

Research Paper

The effect of using agricultural waste ash on improving the mechanical properties of forest roadbed soilSeyed Amir Reza Jaddi Hosseini¹, Aidin parsakhoo^{*2}, Sattar Ezzati³ and Aiub Rezaei Motlagh⁴

1- MSc. Student, Department of Forestry, Faculty of Forest Science, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, I. R. Iran. (amir.r.j.h@gmail.com)

2,*- (Corresponding author) Associate Professor, Department of Forestry, Faculty of Forest Sciences, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, I. R. Iran. (parsakhoo@gau.ac.ir)

3- Assistant Professor, Department of Forestry, Faculty of Forest Sciences, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, I. R. Iran. (ezzati@gau.ac.ir)

4- Research Expert (Ph.D. of forest management), Forest Research Division, Research Institute of Forests and Rangelands, AREEO, Tehran, I. R. Iran. (aiubrezaee@yahoo.com)

Received: 05 February 2025

Accepted: 12 April 2025

Extended Abstract

Background and Objective: Forest road subgrade soils in certain areas often face challenges such as high plasticity, low load-bearing capacity and shear strength, compaction difficulties, and settlement risks. Therefore, soil stabilization and strength improvement through additives have always been of interest to researchers and road engineers. At the same time, the agricultural industry struggles with the increasing volume of waste and by-products from production processes. Many of these residues, due to their mineral composition, possess favorable mechanical properties, making them potential substitutes for traditional soil stabilizers such as lime and cement. Moreover, the structural characteristics of organic materials can contribute to environmental preservation and the biological improvement of unstable and expansive soils.

Material and Methods: In this study, agricultural by-products of walnut and peanut shells were used to reinforce the subgrade soils of forest roads in the Shast Kalateh forest management plan. The soil samples, collected from unstable landslide-prone zones containing expansive clay soils, were obtained from five landslide sites along forest roads. From each site, at least three samples weighing 5 kg each were randomly collected, yielding a total of 15 samples (75 kg). The hard shells of walnuts and peanuts were ground into powder using a professional grinder and then burned in a furnace at 580 °C for two hours to produce ash. Clay soil samples with high plasticity (CH) were mixed with walnut and peanut shell ash in proportions of 0, 5, 10, 15, and 20% (ash size 0.04–0.4 mm). The curing period was set at 28 days. Compaction characteristics, Atterberg limits, load-bearing capacity (CBR), and unconfined compressive strength were then evaluated using Proctor, Casagrande, plastic thread, and CBR tests. Statistical analyses were conducted as a factorial experiment with three factors (waste type at two levels, waste content at five levels, and 10 treatments in total) using SPSS software.

Results: Findings revealed that all treatments increased the CBR values by 2 to 2.5 times; however, none were able to elevate the soil's load-bearing capacity from "poor" to a higher category. The lowest CBR was recorded in soils treated with 3% peanut shell ash, while the highest plasticity index (PI) was observed in the control and soils treated with 10–15% walnut shell ash. Conversely,

the lowest PI was recorded in soils treated with 3% peanut shell ash. Overall, soils treated with peanut shell ash exhibited significantly lower PI values than those treated with walnut shell ash. Due to the high plasticity of the native soil, treatments showed limited effectiveness in improving load-bearing capacity. Thus, their independent use for CH soil mechanical improvement is not recommended, but their potential in combination with additives like lime and cement could be considered.

Conclusion: Higher percentages of walnut shell ash (10–15%) did not effectively reduce soil plasticity, likely due to its stronger affinity for water. In contrast, peanut shell ash at 3% by weight showed promising results in reducing soil plasticity, suggesting its suitability for stabilizing landslide-prone slopes without load-bearing requirements. Overall, while the tested treatments demonstrated limited capacity to enhance load-bearing properties of CH soils, their combined use with lime or cement could be a promising approach for further evaluation.

Keywords: CH soil, Load capacity, Peanut shell ash, Plasticity index, Walnut shell ash.

How to Cite This Article: Jaddi Hosseini, S. A. R., Parsakhoo, A., Ezzati, S., and Rezaei Motlagh, A. (2025). The effect of using agricultural waste ash on improving the mechanical properties of forest roadbed soil. Forest Research and Development, 11(2), 249-265. DOI: [10.30466/jfrd.2025.55946.1752](https://doi.org/10.30466/jfrd.2025.55946.1752)



Copyright ©2024 Jaddi Hosseini et al. Published by Urmia University.

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which allows users to read, copy, distribute, and make derivative works for non-commercial purposes from the material, as long as the author of the original work is cited properly.

تأثیر استفاده از خاکستر ضایعات کشاورزی در اصلاح ویژگی‌های مکانیکی خاک بستر جاده‌های جنگلی

سید امیررضا جدی حسینی^۱، آیدین پارساخو^{۲*}، ستار عزتی^۳ و ایوب رضایی مطلق^۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد عمران و بهره برداری جنگل، دانشکده علوم جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. (amir.r.j.h@gmail.com)

۲- دانشیار، گروه جنگلداری، دانشکده علوم جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. (parsakhoo@gau.ac.ir)

۳- استادیار، گروه جنگلداری، دانشکده علوم جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. (ezzati@gau.ac.ir)

۴- کارشناس بخش تحقیقات جنگل، موسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران. (aiubrezaee@yahoo.com)

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۲۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۱۷

چکیده

مقدمه و هدف: خاک بستر جاده‌های جنگلی در برخی مناطق دارای مشکلاتی مانند خمیرایی بالا، قابلیت بارگذاری و مقاومت برشی پایین، دشواری تراکم و امکان نشست می‌باشد. از این رو، تثبیت و ارتقاء مقاومت خاک با استفاده از مواد افزودنی همواره مورد توجه پژوهشگران و مهندسين راه‌سازی بوده است. امروزه در صنعت کشاورزی مشکلات زیادی در خصوص دفع ضایعات و زباله‌های حاصل از فرآیندهای تولید وجود دارد که هر روز بر حجم آنها افزوده می‌شود. در عین حال، بسیاری از این ضایعات با توجه به اجزای معدنی تشکیل‌دهنده آنها دارای ویژگی‌های مقاومتی مطلوبی هستند که آنها را به‌طور بالقوه به یکی از کاندیدهای اصلی برای جایگزینی با افزودنی‌ها و تثبیت‌کننده‌های سنتی خاک‌های جنگلی مانند آهک و سیمان تبدیل کرده است. علاوه بر این، ویژگی‌های ساختاری مواد آلی می‌تواند به حفظ محیط‌زیست و اصلاح زیستی خاک‌های ناپایدار و منبسط‌شونده کمک کند.

