مجلهٔ جنگل ایران، انجمن جنگلبانی ایران
سال هجدهم، شمارهٔ ۲، تابستان ۱۴۰۵
ص ۲۳۳-۲۱۹
مقاله پژوهشی

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22034/ijf.2026.550275.2077
CC BY 4.0

بهسازی خاک رس با خمیرایی زیاد توسط افزودنی‌های زیستی به‌منظور تثبیت زیرسازی جاده‌های جنگلی

آیدین پارساخو[1*] و سید عطاالله حسینی[2]

[1]دانشیار گروه جنگلداری دانشکدهٔ علوم جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان
[2]استاد گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکدهٔ منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۱۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۳)

چکیده

مقدمه: بهبود خواص مکانیکی خاک فرایندی اجتناب‌ناپذیر قبل از ساخت‌وساز در خاک‌های ناپایدار بوده و در این راستا انتخاب مواد سازگار با محیط زیست برای بهسازی خاک، راهکاری ضروری برای توسعهٔ پایدار به‌ویژه در پروژه‌های عمرانی عرصه‌های منابع طبیعی است.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش پس از طبقه‌بندی صحرایی خاک مسیر عبور جاده‌های پیشنهادی سری دو طرح جنگلداری دکتر بهرام‌نیا، سه نمونهٔ ۱۶۰ کیلوگرمی خاک رسی با خمیرایی زیاد (CH) به‌عنوان یکی از مشکل‌سازترین خاک‌ها در سه نقطه به روش تصادفی منظم و در فواصل ۲۵۰ متری از عمق ۵۰-۱۰ سانتی‌متر بستر جمع‌آوری شد (در مجموع ۴۸۰ کیلوگرم). سپس سه نوع پلیمر زیستی شامل صمغ زانتان، صمغ گوار و بتاگلوکان هر یک با درصدهای وزنی ۰، ۰/۱، ۰/۲، ۰/۴ و ۰/۶ به خاک‌های CH افزوده شد. اختلاط نمونه‌ها با پلیمرهای زیستی به‌کمک دستگاه همزن صنعتی انجام گرفت. تأثیر این پلیمرهای زیستی بلافاصله پس از اختلاط (زمان صفر) و بعد از گذشت ۲۸ روز زمان عمل‌آوری بر حدود آتربرگ خاک (حد خمیری و روانی)، تراکم پراکتور یا حداکثر وزن مخصوص خشک خاک (MDD) و ظرفیت باربری (CBR) اندازه‌گیری شد. آزمایش حد روانی توسط دستگاه کاساگرانده، آزمایش حد خمیری از طریق آزمایش فتیله کردن و آزمایش ظرفیت باربری توسط دستگاه CBR در آزمایشگاه مکانیک خاک انجام پذیرفت. تجزیه‌وتحلیل‌های آماری در قالب طرح فاکتوریل با سه عامل اصلی شامل نوع پلیمر زیستی، مقدار پلیمر زیستی و زمان عمل‌آوری بر متغیرهای وابسته در نرم‌افزار SPSS بررسی شد.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که با افزایش غلظت تیمارها، مقدار شاخص خمیری به‌طور معنی‌داری کاهش پیدا کرد. در مورد زانتان بیشترین کاهش در زمان عمل‌آوری ۲۸ روز (۲۲ درصد کاهش) و با افزودن ۰/۴ درصد زانتان به خاک CH مشاهده شد. در مورد بتاگلوکان بیشترین کاهش شاخص خمیری با افزودن ۰/۶ بتاگلوکان و پس از ۲۸ روز حاصل شد (۲۱/۳ درصد کاهش). در تیمار گوار نیز روند کاهشی شاخص خمیری همگام با افزایش غلظت تیمارها به ثبت رسید. نتایج تجزیهٔ واریانس نشان داد که نوع پلیمرهای زیستی، غلظت پلیمرهای زیستی و زمان عمل‌آوری بر حداکثر تراکم خشک خاک تأثیر معنی‌داری داشت. بیشترین افزایش MDD (۲۸/۴ درصد افزایش) و CBR (۱۱۲/۱ درصد افزایش) در زمان عمل‌آوری ۲۸ روز و با افزودن ۰/۴ درصد زانتان به خاک CH مشاهده شد. بدین ترتیب می‌توان دریافت که زانتان ۰/۴ درصد مناسب‌ترین تیمار به‌منظور تقویت خاک CH بستر پروژه‌های عمرانی در اکوسیستم جنگل است.

نتیجه‌گیری: زانتان یکی از بیوپلیمرهای مؤثر به‌منظور تقویت خاک CH بستر پروژه‌های عمرانی در اکوسیستم جنگل است. این بیوپلیمر فضاهای خالی موجود در خاک را پر می‌کند و با ذرات ریز رس نیز پیوند برقرار می‌کند و در نتیجه چگالی خشک خاک را افزایش می‌دهد. بدین ترتیب می‌توان از این پلیمر زیستی به مقدار بهینه و با توجه به ملاحظات اقتصادی برای تثبیت لکه‌ای بستر ناپایدار جاده‌های جنگلی بهره جست.

واژه‌های کلیدی: پلیمرهای زیستی، حداکثر تراکم خشک، زمان عمل‌آوری، شاخص خمیری، ظرفیت باربری خاک.

*نویسندهٔ مسئول
شمارهٔ تماس: ۰۱۷۳۲۴۲۷۱۷۶
ایمیل: Parsakhoo@gau.ac.ir

مقدمه

خاک‌های مشکل‌ساز در پروژه‌های عمرانی جنگل به‌ویژه جاده‌سازی شامل خاک‌های ریزدانه، خاک‌های منبسط‌شونده، خاک‌های فروریزشی و خاک‌های نرم و شل هستند. ویژگی‌های نامطلوب این خاک‌ها اغلب نشأت‌گرفته از مقادیر زیاد لای و رس است (Chen et al., 2013; Latifi et al., 2017; wiszniewski et al., 2017; Hataf et al., 2018; Toufigh & Kianfar., 2019). رایج‌ترین رویکردها برای بهبود کیفیت خاک نامطلوب را می‌توان به چهار گروه اصلی تثبیت مکانیکی، تثبیت حرارتی، تثبیت بیولوژیک و تثبیت شیمیایی تقسیم کرد که از میان آنها اولویت با راه حل‌های سازگار با محیط زیست برای تثبیت خاک است. ما در دنیایی زندگی می‌کنیم که به‌سرعت در حال توسعه است، جایی که تخریب محیط زیست مدام در حال رشد است و نیاز به یافتن راه حل‌های سازگار با محیط زیست در هر نوع صنعتی با تقاضای زیاد همراه است. در طی سال‌ها، پلیمرهای زیستی پتانسیل زیادی برای تثبیت خاک نشان داده‌اند (Mohammed & Abbas, 2020)؛ اما به‌دلیل درک نشدن تعامل بیوپلیمر- خاک-آب، راه خود را در زمینهٔ مهندسی عمران در جنگل پیدا نکرده‌اند (Kumar et al., 2021; Soldo, 2020).

Karimi (1998) نفوذپذیری و استحکام خاک سیلتی تیمارشده با پلیمرهای زیستی را در جاده‌های جنگلی ایالت متحده آمریکا بررسی کرد. تحقیقات وی نشان داد که پلیمرهای زیستی می‌توانند نفوذپذیری خاک را برای مدت طولانی کاهش و مقاومت سه‌محوری خاک را افزایش دهند. پلیمرهای زیستی مانند صمغ گوار، صمغ زانتان، کیتوزان و بتاگلوکان می‌توانند به‌طور چشمگیری خواص مهندسی خاک را بهبود بخشند. Chang & Cho (2012) نشان دادند که بتاگلوکان می‌تواند تراکم‌پذیری خاک و همچنین شاخص خمیری و ظرفیت باربری کالیفرنیا را افزایش دهد. بتاگلوکان می‌تواند حد روانی، شاخص خمیری و شاخص تورم را افزایش دهد. et al. (2017) Ayeldeen به بررسی اثر دو نوع پلیمر زیستی زانتان و گوار بر مقاومت مکانیکی خاک فروریزشی یا رمبنده پرداختند. نتایج نشان داد که گوار با کارایی بهتر نسبت به زانتان سبب افزایش ۳۰ درصدی مقاومت برشی و کاهش ۲۰ درصدی پتانسیل رانش خاک شد. افزون‌بر این، چند محقق دیگر نیز تأیید کردند که صمغ زانتان می‌تواند نفوذپذیری خاک را کاهش دهد. Das & Singh (2020) اثربخشی بیوپلیمر صمغ زانتان را در تثبیت خاک بررسی کردند. بیوپلیمر زانتان به نسبت‌های مختلف مانند ۰، ۰/۲، ۰/۵، ۰/۸ و یک درصد وزن تودهٔ خاک خشک مخلوط شد. سپس ویژگی‌های پلاستیسیته، تراکم، تورم، تراکم‌پذیری، هدایت هیدرولیکی، مقاومت و دوام خاک تیمارشده و تیمارنشده بررسی شد. نتایج نشان داد که افزایش محتوای زانتان تراکم پذیری را اندکی افزایش داد، اما تورم و هدایت هیدرولیکی را کاهش چشمگیری داد. از سوی دیگر، مقاومت فشاری با افزایش محتوای زانتان افزایش یافت. بررسی میکروسکوپی تشکیل پیوند ژل‌مانند را تأیید می‌کند که سبب تغییرات در خاک تیمارشده می‌شود. Ramani & Anandha (2020) به بررسی اثر بتاگلوکان بر مقاومت خاک رس پرداختند. میکروگراف‌های میکروسکوپ الکترونی روبشی تشکیل الیاف سیمانی و هیدروژل‌های جدید در ماتریکس خاک را تأیید می‌کنند که تمایل به جوش دادن ذرات خاک و کاهش فضاهای منفذی دارند. این موضوع سبب افزایش مقاومت خاک می‌شود. همچنین یافته‌ها حاکی از آن است که تراکم‌پذیری خاک با افزایش محتوای بیوپلیمر و دورهٔ عمل‌آوری به‌طور چشمگیری کاهش می‌یابد.

