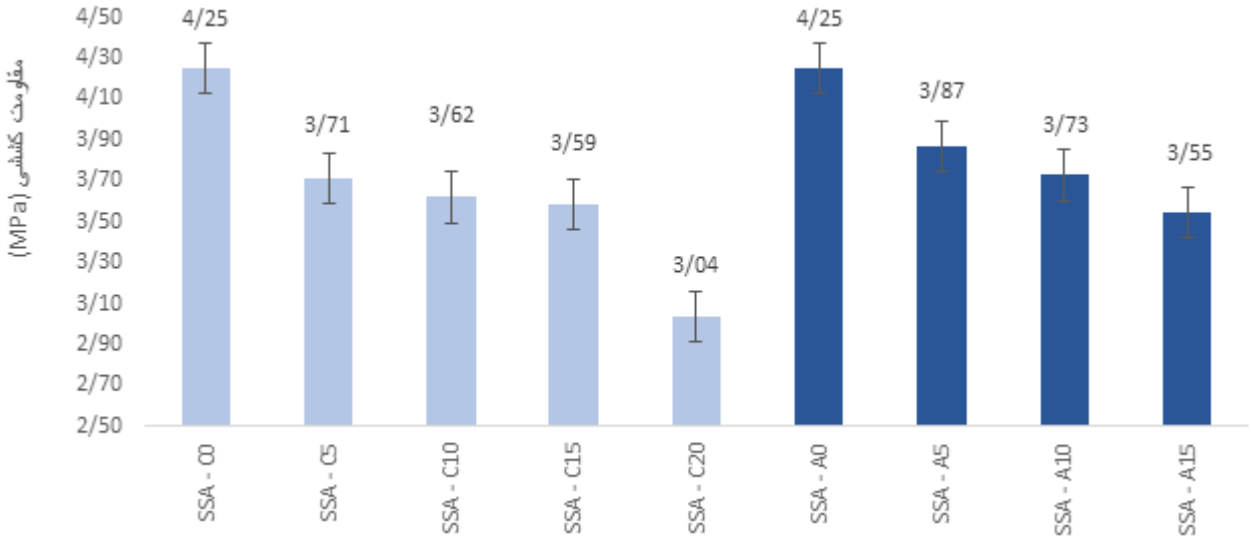


شکل ۵ : مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی حاوی خاکستر لجن فاضلاب جایگزین شده به جای سیمان و ریزدانه در سنین ۷ ۲۸ و ۹۰ روز

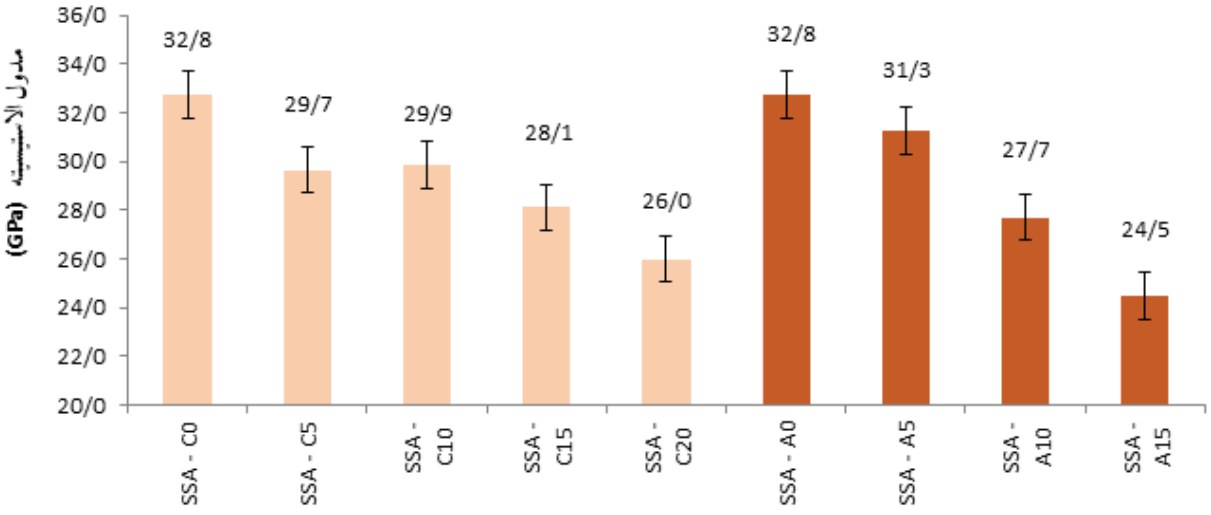
شکل ۶ و شکل ۷ مقادیر مقاومت کششی و مدول الاستیسیته نمونه‌های مورد بررسی در این مطالعه را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج ارائه‌شده می‌توان مشاهده کرد که مقاومت کششی و مدول الاستیسته نمونه‌ها برای تمام درصدهای جایگزینی SSA در سن ۲۸ روز به نسبت نمونه شاهد کاهش یافته است خواص پوزولانی پایین SSA کاهش محصولات هیدراته وجود عناصر مزاحم هیدراته شدن و سایر عوامل کاهش دهنده مقاومت فشاری مانند تخلخل بتن حاوی خاکستر و یا مقاومت ذاتی پایین ذرات خاکستر تأثیر

زیادی بر روی خصوصیات کششی بتن همانند سایر خواص مکانیکی دارد. کاهش مدول الاستیسته و افزایش تغییر شکل‌ها در اثر افزایش نرخ جایگزینی خاکستر لجن به این دلیل است که با افزایش نسبت SSA تعداد منافذ بتن افزایش یافته و این عامل خواص مکانیکی اعم از مدول را تحت تأثیر قرار می‌دهد. نتایج این بخش با بخش قبل با توجه به همسویی خواص مکانیکی بتن منطبق می‌باشد. همچنین نتایج به‌دست‌آمده در این پژوهش با سایر پژوهش‌های صورت گرفته توسط والز و همکاران ؛ لین و همکاران و عسگری همخوانی زیادی دارد[۱۸ و ۲۴ و ۲۵].

