Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

Journal of Wood and Forest Science and Technology

Print ISSN: 2322-2077
Online ISSN: 2322-2786

The effect of using stone powder in improving the mechanical properties of forest roadbed

Aidin Parsakhoo[*1], Aiub Rezaee Motlagh[2], Zohreh Gholamy[3]

1. Corresponding Author, Associate Prof., Dept. of Forestry, Faculty of Forest Sciences, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: parsakhoo@gau.ac.ir
2. Ph.D. Graduated, Dept. of Forestry, Faculty of Forest Sciences, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: aiubrezaee@yahoo.com
3. Ph.D. Student, Dept. of Forestry, Faculty of Forest Sciences, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: ghlamyzhrh@gmail.com

Article Info

Article type:
Full Length Research Paper

Article history:
Received: 08.13.2023
Revised: 10.08.2023
Accepted: 10.09.2023

Keywords:
Atterberg limits,
CL soil,
Processing time,
Road loading capacity,
Stone powder

ABSTRACT

Background and Objectives: Fine-grained soils often present challenges such as low load-bearing capacity, limited shear resistance, compaction difficulties, and settlement issues. Consequently, the stabilization of fine-grained soils using additives has consistently garnered attention among road construction engineers. Moreover, the utilization of waste materials for soil stabilization has gained popularity due to its economic viability. Within the scope of this study, granite stone powder, a byproduct generated from stone-cutting workshops, was employed to stabilize fine-grained soils.

Materials and Methods: Clay samples categorized as low plasticity (CL) were mixed with varying proportions (0%, 3%, 5%, 10%, 15%, and 20%) of granite stone powder in comparison to the dry soil. The processing time for soil and stone was considered at 7, 28, and 90 days. Subsequently, geotechnical properties, including grain size, Atterberg limits, and either compressive strength or CBR, were examined. Granulation characteristics were assessed using the sieve method, Atterberg limits were determined using the Cassagrande and paste wick method, and compressive strength was evaluated using the California loading test and ASTM standards. These investigations were carried out in the soil mechanics laboratory of Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources.

Results: The results revealed that the addition of stone powder led to an increase in the contribution of the coarse soil fraction. Specifically, when 20% of stone powder was added and after 28 days, more than 60% of the weight in each sample consisted of particles with a diameter greater than 0.1 mm. In terms of plastic limit, plasticity index, and load-bearing capacity, there was no significant difference between the processing times of 28 days and 90 days. However, these values differed significantly from those recorded after 7 days of processing. The addition of rock powder to the soil samples resulted in a reduction in the liquid limit and plasticity index. With the inclusion of 20% stone powder, the soil samples transitioned from a plastic state (plasticity index = 25) to a moderately plastic state (plasticity index = 8). Furthermore, the highest value for CBR (19%), indicating soil load-bearing capacity, was achieved when 20% of rock powder was added.

Conclusion: The research findings demonstrated that the inclusion of travertine stone powder at a weight percentage of 20% and a processing time of 28 days had the most significant positive impact on the mechanical strength of low-plasticity clay soil. From a practical standpoint, this optimal amount can be added to forest road soil, mixed thoroughly using disking machinery to a depth of 20 cm, and subsequently compacted using a roller. By following this procedure, waste stone powder can effectively stabilize and repair areas prone to instability and settlement on forest roads.

Cite this article: Parsakhoo, Aidin, Rezaee Motlagh, Aiub, Gholamy, Zohreh. 2024. The effect of using stone powder in improving the mechanical properties of forest roadbed. *Journal of Wood and Forest Science and Technology*, 30 (4), 131-145.

© The Author(s).
DOI: 10.22069/JWFST.2024.21650.2030
Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

نشریه پژوهش‌های علوم و فناوری چوب و جنگل

شاپا چاپی: ۲۳۲۲-۲۰۷۷
شاپا آنلاین: ۲۳۲۲-۲۷۸۶

تأثیر استفاده از ضایعات کارگاه‌های سنگ‌بُری در بهبود ویژگی‌های مکانیکی خاک بستر جاده‌های جنگلی

آیدین پارساخو*[۱]، ایوب رضایی مطلق[۲]، زهره غلامی[۳]

۱. نویسنده مسئول، دانشیار گروه جنگلداری، دانشکده علوم جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.
رایانامه: parsakhoo@gau.ac.ir

۲. دانش‌آموخته دکتری گروه جنگلداری، دانشکده علوم جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.
رایانامه: aiubrezaee@yahoo.com

۳. دانشجوی دکتری گروه جنگلداری، دانشکده علوم جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.
رایانامه: ghlamyzhrh@gmail.com

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله کامل علمی- پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۲۲
تاریخ ویرایش: ۱۴۰۲/۰۷/۱۶
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۱۷

واژه‌های کلیدی:
پودر سنگ،
حدود آتربرگ،
خاک CL،
زمان عمل‌آوری،
ظرفیت بارگذاری جاده

چکیده

سابقه و هدف: خاک‌های ریزدانه غالباً دارای مشکلاتی از جمله پایین بودن قابلیت بارگذاری و مقاومت برشی، دشواری تراکم و نشست می‌باشند. ازاین‌رو تثبیت خاک‌های ریزدانه با مواد افزودنی همواره مورد توجه مهندسین راه‌سازی بوده است. از سوی دیگر امروزه استفاده از مواد ضایعاتی در تثبیت خاک با توجه به اقتصادی بودن آن رایج شده است. در این مطالعه از پودر سنگ گرانیت که ضایعات کارگاه‌های سنگ‌بُری محسوب می‌شود، برای تثبیت خاک‌های ریزدانه استفاده گردید.

مواد و روش‌ها: نمونه‌های خاک رس با خمیرایی کم (CL) با مقادیر متفاوت ۰، ۳، ۵، ۱۰ و ۱۵ و ۲۰ درصد خاک‌برش سنگ گرانیت نسبت به خاک خشک) مخلوط شد. زمان عمل‌آوری خاک‌سنگ ۷، ۲۸ و ۹۰ روز در نظر گرفته شد. در مرحله بعد ویژگی‌های ژئوتکنیکی شامل دانه‌بندی، حدود آتربرگ و قابلیت بارگذاری مورد بررسی قرار گرفت. بررسی ویژگی‌های دانه‌بندی به روش الک تر، حدود آتربرگ به روش کاساگرانده و فتیله خمیری و مقاومت فشاری به کمک آزمایش بارگذاری کالیفرنیا و بر اساس استانداردهای ASTM در آزمایشگاه مکانیک خاک دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان انجام پذیرفت.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که با افزودن پودر سنگ، سهم بخش درشت‌دانه خاک افزایش یافت. به‌طوری‌که با افزودن ۲۰ درصد پودر سنگ و با گذشت ۲۸ روز، بیش از ۶۰ درصد از وزن هر نمونه به ذرات با قطر بیش‌تر از ۰/۱ میلی‌متر تعلق یافت. بین زمان‌های عمل‌آوری ۲۸ روز و

۹۰ روز تفاوت معنی‌داری از نظر حد روانی، شاخص روانی و ظرفیت بارگذاری وجود نداشت؛ اما مقادیر متغیرهای یادشده تفاوت معنی‌داری با ارقام ثبت‌شده در زمان عمل‌آوری ۷ روز داشتند. افزودن پودر سنگ به نمونه‌های خاک باعث کاهش حد روانی و شاخص خمیری شد. با افزودن ۲۰ درصد پودر سنگ نمونه‌های خاک از حالت خمیری (شاخص خمیری = ۲۵) به حالت خمیری متوسط (شاخص خمیری = ۸) تبدیل شدند. علاوه بر این، بیش‌ترین مقدار قابلیت بارگذاری خاک (۲۲ درصد) با افزودن ۲۰ درصد پودر سنگ به وجود آمد.

