جنگل و فرآورده‌های چوب، مجله منابع طبیعی ایران
دوره ۶۸، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۴
ص۳۹۵-۴۰۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۰۷/۰۹
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۰۲/۰۷

مقایسهٔ تأثیر مواد پلیمری بر خصوصیات فیزیکی خاک جاده‌های جنگلی

❖ **فاطمه موسوی؛** دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی جنگل، دانشکدهٔ منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
❖ **احسان عبدی*؛** دانشیار دانشکدهٔ منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
❖ **علی رئیسی استبرق؛** استادیار گروه مهندسی آبادانی و آبیاری، دانشگاه تهران، کرج، ایران
❖ **باریس مجنونیان؛** استاد دانشکدهٔ منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

چکیده

تثبیت خاک؛ اصلاح و بهبود خواص مکانیکی خاک برای افزایش مقاومت خاک در درازمدت جهت تأمین اهداف ازپیش‌تعیین‌شده است. به دلیل اینکه بافت خاک مسیر جاده در سری نم‌خانهٔ جنگل آموزشی‌ــ پژوهشی خیرود از نوع ریزدانه با درصد رس و خمیرایی بالاست، برای ساخت جاده روی آن باید خواص مکانیکی آن را تغییر داد. به همین منظور در این پژوهش آزمایش تراکم و حدود آتربرگ بر نمونهٔ خاک شاهد و نمونه‌های تیمارشده با درصدهای مختلف دو نوع مادهٔ پلیمری با نام‌های تجاری CBRPLUS و RPP بررسی و مطالعه شد. همچنین، به منظور بررسی زمان بر عملکرد این مواد پلیمری، نمونه‌های تیمارشده با ۰٫۰۵ درصد مادهٔ CBRPLUS و ۰٫۰۳ درصد مادهٔ RPP تهیه و به مدت هفت و چهارده روز نگهداری شد. سپس، آزمایش حدود آتربرگ روی این نمونه‌ها انجام گرفت. طبق نتایج، با افزودن درصدهای مختلف مادهٔ CBRPLUS به خاک حد روانی بین ۳٫۲۷ تا ۲۲٫۰۵ درصد، حد خمیری بین ۰٫۹۴ تا ۶٫۹۷ درصد، و شاخص خمیری بین ۴٫۸ تا ۳۲٫۵ درصد کاهش پیدا می‌کند و با افزودن درصدهای مختلف مادهٔ RPP به خاک حد روانی بین ۴٫۹۳ تا ۱۴٫۲۷ درصد، حد خمیری بین ۳٫۱۴ تا ۸٫۵۷ درصد، و شاخص خمیری بین ۱۳٫۲۲ تا ۲۴٫۰۳ درصد کاهش می‌یابد. نتایج آزمایش حدود آتربرگ نشان داد، افزودن این مواد به خاک باعث بهبود خصوصیات پلاستیسیتهٔ خاک می‌شود و زمان عمل‌آوری از لحاظ فنی تأثیری بسزا در بهبود خصوصیات پلاستیسیتهٔ خاک ندارد. همچنین، نتایج آزمایش تراکم نشان داد افزودن درصدهای مختلف مادهٔ CBRPLUS به خاک باعث افزایش حداکثر دانسیتهٔ خشک خاک بین ۱٫۵۸ تا ۹٫۸۵ درصد و کاهش رطوبت بهینه بین ۳٫۵۷ تا ۲۳٫۲۱ درصد و افزودن مادهٔ RPP به خاک باعث افزایش حداکثر دانسیتهٔ خشک خاک بین ۰٫۷۵ تا ۱٫۵۸ درصد و ثابت‌ماندن میزان رطوبت بهینهٔ خاک می‌شود. به طور کلی، با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، افزودن این مواد به خاک باعث بهبود نسبی خصوصیات خاک می‌شود. اما میزان بهبود در حد پذیرفتنی از نظر فنی در خاک مطالعه نشد. بنابراین، این مواد هنوز به منزلهٔ جایگزین مطمئن روش‌های سنتی، حداقل در خاک‌های رسی با حد روانی بالا، مطرح نیست.

واژگان کلیدی: تثبیت خاک، خواص پلاستیسیته، مادهٔ پلیمری، CBRPLUS، RPP.

