

(OPEN ACCESS)

**The effect of biological and non-biological additives
on the mechanical strength of soil in forest roadbeds
(Case study: Dr. Bahramnia's Educational Research Forest)**

Zahra Aqababai¹, Aidin Parsakhoo^{*2}, Sättar Ezzati³, Aiub Rezaei Motlagh⁴

1. M.Sc. Student of Forest Development and Exploitation, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, I.R. Iran. E-mail: zahrag995@gmail.com
2. Corresponding Author, Associate Prof., Dept. of Forestry, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, I.R. Iran. E-mail: parsakhoo@gau.ac.ir
3. Assistant Prof., Dept. of Forestry, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, I.R. Iran. E-mail: sattar.ezzati@gau.ac.ir
4. Research Expert (Ph.D. of Forest Management), Forest Research Division, Research Institute of Forests and Rangelands, AREEO, Tehran, Iran. E-mail: aiubrezaee@yahoo.com

Article Info	ABSTRACT
Article type: Full Length Research Paper	Background and Objectives: Forest road bed soils often exhibit challenges such as high clay content, low bearing and shear strength, poor compact ability, and susceptibility to subsidence. Consequently, stabilizing and enhancing soil strength using additives has drawn considerable attention from researchers and road engineers. Moreover, the utilization of waste materials in soil stabilization has gained popularity due to its economic advantages.
Article history: Received: 05.18.2025 Revised: 08.25.2025 Accepted: 09.20.2025	
Keywords: Bioengineering, Biological and non-biological additives, CBR, Forest road, Plasticity index	Materials and Methods: The study was conducted in Series 1 of the Dr. Bahramnia's Educational-Research Forest. Initially, five thrust points containing fine-grained, swelling soil were prepared, and at least three samples (each weighing 50 kg) were collected from each point using a simple random method. To evaluate the effectiveness of the additives, soil samples were mixed with varying proportions (0%, 1%, 3%, 5%, 10%, 15%, and 20%) of straw and stubble, lime, and cement. Key geotechnical properties, including compaction characteristics, Atterberg limits, and compressive strength (CBR), were assessed for all samples. Compaction properties (maximum dry density and optimum moisture content) were determined via the Proctor test, Atterberg limits (liquid limit, plastic limit, and plasticity index) were measured using the Casagrande and plastic wick methods, and compressive strength (CBR) was evaluated with the California bearing ratio test.
	Results: Comparison of the average load-bearing capacity of treated soil samples indicated a significant increase with the addition of lime, cement, and straw. Furthermore, the plasticity index decreased considerably as higher amounts of cement, lime, and straw were introduced. The lowest plasticity index was achieved with 20% cement. In general, straw treatment had no significant effect on improving the soil's plasticity index compared to the control, and the plasticity index under this treatment remained

significantly higher than in samples treated with lime or cement. The load-bearing capacity of soil treated with cement was significantly greater than that of other treatments.

Conclusion: The findings confirm that both biological and non-biological additives significantly enhance the mechanical strength of forest road bed soil. These materials contribute notably to increased load-bearing capacity and reduced clay index. Through proper management and application of such bioengineering techniques, it is possible to lower forest road maintenance costs and extend operational lifespan.

Cite this article: Aqababai, Zahra, Parsakhoo, Aidin, Ezzati, Sättar, Rezaei Motlagh, Aiub. 2025. The effect of biological and non-biological additives on the mechanical strength of soil in forest roadbeds (Case study: Dr. Bahramnia's Educational Research Forest). *Journal of Wood and Forest Science and Technology*, 32 (2), 51-66.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/jwfst.2025.23670.2112

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

تأثیر افزودنی‌های زیستی و غیر زیستی بر حد خمیرایی و ظرفیت بارگذاری خاک بستر جاده جنگلی در جنگل آموزشی- پژوهشی دکتر بهرام‌نیا

زهرا آقابابایی^۱، آیدین پارساخو^{۲*}، ستار عزتی^۳، ایوب رضایی مطلق^۴

۱. دانشجوی کارشناسی‌ارشد عمران و بهره‌برداری جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.
رایانامه: zahrag995@gmail.com
۲. نویسنده مسئول، دانشیار گروه جنگلداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.
رایانامه: parsakhoo@gau.ac.ir
۳. استادیار گروه جنگلداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: sattar.ezzati@gau.ac.ir
۴. کارشناس محقق، بخش تحقیقات جنگل، مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران. رایانامه: aiubrezaee@yahoo.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی- پژوهشی	سابقه و هدف: خاک بستر جاده‌های جنگلی غالباً دارای محدودیت‌هایی برای استفاده مناسب مانند خمیرایی بالا، قابلیت بارگذاری و مقاومت برشی پایین، دشواری تراکم و امکان نشست می‌باشند. از این رو تثبیت و ارتقاء مقاومت مکانیکی خاک با استفاده از افزودنی‌های زیستی و غیرزیستی همواره مورد توجه پژوهش‌گران و مهندسين راه‌سازی بوده است. این مطالعه با هدف مقایسه تأثیر خاکستر ضایعات لیگنوسلولزی (زیستی)، آهک و سیمان (غیرزیستی) بر تغییر حد خمیرایی و ظرفیت بارگذاری خاک ریزدانه و متورم‌شونده جاده‌های جنگلی انجام گرفت.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۲۸ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۶/۰۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۲۹	مواد و روش‌ها: منطقه مورد مطالعه، شبکه جاده درجه دو سری یک جنگل آموزشی- پژوهشی دکتر بهرام‌نیا است. در این مطالعه ابتدا پنج محل رانشی دربرگیرنده خاک ریزدانه و متورم‌شونده انتخاب و از هر محل، سه نمونه به روش تصادفی ساده برداشت شد. وزن هر نمونه خاک پنج کیلوگرم بود به منظور مقایسه کارایی افزودنی‌ها، نمونه‌های خاک با مقادیر متفاوت ۰، ۱، ۳، ۵، ۱۰ و ۲۰ درصد خاکستر ضایعات لیگنوسلولزی، آهک و سیمان ترکیب شدند. ویژگی‌های مکانیکی خاک شامل ویژگی‌های تراکمی، حدود آتربرگ و مقاومت فشاری در تمام نمونه‌ها بررسی شد. بررسی ویژگی تراکمی شامل حداکثر تراکم خشک خاک و رطوبت بهینه با آزمایش پروکتور، حدود آتربرگ شامل حد روانی، حد خمیری و شاخص‌های مربوطه به روش کاساگراند و فیلده خمیری و مقاومت فشاری به روش بارگذاری کالیفرنیا انجام پذیرفت.

