

Investigating the effect of reed plant ash and lime on soil stabilization of forest roads (Case study: Darab Kola-Sari)

Majid Lotfalian^{*1}, Alireza Bozorgi², Mehran Nasiri³, Somaye Karamirad⁴

1. Corresponding Author, Professor, Dept. of Forestry, Faculty of Natural Resources, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Sari, Iran. E-mail: mloftalian@sanru.ac.ir
2. M.Sc. Graduate in Forest Engineering Sciences, Faculty of Natural Resources, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Sari, Iran. E-mail: a_r_bozorgi@yahoo.com
3. Assistant Prof., Dept. of Forestry, Faculty of Natural Resources, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Sari, Iran. E-mail: m.nasiri@sanru.ac.ir
4. Ph.D. Graduate in Forest Engineering Sciences, Faculty of Natural Resources, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Sari, Iran. E-mail: somaye.karamirad@yahoo.com

Article Info

Article type:

Full Length Research Paper

Article history:

Received: 04.12.2024

Revised: 06.20.2024

Accepted: 07.04.2024

Keywords:

CBR,
Curing time,
Lime,
Pozzolanic reaction

ABSTRACT

Background and Objectives: In the Hyrcanian forests, the presence of fine-grained clayey soils presents considerable challenges for construction endeavors, particularly road building projects. These soils exhibit a propensity to swell, leading to instability in road surfaces and consequent pavement degradation. The adverse technical attributes of fine-grained soils, encompassing factors such as plasticity, low permeability, weak strength, fluctuations in pore water pressure, volumetric alterations, textural nuances, chemical composition, and grain structure, engender intricate engineering complexities. Soil stabilization emerges as a pivotal solution to ameliorate the swelling tendencies inherent in such soils. This process entails the incorporation of natural or synthetic additives to bolster the mechanical characteristics of the soil. Cost-effective and easily accessible materials like lime and plant waste serve as practical agents for soil stabilization, offering a sustainable approach to enhancing soil properties and mitigating the challenges posed by fine-grained clayey soils in construction projects within the Hyrcanian forests.

Materials and Methods: This study focused on enhancing roadbed soil properties within the educational and research Forest of Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources - Darabkala. A fixed 3% hydrated lime content, along with varying proportions of reed plant ash derived from *Phragmites australis* (3%, 6%, 9%, and 12%), was incorporated into the soil. Subsequent to this soil treatment, a series of comprehensive soil mechanics tests were carried out, including Atterberg limits assessment, standard compaction tests, California Bearing Ratio (CBR) evaluations, and uniaxial compressive strength (UCS) tests. These tests were conducted in triplicate following the processing period to evaluate the impact of the additives on the mechanical properties of the roadbed soil.

Results: The findings demonstrate a reduction in the liquid limit and plasticity index, alongside an increase in the plastic limit of the soil following the addition of reed ash. The maximum dry unit weight of the samples exhibited a decrease with the incorporation of reed ash, ranging from 14.52 kN/m³ as the highest to 11.97 kN/m³ as the lowest in the sample containing 3% lime and 12% reed ash. Values of the CBR test

displayed a progressive increase from 4.9% to 9.7% in the soil sample containing 3% lime and 12% reed ash. The results of the uniaxial compressive strength tests conducted over three durations (7, 14, and 28 days) indicate that the highest compressive strength of 2.6 kg/cm² was achieved in the sample with 3% lime and 6% reed ash after 28 days.

Conclusion: The study concludes that reed ash serves as an effective pozzolanic material for stabilizing forest road subsoils in the research area. Optimal stabilization of the clay subsoil was achieved with a mixture comprising 3% lime and 6% reed ash, applied over a period of 28 days. This blend proved to be instrumental in enhancing the mechanical properties of the roadbed soil, suggesting its viability for sustainable road construction practices in similar environments.

Cite this article: Lotfalian, Majid, Bozorgi, Alireza, Nasiri, Mehran, Karamirad, Somaye. 2024. Investigating the effect of reed plant ash and lime on soil stabilization of forest roads (Case study: Darab Kola-Sari). *Journal of Wood and Forest Science and Technology*, 31 (2), 91-110.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/JWFST.2024.22313.2058

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

بررسی تأثیر خاکستر گیاه نی و آهک در تثبیت خاک جاده‌های جنگلی (مطالعه موردی: جنگل دارابکلا - ساری)

مجید لطفعلیان^{۱*}، علیرضا بزرگی^۲، مهران نصیری^۳، سمیه کرمی‌راد^۴

۱. نویسنده مسئول، استاد گروه جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران.
رایانامه: mlotfalian@sanru.ac.ir
۲. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد علوم مهندسی جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران.
رایانامه: a_r_bozorgi@yahoo.com
۳. استادیار گروه جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران.
رایانامه: m.nasiri@sanru.ac.ir
۴. دانش‌آموخته دکتری علوم مهندسی جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران.
رایانامه: somaye.karamirad@yahoo.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی- پژوهشی	سابقه و هدف: در جنگل‌های هیرکانی خاک‌های ریزدانه رس‌دار به دلیل تورم‌پذیر بودن مشکلات زیادی در پروژه‌های ساختمانی به‌ویژه جاده‌سازی ایجاد کرده‌اند و باعث ناپایداری بستر راه و در نتیجه خرابی روسازی شده‌اند. خاک‌های ریزدانه به دلیل خواص فنی نامطلوب، به‌ویژه خواص پلاستیکی، نفوذپذیری کم، مقاومت کم، تغییر فشار آب منفذی، تغییر در حجم، بافت، خواص شیمیایی و ساختار دانه مشکل‌ساز هستند و ممکن است مشکلات مهندسی پیچیده‌ای را برای ساخت جاده‌های جنگلی ایجاد کنند. یکی از روش‌های بهبود خصوصیات تورمی خاک، تثبیت خاک می‌باشد. تثبیت خاک عبارت است از استفاده از مواد افزودنی طبیعی یا مصنوعی به منظور بهبود خصوصیات مکانیکی خاک. آهک و ضایعات گیاهان، به عنوان موادی ارزان‌قیمت، در دسترس و با کاربرد آسان هستند.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۲۴ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۳/۰۳/۳۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۱۴	
واژه‌های کلیدی: آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا، آهک، زمان عمل‌آوری، واکنش پوزولانی	مواد و روش‌ها: در این پژوهش مقدار ثابت سه درصد آهک هیدراته به همراه خاکستر گیاه نی از گونه <i>Phragmites australis</i> با نسبت اختلاط سه، شش، نه و دوازده درصد به خاک بستر جاده منطقه مورد مطالعه واقع در جنگل آموزشی و پژوهشی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری-دارابکلا اضافه گردید و سپس آزمایش‌های مکانیک خاک شامل: حدود اتر برگ، آزمایش تراکم استاندارد، آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا و آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوره پس از طی دوره عمل‌آوری در سه تکرار انجام پذیرفت.

یافته‌ها: نتایج نشان می‌دهد حد روانی و شاخص خمیری کاهش و حد خمیری خاک افزایش یافت. مقدار حداکثر وزن مخصوص خشک نمونه‌ها با افزایش مقدار خاکستر گیاه نی سیر نزولی یافت و بیش‌ترین مقدار $14/52 \text{ KN/m}^3$ در خاک مورد مطالعه و کم‌ترین مقدار KN/m^3 ۱۱/۹۷ در نمونه خاک با سه درصد آهک و ۱۲ درصد خاکستر گیاه نی ثبت شد. در آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا یک‌روند افزایشی از $4/9$ درصد در خاک مورد مطالعه تا $9/7$ درصد در نمونه خاک حاوی سه درصد آهک و ۱۲ درصد خاکستر گیاه نی ثبت شد. نتیجه آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوره در سه دوره زمانی ۷، ۱۴ و ۲۸ روز بر روی نمونه‌ها نشان می‌دهد بیش‌ترین مقدار مقاومت فشاری تک‌محوره به میزان $2/6 \text{ Kg/cm}^2$ در نمونه حاوی سه درصد آهک و شش درصد خاکستر گیاه نی پس از طی زمان ۲۸ روز حاصل شد.

نتیجه‌گیری: بر اساس یافته‌های پژوهش پیشرو نتیجه گرفته شد که از خاکستر گیاه نی به‌عنوان یک ماده پوزولانی مناسب، جهت تثبیت خاک بستر جاده‌های جنگلی منطقه مورد مطالعه می‌توان استفاده نمود و نسبت سه درصد آهک و شش درصد خاکستر بازمان عمل‌آوری ۲۸ روز را برای تثبیت خاک رس بستر جاده‌های جنگلی منطقه مورد مطالعه پیشنهاد شد.

استناد: لطفعلیان، مجید، بزرگی، علیرضا، نصیری، مهران، کرمی‌راد، سمیه (۱۴۰۳). بررسی تأثیر خاکستر گیاه نی و آهک در تثبیت خاک جاده‌های جنگلی (مطالعه موردی: جنگل دارابکلا-ساری). نشریه پژوهش‌های علوم و فناوری چوب و جنگل، ۳۱ (۲)، ۹۱-۱۱۰.

