

## کنترل تورم خاک بستر جاده‌های جنگلی با استفاده از مواد

### پلیمری

❖ فاطمه موسوی؛ دانشجوی دکتری مهندسی جنگل، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران  
❖ احسان عبدی\*؛ استادیار، گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران

#### چکیده

با اینکه خاک به‌عنوان مصالح بستر بسیاری از سازه‌ها مطرح است، برخی خاک‌ها مشکلاتی در سازه‌ها از جمله جاده ایجاد می‌کنند. این خاک‌ها با جذب رطوبت متورم شده و با از دست‌دادن آب متقبض می‌شوند. تغییرات رطوبت این خاک‌ها سبب تغییر حجم آن‌ها و در نتیجه اعمال فشار به لایه روسازی و در نهایت تخریب جاده می‌شود. این امر نشان‌دهنده اهمیت بررسی‌های لازم برای به‌کارگیری روش‌هایی به‌منظور کاهش پتانسیل تورمی این‌گونه خاک‌هاست که با وجود اهمیت موضوع، تاکنون مطالعه‌ای در این زمینه در جاده‌های جنگلی صورت نگرفته است. به‌همین دلیل در این پژوهش تأثیر مواد پلیمری بر کنترل تورم خاک به‌عنوان مصالح جاده‌های جنگلی بررسی شد. آزمایش‌های تراکم، تورم و فشار تورمی روی خاک شاهد و نمونه‌های تیمار شده با درصد‌های متفاوت ماده پلیمری RPP (۰/۰۱۹، ۰/۰۴ و ۰/۰۶ درصد) صورت گرفت. به‌منظور انجام آزمایش تورم و فشار تورمی، نمونه‌ها با رطوبت بهینه حاصل از آزمایش تراکم تهیه و به شیوه تراکم استاتیکی متراکم و سپس به دستگاه تحکیم منتقل شدند. با توجه به نتایج تست‌های آزمایشگاهی به‌دست‌آمده از این پژوهش افزودن ماده پلیمری RPP می‌تواند سبب کاهش تورم و فشار تورمی خاک شود؛ به‌طوری‌که با افزایش درصد ماده RPP، پتانسیل تورم و فشار تورمی خاک با شدت بیشتری کاهش می‌یابد. در نتیجه ماده RPP می‌تواند گزینه‌ای برای رفع مشکل تورم‌زایی خاک‌های جنگلی باشد، اما باید بررسی‌های اقتصادی، فنی تکمیلی و مقایسه‌ای در این مورد به‌عمل آید.

واژگان کلیدی: جاده‌های جنگلی، خواص تورمی، دستگاه تحکیم، کنترل تورم، ماده RPP.

## مقدمه

از آنجا که استفاده از خاک به عنوان اصلی ترین مصالح در بسیاری پروژه‌های عمرانی مطرح است، رفتار تورمی برخی خاک‌ها به دلیل مشخصات فنی نامطلوب، مشکلاتی را می‌تواند برای سازه‌ها ایجاد کند [۱]. برخی خاک‌ها در اثر جذب آب، افزایش حجم چشمگیری داشته و با از دست دادن رطوبت از حجمشان کم می‌شود که این‌گونه خاک‌ها، به‌طور معمول از نوع خاک‌های رسی هستند و به خاک‌های قابل تورم موسوم‌اند و برای برخی سازه‌ها از جمله جاده‌های جنگلی ایجاد اشکال می‌کنند. خاک‌های متورم‌شونده به دلیل مشکلات ناشی از تورم به علت جذب آب از گروه خاک‌های مشکل‌آفرین به‌شمار می‌روند [۲]. منشأ اصلی تورم در خاک، واکنش‌های فیزیکی- شیمیایی است و خاک‌های متورم‌شونده، اغلب خاک‌هایی با کانی‌های رسی مانند مونت موریلونیت هستند [۳] که این کانی‌های رسی نسبت به جذب مولکول‌های آب در ساختار شیمیایی آن‌ها حساس‌اند و شرایط لازم برای متورم شدن را دارند [۴]. قدرت تورمی این خاک‌ها به عوامل متعددی از قبیل نوع کانی‌های تشکیل‌دهنده آن‌ها، چگالی و رطوبت اولیه بستگی دارد [۵]. تورم، خاصیت ذاتی ذراتی است که می‌توانند مقدار قابل توجهی آب را در خود ذخیره کنند. این خاک‌ها به دلیل وجود کانی‌های رسی با جذب آب و تبادل یونی متورم شده و این تغییرات حجمی ناشی از تغییر درصد رطوبت خاک، سبب وارد آمدن خسارت به جاده‌های جنگلی می‌شوند که شرایط آب‌وهوایی خاص جنگل نیز این خسارات را تشدید می‌کند. بنابراین تا حد ممکن باید از ساخت و ساز ر روی این خاک‌ها اجتناب شود.

