Archive of SID.ir

University of Tehran

Journal of Forest and Wood Products

Online ISSN: 2383-0530

Home Page: https://jfwp.ut.ac.ir

Investigating the effect of lime on the swelling characteristics of forest roads

Fatemeh Mousavi[1*] | Ehsan Abdi[2] | Zahra Mashayekhi[3] | Morteza Modaresi[4] | Mostafa Janatbabaei[5]

1. Corresponding author, Department of Forestry, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: fmusavi@ut.ac.ir
2. Department of Forestry, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: abdie@ut.ac.ir
3. Research Institute of Petroleum Industry, Faculty of Energy and Environment, Tehran, Iran. Email: mashayekhiz@ripi.ir
4. Department of Civil Engineering, Majoring in Road and Transportation, Islamic Azad University, Amol branch, Iran. Email: st.m.modaresi@iauamol.ac.ir
5. Department of Forest Sciences and Engineering, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: janatbabaei@ut.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:
Research Article

Article History:
Received: 10 July 2023
Revised: 16 August 2023
Accepted: 03 September 2023
Published online: 20 December 2023

Keywords:
Curing time,
Free swell,
Swelling pressure,
Soil classification.

ABSTRACT

Swelling soils, characterized by fine particles, undergo volume changes due to water absorption and loss, posing challenges in road construction. Hence, enhancing the mechanical properties of such soils is crucial. Considering lime as a cost-effective, readily available, and easily applicable water-repellent material, this study investigates its influence on the swelling characteristics of high-plasticity clay soil (CH). Atterberg limit tests, including liquid limit (LL), plastic limit (PL), shrinkage limit (SL), plasticity index (PI), Proctor compaction, free swell, and swelling pressure tests were conducted based on standard procedures on control soil samples and soil samples mixed with different percentages of lime (3, 5, and 7%). Furthermore, mechanical test assessments were performed on specimens cured for 7, 14, and 28 days. The results indicated that the addition of lime decreased LL and PI while increasing PL and SL. Moreover, lime addition led to a reduction in the dry unit weight of the soil, an increase in the optimal moisture content, and a decrease in free swell and swelling pressure, with the most significant reduction observed in samples containing 5% lime. Additionally, the findings revealed that with increased curing time, free swell and swelling pressure reduced notably in samples mixed with 3% lime. In conclusion, the study demonstrates that lime can effectively improve the mechanical properties of swelling clay soils, especially crucial for road construction and soil classification purposes. Therefore, it can be concluded that lime is effective in reducing the swelling of forest soils.

Cite this article: Mousavi, F., Abdi, E., Mashayekhi, Z., Modaresi, M., Janatbabaei, M. (2023). Investigating the effect of lime on the swelling characteristics of forest roads. *Journal of Forest and Wood Products*, 76 (3), 207-216. DOI: http//doi.org/10.22059/jfwp.2023.361990.1258

© The Author(s) **Publisher:** The University of Tehran Press.
DOI: http//doi.org/10.22059/jfwp.2023.361990.1258

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

نشریهٔ جنگل و فرآورده‌های چوب
سایت نشریه: https://jfwp.ut.ac.ir
شاپا الکترونیکی: ۲۳۸۳-۰۵۳۰
دانشگاه تهران

بررسی تأثیر آهک بر روی خصوصیات تورمی خاک جاده‌های جنگلی

فاطمه موسوی[۱*] | احسان عبدی[۲] | زهرا مشایخی[۳] | مرتضی مدرسی[۴] | مصطفی جنت بابایی[۵]

۱. نویسنده مسئول، گروه مهندسی جنگل، دانشکدهٔ منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: fmusavi@ut.ac.ir
۲. گروه مهندسی جنگل، دانشکدهٔ منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: abdie@ut.ac.ir
۳. پژوهشگاه صنعت نفت، پردیس انرژی و محیطزیست، تهران، ایران. رایانامه: mashayekhiz@ripi.ir
۴. گروه عمران–راه و ترابری، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد آمل، آمل، ایران. رایانامه: st.m.modaresi@iauamol.ac.ir
۵. گروه مهندسی جنگل، دانشکدهٔ منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: janatbabaei@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:
تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۱۹
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۵/۲۵
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۱۲
تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۹/۲۹

کلیدواژه:
تورم آزاد،
زمان عمل‌آوری،
فشار تورمی،
کلاسه‌بندی خاک.

چکیده

خاک‌های متورم، خاک‌های ریزدانه‌ای هستند که حجم آن‌ها در اثر جذب آب، افزایش و با از دست دادن رطوبت، کاهش می‌یابد و مشکلاتی را برای جاده‌سازی ایجاد می‌کنند. بنابراین، باید به‌دنبال بهبود خصوصیات مکانیکی این نوع خاک‌ها بود. از آنجا که آهک یک مادهٔ ضد آب ارزان‌قیمت، در دسترس و با کاربرد آسان است، در این مطالعه تأثیر مادهٔ آهک بر روی خصوصیات تورمی یک خاک رسی با حد روانی بالا (CH) مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش‌های حدود آتربرگ شامل حد روانی (LL)، حد خمیری (PL)، حد انقباض (SL) و شاخص خمیری (PI)، تراکم پراکتور، تورم آزاد و فشار تورمی براساس استاندارد بر روی نمونه خاک شاهد و خاک اختلاط یافته با درصدهای مختلف آهک (۳، ۵ و ۷ درصد) انجام شد. همچنین، به‌منظور بررسی زمان عمل‌آوری آزمایش‌های مکانیک خاک بر روی نمونه‌های عمل‌آوری شده در زمان‌های ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه انجام شد. نتایج نشان داد با افزودن آهک، میزان LL و PI کاهش و PL و SL افزایش یافت. همچنین افزودن آهک به خاک موجب کاهش وزن واحد خشک خاک و افزایش درصد رطوبت بهینهٔ خاک و کاهش تورم آزاد و فشار تورمی می‌گردد و بیشترین کاهش در نمونهٔ اختلاط‌یافته با ۵ درصد آهک مشاهده شد. علاوه بر این، نتایج نشان داد با افزایش زمان عمل‌آوری تورم آزاد و فشار تورمی در نمونه‌های اختلاط‌یافته با ۳ درصد آهک کاهش می‌یابد. بنابراین می‌توان نتیجه‌گیری نمود که آهک در کاهش تورم خاک‌های جنگلی موثر می‌باشد.

