**مجله انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران**
**زمستان ۱۴۰۱، جلد پانزدهم، شماره ۴ صفحه ۷۹ تا ۹۵**

# تاثیر خاکستر خاک اره بر خصوصیات ژئوتکنیکی خاک رس

رضا فرسام نیا [۱]، روزبه دبیری [۲*]

دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۸/۰۲ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۷/۲۲

## چکیده

خاک رس نوعی از خاک‌های مساله دار می‌باشد که در اثر جذب آب و رطوبت سبب بروز مشکلاتی همچون تورم، نشست و تغییر شکلهای قابل توجه می‌شود. امروزه استفاده از مصالح قابل دسترس و باطله بمنظور جلوگیری از آلودگی محیط زیست جهت تثبیت خاکهای مساله دار مورد نظر قرار گرفته است که یکی از این نوع مصالح، خاکستر خاک اره می‌باشد. در تحقیق حاضر، امکان بهبود خصوصیات خاک رس با استفاده از خاکستر خاک اره مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور، خاکستر خاک اره با درصدهای وزنی ۳، ۶، ۹ با خاک رسی مخلوط گردیده و سپس در زمان های ۱، ۷ و ۱۴ روز عمل آوری انجام گرفته است. جهت ارزیابی رفتار ژئوتکنیکی خاک تثبیت شده آزمون‌های حدود آتربرگ، تراکم استاندارد، مقاومت فشاری تک محوری، برش مستقیم، نسبت باربری کالیفرنیا و تحکیم انجام گرفته است. نتایج بدست آمده از تحقیق حاضر نشان می‌دهد، مقدار بهینه خاکستر خاک اره برابر ۳ درصد در مدت زمان عمل آوری ۱۴ روز می‌باشد. بطوریکه در خاک تثبیت شده شاخص خمیری ۴۹ ٪ شاخص فشردگی ۴۰ ٪ کاسته شده و وزن مخصوص خشک حداکثر به میزان ۱۴٪ مقاومت فشاری تک محوری به اندازه ۶۵ ٪ و مقاومت برشی در لحظه گسیختگی بطور میانگین ۵۳/۶ ٪ نسبت به حالت تثبیت نشده افزایش یافته است.

**کلید واژه‌ها:** *رس، خاکستر خاک اره، مقاومت برشی، تورم، تحکیم.*

۱. کارشناسی ارشد مهندسی عمران-ژئوتکنیک، گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران
۲. استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران rouzbeh_dabiri@iaut.ac.ir
* مسئول مکاتبات

**۱. مقدمه**

اجرای پروژه‌های عمرانی یکی از مهمترین شاخص‌های پیشرفت هر کشوری در زمینه‌های اقتصادی، سیاسی، نظامی و غیره محسوب می‌شوند. خاکهای ریزدانه از جمله خاک‌هایی است که ظرفیت لازم را جهت احداث ابنیه‌ها را نداشته و سازه را از نظر عملکردی ممکن است با خطرات جدی مواجه کند. در سیستم نامگذاری متحد خاکها، کلیهٔ ذراتی که دارای اندازهٔ کمتر از ۷۵ میکرون باشد، در طبقهٔ ریزدانه‌ها قرار می‌گیرند. اگر اینگونه خاکها در صورت تماس با مقدار محدودی آب خاصیت خمیری از خود نشان دهند، در طبقهٔ رس و در غیر این صورت در بخش لای قرار می‌گیرند .لذا، مهندسین به فکر روش‌هایی برای بهبود خواص این نوع خاک بوده‌اند که حاصل آن ایجاد روشهای مختلف بهسازی می‌باشد. با در نظر گرفتن اهمیت سازه‌ها، مسائل اقتصادی و زمان اتمام پروژه، روش بهسازی خاک مورد نظر انتخاب می‌گردد. معمولا پروژه‌های عمرانی زمانیکه با خاک های رسی مواجه می‌شوند، برای کنترل خاصیت تورم و کاهش حجم از تثبیت کننده‌های شیمیایی از قبیل سیمان و یا آهک استفاده می‌گردد. از سوی دیگر، این مواد اگرچه قابلیت خوبی در افزایش پارامترهای مقاومتی از خود نشان داده‌اند ولی باعث آسیبهای زیست محیطی زیادی در اثر تولید و انتشار گازهای گلخانه‌ای مثل دی اکسید کربن می‌گردند (روح بخشان و کلانتری، ۱۳۹۵). خاکستر خاک اره در اثر سوزاندن کامل خاک اره که محصول برش، سمباده زدن و یا ساییدن چوب با اره است تشکیل می‌شود. زائدات خاک ارهٔ چوب در تمام کشورهای جهان انباشته می‌شوند و مشکلات زیست محیطی جدی و خطرات سلامتی گوناگونی را موجب می‌شوند و از آنجایی که تولید ضایعات چوبی در کارخانه‌های چوب بری و صنایع چوبی گوناگون غیرقابل اجتناب است، لذا برای استفاده از این ضایعات تلاش زیادی به عمل می‌آید (فروغی اصل و نوظهور، ۱۳۹۶). انتخاب روش‌های موجود جهت بهسازی تابع پارامترهای مختلفی همچون نوع خاک، ساختار دانه‌بندی خاک، مهارت، نوع تجهیزات، مواد مصرفی و هزینهٔ اجرای آنها می‌باشد. انجمن ادارهٔ راه وترابری آمریکا (FHWA, 2017) روش‌های مختلف بهسازی خاک‌ها را به‌همراه هزینهٔ اجرای آنها طبق جدول(۱) ارائه نموده است. با مقایسهٔ هزینه‌ها می‌توان مشاهده کرد، خاک اره به دلیل گستردگی در تهیهٔ آن و قیمت بسیار پایین، امکان استفاده از آن را درجهت بهسازی خاکها امکان پذیر می‌نماید. بنابراین، در این تحقیق سعی بر آن است تا بتوان با به کارگیری خاکستر خاک اره، ویژگیهای مکانیکی خاک ریزدانهٔ رسی را اصلاح کرده و از آلودگی محیط زیست وخسارتهای ناشی از آن اجتناب نمود.

**۲. مرور مطالعات گذشته**

استفاده از مواد ضایعاتی کارخانجات و صنایع مختلف در خاک با هدف بهبود خصوصیات مهندسی، از جمله روش‌های مورد توجه جدید در این زمینه است. انواع خاکسترها موجود می‌باشد. یکی از آنها خاکستر بادی است که محصولی فرعی مهمی از نیروگاه‌های سوخت زغال‌سنگ یا از حرارت دادن ضایعات برخی کارخانه‌ها نیز بدست می‌آید که دارای خاصیت پوزولانی مناسبی بوده و در پروژه‌های ساختمانی جهت استفاده در بتن و در پروژه‌های ژئوتکنیکی جهت تثبیت خاک کاربرد دارد. بیات و بحرینیان(۱۳۹۹) تاثیر همزمان خاکستر بادی و آهک را بر روی ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک ماسه مطالعه نمودند. ایشان دریافتند که اضافه شدن خاکستر بادی تا ۲۰ درصد در خاک ماسه‌ای بدون آهک، باعث افزایش بیشتری در وزن مخصوص خشک حداکثر می‌شود و این مقدار با وجود ۱۰٪ آهک به مقدار ۱۰٪ کاهش می‌یابد. همچنین مقدار ۲۰٪ خاکستر بادی یک مقدار بهینه جهت تثبیت خاک با یا بدون آهک است بطوریکه بیشترین مقدار نسبت باربری کالیفرنیا در این حدود خاکستر بادی بدست می‌آید. نوع دیگر خاکستر حاصل از خاک اره می‌باشد که بیشتر در زمینهٔ تثبیت خاکهای ریزدانه استفاده می‌گردد و مطالعات گسترده‌ای انجام یافته است. اوکانده (Okunade, 2008) مطالعه‌ای بر روی اثرات خاکستر چوب و ترکیبات خاک اره بر روی خصوصیات مهندسی خاک‌های رسی انجام داده

است. نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد سهم عمده افزودنی خاکستر خاک اره موجب افزایش خصوصیات تراکمی خاک رسی خواهد شد. اوتوکو و آنست (Otoko and Honest, 2014) دریافتند که با افزودن ۴ درصد خاکستر خاک اره باعث بهبود مقاومت فشاری و افزایش ظرفیت باربری خاک در حالت خشک شده است و همچنین ترکیب خاکستر خاک اره با دیگر افزودنی ها باعث کاهش هزینه‌های اقصادی شده است. ایلوری و اودو (Ilori and Udo, 2015) دریافتند که خاکستر خاک اره باعث کاهش شاخص خمیری خاک‌های رسی و افزایش مقاومت فشاری خاک رس شده است. خان و خان ( Khan and Khan, 2015) مشاهده کردند که با افزودن خاکسترخاک اره به خاک رس، ضریب نفوذپذیری نسبت به حالت اولیه کاهش پیدا کرده است. نتایج تحقیق واجد علی و همکاران ( Wajid Ali et al., 2016) نشان داد که حضور خاکستر خاک اره به مقدار ۴ درصد در خاک های رسی با پلاستیسیته پایین باعث بهبود خصوصیات ژئوتکنیکی خاک از قبیل مقاومت فشاری و ظرفیت باربری خاک گردیده است. در تحقیق دیگر اواما و همکاران (Owamah et al., 2017) در مقایسه سیمان با ترکیب خاکستر و سیمان دریافتند که تاثیر سیمان برروی پارامترهای برش مستقیم و تک محوری بیشتر از ترکیب خاکستر خاک اره و سیمان است و همچنین دوره عمل آوری ۲۸ روزه تاثیر چشم گیری در افزایش پارامترهای مقاومتی خاک گردیده است. گانا و تبت (Gana and Tabat, 2017) مطالعه‌ای بر روی تثبیت خاک رس با استفاده از سیمان و خاکستر خاک اره انجام دادند. آنها دریافتند که این ترکیب باعث کاهش شاخص خمیری و حد روانی و همچنین باعث افزایش مقاومت فشاری خاک گردید، گرچه این افزایش مقاومت در ترکیب سیمانی بیشتر از ترکیب با خاکستر خاک اره بود. همچنین کیل و همکاران (Kale et al., 2019) مطالعه‌ای بر وی تاثیر خاکستر خاک اره و آهک بر روی خاک مسئله دار انجام داد که با افزودن مقادیر ۱ تا ۵ درصد از ترکیبات خاکستر و آهک باعث افزایش حداکثر وزن مخصوص خاک و کاهش رطوبت بهینه خاک گردید. همچنین در درصدهای پایین‌تر مواد افزودنی موجب افزایش مقاومت فشاری و ظرفیت باربری خاک شده است. تدین و دبیری (۱۳۹۸) مطالعه‌ای را بر روی تأثیر خاک اره برروی رفتار ژئوتکنیکی خاکهای رسی انجام دادند. نتایج بدست آمده نشان داد زمانی که ۳ درصد خاک اره به نمونه های مورد مطالعه افزوده شد سبب کاهش نسبت تخلخل خاک و کاهش جذب آب و همچنین موجب افزایش مقاومت، ظرفیت باربری و تراکم پذیری خاک گردید. کوادری و همکاران (Quadri et al., 2020) طی تحقیقات خود اثر تثبیت کننده ضایعات کلسیم کاربید و خاک رس کلسینید شده بر روی روسازی انعطاف پذیرمورد ارزیابی قراردادند. در این تحقیق با استفاده از درصد های افزودنی متفاوت باعث بهبود برخی از خصوصیت ژئوتکنیکی خاک از قبیل مقاومت فشاری و ظرفیت باربری خاک شدند. نتایج حاصل از این تحقیقات نشانگر افزایش خصوصیات ژئوتکنیکی خاک از قبیل مقاومت فشاری خاک، چسبندگی خاک و ظرفیت باربری آن شده است. با مرور بر تحقیقات انجام گرفته مشاهده می‌گردد، نوع خاکستر خاک ارهٔ که از درخت تبریزی که با درصدهای مختلف تهیه گردیده با خاک رس مخلوط شده است و تاثیرگذاری مدت زمان عمل آوری بر روی خصوصیات ژئوتکنیکی آن کمتر مدنظر واقع شده است. همچنین، نحوه تهیه خاکستر خاک که از سوزاندن کامل خاک اره در داخل کوره در دمای ۷۰۰ درجه سانتیگراد بدست آمده از نوآوری‌های مطالعهٔ حاضر می‌باشد.

**جدول ۱.** مقایسهٔ هزینه‌های روش‌های بهسازی خاک (FHWA, 2017).

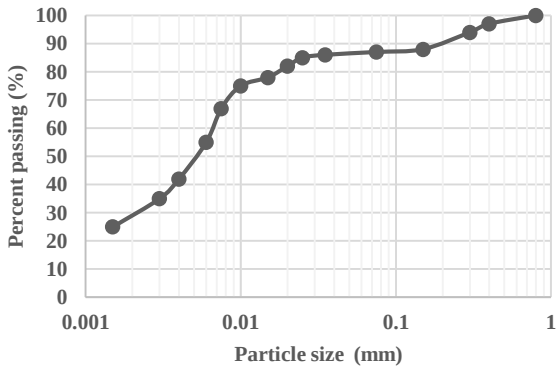
| Category | Technology | Unit cost ($) |
|---|---|---|
| **Vertical drains and accelerated consolidation** | PVDs; with and without fill preloading | 0.5-4 / 1ft |
| **Lightweight Fills** | Compressive strength fill; geofoam; foamed concrete | 75-150/$yd^3$ |
| **Lightweight Fills** | Granular fills; Wood fiber; Blast furnace slag; Fly ash; Boiler slag; Expanded shale; Clay and slate; Tire shreds | 3-15/$yd^3$ |
| **Deep compaction** | Deep dynamic compaction | 10-30/$yd^2$ |
| **Deep compaction** | Vibro-compaction | 5-9/1ft |
| **Aggregate columns** | Stone columns and rammed aggregates piers | 15-60/1ft |
| **Column supported embankments** | Column supported embankment | 9/$ft^2$+cost of column |
| **Column supported embankments** | Columns: Non-compressible | 30-80/1ft |
| **Column supported embankments** | Columns: compressible | 20-100/1ft |
| **Soil mixing** | Deep mixing (dry) | 60-125/1ft |
| **Soil mixing** | Mass mixing | 15-75/$yd^3$ |
| **Grouting technologies** | Chemical grouting | 20/ft+0.65/qt |
| **Grouting technologies** | Compaction grouting | 75-750/$yd^3$ |
| **Grouting technologies** | Bulk void filling | 50-150/ $yd^3$ |
| **Grouting technologies** | Slabjaking | 6.5-9.5/$ft^2$ |
| **Grouting technologies** | Jet grouting | 250-750/ $yd^3$ |
| **Grouting technologies** | Rock fissure grouting | 25-80/$ft^2$ |
| **Pavement support technologies** | Mechanical stabilization | 1-5/ $yd^2$ |
| **Pavement support technologies** | Chemical stabilization | 2-5/ $yd^2$ |
| **Pavement support technologies** | Moisture control | 3-12/1ft |
| **Reinforced soil** | Reinforced embankment | 2-12/ $yd^2$ |
| **Reinforced soil** | MSE walls | 30-65/$ft^2$ |
| **Reinforced soil** | Reinforced soil slopes | 3-25/$ft^2$ |
| **Reinforced soil** | Soil nail | 20-50/1ft |

## ۳. مواد و مصالح

خاک مورد مطالعه از منطقه مرزداران در شهر تبریز تهیه شده است (شکل ۱). منحنی دانه بندی مصالح مورد مطالعه طبق استانداردASTM D421 و ASTM D422 تعیین گردیده و در شکل(۲) می‌توان مشاهده نمود. خصوصیات خمیری خاک مورد مطالعه طبق استاندارد ASTM D4318-95a و چگالی ویژه نیز براساس استاندارد ASTM D854 اندازه گیری شده است (جدول ۲). مطابق با سیستم طبقه بندی متحد خاکها، خاک مورد مطالعه از نوع رس(CL) می‌باشد. خاکستر خاک اره مورد استفاده در پژوهش حاضر، مربوط به درخت تبریزی است. جهت تهیه خاکستر، ابتدا خاک اره درخت تبریزی از یکی کارگاه های چوب بری تهیه گردید (شکل ۳-الف). سپس، خاک اره سرند شده و در دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد به حالت خشک درآورده شده است. در ادامه، خاک اره تهیه شده در کوره کارگاه ذغال پزی و در شرایط خلاء در دمای ۷۰۰ درجه سانتیگراد سوزانده شده و خاکستر خاک اره تهیه گردیده است (شکل ۳-ب). خصوصیات شیمیایی خاکستر خاک اره در جدول(۳) آورده شده است. در انتها، با مرور مطالعات گذشته مشاهده گردید که میزان خاکستر خاک اره در نظر گرفته شده تا ۳ تا ۵ درصد می‌باشد و نوع خاک اره مورد استفاده که از آن خاکستر تهیه شده متفاوت است. بنابراین در تحقیق حاضر، خاکستر خاک اره تهیه شده از الک شماره ۲۰۰ رد شده و به میزان ۳، ۶ و ۹ درصد وزنی به خاک رس مورد مطالعه مخلوط شده است. جهت ساخت نمونه، خاک رس و خاکستر خاک اره مورد استفاده در رطوبت بهینه با استفاده از دستگاه مخلوط کن

با یکدیگر مخلوط شده و نمونه‌های تهیه شده در ظروف پلاستیکی سر بسته در شرایط دمایی محیط ۲۱ درجه سانتیگراد نگهداری شده و به مدت ۱، ۷ و ۱۴ روز عمل آوری انجام گرفته است.