در مواردی که نتوان با تغییر مسیر راه یا تعدیل خاک قابل تورم با مصالح مناسب دیگر از ساختن روسازی بر روی این‌گونه خاک‌ها اجتناب ورزید، باید تدابیری برای کاهش تورم خاک در نظر گرفت. به همین منظور طی دهه‌های اخیر روش‌های مختلفی برای مقابله با تورم توسط پژوهشگران پیشنهاد شده است. برای مثال روشی برای کاهش قابلیت تورم خاک‌ها که در برخی از کشورها مورد استفاده قرار گرفته و نتیجه رضایت‌بخشی داده است، غرقاب کردن خاک قبل از روسازی است [۶]، روش دیگری که به‌تازگی مورد توجه محققان قرار گرفته، تثبیت توسط مواد افزودنی است. در مورد تأثیر مواد افزودنی مختلف بر کنترل تورم خاک پژوهش‌های گسترده‌ای در جهان صورت گرفته است، اما در جاده‌های جنگلی تا کنون تحقیقی در این زمینه صورت نگرفته است. پژوهشگران قبلاً به این نتیجه رسیدند که آهک موجب افزایش رطوبت اپتیمم، حد انقباض و مقاومت خاک خواهد شد و از طرفی کاهش حد روانی، حداکثر چگالی خشک، خواص خمیری خاک و پتانسیل تورم را در پی خواهد داشت. آنان درصد بهینه آهک اضافه‌شده به خاک را بین ۲ تا ۸ درصد گزارش کرده‌اند [۶-۱۰]. پژوهشگران دیگری نیز به این نتیجه رسیدند که افزودن خاکستر بادی به خاک می‌تواند در جهت تثبیت تورم‌زایی آن مؤثر واقع شود [۱۱-۱۴]. تأثیر الیاف پلی پروپیلین بر خصوصیات مهندسی خاک تیمار شده با این الیاف بررسی شده و مشخص شده است که وجود الیاف پلی‌پروپیلین با طول و درصد مشخص سبب افزایش مقاومت و پایداری خاک می‌شود [۱۵]. در طول دو دهه اخیر نیز، در بسیاری از کشورها کاربرد پلیمرها به‌منظور کاهش تورم خاک توسعه پیدا کرده است [۱۶-۲۰].

جاده بخش نم خانه جنگل خیرود دانشگاه تهران بررسی شد.

## مواد و روش‌ها

### مواد

خاک، آب و ماده پلیمری RPP مواد اساسی بودند که برای ساختن مخلوط استفاده شدند. خواص مکانیکی، فیزیکی و شیمیایی این مواد در این قسمت شرح داده شده است.

### خاک

خاک استفاده شده در این پژوهش، نمونه‌ای از خاک حاشیه جاده جنگلی در بخش نم خانه جنگل آموزشی و پژوهشی دانشگاه تهران است. این خاک براساس استاندارد یونیفاید، رس با خاصیت خمیری بالا (CH) است که جزو رایج‌ترین تیپ خاک در جنگل‌هاست. آزمایش دانه‌بندی طبق استاندارد ASTM-D422 انجام پذیرفت که درصد رده شده نمونه خاک از الک نمرة ۲۰۰، حدود ۱۰۰ درصد و درصد ذرات رسی (کوچک‌تر از ۲ میکرون) آن در حدود ۸۵ درصد است. خواص فیزیکی این خاک نیز در جدول ۱ آورده شده است.

