

بررسی آزمایشگاهی تثبیت زیستی و شیمیایی بر روی خاک ماسه‌ای در حضور خاک

ریزدانه

حلیمه نامداری^۱، محسن کرامتی^۲، فهیمه رفیعی^۳

۱- دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، سمنان، ایران، Halimeh996@gmail.com

۲- دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، سمنان، ایران، Keramati@shahroodut.ac.ir

۳- دانشکده فنی و مهندسی دامغان، دامغان، سمنان، ایران، F.Rafiee@du.ac.ir

چکیده

تثبیت شیمیایی خاک یکی از روش‌های متداول برای بهبود خواص ژئوتکنیکی خاک‌های مسئله‌دار، از جمله افزایش ظرفیت باربری و کاهش نفوذپذیری، محسوب می‌شود. با این حال، نگرانی‌های زیست‌محیطی مرتبط با این روش، پژوهشگران را به سمت استفاده از روش‌های سازگارتر با محیط زیست سوق داده است. در این پژوهش، عملکرد بیوپلیمرهای گوارگام و زانتان‌گام به‌عنوان روش‌های تثبیت زیستی، در مقایسه با تثبیت شیمیایی با سیمان و آهک، بررسی شد. آزمایش تک‌محوری برای تعیین مقاومت فشاری محصور نشده نمونه‌های ماسه مخلوط با درصد‌های وزنی مختلف خاک رس کائولن (۰، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درصد) انجام شد. نمونه‌ها با غلظت‌های مختلف گوارگام و زانتان‌گام (۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد وزنی) و همچنین سیمان (۵، ۱۰ و ۱۵ درصد وزنی) و آهک (۴، ۶، ۸ و ۱۰ درصد وزنی) تثبیت شدند. تاثیر زمان عمل‌آوری (۷، ۱۴ و ۲۸ روز) نیز بر مقاومت فشاری نمونه‌ها بررسی شد. نتایج نشان داد که با افزایش غلظت سیمان، گوارگام و زانتان‌گام، مقاومت فشاری بهبود می‌یابد، درحالی‌که در تثبیت با آهک، حداکثر مقاومت فشاری در غلظت ۸ درصد مشاهده شد. همچنین، در نمونه‌های تثبیت‌شده با گوارگام و زانتان‌گام، افزایش غلظت و زمان عمل‌آوری منجر به افزایش مقاومت فشاری شد، به‌طوری‌که گوارگام عملکرد بهتری نسبت به زانتان‌گام نشان داد. به‌کارگیری بیوپلیمرهای گوارگام و زانتان‌گام به‌طور مؤثری موجب افزایش مقاومت فشاری محصور نشده خاک شده و می‌تواند جایگزین مناسبی برای مواد شیمیایی باشد. با این حال، نتایج نشان داد که در روش تثبیت زیستی، هرچند افزایش میزان رس و غلظت افزودنی موجب افزایش مقاومت می‌شود، اما نرخ رشد مقاومت با افزایش درصد رس کاهش می‌یابد.

کلمات کلیدی

تثبیت خاک، ماسه رس‌دار، گوارگام، زانتان‌گام، مقاومت فشاری محصور نشده

با گسترش شهرنشینی و توسعه صنعتی، بسیاری از مناطقی که پیش تر نامناسب یا حاشیه‌ای محسوب می‌شدند، برای اهدافی همچون ساخت شالوده، مسیرهای حمل‌ونقل و پروژه‌های عمرانی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. با این حال، به‌منظور تثبیت و بهبود ویژگی‌های مکانیکی خاک در این مناطق، استفاده از روش‌های مختلف بهسازی ضرورت دارد [۱]. یکی از رایج‌ترین این روش‌ها، تثبیت شیمیایی است که به‌طور سنتی از موادی مانند آهک و سیمان بهره می‌گیرد. با وجود اثربخشی این مواد، استفاده از آن‌ها مشکلات زیست‌محیطی متعددی، از جمله انتشار گازهای گلخانه‌ای و اثرات مخرب بر تغییرات آب‌وهوایی، به همراه دارد [۲]. از این رو، ضرورت استفاده از روش‌های بهینه و سازگار با محیط زیست بیش از پیش احساس می‌شود [۳، ۴].

یکی از روش‌های جایگزین و پایدار، استفاده از بیوپلیمرهاست. بیوپلیمرها ماکرومولکول‌های زیستی هستند که از واحدهای تکرارشونده‌ای به نام مونومر تشکیل شده و به سه دسته اصلی شامل نوکلئیک اسیدها، پروتئین‌ها و پلی‌ساکاریدها تقسیم می‌شوند [۵]. این مواد با ویژگی‌هایی نظیر چسبندگی و توانایی لخته‌سازی، نقش مؤثری در بهبود خواص مکانیکی خاک دارند.

تحقیقات گسترده‌ای درباره تثبیت شیمیایی و زیستی انواع خاک انجام شده است. در یکی از این مطالعات، عوامل مؤثر بر مقاومت فشاری طولانی مدت خاک رس ماسه‌ای تثبیت شده با آهک بررسی شده و نتایج نشان داده است که افزایش میزان آهک، مقاومت فشاری محصور نشده خاک را به‌طور غیرخطی در طول دوره عمل‌آوری افزایش می‌دهد [۶]. در سال ۲۰۰۸، جانگ و بابت، کارایی و قابلیت تراکم پس از تثبیت خاک‌های آهکی را ارزیابی کردند و تأثیر مثبت این روش را تأیید نمودند [۷]. بیلماز و جیولکوغلو نیز نشان دادند که استفاده از آهک در خاک‌های رسی موجب کاهش پتانسیل انقباض و بهبود خواص این نوع خاک‌ها می‌شود [۸].

مطالعاتی درباره تثبیت خاک دانه‌ای با سیمان نیز انجام شده است. این مطالعات گزارش کرده‌اند که تثبیت با سیمان موجب افزایش قابل توجه حداکثر تنش محوری شده، اما کرنش متناظر با حداکثر تنش محوری کاهش می‌یابد [۹]. همچنین، درصد ذرات ریزدانه تأثیر مهمی بر خواص مکانیکی خاک ماسه‌ای تثبیت شده با سیمان دارد، به طوری که حتی درصدهای کم ریزدانه نیز می‌تواند مقاومت و سختی خاک را افزایش دهد [۱۰].

با وجود موفقیت روش‌های شیمیایی در بهبود رفتار خاک، چالش‌هایی همچون مصرف زیاد انرژی، مصرف بالای آب و تأثیرات منفی زیست‌محیطی مانند انتشار گاز CO_2 ، استفاده از این روش‌ها را محدود می‌کند [۱۱]. از این رو، مواد جایگزین سازگار با محیط زیست، مانند بیوپلیمرها، به‌عنوان راه حلی نوین مطرح شده‌اند. در تثبیت زیستی، از بیوپلیمرهایی با خاصیت چسبندگی و ژل‌کنندگی استفاده می‌شود [۱۲]. این مواد از طریق واکنش‌های شیمیایی میان گروه‌های عاملی بیوپلیمر و مولکول‌های خاک، پیوندهای یونی یا کووالانسی ایجاد کرده و ذرات خاک را به یکدیگر متصل می‌کند [۱۳]. به‌عنوان مثال، زانتان گام و گوارگام از جمله بیوپلیمرهایی هستند که در مهندسی ژئوتکنیک مورد توجه قرار گرفته‌اند. این مواد به دلیل راندمان بالا و هزینه اقتصادی مناسب، کارایی خود را در تثبیت خاک نشان داده‌اند [۱۴، ۱۵].

چانگ و همکاران در سال ۲۰۱۵ تأثیر حضور زانتان گام بر بهبود خواص خاک‌های درشت‌دانه و ریزدانه را مورد مطالعه قرار دادند و گزارش کردند، اثر تقویتی زانتان گام در حضور ریزدانه افزایش می‌یابد که این امر به دلیل پیوندهای هیدروژنی میان زانتان گام و سطوح باردار خاک‌های رسی می‌باشد. با این حال این پیوند و تعامل به معنای این نیست که زانتان گام در تثبیت ماسه ضعیف بی اثر است [۱۶]. لطیفی و همکاران نیز تأثیر زانتان گام و گوارگام را در بهبود رفتار برشی خاک‌های دانه‌ای بررسی کرده و دریافتند که افزایش غلظت این بیوپلیمرها و مدت زمان عمل‌آوری، مقاومت برشی خاک را به‌طور قابل توجهی افزایش می‌دهد [۱۷].

در سال ۲۰۲۱، بوزیگیت و همکاران به بررسی تأثیر بیوپلیمرهای زانتان گام و گوارگام بر رفتار مکانیکی خاک رس کائولن پرداختند. آن‌ها دریافتند که این بیوپلیمرها حد مایع، وزن مخصوص خشک و مقاومت فشاری خاک را افزایش داده و رطوبت بهینه را کاهش می‌دهند [۱۸]. همچنین، تحقیقات اخیر نشان داده‌اند که افزودن مقدار کمی از این بیوپلیمرها به خاک باقیمانده رسوبی موجب افزایش pH و بهبود مقاومت فشاری محصور نشده می‌شود [۱۹]. مطالعه اولویرا و کابرال در سال ۲۰۲۳ نشان داد که تثبیت زیستی خاک ماسه‌ای سیلتی با زانتان گام می‌تواند منجر به افزایش مقاومت فشاری، بهبود رفتار تنش-کرنش و تراکم‌پذیری یک‌بعدی شود و این تأثیرات با افزایش مقدار زانتان گام بیشتر می‌شود [۲۰].

یافته‌های رونگ و همکاران در سال ۲۰۲۴ نشان داد که استفاده از بیوپلیمرهای زانتان گام و گوار گام با غلظت ۲٪ و زمان عمل‌آوری ۱۴ روز، به‌طور قابل‌توجهی مقاومت فشاری، مقاومت برشی و پایداری آبی خاک لئوس را از طریق تشکیل ساختار شبکه‌ای تقویت‌کننده بین ذرات، بهبود می‌بخشد [۲۱]. از سوی دیگر، وان و همکاران در سال ۲۰۲۴ تأثیر منفرد و ترکیبی این دو بیوپلیمر را بر خاک رس مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که افزودن ترکیب ۲٪ آن‌ها منجر به افزایش حد مایع و حد پلاستیک خاک، تغییر پارامترهای تراکم و افزایش معنادار مقاومت برشی در مقایسه با نمونه‌های تثبیت‌شده با بیوپلیمر منفرد شد [۲۲].

در همان سال ما و همکاران، تأثیر افزودن زانتان گام را بر خواص مکانیکی خاک شنی تقویت‌شده با الیاف را مورد بررسی قرار دادند [۲۳]. نتایج تحقیق آنها نشان داد که افزایش درصد بیوپلیمر و زمان خشک شدن به طور قابل‌توجهی مقاومت فشاری، مقاومت برشی و مقاومت کششی خاک را افزایش می‌دهد. مقدار بهینه زانتان گام برای افزایش مقاومت فشاری برابر ۴٪ و برای مقاومت برشی و کششی ۳٪ تعیین شد. زمان خشک شدن ۱۴ روز نیز به عنوان زمان بهینه گزارش گردید.

مطالعه کاربرد بیوپلیمرهای زانتان گام و گوار گام بر تثبیت خاک در سال ۲۰۲۵ نیز ادامه یافت. الجابوبی و بیلسل، افزایش استحکام و کاهش نفوذپذیری، مخلوط شن و بنتونیت به کمک این دو بیوپلیمر مورد مطالعه قرار دادند [۲۴]. آنها گزارش کردند، افزودن ۲٪ بیوپلیمر باعث افزایش قابل توجه (حدود ۳ برابر) در مقاومت فشاری محصور نشده می‌شود. همچنین نتایج نشان داد زانتان گام به دلیل خواص ژل‌سازی قوی‌تر، عملکرد بهتری نسبت به گوار گام دارد.

