



Research paper

(Received 28 Sep. 2025

Accepted 14 Dec. 2025)

Chemical stabilization of silty sand soils with styrene–acrylic polymer: A geotechnical and environmental approach to road dust control and soil improvement

Mahboub Saffari^{*1}, Masomeh Moazallahi¹, Seyed Morteza Moosavirad¹

¹ *Environment Department, Institute of Science and High Technology and Environmental Sciences, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran*

Abstract

Surface silty sand soils, recognized as one of the representative weak geotechnical soils, pose significant challenges in road engineering and environmental management due to their low shear strength, high susceptibility to erosion, and potential for dust emission. In this study, the effect of styrene–acrylic copolymer on improving the physical and mechanical properties of such soils was investigated. For this purpose, soil samples were prepared with three different polymer additive levels (2.5, 5, and 7.5 wt%). Initially, proctor compaction, Atterberg limits, and linear shrinkage tests were conducted. Subsequently, to assess the time-dependent behavior of the polymer, compacted specimens were subjected to unconfined compressive strength (UCS) and California bearing ratio (CBR) tests after 7- and 21-day curing periods. The results showed that polymer addition, without causing significant changes in particle-size distribution, reduced the maximum dry density from 1.79 g/cm³ in the control sample to 1.72–1.77 g/cm³, while the optimum moisture content increased from 8% to 8.5–9.6%. In addition, the liquid limit (LL) increased from 20% to 21–23%, and the plastic limit (PL) from 12% to 13–14%, whereas the plasticity index remained nearly unchanged (8–9%). After 21 days of curing, the UCS values for the samples containing 2.5%, 5%, and 7.5% styrene–acrylic copolymer were 1.18 MPa, 1.64 MPa, and 2.03 MPa, respectively, compared with 0.79 MPa for the untreated control. Similarly, the CBR values for the treated samples were 11.2%, 15%, and 18.5%, whereas the control sample exhibited 7.8%. Based on these findings, the 7.5 wt% styrene–acrylic copolymer treatment after 21 days of curing is proposed as the optimum dosage for enhancing the strength and bearing capacity of weak geotechnical soils, while simultaneously mitigating road dust emissions.

Keywords: Unconfined compressive strength (UCS); California bearing ratio (CBR); Atterberg limits; Proctor compaction; Weak geotechnical soil

* Corresponding Author: Mahboub Saffari
Email: mahboobsaffari@gmail.com
Phone: 03433776611



مقاله پژوهشی

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۲۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۰۶

پایدارسازی شیمیایی خاک‌های ماسه‌سیلتی با پلیمر استایرن-اکریلیک: رویکردی ژئوتکنیکی و محیط‌زیستی در تثبیت و کاهش گردوغبار جاده‌ای

محبوب صفاری^{*}، معصومه معاذالهی^۲، سید مرتضی موسوی راد^۱

^۱ دانشیار گروه محیط زیست، پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان
^۲ پژوهشگر مستقل، پژوهشکده علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران

چکیده

خاک‌های ماسه‌سیلتی سطحی، به‌عنوان یکی از نمونه‌های شاخص خاک‌های ضعیف ژئوتکنیکی، به دلیل مقاومت برشی پایین، حساسیت بالا به فرسایش و قابلیت رهایش گردوغبار، از چالش‌های مهم در حوزه مهندسی راه و مدیریت محیط‌زیست محسوب می‌شوند. در این پژوهش، تأثیر استفاده از کوپلیمر استایرن-اکریلیک بر بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی این خاک‌ها مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور، نمونه‌های خاک با سه سطح مختلف از افزودنی پلیمری (۲/۵، ۵ و ۷/۵ درصد وزنی) آماده‌سازی شدند. ابتدا آزمایش‌های تراکم پروکتور، حدود آتربرگ و جمع‌شدگی خطی بر روی نمونه‌ها انجام گرفت. سپس به منظور ارزیابی رفتار زمانی پلیمر، نمونه‌های متراکم‌شده تحت آزمایش‌های مقاومت فشاری محصورنشده (UCS) و نسبت باربری کالیفرنیا (CBR) پس از دو دوره ماندگاری ۷ و ۲۱ روزه قرار گرفتند. نتایج نشان داد که افزودن پلیمر، بدون تغییر عمده در توزیع دانه‌ای، وزن مخصوص خشک خاک را از 1.79 g/cm^3 در نمونه شاهد به $1.77-1.72 \text{ g/cm}^3$ کاهش داد و رطوبت بهینه حداکثر تراکم را از ۸٪ به $8.5-9.6\%$ افزایش داد. همچنین به تبع افزودن پلیمر، حدود روانی (LL) از ۲۰٪ به $21-23\%$ و حد پلاستیک (PL) از ۱۲٪ به $13-14\%$ افزایش یافت، در حالی که شاخص پلاستیسیته تقریباً ثابت ماند (۸-۹٪). مقاومت UCS پس از ۲۱ روز ماندگاری به ترتیب برای نمونه‌های حاوی 2.5% ، 5% و 7.5% کوپلیمر استایرن-اکریلیک برابر با 1.18 MPa ، 1.64 MPa و 2.03 MPa بود. در حالی که نمونه شاهد فاقد پلیمر 0.79 MPa مقاومت داشت. نسبت باربری کالیفرنیا (CBR) نیز به ترتیب برای همان تیمارها برابر با 11.2% ، 15% و 18.5% اندازه‌گیری شد، در حالی که نمونه شاهد 7.8% بود. بر اساس نتایج، تیمار 7.5% وزنی کوپلیمر استایرن-اکریلیک پس از ۲۱ روز ماندگاری به عنوان درصد بهینه برای ارتقای مقاومت و ظرفیت باربری خاک‌های ضعیف ژئوتکنیکی پیشنهاد می‌شود، که همزمان کاهش انتشار گردوغبار جاده‌ای را نیز فراهم می‌کند.

کلمات کلیدی: مقاومت فشاری محصورنشده، نسبت باربری کالیفرنیا، حدود آتربرگ، تراکم پروکتور، خاک ضعیف ژئوتکنیکی

۱- مقدمه

تثبیت و بهسازی خاک به عنوان یکی از ارکان اصلی مهندسی ژئوتکنیک، نقشی تعیین کننده در تضمین پایداری، دوام و ایمنی سازه‌ها و زیرساخت‌های عمرانی ایفا می‌کند. این اهمیت به‌ویژه در پروژه‌های احداث و نگهداری راه‌ها در مناطقی که خاک‌های موجود کیفیت مهندسی مطلوبی ندارند و تأمین مصالح جایگزین پرهزینه یا غیرعملی است، دوچندان می‌شود. استفاده از راهکارهای تثبیت درجا، علاوه بر کاهش نیاز به برداشت و جایگزینی گسترده خاک، آثار مثبت اقتصادی و زیست‌محیطی قابل توجهی نیز به همراه دارد. از همین رو، طی دهه‌های اخیر این رویکرد به یکی از گزینه‌های اصلی در مدیریت پایدار خاک و مصالح عمرانی بدل شده است [۱].

به‌طور کلی، روش‌های تثبیت خاک را می‌توان در سه دسته مکانیکی، شیمیایی و فیزیکی طبقه‌بندی کرد [۲]. در تثبیت مکانیکی، تراکم و کاهش تخلخل ساختار خاک عمدتاً به‌منظور افزایش مقاومت و سختی انجام می‌شود، در حالی که تثبیت شیمیایی مبتنی بر واکنش‌ها یا پیوندهایی با افزودنی‌هایی نظیر سیمان، آهک یا پلیمرها است. روش‌های فیزیکی با تغییر شرایط فیزیکی یا ریزساختار خاک می‌توانند خواص را دگرگون کنند، اما این روش‌ها به‌ندرت در راه‌سازی سطحی کاربرد عملی دارند و عمدتاً در کاربردهای ویژه مورد استفاده قرار می‌گیرند. در عمل، ترکیب تثبیت مکانیکی و شیمیایی، مانند تراکم کنترل‌شده همراه با افزودن تثبیت‌کننده‌های شیمیایی یا پلیمری، برای دستیابی به راه‌حل‌های فنی و اقتصادی بهینه در راه‌سازی خاکی رایج‌تر است [۳].

با وجود کارایی تثبیت‌کننده‌های معدنی متداول مانند سیمان و آهک، محدودیت‌هایی نظیر انتشار بالای دی‌اکسیدکربن، مصرف زیاد انرژی و حساسیت عملکرد به شرایط محیطی، موجب شده است پژوهشگران به سمت گزینه‌های جایگزین پایدارتر سوق پیدا کنند [۴]. در این میان، پلیمرها به‌عنوان تثبیت‌کننده‌های نوین، به دلیل وزن کم، سهولت حمل و اختلاط، زمان ماندگاری کوتاه و امکان تنظیم خواص شیمیایی، توجه فزاینده‌ای را به خود جلب کرده‌اند [۵، ۶]. این ترکیبات، اعم از طبیعی یا مصنوعی (سنتتیک)، از طریق ایجاد پل‌های فیزیکی، پیوندهای شیمیایی سطحی و تغییر خصوصیات بین‌ذره‌ای، موجب افزایش انسجام خاک و کاهش حساسیت آن نسبت به تغییرات رطوبتی و بارگذاری می‌شوند [۷، ۸].