### ماده RPP

RPP ماده‌ای کاتیونی، به صورت مایع به رنگ قهوه‌ای متمایل به قرمز و ساخت کشور کانادا است [۲۱]. پیش شرط لازم برای استفاده از ماده شیمیایی RPP وجود رس بیشتر از ۱۵ درصد و بهترین حالت pH که میزان واکنش پذیری رس و تثبیت کننده را نشان می‌دهد، pH کمتر از ۸ است [۲۱]، که خاک مورد استفاده در این پژوهش هر دو شرط لازم را داراست.

پژوهش‌های دیگری درباره کاربرد ماده RPP<sup>۱</sup> روی خاک‌های سولفید آهک انجام گرفت که در آن‌ها آزمایش‌های مختلفی از جمله آزمایش مقاومت فشاری غیرمحصور و برش مستقیم صورت پذیرفت [۲۱] و تأثیرات زیست محیطی این ماده نیز بررسی شد. تحقیقات نشان داد که این ماده سبب افزایش مقاومت نمونه خاک‌های مورد نظر می‌شود و می‌توان به عنوان یک ماده حفاظتی زیست محیطی در لایه زیراساس<sup>۲</sup> شاهراه‌ها یا بزرگراه‌ها و اساس<sup>۳</sup> در جاده‌های درجه دو و درجه سه از آن استفاده کرد [۲۱]. با توجه به اینکه در جاده‌های جنگلی، وسعت مناطق دارای خاک‌های رسی متورم شونده زیاد است، شناسایی این نوع خاک‌ها و مطالعه رفتار آن‌ها و ارائه راه حل‌های مناسب برای کاهش پتانسیل تورم و جلوگیری از بروز خسارت به جاده‌های بنا شده روی آن‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. شایان ذکر است که این پژوهش، اولین بررسی در این زمینه در جاده‌های جنگلی در ایران است که با توجه به ریزدانه بودن و درصد رس زیاد خاک منطقه، آثار مخرب ناشی از تورم در این خاک‌ها مشهود است و به کارگیری روش‌هایی به منظور بهبود خواص تورمی خاک‌ها ضرورت پیدا می‌کند. با توجه به مطالب ذکر شده هدف پژوهش حاضر بررسی قابلیت ماده پلیمری RPP به عنوان نسل جدیدی از تثبیت کننده در کنترل تورم خاک جاده جنگلی است. به این منظور با اجرای عملیات آزمایشگاهی متعدد روی نمونه‌های تهیه شده از اختلاط خاک و درصد‌های مختلف ماده پلیمری RPP، اثر کنترل تورمی ماده مذکور در مسیر

1. Road Packer Plus
2. Sub base
3. Base

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی خاک مورد استفاده

حد روانی	حد خمیری	شاخص خمیری	حد انقباض	چگالی ذرات ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )	pH
٪۸۹/۱۶	٪۳۵	٪۵۴/۱۶	٪۱۹	۲/۸۵	۷/۴

عمل تراکم، پس از استخراج رینگ میانی قالب تراکم، وزن واحد حجم خشک آن تعیین شد و در صورت مغایرت با وزن واحد حجم خشک انتخابی روی منحنی تراکم، سعی مجدد با نیروی متفاوت صورت گرفت تا در پایان نیروی مورد نیاز برای تهیه نمونه‌ها به دست آمد و مطابق با همان نیرو، نمونه‌ها ساخته شد. برای متراکم کردن نمونه‌ها از قالب ساخته شده برای این آزمایش استفاده شد.

