

Evaluation of the Mechanical Properties and Durability of Aeolian Sand Stabilized with Emulsion Copolymers

Zohreh Ghafouri Fard¹, Maryam Mokhtari¹*, Mohammad Mehdi Khabiri¹ , Seyed Mehrdad Jalilian²

¹ Faculty of Civil Engineering, University of Yazd, Yazd, Iran.

² Iran Polymer and Petrochemical Institute, Tehran, Iran.

Review History:

Received: Jun. 27, 2025

Revised: May, 13, 2026

Accepted: Aug. 04, 2026

Available Online: Aug. 06, 2026

Keywords:

Soil Stabilization

Eco-Friendly Polymers

Styrene-Acrylate Copolymer

Styrene-Butadiene Copolymer

Aeolian Sand

ABSTRACT: The stabilization and improvement of the engineering properties of weak soils, particularly aeolian sandy soils (windblown sand), represent one of the major challenges in geotechnical engineering and pavement construction projects. The use of conventional stabilizers such as cement and lime is subject to significant limitations due to their high carbon dioxide emissions and adverse environmental impacts. The present study investigates, through experimental and statistical approaches, the performance of two environmentally compatible emulsion copolymers, namely styrene-acrylate copolymer (A70) and styrene-butadiene copolymer (B70), in the stabilization of desert aeolian sand collected from South Khorasan Province, Iran. For this purpose, the polymers were prepared at concentrations of 10%, 30%, and 50%, and added to the soil at different dosages by dry weight. After a 14-day curing period under laboratory conditions, the treated specimens were subjected to a series of tests, including compaction, unconfined compressive strength (UCS), direct shear, indirect tensile strength (Brazilian test), California Bearing Ratio (CBR), and durability tests involving freeze-thaw and wetting-drying cycles. In addition, microstructural analyses were conducted using scanning electron microscopy (SEM) to examine the bonding mechanism between soil particles. The results indicated that the effect of polymer content on compressive, tensile, and shear strength was nonlinear. The optimum pure polymer contents were determined as 6.03% for A70 and 4.02% for B70. Specimens stabilized with B70 exhibited higher compressive strength and elastic modulus, whereas those treated with A70 demonstrated more ductile behavior and superior durability under wetting-drying and freeze-thaw cycles, owing to the formation of a continuous polymeric network. Statistical analyses performed using Design-Expert and SPSS confirmed the validity of the proposed regression predictive models, with coefficients of determination (R^2) greater than 0.9.

1- Introduction

Since civil infrastructure is constructed directly on soil, ensuring that the subgrade possesses adequate engineering properties is essential; otherwise, the implementation of soil improvement and stabilization techniques becomes inevitable [1]–[3]. Concurrently, given the global warming crisis and the environmental pollution stemming from energy consumption and carbon dioxide emissions in construction projects, utilizing eco-friendly materials to minimize these adverse impacts has gained significant importance [4], [5]. In this regard, the application of polymers as a novel and environmentally friendly approach has attracted substantial attention in geotechnical engineering [6]–[8]. The primary novelty of this research lies in the introduction and application of two novel, eco-friendly emulsion copolymers for soil stabilization, which have not been previously explored in the literature. In addition to introducing these agents, this study

presents a laboratory evaluation of their efficacy in enhancing the geotechnical properties and engineering behavior of the soil, thereby establishing their viability as sustainable and efficient alternatives.

2- Methodology

This study investigates the stabilization of aeolian sand sourced from the deserts of South Khorasan Province, Iran. The stabilization process was conducted using two types of eco-friendly polymer emulsions: styrene-acrylate copolymers (designated as A70) and styrene-butadiene (designated as B70) at three concentrations of 10%, 30%, and 50%. Both polymers comprise 70% styrene monomer in their chemical structure and were applied as a milky liquid with a density of approximately 1.2 g/cm³ and a neutral pH (ranging from 6 to 7).

To evaluate the performance of the stabilized specimens

*Corresponding author's email: mokhtar@yazd.ac.ir

(coded A1–A3 and B1–B3 according to their respective concentrations), compaction tests were initially performed to determine the optimum emulsion content for each concentration. The prepared specimens were subjected to a 14-day curing period under dry conditions, followed by a series of mechanical and durability tests. This experimental program included Unconfined Compressive Strength (UCS), direct shear, and indirect tensile strength tests. Furthermore, the stability of the specimens against wetting-drying and freezing-thawing cycles was assessed to determine the efficacy of these two polymers in enhancing the geotechnical properties of aeolian sand.

3- Results and Discussion

This research demonstrated that polymer emulsions A70 and B70 significantly enhance the engineering behavior of sandy soil; however, this improvement follows a parabolic trend, peaking at an optimum content. At low concentrations, the polymer acts as a lubricant, facilitating particle rearrangement and thereby increasing the dry density. Conversely, at high concentrations, the increased viscosity hinders efficient particle packing, leading to a reduction in density. The optimum net polymer content for maximum dry density was determined to be 6.03% for A70 and 4.02% for B70.

Regarding mechanical strength, both polymers proved effective as stabilizing agents. The maximum Unconfined Compressive Strength (UCS) was achieved by the specimen containing 4.02% B70 (3.85 MPa), indicating the formation of robust inter-particle bonds. Furthermore, B70 exhibited a stiffer and more brittle response, whereas A70 demonstrated higher failure strain, reflecting a more ductile and flexible behavior (Figure 1). Consequently, B70 is more suitable for maximizing ultimate strength, while A70 offers superior deformation tolerance.

Polymer stabilization also led to a substantial increase in shear strength parameters. The untreated sand exhibited negligible cohesion and an internal friction angle of approximately 31° . Post-stabilization, both cohesion and the internal friction angle increased. This improvement is attributed to the formation of a cohesive polymeric film and increased particle surface roughness upon curing, which effectively restricts inter-granular slippage.

The results for tensile strength and durability were equally favorable. Post-treatment, the sandy soil developed significant indirect tensile strength. All optimized specimens maintained a weight loss of less than 6% after 12 durability cycles, well below the 14% permissible limit. Notably, A70 performed better in freeze-thaw cycles, likely due to the higher flexibility of its molecular chains.

The California Bearing Ratio (CBR) followed a similar trend; polymer addition up to the optimum level enhanced the CBR, but excessive dosages led to a decline. This reduction is attributed to excessive lubrication, decreased direct grain-to-grain contact, and the formation of localized soft zones.

Statistical modeling using Response Surface Methodology

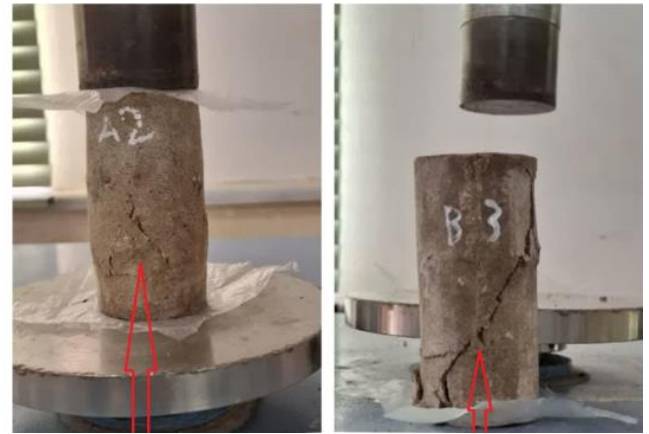


Fig. 1. Failure patterns of polymer-stabilized specimens.

(RSM) via Design-Expert software showed excellent agreement with experimental data ($R^2 > 0.9$). Additionally, SEM analysis revealed that A70 forms continuous films and flexible polymeric bridges, making it superior for long-term durability. In contrast, B70 develops shorter but stiffer and stronger bonds, making it the preferred option for achieving higher strength and cohesion.

4- Conclusion

The present study evaluated the effectiveness of two environmentally friendly emulsion copolymers in improving the geotechnical properties of aeolian sand. The main findings of this research are summarized as follows:

1. The incorporation of emulsion copolymers into aeolian sand significantly enhanced its mechanical properties, including compressive, shear, and tensile strength. The variation in strength with polymer content was nonlinear and exhibited a distinct optimum value.
2. The optimum pure polymer contents were determined to be 6.03% for styrene-acrylate (A70) and 4.02% for styrene-butadiene (B70).
3. Owing to the formation of stiff and concentrated bonds at interparticle contact points, B70 produced higher unconfined compressive strength (3.85 MPa), tensile strength (0.48 MPa), and shear strength than A70.
4. Due to the formation of a continuous and flexible film-like structure, A70 exhibited a softer response, characterized by a larger failure strain, as well as superior durability under wetting-drying and freeze-thaw cycles, reducing specimen weight loss to less than 5.5%.
5. The mathematical regression models developed using response surface methodology (RSM) showed excellent agreement with the experimental results and can therefore serve as a reliable tool for the design of soil stabilization mixtures in practical engineering applications.

References

- [1] M. Miri, M. Amel-Sakhi, M. Jiriyaei-Sharahi, Investigation of the effect of adding ethylene-vinyl acetate on the strength parameters of granular soil, *Amirkabir Civil Engineering Journal*, 55(1) (2023) 41-60, doi: 10.22060/ceej.2022.21307.7683 (in Persian).
- [2] P. Daneshgar, S. Ghafarpour Jahromi, H. Arzani, Investigation of the behavior of Ahvaz sand soil stabilized with metakaolin, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 55(2) (2023) 337-358, doi: 10.22060/ceej.2022.21851.7838 (in Persian).
- [3] S. Ghayani, M. Jiriyaei Sherahi, B. A. Mohammadnejad, Evaluation of clay stabilization with calcium lignosulfonate additive, considering different mixing methods, *Amirkabir Civil Engineering Journal*, 53(2) (2021) 659-674, doi: 10.22060/ceej.2020.16461.6238 (in Persian).
- [4] B. Iftikhar et al., A machine learning-based genetic programming approach for the sustainable production of plastic sand paver blocks, *J. Mater. Res. Technol.*, 25 (2023) 5705-5719, doi: 10.1016/j.jmrt.2023.07.034.
- [5] W. Ahmad, A. Ahmad, K. A. Ostrowski, F. Aslam, P. Joyklad, A scientometric review of waste material utilization in concrete for sustainable construction, *Case Stud. Constr. Mater.*, 15 (2021) e00683, doi: 10.1016/j.cscm.2021.e00683.
- [6] A. Al-Khanbashi, A. M. O. Mohamed, A. Moet, B. Hadi, Stabilization of desert sand using water-born polymers, in: *Geoengineering in Arid Lands*, (2026) 143-147.
- [7] S. Shafqatian, G. Moradi, H. Katabi, Laboratory investigation of the effect of chemical and biological stabilization on the properties of roadbed clay, *Amirkabir Civil Engineering Journal*, 53(7) (2021) 2821-2836, doi: 10.22060/ceej.2020.17493.6588 (in Persian).
- [8] [K. Prince, P. A. J., C. S. S. Chandra, T. J. S., Laboratory durability evaluation of sandy soil stabilized with synthetic polymer, in: *Geotechnical Frontiers 2025*, (2025) 277-286.



ارزیابی خواص مکانیکی و دوام خاک ماسه‌بادی تثبیت‌شده با کوپلیمرهای امولسیون

زهره غفوری فرد^۱، مریم مختاری^{۱*}، محمد مهدی خیبری^۱، سید مهرداد جلیلیان^۲

۱- دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران.

