

بررسی آزمایشگاهی تأثیر جایگزینی خاکستر خاکاره و زئولیت در ماسه‌ی تثبیت شده با سیمان

رضا یوسفی (کارشناسی ارشد)

امیرعباس عهویی (کارشناسی ارشد)

عبدالرضا کریمی* (استادیار)

مسعود عامل سخی (استادیار)

دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی قم

مهندسی عمران شریف، زمستان ۱۴۰۰ (دوره ۲ - ۳۷، شماره ۴/۲، ص. ۱۵-۲۵، پژوهشی)

امروزه با توجه به آلودگی‌های زیست‌محیطی در جوامع شهری و همچنین هزینه‌ی بالای تولید سیمان، استفاده از مصالحی به عنوان جایگزین آن، امری ضروری است. در پژوهش حاضر به بررسی تأثیر جایگزینی خاکستر خاکاره به جای سیمان و استفاده‌ی همزمان از زئولیت به منظور بهسازی خاک ماسه‌ی پرداخته شده است. به منظور بهسازی خاک مذکور از مقادیر ۴٪ وزنی سیمان، مقادیر ۵/۰، ۱۰/۰ و ۱۵/۰ درصد جایگزینی خاکستر خاکاره و مقادیر ۰، ۱۰، ۳۰، ۵۰ و ۷۰ درصد جایگزینی زئولیت در زمان عمل‌آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روز استفاده شده است. طبق نتایج آزمایش، درصد بهینه‌ی جایگزینی زئولیت و خاکستر خاکاره در طرح بهسازی خاک ماسه‌ی به ترتیب ۱۰٪ و ۵/۰٪ بدست آمده است که نسبت به نمونه‌های تثبیت نشده در زمان عمل‌آوری ۱۴ و ۲۸ روز به ترتیب ۴۶/۲۵ و ۱/۲۴۵ درصد و نسبت به نمونه‌های تثبیت شده با ۴٪ سیمان ۷۳/۹ و ۴۲/۸۷ درصد افزایش در مقاومت تک‌محوری را نشان می‌دهد.

yousefi.r@qut.ac.ir
amooei.a@qut.ac.ir
karimi@qut.ac.ir
amelsakhi@qut.ac.ir

واژگان کلیدی: تثبیت خاک، ماسه، خاکستر خاکاره، سیمان، زئولیت، مقاومت فشاری تک‌محوری.

۱. مقدمه

خاک‌های دانه‌ی بی به دلیل خصوصیات مقاومتی همواره مشکل‌ساز بوده‌اند. از ویژگی‌های عمده خاک‌های ماسه‌ی سست و یکنواخت، مقاومت کم و عدم چسبندگی آن‌هاست. جهت تثبیت خاک ماسه‌ی سست، روش افزودن سیمان به عنوان یکی از گزینه‌های پرکاربرد مورد استفاده‌ی مهندسان است.^[۱] امروزه در بسیاری از پروژه‌های عمرانی، بخش قابل توجهی از منابع مالی صرف اصلاح خاک می‌شود. همزمان شرایط زیست‌محیطی نیز برای زندگی در مناطق شهری در حال وخامت است. همچنین سمی بودن برخی روش‌های بهسازی از جمله استفاده از مواد شیمیایی همانند آهک و سیمان موجب بروز برخی مشکلات زیست‌محیطی نظیر آلودگی خاک‌ها و تغییر مسیر سفره‌های آب زیرزمینی می‌شود.^[۲-۴]

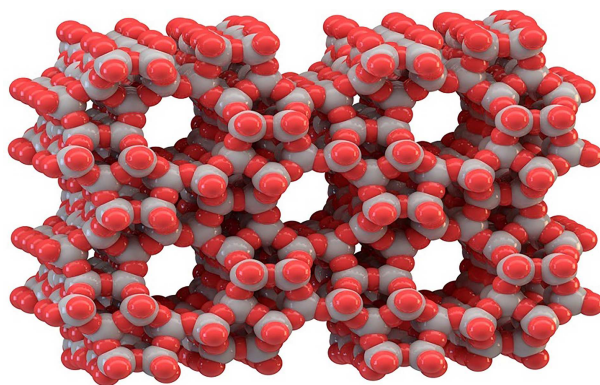
در حالی که صنعت سیمان مدرن‌ترین فناوری‌ها را برای کاهش آلودگی در پیش گرفته است، اما مراحل مختلف فرایند تولید و حمل و نقل سیمان، سهم زیادی در آلودگی محیط‌زیست دارند. مطالعات نشان می‌دهد برای تولید یک تن سیمان و

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۹/۱۱/۱۸، اصلاحیه ۱۴۰۰/۳/۲۹، پذیرش ۱۴۰۰/۵/۱۰

DOI:10.24200/J30.2021.57542.2916

زئولیت‌ها، آلومینوسیلیکات‌هایی کریستالی از فلزات قلیایی یا قلیایی خاکی مانند سدیم، پتاسیم، منیزیم، استرانسیم، باریم و کلسیم هستند که از ترکیب $[\text{AlO}_2]^-$ و $[\text{SiO}_2]^-$ وجود می‌آیند. ساختار زئولیت در شکل ۱ مشاهده می‌شود. رابطه‌ی ۱



شکل ۱. ساختار زئولیت. [۹]

فرمول شیمیایی زئولیت‌ها را بیان می‌کند که در آن M^+ کاتیون‌های فلز قلیایی و M^{2+} کاتیون‌های قلیایی خاکی است. [۸]

$$[(M^+, M^{2+}_x)AlO_4]_x \cdot [SiO_4]_y \cdot [H_2O]z \quad (1)$$

عباسی و همکاران (۱۳۹۳) در بررسی اثر زئولیت در مقاومت کششی خاک ماسه‌یی تثبیت شده با سیمان دریافتند که با جایگزینی ۳۰ درصد زئولیت طبیعی به جای سیمان، افزایش ۴۵ درصدی مقاومت کششی نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های بدون زئولیت قابل دستیابی است. [۱۱] ملاعباسی و شوش‌پاشا (۲۰۱۹) نیز در بررسی تأثیر جایگزینی زئولیت با سیمان در نمونه‌های خاک ماسه‌یی بابل‌سرداختند از نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری دریافتند که با جایگزینی ۳۰٪ زئولیت به جای سیمان نسبت به نمونه‌های بدون زئولیت، مقاومت فشاری تک‌محوری به میزان ۲۰ تا ۷۸ درصد افزایش یافته است. [۱۲] عباسی و همکاران (۱۳۹۸) هم در بررسی تأثیر جایگزینی زئولیت در نمونه‌های خاک ماسه‌یی تثبیت شده با سیمان از آزمایش‌های برش مستقیم استفاده کردند و دریافتند که با جایگزینی ۵۰٪ زئولیت به جای سیمان، مقاومت برشی نمونه‌ها، نسبت به نمونه‌های بدون زئولیت به میزان ۶۲٪ همراه با افزایش کرنش گسیختگی، افزایش یافته است. [۱۳]

همچنین هدف دمیرباس (۲۰۰۹) از مطالعه‌ی تثبیت خاک‌های متورم‌شونده با استفاده از زئولیت بیگادیچ و آهک بررسی آثار زئولیت بیگادیچ و آهک و مخلوط آن دو ماده بر روی برخی خواص خاک، از جمله: حدود اتربرگ، توزیع اندازه دانه‌ها، درصد تورم و نرخ تورم و همچنین بررسی اثر بهسازی در درصد تورم و نرخ تورم خاک با تثبیت هر نوع سیلیکات آب‌دار بیگادیچ بوده است. [۱۴]

هونگ (۲۰۱۵) خصوصیات ژئوتکنیکی خاک ماسه‌یی تثبیت شده با زئولیت را در مقادیر وزنی مختلف ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد بررسی کرده و نتایج آزمایش‌های تراکمی ایشان نشان داده است که با افزایش نسبت وزن زئولیت در مخلوط، درصد رطوبت بهینه افزایش و وزن مخصوص خشک خاک کاهش یافته است. [۱۵] احمدی و همکاران (۲۰۲۱) با جایگزینی مقادیر ۰، ۱۰، ۳۰، ۵۰، ۷۰ و ۹۰ درصد زئولیت و مقادیر ۶، ۸، ۱۰ و ۱۲ درصد سیمان به تثبیت خاک رس پرداختند. نتایج تجربی آزمایش‌های مقاومت تک‌محوری ایشان نشان داده است که با افزایش زئولیت به میزان ۳۰٪ جایگزینی سیمان، مقاومت تک‌محوری خاک افزایش و با مقادیر بیشتر زئولیت کاهش یافته است. [۱۶]

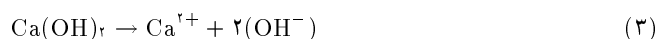
علاوه بر مشکلاتی که سیمان برای محیط‌زیست ایجاد می‌کند، یکی دیگر از مهم‌ترین معضلات جامعه امروز، انباشت مواد زائد از محصولات مختلف است که یکی از راه‌حل‌های رفع مشکل اخیر، استفاده مجدد از مواد زائد مذکور است که می‌تواند به عنوان مواد افزودنی در بهبود خصوصیات مهندسی خاک استفاده شوند.