DOI: 10.22069/JWFST.2024.22313.2058



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

جاده‌های جنگلی دسترسی به قسمت‌های مختلف جنگل، حمل و نقل، نیروی کار، محصولات و خدمات را ممکن می‌سازند. ویژگی‌های خاک شاخص‌های مهمی در برآورد هزینه‌های ساخت و نگهداری جاده‌های جنگلی و پیش‌بینی اثرات منفی زیست‌محیطی جاده‌های جنگلی می‌باشند (۱ و ۲). در جنگل‌های هیرکانی خاک‌های ریزدانه رس‌دار به دلیل تورم‌پذیر بودن مشکلات زیادی در پروژه‌های ساختمانی به‌ویژه در جاده‌سازی ایجاد کرده‌اند و باعث ناپایداری بستر راه و در نتیجه خرابی روسازی شده‌اند (۳). در این راستا، خاک‌های ریزدانه به دلیل خواص فنی نامطلوب، به‌ویژه خواص پلاستیکی، نفوذپذیری کم، مقاومت کم، تغییر فشار آب منفذی، تغییر در حجم، بافت، خواص شیمیایی و ساختار دانه مشکل‌ساز هستند و ممکن است مشکلات مهندسی پیچیده‌ای را برای ساخت جاده‌های جنگلی ایجاد کنند (۴ و ۵). خاک‌های رسی که در مناطق جنگلی متداول هستند زمانی که تحت رطوبت کم‌تر از رطوبت بهینه قرار می‌گیرند، فشار زیادی را تحمل می‌کنند اما با افزایش رطوبت مقاومت آن‌ها به میزان قابل‌توجهی کاهش می‌یابد و تغییر شکل بیش‌تری در خاک ایجاد می‌شود و در نهایت پایداری خاک از بین می‌رود (۶ و ۷). برای تثبیت خاک، شناخت تثبیت‌کننده‌ها و آگاهی از واکنش آن‌ها، نحوه عملکرد و محدودیت‌های آن‌ها مهم است که به تصمیم‌گیری در مورد بهترین تثبیت‌کننده و روش تثبیت خاک کمک می‌کند (۸). برای ساخت جاده بر روی آن‌ها، باید خواص مکانیکی آن‌ها را تغییر داد و آن‌ها را تثبیت کرد. از جمله روش‌های سنتی تثبیت خاک‌های رسی استفاده از آهک است (۹). آهک قدیمی‌ترین ماده شیمیایی

برای تثبیت خاک است (۱۰) که علاوه بر بهبود خصوصیات مهندسی خاک، اقتصادی نیز می‌باشد (۱۱ و ۱۲). آهک با تغییر در ظرفیت تبادل کاتیون، کربناته شدن و واکنش‌های پوزولانی موجب تثبیت خاک‌های رسی می‌شود (۱۳). با اضافه کردن ۲ تا ۸ درصد آهک، رطوبت بهینه، حد انقباض و مقاومت خاک افزایش یافته و از طرفی حد روانی، حداکثر دانسیته خشک، خواص خمیری خاک و پتانسیل تورم نیز کاهش نشان می‌دهد (۱۰). هم‌چنین موجب افزایش مقاومت خاک جنگلی می‌شود (۱۴). امروزه تکنیک‌های تثبیت خاک به‌طور چشمگیری پیشرفت داشته که از آن جمله استفاده از خاکستر می‌باشد.

افزودن خاکستر تا سقف ۲۰ درصد وزنی خاک می‌تواند در جهت تثبیت تورم‌زایی خاک مؤثر واقع شود. خاکسترها به‌دلیل اندازه کوچکشان، موجب تأثیر در خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی خاک در یک زمان مشخص می‌شوند (۱۵). استفاده از ضایعات محصولات کشاورزی به‌عنوان خاکستر مانند خاکستر پوسته برنج، خاکستر برگ ذرت و هم‌چنین خاکستر چوب علاوه بر هزینه پایین در تثبیت خاک نقش مهمی دارند. از آن‌جا که در پیکره گیاهان خانواده‌های گندمیان، دم‌اسیان و نخل‌ها به‌ویژه در محل بندها حدود ۶۰-۷۰ درصد سیلیس بی‌شکل (SiO_2) وجود دارد که می‌توان غالب آن را در کوره تحت شرایط دمایی حدود ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد به‌صورت خاکستر استحصال نمود (۱۶ و ۱۷). استفاده از ترکیبات سیلیس‌دار برای بهبود رفتار خاک به این دلیل اهمیت دارد که این عنصر یکی از معروف‌ترین موادی است که نقش مهمی در بروز خواص پوزولانی و چسبندگی ذرات خاک دارد (۱۸ و ۱۹). پوزولان‌ها مواد سیلیسی یا سیلیسی-آلومینی هستند که به‌تنهایی فاقد ارزش

بهرام‌نیا واقع در استان گلستان انجام دادند. نتایج نشان داد که افزودن ترکیبات مختلف خاکستر نی و نانو رس به خاک سبب کاهش حد روانی، افزایش حد خمیری و کاهش شاخص خمیری خاک شد. همچنین، با افزایش درصد وزنی مواد افزودنی مذکور، رطوبت بهینه افزایش یافت و حداکثر تراکم خشک خاک کم شد. مقاومت فشاری نامحدود و آزمون نسبت باربری کالیفرنیا CBR خاک تا تیمار شش درصد خاکستر و یک و نیم درصد نانو رس به‌طور فراوانی افزایش یافت. به‌این‌ترتیب، تیمار شش درصد خاکستر و یک و نیم درصد نانو رس با زمان عمل‌آوری ۲۸ روز برای تثبیت خاک رس منطقه مورد مطالعه پیشنهاد شد (۲۳). کریمی و همکاران (۲۰۱۸) مطالعه‌ای در مورد استفاده از خاکستر باگاس نیشکر و آهک برای تثبیت خاک‌های رس انجام دادند. نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش نشان می‌دهد که با افزایش مقدار خاکستر باگاس نیشکر و آهک به خاک رس، وزن واحد حجم خشک کاهش و رطوبت بهینه افزایش‌یافته است. ترکیب ۸ درصدی خاکستر باگاس نیشکر با خاک رس، باعث افزایش ۹۲ درصدی مقاومت خاک شده است (۲۵). حیدری و همکاران (۲۰۱۸) پژوهشی با موضوع تأثیر اختلاط خاکستر ساقه ذرت (*Zea mays L.*) با خاک رس تورم‌پذیر و زمان عمل‌آوری آن بر ویژگی‌های مکانیکی خاک راه‌های جنگلی در سری دو طرح جنگلداری دکتر بهرام‌نیا واقع در استان گلستان انجام دادند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که به‌دلیل خواص پوزولانی خاکستر ساقه ذرت می‌توان از آن در مقدار بهینه پنج درصد و زمان عمل‌آوری ۱۴ روز برای بهبود خواص مکانیکی خاک‌های رسی تورم‌پذیر در زیرسازی راه‌های جنگلی استفاده نمود (۱۹). کریم و همکاران (۲۰۱۵) بر روی خاک نرم از استان *Maysa* در

چسبانندگی بوده اما در اندازه بسیار ریز در مجاورت رطوبت طی واکنش شیمیایی با کلسیم هیدروکسید و آهک موجود در خاک ترکیبات سیلیکات کلسیم با خواص سیمانی ایجاد می‌کنند (۲۰). شریفی تشنیزی و همکاران (۲۰۲۳) در مطالعه‌ای نمونه خاکی با خمیری بالا و تورم‌پذیر را با خاکستر برنج (۲۰-۵ درصد) و گچ (۶-۲ درصد) در زمان‌های ۷، ۱۵ و ۳۰ روز را تیمار کردند. نتایج نشان داد که افزودن گچ و خاکستر برنج حداکثر وزن واحد خشک خاک رس را کاهش و رطوبت بهینه آن را افزایش می‌دهد. همچنین مقاومت فشاری بعد از ۳۰ روز و ۱۵ درصد خاکستر برنج و ۶ درصد گچ به‌طور چشمگیری افزایش نشان می‌دهد (۲۱). زیواری و همکاران (۲۰۲۳) از ترکیب خاکستر برنج و آهک در خاک لوس در استان گلستان به نسبت ۴:۲ و در ترکیب‌های ۲/۵، ۷/۵، ۱۰ و ۱۲/۵ درصد در خاک خشک استفاده کردند. نتایج نشان داد که افزایش خاکستر برنج و آهک موجب افزایش مقاومت فشاری در نسبت‌های مختلف می‌شود به‌طوری‌که با افزایش ۵ درصد ترکیب خاکستر برنج و آهک، مقاومت فشاری نیز ۵ درصد در ۲۸ روز افزایش می‌یابد (۲۲). گیاه نی از دیگر منابع مهم سیلیس بوده و خواص پوزولانی خوبی دارد (۲۳). این گیاه به‌دلیل خصوصیات جالب‌توجه مانند تکثیر آسان، رشد سریع و میزان تولید زیاد، دوره بهره‌برداری کوتاه‌مدت، تداوم داشتن موجودی و امکان کشت در اراضی باتلاقی می‌تواند به‌عنوان یک ماده ارزان، مناسب و تجدیدشونده مورد استفاده قرار گیرد (۲۴). پارساخو و رضائی‌مطلق (۲۰۱۸) پژوهشی با موضوع تأثیر اختلاط نانو رس و خاکستر ساقه نی گونه (*Phragmites australis Cav Trin. ex Steud*) در تثبیت بستر خاک ریزدانه راه‌های جنگلی بر روی خاک جاده‌های سری دو طرح جنگلداری دکتر

