

Effects of water-borne acrylic polymer on the strength improvement of low-plasticity fine-grained soils: A Experimental study

Reza Tadayonfar^{1✉} , Mostafa Mohammadian² , Morteza Salari³

1. Corresponding Author, Civil Engineering Dept., Faculty of Engineering, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran. E-mail: r.tadayon@hsu.ac.ir
2. Civil Engineering Dept., Faculty of Engineering, Rouzbahan Institute of Higher Education Non-profit - NGOs, Sari, Iran. E-mail: mostafa_mohammadian70@yahoo.com
3. Civil Engineering Dept., Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. E-mail: Salari.m@alumni.um.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received
2026-06-27
Received in revised form
2026-08-31
Accepted
2026-09-18
Available online
2026-10-01

Keywords:

fine-grained soil,
Improvement,
Stabilization,
Polymer emulsion,
Unconfined compressive
Strength

ABSTRACT

Low-plasticity fine-grained soil (ML) exhibit poor geotechnical stability due to weak interparticle bonding and moisture sensitivity, while traditional stabilizers like cement and lime face environmental restrictions in urban areas. This laboratory study evaluates a low-carbon stabilization approach using a butyl acrylate-methyl methacrylate (BA-MMA) copolymer emulsion (2%–9% by dry weight) on a fine-grained soil from Sabzevar, Iran. Specimens cured for 3 hours, 1 day, and 7 days were subjected to Atterberg limits, standard Proctor compaction, and unconfined compressive strength (UCS) tests. Notably, the contribution of matric suction was decoupled from the net polymeric strengthening effect. Results showed that the BA-MMA copolymer modified water-particle interactions and encapsulated soil grains, reducing the plasticity index by 31% (from 8.4 to 5.8) while leaving the plastic limit virtually unchanged. Polymer modification enhanced compaction, increasing maximum dry density by 6% (from 1.69 to 1.79 g/cm³) and reducing optimum moisture content by 12%; the optimum compaction efficiency occurred between 5% and 7% polymer content. Corrected UCS results revealed that the net polymer-induced strength was negligible initially, but reached 0.38 kg/cm² at 7 days for the 7% dosage (a 1.31-fold increase over the untreated soil) due to dehydration and interparticle polymer network formation. Beyond 7%, strength and compaction declined because the increased polymer volume fraction disrupted the continuity of the mineral soil skeleton. Consequently, the BA-MMA copolymer is an effective low-carbon stabilizer, with 7% established as the optimum dosage.

Cite this article: Tadayonfar, Reza., Mohammadian, Mostafa., & Salari, Morteza. (2026). Effects of water-borne acrylic polymer on the strength improvement of low-plasticity fine-grained soils: A laboratory study. *Advanced Modeling in Civil Engineering*, 3(3), 68-85. DOI: 10.22126/amcen.2026.14216.1099



© The Author(s).
DOI: 10.22126/amcen.2026.14216.1099

Publisher: Razi University

Introduction

Low-plasticity fine-grained soils (ML) are commonly characterized by a dispersed particle arrangement, weak interparticle bonding, and high sensitivity to moisture variations, which collectively lead to limited shear strength, relatively high compressibility, and unstable mechanical performance at the engineering scale. Consequently, slopes and earth structures composed of such soils are vulnerable to localized instability and shallow failure, particularly under environmental conditions involving moisture fluctuation. To improve the engineering behavior of fine-grained soils, chemical stabilization with cement and lime has long been the most widely used approach. However, despite their effectiveness, these traditional binders are increasingly questioned because of their high energy demand, considerable carbon footprint, and increase in environmental alkalinity, and tendency to induce irreversible chemical changes in the treated soil. In addition, the hardened soil structure produced by mineral stabilizers may exhibit brittle behavior, which can be disadvantageous in applications requiring more tolerant and adaptable mechanical response. These limitations have directed recent geotechnical research toward the development of alternative low-carbon and environmentally compatible stabilizers. Among them, water-borne polymer emulsions have attracted growing attention because they can form continuous polymer films around soil particles, promote interparticle bonding, and generally produce less brittle behavior than conventional mineral additives. Their performance can also be tailored through copolymer composition and dosage, making them potentially suitable for a range of problematic soils. Nevertheless, most previous studies have focused on clays with medium to high plasticity, whereas the response of low-plasticity fine-grained soils to polymer treatment remains insufficiently understood. In particular, the combined influence of intrinsic emulsion characteristics, such as minimum film formation temperature and latex particle size, together with polymer dosage and curing duration, on the plasticity, compaction, and strength behavior of ML soils has not yet been systematically clarified. This knowledge gap is more evident for butyl acrylate-methyl methacrylate (BA-MMA) copolymers, for which published data on ML deposits remain limited. The BA-MMA emulsion is of particular interest because the butyl acrylate segment enhances flexibility and facilitates latex particle coalescence, whereas the methyl methacrylate segment contributes to film stiffness and mechanical stability. Accordingly, this study experimentally evaluates the effects of BA-MMA emulsion on the Atterberg limits, compaction characteristics, and unconfined compressive strength of an ML soil, with emphasis on the interactive roles of polymer dosage and curing time in governing performance improvement or decline.

Method

A low-plasticity fine-grained soils (USCS: ML) from the Sabzevar site was characterized and used as the base material for polymer stabilization. A water-borne butyl acrylate-methyl methacrylate (BA-MMA) copolymer emulsion with a submicron particle size (0.16 μm) and a minimum film formation temperature of 18°C was selected as the stabilizing agent. Polymer contents of 2–9% by dry weight of soil were prepared by calculating the required emulsion volume based on its solid content, followed by uniform mixing and a 24-hour moisture-equilibration stage. To capture time-dependent film formation, all tests were performed after

3 hours, 1 day, and 7 days of curing. For Atterberg limits and standard Proctor compaction tests, the mixtures were air-dried as thin layers (approximately 1 cm) to ensure uniform evaporation and homogeneous soil–polymer interactions. For unconfined compressive strength (UCS), cylindrical specimens (5 cm × 10 cm) were compacted using the under compaction method to match the natural density and moisture of the untreated soil. These specimens were then cured in intact cylindrical form to maintain realistic moisture gradients representative of field conditions in stabilized slopes. UCS tests were performed in triplicate at each curing age, while consistency limits and compaction characteristics were monitored to evaluate the influence of polymer content and curing time on the engineering behavior of the treated soil.

Results

The experimental results confirm that BA-MMA copolymer stabilization fundamentally alters the geotechnical properties of the studied low-plasticity fine-grained soil. Atterberg limits indicated a distinct, time-dependent plasticity reduction, with the Plasticity Index decreasing from 8.4 to 5.8 at 7 percent polymer content after 7 days. The stability of the plastic limit amidst liquid limit reduction implies that the polymer acts as a physical barrier, encapsulating particles and restricting water absorption rather than engaging in clay-polymer chemical reactions. This physical modification was mirrored in compaction performance, where the maximum dry density improved by 6 percent from 1.69 to 1.79 grams per cubic centimeter and optimum moisture content decreased by 12 percent within the optimal dosage range of 5 to 7 percent, primarily due to enhanced workability and reduced water demand for particle coalescence. Beyond 7 percent polymer, however, maximum dry density values declined, indicating that volumetric displacement by the lighter polymer phase and increased elastic rebound impede densification. The unconfined compressive strength data further validated the efficacy of the polymeric network. After decoupling the matric suction contribution, the corrected strength peaked at 0.38 kilograms per square centimeter for the 7 percent polymer dosage at 7 days, demonstrating the formation of a cohesive, three-dimensional elastomeric matrix. At higher concentrations of 9 percent, a significant reduction in strength was observed, suggesting that excessive polymeric film thickness interrupts direct mineral-to-mineral skeletal contacts, thereby transitioning the soils failure mechanism from a rigid grain-contact mode to a compliant elastomeric-controlled deformation. Collectively, these findings establish a 7 percent polymer dosage as the technical threshold for optimizing structural integrity and physical workability in stabilized low-plasticity fine-grained deposits.

Conclusions

This study evaluated the efficacy of a water-borne BA-MMA copolymer emulsion for stabilizing low-plasticity fine-grained soil. The experimental findings lead to several key conclusions. First, polymer treatment significantly reduces soil plasticity, yielding a 31 percent decrease in the plasticity index at a 7 percent polymer dosage after 7 days of curing, primarily driven by liquid limit reduction while the plastic limit remains nearly unchanged, likely due to localized polymer-induced stiffening within the soil matrix. Second, the copolymer enhances soil workability and compaction efficiency, achieving a 6 percent increase in maximum dry density and a 12 percent reduction in optimum moisture content,

with the optimum compaction range identified between 5 and 7 percent polymer content. Third, after decoupling the matric suction effects, the corrected unconfined compressive strength peaks at 0.38 kilograms per square centimeter at a 7 percent polymer dosage after 7 days, representing a 1.31-fold strength increase over the untreated control. Beyond the 7 percent threshold, both compaction and strength characteristics decline due to polymer phase saturation and mineral skeleton disruption. Ultimately, while BA-MMA copolymer emulsion represents a highly effective low-carbon alternative for stabilizing unstable low-plasticity fine-grained deposits, future research must assess the long-term durability of the polymer-soil matrix under cyclic wet-dry conditions to ensure its field performance.

Author Contributions

All authors participated in writing and revising the article.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.