یافته‌ها: نتایج حاصل از مقایسه میانگین ظرفیت بارگذاری نمونه‌های خاک تیمار شده نشان داد که مقدار CBR سیمان ۲۰ درصد با ۶/۶۵ درصد، ۱۵ درصد سیمان ۵/۶ درصد و ۵ درصد سیمان ۴/۵۸ درصد بیش‌تر از خاک شاهد بود و ۲۰ درصد آهک ۴/۵۸ درصد، ۱۵ درصد آهک ۴/۸۴ درصد و ۵ درصد آهک ۴/۰۷ درصد افزایش نسبت به خاک شاهد و ۱ درصد کاه ۱/۰۲ درصد، ۳ درصد کاه ۱/۵۸ درصد و ۵ درصد کاه ۲/۰۴ درصد افزایش نسبت به خاک شاهد داشته است. علاوه بر این، با افزودن مقادیر بیش‌تر سیمان، آهک و خاکستر کاه به خاک، مقدار شاخص خمیری به‌طور معنی‌داری کاهش یافت ($P \leq 0.05$). ۲۰ درصد سیمان با شاخص خمیری ۰/۳، ۱۵ درصد سیمان با ۱/۴ و ۵ درصد سیمان با ۲ می‌باشد و هم‌چنین ۲۰ درصد آهک با شاخص خمیری ۰/۳، ۱۵ درصد آهک ۰/۲ و ۵ درصد آهک ۲/۸ می‌باشد و ۵ درصد خاکستر کاه با شاخص خمیری ۲/۴، ۳ درصد خاکستر کاه با ۲/۸ و ۱ درصد خاکستر کاه با ۲۵/۸ می‌باشد که کم‌ترین مقدار شاخص خمیری با افزودن ۲۰ درصد سیمان و ۲۰ درصد آهک ایجاد گردید.

نتیجه‌گیری: نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که افزودنی‌های زیستی و غیرزیستی بر مقاومت مکانیکی خاک بستر جاده‌های جنگلی تأثیر معنی‌داری دارند، هرچند که تأثیر آن‌ها متغیر بوده است و این افزودنی‌ها می‌توانند در افزایش ظرفیت بارگذاری و کاهش شاخص خمیرایی جاده جنگلی نقش به‌سزایی ایفا کنند و با مدیریت صحیح و استفاده از این تکنیک‌های زیست‌مهندسی می‌توان در کاهش هزینه تعمیر و نگهداری جاده جنگلی و افزایش عمر مفید جاده‌های جنگلی اقدام نمود.

استناد: آقابابایی، زهرا، پارساخو، آیدین، عزتی، ستار، رضایی مطلق، ایوب (۱۴۰۴). تأثیر افزودنی‌های زیستی و غیر زیستی بر حد خمیرایی و ظرفیت بارگذاری خاک بستر جاده جنگلی در جنگل آموزشی - پژوهشی دکتر بهرام‌نیا. نشریه پژوهش‌های علوم و فناوری چوب و جنگل، ۳۲ (۲)، ۶۶-۵۱.

DOI: 10.22069/jwfst.2025.23670.2112



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

خاک‌های ریزدانه و متورم شونده به خاک‌های اطلاق می‌گردد که بعد از جذب آب، افزایش حجم پیدا می‌کنند. عامل اصلی تورم این خاک‌ها وجود کانی رسی به نام مونت‌موریلونیت است. وجود خاک‌های متورم‌شونده در بستر جاده‌های جنگلی می‌تواند باعث خرابی ساختمان، نشست جاده، تخریب پل‌ها و آبروهای عرضی و ناپایداری دامنه‌ها شود (۱، ۲). گاه این گونه خاک‌ها گستره وسیعی از بستر جاده جنگلی ساخته‌شده و یا پیش‌بینی‌شده را تشکیل می‌دهد و بر کیفیت فنی و دوام جاده تأثیر می‌گذارد. بسیاری از زیان‌ها و خسارت‌های عمده وارد بر ساختمان جاده با ویژگی‌های خاک بستر آن ارتباط مستقیم دارد. بهبود مشخصات فنی و مکانیکی خاک (مانند حدود آتربرگ، مقاومت فشاری و برشی، تراکم خشک، تورم آزاد، قابلیت بارگذاری) برای تداوم جریان ترافیک در جاده‌های جنگلی به‌منظور تداوم فعالیت‌های بهره‌برداری، حفاظت، آموزش و تفریح و تفرج از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (۳، ۴). افزودنی‌های مختلف مانند استفاده از سیمان، آهک، پودر سنگ و خاکستر حاصل از الیاف لیگنوسلولزی از قدیم‌الایام برای بهبود مقاومت مکانیکی خاک استفاده شده است که هرکدام معایب و مزایای خاص خود را دارند (۵، ۶، ۷، ۸).

در سال‌های اخیر، تلاش‌های علمی برای بررسی امکان استفاده از خاکستر حاصل از ضایعات لیگنوسلولزی و آهک و سیمان برای تثبیت خاک صورت گرفته است. استفاده از مصالح سنتی در پروژه‌های مهندسی عمران سؤالاتی را در مورد اثرات محیطی زیستی آن‌ها در محیط جنگل ایجاد کرده است (۹). خاکستر حاصل از ضایعات لیگنوسلولزی که

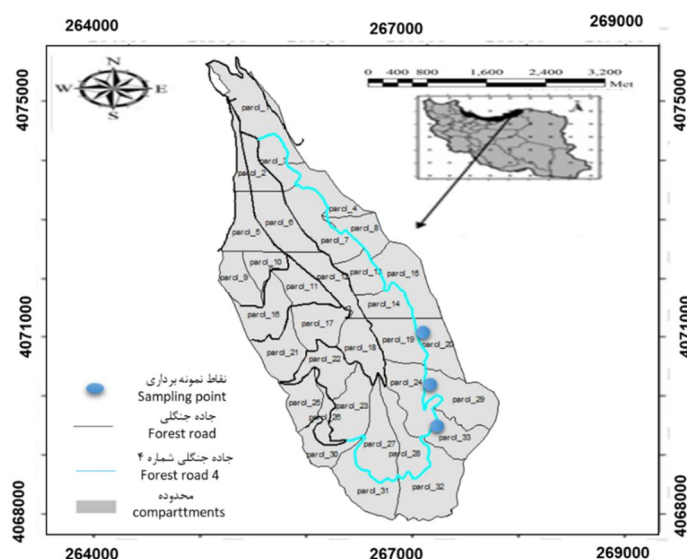
به‌عنوان یک ماده دوست‌دار طبیعت شناخته می‌شود، می‌تواند به‌عنوان یک گزینه مناسب و اقتصادی، جایگزین افزودنی‌های سنتی باشد و توسط پژوهش‌گران متعددی برای اصلاح گسترده خاک پیشنهاد شده است (۱۰، ۱۱). تثبیت با آهک برای خاک‌های دارای دانه‌بندی وسیع در اندازه ماسه و کوچک‌تر از آن به‌کار می‌رود، آهک با بخش رسی ترکیب‌شده و مخلوط سیمانی از مصالح ریزدانه و درشت‌دانه را همانند یک مخلوط بتنی به وجود می‌آورد و تغییرات درصد رس و آهک می‌تواند به تغییرات درصد مواد سیمانی شده و در نتیجه مقاومت مکانیکی خاک بیانجامد (۱۲، ۱۳). مسلمی و همکاران (۲۰۲۲) در پژوهش خود تأثیر محتوای فیبر (۰/۵، ۱ و ۲ درصد وزن خشک خاک)، طول الیاف (۰/۵، ۱ و ۱/۵ میلی‌متر) و زمان پخت (یک و هفت روز) بر رفتار مقاومتی خاک شنی تقویت‌شده را بررسی کردند. برای این منظور، یک سری از آزمایش‌های فشرده‌سازی سه محوری زهکشی نشده (CU) یکپارچه انجام دادند (۱۴). وجود خاک‌های ریزدانه و متورم‌شونده با قابلیت باربری ضعیف در بستر سازه‌های جاده‌ای نه‌تنها افزایش هزینه‌های مربوط به ساخت در ابتدای پروژه را به دنبال دارد، بلکه عملیات تعمیر و نگهداری آن را در سال‌های آتی با چالش روبرو می‌سازد، این مهم در مورد شبکه جاده‌های جنگلی، به‌دلیل داشتن رطوبت دائمی و وجود تاج پوشش درختان حاشیه جاده از اهمیت بالاتری برخوردار است (۱۵، ۱۶). از طرف دیگر، در سالیان اخیر به‌دلیل اجرای طرح تنفس و عدم تخصیص بودجه از سوی سازمان برای بازسازی و نگهداری شبکه راه‌های جنگلی وضعیت وخیم‌تری را به خود گرفته است. ضایعات و مواد لیگنوسلولزی برجای‌مانده پوشش