برای تعیین پتانسیل تغییر حجم، نمونه‌های متراکم شده به دستگاه‌های تحکیم منتقل شدند. به منظور جای گذاری نمونه‌ها در دستگاه تحکیم، ابتدا سنگ متخلخل زیری و رینگ حاوی نمونه به ترتیب در دستگاه قرار گرفتند، سپس درپوش بیرونی روی رینگ نمونه قرار داده شد و توسط سه پیچ در جای خود تثبیت شد. پس از آن سنگ متخلخل بالایی و صفحه بارگذاری روی نمونه قرار داده شدند و گیج روی صفحه بارگذاری مستقر شده و عدد آن روی صفر تنظیم شد. شایان ذکر است که پیش از این مرحله، سنگ‌های متخلخل بالایی و پایینی برای رسیدن به حالت اشباع در آب قرار داده شده بودند. به منظور تعیین پتانسیل تورم پذیری همزمان با ریختن آب در محفظه دستگاه در فواصل زمانی مشخص تغییر شکل محوری آن توسط گیج ثبت شد. پس از رسیدن نمونه‌ها به حداکثر تورم و ثابت شدن عدد گیج تغییر شکل، فشار تورمی نمونه‌ها تعیین شد.

### آزمایش تراکم (ASTM-D698)

آزمایش تراکم براساس استاندارد بر روی نمونه خاک طبیعی و نمونه‌های اختلاط یافته با درصد پیشنهادی سازنده ماده RPP (۰/۱۹ درصد) و درصد‌های دیگر (۰/۰۴ و ۰/۰۶ درصد) انجام گرفت.

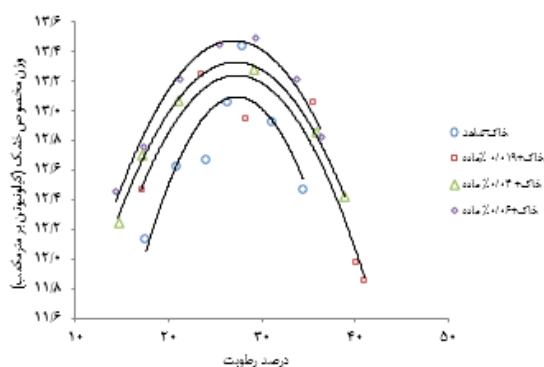
### آزمایش تورم و فشار تورمی

(ASTM-D4546)

#### تهیه نمونه‌ها

این آزمایش روی نمونه‌های تهیه شده به روش تراکم استاتیکی که دارای  $\omega_{opt}$  و  $\gamma_{dmax}$  بودند، بر روی خاک طبیعی و نمونه‌های تیمار شده با درصد‌های مختلف ماده RPP (۰/۱۹، ۰/۰۴ و ۰/۰۶ درصد) صورت گرفت. برای این کار نمونه‌ها با رطوبت مورد نظر آماده و نمونه‌های خاک به شیوه تراکم استاتیکی متراکم شد. به این ترتیب که وزن خاک به سه قسمت تقسیم و هر قسمت تحت نیروی مشخصی با سرعت بارگذاری ۱/۵ میلی متر در دقیقه با استفاده از دستگاه تک محوری متراکم شد. مقدار نیرویی که برای متراکم ساختن نمونه‌ها برای رسیدن به وزن واحد حجم خشک انتخابی روی منحنی تراکم استاندارد لازم بود، به شیوه سعی و خطا به دست آمد؛ به این ترتیب که مخلوطی از خاک با شرایط رطوبتی مورد نظر در سه لایه تحت یک نیروی خاص متراکم شد و در پایان

این دلیل است که ماده مذکور شرایط شیمیایی آب منفذی را تغییر می‌دهد و ضخامت لایه مضاعف را کاهش و نیروی جاذبه را در محیط خاک افزایش می‌دهد؛ در نتیجه این ماده ذرات خاک را به هم متصل می‌کند و سبب افزایش وزن مخصوص خاک می‌شود.