ارزیابی آزمایشگاهی اثرات پلیمر اکریلیک مایع بر بهسازی مقاومتی خاک های ریزدانه با پلاستیسیته کم

رضا تدین فرا^۱، مصطفی محمدیان^۲، مرتضی سالاری^۳

۱. نویسنده مسئول، گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه حکیم سبزواری، ایران. رایانامه: r.tadayon@hsu.ac.ir

۲. گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، مؤسسه آموزش عالی غیرانتفاعی روزبهان، ساری، ایران. رایانامه:

mostafa_mohamadian70@yahoo.com

۳. گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران. رایانامه: Salari.m@alumni.um.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:

۱۴۰۵/۰۴/۰۶

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۵/۰۶/۰۹

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۵/۰۶/۲۷

تاریخ انتشار:

۱۴۰۵/۰۷/۰۹

کلیدواژه ها:

خاک ریزدانه،

بهسازی،

تثبیت،

پلیمر مایع،

مقاومت فشاری تک محوری

خاک های ریزدانه با پلاستیسیته کم (ML)، به دلیل پیوندهای بین ذره ای ضعیف و حساسیت رطوبتی، پایداری ژئوتکنیکی پایینی دارند. از سوی دیگر، تثبیت کننده های سنتی نظیر سیمان و آهک به دلیل مصرف انرژی بالا و رد پای کربنی قابل توجه، برای بهسازی خاک در محیط های شهری و فضاهای سبز با محدودیت مواجه اند. این پژوهش آزمایشگاهی باهدف توسعه یک روش بهسازی کم کربن، به ارزیابی کارایی امولسیون کوپلیمر بوتیل اکریلات-متیل متاکریلات (BA-MMA) بر ویژگی های فیزیکی، تراکمی و مقاومتی خاک ریزدانه کم پلاستیسیته ساختگاه پارک شهدای گمنام سبزوار می پردازد. نمونه ها با ۲ تا ۹ درصد وزنی کوپلیمر مخلوط شده و پس از عمل آوری در سنین ۳ ساعت، ۱ روز و ۷ روز، تحت آزمایش های حدود اتبرگ، تراکم استاندارد و مقاومت فشاری تک محوری (UCS) قرار گرفتند. همچنین سهم مقاومت تک محوری ناشی از مکش بافتی از اثر خالص پیوندهای پلیمری به صورت تقریبی تفکیک شد. نتایج نشان داد افزودن کوپلیمر BA-MMA با اصلاح برهم کنش آب-ذره و پوشش دهی ذرات خاک، موجب افت ۳۱ درصدی شاخص خمیری (کاهش PI از ۸.۴ به ۵.۸) شد، درحالی که حد خمیری تغییر محسوسی نکرد. اصلاح پلیمری با بهبود رفتار تراکمی، دانسیته خشک حداکثر را با ۶ درصد افزایش از ۱.۶۹ به ۱.۷۹ گرم بر سانتی متر مکعب رساند و رطوبت بهینه را ۱۲ درصد کاهش داد؛ به طوری که بیشترین کارایی تراکمی در محدوده ۵ تا ۷ درصد پلیمر حاصل شد. نتایج UCS تصحیح شده نشان داد که اثر مقاومت خالص پلیمر در سنین اولیه ناچیز است، اما در سن ۷ روز با تکامل فرآیند آب زدایی و تشکیل شبکه پلیمری بین ذره ای، مقاومت خالص ناشی از پلیمر در غلظت ۷ درصد به ۰.۳۸ کیلوگرم بر سانتی متر مربع (معادل ۱.۳۱ برابر مقاومت نمونه اصلاح نشده در همین سن) رسید. فراتر از غلظت ۷ درصد، به دلیل افزایش سهم حجمی فاز پلیمری و اختلال در پیوستگی اسکلت معدنی خاک، روند بهبود خواص تراکمی و مقاومتی نزولی شد. در مجموع، کوپلیمر BA-MMA یک افزودنی کم کربن مؤثر معرفی می شود و غلظت ۷ درصد، مقدار بهینه آن در این پژوهش است.

استناد: تدین فرا، رضا؛ محمدیان مصطفی؛ و سالاری. مرتضی. (۱۴۰۵). ارزیابی آزمایشگاهی اثرات پلیمر اکریلیک مایع بر بهسازی مقاومتی خاک های ریزدانه با پلاستیسیته کم. *مجله مدل سازی پیشرفته در مهندسی عمران*، ۳(۳)، ۸۵-۶۸.

DOI: 10.22126/amcen.2026.14216.1099



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه رازی.

۱. مقدمه

خاک‌های ریزدانه با پلاستیسیته کم (ML) از منظر ریزساختاری عمدتاً دارای آرایش ذرات پراکنده، پیوندهای بین‌ذره‌ای ضعیف و حساسیت بالا نسبت به تغییرات رطوبتی هستند. این ویژگی‌های میکروسکوپی در مقیاس ماکروسکوپی به مقاومت برشی محدود، تراکم‌پذیری نسبتاً زیاد و عملکرد مکانیکی غیر پایدار منجر می‌شوند [۵-۱]. بر این اساس، شیروانی‌های متشکل از این‌گونه خاک‌ها همواره در معرض مخاطراتی نظیر ناپایداری‌های موضعی و لغزش‌های سطحی قرار دارند [۷-۵].

در دهه‌های اخیر، تثبیت شیمیایی با سیمان و آهک به‌عنوان متداول‌ترین روش‌های بهسازی خاک‌های ریزدانه مورد استفاده قرار گرفته است [۸-۱۲]. با این حال، این تثبیت‌کننده‌ها علاوه بر مصرف انرژی بالا و ردپای کربنی قابل توجه، معمولاً با افزایش قلیات محیط، تغییرات شیمیایی برگشت‌ناپذیر و در برخی موارد رفتار ترد و شکننده پس از سخت شدن همراه هستند [۱۳-۱۶]. از این رو، توسعه تثبیت‌کننده‌های جایگزین با رویکردی کم‌کربن تر و سازگارتر با محیط‌زیست، به یکی از محورهای اصلی پژوهش‌های اخیر در مهندسی ژئوتکنیک تبدیل شده است [۱۷-۱۸].

پلیمرهای امولسیون، به دلیل آب‌پایه بودن، قابلیت تشکیل غشای پلیمری پیوسته در سطح ذرات، ایجاد پیوندهای بین‌ذره‌ای و رفتار کم‌تردتر نسبت به تثبیت‌کننده‌های معدنی، به‌عنوان گزینه‌هایی امیدبخش برای بهسازی خاک‌های ریزدانه مطرح شده‌اند [۱۹-۲۲]. همچنین، امکان تنظیم عملکرد این مواد از طریق ترکیب کوپلیمر و مقدار مصرف، جذابیت آن‌ها را برای کاربردهای ژئوتکنیکی افزایش داده است. با این حال، بیشتر مطالعات پیشین بر خاک‌های رسی با پلاستیسیته متوسط تا زیاد متمرکز بوده‌اند [۲۳-۲۸] و رفتار نهشته‌های ریزدانه با پلاستیسیته کم در برابر این دسته از تثبیت‌کننده‌ها هنوز به‌صورت نظام‌مند روشن نشده است. به‌ویژه، نقش ویژگی‌های ذاتی امولسیون، نظیر حداقل دمای تشکیل غشای پلیمری^۱ (MFFT) و اندازه ذرات لاتکس، در کنار اثر متقابل درصد پلیمر و زمان عمل‌آوری، بر شاخص‌های خمیری، رفتار تراکمی و مقاومت فشاری تک‌محوری این خاک‌ها همچنان نامشخص است. این

کمبود دانش در مورد کوپلیمر بوتیل اکریلات - متیل متاکریلات^۲ (BA-MMA) محسوس‌تر است، زیرا داده‌های منتشرشده برای نهشته‌های ML هنوز محدود و پراکنده‌اند.

کوپلیمر امولسیونی BA-MMA از این منظر اهمیت دارد که بخش بوتیل اکریلات (BA) با افزایش انعطاف‌پذیری و تسهیل هم‌جوشی^۳ ذرات لاتکس، تشکیل غشای پلیمری را تقویت می‌کند، درحالی‌که بخش متیل متاکریلات (MMA) به افزایش سختی و پایداری مکانیکی فیلم نهایی کمک می‌کند [۲۹]. افزون بر این، اندازه ذرات در مقیاس زیرمیکرون و حداقل دمای تشکیل غشای پلیمری نسبتاً پایین این امولسیون، امکان تشکیل فیلم پیوسته در دماهای متعارف عمل‌آوری را فراهم می‌سازد؛ فرایندی که می‌تواند به ایجاد پیوندهای بین‌ذره‌ای، پوشش سطحی ذرات و کاهش نسبی فضای خالی منجر شود. با این حال، اثربخشی این سازوکار به درصد پلیمر و مدت زمان عمل‌آوری^۴ وابسته است.

بر این اساس، پژوهش حاضر به ارزیابی آزمایشگاهی اثر کوپلیمر امولسیونی BA-MMA بر حدود اثربرگ، مشخصات تراکمی و مقاومت فشاری تک‌محوری یک خاک ML پرداخته و اثر متقابل درصد پلیمر و زمان عمل‌آوری را بر روند بهبود یا افت رفتار مقاومتی بررسی می‌کند.

۲. مصالح و روش‌شناسی آزمایشگاهی پژوهش

۲-۱. خاک

پارک شهدای گمنام سبزوار در حدود ۱/۵ کیلومتری شمال شهر سبزوار واقع شده است (شکل ۱). شیب‌های خاکی این محدوده عمدتاً از نهشته‌های ریزدانه با پلاستیسیته کم تشکیل شده‌اند که به دلیل مقاومت پایین، مستعد ناپایداری‌های موضعی و کلی هستند. با این حال، به سبب محدودیت‌های کاربری، وجود پوشش گیاهی و ملاحظات زیست‌محیطی، استفاده از تثبیت‌کننده‌های معدنی متداول در این سایت امکان‌پذیر نبود؛ از این رو، بهسازی پلیمری به‌عنوان یکی از گزینه‌های اصلی مدنظر قرار گرفت.

به‌منظور شناسایی ویژگی‌های ژئوتکنیکی مصالح موجود، برنامه‌ای از نمونه‌برداری صحرایی در بخش‌های مختلف سایت اجرا شد. در این

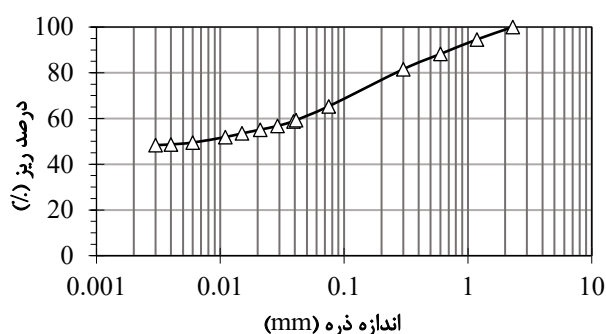
³. Coalescence

⁴. Curing time

¹. Minimum Film Formation Temperature

². Butyl Acrylate-Methyl Methacrylate

نمونه‌های برداشت‌شده عمدتاً دست‌خورده بودند و برای انجام آزمایش‌های شناسایی و تعیین خواص فیزیکی خاک مورد استفاده قرار گرفتند. اندازه‌گیری رطوبت طبیعی و وزن واحد خشک برجا مطابق استانداردهای ASTM انجام شد و شماره استانداردهای مربوطه در جدول ۱ ارائه شده است. نتایج دانه‌بندی نمونه‌های مختلف نشان داد که پراکندگی داده‌ها محدود بوده و منحنی‌های دانه‌بندی از هم‌پوشانی مناسبی برخوردارند. از این رو، منحنی دانه‌بندی متوسط شکل ۲ به عنوان منحنی نماینده خاک مورد مطالعه انتخاب شد. خواص فیزیکی پایه خاک، شامل دانه‌بندی، حدود اتربرگ و سایر شاخص‌های مرتبط، در جدول ۱ ارائه شده است.