مواد و روش‌ها: در این بررسی، ضایعات محصولات کشاورزی گردو و بادام زمینی برای مقاوم‌سازی خاک بستر جاده‌های جنگلی طرح جنگلداری شصت کلاته مورد استفاده قرار گرفت. خاک مورد استفاده از مناطق رانشی و ناپایدار حاوی خاک متورم شونده تهیه شد. ابتدا پنج نقطه رانشی در امتداد جاده‌های جنگلی که دربرگیرنده خاک ریزدانه است، مشخص و از هر نقطه حداقل سه نمونه هر یک به وزن پنج کیلوگرم و در مجموع ۱۵ نمونه به وزن کل ۷۵ کیلوگرم به‌روش تصادفی تهیه شد. سپس پوسته‌های سخت بادام زمینی و گردو پس از آسیاب در دستگاه خردکن حرفه‌ای عطاری به‌صورت پودر درآمد. در مرحله بعد، پودر پوسته گردو و بادام زمینی به مدت دو ساعت در دمای ۵۸۰ درجه سانتی‌گراد کوره سوزانده و به خاکستر تبدیل

شد. نمونه‌های خاک رسی با خمیرایی بالا (CH) با مقادیر متفاوت صفر، ۵، ۱۰ و ۱۵ و ۲۰ درصد خاکستر پوسته بادام‌زمینی و گردو (اندازه خاکستر ۰/۴-۰/۰۴ میلی‌متر) مخلوط شد. زمان عمل‌آوری ترکیب ضایعات و خاک ۲۸ روز در نظر گرفته شد. سپس ویژگی‌های تراکمی، حدود آتربرگ و ظرفیت بارگذاری (CBR) به‌ترتیب به‌کمک آزمایش‌های پروکتور، روش کاساگرانده و فتیله خمیری و مقاومت فشاری مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. تجزیه و تحلیل‌های آماری در قالب طرح فاکتوریل با سه عامل اصلی شامل نوع ضایعات در دو سطح و مقدار ضایعات در پنج سطح و در مجموع با ۱۰ تیمار در نرم‌افزار SPSS به‌اجرا درآمد.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که کلیه تیمارها سبب افزایش دو تا ۲/۵ برابری مقدار ظرفیت بارگذاری شدند اما هیچ یک از آنها نتوانستند وضعیت ظرفیت بارگذاری خاک را از حالت ضعیف به حالت بهتر ارتقاء دهند. کمترین مقدار CBR در نمونه‌های خاک تیمار شده با سه درصد خاکستر پوسته بادام‌زمینی به ثبت رسید. بیشترین شاخص خمیری در نمونه شاهد و نمونه خاک تیمار شده با ۱۰ و ۱۵ درصد خاکستر پوسته گردو مشاهده شد. در حالی که کمترین مقدار شاخص خمیری در نمونه‌های خاک تیمار شده با سه درصد خاکستر پوسته بادام‌زمینی به ثبت رسید. در مجموع مقدار شاخص خمیری در نمونه‌های خاک تیمار شده با خاکستر بادم‌زمینی به‌طور معنی‌داری کمتر از نمونه‌های خاک تیمار شده با خاکستر پوسته گردو بود. در مجموع تیمارهای مورد استفاده از نظر تأثیرگذاری بر قابلیت بارگذاری به‌دلیل خمیرایی بالای خاک شاهد دارای ضعف‌های بارزی بودند، از این‌رو، استفاده از آنها به‌صورت خالص برای بهسازی خواص مکانیکی خاک‌های CH پیشنهاد نمی‌شود اما می‌توان اثر آنها را در ترکیب با افزودنی‌هایی مانند آهک و سیمان مورد ارزیابی قرار داد.

نتیجه‌گیری: درصدهای بالای خاکستر پوسته گردو (۱۰ و ۱۵ درصد) نتوانستند تأثیر چندانی در کاهش شاخص‌های خمیری خاک داشته باشند که دلیل این موضوع را می‌توان میل ترکیبی بیشتر خاکستر پوسته گردو با آب دانست. اما عملکرد مطلوب خاکستر بادام‌زمینی (مقدار سه درصد وزنی) در کاستن از خواص خمیرایی خاک نشان می‌دهد که از این تیمار می‌توان برای تثبیت ترانسه‌های رانشی که روی آنها بارگذاری انجام نمی‌شود استفاده کرد. بدین ترتیب تیمارهای مورد استفاده از نظر تأثیرگذاری بر قابلیت بارگذاری خاک دارای ضعف‌های بارزی بودند، از این‌رو، استفاده از آنها به‌صورت خالص برای بهسازی خواص مکانیکی خاک‌های CH پیشنهاد نمی‌شود اما می‌توان اثر آنها را در ترکیب با افزودنی‌هایی مانند آهک و سیمان مورد ارزیابی قرار داد.

واژه‌های کلیدی: خاکستر پوسته بادام‌زمینی، خاکستر پوسته گردو، ظرفیت بارگذاری، شاخص خمیری، خاک CH.

مقدمه

امروزه در صنعت کشاورزی مشکلات زیادی در خصوص دفع ضایعات و زباله‌های حاصل از فرآورده‌های تولید وجود دارد که هر روز بر حجم آنها افزوده می‌شود (Baugherian et al., 2005). در عین حال، بسیاری از این ضایعات با توجه به اجزای معدنی تشکیل‌دهنده آنها دارای ویژگی‌های مقاومتی مطلوبی هستند که آنها را به طور بالقوه به یکی از کاندیدهای اصلی برای جایگزینی با افزودنی‌ها و تثبیت‌کننده‌های سستی خاک‌های جنگلی مانند آهک و سیمان تبدیل کرده است (Manikandan et al., 2017). علاوه بر این، ویژگی‌های ساختاری مواد آلی می‌تواند به حفظ محیط زیست و اصلاح بیولوژیکی خاک‌های ناپایدار و منبسط شونده کمک کند (Jafer et al., 2018; Jambhale et al., 2021). خاک‌های سنگین و منبسط‌شونده جزء چالش‌های ژئوتکنیکی ساخت جاده‌های جنگلی در بوم‌سازگان مرطوب جنگل‌های شمال هستند و اغلب سبب خسارت‌های جبران‌ناپذیری به ساختمان راه می‌شوند (Bell, 1996). حجم این خاک‌ها با گرفتن آب یا از دست دادن آن به‌طور غیرقابل‌تصور تغییر می‌کند و بیشتر باعث خسارت‌های شدیدی به انواع ابنیه‌ها می‌شود (Nasiri et al., 2016; Ghavidel et al., 2021). خاک‌های سنگین در حالت طبیعی خود عموماً دارای ظرفیت باربری پایین و استحکام پایینی به دلیل مقدار بالای رس است. هنگامی که خاک سنگین از خاک رس با خمیرایی بالا تشکیل شده باشد، خمیرایی خاک ممکن است سبب ایجاد ترک و آسیب در روسازی، راه‌ها، فونداسیون ساختمان یا سایر پروژه‌های عمرانی شود، از این رو بهبود خواص ژئوتکنیکی خاک از طریق فرآیند تثبیت یا اصلاح ضرورت دارد (Garg et al., 2008). اصلاح خاک افزودن یک اصلاح‌کننده (سیمان، آهک،

خاکستر و غیره) برای تغییر ویژگی‌های شاخص آن است، در حالی که تثبیت خاک عبارت است از تصفیه خاک‌ها برای بهبود استحکام و دوام آنها به‌طوری که فراتر از طبقه‌بندی اصلی خود برای ساخت و ساز مناسب شوند (Sadeeq et al., 2015). به گفته Joel Edeh and (2015)، اصلاح خاک در کوتاه مدت در طی و پس از اختلاط (در عرض چند ساعت) اتفاق می‌افتد. هدف آن کاهش خواص منفی خاک تا حد مطلوب و افزایش مقاومت است. از دهه ۱۹۷۰ استفاده از افزودنی‌های آهکی و سیمانی به دلیل ملاحظات زیست‌محیطی منسوخ شده و تمایل به استفاده از افزودنی‌های زیستی افزایش یافته است (Garg et al., 2008; Parsakhoo et al., 2021).