شکل ۱. منحنی تراکم نمونه خاک شاهد و نمونه‌های تیمار شده

نتایج آزمایش‌های تورم آزاد بر روی نمونه خاک شاهد و نمونه خاک تیمار شده با درصد‌های متفاوت ماده RPP نشان داد که افزودن ماده RPP سبب کاهش پتانسیل تورمی خاک می‌شود (شکل ۲). همان‌گونه که در شکل ۲ ملاحظه می‌شود، قدرت تورمی خاک شاهد برابر ۲۲/۷ درصد و برای خاک تیمار شده با ۰/۱۹ درصد برابر با ۲۰/۲ درصد است که نشان‌دهنده ۱۲/۳۷ درصد کاهش پتانسیل تورمی خاک بعد از افزودن ماده RPP، طبق نرخ پیشنهادی سازنده است. افزودن ۰/۰۴ درصد ماده RPP سبب ۳۳/۰۳ درصد کاهش و افزودن ۰/۰۶ درصد ماده، سبب کاهش ۵۱/۳۲ درصد پتانسیل تورمی خاک می‌شود. مهم‌ترین عوامل مؤثر در تورم‌پذیری خاک‌ها، معمولاً اندکس خمیری (IP)، مقدار و نوع کانی‌های موجود در خاک و نوع کاتیون‌های جذب‌شده در

فشار تورمی خاک مقدار نیرویی است که به‌منظور به صفر رساندن تغییر شکل ناشی از تورم یک خاک متورم‌شونده لازم است. به‌منظور اندازه‌گیری این فشار، سربار لازم برای رساندن ارتفاع نمونه به مقدار اولیه از طریق قرار دادن وزنه‌هایی بر اهرم دستگه تحکیم اندازه‌گیری شد و با توجه با سطح مقطع نمونه خاک، مقدار فشار تورم مطابق رابطه ۱ به‌دست آمد [۲۲].

$$S_p = \frac{F}{A} \quad (1)$$

که در رابطه بالا  $S_p$  فشار تورمی و  $F$  میزان نیروی مورد نیاز جهت رساندن ارتفاع نمونه به مقدار اولیه و  $A$  سطح مقطع نمونه است.