شکل ۱. محل تهیه نمونه خاک رس مورد مطالعه در منطقه مرزداران شهر تبریز.




شکل ۲. منحنی دانه بندی خاک مورد مطالعه در تحقیق حاضر.

شکل ۳. تصاویر مصالح مورد استفاده در تحقیق حاضر، الف- خاک اره درخت تبریزی، ب- خاکستر خاک اره.

## ۴. آزمون‌های آزمایشگاهی

در تحقیق حاضر، خاک رسی با خاکستر خاک اره با درصدهای وزنی ۳، ۶ و۹ درصد مخلوط شده است تا امکان بهبود خصوصیات مکانیکی و ژئوتکنیکی خاک رسی ارزیابی گردد. بدین منظور ابتدا آزمون تراکم آزمایشگاهی طبق استاندارد ASTM D698 انجام گرفت. سپس برای تعیین پارامترهای رفتاری خاک رسی تثبیت شده با خاکستر خاک اره، در مرحلهٔ اول آزمایش مقاومت فشاری تک محوری طبق استاندارد ASTM D2166 صورت پذیرفت. در مرحلهٔ دوم، آزمون برش مستقیم در حالت خشک طبق استاندارد ASTM D3080-11 به صورت کنترل کرنش تحت اثر تنشهای قائم ۱۰۰، ۲۰۰و ۳۰۰ کیلوپاسکال صورت گرفت. عملیات بارگذاری نمونه‌های مورد مطالعه با سرعت ۱/۲۵ میلیمتر بر دقیقه صورت گرفت. در مرحلهٔ سوم، برای بررسی تأثیرخاکستر خاک اره برروی میزان ، نشست تحکیم ودرصد تورم خاک رسی مورد مطالعه، ابتدا آزمایش نشست تحکیم و درصد تورم با استفاده از آزمایش تحکیم طبق استاندارد ASTM D2435 صورت گرفت. در انتها، جهت بررسی تاثیر خاکستر خاک اره بر روی میزان ظرفیت باربری خاک، آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا (CBR) مطابق با استاندارد ASTM-D1883 برای انرژی تراکم ۵۶ ضربه در هر لایه و نفوذ پیستون به میزان ۲ اینچ (۵ سانتیمتر) و با سرعت بارگذاری ۱/۲۷ mm/min به دو روش خشک و اشباع انجام گرفت. لازم بذکر است ۲۰ درصد از مجموع آزمایش‌های انجام یافته بر روی نمونه‌ها جهت تدقیق نتایج دوباره تکرار شده است. مطابق جدول (۴) برنامه ریزی آزمایش ها قابل مشاهده می‌باشد.

**جدول ۲.** ویژگی های ژئوتکنیکی خاک رس مورد مطالعه.

| Geotechnical properties | PI | Gs |
|---|---|---|
| Value | 16% | 2.62 |

**جدول ۳.** خصوصیات شیمیایی خاکستر خاک اره مورد مطالعه.

| Elements | Percent |
|---|---|
| L.O.I | 17.5 |
| $SiO_2$ | 21 |
| $Al_2O_3$ | 5.4 |
| $Fe_2O_3$ | 7.1 |
| $TiO_2$ | 0.04 |
| CaO | 33.2 |
| MgO | 3.1 |
| $Na_2O$ | 0.08 |
| $K_2O$ | 5.4 |
| $SO_3$ | 7.1 |
| $P_2O_5$ | 0.01 |
| MnO | 0.03 |
| ZnO | 0.01 |
| SrO | 0.01 |
| C1 | 0.03 |
| total | 100 |

**جدول ۴.** برنامه آزمون های صورت گرفته بر روی نمونه‌های مورد مطالعه در تحقیق حاضر.

| Tests | | | | | Curing time | Percent of Saw dust ash | Soil | Sample name | Row |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Consolidation | Direct shear | Uniaxial strength | Compaction | Atterberg | | | | | |
| * | * | * | * | * | 0 | 0 | Clay | C-0 | 1 |
| * | * | * | * | * | 1, 7, 14 | 3 | Clay | CS-3 | 2 |
| * | * | * | * | * | 1, 7, 14 | 6 | Clay | CS-6 | 3 |
| * | * | * | * | * | 1, 7, 14 | 9 | Clay | CS-9 | 4 |

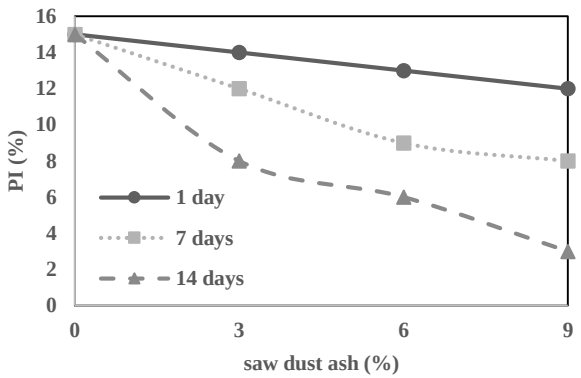
توضیح: C = Clay, S = Saw dust ash , *= آزمایش انجام یافته

## ۵. نتایج و بحث

### ۵-۱. نتایج حاصل از آزمایش حدود آتربرگ

نتایج حاصل از تاثیر خاکستر خاک اره درخت تبریزی در درصدهای وزنی مختلف و پس از انجام عمل آوری بر خصوصیات خمیری خاک رسی مورد مطالعه مطابق شکل (۴) نشان داده شده است. با توجه به نمودار ارائه شده می‌توان دریافت خاکستر خاک اره و مدت زمان عمل آوری آن بر روی رفتار خمیری خاک رسی تاثیر بسزایی داشته و از افزایش حجم و جذب رطوبت جلوگیری نماید. بطوریکه در حالت کلی با افزایش حضور خاکستر خاک اره در خاک رس و در تمامی مدت زمان‌های عمل آوری، میزان شاخص خمیری کاسته شده است. بیشترین میزان کاهش در شاخص خمیری، در نمونه‌هایی که در مدت زمان ۱۴ روز عمل آوری شده‌اند مشاهده شده و مقدار آن بطور میانگین ۴۹ درصد کاسته شده است. اگرچه این کاهش با مخلوط نمودن ۹ درصد وزنی خاکستر خاک اره بعد از مدت زمان عمل آوری ۱۴ روزه به ۸۰ درصد می‌رسد. از نقطه نظر واکنش شیمیایی می‌توان بیان نمود میزان CaO و $SiO_2$ به ترتیب ۳۳/۲ و ۲۱ درصد می‌باشد. این شرایط برای تشکیل شدن واکنش‌های شیمیایی تبادل یونی، تجمع-تراکم آنی و سمنتاسیون در دمای محیط (تقریبا ۱۷ تا ۲۵ درجه سانتیگراد) بین کانی‌های رس و و مواد آلومین دار و سیلیس دار مهیا می‌نماید. بطوریکه در واکنش تبادل یونی، یون‌های $Al^{3+}$ می‌توانند جایگزین یون‌های $Ca^{2+}$ شوند و یون‌های $Ca^{2+}$ می‌توانند جایگزین یون‌های $Na^{+}$ گردند. سپس، در واکنش تجمع-تراکم آنی ذرات خاک رس تجمیع شده و دانه‌های بزرگتر را بوجود می‌آورند که این روند سبب تغییر در ساختار و بافت خاک می‌شود. در انتها، واکنش سمنتاسیون یا پوزولانی سبب بوجود آمدن مواد سنته می‌شود که باعث ایجاد اتصال قوی و مستحکم

بین ذرات تازه تشکیل یافته شده که نتیجه آن کاهش میزان جذب رطوبت، افزایش مقاومت و توانایی باربری و چسبندگی بیشتر در خاک تثبیت شده گردیده است. نتایج بدست آمده سازگار با مطالعات انجام شده بر رو ی نمونه های تثبیت شده با مدت زمان عمل آوری ۷روزه توسط ایلوری و اودو (Ilori and Udo, 2015) و واجد علی و همکاران (Wajid Ali et al., 2016) می‌باشد.