یکی از این مواد زائد اشاره شده، خاکاره است که محصول جانبی و پسماند حاصل از عملیات کار با چوب مانند اره کردن چوب است. خاکاره کاربردهایی مانند استفاده در ساخت خمیر چوب و یا زغال چوب دارد. در کارخانجات چوب‌بری از خاکاره‌های تولیدی به عنوان سوخت برای عملیات آسیاب کردن استفاده می‌شود که محصول باقیمانده از سوزاندن خاکاره، خاکستر خاکاره است. از خاکستر خاکاره می‌توان در ساخت بتن و یا در بهسازی خاک استفاده کرد. [۱۷، ۱۸]

به همین دلیل، بسیاری از پژوهشگران در مورد تأثیر خاکاره در خصوصیات مهندسی خاک مطالعه کرده‌اند که این امر تأثیر بسزایی در خواص خاک داشته است. تدین و دبیری (۲۰۱۹) در بررسی تأثیر خاکاره با مقادیر وزنی ۳، ۶ و ۹ درصد در رفتار ژئوتکنیکی خاک‌های رسی دریافتند که افزودن ۳٪ خاکاره منجر به افزایش مقاومت، ظرفیت باربری و تراکم‌پذیری کاهش نسبت تخلخل، جذب آب و نشست شده است. [۱۹]

راکش و همکاران (۲۰۱۷) نیز در مطالعه‌ی تثبیت خاک Black Cotton که حاکی بسیار ضعیف و دارای ذرات بسیار ریزی (حدود ۸۵ تا ۱۰۰ درصد رس) و با تغییرات حجمی در حدود ۲۰۰ تا ۳۰۰ درصد و فشار تورمی تا 10 Kg/cm^2 است، دریافتند که با افزودن ۲٪ سیمان به همراه ۱٪ خاکاره به خاک، حد روانی حدود ۳/۷ درصد کاهش یافته است. همچنین ظرفیت باربری (CBR) حدود ۴/۶ برابر و مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌ها ۲/۱ برابر شده است. [۲۰] همچنین کومار و همکاران (۲۰۱۴) برای بررسی تأثیر خاکاره در بهسازی خاک رس قرمز (Laterite) و نیز تغییرات وزن مخصوص خشک خاک و مقاومت برشی از مقادیر ۲، ۴، ۶ و ۸ درصد خاکاره استفاده کردند و دریافتند که با افزودن ۴٪ خاکاره، مقاومت برشی خاک افزایش و بعد از آن کاهش می‌یابد. همچنین افزودن خاکاره باعث کاهش وزن مخصوص خاک شده است. [۲۱]

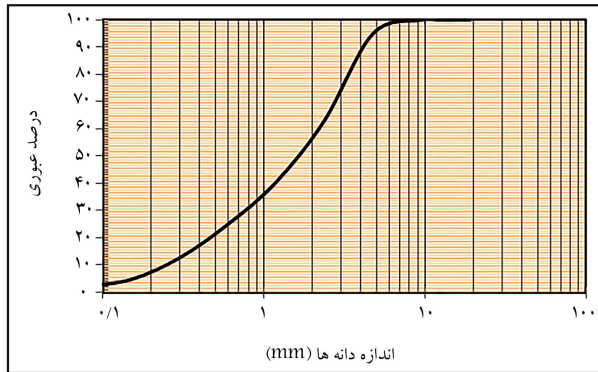
از آنجا که خاکاره، احتمال تجزیه شدن در طبیعت را دارد و همواره یکی از دغدغه‌های اصلی پژوهشگران بوده است. یکی از راهکارها برای جلوگیری از مشکل ذکر شده، استفاده از خاکستر خاکاره است که ضمن از بین رفتن مواد آلی موجود در آن باعث تبدیل اکسیدهایی مانند SiO_2 ، Al_2O_3 و Fe_2O_3 می‌شود که قابلیت انجام واکنش‌های شیمیایی را دارد. واکنش شیمیایی رخ داده باعث جدا شدن آهک (CaO) در خاکستر می‌شود و با ایجاد ژل‌های سیمانی و پوزولانی متشکل از ژل هیدرات سیلیکات کلسیم (CSH) و ژل هیدرات آلومینات کلسیم (CAH) ذرات خاک را متصل می‌کند و باعث افزایش مقاومت و سختی ذرات خاک می‌شود. معادله‌های ۲ تا ۵ نحوه‌ی انجام این واکنش‌های مذکور را نشان می‌دهد. [۲۲]



بهک و موسو^۱ (۲۰۱۶) در بررسی ماسه سیلتی به عنوان خاک بستر روسازی یک راه در شمال اروگوئه نشان دادند که استفاده از خاکستر پوسته برنج و آهک منجر به واکنش‌های پوزولانی شده و مقاومت روسازی را در برابر شرایط ترافیکی و محیطی افزایش داده است. همچنین حالت بهینه مقاومت تک‌محوری ماسه سیلتی با افزودن ۲۵٪ خاکستر پوسته برنج و ۳٪ آهک به دست آمده است. [۲۳]

جدول ۱. مشخصات فیزیکی خاک ماسه‌یی.

G_s	e_{min}	e_{max}	(gr/cm^3)		$W(\%)$	نوع خاک
			$\gamma_{d,min}$	$\gamma_{d,max}$		
ASTM [۳۸] D ۸۵۴	ASTM D ۴۲۵۳ - ۴۲۵۴ [۳۷, ۳۶]				ATSM [۳۵] D ۶۹۸	ATSM [۳۳] D ۲۴۸۷
۲/۶۵	۰/۳۱۸	۰/۴۳۲	۱/۸۵	۲/۰۱	۱۱/۱	SW



شکل ۲. نمودار دانه‌بندی خاک ماسه‌یی.

۲. مواد و روش‌ها

به منظور بررسی تاثیر خاکستر خاکاره در مقاومت تک‌محوری (UCS) خاک ماسه‌یی، پارامترهای مقدار جایگزینی خاکستر خاکاره و ژئولیت به جای سیمان و همچنین زمان عمل‌آوری مدنظر قرار گرفته و در مجموع تعداد ۵۷ آزمایش مقاومت تک‌محوری انجام شده است. به منظور بهسازی خاک ماسه‌یی مذکور از مقادیر ۰.۴٪ وزنی سیمان، مقادیر ۰.۵٪، ۱.۰٪ و ۱.۵٪ درصد جایگزینی خاکستر خاکاره و مقادیر ۰.۱۰، ۰.۳۰، ۰.۵۰ و ۰.۷۰ درصد جایگزینی ژئولیت در زمان عمل‌آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روز استفاده شده است.

۲.۱. مصالح مورد استفاده

۲.۱.۱. ماسه

خاکی که در پژوهش حاضر استفاده شده است، خاک ماسه‌یی آبرفتی با دانه‌بندی غیریکنواخت بوده است که از کارخانه آسفالت واقع در شهرک شکوهیه قم برداشت شده است. با انجام آزمایش دانه‌بندی بر روی خاک مذکور مشخص شد که خاک اشاره شده از نوع ماسه‌ی خوب دانه‌بندی (SW) است. نمودار دانه‌بندی این خاک طبق استاندارد ASTM C ۱۳۶ [۳۳] در شکل ۲ مشاهده می‌شود و مشخصات آن در جدول ۱ ارائه شده است.

۲.۱.۲. سیمان

در پژوهش حاضر، سیمان پرتلند تیپ II کارخانه سیمان آبیگ استفاده شده است. مطابق دستورالعمل ASTM C ۱۵۰ [۳۹] این نوع سیمان با عنوان پرتلند اصلاح شده جهت ساخت بتن‌هایی که حرارت هیدراسیون متوسط برای آن‌ها ضرورت دارد و حمله‌ی سولفات در حد متوسط باشد، تعریف شده است.