نتیجه‌گیری: یافته‌های پژوهش نشان داد که پودر سنگ تراورتن در مقدار ۲۰ درصد وزنی و زمان عمل‌آوری ۲۸ روز دارای بیش‌ترین اثرگذاری مثبت بر مقاومت مکانیکی خاک رسی با خمیرایی کم بود. از منظر کاربردی می‌توان این مقدار بهینه را به خاک بستر جاده‌های جنگلی افزود و از طریق عملیات دیسک‌زنی تا عمق ۲۰ سانتی‌متری اختلاط و سپس با غلتک تراکم ایجاد کرد. بدین‌ترتیب پودر سنگ ضایعاتی گرانیت برای تثبیت و ترمیم لکه‌های مستعد ناپایداری و نشست در جاده‌های جنگلی کارایی مطلوبی دارد.

استناد: پارساخو، آیدین، رضایی مطلق، ایوب، غلامی، زهره (۱۴۰۲). تأثیر استفاده از ضایعات کارگاه‌های سنگ‌بُری در بهبود ویژگی‌های مکانیکی خاک بستر جاده‌های جنگلی. *نشریه پژوهش‌های علوم و فناوری چوب و جنگل*، ۳۰ (۴)، ۱۴۵-۱۳۱.
DOI: 10.22069/JWFST.2024.21650.2030

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان
© نویسندگان.

مقدمه

خاک‌های ریزدانه حاوی رس در جنگل‌های شمال کشور، مشکلات زیادی در پروژه‌های ساختمانی به‌ویژه جاده‌سازی ایجاد کرده‌اند (۱). این مناطق به‌دلیل بارندگی زیاد، بالا بودن سطح آب‌های زیرزمینی، عدم زهکشی مناسب و فراوانی خاک‌های ریزدانه رسی و یا سیلتی، با مسأله تورم خاک مواجه بوده که به‌نوبه خود باعث به وجود آمدن ناهمواری در بستر راه و درنتیجه خرابی زودهنگام روسازی شبکه حمل‌ونقل می‌شود (۲). اصلاح خاک یک اصطلاح کلی برای هر روش فیزیکی، شیمیایی، بیولوژیکی، یا ترکیبی از آن‌ها می‌باشد که جهت بهبود ویژگی‌های خاک به کار می‌رود و روش‌های اصلاح خاک شامل تراکم، تسلیح، کنترل زهکشی، افزودن مواد شیمیایی، طبیعی یا ترکیبی از هر نوع روش فیزیکی و شیمیایی می‌باشد (۳). از اهداف اصلی اصلاح خاک، تسریع در عملیات ساختمانی و بهبود مقاومت و پایداری خاک می‌باشد. بهبود ویژگی‌های مکانیکی خاک ممکن است برحسب نیاز به‌منظور افزایش مقاومت فشاری یا مقاومت در برابر نیروهای محیطی به کار رود. از گذشته‌های دور استفاده از مواد افزودنی تثبیت‌کننده خاک مانند خاکستر چوب و آهک مرسوم بوده است (٤). بررسی‌های انجام‌شده نشان می‌دهد که در شرایط محیطی و اقلیم مرطوب و با دمای نسبتاً پایین عمل واکنش‌پذیری آهک و خاک ریزدانه به‌خوبی انجام نخواهد پذیرفت، ضمن آن‌که افزودن آهک باعث تردشدگی خاک نیز شده و این امر باعث می‌شود تا خاک مقاومت خود را تحت‌تأثیر تنش به‌سرعت از دست دهد (۵). استفاده از آهک و سیمان برای افزایش مقاومت خاک به‌دلیل محدود بودن منابع با مشکل مواجه بوده و نیاز به کاهش مصرف آهک و سیمان محسوس بوده است. امروزه استفاده از مواد ضایعاتی در تثبیت خاک‌ها با توجه به اقتصادی بودن آن در مقایسه با افزودنی‌های سنتی رایج شده است (٦).

به‌طورکلی، استفاده از ضایعات و مواد بازیافتی علاوه بر بهبود خصوصیات فیزیکی و مکانیکی خاک در مقابل بارهای وارده، به‌عنوان یک روش بهینه در کنترل و جلوگیری از آلودگی محیط‌زیست محسوب شده و صرفه‌جویی اقتصادی نیز دربر خواهد داشت. مدیریت کارآمد پسماند و حفظ محیط‌زیست از جمله مسائل دارای اهمیت در زمینه‌های مهندسی از جمله راه‌سازی محسوب می‌شود. پودر سنگ یا خاک‌سنگ یک محصول جانبی صنایع سنگ‌بری بوده و یا از کوبش انواع مختلف سنگ توسط دستگاه‌های سنگ‌شکن تولید می‌شود (۷). ترکیبات معدنی موجود در آن بستگی به نوع سنگی دارد که کوبیده شده است برای مثال ممکن است خاک‌سنگ از برش سنگ گرانیت و یا کوبش سنگ‌آهک و کربنات کلسیم به‌دست آید و درنتیجه ویژگی‌های این کانی‌های معدنی را به همراه داشته باشد (۸ و ۹). ساکسینا (۲۰۱۷) در کشور ترکیه، خاک رس را با ۳۰ تا ۵۰ درصد پودر سنگ مرمر و ۲۰ تا ٤۰ درصد ماسه و با فاصله ۱۰ درصد مخلوط نمود. نتایج نشان داد که حد روانی، شاخص خمیری، میزان رطوبت بهینه، نفوذپذیری و چسبندگی کاهش و حد خمیری، حد انقباض، حداکثر چگالی خشک، نسبت باربری کالیفرنیا و زاویه اصطکاک داخلی با افزایش محتوای پودر مرمر افزایش یافت. تجزیه‌وتحلیل اقتصادی مشخص نمود که مقدار بهینه پودر سنگ مرمر برای تثبیت شن و ماسه مخلوط با خاک رس ۲۰ درصد است و می‌تواند در تقویت رویه راه استفاده شود (۱۰). سایگیلی (۲۰۱۵) از پودرسنگ مرمر در تثبیت خاک رس متورم استفاده کرد. نسبت‌های افزودن گرد و غبار مرمر مورد مطالعه ۰، ۵، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد وزنی بودند. نتایج نشان داد که افزودن گرد و غبار

مرمر پارامترهای مقاومت برشی را بهبود بخشیده و پتانسیل تورم نمونه‌ها را کاهش داد. استفاده از مواد ضایعاتی گرد و غبار مرمر در خاک‌های مشکل‌ساز، کمک زیادی به اقتصاد و حفظ منابع خواهد کرد (۱۱).