* نویسندهٔ مسئول تلفن: ۰۲۶۳-۲۲۴۹۳۱۲، فاکس: ۰۲۶۳-۲۲۴۹۳۱۲
Email: Abdie@ut.ac.ir

مقدمه

یکی از مشخصات مهم و اساسی خاک‌های ریزدانه (رس و لای) خاصیت خمیری آن‌هاست. در سال ۱۹۱۱، دانشمند سوئدی، آتربرگ، روشی برای توصیف سفتی خاک‌های ریزدانه بر حسب میزان رطوبت ابداع کرد. در میزان رطوبت خیلی کم خاک مانند جسمی جامد عمل می‌کند. در رطوبت خیلی بالا مخلوط آب و خاک می‌تواند به صورت مایع جاری شود. به طور کلی، طبیعت رفتار خاک به یکی از چهار حالت جامد، نیمه‌جامد، خمیری، و مایع خواهد بود. میزان رطوبت (بر حسب درصد) در نقطهٔ انتقال از جامد به نیمه‌جامد حد انقباض و در نقطهٔ انتقال از نیمه‌جامد به خمیری حد خمیری و از خمیری به مایع حد مایع نامیده می‌شود. حدود نام‌برده به حدود آتربرگ معروف‌اند. یکی از کاربردهای بسیار مهم حدود آتربرگ استفاده در طبقه‌بندی خاک در سیستم یونیفاید[1] است. ویژگی خمیری بر اساس میزان رطوبت موجود در خاک نسبت به اجزای جامد خاک است. یعنی، با توجه به میزان رطوبت، خاک ممکن است حالات روانی، خمیری، نیمه‌جامد، و جامد به خود بگیرد. اما از طرفی میزان رطوبتی که خاک را از حالتی به حالت دیگر تبدیل می‌کند به جنس و نوع خاک بستگی دارد. حد روانی کمترین مقدار رطوبتی است که در آن خاک بر اثر وزنش جریان پیدا می‌کند؛ در واقع، مقدار رطوبتی است که مقاومت برشی خاک در آن حد از رطوبت ناچیز است. همچنین، حد خمیری کمترین مقدار رطوبتی است که در آن می‌توان خاک را به صورت میله‌ای نازک به قطر ۳٫۲ میلی‌متر درآورد. با ازدست‌دادن رطوبت، خاک منقبض می‌شود (حجم آن کاهش می‌یابد). با کاهش پیوستهٔ رطوبت، مرحله‌ای می‌رسد که از آن به بعد کاهش رطوبت دیگر سبب کاهش حجم نمی‌شود. نمونهٔ خاک آزمایش بخشی از خاک است که از الک شمارهٔ ۴۰ عبور داده می‌شود. آگاهی از خصوصیات مکانیکی خاک و تعیین مشخصات فنی آن برای کارهای ساختمانی و تنظیم پایداری آن ضروری است. در بخش مطالعات مکانیکی خاک، ویژگی‌های خاک بررسی می‌شود. سپس، با توجه به شناخت ویژگی‌های خاک، دستورالعمل‌های مناسب برای جلوگیری از صرف هزینه‌های اضافی، تا حد ممکن، ارائه می‌شود. به عبارت دیگر، طراحی و ساخت جاده بدون مطالعهٔ این بخش توجیه ندارد. پژوهش‌هایی دربارهٔ احداث جاده‌های جنگلی و وضعیت مکانیک خاک منطقه‌ای در اتریش انجام شد. نتایج نشان داد در این قبیل مطالعات ابتدا باید پارامترهای دانه‌بندی، وزن مخصوص، رطوبت بهینه، و تراکم اندازه‌گیری شود [۱]. بعضی خاک‌ها در زمرهٔ خاک‌های مسئله‌دار قرار می‌گیرند. خاک‌های ریزدانه نیز از این دسته‌اند. خاک‌های ریزدانه، به دلیل داشتن خصوصیات فنی نامطلوب، مشکلاتی برای جاده‌سازی ایجاد می‌کنند. این مشکلات عمدتاً ناشی از خواص خمیری، نفوذپذیری کم، مقاومت پایین، تغییرات فشار آب حفره‌ای، تغییر حجم، بافت، و ساختار شیمیایی و دانه‌ای این خاک‌هاست. شرایط محیطی می‌تواند در بعضی موارد شدت مشکلات را بیشتر و در بعضی موارد مانع بروز آن‌ها شود. یکی از اقداماتی که برای رساندن مقاومت به حد مطلوب صورت می‌گیرد

1. Unified Soil Classification System

استفاده از روش‌های اصلاح و تثبیت مناسب خاک است. اگرچه افزایش مقاومت درازمدت خاک مهم‌ترین هدف تثبیت است، در زمین‌های بسیار مرطوب و سست بهبود خصوصیات پلاستیسیتهٔ خاک نیز، به منظور افزایش کارایی ماشین‌آلات راه‌سازی، معمولاً یکی از اهداف تثبیت است. این موضوع با آزمایش‌های حدود آتربرگ بررسی می‌شود [۲]. روش‌های گوناگونی برای اصلاح و تثبیت خاک وجود دارد و تا امروز مطالعات بسیار زیادی دربارهٔ خصوصیات و فرایند و مکانیزم تثبیت با مواد افزودنی متعارف، مانند آهک [۳ـ ۵] و سیمان [۶]، صورت گرفته؛ اما تحقیقات بسیار کمی دربارهٔ تأثیر مواد تثبیت‌کنندهٔ غیر متعارف، مانند آنزیم‌ها [۷] و مواد تثبیت‌کنندهٔ یونی [۸ـ ۱۰] و پلیمرهای طبیعی [۱۱]، اجرا شده است.