۴-۳- نتایج آزمایش مقاومت الکتریکی بتن

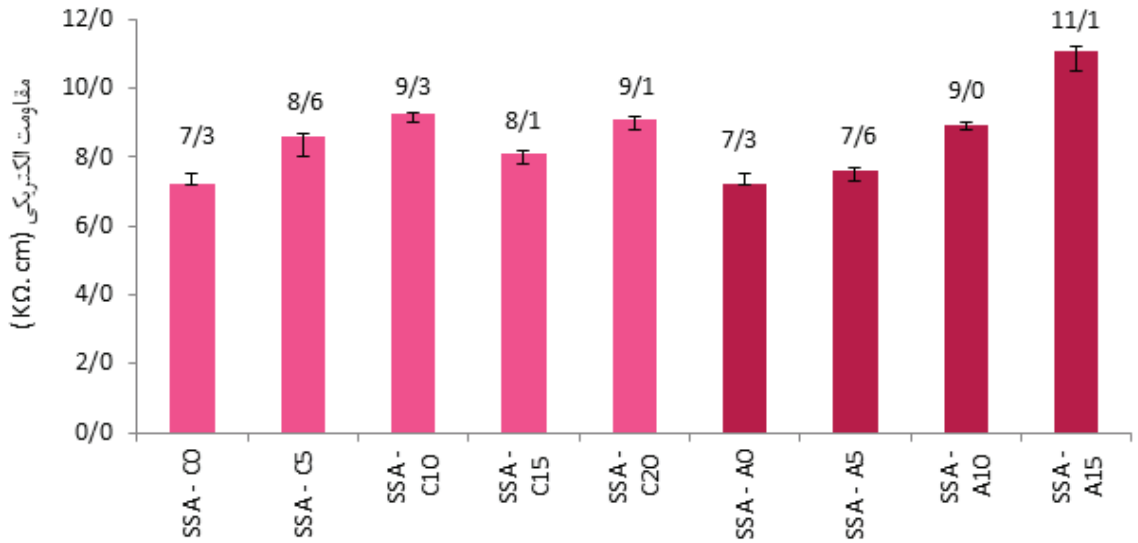


شکل ۶: مقاومت کششی نمونه‌های بتنی حاوی خاکستر لجن فاضلاب جایگزین شده به جای سیمان و ریزدانه در سن ۲۸ روز



شکل ۷ : مدول الاستیسیته نمونه‌های بتنی حاوی خاکستر لجن فاضلاب جایگزین شده به جای سیمان و ریزدانه در سن ۲۸ روز

شکل ۸ مقادیر مقاومت الکتریکی را در درصدهای جایگزینی مختلف SSA در مخلوط‌های بتنی نشان می‌دهد. همان گونه که قابل مشاهده است با افزایش درصد جایگزینی خاکستر لجن فاضلاب مقاومت الکتریکی بتن افزایش یافته است لذا می‌توان استنباط کرد که در نتیجه استفاده از خاکستر لجن فاضلاب در مخلوط‌های بتنی این ماده با محصولات حاصل از هیدراته شدن سیمان وارد واکنش شده و ژل‌های سیلیکاتی تولید می‌گردد. حاصل این فرآیند پرشدن تعدادی از حفرات تراکم بهترمخلوط بتنی بهبود ریزساختار و ناحیه انتقال و بسته شدن راه ارتباطی منافذ با یکدیگر می‌شود. همچنین می‌توان نتیجه گرفت که ذرات خاکستر لجن با توجه به نرمی بیشتر نسبت به سیمان و ریزدانه و در نتیجه داشتن خاصیت پرکنندگی به منافذ بتن به‌خصوص منافذ موئینه نفوذ می‌کند و باعث تراکم بهتر محصولات می‌شود و ریزساختار بتن را به صورت فیزیکی بهبود می‌بخشد که در نتیجه از نفوذپذیری بتن کاسته شده است. از طرف دیگر نرمی بالاتر خاکستر مورد استفاده در مقایسه با سیمان و ریزدانه باعث کاهش نسبت آب به سیمان اطراف سنگدانه‌ها و بهبود ریزساختار بتن به‌خصوص در ناحیه انتقال (ITZ)[9] می‌گردد که در نتیجه می‌توان گفت که با افزودن خاکستر بیشتر بتن در برابر نفوذ مقاومت بیشتری می‌کند [۲۰]. کاهش تولید محصولات هیدراته در مخلوط‌های حاوی خاکستر جایگزین شده به جای سیمان یکی از دلایل احتمالی نوسانات محدود بوجود آمده در نتایج می‌باشد. نتایج این پژوهش با پژوهش مجدی[10] و همکاران در تطابق خوبی قرار دارد [۲۶] اما در تناقض با نتایج پژوهش بهادری و حسینی می‌باشد [۲۷].