۲.۱.۳. ژئولیت

ژئولیت استفاده شده از نوع کلینوپتیلولیت بوده است که از معدن کاوان سمنان تهیه شده است. مشخصات فیزیکی و شیمیایی ژئولیت کلینوپتیلولیت در جدول‌های ۲ و ۳

مهبوش و همکاران (۲۰۱۷)، لی و همکاران (۲۰۲۰) و کرامتی و همکاران (۲۰۱۷) در بررسی تاثیر افزودن خاکستر بادی در خاک ماسه‌یی دریافتند که با افزودن خاکستر بادی، وزن مخصوص خشک خاک افزایش و پس از آن کاهش یافته است همچنین درصد رطوبت بهینه خاک نیز کاهش و پس از آن افزایش یافته است. با افزایش تراکم نسبی و زمان عمل‌آوری مقاومت نیز سختی خاک افزایش یافته است. [۲۴-۲۶]

نتایج مطالعات ایده و همکاران (۲۰۱۴) نشان داده است که با افزایش میزان خاکستر خاکاره استفاده شده در خاک رس، پارامترهای حد روانی، حد خمیری، نشانه‌ی خمیری و انقباض خطی کاهش پیدا کرده‌اند. همچنین با افزایش میزان خاکستر خاکاره، چگالی خشک بیشینه‌ی نمونه‌های دارای خاک و خاکستر کاهش یافته است، درحالی‌که رطوبت بهینه‌ی آن‌ها افزایش پیدا کرده است. [۲۷]

در مطالعات صورت‌گرفته‌ی کومارو جاین^۲ (۲۰۱۶) با افزودن خاکستر خاکاره به نمونه‌ی خاک رسی مشاهده شد که مقادیر زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی بهبود یافته است. همچنین مقدار وزن مخصوص خشک بیشینه با افزودن خاکستر خاکاره افزایش و شاخص خمیری خاک رس به‌طور قابل ملاحظه‌یی کاهش یافته است. [۲۸] ورما و همکاران^۳ (۲۰۱۵)، نیز در بررسی تاثیر خاکاره و سیمان در بهسازی خاک Black Cotton دریافتند که با افزودن ۲٪ سیمان و ۱٪ خاکاره به خاک Black Cotton، حد روانی ۳/۷٪ کاهش و نیز بیشینه‌ی وزن مخصوص خشک خاک تا ۲۹/۶٪ افزایش یافته است. [۲۹] کریم و همکاران (۲۰۱۸)، شهرخان (۲۰۱۵) و بات و همکاران (۲۰۱۷) در بررسی تاثیر خاکستر خاکاره در بهبود خصوصیات خاک رس دریافتند که با افزودن خاکستر خاکاره، حد روانی و حد خمیری خاک رس افزایش یافته است. همچنین افزودن خاکستر خاکاره باعث کاهش وزن مخصوص خشک بیشینه‌ی خاک رس شده است. از طرفی افزودن خاکستر خاکاره به خاک رس، باعث افزایش درصد رطوبت بهینه شده است. با افزودن خاکستر خاکاره، نفوذپذیری خاک کاهش، زاویه‌ی اصطکاک داخلی و مقاومت برشی افزایش یافته است. [۳۰-۳۲]

از آنجایی که بیشتر پژوهش‌های انجام شده در زمینه‌ی افزودن مواد ژائیدی مانند: خاکستر بادی، خاکستر پوسته‌ی برنج و خاکستر خاکاره بر روی خاک‌های ریزدانه و سستی چون خاک رس و یا افزودن ژئولیت به سیمان بوده و منجر به تاثیر مطلوبی در خصوصیات ژئوتکنیکی این خاک‌های شده است. لذا در پژوهش حاضر به بررسی تاثیر همزمان استفاده از خاکستر خاکاره و ژئولیت در مقاومت تک‌محوری خاک ماسه‌یی تثبیت شده با سیمان پرداخته شده است. هدف پژوهش حاضر، بررسی تاثیر واکنش‌های پوزولانی و ژل‌های سیمانی تشکیل شده به کمک دو ماده‌ی خاکستر خاکاره و ژئولیت در خاک دانه‌یی و بدست آوردن درصد بهینه‌ی استفاده از آنها بوده است. از آن‌جا که خاک استفاده شده، ماسه‌ی خوب دانه‌بندی (SW) بوده و ریزدانه بوده است، انتظار می‌رود تاثیر افزودن خاکستر خاکاره و ژئولیت در آن قابل مشاهده باشد. همچنین به منظور بررسی ساختاری نمونه‌های بهسازی شده از آزمایش میکروسکوپ الکترونی (SEM) استفاده شده است.

جدول ۲. مشخصات فیزیکی زئولیت کلینوپتیلولیت.

جذب آب (%)	اندازه متوسط ذرات (μm)	$\gamma_d (gr/cm^3)$	$E_C (mmohs/cm)$
۶۵	۳۸	۰/۶۵	۰/۶۸۳

جدول ۳. مشخصات شیمیایی زئولیت کلینوپتیلولیت (%).

LOI	S	P ₂ O ₅	MnO	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂
۶/۸۹	۰/۰۲	۰/۰۵۲	۰/۰۱۵	۲/۶۸	۱/۸۹	۱/۵۶	۱/۵۳	۰/۱۸۸	۱/۲۹	۱۱/۶۳	۷۲/۹۸

جدول ۴. مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاکستر خاکاره (از بین رفتن درحال احتراق: LOI).

G _۳	اندازه ذرات	سایر اکسیدها	LOI	MgO	CaO	SO _۳	Fe _۲ O _۳	Al _۲ O _۳	SiO _۲
۲/۱۳	< ۰/۰۷۵ mm	%۲/۵	%۳/۹	%۱/۲	%۴/۷	%۱/۶	%۲/۹	%۵/۸	%۷۶/۳



شکل ۳. الف) سوزاندن خاکاره، ب) خاکستر خاک اهری عبوری از الک ۲۰۰.

اضافه شد تا جایی که ترکیب یکنواخت و همگن حاصل شود. از آنجا که نمونه‌ها برای عمل‌آوری نیاز به زمان دارند و باید درون قالب نگهداری شوند، از لوله‌ی پلیکا (PVC) به عنوان قالب استفاده شده است. اندازه ابعاد قالب‌های نگهداری با قطر ۳۴ mm بوده و به ارتفاع ۷۰ mm بریده شده است. در آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری مطابق با استاندارد ASTM D۲۱۶۶ [۲۲] نسبت طول به قطر نمونه‌ها باید بین ۲/۵ - ۲ باشد. همچنین جهت سهولت در خارج کردن نمونه‌ها پس از عمل‌آوری، قالب‌ها به صورت عمودی نیز به دو قسمت مجزا تقسیم شده‌اند. پس از ساخت نمونه‌های مناسب برای آزمایش تک‌محوری و جلوگیری از تغییرات زیاد درصد رطوبت قبل از آزمایش، هر یک از نمونه‌ها به طور جداگانه در پارچه‌های مرطوب قرار گرفته و سپس با کیسه‌های نایلونی پوشیده شده‌اند. از آنجایی که تمام آزمایش‌های این پژوهش در حالت کاملاً خشک انجام شده است، نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط قرار گرفتند و سپس آزمایش شدند. قالب‌های PVC و نحوه برش آن‌ها و نحوه عمل‌آوری نمونه‌ها در شکل ۴ مشاهده می‌شود.

۳.۲. آزمون‌های آزمایشگاهی

۱.۳.۲. آزمایش تراکم

آماده‌سازی نمونه‌ها بلافاصله پس از اتمام مخلوط و آزمایش تراکم بر اساس استاندارد ASTM D۹۶۸ [۲۳] انجام شد. در هر طرح و برای هر دو نوع خاک پنج نمونه برای بدست آوردن رطوبت بهینه برای تراکم استفاده شد. مقادیر مختلف از دو نوع خاک ماسه‌یی، سیمان، زئولیت و خاکستر خاکاره بر اساس درصد‌های بیان شده برای هر نمونه در مجموع به میزان ۳ کیلوگرم جدا شدند و با رطوبت نسبتاً کم مخلوط و در

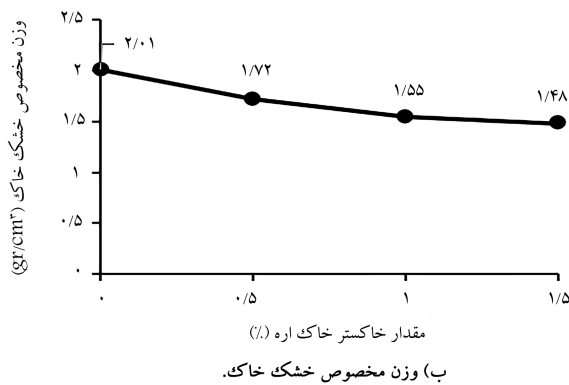
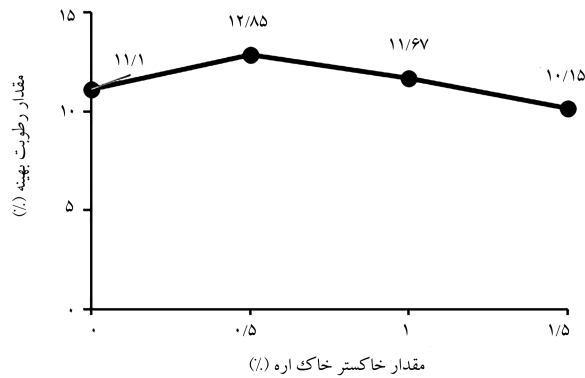
ارائه شده است. اکسیدهای تشکیل دهنده زئولیت به روش تجزیه‌ی شیمیایی توسط آزمایش XRF در آزمایشگاه شرکت معدن کاوان انجام شده است.