یافته‌ها نشان داده است که خاک‌سنگ سبب افزایش مقاومت خاک و بتون می‌شود. روح‌بخشان و کلانتری (۲۰۱٦) از پودر حاصل از برش سنگ در کارخانه‌های سنگ‌بری، برای تثبیت خاک رس به همراه آهک استفاده کردند. نمونه‌های خاک در حالت طبیعی و زمانی با درصدهای مختلف آهک و پودر ضایعات سنگی ترکیب شدند. نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری و نسبت باربری کالیفرنیا نشان می‌دهد که در زمان‌های عمل‌آوری مختلف، افزودن پودر ضایعات سنگی و آهک باعث افزایش مقدار مقاومت فشاری و افزایش مقدار نسبت باربری کالیفرنیا شده است (۱۲). موسی و مگدی (۲۰۱۰) طی پژوهشی به بررسی استفاده از خاک‌سنگ ضایعاتی بر حدود آتربرگ، تراکم پروکتور استاندارد و مقاومت فشاری محصور نشده سه نوع خاک رس پرداختند. نتایج نشان داد که افزودن خاک‌سنگ ضایعاتی به هر سه نوع خاک رسی اثر افزایشی بر حداکثر وزن مخصوص خشک و کاهشی بر رطوبت بهینه داشته است. هم‌چنین افزودن خاک‌سنگ باعث کاهش حد روانی و کاهش شاخص خمیری و افزایش مقاومت فشاری شد (۱۳). الجولانی (۲۰۱۲) به بررسی عملکرد خاک‌سنگ و آهک بر قابلیت بارگذاری[1] یا CBR خاک پرداخته و نتیجه‌گیری کرد که با افزودن نسبت ۳۰ درصدی خاک‌سنگ ضایعاتی و آهک، زاویه اصطکاک داخلی خاک در حدود ۵۰ درصد افزایش و ضریب چسبندگی خاک در حدود ٦٤ درصد کاهش یافت. هم‌چنین افزودن ۳۰ درصدی هم‌زمان خاک‌سنگ و آهک باعث افزایش ۵ درصدی CBR شد (۱٤). سامرعبدالرسول (۲۰۱۵) در منطقه‌ای در کشور عراق نسبت به بهبود خواص مهندسی خاک رس با افزودن ۱، ۳ و ۵ درصد پودر سنگ اقدام کرد. نتایج نشان داد که پودر سنگ با خاک رس واکنش می‌دهد و باعث کاهش انعطاف‌پذیری و منحنی اندازه دانه خاک می‌شود با افزایش درصد پودر سنگ، توزیع به سمت درشت‌دانه‌ها با استحکام بالاتر منتقل می‌شود (۱۵). ابراهیم (۲۰۲۲) در مطالعه‌ای در اربیل عراق اثر استفاده از پودر سنگ را به‌عنوان تثبیت‌کننده خاک رسی مورد بررسی قرار داد. آزمایش‌های مکانیک خاک روی مخلوط‌های پودر سنگ و خاک با نسبت‌های ثابت پودر سنگ ۰، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد وزن خشک انجام شد. نتایج نشان داد که مقاومت برشی زهکشی نشده در تمام نسبت‌های افزودنی افزایش یافته و با افزایش پودر سنگ، شاخص انبساط کاهش یافت (۱٦).

پودرسنگ یا خاک‌سنگ یک محصول جانبی صنایع سنگ‌بری بوده و یا از کوبش انواع مختلف سنگ توسط دستگاه‌های سنگ‌شکن تولید می‌شود. تخمین زده می‌شود که هر واحد سنگ‌شکن ۱۵ تا ۲۰ درصد پودر سنگ تولید می‌کند. دفع چنین ضایعاتی مشکلات ژئومحیط زیستی زیادی مانند مشکلات دفع و دفن زباله، خطرات بهداشتی و زیست‌محیطی ایجاد می‌کند (۱۷ و ۱۸). بهترین راه برای از بین بردن این مشکلات استفاده از این ضایعات در صنایع مختلف به‌خصوص پروژه‌های عمرانی و ساخت و نگهداری جاده‌های جنگلی است؛ اما لازمه استفاده از پودرسنگ ضایعاتی در مقیاس وسیعی اجرایی، انجام بررسی‌های دقیق آزمایشگاهی می‌باشد. ازاین‌رو در این پژوهش از درصدهای مختلف پودرسنگ تراورتن مستخرج از کارگاه‌های سنگ‌تراشی شهرستان گرگان برای بررسی‌های آزمایشگاهی و تحلیل اثر این نوع پودرسنگ بر خواص مکانیکی خاک‌های ریزدانه متورم‌شونده که به‌وفور در مسیر جاده‌های جنگلی

1- California Bearing Ratio (CBR)

یافت می‌شوند، استفاده شد و درنهایت بهترین زمان عمل‌آوری و درصد بهینه اختلاط مشخص گردید.

مواد و روش‌ها

طرح نمونه‌برداری: خاک مورد استفاده در این پژوهش از سری دو طرح جنگل‌داری آموزشی- پژوهشی دکتر بهرام‌نیا و از مسیر عبور جاده‌های پیشنهادی منطقه تهیه شد. این خاک از نوع رس با خمیرایی کم بود (CL). ابتدا قسمتی از طول مسیر دربرگیرنده خاک ریزدانه در مردادماه سال ۱۴۰۲ به روش تصادفی منظم و در فواصل ۱۰ متر نمونه‌برداری شد. بدین‌ترتیب که در هر یک از فواصل حدود ۲۰ کیلوگرم خاک تا عمق سنگ بستر با استفاده از بیل جمع‌آوری و بلافاصله به آزمایشگاه مکانیک خاک منتقل شد. در مجموع ۲۰ نمونه به وزن کل ۴۰۰ کیلوگرم تهیه و مورد بررسی قرار گرفت.

روش پژوهش: در این مطالعه از خاک‌سنگ گرانیت (سنگ آذرین) به اندازه ۰/۰۵ تا ۰/٤ میلی‌متر که در کارگاه‌های سنگ‌تراشی به وجود می‌آید، برای تثبیت خاک‌های ریزدانه استفاده شد. نمونه‌های خاک با مقادیر متفاوت ۰، ۱، ۳، ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد پودر سنگ نسبت به خاک خشک توسط همزن صنعتی مخلوط شد. به تمامی نمونه‌ها مقدار ۳ درصد وزنی آهک نیز اضافه گردید. زمان عمل‌آوری ترکیب پودر سنگ و خاک ۷، ۲۸ و ۹۰ روز در نظر گرفته شد (۱۹). ویژگی‌های ژئوتکنیکی که بر روی نمونه‌ها بررسی شد شامل ویژگی‌های تراکمی، دانه‌بندی، حدود آتربرگ و مقاومت فشاری یا CBR بود.

