



Improvement of divergent clay soil using waste materials: fly ash, rice husk ash and lime

Morteza Mobalegh¹

Abstract

With the industrialization of production, industrial by-products are being produced on a large scale; As a result, they have created risks for the environment. The direct disposal of these waste materials such as fly ash, stone powder, construction material waste and agricultural waste has created potential threats to the ecosystem and the existence of urgent solutions is felt in this field. One of the appropriate solutions is to use these waste materials as infrastructure improvers or to add them to cement stabilizing mixtures. In the present study, compaction and resistance properties of soil improved with various waste materials such as lime, fly ash and rice husk ash have been investigated. The results of this research state that this waste material has significantly improved the engineering properties of the soil.

Keywords: Soil improvement, waste industrial materials, maximum dry weight, Atterberg range, unlimited compressive strength.

¹ Master's degree in geotechnical engineering, Shahid Rajaei University, Tehran, Iran



به سازی خاک رسی واگرا با استفاده از مصالح زائد:

خاکستر بادی، خاکستر پوسته ی برنج و آهک

مرتضی مبلّغ^۱

چکیده

با صنعتی شدن تولیدات، زائدات جانبی صنعتی در مقیاس بزرگی در حال تولید هستند؛ در نتیجه مخاطراتی برای محیط زیست به وجود نشان داده اند. دفع مستقیم این مواد زائد مثل خاکستر بادی، پودر سنگ ها، زائدات مصالح ساختمانی و زائدات کشاورزی تهدیدات بالقوه ای را برای اکوسیستم پدیدار ساخته است و وجود راه حل های فوری در این حوزه احساس می شود. یکی از راهکارهای مناسب، استفاده از این مصالح زائد به عنوان بهبوددهنده زیربناها یا اضافه شدن به مخلوط های تثبیت کننده سیمانی است. در مطالعه حاضر، خصوصیات تراکمی و مقاومتی خاک بهبود یافته با مصالح زائد گوناگونی مثل آهک، خاکستر بادی و خاکستر پوسته ی برنج بررسی شده است. نتایج حاصل از این پژوهش بیان می کند که این مصالح زائد خصوصیات مهندسی خاک را به طور قابل ملاحظه ای بهبود داده است. واژگان کلیدی: به سازی خاک، مصالح صنعتی زائد، وزن خشک حداکثر، حدود آتربرج، مقاومت فشاری محدود نشده.

^۱ دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی ژئوتکنیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

امروزه به علت گسترش بناها و زیرساخت‌ها زمین مناسب برای پیشبرد اهداف در حال کاهش است، از این رو مهندسان به ناچار سازه‌ها را روی خاک‌های ضعیف می‌سازند. برای افزایش ظرفیت باربری خاک و مصالح افزودنی روش‌های مختلفی به کار گرفته شده است. یکی از این روش‌ها بهبود ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک ناپایدار با استفاده از مصالح پوزولانی و پرکننده است. در این روش که تثبیت خاک نیز نامیده می‌شود، خصوصیات ژئوتکنیکی خاک ضعیف برای اهداف مختلف، اصلاح یا بهبود می‌یابد. از خاک تثبیت شده با افزودنی‌ها می‌توان در جاده‌ها، فرودگاه‌ها و سایر فعالیت‌های عمرانی استفاده کرد. در سال‌های گذشته به علت افزایش تقاضا در بخش‌های عمرانی و پیشرفت تکنولوژی، مصالح افزودنی مختلفی برای تثبیت خاک به وجود آمده است. این مصالح می‌توانند از منابع زائدات طبیعی یا صنعتی تامین شوند. زائدات کشاورزی (خاکستر پوسته‌ی برنج^۱، خاکستر تفاله نیشکر^۲، پوسته تخم مرغ^۳)، خاکستر بادی^۴، سرباره گرانوله شده کوره بلند^۵، پودر سنگ مرمر^۶، زائدات پلاستیک، سیمان پرتلند، آهک، ماسه، زائدات شیشه، باکتری و زائدات ساخت و ساز عمرانی از جمله این مصالح هستند. همچنین از مصالح الیافی مثل الیاف پلی پروپیلن، الیاف جوت و الیاف پوست نارگیل نیز می‌توان برای بهسازی و تثبیت خاک استفاده کرد. (Sharma, 2021) در سمت مقابل، توسعه صنایع نقش کلیدی در رشد اقتصادی هر کشور ایفا می‌کند اما یکی از اثرات منفی رشد صنایع مختلف، تولیدات جانبی صنعتی و مسائل مربوط به دفع آن‌ها است که می‌تواند تأثیراتی منفی بر محیط زیست داشته باشد. به طور کلی، در صورتی که ضایعات به طور استاندارد بازیافت نشوند، به طور مستقیم در محیط زیست انباشته می‌شوند و از طریق ورود به مسیرهای آبی باعث آلودگی محیط زیست خواهند شد. بنابراین، انباشت ضایعات، خطری جدی برای محیط زیست قلمداد می‌شود و محققان باید راه حل‌های مناسبی برای رفع این مشکل ارائه دهند. یکی از راه‌های مناسب، استفاده از مصالح زائد صنعت ساخت و ساز است که می‌توان از آن‌ها در مصالح سیمانی و تثبیت خاک‌های مسئله‌دار نیز استفاده کرد. از مزایای استفاده از مصالح زائد در بهسازی خاک مسئله‌دار می‌توان به حفظ منابع طبیعی با کاهش انباشت‌های صنعتی و مقرون به صرفه بودن آن اشاره کرد. (Bibak; et al. 2020) در مطالعه حاضر، برای انجام این کار به استفاده از مصالح گوناگونی مانند FA، RHA و آهک اشاره شده و خصوصیات تراکمی و مقاومتی خاک بهبود یافته نیز بحث می‌شود.