یانگ و همکاران در سال ۲۰۲۵ نشان دادند که افزودن بیوپلیمر زانتان گام به خاک رس قرمز باعث افزایش تقریباً خطی مقاومت برشی با افزایش تنش نرمال می‌شود [۲۵]. چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک ابتدا با افزایش غلظت زانتان گام افزایش و سپس کاهش می‌یابد. مقاومت فشاری و مدول تغییر شکل خاک نیز در بازه ۱۴ تا ۲۸ روز بیشترین افزایش را داشته‌اند و پس از ۲۸ روز مدول تغییر شکل تا ۷/۷۱٪ کاهش رشد را نشان داده است. همچنین شاخص باربری کالیفرنیا (CBR) به بیشینه ۲۴/۱٪ رسید و پس از آن کاهش یافت. بالدوینو و همکاران در سال ۲۰۲۵ در مطالعه‌ای به بررسی تأثیر بیوپلیمر زانتان گام و الیاف پلی‌پروپیلن بر خواص مکانیکی خاک رس پرداخته‌اند [۲۶]. نتایج نشان داد افزودن این مواد باعث بهبود قابل توجه مقاومت و سختی خاک می‌شود و زمان عمل‌آوری و چگالی نمونه نقش مهمی در این بهبودها دارند. افزایش ۹۰ روزه زمان عمل‌آوری تا ۳۷٪ و افزودن الیاف پلی‌پروپیلن مقاومت و سختی را به ترتیب تا ۵۳/۹۳٪ و ۶۳/۵۵٪ افزایش داد.

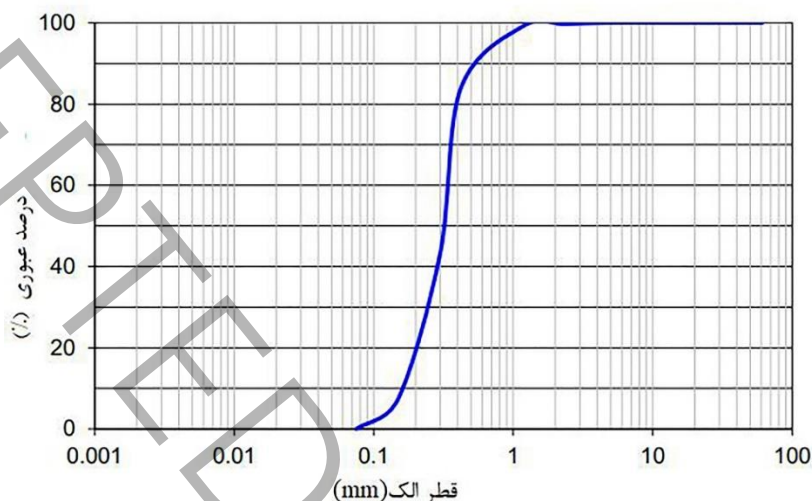
اغلب مطالعات انجام شده در این زمینه صرفاً مربوط به خاک درشت‌دانه یا ریزدانه می‌باشد و تثبیت زیستی در خاک درشت‌دانه ترکیب شده با درصد‌های مختلف ریزدانه و مقایسه آن با تثبیت شیمیایی آن، کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. از سویی، استفاده از بیوپلیمرها با توجه به منشا زیستی و کاربردهای بسیاری که در زمینه‌های گوناگون مهندسی دارند، از جمله بهبود خواص مهندسی خاک ها، در سال‌های اخیر از استقبال چشمگیری برخوردار بوده است. از این رو، در این پژوهش، به منظور ارزیابی پارامترهای مقاومتی خاک مخلوط ماسه رس‌دار با استفاده از تثبیت‌کننده‌های آهک، سیمان، بیوپلیمر زانتان گام و گوار گام مورد مطالعه قرار گرفته است. مقاومت فشاری محصور نشده نمونه‌های خاک ماسه رس‌دار تثبیت شده با غلظت‌های مختلف آهک و سیمان و نمونه‌های خاک تثبیت شده با زانتان گام و گوار گام در دستگاه تک محوری مورد آزمایش قرار گرفته و مقاومت آنها در سه زمان عمل‌آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه، بررسی و با هم مقایسه شده است.

۲- مصالح مصرفی

۲-۱- خاک

در این پژوهش ماسه سیلیکاتی بابلسر، به عنوان خاک درشت‌دانه مورد استفاده قرار گرفت که منحنی دانه‌بندی آن در شکل ۱ نشان داده شده است. بر اساس مقادیر C_u و C_c و طبقه‌بندی سیستم یونیفاید (USCS)، این ماسه در گروه ماسه بد دانه‌بندی شده (SP) قرار می‌گیرد. ویژگی‌های فیزیکی ماسه در جدول ۱ ارائه شده است. وزن مخصوص کمینه و بیشینه ماسه با بابلسر مطابق با روش استاندارد ASTM-D4253 اندازه‌گیری شد و به ترتیب برابر با ۱/۵ و ۱/۷۳ تن بر متر مکعب به دست آمده است. چگالی دانه‌های جامد آن مطابق با استاندارد ASTM-D854-92، ۲/۷۲ اندازه‌گیری شده است. برای ایجاد ترکیب خاک‌های درشت‌دانه و ریزدانه، از رس کائولن به عنوان

خاک ریزدانه استفاده شد. این خاک که از کارخانه رس چینی مرند تهیه شده، مطابق با سیستم طبقه‌بندی یونیفاید در رده CL قرار دارد. آزمایش تعیین حدود اتربرگ مطابق با استاندارد ASTM4318 روی خاک کائولن مورد استفاده انجام شد و حد روانی و شاخص خمیری آن به ترتیب برابر با ۴۹/۷٪ و ۱۸/۲٪ اندازه‌گیری شده است. در این پژوهش، مقادیر مختلفی از رس کائولن، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درصد وزنی به ماسه اضافه شده است.



شکل ۱: منحنی دانه بندی خاک ماسه بابلسر

Figure 1. Grain size distribution curve of Babolsar sand

جدول ۱: مشخصات و ضرایب دانه‌بندی خاک ماسه‌ای

Table 1. Characteristics and grain-size distribution coefficients of the sandy soil

γ_{dmin} (t/m^3)	γ_{dmax} (t/m^3)	C_c	C_u	D_{60} (mm)	D_{50} (mm)	D_{30} (mm)	D_{10} (mm)	نام خاک در سیستم یونیفاید
۱/۵	۱/۷۳	۰/۸۸۱	۰/۳۹۸	۰/۲۲۹	۰/۲۲۱	۰/۱۸۱	۰/۱۶۳	SP

۲-۲- مصالح تثبیت کننده شیمیایی

همچنان که در بخش قبل ذکر شد، در این پژوهش از آهک و سیمان به عنوان یکی از متداول‌ترین مواد تثبیت‌کننده شیمیایی با قابلیت بهبود پارامترهای مقاومتی خاک مورد استفاده قرار گرفت. مطالعات پیشین نشان می‌دهند که درصد بهینه آهک عموماً در بازه ۳ تا ۱۰ درصد و سیمان در محدوده ۵ تا ۱۵ درصد وزنی خاک قرار می‌گیرد تا بهبود مطلوبی در خواص مکانیکی خاک حاصل شود، بدون آنکه مسائل اقتصادی یا زیست‌محیطی تشدید گردد [۳، ۴، ۶، ۹ و ۱۱]. در این پژوهش، درصدهای وزنی ۶، ۸ و ۱۰ از آهک نسبت به وزن خشک خاک مخلوط، انتخاب شد. سیمان مصرفی در این پژوهش نیز سیمان پرتلند نوع ۲ تولید کارخانه سیمان شاهرود است که در درصدهای وزنی ۵، ۱۰ و ۱۵ نسبت به وزن خشک خاک به مخلوط اضافه شد.

۲-۳- مصالح تثبیت کننده بیوپلیمر

زانتان گام، به عنوان یکی از بیوپلیمرهای پرکاربرد در تثبیت خاک، نوعی پلی‌ساکارید آنیونی با فرمول شیمیایی $C_{35}H_{49}O_{29}$ است که در این پژوهش به کار گرفته شده است. همچنین در این پژوهش برای بررسی اثر تثبیت بر روی خاک، از بیوپلیمر گوارگام نیز استفاده شده است. این پلی‌ساکارید با فرمول شیمیایی $C_{10}H_{14}N_5Na_2O_{12}P_3$ ، در غلظت‌های مختلف به خاک مخلوط افزوده شد.

بررسی‌های متعدد نشان می‌دهد که استفاده از درصد‌های کم تا متوسط بیوپلیمرها، عموماً در بازه ۰/۵ تا ۲ درصد وزنی خاک، افزایش قابل توجه مقاومت و بهبود خواص مکانیکی را موجب می‌شود. به علاوه استفاده از بیوپلیمرها در این محدوده، معایب غلظت‌های بسیار بالا مانند نفوذپذیری بیش از حد یا عدم صرفه اقتصادی را به دنبال نخواهد داشت [۲، ۱۸ و ۲۱]. در واقع مطابق با نتایج پژوهش‌های صورت گرفته این محدوده، نقطه تعادلی بین کارایی و صرفه اقتصادی ایجاد می‌کند. از این‌رو هر کدام از این بیوپلیمرها در غلظت‌های وزنی ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد نسبت به وزن خشک خاک مخلوط، استفاده شد.

جدول ۲: ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی بیوپلیمرهای مصرفی در این پژوهش

Table 2. Physicochemical properties of the biopolymers used in this study

نوع بیوپلیمر	وزن مولی (g/mol)	ویسکوزیته (pa.s)	PH	اندازه دانه (mm)	E	شکل ظاهری
زانتان گام	۲۴۱/۱۲	۱۵۵۱	۸/۳	۸۰	E415	پودر
گوار گام	۵۳۵/۱۵	۵۷۵۰	۶/۴	۲۰۰	E412	پودر

۳- روش انجام آزمایش‌ها

۳-۱- آماده‌سازی نمونه‌ها

در ابتدا رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک بیشینه برای نمونه‌های مخلوط ماسه و رس به روش استاندارد در آزمایشگاه اندازه‌گیری شد (جدول ۳). و تمامی نمونه‌های با میزان ماسه و رس مشابه بر اساس رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک بیشینه حاصله، تهیه شدند. طبق یافته‌های مطالعات پیشین [۲، ۱۸ و ۲۱]، آب مورد نیاز برای هیدراته شدن و ایجاد پیوند بیوپلیمرهای گوار گام و زانتان گام، معادل ۵۰ تا ۶۰ درصد وزن خشک بیوپلیمر است. این مقدار آب به صورت هم‌زمان با آب مورد نیاز خاک به عنوان رطوبت بهینه لحاظ شده است. سپس فرآیند اختلاط خاک با مواد تثبیت‌کننده بیوپلیمری (زانتان گام و گوار گام) به صورت دستی و با دقت بالا به مدت ۵ دقیقه انجام شد. مخلوط در جهت‌های مختلف هم زده شد تا مواد به‌طور یکنواخت ترکیب شوند. برای تضمین یکنواختی اختلاط، نمونه‌هایی از مخلوط از نواحی مختلف برداشت شده و وضعیت ظاهری آن از نظر توزیع یکنواخت مواد بررسی گردید. در صورت مشاهده هرگونه ناهم‌آهنگی یا تجمع مواد، فرآیند اختلاط اصلاح و تکرار شد. روش اختلاط دستی یا مکانیکی در بازه زمانی مشابه (۵ تا ۱۰ دقیقه) در مطالعات متعددی مورد استفاده قرار گرفته است [۲، ۱۸ و ۲۱]. پس از تکمیل اختلاط، نمونه‌ها در قالب‌های استوانه‌ای به ابعاد ۱۰ × ۵ سانتی‌متر (ویژه آزمایش تک‌محوری) شکل داده شده و در شرایط ویژه جهت حفظ رطوبت نمونه نگهداری شدند. نمونه‌ها با حفظ رطوبت، به مدت ۷، ۱۴ و ۲۸ روز در دمای محیط برای عمل‌آوری نگهداری شدند.