اندازه‌گیری حدود آتربرگ و دانه‌بندی: برای انجام آزمایش حدود آتربرگ ابتدا نمونه‌های خاک از الک نمره ٤۰ عبور داده شد. حد خمیری خاک یا درصد رطوبتی که در آن خمیره خاک هنگام ورز دادن شروع به ترک خوردن می‌کند از رابطه ۱ و بر اساس استاندارد ASTM D 89,90-81 به دست آمد (۲۰):

$$PL = \frac{W_2 - W_3}{W_3 - W_1} \times 100 \qquad (۱)$$

در این رابطه، W_2 وزن ظرف و خاک مرطوب بر حسب گرم، W_3 وزن ظرف و خاک خشک بر حسب گرم و W_1 وزن ظرف خالی بر حسب گرم می‌باشد. حد روانی خاک نیز با استفاده از رابطه ۲ و براساس استاندارد ASTM D 4318-87 محاسبه شد (۲۰):

$$LL = W_N * \left[\frac{N}{25}\right]^{0.121} \qquad (۲)$$

در این رابطه، N تعداد ضرباتی است که در آن ۱۳/۷ میلی‌متر از طول شیار ایجاد شده روی خاک درون ظرف کاساگرانده بسته می‌شود و W درصد رطوبتی است که در آن این طول از شیار بسته می‌شود. شاخص خمیری از تفاضل حد روانی از حد خمیری به‌دست آمد (رابطه ۳) (۲۰).

$$PI = LL - PL \qquad (۳)$$

نمونه‌های خاک تیمارشده و هوا خشک از الک ۸ میلی‌متری عبور داده شد. سپس نمونه‌های خاک به روش الک تر (به مدت ۱۰ دقیقه) در سری الک‌های ٤ (شماره الک ۵)، ۲ (شماره الک ۱۰)، ۱ (شماره الک ۱۸)، ۰/۵ (شماره الک ۳۵) و ۰/۲۵ میلی‌متر (شماره الک ٦۰) در آب حرکت داده می‌شوند. خاکدانه‌های باقی‌مانده روی هر الک در آون و در دمای ۱۰۵ درجه خشک و بعد از وزن کردن منحنی دانه‌بندی رسم می‌شود (ASTM D 422-87).

محاسبه مقدار CBR: در این پژوهش ابتدا از طریق آزمایش پروکتور محتوی رطوبتی بهینه که در آن حداکثر تراکم خشک خاک حاصل می‌گردد، به دست آمد (۲۱). سپس آزمایش CBR یا نرخ بارگذاری کالیفرنیا جهت تعیین ظرفیت بارگذاری خاک‌ها

مورد استفاده قرار گرفت. 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 (ASTM D 1883-87). حدود ۷ کیلوگرم خاک کاملاً خشک را از الک ٤ عبور داده و به میزان رطوبت بهینه به‌دست‌آمده 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، ۱۰ و ۱۲/۵ 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).

$$CBR = \frac{\text{ضریب دستگاه} \times \text{ضریب قرائت‌شده فشارسنج}}{\text{فشار استاندارد}} \times ۱۰۰ \qquad (٤)$$

جدول ۱- وضعیت روسازی با توجه به مقادیر مختلف CBR (۲۲).

Table 1. Pavement condition according to different CBR values (22).

ظرفیت باربری کالیفرنیا California bearing ratio	وضعیت روسازی Pavement condition
5 >CBR> 2	خیلی ضعیف Very weak
10 >CBR> 5	ضعیف Weak
20 >CBR> 10	متوسط Moderate
40 >CBR> 20	خوب Good
70 >CBR> 40	خیلی خوب Very good
100 >CBR> 70	عالی Excellent

تجزیه‌وتحلیل آماری: تجزیه‌وتحلیل‌های آماری در قالب طرح فاکتوریل با دو عامل اصلی یا متغیر مستقل مقدار پودر سنگ گرانیت در ٦ سطح (۰، ۳، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد) و زمان عمل‌آوری در ۳ سطح (۷، ۲۸ و ۹۰ روز) می‌باشد. بدین ترتیب در کل ۱۸ تیمار هر یک با ۳ تکرار به اجرا درآمد. تجزیه واریانس به روش ANOVA و مقایسه میانگین‌ها به روش Tukey در سطح احتمال ۵ درصد در نرم‌افزار SAS به اجرا درآمد.

نتایج و بحث

با توجه به قیمت بالای سیمان و آلودگی‌های محیط‌زیستی ناشی از تولید سیمان، پژوهش‌گران به‌دنبال استفاده از مواد جایگزین برای افزایش ظرفیت مقاومت خاک بوده‌اند. یکی از مقرون به‌صرفه‌ترین مواد پودر سنگ است (١٤). در پژوهش حاضر نتایج تجزیه واریانس نشان داد که مقدار پودرسنگ اضافه‌شده به خاک رس با خمیرایی کم باعث بروز تغییرات معنی‌داری در مقدار حد روانی، شاخص خمیری و ظرفیت بارگذاری خاک شد. زمان عمل‌آوری نیز تأثیر معنی‌داری بر بهبود ویژگی‌های مکانیکی خاک داشت. اثر متقابل مقدار پودر سنگ و زمان عمل‌آوری در سطح احتمال ۰/۱ درصد بر مقدار حد روانی، شاخص خمیری و ظرفیت بارگذاری معنی‌دار بود (جدول ۲). این یافته‌ها با نتایج پژوهش‌های بسیاری از پژوهش‌گران مطابقت دارد.

به‌عنوان‌مثال بشارا و همکاران (۲۰۱٤) اثر پودر سنگ را بر خواص ژئوتکنیکی خاک ضعیف بررسی کردند و نتیجه گرفتند که CBR و حداکثر چگالی خشک خاک‌های ضعیف را می‌توان با مخلوط کردن پودر سنگ بهبود بخشید. آن‌ها هم‌چنین نشان دادند که حد روانی، حد خمیری، شاخص خمیری و رطوبت بهینه با افزودن پودر سنگ کاهش یافت و این باعث افزایش معنی‌دار (P<۰/۰۵) مقاومت خاک به‌عنوان مصالح زیرسازی جاده گردید (۲۳). سابات (۲۰۱۲) با انجام یک سری آزمایش‌ها به این نتیجه رسید که افزودن پودر سنگ باعث کاهش حد روانی، حد خمیری، شاخص خمیری، رطوبت بهینه، انسجام و افزایش حد انقباض، حداکثر چگالی خشک، زاویه اصطکاک داخلی خاک شد (۲٤).