Abdi et al. (2015) گزارش کردند که بافت خاک مسیر جادهٔ فرعی با نام «سه کیلومتر» در سری نم‌خانهٔ جنگل آموزشی- پژوهشی خیرود از نوع ریزدانه با درصد رس و خمیرایی زیاد است (CH)، از این‌رو برای ساخت جاده روی آن باید خواص مکانیکی آن را تغییر داد. به همین منظور در پژوهشی آزمایش تراکم و حدود

آتربرگ بر نمونهٔ خاک شاهد و نمونه‌های تیمارشده با درصدهای مختلف دو نوع مادهٔ پلیمری با نام‌های تجاری CBR PLUS و RPP[1] بررسی شد. همچنین به‌منظور بررسی اثر زمان بر عملکرد این مواد پلیمری، نمونه‌های تیمارشده با ۰/۰۵ درصد نانوپلیمر زیستی CBR PLUSو ۰/۰۳ درصد مادهٔ RPP تهیه و به‌مدت ۷ و ۱۴ روز نگهداری شدند. طبق نتایج، با افزودن درصدهای مختلف مادهٔ CBR PLUS و RPP به خاک حد روانی، حد خمیری و شاخص خمیری کاهش پیدا می‌کند و زمان عمل‌آوری از لحاظ فنی تأثیر چندانی در بهبود خصوصیات پلاستیسیتهٔ خاک ندارد. همچنین افزودن درصدهای مختلف مادهٔ CBR PLUS به خاک سبب افزایش حداکثر دانسیتهٔ خشک خاک و کاهش رطوبت بهینه و افزودن مادهٔ RPP به خاک سبب افزایش حداکثر دانسیتهٔ خشک خاک و ثابت ماندن مقدار رطوبت بهینهٔ خاک می‌شود. به‌طور کلی، با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، افزودن این مواد به خاک سبب بهبود نسبی خصوصیات خاک می‌شود. از این‌رو این مواد هنوز به‌منزلهٔ جایگزین مطمئن روش‌های سنتی، دست‌کم در خاک‌های رسی با حد روانی زیاد مطرح نیستند. همچنین Abdi & Mousavi (2015) نشان دادند که RPP سبب افزایش ظرفیت باربری خاک می‌شود. البته میزان بهبود در خاک منطقه کمتر از مقدار ادعاشده توسط شرکت سازنده است و بنابراین تثبیت خاک مدنظر با نرخ پیشنهادی مادهٔ RPP تأثیر زیادی در بهبود خصوصیات خاک مدنظر ندارد. Mousavi et al. (2023) تأثیر یک تثبیت‌کنندهٔ معمولی (آهک) و یک پلیمر زیستی (نانوآلژینات سدیم) با دوزهای ۳، ۵ و ۷ درصد را بر بهبود ویژگی‌های خاک جنگلی با پلاستیسیتهٔ زیاد مقایسه کردند. نتایج نشان داد که دامنهٔ بهبود CBR برای خاک تثبیت‌شده با نانوآلژینات سدیم و آهک به‌ترتیب ۱۲۲/۹۷- ۲۸/۷۲ درصد و ۴۵/۵۹ -۱۳/۸۳ درصد بود. افزایش زمان عمل‌آوری، خواص مکانیکی خاک جنگل را در نمونه‌های تیمارشده با هر دو تثبیت‌کننده بهبود بخشید، اما نانوآلژینات سدیم در تثبیت خاک عملکرد بهتری داشت.

با توجه به اینکه در پروژه‌های عمرانی جنگل مانند جاده‌سازی، پل‌سازی، لوله‌گذاری و احداث ایستگاه‌های نگهبانی و تحقیقاتی و گردشگری تجربه اندکی در زمینهٔ استفاده از تثبیت‌کننده‌های بیوپلیمری وجود داشته است، بررسی اثر این قبیل افزودنی‌ها بر مقاومت خاک و به‌عبارت دیگر مقاوم‌سازی پی ضروری است تا بتوان کارآمدترین و مقرون‌به‌صرفه‌ترین و در عین‌حال زیست‌سازگارترین افزودنی را مشخص کرد. وجود مقادیر زیاد خاک‌های ریزدانه با خمیرایی زیاد و همچنین رطوبت دائمی جنگل‌های شمال آسیب‌پذیری سازه‌ها را بیشتر می‌کند و در پیش نگرفتن رویکرد مناسب حفاظت و نگهداشت ممکن است تبعات اقتصادی سنگینی برای مدیران بخش جنگل داشته باشد. از این‌رو هدف این پژوهش بررسی تأثیر نوع و مقدار پلیمرهای زیستی صمغ زانتان (پلیمر آنیونی)، صمغ گوار (پلیمر آنیونی/کاتیونی یا خنثی) و بتاگلوکان (پلیمر کاتیونی) بر مقاومت مکانیکی خاک رسی دارای خمیرایی زیاد به‌عنوان یکی از مشکل‌سازترین خاک‌هاست. یکی از دلایل مهم استفاده نکردن از بیوپلیمرها در فعالیت راه‌سازی در جنگل‌های شمال کشور، فقدان آنالیزهای عددی است که پاسخ‌های تنش-کرنش سطح کلان خاک تیمارشده با پلیمرهای زیستی را به تصویر بکشد. در حقیقت به‌جز CBR PLUS، بقیهٔ پلیمرهای استفاده‌شده در جاده‌های جنگلی ایران از نوع بیوپلیمر نیستند و بیشتر آنها محصولات شیمیایی غیرزیستی هستند. آنالیزهای عددی قبلی آغازگر مفیدی برای تجزیه‌وتحلیل عددی خاک تیمارشده با بیوپلیمر بودند، اما هنوز پیشرفت چشمگیری در درک رفتار خاک تیمارشده وجود ندارد. این پژوهش به‌صورت عددی پاسخ خاک تیمارشده با صمغ زانتان، صمغ گوار و بتاگلوکان را بررسی می‌کند. در واقع هدف

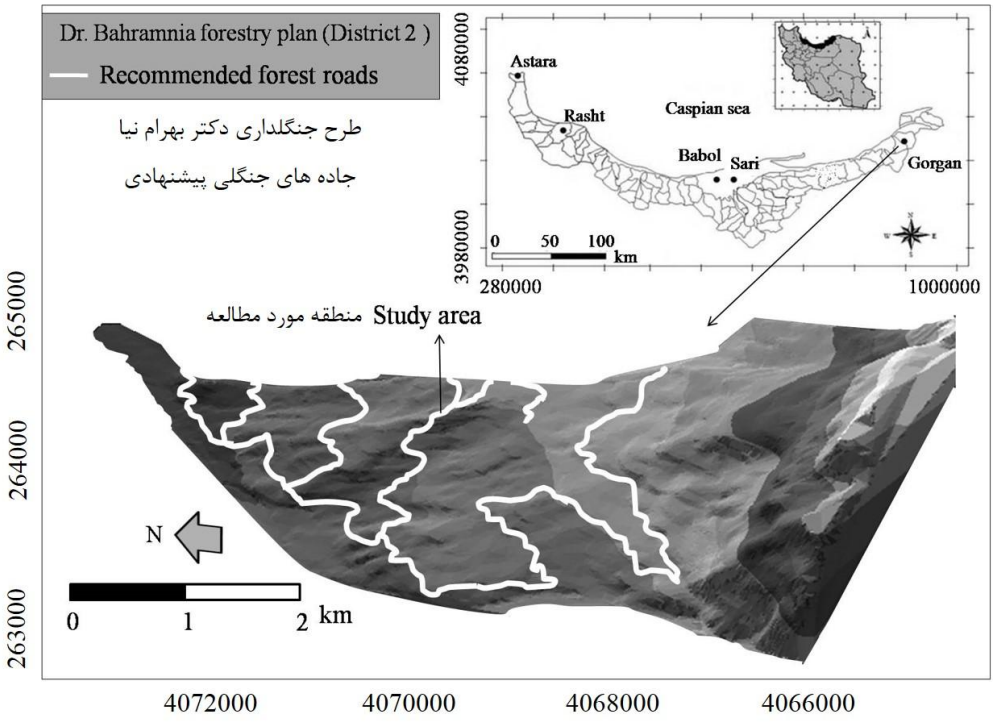
1. Road Packer Plus

پژوهش حاضر، کسب دانش جامع دربارهٔ تئوری‌ها و خواص و رفتار مکانیکی خاک رسی تیمارشده با پلیمرهای زیستی است.

مواد و روش‌ها

منطقه پژوهش

منطقهٔ پژوهش در سری دو طرح جنگلداری دکتر بهرام‌نیا در استان گلستان واقع شده است. این طرح در حوضهٔ آبخیز شمارهٔ ۸۵ تقسیمات حوزه‌ای طرح جامع مقدماتی جنگل‌های شمال کشور و در حوزهٔ مدیریتی ادارهٔ کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان گلستان و در حوزهٔ استحفاظی ادارهٔ منابع طبیعی و آبخیزداری شهرستان گرگان و واحد منابع طبیعی و آبخیزداری نوچمن در فاصلهٔ هشت کیلومتری جنوب غربی شهرستان گرگان واقع شده است. این سری با مساحت ۱۹۹۲ هکتار در استان گلستان، شهر گرگان و در محدودهٔ ″۳۰ ′۴۲ °۳۶ تا ″۳۰ ′۴۳ °۳۶ عرض جغرافیایی شمالی و ″۶ ′۲۱ °۵۴ تا ″۳۰ ′۲۳ °۵۴ طول جغرافیایی شرقی قرار دارد (شکل ۱).



شکل ۱- موقعیت منطقهٔ پژوهش در استان گلستان و ایران

Figure 1. Location of the research area in Golestan province and Iran

تحقیق در محدودهٔ ارتفاعی ۶۵۰-۶۰۰ متری از سطح دریا و در دامنهٔ شمالی تا شمال غربی انجام گرفت. از لحاظ جامعه‌های گیاهی، منطقه از جامعهٔ انجیلی- ممرزستان (*Parrotia-carpinetum*) و جامعهٔ آزاد و بلوط (*Zelkova-quercetum*) و جامعهٔ راش (*Fagetum*) تشکیل شده است. منطقه دارای اقلیم مدیترانه‌ای گرم مرطوب با آب‌وهوای معتدل است. بر اساس اطلاعات به‌دست‌آمده از آمار بارندگی ایستگاه محوطهٔ ادارهٔ کل هواشناسی (واقع در هاشم‌آباد) طی دورهٔ آماری ۱۳۶۵ تا ۱۳۹۴، مقدار بارندگی متوسط سالیانه ۵۶۲/۱ میلی‌متر است که بین ۳۶۲/۴ میلی‌متر تا ۸۵۳/۶ میلی‌متر در سال‌های مختلف تغییر می‌کند. سنگ مادر منطقه نهشته‌های رسوبی لس دوران کواترنری است. بر اساس گمانه‌زنی‌های صورت‌گرفته مشخص شد که خاک منطقه از نوع اوتریک کامبی‌سول با نفوذپذیری ضعیف تا متوسط و ساختمان آن مکعبی

درشت و در عمق توده‌ای است. مقدار آهک فعال موجود در خاک ۱ تا ۳ درصد است. طول کل جاده‌های جنگلی پیشنهادی این سری ۲۸ کیلومتر است که بخش‌هایی از آن در صورت احداث از روی خاک رس با خمیرایی زیاد عبور خواهد کرد (Parsakhoo & Rezaee Motlaq, 2018). شایان ذکر است که در جنگل یادشده هنوز جاده‌ای ساخته نشده است.

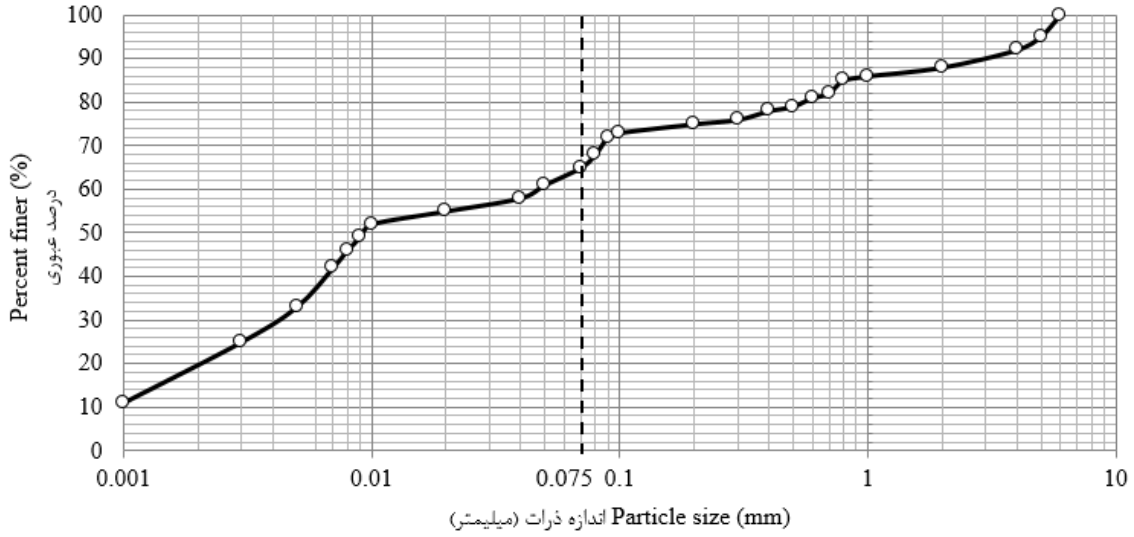
شیوه اجرای پژوهش

پلیمرهای زیستی

در این تحقیق از سه نوع پلیمر زیستی شامل صمغ زانتان، صمغ گوار و بتاگلوکان به‌منظور بهبود مقاومت مکانیکی خاک استفاده شد. صمغ زانتان نوعی پلی‌ساکارید از بیوپلیمر است که از تخمیر یک محیط کربوهیدراتی مانند گلوکز ایجاد می‌شود. صمغ زانتان از روی باکتری القاکنندهٔ فرایند تخمیر *Xanthomonas campestris* نام‌گذاری شده است. این صمغ را می‌توان در آب سرد و گرم حل کرد. محلول‌های حاوی صمغ زانتان به‌شدت شبه‌پلاستیک هستند و زنجیره‌های آن در محدودهٔ وسیعی از مقادیر pH پایدار می‌مانند. بنابراین می‌توان آن را با موفقیت در محصولات پاک‌کننده و همچنین افزودنی‌های غذایی اسیدی اجرا کرد. به غیر از آن می‌توان زانتان را در صنایع آرایشی و بهداشتی، کشاورزی و صنعت حفاری نفت و همچنین عاملی برای بهبود خصوصیات مختلف خاک استفاده کرد (Ayeldeen et al., 2016; Cabalar et al., 2017). صمغ گوار یک پلی‌ساکارید استخراج‌شده از آندوسپرم گیاه *Cyamopsis tetragonoloba* است که به‌طور معمول به‌عنوان لوبیا گوار یا گوار شناخته می‌شود. گوار را می‌توان در هند، پاکستان، سودان و برخی از مناطق ایالات متحده یافت. تجمع صمغ گوار در دانه‌های گیاه گوار وجود دارد. در طی فرایند استخراج، صمغ گوار از بقیه قسمت‌های گیاه جدا، آسیاب و الک شده و برای مقاصد تجاری به‌صورت پودر بسته‌بندی می‌شود. برخلاف بیشتر صمغ‌های گیاهی، صمغ گوار در ساختار مولکولی خود اسید اورونیک ندارد و همچنین وزن مولکولی به‌نسبت زیادی در مقایسه با دیگر پلی‌ساکاریدهای محلول در آب دارد. شایان ذکر است که تشکیلات صمغ گوار در محدودهٔ وسیعی از pH پایدار هستند (Dehghan et al., 2018). بتاگلوکان‌ها گروهی از پلی‌ساکاریدهای بتا-دی-گلوکز (گلوکان‌ها) را تشکیل می‌دهند که به‌طور طبیعی در دیوارهٔ سلولی غلات، باکتری‌ها و قارچ‌ها وجود دارند. این بیوپلیمر برای بهبود مقاومت بستر خاک‌های رسی و به‌عنوان نوعی تثبیت‌کنندهٔ پایدار، بدون کربن و سازگار با محیط زیست استفاده می‌شود (Bacic et al., 2009; Chang & Cho, 2014). بر اساس تعرفهٔ تابستان ۱۴۰۳، قیمت هر کیلو صمغ گوار ۳۲۰۰۰۰ تومان (۵/۳ دلار)، صمغ زانتان ۹۱۰۰۰۰ تومان (۱۵/۲ دلار) و صمغ بتاگلوکان ۵۰۰۰۰۰ تومان (۸/۳ دلار) بود.

طبقه‌بندی و نمونه‌برداری خاک

در این پژوهش پس از طبقه‌بندی صحرایی خاک مسیر عبور جاده‌های پیشنهادی سری دو طرح جنگلداری دکتر بهرام‌نیا و چند بار نمونه‌برداری و آزمایش‌های حدود آتربرگ و اطمینان از وجود خاک رس با خمیرایی زیاد (CH)، نمونه‌های این نوع خاک به‌روش تصادفی منظم در سه نقطه با فواصل ۲۵۰ متر جمع‌آوری شد و سپس نمونه‌ها با یکدیگر مخلوط شدند. منحنی دانه‌بندی خاک رس با خمیرایی زیاد که در منطقهٔ پژوهش مشاهده شد در شکل ۲ ارائه شده است. نمونه‌برداری با ابزار غیرمکانیزه (بیل و کلنگ) از عمق ۵۰-۱۰ سانتی‌متر و پردازش و خرد کردن کلوخه‌ها با پتک انجام گرفت. بعد از سرند کردن خاک با الک نمرهٔ چهار، ۱۶۰ کیلوگرم از هر محل و در مجموع ۴۸۰ کیلوگرم خاک برای اجرای آزمایش‌های مکانیک خاک مهیا شد. برای انجام دادن آزمایش‌های حدود آتربرگ، ۳۰ کیلوگرم از خاک رسی با خمیرایی زیاد CH از الک نمرهٔ ۴۰ عبور داده شد (Keymanesh & Ghareh, 2025; Abdi & Mousavi, 2017).



شکل ۲- منحنی دانه‌بندی خاک رس بررسی‌شده

Figure 2. Soil grain size distribution curve of the studied clay

طرح اختلاط و آزمایش‌های حدود آتربرگ، پراکتور و CBR

سه نوع پلیمر زیستی شامل صمغ زانتان، صمغ گوار و بتاگلوکان هر یک با درصدهای وزنی ۰، ۰/۱، ۰/۲، ۰/۴ و ۰/۶ به‌حالت محلول به خاک CH افزوده شدند. بدین منظور ۱۵ طرح اختلاط هر یک در سه تکرار و در مجموع ۴۵ نمونه هر یک به وزن ۱۰ کیلوگرم آماده شد (وزن کل خاک لازم: ۴۸۰ کیلوگرم). بر اساس درصدهای وزنی یادشده، به‌ترتیب ۱۰، ۲۰، ۴۰ و ۶۰ گرم از پلیمرهای زیستی در آب حل و به نمونه‌ها افزوده شد (مقدار کل پلیمرهای زیستی لازم: ۱۲ کیلوگرم خشک، از هر کدام ۴ کیلوگرم). در مرحلهٔ بعد، تأثیر این پلیمرهای زیستی بلافاصله پس از اجرا (زمان صفر) و بعد از گذشت ۲۸ روز زمان عمل‌آوری بر حدود آتربرگ خاک (حد خمیری و روانی)، تراکم پراکتور و ظرفیت باربری کالیفرنیا (CBR) اندازه‌گیری شد.

آزمایش حدود آتربرگ خاک: برای هر یک از آزمایش‌های حدود آتربرگ سه نمونه از هر تیمار تهیه شد. سپس آزمایش حد روانی توسط دستگاه کاساگرانده و آزمایش حد خمیری از طریق آزمایش فتیله کردن و بر اساس استاندارد ASTM-D423 انجام گرفت (Abdi et al., 2019).

آزمایش ظرفیت باربری کالیفرنیا خاک

پیش‌نیاز آزمایش ظرفیت باربری خاک، اجرای آزمایش تراکم خاک و محاسبهٔ حداکثر وزن مخصوص خشک خاک[1] (MDD) و مقدار رطوبت بهینهٔ خاک[2] (OMC) مدنظر است (Chang & Cho, 2019). آزمایش تراکم بر اساس استاندارد ASTM D1557 انجام گرفت و پس از یافتن حداکثر چگالی خشک و رطوبت بهینه، مقادیر میانگین CBR در حالت خشک و اشباع با استفاده از استاندارد ASTM D1883 اندازه‌گیری شد (شکل ۳). در مورد CBR اشباع آزمایش فقط روی نمونهٔ شاهد و تیمار بهینه انجام پذیرفت (Keymanesh & Ghareh, 2025).

آزمایش‌ها در قالب طرح فاکتوریل با سه عامل اصلی شامل نوع پلیمر زیستی در سه سطح، مقدار پلیمرهای زیستی در پنج سطح و زمان عمل‌آوری در دو سطح و در مجموع ۳۰ تیمار و سه تکرار انجام گرفت. همهٔ تجزیه‌وتحلیل‌ها اعم از آزمون کولموگروف- اسمیرنوف، آنالیز واریانس سه‌عامله (ANOVA) و مقایسهٔ میانگین‌ها با توجه به وجود نمونهٔ شاهد به روش LSD در نرم‌افزار SPSS انجام پذیرفت.

1. Maximum dry density
2. Optimum moisture content



شکل ۳- آزمایش ظرفیت باربری کالیفرنیا (CBR)
Figure 3. California Bearing Ratio Test (CBR)

نتایج

نتایج تجزیهٔ واریانس نشان داد که غلظت پلیمرهای زیستی بر شاخص خمیری خاک تأثیر معنی‌داری داشت ($F=7.3;\ p<0.001$). اما نوع تیمار، زمان عمل‌آوری و اثرهای متقابل بین آنها هیچ اثر معنی‌داری بر مقدار شاخص خمیری خاک نداشت. بر اساس یافته‌ها با افزایش غلظت تیمارها، مقدار شاخص خمیری به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. در مورد زانتان بیشترین کاهش در زمان عمل‌آوری ۲۸ روز (۲۲ درصد کاهش) و با افزودن ۰/۴ درصد زانتان به خاک CH مشاهده شد. در مورد بتاگلوکان بیشترین کاهش شاخص خمیری با افزودن ۰/۶ بتاگلوکان و پس از ۲۸ روز حاصل شد (۲۱/۳ درصد کاهش). در تیمار گوار نیز روند کاهشی شاخص خمیری همگام با افزایش غلظت تیمارها به ثبت رسید. بیشترین کاهش به میزان ۱۶/۳ درصد پس از ۲۸ روز و با افزودن ۰/۶ درصد گوار مشاهده شد. به‌طور کلی در تحقیق حاضر، کمترین مقدار شاخص خمیری خاک به میزان ۲۳/۴ درصد با افزودن ۰/۴ درصد زانتان و بعد از ۲۸ روز به ثبت رسید. استفاده از زانتان با غلظت ۰/۲ و ۰/۴ درصد سبب تغییر طبقهٔ خاک از CH به CL پس از ۲۸ روز شد. این تغییر در طبقهٔ خاک با افزودن ۰/۶ درصد بتاگلوکان و گوار رخ داد(جدول ۱).

آزمایش پراکتور

نتایج تجزیهٔ واریانس نشان داد که نوع پلیمرهای زیستی ($F= 15.65;\ P<0.001$)، غلظت پلیمرهای زیستی ($F= 17.23;\ P<0.001$) و زمان عمل‌آوری ($F= 8.28;\ P<0.01$) بر حداکثر دانسیتهٔ خشک خاک تأثیر معنی‌داری داشت. اما اثرهای متقابل بین تیمارها به‌جز اثر متقابل نوع تیمار در غلظت تیمار ($F= 2.53;\ P<0.05$) بر مقدار حداکثر تراکم خشک خاک معنی‌دار نبود. بر اساس یافته‌ها با افزایش غلظت تیمارها، مقدار حداکثر تراکم خشک خاک به‌طور معنی‌داری افزایش و درصد رطوبت بهینهٔ خاک کاهش پیدا کرد. در مورد زانتان بیشترین افزایش در زمان عمل‌آوری ۲۸ روز (۲۸/۴ درصد افزایش) و با افزودن ۰/۴ درصد زانتان به خاک CH مشاهده شد. در مورد بتاگلوکان بیشترین افزایش حداکثر تراکم خشک خاک با افزودن ۰/۶ بتاگلوکان و پس از ۲۸ روز حاصل شد (۲۴/۱ درصد افزایش). در تیمار گوار نیز روند افزایشی حداکثر تراکم خشک خاک همگام با افزایش غلظت تیمارها به ثبت رسید. بیشترین افزایش به میزان ۱۵/۶ درصد پس از ۲۸ روز و با افزودن ۰/۶ درصد گوار مشاهده شد. در بین کل تیمارها، بیشترین مقدار حداکثر تراکم خشک خاک به مقدار ۱/۸۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب با افزودن ۰/۴ درصد زانتان و بعد از ۲۸ روز به ثبت رسید (جدول ۲).

جدول ۱- حدود آتربرگ نمونه‌های خاک CH تیمارشده با غلظت‌های مختلف پلیمرهای زیستی زانتان، گوار و بتاگلوکان

Table 1. Atterberg limits of CH soil samples treated with different concentrations of xanthan, guar and beta-glucan biopolymers

زمان عمل‌آوری ۲۸ روز Curing time 28 day				زمان عمل‌آوری ۰ روز Curing time 0 day				غلظت Dosage (٪)	بیوپلیمر Biopolymer
درصد تغییر Percentage change	شاخص خمیری plasticity index	حد خمیری (درصد) plastic limit (%)	حد روانی (درصد) Liquid limit (%)	درصد تغییر Percentage change	شاخص خمیری plasticity index	حد خمیری (درصد) plastic limit (%)	حد روانی (درصد) Liquid limit (%)		
0.0	30.0^{c}	28.0	58.0	0.0	30.0^{c}	28.0	58.0	0.0	زانتان Xanthan
-11.7	26.5^{b}	26.5	53.0	-9.0	27.3^{b}	27.7	55.0	0.1	
-21.0	23.7^{a}	24.6	48.3	-12.7	26.2^{bc}	25.8	52.0	0.2	
-22.0	23.4^{a}	23.8	47.2	-16.0	25.2^{a}	25.0	50.2	0.4	
-13.7	25.9^{b}	24.1	50.0	-8.7	27.4^{b}	25.6	53.0	0.6	
0.0	30.0^{c}	28.0	58.0	0.0	30.0^{b}	28.0	58.0	0.0	بتاگلوکان Beta-Glucan
-5.0	28.5^{c}	25.3	53.8	-0.3	29.9^{b}	26.9	56.8	0.1	
-7.0	27.9^{c}	24.1	52.0	-4.3	28.7^{b}	25.7	54.4	0.2	
-14.7	25.6^{b}	23.3	49.0	-12.3	26.3^{a}	24.3	50.6	0.4	
-21.3	23.6^{a}	22.9	46.5	-17.7	24.7^{a}	23.3	48.0	0.6	
0.0	30.0^{b}	28.0	58.0	0.0	30.0^{b}	28.0	58.0	0.0	گوار Guar
-11.0	26.7^{a}	23.4	50.2	-9.7	27.1^{a}	24.6	51.7	0.1	
-13.0	26.1^{a}	23.9	50.0	-10.3	26.9^{a}	24.2	51.1	0.2	
-13.7	25.9^{a}	23.6	49.5	-10.7	26.8^{a}	23.7	50.5	0.4	
-16.3	25.1^{a}	20.1	45.2	-12.7	26.2^{a}	22.3	48.5	0.6	

حروف مختلف در یک ستون نشان‌دهنده وجود تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد است.

Different letters in a column indicate a significant difference at the 5% probability level.

جدول ۲- رطوبت بهینه و حداکثر تراکم خشک نمونه‌های خاک CH تیمارشده با غلظت‌های مختلف انواع بیوپلیمر

Table 2. Optimal moisture content and maximum dry density of CH soil samples treated with different concentrations of biopolymers

زمان عمل‌آوری ۲۸ روز Curing time 28 day			زمان عمل‌آوری ۰ روز Curing time 0 day			غلظت Dosage (٪)	بیوپلیمر Biopolymer
درصد تغییر Percentage change	حداکثر تراکم خشک خاک (g/cm3) maximum dry density (g/cm3)	رطوبت بهینه (٪) Optimal moisture content (%)	درصد تغییر Percentage change	حداکثر تراکم خشک خاک (g/cm3) maximum dry density (g/cm3)	رطوبت بهینه (٪) Optimal moisture content (%)		
0.0	1.41^{d}	27.0	0.0	1.41^{c}	27.0	0	زانتان Xanthan
+19.8	1.69^{c}	28.9	+17.0	1.65^{b}	32.1	0.1	
+24.1	1.75^{b}	27.3	+19.8	1.69^{a}	29.5	0.2	
+28.4	1.81^{a}	25.4	+21.9	1.72^{a}	27.1	0.4	
+19.8	1.69^{c}	24.9	+16.3	1.64^{b}	27.0	0.6	
0.0	1.41^{d}	27.0	0.0	1.41^{d}	27.0	0	بتاگلوکان Beta-Glucan
+6.4	1.50^{c}	28.7	+2.8	1.45^{c}	30.6	0.1	
+7.8	1.52^{c}	26.7	+3.5	1.46^{c}	26.3	0.2	
+19.8	1.69^{b}	22.1	+8.5	1.53^{b}	24.5	0.4	
+24.1	1.75^{a}	19.8	+14.9	1.62^{a}	21.2	0.6	
0.0	1.41^{c}	27.0	0.0	1.41^{b}	27.0	0	گوار Guar
+6.4	1.50^{b}	26.7	+2.1	1.44^{b}	31.1	0.1	
+11.3	1.57^{a}	30.0	+4.2	1.47^{b}	30.0	0.2	
+12.0	1.58^{a}	26.9	+7.1	1.51^{a}	28.5	0.4	
+15.6	1.63^{a}	23.6	+12.8	1.59^{a}	24.2	0.6	

حروف مختلف در یک ستون نشان‌دهنده وجود تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد است.

Different letters in a column indicate a significant difference at the 5% probability level.

آزمایش ظرفیت باربری کالیفرنیا

نتایج تجزیهٔ واریانس نشان داد که نوع پلیمرهای زیستی ($P<0.001$)، غلظت پلیمرهای زیستی ($P<0.001$) و زمان عمل‌آوری ($P<0.01$) بر ظرفیت باربری خاک تأثیر معنی‌داری داشت. اما اثرهای متقابل بین تیمارها به‌جز اثر متقابل نوع تیمار در غلظت تیمار ($P<0.001$) بر مقدار ظرفیت باربری خاک معنی‌دار نبود (جدول ۳). بر اساس یافته‌ها با افزایش غلظت تیمارها، مقدار ظرفیت باربری خاک به‌طور معنی‌داری افزایش پیدا کرد. در مورد زانتان بیشترین افزایش در زمان عمل‌آوری ۲۸ روز (۱۱۲/۱ درصد افزایش) و با افزودن ۰/۴ درصد زانتان به خاک CH مشاهده شد. در مورد بتاگلوکان بیشترین افزایش ظرفیت باربری خاک با افزودن ۰/۶ بتاگلوکان و پس از ۲۸ روز حاصل شد (۷۱/۲ درصد افزایش). در تیمار گوار نیز روند افزایشی ظرفیت باربری خاک همگام با افزایش غلظت تیمارها به ثبت رسید. بیشترین افزایش به میزان ۶۸/۰ درصد پس از ۲۸ روز و با افزودن ۰/۶ درصد گوار مشاهده شد. در بین کل تیمارها، بیشترین مقدار ظرفیت باربری خاک به میزان ۲۶/۷۱ درصد با افزودن ۰/۴ درصد زانتان و بعد از ۲۸ روز به ثبت رسید (جدول ۴).

جدول ۳- تجزیهٔ واریانس اثر نوع، غلظت و زمان عمل‌آوری بر مقدار ظرفیت باربری خاک CH

Table 3. Analysis of variance of the effect of type, concentration and treatment time on the value of soil CH loading capacity

منبع تغییرات Source	درجهٔ آزادی df	مجموع مربعات Sum Squares	میانگین مربعات Mean Square	F	سطح معنی‌داری Sig
مدل تصحیح‌شده Corrected Model	29	1479.93	51.04	51.03	0.000
عرض از مبدأ Intercept	1	26640.05	26640.05	3.66	0.000
زمان عمل‌آوری Curing time	1	12.32	12.32	12.32	0.001
نوع بیوپلیمر Treatment type	2	214.34	107.17	107.17	0.000
غلظت بیوپلیمر Treatment dosage	4	883.35	220.84	220.84	0.000
زمان × غلظت بیوپلیمر Curing time × dosage	4	3.57	0.89	0.89	0.474
زمان × نوع بیوپلیمر Curing time× type	2	0.39	0.19	0.19	0.825
نوع×غلظت‌بیوپلیمر Biopolymer type×dosage	8	365.01	45.63	45.63	0.000
نوع ×غلظت× زمان type×dosage×time	8	0.95	0.12	0.12	0.998
خطا Error	60	60.00	1.000		
کل Total	90	28179.98			
کل تصحیح‌شده Corrected Total	89	1539.93			

جدول ۴- ظرفیت باربری نمونه‌های خاک CH تیمارشده با غلظت‌های مختلف پلیمرهای زیستی زانتان، گوار و بتاگلوکان

Table 4. CBR loading capacity of CH soil samples treated with different concentrations of xanthan, guar and beta-glucan biopolymers

بیوپلیمر Biopolymer	غلظت (٪) Dosage (%)	زمان عمل‌آوری ۰ روز Curing time 0 day	درصد تغییر Percentage change	زمان عمل‌آوری ۲۸ روز Curing time 28 day	درصد تغییر Percentage change
زانتان Xanthan	0.0	12.59^{c}	0.0	12.59^{c}	0.0
	0.1	16.97^{b}	+34.8	17.79^{b}	+41.3
	0.2	22.78^{a}	+80.9	23.65^{a}	+87.8
	0.4	25.07^{a}	+99.1	26.71^{a}	+112.1
	0.6	17.17^{b}	+36.4	18.30^{b}	+45.3
بتاگلوکان Beta-glucan	0.0	12.59^{b}	0.0	12.59^{b}	0.0
	0.1	13.45^{b}	+6.8	14.17^{b}	+12.5
	0.2	15.09^{b}	+19.8	16.16^{b}	+28.3
	0.4	18.60^{a}	+47.7	19.47^{a}	+54.6
	0.6	20.44^{a}	+62.3	21.56^{a}	+71.2
گوار Guar	0.0	12.59^{b}	0.0	12.59^{b}	0.0
	0.1	12.94^{b}	+2.8	13.35^{b}	+6.0
	0.2	14.07^{b}	+11.7	15.09^{b}	+19.8
	0.4	18.04^{a}	+43.3	18.45^{a}	+46.5
	0.6	20.13^{a}	+59.9	21.15^{a}	+68.0

حروف مختلف در یک ستون نشان‌دهندهٔ وجود تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد است.

Different letters in a column indicate a significant difference at the 5% probability level.

جدول ۵- ظرفیت باربری اشباع نمونه‌های خاک CH تیمارشده با غلظت بهینهٔ پلیمر زیستی زانتان
Table 5. Saturated CBR loading capacity of CH soil samples treated with the optimal concentration of xanthan biopolymer

تیمار Treatment	غلظت Dosage (%)	زمان عمل‌آوری ۰ روز Curing time 0 day	درصد تغییر Percentage change
شاهد Control	0	2.85	0.0
زانتان Xthantan	4	8.51	199

ضخامت روسازی جاده‌های جنگلی بر اساس CBR اشباع تعیین می‌شود، از این‌رو اندازه‌گیری CBR اشباع نمونهٔ خاک رسی شاهد و تیمار بهینه که ۹۶ ساعت در آب قرار داشتند انجام گرفت که نتایج آن در جدول ۵ ارائه شده است.

بحث

در تحقیق حاضر بیشترین کاهش شاخص خمیری خاک در زمان عمل‌آوری ۲۸ روز (۲۲ درصد کاهش) و با افزودن ۰/۴ درصد زانتان به خاک CH مشاهده شد. برای خاک‌های غنی از رس، ماهیت آنیونی صمغ زانتان، برهم‌کنش‌های یونی قوی با کانی‌های رسی را تسهیل می‌کند. این سازوکار پیوند یونی به تشکیل یک ماتریس پایدار خاک، افزایش چسبندگی و مقاومت خاک کمک می‌کند (Ni et al., 2022; Weng et al., 2023). استفاده از زانتان با غلظت ۰/۲ و ۰/۴ درصد سبب تغییر طبقهٔ خاک از CH به CL پس از ۲۸ روز شد. این تغییر در طبقهٔ خاک با افزودن ۰/۶ درصد بتاگلوکان و گوار رخ داد. خاک CL، خاکی با شاخص روانی زیر ۵۰ درصد است که از رس غیرآلی با پلاستیسیتهٔ متوسط تشکیل می‌شود. درحالی که خاک CH، خاکی با شاخص روانی بیشتر از ۵۰ درصد به‌همراه رس‌های غیرآلی با پلاستیسیتهٔ زیاد و رس سنگین است (Ta'negonbadi & Noorzad, 2018; Lee et al., 2019). شایان ذکر است که چون استفاده از غلظت صفر هر بیوپلیمر در خاک به‌معنای عدم تیمار خاک (شاهد) است، تنها سه تکرار شاهد برای هر سه بیوپلیمر لحاظ و میانگین نتایج در جدول وارد شد. صمغ زانتان حتی در مقدار کم نیز ویسکوزیتهٔ زیادی دارد که ممکن است بر رفتار خاک تحت شرایط تنش مختلف تأثیر زیادی بگذارد. این بیوپلیمر فضاهای خالی موجود در خاک را پر می‌کند و همچنین با ذرات ریز رس پیوند برقرار می‌کند و در نتیجه چگالی خشک خاک را افزایش می‌دهد. زانتان پلی‌ساکارید آنیونی با زنجیره‌های جانبی متعدد، پیوندهای هیدروژنی و یونی با ذرات خاک و یون‌های محلول تشکیل می‌دهد (Berkane et al., 2022). نتایج تحقیقات Abbasi et al. (2025) نیز بهبود چشمگیری را در خواص خاک تیمارشده با زانتان نشان دادند، به‌طوری که تنها ۰/۲۵ درصد صمغ زانتان پس از یک دوره عمل‌آوری هفت‌روزه سبب افزایش چشمگیر مقاومت خاک شد. با این‌حال، افزایش بیشتر غلظت صمغ زانتان سبب کاهش بازده در افزایش مقاومت شد. افزایش زمان عمل‌آوری از ۷ به ۲۸ روز، مقاومت فشاری و سختی را بهبود بخشید. در تحقیق حاضر مقادیر بیشتر زانتان سبب کاهش حداکثر تراکم خشک خاک شد. Dehghan et al. (2018) نیز با بررسی تأثیر صمغ گوار و صمغ زانتان بر خاک رس با خمیرایی زیاد نشان دادند که افزایش محتوای بیوپلیمر سبب کاهش حداکثر چگالی خشک و افزایش محتوای آب بهینه می‌شود. آنها گزارش دادند که افزایش محتوای بیوپلیمر سبب جذب بیشتر آب توسط مونومرهای اضافی شده و برهمکنش ذرات مهار می‌شود. بنابراین افزایش تخلخل خاک، چگالی خشک خاک را کاهش می‌دهد. این موضوع در مورد آهک نیز مشاهده شد. بنابراین درصد بهینه‌ای از افزودنی‌ها وجود دارد که در آن چگالی خشک خاک بیشینه می‌شود و در صورت افزودن بیش از درصد وزنی بهینه، به‌دلیل اشباع شدن مخلوط از آهک، پلیمر زیستی یا هر افزودنی دیگر و همچنین متوقف شدن واکنش پوزولانی به‌علت تمام شدن

واکنش‌دهنده‌ها در طول واکنش، مقدار چگالی خشک خاک کاهش می‌یابد (Mahbubi Motlagh & Mahboubi Ardakani, 2018). در مورد بتاگلوکان بیشترین افزایش حداکثر تراکم خشک خاک با افزودن ۰/۶ بتاگلوکان و پس از ۲۸ روز حاصل شد (۲۴/۱ درصد افزایش). این موضوع با یافته‌های Chang & Cho (2012) مطابقت داشت. آنها دریافتند که ۰/۵ درصد بتاگلوکان می‌تواند با افزایش چسبندگی بین ذرات خاک، مقاومت خاک سیلتی را تا ۴۳۱۰ کیلو پاسکال بهبود بخشد (Chang & Cho, 2012). بتاگلوکان هموپلی‌ساکاریدهای خطی با مقاومت کششی خوب و قدرت اتصال و جذب بالا هستند. نکتهٔ مهم در مورد بتاگلوکان این است که این پلیمر بلافاصله ژل تولید نمی‌کند. بلکه با گذشت روز، محلول بیوپلیمر به یک ماتریس چسبناک جامد تبدیل می‌شود و با افزایش تعداد روزها، ارتفاع ماتریس پلیمری افزایش می‌یابد.

با افزایش غلظت تیمارها، مقدار ظرفیت باربری خاک به‌طور معنی‌داری افزایش پیدا کرد. در بین کل تیمارها، بیشترین مقدار ظرفیت باربری خاک به میزان ۲۶/۷۱ درصد با افزودن ۰/۴ درصد زانتان و بعد از ۲۸ روز به ثبت رسید. صمغ زانتان با آب سرد اضافه‌شده در طول آزمایش واکنش داده و محلولی چسبناک تشکیل می‌دهد. بارهای منفی که در سطح وسیعی از صمغ زانتان پخش می‌شوند، امکان برهمکنش قوی بین XG و ذرات خاک را فراهم می‌کنند و تحت اعمال انرژی تراکمی به ماده‌ای سفت تبدیل می‌شوند و در نتیجه مقدار CBR را بهبود می‌بخشند (Barani & Barfar, 2021; Weng et al., 2021). ضخامت روسازی جاده‌های جنگلی بر اساس CBR اشباع تعیین می‌شود، از این‌رو اندازه‌گیری CBR اشباع نمونهٔ خاک رسی شاهد و تیمار بهینه که ۹۶ ساعت در آب قرار داشتند انجام گرفت که نتایج آن در جدول ۵ ارائه شده است. با توجه به یافته‌های Heinimann (2021) ضخامت لایهٔ اساس جاده متأثر از مقدار CBR اشباع خاک است. بر اساس یافته‌های هاینیمن، ضخامت شن و ماسهٔ رودخانه‌ای در لایهٔ اساس جاده با CBR بستر ۲/۸۵ درصد باید حدود ۶۰ سانتی‌متر و ضخامت سنگ‌شکسته‌های خوب‌دانه‌بندی‌شده باید حدود ۳۰ سانتی‌متر باشد. با استفاده از تیمار پلیمر زیستی بهینه (زانتان ۰/۴ درصد) می‌توان ضخامت لایهٔ اساس را هنگام استفاده از شن و ماسهٔ رودخانه‌ای به ۳۵ سانتی‌متر و در صورت استفاده از سنگ‌شکسته‌های خوب‌دانه‌بندی‌شده به حدود ۲۰ سانتی‌متر کاهش داد که این موضوع سبب کاهش هزینه‌های جاده‌سازی خواهد شد.

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، چند آزمایش برای تعیین ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک رس تیمارشده با صمغ گوار و صمغ زانتان و بتاگلوکان انجام گرفت. اثرهای هر سه بیوپلیمر به‌صورت جداگانه بررسی شده است. بر اساس یافته‌ها، خواص مقاومتی خاک تثبیت‌شده با بیوپلیمرها به نوع و مقدار بیوپلیمر و زمان عمل‌آوری وابسته است. صمغ زانتان تأثیر به‌نسبت بهتری در افزایش خواص ژئوتکنیک خاک دارد. بیشترین کاهش شاخص خمیری (۲۲ درصد کاهش)، بیشترین افزایش MDD (۲۸/۴ درصد افزایش) و CBR (۱۱۲/۱ درصد افزایش) در زمان عمل‌آوری ۲۸ روز و با افزودن ۰/۴ درصد زانتان به خاک CH مشاهده شد. افزودن این پایدارکننده در دوز بیشتر، بازده را کاهش می‌دهد و اجرا را سخت‌تر می‌کند. افزودن پلیمرهای زیستی به خاک رس سبب پر شدن منافذ و تشکیل پیوند بین رس و بیوپلیمر و در نتیجه بهبود عملکرد خاک می‌شود. بدین ترتیب می‌توان دریافت که زانتان ۰/۴ درصد یکی از بیوپلیمرهای اقتصادی مؤثر به‌منظور تقویت خاک CH بستر پروژه‌های عمرانی در اکوسیستم جنگل است. در پایان پیشنهاد می‌شود که در تحقیقات آتی اثر بقیهٔ بیوپلیمرها مانند آگار، ژلان، کیتوزان و غیره نیز به‌صورت جدا یا در ترکیب با هم بر خواص مکانیکی انواع خاک‌های ریزدانه بررسی شود.

تشکر و قدردانی

این پژوهش در قالب طرح پژوهشی که توسط بنیاد ملی علم ایران (صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور) به شمارهٔ ۴۰۳۴۰۲۳ تأمین اعتبار شده انجام گرفته است که بدین وسیله نگارندگان مراتب سپاس و قدردانی خود را ابراز می‌دارند.

References

Abbasi, F., Janalizadeh Choobbasti, A., & Roushan, K. (2025). Advanced stabilization of clayey sand using xanthan gum: insights from multiscale evaluation and ultrasonic pulse velocity analysis. *Results in Engineering, 25*(1)*,* 104-111. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104419.

Abdi, E., Mousavi, F., Raisi Estabrog, A., & Majnoonian, B. (2015). Comparison of the effect of polymeric materials on the physical properties of forest road soil. *Forest and Wood Products, Journal of Natural Resources of Iran, 68*(2), 395-404. https://doi.org/10.22059/jfwp.2015.54840. (In persian)

Abdi, E., & Mousavi, F. (2017). Evaluation of mechanical properties and strength of river and mine aggregate for pavement and maintenance of forest roads. *Iranian journal of Forest*, 9(1), 15-27. https://www.ijf-isaforestry.ir/article_47045_dc0f604bed9e7fe164e5568aa0ebf53e.pdf?lang=en. (In persian)

Abdi, E., Salimizand, M., & Mousavi, F. (2019). The impact of different methods of Atterberg limits determination on the resulted Unified soil classification. *Iranian journal of Forest, 10*(4), 403-413. https://www.ijf-isaforestry.ir/article_84405_69b49af57c97ca00be0d542e5105b51a.pdf?lang=en. (In persian)

Anandha, K.S., & Ramani, S.E. (2020). Performance evaluation of β-glucan treated lean clay and efficacy of its choice as a sustainable alternative for ground improvement. *Journal of Geomechanics and Engineering, 21*(5), 413-422. https://doi.org/10.12989/gae.2020.21.5.413

Ayeldeen, M., Negm, A., El-Sawwaf, M., & Kitazume, M. (2017). Enhancing mechanical behaviors of collapsible soil using two biopolymers. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 9* (2),329-339. https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2016.11.007.

Ayeldeen, M.K., Negm, A.M., & El Sawwaf, M.A. (2016). Evaluating the physical characteristics of biopolymer/soil mixtures. *Arabian Journal of Geosciences, 9*(5), 371- 384. https://doi.org/10.1007/s12517-016-2366-1.

Bacic, A., Fincher, G.B., & Stone, B.A. (2009). Chemistry, Biochemistry, and Biology of 1-3 Beta Glucans and Related Polysaccharides. Orlando: Academic Press. ISBN: 978-0-12-373971-1, 250 p. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-373971-1.X0001-5

Barani, O.R., & Barfar, P. (2021). Effect of xanthan gum biopolymer on fracture properties of clay. J. Mater. *Journal of Materials in Civil Engineering, 33*(1), 12-20. https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003526

Berkane, H.A., Della, N., Benziane, M.M., Denine, S., Elroul, A.B., & Feknous, H. (2022). Laboratory investigation on the effect of a combination of xanthan gum and clay on the behavior of sandy soil. *Journal of Innovative Infrastructure Solutions, 7*(4), 269-276. https://doi.org/10.1007/s41062-022-00867-z.

Cabalar, A.F., Wiszniewski, M., & Skutnik, Z. (2017). Effects of Xanthan Gum Biopolymer on the Permeability, Odometer, Unconfined Compressive and Triaxial Shear Behavior of a Sand. *Soil Mechanics and Foundation Engineering, 54*(6), 356–361. https://doi.org/10.1007/s11204-017-9481-1.

Chang, I., & Cho, G. (2012). Strengthening of Korean residual soil with β-1,3/1,6-glucan biopolymer. *Journal of Construction and Building Materials, 30*(1), 30–35. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.11.030.

Chang, I., & Cho, G.C. (2014). Geotechnical behavior of a beta-1,3/1,6-glucan biopolymer-treated residual soil. *Journal of Geomechanics and Engineering, 7*(6), 633-647. https://doi.org/10.12989/gae.2014.7.6.633.

Chang, G., & Cho, C. (2019). Shear strength behavior and parameters of microbial gellan gum-treated soils: from sand to clay. *Journal of Acta Geotechnica, 14*(2), 361-375. https://doi.org/10.1007/s11440-018-0641-x.

Chen, R., Zhang, L., & Budhu, M. (2013). Biopolymer Stabilization of Mine Tailings. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental, 139*(10), 1802–1807. https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000902.

Dehghan, H., Tabarsa, A., Latifi, N., & Bagheri, Y. (2018). Use of xanthan and guar gums in soil strengthening. *Journal of Clean Technologies and Environmental Policy, 21*(2), 155–165. https://doi.org/10.1007/s10098-018-1625-0.

Hataf, N., Ghadir, P., & Ranjbar, N. (2018). Investigation of soil stabilization using chitosan biopolymer.
Journal of Cleaner Production,170(1), 1493–1500. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.256.

Heinimann, H. (2021). Pavement engineering for forest roads: development and opportunities. *Croatian Journal of Forest Engineering, 42*(1), 91-106. https://doi.org/10.5552/crojfe.2021.860

Karimi, S. (1998). A study of geotechnical applications of biopolymer treated soils with an emphasis on silt. University of Southern California, 62p.

https://www.proquest.com/openview/b3dc6a201e505990ff9939d2c6525ec5/1?pq-origsite=gscholar&cbl=18750&diss=y

Keymanesh, M.R., & Ghareh, S. (2025). Soil Mechanics. *Noavar Publications, 2*, 344p. ISSN: 9786001683404. (In persian)

Kumar, S.A., Sujatha, E.R., Pugazhendi, A., & Jamal, M.T. (2021) Guar gum-stabilized soil: a clean, sustainable and economic alternative liner material for landfills. *Journal of Clean Technol Environ Policy, 25*(2), 323-341. https://doi.org/10.1007/s10098-021-02032-z.

Latifi, N., Horpibulsuk, S., Meehan, C.L., Abd Majid, M.Z., Tahir, M.M., & Mohamad, E.T. (2017). Improvement of Problematic Soils with Biopolymer—An Environmentally Friendly Soil Stabilizer. *Journal of Materials in Civil Engineering, 29*(2), 162-178. https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001706.

Lee, S., Chung, M., Park, H.M., Song, K., & Chang, I. (2019). Xanthan gum biopolymer as soil-stabilization binder for road construction using local soil in Sri Lanka. *Journal of Materials in Civil Engineering, 31*(11), 58-69. https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002909.

Mahbubi Motlagh, N., & Mahboubi Ardakani, A.R. (2018). Evaluation of the effect of adding lime to shear strength parameters of clay- geosynthetic interface. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, *27*(108), 281-292. https://doi.org/10.22071/gsj.2017.81999.1080

Mohammed, H., & Abbas, W.A. (2020). Effect of Biopolymer Alginate on some properties of concrete. *Journal of Engineering, 26*(6), 121-131. https://doi.org/10.31026/j.eng.2020.06.10.

Mousavi, F., Abdi, A. (2015). The effect of polymeric materials in stabilizing forest roads and reducing environmental degradation. *Iranian journal of Forest, 7*(4), 497-505. https://www.ijf-isaforestry.ir/article_13790_b270a720f6ac2e8a8c53d968243d5971.pdf (In persian)

Mousavi, F., Abdi, E., Borz, S.A. (2023). Forest road subgrade improvement by lime and sodium nanoalginate used as stabilizers for clay soils. *Forests, 14,* 1-17. https://doi.org/10.3390/f14071332

Ni, J., Li, S., & Geng, Y. (2022). Mechanical and biodeterioration behaviours of a clayey soil strengthened with combined carrageenan and casein. *Journal of Acta Geotech, 17*(12), 5411-5427. https://doi.org/10.1007/s11440-022-01588-4.

Parsakhoo, A., & Rezaee Motlaq, A. (2018). Investigating the effect of the combination of nano-clay and reed ash (Phragmites australis (Cav.) Trin. ex Steud.) on stabilization of the fine aggregate earthy bed of forest roads. *26*(3), 319-330. https://doi.org/10.22092/IJFPR.2018.117736. (In persian)

Singh, S.P., & Das, R. (2020). Geo-engineering properties of expansive soil treated with xanthan gum biopolymer. *Journal of Geomechanics and Geoengineering, 15*(2), 1-16. https://doi.org/10.1080/17486025.2019.1632495.

Soldo, A. (2020). Biopolymers for enhancing the engineering properties of soil. Alabama: Academic Press.

Ta'negonbadi, B., & Noorzad, R. (2018). Physical and geotechnical long-term properties of lignosulfonate-stabilized clay: an experimental investigation. *Journal of Transport Geotech, 17*(1), 41-50. https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2018.09.001

Toufigh, V., & Kianfar, E. (2019). The effects of stabilizers on the thermal and the mechanical properties of rammed earth at various humidities and their environmental impacts. *Journal of Construction and Building Materials, 200*(1), 616–629. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.050.

Weng, Z., Wang, L., Liu, Q., Pan, X., Xu, Y., & Li, J. (2021). Improving the Unconfined Compressive Strength of Red Clay by Combining Biopolymers with Fibers. *Journal of Renewable Materials, 9*(8), 1503-1517. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.050.

Weng, Z., Yu, J., Deng Y., Cai, Y., & Wang, N. (2023). Mechanical behavior and strengthening mechanism of red clay solidified by xanthan gum biopolymer. *Journal of Central South University, 30*(6), 1948-1963. https://doi.org/10.1007/s11771-023-5327-3.

Wiszniewski, M., Skutnik, Z., Biliniak, M., Çabalar, A.F. (2017). Some geomechanical properties of a biopolymer treated medium sand. *Annals of Warsaw University of Life Sciences - SGGW Land Reclamation, 49*(3), 201–212. https://doi.org/10.1515/sggw-2017-0016.

Iranian Journal of Forest
Vol. 18, No. 2, Summer 2026
pp. 219-233
Research Article

DOI: 10.22034/ijf.2026.550275.2077
CC BY 4.0

Improving high-plastisity clay with biological additives to stabilize forest road subgrades

A. Parsakhoo[1*] and S.A. Hosseini[2]

[1]Associate Prof., Dept. of Forestry, Faculty of Forest Sciences, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, I. R. Iran.
[2]Prof., Forestry and Forest Economics Dept. Natural Resources Faculty, University of Tehran, Karadj, I. R. Iran.

(Received: 4 October 2025; Accepted: 24 December 2025)

Abstract

Introduction: Improving the mechanical properties of soil is an essential prerequisite for construction on unstable soils. In this regard, selecting environmentally compatible materials for soil improvement is an essential method for sustainable development, especially in natural resource development projects.

Materials and Methods: In this study, Following field classification of the soils along the proposed forest road alignments of the second series of Dr. Bahramnia Forestry Plan, three 160-kg samples of highly plastic clay soil (CH), one of the most problematic soil types for construction were collected randomly at regular intervals of 250 meters from a depth of 10-50 cm below the roadbed surface. Then, three types of bio-polymers including xanthan gum, guar gum and beta-glucan were then added to the CH soils at concentrations of 0, 0.1, 0.2, 0.4, and 0.6% by weight. The samples were mixed with the biopolymers using an industrial mixer. The effect of these biopolymers were evaluated immediately after mixing (day 0) and after a 28-day curing period. The measured properties included the Atterberg limits (plastic limit and liquid limit), Proctor compaction characteristics, particularly maximum dry density (MDD), and California Bearing Ratio (CBR). The liquid limit test was performed using a Casagrande apparatus, the plastic limit test using a kneadability test and the CBR test using a uniaxial device in the soil mechanics laboratory. Statistical analyses were performed in a factorial design with three main factors including the type of biopolymer, the amount of biopolymer and the curing time as dependent variables in SPSS software.

Results: The results showed that with increasing treatment concentration, the amount of pulp index decreased significantly. for xanthan, the greatest decrease was observed after 28 days of treatment (22% decrease) and with the addition of 0.4% xanthan to CH soil. for beta-glucan, the greatest decrease in pulp index was observed after adding 0.6% beta-glucan and after 28 days (21.3% decrease). Guar also exhibited a decreasing trend in the plasticity index as its concentration increased. . Analysis of variance revealed that biopolymer type, concentration, and curing time had significant effects on the maximum dry density of the soil. The greatest increases in MDD (28.4%) and CBR (112%) were observed after 28 days of curing with the addition of 0.4% xanthan to the CH soil.. Thus, it can be seen that 0.4% xanthan is the most suitable treatment for strengthening CH soil as a base for development projects in forest ecosystems.

Conclusion: Xanthan is an effective biopolymers for improving the engineering properties of CH soil as a base for construction projects in forest ecosystems. This biopolymer fills the voids in the soil and also binds with fine clay particles, thereby increasing the dry density of the soil. Thus, this biopolymer can be used in an optimal amount and with economic considerations for patch stabilization of unstable forest road subgrades.

Keywords: Biopolymer concentration, Maximum dry density, Road stabilization, Soil loading capacity, Xanthan.

[*]Corresponding author Tel: +17 32427176 Email: Parsakhoo@gau.ac.ir