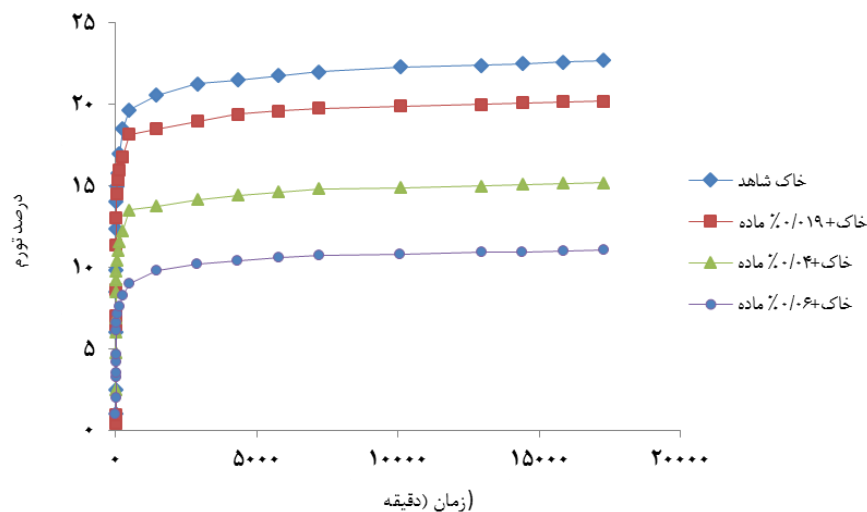
## نتایج و بحث

نتایج آزمایش‌های تراکم نشان داد که با افزودن ماده تثبیت‌کننده یونی RPP به خاک میزان حداکثر چگالی خشک افزایش می‌یابد و میزان رطوبت بهینه خاک تغییری نمی‌کند (شکل ۱)، که با نتایج موجود در منابع علمی [۲۰، ۱۸] همخوانی دارد. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، حداکثر چگالی خشک خاک برای خاک شاهد برابر با ۱۳/۱ کیلوگرم بر متر مکعب و مقادیر حداکثر چگالی خشک با افزودن ۰/۱۹ درصد، ۰/۰۴ درصد و ۰/۰۶ درصد ماده RPP به‌ترتیب ۱۳/۲۲، ۱۳/۳۵ و ۱۳/۴۵ کیلوگرم بر متر مکعب است که نشان می‌دهد افزودن ۰/۱۹ درصد ماده RPP (نرخ پیشنهادی سازنده) سبب افزایش ۰/۹۱ درصد، افزودن ۰/۰۴ درصد ماده سبب افزایش ۱/۹ درصد و افزودن ۰/۰۶ درصد ماده سبب افزایش ۲/۶۷ درصد حداکثر چگالی خشک خاک می‌شود. افزایش چگالی خاک با افزودن ماده RPP به

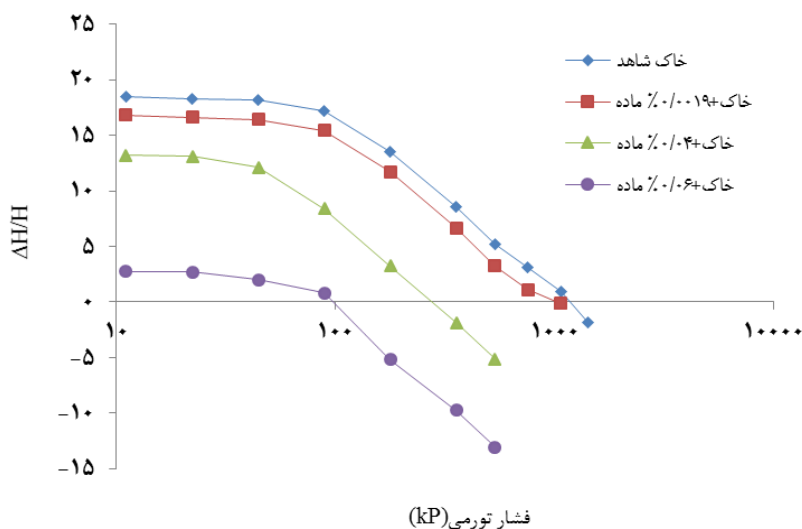
سطح ذرات است [۲۲]. همان‌طور که گفته شد منشأ تورم به مقدار و نوع کانی‌های موجود در خاک بستگی دارد. در میان کانی‌های رسی، مونت‌موریلونیت، ایلیت و کائولینیت به ترتیب دارای سطح ویژه و پتانسیل تورم‌پذیری زیاد به کم هستند [۱۶]. خاک مورد استفاده، مطابق طبقه‌بندی یونیفاید از نوع CH (رس با پلاستیسیته بالا) است و کانی‌های تشکیل‌دهنده آن با توجه به حد روانی ( $LL=89/16$ ) احتمالاً از نوع مونت‌موریلونیت و ایلیت است. از طرفی دیگر شاخص خمیری بسیار زیاد همراه با حد روانی بالا نشان‌دهنده آن است که خاک بر اثر تبخیر آب، به شدت منقبض می‌شود و کاهش حجم پیدا می‌کند و به‌هنگام جذب آب به شدت متورم می‌شود و می‌تواند فشار زیادی تولید کند [۶]، بنابراین خاک مورد نظر دارای سطح ویژه و پتانسیل تورم‌پذیری زیادی است.

آب جذبی یا مضاعف عمده‌ترین عامل تورم یا انقباض است، به‌خصوص در مورد رس‌ها که قابلیت جذب آب زیادی دارند. این خاصیت بر عملکرد