مطالعات در زمینهٔ تأثیرگذاری مواد تثبیت‌کنندهٔ متعارف، مانند آهک و سیمان، روی نمونه‌های مختلف خاک نشان داد اضافه‌کردن مقدار متوسطی از این مواد به انواع مشخصی از خاک‌ها تأثیری مفید بر رفتار آن خاک‌ها دارد و میزان شاخص خمیری خاک کاهش می‌یابد [۳ – ۶]. همچنین، پژوهش در زمینهٔ تأثیر مواد افزودنی غیر متعارف نشان داد این مواد باعث کاهش پلاستیسیته و بهبود خواص خاک [۸ – ۱۱] و افزایش حداکثر دانسیتهٔ خشک خاک [۱۰ و ۱۱] می‌شوند. آنالیزهای اقتصادی نیز نشان داد استفاده از این مواد در ساخت جاده اقتصادی است [۱۱]. در پژوهشی دیگر تغییرات خواص مکانیکی خاک در اثر سه مادهٔ تثبیت‌کنندهٔ غیر متعارف بر خصوصیات پنج نوع خاک رس مطالعه شد. سه مادهٔ تثبیت‌کنندهٔ مایع شامل تثبیت‌کننده‌های یونی و آنزیمی و پلیمری بودند و مصالح رسی مورد آزمایش شامل سه کانی نسبتاً خالص رسی کائولینیت و ایلیت و مونت‌مریلونیت سدیمی و دو رس با پلاستیسیتهٔ بالا بودند. نتیجهٔ مطالعات فقط کاهش پلاستیسیته را در مونت‌مریلونیت سدیمی نشان داد [۱۲]. با توجه به اینکه تاکنون در جاده‌های جنگلی فقط از تثبیت‌کننده‌های سنتی (عمدتاً آهک) استفاده شده و تجربه‌ای در زمینهٔ تثبیت‌کننده‌های پلیمری وجود ندارد و نیز با توجه به کمبود مصالح مناسب (به دلیل قیمت یا تخریب محیط زیست) در این پژوهش به این مقوله پرداخته شد. هدفِ پژوهش بررسی و مقایسهٔ تأثیر افزودن مواد پلیمری با نام‌های CBR PLUS و RPP بر خصوصیات تراکمی و کاهش پلاستیسیتهٔ نمونهٔ خاک مشکل‌دار تهیه‌شده از سری نم‌خانهٔ جنگل خیرود دانشکدهٔ منابع طبیعی دانشگاه تهران بود.

مواد و روش‌ها

مواد

خاک

خاک استفاده‌شده در این پژوهش از حاشیهٔ جادهٔ فرعی واقع در سری نم‌خانهٔ جنگل آموزشی و پژوهشی دانشکدهٔ منابع طبیعی دانشگاه تهران در نوشهر تهیه شد. آزمایش حد روانی بر خاک به‌کاررفته، با استفاده از نفوذ مخروط[1]، مطابق استاندارد BS انجام شد. گفتنی است درصد رطوبت ۲۰ میلی‌متر نفوذ درصد رطوبت را در حد روانی نشان می‌دهد. وزن مخصوص نسبی ذرات جامد نیز طبق استاندارد ASTM-D128 تعیین شد.

1. Cone Penetration

مادهٔ RPP

Road Packer Plus (**RPP**) ماده‌ای به شکل مایع به رنگ قهوه‌ای متمایل به قرمز و کاتیونی است که در کانادا ساخته شد [۹]. خصوصیات فیزیکی این ماده در جدول ۱ می‌آید. گفتنی است مادهٔ مذکور از لحاظ زیست‌محیطی تأیید می‌شود [۹].

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی مادهٔ RPP

خصوصیت	PH	Gs	انحلال‌پذیری
مقدار	<۲	۱٫۱۳۶	٪۱۰۰

مادهٔ CBRPLUS

CBRPLUS مایعی به رنگ قهوه‌ای تیره مایل به قرمز و بدون بو و مزه است که از مواد نفتی چسبناک ساخته می‌شود. بنابراین چسبندگی آن بالاست. این ماده را محققان امریکای شمالی به بازار عرضه کردند [۱۰]. ارزیابی زیست‌محیطی این محصول در دانشگاه بریتیش کلمبیا انجام شد. از خصوصیات محیطی این ماده می‌توان به حل‌شدن در آب بدون باقی‌گذاشتن ذرات جامد، آب‌دوست‌بودن، سمّی‌نبودن، خورنده‌نبودن، اشتعال‌پذیرنبودن، آلوده‌نکردن آب، و عمر مفید نامحدود اشاره کرد. اشعهٔ ماوراء بنفش نیز تأثیری بر این ماده نمی‌گذارد [۱۰]. خصوصیات فیزیکی این ماده در جدول ۲ می‌آید.