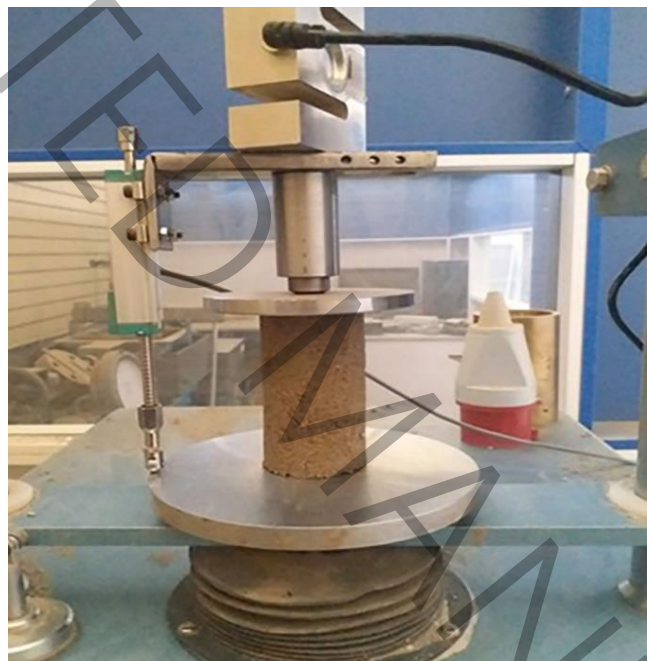
جدول ۳: درصد رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک بیشینه مخلوط خاک ماسه و رس

Table 3. Optimum moisture content and maximum dry unit weight of sand-clay mixtures

شماره نمونه	مشخصات مخلوط خاک	درصد رطوبت بهینه (%)	وزن مخصوص خشک (t/m ³)
۱	ماسه	۱۶	۱/۶۵
۲	ماسه + ۱۰٪ رس کائولن	۱۷/۲	۱/۶۲
۳	ماسه + ۱۵٪ رس کائولن	۱۸/۲	۱/۶۰
۴	ماسه + ۲۰٪ رس کائولن	۱۹/۲	۱/۵۸
۵	ماسه + ۲۵٪ رس کائولن	۲۰	۱/۵۵

۲-۳- آزمایش فشاری تک‌محوری

آزمایش فشاری تک‌محوری یکی از رایج‌ترین آزمایش‌های مکانیک خاک است که به طور گسترده در بررسی پایداری و تثبیت خاک در روسازی‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. این آزمایش مطابق با استاندارد ASTM D-2166 برای تعیین مقاومت فشاری محصورنشده انجام شد. نمونه‌ها شامل ترکیبات مختلفی از ماسه، رس و مواد تثبیت‌کننده شیمیایی آهک یا سیمان و یا مواد تثبیت‌کننده بیوپلیمری زانتان‌گام یا گوارگام بودند. پس از دوره عمل‌آوری، نمونه‌ها در دستگاه آزمایش فشاری قرار گرفتند. بارگذاری با نرخ ۱ میلی‌متر بر دقیقه و در دمای محیط و رطوبت نسبی کنترل شده، تا جایی ادامه یافت که مقدار نیرو به دلیل افزایش کرنش کاهش یابد. برای قرائت دقیق جابجایی و نیروی اعمالی از نرم‌افزار ثبت داده‌ها متصل به رایانه استفاده شد. شکل ۲ دستگاه مورد استفاده به همراه یکی از نمونه‌های مورد آزمایش نشان داده شده است.



شکل ۲ : نحوه قرار گرفتن نمونه در دستگاه

Figure 2. Configuration of the sample in the apparatus.

برای تسهیل در ارائه نتایج آزمایش بر روی نمونه‌ها با ترکیب‌های متفاوت از افزودنی‌های متنوع، نمونه‌ها با علائم اختصاری نام‌گذاری شده‌اند که این علائم برای پارامترهای مورد آزمایش، در جدول ۴ نشان داده شده است. مشخصات دقیق و ترکیب برخی از نمونه‌های مورد آزمایش در جدول ۵ ارائه شده است. بدین ترتیب، بر اساس نشانه مصالح، درصد حضور آنها در ترکیب و تعداد روز عمل‌آوری، نام گذاری نمونه‌ها انجام شده است.

جدول ۴: نشانه‌های مورد استفاده در نام‌گذاری نمونه‌ها

Table 4. Symbols used for sample labeling

مصالح مصرفی	ماسه (Sand)	رس (Clay)	سیمان (Cement)	آهک (Lime)	زانتان (Xanthan)	گوار (Guar)	زمان عمل آوری
نشانه	S	C	Ce	L	X	G	D

جدول ۵: مشخصات دقیق و ترکیب برخی از نمونه‌های تست شده در آزمایش تک محوری

Table 5. Detailed properties and composition of selected samples tested in the uniaxial compression test

نام نمونه	رس C (%)	سیمان Ce (%)	آهک L (%)	زانتان X (%)	گوار G (%)	زمان عمل آوری (روز)
SC0Ce5-28D	۰	۵	-	-	-	۲۸
SC10Ce5-28D	۱۰	۵	-	-	-	۲۸
SC15Ce5-28D	۱۵	۵	-	-	-	۲۸
SC0Ce15-28D	۰	۱۵	-	-	-	۲۸
SC10Ce15-28D	۱۰	۱۵	-	-	-	۲۸
SC20Ce10-7D	۲۰	۱۰	-	-	-	۷
SC20Ce10-14D	۲۰	۱۰	-	-	-	۱۴
SC20Ce10-28D	۲۰	۱۰	-	-	-	۲۸
SC25L6-7D	۲۵	-	۶	-	-	۷
SC25L6-14D	۲۵	-	۶	-	-	۱۴
SC10X0.5-28D	۱۰	-	-	۰/۵	-	۲۸
SC15X0.5-7D	۱۵	-	-	۰/۵	-	۷
SC15X0.5-14D	۱۵	-	-	۰/۵	-	۱۴
SC15X0.5-28D	۱۵	-	-	۰/۵	-	۲۸
SC0G0.5-28D	۰	-	-	-	۰/۵	۲۸
SC10G0.5-28D	۱۰	-	-	-	۰/۵	۲۸

۳-۳- آزمایش میکروسکوپ الکترونی (SEM)

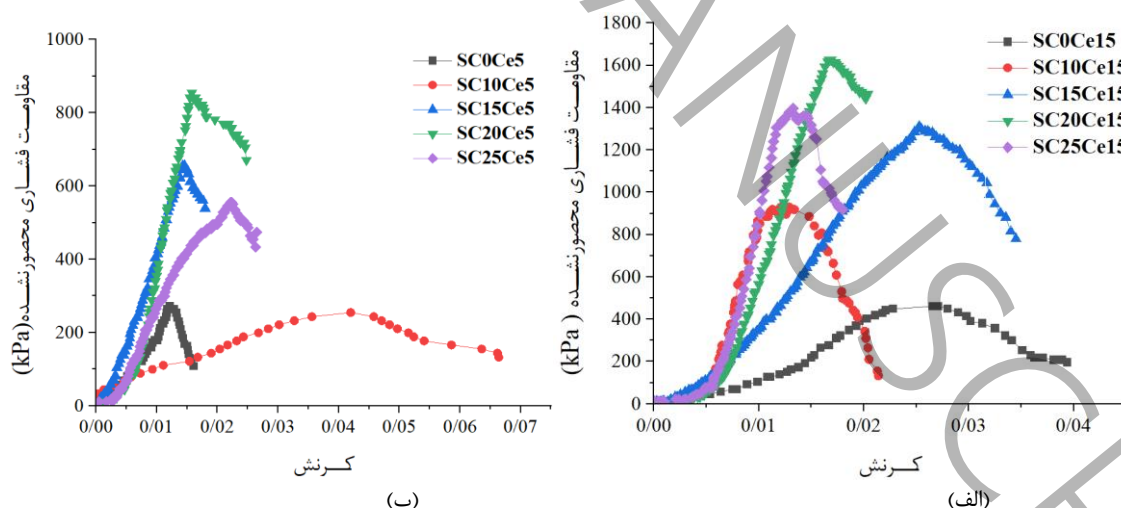
آزمایش میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه صنعتی شاهرود با استفاده از دستگاه Zeiss مدل HV300Sigma ساخت آلمان، مستقر در دانشگاه شاهرود، انجام شد. این دستگاه قابلیت تصویربرداری از ذرات، سطوح، ساختارهای نانویی، لایه‌های نازک و پوشش‌ها را دارد. در این پژوهش، تصاویر سطحی برخی از نمونه‌های آزمایش شده در بزرگنمایی‌های ۲۵۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۲۵۰۰ برابر تهیه شد. این سری از آزمایش‌ها روی نمونه خاک‌های تثبیت‌شده با بیوپلیمر پس از دوره عمل‌آوری ۷ روزه انجام شده است. برای تصویربرداری از نمونه‌ها، اجازه داده شد تا نمونه‌ها در دمای اتاق خشک شده و رطوبت سطحی آن‌ها حذف شود. پس از آن با تقسیم نمونه‌ها به قطعات کوچک‌تر، بر روی بستری از چسب کربنی قرار داده شدند. در ادامه، جهت افزایش رسانایی سطح نمونه‌ها و کاهش اثرات بارگذاری الکتریکی، نمونه‌ها با پوشش‌دهی فلزی طلا با ضخامت تقریبی ۱۰ نانومتر تحت روش اسپاترینگ پوشانده شدند.

۴- تحلیل و تفسیر نتایج

۴-۱- نتایج آزمایش تک محوری

خاک ماسه رس دار مورد آزمایش با استفاده از آهک و سیمان و بیوپلیمرهای گوارگام و زانتان گام تثبیت و مقاومت فشاری آن در زمان های عمل آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه مورد بررسی قرار گرفت. نتیجه تاثیر ترکیب خاک ماسه ای با درصد رس های مختلف برای نمونه های تثبیت شده با ۵٪ و ۱۵٪ سیمان در زمان عمل آوری ۲۸ روزه، به ترتیب در شکل ۳(الف) و ۳(ب) نشان داده شده است. همچنان که در شکل ۳ مشاهده می شود، با افزایش درصد رس از ۰٪ تا ۲۰٪، مقاومت فشاری نمونه ها در هر دو حالت ۵٪ و ۱۵٪ سیمان به طور قابل توجهی افزایش یافته است. به طوری که مقاومت نمونه های مخلوط شده با رس ۲۰٪ و سیمان ۵٪ در مقایسه با نمونه ای با رس ۰٪ و سیمان ۵٪، نرخ رشدی برابر ۲۱۴/۶۶٪ نشان می دهد. این روند صعودی نشان دهنده بهبود ساختار داخلی خاک و افزایش چسبندگی بین ذرات خاک و ترکیبات سیمانی است که منجر به افزایش ظرفیت تحمل بار می شود. همچنین در شکل ۳ قابل مشاهده است که با افزایش درصد رس از ۲۰٪ به ۲۵٪، مقاومت فشاری نمونه ها در هر دو غلظت سیمان کاهش یافته است. این کاهش قابل توجه می تواند ناشی از اثرات منفی افزایش بیش از حد رس بر تخلخل و ساختار خاک باشد که موجب کاهش کارایی تثبیت سیمانی و ایجاد نواحی ضعیف تر در نمونه می شود. بنابراین با توجه به نتایج به دست آمده، می توان بیان کرد که درصد رس بهینه برای افزایش مقاومت فشاری در محدوده ۲۰٪ قرار دارد و افزایش بیش از این مقدار منجر به کاهش عملکرد تثبیت سیمانی می گردد. نتایج پژوهش شاکر و همکاران نیز نشان داده است که حضور بیش از ۳۰٪ درصد رس در ترکیب خاک، کارایی سیمان در تثبیت خاک را کاهش داده و تغییرات مقاومت خاک، روند نزولی می یابد [۲۷].