شکل ۸ : مقاومت الکتریکی ۴ نقطه ای نمونه‌های بتنی حاوی خاکستر لجن فاضلاب جایگزین شده به جای سیمان و ریزدانه در سن ۲۸ روز

۳-۵- نتایج آزمایش جذب آب

جذب آب نمونه‌های بتن حاوی خاکستر با اندازه‌گیری افزایش وزن نمونه خشک شده پس از غوطه ور شدن در آب به مدت ۳۰ دقیقه ۶۰ دقیقه ۲۴ ساعت و ۷۲ ساعت محاسبه شد. جدول ۴ تغییر در وزن آب جذب شده با تغییر درصد SSA به‌عنوان جایگزینی سیمان یا ریزدانه در مخلوط‌های بتنی را نشان می‌دهد.

نتایج حاصل از جذب آب کوتاه مدت (نیم و یک ساعته) نشان داد که ظرفیت جذب آب در ابتدا با افزایش مقدار خاکستر تا ۵٪ افزایش یافته است. این نشان می‌دهد که افزودن خاکستر به میزان کم باعث افزایش ظرفیت جذب و نگهداری آب به دلیل افزایش

[9] Interfacial transition zone

[10] Mejdi

تعداد منافذ داخل بتن و همچنین طرفیت جذب آب زیاد ذرات خاکستر به دلیل سطح نامنظم و متخلخل آن‌ها می‌شود. پس از آن با افزودن بیشتر خاکستر لجن میزان جذب آب کوتاه مدت نمونه بتن کاهش یافت و پایین تر از نمونه شاهد بود. این پدیده به دلیل توانایی بالای خاکستر در کاهش نفوذپذیری بتن به دلیل خاصیت پرکنندگی آن است که این عامل در کوتاه مدت و در درصدهای جایگزینی زیادتر بر عامل جذب آب زیاد و تخلخل ذرات خاکستر غلبه می‌کند. در این بخش نتایج ما مطابقت خوبی با مطالعات قبلی ارائه‌شده برای ارزیابی میزان جذب آب کوتاه مدت بتن حاوی خاکستر لجن فاضلاب دارد [۲۴ و۲۳ و ۲۸ و ۲۹].

نتایج حاصل از جذب آب بلند مدت (۲۴ ساعته و ۷۲ ساعته) حاکی از آن است که با افزایش مقدار خاکستر لجن ظرفیت جذب آب بلند مدت افزایش یافته است. از این نتیجه می‌توان اینگونه استنباط کرد که با افزایش میزان خاکستر در بتن پارامتر تخلخل خاکستر و ظرفیت جذب آب زیاد ذرات SSA مؤثرتر از پارامتر کاهش نفوذپذیری واقع می‌شود و بر عامل ضریب نفوذپذیری پایین بتن چیره می‌شود. در این بخش نتایج پژوهش حاصل با پژوهش خوشروش و همکاران منطبق و با سایر پژوهش‌ها ضد و نقیض می‌باشد[۱۶]. بائزا[11] در پژوهش دریافت با افزایش خاکستر جذب آب در ملات افزایش می‌باشد اما در نمونه‌های بتنی جذب آب کاهش می‌یابد [۳۰]. لین[12] و همکاران نیز در پژوهش خود به این مطلب اشاره می‌کند که حضور خاکستر باعث کاهش جذب آب در بتن و ملات می‌شود[۲۴]. اما در مقابل والز[13] و همکاران نظری کاملا برعکس داردند. آن‌ها در پژوهش خود به این نتیجه رسیدند که به‌طور کل حضور خاکستر باعث افزایش جذب آب بتن می‌شود [۲۵]. تای[14] نیز تغییر محسوسی در جذب آب نمونه‌های بتنی مشاهده نکرد اما با بررسی دقیق تر نتایج وی می‌توان استنباط کرد که که اندکی کاهش در جذب آب بتن با افزایش خاکستر لجن مشاهده می‌شود [۲۹].

جدول ۴ : جذب آب نمونه‌های بتنی حاوی خاکستر لجن فاضلاب جایگزین شده به جای سیمان و ریزدانه در سن ۲۸ روز