۴.۱.۲. خاکستر خاکاره

سوزاندن خاکاره تا زمانی که تمام ذرات آن به خاکستر تبدیل شود ادامه یافته است. خاکستر برجای مانده نسبتاً تمیز و بدون ذرات خیلی درشت بوده است. پس از اینکه عمل سوزاندن خاکاره به اتمام رسید، خاکستر آن به منظور کاهش درجه حرارت بر روی ظرف مسطح پخش شد و در هوای آزاد قرار گرفت و پس از سرد شدن از الک ۲۰۰ عبور داد شد تا ذرات ریزی به دست آید که چسبندگی و واکنش‌پذیری قابل قبولی با سیمان و زئولیت ایجاد کند. سپس خاکستر الک شده به مدت ۲ ساعت در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد درون اون قرار داده شد تا از عمل اکسیداسیون ذرات خاکستر و همچنین حذف هرگونه مواد آلی اطمینان حاصل شود. [۲۴] در شکل ۳ نحوه‌ی سوزاندن خاکاره و خاکستر برجای مانده و رد شده از الک ۲۰۰ را مشاهده می‌شود. مشخصات فیزیکی و ترکیب‌های شیمیایی خاکستر خاکاره در جدول ۴ ارائه شده است. آنالیز شیمیایی خاکستر خاکاره توسط آزمایش XRF و در آزمایشگاه شیمی انجام شده است. با توجه به استانداردهای ASTM C۶۱۸ و ISIRI۳۴۳۳ [۲۵،۲۶] مربوط به خواص شیمیایی پوزولان‌ها، مجموع عناصر اصلی تشکیل‌دهنده شامل: در آن حداقل ۷۰٪ عنوان شده است. مشاهده می‌شود که مقدار اخیر در آنالیز شیمیایی خاکستر خاکاره ۸۵٪ است که با استانداردهای ذکر شده مطابقت دارد. محدودیت اشاره شده به خاطر وجود مقادیر کافی سه اکسید SiO₂، Al₂O₃ و Fe₂O₃ برای انجام واکنش پوزولانی لازم است. یعنی ترکیب‌های مذکور با سیمان واکنش می‌دهند و سبب بهبود ریز ساختار سیمان هیدراته می‌شوند. خاکسترها از نظر مقدار تشکیل‌دهنده‌ی CaO به دو کلاس F و C تقسیم می‌شوند. گروه C، مقادیر زیادی CaO هستند و به تنهایی قابلیت سیمانی شدن دارند و گروه F که دارای مقادیر کمی CaO هستند و با کمک فعال‌کننده‌هایی مانند سیمان و آهک، قابلیت انجام واکنش‌های شیمیایی و در نهایت چسبندگی پیدا می‌کنند. از آنجا که مقدار CaO در خاکستر خاکاره کم است از سیمان به عنوان فعال‌کننده واکنش‌های شیمیایی و پوزولانی استفاده شده است.

۲.۲. ساخت نمونه‌ها

جهت آماده‌سازی نمونه‌ها ابتدا سیمان، زئولیت و خاکستر خاکاره به مدت ۱۵ دقیقه با خاک ماسه‌یی به صورت خشک به وسیله‌ی همزن برقی با سرعت پایین مخلوط شدند تا به خوبی تمام نقاط خاک را پوشش دهند. سپس آب مقطر به آن



شکل ۶. تاثیر افزودن خاکستر خاک اره بر قسمت های الف و ب).

وزن مخصوص خشک خاک (MDD) کاهش یافته است. کاهش وزن مخصوص خشک خاک می تواند به دلیل پایین آمدن وزن مخصوص خاکستر خاک اره باشد، در حالی که افزایش رطوبت بهینه ممکن است در اثر نیاز به آب بیشتر برای هیدراسیون باشد. از طرف دیگر با توجه به مکانیک خاک های غیراشباع با افزودن زئولیت و خاکستر خاک اره به خاک ماسه ای، خلل و فرج و نفوذپذیری خاک کاهش پیدا کرده و از آن جا که مکش ماتریک (Capillary suction) که برابر اختلاف فشار هوا و فشار آب است و با رطوبت رابطه ای عکس دارد، با کاهش رطوبت، مکش ماتریک در خاک و در نتیجه مقاومت و سختی خاک افزایش می یابد.

۲.۳. نتایج آزمایش تک محوری

۱.۲.۳. تاثیر جایگزینی زئولیت

نمودار تنش - کرنش نمونه های سیمانی در آزمایش مقاومت تک محوری با جایگزینی ۰، ۱۰، ۳۰، ۵۰ و ۷۰ درصد زئولیت در دو بازه ی عمل آوری ۱۴ و ۲۸ روز در شکل ۷ مشاهده می شود که مطابق آن، بیشینه ی تنش تک محوری با جایگزینی ۱۰٪ زئولیت به جای سیمان بیشتر از نمونه های بدون زئولیت بوده و با افزایش درصد جایگزینی زئولیت از مقاومت تک محوری نمونه ها کاسته شده است. افزایش اخیر در مقاومت تک محوری در زمان عمل آوری ۱۴ و ۲۸ روز به ترتیب ۱۰ و ۲۱ درصد بوده است. همچنین کرنش گسیختگی نمونه ی تثبیت شده با جایگزینی ۱۰٪ زئولیت، بیشتر از نمونه بدون زئولیت بوده است که نشان دهنده ی افزایش رفتار نرم و شکل پذیر نمونه های زئولیتی نسبت به نمونه های سیمانی است و با افزایش بیشتر درصد جایگزینی زئولیت، از مقدار کرنش نمونه ها کاسته است. دلیل این رفتار خاک



شکل ۴. الف) قالب آزمایش، ب) نحوه ی عمل آوری نمونه ها درون قالب با عایق و پوشش مرطوب.



شکل ۵. الف) تصویری از خاک تثبیت نشده، ب) نمونه ی بهسازی شده با ۴٪ سیمان، ۱۰٪ زئولیت و ۵٪ خاکستر خاک اره در لحظه ی گسیختگی.

قالب پروکتور استاندارد با استفاده از چکش ۲/۵ کیلوگرم با سقوط آزاد با فاصله ی ۳۰ سانتی متر متراکم شدند. تراکم در ۳ لایه، هر لایه با ۲۵ ضربه متراکم و سطح خاک روی قالب بدون اعمال فشار صاف شده است. سپس پایه ی قالب برداشته شد و خاک و قالب وزن شدند. این روش تا زمانی که وزن خاک در قالب از بیشینه ی مقدار عبور و شروع به کاهش کند، تکرار شده است.

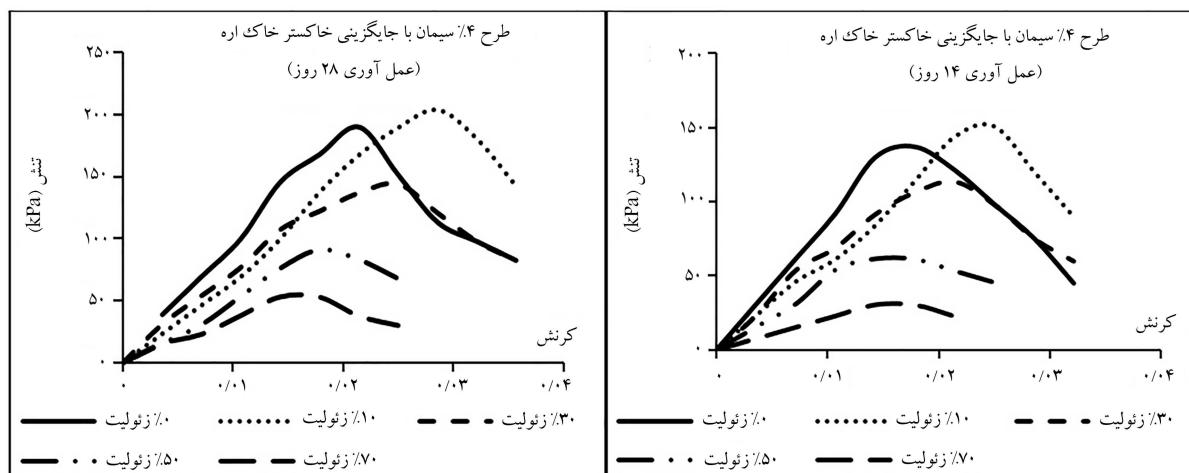
۲.۳.۲. آزمایش مقاومت تک محوری

پس از عمل آوری، نمونه ها طبق استاندارد ASTM D2166 [۲۲] از قالب خارج و به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط نگهداری شدند و سپس جهت انجام آزمایش، در دستگاه تک محوری و با سرعت بارگذاری ۱ mm/min قرار گرفتند. در این بخش نتایج، آزمایش مقاومت تک محوری در زمان عمل آوری ۷، ۱۴، ۲۸ روز ارائه شده است. در شکل ۵ تصویری از الف) خاک تثبیت نشده و ب) نمونه تثبیت شده با مقادیر ۴٪ سیمان، ۱۰٪ زئولیت و ۵٪ خاکستر خاک اره در لحظه گسیختگی تحت آزمایش مقاومت تک محوری مشاهده می شود.