همچنین مقایسه میزان مقاومت فشاری به دست آمده در شکل ۳(الف) و ۳(ب) نشان می دهد که با افزایش درصد سیمان، مقاومت فشاری خاک نیز افزایش می یابد. به عنوان مثال، مقاومت فشاری نمونه خاک ماسه ای ترکیب شده با ۲۰٪ رس و ۵٪ سیمان (شکل ۳(الف)) برابر با ۸۵۵ kPa می باشد، در حالی که نمونه با درصد رس مشابه ۲۰٪ و ۱۵٪ سیمان (شکل ۳(ب)) مقاومتی برابر با ۱۶۲۶ kPa را داراست.

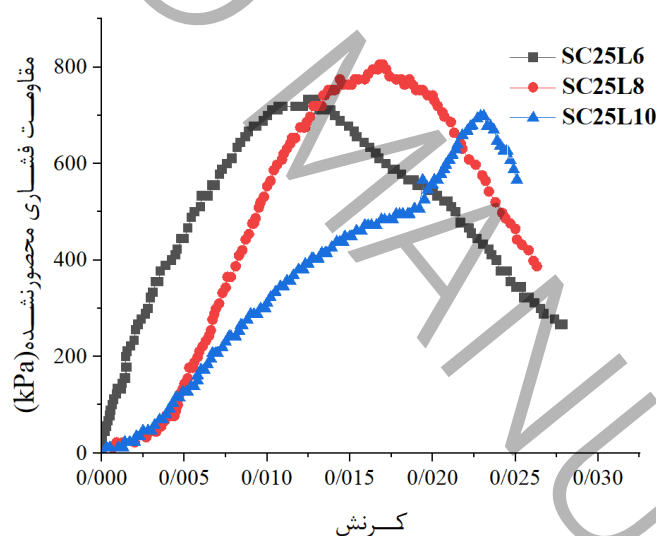


شکل ۳: اثر میزان رس بر مقاومت ۲۸ روزه نمونه های تثبیت شده ماسه رس دار در ترکیب با (الف) ۵ درصد وزنی سیمان و (ب) ۱۵ درصد وزنی سیمان

Figure 3. Effect of clay content on the 28-day strength of stabilized clayey sand samples with (a) 5 wt.% cement and (b) 15 wt.% cement.

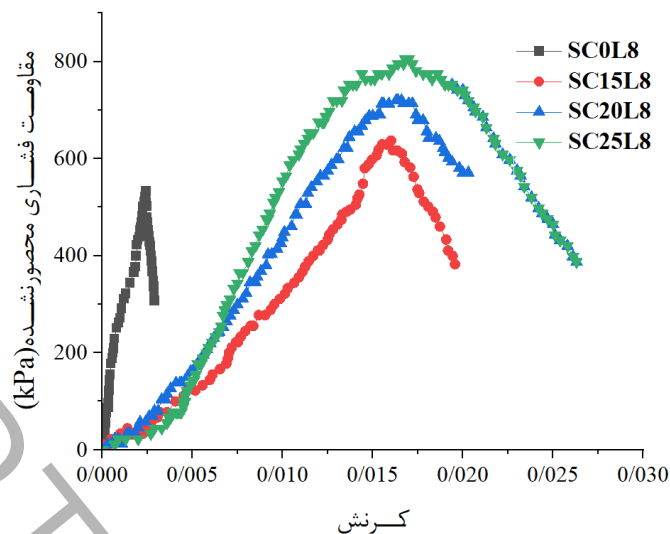
همانطور که اشاره شد در این پژوهش، تغییرات مقاومت فشاری خاک در حضور آهک به عنوان یکی از رایج‌ترین تثبیت‌کننده‌های شیمیایی نیز مورد آزمایش قرار گرفت. در فرآیند تثبیت آهکی، هنگامی که آهک با خاک در حضور آب مخلوط می‌شود، در نتیجه تجزیه CaO ، غلظت یون‌های کلسیم و هیدروکسید محیط افزایش می‌یابد. بین یون‌های کلسیم و سیلیکات‌های حل شده خاک، واکنش پوزولانی صورت می‌گیرد و ایجاد عناصر پایدار از جمله سیلیکات کلسیم و آلومینات کلسیم و در نهایت تولید ژل‌های هیدراته، مانند چسب طبیعی، منجر به افزایش مقاومت و سیمانی شدن خاک تثبیت شده با آهک می‌گردد. شکل ۴، تغییرات مقاومت فشاری خاک ماسه‌ای در حضور ۲۵٪ وزنی رس، تثبیت شده با درصدهای مختلف آهک، ۶٪، ۸٪ و ۱۰٪ را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، خاک تثبیت شده با ۸٪ آهک بیشترین مقاومت فشاری را نشان داده است.

با توجه به درصد بهینه آهک به دست آمده از شکل ۴، اثر حضور رس در خاک ماسه‌ای بر مقاومت فشاری خاک تثبیت شده با ۸٪ آهک در زمان عمل‌آوری ۲۸ روزه در شکل ۵ ارائه شده است. مطابق شکل ۵ در غلظت ثابت آهک، ۸٪ وزنی، با افزایش درصد رس در خاک ماسه‌ای تا ۲۵٪، تمامی نمونه‌ها افزایش مقاومت را نشان می‌دهند. مطابق با نتایج، مقاومت نمونه‌های تثبیت شده با ۸٪ آهک و میزان رس ۲۵٪ نسبت به نمونه مشابه با میزان رس ۰٪، نرخ رشدی برابر با ۳۹/۷۶٪ را نشان می‌دهد. این افزایش قابل توجه به بهینه بودن این مقدار آهک برای فعال‌سازی واکنش‌های پوزولانی و تشکیل فازهای پایدار مانند سیلیکات کلسیم و آلومینات کلسیم نسبت داده می‌شود که موجب استحکام‌بخشی به ساختار خاک می‌گردد. حال آنکه، افزایش درصد آهک به ۱۰٪، کاهش مقاومت فشاری را منجر می‌شود که می‌تواند ناشی از اشباع ظرفیت واکنش‌پذیری خاک و باقی ماندن آهک آزاد در سیستم باشد که باعث افزایش تخلخل و کاهش یکنواختی پیوندهای خاک می‌گردد.



شکل ۴: اثر غلظت‌های مختلف آهک بر مقاومت ۲۸ روزه نمونه‌های تثبیت شده مخلوط ماسه با ۲۵ درصد رس

Figure 4. Effect of different lime contents on the 28-day strength of stabilized sand-clay mixture containing 25% clay.



شکل ۵: اثر میزان رس بر مقاومت ۲۸ روزه نمونه‌های تثبیت شده مخلوط ماسه رس دار تثبیت شده با ۸٪ آهک (درصد بهینه آهک)

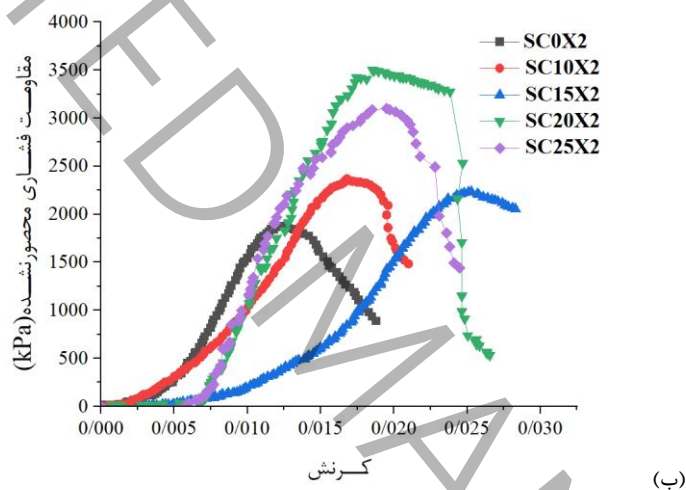
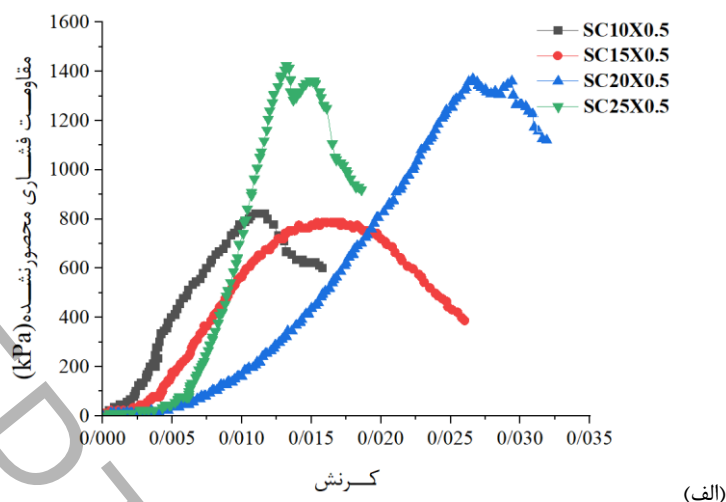
Figure 5. Effect of clay content on the 28-day strength of sand-clay mixtures stabilized with 8% lime (optimum lime content).

در ادامه پژوهش، تاثیر حضور رس بر میزان مقاومت ۲۸ روزه نمونه‌های تثبیت شده با بیوپلیمر زانتان گام نیز مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج این بررسی در شکل ۶ ارائه شده است. شکل‌های ۶(الف) و ۶(ب) به ترتیب، تاثیر حضور رس با درصدهای مختلف بر مقاومت فشاری نمونه خاک تثبیت شده با ۰/۵٪ و ۰/۲٪ زانتان گام را نشان می‌دهند. همچنانکه از مقایسه دو شکل قابل مشاهده است، مقادیر حداکثر مقاومت فشاری برای تمامی نمونه‌های خاک مخلوط تثبیت شده با ۰/۲٪ زانتان گام، بیش از نمونه‌های با ۰/۵٪ زانتان گام می‌باشد. مطابق با مطالعات پیشین افزایش میزان بیوپلیمر در خاک، مقاومت فشاری خاک را بهبود می‌بخشد. افزایش غلظت بیوپلیمر زانتان گام منجر به افزایش چسبندگی و قفل شدگی ذرات و در نتیجه افزایش مقاومت خاک می‌شود.

همچنین با مقایسه منحنی‌های شکل ۶(الف) می‌توان دریافت، برای نمونه‌های تثبیت شده با ۰/۵٪ زانتان گام، افزایش مقدار رس در مخلوط خاک، مقاومت فشاری را افزایش می‌دهد. نمونه‌های تثبیت شده با ۰/۵٪ زانتان گام، حاوی ۱۰٪ رس و ۲۵٪ رس به ترتیب مقاومت فشاری حداکثری برابر با ۸۲۱/۵ کیلوپاسکال و ۱۴۲۳/۴ کیلوپاسکال را نشان می‌دهند.

نتیجه مشابهی در شکل ۶(ب) برای نمونه‌های تثبیت شده با ۰/۲٪ زانتان گام نیز قابل مشاهده است. برای نمونه‌های تثبیت شده با ۰/۲٪ زانتان گام، حداکثر مقاومت فشاری نمونه ماسه‌ای (بدون حضور رس) حدود ۱۸۷۶/۵ کیلوپاسکال به دست آمده است، در حالی‌که برای نمونه خاک ماسه‌ای مخلوط با ۲۵٪ رس به ۳۰۹۸/۷ کیلوپاسکال رسید. به معنای دیگر مقاومت فشاری نمونه به میزان ۶۵٪ رشد داشته است. به علاوه در شکل ۶(ب) مشاهده می‌شود، با افزایش میزان رس تا ۲۰٪ وزنی ماسه، مقاومت فشاری افزایش یافته است، حال آنکه درصد رس ۲۵٪، کاهش مقاومت فشاری را در پی دارد. به بیانی دیگر، افزایش درصد حضور رس موجب درگیری بیشتر ذرات خاک مخلوط و در نتیجه افزایش مقاومت فشاری آن شده است. تاثیر مثبت حضور رس بر عملکرد زانتان گام در تثبیت خاک در پژوهش ونگ و همکاران نیز دیده شد [۲۸]. اما با افزایش غلظت زانتان گام، این روند کاهشی بوده است و تاثیر حضور رس بر مقاومت فشاری خاک مخلوط کاهش یافته است. زانتان گام در غلظت‌های بالاتر، به تنهایی با ایجاد پیوستگی و افزایش سختی، ساختار خاک را تقویت می‌کند و نقش رس در افزایش مقاومت، کمتر بارز است.