¹ Rice hush ash (RHA)

² Bagasse ash

³ Chicken eggshell

⁴ Fly ash (FA)

⁵ Ground granulated blast furnace slag (GGBFS)

⁶ Marble powder (MP)

۲. پیشینه‌ی تحقیق

خاکستر پسته‌ی برنج (RHA) یک مواد افزودنی است که می‌تواند رفتار ژئوتکنیکی خاک را بهبود ببخشد. با افزایش مقدار RHA در خاک، به علت سطح ویژه بالا جذب آب برای فرایند هیدراتاسیون و در نتیجه رطوبت بهینه افزایش می‌یابد. از طرفی به دلیل کلوخه شدن ذرات رس، حداکثر وزن مخصوص خشک کاهش می‌یابد. با اضافه کردن ۱۲٪ خاکستر پسته‌ی برنج، به علت واکنش‌های رخ داده در ذرات خاک مقادیر نسبت باربری کالیفرنیا^۱ (CBR) و مقاومت فشاری محدود نشده^۲ (UCS) به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش پیدا می‌کند. (Sharma, 2021)

اصلاح خاک به وسیله‌ی آهک به ویژه در خاک‌های CL، موجب افزایش درصد رطوبت بهینه، کاهش حداکثر وزن مخصوص خشک، کاهش پتانسیل تورم، افزایش مقاومت و افزایش مدول الاستیسیته می‌شود. تأثیر آهک بر خاک را می‌توان به دو گروه تثبیت کوتاه‌مدت و بلندمدت تقسیم‌بندی نمود. افزایش کارپذیری خاک جزء اصلاح کوتاه‌مدت است و مهم‌ترین عامل در مرحله ساخت اولیه است. افزایش مقاومت و دوام را می‌توان در نتیجه اثر بلندمدت آهک در نظر گرفت که در دوره‌ی عمل‌آوری و پس از آن رخ می‌دهد. (Thompson, 1965) از مسائل مهم دیگر در فرایند تثبیت، مقدار آهک مورد نیاز است. مقدار آهک مورد نیاز براساس درصد رس در خاک، خصوصیات خاک موردنظر و درجه تثبیت مطلوب متغیر می‌باشد. اگر هدف، فقط اصلاح خصوصیات خمیری خاک باشد افزودن آهک به میزان ۲٪ تا ۳٪ وزن خشک خاک کافی است. (Maher; et al. 2005) مقادیر بیشتر آهک برای انجام واکنش پوزولانی و افزایش مقاومت نیاز است. به منظور تثبیت، آهک به میزان ۵٪ تا ۱۰٪ وزن خشک خاک استفاده می‌شود. (Das, 1990) گروهی از پژوهشگران پیشنهاد کرده‌اند که حداقل آهک مورد نیاز برای تثبیت باید به اندازه‌ای باشد که بتواند $PH=12$ را تامین کند. (Yildiz, 2012) همچنین آهک باعث افزایش PH خاک می‌شود. با افزایش خاصیت قلیایی خاک، سیلیکا و آلومینای آزاد شده با کلسیم موجود در آهک وارد واکنش می‌شوند و کلسیم سیلیکات هیدرات (CSH) و کلسیم آلومینات هیدرات (CAH) تشکیل خواهد شد. این ترکیبات مانند لخته‌های یکپارچه باعث استحکام بیشتر ذرات خاک شده، در نتیجه خاک رس از حالت خمیری و تورمی شدید به رفتار دانه‌ای و نشست‌ناپذیر تبدیل خواهد شد. (Di Sante; et al. 2015)