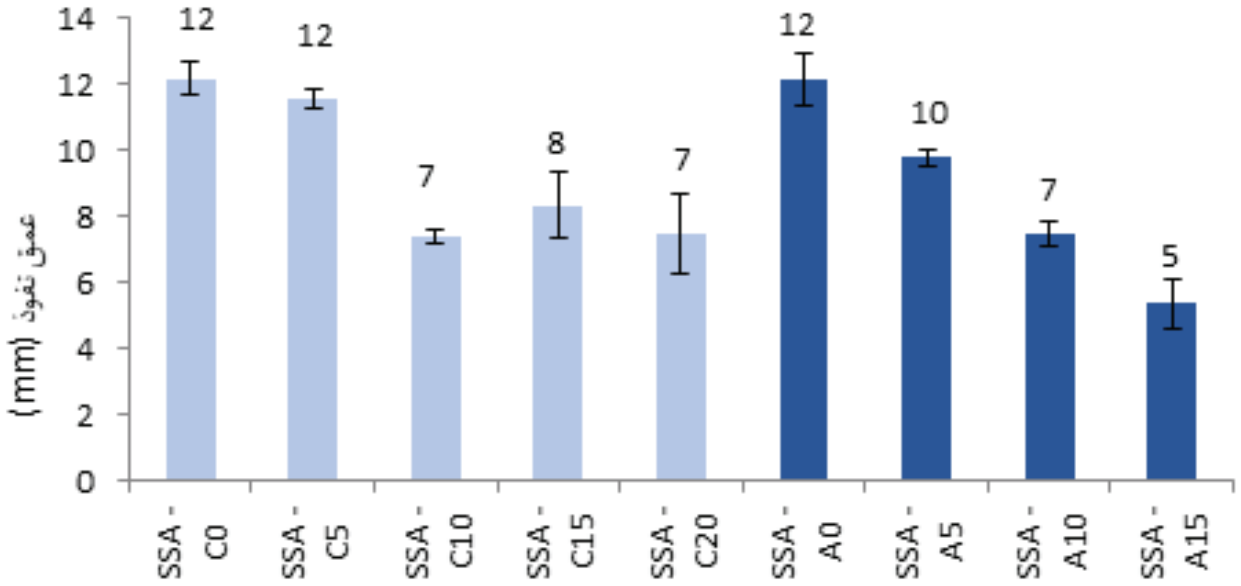
	طرح‌ها با جایگزینی خاکستر لجن فاضلاب به جای سیمان (SSA - Cx)					طرح‌ها با جایگزینی خاکستر لجن فاضلاب به جای ریزدانه (SSA - Ax)			
درصد جایگزینی (٪)	۰	۵	۱۰	۱۵	۲۰	۰	۵	۱۰	۱۵
نام طرح	SSA – C0	SSA – C5	SSA – C10	SSA – C15	SSA – C20	SSA – A0	SSA – A5	SSA – A10	SSA - A15
جذب آب نیم ساعته (٪)	۴,۳	۴,۵	۳,۷	۴,۱	۴,۱	۴,۳	۴,۷	۴,۴	۴,۳
جذب آب ۱ ساعته (٪)	۵,۳	۵,۵	۴,۵	۴,۹	۵,۱	۵,۳	۵,۷	۵,۲	۵,۱
جذب آب ۲۴ ساعته (٪)	۷,۱	۷,۱	۷,۰	۷,۳	۷,۵	۷,۱	۷,۴	۷,۶	۸,۲
جذب آب ۷۲ ساعته (٪)	۷,۲	۷,۲	۷,۱	۷,۳	۷,۵	۷,۲	۷,۵	۷,۷	۸,۳

[11] Baeza
[12] Lynn
[13] Valls
[14] Tay

۳-۶- نتایج آزمایش عمق نفوذ آب در بتن تحت فشار

شکل ۹ تأثیر مقدار جایگزینی خاکستر لجن فاضلاب را بر عمق نفوذ آب نمونه‌های بتنی را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل ۹ مشخص است افزودن SSA باعث کاهش عمق نفوذ آب به بتن می‌شود. به‌طور کل می‌توان استنباط کرد که در نتیجه واکنش خاکستر لجن فاضلاب با محصولات حاصل از هیدراته شدن سیمان ژل‌های سیلیکاتی تولید می‌گردد که در نتیجه منجر به پرشدن تعدادی از حفرات تراکم بهتر مخلوط بتنی بهبود ریزساختار و ناحیه انتقال و بسته شدن راه ارتباطی منافذ با یکدیگر می‌شود. همچنین می‌توان نتیجه گرفت که ذرات خاکستر لجن با توجه به نرمی بیشتر نسبت به سیمان و ریزدانه و در نتیجه داشتن خاصیت پرکنندگی به منافذ بتن به‌خصوص منافذ موئینه نفوذ کرده و باعث تراکم بهتر محصولات شده و ریزساختار بتن را بهبود می‌بخشد.

نتایج این پژوهش علاوه بر همسویی با نتایج آزمایش مقاومت الکتریکی در این پژوهش در تطابق خوبی با سایر پژوهش‌های صورت گرفته در این زمینه نیز می‌باشد [۱۸]. همچنین ووک[15] در نتایج پژوهش خود بیان می‌کند که با افزایش خاکستر ضریب نفوذپذیری در اکثر نمونه‌های حاوی خاکستر کاهش می‌یابد. البته نتایجی هم در تناقض با این مطلب در پژوهش وی دیده می‌شود[۲۰]. لین و همکاران نیز در پژوهش خود به این کاهش نفوذپذیری اشاره می‌کنند و آن را امری شگفت‌انگیز تلقی می‌کنند زیرا با افزایش تخلخل انتظار می‌رود که نفوذپذیری افزایش پیدا کند [۲۴].