در جدول ۶، مقادیر بیشتری از حداکثر مقاومت فشاری به دست آمده از آزمایش تک محوری و نرخ تغییرات حداکثر مقاومت فشاری نسبت به نمونه مبنا (خاک ماسه‌ای حاوی ۰٪ رس) برای نمونه‌های خاک مخلوط تثبیت شده با ۰/۲٪ زانتان گام، ارائه شده است.



شکل ۶: اثر حضور رس بر مقاومت ۲۸ روزه نمونه‌های تثبیت شده ماسه رس دار (الف) ۰/۵ درصد وزنی زانتان گام و (ب) ۲ درصد وزنی زانتان گام

Figure 6. Effect of clay presence on the 28-day strength of sand samples stabilized with (a) 0.5 wt.% xanthan gum and (b) 2 wt.% xanthan gum.

جدول ۶: حداکثر مقاومت فشاری محصور نشده نمونه‌های خاک مخلوط تثبیت شده با بیوپلیمر و نرخ تغییرات حداکثر مقاومت فشاری آنها نسبت به نمونه مینا (خاک ماسه‌ای حاوی ۰٪ رس)

Table 6. Maximum unconfined compressive strength of soil-mixture samples stabilized with biopolymer and the percentage change in maximum strength relative to the reference sample (sandy soil containing 0% clay).

بیوپلیمر	درصد رس (%)	درصد بیوپلیمر (%)	تعداد روز عمل آوری	حداکثر مقاومت فشاری (kPa)	نرخ رشد حداکثر مقاومت فشاری نسبت به نمونه مینا (%)
زانتان گام	۰	۲	۲۸	۱۸۷۶/۴۸	نمونه مینا
	۱۰			۲۳۶۸/۳۱	۲۶/۲۱
	۱۵			۲۲۳۳/۶۳	۱۹/۰۳

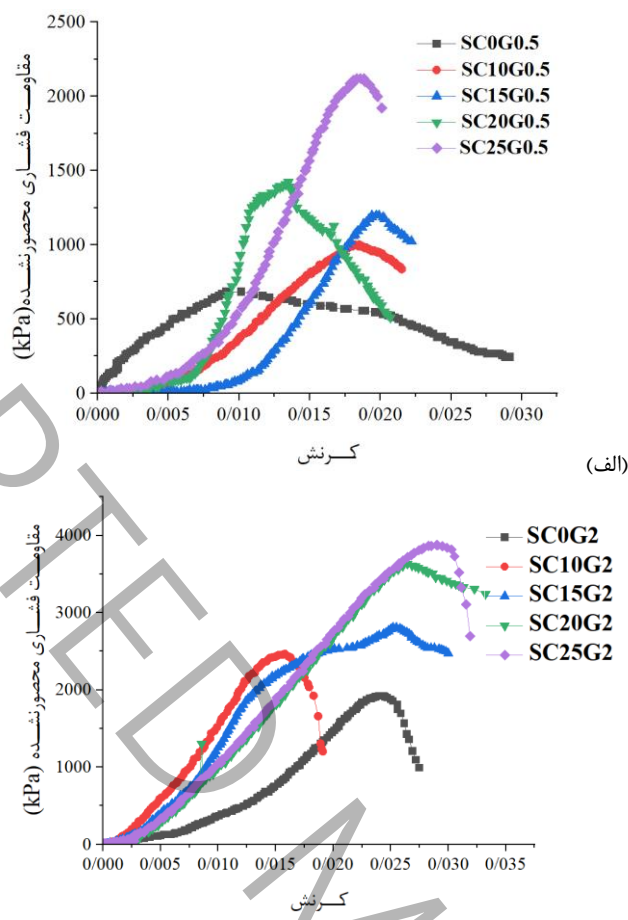
۸۶/۵۶	۳۵۰۰/۷۸			۲۰	
۶۵/۱	۳۰۹۸/۷۳			۲۵	
نمونه مبنا	۶۸۲/۷			۰	
۴۶/۵۴	۱۰۰۰/۴۱			۱۰	
۷۵/۳۷	۱۱۹۷/۳۶	۲۸	۰/۵	۱۵	
۱۰۸/۶۳	۱۴۲۴/۳			۲۰	
۲۱۰/۵۸	۲۱۲۰/۳۱			۲۵	
نمونه مبنا	۱۹۲۲/۵۳			۰	گوارگام
۲۸/۳۰	۲۴۶۶/۶۲			۱۰	
۴۶/۱۲	۲۸۰۹/۱۵	۲۸	۲	۱۵	
۸۸/۹۵	۳۶۳۲/۵۶			۲۰	
۱۰۱/۵۲	۳۸۷۴/۲۴			۲۵	

تاثیر حضور رس و بیوپلیمر گوارگام به عنوان تثبیت کننده خاک به طور همزمان، بر میزان مقاومت فشاری محصور نشده ۲۸ روزه خاک ماسه‌ای نیز مورد آزمایش قرار گرفت و نتایج در شکل ۷ نشان داده شده است. مقایسه مقاومت فشاری خاک ماسه‌ای مخلوط با درصد‌های مختلف رس، تثبیت شده با ۰/۵٪ گوارگام (شکل ۷ الف)) بیانگر آن است که با افزایش میزان رس، حداکثر مقاومت فشاری نمونه‌های تثبیت شده نیز افزایش می‌یابد. به عنوان نمونه، حداکثر مقاومت فشاری محصور نشده برای نمونه‌های تثبیت شده با ۰/۵٪ گوارگام، حاوی ۰٪ رس و ۲۵٪ رس به ترتیب حدود ۶۸۲ کیلوپاسکال و ۲۱۲۰ کیلوپاسکال به دست آمده است. بدین ترتیب با حضور ۲۵٪ رس در خاک، مقاومت فشاری بیش از ۲۱۰٪ رشد کرده است. در واقع حضور به عنوان خاک چسبنده، عامل عملکرد بهتر فرآیند تثبیت می‌شود و مقاومت خاک را بهبود می‌بخشد.

مقاومت فشاری محصور نشده ۲۸ روزه خاک مخلوط تثبیت شده با ۰/۲٪ گوارگام نیز در شکل ۷ ب) نشان داده شده است. همچنان که از مقایسه میزان در شکل‌های ۷ الف) و ۷ ب) مشاهده می‌شود، افزایش میزان تثبیت کننده بیوپلیمری گوارگام تا ۰/۲٪، حداکثر مقاومت فشاری خاک مخلوط را افزایش می‌دهد. همانند نمونه‌های تثبیت شده با زانتان گام، ساختار شبکه‌ای ایجاد شده توسط بیوپلیمرها باعث تقویت اتصال بین ذرات خاک می‌شود [۲۱].

مقادیر حداکثر مقاومت فشاری به دست آمده از آزمایش تک محوری و نرخ تغییرات مقاومت فشاری نسبت به نمونه مبنا (خاک ماسه ای حاوی ۰٪ رس) برای نمونه‌های خاک مخلوط تثبیت شده با ۰/۵٪ و ۰/۲٪ گوارگام، در جدول ۶ ارائه شده است. بررسی نتایج نشان می‌دهد که نرخ رشد مقاومت فشاری برای نمونه‌های تثبیت شده با ۰/۲٪ گوارگام، در حضور ۲۵٪ رس نسبت به نمونه مشابه با ۰٪ رس بیش از ۱۰۰٪ می‌باشد. روند تغییرات نشان می‌دهد که با افزایش رس تا ۲۵٪، مقاومت بیش از دو برابر شده است. این افزایش ناشی از اثر همزمان گوار و رس در بهبود تراکم، کاهش تخلخل و افزایش پیوستگی ساختار خاک می‌باشد.

از سوی دیگر، مشابه یافته‌های به دست آمده از نمونه‌های تثبیت شده با زانتان گام، می‌توان نتیجه گرفت که افزایش درصد رس موجب افزایش مقاومت فشاری شده است اما این روند افزایشی در غلظت‌های بالاتر گوارگام، تعدیل می‌گردد. به عبارت دیگر، گرچه حضور رس به تقویت مقاومت کمک می‌کند، غلظت‌های بسیار بالای گوارگام ممکن است با افزایش ویسکوزیته و ایجاد محدودیت در تراکم‌پذیری بهینه، مانع از افزایش چشمگیر و مداوم مقاومت گردد [۱۷].



شکل ۷: اثر حضور رس بر مقاومت ۲۸ روزه نمونه‌های تثبیت شده ماسه رس دار (الف) ۰/۵ درصد وزنی گوارگام و (ب) ۲ درصد وزنی گوارگام

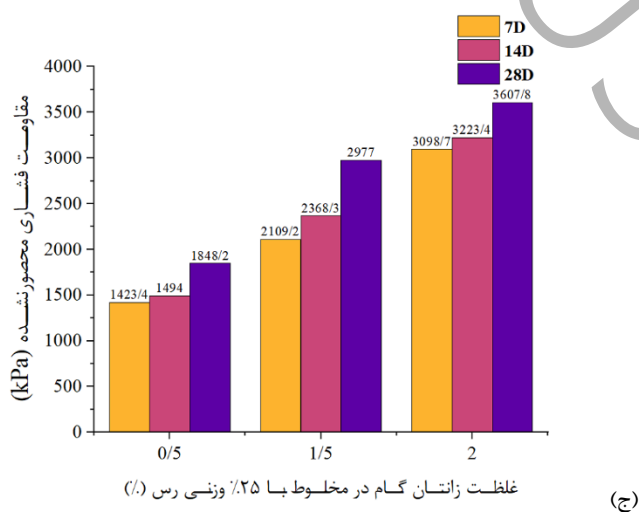
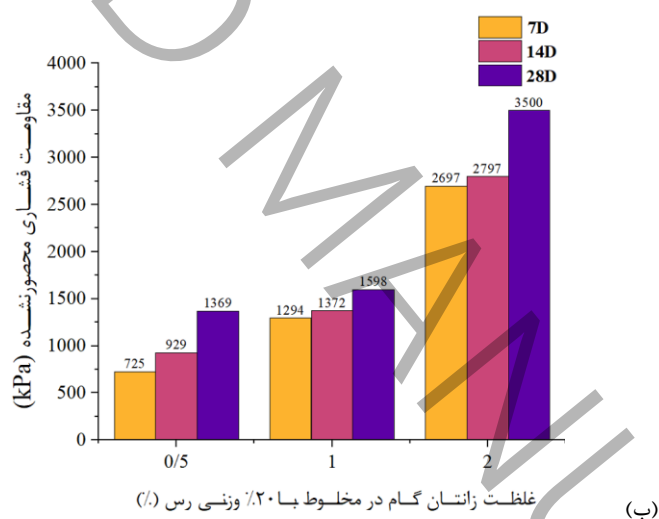
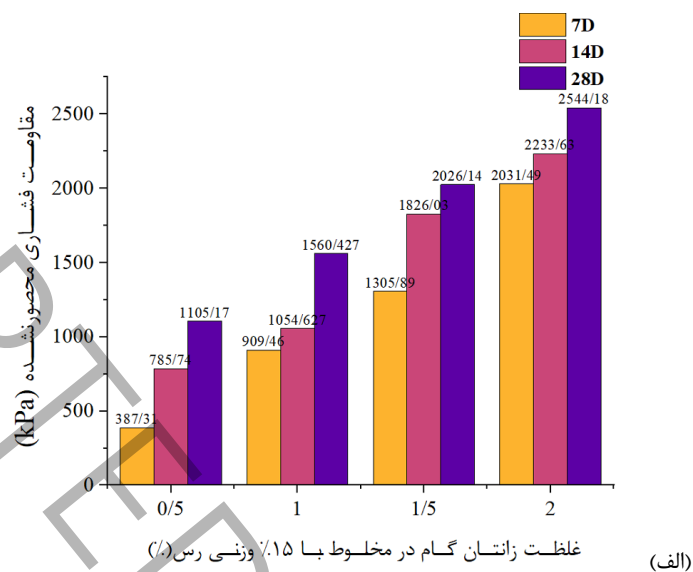
Figure 7. Effect of clay presence on the 28-day strength of stabilized clayey sand samples with (a) 0.5 wt.% guar gum and (b) 2 wt.% guar gum.