خاکستر بادی از اکسیدهای سیلیسیم، آلومینیوم، آهن و کلسیم تشکیل شده است و امروزه از نیروگاه‌هایی که برای تولید برق از ذغال سنگ استفاده می‌کنند، به دست می‌آید. (Acosta; et al. 2003) از این رو خاکستر بادی نوعی از مصالح بلااستفاده صنعتی به حساب می‌آید و با توجه به قیمت پایین، مقرون به صرفه است. همچنین با اضافه کردن

¹ California Bearing Ratio

² Unconfined Compression Test



خاکستر بادی، میزان کلسیم محلول و فعالیت پوزولانی افزایش می‌یابد. اضافه کردن خاکستر بادی به صورت قابل توجهی مقدار pH را افزایش می‌دهد. با بالا رفتن pH، سیلیکای خاک از ساختمان ورقه‌ای چهاروجهی خود و آلومینای خاک از ساختمان ورقه‌ای می‌گیرد. (Acosta; et al. 2003)، (Cokca, 2003) و (Parabakar; et al. 2004) اشاره کرد که در گزارشات خود به افزایش CBR، ظرفیت باربری، زاویه اصطکاک داخلی، مقاومت برشی و کاهش درصد جذب آب خاک اشاره کرده‌اند.

در این پژوهش، از ترکیبات شامل خاکستر پوسته‌ی برنج (RHA)، خاکستر بادی (FA) و آهک به منظور بهبود خصوصیات ژئوتکنیکی خاک رسی واگرا استفاده شده است که در ادامه به بررسی تاثیر هر کدام پرداخته خواهد شد.

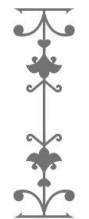
۳. مصالح و روش‌ها

۳-۱. خاک

خاک استفاده شده در این تحقیق از عمق نیم متری از سطح زمین و حومه شهر تهران جمع‌آوری شده است که خصوصیات آن در جدول ۱ نشان داده شده است. این خاک در طبقه‌بندی رس سیلیتی با واگرایی بالا (MH) قرار می‌گیرد.

جدول ۱: ویژگی‌های پایه خاک پایه مورد مطالعه

مشخصات	مقدار	استاندارد
حد روانی LL	۷۶/۸۹	ASTM D4318
حد خمیری PL	۴۰/۴۳	ASTM D4318
شاخص خمیری PI	۳۶/۴۶	ASTM D4318
چگالی ذرات جامد G_s	۲/۶۹	ASTM D854
طبقه بندی خاک (USCS)	MH	ASTM D2487
وزن مخصوص خشک حداکثر (Mg/m^3)	۱/۴۹۸	ASTM D698
درصد رطوبت بهینه	۲۶/۱	ASTM D698
شن (%)	۰	ASTM D6913
ماسه (%)	۱۴/۱۷	ASTM D6913
ریزدانه (%)	۸۵/۸۳	ASTM D6913



۳-۲. خاکستر پوسته‌ی برنج

خاکستر پوسته‌ی برنج از سوزاندن پوسته‌ی برنج که یکی از ضایعات جانبی فراوری برنج است به دست می‌آید. خصوصیات شیمیایی این محصول در جدول ۲ نشان داده شده است. مطابق نتایج به دست آمده، اکسید سیلیسیم (SiO_2) اکسید اصلی این افزودنی است.