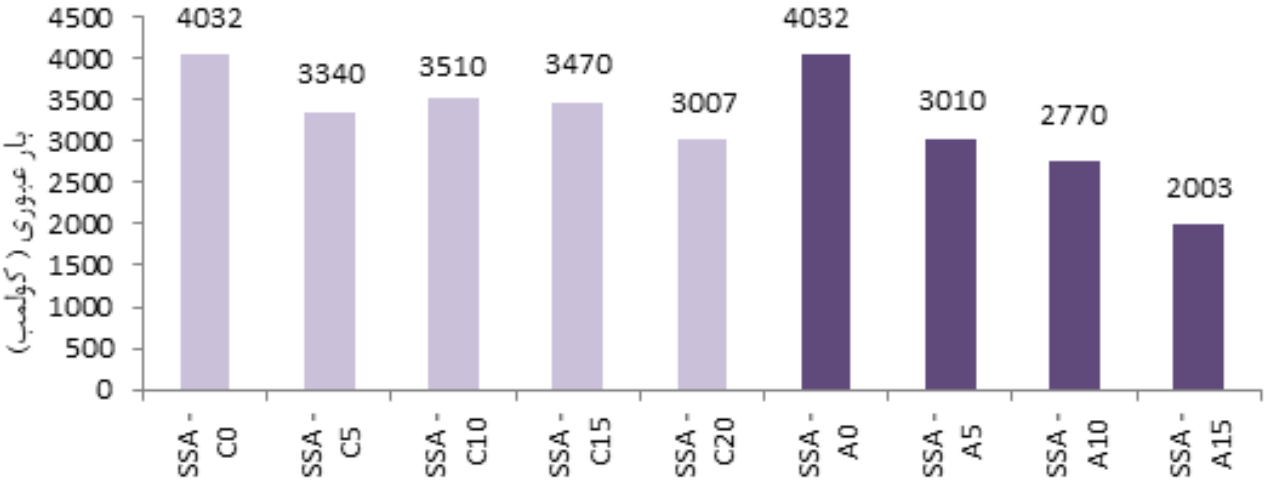
شکل ۹ : عمق نفوذ آب نمونه‌های بتنی حاوی خاکستر لجن فاضلاب جایگزین شده به جای سیمان و ریزدانه در سن ۲۸ روز

۳-۷- نتایج آزمایش نفوذ یون کلراید در بتن (RCPT)

با بررسی دقیق نتایج ارائه‌شده در شکل ۱۰ می‌توان نتیجه گرفت که وجود SSA به‌عنوان جایگزینی برای سیمان یا ریزدانه باعث کاهش قابل‌توجه نفوذ یون کلرید در بتن می‌شود. مشابه استدلال‌های بیان شده در بخش مقاومت الکتریکی و عمق نفوذ آب پرشدن حفرات به وسیله محصولات حاصل از واکنش‌های پوزولانی بهبود ریزساختار بتن با توجه به نرمی بالای خاکستر مورد استفاده بهبود تراکم و ریزساختار بتن به‌خصوص در ناحیه انتقال و در نتیجه بسته شدن منافذ و راه‌های ارتباطی آن‌ها باعث کاهش نفوذپذیری مخلوط‌های حاوی خاکستر لجن فاضلاب می‌گردد.

[15] Vouk

نتایج این آزمایش با نتایج آزمایش‌های مقاومت الکتریکی و عمق نفوذ آب به دلیل وابستگی به پارامتر نفوذپذیری همسویی خوبی را دارا می‌باشد.



شکل ۱۰ : میزان بار عبوری از نمونه‌های بتنی حاوی خاکستر لجن فاضلاب جایگزین شده به جای سیمان و ریزدانه در سن ۲۸ روز

۳-۸- نتایج آزمایش پوسته شدن بتن در برابر چرخه‌های ذوب و انجماد در مجاورت مواد یخ‌زدا

نمونه‌های تحت چرخه یخ زدن و آبشدن که در معرض نمک یخ‌زدای کلسیم کلرید قرار داشتند با استناد به استاندارد ASTM C672 مورد قضاوت بصری قرار گرفتند. امتیاز قضاوت بصری برای هر پنج چرخه یخ زدن و آبشدن در جدول ۵ گزارش شده است. بر اساس نتایج ارائه‌شده در جدول ۵ می‌توان نتیجه گرفت که افزودن SSA به‌عنوان جایگزین سیمان یا ریزدانه تأثیر منفی بر مقاومت سطحی بتن در معرض چرخه یخ زدن و آبشدن در حضور مواد یخ‌زدا دارد. با افزایش درصد جایگزینی خاکستر لجن فاضلاب به‌عنوان جایگزین سیمان یا ریزدانه پوسته شدگی بتن در هر ۵ چرخه به‌طور واضحی بیشتر گردیده و میزان خرابی سطحی در مقایسه با نمونه شاهد شدت می‌گیرد. به‌طور کلی این تأثیر در کوتاه مدت مشهودتر است ولی در دراز مدت تفاوت محسوسی بین نمونه‌های حاوی خاکستر و فاقد خاکستر مشاهده نگردید.

سازوکارهای فراوانی برای خرابی پوسته شدن بتن در مجاورت نمک در منابع مختلف عنوان شده است. به تازگی سازوکار ورقه‌ورقه شدن ژلی به‌عنوان عامل اصلی پوسته پوسته شدن بتن در مجاورت نمک پیشنهاد شده است [۳۱]. هنگام یخ زدن محلول نمک روی سطح بتن یک ترکیب دو ماده ای بتن/ یخ تشکیل می‌شود. لذا هنگامی‌که دمای ترکیب در زیر نقطه آب شدن محلول کاهش می‌یابد تمایل لایه یخ به انقباض ۵ برابر تمایل لایه بتنی است. بسته به غلظت محلول لایه یخ تحت اثر کشش وارد شده بر آن توسط لایه بتنی زیرین ترک می خورد. ترک‌های لایه یخ تمایل به نفوذ به لایه زیرین را دارد. استفاده از حباب ساز یک راهکار موثر در این رابطه می‌باشد [۳۲].