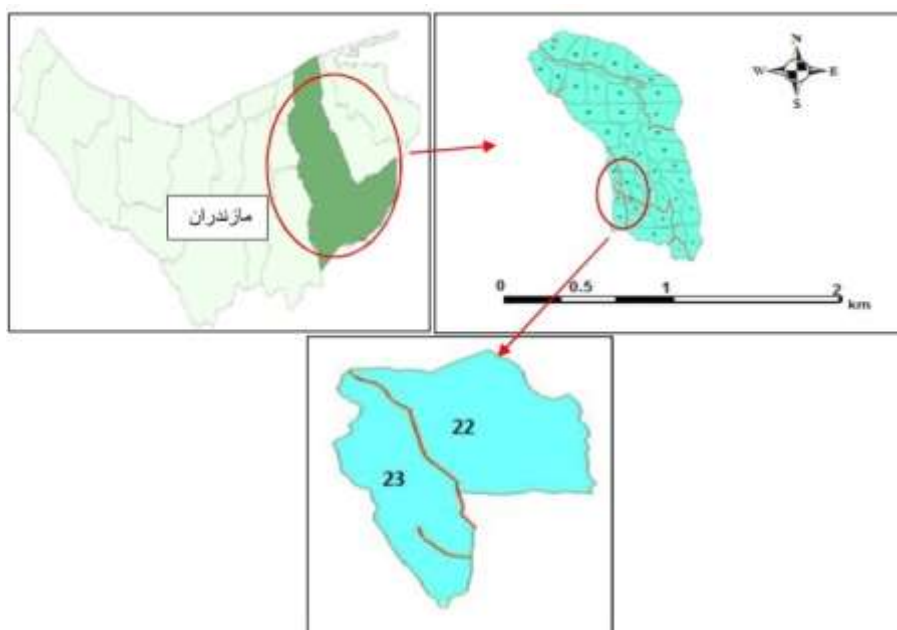
خاک رس، آهک و خاکستر ساقه نی به عنوان یک ماده پوزولانی برای تثبیت خاک ریزدانه بستر راه‌های جنگلی بهره گرفته شود. در همین راستا، بهترین زمان عمل‌آوری و درصد بهینه اختلاط این مواد با خاک ریزدانه تعیین شد.

مواد و روش‌ها

وضعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه: جنگل‌های دارابکلا در جنوب شرقی شهرستان ساری و در طول جغرافیایی ۵۲ درجه و ۱۴ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۲۸ دقیقه شمالی واقع شده است. میزان بارندگی سالیانه این حوزه بین ۷۵۰-۷۰۰ میلی‌متر گزارش شده است. سنگ مادر این منطقه آهکی و مارنی است و ژرفای خاک آن از عمیق تا نسبتاً عمیق، همراه با سنگ‌ریز و درشت مادری است و بر پایه روش دومارتن با ضریب خشکی ۳۴/۲۷ منطقه در اقلیم نیمه مرطوب جای می‌گیرد.

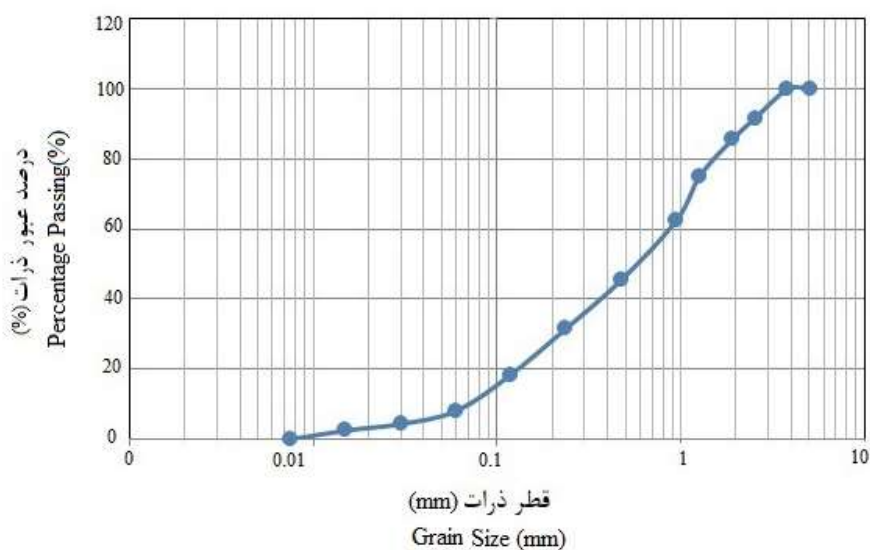
نمونه‌برداری خاک طبیعی: ابتدا ۱۰۰ متر از طول مسیر جاده جنگلی واقع در دانگ دوم بخش یک طرح جنگلداری دارابکلا که دربرگیرنده خاک رس تورم‌پذیر بود، به روش تصادفی- منظم و در فاصله‌های دو متر نمونه‌برداری شد. در هریک از فاصله‌ها، حدود دو کیلوگرم خاک از عمق ۲۰ سانتی‌متری (فاقد مواد آلی) تهیه و بلافاصله به آزمایشگاه مکانیک خاک منتقل شد. در مجموع، ۵۰ نمونه با وزن کل ۱۰۰ کیلوگرم تهیه شد (شکل ۱)، (۲۳ و ۲۷).

جنوب عراق مطالعاتی انجام دادند و درصدهای مختلف خاکستر نی به ترتیب افزایشی سه تا ۱۲ درصد به نمونه خاک طبیعی اضافه نمودند. مشخص شد با افزودن ۱۲ درصد خاکستر نی شاخص خمیری خاک طبیعی حدود ۲۲ درصد کاهش یافته و کاهش کلی در وزن واحد خشک خاک به وجود آمده و رطوبت بهینه به‌طورکلی با افزایش مقدار خاکستر نی افزایش یافت. افزایش بسیار زیادی در مقدار مقاومت فشاری تک‌محوری با حدود ۸۶ درصد و نسبت باربری کالیفرنیا حدود ۲۲۷ درصد به وجود آمد و در شاخص تراکم‌پذیری کاهش حاصل شد. نتیجه گرفته شد که خاکستر نی تثبیت‌کننده مؤثر برای بهبود خصوصیات ژئوتکنیکی نمونه‌های خاک نرم بوده و از این ماده می‌توان به‌عنوان پایدارکننده مناسب و مؤثر برای تثبیت خاک استفاده نمود (۲۶). صادق و همکاران (۲۰۱۵) از ترکیب خاکستر نیشکر و آهک هیدراته با نسبت‌های وزنی صفر، دو، چهار، شش و هشت درصد برای اصلاح خواص مکانیکی خاک لاتریت در کشور نیجریه استفاده کردند. نتایج بیانگر آن بود که حداکثر ظرفیت بارگذاری خاک (۴۳ درصد) و حداکثر مقاومت فشاری نامحدود (۶۹۸ کیلو نیوتن بر مترمربع) از ترکیب هشت درصد آهک و شش درصد خاکستر نیشکر به‌دست آمد (۲۷). تاکنون مطالعات روی خاصیت پوزولانی خاکستر گیاه نی به‌صورت آزمایشگاهی در کشور انجام شده است اما همراه با آهک به‌صورت عملیاتی در تثبیت بستر خاک جاده‌های جنگلی استفاده نشده است. بنابراین در پژوهش پیشرو سعی شد از اختلاط



شکل ۱- نقشه محل نمونه برداری خاک.

Figure 1. Map of soil sampling location.



شکل ۲- نمودار دانه بندی نمونه خاک مورد استفاده در پژوهش.

Figure 2. Graining diagram of the soil sample used in the research.

سانتی متری خرد گردیده. زمان برداشت گیاه نی فصل زمستان انتخاب گردید. به این علت که میزان درصد عناصر شیمیایی SiO_2 و K_2O برای خاکستر برداشت شده در فصل تابستان و زمستان به طور قابل توجهی متفاوت است. نی برداشت شده در زمستان

تهیه خاکستر و آماده سازی نمونه‌ها: در این پژوهش ابتدا محل رویش گیاه نی گونه *phragmites australis* در حاشیه رودخانه تجن ساری و کنار جاده ساری به قائم شهر شناسایی، سپس اقدام به برداشت و درو گردید. ساقه‌های نی به اندازه‌های حدود ۱۰

بالاترین مقدار اکسید سیلیسیم را نشان می‌دهد (۱۵).
 شکل ۳ تهیه خاکستر گیاه نی در کوره با دمای ۵۵۰
 درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد. جدول ۱ درصد
 مواد معدنی در نی خشک‌شده در دمای ۱۰۵ درجه
 سانتی‌گراد به مدت ۱۲ ساعت و درصد ترکیبات
 شیمیایی خاکستر نی سوزانده شده در دمای ۵۵۰
 درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد (۲۸ و ۲۹).