جدول ۲: آنالیز شیمیایی XRF خاک پایه مورد مطالعه

درصد وزنی (w%)	ترکیب شیمیایی
۹۱/۱	SiO_2
۰/۴	Al_2O_3
۰/۴	Fe_2O_3
۰/۴	CaO
۰/۱	Na_2O
۰/۵	MgO
۴/۸	LOI
۲/۳	سایر ترکیبات

۳-۳. خاکستر بادی

خاکستر بادی (FA) از گازهای خروجی کوره‌های آتش با سوخت ذغال و سیلت غیر پلاستیک و ریز استخراج می‌شود که ترکیبی متفاوت براساس سوخت ذغال طبیعی است. خاکستر بادی جزء مصالح زائد در نیروگاه‌های حرارتی می‌باشد. این ماده تولید شده در اثر سوختن سوخت، به وسیله ته‌نشین‌کننده‌ی الکترواستاتیکی یا فیلتر کیسه‌ای (یا هر دو) که در محل گازهای خروجی کوره قرار دارد، جمع‌آوری می‌شود. پس از جمع‌آوری خاکسترها آن‌ها را تا زمانی که به محل دیگری منتقل شوند به صورت فشرده در انبار نگهداری می‌کنند. خاکستر بادی به عنوان یک پوزولان برای ارتقای مقاومت ترکیب خاک استفاده شده است. آنالیز XRF خاکستر بادی استفاده شده در این پژوهش نشان می‌دهد که این افزودنی دارای ۶۴/۰۸٪ اکسید سیلیسیم، ۲۰/۲۱٪ اکسید آلومینیوم و ۴/۱۷٪ اکسید آهن است. بنابراین، بیش از ۷۰٪ وزنی در این مصالح حاوی اکسیدهای پوزولانی ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) می‌باشد که طبق استاندارد ASTM C618، پوزولان‌های فعال محسوب می‌شوند.



۴-۳. آهک

در این تحقیق، از آهک فعال به منظور افزایش درجه قلیایی (pH) خاک استفاده شده است. مقدار pH آهک استفاده شده در ترکیبات ۱۲/۸۰ می باشد. جدول ۳ مقدار pH طرح مخلوط‌های این پژوهش را نشان می‌دهد.

جدول ۳: نتایج آزمایش pH برای طرح‌های مخلوط

مقدار pH	طرح مخلوط
۱۱/۶۳	Soil + 4% RHA + 4% FA + 2% L
۱۲/۴۲	Soil + 4% RHA + 4% FA + 4% L
۱۲/۶۸	Soil + 4% RHA + 4% FA + 6% L
۱۲/۷۰	Soil + 4% RHA + 4% FA + 8% L

۴. بررسی نتایج آزمایشگاهی

طبق استانداردهای مورد نیاز، آزمایش‌های حد روانی (LL)، حد خمیری (PL) و شاخص خمیری (PI) روی خاک پایه و خاک بهسازی شده انجام شد و نتایج این آزمایش‌ها در جدول ۴ نشان داده شده است. با افزایش مقدار RHA از ۰٪ به ۴٪، حد روانی از ۷۶/۸۹٪ به ۶۶٪/۸۰ کاهش می‌یابد. پس از این محدوده افزایش RHA باعث افزایش حد روانی شده است. به طور کلی، با افزایش ذرات RHA میان ذرات خاک، جذب آب افزایش یافته است. روند شکل گرفته در حد خمیری نیز مانند حد روانی است؛ به طوری که با افزایش RHA، حد روانی نیز افزایش یافته و در نتیجه شاخص خمیری کاهش یافته است. همچنین شاخص تورم آزاد تا ۶۵٪ افزایش یافته است اما با اضافه کردن خاکستر بادی و آهک این میزان تا ۳۰٪ کاهش داشته است. این موضوع می‌تواند به این علت باشد که ذرات FA و آهک خاصیت پوزولانی بیشتری نسبت به RHA دارند و باعث چسبندگی بیشتر ذرات و در نتیجه کاهش منافذ بین ذرات می‌شوند. این موضوع در شاخص خمیری نیز قابل رویت است و می‌تواند دلیلی بر کاهش مقادیر این شاخص باشد.