**شکل ۴.** تاثیر خاکستر خاک اره درخت تبریزی بر روی شاخص خمیری مصالح مورد مطالعه در تمامی مدت زمان‌های عمل آوری.

*۵-۲. نتایج حاصل از آزمایش تراکم*

درحالت کلی می‌توان دریافت با مخلوط نمودن خاکستر خاک اره به مقدار ۳ درصد وزنی به خاک رسی مورد مطالعه در تمام مدت زمان‌های عمل آوری، مقدار وزن مخصوص خشک حداکثر ($\gamma_{dmax}$) یک روند رو به رشد را نشان می‌دهد. زیرا، از یک سو تشکیل ساختار و بافت جدید درشت تر به دلیل واکنش‌های شیمیایی و از سوی دیگر، کاهش میزان رطوبت بهینه سبب بالا رفتن $\gamma_{dmax}$ شده است. همانگونه که در جدول(۵-الف وب) نشان داده شده است، زمانیکه خاک رسی با ۳٪ خاکستر خاک اره مخلوط می‌شود، میزان وزن مخصوص خشک حداکثر در مدت زمان‌های عمل آوری ۱، ۷ و ۱۴ روزه بترتیب ٪۷/۱۴، ۱۰٪ و ۱۴٪ افزایش می‌یابد. ولی در ادامه مشاهده می‌گردد با افزایش میزان خاکستر خاک اره تا ۹٪، وزن مخصوص خشک حداکثر در تمامی مدت زمان‌های عمل آوری یک روند کاهندگی را طی می‌نماید. زیرا، هنگامیکه فضاهای خالی خاک مورد مطالعه با مواد فیلر شوند، مازاد افزودنی باعث می‌شود وزن مخصوص مخلوط را کنترل گردد زیرا خاکستر سبکتر بوده و وزن مخصوص خاکستر غالب می‌شود. همچنین، در ادامه در جدول(۵-الف و ب) می‌توان دریافت خاکستر خاک اره بر روی میزان رطوبت بهینه جذب شده توسط خاک رس تاثیرگذار است. بطوریکه حضور ۳ درصد وزنی خاکستر در خاک رس مقدار رطوبت بهینه خاک تثبیت شده را بعد از ۱، ۷ و ۱۴ روز مدت زمان عمل آوری به ترتیب ٪۸/۲، ۲۴٪ و ۴۶٪ کاسته است. این شرایط بیان کننده آن است که حضور خاکستر خاک اره در خاک رس و بعد زمان عمل آوری می‌تواند باعث تغییر ساختار و بافت خاک گردد و ۳٪ خاکستر خاک اره بیشترین اثر را در افزایش وزن مخصوص خشک حداکثر و کاهش رطوبت بیهنه را در خاک تثبیت شده نشان داده است. نتایج بدست آمده مشابه با مطالعات انجام یافته توسط کیل و همکاران (Kale et al., 2019) برای نمونه‌های مطالعه شده با یک روز عمل آوری می باشد.

**جدول ۵. الف.** مقایسه نتایج مطالعه حاضر حاصل از آزمایش تراکم با تحقیقات صورت گرفته توسط کیل و همکاران در سال ۲۰۱۹ (Kale et al., 2019) در مدت زمان عمل آوری یک روزه.

| 1 day curing time (present study) | | | Studies performed by Kale et al. in 2019 (Kale et al., 2019) for 1 day curing time | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Percent of Saw dust ash | $\gamma_{dmax(gr/cm3)}$ | $W_{opt}$ (%) | Percent of Saw dust ash | $\gamma_{dmax(gr/cm3)}$ | $W_{opt}$ (%) |
| 0 | 1.4 | 18.4 | 0 | 1.335 | 26 |
| 3 | 1.5 | 17 | 3 | 1.44 | 21 |
| 6 | 1.36 | 18 | 6 | 1.34 | 22 |
| 9 | 1.33 | 19.1 | 9 | 1.26 | 24 |

**جدول ۵. ب.** نتایج مطالعه حاضر حاصل از آزمایش تراکم در مدت زمان عمل آوری ۷ و ۱۴ روزه.

| 7 days curing time | | | 14 days curing time | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Percent of Saw dust ash | $\gamma_{dmax(gr/cm3)}$ | $W_{opt}$ (%) | Percent of Saw dust ash | $\gamma_{dmax(gr/cm3)}$ | $W_{opt}$ (%) |
| 0 | 1.4 | 18.4 | 0 | 1.4 | 18.4 |
| 3 | 1.54 | 14 | 3 | 1.6 | 10 |
| 6 | 1.4 | 16 | 6 | 1.5 | 12 |
| 9 | 1.36 | 17 | 9 | 1.43 | 15 |

*۵-۳. نتایج حاصل از آزمایش تک محوری*

همانگونه که در جدول(۶) مشاهده می‌گردد، اضافه کردن خاکستر خاک اره به خاک رس می‌تواند رفتار ژئوتکنیکی آن را برپایه نتایج آزمون مقاومت فشاری تک محوری تغییر دهد. با توجه به شکل(۶-الف) می‌توان دریافت با افزودن ۳٪ خاکستر خاک اره درخت تبریزی به خاک رس در مدت زمان‌های عمل آوری ۱، ۷ و ۱۴ روزه باعث افزایش مقاومت فشاری تک محوری در لحظه گسیختگی به ترتیب به اندازه ۴۲٪، ۵۷٪ و ۶۴٪ گردد. اگرچه با افزودن میزان خاکستر خاک اره تا ۹٪ مقدار توانایی باربری نمونه‌های تثبیت شده کاسته شده ولی نسبت به حالت تثبیت نشده(خاک رس اولیه) دارای مقادیر بالای مقاومت در تمامی مدت زمان‌های عمل آوری می‌باشند. نتایج بدست آمده سازگار با مطالعات انجام یافته توسط اتوکو و هانست (Otoko and Honest, 2014)، ایلوری و اودو (Ilori and Udo, 2015) و واجد علی و همکاران (Wajid Ali et al., 2016) می‌باشد. همچنین افزودن ۳ درصد وزنی خاکستر خاک اره به خاک رس در تمامی مدت زمان های عمل آوری ۱، ۷ و ۱۴ روزه مقدار مدول سکانت ($E_{50}$) را بترتیب ۱۱٪، ۱۶/۵٪و ۲۲/۵٪ افزایش یافته است. درادامه علیرغم افزایش مقدار خاکستر خاک اره و انجام عملیات عمل آوری مقدار مدول سکانت کاهش یافته و از میزان حالت خالص نیز پایین تر آمده است. نتایج بدست آمده فوق بیانگر آنست وجود ۳ ٪ خاکستر خاک اره درخت تبریزی که دارای عنصر اکسید کلسیم (آهک) می‌باشد در مدت زمان عمل آوری ۱۴ روزه سبب واکنش سمنتاسیون گردیده که سبب شده است ساختار و بافت خاک رس بگونه‌ای تغییر یابد تا باعث افزایش توانایی باربری شده و با توجه به مدول سکانت مشاهده گردد که خاصیت ارتجاعی خاک تثبیت شده نیز افزایش یافته است. همانطور که از جدول(۶) می‌توان دریافت، حضور ۳ ٪ خاکستر خاک اره در خاک رس تثبیت شده در تمامی مدت زمان های عمل آوری سبب بوجود آمدن رفتار ترد و شکننده در خاک تثبیت شده گردیده است. ولی با بالا رفتن مقدار خاکستر خاک اره، رفتار خاک تثبیت شده حالت انعطاف پذیرتر، شکل پذیرتر و با توانایی باربری کمتری را به خود گرفته است.