شکل ۲. توزیع دانه‌بندی نمونه معرف ساختمان پارک شهدای گمنام

۲-۲. امولسیون پلیمری

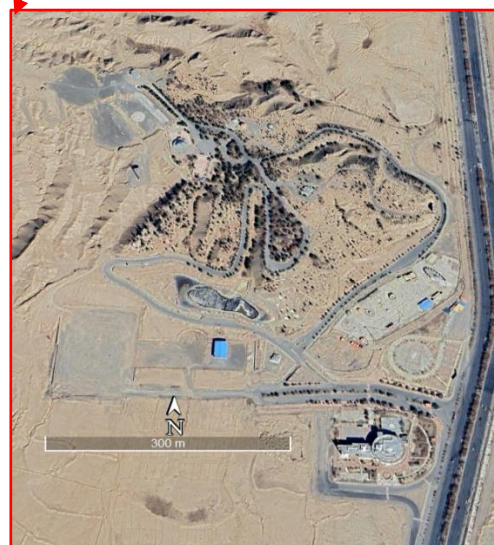
ماده بهساز مورد استفاده در این پژوهش، یک امولسیون کوپلیمری پایه آب متشکل از مونومرهای بوتیل‌اکریلات (BA) و متیل‌متاکریلات (MMA) است. ساختار و فرمول شیمیایی این دو مونومر در شکل ۳ ارائه شده است. تفاوت ذاتی این دو مونومر از نظر قطبیت، پارامتر انحلال‌پذیری در فاز ممتد و نسبت‌های واکنش‌پذیری، معماری ماکرو مولکولی و عملکرد نهایی کوپلیمر را تعیین می‌کند [۳۹].

این دو مونومر از طریق پلیمریزاسیون رادیکال آزاد امولسیونی با یکدیگر کوپلیمر زنجیره‌ای تصادفی تشکیل می‌دهند. در این کوپلیمر، بخش‌های MMA صلبیت مکانیکی، پایداری حرارتی و مقاومت شیمیایی را تأمین می‌کنند، در حالی که زنجیره‌های BA انعطاف‌پذیری و کاهش دمای کمینه تشکیل غشای پلیمری را به همراه دارند [۲۹].

راستا، تعداد محدودی چاهک دستی تا عمق حداکثر ۵ متر حفر و نمونه‌ها در فواصل عمقی تقریباً ۱ متر از دیواره چاهک‌ها برداشت شدند. پیش از نمونه‌برداری، لایه‌های سطحی متأثر از مواد آلی، پوشش گیاهی و هوازدگی حذف شد تا نمونه‌ها نماینده مصالح اصلی شیب باشند. مشاهدات صحرایی همچنین نشان داد که تغییرات جانبی مصالح در محدوده مورد مطالعه محدود است.



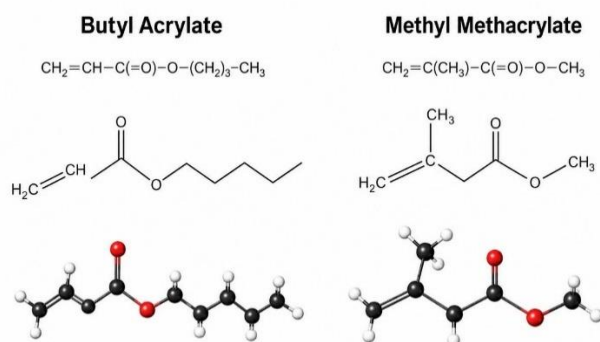
(الف)



(ب)

شکل ۱. الف) موقعیت محدوده مورد مطالعه نسبت به شهر سبزوار
ب) محدوده مورد مطالعه از نمای نزدیک‌تر

محیط تحت فرآیند هم‌جوشی و تشکیل غشای پلیمری قرار می‌گیرند. پیامد این فرآیند، تشکیل غشایی پیوسته، چسبنده و نسبتاً آب‌گریز در شبکه حفرات خاک است. غشای پلیمری الاستیک تشکیل شده با



شکل ۳. ساختار شیمیایی مونومرهای بوتیل اکریلات (BA) و متیل متاکریلات (MMA)

ایجاد پل‌های میان‌ذره‌ای بین ذرات ریزدانه (سیلت و رس)، سبب اتصال و قفل‌شدگی فیزیکی آن‌ها می‌شود. به‌نحوی که افزایش چسبندگی ظاهری و کاهش استعداد لغزش نسبی ذرات تحت بارگذاری را در پی دارد. افزون بر این مکانیسم فیزیکی، گروه‌های کربونیل استری ($\text{C}=\text{O}$) موجود در زنجیره کوپلیمر می‌توانند با گروه‌های هیدروکسیل سطحی کانی‌های رسی ($\text{Si}-\text{OH}$, $\text{Al}-\text{OH}$) برهم‌کنش‌هایی از نوع پیوند هیدروژنی و جذب/برهم‌کنش الکترواستاتیکی برقرار کنند. با این حال، در خاک‌های ریزدانه کم‌پلاستیسیته به دلیل مقدار کمتر کانی‌های رسی فعال و در نتیجه سطح ویژه پایین‌تر، سهم و شدت این برهم‌کنش‌های ثانویه نسبت به خاک‌های با پلاستیسیته بالا محدودتر بوده و مکانیسم غالب بهبود، عمدتاً به پیوستگی فیلم پلیمری، پل‌زنی میان‌ذره‌ای و اصلاح ریزساختار حفرات نسبت داده می‌شود.

مشخصات فیزیکی امولسیون BA-MMA بر استاندارد به کاتالوگ شرکت سازنده در جدول ۲ خلاصه شده است. میانگین اندازه ذرات امولسیون حدود ۱۶۰ نانومتر است، این مقیاس زیرمیکرون، پخش شونده‌گی کلئیدی و نفوذ مویینیگی را در تخلخل‌های ریز خاک لای بهبود بخشیده و توزیع یکنواخت پلیمر و اصلاح مؤثر ریزساختار را تسهیل می‌کند. دمای کمینه تشکیل غشای پلیمری این امولسیون برابر با ۱۸ درجه سانتی‌گراد است. از آنجاکه دمای عمل‌آوری نمونه‌ها

در ترکیب خاک-پلیمر، با تبخیر فاز آبی امولسیون، ذرات لاتکس پلیمری به یکدیگر نزدیک شده و پس از رسیدن به تماس، در دمای

جدول ۱. مشخصات فیزیکی نمونه خاکی معرف

ویژگی	واحد	مقدار	استاندارد
محتوی ذرات شبه رس (کوچک‌تر از ۲ میکرون)	%	۴۸	ASTM D7928-21E01 [۳۰]
محتوی ریزدانه (کوچک‌تر از ۷۵ میکرون)	%	۶۵.۳	ASTM D7928-21E01 [۳۰]
محتوی ماسه	%	۳۴.۷	ASTM D422-63R07 [۳۱]
محتوی شن	%	۰	ASTM D422-63R07 [۳۱]
عدد فعالیت (A) [۳۲]	-	۰.۱۷	
حد روانی (LL) [۳۳]	%	۳۳.۳	ASTM D4318-00 [۳۳]
شاخص خمیری (PI) [۳۳]	%	۸.۳۷	ASTM D4318-00 [۳۳]
طبقه‌بندی در سیستم متحد (USCS) [۳۴]	-	ML	ASTM D2487-17 [۳۴]
وزن مخصوص ویژه ذرات (Gs) [۳۵]	بی‌بعد	۲.۷	ASTM D854-23 [۳۵]
متوسط رطوبت طبیعی برجا [۳۶]	%	۹	ASTM D2216-19 [۳۶]
متوسط دانسیته خشک برجا [۳۷]	gr/cm^3	۱.۴	ASTM D1556/D1556M-15E01 [۳۷]
رطوبت بهینه (OMC) [۳۸]	%	۱۷.۸	ASTM D698-12R21 [۳۸]
دانسیته خشک حداکثر (MDD) [۳۸]	gr/cm^3	۱.۶۹	ASTM D698-12R21 [۳۸]

کلیدی در برنامه آزمایشگاهی لحاظ گردید. شایان ذکر است که سازوکار بهسازی در این سامانه‌ها تفاوت ماهوی با تثبیت‌کننده‌های پایه سیمانی دارد [۱۸ و ۱۹]، بدین معنا که در تثبیت سیمانی، بهبود خواص مکانیکی عمدتاً تابعی از واکنش‌های هیدراتاسیون و تشکیل تدریجی محصولات سیمانی طی دوره‌های متعارف ۷ تا ۲۸ روز است. در مقابل، در سیستم‌های مبتنی بر پلیمرهای اکریلیک، انتظار می‌رود بخش عمده تغییرات ساختاری و توسعه پیوندهای فیزیکی-شیمیایی در سنین اولیه عمل‌آوری به وقوع بپیوندد. این امر از طریق ایجاد پل‌های پلیمری و پوشش‌دهی ذرات حاصل شده که منجر به افزایش چسبندگی بین‌ذره‌ای و کاهش حساسیت رطوبتی می‌گردد، پدیده‌ای که به‌ویژه در خاک‌های کم‌پلاستیسیته به‌دلیل اصلاح آرایش تماس ذرات و ارتقای انسجام اولیه، نمود بیشتری دارد. از این‌رو، با هدف تمرکز بر ارزیابی اثرات کوتاه مدت پلیمر بر رفتار خاک، بازه زمانی عمل‌آوری حداکثر ۷ روز برای آزمون‌ها انتخاب گردید.