استناد: موسوی، فاطمه؛ عبدی، احسان؛ مشایخی، زهرا؛ مدرسی، مرتضی؛ جنت بابایی، مصطفی (۱۴۰۲). بررسی تأثیر آهک بر روی خصوصیات تورمی خاک جاده‌های جنگلی. *نشریهٔ جنگل و فرآورده‌های چوب*، ۷۶ (۳)، ۲۱۶–۲۰۷. DOI: http//doi.org/10.22059/jfwp.2023.361990.1258

© نویسندگان.
ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.
DOI: http//doi.org/10.22059/jfwp.2023.361990.1258

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

۱. مقدمه

از آنجا که جاده‌های جنگلی و روستایی بر روی بستر طبیعی ساخته می‌شوند، آگاهی از خصوصیات مکانیکی خاک امری ضروری بوده و می‌تواند میزان هزینه‌های ساخت، تعمیر و نگهداری جاده را به‌طور چشم‌گیری کاهش دهد. در بخش مطالعات مکانیکی خاک، ویژگی‌های خاک مورد بررسی قرار می‌گیرد؛ سپس با توجه به شناخت ویژگی‌های خاک، دستورالعمل‌های مناسب ارائه می‌گردد که تا حد ممکن از صرف هزینه‌های اضافی جلوگیری گردد. به‌عبارتی، طراحی و ساخت جاده بدون مطالعهٔ این بخش، توجیه ندارد. در پروژه‌های راه‌سازی، مهندسان به ناچار با بسترهایی از انواع مختلف خاک با مقاومت و ویژگی‌های مختلفی روبه‌رو می‌شوند. خاک‌ها خواص مکانیکی، تورم‌زایی و مقاومتی مختلفی دارند. بعضی از خاک‌ها در دسته خاک‌های مسئله‌دار قرار می‌گیرند که خاک‌های ریزدانه نیز از این دسته‌اند. مقدار حجم این نوع خاک‌ها در اثر جذب آب، افزایش می‌یابد و با از دست دادن رطوبت، حجمشان کاهش می‌یابد بنابراین به خاک‌های متورم معروف هستند که به‌دلیل داشتن خصوصیات فنی نامطلوب، مشکلاتی را برای جاده‌سازی ایجاد می‌کنند [۱] و خسارات وارد شده توسط این نوع خاک‌ها بیلیون‌ها دلار در سال برآورد شده است [۲]. بنابراین در مواردی که نتوان با تغییر مسیر راه از ساخت روسازی بر روی این نوع خاک‌ها دوری کرد باید تدابیری برای کاهش تورم خاک در نظر گرفت و تا حد ممکن باید از ساخت روسازی بر روی این خاک‌ها بدون انجام تثبیت اجتناب شود [۴،۳]. معمولاً خاک‌های ریزدانه زمانی که تحت رطوبتی کمتر از رطوبت بهینه قرار گیرند، بارهای زیادی را تحمل می‌کنند اما هر چه میزان رطوبت افزایش یابد، مقاومت آن‌ها کم شده و تغییر شکل‌های بیشتری در خاک ایجاد می‌شود و در نهایت پایداری خاک از بین می‌رود [۱]. بنابراین یکی دیگر از پارامترهای مهم در ارزیابی کیفیت و مشخصات مکانیکی مصالح به‌ویژه برای جاده‌سازی، تورم و فشار تورمی خاک است. خسارات ایجاد شده توسط خاک‌های متورم به چالش بزرگی برای مهندسین و محققین تبدیل شده است و آن‌ها همواره در جستجوی یافتن روش مؤثر به‌منظور بهبود خصوصیاتی تورمی هستند. یکی از روش‌های بهبود خصوصیات تورمی خاک، تثبیت خاک می‌باشد. تثبیت خاک عبارت است از استفاده از مواد افزودنی طبیعی یا مصنوعی به‌منظور بهبود خصوصیات مکانیکی خاک. در زمینهٔ تثبیت خاک با مواد افزودنی مختلف، پژوهشگران به این نتیجه رسیدند که مواد افزودنی مانند آهک [۵]، سیمان [۶] و خاکستر بادی [۷] موجب بهبود مقاومت فشاری محصور نشده خواهند شد. در بین این مواد، از آهک به‌عنوان روش اقتصادی در تثبیت خاک‌ها، به‌صورت گسترده استفاده می‌شود [۸،۹]. پژوهشگرانی [۱۲-۱۰] به این نتیجه رسیدند که آهک موجب افزایش رطوبت بهینه، حد انقباض و مقاومت خاک شده و از طرفی کاهش حد روانی، حداکثر دانسیتهٔ خشک، خواص خمیری خاک و پتانسیل تورم را در پی خواهد داشت و درصد بهینهٔ آهک اضافه شده به خاک بین ۲ تا ۸ درصد توسط آنان گزارش شده است. همچنین پژوهش‌هایی نیز بر روی تثبیت خاک جاده‌های جنگلی با آهک صورت گرفته است [۱۷-۱۳] که به این نتیجه رسیدند که آهک موجب افزایش مقاومت خاک جنگلی می‌گردد. همچنین پژوهشی نیز در زمینهٔ تثبیت خاک زیر اساس جاده‌های جنگلی با استفاده از ضایعات گل آهکی حاصل از فرآیند بازیابی شیمیایی در آسیاب خمیر قلیایی انجام شده است که نشان‌دهندهٔ تأثیر مثبت ضایعات گل آهک در خاک زیر اساس جاده‌های جنگلی بود [۱۸] اما تاکنون مطالعه‌ای در زمینهٔ تأثیر آهک بر تورم آزاد و فشار تورمی جاده‌های جنگلی صورت نگرفته است. بنابراین با توجه به خواص این ماده و اهمیت بهبود پتانسیل تورمی خاک‌های متورم لازم است مطالعه‌ای در این زمینه در جاده‌های جنگلی نیز انجام شود. در این راستا، این مطالعه سعی در بررسی تأثیر مادهٔ آهک بر خصوصیات تورم یک خاک رسی متورم جنگلی دارد.