۲- پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۰۶

بازنگری: ۱۴۰۵/۰۲/۲۳

پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۱۳

ارائه آنلاین: ۱۴۰۵/۰۵/۱۵

کلمات کلیدی:

تثبیت خاک

پلیمر دوستدار محیط زیست

کوپلیمر استایرن آکریلات

کوپلیمر استایرن بوتادین

ماسه‌بادی

خلاصه: تثبیت خاک یک فرآیند حیاتی در مهندسی عمران است که با بهبود خواص مکانیکی خاک، بستر پایدارتری برای سازه‌ها ایجاد می‌کند. یکی از روش‌های نوظهور سازگار با محیط‌زیست تثبیت خاک، تثبیت با پلیمرهای دوستدار محیط‌زیست است. از این رو در این پژوهش خواص خاک ماسه‌بادی تثبیت‌شده با دو کوپلیمر امولسیون دوستدار محیط‌زیست با نام‌های کوپلیمر استایرن آکریلات و کوپلیمر استایرن بوتادین با سه غلظت متفاوت مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور ابتدا با انجام آزمایش تراکم مقدار پلیمر امولسیون برای غلظت‌ها مختلف برای رسیدن به حداکثر وزن مخصوص تعیین شد. سپس نمونه‌های خاک تثبیت‌شده با انجام آزمایش‌های مقاومت تک‌محوری، مقاومت برشی، مقاومت کششی غیرمستقیم و دوام مورد ارزیابی قرار گرفتند. مطابق نتایج این پژوهش با افزایش مقدار پلیمر، مقاومت تک‌محوری، مقاومت برشی و کششی غیرمستقیم ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد؛ به‌طوری‌که مقدار بهینه پلیمر خالص A70 برابر با ۰.۳٪ و مقدار بهینه پلیمر خالص B70 برابر با ۰.۲٪ است. همچنین نتایج بیانگر آن است که با افزایش درصد پلیمر میزان افت وزنی ناشی از چرخه ذوب و یخ و تر و خشک کاهش می‌یابد. علاوه بر این با روابط ارائه‌شده در حاصل از تحلیل آماری با نرم‌افزار Design-Expert می‌توان عملکرد خاک تثبیت‌شده با این دو پلیمر را با دقت خوبی پیش‌بینی کرد. نتایج آزمون T با استفاده از نرم‌افزار SPSS در خصوص مقایسه عملکرد خاک تثبیت‌شده با این دو پلیمر نشان می‌دهد که اختلاف معناداری بین مقاومت فشاری، کششی و خواص دوام خاک تثبیت‌شده با دو پلیمر وجود دارد؛ این در حالی است که اختلاف پارامترهای مقاومت برشی خاک تثبیت‌شده با این دو پلیمر معنادار نیست.

۱- مقدمه

از دیرباز خاک‌ها جایگاه مهمی در علوم عمرانی به خود اختصاص داده‌اند؛ چراکه تمامی سازه‌های عمرانی بر روی خاک بنا می‌شود [۱]. از این رو خاک بستر سازه‌های عمرانی باید خواص مهندسی مطلوبی را دارا باشند که در غیر این صورت مهندسیین با اتخاذ روش‌هایی سبب بهبود خواص مهندسی خاک می‌شوند که بهسازی خاک نام دارد [۲، ۳]. این در حالی است که امروزه گرم شدن کره زمین و افزایش آلودگی محیط‌زیست به یک معضل جهانی تبدیل‌شده است و از طرفی ساخت‌وساز سازه‌های مختلف تأثیر قابل‌توجهی بر محیط‌زیست، مصرف انرژی و میزان انتشار CO₂ دارد [۴، ۵]. از این رو امروزه به‌منظور به حداقل رساندن آسیب‌های وارده بر محیط‌زیست، می‌بایست در ساخت‌وسازهای عمرانی از مصالح سازگار با محیط‌زیست استفاده شود تا اثرات منفی وارد آمده حتی‌الامکان

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mokhtar@yazd.ac.ir

کاهش یابد. یکی از روش‌های نوظهور سازگار با محیط‌زیست تثبیت خاک، تثبیت با پلیمرهاست [۶، ۷]. پلیمرها علاوه بر اینکه در زمینه‌های مختلف از جمله صنایع غذایی، نساجی، پزشکی و کشاورزی پرکاربرد هستند؛ در زمینه مهندسی ژئوتکنیک نیز به‌عنوان تثبیت‌کننده خاک مورد توجه مهندسان قرار گرفته‌اند [۸، ۹]. از این رو پژوهش‌های متعددی در این زمینه انجام شده است؛ به‌عنوان نمونه سلطانی‌جیقه و همکارانش تأثیر پلیمر پلی آکریل آمید کاتیونی محلول در آب (PAM) بر خواص فیزیکی و مکانیکی خاک ریزدانه مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش، مقادیر مختلفی از افزودنی PAM به خاک ریزدانه با پلاستیسیته بالا اضافه شد و تحت آزمایش‌های حدود ات‌برگ، تراکم، مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS) و چرخه‌ی ذوب و یخ قرار گرفت. نتایج نشان داد که خاصیت آب‌دوستی PAM منجر به افزایش شاخص پلاستیسیته خاک می‌شود. از طرفی نتایج بیانگر آن است که افزودنی PAM باعث بهبود قابل‌توجهی در مقاومت

محمود^۸ انجام شد. در این تحقیق، نسبت‌های مختلف پلیمر برای تثبیت خاک متورم شونده مورد استفاده قرار گرفت. طبق نتایج این پژوهش، افزایش مقدار پلیمر منجر به افزایش حداکثر چگالی خشک، نسبت باربری کالیفرنیا، مقاومت فشاری و همچنین کاهش شاخص خمیری و تورم می‌شود[۱۵]. کومار^۹ و همکارانش نیز با بیان اینکه خصوصیات خاک بستر روسازی در طراحی روسازی بادوام بسیار حائز اهمیت است؛ مطالعه‌ای به منظور بررسی اثر امولسیون پلیمری بر ویژگی‌های خاک ماسه که نقش خاک بستر بزرگراه‌ها و فرودگاه‌ها را دارد، انجام دادند. بدین منظور، بررسی آزمایشگاهی بر روی خاک تثبیت شده با مقادیر مختلف امولسیون پلیمری و زمان‌های عمل‌آوری مختلف برای ارزیابی خواص خاک ماسه‌ای تثبیت شده انجام شد. نتایج این پژوهش بیانگر بهبود پارامترهای مقاومتی و مدول ارتجاعی خاک تثبیت شده است[۱۶].

همچنین جلالی و همکارانش در سال ۱۴۰۱ به مطالعه‌ای تحت عنوان بهبود خاصیت رمبندگی خاک دست‌نخورده با استفاده از مواد پلیمری پرداختند و اثر بوتادین رابر را بر تثبیت این گونه خاک‌ها مورد بررسی قرار دادند. بدین منظور ۲، ۳، ۴ و ۵٪ بوتادین رابر به نمونه‌های خاک رمبند تزیق شد و در مدت زمان‌های ۴، ۷، ۱۴ و ۲۸ روز عمل‌آوری شدند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که نفوذ بوتادین رابر در خاک باعث تشکیل ستون‌های بوتادین رابر می‌شود که کاهش میزان رمبندگی را به دنبال دارد[۱۷]. در پژوهشی دیگر سلطانی‌جیقه و همکارانش به بررسی اثر رزین پلیمری پلی‌استر بر ویژگی‌های خاک ریزدانه بنتونیت با خاصیت خمیری بالا به کمک انجام آزمایش‌های حدود اتربرگ و مقاومت فشاری تک‌محوری پرداختند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که افزودن رزین پلیمری پلی‌استر به خاک موجب کاهش حد روانی و شکل‌پذیری و همچنین باعث افزایش مقاومت تک‌محوری خاک می‌شود[۱۸]. علاوه بر این‌ها در سال ۲۰۲۳، مطالعه‌ای در خصوص بررسی عملکرد خاک تثبیت شده با پلیمرهای سازگار با محیط زیست در برابر چرخه‌ی ذوب و یخ توسط بوزیگیت^{۱۰} و همکارانش انجام شد. بدین منظور سه نوع پلیمر شامل صمغ زانتان، صمغ گوار^{۱۱} و پلیمر پلی‌آکریل آمید آنیونی برای بهبود خواص مقاومتی خاک رس کائولین مورد استفاده قرار گرفت و نتایج بیانگر آن بود که استفاده از پلیمرهای مذکور باعث افزایش مقاومت فشاری و مقاومت در برابر سیکل ذوب و یخ خاک می‌شود [۱۹].

فشاری خاک می‌شود. علاوه بر این نتایج نشان داد که هنگامی که نمونه‌های خاک در معرض پدیده ذوب و یخ قرار می‌گیرند، کاهش قابل توجهی در استحکام نمونه‌های تثبیت نشده و تثبیت شده، به‌ویژه پس از سیکل اول رخ می‌دهد[۱۰]. در سال ۲۰۲۰ نیز قاسم‌زاده و همکارانش به بررسی خاک رس تثبیت شده با یک پلیمر امولسیونی پرداختند و یافتند که مقاومت خاک رس تثبیت شده به این روش تا ۸ برابر افزایش می‌یابد. همچنین نتایج نشان داد که با ثابت نگه داشتن سایر پارامترها، با افزایش غلظت، مقاومت خاک رس افزایش می‌یابد[۱۱]. گلهاشم^۱ و اویگار^۲ نیز در مطالعه‌ای تغییر حجم و مقاومت فشاری تک‌محوری یک خاک آبرفتی تثبیت شده با کوپلیمر بوتیل آکریلات و استایرن (CBAS) را مورد بررسی قرار دادند و دریافتند که تثبیت نمونه‌های خاک با CBAS^۳ باعث بهبود قابل توجهی در ویژگی‌های انقباض و تراکم‌پذیری، تنها با افزودن ۵٪ (نسبت جرم خشک خاک) می‌شود. از سوی دیگر، بهبود در رفتار تورم نیاز به افزودن حداقل ۱۰٪ CBAS دارد. همچنین نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که مقاومت فشاری تک‌محوری حتی در درصدهای بسیار کم CBAS به‌طور قابل توجهی بهبود می‌یابد[۱۲]. در سال ۲۰۲۰ پژوهشی با هدف بررسی ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک‌های ریزدانه‌ی اصلاح شده با پلیمری مایع توسط کولای^۴ و داکال^۵ انجام شد. در این پژوهش دو نوع خاک (رس با پلاستیسیته بالا و لای با پلاستیسیته کم) با درصدهای مختلف پلیمر مایع (۲، ۳، ۴ و ۵٪ نسبت به وزن خشک خاک) تثبیت شدند. سپس آزمایش‌های مقاومت فشاری نامحدود و نسبت باربری کالیفرنیا برای ارزیابی مقاومت خاک تثبیت شده با پلیمر انجام شد. نتایج نشان می‌دهد که با افزودن پلیمر، مقاومت فشاری و نسبت باربری کالیفرنیا هر دو خاک افزایش می‌یابد[۱۳].

بای^۶ و همکارانش نیز در سال ۲۰۲۱ به بررسی رفتار خاک ماسه تثبیت شده با پلی اورتان (PU) پرداختند و یافتند که با افزایش مقدار پلیمر مقاومت فشاری تک‌محوری، مدول الاستیسیته و مقاومت کششی به‌صورت خطی افزایش می‌یابد و حالت شکست به تدریج از حالت شکننده به حالت شکل‌پذیر تغییر می‌کند[۱۴]. در سال ۲۰۲۲ پژوهشی تحت عنوان تثبیت خاک مسئله‌دار در ساخت‌وساز جاده با کوپلیمر مایع توسط عبدالواحد^۷ و

8. Mahmoud
9. Kumar
10. Bozyigit
11. guar gum

1. Golhashem
2. Uygur
3. Co-polymer of Butyl Acrylate and Styrene
4. Kolay
5. Dhakal
6. Bai
7. Abdel-wahed

باوونتورا^۱ و همکارانش در سال ۲۰۲۳ به بررسی خاک ماسه‌ای تثبیت‌شده با پلیمر مصنوعی دوستدار محیط‌زیست پرداختند و یافتند که افزودن محلول پلیمری به خاک باعث سیمانی شدن و افزایش چسبندگی می‌شود و محلول پلیمری یک لایه روی دانه‌ها تشکیل می‌دهد و آن‌ها را به هم متصل می‌کند و باعث بهبود خواص مهندسی خاک می‌گردد [20]. همچنین پاندا^۲ و همکارانش پژوهشی در خصوص پلیمر پلی آکریل آمید به‌عنوان ماده افزودنی به خاک رس متورم شونده برای کنترل پدیده تورم انجام دادند. از این رو سه درصد مختلف، ۰/۵٪، ۲/۵٪ و ۷/۵٪ از پلیمر با خاک خشک مخلوط شد و خصوصیات تورم آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که با افزایش مقدار پلیمر پلی آکریل آمید، تورم به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌یابد. علاوه بر این نتایج بیانگر آن است که افزودن پلیمر باعث بهبود مقاومت خاک می‌شود [۲۱]. میری و همکارانش نیز با بیان اینکه مشکلات زیست‌محیطی در سال‌های اخیر موجب شده که مهندسين حوزه ژئوتکنیک از مواد سازگار با محیط‌زیست در پروژه‌های عمرانی استفاده کنند؛ پژوهشی تحت عنوان بررسی اثر اتیلن-وینیل استات بر پارامترهای مقاومت خاک دانه‌ای پرداختند. بدین منظور نمونه‌های خاک با درصدهای مختلف ماده افزودنی پلیمری تحت آزمایش CBR قرار گرفتند. نتایج آزمایش CBR نشان می‌دهد که مقاومت خاک با استفاده از این افزودنی به‌طور قابل‌توجهی افزایش پیدا کرده است [۱]. در سال ۲۰۲۳، دبارما^۳ و همکارانش با اشاره به اینکه یک روش معمولی برای بهبود استحکام خاک لایه‌های زیرین روسازی، تثبیت خاک است؛ عملکرد اساس و زیراساس تثبیت‌شده با کوپلیمر وینیل اکریلیک را مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش مصالح سنگ‌دانه‌ای با درصدهای مختلف کوپلیمر وینیل اکریلیک تثبیت شدند و تحت آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوری و نسبت باربری کالیفرنیا قرار گرفتند. نتایج این مطالعه نشان داد که افزودن کوپلیمر وینیل اکریلیک به مصالح سنگی موجب افزایش UCS، CBR و Mr اساس و زیراساس می‌شود [۲۲].