جدول ۳. برنامه مطالعه آزمایشگاهی

ویژگی	استاندارد آزمایش	نسبت جرمی پلیمر جامد به وزن خاک خشک (%)	مدت زمان عمل‌آوری (در هوا)
حد روانی (LL)	ASTM D4318-00 [۳۵]	۹، ۷، ۵، ۴، ۳، ۲	۳ ساعت، ۱ و ۷ روز
حد خمیری (PL)			
تراکم استاندارد	ASTM D698- [۴۰] 12R21		
مقاومت فشاری تک‌محوری	ASTM 2166- [۴۲] 06		

۲-۳-۲. روش‌شناسی آزمایشگاهی پژوهش

الف) آماده‌سازی نمونه‌های خاک - پلیمر

جهت آماده‌سازی مخلوط‌های تثبیت‌شده، ابتدا حجم دقیق امولسیون مایع مصرفی بر اساس نسبت جرمی ماده جامد پلیمر به جرم خشک خاک (مطابق جدول ۳) و با لحاظ نمودن چگالی و درصد جامد امولسیون (مطابق جدول ۲) محاسبه گردید. این رویکرد

در آزمایشگاه و همچنین دمای محیطی در فصول گرم و خشک منطقه سبزواری به‌طور مستمر بالاتر از این آستانه حرارتی قرار دارد، فرایند هم‌جوشی ذرات و تشکیل غشا از نظر ترمودینامیکی در شرایط عمل-آوری استاندارد و بدون نیاز به عوامل ادغام‌کننده یا حرارت دهی ثانویه مساعد است. این سازگاری، نیاز به حلال‌های کمکی را مرتفع نموده و با کاهش پتانسیل انتشار ترکیبات آلی فرار^۵ (VOCs)، با اصول ژئوتکنیک زیست‌محیطی و ساخت‌وساز پایدار همخوانی دارد.

جدول ۲. مشخصات کوپلیمر امولسیونی BA-MMA

خاصیت	واحد	مقدار
شکل ظاهری	-	شیری‌رنگ
چگالی در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد	gr/cm ³	۱.۰۸
pH	-	۸ - ۱۰
دمای کمینه تشکیل غشای پلیمری (MFFT)	°C	۱۸
گرانروی ۲۵ درجه سانتی‌گراد	mPa.s	۱۵۰ - ۲۰۰
اندازه ذرات جامد	μm	۰.۱۷
محتوی جامد پلیمر	%	۵۰

۲-۳-۲. برنامه و روش‌شناسی آزمایشگاهی پژوهش

۲-۳-۱. برنامه آزمایشگاهی پژوهش

به‌منظور ارزیابی اثر اصلاح‌کننده کوپلیمری اکریلیک بر رفتار مهندسی خاک مورد مطالعه، ابتدا ویژگی‌های ژئوتکنیکی پایه خاک طبیعی تعیین شد (جدول ۱). سپس، یک برنامه آزمایشگاهی نظام‌مند برای بررسی اثر درصدهای مختلف پلیمر (بر مبنای نسبت جرم پلیمر جامد به جرم خشک خاک) بر ویژگی‌های خمیری (حد روانی، حد خمیری و شاخص خمیری)، مشخصات تراکمی (حداکثر وزن مخصوص خشک و رطوبت بهینه) و مقاومت فشاری محصور نشده^۶ (UCS) طراحی و اجرا گردید.

با توجه به ماهیت زمان‌وابسته فرآیندهایی نظیر هم‌جوشی ذرات لاتکس، تشکیل غشای پلیمری و توسعه پیوندهای بین‌ذره‌ای در سامانه خاک-پلیمر اکریلیک، زمان عمل‌آوری به‌عنوان یک متغیر مستقل

^۶ . Unconfined Compressive Strength

^۵ . Volatile Organic Compounds

خشک شدن را تا حد امکان تضمین می‌کند. علاوه بر این، برای اجتناب از اثرات تغییرات دمایی و رطوبتی احتمالی طی روز، کل فرآیند ساخت، پخش و نگهداری نمونه‌ها در یک بازه زمانی یکسان و به صورت هم‌زمان انجام شد. این رویکرد موجب یکسان‌سازی شرایط محیطی برای تمامی نمونه‌ها گردیده و اعتبار مقایسه رفتار مخلوط‌ها در سنین مختلف عمل‌آوری را افزایش می‌دهد.

ج) تعیین حدود اتربرگ

برای بررسی تأثیر پلیمر بر خواص قوامی خاک، اختلاط پلیمر صرفاً با کسر عبوری از الک شماره ۴۰ (۰.۴۲۵ میلی‌متر) از خاک معرف انجام شد. همان‌گونه که در جدول ۳ ذکر شده، آزمون‌های حد روانی (LL) و حد خمیری (PL) در زمان‌های عمل‌آوری ۳ ساعت، ۱ روز و ۷ روز پس از آغاز مواجهه مخلوط با هوا، مطابق استاندارد ASTM D4318-00 [۳۲] انجام شدند. در ادامه، شاخص خمیری (PI) از اختلاف بین دو حد مذکور محاسبه گردید.

د) تعیین ویژگی‌های تراکمی

به منظور ارزیابی اثر پلیمر بر ویژگی‌های تراکمی خاک، مخلوط‌ها با استفاده از کل دانه‌بندی معرف خاک تهیه شدند. پس از پایان هر یک از بازه‌های زمانی عمل‌آوری، از مصالح قرارگرفته در معرض هوا، پنج زیر نمونه با رطوبت‌های مختلف تهیه شد و آزمون تراکم به روش پروکتور استاندارد (ASTM D698-12R21 [۳۸]) بر روی آن‌ها انجام گرفت. با ترسیم منحنی تراکم برای هر ترکیب خاک-پلیمر، مقادیر حداکثر وزن مخصوص خشک (MDD) و رطوبت بهینه (OMC) استخراج و ثبت گردید.

ه) تعیین مقاومت فشاری محصور نشده (UCS)

به منظور ارزیابی اثر افزودن پلیمر بر رفتار مکانیکی خاک، آزمون مقاومت فشاری محصورنشده مطابق استاندارد ASTM 2166-06 [۴۰] بر روی نمونه‌های شاهد و نمونه‌های اصلاح‌شده با پلیمر انجام شد. ابتدا نمونه شاهد با رطوبت اولیه و دانسیته خشک متناظر با شرایط طبیعی خاک (طبق جدول ۱) در آزمایشگاه بازسازی گردید. برای این منظور مقدار مشخصی آب به خاک خشک افزوده شد و مخلوط تا دستیابی به توزیع یکنواخت رطوبت کاملاً همگن گردید. مخلوط، پیش

محاسباتی، کنترل دقیق میزان مصرف پلیمر در هر نمونه را تضمین نمود. به منظور حذف اثر متغیرهای تداخلی رطوبت و ارتقای قابلیت مقایسه سیستماتیک، رطوبت اولیه تمامی مخلوط‌ها در یک سطح ثابت و کنترل‌شده تثبیت شد. برای دستیابی به این هدف، امولسیون پلیمری با مقدار مشخصی آب مقطر رقیق گردید؛ به گونه‌ای که مجموع محتوای آبی امولسیون و آب رقیق‌سازی، دقیقاً معادل رطوبت هدف برای تمامی گروه‌های آزمایشی باشد.

در مرحله اختلاط، امولسیون پلیمری رقیق‌شده به صورت تدریجی به توده خاک خشک‌شده در اون (oven) در دمای 5 ± 10.5 سانتی‌گراد افزوده شد و تحت اختلاط مداوم مکانیکی قرار گرفت. این فرآیند باهدف دستیابی به تماس کامل بین ذرات خاک و عامل اصلاح‌کننده و تضمین توزیع همگن زنجیره‌های پلیمری در ماتریس خاک انجام شد تا از بروز هرگونه ناهمگنی یا تجمع موضعی پلیمر جلوگیری شود. بلافاصله پس از فرآیند اختلاط، کلیه مخلوط‌ها در کیسه‌های پلاستیکی ضخیم هوابندی شده قرارگرفته و به مدت ۲۴ ساعت در دمای ثابت نگهداری شدند. این دوره پیش عمل‌آوری باهدف ممانعت از تبخیر زودهنگام و تبادل رطوبت با محیط و همچنین فراهم‌سازی زمان کافی جهت تعادل رطوبتی و توسعه برهم‌کنش‌های اولیه فیزیکی- شیمیایی بین ذرات خاک و کلوئیدهای پلیمری در ریزساختار مخلوط صورت پذیرفت.

ب) مواجهه کنترل‌شده با هوا و عمل‌آوری

پس از پایان دوره نگهداری اولیه، مخلوط‌ها از کیسه خارج‌شده و به صورت لایه‌های یکنواخت با ضخامت تقریبی ۱ سانتی‌متر بر روی سطحی صاف گسترده شدند تا در معرض هوا قرار گیرند. انتخاب این ضخامت اندک، با افزایش نسبت سطح به حجم، تبخیر تدریجی آب را تسهیل کرده و یکنواختی نرخ خشک شدن در کل توده مخلوط را بهبود می‌بخشد. در این مرحله، کاهش تدریجی رطوبت زمینه را برای هم‌جوشی ذرات لاتکس فراهم ساخته و درنهایت به تشکیل و تکامل غشا/ شبکه پلیمری در ماتریس خاک-پلیمر منجر می‌شود.