مطالعه اثر زمان عمل‌آوری بر مقاومت فشاری محصور نشده نمونه‌های خاک ماسه‌ای در ترکیب با رس و غلظت‌های مختلف مواد تثبیت کننده زیستی و شیمیایی نیز بخشی از پژوهش حاضر بوده است. تاثیر زمان عمل‌آوری بر مقاومت نمونه‌های ماسه‌ای مخلوط شده با درصد‌های مختلف رس، تثبیت شده با غلظت‌های مختلف زانتان گام در شکل ۸ قابل مشاهده است.

نتایج ارائه شده در شکل ۸ نشان می‌دهد، علاوه بر غلظت بیوپلیمر زانتان گام، زمان عمل‌آوری نیز تاثیر فزاینده بر حداکثر مقاومت فشاری محصور نشده خاک دارد. برای مقایسه، مقادیر ثبت شده در شکل ۸ (ب) نشان می‌دهد، حداکثر مقاومت فشاری برای نمونه‌های ماسه حاوی ۲۰٪ رس، تثبیت شده با ۲٪ زانتان گام پس از ۷ روز عمل‌آوری برابر با ۲۶۹۷/۵ کیلوپاسکال به دست آمده است. در حالی که این مقدار برای نمونه با درصد افزودنی مشابه، با فرآیند عمل‌آوری ۲۸ روزه برابر با ۳۵۰۰/۷۸ کیلوپاسکال اندازه‌گیری شده است. به بیان دیگر مقدار حداکثر مقاومت فشاری حدود ۳۰٪ رشد را نشان می‌دهد. مشابه با نتایج مطالعات پیشین [۱۷ و ۲۵]، افزایش زمان عمل‌آوری تثبیت زیستی خاک با زانتان گام، موجب شده تا مقدار مقاومت فشاری محصور نشده نمونه‌ها، افزایش قابل توجهی را نشان دهد. افزایش غلظت زانتان گام باعث تقویت چسبندگی ذرات و ایجاد شبکه‌ای پایدار بین ماسه و رس می‌شود. زمان عمل‌آوری طولانی‌تر موجب تثبیت بیشتر این شبکه و رشد پایدار مقاومت فشاری می‌گردد. نمونه‌های با درصد رس بالاتر بیشترین افزایش مقاومت را نشان دادند، زیرا ذرات ریز رس نقش پرکننده و پشتیبان ساختار خاک را دارند.

مقاومت فشاری محصور نشده برخی از نمونه‌های خاک مخلوط تثبیت شده با زانتان گام در زمان‌های عمل‌آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه و نرخ تغییرات حداکثر مقاومت فشاری آنها نسبت به نمونه مبنا (زمان عمل‌آوری ۷ روزه)، جهت مقایسه، در جدول ۷ ارائه شده است.

بررسی نتایج نشان می‌دهد میزان رس، بر نرخ اثرگذاری زمان عمل‌آوری بر مقاومت فشاری خاک مخلوط تثبیت شده، موثر است. به بیان دیگر، حضور رس بیشتر در خاک ماسه‌ای، میزان تاثیر زمان عمل‌آوری بر مقاومت فشاری را کاهش می‌دهد.



شکل ۸: اثر زمان عمل آوری بر نمونه‌های تثبیت شده ماسه رس‌دار با غلظت‌های ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد زانتان گام حاوی (الف) ۱۵ درصد رس، (ب) ۲۰ درصد رس و (ج) ۲۵ درصد رس

Figure 8. Effect of curing time on clayey sand samples stabilized with xanthan gum at concentrations of 0.5, 1, 1.5, and 2%: (a) 15% clay, (b) 20% clay, and (c) 25% clay.

جدول ۷: حداکثر مقاومت فشاری محصور نشده نمونه‌های خاک مخلوط تثبیت شده با زانتان گام در زمان‌های عمل آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه و نرخ تغییرات حداکثر مقاومت فشاری آنها نسبت به نمونه مبنا (زمان عمل آوری ۷ روزه)

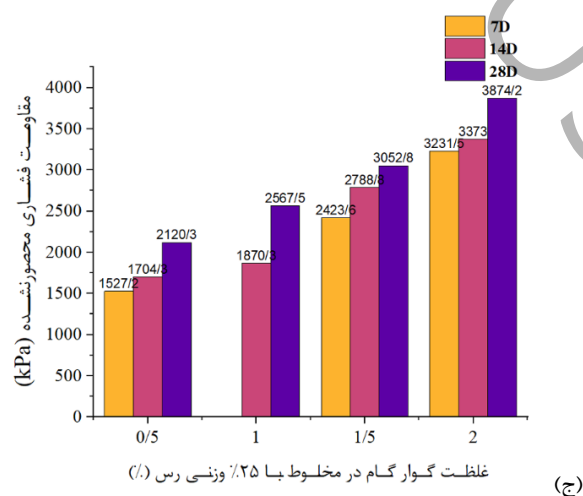
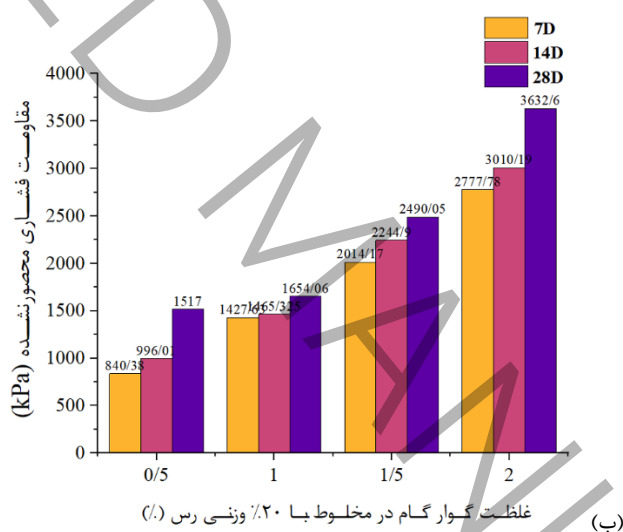
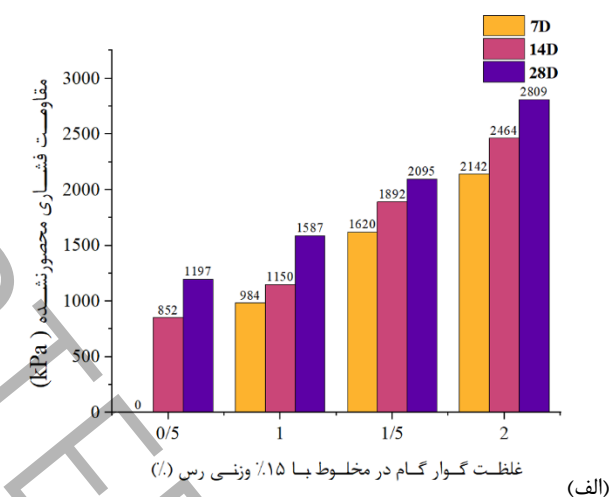
Table 7. Maximum unconfined compressive strength of soil–mixture samples stabilized with xanthan gum at curing times of 7, 14, and 28 days, and the percentage change in maximum strength compared to the reference sample (7-day curing).

درصد رس (%)	درصد بیوپلیمر (%)	تعداد روز عمل آوری	حداکثر مقاومت فشاری (kPa)	نرخ رشد حداکثر مقاومت فشاری نسبت به نمونه مبنا (%)
۱۵	۰/۵	۷	۳۸۷/۳۱	نمونه مبنا
		۱۴	۷۸۵/۷۵	۱۰۲/۸۷
		۲۸	۱۱۰۵/۱۷	۱۸۵/۳۵
		۷	۷۲۵/۲۷	نمونه مبنا
		۱۴	۹۲۹/۹۲	۲۸/۲
		۲۸	۱۳۶۹/۹۴	۸۸/۸۹
		۷	۱۳۶۱/۲۲	نمونه مبنا
		۱۴	۱۴۹۴/۰۳	۹/۷۶
		۲۸	۱۸۴۸/۴۸	۳۵/۸
۲۰	۰/۵	۷	۲۰۳۱/۴۹	نمونه مبنا
		۱۴	۲۲۳۳/۶۳	۹/۹۵
		۲۸	۲۵۴۴/۱۸	۲۵/۲۴
		۷	۲۶۹۷/۵	نمونه مبنا
		۱۴	۲۷۹۷/۴۵	۳/۷
		۲۸	۳۵۰۰/۷۸	۲۹/۷۸
		۷	۳۰۹۸/۷۳	نمونه مبنا
		۱۴	۳۲۲۳/۴	۴/۰۲
		۲۸	۳۶۰۷/۸	۱۶/۴۳
۲۵	۰/۵	۷	۲۰۳۱/۴۹	نمونه مبنا
		۱۴	۲۲۳۳/۶۳	۹/۹۵
		۲۸	۲۵۴۴/۱۸	۲۵/۲۴
		۷	۲۶۹۷/۵	نمونه مبنا
		۱۴	۲۷۹۷/۴۵	۳/۷
		۲۸	۳۵۰۰/۷۸	۲۹/۷۸
		۷	۳۰۹۸/۷۳	نمونه مبنا
		۱۴	۳۲۲۳/۴	۴/۰۲
		۲۸	۳۶۰۷/۸	۱۶/۴۳

در ادامه، اثر زمان عمل آوری بر مقاومت نمونه‌های ماسه‌ای مخلوط با درصدهای مختلف رس و تثبیت شده با غلظت‌های مختلف گوارگام مورد مطالعه قرار گرفت. همچنان که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، افزایش زمان عمل آوری منجر به افزایش حداکثر مقاومت فشاری محصور نشده نمونه‌ها می‌گردد. در عملکردی مشابه با بیوپلیمر زانتان گام، افزایش غلظت گوارگام هم‌زمان با افزایش زمان عمل آوری، باعث تقویت چسبندگی ذرات و در نتیجه بهبود مقاومت مکانیکی خاک می‌گردد.

همچنین در جدول ۸، مقادیر مقاومت فشاری محصور نشده تعدادی از نمونه‌های خاک مخلوط تثبیت شده با گوارگام در زمان‌های عمل آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه و نرخ تغییرات حداکثر مقاومت فشاری آنها نسبت به نمونه مبنا (زمان عمل آوری ۷ روزه) آورده شده است.

نتایج آزمایش تک محوری نشان می دهد، وجود رس و افزایش زمان عمل آوری، به طور همزمان موجب افزایش مقاومت فشاری محصور نشده در خاک ماسه ای تثبیت شده می گردد. از سوی دیگر، مشابه با نتایج پیشین، افزایش درصد رس، تاثیر زمان عمل آوری بر افزایش مقاومت فشاری را تضعیف می نماید [۱۸].



شکل ۹: اثر زمان عمل آوری بر نمونه های تثبیت شده ماسه رس دار با غلظت های ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد گوارگام حاوی (الف) ۱۵ درصد رس، (ب) ۲۰ درصد رس و (ج) ۲۵ درصد رس

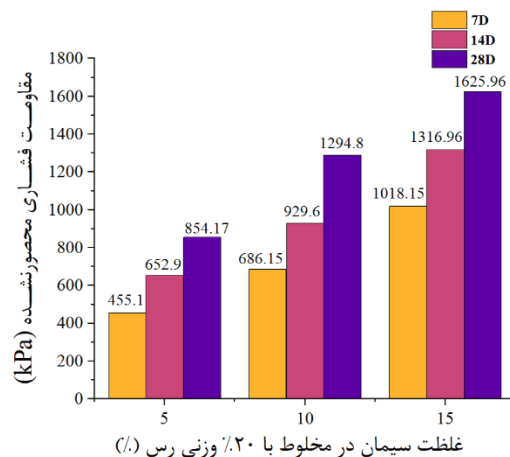
Figure 9. Effect of curing time on clayey sand samples stabilized with guar gum at concentrations of 0.5, 1, 1.5, and 2%: (a) 15% clay, (b) 20% clay, and (c) 25% clay.