شکل ۳- تهیه خاکستر گیاه نی در کوره با دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد.

Figure 3. Preparation of reed plant ash in the furnace with a temperature of 550 degrees Celsius.

جدول ۱- درصد مواد معدنی در نی خشک‌شده و درصد ترکیبات شیمیایی خاکستر نی سوزانده شده.

Table 1. The percentage of minerals in dried reed and the percentage of chemical compounds in burnt reed.

میانگین Average		حدود Range		عناصر و ترکیبات Element and Component	
تابستان Summer	زمستان Winter	تابستان Summer	زمستان Winter		
46.5	47.5	6.1-47.1	47-48.3	C	درصد مواد معدنی در نی خشک‌شده در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۲ ساعت Elemental mass proportion of oven dry (at 105 °C) fuel reed,%
6.2	5.6	5.9-6.4	5.5-5.6	H	
40.7	43.3	39.7-42.2	42.8-43.8	O	
1.0	0.3	0.6-1.2	0.2-0.3	N	
0.2	0.04	0.12-0.45	0.03-0.09	S	
0.4	0.1	0.28-0.48	0.5-0.18	CL	
37.1	77.8	25.9-48.3	65.3-85.5	SiO ₂	درصد ترکیبات شیمیایی خاکستر نی سوزانده شده در دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد Chemical mass proportion of reed ash (at 550 °C)%
0.7	0.3	0.2-1.7	0.1-0.8	Fe ₂ O ₃	
0.6	0.6	0.1-1.1	0.1-1.7	Al ₂ O ₃	
6.8	4.4	4.0-11.5	3.1-7.3	CaO	
3.3	1.2	1.9-4.9	0.4-1.5	MgO	
3.6	3.3	0.87-11.0	2.0-9.1	Na ₂ O	
24.8	4.3	14.9-31.3	1.0-5.7	K ₂ O	
23.0	8.3	7.3-33.5	1.6-19.4	Other	

آهک هیدراته به همراه خاکستر گیاه نی با نسبت اختلاط سه، شش، نه و دوازده درصد به خاک بستر جاده منطقه مورد مطالعه اضافه گردید. در جدول ۳ نسبت اختلاط مصالح مصرفی نشان داده شده است.

آهک مصرفی در این پروژه، تولیدی شرکت مجتمع آهک اسپندار واقع در استان تهران، کیلومتر ۵ جاده فیروزکوه به قائم‌شهر می‌باشد. در جدول ۲ آنالیز شیمیایی این محصول که توسط این شرکت منتشر شده، آورده شده است. در این پژوهش مقدار ثابت سه درصد

جدول ۲- آنالیز شیمیایی آهک استفاده شده.

Table 2. Chemical analysis of used lime.

مقدار (درصد) Range (%)	ترکیبات Component
90-93	کلسیم هیدروکسید $Ca(OH)_2$
68.2-70.5	اکسید کلسیم CaO
0.5<	اکسید منیزیم MgO
0.3<	سیلیس SiO_2
0.2<	اکسید آلومینوم Al_2O_3
0.15<	اکسید آهن Fe_2O_3
0.02<	فسفات P_2O_5
0.02<	اکسید منگنز MnO
0.1<	اکسید سدیم Na_2O
0.05<	اکسید پتاسیم K_2O
0.1<	رطوبت Wet

جدول ۳- نسبت اختلاط مصالح مصرفی.

Table 3. Percentage of mixing of consumables.

حروف اختصاری Index	درصد اختلاط Mix design
S	خاک Soil
S+3L	خاک + ۳ درصد آهک Soil+3% Lime
S+3L+3RA	خاک + ۳ درصد آهک + ۳ درصد خاکستر Soil+3% Lime+3% Ash
S+3L+6 RA	خاک + ۳ درصد آهک + ۶ درصد خاکستر Soil+3% Lime+6% Ash
S+3L+9 RA	خاک + ۳ درصد آهک + ۹ درصد خاکستر Soil+3% Lime+9% Ash
S+3L+12 RA	خاک + ۳ درصد آهک + ۱۲ درصد خاکستر Soil+3% Lime+12% Ash

در این رابطه، W_2 وزن ظرف و خاک مرطوب W_3 وزن ظرف و خاک خشک W_1 وزن ظرف خالی (همگی به گرم) می‌باشد.

ب- آزمایش حد روانی: میزان رطوبت (برحسب درصد) برای حالتی که خاک چسبنده از حالت روان (مایع گونه) به یک حالت پلاستیک گونه و خمیری می‌رسد را حد روانی خاک می‌گویند که از رابطه ۲ به دست آمد.

$$LL = W_N * \left[\frac{N}{25} \right]^{0.121} \quad (2)$$

در این رابطه، N تعداد ضرباتی است که در آن $12/7$ میلی‌متر از طول شیار ایجاد شده خاک درون ظرف کاساگرانده بسته می‌شود و W درصد رطوبتی است که در آن این طول از شیار بسته می‌شود (۳۱). شاخص خمیری از تفاضل حد روانی از حد خمیری (رابطه ۳) به دست آمد.

$$PI = LL - PL \quad (3)$$

آزمایش تراکم استاندارد: برای انجام این آزمایش نمونه‌ها از الک نمره چهار عبور داده شدند. آزمایش طبق روش استاندارد ASTM D698 انجام شد. حداکثر تراکم خشک خاک از رابطه ۴ به دست آمد. سپس منحنی تغییرات γ_d نسبت به درصد رطوبت رسم شد.

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1 + \frac{w\%}{100}} \quad (4)$$

که در آن، γ حداکثر وزن مخصوص مرطوب، γ_d وزن مخصوص خشک حداکثر.

آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا: برای انجام این آزمایش نمونه‌های خاک از الک نمره چهار عبور داده شدند.

آزمایش‌های مکانیک خاک: خاک نمونه‌برداری شده به روش تقسیم‌بندی متحده (یونیفاید) و آشتو طبقه‌بندی گردید. برای آماده‌سازی نمونه‌ها، خاک برداشت‌شده در آزمایشگاه از وجود ریشه و برگ درختان تمیز، کلوخ‌های بزرگ در هاون خرد شد؛ سپس با توجه به نوع آزمایش به وسیله سرنند با سایز مختلف الک شد. آنگاه خاک الک شده با مقدار ثابت ۳ درصد آهک هیدراته از کارخانه آهک صنعتی البرز و خاکستر گیاه نی از گونه *phragmites australis* به نسبت‌های ۳، ۶، ۹ و ۱۲ درصد ترکیب شد. تغییرات ایجادشده در خاک در نتیجه افزودن خاکستر و آهک، آنی نبوده و فرآیند رساندن آن به تمام ذرات خاک به زمان معینی نیاز دارد که به آن دوره عمل‌آوری می‌گویند و مدت آن حداقل چهار هفته است. در این پژوهش برای بررسی اثر اختلاط خاک از آزمایش‌های حدود آتربرگ (حد روانی و خمیری)، تراکم استاندارد، نسبت باربری کالیفرنیا و مقاومت فشاری تک‌محوره در سه تکرار پس از طی زمان عمل‌آوری استفاده شد.

آزمایش حدود آتربرگ: برای انجام این آزمایش نمونه‌های خاک از الک نمره ۴۰ عبور داده شدند (۳۰). سپس آزمایش حد روانی و حد خمیری طبق روش استاندارد ASTM D4318 انجام شد و نهایتاً شاخص خمیری برای هر یک از نمونه‌ها تعیین گردید.

الف- آزمایش حد خمیری: حد خمیری عبارت است از درصد رطوبتی که در آن یک خاک چسبنده از حالت خمیری به حالت نیمه‌جامد تغییر می‌کند. در آزمایشگاه حد خمیری درصد رطوبتی است که در آن خاک در اثر فیلته شدن وقتی که قطرش $3/18$ میلی‌متر می‌شود شروع به ترک خوردن می‌کند.

رطوبت خاک از رابطه ۱ به دست می‌آید.

$$W (\%) = \frac{W_2 - W_3}{W_3 - W_1} (100) \quad (1)$$

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi \quad (6)$$

که در آن، τ مقدار تنش برشی برحسب کیلو نیوتن بر مترمربع است که سبب گسیختگی خاک می‌گردد، c چسبندگی خاک برحسب کیلو نیوتن بر مترمربع، σ مقدار تنش مؤثر نرمال برحسب کیلونیوتن بر مترمربع و φ زاویه اصطکاک داخلی خاک برحسب درجه است (۲۸ و ۳۰).

در جدول ۴ نتایج انجام آزمایش‌های مکانیک خاک بر روی خاک منطقه مورد مطالعه آورده شده است. بدین ترتیب برخی از خواص خاک طبیعی مشخص گردید. هم‌چنین در شکل ۲ نمودار دانه‌بندی خاک مورد مطالعه نشان داده شده است.