نمونه‌ها در محیط کنترل‌شده آزمایشگاه با دمای تقریباً ثابت (دمای 25 ± 2 سانتی‌گراد) قرار گرفتند. گرچه رطوبت نسبی محیط در این پژوهش به صورت فعال کنترل نشد، قرار دادن تمامی نمونه‌ها در یک فضای واحد و حذف هرگونه جریان هوای موضعی، یکنواختی شرایط



(ب)

شکل ۴. الف) نمونه‌های تک‌محوری قرار داده شده در معرض هوا، ب) نمونه جایگذاری شده در دستگاه تک‌محوری

شایان ذکر است که فرآیند مواجهه با محیط (عمل‌آوری) در آزمون‌های حدود اتربرگ و خواص تراکمی به‌طور هدفمندی با آزمون UCS متفاوت انتخاب شد. در تعیین حدود اتربرگ و رفتار تراکمی، تمرکز اصلی بر ارزیابی اثر پلیمر بر روی ذرات در مقیاس خرد (برهم‌کنش فیزیکی-شیمیایی لاتکس با کانی‌های خاک) در طول زمان است. از این‌رو، پهن کردن مخلوط به‌صورت لایه‌های نازک ۱ سانتی‌متری تضمین می‌کند که فرآیند تبخیر آب به‌طور یکنواخت رخ داده و واکنش شیمیایی در کل توده پیش از اجرای آزمون‌های فیزیکی استاندارد به‌صورت همگن توسعه یابد. در مقابل، هدف از آزمون UCS، سنجش یکپارچگی ساختاری توده متراکم خاک و نقش پل‌زنی و اتصالی غشای پلیمری در مقیاس ماکرو است. در این حالت، وجود گرادیان رطوبتی و تفاوت در نرخ خشک شدن در امتداد شعاع نمونه استوانه‌ای، بازتاب‌دهنده واقعیت رفتاری سازه‌های خاکی (مانند بسترهای تثبیت‌شده یا شیروانی‌ها) در شرایط میدانی و صحرایی است.

۳. یافته‌های پژوهش و بحث

۳-۱. اثر درصد پلیمر و زمان عمل‌آوری بر حدود اتربرگ

شکل‌های ۵-الف تا ۵-ج، به ترتیب تغییرات حد روانی (LL)، حد خمیری (PL) و شاخص خمیری (PI) برای خاک لای دار اصلاح‌شده با کوپلیمر BA-MMA را به‌عنوان تابعی از درصد پلیمر (۰ تا ۹٪) و زمان عمل‌آوری (۳ ساعت، ۱ روز و ۷ روز) نشان می‌دهند. طبق شکل‌های ۵-الف و ۵-ج، مقادیر LL و PI با افزایش درصد پلیمر روند کاهشی پیوسته‌ای را نشان می‌دهند. برای خاک اصلاح‌نشده،

از آماده‌سازی نمونه، به مدت ۲۴ ساعت در کیسه‌های پلاستیکی درزبندی شده نگهداری شد تا تعادل رطوبتی برقرار گردد.

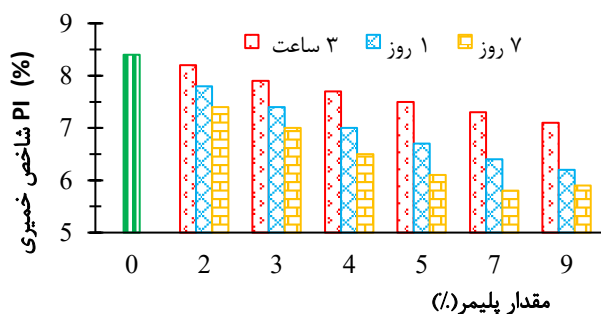
پس از این مرحله، نمونه‌های استوانه‌ای با قطر ۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر (نسبت ارتفاع به قطر برابر با ۲) به روش کوبش مرطوب [۴۱-۴۴] در قالب فلزی دو کفه از جنس فولاد ضدزنگ آماده‌سازی شدند. فرآیند تراکم در پنج لایه متوالی انجام گرفت و به‌منظور کاهش تغییرات دانسیته در امتداد ارتفاع نمونه، ضخامت لایه‌ها بر اساس روش تراکم کاهش‌یافته [۴۵] تنظیم گردید.

نمونه‌های تثبیت‌شده با پلیمر نیز با همان رطوبت اولیه و دانسیته خشک نمونه شاهد آماده‌سازی شدند تا اثرات ناشی از تفاوت شرایط تراکم حذف گردد. در این نمونه‌ها، مقدار محاسبه‌شده‌ای از امولسیون رقیق کوپلیمر BA-MMA به خاک افزوده شد، به‌گونه‌ای که نسبت جرم پلیمر جامد به جرم خشک خاک برابر با درصد‌های هدف (طبق جدول ۳) تعیین‌شده باشد.

پس از آماده‌سازی، کلیه نمونه‌های شاهد و اصلاح‌شده در شرایط محیطی آزمایشگاه در معرض هوا قرار گرفتند تا تبخیر آب، افزایش مکش بافتی و تشکیل تدریجی شبکه پلیمری در ساختار خاک-پلیمر امکان‌پذیر شود. آزمون UCS در زمان‌های ۳ ساعت، ۱ روز و ۷ روز عمل‌آوری انجام شد. برای هر طرح اختلاط، حداقل سه تکرار مستقل انجام گردید و میانگین نتایج گزارش شد. شکل ۴-الف نمونه‌های آماده‌شده و شکل ۴-ب دستگاه آزمون را نشان می‌دهد.



(الف)



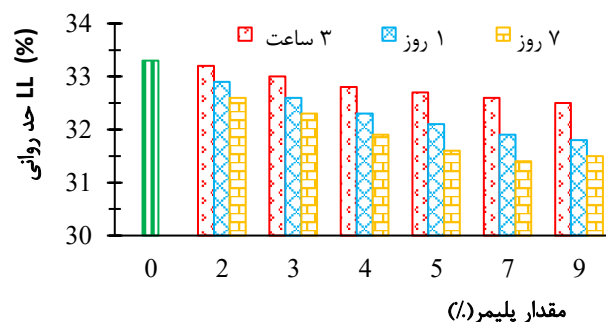
(ج)

شکل ۵. اثر درصد پلیم‌ر و زمان عمل‌آوری بر حدود اتربرگ (الف) حد روانی (ب) حد خمیری (ج) شاخص خمیری

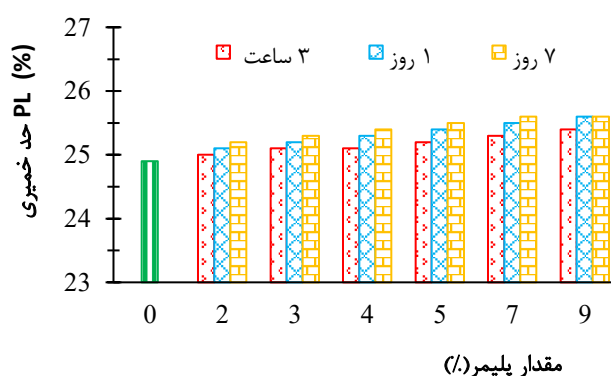
امولسیون پلیم‌ری که پیش از آزمایش فرآیند هم‌جوشی اولیه را آغاز کرده‌اند، به صورت لکه‌های پلیم‌ری موضعی در تماس بین ذره‌ای عمل کرده و صلبیت موضعی ایجاد می‌کنند. این صلبیت نسبی اثر روان کاری رطوبت کم موجود را به طور مؤثر خنثی کرده و در نتیجه مقدار PL تقریباً ثابت باقی می‌ماند. به بیان دیگر، در سطوح رطوبتی متناظر با PL، نقش پلیم‌ر از یک عامل کاهش‌دهنده ظرفیت نگهداشت آب به یک تقویت‌کننده صلبیت بین ذره‌ای تغییر می‌کند.

با توجه به شاخص فعالیت پایین خاک پایه $A \approx 0.17$ (جدول ۱)، تغییر رفتار خمیری ثبت شده بیش از آنکه ناشی از واکنش‌های شیمیایی متداول رس-پلیم‌ر باشد، تحت کنترل مکانیسم‌های فیزیکی و ریزساختاری است. همچنین، متوسط قطر ذرات امولسیون کوپلیم‌ری (جدول ۲) کوچک‌تر از ابعاد گلوگاه حفرات خاک ریزدانه است که نفوذ ذرات لاتکس به درون فضاهای خالی را تسهیل می‌کند. در طول فرآیند آب‌زدایی، این ذرات هم‌جوش شده و غشای پلیم‌ری آب‌دوست پیوسته‌ای را روی دانه‌های خاک تشکیل می‌دهند. این غشا به عنوان یک مانع فیزیکی عمل کرده و با محدود کردن دسترسی آب آزاد به سطح ذرات، ظرفیت جذب آب کل ماتریس خاک را کاهش می‌دهد. لذا نرخ تغییر حدود اتربرگ به شدت تابع زمان عمل‌آوری بود. در زمان اولیه (۳ ساعت)، کاهش در PI بسیار ناچیز بود (از ۸.۴ به ۷.۴٪ در میزان پلیم‌ر ۹٪) که نشان می‌دهد رطوبت اولیه بالا مانع از هم‌جوشی کامل ذرات لاتکس شده است. در مقابل، نمونه‌های عمل‌آوری شده در بازه ۷ روزه بیشترین تغییر را نشان دادند، چراکه

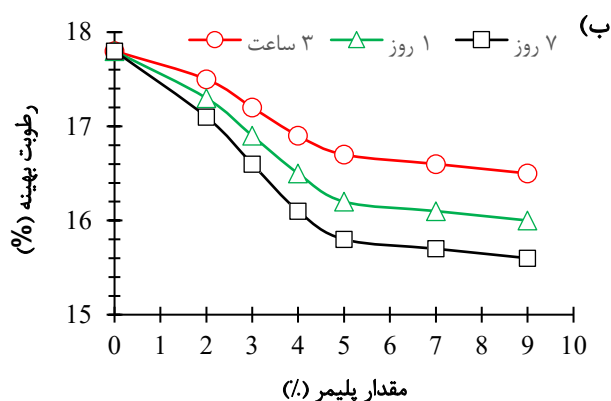
مقادیر اولیه LL، PL و PI به ترتیب ۳۳.۳٪، ۲۴.۹٪ و ۸.۴٪ اندازه‌گیری شد. با افزودن ۷٪ پلیم‌ر پس از ۷ روز عمل‌آوری، مقدار LL به ۳۱.۴٪ کاهش یافت و PI به ۵.۸٪ رسید که نشان‌دهنده کاهش ۳۱٪ در شاخص خمیری است. در مقابل، تغییرات PL در تمامی مراحل عمل‌آوری ناچیز بود و در محدوده باریک ۲۴.۹ تا ۲۵.۶٪ باقی ماند (شکل ۵ ب). این کاهش محسوس در LL در کنار ثبات نسبی PL نشان می‌دهد که بهسازی پلیم‌ری عمدتاً بر ظرفیت نگهداری آب که کنترل‌کننده حد روانی است تأثیر می‌گذارد و اثر چندانی بر مرز شروع حالت خمیری خاک ندارد. در محدوده‌های رطوبتی بسیار پایین (نزدیک PL)، مکش بافتی بالا سبب نزدیکی شدید ذرات خاک و کاهش ضخامت لایه آب بین ذره‌ای می‌شود. تحت این شرایط، ذرات