وانگ^۴ و همکارانش نیز با بیان اینکه تثبیت خاک با استفاده از پلیمرها در سال‌های اخیر به‌طور گسترده مورد توجه مهندسين قرار گرفته است؛ به بررسی تثبیت خاک ماسه با پلیمر مصنوعی (پلیمر AH) و الیاف طبیعی (الیاف سیزال) پرداختند. در این پژوهش خاک با مقادیر مختلف پلیمر (۱، ۲،

1. Boaventura
2. Panda
3. Debbarma
4. Wang

۳ و ۴٪) و الیاف (۰/۲، ۰/۴، ۰/۶ و ۰/۸٪) تثبیت شد و تحت آزمایش‌هایی همچون مقاومت فشاری تک‌محوری، کشش غیرمستقیم و ریزساختاری قرار گرفت. یافته‌ها نشان می‌دهد که کاربرد هم‌افزایی پلیمر AH و الیاف سیزال به‌طور قابل‌توجهی یکپارچگی ساختاری ماسه را افزایش می‌دهد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که این پلیمر به‌عنوان یک چسب عمل می‌کند و الیاف را به ذرات ماسه متصل می‌کند، درحالی‌که الیاف ساختاری شبکه‌مانند ایجاد می‌کنند که سطح تماس مؤثر بین ذرات شن را تقویت می‌کند و در نتیجه خواص مکانیکی ماسه را به‌طور قابل‌توجهی بهبود می‌بخشد [۲۳]. وانگ^۵ و همکارانش نیز با اشاره به اینکه در تزریق عمدتاً از مواد سیمانی برای پر کردن فضاهای خالی و یا ایجاد پیوند بین ذرات خاک استفاده می‌شود، که در خاک‌های بسیار نفوذپذیر مانند ماسه‌ها و شن‌ها عملکرد خوبی دارند؛ اما برای خاک با نفوذپذیری کم به دلیل جریان پذیری کم مناسب نیستند، به بررسی تثبیت خاک به روش تزریق با پلیمر فعال‌شده با آب (WAP^۶) پرداختند. پلیمر مورد استفاده در این مطالعه یک پلیمر مایع است و ویسکوزیته آن به ۲۵ سانتی پواز می‌رسد، به این معنی که به‌اندازه شیر کم‌چرب روان است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که نشان داد که می‌توان از پلیمر برای تثبیت خاک‌های ریزدانه به روش تزریق که مواد سیمانی برای آن نامناسب است، استفاده شود [۲۴]. در مطالعه‌ی دیگری وانگ و همکارانش خاک سیلتی تثبیت‌شده با پلیمر پلی یورتان را مورد ارزیابی قرار دادند و یافتند که پلیمر پلی یورتان می‌تواند مقاومت فشاری خاک سیلتی را تا ۵ مگا پاسکال افزایش دهد. همچنین نتایج بیانگر آن است که در نتیجه، یافته‌ها نشان می‌دهد که این پلیمر در بهبود خواص مکانیکی خاک سیلتی با نفوذپذیری پایین در مقایسه با مواد تثبیت‌کننده مانند سیمان مؤثرتر است [۲۵].

علاوه بر این‌ها مالکی و همکارانش در سال ۲۰۲۵ به بررسی تثبیت خاک ماسه با پلیمرهای دوستدار با محیط‌زیست آگارگام و گوارگام پرداختند. در این پژوهش از سرعت پالس فراصوت (UPV) برای بررسی رفتار بلندمدت و کوتاه‌مدت ماسه سیلتی استفاده گردید و همچنین رفتار کوتاه‌مدت با آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوره، کشش غیرمستقیم و برش مستقیم بررسی شد. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که تثبیت خاک با آگارگام، در مقایسه با گوارگام، موجب افزایش مقدار مقاومت فشاری تک‌محوره و کشش غیرمستقیم می‌شود. همچنی زاویه اصطکاک داخلی مؤثر ماسه تثبیت‌شده با ۲٪ گوارگام و آگارگام به ترتیب ۲۱٪ و ۱۰٪ کاهش یافته است و چسبندگی مؤثر ماسه تثبیت‌شده با ۲٪ گوارگام و آگارگام به ترتیب

5. Huang
6. Water-activated polymer

در این پژوهش خاک موردنظر با دو پلیمر امولسیون دوستدار محیط زیست تثبیت شد. پلیمرهای مورد استفاده در این پژوهش شامل کوپلیمر استایرن آکریلات^۱ و کوپلیمر استایرن بوتادین^۲ با سه غلظت پلیمر متفاوت ۱۰، ۳۰ و ۵۰٪ است. غلظت پلیمرهای مورد استفاده در این پژوهش با در نظر گرفتن ملاحظات فنی و اجرایی انتخاب شد. در غلظت‌های کمتر از ۱۰٪، به دلیل مقدار کم پلیمر خالص در مخلوط، چسبندگی و پیوستگی کافی بین ذرات خاک ایجاد نمی‌شود و در نتیجه نمونه‌های تثبیت‌شده از مقاومت مکانیکی مطلوبی برخوردار نخواهند بود. در مقابل، در غلظت‌های بیش از ۵۰٪، به دلیل افزایش قابل توجه غلظت و گرانی پلیمر، فرآیند اختلاط با خاک دشوار شده و دستیابی به مخلوطی یکنواخت با مشکلات اجرایی همراه است. بنابراین، محدوده غلظت انتخاب‌شده به عنوان بازه‌ای مناسب در نظر گرفته شد تا ضمن تأمین مقدار کافی پلیمر برای ایجاد پیوند مؤثر بین ذرات خاک، امکان اختلاط مناسب و همگن با خاک نیز فراهم شود.

لازم به ذکر است که میزان مونومر استایرن در ساختار کوپلیمر برای هر دو پلیمر ۷۰٪ است؛ از این رو در این پژوهش کوپلیمر استایرن آکریلات و کوپلیمر استایرن بوتادین به ترتیب با حرف اختصاری A70 و B70 نمایش داده می‌شود. این پلیمرها به صورت مایعی شیرین رنگ است که PH آن بین ۶ تا ۷ است و درصد جامد آن وابسته به غلظت آن است؛ به عنوان مثال برای پلیمری با غلظت ۳۰٪، درصد جامد (درصد وزنی) آن برابر ۳۰ است؛ همچنین دانسیته این پلیمر حدود 1.2 gr/cm^3 است.

همان‌طور که اشاره شد، پلیمرها از واحدهای کوچک‌تری به نام مونومر تشکیل شده‌اند؛ در خصوص سنتز پلیمریزاسیون امولسیونی مونومرها لازم به ذکر است که پلیمریزاسیون امولسیونی یک واکنش پلیمریزاسیون رادیکالی است. در این نوع پلیمریزاسیون حداقل چهار جزء مورد نیاز است که شامل مونومر (نامحلول در آب)، محیط انجام واکنش (آب)، آغازگر (محلول در آب) و امولسیفایر. در این سیستم علاوه بر اصلاح‌کننده‌های زنجیر، اختتام دهنده واکنش و نیز پایدارکننده نیز مورد نیاز است. طی این واکنش پایدارسازی مونومرها در فاز آبی توسط امولسیفایر انجام می‌شود و سپس شروع واکنش با یک آغازگر محلول در آب مانند پتاسیم پرسولفات در حضور پایدارکننده‌هایی که ممکن است یونی، غیر یونی یا کلئیدی باشند، انجام می‌گیرد. وظیفه پایدارکننده‌ها پراکنده کردن مونومرهای آلی در فاز آبی است. مونومرها در درون مایسل‌هایی که توسط امولسیفایر ایجاد شده است تبدیل به پلیمر می‌شوند و محصول نهایی لاتکس نامیده می‌شود. روش انجام پلیمریزاسیون

به ۱۰۷ و ۱۴۸ کیلوپاسکال افزایش پیدا کرده است. علاوه بر این یکنواختی نشان داد که آزمون UPV می‌تواند پارامترهای مقاومت مکانیکی و برشی کوتاه مدت و بلند مدت ماسه و ماسه سیلتی تثبیت‌شده با آگارگام و گوارگام را تخمین بزند [۲۶]. همچنین مگروسه و همکارانش به بررسی عملکرد خاک ماسه تثبیت‌شده با پلیمری پلی‌وینیل استات همراه با الیاف سیسال پرداختند و یافتند که همبستگی مثبت بین غلظت پلی‌وینیل استات و مقاومت فشاری تک‌محوره در بازه آزمایش‌شده وجود دارد و استفاده از پلیمر همزمان با الیاف سبب بهبود چشم‌گیری عملکرد خاک ماسه می‌شود [۲۷].

همان‌گونه که اشاره شد، مطالعات متعددی در خصوص به کارگیری پلیمرها در تثبیت خاک انجام شده است؛ با این حال، با توجه به افزایش گرانی‌های زیست‌محیطی، استفاده از مواد کم‌هزینه و سازگار با محیط زیست به عنوان جایگزین روش‌های متداول بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است. در همین راستا، نوآوری اصلی این پژوهش در به کارگیری دو کوپلیمر امولسیونی جدید و دوستدار محیط زیست برای تثبیت خاک است که بر اساس بررسی منابع علمی موجود، تاکنون در این زمینه مورد استفاده قرار نگرفته‌اند. در این مطالعه، علاوه بر معرفی این مواد، تأثیر آن‌ها بر بهبود ویژگی‌های مهندسی خاک از طریق آزمایش‌های آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار گرفته است. بنابراین، نوآوری مقاله در معرفی و بررسی عملکرد این کوپلیمرهای امولسیونی جدید به عنوان گزینه‌ای سازگار با محیط زیست برای تثبیت خاک و ارائه شواهد تجربی از کارایی آن‌ها در بهبود رفتار خاک قابل بیان است.

۲- روش انجام تحقیق

۲-۱- مواد مصرفی

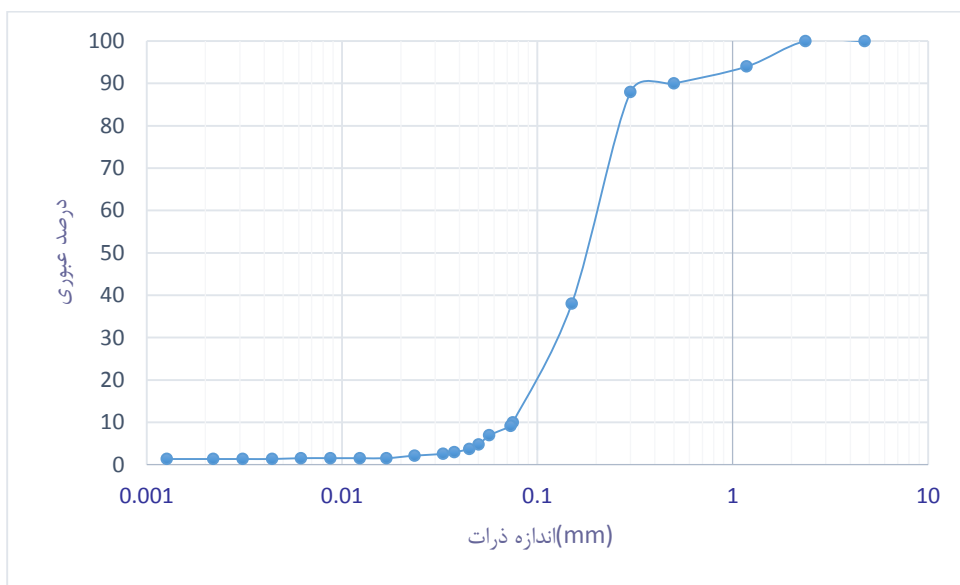
خاک ماسه‌بادی مورد استفاده در این پژوهش حاصل از برداشت مصالح محلی در عمق ۰/۵ متری منطقه‌ای بیابانی در استان خراسان جنوبی و ۷۵ کیلومتری بیرجند است (شکل ۱). لازم به ذکر است که آزمایش‌های شاخص شامل ارزش ماسه‌ای مطابق ASTM D2419، دانه‌بندی مطابق ASTM D6913، هیدرومتری مطابق ASTM D7928، حدود اتربرگ ASTM D4318 و چگالی ویژه مطابق ASTM D85 بر روی خاک مربوطه انجام شد که نمودار دانه‌بندی در شکل ارائه شده است. این خاک که طبق آزمایش ارزش ماسه‌ای ماسه تمیز است؛ بر اساس سیستم طبقه‌بندی متحد در دسته‌ی SP و بر اساس سیستم طبقه‌بندی آشتو در دسته‌ی A-3 قرار می‌گیرد. همچنین چگالی ویژه (Gs) این خاک برابر ۲/۶۷ و مقادیر ضریب یکنواختی (C_u) و ضریب انحنای (C_c) دانه‌بندی خاک موردنظر به ترتیب برابر ۲/۷ و ۰/۸ است.