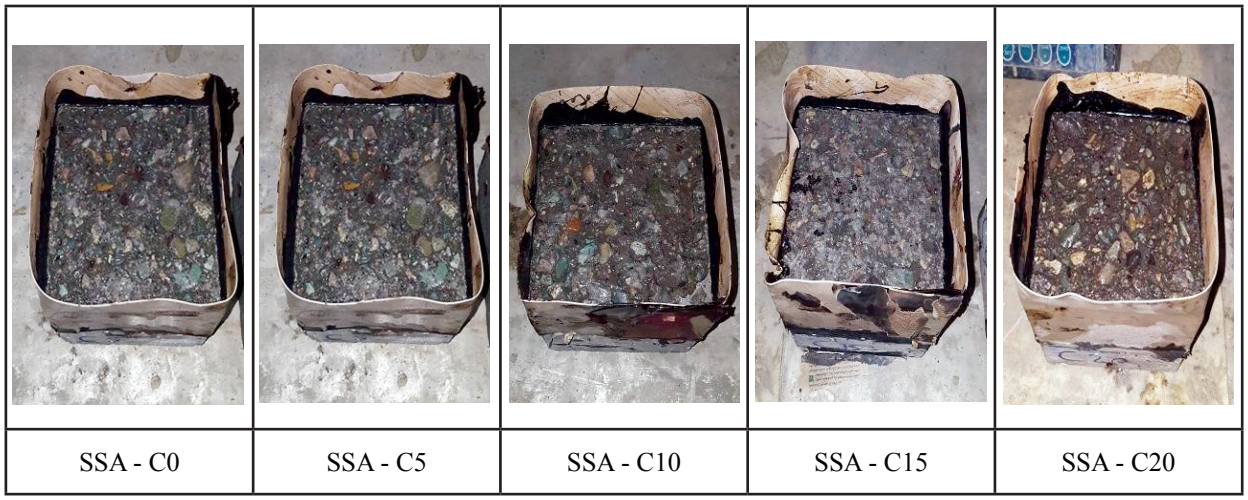
ضعف در مقاومت فشاری و فعالیت پوزولانی کم SSA باعث کاهش چسبندگی ملات و سنگدانه در بتن و در نتیجه کاهش مقاومت سطحی بتن می‌شود. همچنین یخ زدن و آبشدن محلول آب و نمک در سطح بتن و رشد بلورهای یخ در حفره‌های مویینه زیر سطح بتن باعث‌ایجاد تنش کششی در منافذ می‌شود و از آنجا که حضور SSA در بتن منجر به کاهش مقاومت کششی می‌شود بنابراین تاثیر SSA در مقاومت کششی نیز با ضعف مقاومت سطحی مرتبط است. تخلخل سطح نمونه‌های بتنی یکی دیگر از دلایل موثر در

ضعف نمونه‌ها در برابر این پدیده است. نتایج این آزمایش با نتایج آزمایش‌های مکانیکی صورت گرفته در مرحله قبل و به‌خصوص با نتایج آزمایش مقاومت فشاری و کششی بتن‌های حاوی خاکستر لجن فاضلاب مطابقت دارد.

جدول ۵ : نتایج قضاوت بصری آزمون پوسته شدن نمونه‌های بتنی حاوی خاکستر لجن فاضلاب جایگزین شده به جای سیمان و ریزدانه

	درصد جایگزینی	نام طرح	تعداد چرخه / نمره بصری									
			۰	۵	۱۰	۱۵	۲۰	۲۵	۳۰	۳۵	۴۰	۴۵	۵۰
طرح مخلوط با جایگزینی خاکستر لجن فاضلاب به جای سیمان (SSA-Cx)	۰	SSA-C0	۰	۱	۱	۲	۳	۳	۴	۴	۴	۵	۵
	۵	SSA-C5	۰	۱	۱	۳	۴	۴	۵	۵	۵	۵	۵
	۱۰	SSA-C10	۰	۱	۲	۳	۴	۴	۵	۵	۵	۵	۵
	۱۵	SSA-C15	۰	۲	۳	۳	۳	۴	۴	۵	۵	۵	۵
	۲۰	SSA-C20	۰	۲	۳	۴	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵
طرح مخلوط با جایگزینی خاکستر لجن فاضلاب به جای ریزدانه (SSA-Ax)	۰	SSA-A0	۰	۱	۱	۲	۳	۳	۴	۴	۴	۵	۵
	۵	SSA-A5	۰	۱	۱	۲	۳	۳	۴	۴	۵	۵	۵
	۱۰	SSA-A10	۰	۱	۲	۳	۴	۴	۵	۵	۵	۵	۵
	۱۵	SSA-A15	۰	۲	۳	۴	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵

شکل ۱۱و ۱۲ ظاهر سطح آزمونه‌های حاوی خاکستر لجن فاضلاب جایگزین شده به‌ترتیب به جای سیمان و ریزدانه را پس از ۳۰ چرخه یخ زدن و آبشدن نشان می‌دهد.



شکل ۱۱ : نمونه‌های حاوی خاکستر لجن فاضلاب جایگزین به جای سیمان پس از ۳۰ چرخه یخ زدن و آبشدن در معرض محلول آب نمک

SSA - A0	**SSA - A5**	**SSA - A10**	**SSA - A15**

شکل ۱۲ : نمونه‌های حاوی خاکستر لجن فاضلاب جایگزین به جای ریزدانه پس از ۳۰ چرخه یخ زدن و آبشدن در معرض محلول آب نمک

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش امکان سنجی استفاده از خاکستر لجن فاضلاب در بتن معمولی مورد ارزیابی واقع گردید و با بررسی خواص مکانیکی و دوامی نمونه‌های بتنی حاوی خاکستر لجن فاضلاب به‌عنوان ماده جایگزین سیمان وریزدانه به نتایج زیر دست یافته شد :

استفاده از خاکستر لجن فاضلاب در بتن با توجه به سطح مخصوص بسیار زیاد و همچنین بافت زبر و خشن و مورفولوژی نامنظم و متخلخل این خاکستر منجر به کاهش قابل‌توجه کارایی می‌گردد. با جایگزینی تا ۱۰٪ خاکستر لجن فاضلاب به جای سیمان و تا ۱۰٪ به جای ریزدانه افت اسلامپ قابل پذیرش می‌باشد و بتن در رده بتن‌های قابل استفاده در مصارف عمومی قرار می‌گیرد اما با جایگزینی بیشتر برای کاربردهای متداول بتن مناسب نیست.