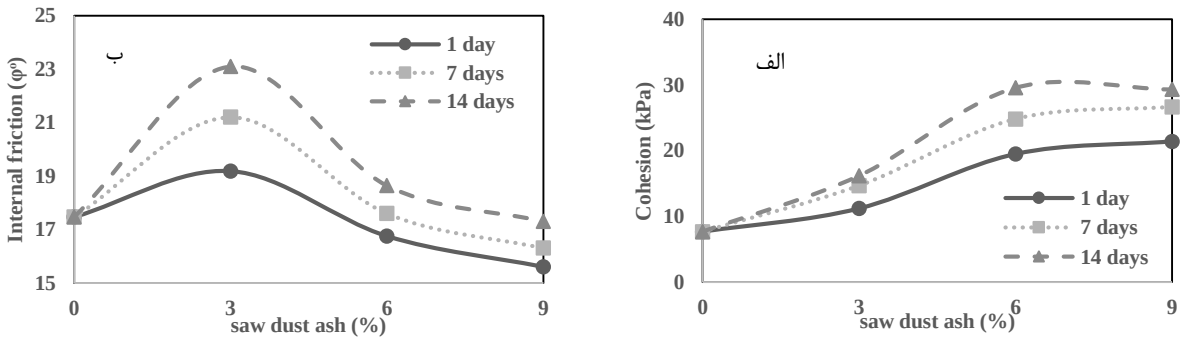
**جدول ۶.** افزودن درصدهایی از خاکسترخاک اره درخت تبریزی به خاک رس و تاثیر آن بر نتایج آزمون مقاومت فشاری تک محوری مخلوط خاک مورد مطالعه در تمامی مدت زمان‌های عمل آوری.

| Percent of Saw dust ash | $q_u$ (kPa) | $E_{50}$ (kPa) | Axial strain at failure (%) |
|---|---|---|---|
| **1 day curing time** | | | |
| 0 | 168 | 7500 | 7 |
| 3 | 240 | 8300 | 3.5 |
| 6 | 230 | 3700 | 6 |
| 9 | 220 | 3100 | 7 |
| **7 days curing time** | | | |
| 3 | 265 | 8740 | 2.5 |
| 6 | 241 | 4120 | 4.5 |
| 9 | 237 | 3640 | 6 |
| **14 days curing time** | | | |
| 3 | 277 | 9175 | 1.44 |
| 6 | 253 | 4450 | 3.11 |
| 9 | 244 | 4000 | 4.5 |

*۵-۴. نتایج حاصل از آزمایش برش مستقیم*

همانگونه که در شکل(۵-الف) می‌توان مشاهده نمود افزودن خاکستر خاک اره می‌تواند بر روی میزان چسبندگی خاک رس تثبیت شده تاثیر مثبت داشته باشد. بطوریکه مقدار پارامتر چسبندگی بعد از ۱، ۷ و ۱۴ روز عمل آوری بطور میانگین ۱/۲۵، ۱/۸۷ و۲/۲۵ برابر افزایش داشته است. زیرا، مواد سمنته تازه تشکیل یافته بدلیل واکنش پوزولانی بین خاکستر خاک اره و خاک رس را سبب ایجاد پیوندهای مستحکم بین ذرات درشت دانه‌تر تازه تشکیل یافته در بافت خاک تثبیت شده می-گردند.

از سوی دیگر، با توجه به افزودن ۳ ٪ خاکستر خاک اره به خاک رس مورد مطالعه طبق نمودارهای شکل (۷-ب) می‌توان دریافت بدلیل تغییر ساختار و بافت خاک تثبیت شده از ریزدانه به سمت درشت دانه در اثر واکنش پوزولانی، در تمامی مدت زمان های عمل آوری ۱، ۷ و ۱۴ روزه مقدار زاویه اصطکاک داخلی به ترتیب ۹/۸۵، ۲۱/۴ و ۳۲ درصد افزایش یافته است. ولی در ادامه با افزایش مقدار خاکستر خاک اره مقدار زاویه اصطکاک داخلی یک روند کاهش را طی نموده است. علت این شرایط را می‌توان بدین صورت بیان نمود که در اثر ترکیب دی اکسید کربن هوا به همراه رطوبت بهینه موجود در خاک رس و اکسید کلسیم موجود در خاکستر خاک اره، سبب ایجاد کربنات کلسیم می‌شود که این شرایط باعث ایجاد خاصیت چسبندگی بیشتر گردیده و اصطکاک بین ذرات را کاهش داده است. این شرایط تمامی مدت زمان های عمل آوری مشاهده شده است.



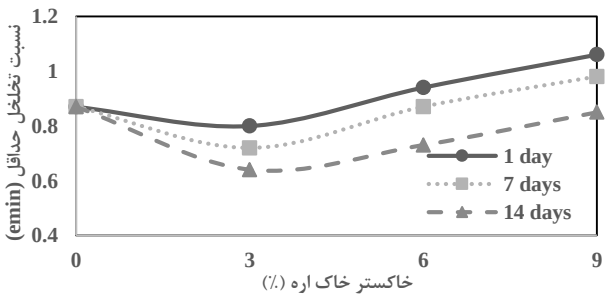

**شکل۵.** تاثیر خاکسترخاک اره بر نتایج حاصل از آزمایش برش مستقیم خاک رس مورد مطالعه در تمامی مدت زمان‌های عمل آوری، الف- چسبندگی، ب- زاویه اصطکاک داخلی.

همچنین در جدول (۷) می‌توان تاثیر خاکستر خاک اره بر روی مقاومت برشی در لحظه گسیختگی نمونه‌های مورد مطالعه را مشاهده نمود. در حالت کلی با توجه به دیاگرام‌ها می‌توان دریافت خاکستر خاک اره تاثیر مثبتی بر روی میزان مقاومت برشی داشته است. بطوریکه مخلوط کردن ۳ درصد خاکستر خاک اره در خاک رس با مدت زمان عمل آوری ۱۴ روزه مقدار مقاومت برشی در لحظه گسیختگی را تحت تاثیر تنش‌های قائم ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلو پاسکال بطور میانگین ۵۴ درصد نسبت به حالت تثبیت نشده افزایش داده که بیانگر بهبود میزان مقاومت و توانایی باربری خاک رس تثبیت شده است. اگرچه در ادامه با افزایش مقدار خاکستر خاک اره در خاک مورد مطالعه مقاومت برشی یک روند کاهندگی را طی نموده ولی با حضور ۹ درصد خاکستر خاک اره بعد از ۱۴ روز عمل آوری مقاومت برشی به طور میانگین ۲۶/۳ درصد بیشتر نسبت به حالت تثبیت نشده برآورد شده است.

**جدول ۷.** تاثیر خاکستر خاک اره بر مقاومت برشی در لحظه گسیختگی در تمامی مدت زمان‌های عمل آوری.

| 1 day curing time | Shear strength at failure (kPa) | | |
|---|---|---|---|
| Percent of Saw dust ash | σ=100 kPa | σ=200 kPa | σ=300 kPa |
| 0 | 32 | 60 | 95.4 |
| 3 | 38.4 | 77.8 | 115 |
| 6 | 34.2 | 68.1 | 108 |
| 9 | 32.8 | 62.8 | 102.6 |
| **7 days curing time** | **Shear strength at failure (kPa)** | | |
| 3 | 45.4 | 84.5 | 125.4 |
| 6 | 41.3 | 73.4 | 118.7 |
| 9 | 38.6 | 68.1 | 110.2 |
| **14 days curing time** | **Shear strength at failure (kPa)** | | |
| 3 | 52.2 | 92.7 | 138.7 |
| 6 | 47.3 | 78.9 | 127.1 |
| 9 | 43.2 | 74.3 | 115.6 |

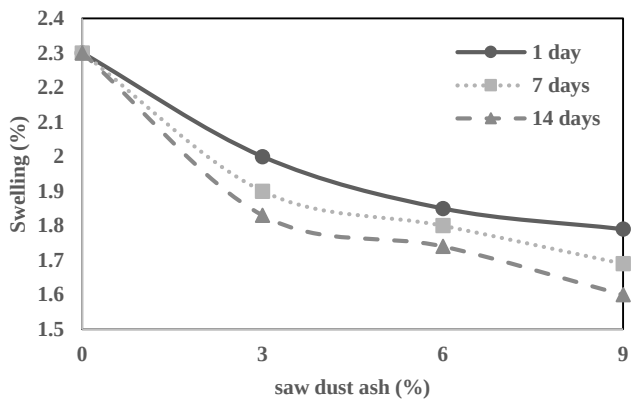
از سوی دیگر، نتایج به‌دست‌آمدهٔ حاصل از آزمون برش مستقیم را می‌توان براساس تغییرات نسبت تخلخل حداقل ($e_{min}$) طبق شکل (۶) تفسیر نمود. باتوجه به نمودارها می‌توان مشاهده نمود که در حالت تثبیت نشده، خاک رس دارای خاصیت خمیری و نسبت تخلخل حداقل بالایی است که بیان‌کنندهٔ شکل‌پذیری بیشتر آن است. هنگامی‌که خاکستر خاک اره به نمونه‌های مورد مطالعه افزوده می‌شود، مشاهده می‌گردد در حضور ۳٪ خاکستر خاک اره، فضای خالی بین ذرات خاک رس بعد از ۱۴ روز عمل آوری کاسته می‌شود که این میزان کاهش ۲۶٪ است. همانگونه که در بخشهای قبلی (بند ۵-۱) اشاره گردید واکنش شیمیایی که بین خاکستر خاک اره و ذرات خاک رس تشکیل می گردد سبب ایجاد یک ساختار و بافت جدید شده و سبب کاهش فضای خالی بین ذرات و تماس بیشتر بین آنها گردیده است.