با این حال، عملکرد پلیمرها در تثبیت خاک به‌شدت به ویژگی‌های ذاتی خاک (از جمله بافت، ترکیب معدنی، رطوبت طبیعی و چگالی خشک) و نیز میزان و نحوه کاربرد پلیمر وابسته است. همچنین، ترکیب‌های اختصاصی و اغلب محرمانه محصولات تجاری، ارزیابی علمی و مقایسه‌پذیری نتایج را دشوار می‌سازد [۹-۱۱]. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که پلیمرهای مختلف مانند کوپلیمرهای اکریلیک-وینیل، پلی‌اکریلامیدها، هیدروکلوئیدها و مشتقات آکریلات، از طریق مکانیسم‌هایی چون ژل‌سازی، پل‌سازی بین‌ذرات و اصلاح سطحی می‌توانند خواص مکانیکی و هیدرولیکی خاک را بهبود بخشند [۱۲-۱۴]. با وجود این، کارایی یک ترکیب مشخص در انواع مختلف خاک ممکن است به‌طور قابل توجهی متفاوت باشد و همین امر ضرورت پژوهش‌های سیستماتیک و پارامتریک را برجسته می‌سازد [۱۵-۱۶].

در حوزه کاربردی، گردوغبار جاده‌ای ناشی از خاک‌های دانه‌ای و نیمه‌دانه‌ای یکی از معضلات جدی زیست‌محیطی و بهداشتی محسوب می‌شود. این پدیده علاوه بر تهدید سلامت عمومی، موجب کاهش کیفیت هوا، فرسایش سطحی جاده و افزایش هزینه‌های نگهداری می‌گردد. از این رو، یافتن راهکارهایی که همزمان ظرفیت باربری و مقاومت مکانیکی خاک را ارتقا داده و از رهاسازی ذرات ریز جلوگیری کنند، از دیدگاه مهندسی و محیط‌زیست اهمیت بالایی دارد [۱۷-۲۰].

با وجود گسترش مطالعات بر روی انواع پلیمرها، بررسی‌های جامع در زمینه تأثیر کوپلیمر استایرن-اکریلیک بر خاک‌های ماسه-سیلتی، به‌ویژه در ابعاد همزمان بهسازی ژئوتکنیکی و کنترل گردوغبار جاده‌ای، همچنان محدود است. این پژوهش با هدف پر کردن این خلأ علمی انجام شده و به بررسی اثرات کاربرد پلیمر مایع استایرن-اکریلیک در مقادیر ۲/۵، ۵ و ۷/۵ درصد بر خواص فیزیکی و مکانیکی یک خاک ماسه-سیلتی می‌پردازد. برای این منظور، مجموعه‌ای از آزمون‌های استاندارد شامل وزن مخصوص ویژه، دانه‌بندی، حدود آتربرگ، پروکتور استاندارد، مقاومت فشاری محصورنشده (UCS) و نسبت باربری کالیفرنیا (CBR) بر روی نمونه‌های تیمارشده با کوپلیمر استایرن-اکریلیک و شاهد اجرا شد. هدف نهایی این مطالعه، ارزیابی کارایی این افزودنی به‌عنوان رویکردی پایدار و کم‌اثر بر محیط‌زیست برای تثبیت و بهسازی خاک و کاهش گردوغبار جاده‌ای است.

¹ Unconfined compressive strength

² California bearing ratio

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- خاک و پلیمر مورد مطالعه

نمونه خاک مورد استفاده از محدوده معدن مس میدوک، واقع در ۴۲ کیلومتری شمال شرقی شهرستان شهربابک (استان کرمان) برداشت گردید. انتخاب این خاک به دلیل فراوانی بافت ماسه-سیلتی در این ناحیه و چالش‌های مرتبط با مقاومت پایین و پتانسیل بالای تولید گردوغبار صنایع معدنی صورت گرفت. آماده‌سازی اولیه خاک مطابق با روش استاندارد ASTM D421-85 انجام شد. بدین منظور، نمونه‌ها پس از خشک شدن در شرایط محیطی به مدت ۴۸ ساعت، خرد شده و کلوخه‌ها شکسته شدند. برای انجام آزمایش‌های مکانیکی (مانند پروکتور (تراکم خاک)، سنجش مقاومت محصورنشده خاک (UCS) و نسبت باربری کالیفرنیا (CBR))، بخش عبوری از الک شماره ۴۰ (چشمه ۴۲۵ میکرون) انتخاب و در آون با دمای ۱۰۵ °C به مدت ۲۴ ساعت تا رسیدن به وزن ثابت خشک گردید و سپس در ظروف درب‌دار و عایق رطوبت نگهداری شد. با این حال، برای تعیین مشخصات کلی خاک و توزیع کامل دانه‌ها، آزمایش دانه‌بندی به روش ترکیبی الک‌سنجی و هیدرومتر طبق استاندارد ASTM D422-63 بر روی نمونه دست‌نخورده (بدون محدودیت الک اولیه) انجام گرفت. همچنین حدود آتربریگ خاک شامل حد روانی و حد پلاستیک مطابق با استاندارد ASTM D4318 تعیین شد. برای اندازه‌گیری حد مایع از دستگاه کاساگرانده استفاده شد و حد پلاستیک با روش رول کردن خمیر خاک بر روی سطح صاف تعیین گردید. شاخص پلاستیک و دامنه پلاستیک خاک از این آزمون‌ها استخراج شد.

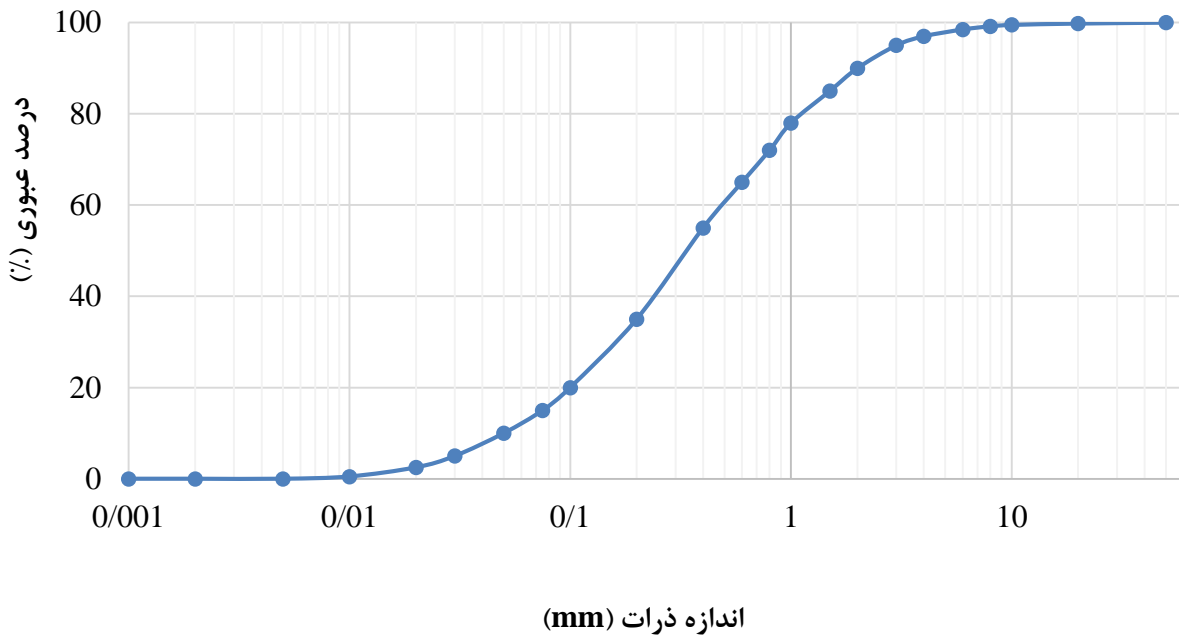
پلیمر مورد استفاده در مطالعه حاضر؛ کوپلیمر استایرن-اکریلیک با پایه آبی بود. مشخصات فیزیکی و شیمیایی این ماده در جدول ۱ ارائه شده است. این پلیمر با دارا بودن ۵۰ درصد مواد جامد، گرانروی ۳۵۰۰ سانتی‌پواز در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و pH برابر ۸، پس از خشک شدن فیلمی شفاف، غیرچسبنده و مقاوم در برابر آب تشکیل می‌دهد.