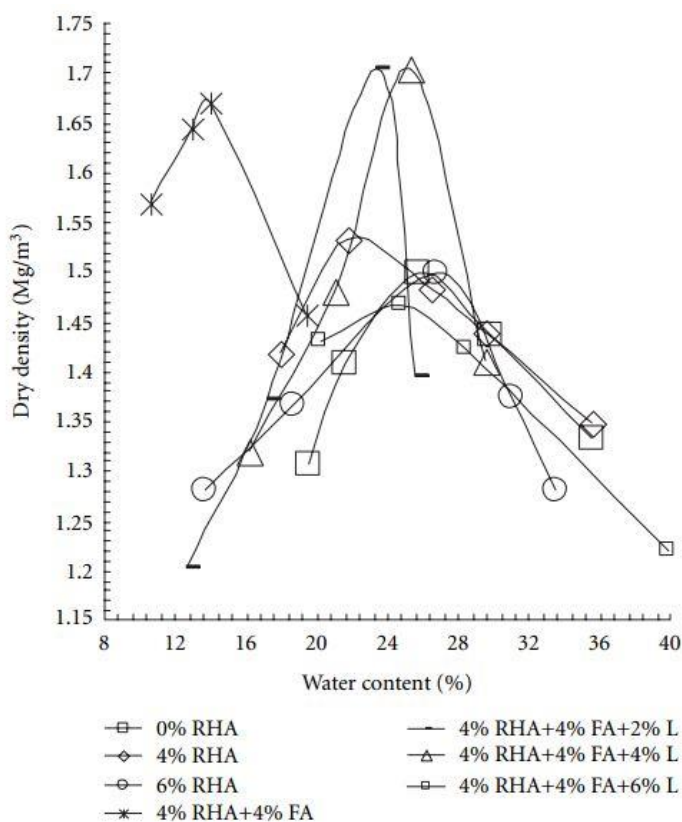
آزمایش تراکم استاندارد روی خاک پایه و خاک دارای افزودنی انجام شد. شکل ۱ نمودارهای تراکم را نشان می‌دهد. خصوصیات تراکمی حداکثر وزن مخصوص خشک^۱ (MDD) و رطوبت بهینه^۲ (OMC) نیز در جدول ۵ نشان داده شده است. باتوجه به نتایج، طرح مخلوط 4% RHA + 4% FA + 6% L به عنوان طرح مخلوط بهینه به دست آمده است.

¹ Maximum Dry Density

² Optimum Moisture Content

جدول ۴: تغییرات شاخص‌های حدود آتربرگ و تورم آزاد با اضافه کردن افزودنی‌ها

درصد افزودنی	LL (%)	PL (%)	PI (%)
2% RHA	۷۷/۵۱	۳۹/۱۶	۳۸/۳۵
4% RHA	۶۶/۸	۴۴/۳۶	۲۲/۴۴
6% RHA	۷۹/۱۴	۴۵/۶۶	۳۳/۴۸
8% RHA	۷۸/۳۸	۴۴/۰۵	۳۴/۳۳
10% RHA	۷۹/۱۴	۴۵/۶۶	۳۳/۴۸
12% RHA	۷۹/۸۶	۴۷/۸۲	۳۲/۰۴
4% RHA + 4% FA	۴۰/۲۹	۳۰/۳۷	۹/۹۲
4% RHA + 4% FA + 2% L	۶۳/۱۱	۳۹/۳۹	۲۳/۷۲
4% RHA + 4% FA + 4% L	۶۴/۷۵	۳۸/۰۲	۲۶/۷۳
4% RHA + 4% FA + 6% L	۵۶/۷۳	۳۷/۶۲	۱۹/۱۱



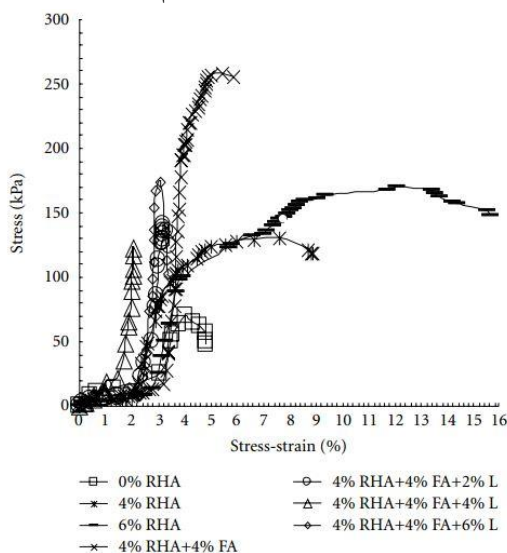
شکل ۱: منحنی تغییرات وزن مخصوص خشک و رطوبت بهینه با اضافه کردن افزودنی‌ها