1. Styrene-Acrylate Copolymer
2. Styrene-Butadiene Copolymer



(الف)

(A)

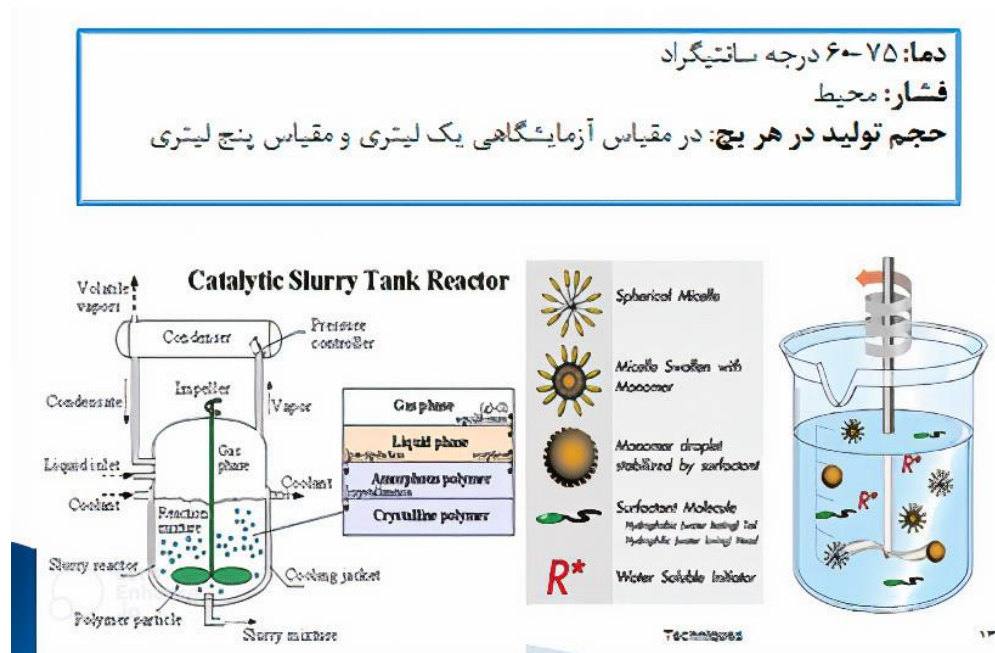


(ب)

(B)

شکل ۱. الف-محل برداشت خاک ب-دانه‌بندی خاک ماسه‌بادی مورد استفاده.

Fig. 1. (A) Soil sampling location; (B) grain-size distribution of the wind-blown sand used in the present study.



شکل ۲. پلیمریزاسیون امولسیون مونیومر.

Fig. 2. Emulsion polymerization of the monomer.

امولسیونی نیز در شکل ۲ ارائه شده است.

۲-۲-۲- آزمایش مقاومت تک محوری

مقاومت تک محوری خاک ماسه ای (UCS^1) یکی از پارامترهای مهم در مهندسی ژئوتکنیک است که نشان دهنده توانایی خاک در تحمل بار است یا به عبارتی دیگر برای تعیین مقاومت فشاری محصور نشده خاک مطابق استاندارد ASTM D 2166 انجام می گردد (شکل ۴) [۲۹].

۲-۲-۳- آزمایش مقاومت برش مستقیم

اهمیت مقاومت برشی در خاک به دلیل نقش حیاتی آن در پایداری سازه ها و خاک، به ویژه در پروژه های ژئوتکنیکی، بسیار زیاد است. این مقاومت نشان دهنده توانایی خاک در تحمل نیروهای برشی است که می تواند منجر به گسیختگی و فرونشست خاک شود. آزمایش برش مستقیم یکی از روش های معمول برای تعیین مقاومت برشی خاک است و نتایج آن برای طراحی سازه هایی مانند سدها، تونل ها و شیروانی ها، همچنین برای ارزیابی پایداری خاک در برابر پدیده های مخرب ژئوتکنیکی، حیاتی است؛ از این رو در این پژوهش آزمایش برش مستقیم خاک برای بررسی مقاومت برشی خاک مطابق استاندارد ASTM D 3080 مورد استفاده قرار می گیرد (شکل ۵) [۳۰].

۲-۲-۲- روش ساخت نمونه و برنامه آزمایش ها

در این مطالعه ابتدا با کمک آزمایش تراکم برای غلظت های مختلف پلیمر، مقدار بهینه برای رسیدن به حداکثر وزن مخصوص تعیین گردید. سپس نمونه های مربوط به هر آزمایش با مخلوط کردن ماسه با مقادیر بهینه پلیمر با غلظت های مختلف تهیه شد و سپس به نمونه ها به مدت ۱۴ روز وقت داده شد تا کاملاً خشک شوند. لازم به ذکر است که در این پژوهش آزمایش های مقاومت تک محوری، مقاومت برش مستقیم، مقاومت کششی غیرمستقیم، آزمایش دوام شامل چرخه ذوب و یخ و چرخه تر و خشک به منظور بررسی عملکرد خاک تثبیت شده با این دو پلیمر انجام شد.

۲-۲-۱- آزمایش تراکم

آزمایش تراکم استاندارد به منظور تعیین درصد رطوبت بهینه و چگالی خشک حداکثر خاک مطابق استاندارد ASTM D698 انجام گردید. جهت انجام آزمایش تراکم خاک لازم است در ابتدا قالب توزین شده و سر قالب بر روی قالب قرار داده می شود (شکل ۳) [۲۸].

1. Unconfined Compressive Strength



شکل ۳. آزمایش تراکم.

Fig. 3. Compaction test



(ب)
(B)



(الف)
(A)

شکل ۴. الف- نمونه و قالب آزمایش تک‌محوری ب-نمایی از انجام آزمایش تک‌محوری.

Fig. 4. (A) Specimen and mold used for the unconfined compression test; (B) view of the unconfined compression test setup.

استاندارد ASTM C496 انجام شد. این آزمایش درواقع یک آزمایش فشاری قطری است که در آن، نمونه استوانه‌ای شکل مصالح، تحت اثر نیروی فشاری وارد بر سطح جانبی آن قرار می‌گیرد که این نحوه بارگذاری سبب به وجود آمدن تنش‌های کششی در امتداد قطر بارگذاری شده، می‌شود (شکل ۶). مقاومت کششی نمونه‌ها از رابطه ۱ قابل محاسبه است [۳۱]. در رابطه ۱، P بیش‌ترین نیروی وارده بر نمونه برحسب نیوتن، L طول نمونه برحسب میلی‌متر و d قطر نمونه برحسب میلی‌متر است.

۲-۲-۴- آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم (برزیلی)

مقاومت کششی غیرمستقیم در خاک ماسه از این جهت اهمیت دارد که به‌عنوان یک پارامتر مهم در طراحی و ارزیابی پایداری سازه‌های خاکی، به‌ویژه در مناطقی که در معرض تنش کششی هستند، عمل می‌کند. این مقاومت نشان‌دهنده توانایی خاک در تحمل نیروهای کششی بدون شکست یا ترک‌خوردگی است و بر اساس آزمایش‌های غیرمستقیم، مانند آزمایش کشش غیرمستقیم (برزیلی)، اندازه‌گیری می‌شود؛ این آزمایش مطابق



(ب)
(B)



(الف)
(A)

شکل ۵. الف- نمونه و قالب آزمایش برش مستقیم ب-نمایی از دستگاه آزمایش برش مستقیم.

Fig. 5. (A) Specimen and mold used for the direct shear test; (B) view of the direct shear test apparatus.

خاک می‌پردازد و در درک رفتار خاک در شرایط مختلف محیطی بسیار مهم است. از این رو در این پژوهش نمونه‌های استوانه‌ای خاک تثبیت شده مطابق استاندارد ASTM D559 تحت آزمایش چرخه تر و خشک‌شدگی قرار گرفتند (مطابق شکل ۷-الف) [۳۲].

آزمایش چرخه ذوب و یخ خاک به منظور بررسی اثرات تغییرات دما، یخ زدن و ذوب شدن بر خواص خاک انجام می‌شود. این آزمایش اهمیت ویژه‌ای در مناطق با آب‌وهوای سرد و یخبندان دارد، زیرا یخ زدن و ذوب شدن مکرر خاک می‌تواند منجر به تغییرات قابل توجهی در ساختار، مقاومت و نفوذپذیری خاک شود. به عبارتی دیگر عمل انجماد-ذوب، به عنوان یک فرآیند هوازدگی قوی، می‌تواند به شدت بر خواص مهندسی خاک تأثیر بگذارد؛ بنابراین بررسی مقاومت خاک تثبیت شده در برابر چرخه ذوب و یخ حائز اهمیت است [۳۳]. بدین منظور نمونه‌های استوانه‌ای خاک تثبیت شده مطابق استاندارد ASTM D560 تحت آزمایش چرخه ذوب و یخ قرار گرفتند (شکل ۷-ب) [۳۴]. لازم به ذکر است که حداکثر درصد افت مجاز پس از چرخه تر و خشک و ذوب و یخ ۱۴٪ است.



شکل ۶. آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم خاک.

Fig. 6. Indirect tensile strength test of the soil.

$$T = \frac{2P}{\pi Ld} \quad (۱)$$

۲-۲-۶- آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا (CBR)

آزمایش ظرفیت باربری کالیفرنیا نیز یکی از آزمایش‌های مکانیک خاک است که به واسطه آن می‌توان برای خاک موردنظر، حداکثر فشار قابل اعمال را محاسبه کرد و این آزمایش مطابق استاندارد ASTM D1883، بدین صورت انجام گرفت (شکل ۸).

۲-۲-۵- آزمایش دوام

در این پژوهش به منظور بررسی دوام نمونه‌های خاک تثبیت شده از آزمایش چرخه تر و خشک و چرخه ذوب و یخ استفاده شد. آزمایش چرخه تر و خشک‌شدگی خاک اهمیت زیادی در مهندسی ژئوتکنیک دارد؛ چراکه این آزمایش به بررسی اثرات تغییرات رطوبت بر خواص فیزیکی و مکانیکی



(ب)
(B)

(الف)
(A)

شکل ۷. الف- آزمایش چرخه تر و خشک ب-آزمایش چرخه ذوب و یخ.

Fig. 7. (A) Wet-dry cyclic test; (B) freeze-thaw cyclic test.

خواص دارد. این روش امکان مشاهده‌ی مستقیم نحوه‌ی پوشش ذرات خاک، پر شدن منافذ و ایجاد پیوندهای پلیمری را فراهم می‌کند. تحلیل این ویژگی‌های میکروسکوپی، ارتباط مستقیم بین ساختار درونی و عملکرد مهندسی بلوک (مانند مقاومت و دوام) را مشخص می‌سازد. لازم به ذکر است که بررسی ریزساختاری بر روی نمونه‌های A2 و B2 که دارای بهترین عملکرد مکانیکی بودند انجام شد.

۳- نتایج و بحث

همان‌طور که اشاره شد هدف این پژوهش بررسی خصوصیات مکانیکی خاک ماسه‌بادی تثبیت‌شده با دو پلیمر امولسیون دوستدار محیط‌زیست با غلظت‌های مختلف است. ابتدا به‌منظور تعیین مقادیر بهینه پلیمرها با غلظت‌های مختلف آزمایش تراکم انجام شد. در ادامه نمونه خاک‌های تثبیت‌شده با مقادیر مختلف پلیمر تحت آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوری، مقاومت برش مستقیم، مقاومت کششی غیرمستقیم و آزمایش دوام شامل چرخه تر و خشک‌شدگی و چرخه ذوب و یخ قرار گرفت. درنهایت نتایج آزمایش‌ها با نرم‌افزار Design-Expert و SPSS تحلیل شد.