جدول ۱- مشخصات فیزیکی و شیمیایی پلیمر استایرن-اکریلیک مورد استفاده در مطالعه حاضر

مقدار / ویژگی	مشخصه	مقدار / ویژگی	مشخصه
۱۶ °C	حداقل دمای تشکیل فیلم	مایع شیری رنگ	حالت فیزیکی
۱/۰۲ g/cm ³	چگالی	۵۰ ± ۱ درصد	درصد مواد جامد
شفاف و انعطاف‌پذیر	ویژگی‌های فیلم خشک‌شده	۳۵۰۰ ± ۱۵۰۰ سانتی‌پواز	گرانروی در ۲۵ °C
کوپلیمر امولسیون (آنیونی)	پایه شیمیایی	۱ ± ۸	pH

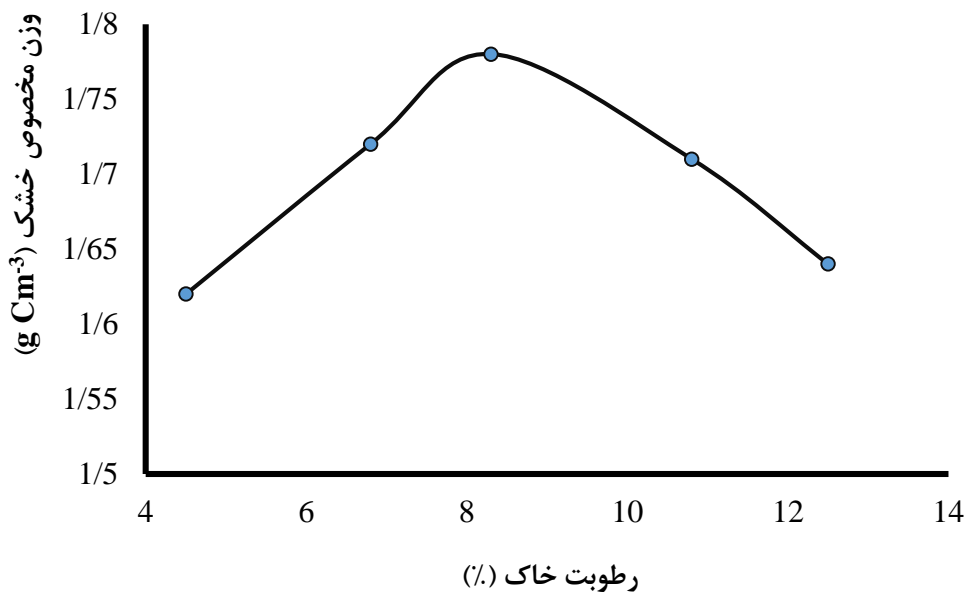
۲-۲- مشخصات ژئوتکنیکی خاک

آزمایش دانه‌بندی برای خاک مورد نظر مطابق استاندارد ASTM D422-63 انجام شد. بر اساس نتایج دانه‌بندی و با استفاده از سیستم طبقه‌بندی متحد (USCS) مطابق استاندارد ASTM D2487-00، خاک در گروه SM (ماسه سیلتی، Silty Sand) قرار گرفت. توزیع دانه‌بندی این خاک در شکل ۱ ارائه شده است.



شکل ۱- منحنی دانه بندی خاک مورد مطالعه

مقادیر حداکثر وزن مخصوص خشک و رطوبت بهینه (OMC) این خاک که از آزمایش تراکم پروکتور استاندارد مطابق با AASHTO T180 به دست آمد، به ترتیب حدود $1/79 \text{ g/cm}^3$ و ۸ درصد تعیین شدند (شکل ۲). این مقادیر به عنوان مبنای آماده‌سازی نمونه‌های آزمایشگاهی مورد استفاده قرار گرفتند.



شکل ۲- منحنی تراکم (پروکتور استاندارد) همراه با مقادیر حداکثر وزن مخصوص خشک و رطوبت بهینه

۲-۳- آماده‌سازی نمونه‌ها و آزمایش‌های مکانیکی

آزمون مقاومت فشاری محصورنشده (UCS) بر اساس استاندارد ASTM D2166/D2166M انجام شد. بدین منظور، نمونه شاهد (فاقد پلیمر) و نمونه‌های حاوی پلیمر استایرن-اکریلیک در سه درصد وزنی ۲/۵، ۵ و ۷/۵ درصد نسبت به وزن خشک خاک، در شرایط رطوبت بهینه و حداکثر وزن مخصوص خشک متناظر تهیه گردیدند. فرآیند اختلاط خاک و پلیمر در این پژوهش به صورت دستی انجام شد. پس از تنظیم خاک بر رطوبت بهینه، مقدار مشخصی از پلیمر استایرن-اکریلیک به صورت تدریجی و با استفاده از بطری اسپری در سطح خاک پخش گردید. سپس مخلوط به مدت حدود ۵ تا ۷ دقیقه با دست هم زده شد تا یکنواختی کامل از نظر توزیع پلیمر حاصل شود. تمامی مراحل اختلاط در شرایط دمای آزمایشگاهی (۲۵±۲ درجه سانتی‌گراد) انجام گرفت. انتخاب روش دستی به منظور جلوگیری از ایجاد برش بیش از حد، خشک شدن زود هنگام پلیمر و حفظ پیوستگی مخلوط صورت گرفت. اختلاط خاک و پلیمر پس از آماده‌سازی در قالب‌های استوانه‌ای استاندارد با قطر ۵ سانتی‌متر و ارتفاع دو برابر قطر در پنج لایه متراکم شد. تمامی لایه‌ها انرژی تراکم به صورت یکنواخت اعمال گردید و سطح هر لایه پیش از ریختن لایه بعدی برای ایجاد پیوند مناسب به طور یکنواخت خراش داده شد. پس از خروج از قالب، نمونه‌ها در شرایط آزمایشگاهی در دمای ۲۵±۲ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند. برای بررسی تأثیر زمان، دوره‌های ماندگاری ۷ و ۲۱ روزه در نظر گرفته شد. در پایان هر دوره، نمونه‌ها با نرخ تغییر طول ثابت معادل یک درصد در دقیقه تحت بارگذاری قرار گرفتند تا مقاومت فشاری نهایی اندازه‌گیری شود. برای هر درصد وزنی پلیمر سه نمونه ساخته و میانگین نتایج گزارش گردید.

به منظور ارزیابی تأثیر سطوح مختلف پلیمر بر جمع‌شدگی خاک، مقادیر جمع‌شدگی خطی نمونه‌ها مطابق استاندارد AASHTO T92 تعیین شد. در این روش، نمونه‌های خاک تیمار شده و شاهد در قالب‌های استاندارد قرار گرفته و پس از خشک شدن در شرایط کنترل شده، تغییر طول طولی آنها اندازه‌گیری شد تا درصد جمع‌شدگی خطی محاسبه گردد.

آزمون CBR طبق استاندارد ASTM D1883 بر روی نمونه‌ها انجام شد. برای آماده‌سازی، خاک و پلیمر با رطوبت بهینه مخلوط و به صورت لایه‌ای در قالب‌های CBR (قطر اینچ و ارتفاع ۷ اینچ) ریخته شدند. تراکم در سه لایه متوالی با استفاده از چکش استاندارد و انرژی تراکم ثابت انجام گرفت تا به وزن مخصوص خشک هدف برسد. مشابه آزمون UCS، سطح لایه‌ها پیش از قرارگیری لایه بعدی خراش داده شد تا پیوستگی کامل ایجاد شود. پس از متراکم‌سازی، نمونه‌ها به مدت ۷ و ۲۱ روز تحت شرایط دمای آزمایشگاه ماندگاری گردیدند. سپس قالب‌ها در دستگاه CBR نصب شده و بارگذاری با نرخ نفوذ ثابت انجام شد تا مقادیر باربری در نفوذهای ۰/۱ و ۰/۲ اینچ محاسبه و شاخص CBR استخراج شود.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- خصوصیات فیزیکی خاک مورد مطالعه

بر اساس نتایج بدست آمده، دانه‌بندی خاک با میان‌بایی خطی در نمودار نیمه‌لوگ نشان داد (شکل ۱) که مقادیر D_{30} و D_{60} به ترتیب برابر با ۰/۴۴، ۰/۱۶۸ و ۰/۴۹ میلی‌متر می‌باشد. از این داده‌ها، ضرایب یکنواختی و خمیدگی به ترتیب ۱/۱ و ۱/۳۱ محاسبه شد که نشان‌دهنده توزیع دانه‌ای شکاف‌دار و رده‌بندی ضعیف خاک است. درصد عبوری از الک ۰/۰۷۵ میلی‌متر ۱۷/۷ درصد اندازه‌گیری شد، بنابراین خاک عمدتاً از نوع شن با محتویات سیلت (silty sand) محسوب می‌شود و بر اساس سیستم طبقه‌بندی متحد (USCS) مطابق استاندارد ASTM D2487-00، به گروه SM تعلق دارد. حد روانی (LL) خاک برابر با ۲۰٪، حد پلاستیک (PL) برابر با ۱۲٪ و شاخص پلاستیسیته برابر با ۸٪ اندازه‌گیری شد، که نشان می‌دهد خاک غیرپلاستیک (NP) است.