روش پژوهش

معرفی منطقه مورد مطالعه: سری یک جنگل آموزشی-

پژوهشی دکتر بهرام‌نیا در ۸ کیلومتری جنوب غربی شهرستان گرگان در حوزه ۸۵ طرح جامع جنگل‌های شمال کشور و در حوزه استحفاظی اداره کل منابع طبیعی استان گلستان در محدوده سرچنگلانی نوچمن و اداره منابع طبیعی شهرستان گرگان و در محدوده طول جغرافیایی $54^{\circ}21'26''$ تا $54^{\circ}24'57''$ و عرض جغرافیایی $36^{\circ}43'27''$ تا $36^{\circ}48'06''$ واقع شده است. وسعت کل منطقه مورد مطالعه $1713/3$ هکتار است (شکل ۱). از نظر توپوگرافی اراضی این منطقه قسمتی جلگه‌ای و قسمتی در دامنه کوه قرار دارند. تیپ غالب این منطقه راش-ممرزستان (*Fagus orientalis* Lipsky و *Carpinus betulus* L.) و حداقل ارتفاع از سطح دریا ۲۱۰ متر و حداکثر ارتفاع ۹۹۵ متر است. بر اساس اطلاعات ایستگاه کلیماتولوژی هاشم‌آباد، متوسط بارندگی طی دوره ۱۳۹۰ تا ۱۴۰۰ در این منطقه ۵۲۶ میلی‌متر می‌باشد. طول کل جاده موجود در این منطقه $31/059$ کیلومتر می‌باشد که $4/104$ کیلومتر آن از نوع جاده درجه یک و بقیه از نوع جاده درجه دو و سه می‌باشند. مطالعه حاضر در شبکه جاده واقع در محدوده پارسل‌های ۳۱ و ۳۲ این جنگل انجام شد. تراکم طولی این جاده‌ها $17/68$ و متوسط شیب آن‌ها $2/5$ درصد می‌باشد. مواد مورد استفاده در روسازی این جاده‌ها بیش‌تر از مصالح رودخانه‌ای و در برخی موارد کوهی می‌باشد.

گیاهی به‌خصوص خانواده‌های گندمیان، دم‌اسبیان و نخل‌ها دارای ۶۰-۷۰ درصد سیلیس (SiO_2) هستند. سیلیس به دلیل ساختار سخت و مقاوم خود، وقتی به خاک اضافه می‌شود، باعث افزایش مقاومت خاک در برابر فشار، رطوبت و سایش می‌گردد. این ویژگی به‌ویژه در جاده‌های جنگلی که تحت بار زیاد ماشین‌آلات و تردد مکرر قرار دارند، اهمیت دارد. سیلیس با پر کردن فضاهای خالی بین ذرات خاک، تراکم و استحکام بستر جاده را بالا می‌برد و از نشست و تغییر شکل خاک جلوگیری می‌کند. این ماده معدنی با افزایش چسبندگی بین ذرات خاک باعث افزایش پایداری و کاهش لغزش و درنهایت بهبود عملکرد و کاهش هزینه‌های نگهداری جاده‌های جنگلی را در درازمدت به دنبال دارد (۱۶). از طرف دیگر، استفاده از افزودنی‌های غیرزیستی غنی از سیلیس در مقایسه با افزودنی‌های غیرزیستی به لحاظ اقتصادی هم توجیه دارد. به‌عنوان مثال، قیمت بازاری در تیرماه ۱۴۰۳ هر کیلوگرم سیمان حدود ۴۰۰۰ تومان، آهک، ۱۵۰۰ تومان و قیمت هر کیلو کاه و کلش گندم حدود ۱۷۵۰ تومان است؛ بنابراین، در پژوهش حاضر تلاش شده است تا عملکرد مکانیکی (حد خمیرایی و ظرفیت بارگذاری) خاک‌های ریزدانه و متورم با استفاده از افزودنی‌های زیستی و ارزان مانند (ضایعات لیگنوسلولوزی) و مواد غیرزیستی/افزودنی‌های سستی (سمیان و آهک) بر بهبود خواص تورم‌پذیری خاک در مناطق جنگلی مقایسه و بهترین افزودنی برای مدیریت خاک‌های ریزدانه و متورم شونده در بستر جاده‌های جنگلی پیشنهاد شود.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی مناطق مورد مطالعه.

Figure 1. Geographical location of the study area.