شکل ۸. آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا

Fig. 8. California Bearing Ratio (CBR) test.

۲-۲-۷- بررسی ریزساختاری

به‌منظور بررسی هرچه دقیق‌تر اثر درصدهای مختلف پلیمرهای مورد استفاده بر بافت خاک ماسه‌بادی و عملکرد آن، بررسی ریزساختاری به روش SEM انجام شد. بررسی ریزساختاری با روش SEM برای بلوک خاکی تثبیت‌شده با پلیمر، نقش کلیدی در درک مکانیسم تثبیت و بهینه‌سازی

۳-۱- نتایج آزمایش تراکم

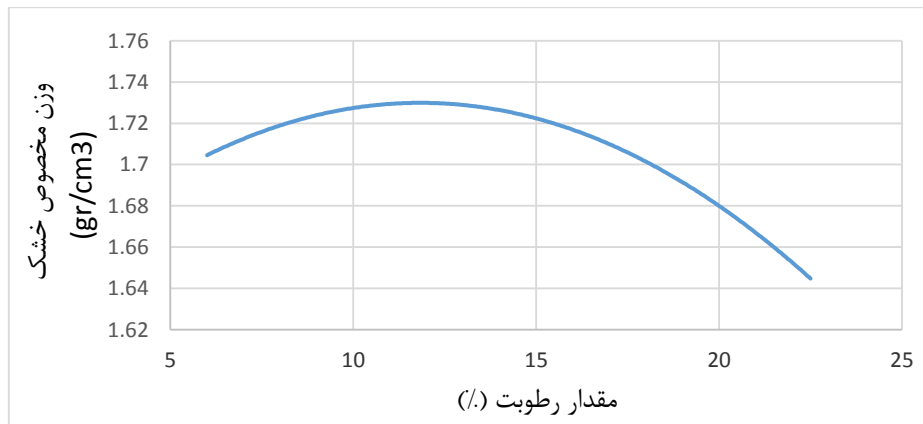
در این پژوهش به کمک نتایج آزمایش تراکم مقدار پلیمر بهینه در غلظت‌های مختلف را برای رسیدن به حداکثر وزن مخصوص خشک خاک تعیین گردید و در ادامه به منظور ساخت نمونه‌های مربوط به سایر آزمایش‌ها مقدار پلیمر امولسیون برای تثبیت مشخص شد. نتایج آزمایش تراکم در شکل ۹ ارائه شده است که مطابق آن با افزایش غلظت، مقدار پلیمر مورد نیاز برای رسیدن به حداکثر وزن مخصوص خاک افزایش می‌یابد؛ چراکه با افزایش غلظت و گرانی پلیمر و از طرفی کاهش میزان آب پلیمر امولسیون، مقدار بیشتری به امولسیون برای روانکاری ذرات خاک به منظور تراکم بهتر نیاز است. این در حالی است که این نتایج با نتایج تحقیقات پیشین همخوانی دارد؛ به طوری که پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد که با افزایش غلظت پلیمر، مقدار پلیمر بهینه افزایش و حداکثر وزن مخصوص خشک کاهش می‌یابد [۱۱]، [۲۰]. در جدول ۱ مقدار پلیمر بهینه برای غلظت‌های مختلف انواع پلیمرها حاصل از آزمایش تراکم ارائه شده است که در ادامه برای ساخت نمونه‌های مختلف برای انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوری، مقاومت برشی مستقیم، مقاومت کششی غیرمستقیم و دوام، از این مقادیر پلیمر استفاده شده است.

۳-۲- نتایج آزمایش مقاومت تک‌محوری

همان‌طور که اشاره شد آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری بر روی نمونه‌های خاک ماسه‌بادی تثبیت‌شده با مقادیر مختلف پلیمر انجام شد که نتایج آن در شکل ۱۰ ارائه شده است. مطابق شکل ۱۰ از بین نمونه‌های مورد بررسی نمونه B2 دارای بیشترین مقاومت فشاری و نمونه A3 دارای بیشترین شکل‌پذیری است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، پلیمرهای مورد نظر در یک مقدار بهینه به‌طور قابل‌توجهی سبب افزایش مقاومت و شکل‌پذیری خاک شدند؛ در یک پلیمر خاص، با افزایش مقدار پلیمر ابتدا مقاومت تک‌محوری افزایش و سپس کاهش می‌یابد؛ به طوری که در خاک تثبیت‌شده با پلیمر A70 مقاومت تک‌محوری نمونه‌ها با افزایش پلیمر از ۱/۵ تا ۶/۰۳٪، ۲۳٪ افزایش و از ۶/۰۳ تا ۱۲/۰۵۵٪، ۶۲٪ کاهش می‌یابد؛ همچنین در خاک تثبیت‌شده با پلیمر B70 مقاومت تک‌محوری نمونه‌ها با افزایش پلیمر از ۱/۲۶ تا ۴/۰۲٪، ۱۰٪ افزایش و از ۴/۰۲ تا ۶/۸٪، ۲۸٪ کاهش می‌یابد. می‌توان گفت مقدار بهینه پلیمر خالص A70 برابر با ۶/۰۳٪ و مقدار بهینه پلیمر خالص B70 برابر ۴/۰۲٪ است. دلیل این امر را این‌گونه می‌توان بیان کرد که با افزودن پلیمر تا یک حد مشخص، پلیمر

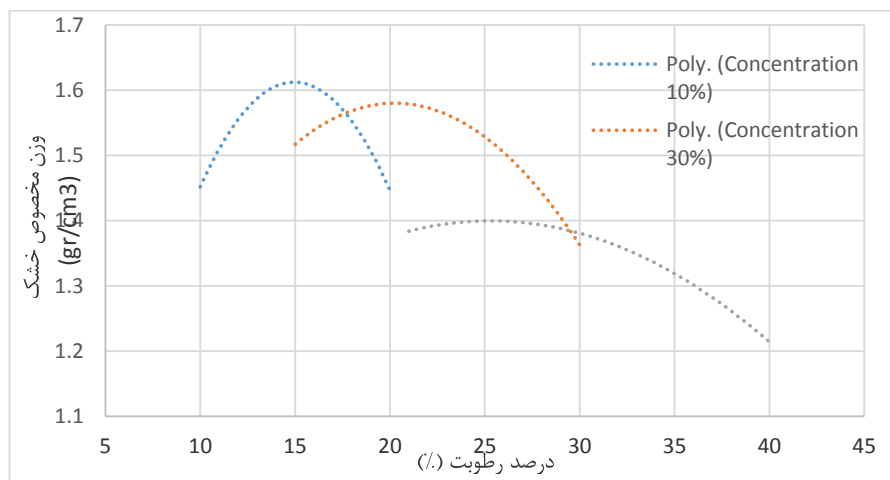
لازم به ذکر است که نتایج این پژوهش با نتایج پژوهش‌های پیشین نیز همخوانی دارد؛ به عنوان نمونه در پژوهشی که در سال ۲۰۲۲ توسط کومار و همکارانش به منظور بررسی خواص خاک ماسه‌ای تثبیت‌شده با پلیمر امولسیونی انجام شد، نشان داد که با تبخیر آب پلیمر امولسیونی در مخلوط خاک تثبیت‌شده، پیوند بین ذرات خاک ایجاد شده توسط امولسیون پلیمر به بهبود مقاومت فشاری خاک کمک می‌کند. همچنین نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که افزایش مقدار پلیمر امولسیونی، سبب افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری خاک می‌شود. همچنین مطابق نتایج این پژوهش نمونه‌های خاک تثبیت‌شده با پلیمر امولسیونی، رفتار انعطاف‌پذیرتری نسبت به خاک تثبیت نشده دارند که با افزایش مقدار پلیمر امولسیونی خاصیت انعطاف‌پذیری نیز افزایش می‌یابد [۱۶]. علاوه بر این نتایج تحقیقات شیا^۱ و همکارانش در سال ۲۰۲۴ نشان می‌دهد که با افزایش مقدار پلیمر امولسیونی به منظور تثبیت خاک، ابتدا مقاومت فشاری تک‌محوری افزایش و به دنبال آن کاهش جزئی مشاهده می‌شود که افزایش مقاومت خاک تثبیت‌شده با پلیمر امولسیونی را می‌توان اثر تشکیل فیلم امولسیونی، که یک لایه پیوسته و یکنواخت بر روی سطح ذرات خاک ایجاد می‌کند، نسبت داد. این لایه‌های پلیمری خواص پیوند خوبی دارند و پیوندهای شیمیایی و فیزیکی قوی بین ذرات خاک ایجاد می‌کنند و استحکام و پایداری کلی خاک را افزایش می‌دهند [۳۶].

از طرفی دیگر مطابق شکل ۱۰ با مقایسه نتایج مقاومت فشاری خاک



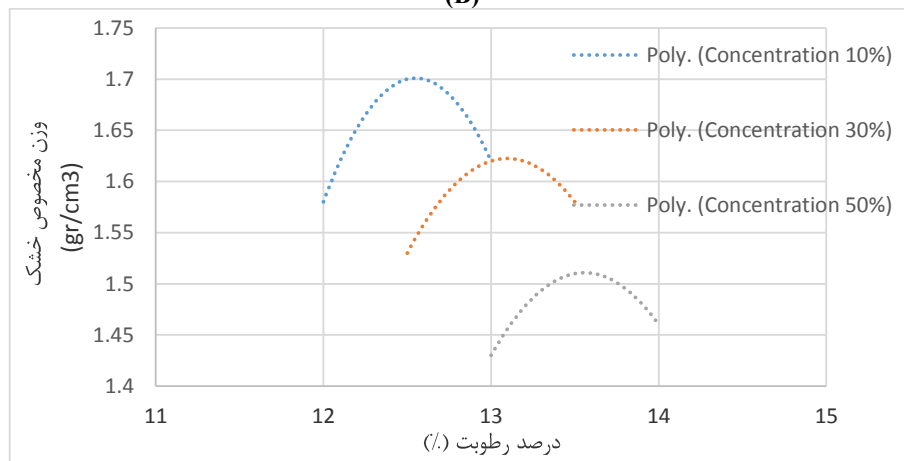
(الف)

(A)



(ب)

(B)



(ج)

(C)

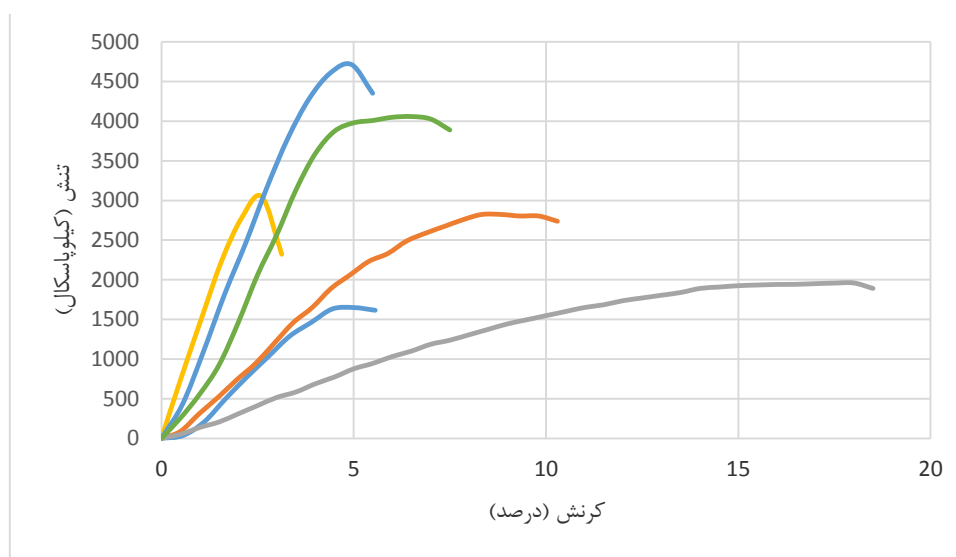
شکل ۹. نمودار وزن مخصوص خشک و درصد رطوبت بهینه الف-آب-ب-پلیمر A70 ج-پلیمر B70

Fig. 9. Dry unit weight and optimum moisture content curves for (A) water, (B) polymer A70, and (C) polymer B70.

جدول ۱. نام‌گذاری نمونه‌های خاک تثبیت‌شده.