^۱Li near Shri n kage

^۲Li qui d l i m t

^۳Pl ast i c l i m t

^۴Non-pl ast i c

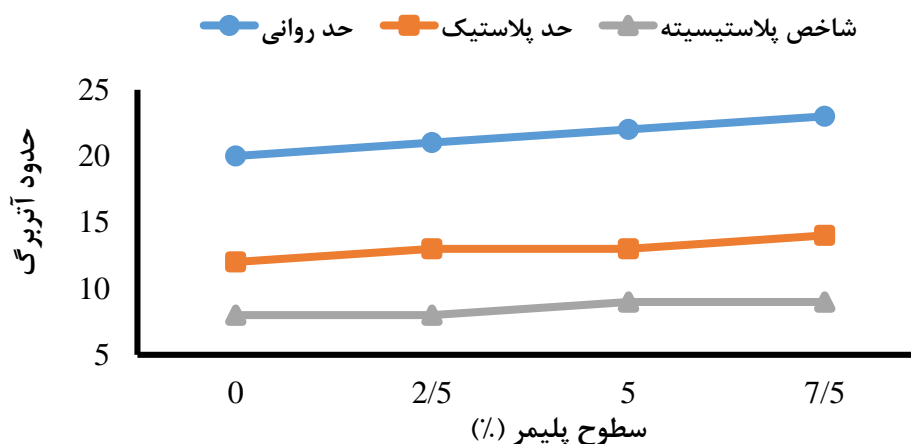
۳-۲- تغییرات حدود آتربرگ

به منظور بررسی تأثیر سطوح مختلف پلیمر بر حدود آتربرگ خاک، نتایج آزمون‌های مربوطه برای نمونه‌های تیمار شده در شکل ۲ ارائه شده است. داده‌ها نشان می‌دهد که با افزایش درصد پلیمر استایرن-اکریلیک، حد روانی (LL) و حد پلاستیک (PL) خاک به‌طور نسبی افزایش یافته‌اند؛ به‌طوری که LL از حدود ۲۰٪ در نمونه بدون پلیمر به ۲۳٪ در نمونه با بالاترین درصد پلیمر رسید و PL نیز از ۱۲٪ به ۱۴٪ افزایش یافت. شاخص پلاستیسیته (PI) تغییر کمی داشته و از ۸٪ به ۹٪ رسیده است، که نشان می‌دهد افزودن پلیمر تأثیر قابل توجهی بر پلاستیسیته کلی خاک ندارد، اما ظرفیت نگهداری آب و چسبندگی ذرات را به‌طور محسوس افزایش می‌دهد.

از منظر ژئوتکنیکی، افزایش اندک LL و PL نشان‌دهنده تغییرات کمی در رفتار پلاستیک-روانی است و با مکانیسم‌های سطحی ضعیف تا متوسط بین زنجیره‌های پلیمری و ذرات ریز سازگار است. پلیمرها با تشکیل فیلم سطحی و پل‌زنی بین ذرات، توانایی نگهداری آب سطحی را افزایش می‌دهند، بدون آنکه ساختار ریزدانه‌ای اصلی خاک (سیلت و رس) تغییر کند؛ بنابراین شاخص پلاستیسیته تقریباً ثابت باقی می‌ماند. استایرن-اکریلیک عمدتاً از طریق مکانیسم‌های فیزیکی نظیر چسبندگی، تشکیل فیلم و پل‌زنی بین ذرات عمل می‌کند و نقش قابل توجهی در واکنش‌های هیدرولیکی ندارد. این سازوکار باعث افزایش مقاومت پیوندی بین ذرات سطحی و بهبود انسجام و ظرفیت نگهداری آب خاک می‌شود، که با الگوی تغییرات LL و PL مشاهده شده همخوانی دارد.

افزایش اندک LL و PL می‌تواند تأثیر جزئی بر محدوده رطوبتی قابل تراکم^۱ داشته باشد و رطوبت بهینه طراحی برای تراکم ممکن است کمی جابه‌جا شود، اما تغییرات آن به قدری کم است که الزامات کلی تراکم یا انتخاب روش تثبیت را تغییر نمی‌دهد. افزایش چسبندگی سطحی و ظرفیت نگهداری آب می‌تواند نفوذپذیری مؤثر خاک را کاهش دهد و مقاومت خاک در برابر فرسایش سطحی و رهاش ذرات (گردوغبار) را بهبود بخشد. با توجه به ثابت ماندن PI و حفظ توزیع دانه‌ای ماسه‌ای، انتظار می‌رود که افزایش انسجام سطحی بهبودهایی در مقاومت فشاری کوتاه‌مدت (UCS) و ظرفیت باربری کالیفرنیا (CBR) ایجاد کند، در حالی که دوام بلندمدت خاک به پایداری پوشش پلیمری در برابر شستشو و سیکل‌های مرطوب-خشک وابسته است.

در مطالعه کولای و همکاران (۲۰۱۶)، برای تثبیت خاک‌های ریزدانه از کوپلیمر اکریلیک مایع به‌صورت تجاری استفاده شد. در این پژوهش دو نوع خاک (خاک A با بافت رسی با پلاستیسیته بالا و خاک B با بافت سیلتی با پلاستیسیته بالا) بررسی گردید. پلیمر در مقادیر ۲، ۳، ۴ و ۵ درصد وزنی نسبت به وزن خشک خاک به مخلوط افزوده شد. نتایج آزمایش‌های آتربرگ نشان داد که افزودن این کوپلیمر تغییر قابل توجهی در حدود روانی (LL) و حد خمیری (PL) ایجاد نکرد و مقادیر ثبت‌شده در هر دو نوع خاک در محدوده نزدیک به خاک شاهد باقی ماند [۲۱]. در مطالعه ای دیگر، اونیجکوه و غطورا (۲۰۱۵) نیز گزارش کردند که افزودن پلیمر در محدوده درصدهای معمول، تغییر معنی‌داری در حدود روانی، خمیری و جمع‌شدگی خطی ایجاد نمی‌کند [۲۲].



شکل ۳- تأثیر سطوح مختلف پلیمر استایرن-اکریلیک بر حدود آتربرگ خاک مورد مطالعه

¹ Plasticity index

² Compaction window

۳-۳- تغییرات جمع شدگی خطی

جدول ۲ مقادیر جمع شدگی خطی خاک مورد مطالعه را در سطوح مختلف افزودن پلیمر نشان می‌دهد. این شاخص مستقیماً با پتانسیل ترک خوردگی، کاهش یکپارچگی و افت مقاومت برشی خاک در اثر تنش‌های ناشی از خشک شدن مرتبط است. بر اساس نتایج حاضر، با افزایش درصد پلیمر، جمع شدگی خطی به طور جزئی افزایش یافته است؛ به طوری که مقدار آن از ۱۴٪ در نمونه شاهد به ۱۶٪ در نمونه با ۷/۵٪ پلیمر رسیده است. این تغییر اندک نشان می‌دهد که افزودن پلیمر تأثیر بنیادی بر رفتار حجمی خاک ندارد، اما ظرفیت خاک برای نگهداری آب سطحی و انسجام ذرات ریز تا حدی بهبود یافته است. مکانیسم محتمل این افزایش جزئی، ایجاد پوشش و پل‌های پلیمری بین ذرات است که مانع جداسازی آزاد ذرات هنگام خشک شدن می‌شود و جمع شدگی موضعی اندکی را موجب می‌گردد. از منظر کاربردی، این تغییر محدود می‌تواند نیاز به کنترل رطوبت در مراحل خشک شدن و تراکم لایه‌های تثبیت شده را کمی افزایش دهد، ولی اثر منفی قابل توجهی بر عملکرد کلی عملیات تثبیت و تراکم انتظار نمی‌رود. با این حال، برای ارزیابی دوام بلندمدت و پیش‌بینی رفتار تحت سیکل‌های مرطوب-خشک، انجام آزمون‌های تکمیلی توصیه می‌شود تا اثرات احتمالی بر ترک خوردگی سطحی و پایداری پوشش پلیمری مشخص گردد. در مطالعه کولای و همکاران (۲۰۱۶)، میزان جمع شدگی خطی برای خاک‌های بافت رسی و سیلتی با پلاستیسیته بالا به ترتیب ۱۳٪ و ۱۵٪ ثبت شد و با افزایش درصد پلیمر تنها تغییرات جزئی در این شاخص مشاهده گردید [۲۱]. این شواهد حاکی از آن است که اثر اصلی پلیمر در این خاک‌ها نه بر تغییرات حدود آتربرگ، بلکه بر بهبود پیوستگی ساختاری، کاهش تخلخل و تقویت پیوندهای بین‌ذره‌ای جهت افزایش مقاومت مکانیکی و ظرفیت باربری خاک خواهد بود.

جدول ۲- مقادیر جمع شدگی خطی برای خاک مورد مطالعه با سطوح مختلف پلیمر

سطوح پلیمر (%)	جمع شدگی خطی (%)
۰	۱۴
۲/۵	۱۴
۵	۱۵
۷/۵	۱۶

۳-۴- تغییرات میزان تراکم حداکثر و رطوبت بهینه

جدول ۳ نتایج آزمون پروکتور استاندارد برای خاک مورد مطالعه در حضور سطوح مختلف کوپلیمر استایرن-اکریلیک را نشان می‌دهد. مطابق داده‌ها، با افزایش درصد پلیمر، حداکثر وزن مخصوص خشک کاهش یافته و از حدود $1/79 \text{ g/cm}^3$ در نمونه شاهد به $1/72 \text{ g/cm}^3$ در نمونه با ۷/۵٪ پلیمر رسیده است، در حالی که رطوبت بهینه به طور متناظر از ۸٪ به ۹/۶٪ افزایش یافته است. این تغییرات بیانگر تأثیر پوشش‌دهی سطحی ذرات توسط فیلم پلیمری و محدود شدن امکان آرایش متراکم دانه‌هاست که منجر به کاهش تراکم‌پذیری می‌شود. افزایش رطوبت بهینه نیز ناشی از نیاز به مقدار آب بیشتر برای تسهیل لغزش ذرات و شکل‌گیری پیوندهای سطحی مناسب است. از نظر ژئوتکنیکی کاهش وزن مخصوص خشک همراه با افزایش چسبندگی سطحی اثرات دوگانه‌ای بر رفتار خاک ایجاد می‌کند؛ از یک سو موجب کاهش جزئی مدول ثابته و افزایش تغییر شکل‌پذیری می‌شود و از سوی دیگر باعث بهبود انسجام سطحی و افزایش مقاومت ابتدایی (UCS و CBR) همراه با کاهش نفوذپذیری و فرسایش سطحی خواهد شد. با این حال، تغییرات نسبتاً محدودند و انتظار نمی‌رود اثر منفی قابل توجهی بر عملکرد کلی لایه‌های خاک تثبیت شده داشته باشند. این نتایج بر اهمیت تأمین رطوبت مناسب و تراکم کافی در نمونه‌ها برای دستیابی به خواص مهندسی هدفمند تأکید می‌کند.