**شکل ۶.** تاثیر خاکستر خاک اره بر نسبت تخلخل حداقل مصالح مورد مطالعه در تمامی مدت زمان عمل آوری.

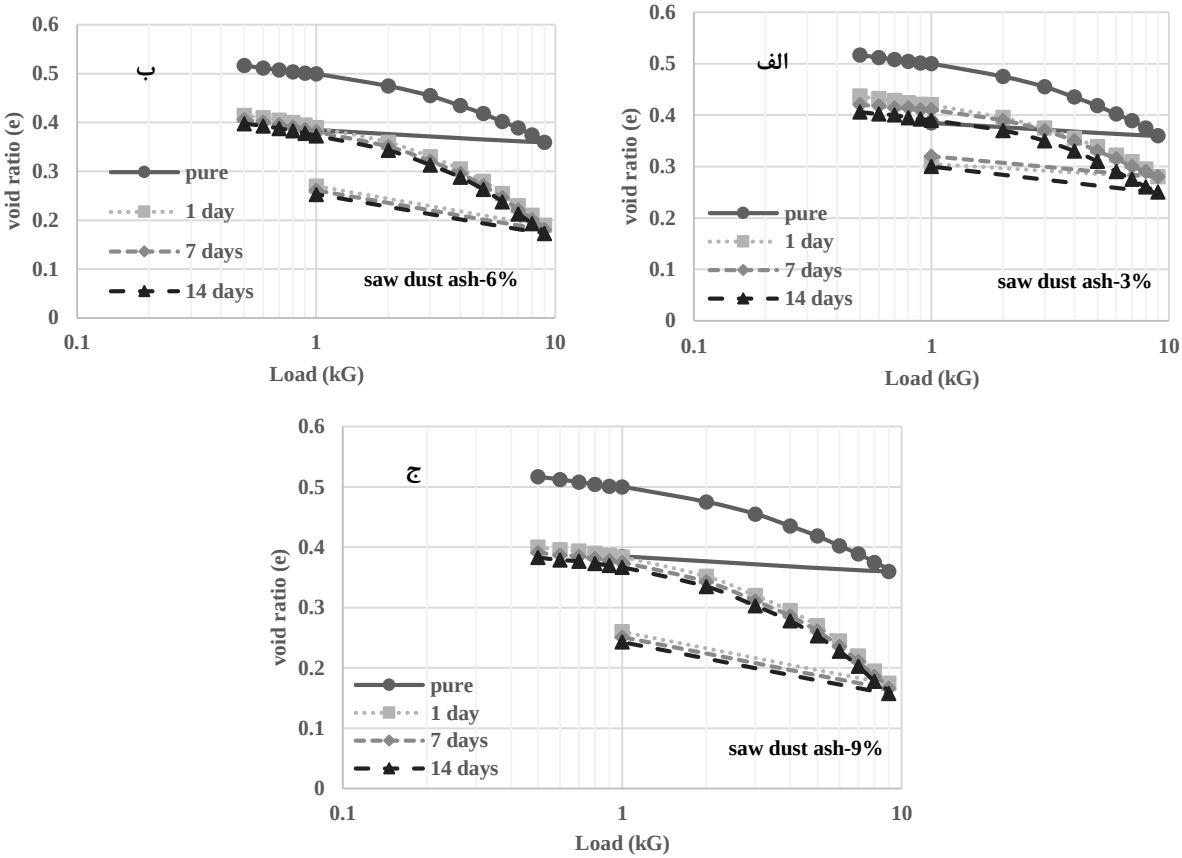
*۵-۵. نتایج حاصل از آزمایش تحکیم*

یکی از موضوعات مهم در خاک‌های مساله دار ریزدانه رسی وقوع نشست و یا افزایش حجم و تورم در اثر جذب آب و رطوبت می‌باشد. در این تحقیق سعی شده است تا با انجام آزمایش تحکیم تاثیر خاکستر خاک اره درخت تبریزی بر روی مقدار نشست و تورم خاک رس ارزیابی شده است. مطابق شکل(۷) تاثیر خاکستر خاک اره بر روی میزان تورم آزاد نمونه-های مورد مطالعه قابل مشاهده می‌باشد. با توجه به نمودار می-توان دریافت، در حالت کلی با حضور خاکستر خاک اره در خاک رس در درصدهای مختلف میزان تورم در تمامی مدت زمان های عمل آوری کاسته شده است. البته بیشترین میزان کاهش تورم در نمونه خاک رس با حضور ۹ درصد خاکستر خاک اره و بعد از ۱۴ روز عمل آوری دیده شده که برابر با ۳۰ درصد است. علت کاهش تورم در نمونه‌ها بدین دلیل است که با تشکیل واکنش شیمیایی بین عنصر Cao موجود در ذرات خاکستر خاک اره با رطوبت موجود خاک رس $Ca(OH)_2$ تولید نموده است که در ساختار و بافت خاک تثبیت شده تغییر ایجاد کرده و میزان جذب آب کاهش یافته و مواد سمنته تازه تشکیل یافته یک استخوان بندی قوی بین ذرات تازه تشکیل یافته ایجاد نموده اند که از وقوع افزایش حجم و تورم جلوگیری نموده است.

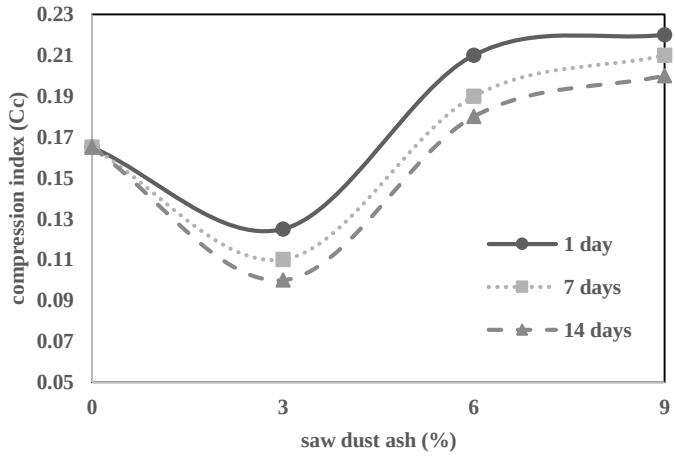



**شکل ۷.** تاثیر خاکستر خاک اره بر میزان تورم آزاد مصالح مورد مطالعه در تمامی مدت زمان‌های عمل آوری.

همچنین تغییرات میزان نسبت تخلخل و شاخص فشردگی (Cc) بر روی خاک رس مورد مطالعه تحت تاثیر خاکستر خاک اره به ترتیب در شکل‌های (۸-الف، ب و ج) و شکل (۹) ارائه شده است. با مشاهده نمودارهای شکل های (۸-الف، ب و ج) می‌توان دریافت افزودن خاکستر خاک اره باعث کاهش میزان نسبت تخلخل در نمونه‌ها شده و اگرچه مدت زمانهای عمل آوری نیز سبب بالا رفتن این تاثیر گذاری شده است. در ادامه، با توجه به شکل (۹) مشاهده می‌شود افزودن ۳ درصد خاکستر خاک اره به خاک رس مورد مطالعه بعد از ۱۴ روز عمل آوری مقدار نشست پذیری را تا میزان ۴۰ درصد کاهش داده است.