معادل ۱۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ گرم) تهیه شد. سپس درصدهای وزنی تیمارهای خاکستر کاه و افزودنی‌های آهک و سیمان با مقدار آب متناظر با درصد رطوبت بهینه برای حداکثر تراکم خاک درون همزن ریخته شد. مواد افزودنی به همراه خاک رسی ریزدانه جمع‌آوری شده از عرصه در هوای خشک به مدت ۵ دقیقه هم‌زده شد تا در پایان یک مخلوط همگن و عاری از کلوخه به‌دست آید. تغییرات ایجاد شده در خصوصیات مکانیکی خاک در نتیجه افزودن خاکستر آنی نبوده و فرآیند رساندن آن به تمام ذرات خاک به زمان معینی نیاز دارد که به آن دوره عمل‌آوری می‌گویند و مدت آن از حدود یک تا چهار هفته است. در این پژوهش برای هر یک از درصد اختلاط‌های تهیه‌شده در پایان دوره عمل‌آوری ۲۸ روزه، آزمایش‌های مکانیک خاک در سه تکرار انجام پذیرفت تا درصد اختلاط بهینه به‌دست آید. خصوصیات مکانیکی اندازه‌گیری شده در آزمایش خاک شامل موارد زیر بود: **شاخص خمیری خاک**: حد خمیری خاک یا درصد رطوبتی که در آن خمیر خاک هنگام ورز دادن شروع به ترک خوردن می‌کند و مقدار آن از رابطه ۱ به دست آمد:

نمونه‌برداری و جمع‌آوری داده‌ها: محل وجود خاک رس تورم‌پذیر (CH) در سطح بستر جاده با توجه به مشخصات ظاهری و عملکردی آن مانند مرطوب بودن سطح خاک، لغزش‌های قبلی و انحراف تنه درختان در اثر حرکات توده‌ای زمین مشخص شد. نمونه‌برداری خاک به‌طور تصادفی در سه نقطه از پارسل‌های ۲۰، ۲۹ و ۳۳ انجام شد. بر اساس پروتکل AASHTO در هر بار نمونه‌برداری ۵۰ کیلوگرم خاک از الک نمره ۴ عبور داده شد و در مجموع ۱۵۰ کیلوگرم خاک به آزمایشگاه منتقل گردید. مواد افزودنی اصلاح‌کننده خاک شامل آهک و سیمان از مراکز فروش مصالح ساختمانی تهیه شد. با توجه به مقادیر در نظر گرفته‌شده تیمار آهک و سیمان (۵، ۱۵ و ۲۰ درصد معادل ۰/۵، ۱/۵ و ۲ کیلوگرم)، در کل ۴ کیلوگرم از هر کدام تهیه شد. کاه و کلش مورد نیاز پژوهش از مزارع و شالیزارهای حاشیه شهر گرگان تهیه و پس از آسیاب در دستگاه خردکن به اندازه‌هایی با طول ۳ میلی‌متر خرد شد و سپس در کوره در دمای ۱۰۰ درجه به خاکستر تبدیل شد. با توجه به مقادیر در نظر گرفته‌شده تیمار خاکستر کاه (۱، ۳ و ۵ درصد

$$PL = \frac{W_2 - W_3}{W_3 - W_1} \times 100 \quad (1)$$

در این رابطه، W_2 وزن ظرف و خاک مرطوب (گرم)، W_3 وزن ظرف و خاک خشک و W_1 وزن ظرف خالی می‌باشد. حد روانی خاک به روش سه نقطه (منحنی جریان) و توسط دستگاه کاساگرانده به دست آمد. هر نقطه منحنی جریان نشان‌دهنده درصد رطوبتی است که در تعداد ضرباتی معین (معمولاً ۱۵ تا ۳۰ ضربه)، منجر به بسته شدن بخشی از شیار ایجاد شده بر روی خاک درون ظرف کاساگرانده می‌شود. در پایان، حد روانی درصد رطوبتی است که طی ۲۵ ضربه شیار ایجاد شده در سطح خاک به طول ۱۳/۷ میلی‌متر بسته شود. شاخص خمیری از تفاضل حد روانی از حد خمیری به دست آمد (رابطه ۲).

$$PI = LL - PL \quad (2)$$

رطوبت بهینه و ظرفیت باربری خاک (CBR):
CBR خاک یکی از مهم‌ترین آزمایش‌های مربوط به بررسی ضخامت رویه راه‌هاست. با استفاده از نتایج این آزمایش می‌توان مقاومت برشی خاک (در یک رطوبت و وزن مخصوص معین)، ظرفیت بارگذاری خاک بستر و لایه روسازی را به دست آورد. عدد CBR بنا به تعریف نسبت بار استفاده شده برای

فرورفتن و نفوذ یک سنبه استاندارد به میزان معین در یک نمونه مورد آزمایش به مقدار بار استاندارد برای همان نفوذ است. پیش‌نیاز آزمایش ظرفیت باربری خاک، اجرای آزمایش تراکم خاک و محاسبه مقدار رطوبت بهینه خاک موردنظر است. آزمایش تراکم از روش تراکم آشتو AASHTO99 (روش تراکم پروکتور معمولی) و براساس استاندارد ASTM D1557 انجام شد و پس از یافتن حداکثر چگالی خشک و رطوبت بهینه مقادیر میانگین CBR با استفاده از استاندارد ASTM D1883 اندازه‌گیری شد. در ابتدا حدود ۷ کیلوگرم خاک کاملاً خشک را از الک ۴ عبور داده و به میزان رطوبت بهینه به دست آمده آب اضافه گردید و پس از مخلوط کردن کامل آب با خاک، با استفاده از روش تراکم استاندارد خاک در قالب متراکم و سطح آن صاف گردید و قالب زیر دستگاه قرار گرفت به‌صورتی که پیستون مماس بر سطح خاک نمونه بود. در مرحله بعد عقربه نیروسنج و نفوذسنج دستگاه صفر گردید و دستگاه روشن شد. در این مرحله اعداد عقربه فشارسنج (ساعت اندیکاتور) در نفوذ ۰/۵، ۲/۵، ۵، ۷/۵ و ۱۰ اینچ قرائت شد سپس با استفاده از دو عدد فشارسنج قرائت‌شده در نفوذ ۲/۵ و ۵ اینچ و بار استاندارد برای نفوذ پیستون استاندارد طبق جدول CBR محاسبه گردید.

جدول ۱- بار استاندارد برای نفوذ پیستون.

Table 1. Standard load for piston penetration.

نفوذ (میلی‌متر)	بار (کیلوگرم)	فشار (کیلوگرم/سانتی‌مترمکعب)	فشار (مگاپاسکال)
Penetration (mm)	Burden (kg)	Pressure (kg/cm ²)	Pressure (MPa)
2.5	1366	70	6.9
5	2039	105	10.3
7.5	2572	133	13
10	3162	163	16
12.5	3562	184	18