۲. روش‌شناسی پژوهش

۲-۱. مواد

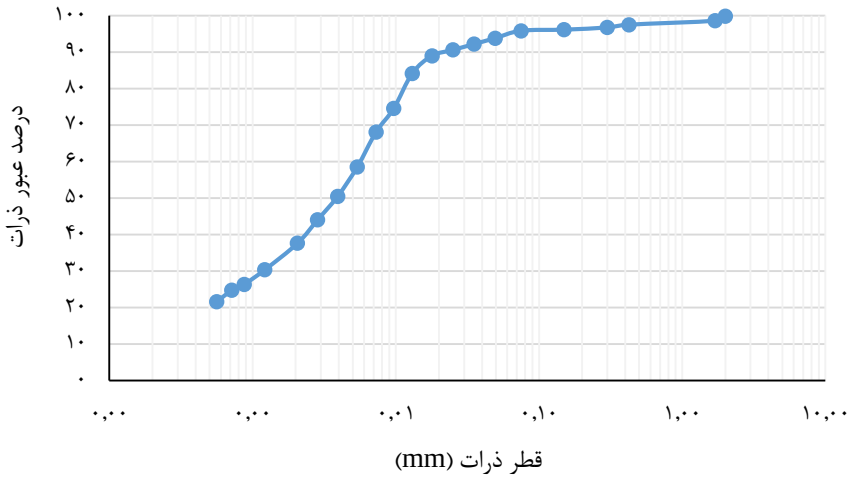
۲-۱-۱. خاک مورد استفاده

خاک مورد استفاده برای این مطالعه، نمونه‌ای حدود ۵۰ کیلوگرم خاک برداشت شده از عمق ۳۰-۰ سانتی‌متری حاشیهٔ جادهٔ جنگلی در بخش نمخانهٔ جنگل آموزشی و پژوهشی دانشگاه تهران بود. لازم به ذکر است، بعد از کنار زدن، مادهٔ آلی تهیه و به آزمایشگاه مکانیک خاک منتقل شد. بعد از خشک کردن در هوای آزاد، برای از بین بردن تفاوت قسمت‌های مختلف نمونهٔ خاک،

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

خاک کاملاً مخلوط و به دو قسمت تقسیم شد، یک قسمت خاک شاهد و یک قسمت خاک تیمار شده با درصدهای مختلف ماده که برای آزمایش‌های تراکم، تورم و فشار تورمی بکار رفت، بود. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آن براساس استاندارد تعیین شد و در جدول ۱ نشان داده شده است. همچنین آزمایش دانه‌بندی طبق استاندارد ASTM D422 انجام شد. نمودار دانه‌بندی خاک مورد نظر در شکل ۱ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، خاک مورد استفاده دارای ۸۷ درصد رس بود و با توجه به طبقه‌بندی یونیفاید از نوع خاک رسی با حد روانی بالا (CH) بود.



شکل ۱. نمودار دانه‌بندی نمونه خاک مورد استفاده در تحقیق

جدول ۱. خصوصیات شیمیایی نمونه خاک استفاده شده در تحقیق

ویژگی	مقدار	ویژگی	مقدار
Gs	۲/۸۵	Na^+ (meq/L)	۰/۳۹
SO_4 (2−)	۱/۹	Ca^{2+} (meq/L)	۱/۷
CaCO3 (%)	۰/۷۴	Mg^{2+} (meq/L)	۲/۸
CEC	۳۳/۰۹	CL^- (meq/L)	۰/۸
EC	۱۲۱/۲	CO_3^{2-}(meq/L)	۰/۰
OC	۱/۶۸	HCO_3 (2−)	۱/۸۸
pH	۴/۸	K^+ (meq/L)	۰/۹

۲-۱-۲. آهک

آهک مورد استفاده در مطالعهٔ حاضر اکسید کلسیم (CaO) بود. این ماده، واکنش شیمیایی بالایی دارد و از نظر ظاهری پودری سفید رنگ است. اکسید کلسیم دارای ساختار کریستالی و قلیایی است. خواص آهک مورد استفاده در این تحقیق در جدول ۲ ارائه شده است.