در مطالعه کولای و همکاران (۲۰۱۶)، بر اساس نتایج آزمایش پروکتور استاندارد، رطوبت بهینه و حداکثر وزن مخصوص خشک برای خاک با بافت رسی با پلاستیسیته بالا به ترتیب ۲۳/۵٪ و 15 kN/m^3 ($1/53 \text{ g/cm}^3$) و برای خاک با بافت سیلتی با پلاستیسیته بالا به ترتیب ۳۲/۴٪ و $13/12 \text{ kN/m}^3$ ($1/31 \text{ g/cm}^3$) به دست آمد. همچنین مشاهده شد که با افزایش درصد کوپلیمر اکریلیک مایع، مقدار وزن مخصوص خشک هر دو خاک کاهش یافت. این پدیده به پایین‌تر بودن وزن مخصوص ظاهری پلیمر و آب نسبت به ذرات خاک نسبت داده شد [۲۱].

جدول ۳- نتایج آزمون پروکتور برای خاک مورد مطالعه با سطوح مختلف پلیمر، نشان‌دهنده رطوبت بهینه و حداکثر چگالی خشک

سطح پلیمر (%)	رطوبت بهینه (%)	حداکثر چگالی خشک (g/cm ³)
۰	۸	۱/۷۹
۲/۵	۸/۵	۱/۷۷
۵	۹	۱/۷۴
۷/۵	۹/۶	۱/۷۲

۳-۵- تغییرات مقاومت فشاری تک‌محوره

شکل ۴ نتایج آزمون مقاومت فشاری تک‌محوره (UCS) خاک تیمار شده با سطوح مختلف کوپلیمر استایرن-اکریلیک پس از دو دوره ماندگاری ۷ و ۲۱ روز را نشان می‌دهد. داده‌ها حاکی از افزایش پیوسته و معنی‌دار مقاومت فشاری خاک می‌شود، به طوری که نمونه شاهد از 0.58 MPa در روز هفتم به 0.79 MPa در روز بیست‌ویکم افزایش می‌یابد، در حالی که نمونه حاوی ۷/۵٪ پلیمر به ترتیب به 1.72 MPa و 2.03 MPa می‌رسد. این افزایش مقاومت، ناشی از تشکیل فیلم‌ها و پل‌های پلیمری بین ذرات است که انسجام بین‌ذره‌ای را تقویت کرده و شبکه باربری داخلی خاک را بهبود می‌بخشد. افزایش بیشتر مقاومت با زمان ماندگاری، بیانگر تکمیل تدریجی فرایند تثبیت فیزیکوشیمیایی پلیمر و بهبود پیوستگی ماتریس خاک-پلیمر است، که امکان انتقال مؤثرتر بار بین ذرات را فراهم می‌کند.

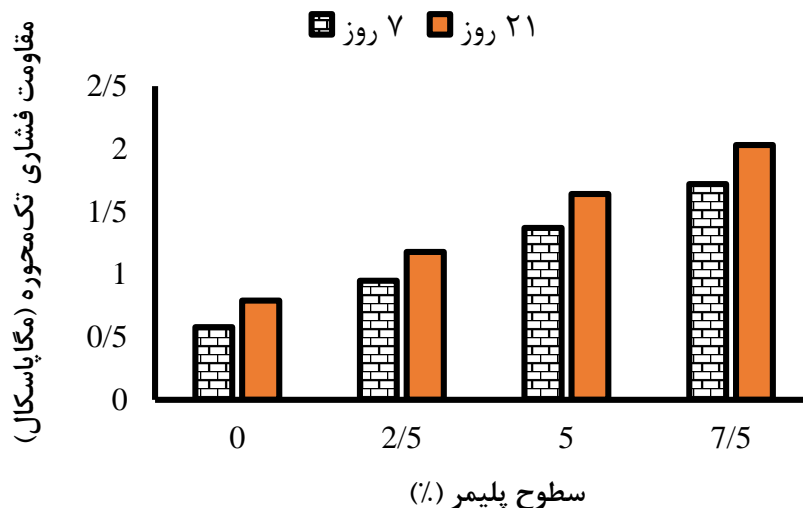
بر اساس نتایج بدست آمده، پس از ۷ روز ماندگاری، نمونه‌های حاوی ۲/۵، ۵ و ۷/۵ درصد پلیمر به ترتیب ۰/۹۵، ۱/۳۷ و ۱/۷۲ مگاپاسکال مقاومت نشان دادند که نسبت به نمونه شاهد (۰/۵۸ مگاپاسکال) معادل ۶۳/۸، ۱۳۶/۲ و ۱۹۶/۶ درصد افزایش مقاومت را به همراه داشت. این روند بهبودی پس از ۲۱ روز ماندگاری نیز تداوم یافت، به طوری که مقاومت نمونه‌ها به ترتیب به ۱/۱۸، ۱/۶۴ و ۲/۰۳ مگاپاسکال رسید که نسبت به نمونه شاهد (۰/۷۹ مگاپاسکال) ۴۹/۴، ۱۰۷/۶ و ۱۵۷ درصد افزایش نشان می‌داد.

تجزیه و تحلیل دقیق الگوی افزایش مقاومت حاکی از دو روند مهم بود. از یک سو، افزایش مطلق مقاومت در غلظت‌های بالاتر پلیمر کاملاً مشهود است، به طوری که مقاومت نمونه ۷/۵ درصدی پس از ۷ روز ماندگاری به نزدیک ۳ برابر مقاومت نمونه شاهد رسید. از سوی دیگر، بررسی بازدهی افزایش مقاومت به ازای هر واحد درصد پلیمر اضافه شده نشان داد که بیشترین نرخ بهبود در محدوده ۲/۵ تا ۵ درصد پلیمر رخ داده است. در این بازه، به ازای هر ۱ درصد افزایش پلیمر، مقاومت به طور میانگین حدود ۲۹ درصد رشد کرد، در حالی که این نرخ بهبود در بازه ۵ تا ۷/۵ درصد پلیمر به حدود ۲۴ درصد کاهش یافت. این الگوی کاهشی در نرخ بازدهی می‌تواند نشان‌دهنده آغاز فرآیند اشباع نسبی نقاط فعال روی سطح ذرات خاک برای تشکیل پیوندهای پلیمری جدید باشد. با این وجود، حتی در غلظت ۷/۵ درصد، افزایش کلی مقاومت از نظر فنی کاملاً معنادار و قابل توجه است. از منظر کاربردی، این نتایج نشان می‌دهد که برای پروژه‌هایی با محدودیت بودجه، غلظت ۵ درصد پلیمر می‌تواند به عنوان نقطه بهینه اقتصادی-عملکردی در نظر گرفته شود، در حالی که برای دستیابی به حداکثر مقاومت ممکن، استفاده از غلظت ۷/۵ درصد پلیمر با دوره ماندگاری ۲۱ روزه توصیه می‌شود. در مطالعه کولای و همکاران (۲۰۱۶)، نتایج آزمون مقاومت فشاری محصور نشده نشان داد که شرایط ماندگاری (در شرایط محیطی یا محصور شده درون کیسه) نقش تعیین‌کننده‌ای در بهبود خواص مکانیکی خاک‌های تثبیت‌شده با پلیمر دارد. در شرایط ماندگاری محصور، به دلیل محدود بودن تبخیر آب و عدم وقوع کامل فرآیند پلیمریزاسیون، افزایش قابل توجهی در مقاومت خاک‌های A (بافت رسی با پلاستیسیته بالا) و B (بافت سیلتی با پلاستیسیته بالا) مشاهده نشد. در مقابل، در شرایط ماندگاری در هوای آزاد، خاک B با افزودن ۴٪ کوپلیمر اکریلیک پس از ۲۸ روز افزایش مقاومت قابل توجهی معادل ۷۵/۵٪ نسبت به نمونه شاهد نشان داد، در حالی که در مورد خاک A تنها افزایش اندکی در حدود ۷-۱۰٪ ثبت شد [۲۱].

در مطالعه تیواری و همکاران (۲۰۲۰)، اثر تثبیت ترکیبی خاک رسی انبساطی با الیاف پلی‌پروپیلن (۰/۲۵، ۰/۵ و ۱٪ PP) و پودر سیلیکا فوم (۲، ۴ و ۸٪ SF) به منظور بهبود خواص مکانیکی و کاهش پتانسیل تورم-انقباض به عنوان بستر جاده بررسی شد. نتایج این پژوهش نشان داد که افزودن SF و PP موجب افزایش CBR و کاهش سطح جمع‌شدگی شد. همچنین، حدود آتربرگ کاهش یافته و رفتار جمع‌شدگی-تورم خاک به طور چشمگیری بهبود یافت [۲۳].