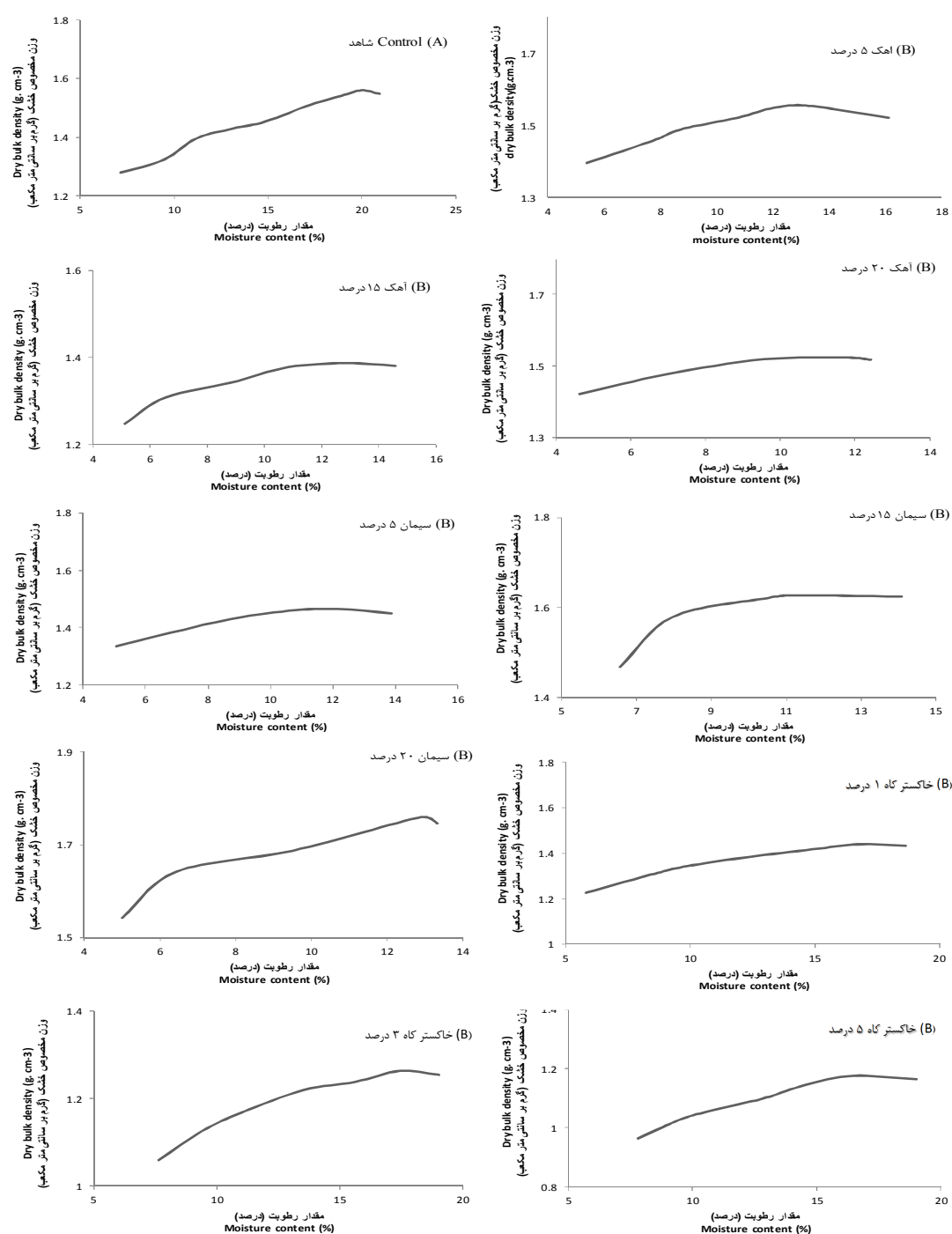
*ضریب دستگاه ۱۵/۲۹ است

تجزیه و تحلیل‌های آماری: تجزیه و تحلیل‌های آماری داده‌ها در قالب طرح فاکتوریل با دو عامل اصلی شامل نوع افزودنی در سه سطح (خاکستر کاه، آهک و سیمان)، مقدار افزودنی در ۴ سطح (۰، ۱، ۳ و ۵ برای خاکستر کاه و ۰، ۵، ۱۵ و ۲۰ برای آهک و سیمان) و در مجموع با ۱۲ تیمار در نرم‌افزار SPSS به اجرا درآمد. تجزیه واریانس به روش ANOVA و مقایسه میانگین‌ها به روش LSD در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد.

نتایج و بحث

منحنی آزمایش پروکتور نمونه شاهد نشان داد که در میزان رطوبت ۲۰ درصد، حداکثر تراکم خشک خاک به مقدار $1/56$ گرم بر سانتی‌مترمکعب به دست آمد (شکل ۲). با افزودن ۵ درصد آهک مقدار رطوبت لازم جهت رسیدن به حداکثر تراکم خشک خاک که $1/55$ گرم بر سانتی‌مترمکعب بود، به $13/3$ درصد رسید (شکل ۲). در تیمارهای ۱۵ درصد و ۲۰ درصد آهک مقدار این رطوبت (جهت رسیدن به تراکم حداکثری خاک $1/52$ گرم بر سانتی‌مترمکعب) به $11/8$ درصد کاهش یافت (شکل ۲). منحنی آزمایش پروکتور نمونه خاک تیمار شده با ۵ درصد سیمان نشان داد که در میزان رطوبت $12/1$ درصد، حداکثر تراکم خشک خاک ($1/47$ گرم بر سانتی‌مترمکعب) ایجاد شد (شکل ۲) که به‌طور متوسط تراکمی کم‌تر از نمونه‌های خاک تیمار شده با آهک را دارد اما با افزودن ۱۵ درصد سیمان، حداکثر تراکم خشک خاک به $1/63$ گرم بر سانتی‌مترمکعب (شکل ۲) و با افزودن ۲۰ درصد سیمان تحت مقدار رطوبت $12/9$ درصد حداکثر تراکم خشک به مقدار قابل‌توجه $1/76$ گرم بر سانتی‌مترمکعب افزایش یافت (شکل ۲). منحنی آزمایش پروکتور نمونه خاک تیمار شده با ۱ درصد خاکستر کاه نشان داد که در میزان رطوبت $16/7$

درصد، حداکثر تراکم خشک خاک ($1/44$ گرم بر سانتی‌مترمکعب) بود (شکل ۲) که تراکمی کم‌تر از نمونه‌های خاک تیمار شده با آهک و سیمان دارد. با افزودن ۳ درصد خاکستر کاه، حداکثر تراکم خشک خاک به $1/26$ گرم بر سانتی‌مترمکعب (شکل ۲) و با افزودن ۵ درصد خاکستر کاه تحت مقدار رطوبت $16/5$ درصد حداکثر تراکم خشک به مقدار $1/18$ گرم بر سانتی‌مترمکعب رسید (شکل ۲). بدین ترتیب افزایش خاکستر کاه حداکثر تراکم خشک خاک را افزایش نداده بود. نتایج مطالعه حاضر با یافته‌های روسلو و همکاران (۲۰۱۷) تطابق ندارد. آن‌ها در مطالعه خود ابتدا الیاف کاه را به کمک کاتر به قطعات ۲ تا ۳ سانتی‌متری تبدیل کرده و بعد از آسیاب در دمای 105 درجه سانتی‌گراد آن به مدت ۲۴ ساعت خشک کردند. سپس پودر کاه با خاکی با ظرفیت باربری پایین مخلوط کردند. نتایج نشان داد ظرفیت بارگذاری خاک به میزان ۲۵ درصد بهبود یافته بود. دلیل این امر شاید مرتبط با تفاوت در بافت خاک، میزان اختلاط کاه با خاک و شرایط رطوبتی بوده باشد. نتایج مربوط به آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های خاک تیمار شده با مقادیر مختلف آهک، سیمان و خاکستر کاه در شکل ۳ مشاهده می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقدار نیروی صرف شده برای نفوذ سنبه دستگاه مقاومت فشاری در نمونه‌های خاک شاهد و تیمار شده با خاکستر کاه به‌طور قابل‌توجهی کم‌تر از مقدار نیروی لازم برای نفوذ همان سنبه در خاک‌های تیمار شده با آهک و سیمان بوده است. اگر CBR بیش از ۳۰ درصد باشد مقاومت خاک خیلی خوب است. خاک شنی خوب دانه‌بندی شده (GW) مقاومتش از نظر CBR بین ۵۰ تا ۱۰۰ درصد است (استاندارد ASTM D1883).