جدول ۲- تجزیه واریانس اثر مقدار پودرسنگ و زمان عمل‌آوری بر برخی ویژگی‌های مکانیکی خاک.

Table 2. Analysis of variance for the effect of amount of stone powder and curing time on some mechanical properties of soil.

منبع تغییرات Source	متغیرهای وابسته Dependent Variable	مجموع مربعات Sum Squares	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean Square	F	معنی‌داری Sig.
مدل تصحیح شده Corrected Model	حد روانی (LL)	3045.721[a]	17	179.160	138.585	0.000
	شاخص خمیری (PI)	2406.955[b]	17	141.586	123.019	0.000
	ظرفیت بارگذاری (CBR)	1556.655[c]	17	91.568	81.865	0.000
عرض از مبداء Intercept	حد روانی (LL)	82610.489	1	82610.489	6.390E4	0.000
	شاخص خمیری (PI)	15412.802	1	15412.802	1.339E4	0.000
	ظرفیت بارگذاری (CBR)	6796.179	1	6796.179	6.076E3	0.000
مقدار پودر سنگ Stone powder	حد روانی (LL)	2356.705	5	471.341	364.596	0.000
	شاخص خمیری (PI)	1944.995	5	388.999	337.988	0.000
	ظرفیت بارگذاری (CBR)	1255.335	5	251.067	224.464	0.000
زمان عمل‌آوری Curing time	حد روانی (LL)	573.219	2	286.610	221.701	0.000
	شاخص خمیری (PI)	367.114	2	183.557	159.487	0.000
	ظرفیت بارگذاری (CBR)	197.913	2	98.956	88.471	0.000
مقدار پودر سنگ × زمان عمل‌آوری Stone powder × Curing time	حد روانی (LL)	115.796	10	11.580	8.957	0.000
	شاخص خمیری (PI)	94.846	10	9.485	8.241	0.000
	ظرفیت بارگذاری (CBR)	103.407	10	10.341	9.245	0.000
خطا Error	حد روانی (LL)	46.540	36	1.293		
	شاخص خمیری (PI)	41.433	36	1.151		
	ظرفیت بارگذاری (CBR)	40.267	36	1.119		
کل Total	حد روانی (LL)	85702.750	54			
	شاخص خمیری (PI)	17861.190	54			
	ظرفیت بارگذاری (CBR)	8393.100	54			
کل تصحیح شده Corrected Total	حد روانی (LL)	3092.261	53			
	شاخص خمیری (PI)	2448.388	53			
	ظرفیت بارگذاری (CBR)	1596.921	53			

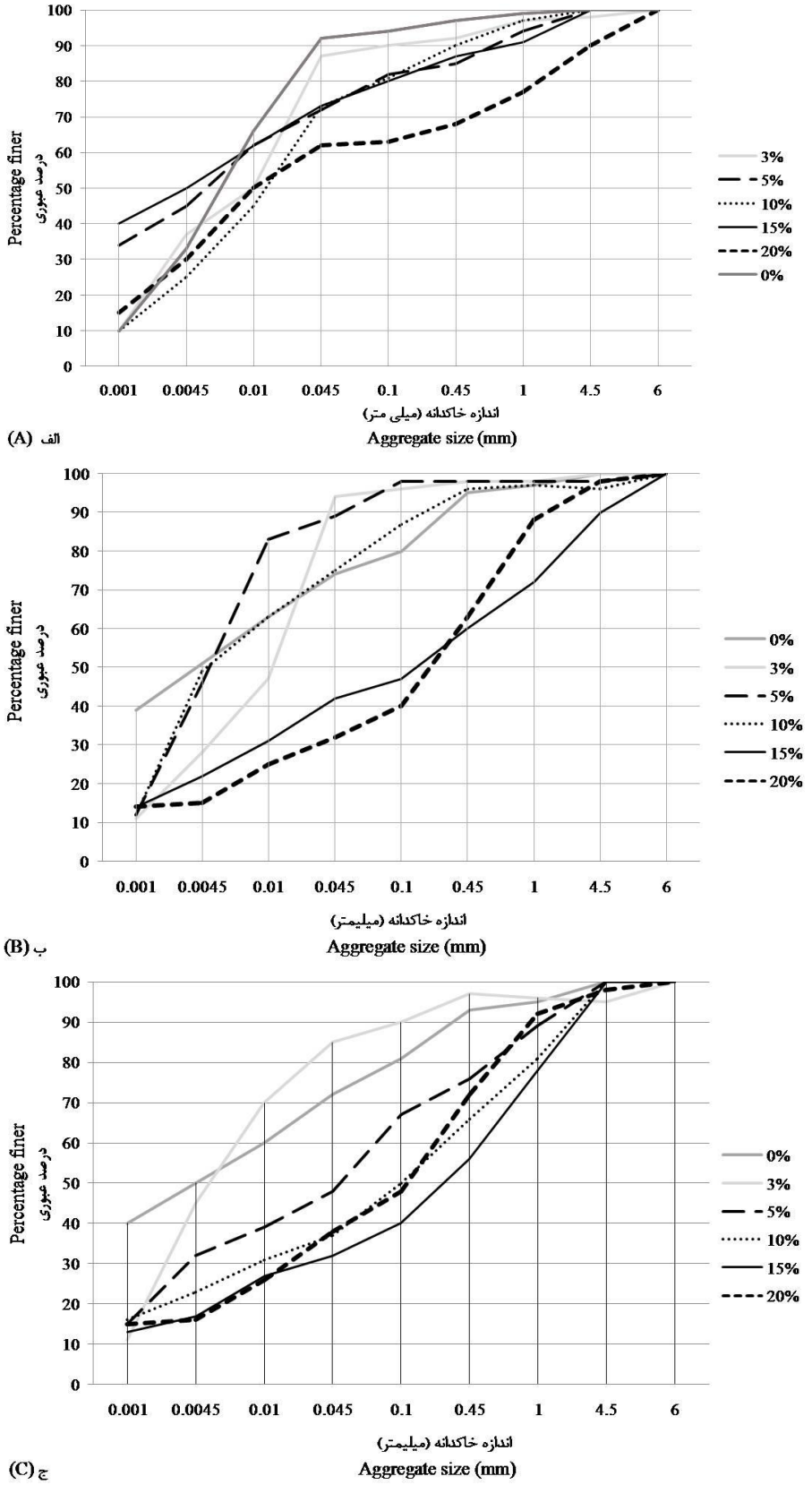
با مطالعه منحنی‌های دانه‌بندی نمونه‌های خاک مشخص گردید که با افزودن پودر سنگ، سهم بخش درشت‌دانه خاک تا ٦۰ درصد افزایش یافت (شکل ۱ الف)، به‌طوری‌که با افزودن ۱۵ تا ۲۰ درصد پودر سنگ و با گذشت ۲۸ روز، بیش از ٦۰ درصد از وزن هر نمونه به ذرات با قطر بیش‌تر از ۰/۱ میلی‌متر تعلق یافت (شکل ۱ ب). این موضوع در زمان عمل‌آوری ۹۰ روز نیز به همین صورت بود (شکل ۱ ج). بدین‌ترتیب با افزایش درصد پودر سنگ، منحنی‌های توزیع اندازه دانه به‌طور قابل‌توجهی به سمت درشت‌تر تغییر می‌کنند و خاک کلوخه می‌شود. این ممکن است ناشی از واکنش پوزولانی فوری باشد که باعث کلوخه شدن ذرات رس می‌شود (۱۵ و ۱٦). نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که به‌طورکلی بین زمان‌های عمل‌آوری ۲۸ روز و ۹۰ روز تفاوت معنی‌داری از نظر حد روانی، شاخص روانی و ظرفیت بارگذاری وجود نداشت؛ اما مقادیر متغیرهای یادشده تفاوت معنی‌داری با ارقام ثبت‌شده در زمان عمل‌آوری ۷ روز داشتند. به‌طوری‌که در زمان‌های عمل‌آوری ۲۸ روز و ۹۰ روز، حد روانی و شاخص خمیری در سطح احتمال ۵ درصد کم‌تر و ظرفیت بارگذاری در سطح احتمال ۵ درصد بیش‌تر از زمان عمل‌آوری ۷ روز بود (جدول ۳). بر این اساس می‌توان بیان نمود که نمونه‌های خاک پس از ۲۸ روز، همه فعل‌وانفعالات مثبت و یا منفی ناشی از افزودن پودر سنگ را بروز داده و گذشت زمان بیش‌تر، تأثیر معنی‌داری بر خواص مکانیکی خاک ندارد. این یافته با نتایج پژوهش‌های ساکسینا (۲۰۱۷)، سایگیلی (۲۰۱۵)، عباسی و همکاران (۲۰۱۹) و ابراهیم (۲۰۲۲) مطابقت دارد. این پژوهش‌گران ثابت کردند که زمان عمل‌آوری ۲۸ روز برای حصول حداکثر اثرگذاری پودرسنگ بر خواص مکانیکی خاک کافی می‌باشد (۱۰، ۱۱، ۱۹ و ۱٦).