در مطالعه کریم و ال‌سودانی (۲۰۱۸)، اثر افزودن پلیمر بر خاک‌های رسی مورد بررسی قرار گرفت. برای تثبیت خاک، از فیبر پلی‌پروپیلن به صورت همگن استفاده شد و به خاک با درصدهای وزنی ۰، ۱/۵، ۳ و ۵٪ افزوده شد. نتایج نشان داد که با افزایش میزان

پلیمر، رطوبت بهینه افزایش و وزن مخصوص کاهش یافت. برای حدود آتربرگ، حد روانی و شاخص پلاستیسیته افزایش و حد خمیری کاهش یافت. آزمایش‌های مقاومت فشاری غیرمحصور و مقاومت برشی نشان داد که افزودن پلیمر باعث بهبود قابل توجه مقاومت خاک می‌شود؛ به طوری که نمونه با ۵٪ پلیمر بیش از سه برابر مقاومت خاک شاهد را نشان داد. همچنین شاخص‌های تثبیت (recompression index Cr و Compression index Cc) با افزایش پلیمر کاهش یافت [۲۴].



شکل ۴- تأثیر سطوح مختلف کوپلیمر استایرن-اکریلیک و زمان ماندگاری بر مقاومت فشاری محصور نشده نمونه‌های خاک تیمار شده

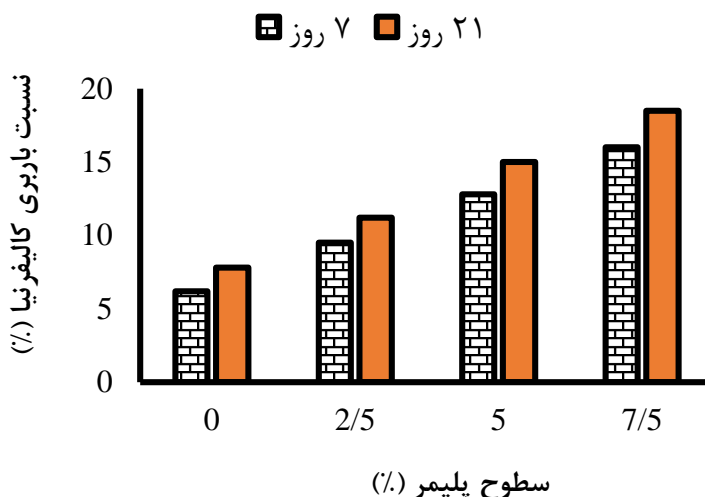
۳-۶- تغییرات نسبت باربری کالیفرنیا

شکل ۵ نتایج آزمون نسبت باربری کالیفرنیا خاک‌های تیمار شده با سطوح مختلف کوپلیمر استایرن-اکریلیک پس از دو دوره ماندگاری ۷ و ۲۱ روز را نشان می‌دهد. داده‌ها افزایش پیوسته و معنادار CBR را هم‌زمان با افزایش درصد پلیمر و طولانی‌تر شدن زمان ماندگاری نشان می‌دهند؛ به طوری که نمونه شاهد از ۶/۲٪ در روز هفتم به ۷/۸٪ در روز بیست‌ویکم افزایش می‌یابد، در حالی که نمونه حاوی ۷/۵٪ پلیمر به ترتیب مقادیر ۱۶٪ و ۱۸/۵٪ را نشان می‌دهد.

همچنین، نتایج نشان داد که افزایش زمان نگهداری نقش مهمی در بهبود رفتار مکانیکی خاک دارد؛ به نحوی که به‌طور میانگین، مقادیر CBR در دوره ۲۱ روزه حدود ۱۵ تا ۲۵ درصد بیشتر از مقادیر ۷ روزه بود. این روند بیانگر تکمیل فرآیند سخت‌شدن لایه‌های پلیمری و تقویت پیوندهای فیزیکوشیمیایی بین پلیمر و ذرات خاک است. همچنین رابطه CBR با درصد پلیمر تقریباً خطی مشاهده شد، به گونه‌ای که افزایش مقدار افزودنی در تمامی سطوح بررسی شده به رشد پیوسته ظرفیت باربری منجر گردید، بدون آنکه نشانه‌ای از کاهش بازده در غلظت‌های بالاتر دیده شود.

با افزایش درصد پلیمر استایرن-اکریلیک، مقاومت CBR خاک به‌طور پیوسته و معناداری نسبت به نمونه شاهد بهبود یافت. پس از ۷ روز ماندگاری، افزودن ۲/۵٪ پلیمر منجر به افزایش ۵۳/۲٪ در مقدار CBR شد. با افزایش غلظت پلیمر به ۵٪، این بهبود به بیش از دو برابر (۱۰۶/۵٪) رسید و در غلظت ۷/۵٪ پلیمر، افزایش مقاومت به ۱۵۸/۱٪ (حدود ۲/۶ برابر نمونه شاهد) بالغ گردید. این روند افزایشی پس از ۲۱ روز ماندگاری نیز تداوم یافت، به طوری که نمونه‌های حاوی ۲/۵٪ و ۷/۵٪ پلیمر به ترتیب ۴۳/۶٪، ۹۲/۳٪ و ۱۳۷/۲٪ افزایش CBR نسبت به نمونه شاهد نشان دادند. از منظر ژئوتکنیکی، این افزایش محسوس CBR نشان‌دهنده تقویت ماتریس خاک-پلیمر و بهبود ظرفیت تحمل بار سطحی است. مکانیسم‌های اصلی این تقویت شامل تشکیل فیلم‌ها و پل‌های پلیمری میان ذرات، افزایش انسجام سطحی و کاهش جابجایی موضعی ذرات ریز تحت بار است. توجه به این نکته ضروری است که این بهبود عملکرد باربری بیشتر ناشی از افزایش پیوستگی بین ذره‌ای و شبکه باربری موضعی است تا تغییرات در توزیع دانه‌ای یا تراکم کلی، زیرا مقادیر اندک تغییر در حدود آتربرگ و کاهش جزئی چگالی خشک نشان می‌دهد که خصوصیات حجمی و دانه‌بندی خاک همچنان عامل اصلی رفتار کلی هستند. از منظر مهندسی، استفاده از استایرن-اکریلیک در محدوده ۵ تا ۷/۵ درصد می‌تواند ظرفیت باربری

لایه‌های روسازی و زیرسازی را به‌طور مؤثر ارتقا دهد. برای دستیابی به خواص پایدار، ماندگاری حداقل ۲۱ روز توصیه می‌شود. همچنین، انتخاب درصد بهینه افزودنی باید با در نظر گرفتن ملاحظات اقتصادی و عملکردی صورت گیرد. تعمیم این یافته‌ها به شرایط واقعی مستلزم انجام آزمون‌های CBR صحرایی یا بارگذاری بزرگ‌مقیاس همراه با ارزیابی دوام خاک در سیکل‌های مرطوب-خشک است.



شکل ۵- تأثیر سطوح مختلف کوپلیمر استایرن-اکریلیک و زمان ماندگاری بر نسبت باربری کالیفرنیا (%) نمونه‌های خاک تیمار شده

۳-۷- مکانیسم‌های اثربخشی کوپلیمر استایرن-اکریلیک بر تثبیت خاک ماسه-سیلتی

نتایج مطالعه حاضر نشان می‌دهد که کوپلیمر استایرن-اکریلیک می‌تواند با ایجاد یک سازوکار چندسطحی پیچیده، به‌صورت همزمان موجب بهبود خواص ژئوتکنیکی و کنترل پدیده گردوغبار در خاک‌های ماسه-سیلتی شود. با توجه به ماهیت آنیونی-غیریونی این پلیمر [۲۵]، مکانیزم تثبیت در محیط قلیایی خاک ماسه-سیلتی عمدتاً از طریق پل زنی کاتیونی و تشکیل پیوندهای هیدروژنی صورت می‌پذیرد.

از منظر میکرومکانیکی، پلیمر با ایجاد ساختارهای "قطار-حلقه-دم" بر سطح ذرات [۲۵]، یک شبکه سه‌بعدی پیوسته تشکیل می‌دهد. در این سازوکار، بخش‌های آبگریز پلیمر (گروه‌های استایرن) با ایجاد پیوند واندروالسی با سطوح خنثی ذرات ماسه برهمکنش نشان داده [۲۶]، در حالی که گروه‌های قطبی اکریلیک از طریق پل‌های کاتیونی (مانند کلسیم و سدیم موجود در خاک) با ذرات سیلتی پیوند برقرار می‌کنند [۲۷]. این پدیده منجر به تشکیل پوشش‌های نازک پلیمری و پل‌های بین ذره‌ای می‌گردد [۲۸-۳۰]. شواهد تجربی این تحقیق مؤید سه مکانیزم کلیدی است. اول، پوشش دهی سطح ذرات که از طریق کاهش وزن مخصوص خشک از ۱/۷۹ به ۱/۷۲ گرم بر سانتیمتر مکعب قابل استنباط است و ناشی از تشکیل لایه پلیمری بر سطح ذرات می‌باشد [۲۶]. دوم، پل زنی بین ذرات که با افزایش ۱۵۷ درصدی مقاومت فشاری (UCS) همراه بوده و حاکی از ایجاد پیوندهای پلیمری بین ذرات غیرتماس است [۳۱، ۳۲]. سوم، اصلاح رفتار آبی که با افزایش رطوبت بهینه از ۰.۸٪ به ۹.۶٪ مشهود بوده و نشان‌دهنده تشکیل هیدروژل پلیمری و بهبود ظرفیت نگهداری رطوبت می‌باشد [۳۳].