جدول ۲. خصوصیات فیزیکی مادهٔ CBRPLUS

خصوصیت	PH	Gs	انحلال‌پذیری
مقدار	۳٫۱	۱٫۰۵	٪۱۰۰

روش

در این پژوهش برای تعیین حد روانی از دستگاه نفوذ مخروط مطابق استاندارد BS و برای تعیین حد خمیری از استانداردASTM D4318 استفاده شد. دامنهٔ خمیری بر اساس اختلاف حد روانی و حد خمیری به دست آمد. آزمایش‌های حدود آتربرگ (حد روانی و حد خمیری) مطابق استاندارد بر نمونهٔ خاک شاهد و نمونه‌های تیمارشده با درصد پیشنهادی سازندهٔ مادهٔ CBRPLUS (۰٫۰۰۹۶ درصد) و چهار درصد بالاتر از میزان پیشنهادی (۰٫۰۳، ۰٫۰۵، ۰٫۰۷، و ۰٫۰۹ درصد) و نمونه‌های تیمارشده با درصد پیشنهادی سازندهٔ مادهٔ RPP (۰٫۰۱۹ درصد) و دو درصد بالاتر از میزان پیشنهادی (۰٫۰۳، ۰٫۰۶ درصد) انجام شد.

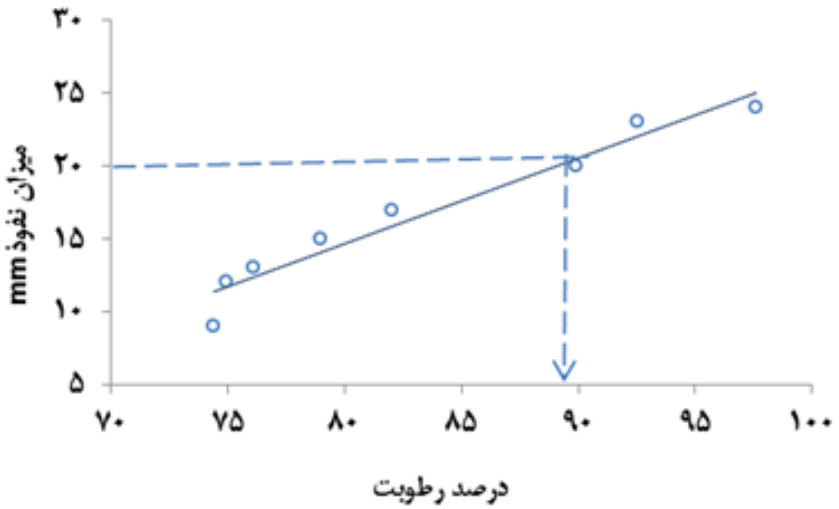
به منظور بررسی تأثیر زمان بر عملکرد مادهٔ CBRPLUS و RPP در بازه‌های زمانی مختلف (یک، هفت، و چهارده روزه) آزمایش حدود آتربرگ انجام شد. برای این کار نمونه‌های تیمارشده با ۰٫۰۵ درصد مادهٔ CBRPLUS و ۰٫۰۳ درصد مادهٔ RPP ساخته و به مدت هفت و چهارده روز در شرایط نگهداری مرطوب (داخل کیسه‌های پلاستیکی سربسته) در دمای آزمایشگاه نگهداری شد. سپس، آزمایش حدود آتربرگ روی نمونه‌ها انجام شد. همچنین، آزمایش تراکم مطابق استاندارد ASTM-D689 بر نمونهٔ خاک شاهد و نمونه‌های تیمارشده با درصدهای مختلف مادهٔ CBRPLUS (۰٫۰۰۹۶، ۰٫۰۳، ۰٫۰۵، ۰٫۰۷، و ۰٫۰۹ درصد) و نمونه‌های تیمارشده با درصدهای مختلف مادهٔ RPP (۰٫۰۱۹، ۰٫۰۳، ۰٫۰۶ درصد) انجام شد.

یافته‌ها و بحث

خاک استفاده‌شده در این پژوهش، طبق سیستم یونیفاید، رس با پلاستیسیتهٔ بالا (CH) بود. منحنی

حاصل از آزمایش حد روانی بر خاک استفاده‌شده در شکل ۱ و خصوصیات فیزیکی خاک در جدول ۳ می‌آید.

نتایج آزمایش حدود آتربرگ بر نمونهٔ خاک شاهد و نمونه‌های تیمارشده با درصدهای مختلف مادهٔ CBRPLUS (۰/۰۰۹۶، ۰/۰۳، ۰/۰۵، ۰/۰۷، و ۰/۰۹ درصد) در جدول ۴ می‌آید.