شکل ۲- منحنی‌های پروکتور نمونه شاهد و خاک ریزدانه تیمار شده با ۵ درصد آهک، ۱۵ درصد آهک، ۲۰ درصد آهک،

۵ درصد سیمان، ۱۵ درصد سیمان و ۲۰ درصد سیمان، ۱ درصد خاکستر کاه، ۳ درصد خاکستر کاه و ۵ درصد خاکستر کاه.

Figure 2. Proctor curves of the control sample and treated soil with 5% lime, 15% lime, 20% lime, 5% cement, 15% cement and 20% cement, 1% straw, 3% straw and 5% straw.

۹۹ درصد بر ظرفیت باربری (CBR) خاک معنی‌دار

بوده است (جدول ۲).

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر نوع و مقدار

تیمار و همچنین اثر متقابل بین آن‌ها در سطح اطمینان

جدول ۲- تجزیه واریانس اثر تیمارهای سیمان، آهک و کاه بر مقدار CBR خاک.

Table 2. Analysis of variance of the effect Cement, lime and straw treatments on the soil CBR amount.

متغیر وابسته	مجموع مربعات (SS)	درجه آزادی (df)	میانگین مربعات (MS)	مقدار F
Dependent variable	Sum of squares	Degree of freedom	Mean squares	F-value
مدل تصحیح شده Corrected model	89.61	8	11.2	11.2***
عرض از مبدأ Width from the origin	1110.92	1	1110.9	11.1***
نوع تیمار Type of treatment	6.23	2	3.11	311.66***
مقدار تیمار Treatment amount	81.16	2	40.58	40.6***
اثر متقابل Interaction	2.20	4	0.55	55.11***
خطا Error	0.18	18	0.01	
کل Total	1200.70	27		
کل تصحیح شده Corrected total	89.78	26		

آن‌ها با الیاف پلی‌پروپیلن ضمن تأثیر بر حدود آتربرگ، موجب کاهش رطوبت بهینه تراکم و وزن واحد حجم خشک بیشینه آن‌ها می‌شود. هم‌چنین افزودن هم‌زمان سه ماده پودر سنگ ضایعاتی، آهک و الیاف پلی‌پروپیلن با ترکیب به ترتیب ۵، ۵ و ۱ درصد وزنی خاک باعث افزایش ۸ برابری مقاومت فشاری خاک تیمار شده نسبت به خاک شاهد شد. درحالی‌که رطوبت بهینه بین تیمارهای ۱، ۳، ۵ درصد خاکستر کاه بین ۱۳-۱۷ درصد کمتر از شاهد بوده است. مقایسه نسبت افزایش CBR شاهد به تیمار بین تیمارهای ۵، ۱۵ و ۲۰ درصد آهک به ترتیب ۴/۰۷، ۴/۸۴، ۴/۵۸ و سیمان بین ۴/۵۸، ۵/۶، ۶/۶۲ درصد بیش‌تر از نمونه شاهد بوده است. درحالی‌که مقایسه نسبت افزایش CBR بین تیمارهای ۱، ۳، ۵ درصد خاکستر کاه بین ۱/۰۲، ۱/۵۳، ۲/۰۴ درصد بیش‌تر از شاهد بوده است که مقدار آن ناچیز بوده است.

بر اساس آزمون تی جفتی بین مقدار CBR نمونه‌های تیمار شده با انواع افزودنی‌های آزمون شده در این مطالعه (به‌جز تیمار ۱ درصد کاه) و CBR شاهد تفاوت معنی‌دار آماری وجود داشت (جدول ۳). آزمون مقایسه گروهی تیمارها نشان داد که بیش‌ترین CBR در خاک تیمار شده با ۲۰ درصد سیمان به وجود آمد. درحالی‌که کم‌ترین CBR در نمونه‌های تیمار شده با کاه به ثبت رسید (جدول ۳). رطوبت بهینه بین تیمارهای ۵، ۱۵ و ۲۰ درصد آهک و سیمان بین ۳۳-۴۰ درصد و ۳۵-۴۴ درصد کم‌تر از نمونه شاهد بوده است. در مجموع، افزودنی‌های غیرزیستی تأثیر معنی‌داری را در افزایش مقاومت مکانیکی خاک نداشته‌اند. نتایج این مطالعه با یافته‌های عباسی و همکاران (۱۳۹۹) تطابق دارد. آن‌ها در مطالعه خود به این نتیجه رسیدند که تثبیت نمونه‌های حاوی خاک رس با آهک و پودر سنگ ضایعاتی و مسلح کردن

جدول ۳- مقادیر رطوبت بهینه و حداکثر تراکم خشک و مقایسه گروهی CBR نمونه‌های تیمار شده.

Table 3. Optimal moisture content and maximum dry density amount and group comparison of CBR of treated samples.

مقایسه نسبت افزایش CBR شاهد به تیمار (درصد) Comparison of the ratio of CBR increase in control to treatment (%)	CBR	حداکثر تراکم خشک خاک (g/cm ³) Maximum dry density (g/cm ³)	رطوبت بهینه (%) Optimal moisture content (%)	تیمارها Treatments
0	2.55	1.54	20.0	شاهد Witness
4.07	6.62	1.56	13.3	خاک + ۵ درصد آهک Soil + 5% lime
4.84	7.39	1.57	12.9	خاک + ۱۵ درصد آهک Soil + 15% lime
4.58	7.13	1.60	11.8	خاک + ۲۰ درصد آهک Soil + 20% lime
4.58	7.13	1.47	12.1	خاک + ۵ درصد سیمان Soil + 5% cement
5.6	8.15	1.63	11.2	خاک + ۱۵ درصد سیمان Soil + 15% cement
6.62	9.17	1.76	12.9	خاک + ۲۰ درصد سیمان Soil + 20% cement
1.02	3.57	1.25	16.7	خاک + ۱ درصد خاکستر کاه Soil + 1% straw
1.53	4.08	1.26	17.4	خاک + ۳ درصد خاکستر کاه Soil + 3% straw
2.04	4.59	1.28	16.5	خاک + ۵ درصد خاکستر کاه Soil + % straw