(الف)



(ب)



شکل ۶. اثر درصد پلیمر و زمان عمل‌آوری بر خواص تراکمی (الف) حداکثر دانسیته خشک (ب) رطوبت بهینه

در زمان عمل‌آوری کوتاه ۳ ساعت، افزودن پلیمر تغییرات محدودی را در وضعیت تراکم ایجاد کرد، به‌طوری‌که در درصد پلیمر ۵٪، مقدار حداکثر وزن مخصوص خشک با افزایش جزئی به 1.074 gr/cm^3 و رطوبت بهینه به ۱۶.۷٪ رسید. این رفتار اولیه عمدتاً ناشی از روان‌کاری موقت تماس بین ذره‌ای توسط فاز مایع امولسیون، پیش از شروع فرآیند هم‌جوشی و تشکیل غشای ذرات پلیمری BA-MMA است. با افزایش زمان عمل‌آوری به ۱ روز، روند بهبود تراکم ساختاریافته‌تر شد. در درصد پلیمر ۵٪، حداکثر وزن مخصوص خشک ترکیب به 1.077 gr/cm^3 افزایش و رطوبت بهینه به ۱۶.۲٪ کاهش یافت. این امر نشان‌دهنده آن است که تبخیر بخشی از فاز آبی و آغاز شکل‌گیری غشای پلیمری، بازآرایی و چیدمان کارآمدتر ذرات خاک را تحت انرژی تراکمی کوبشی تسهیل کرده است؛ اما بیشترین تغییر خواص تراکمی در زمان عمل‌آوری ۷ روز محقق شد. در این سن، حداکثر وزن مخصوص خشک در محدوده بهینه پلیمر (۵٪ تا ۷٪) به مقدار حداکثر 1.079 g/cm^3 افزایش حدود ۶٪ افزایش نسبت به نمونه شاهد رسید، درحالی‌که رطوبت بهینه تا ۱۵.۷٪ کاهش حدود ۱۲٪ افت کرد. این تغییر محسوس نشان می‌دهد که غشای پلیمری که فرآیند هم‌جوشی آن کامل شده است، هم‌زمان به‌عنوان روان‌ساز حین تراکم و پرکننده فیزیکی حفرات عمل کرده و نیاز به آب آزاد را برای دستیابی به حداکثر دانسیته خشک کاهش داده است.

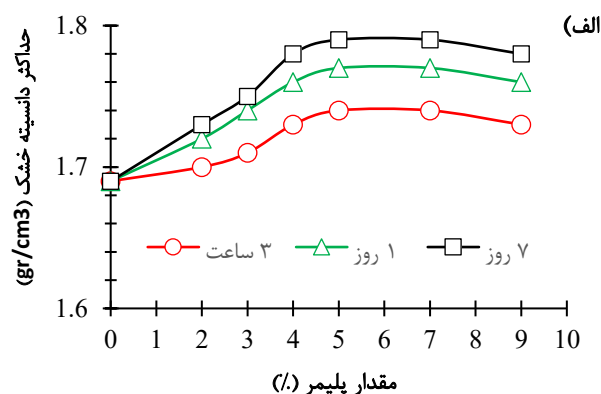
در درصد پلیمرهای بالاتر (۷٪ تا ۹٪)، یک ناحیه اشباع و افت جزئی در دانسیته خشک مشاهده شد، به‌طوری‌که در مقدار مصرف ۹٪ پلیمر

زمان کافی برای تبخیر فاز آبی و تشکیل شبکه الاستومری پیوسته فراهم شده است.

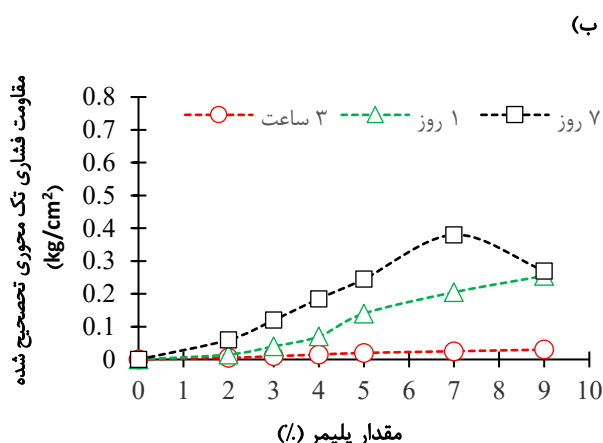
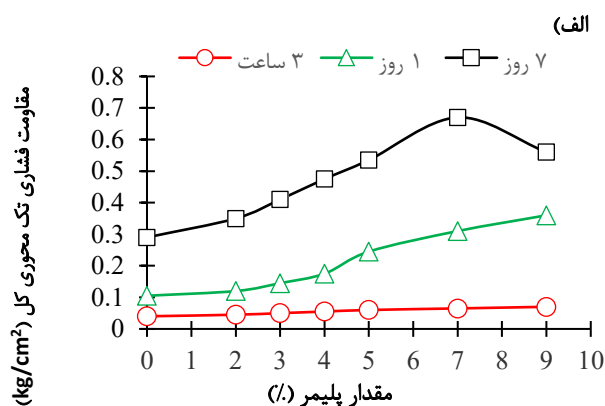
نکته قابل‌توجه این است که افزایش غلظت پلیمر از ۷٪ به ۹٪ منجر به کاهش بیشتر PI نشد و این شاخص در بازه ۷ روزه در محدوده ۵.۸٪ تا ۵.۹٪ تثبیت گردید. این رفتار نشان‌دهنده یک آستانه اشباع است که در آن، سطح مؤثر ذرات خاک در میزان پلیمر ۷٪ به‌طور کامل توسط غشای پلیمری پوشش داده شده است. درنتیجه، تجمع پلیمر مازاد در فضاهای خالی تأثیری بر کاهش بیشتر ظرفیت جذب آب اسکلت خاک ندارد.

۲-۳. اثر درصد پلیمر و زمان عمل‌آوری بر خواص تراکمی

تغییرات حداکثر وزن مخصوص خشک (MDD) و رطوبت بهینه (OMC) خاک تثبیت‌شده با کوپلیمر BA-MMA به‌عنوان تابعی از مقدار مصرفی پلیمر و زمان عمل‌آوری در شکل‌های ۶-الف و ۶-ب نشان داده شده است. مشخصات تراکمی استاندارد خاک شاهد (بدون اصلاح) برابر با حداکثر وزن مخصوص خشک 1.069 gr/cm^3 و رطوبت بهینه ۱۷.۸٪ (جدول ۱) تعیین شد.



نمونه تثبیت شده متناظر کسر شد. مقادیر حاصل با عنوان مقاومت فشاری تک محوری تصحیح شده ($q_{u,corr}$) محاسبه و تغییرات آن در شکل ۷-ب نشان داده شد.



شکل ۷. اثر درصد پلیمر و زمان عمل آوری: (الف) مقاومت فشاری تک محوری کل (q_u) (ب) مقاومت فشاری تک محوری تصحیح شده ($q_{u,corr}$) (سهم خالص افزودن پلیمر)

در زمان عمل آوری کوتاه مدت ۳ ساعت، مقدار $q_{u,corr}$ بسیار ناچیز بوده و در محدوده بین 0.005 kg/cm^2 (در محتوای ۲٪ پلیمر) تا 0.03 kg/cm^2 (در محتوای ۹٪ پلیمر) نوسان می کند. این سهم اولیه ناچیز نشان می دهد که فرآیند هم جوشی گلبول های پلیمری و تشکیل شبکه الاستومری پیوسته مستلزم خروج بخش عمده ای از آب آزاد حفرات است. در ساعات اولیه، بالا بودن میزان آب در منافذ مانع از تماس نزدیک و به هم پیوستگی ذرات معلق پلیمری می شود و کوپلیمر

و عمل آوری ۷ روزه، حداکثر وزن مخصوص خشک به 1.78 g/cm^3 کاهش یافت. این رفتار تحت کنترل دو مکانیسم هم زمان قرار دارد: (الف) جایگزینی حجمی: وزن مخصوص کمتر کوپلیمر BA-MMA نسبت به ذرات معدنی خاک، دانسیته خشک کل مخلوط را کاهش می دهد و (ب) برگشت الاستیک: حجم بالای فاز الاستومری در فضاهای خالی خاک پس از برداشتن بار تراکمی، دچار بازیابی کشسان شده و مانع از قفل و بست متراکم تر ذرات می شود.

بر این اساس، محدوده بهینه تراکمی برای این خاک ریزدانه با فعالیت کم، بین ۵٪ تا ۷٪ پلیمر تعیین می شود. جایی که اصلاح فیزیکی ماتریس خاک (روان کاری و پر کردن حفرات) بدون ایجاد افت چگالی به حداکثر کارایی خود می رسد.

۳-۳. اثر درصد پلیمر و زمان عمل آوری بر مقاومت فشاری محصور نشده (UCS)

اثرات متقابل درصد کوپلیمر BA-MMA و زمان عمل آوری بر مقاومت فشاری تک محوری کل (q_u) خاک ریزدانه تثبیت شده در شکل ۷ الف نشان داده شده است.

برای خاک شاهد اصلاح نشده (۰٪ پلیمر)، مقاومت فشاری تک محوری از 0.04 kg/cm^2 بر سانتی متر مربع در زمان ۳ ساعت به 0.29 kg/cm^2 در سن ۷ روز افزایش یافت. با توجه به نگهداری نمونه ها در معرض شرایط محیطی آزمایشگاه، این روند افزایش مقاومت عمده ناشی از کاهش تدریجی رطوبت (خشک شدن) است که منجر به رشد مداوم مکش بافتی در ساختار خاک غیر اشباع و در نتیجه افزایش تنش مؤثر ظاهری می شود [۴۶].