شکل ۱. منحنی آزمایش حد روانی با استفاده از مخروط نفوذ

جدول ۳. خصوصیات فیزیکی خاک

حد روانی (٪) LL	حد خمیری (٪)PL	شاخص خمیری (٪) PI	چگالی ذرات Gs
۸۹٫۱۶	۳۵	۵۱٫۱۶	۲٫۸۵

جدول ۴. نتایج آزمایش حدود آتربرگ با مادهٔ CBRPLUS

CBRPLUS (%)	LL (%)	PL (%)	PI (%)
۰	۸۹٫۱۶	۳۵	۵۴٫۱۶
۰٫۰۰۹۶	۸۶٫۲۴	۳۴٫۶۷	۵۱٫۵۶
۰٫۰۳	۸۴٫۰۲	۳۴٫۱۴	۴۹٫۸۸
۰٫۰۵	۸۳٫۹۱	۳۴٫۴	۴۹٫۵۱
۰٫۰۷	۷۶٫۱۳	۳۳٫۶۵	۴۲٫۴۸
۰٫۰۹	۶۹٫۵	۳۲٫۵۶	۳۶٫۵۶

همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد، با افزایش میزان مادهٔ استفاده‌شده حد خمیری و حد روانی و شاخص خمیری خاک با شدت بیشتری کاهش پیدا می‌کند. نتایج تأثیر زمان بر حدود آتربرگ و شاخص خمیری نیز در جدول ۵ می‌آید.

نتایج تأثیر زمان بر حدود آتربرگ و شاخص خمیری نشان داد تغییرات از یک روز به هفت روز نسبتاً کند و روند از هفت تا چهارده روز کمی تندتر می‌شود. جدول ۶ تأثیر مادهٔ RPP را نشان می‌دهد.

نتایج نشان می‌دهد هم‌گام با افزایش میزان مادهٔ استفاده‌شده خصوصیات خمیری خاک کاهش می‌یابد. تأثیر زمان بر تأثیر مادهٔ RPP در جدول ۷ می‌آید.

جدول ۵. تأثیر زمان بر حدود آتربرگ خاک تیمارشده با ۰٫۰۵ درصد مادهٔ CBRPLUS

CBRPLUS ٪۰٫۰۵	۱ روزه	۷ روزه	۱۴ روزه
LL (%)	۸۳٫۹۱	۸۳٫۴۸	۷۷٫۴۴
PL (%)	۳۴٫۴	۳۴٫۷۲	۳۳٫۱۳
PI (%)	۴۹٫۵۱	۴۸٫۷۶	۴۴٫۳۱

جدول ۶. نتایج آزمایش حدود آتربرگ با مادهٔ RPP

RPP (%)	LL (%)	PL (%)	PI (%)
۰٫۰۱۹	۸۴٫۷۶	۳۳٫۹	۵۰٫۸۶
۰٫۰۳	۸۲٫۲۷	۳۳٫۲	۴۹٫۰۷
۰٫۰۶	۷۶٫۴۳	۳۲	۴۴٫۴۳

جدول ۷. تأثیر زمان بر حدود آتربرگ خاک تیمارشده با ۰٫۰۵ درصد مادهٔ RPP

RPP ٪۰٫۰۳	۱ روزه	۷ روزه	۱۴ روزه
LL (%)	۸۲٫۲۷	۸۱٫۱۱	۷۹٫۳۸
PL (%)	۳۸٫۵۸	۳۸	۳۶٫۶۸
PI (%)	۴۳٫۶۹	۴۳٫۱۱	۴۲٫۷

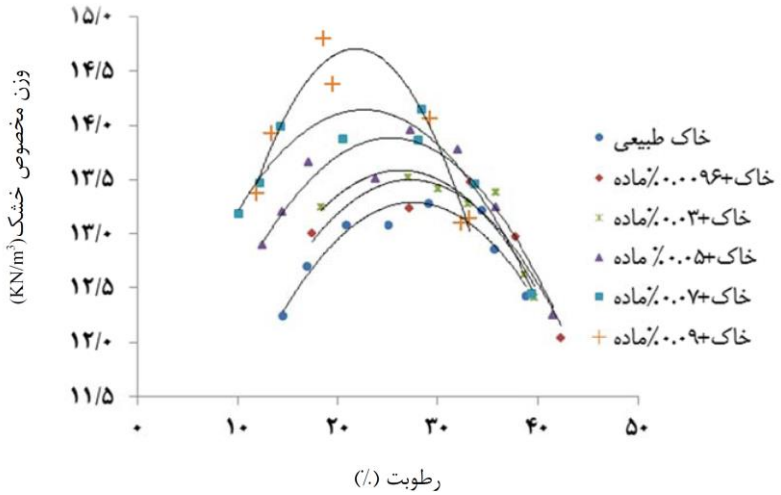
هر چه میزان رس خاک بیشتر باشد خصوصیت جذب آن بیشتر است. بنابراین حد روانی آن بیشتر می‌شود و به تبع آن دامنهٔ خمیری افزایش می‌یابد. معمولاً روش مناسب مطالعهٔ خواص خمیری خاک‌ها بررسی توأم حد روانی و دامنهٔ خمیری خاک است. خصوصیات خمیری نیز به دو عامل میزان و نوع رس موجود در خاک بستگی دارد [۱۳]. هرچه درصد ریزدانهٔ مصالح بیشتر باشد تأثیر افزایش دامنهٔ خمیری بر کاهش مقاومت برشی مصالح بیشتر می‌شود [۱۴]. کاهش خواص خمیری در خاک‌های با قابلیت جانشینی بالا بیش از آن‌هایی است که قابلیت جانشینی پایینی دارند؛ مثلاً خواص خمیری برای مونت‌مریلونیت بیش از کائولینیت است [۱۳]. کانی‌های تشکیل‌دهندهٔ خاک آزمایش‌شده با توجه به حد روانی آن (LL=۸۹٫۱۶) احتمالاً از نوع ایلیت و مونت‌مریلونیت است [۱۵]. بنابراین، شدت کاهش خواص خمیری در خاک یادشده بالاست.