۲-۲. روش مطالعه

در این پژوهش، برای تعیین حد روانی از دستگاه کاساگرانده و برای تعیین حد خمیری از استاندارد ASTM D4318 استفاده گردید. دامنهٔ خمیری نیز براساس اختلاف حد روانی و حد خمیری به‌دست آمد. بدین‌منظور آزمایش‌های حدود آتربرگ (حدروانی

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

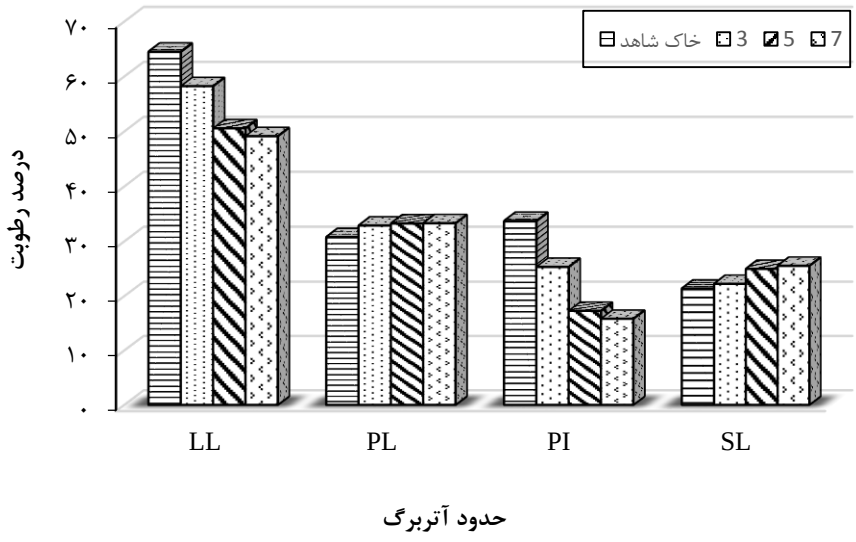
و حد خمیری) مطابق استاندارد بر روی نمونه خاک شاهد و نمونه‌های تیمار شده با درصدهای مختلف آهک (۳، ۵ و ۷ درصد) انجام شد [۱۳، ۱۵]. همچنین پیش از انجام آزمایش تورم و فشار تورمی، آزمایش پراکتور استاندارد براساس استاندارد ASTMD-698 به‌منظور تعیین درصد رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک حداکثر، برای نمونه‌ها خاک اختلاط‌یافته با درصدهای مختلف آهک انجام شد. سپس آزمایش تورم و فشار تورمی طبق استاندارد ASTM-D4546 بر روی نمونهٔ شاهد و نمونه‌های اختلاط‌یافته با درصدهای مختلف آهک انجام شد [۱۹].

جدول ۲. خصوصیات آهک

ویژگی	مقدار
فرمول شیمیایی	CaO
pH	۱۲/۸
Gs	۳/۳۴ gr/m^3
نقطه ذوب	۲۶۱۳ $^{\circ}C$
ظاهر	سفید رنگ

۳. یافته‌های پژوهش و بحث

شکل ۲ نتایج حدود آتربرگ را به‌ترتیب برای خاک شاهد و خاک اختلاط‌یافته با درصدهای مختلف آهک نشان می‌دهد. میزان LL، PL، PI و SL برای خاک شاهد به‌ترتیب برابر ۶۴/۵۳، ۳۰/۸، ۳۳/۷۳ و ۲۱/۴۱ درصد می‌باشد که با اضافه نمودن ۷ درصد آهک، میزان LL، PL، SL و PI به‌ترتیب برابر با ۴۹/۱۵، ۳۳/۳۱، ۱۵/۸۴ و ۲۵/۵۵ درصد شد. نتایج نشان داد که با افزودن ۳، ۵ و ۷ درصد آهک، میزان LL به‌ترتیب برابر ۱۰/۷۸، ۲۷/۵۸ و ۳۱/۲۹ درصد است. همچنین میزان PL با افزودن ۳، ۵ و ۷ درصد آهک به‌ترتیب ۶/۷۸، ۸/۰۱، ۸/۱۴ افزایش یافت. این مقادیر برای SL به‌ترتیب ۴/۰۶ ، ۱۶/۷۷ و ۱۹/۴۱ درصد افزایش و ۳۳/۰۰، ۹۴/۸۵ و ۱۱۲/۹۴ درصد کاهش برای PI را نشان داد. دلیل کاهش LL و PI و افزایش PL و SL در نمونه‌های تثبیت‌شده با آهک، واکنش تبادل یونی ناشی از ترکیب خاک با آهک می‌باشد که موجب کاهش خصوصیات خمیری خاک و در نهایت افزایش کارایی خاک می‌شود [۲۰].