خاکستر برخی ضایعات کشاورزی مانند خاکستر پوسته برنج، خاکستر چوب، خاکستر برگ نخل و خاکستر ذرت نیز دارای خواص تثبیت‌کنندگی خاک هستند که این ویژگی ریشه در حضور عنصر سیلیس در ساختمان شیمیایی آنها دارد (Amo et al., 2005; Pinto et al., 2011). تولید جهانی بادام‌زمینی و گردو در سال‌های اخیر به سرعت در حال افزایش بوده است که بیشترین افزایش آن مربوط به آسیا می‌باشد. جهان در مجموع ۲/۵۵ میلیون تن گردو در سال ۲۰۱۰ تولید کرد. متوسط عملکرد جهانی گردو در سال ۲۰۱۰ حدود سه تن در هکتار بود. پوسته بادام زمینی یکی دیگر از ضایعات کشاورزی است که کاربرد فراوانی به‌ویژه در اصلاح خواص مکانیکی خاک دارد. پوسته بادام زمینی پتانسیل غیرقابل‌درک برای استفاده تجاری دارد و به عنوان سوخت، غنی‌کننده خوراک دام، صنعت تخته خرده چوب، جایگزین پلاستیک، کربن فعال و غیره استفاده می‌شود. تقریباً تمام شرکت‌های فرآوری گردو در فروش و دفع پوسته با مشکلاتی مواجه هستند (Nnochiri and Emeka, 2017). علاوه بر این، پوست

گردو از استحکام کافی بالایی برخوردار است، پوسیده نمی شود، عملاً با گذشت زمان خواص خود را از دست نمی دهد، به سرعت در طبیعت تجدید می شود و محصولی سازگار با محیط زیست و ایمن برای انسان و حیوانات است (Chen and Yang, 2023). پوسته سخت گردو شامل خاکستر (۳/۴ درصد) لیگنین (۵۰/۳ درصد) همی سلولز (۲۲/۴ درصد) و سلولز (۲۳/۹ درصد) است. از دیگر کاربردهای پوسته گردو و بادام زمینی می توان به استفاده در سوخت بخاری و اجاق، تولید سندبلاست، استفاده از خاکستر آنها به عنوان کود و غیره اشاره کرد.

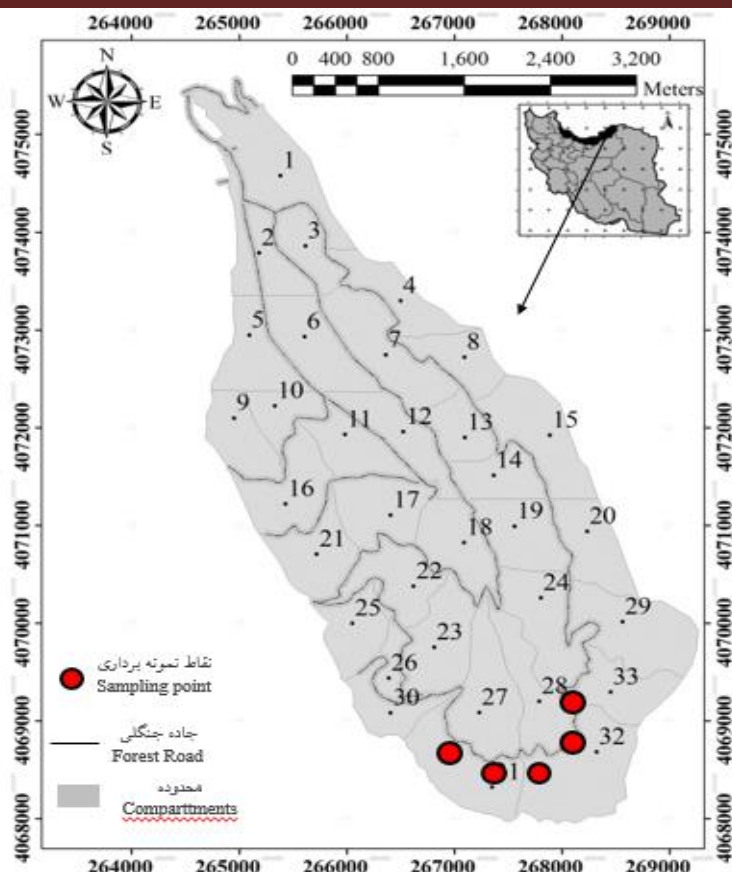
پوست گردو در مقایسه با سایر ضایعات کشاورزی از شاخص های فنی ارزشمندتری برخوردار است. به دلیل محتوای بالای لیگنین، استحکام و مقاومت آن در برابر پوسیدگی بسیار بهتر از کاه، پوسته، خاک اره و غیره است. همچنین، پوست گردو کمترین مقدار جذب آب را در بین مواد ذکر شده دارد. برخی از اکسیدهای موجود در پوزولان و سیمان پرتلند نیز در خاکستر پوسته بادام زمینی وجود دارد و از این رو، بر اساس پیشنهاد بسیاری از پژوهشگران مناسب است تا ۳۰ درصد خاکستر پوسته بادام زمینی به جای سیمان پرتلند استاندارد در بتن استفاده شود (Krishna and Beebi, 2015; Sujatha et al., 2016). یافته ها نشان داده است که با افزودن ۱۰ درصد خاکستر پوسته بادام-زمینی به وزن خاک، مقادیر حد مایع و شاخص پلاستیسیته به ترتیب از ۳۶/۵۰ درصد به ۳۱/۲۰ درصد

و از ۱۹/۳۰ درصد به ۱۶/۴۸ درصد کاهش یافت (Gajera and Thanki, 2015). خاک بستر جاده های جنگلی اغلب دارای مشکلاتی مانند خمیری بالا، قابلیت بارگذاری و مقاومت برشی پایین، دشواری تراکم و امکان نشست می باشد (Akinwumi and Aidomojie, 2015). از این رو، تثبیت و ارتقاء مقاومت خاک با استفاده از مواد افزودنی همواره مورد توجه پژوهشگران و مهندسين راه سازی بوده است. از سوی دیگر امروزه استفاده از مواد ضایعاتی در تثبیت خاک ها با توجه به اقتصادی بودن آن در مقایسه با افزودنی های سنتی مانند آهک و سیمان رایج شده است. هدف از بررسی حاضر، بررسی اثر خاکستر ضایعات کشاورزی شامل خاکستر پوسته بادام زمینی و گردو و شکل و مقدار آنها بر مقدار بهبود مقاومت مکانیکی خاک بستر جاده های جنگلی بود.

مواد و روش ها

مشخصات منطقه مورد بررسی و روش نمونه برداری

خاک مورد استفاده در این پژوهش از سری یک طرح جنگل داری آموزشی-پژوهشی شصت کلاته و از مناطق رانشی و ناپایدار حاوی خاک متورم شونده تهیه شد. ابتدا پنج نقطه رانشی در امتداد جاده های جنگلی که دربرگیرنده خاک ریزدانه است مشخص و از هر نقطه حداقل سه نمونه هر یک به وزن پنج کیلوگرم و در مجموع ۱۵ نمونه به وزن کل ۷۵ کیلوگرم به روش تصادفی تهیه شد (شکل ۱).