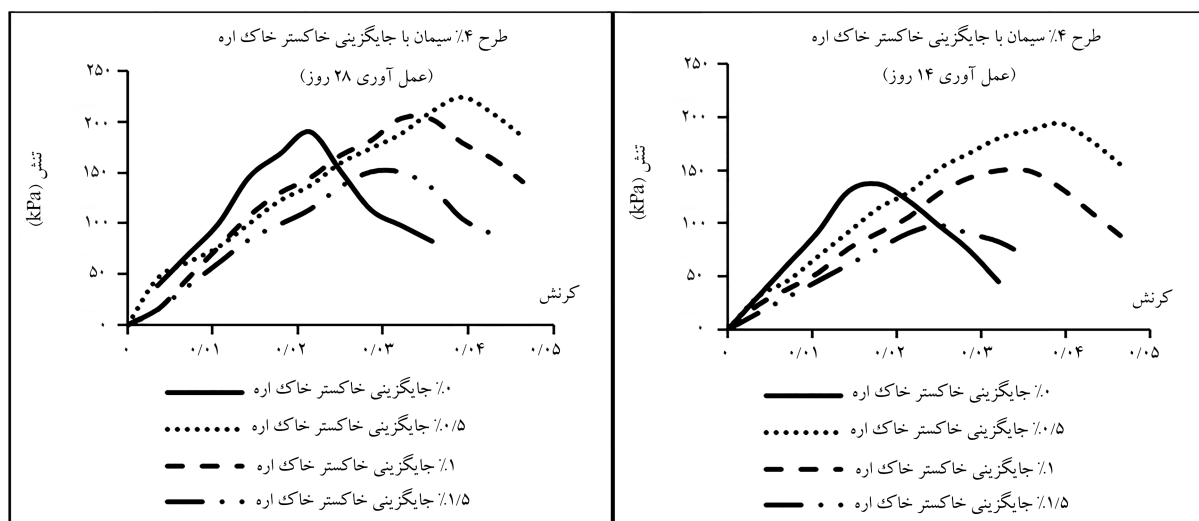
۳. نتایج

۳.۱. نتایج آزمایش تراکم

نتایج آزمایش تراکم، با افزودن مقادیر ۵/۰، ۱ و ۱/۵ درصد خاکستر خاک اره به خاک ماسه ای در شکل ۶ مشاهده می شود. مطابق شکل الف با افزودن ۵/۰٪ خاکستر خاک اره، مقدار رطوبت بهینه ی خاک (OMC)، افزایش و پس از آن کاهش یافته است. از طرفی با توجه به شکل ۶ ب با افزایش درصد خاکستر خاک اره، بیشینه ی



شکل ۷. نتایج آزمایش تک محوری در طرح جایگزینی زئولیت به جای سیمان در عمل آوری ۱۴ و ۲۸ روز.



شکل ۸. نتایج آزمایش تک محوری در طرح جایگزینی خاکستر خاکاره به جای سیمان در عمل آوری ۱۴ و ۲۸ روز.

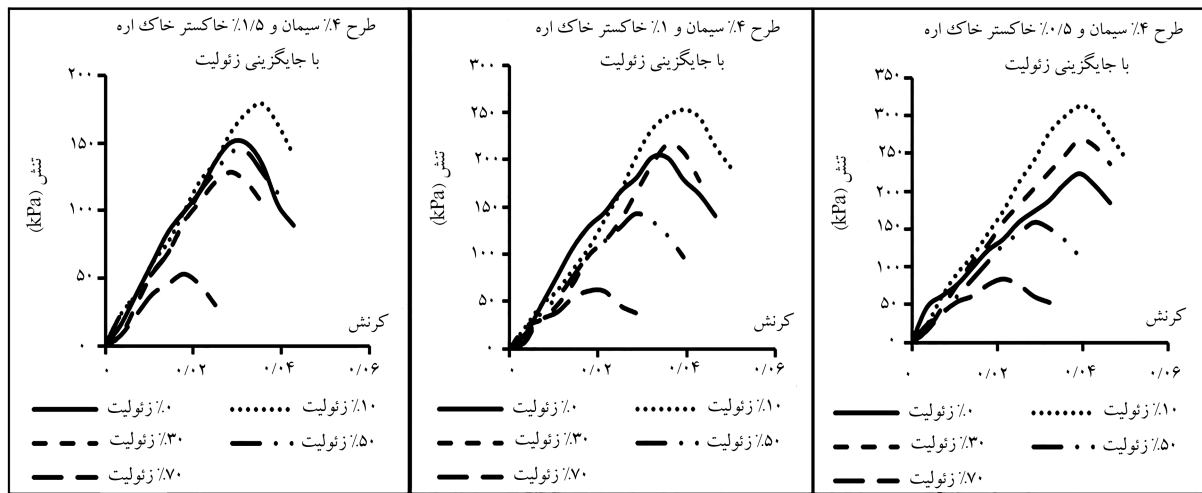
۳.۲.۳. تاثیر جایگزینی همزمان زئولیت و خاکستر خاکاره

نتایج آزمایش تک محوری نمونه های سیمانی با جایگزینی مقادیر ۰/۵، ۱، ۱/۵ و درصد خاکستر خاکاره و همچنین ۰، ۱۰، ۳۰، ۵۰ و ۷۰ درصد زئولیت به جای سیمان مصرفی در زمان عمل آوری ۲۸ روز در شکل ۹ مشاهده می شود که مطابق آن با ثابت فرض شدن سیمان و خاکستر خاکاره به میزان ۰/۵ و ۱ درصد، با افزایش جایگزینی زئولیت، افزایش و پس از آن کاهش یافته است؛ اما در طرح ۱/۵ جایگزینی خاکستر خاکاره با افزایش ۱۰٪ زئولیت، مقاومت تک محوری نمونه ها افزایش و پس از آن کاهش یافته است. طبق نتایج آزمایش، مقاومت تک محوری نمونه های با جایگزینی ۱۰٪ زئولیت و ۰/۵٪ خاکستر خاکاره به جای سیمان، نسبت به ماسه ی تثبیت نشده در زمان عمل آوری ۱۴ و ۲۸ روز به ترتیب ۲۵۰/۴۶ و ۱/۲۴۵ درصد و نسبت به ماسه تثبیت شده با ۴٪ سیمان، ۷۳/۹ و ۸۷/۴۲ درصد افزایش داشته است. از طرفی کرنش گسیختگی نمونه های تثبیت شده با جایگزینی همزمان زئولیت و خاکستر خاکاره به جای سیمان، در مقادیر ۱۰ و ۳۰ درصد زئولیت، افزایش و پس از آن به دلیل عدم استحکام بیشتر نسبت به نمونه های سیمانی کاهش یافته است.

می تواند درگیری ذرات زئولیت با یکدیگر به جای اتصال با سیمان باشد که به عدم چسبندگی در نمونه ها منجر شده است.

۳.۲.۳. تاثیر جایگزینی خاکستر خاکاره

نتایج آزمایش تک محوری نمونه های سیمانی با جایگزینی ۰/۵، ۱، ۱/۵ درصد خاکستر خاکاره در دو بازه عمل آوری ۱۴ و ۲۸ روز در شکل ۸ نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می شود تنش تک محوری با جایگزینی ۰/۵ و ۱ درصد خاکستر خاکاره نسبت به نمونه های بدون جایگزینی خاکستر، افزایش و پس از آن کاهش یافته و مقدار بهینه خاکستر خاکاره برای رسیدن به بیشینه تنش تک محوری، ۰/۵٪ بدست آمده است. این افزایش در مقاومت تک محوری نسبت به نمونه های بدون خاکستر خاکاره در زمان عمل آوری ۱۴ و ۲۸ روز به ترتیب ۴۱/۲۹ و ۳۳/۸۷ درصد بوده است. همچنین کرنش گسیختگی نمونه های تثبیت شده با جایگزینی خاکستر خاکاره به جای سیمان، بیشتر از نمونه های بدون خاکستر است که نشان دهنده ی رفتار شکل پذیر نمونه های بدون خاکستر است که به دلیل انجام واکنش های شیمیایی پوزولان های موجود در آن و پیوند ذرات خاک در ناحیه اتصال است.



شکل ۹. نتایج آزمایش تک‌محوری و تاثیر جایگزینی زئولیت در نمونه‌های تشبیت شده با سیمان و خاکستر خاک‌اره در زمان عمل‌آوری ۲۸ روز.

زئولیت منجر تولید ژل‌های سیمانی بیشتر در ناحیه اتصال دانه‌ها و در نهایت تاثیر بیشتری در مقاومت تک‌محوری نمونه‌ها داشته است. مقاومت تک‌محوری نمونه‌ها در زمان عمل‌آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روز با جایگزینی ۵/۰٪ خاکستر خاک‌اره به جای سیمان به ترتیب ۱/۴۳، ۱/۷۴ و ۱/۲۳ کیلوپاسکال بدست آمده است که نسبت به نمونه‌های بدون جایگزینی خاکستر خاک‌اره، ۳۳/۷۴، ۳۳/۳۳ و ۴۷/۳۳ و ۱۷/۸ درصد افزایش داشته است.