نکته حائز اهمیت، سینرژی بین مکانیزم‌هاست. تشکیل پیوندهای هیدروژنی بین گروه‌های کربوکسیل پلیمر و گروه‌های هیدروکسیل سطح ذرات سیلت [۲۵]، همراه با برهمکنش آبگریز با ذرات ماسه [۲۶]، یک ساختار کامپوزیتی پایدار ایجاد می‌کند. این سازوکار توأمان موجب افزایش مقاومت (UCS) تا ۲/۰۳ مگاپاسکال و کاهش پتانسیل گردوغبار می‌شود.

¹ Train-loop-tail

اثر زمان ماندگاری (۲۱ روز) نیز با تئوری‌های پلیمری همخوانی دارد. افزایش تدریجی مقاومت نشان‌دهنده تکمیل فرآیندهای بازآرایی زنجیره‌های پلیمری و تشکیل پیوندهای پایدار است [۲۵]. این ویژگی به‌ویژه در محیط‌های کم‌رطوبت خاک‌های ماسه‌ای یک مزیت محسوب می‌شود.

در مقایسه با سایر پلیمرها، استایرن-اکریلیک به دلیل خاصیت آموتر نسبی، کارایی بهتری در محیط‌های با pH متغیر از خود نشان می‌دهد. همچنین وجود گروه‌های آروماتیک در زنجیره پلیمری، پایداری UV بهتری نسبت به پلیمرهای آلیفاتیک ایجاد می‌کند [۳۴، ۳۵]. این مطالعه گامی مهم در درک مکانیزم‌های تثبیت خاک‌های درشت‌دانه با پلیمرهای آلی محسوب می‌شود و زمینه را برای توسعه نسل جدیدی از مواد تثبیت‌کننده پایدار فراهم می‌کند.

در مطالعه کولای و همکاران (۲۰۱۶)، نتایج آزمون باربری کالیفرنیا نشان داد که خاک با بافت رسی و پلاستیسیته بالا در اثر افزودن پلیمر تنها افزایش اندکی در حدود ۶/۶-۱۴/۱٪ تجربه کرد. در مقابل، خاک با بافت سیلتی و پلاستیسیته بالا در حضور ۴٪ کوپلیمر اکریلیک و پس از ۲۸ روز ماندگاری، افزایش چشمگیری معادل حدود ۳۴۰٪ نسبت به نمونه شاهد نشان داد [۲۱]. یافته‌های مشابهی نیز توسط موسوی و همکاران (۲۰۱۴) و Kavak و همکاران (۲۰۱۰) گزارش شده است که نشان می‌دهد افزودن پلیمر می‌تواند ظرفیت باربری خاک‌های ریزدانه را به‌طور قابل توجهی بهبود بخشد [۳۶، ۳۷].

در مطالعه خالوتیا و همکاران (۲۰۲۲)، اثر تثبیت خاک با استفاده از پلیمر و سیمان بر مقاومت مکانیکی و ظرفیت باربری خاک بررسی شد. در این پژوهش، یک آزمایشگاه کنترل‌شده بر روی خاک ماسه‌ای و خاک رسی انجام شد و نمونه‌ها با مقادیر مختلف پلیمر آب‌پایه (۲، ۳ و ۴٪ وزنی) و سیمان (۲۰، ۳۰ و ۴۰٪ وزنی) مخلوط شدند. نتایج نشان داد که افزودن پلیمر آب‌پایه باعث افزایش قابل توجه مقاومت فشاری خاک ماسه‌ای شد، به‌ویژه خاک‌هایی که مستعد روانگرایی بودند. مکانیسم اثر پلیمر عمدتاً به واسطه پوشش‌دهی ذرات و ایجاد پیوستگی فیزیکی بین آن‌ها و پرکردن فضای خالی بین ذرات صورت گرفت. میزان پلیمر مورد نیاز برای بهبود خواص مهندسی خاک با ضخامت پوشش ذرات و سطح ویژه خاک رابطه مستقیم داشت. با این حال، مقاومت و بهبود خواص مهندسی خاک‌های تثبیت‌شده با پلیمر کمتر از نمونه‌های تثبیت‌شده با سیمان بود [۳۸].

در مطالعه آوساد و همکاران (۲۰۲۳)، اثر استفاده از پلی‌آکریلامید (۰/۲۵، ۰/۵، ۱، ۲ و ۴٪ نسبت به وزن خاک خشک) به‌عنوان ماده تثبیت‌کننده خاک بر خواص مکانیکی و تراکم‌پذیری خاک‌های رسی بررسی شد. نتایج نشان داد که افزودن پلیمر موجب افزایش قابل توجه مقاومت برشی و کاهش تراکم‌پذیری خاک رسی شد. بیشترین بهبود در مقاومت برشی و کاهش شاخص تراکم‌پذیری با افزودن ۰/۵٪ پلیمر مشاهده شد. در آزمایش فشار محصور، مقاومت برشی (Cu) خاک در روزهای ۷، ۱۴ و ۲۸ برابر با ۷۸/۷، ۸۳/۴۵ و ۱۰۰/۱۵ kPa بود که افزایش نسبی ۷۵٪، ۷۰٪ و ۶۸٪ نسبت به نمونه شاهد نشان می‌داد. همچنین، شاخص تراکم‌پذیری (Cc) خاک طبیعی از ۰/۲۱ به ۰/۰۶ کاهش یافت که تقریباً ۷۱٪ کاهش را نشان می‌دهد [۳۹].

در مطالعه رجبی و قاسمی (۲۰۲۵) اثر رزین مایع پلی‌استر (۰/۵، ۱، ۲، ۳ و ۴٪ وزنی) در زمان‌های ماندگاری متفاوت (۱، ۳، ۷ و ۱۴ روز) بر خواص مکانیکی خاک ماسه‌ای رسی (SC) بررسی شد. نتایج این مطالعه نشان داد که درصد بهینه رزین پلی‌استر برای افزایش مقاومت خاک ۳٪ بود، به طوری که افزایش بیشتر رزین تأثیر قابل توجهی بر مقاومت خاک نداشت. زمان ماندگاری نیز نقش مهمی داشت و بیشینه مقاومت پس از ۷ روز ماندگاری حاصل شد. افزایش درصد رزین و زمان ماندگاری موجب افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری، مقاومت برشی، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی نمونه‌ها شد. همچنین مشخص شد که با افزایش درصد رزین، مقاومت نهایی ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد [۴۰].

۴- نتیجه گیری

این پژوهش با هدف بررسی نقش کوپلیمر استایرن-اکریلیک در تثبیت خاک ماسه-سیلتی و کاهش گردوغبار جاده‌ای انجام شد. یافته‌ها نشان دادند که این پلیمر با تشکیل فیلم‌های پلیمری و ایجاد پیوندهای فیزیکوشیمیایی، بدون تغییر در رده‌بندی ژئوتکنیکی خاک (SM)، موجب بهبود قابل توجه ویژگی‌های مکانیکی می‌شود. روند افزایش مقاومت نشان داد که در مقادیر پایین پلیمر، رشد سریع‌تر بوده اما در غلظت‌های بالاتر شدت آن کاهش یافته است. به‌طور خاص، در تیمار با ۷/۵ درصد پلیمر و پس از ۲۱ روز عمل‌آوری، مقاومت فشاری محصورنشده حدود ۲/۵ برابر و شاخص باربری کالیفرنیا حدود ۳/۲ برابر نمونه شاهد افزایش یافت. تحلیل مکانیسم‌ها روشن ساخت که ارتقای عملکرد خاک از سه مسیر اصلی صورت گرفته است. نخست، پوشش سطح ذرات و ایجاد لایه‌های پلیمری که

انسجام میان ذره‌های را افزایش داد. دوم، پل زنی بین ذرات از طریق پیوندهای هیدروژنی و کاتیونی که نقش کلیدی در افزایش مقاومت فشاری داشت. سوم، اصلاح رفتار آبی از طریق تشکیل هیدروژل‌های پلیمری که ظرفیت نگهداری رطوبت خاک را بهبود بخشید. این هم‌افزایی میان سازوکارها موجب شد خاک هم مقاوم‌تر گردد و هم پتانسیل تولید گردوغبار کاهش یابد. از دیدگاه کاربردی، بازدهی بهینه در بازه ۵ تا ۷/۵ درصد پلیمر مشاهده شد که با ملاحظات اقتصادی و فنی سازگار است. در جمع‌بندی نهایی، می‌توان نتیجه گرفت که کوپلیمر استایرن-اکریلیک یک گزینه پایدار و دوستدار محیط‌زیست برای بهسازی روسازی‌های خاکی و کنترل گردوغبار است و با توجه به کارایی مشاهده‌شده، به‌ویژه برای جاده‌های خاکی کم‌تردد، مسیرهای دسترسی معادن، راه‌های موقت پروژه‌های عمرانی و نواحی بیابانی مستعد گردوغبار قابلیت کاربرد دارد. با این حال، تعمیم این نتایج به مقیاس میدانی مستلزم بررسی‌های بیشتر در زمینه دوام بلندمدت و اثرات زیست‌محیطی است.

۵- تشکر و قدردانی

این پژوهش با استفاده از اعتبارات پژوهشی پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران انجام شده است و نویسندگان از این حمایت مالی صمیمانه سپاسگزاری می‌نمایند.