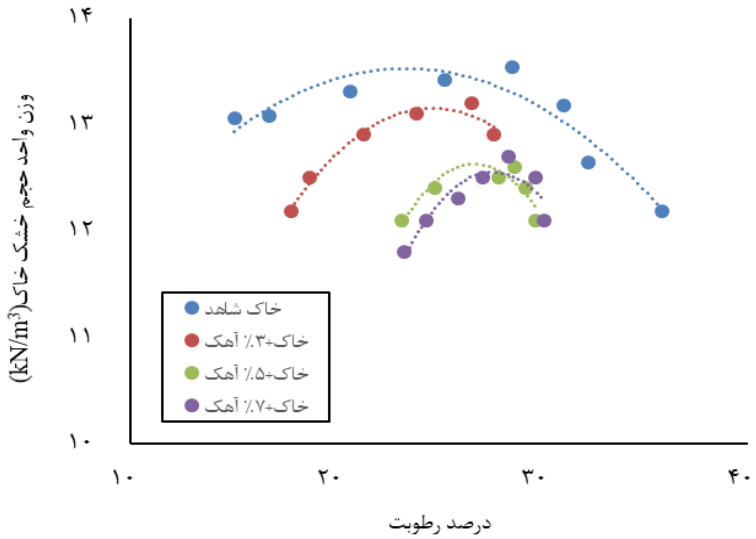


شکل ۲. نتایج حدود آتربرگ برای خاک شاهد و خاک تیمار شده با درصدهای مختلف آهک

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

نتایج آزمایش پراکتور استاندارد نیز برای نمونه خاک شاهد و نمونه‌های اختلاط‌یافته با درصدهای مختلف آهک (۳، ۵ و ۷درصد) در شکل ۳ ارائه شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، با افزودن ۳، ۵ و ۷ درصد آهک به خاک، میزان وزن واحد خشک بیشینه به‌ترتیب ۳/۰۵، ۴/۵۸ و ۶/۸۷ درصد کاهش و میزان رطوبت بهینهٔ خاک ۴/۱۶، ۸/۳۳ و ۶۶ درصد افزایش یافت که این نتایج با مطالعات قبلی نیز مطابقت داشت [۲۰، ۲۱]. براساس مطالعات پیشین، افزودن آهک به خاک موجب کلسیمی شدن خاک و جمع‌شدن ذرات می‌گردد که این موضوع سبب کاهش حداکثر وزن مخصوص خشک خاک می‌گردد. از طرفی برای انجام هیدراتاسیون و واکنش پوزولانی میان خاک و آهک به آب بیشتری نیاز است که این امر موجب افزایش رطوبت بهینهٔ خاک با افزایش مقدار آهک می‌شود. براساس نتایج، با افزایش میزان آهک بیشتر از ۵ درصد، میزان حداکثر وزن واحد حجم خشک افزایش و رطوبت بهینه کاهش پیدا کرد که این امر نیز به‌دلیل اتمام واکنش‌دهنده‌ها در طول واکنش و در نهایت توقف واکنش پوزولانی می‌باشد [۱۵، ۲۱].



شکل ۳. نتایج آزمایش پراکتور استاندارد بر روی نمونهٔ شاهد و نمونه‌های اختلاط‌یافته با آهک

نتایج آزمایش تورم خاک برای نمونه خاک شاهد و نمونه‌های اختلاط‌یافته با درصدهای مختلف آهک (۳، ۵ و ۷ درصد) در شکل ۴ نشان داده شده است. نرخ کاهش تورم آزاد خاک اختلاط‌یافته با ۳، ۵ و ۷ درصد آهک نسبت به خاک شاهد به‌ترتیب ۷/۳۰، ۲۴/۷۲ و ۱۶/۱۵ درصد بود که این نتایج با یافته‌های پیشین [۲۵-۲۲] مطابقت داشت.

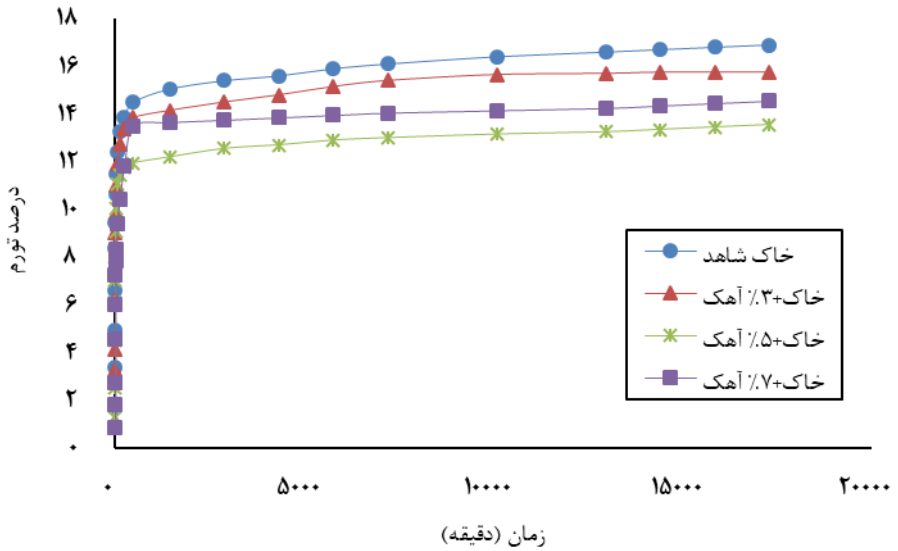
پس از افزودن آهک به خاک، ابتدا آب اضافی از اطراف ساختار رس-آهک با هیدراتاسیون سریع CaO به $Ca(OH)_2$ حذف می‌گردد که گرمای قابل توجهی نیز ایجاد می‌کند. پس از آن، فرآیند تبادل کاتیونی سریع بر روی سطح ذرات رس رخ می‌دهد که در این مرحله، لایهٔ مضاعف آب اطراف ذرات رس بین کاتیون‌های دو ظرفیتی و کاتیون‌های تک ظرفیتی از بین می‌رود و بارهای الکترواستاتیکی در اطراف ذرات رس متعادل می‌شوند. همزمان با این مرحله، سطح مؤثر معدنی رس کاهش پیدا کرده و واکنش‌های پوزولانی اولیه رخ می‌دهد که منجر به محدودیت در پراکندگی بعدی تجمعات می‌گردد و در انتهای این مرحله، محصولات واکنش پوزولانی اولیه در نقاط تماس میان ذرات رس قرار می‌گیرند. ترکیبات تشکیل‌شده حفرات خاک را پر می‌کنند و در نتیجه تخلخل و نفوذپذیری کاهش می‌یابد و به‌دلیل ایجاد ساختار مجتمع و جامدشدگی ذرات ناشی از افزودن آهک به خاک در نهایت سطح مؤثر کانی‌های رس کاهش می‌یابد و این امر موجب کاهش تورم خاک می‌گردد [۲۶]. علاوه بر این، نتایج نشان داد درصد بهینهٔ آهک به‌منظور کاهش تورم خاک، ۵ درصد می‌باشد و با افزایش درصد، بیشتر میزان تورم افزایش می‌یابد.