۳.۴. بررسی تاثیر خاکستر خاک‌اره با ثابت ماندن سیمان و زئولیت

نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری در طرح بهسازی خاک ماسه‌یی با جایگزینی همزمان زئولیت و خاکستر خاک‌اره با ثابت فرض شدن مقادیر ۴٪ سیمان و زئولیت به میزان ۱۰، ۳۰ و ۷۰ درصد در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل ۱۰ الف و ب مشاهده می‌شود با افزایش جایگزینی خاکستر خاک‌اره تا ۱٪ مقاومت تک‌محوری نمونه‌های تشبیت شده نسبت به نمونه‌های بدون جایگزینی، افزایش پس از آن کاهش یافته است. بیشینه‌ی افزایش مقاومت تک‌محوری نمونه‌ها در مقدار ۵/۰٪ جایگزینی خاکستر خاک‌اره نسبت به سیمان بدست آمده است. مقاومت تک‌محوری نمونه‌ها در طرح بهسازی ۴٪ سیمان، ۱۰٪ جایگزینی زئولیت و ۵/۰٪ خاکستر خاک‌اره در زمان عمل ۷، ۱۴ و ۲۸ روز به ترتیب ۲۰۱/۷۴، ۲۳۸/۲۱ و ۳۱۲/۶۵ کیلوپاسکال بدست آمده است که نسبت نمونه‌های بدون جایگزینی زئولیت و خاکستر خاک‌اره، ۶۶/۸۸، ۹/۷۳ و ۹۴/۶۴ درصد افزایش یافته است. همچنین مقاومت تک‌محوری نمونه‌ها در طرح بهسازی ۴٪ سیمان، ۳۰٪ جایگزینی زئولیت و ۵/۰٪ خاکستر خاک‌اره در زمان عمل‌آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ به ترتیب ۱۸۷/۴۹، ۲۰۲/۴ و ۲۶۷/۹۹ کیلوپاسکال بدست آمده است که نسبت نمونه‌های بدون جایگزینی زئولیت و خاکستر خاک‌اره، ۳۳/۷۵، ۸/۴۷ و ۳/۴۱ درصد افزایش یافته است. در شکل ۱۰ ج و د با ثابت ماندن مقادیر سیمان و زئولیت با افزایش درصد جایگزینی خاکستر خاک‌اره مقاومت تک‌محوری نمونه‌ها کاهش یافته است. اما مقاومت تک‌محوری نمونه‌های بهسازی شده با جایگزینی همزمان زئولیت و خاکستر خاک‌اره نسبت به نمونه‌های بهسازی شده با زئولیت بیشتر بوده است.

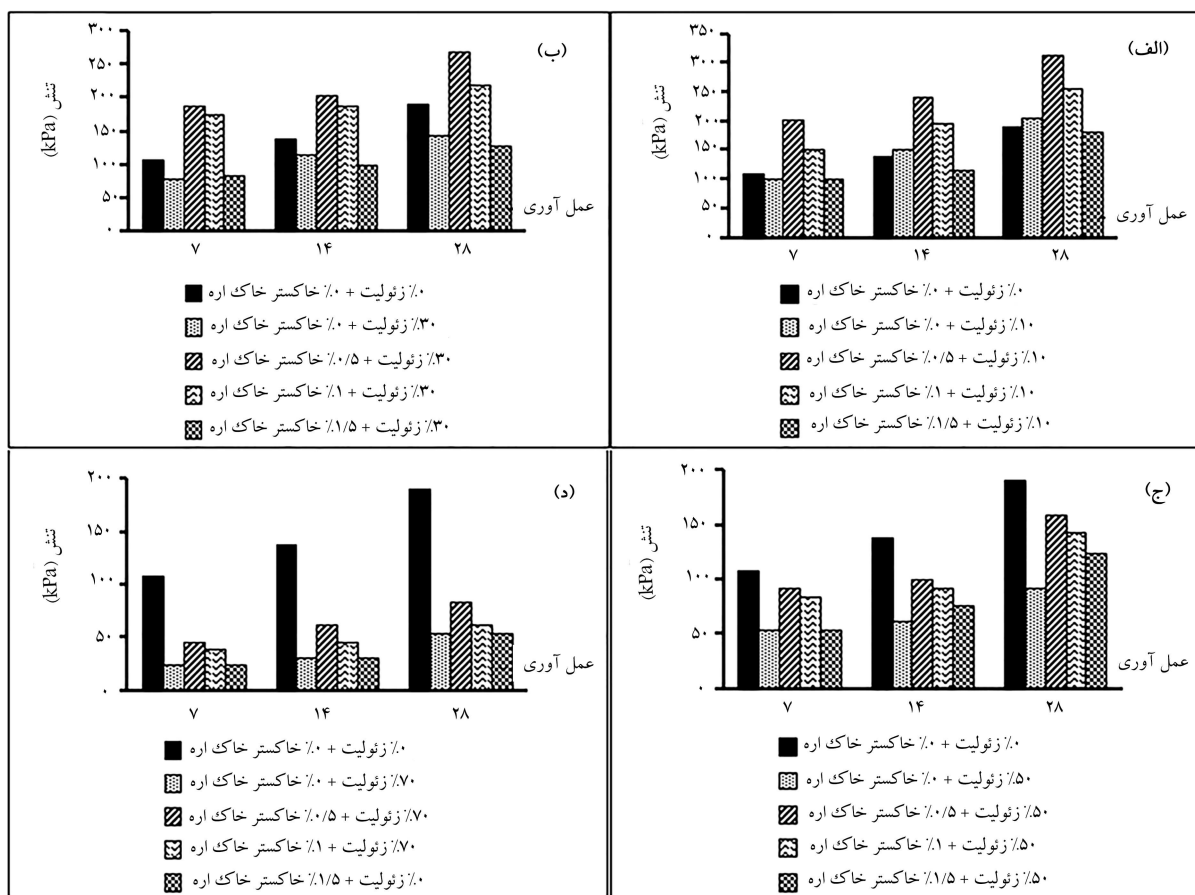
۴. بحث و تحلیل نتایج

۱.۴. بررسی تاثیر جایگزینی زئولیت به جای سیمان

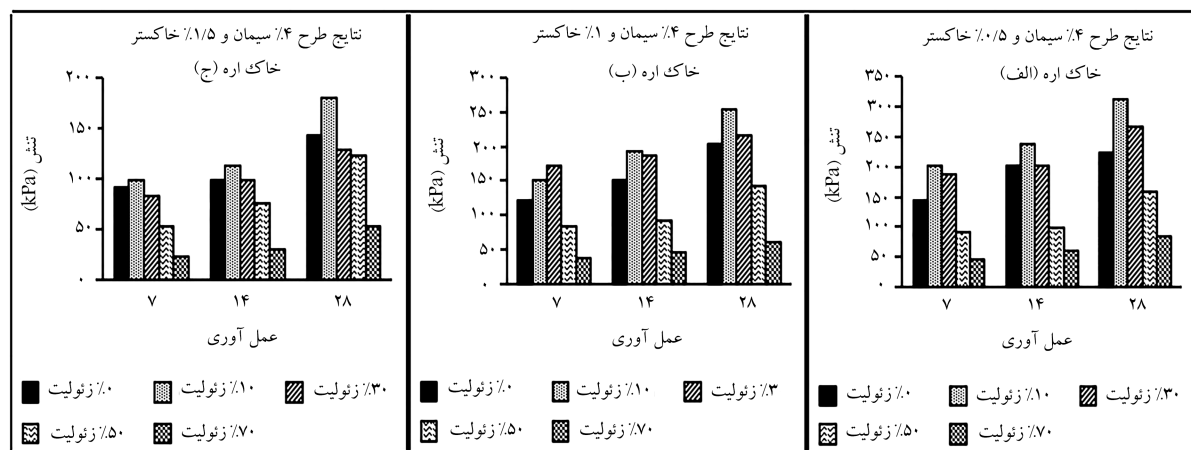
نتایج حاصل از آزمایش‌های تک‌محوری در طرح بهسازی خاک ماسه‌یی با ۴٪ سیمان و مقادیر ۰، ۱۰، ۳۰، ۵۰ و ۷۰ درصد جایگزینی زئولیت در زمان عمل‌آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روز نشانگر تاثیر زئولیت در فرایند هیدراسیون سیمان است. از آنجایی که مقاومت تک‌محوری نمونه‌های بهسازی شده در عمل‌آوری ۷ روز با افزایش درصد جایگزینی زئولیت به جای سیمان، کاهش یافته است؛ می‌توان دریافت که زئولیت در کوتاه‌مدت تاثیر مطلوبی ندارد و برای تکمیل واکنش‌های پوزولانی خود به زمان بیشتری نیاز دارد. اما جایگزینی زئولیت به جای سیمان در زمان عمل‌آوری ۱۴ و ۲۸ روز نشان‌دهنده تاثیر مطلوب آن در تشبیت خاک ماسه‌یی بوده است. بنابراین زئولیت برای افزایش مقاومت تک‌محوری نمونه‌ها به عمل‌آوری بیشتر از ۷ روز نیاز داشته است. از طرفی درصد بهینه‌ی جایگزینی زئولیت به جای سیمان در این طرح، ۱۰٪ بدست آمده است. مقاومت تک‌محوری نمونه‌ها در زمان عمل‌آوری ۱۴ و ۲۸ روز با جایگزینی ۱۰٪ زئولیت به جای سیمان به ترتیب ۱۵۱/۹۹ و ۲۰۳/۲۳ کیلوپاسکال بدست آمده است که نسبت به نمونه‌های بدون جایگزینی زئولیت، ۳/۱۰ و ۲/۷ درصد افزایش داشته است.