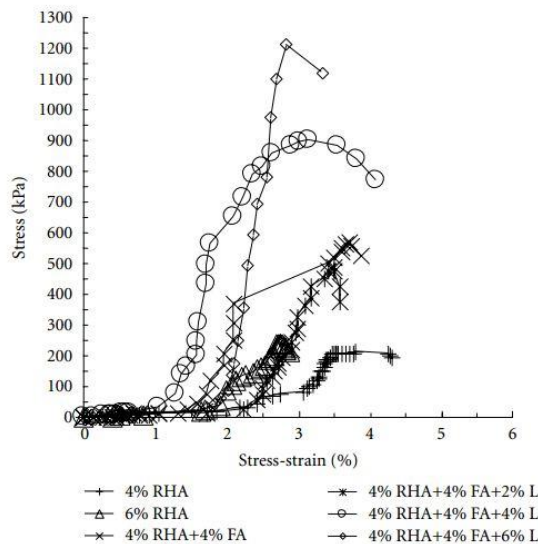
جدول ۵: تغییرات وزن مخصوص خشک و رطوبت بهینه

درصد افزودنی‌ها	MDD (Mg/m ³)	OMC (%)
4% RHA	۱/۵۳۲	۲۲/۵
6% RHA	۱/۴۹۹	۲۷
4% RHA + 4% FA	۱/۶۶	۱۳/۸
4% RHA + 4% FA + 2% L	۱/۷۱	۲۳/۳
4% RHA + 4% FA + 4% L	۱/۷۰۳	۲۵/۳
4% RHA + 4% FA + 6% L	۱/۴۷	۲۴/۸۱

آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده (UCS) در یک دوره ۷ روزه روی خاک پایه و خاک دارای افزودنی مطابق استاندارد ASTM D2166 انجام شد که نتایج آن در شکل‌های ۲ و ۳ و جدول ۶ نشان داده شده است. مطابق این نتایج، در روز اول عمل‌آوری، مقاومت فشاری نمونه‌ها با افزایش RHA از ۷۰ به ۱۶۹ کیلوپاسکال می‌رسد. اما با افزایش دوره عمل‌آوری به ۷ روز، مقاومت نمونه‌ها از ۷۰ به ۲۴۰ کیلوپاسکال می‌رسد که تاثیر مثبت عمل‌آوری دیده می‌شود. با اضافه کردن FA و آهک به مخلوط، در دوره یک روزه تاثیر قابل ملاحظه‌ای دیده نمی‌شود اما با گذشت ۷ روز، رشد قابل ملاحظه‌ای مقاومت فشاری نمونه‌ها قابل مشاهده است، به طوری که مقاومت نمونه‌ها از ۵۶۶ به ۱۲۰۴ کیلوپاسکال می‌رسد. این موضوع به این علت است که خاصیت پوزولانی FA و آهک با افزایش زمان عمل‌آوری فعال شده و باعث ایجاد لخته‌های C-S-H می‌شود، از این رو مقاومت نمونه‌ها نیز افزایش یافته است. این موضوع در کرنش نمونه‌ها نیز قابل مشاهده است. کرنش نمونه‌ها در دوره یک روزه تغییرات منظمی نداشته‌اند ولی با افزایش دوره عمل‌آوری، کرنش‌ها کاهش می‌یابد، در نتیجه جسم سخت‌تری به وجود می‌آید.



شکل ۲: منحنی تنش-کرنش برای نمونه‌های دوره ۱ روزه



شکل ۳: منحنی تنش-کرنش برای نمونه‌های دوره ۷ روزه

جدول ۶: نتایج آزمایش UCS نمونه‌ها

درصد افزودنی‌ها	دوره ۱ روزه		دوره ۷ روزه	
	UCS (kPa)	کرنش (%)	UCS (kPa)	کرنش (%)
0% RHA	۷۰	۴/۰۴	۷۰	۴/۰۴
4% RHA	۱۲۹	۷/۶	۲۱۰	۳/۷۸
6% RHA	۱۶۹	۱۲/۱	۲۴۰	۲/۶۸
4% RHA + 4% FA	۲۶۰	۵/۴۲	۵۶۶	۳/۷۱
4% RHA + 4% FA + 2% L	۱۴۱	۳/۱۹	۴۸۴	۳/۵
4% RHA + 4% FA + 4% L	۱۲۲	۲/۰۸	۸۹۹	۳/۱۵
4% RHA + 4% FA + 6% L	۱۷۴	۳/۰۹	۱۲۰۴	۲/۸۱



۵. نتیجه‌گیری

در این پژوهش به منظور بررسی تاثیر افزودنی‌های بازیافتی و بلااستفاده رروی خاک مسئله‌دار، افزودنی‌های خاکستر پوسته‌ی برنج (RHA)، خاکستر بادی (FA) و آهک به خاک اضافه شدند و آزمایش‌های ژئوتکنیکی مطابق با استانداردهای ASTM انجام شدند. مطابق مشاهدات صورت گرفته، نتایج زیر قابل استخراج است:

۱. از نتایج حدود آتربریگ و شاخص تورم آزاد می‌توان استنباط کرد که RHA با ۴٪ وزنی مقدار بهینه برای این افزودنی است.