آزمایش طبق روش استاندارد ASTM D698 انجام شد. نسبت باربری کالیفرنیا از رابطه ۵ به دست آمد.

$$CBR (\%) = \frac{100 * \text{بار استفاده شده در آزمایش}}{\text{بار استاندارد}} \quad (5)$$

آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوره: برای انجام این آزمایش نمونه‌های خاک از الک نمره چهار عبور داده شدند.

آزمایش طبق روش استاندارد ASTM D2166 انجام شد. نمونه‌ها با مقداری آب مخلوط شده و با ضربات چکش لاستیکی درون قالب مخصوص متراکم شدند. سپس نمونه‌ها از درون قالب خارج شده و درون دستگاه تک‌محوری قرار گرفتند. برای محاسبه مقاومت برشی از رابطه کولمب استفاده گردید (رابطه ۶).

جدول ۴- برخی از خواص خاک طبیعی.

Table 4. Properties of the natural soil.

مقدار	آزمون‌های آزمایشگاهی
Rate	Laboratory tests
52	آزمایش حد روانی Liquid limit (%)
32.34	آزمایش حد خمیری Plastic limit (%)
19.66	شاخص خمیری Plasticity index (%)
22.34	رطوبت بهینه OMC (%)
14.52	حداکثر وزن مخصوص خشک MDD (KN/m ³)
1.23	آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوره UCS (KN/m ²)
4.9	آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا CBR saturated (%)
CH	طبقه‌بندی متحد UNIFID classification
A-7-6	طبقه‌بندی آشتو ASHTOO classification

کاهش می‌یابد (۴). با کاهش شاخص پلاستیسیته، بارهای الکتریکی روی سطح ذرات و درصد ذرات کوچک کاهش می‌یابد. از آنجایی که درصد این نوع ذرات کوچک و پولک مانند تأثیر به‌سزایی در تراکم‌پذیری خاک دارد، این حد مایع است که نشان‌دهنده تراکم‌پذیری خاک است (۳۳ و ۳۴). کریم و همکاران (۲۰۱۵) نشان دادند که با افزودن مقدار بیش‌تری خاکستر ساقه نی به خاک رس، حد روانی و حد خمیری افزایش یافته و شاخص خمیری کاهش یافت. بیش‌ترین مقدار خاکستر نی افزوده شده به خاک ۱۲ درصد بود که سبب افزایش حد روانی از ۴۵ درصد به ۵۰/۵ درصد، حد خمیری از ۲۵ تا ۳۴/۸ درصد شد و هم‌چنین شاخص خمیری از ۲۰ به ۱۵/۷ درصد کاهش یافت. آن‌ها کاهش خواص خمیری خاک را به دگرگون شدن طبیعت خاک و گرانول شدن خاکدانه‌ها به واسطه تولید ژل‌های سیمانی شکل سیلیکات کلسیم هیدراته نسبت دادند (۲۶). اوحدی و همکاران (۲۰۱۶) بروز واکنش‌های کوتاه‌مدت شامل تبادل کاتیونی و لخته یا کلوخه‌شدن (فولوکوله‌شدن) و کربناسیون را در کاهش سریع خواص خمیری دخیل می‌دانند. در پژوهش پیش رو با افزودن مقدار ثابت سه درصد آهک و خاکستر گیاه نی به نسبت‌های سه تا ۱۲ درصد حد روانی به مقدار ۸۰ درصد به‌طور میانگین کاهش یافت. بدین‌ترتیب بیش‌ترین مقدار شاخص خمیری ۱۹/۶۶ درصد در خاک شاهد و کم‌ترین مقدار ۰/۷۵ درصد در خاک حاوی سه درصد آهک و سه درصد خاکستری گیاه نی مشاهده شد (۳۵). نتیجه آزمایش حد روانی این پژوهش با نتیجه آزمایش حد روانی در پژوهش‌های حیدری و همکاران (۲۰۱۸) و زیواری و همکاران (۲۰۲۳) مغایرت داشته و با نتیجه آزمایش حد روانی پژوهش پارساخو و رضائی‌مطلق (۲۰۱۸) و موسوی و همکاران (۱۴۰۲) هم‌خوانی دارد (۱۹، ۲۲، ۲۳، ۲۶). دلیل کاهش حد خمیری و حد روانی واکنش تبادل

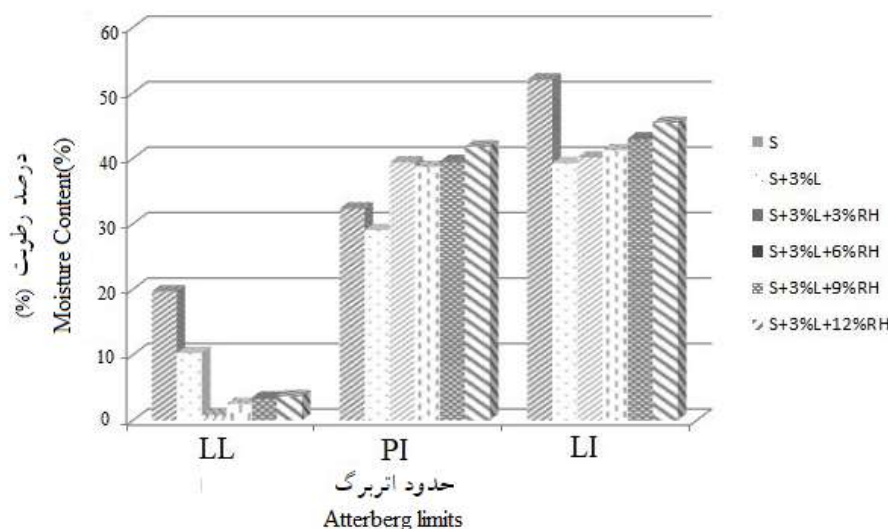
تجزیه و تحلیل آماری: پس از جمع‌آوری اطلاعات جهت انجام آنالیز آماری، از نرم‌افزار IBM SPSS Statistics 25 استفاده شد. به‌منظور مقایسه تیمارها با توجه به میزان تأثیرگذاری مواد تثبیت‌کننده بر نتایج هر یک از آزمایش‌ها، تجزیه واریانس و از آزمون توکی به‌منظور مقایسه میانگین استفاده شد.

نتایج و بحث

حدود آتربرگ شاخص مناسبی جهت عملکرد خاک‌های اصلاح‌شده توسط تثبیت‌کننده‌ها را نشان می‌دهد که می‌تواند درک بهتری از عملکرد و ساختار خاک ارائه دهد (۳۲). نتایج آزمایش حد روانی، حد خمیری و شاخص خمیری نمونه خاک شاهد و تیمارها نشان می‌دهد حد روانی به‌طور میانگین ۸۰ درصد کاهش یافته و حد خمیری نمونه‌ها به‌طور میانگین ۱۱۶ درصد افزایش یافته است. بدین‌ترتیب بیش‌ترین مقدار شاخص خمیری به مقدار ۱۹/۶۶ درصد در خاک شاهد و کم‌ترین مقدار شاخص خمیری به مقدار ۰/۷۵ درصد در خاک حاوی سه درصد آهک و سه درصد خاکستری گیاه نی حاصل شد. نتایج حدود آتربرگ کاهش حد روانی، افزایش حد خمیری و در نتیجه کاهش شاخص خمیری را بعد از اضافه کردن خاکستر نی نشان می‌دهد. پارساخو و رضائی‌مطلق (۲۰۱۸) که نشان دادند که با افزودن ترکیبات مختلف خاکستر نی و نانو رس به خاک، میانگین کل تغییرات به‌صورت کاهش ۲۲ درصدی حد روانی و افزایش ۱۳۶ درصدی حد خمیری بود تغییرات به وجود آمده در حدود آتربرگ سبب کاهش شاخص خمیری به مقدار ۷۴ درصد و بهبود خواص مکانیکی خاک شده است. کم‌ترین مقدار شاخص خمیری برای خاک تیمار شده با شش درصد خاکستر و ۱/۵ درصد نانو رس و در زمان عمل‌آوری ۲۸ روز به ثبت رسید (۲۳). در واقع هرچه میزان محتوای رس خاک کم‌تر شود، میزان شاخص خمیری خاک نیز

می‌شود. این امر موجب افزایش جاذبه بین ذرات رس خاک و در نتیجه تغییر بافت خاک می‌شود. به طوری که در اثر این فعل و انفعالات خاک به سمت کلوخه شدن پیش می‌رود. افزودن آهک به خاک سبب واکنش گرمایی می‌شود که این گرما سبب کاهش رطوبت و در نهایت کاهش حد خمیری خاک می‌شود. هم‌چنین افزودن آهک به خاک سبب افزایش pH خاک می‌شود که این افزایش به انجام واکنش کمک می‌کند. ظرفیت تبادل یونی در خاک بستگی به pH محیط دارد با افزایش pH این ظرفیت افزایش می‌یابد.