در نمونه های اصلاح شده با پلیمر، بهبود مقاومت فشاری را می توان حاصل اثر توأم مکش بافتی و هم جوشی/تشکیل غشای پلیمری دانست. هرچند برهم کنش بین مکش بافتی و چسبندگی ایجاد شده توسط پلیمر رفتاری غیر خطی دارد (زیرا پلیمر هم بر نرخ تبخیر و هم بر توزیع و مقدار مکش بافتی اثر می گذارد)، استفاده از تفاضل مستقیم مقاومت نمونه شاهد در هر سن عمل آوری، رویکردی ساده و کاربردی برای بررسی کیفی روند تغییرات و برآورد تقریبی سهم شبکه پلیمری فراهم می کند. بر این اساس، به منظور تفکیک نسبی اثر کوپلیمر از سهم مقاومت ناشی از مکش بافتی حاصل از تبخیر آب، مقاومت فشاری تک محوری نمونه شاهد در هر سن عمل آوری از مقاومت

به خاک افزوده شد و برای هر درصد، نمونه‌هایی جهت انجام آزمایش‌های حدود اتربرگ، خواص تراکمی و مقاومت تک‌محوری تهیه گردید. پس از آماده‌سازی، نمونه‌ها جهت بررسی اثر زمان عمل‌آوری، در سه سن ۳ ساعت، ۱ روز و ۷ روز تحت شرایط کنترل‌شده آزمایشگاهی عمل‌آوری شدند. سپس آزمایش‌های مذکور در هر سه سن روی نمونه‌ها انجام شد. مهم‌ترین نتایج این مطالعه عبارتند از:

۱- افزودن کوپلیمر BA-MMA منجر به کاهش حد روانی و افت ۳۱ درصدی شاخص خمیری (PI) خاک گردید (کاهش PI از ۸.۴ به ۵.۸)، درحالی‌که حد خمیری تغییر محسوسی نشان نداد. این اثر کاهشی با افزایش زمان عمل‌آوری تا ۷ روز تشدید شد. باین‌حال، افزایش غلظت پلیمر به بیش از ۷ درصد، تغییر بیشتری در حدود اتربرگ ایجاد نکرد که نشان‌دهنده رسیدن به آستانه اشباع پوشش پلیمری در سطح ذرات خاک است.

۲- اصلاح خاک با کوپلیمر BA-MMA، افزایش ۶ درصدی دانسیته خشک حداکثر (از ۱.۶۹ به ۱.۷۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب) و کاهش ۱۲ درصدی رطوبت بهینه را به همراه داشت که این روند در سن ۷ روز و در محدوده غلظت ۵ تا ۷ درصد پلیمر به بیشینه کارایی رسید. در مقابل، افزایش غلظت پلیمر به ۹ درصد به دلیل چگالی کمتر فاز پلیمری، موجب افت جزئی دانسیته خشک گردید. از این‌رو، محدوده غلظت ۵ تا ۷ درصد به‌عنوان بازه بهینه برای بهبود رفتار تراکمی این خاک ریزدانه کم پلاستیسته تعیین می‌شود.

۳- با تفکیک سهم مقاومت ناشی از مکش بافتی (حاصل از خشک شدن) از اثر خالص پلیمر، مشخص شد که اثربخشی کوپلیمر در کوتاه‌مدت (۳ ساعت) ناچیز است؛ اما در سن ۷ روز و با تکمیل فرآیند آب‌زدایی، مقاومت فشاری تک‌محوری تصحیح‌شده (سهم خالص اثر پلیمر) به ۱.۳۱ برابر مقاومت نمونه شاهد اصلاح‌نشده (که دارای مقاومت مقایسه‌ای ۰.۲۹ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع در همان سن بود) افزایش می‌یابد. در این راستا، غلظت ۷ درصد به‌عنوان مقدار بهینه مقاومتی (با ثبت مقاومت تک‌محوری تصحیح‌شده ۰.۳۸ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع) معرفی می‌گردد و فراتر از آن (غلظت ۹ درصد)، مقاومت تک‌محوری فشاری روند کاهشی نشان می‌دهد.

BA-MMA در این بازه بیشتر نقش یک روان‌ساز ویسکوز را ایفا می‌کند تا یک چسباننده سازه‌ای. باگذشت زمان عمل‌آوری به ۱ روز، تبخیر تدریجی آب منافذ، ذرات پلیمری را به هم نزدیک کرده و فرآیند هم‌جوشی فاز پلیمری آغاز می‌شود. این پدیده مستقیماً خود را در صعود مقدار $q_{u,corr}$ نشان می‌دهد، به‌طوری‌که مقاومت تصحیح‌شده از $kg/cm^2 \cdot 0.015$ در غلظت ۲٪، به $kg/cm^2 \cdot 0.205$ در غلظت ۷٪ و $kg/cm^2 \cdot 0.255$ در غلظت ۹٪ افزایش می‌یابد. در این مرحله، ایجاد اتصالات فیزیکی در محل تماس ذرات و پر شدن نسبی منافذ توسط ژل اولیه پلیمر، صلیبت اسکلت خاکی را ارتقا می‌دهد. بیشترین تأثیر ساختار غشایی کوپلیمر BA-MMA در سن ۷ روز رخ می‌دهد، جایی که مقدار $q_{u,corr}$ برای درصدهای ۲، ۳، ۴، ۵ و ۷ درصد پلیمر به ترتیب به ۰.۰۶، ۰.۱۲، ۰.۱۸۵، ۰.۲۴۵ و ۰.۳۸ مگا پاسکال می‌رسد. این روند افزایشی منظم، ناشی از تشکیل یک شبکه پلیمری سه‌بعدی متداخل و بالغ در فضای بین‌ذره‌ای است که انسجام کششی و برشی توده خاک را به‌طور چشمگیری بهبود می‌بخشد.

باین‌حال، در میزان افزودنی ۹٪ پلیمر، افت شدیدی در مقاومت تصحیح‌شده رخ داده و مقدار $q_{u,corr}$ از ۰.۳۸ (در غلظت ۷٪) به ۰.۲۷ kg/cm^2 کاهش می‌یابد. این رفتار نشان‌دهنده آن است که نسبت ۷٪ به‌عنوان درصد بهینه پلیمر عمل می‌کند. در این غلظت بهینه، تعادل مناسبی بین تقویت کششی شبکه پلیمری و حفظ اصطکاک دانه‌ای ذرات خاک برقرار است. در فراتر از این درصد (۹٪)، تجمع بیش‌ازحد فاز پلیمری منجر به ایجاد پوشش‌های ضخیم دور دانه‌ها و جدایش فیزیکی اسکلت معدنی خاک می‌شود. در این حالت، تماس مستقیم بین ذره‌ای (عامل اصلی مقاومت اصطکاک) قطع‌شده و رفتار مکانیکی توده خاک تحت کنترل فاز نرم و بسیار انعطاف‌پذیر الاستومری قرار می‌گیرد که نتیجه آن کاهش ظرفیت باربری فشاری نمونه است.

۴. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

این پژوهش باهدف ارزیابی تأثیر امولسیون کوپلیمر BA-MMA بر ویژگی‌های فیزیکی و مقاومتی خاک‌های ریزدانه کم‌پلاستیسته در انجام شد. بدین منظور، خاک مورد مطالعه از ساختگاه پارک شهدای گمنام سبزوار (که دارای ماهیت مشابه و بافت ریزدانه با پلاستیسته کم بود) نمونه‌برداری شد. در آزمایشگاه، درصدهای مختلف پلیمر (۲ تا ۹ درصد وزنی نسبت به خاک خشک)

- Engineering Geology and the Environment, vol. 82, no. 8, p. 317, 2023.
- [4] L. González Blanco, E. E. Romero Morales, N. M. Pinyol Puigmarti, and E. Alonso Pérez de Agreda, "Microstructure of compacted low-plasticity soils: the initial fabric and its evolution on stress and suction paths," In Proc. E3S Web of Conferences, vol. 382, no. 11003, pp. 1-6, 2023.
- [5] L. Fletcher, O. Hungr, and S. G. Evans, "Contrasting failure behaviour of two large landslides in clay and silt," Canadian Geotechnical Journal, vol. 39, no. 1, pp. 46-62, 2002.
- [6] A. R. Ram, M. S. Brook, and S. J. Cronin, "Engineering characteristics of soils prone to rainfall-induced slope failure in Viti Levu, Fiji," Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, vol. 52, no. 3, pp. 336-345, 2019.
- [7] R. Haghighi, A. Malekpour Estalaki, and M. Esmaeili Varaki, "Probabilistic slope stability analysis of side wall of river under water level changes and correlation of soil random variables," Advanced Technologies in Water Efficiency, vol. 3, no. 4, pp. 41-60, 2023, doi: 10.22126/atwe.2024.10154.1073.
- [8] J. Shi, S. Wang, W. Cao, J. Su, and X. Zhang, "Mechanical properties and strengthening mechanism of dredged silty clay stabilized by cement and steel slag," Materials, vol. 15, no. 11, p. 3823, 2022.
- [9] M. Nasiri Pishvari, M. Davaran, M. Kamalpoor Arabani, S. M. Mortazavi, S. M. Tolouei Barazandeh, and H. Ahmadi, "Strength improvement of coastal silty deposits using cement and nano-Al₂O₃: A geotechnical and microstructural study," Marine Georesources & Geotechnology, vol. 44, no. 4, pp. 864-882, 2026.
- [10] M. M. Jalilvand, H. Jahanian, and M. Azadi, "Mechanical and microstructural performance of clayey soil stabilized with cement and sodium silicate waste (SSW)," Advanced Modeling in Civil Engineering, vol. 3, no. 2, pp. 76-99, 2026, doi: 10.22126/amcen.2026.14016.1091.
- [11] A. Yousefi, M. Azadi, H. Jahanian, and A. Tabarsa, "Mechanical behavior and durability of clay stabilized with lime and sodium silicate waste under freeze-thaw cycles," Advanced Modeling in Civil