برحسب میزان رطوبت موجود در خاک‌های ریزدانه، وضعیت فیزیکی آن‌ها متفاوت است. وقتی که رطوبت خاک‌های ریزدانه کم است، از نظر مقاومت سخت هستند و می‌توان روی آن‌ها بارگذاری نمود. ولی وقتی بر مقدار رطوبت آن‌ها افزوده شود از وضعیت جامد به نیمه جامد، خمیری و روان تبدیل می‌شوند. منحنی جریان نمونه‌های شاهد و تیمار شده با مقادیر مختلف آهک، سیمان و خاکستر کاه در جدول ارائه شده است. نتایج تجزیه واریانس نشان داد

که اثر نوع و مقدار تیمار و همچنین اثر متقابل بین آن‌ها در سطح اطمینان ۹۹ درصد بر مقدار شاخص خمیری (PI) خاک معنی‌دار بود (جدول ۴). بر اساس آزمون تی جفتی، بین مقدار شاخص خمیری تمامی نمونه‌های تیمار شده با انواع افزودنی‌ها (به جز نمونه‌های تیمار شده با خاکستر کاه) و شاخص خمیری نمونه شاهد تفاوت معنی‌دار وجود داشت (جدول ۴).

جدول ۴- تجزیه واریانس اثر تیمارهای خاکستر کاه بر شاخص PI خاک.

Table 4. Analysis of variance of the effect of lime, cement and straw treatments on soil PI amount.

متغیر وابسته	مجموع مربعات (SS)	درجه آزادی (df)	میانگین مربعات (MS)	مقدار F
Dependent variable	Sum of squares	Degree of freedom	Mean squares	F-value
مدل تصحیح شده Corrected model	3958.26	8	494.78	11***
عرض از مبدأ Width from the origin	2540.43	1	2540.43	56.4***
نوع تیمار Type of treatment	7.02	2	3.51	7.80**
مقدار تیمار Treatment amount	3932.24	2	1966.12	43.7***
اثر متقابل Interaction	19.00	4	4.75	10.56***
خطا Error	8.10	18	0.45	
کل Total	6506.79	27		
کل تصحیح شده Corrected total	3966.36	26		

واقعیت است که استفاده از افزودنی‌های زیستی (خاکستر کاه) تأثیر معنی‌داری در مقدار شاخص خمیری خاک نداشته است. عدم تأثیرگذاری افزودنی‌های زیستی بر مقاومت مکانیکی خاک شاید به دلیل وجود مقدار سلیس پایین خاکستر کاه و هم‌چنین پرورژه تولید خاکستر از آن‌جایی که در فضای آزاد انجام شد از حرارت مناسب برای از بین رفتن مواد آلی برخوردار نبوده و بنابراین اثرگذاری کاه به دلیل وفور ماده زیستی به شدت کاهش یافته بود. یافته‌های این پژوهش در مورد عدم تأثیرگذاری خاکستر کاه بر مقاومت مکانیکی خاک با نتایج کوتنایی و جانعلی‌زاده چوب‌بستی (۱۳۹۳) متضاد بوده است، شاید دلیل این تضاد مرتبط با نوع خاک مورد بررسی بوده است که در مطالعه ایشان بافت خاک ماسه‌ای و در پژوهش حاضر رسی-لومی (ریزدانه) بوده است.

آزمون مقایسه گروهی تیمارها نشان داد که بیش‌ترین شاخص خمیری در نمونه شاهد و نمونه‌های خاک تیمار شده با خاکستر کاه به وجود آمد. درحالی‌که کم‌ترین مقدار شاخص خمیری در نمونه‌های خاک تیمار شده با ۱۵ و ۲۰ درصد آهک و ۲۰ درصد سیمان به ثبت رسید (جدول ۵). چنان‌چه شاخص خمیری بین صفر تا پنج باشد خاک غیرخمیری، بین پنج تا ۱۵ خمیری متوسط، بین ۱۵ تا ۳۵ خاک خمیری و بزرگ‌تر از ۳۵ خاک خیلی خمیری است (استاندارد ASTM D1883). شاخص خمیری تیمار ۵ درصد آهک ۹۰ درصد کم‌تر از شاهد می‌باشد شاخص خمیری بین تیمارهای ۵، ۱۵ و ۲۰ درصد آهک و سیمان بین ۹۶-۹۹ درصد و ۹۳-۹۸ درصد کم‌تر از شاهد بوده است. درحالی‌که شاخص خمیری بین تیمارهای ۱، ۳، ۵ درصد خاکستر کاه بین ۵-۱۳ درصد کم‌تر از شاهد بوده است که نشان‌دهنده این

جدول ۵- مقادیر حد روانی، حد خمیری و شاخص خمیری نمونه‌های تیمار شده با آهک، سیمان و کاه.

Table 5. Liquid limit and plastic limit amount and plasticity index of samples treated with lime, cement and straw.

شاخص خمیری plasticity index	حد خمیری (درصد) Plastic limit (%)	حد روانی (درصد) Liquid limit (%)	تیمارها Treatments
29.7	26.1	55.8	شاهد Witness
2.8	18.7	21.5	خاک + ۵ درصد آهک Soil + 5% lime
0.2	16.4	16.7	خاک + ۱۵ درصد آهک Soil + 15% lime
0.3	14.5	14.8	خاک + ۲۰ درصد آهک Soil + 20% lime
2.0	20.0	22.0	خاک + ۵ درصد سیمان Soil + 5% cement
1.4	21.1	22.5	خاک + ۱۵ درصد سیمان Soil + 15% cement
0.3	20.7	21.0	خاک + ۲۰ درصد سیمان Soil + 20% cement
25.8	9.2	35.0	خاک + ۱ درصد کاه Soil + 1% straw
28.1	7.9	36.0	خاک + ۳ درصد کاه Soil + 3% straw
26.4	9.1	35.5	خاک + ۵ درصد کاه Soil + % straw

نتیجه‌گیری کلی

پژوهش حاضر به بررسی تأثیر افزودنی‌های زیستی و غیرزیستی در مدیریت خاک‌های ریزدانه و متورم شونده در مناطق جنگلی و مطالعه موردی جنگل شصت‌کلاته گرگان انجام شده است. از بین افزودنی‌های مطالعه شده، تنها آهک، سیمان ظرفیت بارگذاری خاک را به‌طور معنی‌داری افزایش داده بود، درحالی‌که خاکستر کاه هیچ تأثیری بر ظرفیت بارگذاری خاک نداشته است و مقدار شاخص خمیری در این تیمار به‌طور معنی‌داری بیش‌تر از نمونه‌های خاک تیمار شده با آهک و سیمان بود. همچنین با افزودن مقادیر بیش‌تر سیمان، آهک و خاکستر کاه به خاک ریزدانه، مقدار شاخص خمیری به‌طور

معنی‌داری کاهش یافت. کم‌ترین مقدار شاخص خمیری با افزودن ۲۰ درصد سیمان و ۲۰ درصد آهک ایجاد گردید. مقدار ظرفیت بارگذاری خاک در نمونه‌های تیمار شده با سیمان به‌طور معنی‌داری بیش‌تر از تیمارهای دیگر بود. به این منظور استفاده از خاکستر کاه برای مقاومت مکانیکی خاک بستر جاده‌های جنگلی توصیه نمی‌شود زیرا مقاومت مکانیکی بسیار ناچیزی نسبت به نمونه خاک شاهد داشته است. مقاومت مکانیکی پایین خاک رسی تیمار شده با خاکستر کاه، احتمالاً به دلیل مقدار سلیس پایین خاکستر کاه و تولید خاکستر در فضای باز و حضور اکسیژن بوده است و از حرارت مناسب برای از بین رفتن مواد آلی برخوردار نبوده و بنابراین

نشود و از مواد سیمانی برای مقاومت خاک این منطقه استفاده شود. استفاده از بیوپلاستیک‌های لیگنوسلولزی به دلیل حفظ ماهیت عناصر معدنی و عدم حضور اکسیژن شاید گزینه بهتری نسبت به خاکستر کاه در مهار تورم‌پذیری خاک‌های ریزدانه باشد.

اثرگذاری کاه به دلیل وفور ماده زیستی به شدت کاهش یافته بود. در مقابل ماده افزودنی سیمان به دلیل تناسب با pH خاک، کارایی مطلوب‌تری از خود نشان داد بدین‌منظور پیشنهاد می‌شود از خاکستر کاه برای مقاومت خاک بستر جاده جنگلی این منطقه استفاده

منابع

1. Ademola, I. A., Adekunle, A. M., & Adeoye, B. A. (2017). Investigating the effect of cement and lime on the plasticity index of black cotton soil. *Journal of Materials and Environmental Science*. 8(3), 900-908.
2. Anupama, A. K., Kumar P., & Ransinchung R. N. (2013). Use of various agricultural and industrial waste materials in road construction. Proceedings of the 2nd Conference of Transportation Research Group of India (2nd CTRG), IIT Roorkee, India, 264-273.
3. Eltwati, A., & Saleh, W. (2020). Improvement of geotechnical properties of soft soil stabilized with lime and metakaolin. *Journal of Materials Research and Technology*. 9(3), 5007-5019.
4. Al-Joulani, N. (2012). Effect of stone powder and lime on strength, compaction and CBR properties of fine soils. *Jordan Journal of Civil Engineering*. 6(1), 1-16.
5. Dharan, C. K., & Kumar, A. (2019). Effect of lime-fly ash on geotechnical properties of black cotton soil. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*. 8(11), 1877-1881.
6. Essien, E. U., & Charles, I. J. (2016). Effects of lime-stabilization on the index properties of lateritic soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 142(11), 04016048.
7. Bhardwaj, S. K., & Sharma, R. K. (2020). Performance evaluation of black cotton soil stabilized with fly ash and cement kiln dust. *Geotechnical and Geological Engineering*. 38(6), 5557-5575.
8. Maheswari, A. U., Pavan Kumar, M., Pooja Kumari, G. V., Tanuj Varma, G., Haritha, M., Venu Gopal, P., & Gayatri, B. (2022). Stabilization of red clay soil using rice straw. *Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*. 22(2), 334-342.
9. Bello, A. O., Akintokun, O. O., & Adejumo, A. O. (2021). Optimal content and ratio of cement and lime stabilizers for improving the plasticity index of black cotton soil. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*. 33(3), 333-341.
10. Gautam, N., Agrawal, S., Pandey, M., & Nandwani, N. (2020). Effect of mixing of rice straw to enhance the characteristics of soil". *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*. 9(8), 656-658.
11. Issac, S., & John, N. E. (2018). Stabilization of expansive Kuttanad clay using lime treated rice straw fibres". *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)*. 6(2), 1-12.
12. Kumar, M., Mishra, V. K., & Singh, A. (2020). Engineering properties of black cotton soil stabilized with lime. *International Journal of Geotechnical Engineering*. 14(2), 214-219.
13. Garg, A., & Gupta, M. K. (2017). Stabilization of black cotton soil with lime and cement. *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 8(5), 1195-1202.

14. Moslemi, A., Tabarsa, A., Mousavi, S. Y., & Aryaie Monfared, M. H. (2021). Use of Taguchi method to evaluate the hydraulic conductivity of lignocellulose fibers-reinforced soil. *AUT Journal of Civil Engineering*. 5(2), 213-224.
15. Nasiri, M., Lotfalian, M., Modarres, A., & Wu, W. (2016). Use of rice husk ash as a stabilizer to reduce soil loss and runoff rates on sub-base materials of forest roads from rainfall simulation tests. *CATENA*. 150, 116-123.
16. Marik, S., Ransinchung, G. D., Singh, A., & Khot, P. (2022). Investigation on use of silica based additive for sustainable subgrade construction. *Case Studies in Construction Materials*, 17, e01229.
17. Nnochiri, E. S., & Emeka, H. O. (2017). Improvement of geotechnical properties of Lateritic soil using walnut shell ash. *Acta Technica Corviniensis- Bulletin of Engineering*. 4, 105-109.
18. Roselló, J., & Soriano, L. (2017). Rice straw ash: A potential pozzolanic supplementary material for cementing systems. *Journal of Industrial Crops and Products*. 103, 39-50.
19. Sunny, T., & Joy, A. (2016). Study on the effects of clay stabilized with Banana fiber. *International Journal of Scientific Engineering and Research (IJSER)*. 4, 96-98.
20. Pascoal, A., Almeida, A., Capitão, S., & Picado-Santos, L. (2023). Improvement of warm-mix asphalt concrete performance with lignin obtained from bioethanol production from forest biomass waste. *Materials*. 16(23), 7339.
21. Neeladharan, S., Suresh Kumar, G., & Bhattacharya, S. (2018). Effect of lime stabilization on the engineering properties of soil. In *Proceedings of the International Conference on Sustainable Technologies for Computational Intelligence*. Pp: 265-272.
22. Wei, L., Chai, S. X., Zhang H. Y., & Shi, Q. (2018). Mechanical properties of soil reinforced with both lime and four kinds of fiber. *Journal of Construction and Building Materials*. 172, 300-308.
23. Roselló, J., & Soriano, L. (2017). Rice straw ash: A potential pozzolanic supplementary material for cementing systems. *Journal of Industrial Crops and Products*. 103, 39-50.
24. Abbasi, N., Heidari, Pakro, A., & Bahramlou, R. (2019). Application of polypropylene fibers, lime, and waste rock powder for stabilizing clay soil. *Soil and Water Sciences (Agricultural Sciences and Technologies and Natural Resources)*. 24(2), 221-234.
25. Younesi Kotnaei, R., & Janalizadeh Choobbasti, A. (2014). Mechanical behavior of sand reinforced with separate strands of barley straw. *First National Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, December 3-4, 2014, Shahid Rajaei Teacher Training University, 12p.