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی مناطق مورد بررسی

Figure 1. Geographical position of the study areas

عطاری پودر پوسته‌ها تهیه شد. در مرحله بعد پودر پوسته گردو و بادام زمینی به مدت دو ساعت در دمای ۵۸۰ درجه سانتی‌گراد کوره سوزانده و به خاکستر تبدیل شد (جدول ۱). خاکستر مورد استفاده به‌منظور اثرگذاری بر هر دو بخش ریزدانه و درشت‌دانه خاک دارای اندازه ۰/۴-۰/۰۴ میلی‌متر بود. نمونه‌های خاک با مقادیر متفاوت صفر، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد خاکستر نسبت به خاک خشک مخلوط شد. بعد از ۲۸ روز (زمان عمل‌آوری) ویژگی‌های ژئوتکنیکی که روی نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفت، شامل ویژگی‌های تراکمی، حدود آتربرگ و مقاومت فشاری بود

در این بررسی، پوسته چوبی گردو و بادام زمینی مورد نیاز پژوهش از مصارف بخش خانگی و شیرینی فروشی‌ها تهیه شد. با توجه به تیمارهای در نظر گرفته شده مقدار کل خاکستر پوسته گردو و بادام زمینی مورد نیاز ۱۰ کیلوگرم بود (پنج کیلوگرم خاکستر پوسته گردو و پنج کیلوگرم خاکستر پوسته بادام زمینی). از آنجایی که وزن خاکستر تولیدشده از سوزاندن پوسته سخت گردو و بادام زمینی در کوره، تقریباً ۲۰ درصد وزن کل پوسته می‌باشد، مقدار ۲۵ کیلوگرم پوسته سخت گردو و ۲۵ کیلوگرم پوسته سخت بادام زمینی از منابع مورد اشاره تأمین و پس از آسیاب در دستگاه خردکن حرفه‌ای

جدول ۱- ترکیبات شیمیایی خاکستر پوسته چوبی گردو و بادام زمینی (Sathiparan et al., 2023; Chen and Yang, 2023)

Table 1. Chemical composition of walnut and peanut shell ash (Sathiparan et al., 2023; Chen and Yang, 2023)

TiO ₂ (%)	LOI (%)	P ₂ O ₅ (%)	CaO (%)	K ₂ O (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	SO ₃ (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	Na ₂ O (%)	ترکیب Composition
0.69	4.20	2.00	13.31	15.43	5.12	1.92	33.41	10.80	5.68	2.24	بادام زمینی Peanut
0.00	0.00	0.00	11.1	3.43	1.02	0.87	65.34	10.42	7.91	0.19	گردو Walnut

آزمایشات حدود آتربرگ

حد خمیری خاک یا درصد رطوبتی که در آن خمیره خاک هنگام ورز دادن شروع به ترک خوردن می کند از رابطه (۱) به دست آمد:

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

در این رابطه W₂ وزن ظرف و خاک مرطوب (گرم)، W₃ وزن ظرف و خاک خشک و W₁ وزن ظرف خالی می باشد. حد روانی خاک نیز با استفاده از منحنی جریان و بر اساس تعداد ضرباتی است که در آن ۱۳/۷ میلیمتر از طول شیار ایجاد شده روی خاک درون ظرف کاساگرانده بسته می شود محاسبه شد (Atterberg, 1911). شاخص خمیری از تفاضل حد روانی از حد خمیری به دست آمد (رابطه ۲).

$$PI = LL - PL \quad (۲)$$

محاسبه حداکثر تراکم خشک خاک و مقدار CBR

برای انجام آزمایش پروکتور یا تعیین بیشینه تراکم خشک خاک، ابتدا نمونه های خاک از الک نمره چهار عبور داده شد. به دست آوردن مقدار رطوبتی که برای کوبیدن و حصول تراکم حداکثری خاک نیاز است، هدف آزمایش تراکم می باشد. زیرا اگر خاک خشک باشد و یا بیش از حد رطوبت داشته باشد به خوبی کوبیده نخواهد شد. برای این کار نمونه های خاک منطقه پس از افزودن درصدهای وزنی مختلف خاکستر و

عمل آوری و گذشت ۲۸ روز در آزمایشگاه مورد آزمایش قرار داده تا درصد بهینه رطوبت تعیین شود (رابطه ۳).

$$P_d = \frac{P_w}{\left(\frac{W}{100} + \frac{1}{G_s}\right)} \quad (۳)$$

که در آن Pd تراکم خشک خاک بر حسب گرم بر سانتی متر مکعب، G_s گرانی ویژه خاک (۲/۷)، PW چگالی آب بر حسب گرم بر سانتی متر مکعب (تقریباً یک گرم بر سانتی متر مکعب) و W درصد رطوبت است. در آزمایش پروکتور، ابتدا مقدار رطوبت نمونه های خاک خشک شده در معرض هوا با افزودن آب تنظیم شد. سپس نمونه ها در قالب کوبیدگی پروکتور به قطر چهار اینچ قرار داده شده و با ۲۵ ضربه چکش استاندارد ۵/۵ پوندی با ارتفاع برخورد ۱۲ اینچ کوبیده شدند. در پایان نمونه ها از قالب خارج شده و تراکم خشک و درصد رطوبت آن ها اندازه گیری شد.

منحنی تراکم خشک خاک به صورت تابعی از درصد رطوبت ترسیم شد. به کمک این نمودار محتوی رطوبتی بهینه که در آن بیشینه تراکم خشک خاک حاصل گردید به دست آمد (Davidson and Gardiner, 1949). سپس آزمایش CBR یا نرخ بارگذاری کالیفرنیا برای تعیین ظرفیت بارگذاری خاک ها مورد استفاده قرار گرفت. عدد CBR بنا به تعریف نسبت بار استفاده شده برای فرو رفتن و نفوذ یک سنبه استاندارد به مقدار معین در یک نمونه مورد آزمایش به مقدار بار استاندارد برای

همان نفوذ است. تجزیه و تحلیل‌های آماری در قالب طرح فاکتوریل با سه عامل اصلی شامل نوع ضایعات در دو سطح و مقدار ضایعات در پنج سطح و در مجموع با ۱۰ تیمار در نرم‌افزار SPSS به اجرا درآمد. تجزیه واریانس به روش ANOVA و مقایسه میانگین‌ها به روش LSD در سطح احتمال پنج درصد انجام شد.

نتایج

اثر افزودنی‌ها بر ظرفیت بارگذاری خاک

نتایج تجزیه واریانس پژوهش حاضر نشان داد که اثر نوع و مقدار تیمار و همچنین اثر متقابل بین آنها در سطح اطمینان ۹۹ درصد بر مقدار ظرفیت باربری (CBR) خاک معنی‌دار بود (جدول ۲). بر اساس آزمون مقایسه گروهی، بین مقدار CBR تمامی نمونه‌های تیمار شده با انواع افزودنی‌ها و CBR نمونه شاهد تفاوت معنی‌دار وجود داشت. بیشترین CBR در نمونه‌های خاک تیمار شده با ۱۵ درصد خاکستر پوسته گردو به وجود آمد (۶/۱۲ درصد). درحالی‌که کمترین مقدار

CBR در نمونه‌های خاک تیمار شده با سه درصد خاکستر پوسته بادام زمینی به ثبت رسید (جدول ۳). در این بررسی مقدار CBR خاک با افزودن پنج، ۱۰ و ۱۵ درصد خاکستر پوسته بادام زمینی حدود دو برابر افزایش یافت اما به دلیل ماهیت خاک CH مورد بررسی و همچنین عدم استفاده از مکمل آهک، مقدار ظرفیت بارگذاری به حد مطلوب افزایش نیافت (جدول ۴). مقدار ظرفیت بارگذاری نمونه‌های خاک تیمار شده با خاکستر پوسته بادام زمینی کمتر از نمونه‌های خاک تیمار شده با خاکستر پوسته گردو بود اما در هر صورت مقدار CBR را در مقایسه با شاهد به مقدار دو برابر افزایش داد (شکل ۲). در مجموع با وجود اینکه تیمارهای مورد استفاده سبب افزایش دو تا ۲/۵ برابر مقدار ظرفیت بارگذاری شدند اما هیچ‌یک از تیمارها نتوانستند وضعیت ظرفیت بارگذاری خاک را از حالت ضعیف بر اساس جدول (۴) به حالت بهتری ارتقاء دهند.