با توجه به نتایج جدول‌های ۴ و ۶، افزودن مادهٔ CBRPLUS و RPP باعث کاهش حد روانی و خمیری و در نهایت کاهش شاخص خمیری خاک می‌شود که با نتایج برخی پژوهش‌ها [۸، ۱۰، ۱۶، ۱۷] همخوانی دارد. افزودن ۰٫۰۰۹۶ درصد مادهٔ CBRPLUS (درصد پیشنهادی سازنده) باعث کاهش ۳٫۲۷ درصد حد روانی، ۰٫۹۴ درصد حد خمیری، و ۴٫۸ درصد شاخص خمیری خاک می‌شود. با توجه به نتایج، با افزایش درصد مادهٔ افزودنی CBRPLUS در چهار درصد کاربردی بیشتر از درصد پیشنهادشده، حد روانی، حد خمیری، و شاخص خمیری کاهش بیشتری می‌یابند؛ به طوری که افزودن ۰٫۰۹ درصد مادهٔ CBRPLUS باعث کاهش ۲۲٫۰۵ درصد حد روانی، ۶٫۹۷ درصد حد خمیری، و ۳۲٫۴۹ درصد شاخص خمیری خاک می‌شود. به طور کلی، با افزودن درصدهای مختلف (۰٫۰۰۹۶، ۰٫۰۳، ۰٫۰۵، ۰٫۰۷، و ۰٫۰۹ درصد) مادهٔ CBRPLUS به خاک حد روانی بین ۳٫۲۷ تا ۲۲٫۰۵ درصد، حد خمیری بین ۰٫۹۴ تا ۶٫۹۷ درصد، و شاخص خمیری بین ۴٫۸ تا ۳۲٫۴۹ درصد کاهش پیدا می‌کند. همین‌طور افزودن ۰٫۰۱۹ درصد مادهٔ RPP (درصد پیشنهادی سازنده)، باعث کاهش ۴٫۹۳ درصد حد روانی، ۳٫۱۴ درصد حد خمیری، و ۱۳٫۲۲ درصد شاخص خمیری خاک می‌شود. همان‌طور که در جدول ۶ مشاهده می‌شود، با افزایش میزان مادهٔ RPP در دو درصد کاربردی بیشتر از ۰٫۰۱۹ درصد حد روانی، حد خمیری، و شاخص خمیری خاک با شدت بیشتری کاهش می‌یابد؛ به طوری که با افزودن درصدهای مختلف (۰٫۰۱۹، ۰٫۰۳، ۰٫۰۶ درصد) مادهٔ RPP به خاک حد روانی بین ۴٫۹۳ تا ۱۴٫۲۷ درصد، حد خمیری بین ۳٫۱۴ تا ۸٫۵۷ درصد، و شاخص خمیری بین ۱۳٫۲۲ تا ۲۴٫۰۳ درصد کاهش پیدا می‌کند. نتایج نشان می‌دهد مادهٔ RPP به میزان بسیار ناچیز در بهبود خصوصیات فیزیکی خاک تأثیری بهتر از مادهٔ CBRPLUS دارد. همچنین، گفتنی است در هیچ حالتی با افزودن درصدهای مختلف مواد تثبیت‌کننده مقدار حد روانی به کمتر از ۵۰ درصد نرسید. در نتیجه در کلاسهٔ خاک تغییری ایجاد نشد. واکنش‌های تبادل یونی بزرگ‌ترین عامل در کاهش خصوصیات خمیری خاک‌های ریزدانه است و شدت این کاهش بستگی به شدت واکنش‌ها دارد. کاهش خصوصیات خمیری در خاک تیمارشده به علت این است که تثبیت‌کننده به منزلهٔ کاتالیزور به فرایند هوازدگی کانی‌های خاص رسی