بدیهی است تعمیم نتایج این پژوهش به کاربردهای میدانی و اجرایی، مستلزم انجام مطالعات تکمیلی در زمینه ارزیابی عملکرد بلندمدت، بررسی تغییرات درازمدت^۷ در سیستم خاک-پلیمر، و نیز ارزیابی دوام^۸ خاک تثبیت‌شده تحت شرایط محیطی واقعی است. در این راستا، بررسی پایداری بلندمدت شبکه پلیمری، تغییرات احتمالی خواص مکانیکی در گذر زمان، و عملکرد نمونه‌ها در برابر عوامل محیطی نظیر سیکل‌های تر و خشک ناشی از تغییرات اقلیمی و بارندگی، گامی ضروری در ارزیابی قابلیت اطمینان و پایداری این روش بهسازی محسوب می‌شود. علاوه بر این، انجام مطالعات ریزساختاری، شیمیایی و کانی‌شناسی با استفاده از آزمون‌ها و روش‌هایی نظیر SEM، EDX، XRF و XRD می‌تواند به تبیین دقیق‌تر سازوکار برهم‌کنش خاک-پلیمر، شناسایی تغییرات ریزساختاری، ترکیب عنصری و ویژگی‌های کانی‌شناختی مؤثر بر بهبود رفتار مهندسی خاک کمک کند. همچنین، بررسی اثر این افزودنی پلیمری بر ویژگی‌های هیدرولیکی و تغییرشکلی خاک، از جمله ضریب نفوذپذیری، پارامترهای تحکیم و نشست‌پذیری، از طریق انجام آزمون‌های اختصاصی، می‌تواند شناخت جامع‌تری از عملکرد کوتاه‌مدت و بلندمدت این سامانه تثبیت فراهم ساخته و زمینه توسعه و کاربرد مطمئن‌تر آن در پروژه‌های مهندسی ژئوتکنیک را فراهم آورد.

References

- [1] V. Ferber, J. C. Auriol, Y. J. Cui, and J. P. Magnan, "Wetting-induced volume changes in compacted silty clays and high-plasticity clays," Canadian Geotechnical Journal, vol. 45, no. 2, pp. 252-265, 2008.
- [2] V. N. Georgiannou, M. R. Coop, F. N. Altuhafi, and D. I. Lefas, "Compression and strength characteristics of two silts of low and high plasticity," Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, vol. 144, no. 7, p. 04018041, 2018.
- [3] Q. Mu, L. Meng, Y. Shen, C. Zhou, and G. Gu, "Effects of clay content on the desiccation cracking behavior of low-plasticity soils," Bulletin of

^۸. Durability

^۷. Aging effects

- [21] S. A. Naeini, B. Naderinia, and E. Izadi, "Unconfined compressive strength of clayey soils stabilized with waterborne polymer," *KSCE Journal of Civil Engineering*, vol. 16, no. 6, pp. 943-949, 2012.
- [22] P. K. Kolay, B. Dhakal, R. Kumar, and V. K. Puri, "Effect of liquid acrylic polymer on geotechnical properties of fine-grained soils," *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, vol. 2, no. 4, p. 29, 2016.
- [23] M. Mirzababaei, A. Arulrajah, and M. Ouston, "Polymers for stabilization of soft clay soils," *Procedia Engineering*, vol. 189, pp. 25-32, 2017.
- [24] P. K. Kolay and B. Dhakal, "Geotechnical properties and microstructure of liquid polymer amended fine-grained soils," *Geotechnical and Geological Engineering*, vol. 38, no. 3, pp. 2479-2491, 2020.
- [25] H. Ghasemzadeh, A. Mehrpajouh, and M. Pishvaei, "Compressive strength of acrylic polymer-stabilized kaolinite clay modified with different additives," *ACS Omega*, vol. 7, no. 23, pp. 19204-19215, 2022.
- [26] Y. Luan, X. Ma, Y. Ma, X. Liu, S. Jiang, and J. Zhang, "Research on strength improvement and stabilization mechanism of organic polymer stabilizer for clay soil of subgrade," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 19, p. e02397, 2023.
- [27] M. F. Aswad, A. S. Al-Gharbawi, M. Y. Fattah, R. H. Mustfa, and H. R. Hameed, "Improvement of clayey soil characteristics using poly acrylamide geopolymer," *Transportation Infrastructure Geotechnology*, vol. 11, no. 4, pp. 1673-1690, 2024.
- [28] M. Yousefinezhad, H. Ghasemzadeh, and M. A. Ramezanpour, "Clay stabilisation using Persian gum and polyvinyl alcohol," *Road Materials and Pavement Design*, vol. 26, no. 11, pp. 2892-2914, 2025.
- [29] Y. Park, S. Jo, X. Tie, W. G. Kim, G. H. Lee, K. Y. Ryu, J. H. Lee, and H. Kong, "Phosphorus-containing acrylate-based core-shell polymers: Synthesis and flame-retardant properties," *ACS Omega*, vol. 11, no. 5, pp. 3120-3132, 2026.
- [30] ASTM International, "ASTM D7928-21E01: Standard test method for particle-size distribution (gradation) of fine-grained soils using the sedimentation (hydrometer) analysis," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2021.
- Engineering, 2026, doi: 10.22126/amcen.2026.14102.1094.
- [12] H. R. Akbari and A. Entezari Harsini, "Evaluation of durability of stabilized soft soils under changing weather conditions," *Advanced Modeling in Civil Engineering*, vol. 1, no. 2, pp. 62-76, 2024, doi: 10.22126/amcen.2024.11319.1025.
- [13] O. O. Ojuri, A. A. Adavi, and O. E. Oluwatuyi, "Geotechnical and environmental evaluation of lime-cement stabilized soil-mine tailing mixtures for highway construction," *Transportation Geotechnics*, vol. 10, pp. 1-12, 2017.
- [14] R. B. Saldanha, C. G. Da Rocha, A. M. L. Caicedo, and N. C. Consoli, "Technical and environmental performance of eggshell lime for soil stabilization," *Construction and Building Materials*, vol. 298, p. 123648, 2021.
- [15] A. A. Mohammed, H. Nahazanan, N. A. M. Nasir, G. F. Huseien, and A. H. Saad, "Calcium-based binders in concrete or soil stabilization: Challenges, problems, and calcined clay as partial replacement to produce low-carbon cement," *Materials*, vol. 16, no. 5, p. 2020, 2023.
- [16] M. T. Esan, C. Ackerman, W. K. Kupolati, and J. Snyman, "Decarbonising cement production in South Africa: An environmental and economic assessment of limestone-calcined clay cement," *Adv. Civ. Eng. Environ. Sci.*, 2026, doi: 10.22034/acees.2026.579142.1048.
- [17] M. T. Elnimr, W. R. Azzam, F. A. Agrama, and M. M. Ata, "Advances in problematic soil stabilization: State-of-the-art," *ERJ. Engineering Research Journal*, vol. 49, no. 2, pp. 159-171, 2026.
- [18] M. A. Elshawadfy, A. A. El Shahawy, A. H. Moubarak, and M. M. Shams, "Sustainable soil stabilization: Innovations, environmentally friendly additives, and future perspectives," *Suez Canal Engineering, Energy and Environmental Science*, vol. 3, no. 4, pp. 80-88, 2025.
- [19] A. Al-Khanbashi, A. M. O. Mohamed, A. Moet, and B. Hadi, "Stabilization of desert sand using water-born polymers," in *Geoengineering in Arid Lands*, CRC Press, pp. 143-147, 2026.
- [20] Tadinfar, Gholamreza, and Narges Shahmiri. "Laboratory Investigation of the Effect of Acrylic Polymer in Stabilizing Fine-Grained Soils to Reduce Dust in Arid and Semi-Arid Regions." *Geographical Studies of Arid Regions*, no. 19, pp. 1-11. 2015.

- and Geological Engineering, vol. 43, no. 9, p. 528, 2025. <https://doi.org/10.1007/s10706-025-03484-6>
- [43] M. Salari, A. Akhtarpour, and S. Khosravi, "Long-term deformation mechanism of Masjed-e-Soleyman high rockfill dam," *Scientia Iranica*, 2024, doi: 10.24200/sci.2024.62637.7947.
- [44] M. M. Kotlar, A. Akhtarpour, and M. Salari, "A strain hardening/softening elasto-plastic constitutive model for plastic concrete materials," *Journal of Ferdowsi Civil Engineering*, vol. 30, no. 1, 2017.
- [45] R. S. Ladd, "Preparing test specimens using undercompaction," *Geotechnical Testing Journal*, vol. 1, no. 1, pp. 16-23, 1978.
- [46] A. Akhtarpour, N. Soleimani, A. Ekramifard, and A. Riyahikhoo, "Matrix suction effect on the soil stability in unsaturated soil," *Scientific Quarterly Journal of Iranian Association of Engineering Geology*, vol. 15, no. 2, pp. 1-17, 2022.
- [31] ASTM International, "ASTM D422-63(2007): Standard test method for particle-size analysis of soils," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2007.
- [32] A. W. Skempton, "The colloidal activity of clays," in *Selected Papers on Soil Mechanics*, vol. 1, pp. 57-61, 1953.
- [33] ASTM International, "ASTM D4318-00: Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2000.
- [34] ASTM International, "ASTM D2487-17: Standard practice for classification of soils for engineering purposes (unified soil classification system)," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.
- [35] ASTM International, "ASTM D854-23: Standard test methods for specific gravity of soil solids by the water displacement method," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2023.
- [36] ASTM International, "ASTM D2216-19: Standard test methods for laboratory determination of water (moisture) content of soil and rock by mass," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019.
- [37] ASTM International, "ASTM D1556/D1556M-24: Standard test method for density and unit weight of soil in place by sand-cone method," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2024.
- [38] ASTM International, "ASTM D698-12(2021): Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort (12,400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³)), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2021.
- [39] G. Odian, *Principles of Polymerization*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2004.
- [40] ASTM International, "ASTM D2166-06: Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2006.
- [41] A. Riyahikhoo, A. Akhtarpour, and M. Salari, "Experimental investigation of stress-induced anisotropy on the yield surface of mine tailings," *Transportation Infrastructure Geotechnology*, vol. 12, no. 1, p. 64, 2025. <https://doi.org/10.1007/s40515-024-00523-2>
- [42] M. Salari and A. Akhtarpour, "Strain rate effects on shear behavior of dense unsaturated silty sand from the Dasht-e-Bayaz Fault Zone," *Geotechnical*