خاک تأثیر منفی خواهد داشت. از این رو بهترین روش برای از بین بردن اثر نامطلوب تورم، کاهش ضخامت این لایه آب از طریق جانشینی یونی است [۱۷]. ماده RPP به علت دارا بودن خاصیت یونی خود موجب کاهش ضخامت لایه آب جذبی می‌شود. با افزودن این ماده به خاک، همزمان هر کاتیون دیگری مانند آب به‌سادگی از ذرات خاک جدا شده و محل‌های خالی توسط این ماده اشغال می‌شود که به موازنه بارهای منفی خاک رس با یون‌های مثبت RPP می‌انجامد. در طی این فرایند یون‌های مثبت، جاذب-های آب را از بین می‌برند و خاک رس در برابر آب نسبتاً بی‌اثر و آبگریز می‌شود. این فرایند موجب نزدیک شدن ذرات خاک به هم و کاهش پتانسیل تورم خاک می‌شود که با نتایج [۱۶] مطابقت دارد. همچنین نتایج آزمایش فشار تورمی روی نمونه خاک شاهد و نمونه خاک تیمار شده با درصد‌های مختلف ماده RPP نشان داد که افزودن ماده RPP سبب کاهش فشار تورمی خاک می‌شود (شکل ۳).



شکل ۳. منحنی تورم نمونه خاک شاهد و نمونه‌های خاک تیمار شده



شکل ۳. منحنی فشار تورمی نمونه خاک شاهد و نمونه‌های خاک تیمار شده

کم شود. علت این امر کاهش میل به جذب آب، توسط دانه‌های رس پس از انجام واکنش‌های تبادل یونی و کاهش دامنه خمیری آنهاست. همچنین نتایج آزمایش فشار تورمی نیز نشان می‌دهد که با افزایش میزان اختلاط ماده RPP با خاک مورد آزمایش، از فشار تورمی آن کاسته می‌شود که این موضوع با نتایج آزمایش تورم آزاد مبنی بر کاهش پتانسیل تورم‌پذیری خاک پس از افزودن ماده RPP مطابقت دارد اما پیشنهاد می‌شود برای تعیین سازوکار تثبیت و ارزیابی کارایی این ماده، در شرایط میدانی (واقعی) نیز مطالعات دیگری انجام پذیرد.

### سپاسگزاری

نگارندگان بدین وسیله مراتب سپاس و قدردانی خود را از جناب آقای دکتر قوام‌الدین زاهدی به دلیل در اختیار قرار دادن ماده پلیمری برای اجرای آزمایش‌ها ابراز می‌دارند.

همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، فشار تورمی خاک شاهد برابر ۱۰۲۰ کیلوپاسکال و برای خاک تیمار شده با ۰/۰۱۹ درصد، برابر با ۱۰۰۰ کیلوپاسکال است که نشان‌دهنده ۱/۹۶ درصد کاهش فشار تورمی خاک بعد از افزودن ماده RPP است. افزودن ۰/۰۴ درصد ماده RPP سبب ۷۰/۵۸ درصد و افزودن ۰/۰۶ درصد ماده، سبب ۹۰/۱۹ درصد کاهش فشار تورمی خاک می‌شود.

### نتیجه‌گیری

نتایج آزمایش تراکم نشان داد که با افزودن ماده RPP، منحنی تراکم به سمت بالا حرکت می‌کند، ولی این تغییرات به نسبت کوچک است. همچنین نتایج آزمایش‌های تورم آزاد بر روی نمونه خاک شاهد و نمونه خاک تیمار شده با درصدهای متفاوت ماده RPP نشان داد که افزودن ماده RPP سبب کاهش پتانسیل تورمی خاک می‌شود. اصلاح خاک‌های رسی با این ماده سبب می‌شود که قابلیت تورم این خاک‌ها