جدول ۲- تجزیه واریانس اثر تیمارهای خاکستر گردو و بادام زمینی بر مقدار CBR خاک

Table 2. Analysis of variance of the effect of walnut and peanut ash treatments on the soil CBR amount

مقدار F F-value	میانگین مربعات Mean squares	درجه آزادی (df) Degree of freedom	مجموع مربعات Sum of squares	متغیر وابسته Dependent variable
15.76 ***	3.170	8	25.359	مدل تصحیح شده Corrected model
24.32 ***	489.003	1	489.003	عرض از مبدا Width from the origin
17.86 ***	3.591	1	7.182	نوع تیمار Type of treatment
982.541 ***	1.976	3	5.928	مقدار تیمار Treatment amount
192.406 ***	0.387	3	1.161	اثر متقابل Interaction
	0.002	18	0.036	خطا Error
		27	642.589	کل Total

کل تصحیح شده	25.395	26
Corrected total		
*** معنی دار در سطح احتمال ۹۹/۹ درصد		

*** Significant at probability level of 99.9%.

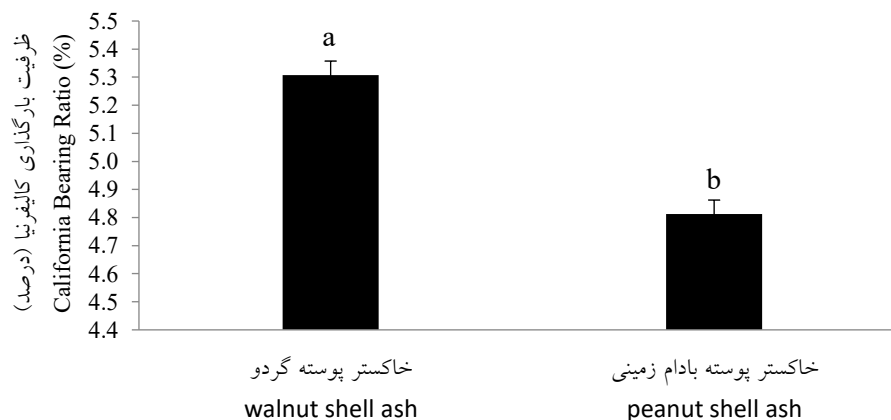
جدول ۳- مقادیر رطوبت بهینه و بیشینه تراکم خشک و مقایسه گروهی CBR نمونه‌های تیمار شده

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

CBR	حد اکثر تراکم خشک خاک (گرم بر سانتی متر مکعب) maximum dry density (g/cm ³)	رطوبت بهینه (درصد) Optimal moisture content (%)	تیمارها Treatments
2.55 ^c	1.56	19.9	شاهد Control
4.40 ^b	1.48	16.9	خاک + ۳ درصد خاکستر پوسته گردو Soil + 3% walnut shell ash
5.10 ^{ab}	1.50	16.4	خاک + ۵ درصد خاکستر پوسته گردو Soil + 5% walnut shell ash
5.61 ^a	1.46	15.7	خاک + ۱۰ درصد خاکستر پوسته گردو Soil + 10% walnut shell ash
6.12 ^a	1.39	17.6	خاک + ۱۵ درصد خاکستر پوسته گردو Soil + 15% walnut shell ash
4.08 ^b	1.44	13.0	خاک + ۳ درصد خاکستر پوسته بادام زمینی Soil + 3% peanut shell ash
5.10 ^{ab}	1.44	15.2	خاک + ۵ درصد خاکستر پوسته بادام زمینی Soil + 5% peanut shell ash
5.15 ^{ab}	1.49	15.6	خاک + ۱۰ درصد خاکستر پوسته بادام زمینی Soil + 10% peanut shell ash
4/92 ^{ab}	1.46	16.4	خاک + ۱۵ درصد خاکستر پوسته بادام زمینی Soil + 15% peanut shell ash

حروف مختلف در ستون نشان‌دهنده وجود تفاوت معنی دار در سطح احتمال ۹۵ درصد می‌باشد.

Different letters in the column indicate a significant difference at the 95% probability level.



شکل ۲- مقایسه ظرفیت بارگذاری خاک در تیمارهای مختلف

Figure 2. Comparison of Soil Bearing Capacity in different treatments

جدول ۴- وضعیت روسازی با توجه به مقادیر مختلف CBR (Javid, 2015)

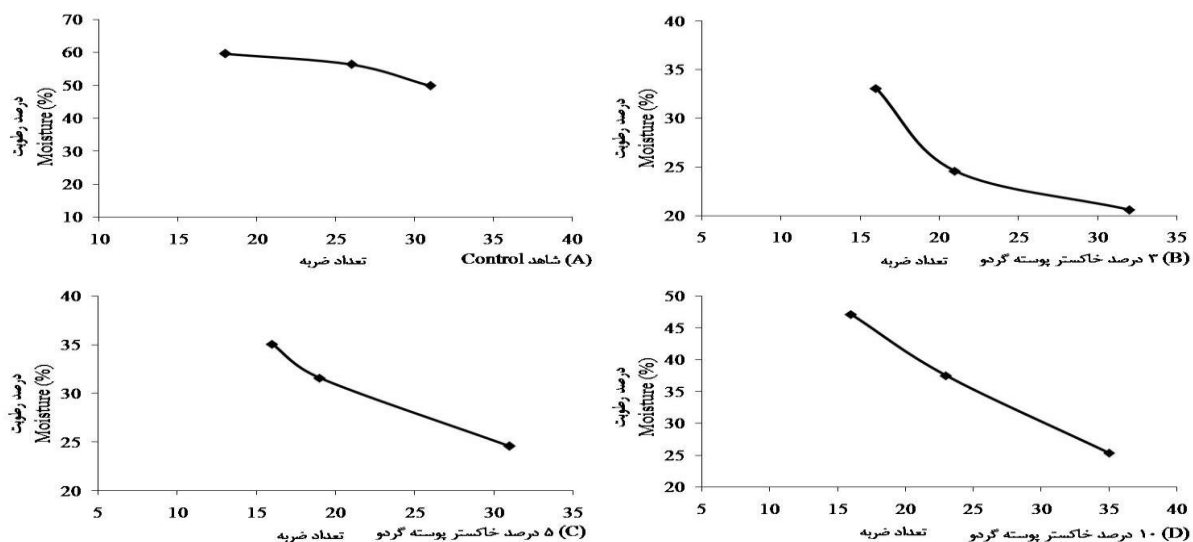
Table 4. Pavement condition according to different CBR amount (Javid 2015)

وضعیت روسازی Pavement condition	ظرفیت باربری کالیفرنیا (درصد) California Bearing Ratio (%)
خیلی ضعیف Very poor	$5 > CBR > 2$
ضعیف Poor	$10 > CBR > 5$
متوسط Normal	$20 > CBR > 10$
خوب Good	$40 > CBR > 20$
خیلی خوب Very good	$70 > CBR > 40$
عالی Excellent	$100 > CBR > 70$

گروهی، بین مقدار شاخص خمیری تمامی نمونه‌های تیمار شده با انواع افزودنی‌ها و شاخص خمیری نمونه شاهد تفاوت معنی‌دار وجود داشت. مقدار شاخص خمیری در نمونه‌های خاک تیمار شده با خاکستر بادم زمینی به‌طور معنی‌داری کمتر از نمونه‌های خاک تیمار شده با خاکستر پوسته گردو بود (شکل ۳).