جدول ۳- مقایسه مشخصات مکانیکی نمونه‌های خاک تیمارشده با پودرسنگ در زمان‌های عمل‌آوری مختلف.

Table 3. Comparison of mechanical characteristics of soil samples treated with stone powder at different curing times.

مشخصات مکانیکی خاک Soil mechanical properties	زمان عمل‌آوری (روز) Curing time (day)	مقدار پودرسنگ (درصد) Amount of stone powder (%)					
		شاهد (۰)	۳	۵	۱۰	۱۵	۲۰
حد روانی Liquid limit	7	53^{a}	51^{a}	45^{a}	44^{a}	35^{a}	32^{a}
	28	44^{b}	42^{b}	40^{b}	33^{b}	32^{b}	27^{b}
	90	48^{ab}	40^{b}	39^{b}	35^{b}	31^{b}	28^{b}
شاخص خمیری Plastic index	7	27^{a}	24^{a}	23^{a}	20^{a}	16^{a}	12^{a}
	28	24^{a}	21^{a}	18^{b}	13^{b}	10^{b}	5^{b}
	90	26^{a}	20^{a}	15^{b}	10^{b}	10^{b}	6^{b}
ظرفیت بارگذاری California bearing ratio	7	5^{a}	6^{a}	7^{a}	9^{c}	11^{b}	13^{b}
	28	4^{a}	7^{a}	9^{a}	13^{a}	17^{a}	22^{a}
	90	5^{a}	8^{a}	11^{a}	14^{a}	17^{a}	23^{a}

حروف متفاوت در هر ستون نشان‌دهنده وجود تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد است

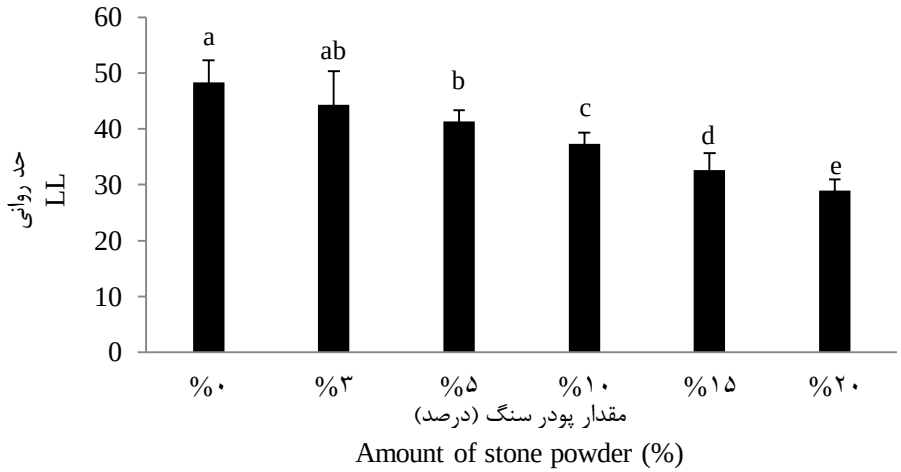


شکل ۱- منحنی دانه‌بندی خاک در تیمارهای مختلف مقادیر پودر سنگ و زمان‌های عمل‌آوری (الف) ۷ روز، (ب) ۲۸ روز و (ج) ۹۰ روز.

Figure 1. Soil granulation curve in different treatments of stone powder amounts and curing times (a) 7 days, (b) 28 days and (c) 90 days.