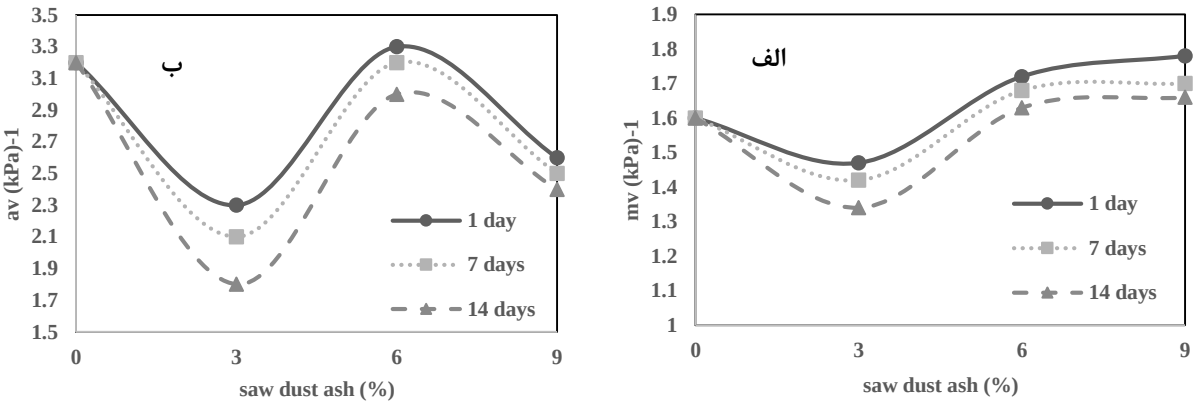

**شکل ۸.** تاثیر خاکستر خاک اره بر روی میزان نسبت تخلخل خاک رس مورد مطالعه در تمامی مدت زمان‌های عمل آوری مختلف، الف- ۳ ٪ خاکستر خاک اره، ب- ۶ ٪ خاکستر خاک اره، ج- ۹ ٪ خاکستر خاک اره.




**شکل ۹.** تاثیر خاکستر خاک اره بر روی میزان شاخص فشردگی (Cc) مصالح مورد مطالعه در تمامی مدت زمان‌های عمل آوری.

تاثیر خاکستر خاک اره بر روی پارامترهای نشست تحکیم همچون ضریب تراکم پذیری (av) و ضریب تغییر حجم (mv) خاک رس مورد مطالعه در شکل (۱۰- الف و ب) ارائه شده است. با توجه به نمودارها می‌توان دریافت مخلوط کردن ۳ درصد خاکستر خاک اره بعد از ۱۴ روز عمل آوری مقدار امکان وقوع تغییر حجم (mv) در نمونه خاک رس را ۱۶ درصد و

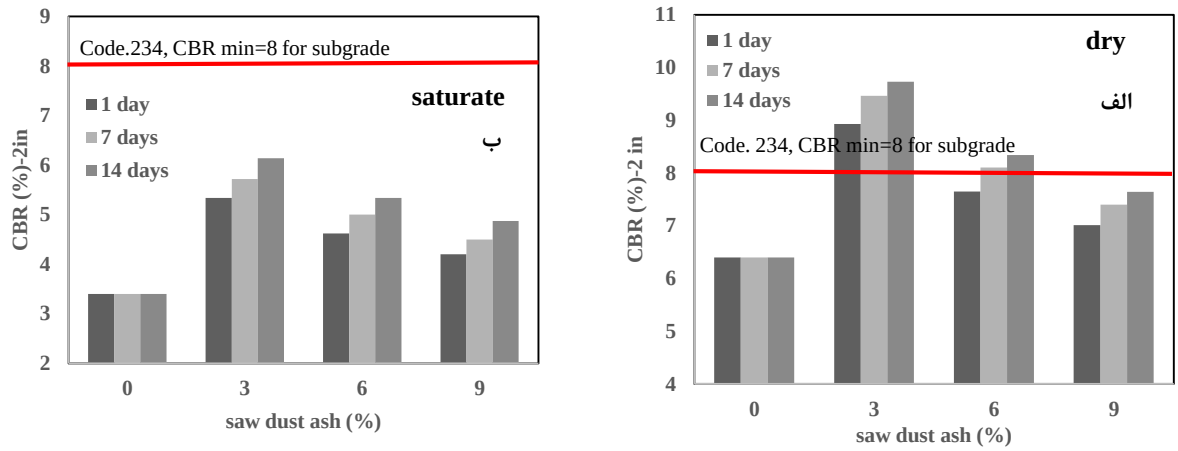
همزمان مقدار تراکم پذیری (av) را ۴۴ درصد کاسته است که بیان کننده تاثیرگذاری واکنش سمنتاسیون بر روی رفتار تحکیمی خاک رس مورد مطالعه است.




**شکل ۱۰.** تاثیر خاکستر خاک اره بر روی میزان پارامترهای نشست تحکیم مصالح مورد مطالعه در تمامی مدت زمان‌های عمل آوری، الف- ضریب تغییر حجم (mv)، ب- ضریب تراکم پذیری (av).

*۵-۶. نتایج حاصل از آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا (CBR)*

یکی از اهداف تحقیق حاضر، امکان سنجی در مورد تاثیر کاربرد خاکستر خاک اره بر روی خاک رس جهت استفاده در لایه‌های روسازی راه است. بدین منظور آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا (CBR) بر روی نمونه‌های مورد مطالعه در دو شرایط بارگذاری خشک و اشباع (در انرژی تراکم ۵۶ ضربه در هر لایه) انجام گرفت و میزان CBR براساس میزان نفوذ پیستون به به اندازه ۲/۵ اینچ (۵ سانتیمتر) برآورد شد. نتایج بدست آمده در شکل (۱۱-الف و ب) نشان داده شده است. با توجه به نتایج بدست آمده درشکل (۱۱-الف) مشاهده می‌شود در حالت خشک بهینه ترین حالت زمانی است که ۳ درصد خاکستر خاک اره به نمونه خاک رس افزوده می‌شود در تمام مدت زمان های عمل آوری خاک تثبیت شده طبق نشریه ۲۳۴ سازمان برنامه و بودجه مناسب برای احداث لایه خاک بستر می‌گردد. از سوی دیگر، هنگامیکه خاکستر خاک اره به خاک رس افزوده می‌شود و بعد از عمل آوری در شرایط اشباع آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا انجام میگیرد مطابق شکل (۱۱-ب) می‌توان دریافت خاک رس تثبیت شده طبق نشریه ۲۳۴ سازمان برنامه و بودجه مناسب جهت ساخت خاک بستر نمی‌باشد.




**شکل ۱۱.** تاثیر خاکستر خاک اره بر روی میزان نسبت برابری کالیفرنیا مصالح مورد مطالعه در تمامی مدت زمان‌های عمل آوری مختلف در انرژی تراکمی ۵۶ ضربه، الف- حالت خشک، ب-حالت اشباع.

## ۶. نتیجه گیری

وجود خاک ریزدانه رسی در محل اجرای پروژه‌های عمرانی و راهسازی به عنوان یک خاک مساله‌دار شناخته می‌شود. بخصوص زمانیکه تغییر حجم ناشی از تغییر رطوبت سبب بروز خسارات و صدماتی در آنها می‌شود. اما به دلیل افزایش روز افزون هزینه مصالح ساخت و ساز و حفظ محیط زیست، امروزه کاربرد مصالح باطله قابل دسترس پیشنهاد می‌گردد. یکی از مصالح پیشنهادی بدین منظور خاکستر خاک اره است که انبار آن باعث الودگی محیط زیست می‌گردد. هدف از تحقیق حاضر امکان بررسی تاثیر خاکستر خاک اره بر روی خصوصیات و ویژگی‌های ژئوتکنیکی و رفتاری خاک رسی است. در این مطالعه خاکستر خاک اره درخت تبریزی با درصدهای ۳، ۶، ۹ با خاک منطقه مرزداران شهر تبریز مخلوط گردیده و پس از ۱، ۷ و ۱۴ روز عمل آوری بر روی نمونه‌های تثبیت شده نتایج بدست آمده نشان می‌دهد میزان بهینه خاکستر خاک اره برای بهبود رفتار ژئوتکنیکی خاک رس مورد مطالعه برابر ۳ درصد در مدت زمان عمل آوری ۱۴ روزه است. دلایل آنرا می‌توان به شرح ذیل بیان نمود:

۱- همان میزان مشابه خاکستر خاک اره سبب افزایش وزن مخصوص خشک حداکثر به میزان ۱۴ درصد گردیده و مقدار رطوبت بهینه ۴۶ درصد کاهش یافته است.

۲- ۳ درصد خاکستر خاک اره در خاک رس بعد از ۱۴ روز عمل آوری مقاومت فشاری تک محوری در لحظه گسیختگی را به میزان۶۴ درصد نسبت به حالت تثبیت نشده افزایش می-دهد.

۳- زاویه اصطکاک داخلی در نمونه‌های خاک تثبیت شده با ۳ درصد خاکسترخاک اره به میزان ۳۲ ٪ افزایش یافته و در همین شرایط میزان چسبندگی در خاک رس به مقدار ۲/۲۵ برابر بهبود یافته است.

۴- با حضور ۹ درصد خاکستر خاک اره و بعد از ۱۴ روز عمل آوری مقدار کاهش تورم آزاد در رس ۳۰ ٪ است.