نتایج آزمایش فشار تورمی خاک برای نمونه خاک شاهد و نمونه‌های اختلاط‌یافته با درصدهای مختلف آهک (۳، ۵ و ۷درصد) در شکل ۵ ارائه شده است. براساس نتایج حاصل، درصد کاهش فشار تورمی خاک اختلاط‌یافته با ۳، ۵ و ۷ درصد آهک

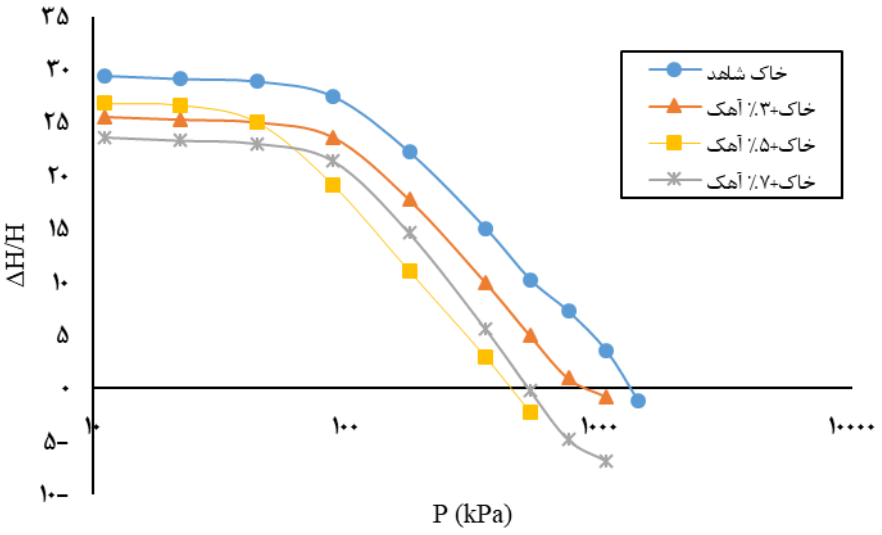
Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

نسبت به خاک شاهد به‌ترتیب ۱۶/۵۷، ۱۱۳/۸۳ و ۹۶/۱۵ درصد بود. این نتایج با نتایج تورم آزاد در توافق بود.



شکل ٤. تأثیر آهک با درصدهای مختلف بر تورم خاک



شکل ۵. تأثیر آهک با درصدهای مختلف بر فشار تورمی خاک

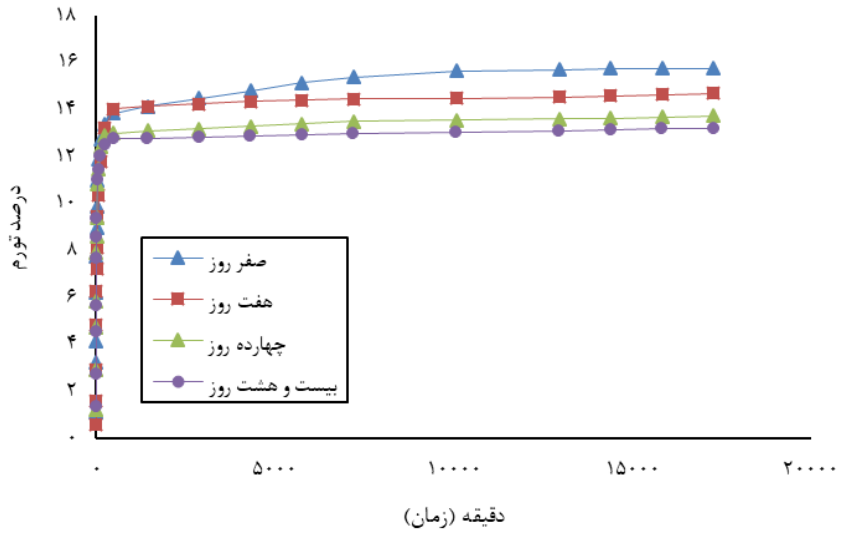
شکل ۶ نیز نتایج تأثیر زمان عمل‌آوری بر تورم آزاد خاک اختلاط‌یافته با ۳ درصد آهک در زمان‌های عمل‌آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه را نشان می‌دهد. براساس نتایج میزان تورم آزاد در زمان‌های عمل‌آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه به‌ترتیب ۷/۱۴، ۱۴/۵۴ و ۱۹/۳۱ درصد کاهش یافت.