یونی ناشی از ترکیب خاک با آهک می‌باشد که موجب کاهش خصوصیات خمیری خاک و در نهایت افزایش کارایی خاک می‌شود (۳۷). به نظر می‌رسد با توجه انجام سریع آزمایش‌های حدود اتربرگ (حد روانی و خمیری) بلافاصله پس از اضافه نمودن آب، واکنش‌های انجام گرفته شامل واکنش‌های کوتاه مدت میان خاک با آهک و پوزولان می‌باشد. یکی از واکنش‌های کوتاه مدت، واکنش تبادل یونی بین یون‌های Ca^{++} و یون‌های منفی خاک می‌باشد. به این ترتیب که یون‌های موجود در آهک جایگزین یون‌های مثبت با ظرفیت کم‌تر موجود در خاک



شکل ۴- مقایسه نتایج آزمایش حد روانی، حد خمیری و شاخص خمیری بین نمونه خاک شاهد و تیمارها.

Figure 4. Comparison of the test results of the LL, PL and PI between the control soil sample and the treatments.

جدول ۵- تجزیه و تحلیل آماری نمونه خاک شاهد و تیمارها.

Table 5. Statistical analysis of control soil sample and treatments.

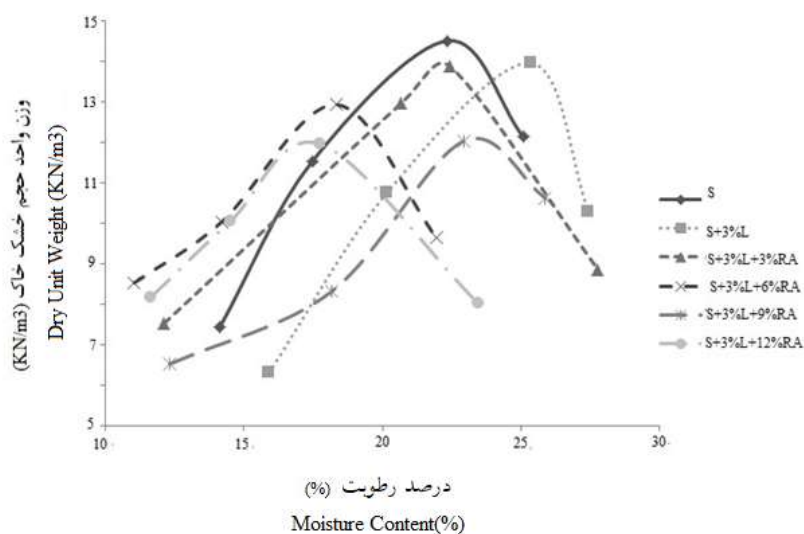
P	S+3L+12RH	S+3L+9RH	S+3L+6RH	S+3L+3RH	S+3L	S	متغیر Variable
934.038*	3.67 ^c	3.4b ^c	2.51 ^b	0.75 ^a	10.26 ^d	19.66 ^f	Plastic index شاخص خمیری
367.171*	17.73 ^a	22.92 ^b	18.33 ^a	22.42 ^b	25.33 ^c	22.34 ^b	OMC رطوبت بهینه
89.59*	11.97 ^a	12.04 ^a	12.94 ^b	13.89 ^c	13.97 ^c	14.52 ^d	MDD حداکثر وزن مخصوص خشک
8.182*	9.7 ^b	9.47 ^b	8.36 ^b	7.133 ^{ab}	7.097 ^{ab}	4.9 ^a	CBR نسبت باربری کالیفرنیا
1.052 ^{ns}	1.48 ^a	1.83 ^a	2.053 ^a	1.98 ^a	1.67 ^a	1.23 ^a	UCS مقاومت فشاری تک محوره

* اختلاف معنی دار در سطح ۰/۰۵، ^{ns} اختلاف غیر معنی دار

* significant difference at the level of -0.05, ^{ns} non-significant difference

هیدراتاسیون میان خاک و آهک نیاز به آب بیش‌تری دارد و در نتیجه رطوبت بهینه خاک با افزایش میزان آهک افزایش می‌یابد (۳۸، ۳۹). در پژوهشی زیواری و همکاران (۲۰۲۳) کاهش میزان دانسیته خشک را به دلیل واکنش‌های پوزولانیک میان خاکستر پوسته برنج و خاک و تشکیل مواد سیمانی بیش‌تر در خاک تثبیت‌شده می‌داند (۲۲). نتایج پژوهش پیش‌رو درباره حداکثر تراکم خشک و رطوبت بهینه با نتایج پژوهش‌های پارساخو و رضائی‌مطلق (۲۰۱۸) و حیدری و همکاران (۲۰۱۸) درباره حداکثر وزن مخصوص خشک خاک تطبیق داشته ولی درباره رطوبت بهینه با این پژوهش‌ها مطابقت ندارد (۱۹، ۲۳). در پژوهش پیش‌رو به نظر می‌رسد با توجه به کوتاه بودن زمان انجام آزمایش تراکم بلافاصله پس از اضافه نمودن آب، واکنش‌های انجام‌گرفته کوتاه‌مدت بوده و واکنش‌های تبادل کاتیونی میان خاک با آهک و پوزولان می‌باشد، اضافه کردن آهک به خاک رس موجب لخته شدن ذرات خاک می‌گردد در اثر به وجود آمدن ذرات لخته شده عمل تراکم به وجود آمده و خاک سخت‌تر شده و همین عامل موجب می‌شود که ذرات برای جابجایی خود بر روی یکدیگر به آب بیش‌تری احتیاج داشته باشند. در نتیجه این امر رطوبت بهینه در مخلوط اصلاح‌شده با آهک افزایش می‌یابد. از طرفی افزایش فضای خالی میان ذرات خاک بر اثر تشکیل مصالح سمنت شده نیز سبب کاهش وزن مخصوص خشک می‌گردد. به دلیل وزن حجمی کم‌تر آب نسبت به مصالح مصرفی، حداکثر دانسیته خشک نیز کاهش می‌یابد (۴۰).

جدول تجزیه واریانس (جدول ۵)، نتیجه آنالیز آماری تأثیر آهک هیدراته و خاکستر گیاه نی بر رطوبت بهینه (ω_{opt}) و حداکثر دانسیته خشک (γ_{dmax}) بین نمونه‌ها معنی‌دار نشان می‌دهد. با انجام آزمایش تراکم استاندارد رطوبت بهینه در نمونه خاک شاهد مقدار ۲۲/۳۴ درصد تعیین شد. در ادامه با ثابت نگه‌داشتن مقدار سه درصد آهک و افزودن خاکستر گیاه نی به مقادیر سه، شش، نه و دوازده درصد، رطوبت بهینه در سه تیمار خاک و سه درصد آهک ($\text{Soil}+3\% \text{ Lime}$) درصد خاکستر ($\text{Soil}+3\% \text{ Lime}+3\% \text{ Ash}$) و خاک با سه درصد آهک و نه درصد خاکستر ($\text{Soil}+3\% \text{ Lime}+9\% \text{ Ash}$)، نسبت به رطوبت بهینه خاک شاهد افزایش یافت و در دو تیمار خاک و سه درصد آهک و شش درصد خاکستر ($\text{Soil}+3\% \text{ Lime}+6\% \text{ Ash}$) و خاک و سه درصد آهک و ۱۲ درصد خاکستر ($\text{Soil}+3\% \text{ Lime}+12\% \text{ Ash}$) رطوبت بهینه، نسبت به رطوبت بهینه خاک شاهد کاهش یافت است. همچنین حداکثر وزن مخصوص خشک نمونه‌ها سیر نزولی یافت و از بیش‌ترین مقدار $14/52 \text{ KN/m}^3$ در خاک مورد مطالعه به کم‌ترین مقدار $11/97 \text{ KN/m}^3$ در نمونه خاک با سه درصد آهک و ۱۲ درصد خاکستر گیاه نی تقلیل یافت. در شکل ۵ مقدار تغییرات رطوبت بهینه و حداکثر وزن مخصوص خشک نشان داده شده است. در واقع با افزودن آهک و خاکستر، خاک کلسیمی شده و ذرات جمع می‌شوند که این موضوع موجب کاهش حداکثر وزن خشک خاک می‌شود. همچنین واکنش پوزولانی و

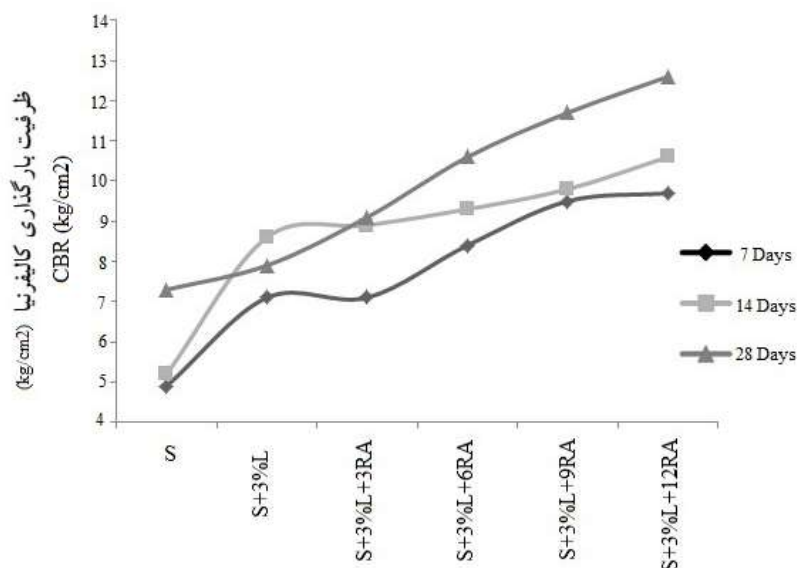


شکل ۵- نتایج آزمایش پراکتور استاندارد بر روی نمونه‌ها.