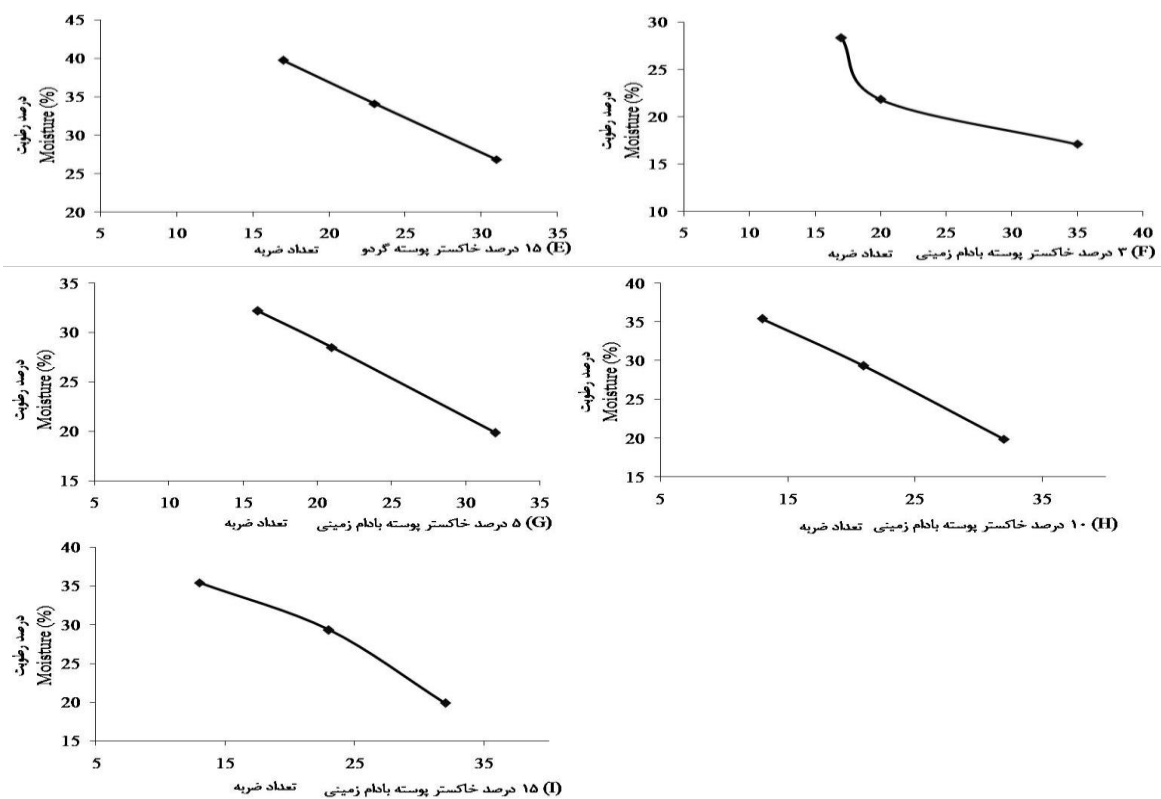
اثر افزودنی‌ها بر شاخص خمیری خاک

منحنی جریان نمونه‌های شاهد و تیمار شده با مقادیر مختلف خاکستر گردو و بادم زمینی در شکل (۲) 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 ۳). براساس آزمون مقایسه



شکل ۳- منحنی‌های جریان نمونه‌های خاک تیمار شده با خاکستر پوسته گردو و بادم زمینی در نتیجه آزمایش کاساگراند

Figure 3. Flow curves of soil samples treated with walnut and peanut shell ash as a result of the Casagrande test



ادامه شکل ۳.

Continued figure 3.

جدول ۳- تجزیه واریانس اثر تیمارهای خاکستر گردو و بادام زمینی بر مقدار PI خاک

Table 3. Analysis of variance of the effect of walnut and peanut ash treatments on soil PI amount

مقدار F	میانگین مربعات	درجه آزادی	مجموع مربعات	متغیر وابسته
F-value	Mean squares	Degree of freedom	Sum of squares	Dependent variable
833.062***	157.467	8	1259.738	مدل تصحیح شده Corrected model
39.52 ***	7470.097	1	7470.097	عرض از مبدا Width from the origin
28.78 ***	543.974	2	1087.949	نوع تیمار Type of treatment
584.746***	110.530	3	331.590	مقدار تیمار Treatment amount
107.024***	20.230	3	60.690	اثر متقابل Interaction
	0.189	18	3.402	خطا Error
		27	7907.072	کل Total
		26	1263.141	کل تصحیح شده Corrected total

*** معنی دار در سطح احتمال ۹۹/۹ درصد

*** Significant at probability level of 99.9%.

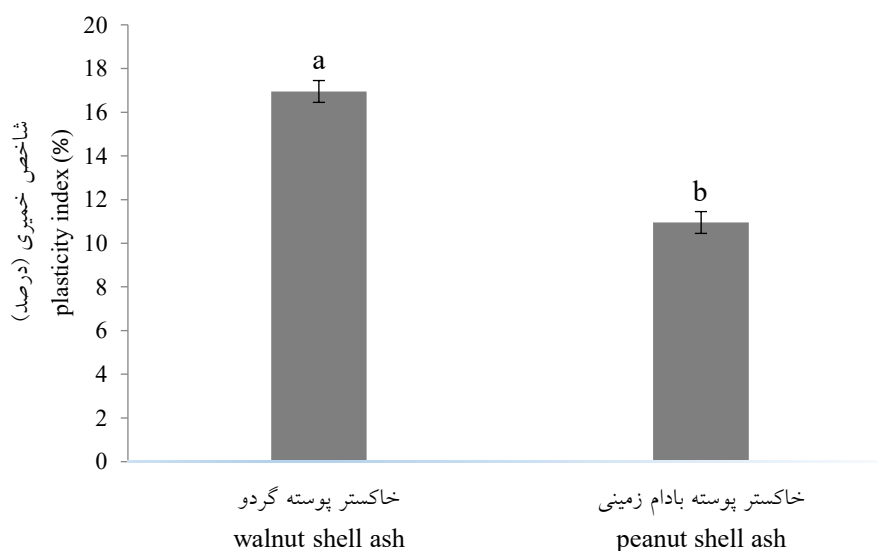
جدول ۴- مقادیر حد روانی و حد خمیری و مقایسه گروهی شاخص خمیری نمونه‌های تیمار شده

Table 4. Liquid limit and plastic limit amount and group comparison of plasticity index of treated samples

شاخص خمیری plasticity index	حد خمیری (درصد) plastic limit (%)	حد روانی (درصد) Liquid limit (%)	تیمارها Treatments
29.7 ^a	26.1	55.8	شاهد Control
11.0 ^c	11.1	22.1	خاک + ۳ درصد خاکستر پوسته گردو Soil + 3% walnut shell ash
13.3 ^c	12.2	25.5	خاک + ۵ درصد خاکستر پوسته گردو Soil + 5% walnut shell ash
23.4 ^b	11.5	34.9	خاک + ۱۰ درصد خاکستر پوسته گردو Soil + 10% walnut shell ash
20.1 ^b	12.0	32.1	خاک + ۱۵ درصد خاکستر پوسته گردو Soil + 15% walnut shell ash
6.4 ^d	12.5	18.9	خاک + ۳ درصد خاکستر پوسته بادام زمینی Soil + 3% peanut shell ash
11.2 ^c	13.8	25.0	خاک + ۵ درصد خاکستر پوسته بادام زمینی Soil + 5% peanut shell ash
12.6 ^c	12.8	25.4	خاک + ۱۰ درصد خاکستر پوسته بادام زمینی Soil + 10% peanut shell ash
13.6 ^c	13.0	26.6	خاک + ۱۵ درصد خاکستر پوسته بادام زمینی Soil + 15% peanut shell ash

حروف مختلف در ستون نشان‌دهنده وجود تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۹۵ درصد است.