Table 1. Naming of stabilized soil samples.

درصد پلیمر خالص	درصد پلیمر امولسیون‌ی حاصل از آزمایش تراکم (درصد وزن خشک خاک)	غلظت پلیمر (%)	نام نمونه	نام اختصاری پلیمر
۱/۵	۱۵	۱۰	A1	A70
۶/۰۳	۲۰/۱	۳۰	A2	
۱۲/۰۵۵	۲۴/۱۱	۵۰	A3	
۱/۲۶	۱۲/۶	۱۰	B1	B70
۴/۰۲	۱۳/۱	۳۰	B2	
۶/۸	۱۳/۶	۵۰	B3	



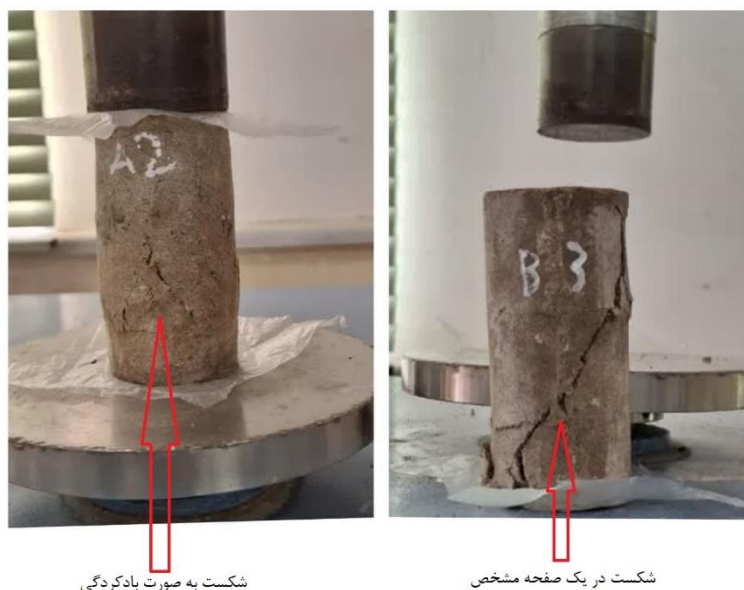
شکل ۱۰: نمودار تنش-کرنش حاصل از آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری

شکل ۱۰. نمودار تنش-کرنش حاصل از آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری.

Fig. 10. Stress-strain curve obtained from the unconfined compression strength test.

و نمونه‌های تثبیت‌شده با پلیمر B70 دارای شکستی ترد هستند. در شکل ۱۱ چگونگی گسیختگی نمونه‌های تثبیت‌شده با دو پلیمر A70 و B70 را ارائه می‌دهد که نشان‌دهنده آن است شکست نمونه‌های تثبیت‌شده با پلیمر A70 به‌صورت خم‌های شکل یا بادکردگی صورت می‌گیرد که بیانگر شکستی انعطاف‌پذیر است [۱۴] و شکست نمونه‌های تثبیت‌شده با

تثبیت‌شده با پلیمر A70 و B70 می‌توان دریافت که مقاومت نهایی نمونه‌های تثبیت‌شده با پلیمر B70 بیشتر از نمونه‌های تثبیت‌شده با پلیمر A70 است و این در حالی است که کرنش نهایی نمونه‌های تثبیت‌شده با پلیمر A70 بیشتر از نمونه‌های تثبیت‌شده با پلیمر B70 است که بیانگر آن است که نمونه‌های تثبیت‌شده با پلیمر A70 دارای شکست انعطاف‌پذیر



شکل ۱۱. نحوه شکست نمونه‌های تثبیت‌شده با پلیمر تحت آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری.

Fig. 11. Failure modes of polymer-stabilized specimens under unconfined compression tests.

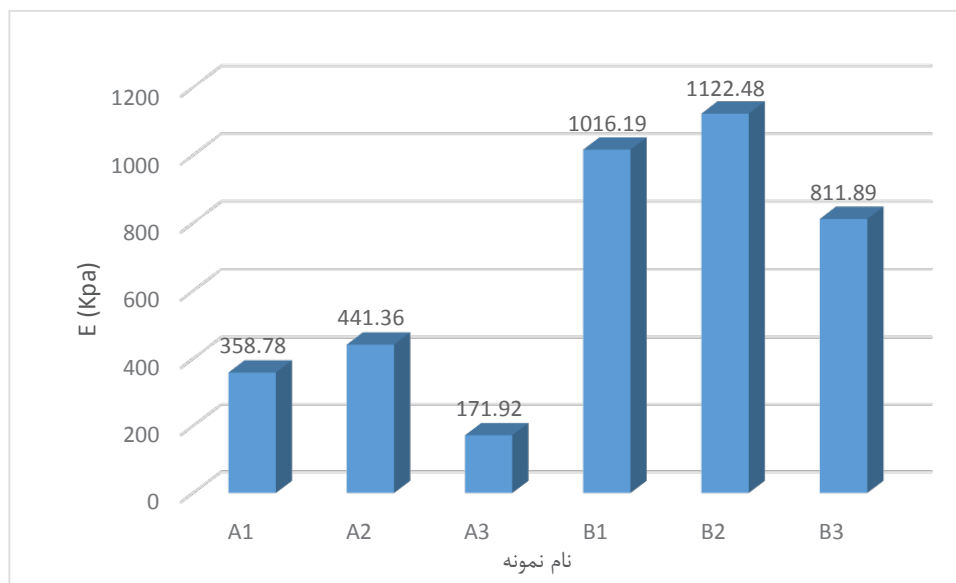
شکل ۱۲ ارائه شده است که بر اساس آن نمونه B2 بیشترین مدول الاستیسیته و در نتیجه کمترین تغییر شکل را در مقابل بار وارده دارد.

۳-۳- نتایج آزمایش مقاومت برش مستقیم

همان‌طور که اشاره شد هدف این آزمایش تعیین پارامترهای مقاومت برشی خاک تثبیت‌شده یعنی زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) و چسبندگی (C) است. شکل ۱۳ نمودار تنش افقی به تنش قائم حاصل از این آزمایش را نشان می‌دهد که مطابق معیار گسیختگی موهر-کولمب شیب نمودار بیانگر $\tan(\phi)$ و عرض از مبدأ نمودار بیانگر C است. همچنین در شکل ۱۴ جدول ۲ به ترتیب مقادیر چسبندگی و زاویه اصطکاک و مقاومت برشی خاک تثبیت نشده و تثبیت‌شده ارائه شده است. مطابق شکل ۱۴ با افزودن پلیمر در مقدار بهینه پارامترهای مقاومت برشی به‌طور قابل‌توجهی افزایش پیدا کرده است؛ به‌طوری‌که با افزودن پلیمر A70 به ترتیب زاویه اصطکاک و چسبندگی به ترتیب تا ۱/۳۵ و ۳/۸ برابر و با افزودن پلیمر B70 تا ۱/۴ و ۴/۶ برابر شده است؛ چراکه ژل‌های پلیمر در اطراف ذرات خاک منجر به تشکیل پل‌هایی بین ذرات می‌شود که در هم‌بستگی درون ماتریکس خاک را بهبود می‌بخشند و در نتیجه مقاومت برشی خاک بهبود می‌یابد. همچنین با توجه به نتایج نمونه‌های A2 و B2 از آن‌جهت که دارای پارامترهای

پلیمر B70 در صفحه‌ای با زاویه ۴۵ درجه صورت می‌گیرد که نشانگر یک شکست ترد است [۳۷]. از دیدگاه مهندسی، رفتار انعطاف‌پذیر در بسیاری از کاربردهای ژئوتکنیکی مطلوب‌تر است، زیرا امکان تغییر شکل تدریجی پیش از گسیختگی را فراهم می‌کند و در نتیجه احتمال شکست ناگهانی را کاهش می‌دهد. این ویژگی می‌تواند ایمنی سازه‌های خاکی نظیر بستر راه، خاکریزها و پی‌های سطحی را افزایش دهد. در مقابل، اگرچه رفتار ترد معمولاً با مقاومت فشاری بیشتر همراه است، اما به دلیل وقوع گسیختگی ناگهانی و تغییر شکل محدود پیش از شکست، ممکن است در برخی شرایط از نظر ایمنی نامطلوب باشد. بنابراین انتخاب نوع تثبیت‌کننده باید علاوه بر افزایش مقاومت، با توجه به رفتار تغییرشکلی مورد نیاز در کاربرد مهندسی مورد نظر انجام گیرد.

از دیگر نتایج قابل‌استخراج از آزمایش تک‌محوری محاسبه مدول الاستیسیته است که یکی از مسائل اصلی در مهندسی عمران به حساب می‌آید؛ چراکه هر چه مقدار این پارامتر بیشتر باشد، مصالح در برابر تنش‌های وارده تغییر شکل کمتری خواهد داشت [۳۸]. این پارامتر با ترسیم نمودار تنش و کرنش حاصل می‌شود؛ به‌طوری‌که مدول الاستیسیته شیب خطی است که از مبدأ به نقطه‌ای از منحنی که این نقطه نظیر ۵۰٪ تنش نهایی گسیختگی است، وصل می‌کند. مدول الاستیسیته خاک تثبیت‌شده با دو کوپلیمر آکریلاتی در



شکل ۱۲. مقادیر مدول الاستیسیته خاک تثبیت شده.

Fig. 12. Elastic modulus values of the stabilized soil.

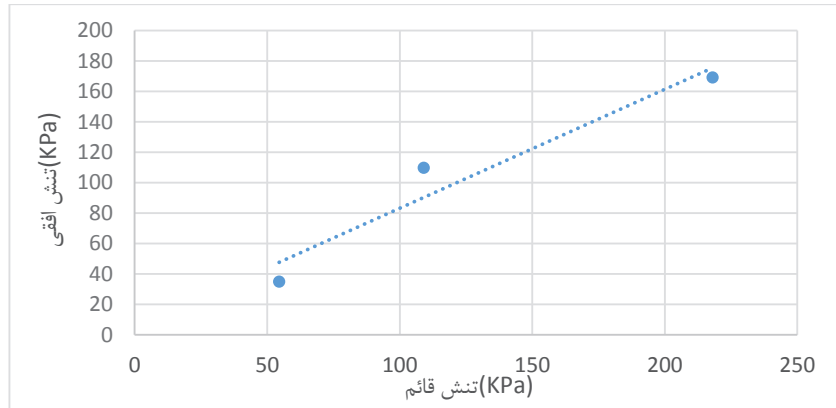
می‌دهد؛ از این رو خاک تثبیت شده با پلیمر تحت تنش برشی به دلیل افزایش پیوند بین ذره‌ای و اصطکاک داخلی، مقاومت بیشتری نسبت به خاک تثبیت نشده دارند [۳۹] که با نتایج تحقیق پیشرو همخوانی دارد.