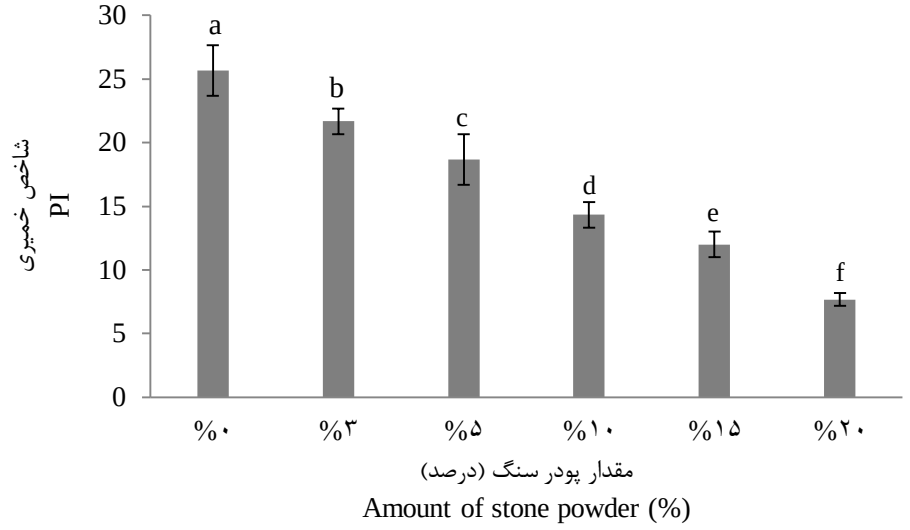
افزودن پودر سنگ به نمونه‌های خاک باعث کاهش حد روانی شد. به‌طوری‌که کم‌ترین مقدار حد روانی درنتیجه افزودن ۲۰ درصد پودرسنگ که حداکثر مقدار پودرسنگ مورد استفاده در پژوهش حاضر بود، ایجاد گردید (شکل ۲). این موضوع در مورد شاخص خمیری هم مشاهده شد و با افزودن ۲۰ درصد پودر سنگ نمونه‌های خاک از حالت خمیری (شاخص خمیری = ۲۵) به حالت خمیری متوسط (شاخص خمیری = ۸) تبدیل شدند (شکل ۳). این یافته با نتایج پژوهش‌های ساکسینا (۲۰۱۷) در کشور ترکیه مطابقت دارد. وی دریافت که مقدار بهینه پودر سنگ برای تثبیت شن و ماسه مخلوط با خاک رس ۲۰ درصد است (۱۰). سایگیلی (۲۰۱۵) نیز نشان داد که افزودن ۲۰ الی ۳۰ درصد پودر سنگ پارامترهای مقاومت برشی را بهبود بخشیده و پتانسیل تورم نمونه‌ها را کاهش داد. لازم به ذکر است که 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. واکنش‌های پوزولانی در ترکیب خاک و پودرسنگ و کاهش حد روانی به دلیل مواد سیلیسی و آلومینیومی که ارزش سیمانی کمی دارند و ذرات بزرگ موجود در بافت خاک رخ می‌دهد (۲۵ و ۲٦).

نتایج پژوهش حاضر نشان داد که افزودن پودر سنگ به نمونه‌های خاک رس با خمیرایی کم تأثیر معنی‌داری بر بهبود مقاومت فشاری نمونه‌ها داشت. به‌طوری‌که بیش‌ترین مقدار CBR یا همان ظرفیت بارگذاری خاک (۲۲ درصد) با افزودن ۲۰ درصد پودر سنگ حاصل شد (شکل ٤). مقادیر CBR به‌دلیل فعل‌وانفعالات شیمیایی بین خاک، پودر سنگ و آب برای تشکیل مواد سیمانی یا چسباننده بهبود می‌یابد. یافته‌های پژوهش حاضر با نتایج آگاروال (۲۰۱۵) مطابقت دارد. وی دریافت که اختلاط خاک با پودر سنگ باعث بهبود CBR می‌شود. به‌طوری‌که افزودن تنها ۳۰ درصد پودر سنگ باعث افزایش CBR خاک تا ۵۰ درصد شد (۸). کومار (۲۰۲۱) نشان داد که ترکیب بهینه پودر سنگ (۲۰ درصد) در خاک رسی، فشار تورم و فشار انقباض را کاهش می‌دهد. با افزودن مقدار معینی پودر سنگ در خاک، حد خمیری تا ۸ درصد تغییر می‌کند و حد روانی نیز افزایش می‌یابد (۲۷). در پژوهش حاضر شاخص خمیری با افزودن ۲۰ درصد پودر سنگ تراورتن بعد از گذشت ۲۸ روز ۷۹ درصد کاهش و مقدار CBR ۸۲ درصد افزایش یافت که نشان از اثربخشی معنی‌دار این ماده افزودنی در مقدار و دوره عمل‌آوری یاد شده می‌باشد ($P<۰/۰۵$).



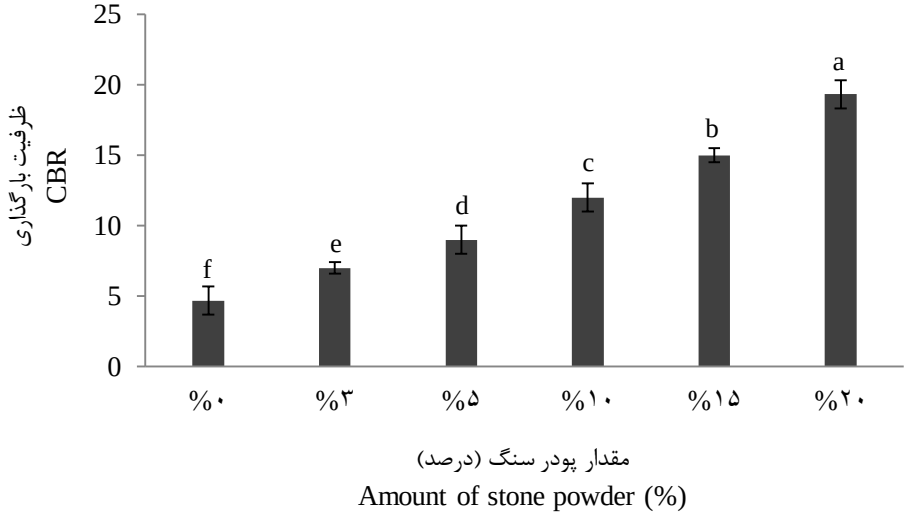
شکل ۲- مقایسه حد روانی نمونه‌های خاک تیمارشده با مقادیر مختلف پودر سنگ.

Figure 2. Comparison of the flow rate of soil samples treated with different amounts of rock powder.



شکل ۳- مقایسه شاخص خمیری نمونه‌های خاک تیمارشده با مقادیر مختلف پودر سنگ.

Figure 3. Comparison of pasty index of soil samples treated with different amounts of rock powder.



شکل ٤- مقایسه ظرفیت بارگذاری نمونه‌های خاک تیمارشده با مقادیر مختلف پودر سنگ.

Figure 4. Comparison of loading capacity of soil samples treated with different amounts of rock powder.

نتیجه‌گیری کلی

زیان اقتصادی هنگفتی به دلیل وجود خاک‌های متورم‌شونده در پی سازه‌های با بارهای سبک مانند جاده‌ها ایجاد شده است. بنابراین استفاده از مواد در دسترس و مقرون‌به‌صرفه محلی برای طراحی پایدار و اقتصادی پروژه‌های ساختمانی در محیط‌های طبیعی و حساس مانند جاده‌های جنگلی ضروری است. برای نیل به این هدف، در این پژوهش استفاده از پودرسنگ به‌عنوان مواد زاید ساختمانی به‌دلیل خصوصیات جامع ژئوتکنیکی و کانی‌شناسی و رفتار متقابل آن‌ها با خاک مورد بررسی قرار گرفت. یافته‌های پژوهش بیانگر آن بود که با افزودن ۲۰ درصد پودر سنگ گرانیت شاخص خمیری خاک‌های ریزدانه با خمیرایی کم بعد از گذشت ۲۸ روز ۷۹ درصد کاهش و مقدار CBR ۸۲ درصد افزایش یافت.