Different letters in the column indicate a significant difference at the 95% probability level.



شکل ۴- مقایسه شاخص خمیری خاک در تیمارهای مختلف

Figure 4. Comparison of soil plasticity index in different treatments

بحث

محصول مغزگیری شود، شاهد به جا ماندن ۱۲۰ تن پوسته ضایعاتی بادام زمینی در استان هستیم.

بیشترین سهم مورد استفاده از تیمار خاکستر پوسته گردو در این بررسی (۱۵ درصد)، بیشترین تأثیر را در بهبود ظرفیت بارگذاری خاک داشت که این موضوع را می توان به ماهیت سخت پوسته چوبی گردو نسبت داد (Parvez et al., 2023). نتایج آنالیز شیمیایی Nnochiri and Emeka (2017)، وجود برخی اکسیدها مانند CaO را در خاکستر پوست گردو نشان داد که قادر به واکنش با ذرات ریز خاک بوده و با تشکیل سیلیکات و آلومینات های کلسیم منجر به افزایش پایداری خاک می شوند. البته به نظر می رسد که افزودن مقادیر بیشتر از ۱۵ درصد نیز می تواند به افزایش ظرفیت بارگذاری خاک کمک کند، هرچند که ممکن است بر متغیرهای دیگر مانند شاخص خمیری اثر منفی بگذارد.

Adetayo et al. (2021) اثر خاکستر پوسته بادام زمینی را روی خاک لاتریت تثبیت شده با آهک برای سازه های عمرانی نیجریه بررسی کردند. آزمون های تراکم، نسبت باربری کالیفرنیا و مقاومت برشی پس از افزودن دو، چهار، شش و هشت درصد خاکستر پوسته بادام زمینی به نمونه های خاک تثبیت شده با آهک، انجام شد. نتایج نشان داد که افزودن خاکستر پوسته بادام زمینی خواص مکانیکی خاک لاتریت تثبیت شده با آهک را افزایش داد، زیرا مقادیر CBR برای همه نمونه های خاک افزایش یافت که با نتایج بررسی های حاضر مطابقت دارد.

Adetoro and Dada (2015) در پژوهش های خود به این نتیجه رسیدند که خاکستر پوسته بادام زمینی بر خواص مقاومتی و دوام خاک رس، تأثیر مثبت دارد.

خاکستر پوسته بادام زمینی و گردو مکمل های مفید در تثبیت خاک هستند. بر اساس یافته ها و بررسی های دفتری نگارندگان، سطح زیر کشت گردو در استان گلستان ۱۵۰۰ هکتار و مقدار تولید سالانه میوه سبز گردو در این استان ۱۱۰۰ تن می باشد. پوسته سبز گردو ۸۰ درصد وزن گردو را تشکیل می دهد از این رو، می توان اذعان داشت که استان گلستان قادر به تولید سالانه ۲۲۰ تن گردو با پوسته سخت قهوه ای رنگ می باشد. چنانچه از این مقدار تنها ۴۰ درصد یعنی ۸۸ تن گردو در کارخانه های آجیل و خشکبار یا سایر کارخانه ها مانند کارخانه های حاج بابا و گلستان به مغز گردو تبدیل شود، سالانه شاهد تولید و دفع حجم بالایی پوسته ضایعاتی هستیم. سهم پوسته گردو به وزن کل آن ۵۵ درصد می باشد، بدین ترتیب تولید سالانه بیش از ۴۸ تن پوسته گردو فرصت مناسبی برای استفاده اقتصادی از این محصول ضایعاتی با توجه به پوسته سخت آن در پروژه های عمرانی فراهم می آورد. وزن خاکستر تولید شده از سوزاندن پوسته سخت گردو و بادام زمینی در کوره، تقریباً ۲۰ درصد وزن کل پوسته می باشد. بدین ترتیب می توان سالیانه حدود ۱۰ تن خاکستر پوسته گردو و ۲۴ تن خاکستر پوسته بادام زمینی تولید و در پروژه های مرمت و نگهداری جاده های جنگلی استان گلستان به کار برد. محصول کشاورزی دیگری که در کارخانه های آجیل و خشکبار مغزگیری شده و ضایعات فراوانی تولید می نماید، بادام زمینی است. مقدار تولید سالانه بادام زمینی در استان گلستان ۱۰۰۰ تن است. پوسته بادام زمینی ۳۰ درصد وزن کل بادام را تشکیل می دهد. از این رو، چنانچه سالیانه تنها ۴۰ درصد از این

- Karthika and Muthukumar (2018) مقدار بهینه افزودن خاکستر پسته بادام‌زمینی به خاک پنبه سیاه با خمیرایی تقریباً متوسط را شش درصد اعلام کردند. بر حسب مقدار 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 کرد. ولی وقتی بر مقدار رطوبت آنها افزوده می‌شود از وضعیت جامد به نیمه‌جامد، خمیری و روان تبدیل می‌شوند. در بررسی حاضر بیشترین شاخص خمیری در نمونه شاهد و سپس در نمونه‌های خاک تیمار شده با ۱۰ و ۱۵ درصد خاکستر پسته گردو به وجود آمد. به نظر می‌رسد مقدار زیاد خاکستر پسته گردو به عنوان جاذب رطوبت عمل کرده و در نتیجه نتوانسته تأثیر مطلوبی در کاهش خمیرایی خاک بگذارد. درحالی‌که کمترین مقدار شاخص خمیری در نمونه‌های خاک تیمار شده با سه درصد خاکستر پسته بادام زمینی به ثبت رسید. در میان ترکیبات موجود در خاکستر پسته بادام زمینی، SiO_2 سبب تشکیل دی‌کلسیم و سیلیکات تری‌کلسیم که برای بهبود استحکام خاک مورد نیاز است، می‌شود. Fe_2O_3 به واکنش شیمیایی با کلسیم و آلومینیوم وارد شده و آلومینوفريت تری‌کلسیم را تشکیل می‌دهد. Al_2O_3 خاصیت گیرش سریع را به مواد سیمانی می‌دهد. همچنین P_2O_5 این پتانسیل را دارد که به عنوان یک عامل اتصال به ذرات خاک عمل کند و در نتیجه پایداری خاک را افزایش دهد (Ayininuola and Sogunro, 2013). به طوری که خاک از حالت خمیری به حالت تقریباً غیرخمیری تغییر وضعیت داد.
- (Nnochiri and Emeka, 2017) از خاکستر پسته گردو برای بهبود خواص مکانیکی خاک لاتریتی در نیجریه استفاده کردند. نتایج نشان داد که خاکستر پسته گردو با کاهش شدید شاخص خمیری، که شاخص‌های بهبود خاک است، نمونه‌های خاک را بهبود بخشید. لازم به ذکر است 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. درمجموع مقدار شاخص خمیری در نمونه‌های خاک تیمار شده با خاکستر بادام‌زمینی کمتر از نمونه‌های خاک تیمار شده با خاکستر پسته گردو بود. احتمالاً جایگزینی ذرات خاک با خاکستر بادام-زمینی، که میل ترکیبی کمتری برای آب دارد، ممکن است دلیل کاهش شاخص خمیری باشد (Osman et al., 2022; Sathiparan et al., 2023).