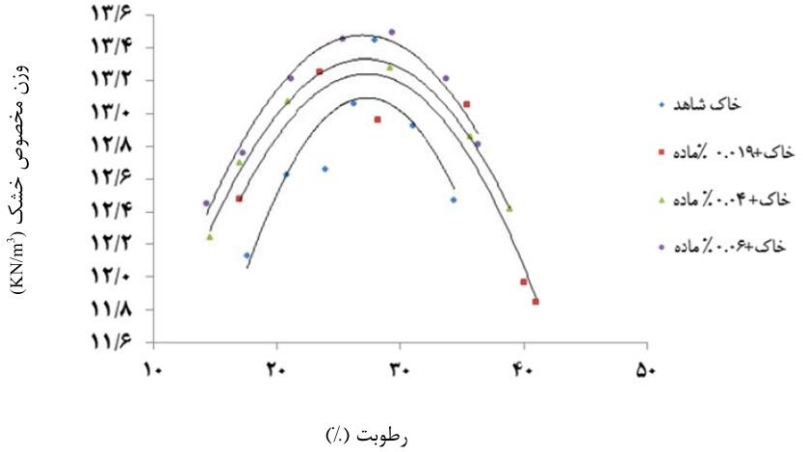
شتاب می‌دهد و تمرکز آب منفذی را به هم می‌زند. در نتیجه، واکنش‌های یونی صورت‌گرفته باعث تجمع و یکپارچگی کانی‌های رسی می‌شود. همان‌گونه که جاذبهٔ قوی‌تری بین کانی‌های رسی ایجاد می‌شود کاتیون‌های آزادشده از الکترولیت یونی آب منفذی به دلیل اختلاف والانس کاتیونی ایجادشده باعث فروپاشی کانی‌های رسی و تبدیل آن‌ها به اشکال پایدارتر می‌شود. در این فرایند لایهٔ دوگانهٔ آب نیز از هر طرف زهکشی می‌شود [۱۶].

همان‌طور که جدول‌های ۵ و ۷ نشان می‌دهند، گذشت زمان تأثیر چندانی بر حدود آتربرگ ندارد. یعنی با گذشت زمان عمل‌آوری حدود آتربرگ تغییر زیادی نمی‌کند و زمان عمل‌آوری از لحاظ فنی معنادار نیست.

نتایج آزمایش تراکم بر نمونهٔ خاک شاهد و نمونه‌های تیمارشده با درصدهای مختلف مادهٔ CBRPLUS (۰٫۰۰۹۶، ۰٫۰۳، ۰٫۰۵، ۰٫۰۷، و ۰٫۰۹ درصد) در شکل ۲ می‌آید. همچنین، شکل ۳ نتایج آزمایش تراکم را بر نمونهٔ خاک شاهد و نمونه‌های تیمارشده با درصدهای مختلف مادهٔ RPP نشان می‌دهد.



شکل ۲. منحنی آزمایش تراکم نمونهٔ خاک شاهد و درصدهای مختلف مادهٔ CBRPLUS



شکل ۳. منحنی آزمایش تراکم نمونهٔ خاک شاهد و درصدهای مختلف مادهٔ RPP

نتایج آزمایش تراکم نشان داد افزودن درصدهای مختلف مادهٔ CBRPLUS به خاک باعث افزایش حداکثر دانسیتهٔ خشک خاک بین ۱٫۵۸ تا ۹٫۸۵ درصد و کاهش رطوبت بهینه بین ۳٫۵۷ تا ۲۳٫۲۱ درصد و افزودن مادهٔ RPP به خاک باعث افزایش حداکثر دانسیتهٔ خشک خاک بین ۰٫۷۵ تا ۱٫۵۸ درصد و ثابت‌ماندن میزان رطوبت بهینهٔ خاک می‌شود.

با توجه به نتایج آزمایش تراکم، همان‌طور که اشاره شد، افزودن مادهٔ CBRPLUS و RPP به خاک سبب افزایش وزن واحد حجم خشک می‌شود که با نتایج برخی پژوهش‌ها [۱۰، ۱۶، ۱۷] همخوانی دارد. افزایش دانسیتهٔ خاک با افزودن مادهٔ CBRPLUS و RPP به این دلیل است که این مواد شرایط شیمیایی آب منفذی را تغییر می‌دهند، از ضخامت لایهٔ مضاعف می کاهند، و نیروی جاذبه را در محیط خاک بالا می‌برند. در نتیجه، ذرات خاک را به هم متصل می‌کنند و سبب افزایش وزن مخصوص خاک می‌شوند. افزایش وزن مخصوص خاک نیز با افزایش میزان مقاومت خاک رابطه دارد. همچنین مادهٔ CBRPLUS باعث چسباندن ذرات بسیار ریز به یک‌دیگر و تشکیل ذرات درشت‌تر و کاهش سطح ویژهٔ ذرات رس و کاهش رطوبت بهینهٔ خاک می‌شود.