۲. با افزایش RHA، مقاومت فشاری محدود نشده افزایش می‌یابد؛ به طوری که مقدار UCS خاک پایه در دوره ۱ روزه از ۷۰ به ۱۲۹ و ۱۶۹ کیلوپاسکال و در دوره ۷ روزه به ۲۱۰ و ۲۴۰ افزایش پیدا کرده است.

۳. با اضافه کردن ۴٪ وزنی FA به ۴٪ وزنی RHA، مقدار UCS نمونه‌ها در دوره ۱ روزه و ۷ روزه به ترتیب به ۲۶۰ و ۵۶۶ کیلوپاسکال افزایش پیدا کرده است.

۴. با اضافه کردن ۲٪ وزنی آهک به مخلوط فوق، مقدار UCS در دوره کوتاه‌مدت کاهش پیدا کرده است ولی در دوره ۷ روزه باعث رشد مقاومت فشاری تا ۱۲۰۴ کیلوپاسکال شده است که تاثیر پوزولانی آهک در دوره بلندمدت را نشان می‌دهد.

۵. باتوجه به نتایج آزمایش UCS طرح مخلوط نهایی بهینه این پژوهش، خاکی دارای ۴٪ وزنی خاکستر پوسته‌ی برنج، ۴٪ وزنی خاکستر بادی و ۴٪ وزنی آهک به دست آمد.

ASTM, C. 618-19., 2019. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM_D2487, Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.

ASTM_D854, Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.

ASTM_D4318, Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.

ASTM_D698, Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.

ASTM_D2166, Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016.

Al-Rawas, A. A., Hago, A. W., & Al-Sarmi, H. (2005). Effect of lime, cement and Sarooj (artificial pozzolan) on the swelling potential of an expansive soil from Oman. *Building and environment*, 40(5), 681-687. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.08.028>

Acosta, H. A., Edil, T. B., & Benson, C. H. (2003). Soil stabilization and drying using fly ash. *Geo Engineering Rep*, 3.

Cokca, E. (2001). Use of class c fly ashes for the stabilization of an expansive soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127(7), 568-573. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2001\)127:7\(568\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2001)127:7(568))

Di Sante, M., Fratalocchi, E., Mazzieri, F. and Pasqualini, E. (2014). Time of reaction in a lime treated clayey soil and influence of curing conditions on its microstructure and behaviour. *Appl. Clay Sci.*, 99: 100-109. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2014.06.018>

Maher, M., Marshall, C., Harrison, F., & Baumgaertner, K. (2005). Context sensitive roadway surfacing selection guide (No. FHWA-CFL/TD-05-004). United States. Federal Highway Administration. Central Federal Lands Highway Division.

McKennon, J. T., Hains, N. L., & Hoffman, D. C. (1994). Method for stabilizing clay bearing soils by addition of silica and lime. Patent Cooperation Treaty (PCT), Patent Classification: C09K, 1(00).

Prabakar, J., Dendorkar, N., & Morchhale, R. K. (2004). Influence of fly ash on strength behavior of typical soils. *Construction and Building Materials*, 18(4) 263-267. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2003.11.003>

Sharma, A., & Sharma, R. K. (2021). Sub-grade characteristics of soil stabilized with agricultural waste, constructional waste, and lime. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 8 (3), 2473-2484. <https://doi.org/10.1007/s10064-020-02047-8>

Sezer, A., İnan, G., Yılmaz, H. R., & Ramyar, K. (2006). Utilization of a very high lime fly ash for improvement of Izmir clay. *Building and environment*, 41(2), 150-155. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.12.009>

Thompson, M. R. (1965). Shear strength and elastic properties of lime-soil mixtures.

Yıldız, M., & Soğancı, A. S. (2012). Effect of freezing and thawing on strength and permeability of lime-stabilized clays. *Scientia Iranica*, 19(4), 1013-1017. <https://doi.org/10.1016/j.scient.2012.06.003>