جدول ۸: حداکثر مقاومت فشاری محصور نشده نمونه‌های خاک مخلوط تثبیت شده با گوارگام در زمان‌های عمل‌آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه و نرخ تغییرات حداکثر مقاومت فشاری آنها نسبت به نمونه مبنا (زمان عمل‌آوری ۷ روزه)

Table 8. Maximum unconfined compressive strength of soil-mixture samples stabilized with guar gum at curing times of 7, 14, and 28 days, and the percentage change in maximum strength relative to the reference sample (7-day curing)

بیوپلیمر	درصد رس (%)	درصد بیوپلیمر (%)	تعداد روز عمل‌آوری	حداکثر مقاومت فشاری (kPa)	نرخ رشد حداکثر مقاومت فشاری نسبت به نمونه مبنا (%)
گوارگام	۲۰	۰/۵	۷	۸۴۰/۳۹	نمونه مبنا
			۱۴	۹۹۶/۰۱	۱۸/۵۲
			۲۸	۱۵۱۷	۸۰/۵۱
			۷	۱۵۲۷/۲۳	نمونه مبنا
			۱۴	۱۷۰۴/۳	۱۱/۵۹
			۲۸	۲۰۰۹/۲۷	۳۱/۵۶
	۲۵	۲	۷	۲۷۷۷/۷۹	نمونه مبنا
			۱۴	۳۰۱۰/۱۹	۸/۳۷
			۲۸	۳۶۳۲/۲۶	۳۰/۷۶
			۷	۳۱۵۳	نمونه مبنا
			۱۴	۳۳۷۳/۰۶	۶/۹۸
			۲۸	۳۸۷۴/۲۴	۲۲/۸۷

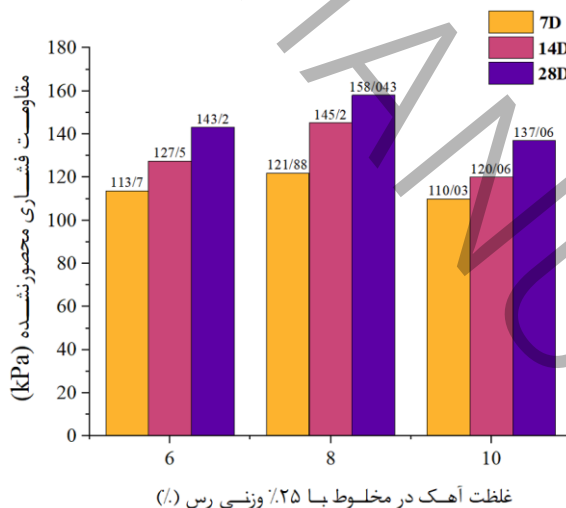
در ادامه، اثر زمان عمل‌آوری بر مقاومت نمونه‌های ماسه رس‌دار تثبیت شده با درصدهای مختلف سیمان و آهک نیز مورد مطالعه قرار گرفت. شکل ۱۰ نتایج مرتبط با نمونه‌های خاک ماسه‌ای مخلوط با ۲۰ درصد رس با ترکیبی از درصدهای مختلف سیمان را نشان می‌دهد. همچنان‌که در شکل مشاهده می‌شود، در زمان‌های مختلف عمل‌آوری، افزایش درصد سیمان تا ۱۵ درصد، موجب افزایش مقاومت فشاری نمونه شده است. از طرف دیگر، با گذشت زمان از شروع اختلاط خاک و سیمان، مقاومت فشاری نمونه نیز افزایش می‌یابد.



شکل ۱۰: اثر زمان عمل‌آوری بر نمونه‌های تثبیت شده ماسه رس‌دار با غلظت‌های ۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪ سیمان حاوی ۲۰٪ وزنی رس

Figure 10. Effect of curing time on clayey sand samples containing 20 wt.% clay stabilized with 5%, 10%, and 15% cement.

نتیجه آزمایش‌های مشابه برای نمونه خاک حاوی ماسه مخلوط شده با ۲۵ درصد وزنی رس، تثبیت شده با غلظت‌های مختلف آهک در شکل ۱۱ ارائه شده است. آنچنان‌که نتایج نشان می‌دهند، علاوه بر افزایش درصد تثبیت‌کننده، طولانی‌تر شدن زمان عمل‌آوری نیز به‌طور فزاینده‌ای بر مقاومت فشاری خاک تأثیرگذار است. تأثیر افزایشی زمان عمل‌آوری از ۷ تا ۲۸ روز بر مقاومت فشاری محصورنشده خاک رسی تثبیت شده با آهک در مطالعه جهان‌داری و همکاران نیز دیده شد [۲۹].

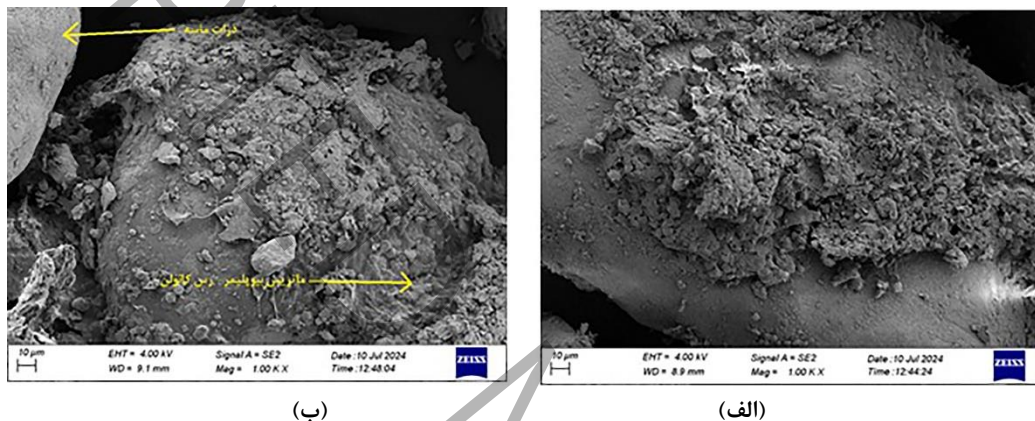


شکل ۱۱: اثر زمان عمل‌آوری بر نمونه‌های تثبیت شده ماسه رس‌دار با غلظت‌های ۶، ۸ و ۱۰ درصد آهک حاوی ۲۵ درصد وزنی رس

Figure 11. Effect of curing time on stabilized clayey sand samples containing 25 wt.% clay with 6, 8, and 10% lime.

۴-۲ نتایج آزمایش SEM

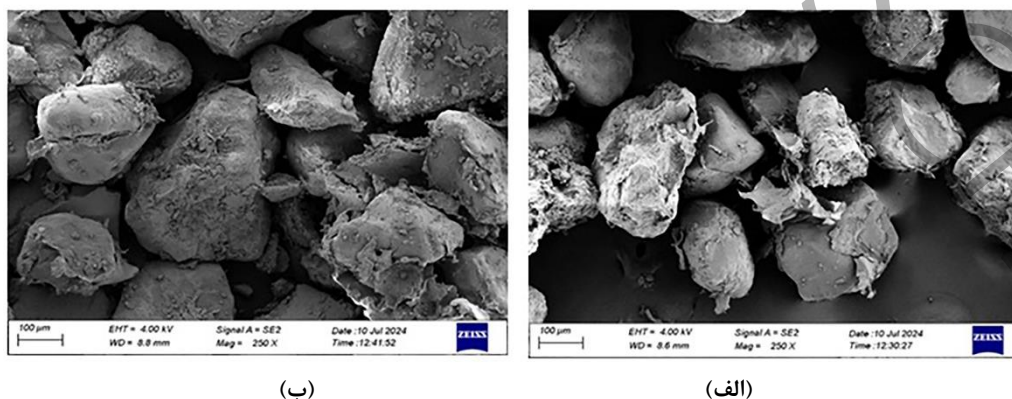
شکل ۱۲ تصاویر بزرگنمایی از نمونه‌های ۷ روزه شامل ۰/۵ و ۲ درصد گوارگام در مخلوط خاک ماسه‌ای و ۱۵ درصد خاک رسی را نشان می‌دهد. با بررسی تصاویر می‌توان نتیجه گرفت که افزودن گوارگام به خاک، به‌طور کلی ماتریس خاک رس-گوارگام را قادر ساخته است تا فضاهای خالی بین ذرات ماسه را به‌طور کامل یا جزئی پر کند. پس از تبخیر و خشک شدن آب، ماتریس خاک رس-گوارگام به تدریج رسوب کرده و منقبض می‌شود و به عنوان پل‌هایی برای ایجاد پیوند بین ذرات ماسه عمل می‌کند. ترکیب حاصل از مخلوط ذرات غیر یکنواخت ماسه با ماتریس خاک رس-گوارگام، مقاومت بالاتری از خود نشان داده است. مقایسه تصاویر همچنین نشان می‌دهد که استفاده از ۲ درصد بیوپلیمر، فضاهای خالی بیشتری را نسبت به غلظت ۰/۵ درصد پر کرده و سطح بیشتری از ماتریس بیوپلیمر-رس را پوشش داده است. این امر باعث بهبود قابل توجه مقاومت مخلوط شده است.



شکل ۱۲: بزرگنمایی ۱۰۰۰ برابری نمونه ۷ روزه نمونه‌های (الف) SC15G0.5 (ب) SC15G2

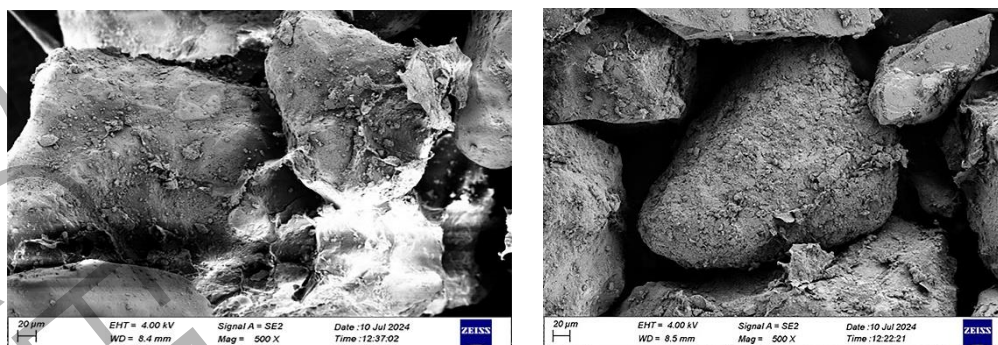
Figure 12. 1000× magnification of the 7-day samples: (a) SC15G0.5 and (b) SC15G2.

شکل‌های ۱۳ و ۱۴ تصاویری از نمونه خاک‌های ماسه‌ای (بدون حضور رس) و ۰/۵ و ۲ درصد زانتان گام و گوارگام را نشان می‌دهد. همچنان که مشاهده می‌شود، با افزایش غلظت بیوپلیمرها (گوارگام و زانتان گام)، هیدروژل‌ها به‌طور کامل تشکیل شده و با بستن حفره‌های موجود، نفوذپذیری خاک تثبیت شده کاهش یافته است. از این نظر، زانتان گام عملکرد بهتری نسبت به گوارگام دارد. به بیان دیگر، غلظت‌های بالاتر بیوپلیمر منجر به ایجاد پیوندهای قوی‌تر بین ذرات خاک شده و اتصال بهتری را فراهم می‌کند. ماهیت آنیونی زانتان گام به تجمع و اتصال بیشتر ذرات کمک کرده و به دلیل جذب سطحی بالاتر، نفوذپذیری خاک را حتی در غلظت‌های پایین‌تر نیز کاهش می‌دهد. این در حالی است که ویسکوزیته پایین در این شرایط نقش کمتری در کاهش نفوذپذیری ایفا می‌کند.