نتیجه‌گیری کلی

در این بررسی با وجود اینکه تیمارهای مورد استفاده سبب افزایش دو تا ۲/۵ برابری مقدار ظرفیت بارگذاری شدند اما هیچ یک از آنها نتوانستند وضعیت ظرفیت بارگذاری خاک را از حالت ضعیف به حالت بهتری ارتقاء دهند. بدین ترتیب تیمارهای مورد استفاده از نظر تأثیرگذاری بر قابلیت بارگذاری خاک دارای ضعف‌های بارزی بودند، از این رو، استفاده از آنها به صورت خالص برای بهسازی خواص مکانیکی خاک‌های CH پیشنهاد نمی‌شود اما می‌توان اثر آنها را در ترکیب با افزودنی‌هایی مانند آهک و سیمان مورد ارزیابی قرار داد. البته باید از حداقل مقدار مجاز آهک و سیمان استفاده شود تا تبعات محیط زیستی استفاده از آنها به حداقل برسد. در این بررسی، درصدهای بالای خاکستر پسته گردو (۱۰ و

سه درصد وزنی) در کاستن از خواص خمیرایی خاک نشان می‌دهد که از این تیمار می‌توان برای تثبیت ترانشه‌های رانشی که روی آنها بارگذاری انجام نمی‌شود، استفاده کرد.

۱۵ درصد) نتوانستند تأثیر چندانی در کاهش شاخص‌های خمیری خاک داشته باشند که دلیل این موضوع را می‌توان میل ترکیبی بیشتر خاکستر پسته گردو با آب دانست. اما عملکرد مطلوب خاکستر بادام زمینی (مقدار

References

- Adetayo, O.A.; Amu, O.O.; Faluyi, F.; Akinyele, E., Effect of groundnut shell ash on Laterite soils stabilized with lime for civil structures. *International Journal of Integrated Engineering* **2021**, 13(4), 242-253.
- Adetoro, A. E.; Dada, O. M., Potentials of groundnut shell ash for stabilization of Ekiti state soil, Nigeria. *Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology* **2015**, 2(8), 2301-2304.
- Ayininuola, G. M.; Sogunro, A. O., Bone Ash Impact on Soil Shear Strength. World Academy of Science, Engineering and Technology. *International Journal of Environmental, Chemical, Ecological, Geological and Geophysical Engineering* **2013**, 7(11), 330-334.
- Amo, O.O.; Fajobi, A.A.; Fekhuai, A., Stabilizing potential of cement and fly ash mixture on expansive clay soil. *Journal of Applied Science* **2005**, 5(9), 1669-1673.
- Akinwumi, I.I.; Aidomojie, O.I., Effect of Corn cob ash on the geotechnical properties of Lateritic soil stabilized with Portland cement. *International Journal of Geomatics and Geosciences* **2015**, 5(3), 375-392.
- Atterberg, A., On the investigation of the physical properties of soils and on the plasticity of clays. *Journal of Internationale Mitteilungen für Bodenkunde* **1911**, 1(1), 10-43.
- Baugharian, A.; Janalizadeh, A.; Hesami, S. The use of the rice husk ash for soil stabilization by lime. 2nd National Conference in Civil Engineering, Iran University of Science and technology: Tehran, **2005**, p7. (In Persian).
- Bell, F.G., Lime stabilization of clay minerals and soil. *Journal of Engineering Geology* **1996**, 42(1), 223-237.
- Chen, H.; Yang, J., A new supplementary cementitious material: Walnut shell ash. *Journal of Construction and Building Materials* **2023**, 40(8), 133-138.
- 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. *Journal of Highway Research Board* **1949**, 29(1), 447-481.
- Gajera, N.V.; Thanki, K.R., Stabilization Analysis of Black Cotton Soil by using Groundnut Shell Ash. *International Journal for Innovative Research in Science and Technology* **2015**, 2(1), 158-162.
- Garg, U.; Kaur, M. P.; Jawa, G. K.; Sud, D.; Garg, V. K., Removal of cadmium (II) from aqueous solution by agricultural waste biomass. *Journal of Hazardous Materials* **2008**, 154(1-3), 1149-1157.
- Ghavidel, P.; Naghdi, R.; Ghajar, E.; Mirzaei, M., Evaluation of pavement distress on forest road curves (Case study: Shanderman watershed). *Journal of Forest Research and Development* **2021**, 7(2), 249-261.
- Jambhale, S.; Lad, A.; Nayakwadi, V.; Padhy, A.; Chhangani, N., Effect of Groundnut Shell Ash Lime on Characteristics of Soil. *International Journal of Landscape Planning and Architecture* **2021**, 7(1), 145-152.
- Jafer, H.; Atherton, W.; Sadigue, M.; Ruddock, F.; Loffill, E., Stabilisation of soft soil using binary blending of high calcium fly ash and palm oil fuel ash. *Journal of Applied Clay Science* **2018**, 152(1), 323-332.
- Karthika, A.P.; Muthukuma, M., Stabilization of black cotton soil using groundnut shell ash. *International Research Journal of Engineering and Technology* **2018**, 5(2): 488-492.
- Krishna, T.M.; Beebi, S. S., Soil stabilization by groundnut shell ash and waste fiber material. *International Journal of Innovations in Engineering and Technology* **2015**, 5(3): 52-57.
- Nasiri, M.; Lotfalian, M.; Modarres, A.; Wu, W., 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. *Journal of CATENA* **2016**, 150(2), 116-123.
- Nnochiri, E.S.; Emeka, H.O., Improvement of geotechnical properties of Lateritic soil using Walnut shell ash. *Acta Echnica Copviniensis, Journal of Bulletin of Engineering* **2017**, ISSN, 2067- 3809, 12 p.
- Manikandan A.T.; Ibrahim, Y.; Thiyaneswaran, M.P.; Dheebikhaa, B.; Raja, K., A Study on Effect of Bottom Ash and Coconut Shell Powder on the Properties of Clay Soi. *International Research Journal of Engineering and Technology* **2017**, 4(2), 17-25.
- Osman, N.F.M.; Tajudin, S.A.A.; Pakir, F., The Effect of Groundnut Shell Ash on Soil Stabilization. *Journal of Sustainable Underground Exploration* **2022**, 2(1), 34-40.
- Parsakhoo, A.; Rezaei Motlagh, A.; Matinnia, B., Effect of hydro-mulches on runoff and soil loss rate from steep slopes. *Journal of Forest Research and Development* **2021**, 7(1), 15-26.
- Parvez, Z.; Ajay Vikram, ER.; Pal Singh, E., Stabilization of black soil using walnut shell powder & ash. *International Research Journal of Engineering and Technology* **2023**, 10(3),1-15.
- Pinto, J.; Paiva, A.; Varum, H.; Costa, A.; Cruz, D.; Pereira, S.; Fernandes, L.; Tavares, P.; Agarwal, J., Corn's cob as a potential ecological thermal insulation material. *Journal of Energy and Building* **2011**, 43(8), 1985-1990.
- Sadeeq, J.A.; Ochepo, J.; Salahudeen, A.B.; Tijjani, S.T., Effect of Bagasse Ash on Lime Stabilized Lateritic Soil. *Jordan Journal of Civil Engineering* **2015**, 9(2), 203-213.
- Sathiparan, N.;Anburuvel, A.; Vinusha Selvam, V.; Anto Vithurshan, P., Potential use of groundnut shell ash in sustainable stabilized earth blocks. *Journal of Construction and Building Materials* **2023**, 39(3), 18-25.
- Sujatha, E. R., Dharini, K., & Bharathi, V. (2016). Influence of groundnut shell ash on strength and durability properties of clay, *Journal of Geomechanics and Geoengineering*, 11(1): 20-27.