شکل ۷ نتایج تأثیر زمان عمل‌آوری بر فشار تورمی خاک تیماریافته با ۳ درصد آهک را نشان می‌دهد. براساس نتایج، میزان فشار تورمی خاک تیمارشده با آهک در زمان‌های عمل‌آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه به‌ترتیب ۱۸۸/۱۷۲، ۱۴۵/۸۳ و ۳۳۶/۵۳ درصد بود. بنابراین می‌توان گفت زمان عمل‌آوری موجب کاهش تورم و فشار تورمی خاک تیمارشده با آهک می‌گردد و بیشترین کاهش

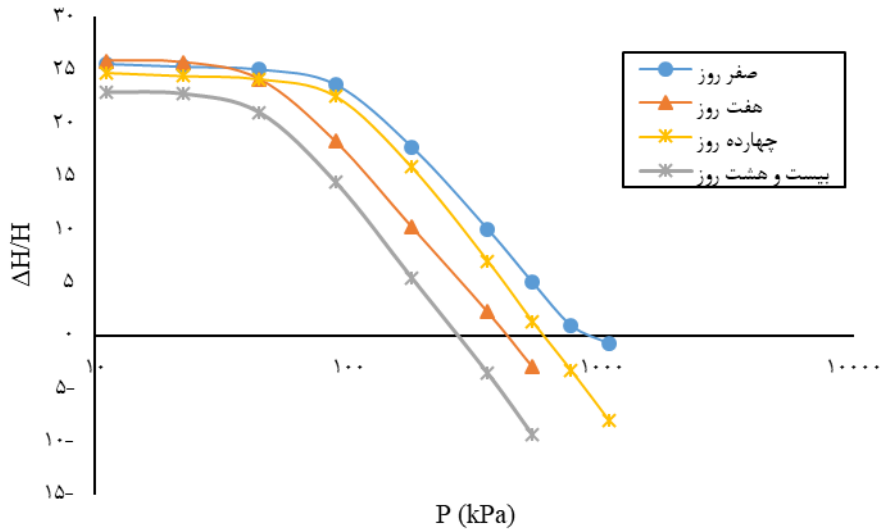
Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

در زمان عمل‌آوری ۲۸ روزه ایجاد می‌گردد. براساس یافته‌ها، می‌توان بیان کرد که با افزودن آهک به خاک نیز واکنش‌های پوزولانی در کوتاه‌مدت آغاز می‌شود و میزان واکنش پوزولانی با گذشت زمان عمل‌آوری، افزایش می‌یابد. واکنش‌های پوزولانی با تغییراتی که در ساختار کریستالی خاک ایجاد می‌کنند موجب کاهش تورم و فشار تورمی خاک‌های متورم می‌گردند که این با گذشت زمان پتانسیل تورمی خاک کاهش می‌یابد [۲۷، ۲۸].



شکل ٦. تأثیر زمان عمل آوری بر تورم آهک



شکل ۷. تأثیر زمان عمل‌آوری بر فشار تورمی خاک تیمارشده با آهک

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

۴. نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر، تأثیر آهک بر روی خصوصیات تورمی یک خاک رسی متورم بررسی شد. علاوه بر این تأثیر زمان عمل‌آوری نیز بر روی خصوصیات تورمی خاک مورد بررسی قرار گرفت. نتیجه‌گیری این تحقیق نشان داد:

۱- افزودن آهک به خاک موجب کاهش حد روانی، افزایش حد روانی و در نهایت کاهش حد خمیری خاک شد.

۲- افزودن آهک به خاک موجب کاهش وزن واحد حجم خشک حداکثر خاک و افزایش رطوبت بهینه شد اما با افزایش میزان آهک بیشتر از ۵ درصد، میزان حداکثر وزن واحد حجم خشک افزایش و رطوبت بهینه کاهش پیدا کرد.

۳- افزودن درصدهای مختلف آهک موجب کاهش تورم خاک گردید به‌طوری‌که با افزودن آهک بیش از ۵ درصد تورم و فشار تورمی خاک کاهش یافت.

۴- افزایش زمان عمل‌آوری موجب کاهش تورم و فشار تورمی خاک در نمونه‌های تیمار شده با آهک می‌شود.

بر اساس نتایج، ۵ درصد آهک و زمان عمل‌آوری ۲۸ روز به‌عنوان مقادیر بهینه معرفی گردید.

۵. سپاسگزاری

بدینوسیله از حمایت مالی صندوق پژوهشگران و فناوران کشور و بنیاد ملی نخبگان در انجام این تحقیق در قالب طرح پسا دکتری به شماره طرح ۴۰۰۰۲۸۵ کمال تشکر و قدردانی را داریم.

۶. منابع

[1] Mousavi, F., Abdi, E., & Rahimi, H. (2014). Effect of polymer stabilizer on swelling potential and CBR of forest road material. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 18(1), 2064-2071.

[2] Thompson, M.P., Gannon, B.M., & Caggiano, M.D. (2021). Forest roads and operational wildfire response planning. *Forests*, 12(2), 110.

[3] Mousavi, F., Avatefi Hemmat, M., Abdi, E., & Norouzi, A. (2021). The effect of polymer materials on the stabilization of forest road subgrade. *International Journal of Forest Engineering*, 32(3), 235-245.

[4] Mousavi, F., & Abdi, E. (2022). Unconfined compression strength of polymer stabilized forest soil clay. *Geotechnical and Geological Engineering*, 40(8), 4095-4107.

[5] Pereira, R. S.; Emmert, F.; Miguel, E.P., & Gatto, A. (2018). Soil stabilization with lime for the construction of forest roads. *Floresta e Ambiente*, 25(1), 12-27.

[6] Emmert, F., Pereira, R.S., Miguel, E.P., Mota, F.C.M., Angelo, H., do Vale, A.T., Machado, M.P.O., Nappo, M.E., & Martins, I.S. (2017). Improving geotechnical properties of a sand-clay soil by cement stabilization for base course in forest roads. *African Journal of Agricultural Research*, 12(30), 2475-2481.