شکل ۱۳: بزرگنمایی ۲۵۰ برابری نمونه ۷ روزه نمونه‌های (الف) SC0X0.5 (ب) SC0X2

Figure 13. 250× magnification of the 7-day samples: (a) SC0X0.5 and (b) SC0X2.



(ب)

(الف)

شکل ۱۴: بزرگنمایی ۵۰۰ برابر برای نمونه ۷ روزه نمونه‌های (الف) SC0G0.5 (ب) SC0G2

Figure 14. 500× magnification of the 7-day samples: (a) SC0G0.5 and (b) SC0G2.

۵- نتیجه‌گیری

این پژوهش، به مقایسه تاثیر تثبیت شیمیایی و تثبیت زیستی بر مقاومت فشاری محصورنشده خاک ماسه‌ای حاوی مقادیر مختلف رس پرداخت. به این منظور، از آهک و سیمان به عنوان تثبیت‌کننده‌های شیمیایی و از گوارگام و زانتان گام به عنوان تثبیت‌کننده‌های زیستی استفاده شد. مهم‌ترین یافته‌های حاصل از آزمایش تک محوری و SEM به شرح زیر می‌باشد:

- در تثبیت شیمیایی خاک ماسه‌ای مخلوط با رس، افزایش درصد سیمان منجر به بهبود مقاومت فشاری می‌شود. بیشترین مقاومت در نمونه‌های حاوی ۲۰٪ رس و ۱۵٪ سیمان پس از ۲۸ روز عمل‌آوری قابل مشاهده است (حدود ۱۶۲۶ کیلوپاسکال). با این حال، افزایش رس بیش از ۲۰٪ اثر منفی بر مقاومت داشته که نشان‌دهنده وجود یک حد بهینه برای درصد رس در تثبیت خاک با سیمان است.

- در حضور درصدهای مختلفی از رس در خاک ماسه‌ای، نمونه‌های تثبیت‌شده با ۸٪ آهک بیشترین مقاومت فشاری را نشان می‌دهند. افزایش درصد رس تا ۲۵٪ تاثیر مثبتی بر مقاومت دارد. از سوی دیگر، افزایش آهک بیش از ۸٪ به دلیل اشباع ظرفیت واکنش‌پذیری خاک، منجر به کاهش مقاومت فشاری خاک مخلوط می‌شود.

- هر دو بیوپلیمر گوارگام و زانتان گام به‌طور قابل توجهی مقاومت فشاری خاک را افزایش می‌دهند. افزایش غلظت بیوپلیمر تا ۲٪ و افزایش زمان عمل‌آوری تا ۲۸ روز، منجر به بهبود مستمر مقاومت می‌شود. نتیجه قابل توجه اینکه برای خاک ماسه رس‌دار، گوارگام عملکرد بهتری نسبت به زانتان گام برای تثبیت خاک از خود، نشان داده است. به‌طور خاص، برای نمونه‌های حاوی ۰/۵٪ گوارگام و ۲۵٪ رس پس از ۲۸ روز، مقاومتی حدود ۲۱۲۰ کیلوپاسکال به دست آمده است.

- نتایج این پژوهش به وضوح بیانگر آن است که اگرچه افزایش درصد رس در ترکیب با بیوپلیمرها به طور کلی منجر به افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ها می‌شود، اما نرخ افزایش مقاومت در درصدهای بالاتر رس، کاهش می‌یابد. همچنین، افزایش زمان عمل‌آوری اثر مثبتی بر مقاومت داشته، اما این اثر در نمونه‌های با درصد رس بالا کمتر است.

- نتایج حاصل از آزمایشات میکروسکوپ الکترونی (SEM) نشان دهنده آن است که افزایش غلظت بیوپلیمرها، باعث پر شدن فضای خالی بین ذرات خاک می‌شود. این امر به ویژه در غلظت‌های بالاتر بیوپلیمر، موجب بهبود مقاومت فشاری نمونه‌ها می‌گردد.

نتایج به دست آمده در این پژوهش بیانگر آن است که برای تثبیت خاک‌های ماسه‌ای حاوی مقدار رس کم تا متوسط در پروژه‌های عمرانی، می‌توان از بیوپلیمرها به عنوان جایگزینی سازگار با محیط‌زیست استفاده کرد. برای خاک‌های با درصد رس بالا، استفاده از تثبیت شیمیایی با سیمان یا آهک در درصدهای بهینه می‌تواند گزینه موثرتری باشد. این یافته‌ها می‌تواند راهنمای مهندسان و محققان در انتخاب روش بهینه تثبیت خاک با توجه به شرایط خاک و ملاحظات اقتصادی و زیست‌محیطی باشد.

در راستای ارزیابی کارایی بیوپلیمرها در بهسازی خاک در پروژه‌های عمرانی، انجام مطالعات اقتصادی برای استفاده از بیوپلیمرها در مقیاس بزرگ و تاثیر این تثبیت‌کننده‌ها بر سایر پارامترهای مهم ژئوتکنیکی مانند مقاومت برشی خاک‌های مخلوط می‌تواند دارای اهمیت

باشد. همچنین مطالعات مشابه بر سایر انواع خاک‌های ریزدانه (رس‌های فعال مانند مونت‌موریلونیت) به درک بهتر اثر خواص شیمیایی رس بر کارایی تثبیت زیستی، کمک خواهد نمود.

۶- مراجع

- [1] R.H. Karol, Chemical grouting and soil stabilization, revised and expanded, Crc Press, 2003.
- [2] P. Bagheri, I. Gratchev, M. Rybachuk, Effects of xanthan gum biopolymer on soil mechanical properties, *Applied Sciences*, 13(2) (2023) 887.
- [3] I. Chang, M. Lee, G.-C. Cho, Global CO₂ emission-related geotechnical engineering hazards and the mission for sustainable geotechnical engineering, *Energies*, 12(13) (2019) 2567.
- [4] R. Etim, A.O. Eberemu, K. Osinubi, Stabilization of black cotton soil with lime and iron ore tailings admixture, *Transportation Geotechnics*, 10 (2017) 85-95.
- [5] J.R. Van der Maarel, Introduction to biopolymer physics, World Scientific Publishing Company, 2007.
- [6] N.C. Consoli, P.D.M. Prietto, L. da Silva Lopes Jr, D. Winter, Control factors for the long term compressive strength of lime treated sandy clay soil, *Transportation Geotechnics*, 1(3) (2014) 129-136.
- [7] C. Jung, A. Bobet, Post-construction evaluation of lime-treated soils, Joint Transportation Research Program, (2008) 319.
- [8] I. Yilmaz, B. Civelekoglu, Gypsum: an additive for stabilization of swelling clay soils, *Applied clay science*, 44(1-2) (2009) 166-172.
- [9] I. Shooshpasha, R.A. Shirvani, Effect of cement stabilization on geotechnical properties of sandy soils, *Geomech Eng*, 8(1) (2015) 17-31.
- [10] S.-W. Moon, G. Vinoth, S. Subramanian, J. Kim, T. Ku, Effect of fine particles on strength and stiffness of cement treated sand, *Granular Matter*, 22(1) (2020) 9.
- [11] E. Worrell, L. Price, N. Martin, C. Hendriks, L.O. Meida, Carbon dioxide emissions from the global cement industry, *Annual review of energy and the environment*, 26(1) (2001) 303-329.
- [12] M. Ayeldeen, A. Negm, M. El-Sawwaf, M. Kitazume, Enhancing mechanical behaviors of collapsible soil using two biopolymers, *Journal of rock mechanics and geotechnical engineering*, 9(2) (2017) 329-339.
- [13] A. Becker, F. Katzen, A. Pühler, L. Ielpi, Xanthan gum biosynthesis and application: a biochemical/genetic perspective, *Applied microbiology and biotechnology*, 50 (1998) 145-152.
- [14] M.K. Ayeldeen, A.M. Negm, M.A. El Sawwaf, Evaluating the physical characteristics of biopolymer/soil mixtures, *Arabian Journal of Geosciences*, 9 (2016) 1-13.
- [15] I. Chang, Y.-M. Kwon, J. Im, G.-C. Cho, Soil consistency and interparticle characteristics of xanthan gum biopolymer-containing soils with pore-fluid variation, *Canadian Geotechnical Journal*, 56(8) (2019) 1206-1213.
- [16] I. Chang, J. Im, A.K. Prasadhi, G.-C. Cho, Effects of Xanthan gum biopolymer on soil strengthening, *Construction and Building Materials*, 74 (2015) 65-72.
- [17] N. Latifi, S. Horpibulsuk, C.L. Meehan, M.Z. Abd Majid, M.M. Tahir, E.T. Mohamad, Improvement of problematic soils with biopolymer—an environmentally friendly soil stabilizer, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(2) (2017) 04016204.
- [18] I. Bozyigit, A. Javadi, S. Altun, Strength properties of xanthan gum and guar gum treated kaolin at different water contents, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 13(5) (2021) 1160-1172.

- [19] H. Sulaiman, M.R. Taha, N. Abd Rahman, A.M. Taib, Performance of soil stabilized with biopolymer materials-xanthan gum and guar gum, *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 128 (2022) 103276.
- [20] P.J. Venda Oliveira, D.J. Cabral, Behaviour of sand stabilised with xanthan gum under unconfined and confined conditions, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement*, 176(1) (2023) 3-13.
- [21] X. Rong, S. Deng, B. Liang, J. Zhuang, Y. Yu, Z. Wu, Mechanical behavior and strengthening mechanism of loess stabilized with xanthan gum and guar gum biopolymers, *Materials Research Express*, 11(10) (2024) 105305.
- [22] J. Wan, F. Ouyang, H. Xiao, L. Wang, G. Tao, Experimental study on the physical and mechanical properties of modified clay using xanthan gum and guar gum composite materials, *Sustainability*, 16(13) (2024) 5432.
- [23] Q. Ma, J. Wu, Y. Bai, H. Xiao, Effect of Xanthan Gum on the mechanical properties of fiber-reinforced sandy soil, *Bulletin of engineering geology and the environment*, 83(5) (2024) 177.
- [24] A. Al-Jabobi, H. Bilsel, The Effects of Xanthan Gum and Guar Gum on the Mechanical Properties of Sand-Bentonite Mixtures, *Sustainability* (2071-1050), 17(12) (2025).
- [25] F. Yang, Z. Zhao, Z. Jia, W. Niu, Y. Liu, F. Song, H. Dong, H. Deng, Study on the mechanical properties and microscopic mechanism of xanthan gum improved red clay, *Scientific Reports*, 15(1) (2025) 31842.
- [26] J.d.J.A. Baldovino, Y.E.N. de la Rosa, O.P. Calabokis, J.A.A. Vergara, L.C.S. López, Geotechnical Behavior of Xanthan Gum-Stabilized Clay Reinforced with Polypropylene Fibers, *Polymers*, 17(3) (2025) 363.
- [27] A.A. Shaker, M. Dafalla, Introducing Cement-Enhanced Clay-Sand Columns under Footings Placed on Expansive Soils, *Applied Sciences*, 14(18) (2024) 8152.
- [28] Z.-y. Weng, J. Yu, Y.-f. Deng, Y.-y. Cai, L.-n. Wang, Mechanical behavior and strengthening mechanism of red clay solidified by xanthan gum biopolymer, *Journal of Central South University*, 30(6) (2023) 1948-1963.
- [29] S. Jahandari, M. Saberian, F. Zivari, J. Li, M. Ghasemi, R. Vali, Experimental study of the effects of curing time on geotechnical properties of stabilized clay with lime and geogrid, *International Journal of Geotechnical Engineering*, 13(2) (2019) 172-183.