۲.۴. بررسی تاثیر جایگزینی خاکستر خاک‌اره به جای سیمان

نتایج حاصل از آزمایش‌های تک‌محوری در طرح بهسازی خاک ماسه‌یی با ۴٪ سیمان و مقادیر ۰، ۱۰، ۳۰، ۵۰ و ۷۰ درصد جایگزینی خاکستر خاک‌اره در زمان عمل‌آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روز نشان‌دهنده‌ی تاثیر استفاده از آن در تشبیت خاک است. خاکستر خاک‌اره برخلاف زئولیت در عمل‌آوری ۷ روز توانسته است در طرح تشبیت خاک ماسه‌یی تاثیرگذار باشد. خاکستر خاک‌اره به دلیل وجود مقادیر قابل قبول سیلیس در ترکیبات شیمیایی خود جدول ۴ در طرح بهسازی خاک موثر واقع شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش ۵/۰٪ جایگزینی خاکستر خاک‌اره به جای سیمان، مقاومت تک‌محوری نمونه‌ها، افزایش و پس از آن کاهش یافته است. وجود مقادیر بیشتر سیلیس و آهک در تجزیه شیمیایی خاکستر خاک‌اره نسبت به



شکل ۱۰. مقایسه‌ی نتایج آزمایش تک‌محوری در طرح ۴٪ سیمان و جایگزینی زئولیت برحسب مقادیر مختلف خاکستر خاکاره در زمان عمل‌آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روز.



شکل ۱۱. مقایسه‌ی نتایج آزمایش تک‌محوری در طرح ۴٪ سیمان و جایگزینی خاکستر خاکاره بر حسب مقادیر مختلف زئولیت در زمان عمل‌آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روز.

۴.۴. بررسی تاثیر زئولیت با ثابت ماندن سیمان و خاکستر

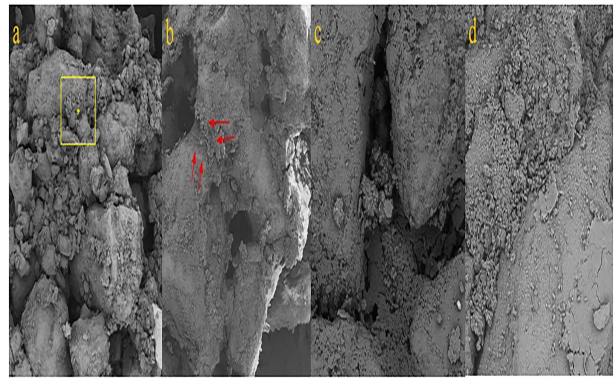
شده نسبت به نمونه‌های بدون جایگزینی، افزایش و پس از آن کاهش یافته است. از طرفی بیشینه‌ی افزایش مقاومت تک‌محوری نمونه‌ها در مقدار ۱۰٪ جایگزینی زئولیت نسبت به سیمان بدست آمده است. همچنین با توجه به شکل ۱۱ ج با افزایش جایگزینی زئولیت به جای سیمان به میزان ۱۰٪ مقاومت تک‌محوری نمونه‌ها افزایش و پس از آن کاهش یافته است.

نتایج حاصل از آزمایش تک‌محوری با جایگزینی همزمان زئولیت و خاکستر خاکاره با ثابت ماندن مقادیر ۴٪ سیمان و خاکستر خاکاره به میزان ۱/۵ و ۱/۵ درصد در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل الف و ب مشاهده می‌شود که با افزایش جایگزینی زئولیت تا ۳۰٪ مقاومت تک‌محوری نمونه‌های تثبیت

در محل اتصال شود و در عین حال از مصرف سیمان در پروژه‌های عمرانی بکاهد. لذا استفاده از مواد زائدی مانند خاکاره و تبدیل آن به خاکستر و همچنین وجود معادن بسیار زئولیت در کشور به خصوص در استان سمنان، ارزان و در دسترس بودن آن، بهبود فرایند هیدراسیون سیمان به کمک ژل‌های تولیدی و در نهایت کاهش معضلات زیست‌محیطی از دلایل کاربرد مواد ذکر شده است.

با توجه به نتایج بدست آمده از آزمایش تراکم، با افزودن ۵٪ خاکستر خاکاره، مقدار رطوبت بهینه‌ی خاک (OMC)، افزایش و پس از آن کاهش یافته است. از طرفی با افزایش درصد خاکستر خاکاره، بیشینه‌ی وزن مخصوص خشک خاک (MDD)، کاهش یافته است. از طرف دیگر با توجه به اینکه در مکانیک خاک‌های غیراشباع، فضای بین حفره‌ها تا حدی با آب و تا حدی با هوا پر شده است و این امر منجر به فشار آب منفذی یا مکش در خاک می‌شود. هرچه خلل و فرج خاک افزایش یابد، نفوذپذیری آن افزایش و مکش ماتریک کاهش می‌یابد. می‌توان گفت که با افزودن زئولیت و خاکستر خاکاره، منافذ خاک کاهش، مکش ماتریک افزایش و در نتیجه مقاومت و سختی خاک افزایش می‌یابد.

استفاده از زئولیت به همراه خاکستر خاکاره علاوه بر کاهش میزان مصرف سیمان، جنبه زیست‌محیطی طرح را دوچندان کرده است. همچنین طبق نتایج آزمایش مقاومت تک‌محوری که معمول‌ترین و سازگارترین روش ارزیابی خاک‌های بهسازی شده است؛ درصد بهینه جایگزینی همزمان زئولیت و خاکستر خاکاره در طرح بهسازی خاک ماسه‌یی به ترتیب ۱۰٪ و ۵٪ بدست آمده است. از آن‌جا که مقدار سیلیس و آهک موجود در تجزیه شیمیایی خاکستر خاکاره بیشتر از زئولیت بوده است باعث تولید ژل‌های سیمانی بیشتری در ناحیه اتصال دانه‌ها شده و در نتیجه تاثیر بیشتری در مقاومت تک‌محوری نمونه‌ها داشته است. استفاده از مقادیر بهینه‌ی زئولیت و خاکستر خاکاره در طرح جایگزینی سیمان، علاوه بر افزایش مقاومت تک‌محوری نمونه‌ها، باعث افزایش کرنش گسیختگی آن‌ها نیز شده است که می‌تواند ناشی از بهبود فرایند هیدراسیون و بهبود خواص فیزیکی و شیمیایی خاک به کمک پوزولان‌ها و ژل‌های سیمانی تولید شده توسط زئولیت و خاکستر خاکاره باشد. طبق نتایج آزمایش، مقاومت تک‌محوری نمونه‌های با جایگزینی ۱۰٪ زئولیت و ۵٪ خاکستر خاکاره به جای سیمان، نسبت به ماسه تثبیت نشده در زمان عمل‌آوری ۱۴ و ۲۸ روز به ترتیب ۲۵۰/۴۶ و ۲۴۵/۰۱ درصد و نسبت به ماسه تثبیت شده با ۴٪ سیمان، ۷۳/۹ و ۸۷/۴۲ درصد افزایش داشته است. همچنین با توجه به نتایج حاصل از آنالیز میکروسکوپ الکترونی (SEM) که به بررسی ساختاری خاک پرداخته شده است با افزودن ۵٪ خاکستر خاکاره به نمونه‌های تثبیت شده با سیمان و جایگزینی ۱۰٪ زئولیت، پیوند بین ذرات خاک به دلیل واکنش‌های شیمیایی و ایجاد ژل‌های سیمانی (CAH و CSH) توسط پوزولان‌های این دو ماده مستحکم‌تر شده است و توده‌ی خاک حالت یکنواخت‌تری گرفته و در نهایت منجر به افزایش در مقاومت تک‌محوری خاک در مقایسه با حالت بدون افزودنی شده است. به‌طور کلی با افزودن همزمان خاکستر خاکاره و زئولیت به سیمان باعث تسریع در واکنش‌های شیمیایی ترکیب و نیز منجر به ساختار متراکم ژل‌های سیمانی در ناحیه اتصال ذرات شده است.



شکل ۱۲. تصویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) با بزرگنمایی X ۳۰.

۵. آنالیز تصویر میکروسکوپ الکترونی (SEM)

آنالیز میکروسکوپ الکترونی به منظور بررسی تغییرات ساختاری خاک، در اثر افزودن سیمان، زئولیت و خاکستر خاکاره انجام شده است. نمونه‌ها به گونه‌یی انتخاب شدند که از ناحیه‌ی اتصال بین دانه‌های خاک با کمک افزودنی‌ها جهت آنالیز استفاده شود. نتایج حاصل در طرح‌های اختلاط انجام شده در شکل ۱۲ نشان داده شده است. شکل (a-۱۲) تصویری از خاک ماسه‌یی ارائه شده است. مطابق شکل (b-۱۲) با افزودن ۴٪ سیمان، فقط منجر به پیوند ذرات خاک در سطح بیرونی آن شده است. شکل (c-۱۲) تصویری از خاک ماسه‌یی تثبیت شده با ۴٪ سیمان و ۱۰٪ جایگزینی زئولیت را نشان می‌دهد. اگرچه زئولیت با بهبود فرایند هیدراسیون زئولیت موجب برقراری پیوند مستحکم‌تری بین ذرات خاک شده است، ولی همچنان اتصال بین ذرات در مقایسه با طرح افزودن خاکستر خاکاره ضعیف است. در شکل (d-۱۲) با افزودن ۵٪ خاکستر خاکاره به نمونه‌های تثبیت شده با ۴٪ سیمان و ۱۰٪ جایگزینی زئولیت، مقاومت تک‌محوری بالاتری در مقایسه با نمونه‌های قبلی به دست آمد که نشان از پیوند مستحکم‌تری بین ذرات خاک است که در نتیجه واکنش‌های شیمیایی و ژل سیمانی (CAH و CSH) ایجاد شده به کمک خاکستر خاکاره و زئولیت به وجود آمده است. می‌توان گفت پوزولان‌های موجود در دو ماده‌ی خاکستر خاکاره و زئولیت، با بهبود فرایند هیدراسیون سیمان، باعث افزایش مقاومت تک‌محوری خاک شده‌اند.