۳-۴- نتایج آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم

در این بخش اثر پلیمرهای امولسیون دوستدار محیط زیست A70 و B70 بر مقاومت کششی غیرمستقیم خاک ماسه‌بادی مورد بررسی قرار می‌گیرد. شکل ۱۵ نتایج حاصل از آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های خاک ماسه‌بادی تثبیت شده را نمایش می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش مقدار پلیمر، چسبندگی بیشتری میان ذرات خاک ایجاد شده و در نتیجه مقاومت کششی نمونه‌ها افزایش می‌یابد؛ اما این در حالی است که افزودن بیش از یک حدی از پلیمرها سبب افت مقاومت کششی نمونه‌ها شده که همان‌طور که در قسمت قبل اشاره شد، افزایش بیش حد پلیمر سبب عدم توزیع یکنواخت ذرات پلیمر در میان ذرات خاک شده و از طرفی استفاده از غلظت بالا (۵۰٪) مانع ارتباط مؤثر ذرات خاک با یکدیگر شده و در نتیجه مقاومت کششی خاک کاهش می‌یابد. باتوجه به نتایج در خاک تثبیت شده با پلیمر A70 مقاومت کششی نمونه‌ها با افزایش پلیمر از ۱/۵ تا ۶/۰۳٪، ۳ برابر و از ۶/۰۳ تا ۱۲/۰۵۵٪، ۰/۷ برابر می‌شود؛ همچنین در

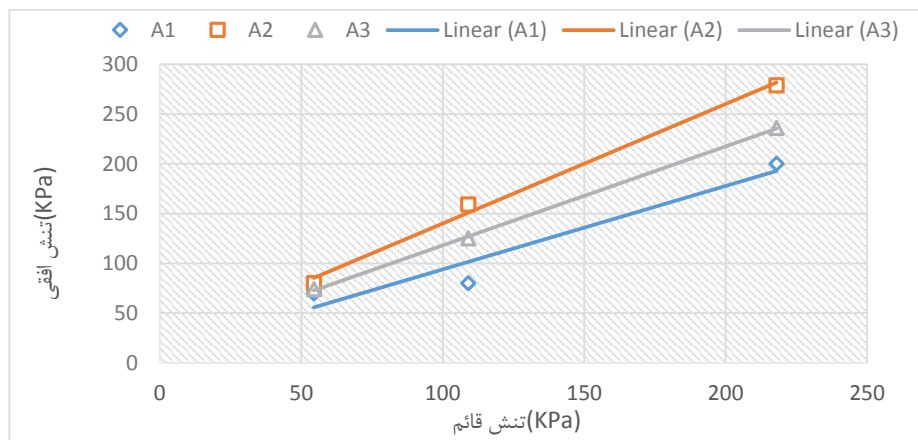
مقاومتی برشی حداکثر هستند، نمونه‌های بهینه به حساب می‌آیند. لازم به ذکر است که به کارگیری پلیمر با غلظت ۵۰٪ سبب افت پارامترهای مقاومت برشی شده و دلیل آن را می‌توان عدم توزیع یکنواخت پلیمر در مخلوط خاک تثبیت شده دانست. علاوه بر این نتایج نشان می‌دهد که خاک تثبیت شده با پلیمر B70 نسبت به خاک تثبیت شده با پلیمر A70 مقاومت برشی بیشتری داراست که علاوه بر خواص مکانیکی این پلیمر، گرانیروی کمتر آن و اختلاط بهتر و یکنواخت‌تر آن با خاک را می‌توان دلیل این موضوع دانست. این در حالی است که نتایج پژوهش بوآونتورا^۱ و همکارانش در سال ۲۰۲۳ در خصوص بررسی مقاومت برشی خاک ماسه‌ای تثبیت شده با محلول پلیمر نشان می‌دهد که پس از گذشت ۲ روز از ساخت نمونه‌ها و خشک شدن کامل آن‌ها، افزایش قابل توجهی در مقاومت برشی خاک تثبیت شده مشاهده می‌شود که دلیل آن را می‌توان افزایش چسبندگی بین ذرات خاک و افزایش پیوستگی ذرات خاک دانست [۲۰]. علاوه بر این نتایج این پژوهش با پژوهش باباتونده^۲ و همکارانش نیز مطابقت دارد. مطابق نتایج پژوهش ایشان در سال ۲۰۲۴، به کارگیری پلیمر برای تثبیت خاک سبب کاهش فضاهای خالی شده و یک نمونه فشرده‌تری را ایجاد می‌کند و به هم پیوستگی ذرات را افزایش

1. Boaventura
2. Babatunde



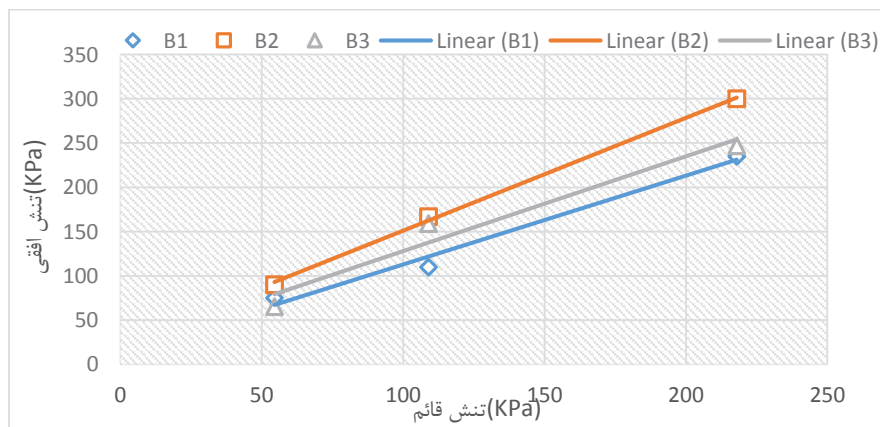
(الف)

(A)



(ب)

(B)

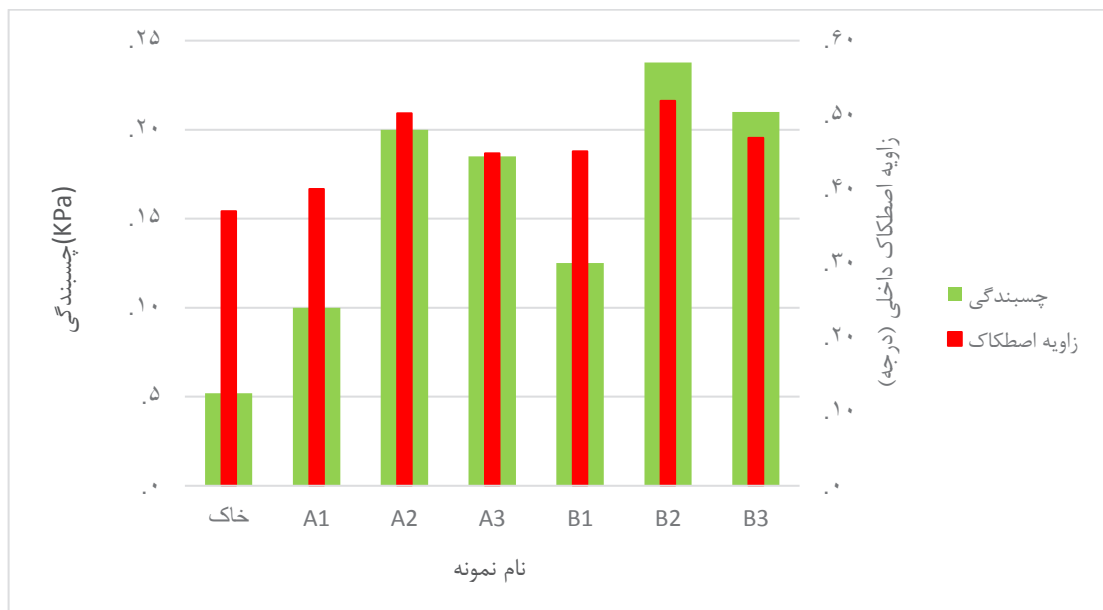


(ج)

(C)

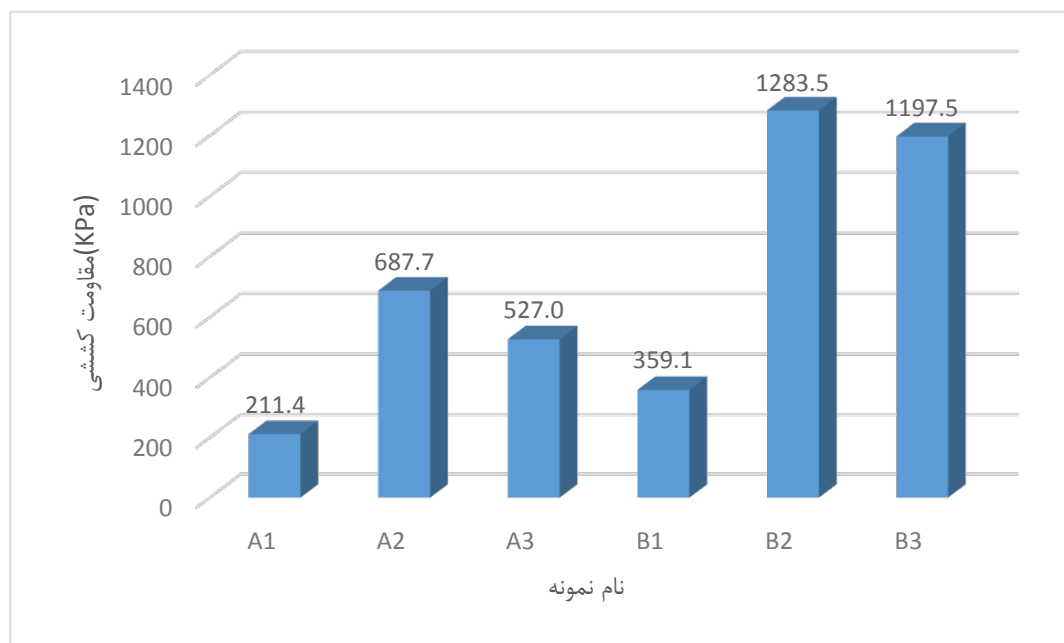
شکل ۱۳. نمودار تنش افقی-تنش قائم الف- خاک تثبیت نشده ب- خاک تثبیت شده با A70 ب- خاک تثبیت شده با B70.

Fig. 13. Horizontal stress-verticle stress plot for (A) unstabilized soil, (B) soil stabilized with A70, and (C) soil stabilized with B70.



شکل ۱۴. چسبندگی و زاویه اصطکاک خاک تثبیت نشده و تثبیت شده با پلیمر.

Fig. 14. Cohesion and friction angle of unstabilized and polymer-stabilized soil.



شکل ۱۵. نتایج آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم.

Fig. 15. Results of the indirect tensile strength test.

۳-۵- نتایج آزمایش دوام

در شکل ۱۶ نتایج آزمایش دوام شامل چرخه ذوب و یخ و چرخه تر و خشک ارائه شده است که مطابق با آن درصد افت تمامی نمونه‌ها از حداکثر افت وزنی آیین‌نامه (۱۴٪) کمتر است. با توجه به شکل ۱۶ با افزایش مقدار پلیمر میزان افت وزنی ناشی از چرخه ذوب و یخ و چرخه تر و خشک کاهش می‌یابد؛ به‌طوری‌که با افزایش مقدار پلیمر A70 از ۱۵ تا ۲۵٪ (وزن خشک خاک) میزان درصد افت وزنی ناشی از چرخه ذوب و یخ و چرخه خشک و تر به ترتیب حدود ۵۲ و ۶۶٪ کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش مقدار پلیمر B70 از ۱۲/۶ تا ۱۳/۶٪ افت وزنی ناشی از چرخه ذوب و یخ و چرخه خشک و تر به ترتیب حدود ۴۲ و ۵۳٪ کاهش می‌یابد. دلیل این امر را می‌توان چسبندگی بهتر ذرات خاک به یکدیگر و در نتیجه کاهش فضای خالی بین آن‌ها در اثر افزایش میزان پلیمر در مخلوط خاک دانست [۴۱] که با نتایج تحقیقات پیشین نیز همخوانی دارد؛ به‌طوری‌که بوزیگیت^۱ و همکارانش در سال ۲۰۲۳ در پژوهشی تحت عنوان بررسی عملکرد پلیمرهای سازگار با محیط‌زیست برای تثبیت خاک و مقاومت آن‌ها در برابر چرخه یخ-ذوب، یافتند که از بین پلیمرهای صمغ زانتان، صمغ گوار و پلی‌آکریل‌آمید آنیونی، پلیمر پلی‌آکریل‌آمید آنیونی مقاوم‌ترین پلیمر در برابر انجماد-ذوب است؛ به‌طوری‌که با افزایش مقدار آن در خاک نیز مقاومت در برابر چرخه ذوب و یخ افزایش می‌یابد [۱۹]. همچنین نائینی و همکارانش در مطالعه‌ای به بررسی خاک تثبیت‌شده با انواع پلیمر از جمله استایرن-اکریلیک-کوپلیمر، پلی‌وینیل استات و صمغ زانتان پرداختند و یافتند که افزودن پلیمر به سبب افزایش چسبندگی بین ذرات خاک، مقاومت خاک را در برابر چرخه ذوب و یخ افزایش می‌دهد [۴۱]. همچنین نتایج پژوهش بای^۲ و همکارانش نشان می‌دهد که تثبیت خاک با پلیمر سبب کاهش خلل و فرج خاک و همچنین کاهش نفوذپذیری و ظرفیت نگهداشت آب می‌شود که به دوام بیشتر آن در برابر تغییرات رطوبت و دما منجر می‌شود [۴۲].

از طرفی دیگر مطابق شکل ۱۶ می‌توان گفت که خاک تثبیت‌شده با پلیمر A70 مقاومت بیشتری در برابر چرخه ذوب و یخ و چرخه تر و خشک دارد که دلیل آن را می‌توان به خواص ذاتی این پلیمر از جمله مقاومت مناسب در برابر چرخه‌های انجماد و همچنین کاهش منافذ خاک به دلیل شکل ساختاری آن نسبت داد [۴۳].