[7] Lindroos, A.-J., Ryhti, K., Kaakkurivaara, T., Uusitalo, J., & Helmisaari, H.-S. (2019). Leaching of heavy metals and barium from forest roads reinforced with fly ash. *Silva Fennica*. 53 (2). https://doi.org/10.14214/sf.10088

[8] Okonkwo, U.N., & Kennedy, C. (2023). The Effectiveness of Cement and Lime as Stabilizers for Subgrade Soils with High Plasticity and Swelling Potential. *Saudi Journal of Civil Engineering*, 7(3), 40-60.

[9] Landlin, G., & Bhuvaneshwari, S. (2023). Cyclic swell shrink behaviour of lime and lignosulphonate amended expansive soil—An experimental quantification and comparison. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 100440.

[10] Sirivitmaitrie, C., Puppala, A.J., Chikyala, V., Saride, S., & Hoyos, L.R. (2008). Combined lime and cement treatment of expansive soils with low to medium soluble sulfate levels. In *Geo Congress 2008: Geosustainability and Geohazard Mitigation* (pp. 646-653).

[11] Guney, Y., Sari, D., Cetin, M., & Tuncan, M. (2007). Impact of cyclic wetting–drying on swelling behavior of lime-stabilized soil. *Building and Environment*, 42(2), 681-688.

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

[12] Thyagaraj, T., Rao, S.M., Sai Suresh, P., & Salini, U. (2012). Laboratory studies on stabilization of an expansive soil by lime precipitation technique. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 24(8), 1067-1075.

[13] Majnounian, P., & Sadeghi, B. (2004). Determination of the Optimum Percentage of Lime for Stabilization and Amendment of Soil in Forest Roads, Seri Namkhaneh, Kheyroudkenar Forest. *Iranian Journal of Natural Resources*, 57(4), 663-673. (In Persian)

[14] Majnounian, P., Jamshidi Kohsari, A., Zahedi Amiri, G., & Hosseini, S.A. (2008). Investigation of Soil Mechanical Capability in Under-Construction Forest Roads for Practical Applications. *Iranian Journal of Natural Resources*, 61, 123-132 (In Persian)

[15] Mohammadi, S.D., Nikoodel, M.R., & Golestani, A. (2012). Assessment of the Efficiency of Quicklime and Slaked Lime for Soil Improvement in Forests Containing Organic Materials. *Iranian Journal of Geotechnical Engineering*, 5(1), 67-78. (In Persian)

[16] Keybondori, S., & Abdi, E. (2021). Lime stabilization to improve clay-textured forest soil road subgrades. *International Journal of Forest Engineering*, 32(2), 112-118.

[17] Rocha, G.S., de Carvalho Silva, C. H., Pitanga, H.N., de Mendonça, E.P.S., de Lima, D.C., & da Corte, G.D. (2020). Effect of lime on the mechanical response of a soil for use in unpaved forest roads. *Acta Scientiarum. Technology*, 42. 10.4025/actascitechnol.v42i1.44764

[18] Eroglu, H., Hulusi Acar, H., Ucuncu, O., & Imamoglu, S. (2006). Soil stabilization of forest roads sub-base using lime mud waste from the chemical recovery process in alkaline pulp mill. *Journal of Applied Sciences*, 6(5), 1199-1203.

[19] ASTM D42-63. (2007). *Test method for particle-size analysis of soils*. 8 p.

[20] Amadi, A. Okeiyi, A. (2017). Use of quick and hydrated lime in stabilization of lateritic soil: comparative analysis of laboratory data. *International Journal of Geo-Engineering*, 8, 1-13.

[21] Saeed, K. A. H., Kassim, K.A., Yunus, N.Z.M., & Nur, H. (2013). Characterization of hydrated lime-stabilized brown kaolin clay. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 2(11), 3722-3727.

[22] Kiliç, R., Küçükali, Ö., & Ulamiş, K. (2016). Stabilization of high plasticity clay with lime and gypsum (Ankara, Turkey). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 75, 735-744.

[23] Al-Rawas, A.A., Hago, A.W., & Al-Sarmi, H. (2005). Effect of lime, cement and Sarooj (artificial pozzolan) on the swelling potential of an expansive soil from Oman. *Building and Environment*, 40(5), 681-687.

[24] Yilmaz, I., & Civelekoglu, B. (2009). Gypsum: an additive for stabilization of swelling clay soils. *Applied Clay Science*, 44(1-2), 166-172.

[25] Phanikumar, B.R. (2009). Effect of lime and fly ash on swell, consolidation and shear strength characteristics of expansive clays: a comparative study. *Geomechanics and Geoengineering: An International Journal*, 4(2), 175-181.

[26] Beetham, P., Dijkstra, T., Dixon, N., Fleming, P., Hutchison, R., & Bateman, J. (2015). Lime stabilisation for earthworks: a UK perspective. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Ground Improvement* 168(2), 81-95.

[27] Jha, A.K., & Sivapullaiah, P.V. (2020). Lime stabilization of soil: A physico-chemical and micro-mechanistic perspective. *Indian Geotechnical Journal*, 50, 339-347.

[28] Jahandari, S., Tao, Z., Saberian, M., Shariati, M., Li, J., Abolhasani, M., Kazemi, M., Rahmani, A., & Rashidi, M. (2022). Geotechnical properties of lime-geogrid improved clayey subgrade under various moisture conditions. *Road Materials and Pavement Design*, 23(9), 2057-2075.

Archive of SID.ir