مقاومت فشاری نمونه‌ها در تمامی درصدهای جایگزینی خاکستر در مقایسه با مخلوط کنترل کاهش یافته است اما این مقادیر با افزایش سن عمل آوری از ۷ تا ۹۰ روز افزایش یافته است. بتن‌هایی حاوی خاکستر تا ۱۵٪ جایگزینی به جای سیمان یا ریزدانه قابل استفاده برای استفاده به‌عنوان بتن آرمه مناسب هستند و بتن‌هایی حاوی خاکستر تا ۲۰٪ جایگزینی به جای سیمان می‌تواند در کاربردهای غیر سازه‌ای استفاده شود. درصدهای جایگزینی بیش از ۲۰٪ به جای سیمان یا ریزدانه از نظر پارامتر مقاومت فشاری برای هیچ نوع کاربردی مناسب نیست.

روند کاهشی مقاومت کششی و مدول الاستیسیته نیز مشابه مقاومت فشاری می‌باشد با این تفاوت که کاهش مقاومت کششی و مدول الاستیسیته در تمامی درصدهای جایگزین در سن مشابه ۲۸ روزه با شیب کمتری صورت می‌گیرد. در نهایت می‌توان عنوان کرد که به لحاظ ملاک قرار دادن خاصیت کششی و مدول الاستیسیته درصد جایگزینی خاکستر لجن فاضلاب به جای سیمان یا ریز دانه می‌باید به ۱۵٪ به جای سیمان و ۱۰٪ به جای ریزدانه محدود شود.

راهکارهایی که باعث افزایش فعالیت پوزولانی خاکستر شود (مانند خردکردن مکانیکی ریزتر کردن ذرات و نرمی بیشتر خاکستر تنظیم دمای سوزاندن و...) بر بهبود خواص مکانیکی نیز تاثیر گذار است. از طرفی استفاده از فوق روان کننده و افزایش عیار سیمان تا حدی می‌تواند باعث کاهش افت خواص مکانیکی گردد اما در درصدهای زیاد جایگزینی خاکستر لجن مقدار زیاد استفاده از فوق روان کننده می‌تواند قیمت زیاد ساخت بتن را به همراه داشته باشد که می‌باید در ملاحظات ساخت در نظر گرفته شود.

ذرات خاکستر لجن با توجه به نرمی بیشتر نسبت به سیمان و ریزدانه به منافذ بتن نفوذ کرده و باعث تراکم بهتر محصولات و پرشدن حفرات موجود شده و در نتیجه با افزودن هر چه بیشتر خاکستر ریزساختار بتن بهبودیافته و بتن در برابر نفوذ مقاومت بیشتری پیدا می‌کند که در نتیجه آن پارامتر مقاومت الکتریکی بتن افزایش و پارامترهای عمق نفوذ آب و بار عبوری در آزمایش RCPT کاهش پیدا می‌کند.

در کوتاه مدت افزودن خاکستر به میزان کم (تا ۵٪ جایگزینی به جای سیمان و ریزدانه) باعث افزایش ظرفیت جذب و نگهداری آب و با افزودن مقادیر بیشتر خاکستر لجن میزان جذب آب کوتاه مدت نمونه بتن کاهش یافته و کم تر از نمونه شاهد می‌باشد. در بلند مدت اما با افزایش مقدار خاکستر لجن ظرفیت جذب آب افزایش می‌یابد.

افزودن خاکستر لجن به‌عنوان ماده جایگزین سیمان یا ریزدانه تأثیر منفی بر پوسته شدن و مقاومت سطحی بتن در معرض چرخه یخ زدن و آبشدن در حضور مواد یخ‌زدا مانند نمک دارد. این تأثیر در کوتاه مدت مشهودتر است ولی در دراز مدت تفاوت محسوسی بین نمونه‌های حاوی خاکستر و فاقد خاکستر مشاهده نمی‌گردد.

به‌طور کلی می‌توان استنباط کرد که جایگزینی خاکستر لجن تصفیه‌خانه فاضلاب به جای سیمان یا ریزدانه در بتن منجر به کاهش کارایی و افت خواص مکانیکی و از طرف دیگر تا حدی باعث بهبود پارامترهای دوامی می‌شود. لذا با ملاک قرار دادن خواص مکانیکی استفاده از این خاکستر در بتن به‌عنوان جایگزین سیمان یا ریزدانه می‌باید به ۱۰٪ تا ۲۰٪ بسته به کاربرد مورد نظر اعم از سازه‌ای یا غیر سازه‌ای محدود گردد.

۵- تشکر

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.

۶- منابع

[1] Masafari M.; Mosadaghinia and Nadafi 2013 "Sludge management of urban wastewater treatment plants in Iran in 1400" 5th Tehran National Conference on Environmental Health.

[2] Akhbari Alavi Moghadam 2013 "Investigation of American EPA standards regarding the use of sludge from sewage treatment plants in agricultural lands" the 11th conference of civil engineering students of the country.