## References

- [1]. Nelson, J. D., and Miller, D.J. (1992). *Expansive soils: Problems and practice in foundation and pavement engineering*, Wiley, New York. Ramana, K V. Humid tropical expansive soils of Trinidad. Their geotechnical properties and areal distribution. *Engineering Technology*, 34: 27-44.
- [2]. Chen, F.H., and Ma, G.S., (1987). Swelling and shrinkage behavior of expansive clays. *Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Conference on Expansive Soils*, pp. 127-129.
- [3]. Stoltz, G., Cuisinier, O., and Masrouri, F. (2012). Multi-scale analysis of the swelling and shrinkage of a lime-treated expansive clayey soil. *Applied Clay Science*, 61: 44-51.
- [4]. Dash, S., and Hussain, M. (2012). Lime stabilization of soils: Reappraisal. *Journal of Materials in Civil Engineering (ASCE)*, 24(6): 707-714.
- [5]. Maher, MH., and Gray, DH. (1998). Static response of sand reinforced with randomly distributed fibers. *Journal of Geotechnical Engineering*, 116(11): 1661-1677.
- [6]. Guney, Y., Sari D, Cetin. M., and Tuncan, M. (2007). Impact of cyclic wetting-drying on swelling behavior of lime-stabilized soil. *Journal of Building and Environment*, 42: 681-688.
- [7]. Bell, F.G. (1996). Lime stabilization of clay minerals and soils. *Engineering Geology*, 42: 223-237.
- [8]. Sirivitmaitrie, C., Puppala, A., Chikyala, V., Saride, S., and Hoyos, L. (2008). Combined lime and cement treatment of expansive soils with low to medium soluble sulfate levels. *The Geo Congress: Geosustainability and Geohazard Mitigation, Louisiana*, 646-653, USA.
- [9]. 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. Proceedings of the international scientific conference*. 1. vyd. Zvolen: Katedra lesníckych stavieb a meliorácií, Zvolene, 96-101.
- [10]. Thyagaraj, T., Rao, S.M., Suresh, P.S., and Salini, U. (2012). Laboratory studies on stabilization of an expansive soil by lime precipitation technique. *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering*, 24(8): 1067-1075.
- [11]. Turner, J.P. (1997). Evaluation of western coal fly ashes for stabilization of low-volume roads. *Proceedings of the Symposium on Testing Soil Mixed with Waste or Recycled Materials, LA. USA*, 157-171.
- [12]. Koliass, S., Kasselouri-Rigopoulou, V., and Karahalios, A. (2005). Stabilization of clayey soils with high calcium fly ash and cement. *Cement and Concrete Composites*, 27: 301-313.
- [13]. Seze, A., Inan, G., Yilmaz, HR., and Ramyar, K. (2006). Utilization of a very high lime fly ash for improvement of Izmir clay. *Bulding and Environment*, 41: 150-155.
- [14]. Senol A., Edil, TB., Bin-Shafique, MS., Acosta, HA., and Benson, CH. (2006). Soft subgrades' stabilization by using various fly ashes. *Resources Conservation and Recycling*, 46: 365-376.
- [15]. Jiang, H., Cai, Y., and Liu, J. (2010). Engineering properties of soils reinforced by short discrete polypropylene fiber. *Journal of Materials in Civil Engineering (ASCE)*, 22(12): 1315-1322.
- [16]. Inyang, H., Bae, S., Mbamalu, G., and Park, S. (2007). Aqueous polymer effects on volumetric swelling of Na-Montmorillonite. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19(1): 84-90.
- [17]. Shirsavkar, SS., and Koranne, S. (2010). Innovation in road construction using natural polymer. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 15: 1614-1624.



- [18]. Vyas, S., Phougat, N., Sharma, P., and Ratnam, M. (2011) .Stabilization of dispersive soil by blending polymers. *International Journal of Earth Sciences and Engineering*, 4(6): 42-54.
- [19]. Faisal, A., (2012). Stabilization of residual soil using liquid chemical. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 17: 115-126.
- [20]. Brandon, TL., Brown, JJ., Daniels, W L., DeFazio, T L., Filz, G M., Mitchell, JK., Musselman, J., and Forsha, C. (2009). Rapid stabilization/polymerization of wet clay soils: literature review. Defense Technical Information Center, Virginia.
- [21]. Hu, WJ., Shang, QS., Liu, ST., Zhao, ZZ., Fan, ZJ., Gao, XC., Chang, Y., Zhang, Y., and Ou., QC. (2007). The application technology of road packer solidified limestone soil. *Proceedings of the 1<sup>th</sup> International Conference on Transportation Engineering*. Chengdu, China, 692-697.
- [22]. ASTM (1992). In: *Annual Book of ASTM Standards*, 04.08, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA.