نتیجه‌گیری

به طور کلی، افزودن مواد پلیمری CBRPLUS و RPP به خاک موجب کاهش خصوصیات خمیری خاک می‌شود. علت این وضعیت کاهش میل جذب آب توسط دانه‌های رس پس از واکنش‌های تبادل یونی است. بر اساس آزمایش‌های انجام‌شده، با وجود اینکه مواد افزودنی باعث کاهش خصوصیات خمیری خاک شد، نتایج در حد انتظار نبود. با گذشت زمان عمل‌آوری حدود آتربرگ تغییر زیادی نمی‌کند و گذشت زمان تأثیر چندانی بر حدود آتربرگ ندارد. آزمایش تراکم نشان داد با افزودن مادهٔ CBRPLUS و RPP به خاک منحنی تراکم به سمت بالا حرکت می‌کند که به دلیل کاهش ضخامت لایهٔ مضاعف و افزایش نیروی جاذبه و در نهایت افزایش وزن مخصوص خاک است. همچنین، با افزایش درصد مادهٔ افزودنی به خاک تغییرات با شدت بیشتری اتفاق می‌افتد. به طور کلی، می‌توان گفت این مواد باعث بهبود خصوصیات نمونهٔ خاک جنگلی مورد آزمایش می‌شوند؛ ولی برای نتیجه‌گیری کلی‌تر پیشنهاد می‌شود تأثیر این مواد بر خاک جنگلی با تحلیل‌های اقتصادی سنجیده و کاربرد این مواد از لحاظ اقتصادی بررسی شود.

References

[1]. Santoni, R. L., Tingle, J. S., and Webster, S. L. (2003). Stabilization of Silty Sand with Non-traditional Additives. Transportation Research Record 1787.*TRB.* National Research Council. Washington. DC, pp. 33-41.

[2]. Sherwood, P. T. (1993). *Soil Stabilisation With Cement and Lime*, HMSO. London .UK

[3]. Zhang, J. R. and Cao, X. (2002). Stabilization of Expansive Soil by Lime and Fly Ash. Journal of Wuhan University of Technology Materials, 17(4): 73-77.

[4]. Bell, F. G. (1996). Lime stabilization of clay mineral and soils, Engineering Geology, 42 (4): 223-237.

[5]. Primusz, P., Peterfalvi, J., Koaztka, M., and Marko, G. (2009). Bearing capacity of lime-stabilized soils. Forest constructions in the country and their recreational use. In: Proceedings of the international scientific conference. 1. vyd. Zvolen: Katedra lesníckych stavieb a melioracií, Zvolene, pp. 96-101.

[6]. Miller, G. and Azad, S. (2000). Influence of soil type on stabilization with cement kiln dust. Construction and Building Materials, 14(2): 89-97.

[7]. Tolleson, R., Shatnawi, M., Harman, E., and Mahdavian, E. (2003). An Evaluation of Strength Change on Subgrade Soils Stabilized With an Enzyme Catayst Solution Using CBR and SSG comparisons Final Report to University Transportation Center Grant R-02-UTC-ULTERPAVE-GEO-01.

[8]. Rauch, L. E. and Ligestrand, H. M. (2005). An Analysis of Mechanisms and Efficasy of Three Liquid Chemical Soil Stabilizers, *FHWA/TX-03*.

[9]. Hu, W. J., Shang, Q. S., Liu, S. T., Zhao, Z. Z., Fan, Z. J., Gao, X. C., Chang, Y., Zhang, Y., and Ou, Q. C. (2007). The Application Technology of Roadpacker Solidified Limestone Soil. In: Proceedings of the The 1th International Conference on Transportation Engineering. July 22-24, Chengdu. China, pp. 692-697.

[10]. Abadjieva, T. (2006). Chemical Stabilization For Low Cost Road in Botswana. 409-414.

[11]. Shirsavkar, S. S. and Koranne, S. (2010). Innovation in Road Construction Using Natural Polymer, Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 15: 1614-1624.

[12]. Rauch, A. F., Harmon, J. S., Katz, L. E., and Liljestrand, H. M. (2002). Liquid Soil Stabilizers Measured Effects on Engineering Properties of Clay. In: Proceedings of the 81st Transportation Research Board Annual Meeting, Jan. 13-17, Washington DC., pp: 1-21.

[13]. Inyang, H. I., Bae, S., Mbamalu, G., and Park, S. W. (2007). Aqueous polymer effects on volumetric swelling of Namontrollonite. Journal of Materials in Civil Engineering, 19(1): 84-90.

[14]. Tingle, J. S. and Santoni, R. L. (2003). Stabilization of Clay Soils with Nontraditional Additives. In Transportation Research Record 1819. Transportation Research Board, Washington, DC. pp. 72-84.

[15]. Petry, T. M. and Das, B. (2001). Evaluation of chemical Modifiers/Stabilizers for chemically Active Soils-Clay. Transportation Research Record No.1757. TBR. National Research Council, Jan 15, Washington, DC. pp. 43-49.

[16]. Scholen, D. E. (1995). Stablizer Mechanisms in Nonstandard stabilizers. In: Proceeding of 6th Interational Conference on Low-Volume Roads, National academy Press, June 25-29, Washington, D.C., pp. 252-260.

[17]. Faisal, A. (2012). Stabilization of Residual Soils Using Liquid Chemical. The Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 17: 115-126.