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

[4] Sarvstani M Fadeli M. 2015 "Evaluation of the feasibility of reusing the residues resulting from dewatering the sludge of water treatment plants in the irrigation of green space and agriculture (case study of the 3rd and 4th treatment plants in Tehran)" Iran Water Resources Management Conference

[5] Fotovat A. ; Alavi Moghadam M.R.; Maknoun R. and Sabat M. 2016 "Effect of replacing sewage treatment plant sludge ash instead of cement on the compressive strength of concrete" 3rd National Congress of Civil Engineering Tabriz.

[6] 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.

[7] Qalibafan M. 1382 "Concrete and Environment" Iranian Concrete Association Quarterly third year number 11.

[8] 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.

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

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

[11] Shekarchizadeh M.; Mirzaei Z. 2010 "Education of concrete and cement engineering with the approach of sustainable development and environmental protection" technical faculty publication number 43.

[12] Sabour M. Yekeler M. and Nikrovan M. 2014 "Evaluation of the role of nanosilica consumption in concrete on its environmental and economic performance" Ferdowsi Civil Engineering Quarterly No. 25.

[13] Nikmanesh A.M. Ramzanianpour A.M. and Shekrachizadeh M. 2018 Investigating the effect of heating temperature on the properties of sewage sludge ash (SSA) and the feasibility of its use in concrete materials 11th National Concrete Conference Tehran - Road Housing and Urban Development Research Center Iran Concrete Association.

[13] Delnawaz M. and Haq-prast A. 1389 "Recycling and reuse of surplus sludge from sewage treatment plant in Alborz Industrial City of Qazvin as cementitious material in concrete" 5th National Waste Management Conference Mashhad.

[15] Chang F.C. Lin J.D. Tsai C.C. and Wang K.S. 2010. Study on cement mortar and concrete made with sewage sludge ash. Water Science and Technology 62(7) pp.1689-1693.

[16] Khoshrosh Amin Bahadri Hadi Manafpour Alireza. (2013). Investigating the performance of sewage sludge ash with and without silica nanoparticles in the properties of self-compacting cement base materials. Water and Wastewater Journal 66-75 24(5).

[17] Arshad Torabi Mohammad Amin Danesh Shahnaz Tavaklizadeh Mohammad Reza. The effect of urban sewage sludge ash as a substitute for cement on the physical mechanical and reliability properties of concrete. Madras Civil Engineering. 1396; 17 (1): 1-12

[1618 Askari S. 2016 "Investigation of the use of sewage sludge sludge ash in the concrete structure as a filler or substitute material for cement" Faculty of Civil Engineering University of Tehran.

[19] Yagüe A. Valls S. Vázquez E. and Albareda F. 2005. Durability of concrete with addition of dry sludge from waste water treatment plants. Cement and concrete research 35(6) pp.1064-1073.

[20] Vouk D. Nakic D. Serdar M. Donatello S. and Cheeseman C.R. 2017 January. Evaluation of using sewage sludge ash in the cement industry: Case study of Zagreb Croatia. In The IWA specialist conference on sludge management: Sludgetech.

[21] 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.

[22] Monzó J. Paya J. Borrachero M.V. and Córcoles A. 1996. Use of sewage sludge ash (SSA)-cement admixtures in mortars. Cement and Concrete Research 26(9) pp.1389-1398.

[23] Fontes C.M.A. Barbosa M.C. Toledo Filho R.D. and Goncalves J.P. 2004 November. Potentiality of sewage sludge ash as mineral additive in cement mortar and high performance concrete. In International RILEM conference on the use of recycled materials in buildings and structures (Vol. 8 No. 11).

[24] 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.

[25] Valls S. Yagüe A. Vázquez E. and Mariscal C. 2004. Physical and mechanical properties of concrete with added dry sludge from a sewage treatment plant. Cement and concrete research 34(12) pp.2203-2208.

[26] Mejdi M. Saillio M. Chaussadent T. Divet L. and Tagnit-Hamou A. 2020. Hydration mechanisms of sewage sludge ashes used as cement replacement. Cement and Concrete Research 135 p.106115.

[27] Bahadori H. and Hosseini P. 2018. Developing green cement paste using binary and ternary cementitious blends of low pozzolanic sewage sludge ash and colloidal nanosilica (short-term properties). Asian Journal of Civil Engineering 19(4) pp.501-511.

[28] Pinarli V. 2000. Sustainable Waste Management-Studies on the use of sewage sludge ash in the construction industry as concrete material. In Sustainable Construction: Use of Incinerator Ash (pp. 415). Thomas Telford Publishing.

[29] Tay J.H. 1987. Sludge ash as filler for Portland cement concrete. Journal of Environmental Engineering 113(2) pp.345-351.

[30] Baeza-Brotons F. Garcés P. Payá J. and Saval J.M. 2014. Portland cement systems with addition of sewage sludge ash. Application in concretes for the manufacture of blocks. Journal of Cleaner Production 82 pp.112-124.

[31] Valenza II J.J. and Scherer G.W. 2007. A review of salt scaling: I. Phenomenology. Cement and Concrete Research 37(7) pp.1007-1021.

[32] Ramzanianpour A.A. Pourjavadi A. and Jafari Nadushan M. 2013 the effect of different types of cements and entrained air on the resistance of concrete against spalling in the vicinity of salt. The fourth national conference of Iranian concrete Tehran Iranian Concrete Association.