۶. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر به بررسی تاثیر جایگزینی زئولیت و خاکستر خاکاره در خاک ماسه (SW) با محوریت ژئوتکنیک زیست‌محیطی پرداخته است. از آن‌جایی که ترکیب‌های دو ماده‌ی مذکور شامل پوزولان‌هایی هستند که در واکنش با سیمان و آب می‌تواند ژل‌هایی (CAH و CSH) تولید کنند که منجر به اتصال بین ذرات خاک

پانویس‌ها

1. behak and Musso

2. Kumar & Jain
3. Verma

منابع (References)

1. Gunaratne, M., *The Foundation Engineering Handbook*, Taylor and Francis Group, CRC PRESS.
2. Mahdavi, R. Ajal Louyian, R. "Biological comparison of sandy soil samples and improved samples", *International Conference on New Developments in Civil Engineering, North University, Amol*, (in Persian) (2017).
3. Xiao, Y. He, X. Evans, T.M. and et al. "Unconfined compressive and splitting tensile strength of basalt fiber-reinforced biocemented sand", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **145**(9) (2019).
4. Obeta, I.N. Ikeagwuani, C.C. Attama, C.M. and et al. "Stability and durability of sawdust ash-lime stabilized black cotton soil", *Nigerian Journal of Technology*, **38**(1), pp. 75-80 (2019).
5. Bildrici, M. "Cement production, environmental pollution and economic growth: Evidence from China and USA", *Clean Technologies and Environmental Policy*, **21**, pp. 783-793 (2019).
6. Harpel, C.J. Kyle, P.R. and Dunbar, N.W. "Englacial tephrostratigraphy of Erebus volcano, Antarctica", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **177**(3), pp. 549-568 (2008).
7. Weckhuysen, B.M. and Yu, J. "Recent advances in zeolite chemistry and catalysis", *Chemical Society Reviews*, **44**(20), pp. 7022-7024 (2015).
8. Fertu, T. Gavrilescu, M. "Application of natural zeolites as sorbents in the clean-up of aqueous streams", *Environmental Engineering And Management Journal*, **11**(1), pp. 867-878 (2012).
9. Riberio, F. Radrigues, L. and Claude, N. "Zeolites science and technology", Martinus Nijhoff Publishers, Boston (1984).
10. Abbasi, M. "Study of the effect of zeolite on the tensile strength of babolsar sandy soils", Master Thesis, Mazandaran Institute of Higher Industrial Education, (in Persian) (2014).
11. Abbasi, M. Shooshpasha, I. and Mollabbasi, H. "Investigation of the effect of zeolite on tensile strength of sand-blasted Babolsar sand cement", *Journal of Civil Engineering, Sharif University*, **33**(1), pp. 117-120 (in Persian) (2017).
12. Mollabbasi, H. Shoosh Pasha, I. and Mollabbasi, H. "Investigation of the effect of zeolite on Babolsar sandy soil strength, cement-stabilized Using Uniaxial Compressive Strength Test", *Journal of Civil Engineering, Tarbiat Modares University*, **16**(4), pp. 213-203 (in Persian) (2016).
13. Abbasi, M. Shoosh Pasha, I. and Mollabbasi, H. "Investigation of the effect of zeolite on shear strength of Bab-salar sand, stabilized by cement", *Journal of Civil and Environmental Engineering, Tabriz University*, **49**(1), pp. 96-89 (in Persian) (2019).
14. Demirbas, G. "Stabilization of expansive soils using bigadic zeolite", PhD Thesis, University of METU, Ankara, Turkey (2009).
15. Hong, S. "Geotechnical laboratory characterization of sand zeolite mixtures", Master Thesis, USA (2015).
16. Ahmadi Chenarboni, H. Lajevardi, S. H. MolaAbasi, H. abd et al. "The effect of zeolite and cement stabilization on the mechanical behavior of expansive soils", *Construction and Building Materials*, **272**(1), pp.1-10 (2020).
17. James, J. "Strength benefit of sawdust/wood ash amendment in cement ctabilization of an expansive soil", *Revista Facultad de Ingenier*, **28**(50), pp. 44-61 (2019).
18. Bolarinwa, A. Ola S, A. "A review of the major problem soils in nigeria", *Journal of Engineering and Technology*, **1**(1), pp. 17-25 (2016).
19. Tadayon, R. Dabiri, R "Investigation of the effect of sawdust on the geotechnical behavior of clay soils", *Journal of Ferdowsi Civil Engineering*, **32**(1), pp. 20-34 (in Persian) (2019).
20. Rakesh, V. Shwetank, R. Chinmayee, R. and et al. "Stabilisation of black cotton soil using sawdust and cement", *International Journal for Scientific Research & Development*, **5**(9), pp. 728-731 (2017).
21. Kumar, K.A. Narayanan, P. and Chiranthana, N. "Stability of red clay and laterite soil with sawdust as an amendment", *International Journal of Combined Research and Development*, **2**(2), pp. 18-23 (2014).
22. Simatupang, M. Mangalla, L.K. Edwin, R.S. and et al. "The mechanical properties of fly-ash-stabilized sands", *Geosciences*, **10**(132), p. 19 (2020).
23. Behak, L. Musso, M. "Performance of low-volume roads with wearing course of silty sand modified with rice husk ash and lime", *Transportation Research Procedia*, **18**, pp. 93-99 (2016).
24. Mahvash, S. Lopez-Querol, S. and bahadori-Jahromi, A. "Effect of class F fly ash on fine sand compaction through soil stabilization", *Heliyon*, **3**(3), e00274 (2017).
25. Keramatikerman, M. Chegenizadeh, A. Nikraz, H. "Experimental study on effect of fly ash on liquefaction resistance of sand", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **93**, pp. 1-6 (2017).
26. Yu, Li, L.-H., Yu, Ch,-D., Xiano,H,-L. "Experimental study on the reinforced fly ash and sand retaining wall under static load", *Construction and Building Materials*, **248**, 118678 (2020).
27. Edeh, J. Agbede, I. and Tyoyila, A. "Evaluation of sawdust ash-stabilized lateric soil as highway pavement material", *Journal of Materials in Civil Engineering*, **26**(1), pp. 367-373 (2014).
28. Kumar, R. Jain, P. "Prediction of compression index (Cc) of fine grained remolded soils from basic soil properties", *International Journal of Applied Engineering Research*, **11**(1), pp. 592-598 (2016).
29. Verma, R. Sagar, S.R. Ray, C. and et al. "Stabilisation of black cotton soil using sawdust and cement", *IJSRD; International Journal for Scientific Research and Development*, **5**(9), pp. 728-731 (2015).
30. Karim, H. Al-Recaby, M. and Nsaif, M. "Stabilization of soft clayey soils with sawdust ashes", *MATEC Web of Conferences* (2018).
31. Khan, Sh. and Khan, M.H. "Improvement of mechanical properties by waste sawdust ash addition into soil", *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, **20**(7), pp. 1901-1914 (2015).

32. Butt, W.A. Gupta, K. and Jha, J.N. "Strength behavior of clayey soil stabilized with saw dust ash", *International Journal of Geo-engineering*, **18**(1), pp. 165-176 (2017).
33. Annual Book of ASTM C136 Standards., *Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken (2012).
34. Annual Book of ASTM D2487 Standards., *Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken (2012).
35. Annual Book of ASTM D698 Standards., *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil*, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken (2012).
36. Annual Book of ASTM D4253 Standards., *Standard Test Methods for Minimum Index Density and Unit Weight of Soils and Calculation of Relative Density*, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken (2012).
37. Annual Book of ASTM D4254 Standards., *Standard Test Methods for Maximum Index Density and Unit Weight of Soils and Calculation of Relative Density*, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken (2012).
38. Annual Book of ASTM D854 Standards., *Standard Test Method for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer*, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken (2012).
39. Annual Book of ASTM C150 Standards., *Standard Specifications for Cements*, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken., (2012).
40. Annual Book of ASTM C618 Standards., *Standard Specification for Coal Fly Use in Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Concrete*, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken (2019).
41. ISIRI 3433, "Standard specification for natural pozzolans", Institute of Standards and Industrial Research of Iran (1994).
42. Annual Book of ASTM D2166 Standards., *Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil*, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken