بکارگیری بیوپلیمرها به منظور ارتقاء عملیات تثبیت در بسترهای نرم رسی

حسن شرفی[*۱] ، سولماز رستمیان[*۲] ، حمیدرضا اکبری[*۳]

۱- گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران، h_sharafi@razi.ac.ir

۲- گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران، solmaz.rostamyan32@gmail.com

۳- گروه مهندسی عمران، واحد همدان، دانشگاه آزاد اسلامی، همدان، ایران ، h_akbari0000@iau.ir

ACCEPTED MANUSCRIPT

چکیده:

خاک‌های مسئله‌دار به دلیل مقاومت پایین و رفتار نامطلوب، نیازمند روش‌های مؤثر بهسازی هستند. در این پژوهش، عملکرد آهک، زانتان‌گام (XG) و آلژینات سدیم (SA) در بهبود مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS) سه نوع خاک شامل کائولینیت، بنتونیت و خاک ترکیبی ماسه/رس (۸۰٪ ماسه استاندارد و ۲۰٪ رس محلی) بررسی و مقایسه شد. نمونه‌ها با ۲/۵، ۵ و۷/۵ درصد آهک و ۰٫۵، ۱، ۱٫۵ و ۲ درصد بیوپلیمر تهیه و پس از ۷ و ۲۸ روز عمل‌آوری تحت آزمایش UCS قرار گرفتند. نتایج نشان داد که عملکرد تثبیت‌کننده‌ها به نوع خاک و زمان عمل‌آوری وابسته است. آهک در هر سه خاک بیشترین بهبود بلندمدت مقاومت را ایجاد کرد؛ به‌طوری‌که در ۲۸ روز، بیشترین مقاومت کائولینیت با ۷٫۵٪ آهک، بنتونیت با ۵٪ آهک و خاک ماسه/رس با ۷٫۵٪ آهک به‌ترتیب به ۲٫۰۸، ۱٫۶۷ و ۰٫۹۵ مگاپاسکال رسید. زانتان‌گام رفتار غیرخطی نشان داد و مقادیر بهینه آن برای کائولینیت، بنتونیت و خاک ماسه/رس به‌ترتیب ۲، ۱ و ۱ درصد بود. در مقابل، آلژینات سدیم عملکرد محدودتری داشت و در خاک ماسه/رس در تمام درصدهای بررسی‌شده موجب کاهش مقاومت شد. در مجموع، نتایج بر تأثیرپذیری عملکرد تثبیت‌کننده‌ها از ویژگی‌های خاک تأکید داشته و نشان می‌دهد که انتخاب نوع و مقدار مناسب ماده تثبیت‌کننده، نقش مهمی در دستیابی به بهسازی مؤثر و افزایش مقاومت خاک دارد.

کلمات‌کلیدی

تثبیت خاک، خاک رس نرم، آهک، بیوپلیمر، زانتان‌گام.

۱-مقدمه

با توجه به گسترش جمعیت، ضرورت ساخت و ساز وگسترش شهرها ازاهمیت ویژه‌ای برخورداراست. بنابراین احتمال برخورد با خاک های مسئله‌دار در مسیراجرای پروژه‌های عمرانی بسیار زیاد می‌باشد که این امر، تثبیت خاک را به عنوان یک راه‌حل مناسب مورد توجه قرارداده است. ازسوی دیگر، کاهش هزینه‌ها در پروژه‌های عمرانی و همچنین کاهش مخاطرات زیست‌محیطی مسائلی هستند که می توانند در انتخاب روش تثبیت وانتخاب مواد افزودنی مورد استفاده لحاظ شوند [۱]/. بهسازی خاک فرآیندی است که برای بهبود خواص ذاتی خاک و افزایش عملکرد آن برای اهداف مهندسی استفاده می‌شود. بهسازی می‌تواند با افزایش مقاومت برشی، فشاری و کششی، کنترل ویژگی‌های انقباض-تورم خاک، کاهش نفوذپذیری و تراکم‌پذیری، فونداسیون مناسبی برای سازه‌ها فراهم کند [۲]/. محدوده وسیعی از مصالح به عنوان افزودنی جهت پایدارسازی و تثبیت خاک اضافه می‌شود. این محدوده شامل خاک‌های طبیعی با اندازه ذرات مختلف تا افزودنی شیمیایی و حتی محصولات بازیافتی حاصل از ضایعات و پسماندهای قابل استفاده است. انتخاب مصالح افزودنی مورد استفاده به این متغیرها بستگی دارد:نوع خاک، هدف از استفاده، مشخصات مهندسی مورد نظر، حداقل خصوصیات و ویژگی‌های مهندسی مورد نیاز، در دسترس بودن مصالح، هزینه و ملاحظات زیست محیطی[۳]/.

وجود خاک نرم در زیرسازی به دلیل تغییر شکل زیاد، مقاومت کم و حساسیت به وجود آب باعث آسیب یا تخریب می‌شود [۴-۶]/ . تثبیت شیمیایی با آهک برای بهبود ساختار زیرسازی‌ها، راه آهن‌ها، بزرگراه‌ها و خواص مهندسی به شیوه‌ای مطلوب استفاده شده است [۷]/. افزودن آهک به خاک رس در حضور آب پس از تبادل کاتیونی (جایگزینی یون‌های با ظرفیت بالاتر اصلاح کننده با کاتیون‌های خاک با ظرفیت کمتر) می‌تواند pH را به شدت افزایش دهد (حدود ۱۲/۴)، که سطوح رس را حل می‌کند (آزاد شدن SiO_2 و AL_2O_3 در محیط). سپس، وجود یون‌های کلسیم آزاد (Ca^{2+}) در سیستم باعث تشکیل ترکیبات سیمانی مانند ژل سیلیکات کلسیم هیدراته (CSH) و ژل هیدرات آلومینات کلسیم (CAH) با واکنش‌های پوزولانی می‌شود. این امر نقش مهمی در بهبود رفتار ژئومکانیکی خاک ایفا می‌کند [۸]، با این حال، تثبیت شیمیایی با آهک دارای معایبی از جمله رفتار شکننده، هزینه بالا، انتشار CO_2 و دوام کم (به عنوان مثال ضعف در برابر چرخه‌های مکرر تر و خشک) است [۷, ۹]/. آهک به همراه مواد پوزولانی می‌تواند ناپایداری حجمی را در دوره‌های پس از تثبیت بهبود بخشد و دوام را افزایش دهد [۱۰]. همچنین به‌کارگیری مواد افزودنی مناسب می‌تواند عملکرد مکانیکی و دوام مصالح ضعیف را به‌طور موثری افزایش دهدکه بیانگر ظرفیت بالای مواد افزودنی در بهبود عملکرد مهندسی خاک‌های مسئله‌دار است [۱۱, ۱۲]/.

بیوپلیمرها، از منابع طبیعی همچون پلی ساکاریدهایی مانند سلولز، پروتئین‌هایی مانند ژلاتین، کسین و ابریشم و همچنین ترکیب شیمیایی مونومرهای مشتق شده زیستی (مانند اسید پلی‌لاکتیک) یا فعالیت‌های میکروبی (مانند زانتان‌گام، گلان‌گام) که می‌توانند بیوپلیمر تولید کنند، حاصل می‌گردند. معروف‌ترین آنها آگارگام، گوارگام، گلان‌گام، زانتان‌گام، کاراگینان، کیتوزان (کیتوسان)، آلژینات سدیم و... هستند [۱۳]/. در زمینه‌های متنوع علم ژئوتکنیک به خصوص بهسازی خاک‌ها از بیوپلیمرهای مختلفی مانند گوارگام، زانتان گام، آگارگام، کربوکسی متیل سلولز و ... استفاده شده است که غالباً استفاده از آنها باعث پیوند محکم‌تر دانه‌های خاک با یکدیگر و درنتیجه بهبود پارامترهای خاک و رفع مشکلات خاک‌های مسئله‌دار گردیده است [۱۴]/.

چن و همکاران نیز اثر خشک شدن را بر مقاومت خاک ماسه تثبیت شده با بیوپلیمرزانتان گام بررسی کردند. نتایج نشان داد که در حالت مرطوب زانتان گام تاثیری بر مقاومت برشی ماسه ندارد و با از دست رفتن رطوبت میزان مقاومت برشی افزایش می یابد [۱۵]/.

ساکر وهمکاران تاثیر آهک‌هیدراته بر ویژگی‌های ژئوتکنیکی و کانی شناسی خاک رس شهر ایدکو مصر که دارای ۱۴ درصد ماده آلی می‌باشد را مورد بررسی قرار دادند. با توجه به نتایج به‌دست آمده مشخص گردید که خاک رس نرم با مواد آلی بالای ۱۴٪ می‌تواند به طور رضایت بخشی با افزودن ۷٪ آهک تثبیت شود [۱۶]/. ساهو و پرادهان تحقیقاتی جهت آهک‌هیدراته بر روی استحکام خاک‌های متورم شونده انجام دادند. نتایج آزمایش نشان داد که حداکثر افزایش قدرت در خاک محتوی ۸٪ آهک‌هیدراته و زمان عمل‌آوری ۱۴ روز می‌باشد [۱۷]/. مایتاه طی آزمایشاتی دریافت که مقاومت خاک مخلوط شده با درصد آهک‌هیدراته ۴٪و درصد سدیم سیلسکات ۲٪

ACCEPTED MANUSCRIPT

افزایش یافته است. هدف ازاین تحقیق تاثیر آهک‌هیدراته بر روی مقاومت فشاری خاک رسی در دو حالت با رطوبت بهینه و رطوبت اشباع می‌باشد [۱۸]/.

چانگ و همکاران، به بررسی اثربخشی انواع مختلف بیوپلیمرها بر روی انواعی از خاک‌ها پرداختند، که در این بررسی بیوپلیمرها را به عنوان یک ماده بهسازی جدید وسازگار با محیط زیست و امیدوارکننده برای عملیات مهندسی ژئوتکنیک و ساخت و ساز فرض کردند [۱۹]/.

در تحقیق امین بخشی زاده و همکارانش، اثر تثبیت کننده آلژینات سدیم را بر روی خاک رسی با پلاستیسته بالا را برای افزایش مقاومت فشاری تک محوری با دو روش خیساندن و پاشش مورد بررسی قرار دادند، خاک تثبیت شده با روش پاشش، مقاومت فشاری تک محوری (UCS) بلند مدت بالاتری نسبت به خاک تثبیت‌شده با روش خیساندن داشت. نتایج تجزیه و تحلیل ریزساختاری نشان داد که یک ماده سیمانی جدید، سدیم آلومینوسیلیکات، با پر کردن فضای منافذ و افزایش استحکام پیوند بین ذرات، ساختار خاک را بهبود بخشیده و از این رو، مقاومت بهبود یافته است. نتیجه این مطالعه، فرآیند تثبیت سطح با استفاده از سدیم آلژینات سازگار با محیط زیست را در کاربردهای زیرساختی ارتقا خواهد داد [۲۰]/.

هادی فرهادی و همکاران، مطالعه‌ای بر روی خاک‌های کائولینیت و ماسه با نسبت‌های اختلاط مختلف انجام شد که در آن تأثیر بیوپلیمرهای آلژینات سدیم (SA)، زانتان‌گام (XG)، گوارگام (GG) و کیتوسان (CS) بر مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS) بررسی گردید. نمونه‌ها با درصدهای مختلف بیوپلیمر تهیه و پس از دوره‌های عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روزه مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج نشان داد عملکرد بیوپلیمرها به نوع خاک و میزان افزودنی وابسته است. به‌طور کلی، کاراگینان و آلژینات سدیم بیشترین بهبود مقاومت را در خاک‌های ریزدانه ایجاد کردند، در حالی که زانتان‌گام در خاک‌های دارای ذرات درشت‌تر عملکرد مناسب‌تری داشت. همچنین مشاهده شد افزایش درصد بیوپلیمر تا مقدار بهینه موجب افزایش مقاومت شده، اما در مقادیر بالاتر روند کاهشی در مقاومت رخ داده است [۲۱]/.

مهدی عظیمی و همکاران، در این پژوهش، اثر بیوپلیمرهای آلژینات سدیم، زانتان‌گام، گوارگام و کیتوزان بر مقاومت فشاری تک‌محوری یک خاک رسی بررسی و با تثبیت آهکی مقایسه شد. نتایج نشان داد مقاومت فشاری با افزایش درصد بیوپلیمر تا مقدار بهینه افزایش یافته و سپس کاهش می‌یابد. همچنین افزایش زمان عمل‌آوری موجب بهبود بیشتر مقاومت شد و برخی بیوپلیمرها عملکردی نزدیک به نمونه‌های آهکی ۷ روزه نشان دادند [۲۲]/.

سهند فتاح و همکاران، تأثیر درصدهای مختلف زانتان‌گام بر ویژگی‌های مقاومتی و دوام خاک‌های کائولینیت و بنتونیت بررسی شد. نتایج نشان داد نمونه‌های دارای ۱ درصد زانتان‌گام و ۲۸ روز عمل‌آوری، بیشترین افزایش مقاومت فشاری را در هر دو خاک داشته‌اند. همچنین زانتان‌گام موجب کاهش تورم بنتونیت، بهبود دوام در برابر چرخه‌های انجماد–ذوب و افزایش عملکرد مقاومتی خاک‌ها شد [۲۳]/.

فاطمه عباسی و دیگر همکارانش، اثر زانتان‌گام بر بهبود رفتار مقاومتی ماسه رسی بررسی شد. نتایج نشان داد افزودن مقادیر کم بیوپلیمر، مقاومت فشاری، مقاومت کششی و سختی خاک را به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌دهد و افزایش زمان عمل‌آوری نیز موجب بهبود بیشتر عملکرد خاک می‌شود. همچنین بررسی‌های ریزساختاری نشان داد زانتان‌گام با ایجاد ساختاری متراکم‌تر، پیوند بین ذرات خاک را تقویت می‌کند [۲۴]/.

سومیت کومار، در این مطالعه مروری، کاربرد بیوپلیمرهایی مانند زانتان‌گام، آگار و گوارگام در بهسازی پایدار خاک‌های ژئوتکنیکی بررسی شد. نتایج نشان داد این بیوپلیمرها با ایجاد هیدروژل و افزایش پیوند بین ذرات خاک، موجب بهبود مقاومت برشی، کاهش نفوذپذیری و افزایش پایداری خاک می‌شوند. همچنین به دلیل سازگاری زیست‌محیطی، عدم سمیت و کاهش اثرات مخرب زیست‌محیطی، به‌عنوان جایگزینی مناسب برای تثبیت‌کننده‌های سنتی معرفی شده‌اند [۲۵]/.

مهدی عظیمی و همکاران در این مطالعه، تأثیر زانتان‌گام بر کاهش میزان مصرف آهک در تثبیت خاک رسی با پلاستیسیته بالا بررسی کردند. نتایج نشان داد مقاومت فشاری نمونه‌های تثبیت‌شده با زانتان‌گام، با افزایش درصد بیوپلیمر تا مقدار بهینه افزایش یافته

ACCEPTED MANUSCRIPT

و پس از آن روند کاهشی پیدا می‌کند. همچنین افزایش زمان عمل‌آوری موجب بهبود بیشتر مقاومت شد. نتایج بیانگر آن بود که ترکیب زانتان‌گام و آهک می‌تواند ضمن افزایش مقاومت فشاری خاک، میزان آهک مصرفی را نیز به‌طور قابل‌توجهی کاهش دهد و در برخی موارد عملکردی مشابه یا حتی بهتر از نمونه‌های دارای آهک بیشتر ارائه کند [۲۶].

در مطالعات محسن باقری و همکارانش نشان داده‌اند که عملکرد روش‌های بهسازی خاک به نوع خاک و شرایط تقویت وابسته است. گزارش کردند که استفاده از ژئوگرید در ماسه می‌تواند ظرفیت مقاومتی را افزایش و تغییرمکان را کاهش دهد و محل قرارگیری تقویت‌کننده نقش مهمی در عملکرد آن دارد، این نتایج بر ضرورت انتخاب روش و میزان بهسازی متناسب با ویژگی‌های خاک تأکید می‌کند؛ موضوعی که در پژوهش حاضر نیز با بررسی درصدهای مختلف تثبیت‌کننده‌ها در خاک‌های متفاوت مورد توجه قرار گرفته است [۲۷].

مطالعات اخیر علی عسکری و همکارانش نشان داده‌اند که بهبود شرایط و اندرکنش خاک–سازه، نقش مؤثری در ارتقای عملکرد پی‌ها دارد. در این میان، بهسازی خاک با افزایش مقاومت و محصورشدگی خاک در اطراف شمع، می‌تواند ظرفیت باربری را افزایش داده و نشست و جابه‌جایی پی را کاهش دهد [۲۸].

با توجه به تفاوت رفتار خاک‌های رسی و محدودیت‌های استفاده از تثبیت‌کننده‌های متداول، هدف پژوهش حاضر بررسی و مقایسه اثر آهک، زانتان‌گام (XG) و آلژینات سدیم (SA) بر مقاومت فشاری تک‌محوره خاک‌های کائولینیت، بنتونیت و خاک ترکیبی ماسه/رس شامل ۸۰ درصد ماسه استاندارد و ۲۰ درصد رس محلی است. در این راستا، درصدهای مختلف آهک (۲/۵، ۵ و ۷/۵ درصد) و بیوپلیمرها (۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد) در دوره‌های عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روز مورد بررسی قرار گرفتند. هدف اصلی، ارزیابی وابستگی عملکرد تثبیت‌کننده‌ها به نوع خاک، درصد افزودنی و زمان عمل‌آوری و تعیین درصد مناسب هر تثبیت‌کننده بر اساس تغییرات مقاومت فشاری است.

وجه تمایز این پژوهش، مقایسه هم‌زمان عملکرد یک تثبیت‌کننده معدنی متداول (آهک) با دو بیوپلیمر XG و SA در خاک‌هایی با ویژگی‌های کانی‌شناسی و بافتی متفاوت است؛ به‌گونه‌ای که رفتار تثبیت‌کننده‌ها در خاک رسی با فعالیت کم تا متوسط (کائولینیت)، خاک رسی بسیار فعال و متورم‌شونده (بنتونیت) و خاک دانه‌ای–چسبنده ماسه/رس مقایسه شده است. این مقایسه امکان بررسی نقش نوع خاک در پاسخ به تثبیت‌کننده‌های مختلف و شناسایی تفاوت میان عملکرد کوتاه‌مدت و بلندمدت آن‌ها را فراهم می‌کند. همچنین، استفاده از آهک در کنار بیوپلیمرها امکان مقایسه یک روش متداول تثبیت با مواد پلیمری زیست‌پایه را از نظر بهبود مقاومت فراهم می سازد و می‌تواند مبنایی برای انتخاب تثبیت‌کننده متناسب با نوع خاک و هدف مقاومتی باشد.

۲-مواد و روش‌ها

۲-۱ -خاک بنتونیت سدیم دار

خاک بنتونیت استفاده شده در این پژوهش، درجه آن فوق خالص است و بیشترین ترکیبات آن از مونت موریلونیت می‌باشد. شکل (۱) تصویری از این خاک می‌باشد، این خاک یک نوع رس فعال با فعالیت بالا است که دارای کانی اصلی مونت موریلونیت با ساختار سه لایه‌ای (۲:۱)، که فضای بین لایه‌ای وسیعی برای جذب آب و تورم شدید دارد. این خاک دارای مقاومت پایین و چسبندگی بسیار است. تمام این خصوصیات باعث ایجاد مشکلات فراوان برای ایجاد سازه‌ای ایمن بر روی آن است. جداول۱و۲ مشخصات فیزیکی و شیمیایی آن ذکر شده است. این خاک دارای درصد رطوبت بهینه (OMC=34%)، حداکثر وزن مخصوص خشک آن ($MDD=1.30\ g/cm^3$) و مقاومت فشاری اولیه آن برابر با ۰/۴۵۵۰مگاپاسکال می‌باشد.

ACCEPTED MANUSCRIPT

جدول ۱: مشخصات فیزیکی خاک بنتونیت مورد استفاده(شرکت سی سی ایران)

Table ۱: Physical properties of the bentonite clay used (CC Iran Company)

ویژگی	مقدار	واحد	استاندارد
ظرفیت تبادل کاتیونی(CEC)	۸۵	cmol/kg	EDX / ASTM D7503
سطح ویژه(SSA)	۵۸۰	m^2/g	BET Method
حد روانی(LL)	۲۵۷	(%)	ASTM D4318
حد خمیری(PL)	۶۸	(%)	ASTM D4318
شاخص خمیری(PI)	۱۹۸	(%)	(LL - PL)
چگالی ویژه(Gs)	۲/۵۰	g/cm^3	ASTM D854
حداکثر وزن مخصوص خشک	۱/۳	g/cm^3	ASTM D698
رطوبت بهینه	۳۴	(%)	ASTM D698
pH	۱۰/۲	-	ASTM G51
رسانایی الکتریکی(EC)	۰/۳۶	mS/cm	EPA Manual (1983)
مقاومت فشاری محصور نشده	۰/۴۵۵۰	(MPa)	ASTM D2166
رده بندی ژئوتکنیکی خاک	CH	-	ASTM D2487

جدول۲: مشخصات شیمیایی خاک بنتونیت سدیم دار(شرکت سی سی ایران)

Table ۲: Chemical specifications of sodium-based bentonite soil (CC Iran Company)

فرمول شیمیایی	$Al_2H_2O_{12}Si_4$
شماره CAC	۹-۷۸-۱۳۰۲
شماره EC	۵-۱۰۸-۲۱۵
جرم مولی	$gr/_{moi}$ ۳۶۰/۳۱۴



شکل ۱: خاک بنتونیت سدیم دار

Figure ۱: Sodium-based bentonite clay

ACCEPTED MANUSCRIPT

۲-۲- خاک کائولینیت

خاک کائولینیت استفاده شده در این پژوهش از(کائولینیت زئوس تبریز) است. این خاک نرم از نوع رس فعال با فعالیت کم تا متوسط است ودارای ساختار دولایه‌ای (۱:۱) که جذب آب در فضای بین لایه‌ای. این خاک به دلیل مقاومت کم، حساس به وجود آب، از خاک‌های مشکل‌ساز در پروژه‌های عمرانی است. شکل (۲) خاک کائولینیت می‌باشد. مشخصات فیزیکی وشیمیایی آن در جدول۳ و۴، آمده است. این خاک دارای درصد رطوبت بهینه (OMC=20%)، حداکثر وزن مخصوص خشک آن (MDD=1.50 g/cm³) و مقاومت فشاری اولیه آن برابر با ۰/۳۷۱۶ مگاپاسکال می‌باشد.

جدول ۳: مشخصات شیمیایی خاک کائولینیت (شرکت زئوس تبریز)

Table ۳: Chemical specifications of kaolinite soil (Zeus Tabriz Company)

ترکیب شیمیایی	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	CaO CaO(آزاد)	LOI (افت حرارتی)	SO_3	Na_2O	K_2O	TIO_2
کائولینیت	۶۳±۱	۲۴±۱	۰٫۵۵±۰٫۱	۰٫۵۵±۰٫۰۶	۱/۲±۰/۲	۹±۱	-	۰/۰۴±۰/۱	۰٫۳۰٫۱±	۰٫۰۴۰٫۰۱±

جدول ۴:مشخصات فیزیکی خاک کائولینیت (شرکت زئوس تبریز)

Table ۴: Physical properties of kaolinite clay (Zeus Tabriz Company)

خواص خاک	مقدار	واحد	استاندارد
ظرفیت تبادل کاتیونی(CEC)	۱۱٫۸	(cmol/kg)	Hendershot and Duquette(1986)
سطح ویژه(SSA)	۲۵	(m^2/g)	Eltantawy and Arnold (1973)
درصد رس	۶۸	(%)	ASTM D422
حد روانی	۴۷	(%)	ASTM D4318
حد خمیری	۲۳	(%)	
شاخص خمیری	۲۴	(%)	ASTM D4318
چگالی ویژه	۲٫۶۷	g/cm³	ASTM D854
حداکثروزن مخصوص خشک	۱٫۵۰	g/cm³	ASTM D698
حداکثر چگالی خشک	۱۵۶۱	(kg/m^3)	ASTM D698
رطوبت بهینه	۲۰	(%)	ASTM D698
طبقه بندی خاک	CL	-	ASTM D2487
مقاومت فشاری محصور نشده	۰٫۳۷۱۶	(MPa)	ASTM D2166
pH	۸٫۶۱	-	(2006)،Ouhadi et al
رسانایی الکتریکی(EC)	۰٫۱۸۹	mS/cm	EPA manual (1983)

ACCEPTED MANUSCRIPT



شکل ۲: خاک کائولینیت

Figure ۲: Kaolinite soil

۲-۳- خاک ماسه/رس

در این خاک از ۸۰٪ ماسه استاندارد و ۲۰٪ رس محلی استفاده شده است. ماسه استاندارد از (شرکت آزمان تجهیز مهام)، تهیه شده است، که ماسه‌ها با دانه‌بندی مطابق استاندارد ASTM-D1556، می‌باشند. رس محلی استفاده شده در این پژوهش از منطقه دادگستری الهیه استان کرمانشاه می‌باشد. این ترکیب از خاک به دلیل مقاومت بسیار کم، ریزشی بودن و نداشتن چسبندگی کافی، یکی از خاک‌های مسئله‌داراست. مشخصات فیزیکی رس وماسه در جدول ۵ آمده است.این خاک دارای درصد رطوبت بهینه (OMC=12%)، حداکثر وزن مخصوص خشک آن ($MDD=1.71\ g/cm^3$) ومقاومت فشاری اولیه آن برابر با ۰/۲۰۳۰ مگاپاسکال می‌باشد.

جدول ۵: مشخصات فیزیکی خاک رس محلی وماسه (مشخصات ماسه از شرکت آزمان تجهیز مهام)

Table ۵: Physical properties of local clay and sand (sand specifications provided by Azman Tajhiz Maham Company)

خواص خاک	مقدار	واحد	استاندارد
درصد رس	۲۰	(%)	ASTM D422
درصد ماسه	۸۰	(%)	ASTM D422
حد روانی	۳۷	(%)	ASTM D4318
حد خمیری	۱۹	(%)	ASTM D4318
شاخص خمیری	۱۸	(%)	ASTM D4318
چگالی ویژه	۲،۶۷	g/cm^3	ASTM D854
وزن مخصوص حقیقی ماسه	۲،۳	g/cm^3	ASTM D698
حداکثر وزن مخصوص خشک	۱،۶۷	g/cm^3	ASTM D698
حداکثر چگالی خشک	۱۵۶۱	(kg/m^3)	ASTM D698

ACCEPTED MANUSCRIPT

خواص خاک	مقدار	واحد	استاندارد
رطوبت بهینه	۱۸	(%)	ASTM D698
رطوبت بهینه ماسه/رس	۱۲	(%)	ASTM D698
طبقه بندی خاک	CL	-	ASTM D2487
مقاومت فشاری محصور نشده ماسه/رس	۰٫۲۰۳۰	(MPa)	ASTM D2166
مقاومت فشاری محصور نشده	۰٫۲۲۰۸	(MPa)	ASTM D2166



شکل ۳: ماسه استاندارد

Figure ۳: Standard sand



شکل ۴: خاک رس محلی

Figure ۴: Local clay

۲-۴ -آهک هیدراته(Ca(OH)2)

آهک استفاده شده در این پژوهش از نوع آهک‌هیدراته می‌باشد، که از شرکت "سی سی ایران" تهیه شده است. این ماده به صورت پودر سفید رنگ است. آهک علاوه بر واکنش با ذرات رس، می‌تواند با تشکیل واکنش پوزولانی، لخته سازی و تبادل یونی مقاومت خاک‌های استفاده شده در این پژوهش را طبق مطالعات گذشته تا چند برابر بیشتر کرده و باعث پیوند بسیارقوی بین ذرات وصفحات رسی خواهد شد. مشخصات فیزیکی و شیمیایی آن در جداول ۶ و۷ آورده شده است.

جدول ۶: مشخصات شیمیایی آهک هیدراته (شرکت سی سی ایران)

Table ۶: Chemical specifications of hydrated lime (CC Iran Company)

مشخصات شیمیایی	مقدار	واحد
کربنات	کمتر از ۳	٪
کلرید	کمتر از ۰٫۰۰۵	٪
ترکیبات گوگرد	کمتر از ۰٫۱۰۰	٪
فلزات سنگین	کمتر از ۰٫۰۰۳	٪
آهن	کمتر از ۰٫۰۵	٪
پتاسیم	کمتر از ۰٫۰۵	٪

ACCEPTED MANUSCRIPT

٪	کمتر از ۰٫۵	منیزیم
٪	کمتر از ۰٫۰۳	مواد نامحلول در اسید هیدروکلریک
٪	کمتر از ۰٫۰۵	سدیم

جدول ۷: مشخصات فیزیکی آهک هیدراته(شرکت سی سی ایران)

Table ۷: Physical specifications of hydrated lime (CC Iran Company)

ویژگی فیزیکی	مقدار	واحد	توضیحات اضافی
رنگ	سفید مایل به خاکستری	-	حالت پودری
چگالی حقیقی (specific gravity)	۲/۲۴	g/cm^3	بسته به درصد خلوص
سطح ویژه (SSA)	۱۱	m^2/g	خمین براساس روش BET
درصد عبوری از الک نمره ۲۰۰	٪۹۰ <	٪	دانه‌بندی مناسب برای اختلاط در خاک
حالت ظاهری	پودر نرم	-	بدون توده و کلوخه

۲-۵ - بیوپلیمر زانتان‌گام(Xanthan gum)

بیوپلیمر زانتان‌گام در واقع یک پلی‌ساکارید است که از فرآیند تخمیر به دست می آید. این ماده کاربردهای بسیاری در صنایع‌غذایی، نوشیدنی، مراقبت شخصی و حتی صنعتی دارد. اغلب به عنوان تثبیت کننده وغلیظ کننده دراین صنایع استفاده می‌شوند و به صورت پودر سفید رنگ می‌باشد. طبق تحقیقات ومروراطلاعات گذشته با ایجاد چسبندگی و شبکه ژلی، در بستن فضاهای خالی بین دانه‌ای ماسه و صفحات رسی و افزایش ویسکوزیته مخلوط، باعث بهبود مقاومت اولیه و پایداری می شود. زانتان گام از شرکت (شیمی استور) تهیه شده است. این ماده پودری به رنگ سفید تا زرد روشن است. مشخصات فیزیکی و شیمیایی آن در جدول ۸، آمده است.

۳-۱- طرح اختلاط نمونه ها

به‌منظور بررسی و مقایسه عملکرد سه تثبیت‌کننده شامل آهک، زانتان‌گام (XG) و آلژینات سدیم (SA) در خاک‌های کائولینیت، بنتونیت و خاک ترکیبی ماسه/رس، طرح آزمایش بر اساس مطالعات پیشین و نتایج تحقیقات مرتبط تنظیم شد. درصد افزودنی‌ها بر مبنای وزن خشک خاک تعیین گردید. آهک در مقادیر ۲/۵، ۵ و ۷/۵ درصد و بیوپلیمرهای XG و SA در مقادیر ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد وزنی خاک خشک مورد استفاده قرار گرفتند.

برای بررسی اثر زمان عمل‌آوری، نمونه‌ها در دو دوره ۷ و ۲۸ روزه نگهداری و سپس تحت آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS) قرار گرفتند. برای هر ترکیب اختلاط و هر دوره عمل‌آوری، چهار نمونه تکراری تهیه و آزمایش شد و مقدار مقاومت گزارش‌شده بر اساس نتایج این نمونه‌ها تعیین گردید. بنابراین، طرح آزمایش امکان ارزیابی هم‌زمان اثر نوع خاک، نوع و مقدار تثبیت‌کننده و زمان عمل‌آوری بر مقاومت فشاری را فراهم کرد.

ACCEPTED MANUSCRIPT

جدول ۸: طرح اختلاط نمونه ها

Table ۸: Mix design of the samples

نوع خاک	تثبیت‌کننده	درصد افزودنی	زمان عمل‌آوری	تکرار
کائولینیت	آهک	٪۷/۵، ۵، ۲/۵	۷ و ۲۸ روز	۴
کائولینیت	XG	٪۲، ۱/۵، ۱، ۰/۵	۷ و ۲۸ روز	۴
کائولینیت	SA	٪۲، ۱/۵، ۱، ۰/۵	۷ و ۲۸ روز	۴
بنتونیت	آهک	٪۷/۵، ۵، ۲/۵	۷ و ۲۸ روز	۴
بنتونیت	XG	٪۲، ۱/۵، ۱، ۰/۵	۷ و ۲۸ روز	۴
بنتونیت	SA	٪۲، ۱/۵، ۱، ۰/۵	۷ و ۲۸ روز	۴
ماسه/رس	آهک	٪۷/۵، ۵، ۲/۵	۷و ۲۸ روز	۴
ماسه/رس	XG	٪۲، ۱/۵، ۱، ۰/۵	۷ و ۲۸ روز	۴
ماسه/رس	SA	٪۲، ۱/۵، ۱، ۰/۵	۷ و ۲۸ روز	۴

۳-۲- فرآیند ساخت نمونه ها

برای آماده‌سازی نمونه‌ها، ابتدا خاک‌های پایه شامل کائولینیت، بنتونیت و رس محلی خشک شده و از الک شماره ۲۰۰ عبور داده شدند. ماسه استاندارد نیز به‌گونه‌ای تهیه شد که از الک شماره ۲۰ عبور کرده و روی الک شماره ۳۰ باقی بماند. سپس زانتان‌گام و آلژینات سدیم، بر اساس درصدهای تعیین‌شده نسبت به وزن خشک خاک، به‌صورت خشک به خاک افزوده شده و به مدت ۱۰ دقیقه به‌طور یکنواخت مخلوط شدند. پس از آن، آب موردنیاز بر اساس رطوبت بهینه (OMC) به‌دست‌آمده از آزمایش تراکم اصلاح‌شده به مخلوط اضافه شد. استفاده از روش اختلاط خشک بیوپلیمرها با هدف دستیابی به توزیع یکنواخت‌تر افزودنی در خاک و ایجاد شرایط یکسان در تهیه نمونه‌ها انجام گرفت [۲۹]. برای نمونه‌های تثبیت‌شده با آهک، مقدار موردنظر آهک ابتدا با آب اختلاط و به‌صورت دوغاب تهیه شد و سپس به خاک افزوده گردید. این روش با هدف بهبود توزیع آهک در خاک و فراهم‌کردن شرایط مناسب برای آغاز واکنش‌های آن با آب و ذرات خاک به کار گرفته شد [۸]. پس از افزودن تثبیت‌کننده، مخلوط‌ها به مدت ۱۵ دقیقه با استفاده از همزن آزمایشگاهی مخلوط شدند تا یکنواختی مناسبی حاصل شود.سپس نمونه‌های موردنیاز برای آزمون مقاومت فشاری تک‌محوری مطابق استاندارد ASTM D2166 تهیه شدند. مخلوط آماده‌شده در سه لایه داخل قالب استوانه‌ای قرار گرفت و هر لایه با استفاده از کوبه استاندارد مورد استفاده در آزمایش تراکم اصلاح‌شده، طی ۲۵ ضربه متراکم شد. شرایط تراکم نمونه‌ها بر اساس نتایج آزمایش تراکم اصلاح‌شده و با هدف دستیابی به حداکثر وزن مخصوص خشک (MDD) هر خاک تعیین گردید. پس از تراکم، نمونه‌ها بلافاصله با سلفون و نایلون پوشانده شدند تا از کاهش رطوبت جلوگیری شود و سپس به مدت ۷ و ۲۸ روز تحت شرایط یکسان عمل‌آوری قرار

ACCEPTED MANUSCRIPT

گرفتند. در پایان دوره عمل‌آوری، نمونه‌ها تحت آزمون مقاومت فشاری تک‌محوری با سرعت بارگذاری ۱ میلی‌متر بر دقیقه قرار گرفتند و آزمایش تا وقوع شکست و کاهش متوالی نیروی اعمالی ادامه یافت.

۳-۳- نتایج آزمایش تراکم استاندارد

ازمایش تراکم استاندارد برای تعیین مقادیر حداکثر وزن مخصوص خشک (MDD) و رطوبت بهینه (OMC)، برای خاک‌های کائولینیت، بنتونیت و ترکیب ماسه/رس، مورد بررسی و انجام قرار گرفت. پارامترهای OMC و MDD، نقش بسیار مهمی در ادامه روند آزمایش‌های تثبیت خاک‌ها، که آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده است را دارند، با این دو مقدار برای هر خاک میزان رطوبت اختلاط و تعیین درصد تثبیت کننده‌ها مشخص شده و آزمایش به صورت دقیق و استاندارد انجام می‌شود. نتایج آزمایش تراکم هریک از خاک‌ها در جدول زیر بیان شده است.

جدول ۹: نتایج آزمایش تراکم استاندارد

Table ۹: Results of the Standard Compaction Test

خاک	حداکثر وزن مخصوص خشک (گرم بر سانتی متر مکعب)	رطوبت بهینه(٪)
بنتونیت	۱/۳۰	۳۴
کائولینیت	۱/۵۰	۲۰
ماسه/رس	۱/۷۱	۱۲

۳-۴- نتایج آزمایش حدود اتربرگ

این آزمایش برای تعیین حدخمیری و حدروانی خاک‌ها انجام شد که نتایج آن، خصوصیات ژئوتکنیکی خاک‌ها و فعالیت خاک‌ها را مشخص می‌کند. این آزمایش برای خاک‌های کائولینیت، بنتونیت و رس محلی انجام شده که نتایج آن در جدول زیر آمده است.

جدول ۱۰: نتایج آزمایش حدود اتربرگ

Table ۱۰: Atterberg Limits Test Results

خاک	LL (حد روانی)	PL (حد خمیری)	PI (شاخص خمیری) PI=LL-PL	طبقه بندی خاک
بنتونیت	٪۲۵۷	٪۶۸	٪۱۹۸	CH
کائولینیت	٪۴۷	٪۲۳	٪۲۴	CL
رس محلی	٪۳۷	٪۱۹	٪۱۸	CL

آزمایش حدود اتربرگ بر روی کائولینیت، بنتونیت و رس محلی انجام شد و نتایج در جدول ۱۰ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بنتونیت با LL=257% و PI=198% بیشترین میزان خمیری‌بودن را در میان خاک‌های مورد بررسی دارد و بر اساس سیستم طبقه‌بندی در گروه CH قرار می‌گیرد. مقدار بالای شاخص خمیری بنتونیت نشان‌دهنده رفتار بسیار خمیری و حساسیت بالای آن به تغییرات رطوبت است که با ماهیت متورم‌شونده و سطح ویژه بالای این خاک سازگاری دارد.

ACCEPTED MANUSCRIPT

کائولینیت با LL=47% و PI=24% و رس محلی با LL=37% و PI=18% در گروه CL طبقه‌بندی شدند. مقایسه مقادیر PI نشان می‌دهد که کائولینیت نسبت به رس محلی رفتار خمیری‌تری دارد، در حالی‌که بنتونیت اختلاف بسیار زیادی با دو خاک دیگر نشان می‌دهد. بنابراین، ترتیب افزایش خمیری‌بودن خاک‌ها به صورت بنتونیت > کائولینیت > رس محلی است. این تفاوت را می‌توان به اختلاف در نوع کانی رسی، سطح ویژه و میزان برهم‌کنش ذرات خاک با آب نسبت داد. در نتیجه، تفاوت ویژگی‌های خمیری و رفتار رطوبتی این سه خاک، می‌تواند در نحوه واکنش آن‌ها با مواد تثبیت‌کننده و تغییرات مقاومت فشاری تک‌محوره مؤثر باشد.

۳-۵- آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوره(UCS) , (ASTM D2166-66)

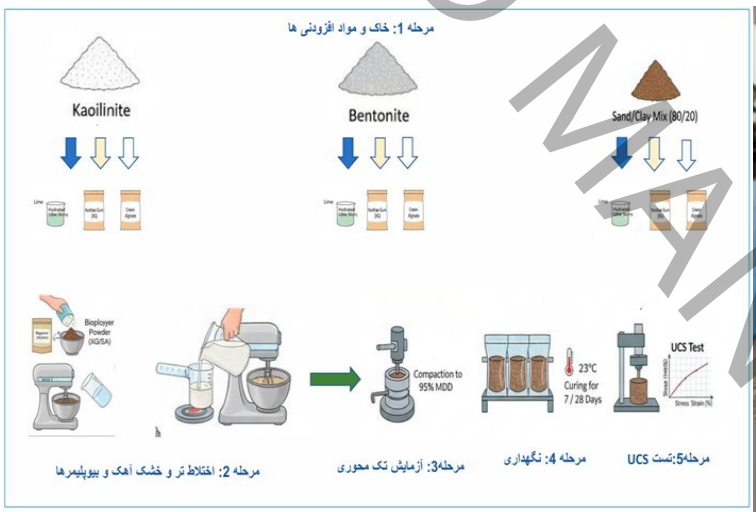
آزمون مقاومت فشاری تک‌محوره بر اساس استاندارد ASTM D2166 بر روی نمونه‌های استوانه‌ای با قطر ۳/۸۱ سانتی‌متر و ارتفاع ۷/۶۲ سانتی‌متر انجام شد. نمونه‌ها پس از آماده‌سازی و تراکم، به‌منظور جلوگیری از تبخیر رطوبت با پوشش سلفون و نایلون محافظت شده و در دوره‌های عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روزه نگهداری شدند. برای هر ترکیب خاک–تثبیت‌کننده و هر دوره عمل‌آوری، چهار نمونه تکراری تهیه و آزمایش شد.

پس از پایان دوره عمل‌آوری، نمونه‌ها در دستگاه مقاومت فشاری تک‌محوره قرار گرفته و بارگذاری با سرعت ثابت ۱ میلی‌متر بر دقیقه انجام شد. بارگذاری تا رسیدن نمونه به حالت شکست ادامه یافت و مقاومت فشاری تک‌محوره بر اساس بیشینه تنش محوری ثبت‌شده در حین آزمایش تعیین گردید. برای هر ترکیب، نتایج چهار نمونه تکراری مورد مقایسه قرار گرفت تا از تکرارپذیری نتایج و کاهش اثر خطاهای ناشی از آماده‌سازی و آزمایش اطمینان حاصل شود.



شکل ۸: آزمایش تک محوری

Figure 8: Uniaxial test



شکل ۹: طرح شماتیک انجام آزمایشUCS

Figure ۹: Schematic layout of the UCS test setup

ACCEPTED MANUSCRIPT



شکل ۱۰: ترکیب ساخت نمونه‌های آزمایش اصلی مقاومت فشاری تک‌محوری تا شکست آن‌ها

Figure ۱۰: Preparation of specimens for the main uniaxial compressive strength tests, up to the point of failure.

۳-۶ - علائم اختصاری در نامگذاری نمونه ها

علائم به کار رفته در نامگذاری نمونه‌ها برای سهولت کاربه صورت زیر است:

K: کائولینیت

B: بنتونیت

SC: ماسه/رس

XG: زانتان گام

SA: آلژینات سدیم

L یا Lime: آهک

جدول (۱۱) مقادیر نمونه‌ها و علائم آن‌ها به صورت کامل بیان شده است. اعداد به کار رفته بعد از نام‌های اختصاری، درصد نمونه‌ها هستند. در قسمت‌هایی که اعداد صفر بکار رفته به علت استفاده نشدن از آن ماده به دلیل مقایسه موادهای دیگر است. در هر سه خاک مذکور هر سه ماده افزودنی (آهک، زانتان گام و آلژینات سدیم) بکار رفته است.

ACCEPTED MANUSCRIPT

جدول ۱۱: جدول طرح اختلاط کل نمونه‌های ساخته شده آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری

Table ۱۱: Mix design table for all specimens prepared for the unconfined compressive strength test.

شماره نمونه	نمونه	خاک٪	زانتان گام(XG)	آلژینات سدیم(SA)	آهک(L)	عمل آوری روز
۱	خاک کائولینیت(K)	۱۰۰	۰	۰	۰	۷،۲۸
۲	K99/5 XG0/5	۹۹/۵	۰/۵	۰	۰	۷،۲۸
۳	K99 XG1	۹۹	۱	۰	۰	۷،۲۸
۴	K98/5 XG1/5	۹۸/۵	۱/۵	۰	۰	۷،۲۸
۵	K98 XG2	۹۸	۲	۰	۰	۷،۲۸
۶	K99/5 XG0/5	۹۹/۵	۰	۰/۵	۰	۷،۲۸
۷	K99 SA1	۹۹	۰	۱	۰	۷،۲۸
۸	K98/5 SA1/5	۹۸/۵	۰	۱/۵	۰	۷،۲۸
۹	K98 SA2	۹۸	۰	۲	۰	۷،۲۸
۱۰	K97/5 L2/5	۹۷/۵	۰	۰	۲/۵	۷،۲۸
۱۱	K95 L5	۹۵	۰	۰	۵	۷،۲۸
۱۲	K92/5 L7/5	۹۲/۵	۰	۰	۷/۵	۷،۲۸
۱۳	خاک بنتونیت(B)	۱۰۰	۰	۰	۰	۷،۲۸
۱۴	B99/5 XG0/5	۹۹/۵	۰/۵	۰	۰	۷،۲۸
۱۵	B99 XG1	۹۹	۱	۰	۰	۷،۲۸
۱۶	B98/5 XG1/5	۹۸/۵	۱/۵	۰	۰	۷،۲۸
۱۷	B98 XG2	۹۸	۲	۰	۰	۷،۲۸
۱۸	B99/5 SA0/5	۹۹/۵	۰	۰/۵	۰	۷،۲۸
۱۹	B99 SA1	۹۹	۰	۱	۰	۷،۲۸
۲۰	B98/5 SA1/5	۹۸/۵	۰	۱/۵	۰	۷،۲۸
۲۱	B98 SA2	۹۸	۰	۲	۰	۷،۲۸
۲۲	B97/5L2/5	۹۷/۵	۰	۰	۲/۵	۷،۲۸
۲۳	B95 L5	۹۵	۰	۰	۵	۷،۲۸
۲۴	B92/5 L7/5	۹۲/۵	۰	۰	۷/۵	۷،۲۸
۲۵	خاک ماسه/رس (SC)	۱۰۰	۰	۰	۰	۷،۲۸
۲۶	SC99/5 XG0/5	۹۹/۵	۰/۵	۰	۰	۷،۲۸
۲۷	SC99 XG1	۹۹	۱	۰	۰	۷،۲۸
۲۸	SC98/5 XG1/5	۹۸/۵	۱/۵	۰	۰	۷،۲۸
۲۹	SC98 XG2	۹۸	۲	۰	۰	۷،۲۸
۳۰	SC99/5 SA0/5	۹۹/۵	۰	۰/۵	۰	۷،۲۸
۳۱	SC99 SA1	۹۹	۰	۱	۰	۷،۲۸
۳۲	SC98/5 SA1/5	۹۸/۵	۰	۱/۵	۰	۷،۲۸
۳۳	SC98 SA2	۹۸	۰	۲	۰	۷،۲۸

ACCEPTED MANUSCRIPT

عمل آوری روز	آهک(L)	آلژینات سدیم(SA)	زانتان گام(XG)	خاک٪	نمونه	شماره نمونه
۷،۲۸	۲/۵	۰	۰	۹۷/۵	SC97/5 L2/5	۳۴
۷،۲۸	۵	۰	۰	۹۵	SC95 L5	۳۵
۷،۲۸	۷/۵	۰	۰	۹۲/۵	SC92/5 L7/5	۳۶
		۲۸۸	=مجموع نمونه ها با ۴بار سعی و خطا		۷۲	=مجموع کل نمونه ها

مقدار بهینه در این پژوهش، درصد بهینه تثبیت‌کننده به‌عنوان درصدی در محدوده مقادیر مورد بررسی تعریف شد که بیشترین مقدار UCS را در یک دوره عمل‌آوری مشخص ایجاد کرده است.

محسن باقری و همکارانش در مطالعه ای نشان داده‌اند که استفاده از روش‌های بهینه‌سازی و هوش مصنوعی می‌تواند به شناسایی شرایط بهینه و پیش‌بینی دقیق‌تر رفتار خاک کمک کند. این رویکردها با کاهش هزینه‌های محاسباتی و افزایش دقت تحلیل‌ها، ظرفیت مناسبی برای بهبود و بهینه‌سازی روش‌های بهسازی خاک و ارزیابی عملکرد آن دارند [۳۰].

در مطالعات دیگر محسن باقری و همکارانش نشان داده‌اند که استفاده از روش‌های داده‌محور و الگوریتم‌های بهینه‌سازی می‌تواند در پیش‌بینی و بهینه‌سازی رفتار مصالح مهندسی مؤثر باشد، نتایج این مطالعات بر اهمیت در نظر گرفتن هم‌زمان چندین متغیر مؤثر و استفاده از روش‌های پیشرفته برای بهبود دقت پیش‌بینی تأکید دارند، این رویکرد می‌تواند در مطالعات آتی برای پیش‌بینی مقاومت و تعیین ترکیب بهینه تثبیت‌کننده‌ها در خاک‌های مختلف مورد استفاده قرار گیرد [۳۱].

ACCEPTED MANUSCRIPT

جدول ۱۲: جدول cv وsd نمونه‌های بهینه ساخته شده آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری

Table 12: CV and SD values for the optimized specimens fabricated for the uniaxial compressive strength test.

خاک	تثبیت‌کننده	درصد بهینه	UCS 7 روزه (MPa)	SD	CV (%)	افزایش (٪) به خاک پایه	UCS 28 روزه (MPa)	SD	CV (%)	افزایش (٪) به خاک پایه
کائولینیت	آهک	7/50%	1/268	0/0023	0/18	241/2	2/065	0/0231	1/12	455/7
کائولینیت	XG	2%	0/572	0/0006	0/11	53/9	1/123	0/0004	0/04	202/2
کائولینیت	SA	1%	0/481	0/0003	0/07	29/5	0/498	0/0004	0/07	34/1
بنتونیت	آهک	5%	0/59	0/0027	0/45	29/7	1/649	0/0202	1/22	262/4
بنتونیت	XG	1%	0/602	0/0039	0/66	32/2	0/754	0/0002	0/03	65/7
بنتونیت	SA	0/50%	0/576	0/0034	0/58	26/6	0/662	0/0007	0/1	45/6
ماسه‌رس	آهک	7/50%	0/733	0/0055	0/76	261/1	0/943	0/0024	0/25	364/5
ماسه‌رس	XG	1%	0/362	0/0018	0/5	78/4	0/63	0/0003	0/04	210/2
ماسه‌رس	SA	0/50%	0/143	0/0026	1/82	−29/8	0/076	0/0011	1/44	−62/8

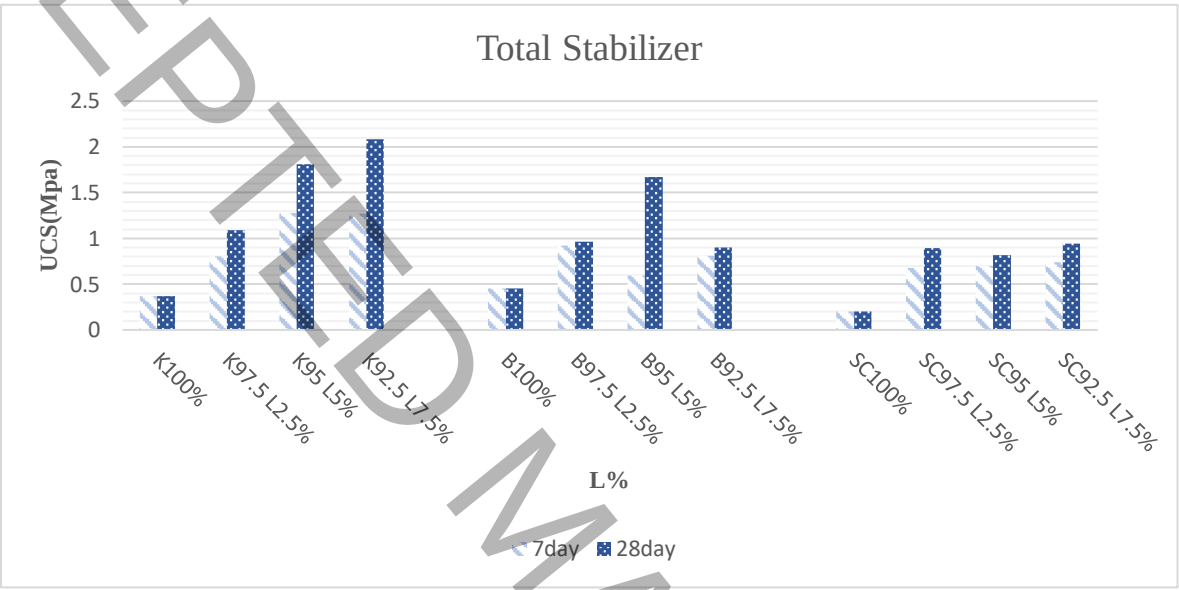
ACCEPTED MANUSCRIPT

۴-تحلیل و تفسیر نتایج

۴-۱ - نتایج آزمایش تک محوری

این آزمایش از اصلی ترین آزمایش این پژوهش است وهدف اصلی در این آزمایش، تعیین حداکثر تنش فشاری است که نمونه‌های خاک می‌توانند بدون هیچ‌گونه محصورسازی جانبی تحمل کنند. در این بخش، ابتدا به تحلیل و بررسی نتایج نمونه‌های تثبیت شده با آهک، زانتان گام و آلژینات سدیم، پس از اتمام طول دوره‌ی عمل‌آوری نمونه‌ها (۷روزه و ۲۸ روزه) پرداخته شده است و درادامه به تحلیل تغییرات درصد رشد مقاومت فشاری تک‌محوری می‌پردازیم.

۴-۱-۱ - تحلیل کلی نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری خاک‌های تثبیت شده با آهک



شکل ۱۱: نمودارنتایج کلی مقاومت فشاری(UCS)، خاک های کائولینیت، بنتونیت و ماسه/رس تثبیت شده با آهک

Figure ۱۱: Chart of overall Unconfined Compressive Strength (UCS) results for kaolinite, bentonite, and sand/clay soils stabilized with lime.

نمودار(شکل ۱۱)، در این قسمت به تحلیل کلی و جامع از نتایج هر سه نوع خاک کائولینیت (K)، بنتونیت(B) و ماسه/رس(SC) در سه درصد از افزودنی آهک (۲/۵٪، ۵٪ و۷/۵٪)، در دو مدت عمل آوری ۷و ۲۸ روز پرداخته می‌شود.

آهک به‌عنوان تثبیت‌کننده یک واکنش دو مرحله‌ای دارد:

۱) مرحله ی کوتاه مدت اولیه – ۷ روز ۲) مرحله‌ی بلندمدت پوزولانی – ۲۸ روز

شاخص اصلی که نمودار نشان می‌دهد این است که شدت این واکنش‌ها درهر خاک متفاوت است و کاملاً وابسته به نوع رس، درصد رس، کانی شناسی و نیاز واکنشی خاک به آهک می‌باشد.

در کائولینیت، افزایش مقدار آهک و زمان عمل‌آوری به‌طور کلی موجب افزایش مقاومت شد؛ به‌طوری‌که نمونه حاوی ۷/۵٪ آهک در سن ۲۸ روز به مقاومت حدود ۲/۰۸ مگاپاسکال رسید. این افزایش را می‌توان، با توجه به ماهیت رسی کائولینیت و روند رشد مقاومت با زمان، به بهبود ساختار خاک و احتمال پیشرفت واکنش‌های پوزولانی نسبت داد؛ هرچند تأیید مستقیم تشکیل محصولات سیمانی

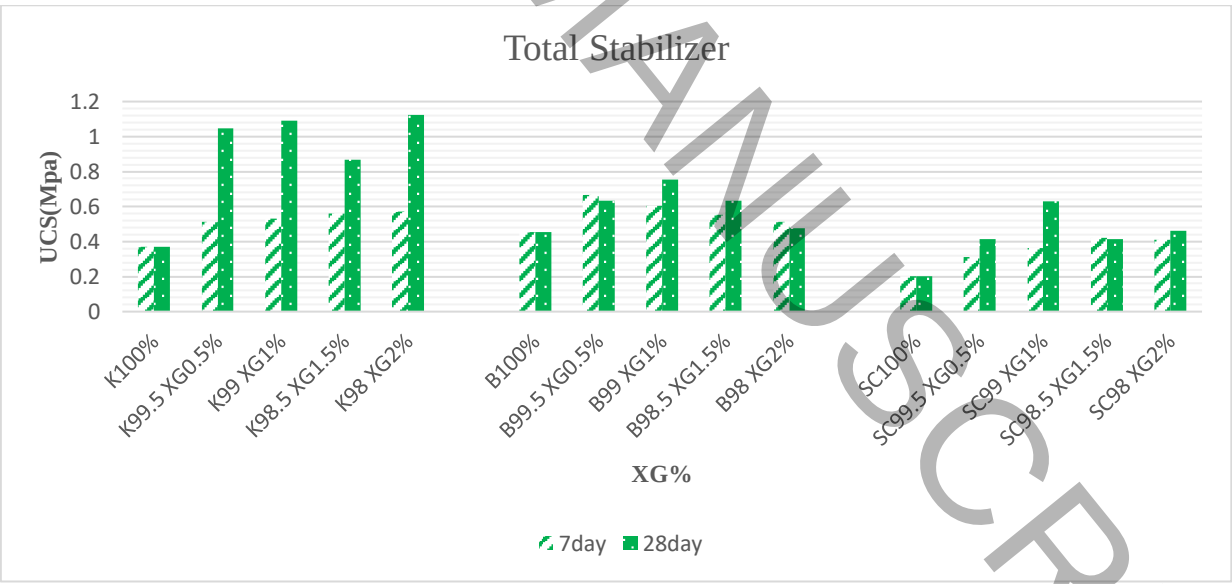
ACCEPTED MANUSCRIPT

نیازمند آزمون‌های ریزساختاری است. خاک کائولینیت، رس فعال است اما مثل بنتونیت بیش واکنشی نیست. ظرفیت مصرف آهک نسبتاً زیاد ولی کنترل شده دارد.

خاک بنتونیت، رس بسیار فعال و دارای سطح ویژه بالا است. در بنتونیت، رفتار مقاومت با افزایش مقدار آهک یکنواخت نبود .بیشترین عملکرد در ۲۸ روز مربوط به ۵٪ آهک با مقاومت حدود ۱/۶۷ مگاپاسکال بود، در حالی‌که مقادیر ۲/۵ و ۷/۵٪ افزایش مقاومت بسیار محدودتری نشان دادند. این رفتار غیرخطی می‌تواند به ویژگی‌های خاص بنتونیت، از جمله سطح ویژه بالا، ظرفیت تبادل کاتیونی و حساسیت زیاد به آب نسبت داده شود. بنابراین، افزایش بیشتر مقدار آهک الزاماً به افزایش مقاومت منجر نشده است و احتمالاً وجود مقدار بهینه آهک در این خاک نقش مهمی دارد.

خاک ماسه/رس، ساختار دانه ای—چسبنده دارد، واکنش آهک عمدتاً در بخش رسی انجام می‌شود، حضور ماسه باعث تهویه و کاهش انقباض—انبساط می‌شود، هر سه درصد باعث افزایش مقاومت شده‌اند، در خاک ماسه/رس نیز هر سه مقدار آهک موجب افزایش مقاومت شدند و بیشترین مقاومت ۲۸ روزه، برابر با ۰/۹۴۵ مگاپاسکال، در نمونه حاوی ۷/۵٪ آهک به دست آمد. حضور بخش رسی می‌تواند زمینه انجام واکنش‌های شیمیایی و افزایش چسبندگی را فراهم کند(افزایش مقاومت مشاهده‌شده می‌تواند با ادامه واکنش‌های شیمیایی و تغییرات ساختاری ناشی از عمل‌آوری مرتبط باشد)،در حالی‌که بخش ماسه‌ای در شکل‌گیری ساختار دانه‌ای خاک نقش دارد. در مجموع، نتایج نشان می‌دهد که مقدار بهینه آهک به نوع و ویژگی‌های خاک وابسته است؛ به‌گونه‌ای که ۷/۵٪ برای کائولینیت و خاک ماسه/رس و ۵٪ برای بنتونیت عملکرد مطلوب‌تری نشان داد. این تفاوت‌ها نشان‌دهنده ضرورت تعیین مقدار بهینه تثبیت‌کننده برای هر خاک به‌صورت مجزا است. این نتایج تأکید می کند که تعیین درصد بهینه تثبیت کننده وابسته به نوع خاک بوده و نمی‌توان یک مقدار ثابت را برای تمام خاک‌ها توصیه نمود.

۴-۱-۲- تحلیل کلی نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری خاک‌های تثبیت شده با زانتان گام



شکل ۱۲: نمودارنتایج کلی مقاومت فشاری(UCS)، خاک کائولینیت، بنتونیت و ماسه/رس تثبیت شده با زانتان گام

Figure ۱۲: Chart of overall Unconfined Compressive Strength (UCS) results for kaolinite, bentonite, and sand/clay stabilized with xanthan gum.

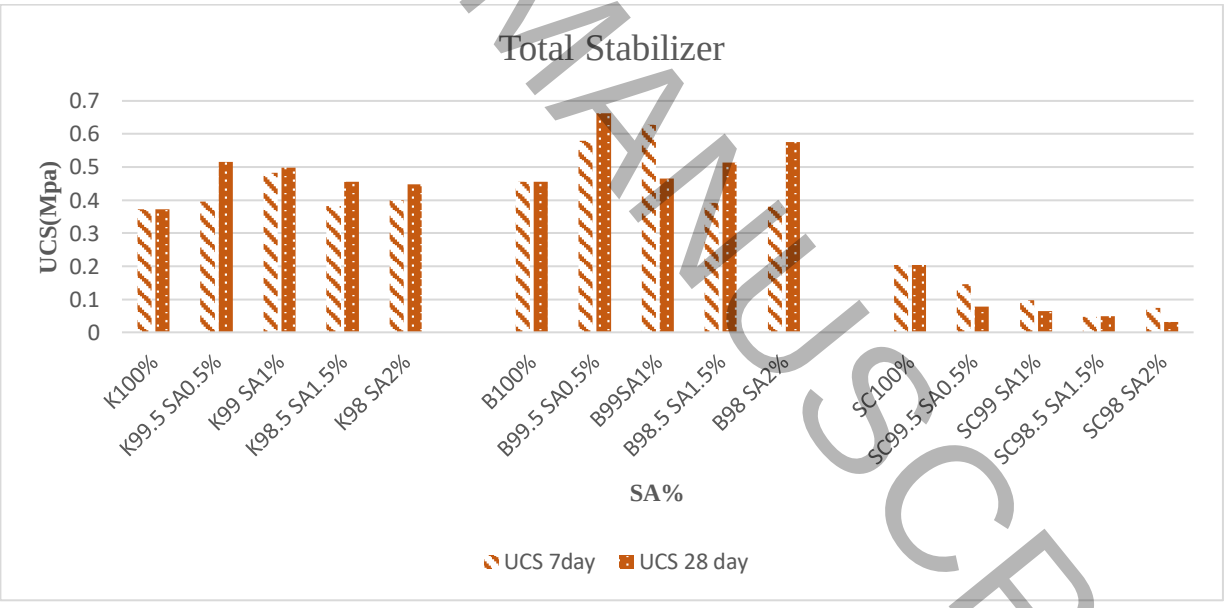
ACCEPTED MANUSCRIPT

در تحلیل و بررسی نمودار (شکل۱۲)، تحلیل نتایج زانتان‌گام نشان داد که میزان تأثیر این بیوپلیمر به نوع خاک، درصد مصرف و زمان عمل‌آوری وابسته است. در کائولینیت، افزایش زانتان‌گام تا ۲٪ موجب افزایش مقاومت فشاری شد و بیشترین مقاومت ۲۸ روزه، معادل ۱/۱۲ مگاپاسکال، در این درصد حاصل گردید. با این حال، در مقدار ۱/۵٪ کاهش نسبی مقاومت ۲۸ روزه مشاهده شد که می تواند با تغییر در توزیع رطوبت، تراکم و نحوه تشکیل ساختار پلیمری در نمونه مرتبط باشد. با توجه به اینکه در این پژوهش آزمون‌های ریزساختاری انجام نشده است، این موارد به‌عنوان مکانیسم‌های احتمالی در نظر گرفته می‌شوند.

در بنتونیت، بیشترین مقاومت ۲۸ روزه در مقدار ۱٪ زانتان‌گام، حدود ۰/۷۵ مگاپاسکال، به دست آمد و افزایش درصد بیوپلیمر به مقادیر بالاتر با کاهش مقاومت همراه شد. این رفتار می‌تواند ناشی از حساسیت بالای بنتونیت به آب و تغییر در وضعیت رطوبتی و تراکم نمونه باشد. در خاک ماسه/رس نیز بیشترین مقاومت ۲۸ روزه در مقدار ۱٪ زانتان‌گام، حدود ۰/۶۳ مگاپاسکال، مشاهده شد و افزایش مقدار بیوپلیمر به بیش از ۱٪ موجب کاهش مقاومت گردید [۳۲].

مقایسه نتایج نشان داد که مقاومت ۷ روزه در کائولینیت بیشترین مقدار را داشته و با افزایش زمان عمل‌آوری، رشد قابل توجهی در مقاومت مشاهده شده است. به‌طور کلی، نتایج UCS نشان می‌دهد که ۱٪ زانتان‌گام برای بنتونیت و خاک ماسه/رس و ۲٪ برای کائولینیت، مقادیر بهینه در محدوده‌های بررسی‌شده هستند. این تفاوت بیانگر وابستگی عملکرد زانتان‌گام به ویژگی‌های اولیه و ساختار خاک است. با توجه به نبود داده‌های XRD، SEM و FTIR در پژوهش حاضر، توضیحات مربوط به نحوه برهم‌کنش زانتان‌گام با کانی های خاک به‌عنوان تفسیرهای احتمالی ارائه می‌شوند و برای تأیید قطعی آن‌ها انجام مطالعات ریزساختاری در تحقیقات آینده پیشنهاد می‌شود.

۴-۱-۳ - تحلیل کلی نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری خاک‌های تثبیت شده با آلژینات سدیم



شکل ۱۳: نمودار نتایج کلی مقاومت فشاری(UCS)، خاک کائولینیت، بنتونیت و ماسه/رس با آلژینات سدیم

Figure ۱۳: Chart of overall Unconfined Compressive Strength (UCS) results for kaolinite, bentonite, and sand/clay soils treated with sodium alginate.

درنمودار(شکل۱۳)، به تحلیل و بررسی کلی نتیجه خاک کائولینیت، بنتونیت و ماسه/رس تثبیت شده با زانتان گام پرداخته شده است.

ACCEPTED MANUSCRIPT

مقایسه نهایی بین هر سه خاک:

- رشد مقاومت در تمام درصدها

۱) بنتونیت = کارایی متوسط اما وابسته به درصد مناسب

- ۰/۵٪ بهترین عملکرد
- در برخی درصدها افت دیده می‌شود
- حساسیت زیاد نسبت به مقدار SA

۲) کائولینیت = بهترین کارایی

- ریزدانه بودن
- ساختار لایه‌ای
- قابلیت ایجاد پیوند ژل–پلیمری پایدار

۳) ماسه/رس = ضعیف‌ترین عملکرد

- افت مقاومت در تمام درصدها
- عدم سازگاری با پلیمر
- عملکرد SA در این خاک غیر قابل توصیه

آلژینات سدیم در خاک‌های ریزدانه (کائولینیت و بنتونیت) عملکرد مؤثر دارد، اما اثر آن وابسته به مقدار مصرف است. بهترین درصد آلژینات سدیم برای هر دو خاک کائولینیت و بنتونیت برابر ۰/۵٪ است. در بنتونیت درصد ۱٪ به طور غیرمنتظره منجر به افت مقاومت ۲۸ روزه می‌شود، درحالی که درصدهای بالاتر رشد تدریجی دارند/ خاک ماسه/رس به دلیل وجود ذرات درشت، عدم امکان تشکیل شبکه ژلی و ایجاد جمع شدگی پلیمری، کمترین سازگاری را با آلژینات سدیم داشته و به‌طور کلی تثبیت با این ماده در این خاک توصیه نمی شود. کائولینیت بیشترین رشد مقاومت و پایدارترین رفتار را نشان داد، بنتونیت رفتار متوسط و ماسه/رس رفتار بسیار ضعیف داشت [۳۳].

۴-۲- تحلیل تغییرات درصد رشد مقاومت فشاری تک‌محوره در زمان ۷ و ۲۸ روز

به‌منظور بررسی دقیق‌تر رفتار زمانی خاک تثبیت شده، درصد رشد مقاومت فشاری تک‌محوره بین مدت ۷ و ۲۸ روز محاسبه شد و از مقاومت خاک شاهد در محاسبه این شاخص استفاده نشد. درصد رشد بیانگر میزان افزایش مقاومت در اثر ادامه واکنش‌های شیمیایی و فیزیکی افزودنی‌ها در دوره عمل‌آوری است. نتایج نشان داد نمونه‌هایی که درصد افزودنی مناسب‌تری داشتند، بیشترین رشد مقاومت را تجربه کردند؛ که این موضوع ناشی از افزایش تشکیل محصولات هیدراتاسیون، ایجاد پیوندهای پایدارتر و کاهش فضای خالی در ساختار خاک است. همچنین مشاهده شد که افزایش بیش‌از حد درصد افزودنی لزوماً باعث افزایش رشد مقاومت نمی‌شود و در برخی نمونه‌ها حتی موجب کاهش کارایی تثبیت گردید. این رفتار نشان دهنده وجود یک مقدار بهینه افزودنی برای هر نوع خاک است. نمودار درصد رشد همچنین مشخص کرد که برخی ترکیب‌ها رشد قابل توجهی در دوره ۷ تا ۲۸ روز داشته و عملکرد بلندمدت بهتری دارند، درحالی که برخی دیگر عمدتاً مقاومت اولیه خود را در سن ۷ روز به دست آورده و در ادامه افزایش کمی نشان می‌دهند. به‌طور کلی، تحلیل درصد رشد مقاومت، یک معیار کلیدی برای ارزیابی پایداری و کیفیت نهایی تثبیت خاک محسوب می‌شود. درصد رشد مقاومت از رابطه زیر به‌دست آمد:

$$Growth\,(\%) = \frac{UCS28 - UCS7}{UCS7} \times 100 \qquad (1)$$

ACCEPTED MANUSCRIPT

۴-۲-۱ - تغییرات درصد رشد مقاومت فشاری تک‌محوری خاک‌ها در اثر تثبیت با آهک



شکل ۱۴: نمودارنتایج کلی تغییرات مقاومت فشاری(UCS)، خاک کائولینیت، بنتونیت و ماسه/رس تثبیت شده با آهک

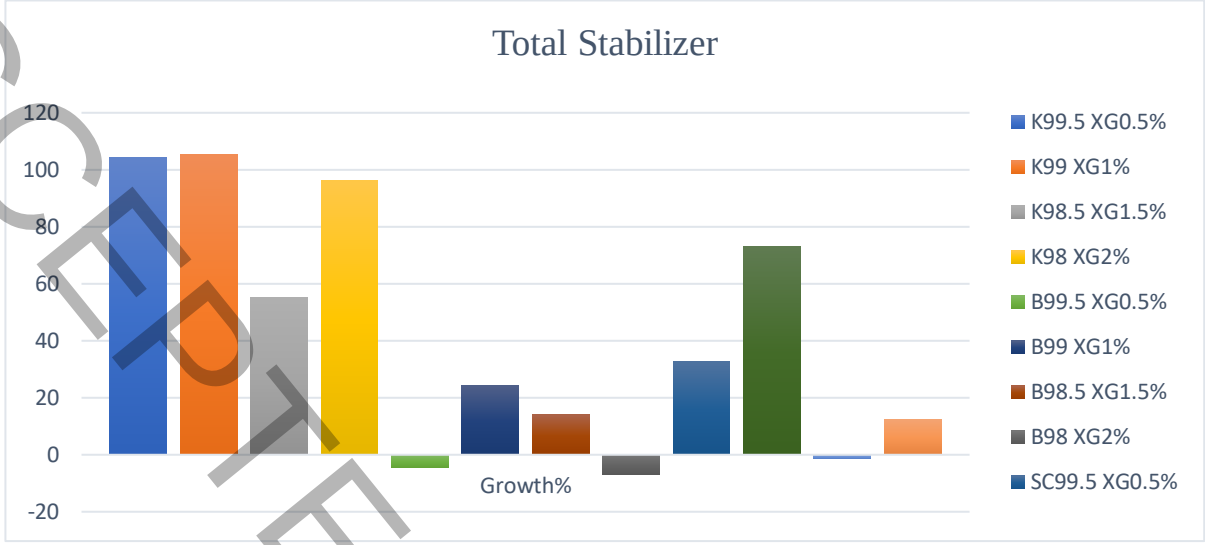
Figure ۱۴: Chart of overall results regarding changes in Unconfined Compressive Strength (UCS) for kaolinite, bentonite, and sand/clay stabilized with lime.

شکل(۱۴)، تغییرات درصد رشد مقاومت را در هر سه خاک کائولینیت، بنتونیت و ماسه/رس را با تثبیت کننده آهک نشان می‌دهد . برای ارزیابی رفتار زمانی نمونه‌های تثبیت شده، درصد رشد مقاومت بین ۷ و ۲۸ روز محاسبه شده است. این شاخص بیانگر میزان افزایش مقاومت دراثر ادامه واکنش‌های پوزولانی، تشکیل محصولات هیدراتاسیون آهک (CSH و CAH) و بهبود تدریجی ساختار خاک است. نتایج در سه گروه خاکی (کائولینیت، بنتونیت و ماسه/رس) به این صورت است که، روند افزایش درصد رشد نشان می‌دهد که کائولینیت واکنش پذیری نسبتاً خوبی با آهک دارد و با افزایش مقدار آهک، محصولات هیدراتاسیون بیشتری تشکیل می‌دهد. بیشترین رشد در ۷/۵٪ به دست آمده که نشان‌دهنده، فعال شدن مؤثر واکنش‌های پوزولانی، بهبود پیوندهای بین ذرات، افزایش قوام و تراکم پذیری است. این رفتار برای خاک های رسی با پلاستیسیته متوسط کاملاً طبیعی است و نشان می‌دهد کائولینیت در حضور آهک یک رشد پیوسته و قابل توجه دارد.

رفتار بنتونیت کاملاً غیرخطی و حساس نسبت به مقدار آهک است. رشد بسیار کم در ۲/۵٪ و ۷/۵٪ نشان می‌دهد مقدار آهک یا کم بوده یا بیش از حد مصرف شده و با ساختار بنتونیت سازگار نبوده است .رشد فوق‌العاده زیاد در ۵٪ (بیش از ۱۸۰٪) این مقدار نشان‌دهنده یک نقطه بهینه است که در آن، تبادل کاتیونی سدیم/کلسیم به‌خوبی انجام شده، تورم بنتونیت کاهش یافته، ساختار خاک تثبیت شده و ژل‌های هیدراتی تشکیل شده است. بنتونیت به دلیل ماهیت متورم‌شونده و سطح ویژه بالا، تنها در یک بازه بهینه از آهک رفتار مطلوب نشان می‌دهد؛ افزایش یا کاهش از این مقدار، کارایی تثبیت را کاهش می‌دهد. خاک ماسه/رس، این خاک رفتار میانه ای بین دو خاک دیگر دارد: رشد مناسب ولی نه خیلی بالا، نبود نقطه اوج بسیار شدید مانند بنتونیت و افزایش نسبتاً متعادل مقاومت در همه درصدها بوده است. کاهش رشد در مقدار ۵٪ و افزایش مجدد در ۷/۵٪ نشان می‌دهد که ۵٪ ممکن است کمی کمتر از مقدار مورد نیاز برای واکنش کامل باشد و۷/۵٪ آهک باعث تکمیل واکنش های پوزولانی و افزایش مقاومت شده است این رفتار برای خاک‌هایی با بافت دانه‌درشت تر و مقدار رس کمتر کاملاً طبیعی است. این مقایسه نشان می‌دهد که انتخاب مقدار بهینه آهک وابسته به نوع خاک بوده و برای هر خاک یک بازه مشخص برای دستیابی به بیشترین افزایش مقاومت وجود دارد.

ACCEPTED MANUSCRIPT

۴-۲-۲ -تغییرات درصد رشد مقاومت فشاری تک‌محوری خاک‌ها در اثر تثبیت با زانتان گام



شکل ۱۵: نمودارنتایج کلی تغییرات مقاومت فشاری(UCS)، خاک کائولینیت، بنتونیت و ماسه/رس تثبیت شده با زانتان گام

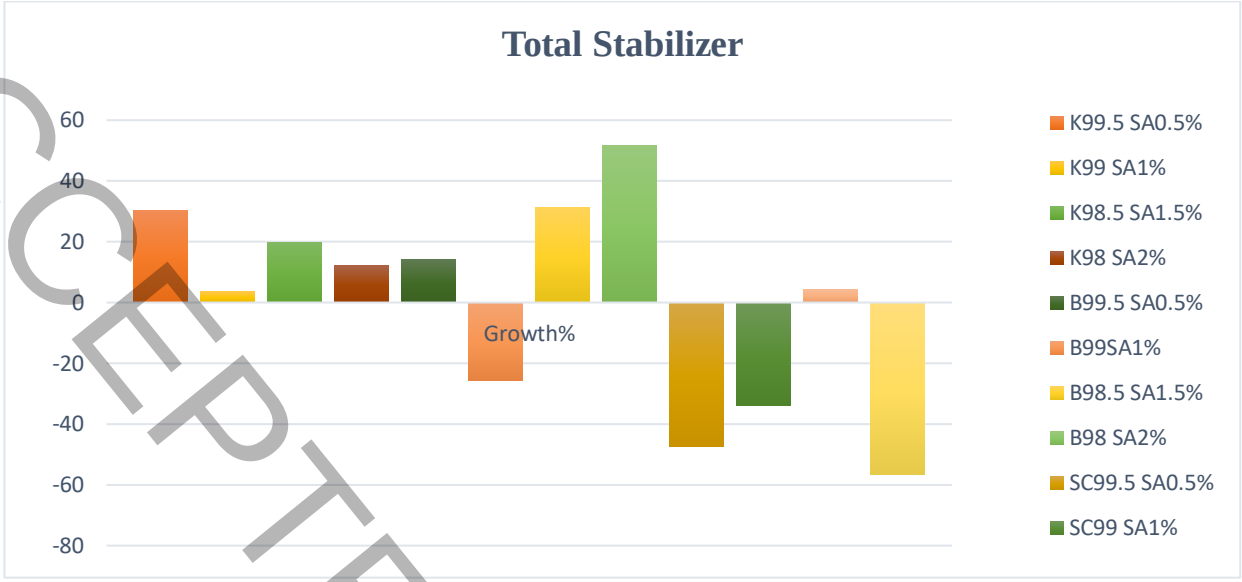
Figure ۱۵: Chart of overall results regarding changes in Unconfined Compressive Strength (UCS) for kaolinite, bentonite, and sand/clay stabilized with xanthan gum.

نمودار(۱۵)، تغییرات درصد رشد مقاومت را درهر سه خاک کائولینیت، بنتونیت و ماسه/رس را با تثبیت کننده زانتان‌گام نشان می دهد. در خاک کائولینیت بیشترین رشد در ۰/۵٪ و ۱٪ است (بیش از ۱۰۰٪)، که نشان می‌دهد: XG به سرعت باعث افزایش انسجام و بهبود ساختاررسی شده توانسته آب محبوس بین صفحات را تنظیم و پراکندگی ذرات را کنترل کند در این دو درصد، شبکه ژلی XG بیشترین کارایی را داشته است. کاهش چشمگیر رشد در ۱/۵٪ (۵۵٪)، احتمالاً مقدار XG بیش از حد بهینه بوده و باعث افزایش ویسکوزیته و محدودیت نفوذ آب و یون‌ها شده است. در نتیجه بخشی از ذرات رسی در شبکه ژل به دام افتاده اند و واکنش پذیری کاهش یافته است. افزایش مجدد در ۲٪ (۹۶٪) نشان‌دهنده آن است که در مقادیر بالاتر، دوباره ساختار ژل مانند پایدار تشکیل شده و مقاومت بهبود یافته. کائولینیت بهترین سازگاری را با زانتان‌گام دارد و حتی در مقادیر کم (۰/۵–۱٪) بیش از دو برابر رشد مقاومت نشان می‌دهد. در خاک بنتونیت نتایج نشان‌دهنده ناپایداری و رفتار غیرقابل پیش‌بینی است، مقادیر ۰/۵٪ و ۲٪ به‌جای افزایش مقاومت، کاهش مقاومت دارند. این رفتار ناشی از خاصیت تورمی شدید بنتونیت است که باعث می‌شود زانتان گام نتواند ساختار پایدار تشکیل دهد. بهترین عملکرد در ۱٪ (رشد ۲۴٪) در این مقدار، XG با بخشی از ذرات رسی واکنش داده و تا حدی ساختار را پایدار کرده، اما بازهم نسبت به سایر خاک‌ها عملکرد ضعیف‌تری دارد. کاهش مقاومت در ۲٪ در مقادیر بیشتر، ژل XG مانع از تراکم مناسب شده و باعث حفظ آب اضافی و کاهش مقاومت می‌شود. بنتونیت سازگاری بسیار ضعیفی با زانتان گام دارد و تنها در مقدار ۱٪ رشد قابل قبولی نشان می‌دهد. در سایر درصدها عملکرد XG حتی منفی است.

خاک ماسه/رس، بهترین عملکرد در ۱٪ (رشد ۷۳٪) XG توانسته با جذب مقدار مناسب آب، یک لایه ژلی بین ذرات ماسه و رس ایجاد کرده و ساختار را منسجم‌تر کند. عملکرد متوسط در ۰/۵٪ و ۲٪، مقدار کم باعث تشکیل ژل ناکافی و مقدار زیاد باعث افزایش بیش از حد چسبندگی و کاهش تراکم پذیری شده است. عملکرد منفی در ۱/۵٪، ژل بیش از حد باعث جداشدگی فاز ریزدانه از درشت‌دانه و کاهش یکپارچگی نمونه شده است. ماسه/رس سازگاری متوسط با XG دارد و مقدار بهینه آن ۱٪ است، جایی که بیشترین افزایش مقاومت ثبت شده است.

ACCEPTED MANUSCRIPT

۴-۲-۳- تغییرات درصد رشد مقاومت فشاری تک‌محوری خاک‌ها در اثر تثبیت با آلژینات سدیم



شکل ۱۶: نمودارنتایج کلی تغییرات مقاومت فشاری(UCS)، خاک کائولینیت، بنتونیت و ماسه/رس تثبیت شده با آآلژینات سدیم

Figure ۱۶: Chart of overall results regarding changes in Unconfined Compressive Strength (UCS) for kaolinite, bentonite, and sand/clay stabilized with sodium alginate.

شکل(۱۶)، تغییرات درصد رشد مقاومت را درهر سه خاک کائولینیت، بنتونیت و ماسه/رس را با تثبیت کننده آلژینات سدیم نشان می‌دهد. خاک کائولینیت، بیشترین رشد در ۰/۵٪ با مقدار ۳۰٪ مشاهده می‌شود. مقدار کم آلژینات سدیم باعث ایجاد چسبندگی بهینه و تشکیل ساختار ژلی پایدار در کائولینیت شده است .مقدار ۱٪ کمترین رشد (فقط ۳/۵٪) را نشان می‌دهد که در مقادیر بیشتر، شبکه ژلی ممکن است بخشی از آب نمونه را حفظ کرده و تراکم‌پذیری را کاهش دهد. روند کلی رفتار "پیک در مقدار کم" است یعنی مقدار بهینه در حدود ۰/۵٪ است و مقادیر بالاتر اثر افزایشی کمتری دارند .کائولینیت سازگاری خوبی با SA دارد، اما مقدار بهینه برای بیشترین رشد مقاومت حدود ۰/۵٪ است.

خاک بنتونیت، رشد بسیار زیاد در ۲٪ (بیش از ۵۱٪) به علت ساختار ورقه‌ای و خاصیت تورمی بالا، در درصدهای بیشتر SA واکنش مثبت‌تری نشان می‌دهد. SA با جذب آب و کاهش تورم، سبب تشکیل ساختار پایدارتر شده است. مقدار ۱٪ باعث کاهش شدید مقاومت (۲۵٪-) شده است، چون ژل SA می تواند باعث حبس آب و کاهش تراکم شود. افزایش شدید در ۱/۵٪ و ۲٪ این خاک به مقدار بالاتر SA نیاز دارد تا بتواند ساختار رسی خود را تثبیت کند. بنتونیت بر خلاف کائولینیت، به مقدار بیشتری از SA نیاز دارد و بیشترین کارایی در ۲٪ مشاهده می‌شود.

خاک ماسه/رس، بیشتر درصدها کاهش مقاومت دارند (مقادیر منفی) به دلیل ماهیت درشت دانه خاک SC ، پلیمر نمی‌تواند شبکه پایدار بین ذرات ماسه تشکیل دهد. ژل SA باعث افزایش آب انداختگی و کاهش چسبندگی می‌شود که فقط در ۱/۵٪ مقدار مثبت (۴/۳٪) مشاهده می‌شود، این مقدار نیز از مقاومت پایه‌ای خاک هم کمتر بوده وفقط نسبت به زمان عمل آوری ۷ روزه مقداری افزایش داشته است. بدترین عملکرد در ۲٪ (۵۶٪-) مقدار زیاد SA باعث افزایش آب دوستی و کاهش تراکم پذیری شده است. خاک SC سازگاری بسیار ضعیفی با SA دارد و استفاده از این پلیمر برای افزایش مقاومت این خاک توصیه نمی‌شود.

ACCEPTED MANUSCRIPT

۵- نتیجه گیری

۱. بررسی جامع رفتار سه نوع خاک کائولینیت، بنتونیت و ماسه/رس در برابر سه افزودنی آهک، زانتان‌گام و آلژینات سدیم نشان داد که عملکرد تثبیت کننده‌ها به شدت وابسته به ماهیت کانی‌شناسی و بافت هر خاک است. آهک در هر سه خاک رفتار نسبتاً پایدار و قابل پیش‌بینی داشت و با گذشت زمان، افزایش قابل توجهی در مقاومت فشاری ایجاد کرد؛ به ویژه درخاک‌های با ماهیت رسی (کائولینیت و بنتونیت) که واکنش‌های پوزولانی نقش اصلی را در رشد مقاومت ایفا می‌کنند. بیشترین بهبود مقاومت ناشی از آهک در بنتونیت مشاهده شد (حدود۱۸۰درصد رشد مقاومت) که به دلیل سطح ویژه بالا و ظرفیت تبادل کاتیونی زیاد، شرایط مطلوب تری برای واکنش با یون های Ca^{2+} فراهم می‌کند. در خاک ماسه/رس نیز رفتار آهک مثبت بوده و ترکیب ۷/۵٪ عملکرد بهینه‌ای در افزایش مقاومت فشاری ۲۸ روزه نشان داد.

۲. بیوپلیمر زانتان‌گام رفتاری متفاوت وغیرخطی نشان داد و میزان اثرگذاری آن به ساختار خاک وابسته بود. این تثبیت کننده در خاک‌های ریزدانه‌تر (کائولینیت) بیشترین کارایی را داشت و موجب افزایش چشمگیر مقاومت و رشد درصدی در دوره ۲۸ روز شد. در خاک بنتونیت نیز افزایش مقاومت مشاهده شد، اما شدت آن کمتر از آهک بود. در خاک ماسه/رس، زانتان‌گام اثر مثبت داشت اما عملکرد آن به مقدار مصرف وابسته بود و مقادیر بالا به‌دلیل اشباع ماتریس و کاهش انعقاد دانه‌ها باعث افت نسبی عملکرد شدند.

۳. آلژینات سدیم نیز رفتاری نسبتاً مشابه زانتان‌گام داشت، اما میزان بهبود مقاومت در اکثر موارد کمتر بود. این بیوپلیمر در خاک کائولینیت بهترین عملکرد را نشان داد و موجب پیوستگی مناسب بین دانه‌ها شد. در بنتونیت، ناپایداری ناشی از تغییرات رطوبتی و تورمی باعث شد رفتار آلژینات در همه درصدها یکسان یا حتی کاهشی باشد. در ماسه/رس، آلژینات سدیم بهبودی نداشته بلکه هم در دوره‌ی عمل‌آوری ۷و۲۸ روز مقاومت خاک را از مقاومت پایه‌ای آن نیز کاهش داده است.

۴. نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری نشان داد که نمونه‌های تثبیت‌شده با زانتان‌گام در سن ۲۸ روزه، توانسته‌اند مقاومتی معادل نمونه‌های آهکی در سن ۷ روزه و مقاومتی نزدیک به نمونه‌های آهکی در سن ۲۸ روزه ایجاد کنند. این موضوع بیانگر توان بالقوه زانتان‌گام در بهبود مقاومت خاک در بازه زمانی میان‌مدت بوده و نشان می‌دهد که این بیوپلیمر می‌تواند به‌عنوان گزینه‌ای جایگزین یا مکمل برای تثبیت‌کننده‌های مرسوم، به‌ویژه در ملاحظات زیست‌محیطی، مورد توجه قرار گیرد.

۵. مقایسه کلی سه افزودنی نشان می‌دهد که آهک پایدارترین و مؤثرترین تثبیت کننده در دوره زمانی بلندمدت است و برای خاک‌های رسی، بهترین گزینه محسوب می‌شود. زانتان‌گام بیشترین درصد رشد مقاومت را در کوتاه‌مدت فراهم می‌کند و از نظر محیط زیستی و اقتصادی نیز گزینه‌ای موفق است. آلژینات سدیم عملکرد متوسط اما قابل قبول دارد و برای کاربردهایی که نیازمند انعطاف‌پذیری و رفتارسازگار با محیط زیست هستند، مناسب است. به طور کلی، نوع افزودنی بهینه برای هر خاک متفاوت است و انتخاب آن باید بر اساس سازوکار واکنش خاک و ماده تثبیت کننده، شرایط عمل‌آوری و هدف پروژه انجام شود. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که ترکیب ویژگی‌های آهک در بلندمدت و بیوپلیمرها در کوتاه‌مدت، چشم‌انداز مناسبی برای توسعه روش‌های نوین تثبیت خاک فراهم می‌کند و زمینه‌تحقیقاتی را برای مطالعات‌آینده ایجاد می‌نماید.

۶- مراجع

[1] Beigi. L., Study and Stabilization of Soft Clay Using Blast Furnace Slag, Sodium Silicate. and Lime. 1396. (in Persian).

[2] T.S. Amhadi and G.J.A. (Eds.). Overview of soil stabilization methods in road construction. in: Sustainable Solutions for Railways and Transportation Engineering.The Official International Congress of the Soil-Structure Interaction Group in Egypt (SSIGE). 2019.

[3] Dr. Ali Ghanbari. D.M.E.M.M., Fundamentals of Soil Improvement. 1398. (in Persian).

[4] Sun, H., Hou, M., Chen, C., Ge, X., 2020a. Microstructure investigation of soft clay subjected to triaxial loading/ Eng. Geol. https://doi.org/10.1016/j. enggeo.2020.105735, 105735.

[5] Wu, Z., Deng, Y., Cui, Y., Chu, C., Feng, Q., 2020. Geological investigation of the settlement behaviour of two highways in Lianyungang region. Eng. Geol. https:// doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105648, 105648.