۵- در خاک رس با افزودن خاکستر خاک اره تا ۳ ٪ ، مقدار شاخص فشردگی در مدت عمل آوری ۱۴ روز به مقدار ۴۰ ٪ نسبت به حالت تثبیت نشده کاسته شده است. همچنین امکان وقوع تغییر حجم (mv) در نمونه خاک رس ۱۶ درصد و مقدار تراکم پذیری (av) ۴۴ درصد کاهش یافته است.

۶- با توجه به نتایج بدست آمده از آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا در حالت خشک مشاهده شد زمانیکه ۳ درصد خاکستر خاک اره به نمونه خاک رس افزوده می‌شود در تمام مدت زمان های عمل آوری خاک تثبیت شده طبق نشریه ۲۳۴ سازمان برنامه و بودجه مناسب برای احداث لایه خاک بستر می‌گردد.

با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان اشاره نمود رفتار خاک ریزدانه رسی تثبیت شده متاثر از، اندازه ذرات خاکستر خاک

اره، نسبت تخلخل حداقل ($e_{min}$) و واکنش شیمیایی صورت گرفته بین ذرات خاک رسی و خاکسترخاک اره در مدت زمان عمل آوری است. با توجه به اینکه ذرات خاکستر خاک اره از الک ۲۰۰ رد شده بدلیل ریز بودن می‌تواند تماس بیشتری با ذرات رس داشته باشد. همچنین بدلیل وجود اکسید کلسیم بالا در خاکستر خاک اره سبب می شود هنگام ترکیب با دی اکسید کربن هوا کربنات کلسیم تولید کند که خاصیت پوزولانی به ذرات خاکستر خاک اره می‌دهد که می‌تواند واکنش شیمیایی مناسب ایجاد نماید. این شرایط پس از مخلوط کردن ۳ درصد خاکستر خاک اره و عمل آوری در مدت ۱۴ روز خود را نشان می‌دهد. بطوریکه این میزان خاکستر خاک اره در خاک رسی نسبت تخلخل حداقل را ۲۶ درصد کاهش داده و این شرایط بیان کننده آن است واکنش شیمیایی صورت گرفته باعث ایجاد یک ساختار دانه بندی جدید با ابعاد درشت تر و با نسبت تخلخل کمتر و با وجود مواد سمنته یک استخوان بندی قوی ایجاد گردیده است که نتیجه آن کاهش میزان شاخص خمیری، افزایش میزان مدول سکانت و ایجاد کرنش محوری بالا در مرحله گسیختگی، کاهش میزان نشست تحکیم و تورم و افزوده شدن نسبی توانایی باربری است. بنابراین در حالت کلی می توان بیان از خاکستر خاک اره بعنوان یک ماده جایگزین که سازگار با محیط زیست است جایگزین آهک و سیمان که آلوده کننده محیط زیست می‌باشند می‌توان استفاده نمود. همچنین، از خاک رسی تثبیت شده با خاکستر خاک اره برای ساخت لایه-های روسازی راه (بویژه خاک بستر)، آب بندی ابنیه‌های ژئوتکنیکی در معرض رطوبت و بهسای خاک زیر پی بهره گرفت. البته نوع خاکستر خاک اره و نحوه عمل آوری ممکن است بر رفتار ژئوتکنیکی خاک رس با توجه به نوع کانی های آنها و میزان نفوذپذیری تاثیرگذار باشد که سعی می گردد در تحقیقات آینده مورد بررسی قرار گیرد.

## منابع


بیات، م.، بحرینیان، م. ح.،۱۳۹۹. تأثیر خاکستر بادی و آهک بر روی خصوصیات ژئوتکنیکی خاک ماسه ای،نشریه زمین شناسی مهندسی، دوره ۱۳، شماره ۲، تابستان، ۸۵-۹۵.

تدین، ر.، دبیری، ر.، ۱۳۹۸، بررسی تأثیر خاک‌اره برروی رفتار ژئوتکنیکی خاک‌های رسی، نشریه مهندسی عمران فردوسی، دوره ۳۲، شماره ۱، بهار، ۱۹-۳۴.

روح بخشان، آ.، کلانتری، ب.، ۱۳۹۵، تثبیت خاک رس با آهک و پودر ضایعات سنگی، نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۴۸، شماره ۴، زمستان، ۴۲۹-۴۳۸.

فروغی اصل، ع.، نوظهور، س.، ۱۳۹۶، بررسی خواص مکانیکی بتن خاک اره‌ای، فصلنامه آنالیز سازه-زلزله، دوره ۱۴، شماره ۲، تابستان، ۱-۱۳.

نشریه شماره ۲۳۴، ۱۳۹۰، آئین نامه روسازی آسفالتی راههای ایران، معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی، دفتر نظام فنی و اجرایی، وزارت راه و شهرسازی، تهران، ایران.

ASTM D421-85, 1985. Dry Preparation of Soil Samples for Particle-Size Analysis and Determination of Soil Constants, Annual book of ASTM standards, (reapproved 1998), 1985.

ASTM D422-63, 1963. Standard Test Method for particle-Size Analysis of Soils", Annual book of ASTM standards (reapproved 1998), 1963.

ASTM D 4318-95a, 1995. Standard test method for liquid limit, plastic limit and plasticity index for soils, Annual book of ASTM standards, 1995.

ASTM D 854-02, 2002. Standard test method for specific gravity of soil solids by water pycnometer, Annual book of ASTM standards, 2002.

ASTM-D 698-00, 2000. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12,400 ft-lbf/ft$^3$ (600 kN-m/m$^3$))", Annual book of ASTM standards, 2000.

ASTM-D 2166/D2166M-13, 2013. Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soils, Annual book of ASTM standards, 2013.

ASTM-D 3080-98, 1998. Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained condition, Annual book of ASTM standards, 1998.

ASTM D2435-11, 2011. Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading, Annual book of ASTM standards, 2011.

ASTM-D 1883-02. Standard test method for CBR (California Bearing Ratio) of laboratory-compacted soils, (ASTM International, West Conshohocken, PA, United States, 2002).

FHWA, 2017, Ground modification methods references manual, Vol. 1 and Vol. 2, U.s. Depart. Of Trans. Feder. High. Admin.

Gana, A. J., and Tabat, B. J., 2017, Stabilization of Clay Soil with C ement and Sawdust Ash, CARD International Journal of Engineering and Emerging Scientific Discovery, Vol.2, No.3, pp.1-27.

Ilori, A. O., and Udo, E. A., 2015, Investigation of Geotechnical Properties of a Lateritic Soil with Saw Dust Ash, IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering, Vol.12, No. 1, pp.11-14.

Kale, R. Y., Chaudhari, K., Bhadange, K., Chune, V., Kadu, G. and Tidke, A., 2019, Effect of Saw dust ash and lime on expansive soil, International Research Journal of Engineering and Technology, Vol.6, No.4, pp.3916-3921.

Khan, S. and Khan, H., 2015, Improvement of mechanical properties by waste sawdust ash addition into soil, Electronic Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 20, pp.1901-1914.

Olubayode, S. A., Olateju, O. T., Awokola, O. S., Dare, E. O., Akinwamide, J. T. and Eshiett, I. M., 2015, Engineering Properties of Sawdust Modified Clay Soil, International Journal of Pure & Applied Bioscience, Vol. 3, No. 5, pp. 35-41.

Okunade, E. A., 2008, The Effect of Wood Ash and Sawdust Admixtures on the Engineering Properties of a Burnt Laterite-Clay Brick, Journal of Applied Science, Vol.8, No.6, pp.1042-1048.

Otoko, G. R., and Honest, B. K., 2014, Stablization of Nigerian Deltaic Laterites with Saw Dust Ash, International Journal of scientific research and management, Vol.2, No.8, pp. 1287–1292.

Owamah, H. I., Atikpo, E., Oluwatuyi, O. E., and Oluwatomisin, A. M., 2017, Geotechnical Properties of Clayey Soil Stabilized with Cement-Sawdust Ash for Highway Construction, Journal of Applied Scienc Environment Management, Vol.21, No.7, pp. 1378–1381.

Quadri, H. A., Abiola, O. S., Odunfa, S. O. and Azeez, J. O., 2019, Application and strength development of subgrade material stablized with calcium carbide waste in flexible pavement construction, Vol.2, No.2, pp.55-65.

Wajid Ali, B., Gupta, K. and Jha, J. N., 2016, Strength behavior of clayey soil stabilized with saw dust ash, International Journal of Geo- engineering, Vol.7, No.18, pp. 2-9.