Figure 5. The results of the standard Proctor test on the samples.

خاکستر بادی تا ۲۰ درصد میزان CBR افزایش می‌یابد (۴۱). به نظر می‌رسد علت این روند افزایشی ناشی از واکنش‌های پوزولانی سیلیس، (SiO_2) از خاکستر نی با یون Ca^{++} از خاک برای تشکیل اجزای سیمانی $(C-S-H)$ و $(C-A-H)$ ، درون مخلوط خاکستر-خاک است که منجر به افزایش استحکام در طول زمان می‌شود (۴۲). بر اساس مطالعات پیشین، افزودن آهک به خاک موجب کلسیمی شدن خاک و جمع شدن ذرات می‌گردد که این موضوع سبب کاهش حداکثر وزن مخصوص خشک خاک می‌گردد. از طرفی برای انجام هیدراتاسیون و واکنش پوزولانی میان خاک و آهک به آب بیش‌تری نیاز است که این امر موجب افزایش رطوبت بهینه خاک با افزایش مقدار آهک می‌شود. بر اساس نتایج، با افزایش میزان آهک بیش‌تر از ۵ درصد، میزان حداکثر وزن واحد حجم خشک افزایش و رطوبت بهینه کاهش پیدا کرد که این امر نیز به دلیل اتمام واکنش‌دهنده‌ها در طول واکنش و در نهایت توقف واکنش پوزولانی می‌باشد (۳۸، ۳۹).

آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا با رطوبت بهینه پس از طی شصت روز در سه تکرار انجام پذیرفت. نتیجه آنالیز آماری آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا نشان می‌دهد که اختلاف معنی‌داری بین مقدار CBR تمامی نمونه‌ها وجود دارد. با انجام این آزمایش مقدار CBR در نمونه خاک شاهد ۴/۹ درصد برآورد گردید. افزودن مقدار ثابت سه درصد آهک در باقی نمونه‌ها باعث افزایش مقدار CBR به مقدار ۷/۱ درصد نمونه خاک و سه درصد آهک شد و از آن پس با افزایش مقدار خاکستر به نسبت‌های سه تا ۱۲ درصد، یک‌روند افزایشی برای مقدار CBR تا بیشینه ۹/۷ درصد در نمونه خاک حاوی سه درصد آهک و ۱۲ درصد خاکستر گیاهی حاصل گردید. شکل ۶ نمودار تغییرات نسبت باربری کالیفرنیا نمونه‌ها را نشان می‌دهد. در پژوهش کریم و همکاران (۲۰۱۵) نشان می‌دهد این نسبت از ۴/۹ درصد در خاک شاهد به ۱۶ درصد در نمونه‌های تثبیت‌شده با ۱۲ درصد خاکستر نی افزایش‌یافته است (۲۶). بیات و بحرینیان (۱۳۹۹) در پژوهش خود دریافتند که با اضافه کردن آهک و

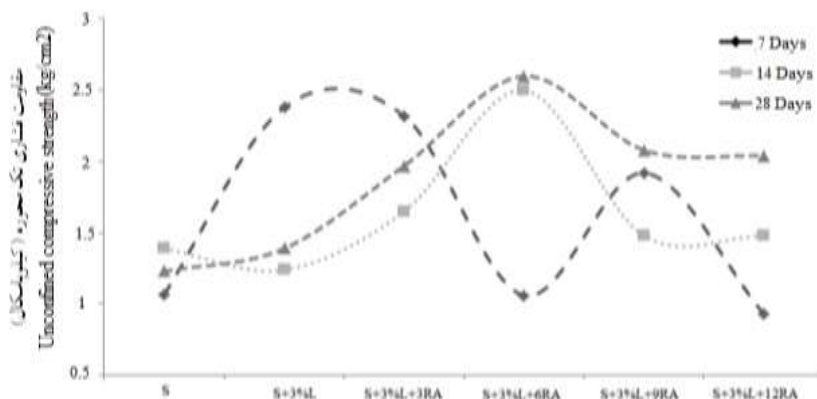


شکل ۶- نمودار تغییرات CBR نمونه‌ها پس از ۷، ۱۴ و ۲۸ روز.

Figure 6. Chart of changes of CBR samples after 7, 14 and 28 days.

با افزودن شش درصد خاکستر گیاه نی در بازه زمانی ۱۴ و ۲۸ روز به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است ولی از آن‌پس افزودن مقادیر بیش‌تر خاکستر سبب کاهش مقاومت فشاری خاک شده است. ضمن آن‌که افزایش زمان عمل‌آوری از ۱۴ به ۲۸ روز سبب افزایش مقاومت فشاری تک‌محوره خاک گردید. شکل ۷ مقایسه تغییرات مقاومت فشاری تک‌محوره در سه دوره زمانی هفت، ۱۴ و ۲۸ روز نشان می‌دهد.

آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوره در سه زمان عمل‌آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روز انجام شد؛ نتایج تجزیه تحلیل آماری نشان می‌دهد بین مقادیر حاصله از انجام آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوره بر روی نمونه‌ها در یک دوره یا زمان عمل‌آوری اختلاف معنی‌داری وجود ندارد ولی بین هریک از زمان‌های عمل‌آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روز تفاوت معنی‌داری وجود دارد. نتیجه انجام این آزمایش نشان داد که مقاومت فشاری تک‌محوره خاک



شکل ۷- مقایسه نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوره در سه دوره زمانی ۷، ۱۴ و ۲۸ روز بین نمونه خاک شاهد و تیمارها.

Figure 7. Comparison of uniaxial compressive strength test results in three time periods of 7, 14 and 28 days between control soil sample and treatments.

رضائی مطلق (۲۰۱۸) و حیدری و همکاران (۲۰۱۸) مطابقت دارد (۱۹، ۲۳).

نتیجه‌گیری کلی

به نظر می‌رسد پس از طی زمان ۱۴ روز واکنش پوزولانی در حال تکمیل شدن بوده و در ۲۸ روز پس از اختلاط مصالح و رسانیدن رطوبت نمونه‌ها به رطوبت بهینه بیش‌ترین استحکام و مقاومت حاصل شده است. به‌طورکلی بر اساس یافته‌های پژوهش پیشرو می‌توان تیمار سه درصد آهک و شش درصد خاکستر با زمان عمل‌آوری ۲۸ روز را برای تثبیت خاک رس منطقه مورد مطالعه پیشنهاد کرد.

نصیری و همکاران (۲۰۱۶)، پارساخو و رضائی مطلق (۲۰۱۸) و حیدری و همکاران (۲۰۱۸) در پژوهش‌های خود را در سه دوره عمل‌آوری هفت، ۱۴ و ۲۸ روز انجام دادند. آن‌ها دریافتند که با افزایش زمان عمل‌آوری، مقاومت خاک در اثر افزودن خاکسترهای محتوی سیلیس افزایش پیدا نموده است (۳، ۱۹، ۲۳). در پژوهش پیش رو نتیجه این آزمایش در سه دوره زمانی هفت، ۱۴ و ۲۸ روز نشان می‌دهد. بیشینه میزان مقاومت فشاری تک‌محوره در نمونه شش در صد خاکستر و سه درصد آهک پس از طی زمان ۱۴ و ۲۸ روز به ترتیب ۲/۵ و ۲/۶ kg/cm^3 به‌دست آمد که با نتایج مطالعات پارساخو و

منابع

1. Wang, L., Ok, Y. S., Tsang, D. C., Alessi, D. S., Rinklebe, J., Wang, H., Mašek, O., Hou, R., O'Connor, D., & Hou, D. (2020). New trends in biochar pyrolysis and modification strategies: Feedstock, pyrolysis conditions, sustainability concerns and implications for soil amendment. *Soil Use Management*. 36, 358-386.
2. Papa, I., Picchio, R., Lovrinčević, M., Janeš, D., Pentek, T., Validžić, D., Venanzi, R., & Duka, A. (2023). Factors affecting earthwork volume in forest road construction on steep Terrain. *Land*. 12, 400.
3. Nasiri, M., Lotfalian, M., Modarres, A., & Wu, W. (2016). Optimum utilization of rice husk ash for stabilization of subbase materials in construction and repair projects of forest roads. *Croatian J. of Forest Engineering*. 37 (2), 333-344.
4. Mousavi, F., Avatefi Hemmat, M., Abdi, E., & Norouzi, A. (2021). The effect of polymer materials on the stabilization of forest roadsubgrade. *International J. of Forest Engineering*. 32, 235-245.
5. Shirmohammadi, S., Ghaffarpour Jahromi, S., Payan, M., & Senetakis, K. (2021). Effect of lime stabilization and partial clinoptilolite zeolite replacement on the behavior of a silt-sized low-plasticity soil subjected to freezing-Thawing cycles. *Coatings*. 11, 994.
6. Nikonovas, T., Spessa, A., Doerr, S. H., Clay, G. D., & Mezbahuddin, S. (2020). Near-complete loss of fire-resistant primary tropical forest cover in Sumatra and Kalimantan. *Communications Earth & Environment*. 1, 65.
7. Mousavi, F., & Abdi, E. (2022). Unconfined Compression Strength of Polymer Stabilized Forest Soil Clay. *Geotechnical and Geological Engineering*. 40, 4095-4107.
8. Andavan, S., & Kumar, B. M. (2020). Case study on soil stabilization by using bitumen emulsions-A review. *Materials Today: Proceedings*. 22, 1200-1202.
9. Rangan, P. R., & Tumpu, M. (2021). Effect calcium hydroxide (traditionally called slaked lime) to stabilization of laterite soil. In Proceedings of the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 12-14 November 2021, Sanya, China, 7p.
10. Baldovino, J. D. J. A., Dos Santos Izzo, R. L., Moreira, E. B., & Rose, J. L. (2019). Optimizing the evolution of strength for lime-stabilized rammed soil. *J. of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 11 (4), 882-891.