ACCEPTED MANUSCRIPT

[6] Ayeldeen, M., Kitazume, M., 2017. Using fiber and liquid polymer to improve the behaviour of cement-stabilized soft clay. Geotext. Geomembranes 45 (6), 592–602. https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2017.05.005.
[7] Kafodya, I., Okonta, F., 2018/ Effects of natural fiber inclusions and pre-compression on the strength properties of lime-fly ash stabilised soil. Construct.Build.Mater.170, 737–746. https://doi.rg/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.194.
[8] Akbari, Sharafi, Goodarzi. ,2020, Effect of polypropylene fiber inclusion in kaolin clay stabilized with lime and nano-zeolite considering temperatures of 20 and 40 °C, Bulletin of Engineering Geology and the Environment. https://doi.org/10.1007/s10064-020-02028-x
[9] Alrubaye, A.J., Hasan, M. Fattah, M/Y., 2016. Stabilization of soft kaolin clay with silica fume and lime. Int. J. Geotech. Eng. 11 (1), 90–96. https://doi.org/10.1080/ 19386362/2016/1187884.
[10] Abdullah, H.H., Shahin, M.A., Walske, M.L., Karrech, A., 2019. Systematic approach to assessing the applicability of fly-ash-based geopolymer for clay stabilization. Can. Geotech. J/ 57 (9), 1356–1368/ https://doi.org/10.1139.cgj-2019-0215/ Aci Committee 230, 2009. Report on Soil Cement/ American Concrete Institute.
[11] Hamid Reza Akbari, Hassan Sharafi, Amir Reza Goodarzi., 2021. Effect of polypropylene fiber and nano-zeolite on stabilized soft soil under wet-dry cycles. Geotextiles and Geomembranes.
[12] HR Akbari., H Sharafi., 2025. Enhanced stabilization of weak materials derived from highly weathered slate rock under harsh climatic conditions/ Bulletin of Engineering geology and the Environment 84 (11), 46 , 2025.
[13] I. Chang, J. Im, and G.-C. Cho, "Introduction of Microbial Biopolymers in Soil Treatment for Future Environmentally-Friendly and Sustainable Geotechnical Engineering," Sustainability, vol. 8, no. 3, p. 251, Mar. 2016, doi: 10.3390.su8030251.
[14] Prusinski, J., & Bhattacharja, S. 1999. Effectiveness of Portland cement and lime in stabilizing clay soils. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, (1652), 215-227.
[15] C.Chen, L. Wu, M/ Perdjon, X. Huang, Y. Peng., 2019. The drying effect on xanthan gum biopolymer treated sandy soil shear strength, Construction and Building Materials.
[16] Sakr. M. A., M. A. Shahin and Y.M. Metwally., 2009. Utilization of lime for stabilizing soft clay soil of high organic content. Geotech.Geol.Eng. 27: 105-113.
[17] Pradhan. P.K.and J. D. P/ Sahoo., 2010. Effect of lime stabilized soil cushion on strength behaviour of expansive soil. Geotech. Geol.Eng. 28: 889-897.
[18] Maaitah. O. 2012. Soil stabilization by chemical agent. Geotech.Geol. Eng. 30: 1345-1356.
[19] Ilhan Chang, Minhyeong Lee, An Thi Phuong Tran, Sojeong Lee, Yeong-Man Kwon, Jooyoung Im, Gye-Chun Chob., 2020. Review on biopolymer-based soil treatment (BPST) technology in geotechnical engineering practices. .https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100385.
[20] Amin Bakhshizadeh , Navid Khayat, Suksun Horpibulsuk., 2022. Surface stabilization of clay using sodium alginate. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01006.
[21] Hadi Fatehi, Dominic E.L. Ong, Jimmy Yu , Ilhan Chang., 2024, Sustainable soil treatment: Investigating the efficacy of carrageenan biopolymer on the geotechnical properties of soil. journal homepage:. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134627
[22] Mahdieh Azimia,*, Amin Soltanib,c, Mehdi Mirzababaeia, Mark B.Jaksad, Nanjappa Ashwathe., 2024.Biopolymer stabilization of clayey soil. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2023.12.020.
[23] Sahand Fateh , Yasaman Mansourkiaei, Meghdad Payan, Mohammad Mahdi Shalchian , Mahyar Arabani, Payam Zanganeh Ranjbar., 2025. A comparison of temperature and freeze-thaw effects on high-swelling and low-swelling soils stabilized with xanthan gum/ https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103719.
[24] Fatemeh Abbasi, Asskar Janalizadeh Choobbasti, Kaveh Roushan., 2025.Advanced stabilization of clayey sand using xanthan gum: insights from multiscale evaluation and ultrasonic pulse velocity analysis/ https://doi/org/10/1016/j/rineng/2025/104419.
[25] Sumit Kumar1, Brahm Deo Yadav, Rohit Raj., 2024. A review on the application of biopolymers (xanthan, agar and guar) for sustainable improvement of soil/ .https://doi.org/10.1007.s42452-024-06087-7.

ACCEPTED MANUSCRIPT

[26] Mahdi Azimi1 · Mehdi Mirzababaei1 · Amin Soltani2,3 Mark B.Jaksa., 2025. Reducing Lime Consumption Demand for Stabilizing High Plasticity Clay.
[27] Mehdi Ebadi-Jamkhaneh [1], Mohammad Ali Arjomand [2], Mohsen Bagheri [3,*], Ali Asgari [4,*], Pouya Nouhi Hefzabad [2], Sahar Salahi [5] and Yashar Mostafaei [6]., 2025. Experimental Study on the Pullout Behavior of Helical Piles in Geogrid-Reinforced Dense Shahriyar Sand/ Buildings2025, 15(16), 2963;https://doi.org/10.3390.buildings15162963
[28] Amin Rezaeian [1], Mohammad Davoodi [2], Mohammad Kazem Jafari [2], Mohsen Bagheri [3], Ali Asgari [4,*] and Hassan Jafarian Kafshgarkolaei [5],. 2025. Optimization of Earth Dam Cross-Sections Using the Max–Min Ant System and Artificial Neural Networks with Real Case Studies. ;https://doi.org/10.3390.buildings16030501.
[29] I. Chang, et al., 2015. Effects of Xanthan gum biopolymer on soil strengthening, Constr. Build. Mater. 74 (2015) 65–72.
[30] Ali Asgari [1], Mohammad Ali Arjomand [2], Mohsen Bagheri [3,*], Mehdi Ebadi-Jamkhaneh [4] and Yashar Mostafaei [5],. 2026. Assessment of Experimental Data and Analytical Method of Helical Pile Capacity Under Tension and Compressive Loading in Dense Sand. https://doi.org/10.3390.buildings15152683.
[31] Babak Naeim [1,*], Ali Javadzade Khiavi [1], Erfan Khajavi [2], Amir Reza Taghavi Khanghah [2], Ali Asgari [3,*], RezaTaghipour [3] and Mohsen Bagheri [4],. 2025. Machine Learning Approaches for Fatigue Life Prediction of Steel and Feature Importance Analyses/ ;https://doi.org/10/3390.infrastructures10110295.
[32] Qian-Feng Gao 1,* , Xue-Ke Shi 1, Ling Zeng 2, Hui-Cong Yu 2,3 1 andJun-Xia Hu 4,. 2025. Characterization of the Mechanical Behavior and Stabilization Mechanism of Soft Soil Treated with Xanthan Gum Biopolymer. https://doi.org/10.3390.polym17111532.
[33] Dr.Hassan Sharafi, D.H.A., Solmaz Rostamian. *Using biopolymers to enhance stabilization operations in soft clay substrates*.1404.(in Persian).

ACCEPTED MANUSCRIPT

Using biopolymers to improve stabilization operations in soft clay substrates

ABSTRACT

Problematic soils require effective stabilization methods due to their low strength and undesirable behavior. This study investigated and compared the performance of lime, xanthan gum (XG), and sodium alginate (SA) in enhancing the unconfined compressive strength (UCS) of three soil types: kaolinite, bentonite, and a sand-clay mixture (80% standard sand and 20% local clay). Samples were prepared with lime contents of 2/5%, 5%, and 7/5% and biopolymer contents of 0/5%, 1%, 1/5%, and 2%, and were subjected to UCS testing after 7 and 28 days of curing. The results indicated that the performance of the stabilizers depended on the soil type and curing duration. Lime yielded the greatest long-term strength improvement across all three soil types; after 28 days, peak strengths reached 2/08 MPa for kaolinite (with 7/5% lime), 1/67 MPa for bentonite (with 5% lime), and 0/95 MPa for the sand-clay mixture (with 7/5% lime). Xanthan gum exhibited non-linear behavior, with optimal dosages of 2%, 1%, and 1% for kaolinite, bentonite, and the sand-clay mixture, respectively. In contrast, sodium alginate showed more limited effectiveness, actually reducing the strength of the sand-clay mixture at all tested dosages. Overall, the results highlight the influence of soil characteristics on the performance of stabilizers and demonstrate that selecting the appropriate type and dosage of the stabilizing agent plays a crucial role in achieving effective soil improvement and enhancing soil strength.

KEYWORDS

Keywords: Soil stabilization, Soft clay, lime, biopolymer, xanthan gum.

ACCEPTED MANUSCRIPT

1. Beigi. L., *Study and Stabilization of Soft Clay Using Blast Furnace Slag, Sodium Silicate*. *and Lime*. 1396. (in Persian).
2. T.S. Amhadi and G.J.A. (Eds.). *Overview of soil stabilization methods in road construction*. *in: Sustainable Solutions for Railways and Transportation Engineering*.The Official International Congress of the Soil-Structure Interaction Group in Egypt (SSIGE). 2019.
3. Dr. Ali Ghanbari. D.M.E.M.M., *Fundamentals of Soil Improvement*. 1398. *(in Persian).*
4. Sun. H., et al., *Microstructure investigation of soft clay subjected to triaxial loading*. *Eng*. 2020.
5. Wu, Z., et al., *Geological investigation of the settlement behaviour of two highways in Lianyungang region*. *Eng*. *Geo*. 2020.
6. Ayeldeen. M. and M.Kitazume. *Using fiber and liquid polymer to improve the behaviour of cement-stabilized soft clay*.Geotext. Geomembranes 45 (6). 592–602, 2017.
7. Kafodya.I. and F. Okonta. *Effects of natural fiber inclusions and pre-compression on the strength properties of lime-fly ash stabilised soil*.Construct.Build، Mater. 170, 737–746. 2018.
8. Akbari. Sharafi. and Goodarzi., *Effect of polypropylene fiber inclusion in kaolin clay stabilized with lime and nano-zeolite considering temperatures of 20 and 40 °C*، Bulletin of Engineering Geology and the Environment.2020.
9. Alrubaye. A.J., M.Hasan. and M.Y. Fattah. *Stabilization of soft kaolin clay with silica fume and lime*، Int. J.Geotech.Eng. 11 (1). 90–96. 2016.
10. Abdullah. H.H., et al., *Systematic approach to assessing the applicability of fly-ash-based geopolymer for clay stabilization*. *Can*. Geotech. J.57 (9). 1356–1368. 2019.
11. Hamid Reza Akbari. Hassan Sharafi. and A.R. Goodarzi. *Effect of polypropylene fiber and nano-zeolite on stabilized soft soil under wet-dry cycles*، Geotextiles and Geomembranes. 2021.
12. HR Akbari. and H. Sharafi. *Enhanced stabilization of weak materials derived from highly weathered slate rock under harsh climatic conditions*. Bulletin of Engineering geology and the Environment 84 (11). 46. 2025., 2025.
13. I. Chang. J. Im.and a.G.-C. Cho, *Introduction of Microbial Biopolymers in Soil Treatment for Future Environmentally-Friendly and Sustainable Geotechnical Engineering*. Sustainability, vol. 8, no. 3. p. 251.Mar. 2016.
14. Prusinski.J، and S. & Bhattacharja. *Effectiveness of Portland cement and lime in stabilizing clay soils*، *Transportation Research Record*. Journal of the Transportation Research Board. (1652). 215-227. 1999.
15. C. Chen. et al., *The drying effect on xanthan gum biopolymer treated sandy soil shear strength*.Construction and Building Materials. 2019.
16. Sakr.M. A., M.A. Shahin. and a.Y.M. Metwally. *Utilization of lime for stabilizing soft clay soil of high organic content*. Geotech. Geol. Eng.27: 105-113, 2009.
17. K., P.P.and a.J.D.P. Sahoo, *Effect of lime stabilized soil cushion on strength behaviour of expansive soil*. Geotech. Geol. Eng. 28: 889-897., 2010.
18. O. M., *Soil stabilization by chemical agent*. ، Geotech، Geol. Eng. 30: 1345-1356., 2012.
19. Ilhan Chang. et al., *Review on biopolymer-based soil treatment (BPST) technology in geotechnical engineering practices*.2020.
20. Amin Bakhshizadeh . N.Khayat.and S.H. , *Surface stabilization of clay using sodium alginate*. 2022.
21. Hadi Fatehi. et al., *Sustainable soil treatment: Investigating the efficacy of carrageenan biopolymer on the geotechnical properties of soil*. 2024.

22. Mahdieh Azimia. et al., *Biopolymer stabilization of clayey soil*. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2023.
23. Sahand Fateh . et al. *A comparison of temperature and freeze-thaw effects on high-swelling and low-swelling soils stabilized with xanthan gum*، 2025.
24. Fatemeh Abbasi. Asskar Janalizadeh Choobbasti. and K. Roushan. *Advanced stabilization of clayey sand using xanthan gum: insights from multiscale evaluation and ultrasonic pulse velocity analysis*، 2025.
25. Sumit Kumar1. Brahm Deo Yadav. and R. Raj. *A review on the application of biopolymers (xanthan, agar and guar) for sustainable improvement of soil*. 2024.
26. M،A., et al., *Reducing Lime Consumption Demand for Stabilizing High Plasticity Clay*. 2025.
27. Mehdi Ebadi-Jamkhaneh 1. et al., *Experimental Study on the Pullout Behavior of Helical Piles in Geogrid-Reinforced Dense Shahriyar Sand*، Buildings2025. 15(16). 2963. 2025.
28. Amin Rezaeian 1. et al. *Optimization of Earth Dam Cross-Sections Using the Max–Min Ant System and Artificial Neural Networks with Real Case Studies*.2025.
29. I. Chang. e.a., *Effects of Xanthan gum biopolymer on soil strengthening*. Constr. Build، Mater. 74 (2015) 65–72. 2015.
30. Ali Asgari 1. et al., *Assessment of Experimental Data and Analytical Method of Helical Pile Capacity Under Tension and Compressive Loading in Dense Sand*.2026.
31. Babak Naeim 1. et al., *Machine Learning Approaches for Fatigue Life Prediction of Steel and Feature Importance Analyses*.2025.
32. Qian-Feng Gao 1. et al،. *Characterization of the Mechanical Behavior and Stabilization Mechanism of Soft Soil Treated with Xanthan Gum Biopolymer*. 2025.
33. Dr.Hassan Sharafi, D.H.A., Solmaz Rostamian. *Using biopolymers to enhance stabilization operations in soft clay substrates*.1404.(in Persian).

ACCEPTED MANUSCRIPT