بنابراین ضروری است تا پودر سنگ به‌عنوان یک جزء پایدارکننده بالقوه برای تقویت خاک‌های رسی ضعیف در نظر گرفته شود. نکته دارای اهمیتی که یافته‌های پژوهش حاضر نشان می‌دهد آن است که با توجه به استحکام سنگ گرانیت و دشواری کوبش آن بهتر است از پودرسنگ گرانیت در اندازه ۰/۲-۰/۰۵ میلی‌متر برای تقویت سهم ماسه و درنتیجه افزایش مقدار بخش درشت‌دانه خاک بهره گرفت و برای تقویت بخش ریزدانه نسبت به افزودن ۳ درصد آهک به‌عنوان عامل چسباننده اقدام کرد که این موضوع خود باعث استحکام بستر و مقاومت در برابر آبشویی می‌گردد. براساس این یافته‌های آزمایشگاهی می‌توان درصد وزنی بهینه پودرسنگ گرانیت را از کارگاه‌های سنگ‌بری تهیه و برای تثبیت لایه زیرسازی یا همان خاک بستر طبیعی جاده‌های جنگلی تجویز نمود. برای این کار می‌توان از عملیات اختلاط با دیسک و سپس متراکم‌سازی با غلتک بهره گرفت تا بدین‌ترتیب مقاومت مکانیکی خاک بستر و درنتیجه دوام جاده‌ها بهبود یابد.

سپاسگزاری

این مقاله مستخرج از طرح تحقیقاتی داخل دانشگاه با شماره شناسه ۵۳-٤۷٤-۰۱ می‌باشد، بنابراین نویسندگان مقاله مراتب تشکر و قدردانی خود را از معاونت محترم پژوهشی و فناوری دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان اعلام می‌دارند.

منابع

1. Nasiri, M., Lotfalian, M., Modarres, A., & Wu, W. (2016). Optimum utilization of rice husk ash for stabilization of sub-base materials in construction and repair projects of forest roads. *Croatian J. of Forest Engineering*. 37 (2), 333-344.
2. Lotfalian, M., Parsakhoo, A., & Savadkoohi, A. (2016). Improvement of forest road gravel surfacing quality by nano-polymer CBR PLUS. *Croatian J. of Forest Engineering*. 372, 345-352.
3. Baugherian, A., Janalizadeh, A., & Hesami, S. (2005). The use of the rice husk ash for soil stabilization by lime. 2nd National Conference in Civil Engineering, 10-13 May 2005, Iran University of Science & technology, Tehran, 7p. (In Persian)
4. Rajasekaran, G., & Narasimha Rao, S. (2002). Compressibility behavior of lime-treated marine clay. *Ocean Engineering*. 29 (5), 545-555.
5. Bell, F. G. (1996). Lime stabilization of clay minerals and soil. *J. of Engineering Geology*. 42, 223-237.
6. Yong, R. N., & Ouhadi, V. R. (2007). Experimental study on instability of bases on natural and lime/cement-stabilized clayey soils. *J. of Applied clay science*. 35 (3), 238-149.
7. Salehi, M., Bayat, M., Saadat, M., & Nasri, M. (2021). Experimental study on mechanical properties of cement-stabilized soil blended with crushed stone waste. *KSCE J. of Civil Engineering*. 25, 1974-1984.
8. Agarwal, N. (2015). Effect of stone dust on some geotechnical properties of soil. *IOSR J. of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*. 12 (1), 61-64.
9. Tech, M. (2015). Effect of stone dust on some geotechnical properties of soil. *IOSR J. of Mechanical and Civil Engineering*. 12 (1), 61-63.
10. Saxena, D. (2017). Effects of marble powder and fine sand on properties of expansive soil. *International J. of Engineering Trends and Technology*. 52 (1), 12-16.
11. Saygılı, A. (2015). Use of waste marble dust for stabilization of clayey soil. *Materials Science*. 21 (4), 601-606.
12. Rooh Bakhshan, A., & Kalantari, B. (2015). Stabilization of clay with lime and stone waste powder. *Amirkabir Scientific Research J*. 48 (4), 429-438.

13. Mousa, A., & Magdi, E. (2010). The use of cutting-stone-slurry-waste in engineering practice. *Anadolu J. of Agricultural Sciences.* 25 (1), 29-33.
14. Al-Joulani, N. (2012). Effect of stone powder and lime on strength, compaction and CBR properties of fine soils. *Jordan J. of Civil Engineering*. 6 (1), 1-2.
15. Sameer Abdulrasool, A. (2015). Strength improvement of clay soil by using stone powder. *J. of Engineering*. 21 (5), 72-73.
16. Ibrahim, M. (2022). Influence of stone powder on the mechanical properties of clayey soil. *J. of Engineering*. 28 (7), 54-67.
17. Demirel, B. (2010). The Effect of the using waste marble dust as fine sand on the mechanical properties of the concrete. *International J. of the Physical Sciences.* 5 (9), 1372-1380.
18. Bayesteh, H., Sharifi, M., & Haghshenas, A. (2020). Effect of stone powder on the rheological and mechanical performance of cement-stabilized marine clay/sand. *Construction and Building Materials*. 262, 120792.
19. Abbasi, N., Heydari Pakro, A., & Behramlu, R. (2019). The use of polypropylene fibers, lime and waste stone powder to stabilize clay soil. *J. of Soil and Water Sciences.* 24 (2), 221-234.
20. Atterberg, A. (1911). On the investigation of the physical properties of soils and on the plasticity of clays. *Internationale Mitteilungenfür Bodenkunde*. 1, 10-43. [In German]
21. Davidson, D. T., & Gardiner, W. F. (1949). Calculation of standard proctor density and optimum moisture content from mechanical, analysis, shrinkage and factors and plasticity index. *Highway Research Board*. 29 (1), 447-481.
22. Javed, M. (2014). Soil mechanics tests. Academic Jihad University of Tehran. 195p.
23. Bshara, A. S., Bind, Y. K., & Sinha, P. K. (2014). Effect of stone dust on geotechnical properties of poor soil. *International J. of Civil Engineering and Technology*. 5 (4), 37-47.
24. Sabat, A. K. (2012). A study on some geotechnical properties of lime stabilized expansive soil-quarry dust mixes. *International J. of Emerging Trends in Engineering and Development.* 1 (2), 42-49.
25. Nakayenga, J., Inui, M., Guharay, A., & Hata, T. (2023). Effect of limestone and granite stone powder on properties of cement-treated clay composites and their socioeconomic and environmental impacts. *Construction and Building Materials*. 393, 107-112.
26. Konovalova, N., Pankov, P., Bespolitov, D., Petukhov, V., Panarin, I., Fomina, E., Lushpey, V., Fatkulin, A., & Othman, A. (2023). Road soil concrete based on stone grinder waste and wood waste modified with environmentally safe stabilizing additive. *Case Studies in Construction Materials,* 19, 225-231.
27. Kumar, M. (2021). Evaluation of experimental research on black cotton soil stabilization using stone powder. Materials Today: *Proceedings*, 37 (2), 3490-3493.