11. Afrin, H. (2017). A review on different types soil stabilization techniques. *International J. of Transportation Engineering*. 3 (2), 19-24.
12. Onyelowe, K., Van, D. B., Igboayaka, C., Orji, F., & Ugwuanyi, H. (2019). Rheology of mechanical properties of soft soil and stabilization protocols in the developing countries-Nigeria. *Materials Science for Energy Technologies*. 2 (1), 8-14.
13. Baldovino, J. A., Moreira, E. B., Teixeira, W., Izzo, R. L., and Rose, J. L. (2018). Effects of lime addition on geotechnical properties of sedimentary soil in Curitiba, Brazil. *J. of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 10 (1), 188-194.
14. Thyagaraj, T., Rao, S. M., Sai Suresh, P., & Salini, U. (2012). Laboratory studies on stabilization of an expansive soil by lime precipitation technique. *J. of Materials in Civil Engineering*. 24 (8), 1067-1075.
15. Singh, K., Singh, J., & Kumar, S. (2018). A sustainable environmental study on corn cob ash subjected to elevated temperature. *Current World Environment*. 13 (1), 144-150
16. Rocha, G. S., de Carvalho Silva, C. H., Pitanga, H. N., de Mendonça, E. P. S., de Lima, D. C., & da Corte, G. D. (2020). Effect of lime on the mechanical response of a soil for use in unpaved forest roads. *Acta Scientiarum: Technology*. 42, 1806-1818.
17. Emmert, F., Pereira, R. S., Miguel, E. P., Mota, F. C. M., Angelo, H., do Vale, A. T., Machado, M. P. O., Nappo, M. E., & Martins, I. S. (2017). Improving geotechnical properties of a sand-clay soil by cement stabilization for base course in forest roads. *African J. of Agricultural Research*. 12 (30), 2475-2481.
18. Lindroos, A. J., Ryhti, K., Kaakkurivaara, T., Uusitalo, J., & Helmisaari, H. S. (2019). Leaching of heavy metals and barium from forest roads reinforced with fly ash. *Silva Fennica*. 53 (2), 46-61.
19. Heidari, A., Parsakhoo, A., Nasiri, M., & Habashi, H. (2018). Effect of the curing time and combination of corncob (*Zea mays* L.) ash with swelling clay on mechanical properties of soil in forest road. *J. of Wood and Forest Science and Technology*. 25 (3), 1-18. [In Persian]
20. Butt, W. A., Gupta, K., & Jha, J. N. (2016). Strength behavior of clays soil stabilized with saw dust ash. *International J. of GeoEngineering*. 7 (18), 1-9.
21. Sharifi Teshnizi, E., Mirzababaei, M., Karimiazar, J., Arjmandzadeh, R., & Mahmoudpardabad, K. (2023). Gypsum and rice husk ash for sustainable stabilization of forest road subgrade. *Quarterly J. of Engineering Geology and Hydrogeology*. 57, 11-26.
22. Zivari, A., Siavoshnia, M., & Rezaei, H. (2023). Effect of lime-rice husk ash on geotechnical properties of loess soil in Golestan province, Iran. *International J. of GeoEngineering*. 14 (20), 1-17.
23. Parsakhoo, A., & Rezaee Motlaq, A. (2018). Investigating the effect of the combination of nano-clay and reed ash (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. Ex Steud.) on stabilization of the fine aggregate earthy bed of forest roads. *J. of Wood and Technology*. 25, 319-330. [In Persian]
24. Nazerian, M., & Nouri Sadeghi, A. (2009). Investigating the chemical properties of reed leaves and stalks (*Phragmites australis*). 1th Conference on Reforming the Consumption Pattern Focusing on Natural Resources, Agriculture and Veterinary Medicine, 15-20 Nov. 2009, Zabol, 6p.
25. Karimi, A., Abbasi, N., & Siavash Nia, M. (2018). Use of sugarcane and lime bagasse ash to stabilize clay soils. *Iranian J. of Water and Soil Research*. 49 (1), 1-12. [In Persian]
26. Karim, H. H., Samueel, Z. W., & Ahmed, S. F. (2015). Geotechnical properties of soft clay soil stabilized by reed ashes. 2nd International Conference on Buildings, Construction and Environmental Engineering, 17-18 Oct. 2015, Lebanon, 5p.

27. Sadeeq, J. A., Ochebo, J., Salahudeen, A. B., & Tijjani, S. T. (2015). Effect of bagasse ash on lime stabilized Lateritic Soil. *J. of Civil Engineering*. 9 (2), 203-213.
28. American Society for Testing and Material (ASTM). (2002). Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils (D4318-05). Annual Books of ASTM Standard, Section 4, USA.
29. American Society for Testing and Material (ASTM). (2002). Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (D0698-07E01). Annual Books of ASTM Standard. Section 4, USA.
30. Atterberg, A. (1911). On the investigation of the physical properties of soils and on the plasticity of clays. *Internationale Mitteilungen für Bodenkunde*. 1, 10-43. [In German]
31. Bahari, M., & Shahnazari, A. (2015). Experimental study of the fine-grained earthen bed stabilization using nanoclay. *J. of Water and Soil Science*. 19 (72), 107-114. [In Persian]
32. Yadav, A. K., Gaurav, K., Kishor, R., & Suman, S. K. (2017). Stabilization of alluvial soil for subgrade using rice husk ash, sugarcane bagasse ash and cow dung ash for rural roads. *International J. of Pavement Research and Technology*. 10 (3), 254-261.
33. Bakhshizadeh, A., Khayat, N., & Horpibulsuk, S. (2022). Surface stabilization of clay using sodium alginate. *Case Studies in Construction Materials*. 16, 1-13.
34. Arab, M. G., Mousa, R., Gabr, A., Azam, A., El-Badawy, S., & Hassan, A. (2019). Resilient behavior of sodium alginate-treated cohesive soils for pavement applications. *J. of Materials in Civil Engineering*. 31 (1), 88-100.
35. Ohadi, O. R., Amiri, M., & Zanganeh, L. (2016). Microstructural evaluation of lime consumption and advancement of Posolanic soil reactions and regulated minerals with lime. *Scientific-Research J. of Civil Engineering*. 16 (1), 11-22. [In Persian]
36. Mousavi, F., Abdi, E., Mashayekhi, Z., Modaresi, M., & Janatbabaei, M. (2023). Investigating the effect of lime on the swelling characteristics of forest roads. *J. of Forest and Wood Products*. 76 (3), 207-216. [In Persian]
37. Amadi, A., & Okeiyi, A. (2017). Use of quick and hydrated lime in stabilization of lateritic soil: comparative analysis of laboratory data. *International J. of Geo-Engineering*. 8, 1-13.
38. Mohammadi, S. D., Nikoodel, M. R., & Golestani, A. (2012). Assessment of the Efficiency of Quicklime and Slaked Lime for Soil Improvement in Forests Containing Organic Materials. *Iranian J. of Geotechnical Engineering*. 5 (1), 67-78. [In Persian]
39. Saeed, K. A. H., Kassim, K. A., Yunus, N. Z. M., & Nur, H. (2013). Characterization of hydrated limestabilized brown kaolin clay. *International J. of Engineering Research & Technology*. 2 (11), 3722-3727.
40. Pashabavandpouri, M. A., & Jahangiri, S. (2015). Effect of nano silica on swelling, compaction and strength properties of clayey soil stabilized with lime. *J. of Applied Environmental and Biological Sciences*. 5 (7), 538-548. [In Persian]
41. Bayat, M., & Bahreinan, S. M. H. (2020). The effect of fly ash and lime on the geotechnical properties of sandy loam soil. *J. of the Engineering Geological Society of Iran*. 13 (2), 85-95.
42. Bischetti, G. B., De Cesare, G., Mickovski, S. B., Rauch, H. P., Schwarz, M., & Stangl, R. (2021). Design and temporal issues in Soil Bioengineering structures for the stabilization of shallow soil movements. *Ecological Engineering*. 169, 106-309.