۶- حمایت مالی

این پژوهش در قالب طرح پژوهشی شماره ۰۲/۳۶۹۷ با استفاده از اعتبارات پژوهشی - پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران انجام شده است.

۷- تضاد منافع

نویسندگان اعلام می‌دارند هیچ‌گونه تضاد منافع در این پژوهش وجود ندارد.

۸- تأییدیه اخلاقی

این مقاله شامل هیچ‌گونه مطالعه‌ای بر روی انسان یا حیوان نیست که نیاز به اخذ مجوز اخلاقی داشته باشد.

۹- دسترسی به داده‌ها

داده‌های این پژوهش بنا به درخواست منطقی از نویسنده مسئول قابل دسترسی است.

۱۰- منابع

1. Archibong, G. A., Sunday, E. U., Akudike, J. C., Okeke, O. C., & Amadi, C. (2020). A review of the principles and methods of soil stabilization. *International Journal of Advanced Academic Research/ Sciences*, 6(3), 2488-9849.
2. Fondjo, A. A., Theron, E., & Ray, R. P. (2021). Stabilization of expansive soils using mechanical and chemical methods: a comprehensive review. *Civ Eng Archit*, 9(5), 1295-1308.
3. Anburuvel, A. (2024). The engineering behind soil stabilization with additives: a state-of-the-art review. *Geotechnical and Geological Engineering*, 42(1), 1-42.
4. Shinde, B., Sangale, A., Pranita, M., Sanagle, J., & Roham, C. (2024). Utilization of waste materials for soil stabilization: A comprehensive review. *Progress in Engineering Science*, 1(2-3), 100009.

5. Huang, J., Kogbara, R. B., Hariharan, N., Masad, E. A., & Little, D. N. (2021). A state-of-the-art review of polymers used in soil stabilization. *Construction and Building Materials*, 305, 124685.
6. Parihar, N. S., & Gupta, A. K. (2024). Stabilization of expansive soils using Non-conventional waste stabilizers: A review. *Indian Geotechnical Journal*, 54(3), 971-997.
7. Bai, Y., Liu, J., Xiao, H., Song, Z., Ma, K., & Deng, Y. (2023). Soil stabilization using synthetic polymer for soil slope ecological protection. *Engineering Geology*, 321, 107155.
8. Boaventura, N. F., Sousa, T. F. D. P., & Casagrande, M. D. T. (2023). The application of an eco-friendly synthetic polymer as a sandy soil stabilizer. *Polymers*, 15(24), 4626.
9. Almajed, A., Lemboye, K., & Moghal, A. A. B. (2022). A critical review on the feasibility of synthetic polymers inclusion in enhancing the geotechnical behavior of soils. *Polymers*, 14(22), 5004.
10. Fatehi, H., Ong, D. E., Yu, J., & Chang, I. (2023). The effects of particle size distribution and moisture variation on mechanical strength of biopolymer-treated soil. *Polymers*, 15(6), 1549.
11. Debbarma, K., Saha, S., & Sarkar, P. P. (2023). Application of vinyl acrylic co-polymer on subgrade and sub base pavement stabilization. *Materials Today: Proceedings*.
12. Albalasmeh, A. A., Hamdan, E. H., Gharaibeh, M. A., & El Hanandeh, A. (2021). Improving aggregate stability and hydraulic properties of Sandy loam soil by applying polyacrylamide polymer. *Soil and Tillage Research*, 206, 104821.
13. Golhashem, M. R., & Uygur, E. (2020). Volume change and compressive strength of an alluvial soil stabilized with butyl acrylate and styrene. *Construction and Building Materials*, 255, 119352.
14. Anburuvel, A. (2024). The engineering behind soil stabilization with additives: a state-of-the-art review. *Geotechnical and Geological Engineering*, 42(1), 1-42.
15. Bai, Y., Liu, J., Xiao, H., Song, Z., Ma, K., & Deng, Y. (2023). Soil stabilization using synthetic polymer for soil slope ecological protection. *Engineering Geology*, 321, 107155.
16. Boaventura, N. F., Sousa, T. F. D. P., & Casagrande, M. D. T. (2023). The application of an eco-friendly synthetic polymer as a sandy soil stabilizer. *Polymers*, 15(24), 4626.
17. Hamza, M., Nie, Z., Aziz, M., Ijaz, N., Akram, O., Fang, C., ... & Madni, M. F. (2023). Geotechnical behavior of high-plastic clays treated with biopolymer: macro-micro-study. *Environmental Earth Sciences*, 82(3), 91.
18. Mehrpajouh, A., Ghasemzadeh, H., & Pishvaei, M. (2021). Effect of the glass transition temperature of acrylic polymers on physical and mechanical properties of kaolinite clay and sandy soil. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 33(5), 04021062.
19. Abd, T. A., Fattah, M. Y., & Aswad, M. F. (2021). Improvement of soft clayey soil by biopolymer. *Engineering and Technology Journal*, 39(08), 1301-1306.
20. Kumar, P., Puppala, A. J., Tingle, J. S., Chakraborty, S., & Sarat Chandra Congress, S. (2022). Resilient characteristics of polymer emulsion-treated sandy soil. *Transportation Research Record*, 2676(9), 526-538.

21. Kolay, P. K., Dhakal, B., Kumar, S., & Puri, V. K. (2016). Effect of liquid acrylic polymer on geotechnical properties of fine-grained soils. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 2(4), 29.
22. Onyejekwe, S., & Ghataora, G. S. (2015). Soil stabilization using proprietary liquid chemical stabilizers: sulphonated oil and a polymer. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 74(2), 651-665.
23. Tiwari, N., Satyam, N., & Patva, J. (2020). Engineering characteristics and performance of polypropylene fibre and silica fume treated expansive soil subgrade. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 6(2), 18.
24. Karim, H., & Al-Soudany, K. (2018). Improving geotechnical properties of clayey soil using polymer material. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 162, p. 01002). EDP Sciences.
25. Theng, B. K. G. (1982). Clay-polymer interactions: summary and perspectives. *Clays and clay minerals*, 30(1), 1-10.
26. Abdalla Mohamed, S. W. (2004). Stabilization of Desert Sand Using Water-Borne Polymers.
27. Roberts, K., Kowalewska, J., & Friberg, S. (1974). The influence of interactions between hydrolyzed aluminum ions and polyacrylamides on the sedimentation of kaolin suspensions. *Journal of Colloid and Interface Science*, 48(3), 361-367.
28. Chang, I., Im, J., & Cho, G. C. (2016). Geotechnical engineering behaviors of gellan gum biopolymer treated sand. *Canadian Geotechnical Journal*, 53(10), 1658-1670.
29. Indraratna, B., Muttuvel, T., Khabbaz, H., & Armstrong, R. (2008). Predicting the erosion rate of chemically treated soil using a process simulation apparatus for internal crack erosion. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 134(6), 837-844.
30. Zhang, T., Liu, S., Cai, G., & Puppala, A. J. (2015). Experimental investigation of thermal and mechanical properties of lignin treated silt. *Engineering Geology*, 196, 1-11.
31. Liu, J., Feng, Q., Wang, Y., Bai, Y., Wei, J., & Song, Z. (2017). The Effect of Polymer-Fiber Stabilization on the Unconfined Compressive Strength and Shear Strength of Sand. *Advances in materials science and Engineering*, 2017(1), 2370763.
32. Liu, J., Qi, X., Zhang, D., Feng, Q., Wang, Y., & Kanungo, D. P. (2017). Study on the permeability characteristics of polyurethane soil stabilizer reinforced sand. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2017(1), 5240186.
33. Bai, Y., Liu, J., Song, Z., Chen, Z., Jiang, C., Lan, X., ... & Kanungo, D. P. (2019). Unconfined compressive properties of composite sand stabilized with organic polymers and natural fibers. *Polymers*, 11(10), 1576.
34. Liu, J., Bai, Y., Song, Z., Lu, Y., Qian, W., & Kanungo, D. P. (2018). Evaluation of strength properties of sand modified with organic polymers. *Polymers*, 10(3), 287.
35. Liu, J., Chen, Z., Song, Z., Bai, Y., Qian, W., Wei, J., & Kanungo, D. P. (2018). Tensile behavior of polyurethane organic polymer and polypropylene fiber-reinforced sand. *Polymers*, 10(5), 499.
36. Mousavi, F., Abdi, E., & Rahimi, H. (2014). Effect of polymer stabilizer on swelling potential and CBR of forest road material. *KSCCE Journal of Civil Engineering*, 18(7), 2064-2071.

37. Kavak, A., Bilgen, G., & Mutman, U. (2010). In-situ modification of a road material using a special polymer. *Scientific Research and Essays*, 5(7), 2547-2555.
38. Khalotia, D., Sen, P., & Chaturvedi, D. (2022, October). Use of Polyethylene and Cement Material Is for Strengthening of Soil. In *International Conference on Recent Advances in Civil Engineering* (pp. 351-367). Singapore: Springer Nature Singapore.
39. Aswad, M. F., Al-Gharbawi, A. S., Fattah, M. Y., Mustfa, R. H., & Hameed, H. R. (2024). Improvement of clayey soil characteristics using poly acrylamide geopolymer. *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 11(4), 1673-1690.
40. Rajabi, A. M., & Ghasemi, F. (2025). The Effect of Polyester Resins on the compressive and shear strength of Clayey Sand Soil: An Experimental Study. *Civil Engineering Infrastructures Journal*.