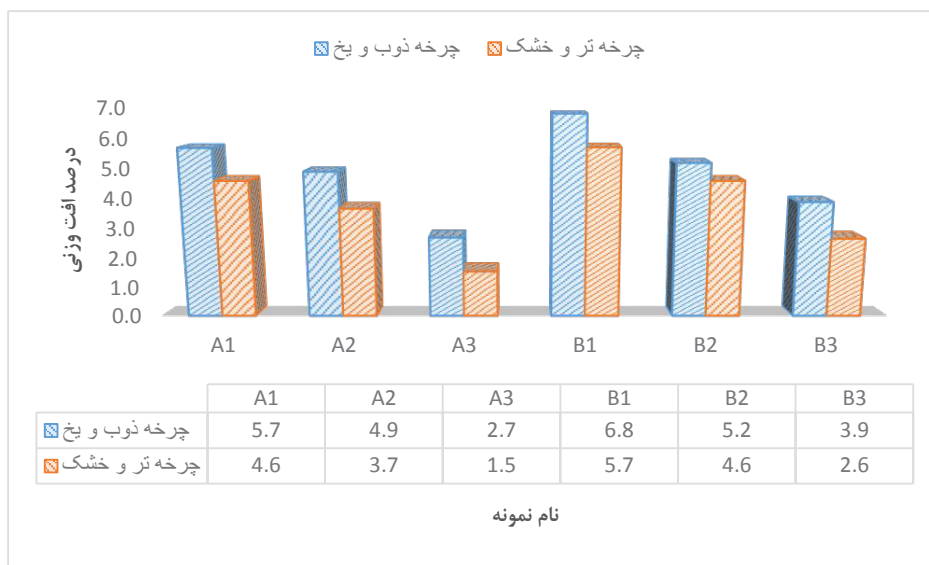
جدول ۲. مقاومت برشی خاک تثبیت نشده و تثبیت‌شده با پلیمر.

Table 2. Shear strength of unstabilized and polymer-stabilized soil.

نام نمونه	مقاومت برشی (KPa)	تنش قائم (KPa)
خاک	۵۴/۵	۴۷/۷۸
	۱۰۹	۹۰/۳۵
	۲۱۸	۱۷۵/۵
A1	۵۴/۵	۵۴/۸۵
	۱۰۹	۹۹/۷
	۲۱۸	۱۸۹/۳۹
A2	۵۴/۵	۸۳/۷۷
	۱۰۹	۱۴۷/۵۳
	۲۱۸	۲۷۵/۰۶
A3	۵۴/۵	۷۱/۶۹
	۱۰۹	۱۲۴/۸۷
	۲۱۸	۲۳۱/۲۵
B1	۵۴/۵	۶۵/۶۹
	۱۰۹	۱۱۸/۸۸
	۲۱۸	۲۲۵/۲۷
B2	۵۴/۵	۹۳
	۱۰۹	۱۶۲/۲۱
	۲۱۸	۳۰۰/۶۴
B3	۵۴/۵	۷۸/۷۷
	۱۰۹	۱۳۶/۵۴
	۲۱۸	۲۵۲/۰۸

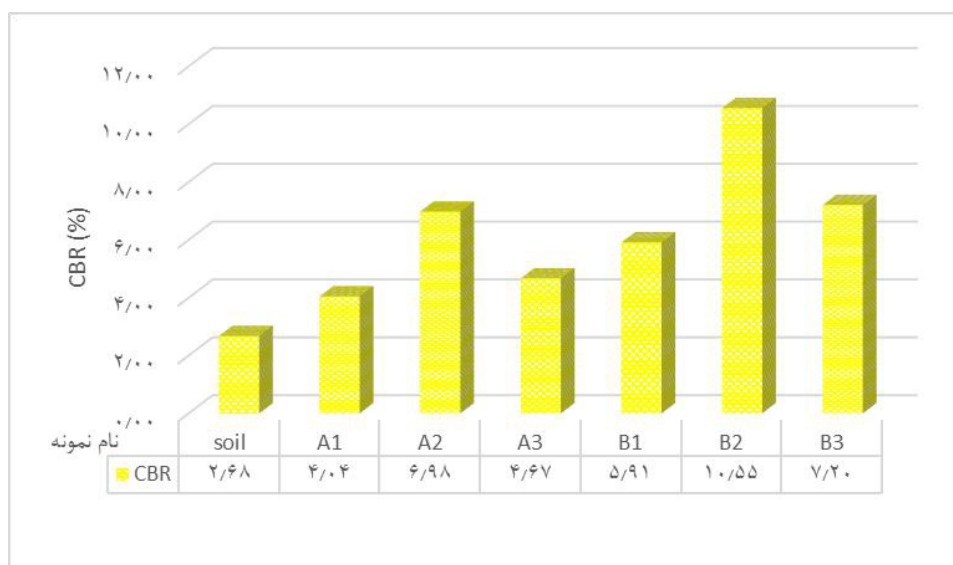
خاک تثبیت‌شده با پلیمر B70 مقاومت تک محوری نمونه‌ها با افزایش پلیمر از ۱/۲۶ تا ۴/۰۲٪، ۳/۵ برابر و از ۴/۰۲ تا ۶/۸٪، ۲۸٪ و ۰/۹ برابر می‌شود. از این رو می‌توان گفت با توجه به نتایج آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم مقدار بهینه پلیمر خالص A70 برابر با ۶/۰۳٪ و مقدار بهینه پلیمر خالص B70 برابر ۴/۰۲٪ است. لازم به ذکر است که نتایج این پژوهش با مطالعات پیشین همخوانی دارد؛ به‌طوری‌که مطالعه محسنی‌نیا و صالح زاده نشان می‌دهد که استفاده بهینه از پلیمر سبب ایجاد پیوندی مستحکم میان ذرات خاک شده و در نتیجه افزایش مقاومت کششی خاک می‌شود [۴۰].

1. Bozyigit
2. Bai



شکل ۱۶. نتایج آزمایش دوام.

Fig. 16. Durability test results.



شکل ۱۷. نتایج آزمایش دوام

Fig. 17. Durability test results.

۳-۶- نتایج آزمایش CBR

شکسته شده و ذرات پلیمر یک لایه نازک و چسبنده روی سطح ذرات خاک تشکیل می‌دهند و این پوشش‌های پلیمری بین ذرات مجاور پل می‌زنند و با خشک شدن، پیوندهای قوی ایجاد می‌کنند و سبب کاهش تخلخل خاک می‌گردد. این فرایندها منجر به افزایش چسبندگی بین ذرات و افزایش مقاومت CBR می‌گردد. حال آنکه با افزایش مقدار پلیمر تا حد بهینه، پلیمر

در شکل ۱۷ نتایج آزمایش CBR نمایش داده شده است که مطابق آن افزودن پلیمر به خاک تا یک حد مشخص سبب بهبود CBR خاک می‌شود و از یکجایی به بعد مقدار آن کاهش می‌یابد. در مکانیزم تثبیت خاک با پلیمرهای امولسیون، هنگام مخلوط شدن آن‌ها با خاک، این امولسیون

از این حد بهینه، نه تنها تمامی ذرات پوشش داده شده و فضای بیشتری برای ایجاد پیوندهای قوی تر وجود ندارد، بلکه مقدار اضافی پلیمر به عنوان یک لایه نرم و روان کار بین ذرات عمل می کند. این امر باعث کاهش اصطکاک داخلی و جدایش نسبی ذرات خاک از یکدیگر شده و در نهایت منجر به کاهش چسبندگی و مقاومت کلی خاک می شود [۴۵] که با نتایج این پژوهش همخوانی دارد.

۳-۷- نتایج تحلیل آماری

همان طور که اشاره شد به منظور بررسی هرچه دقیق تر عملکرد خاک تثبیت شده از تحلیل آماری استفاده شد. به منظور بررسی خواص خاک تثبیت شده با مقادیر و غلظت های مختلف دو کوپلیمر امولسیون دوستدار محیط زیست، از روش سطح پاسخ RSM^1 که در سال ۱۹۵۱ توسط باکس و ویلسون معرفی شد که شامل یک مجموعه از روش های آماری و ریاضیات کاربردی برای ساخت مدل های تجربی است و نرم افزار Design-Expert استفاده شد. نرم افزار Design-Expert نیز یک بسته نرم افزاری آماری از Stat-Ease Inc است که نه تنها برای طراحی آزمایش بهینه کاربرد دارد؛ بلکه به کمک آن می توان رابطه بین پارامترهای وابسته و مستقل را تعیین کرد [۴۶]، [۴۷]. در این پژوهش درصد پلیمر امولسیون (درصد جرمی خاک خشک) و غلظت پلیمر امولسیون را به عنوان پارامترهای مستقل و نتایج آزمایش های انجام شده را به عنوان متغیر وابسته در نظر گرفت و تحلیل آماری انجام داد. در جدول ۴ روابط ارائه شده توسط نرم افزار Design-Expert و شکل ۱۸ و ۱۹ نمودارهای دوبعدی مربوط به این روابط را نشان می دهد. لازم به ذکر است که روابط جدول ۳، پارامتر X درصد پلیمر امولسیون (درصد جرمی خاک خشک) و Y غلظت پلیمر امولسیون بر حسب درصد است. مطابق نمودارهای دوبعدی ارائه شده اشکال ۱۸-الف، ۱۸-ج، ۱۸-د، ۱۸-ه، ۱۸-ح، ۱۹-الف، ۱۹-ج، ۱۹-د، ۱۹-ه و ۱۹-ح بر اساس روابط برازش شده (جدول ۳)، برای هر دو پلیمر مورد بررسی، با افزایش مقدار پلیمر امولسیونی و غلظت آن مقادیر مقاومت تک محوری، مقاومت کششی، پارامترهای مقاومت برشی و مقاومت کالیفرنیا خاک افزایش و سپس کاهش می یابد. مقدار پلیمر امولسیونی و غلظت آن که سبب دستیابی به مقاومت های حداکثری می شود، مربوط به پلیمرها با غلظت ۳۰٪ و درصد پلیمر امولسیونی متناسب با آن حاصل شده از آزمایش تراکم است؛ از این رو می توان گفت دو نمونه A2 و B2 نمونه های بهینه هستند. همچنین با

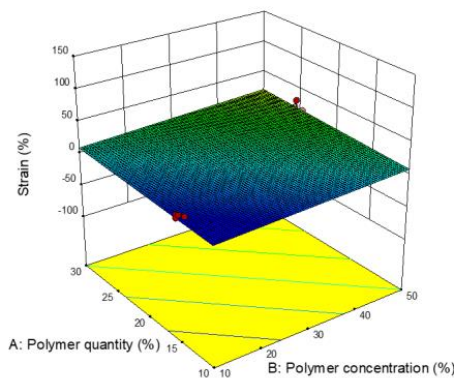
سطح تمام ذرات خاک را به طور یکنواخت و کامل بپوشاند و این امر حداکثر پیوند بین ذرات را ایجاد می کند و ساختار خاک را به یک توده منسجم و مقاوم تبدیل می نماید. همچنین پلیمر با پر کردن بخشی از فضای خالی، بدون آنکه ذرات را به طور کامل از هم جدا کند، به تراکم بهتر خاک کمک می کند و ذرات خاک در تماس نزدیک با یکدیگر باقی می ماند؛ در واقع به عنوان یک چسب قوی ایفای نقش می کند. این در حالی است که افزایش پلیمر بیش از حد بهینه، اثرات معکوس دارد و باعث کاهش مقاومت می گردد؛ چراکه در مقادیر بسیار بالا، پلیمر دیگر فقط یک چسب نیست، بلکه به عنوان یک فاز نرم و انعطاف پذیر، جایگزین بخشی از ذرات خاک می شود. از آنجایی که مقاومت ذاتی پلیمر از مقاومت ذرات شن و ماسه کمتر است، وجود بیش از حد آن در مخلوط، به طور کلی مقاومت کل کامپوزیت را کاهش می دهد. در نقطه بهینه، پلیمر ذرات را به هم می چسباند، اما در مقادیر بیش از حد، لایه های ضخیم پلیمر بین ذرات خاک، آن ها را از یکدیگر جدا می کند؛ در واقع در این حالت پلیمر مانند یک لایه روانکار عمل کرده و تماس مستقیم ذرات سخت و مقاوم خاک (که عامل اصلی مقاومت هستند) را از بین می برد و این کاهش درگیری ذرات، مستقیماً به کاهش CBR منجر می شود. علاوه بر این مقادیر زیاد پلیمر می تواند ساختار خاک را تغییر دهد و باعث ایجاد کلوخه های نرم شود و این امر دستیابی به تراکم مطلوب را با مشکل مواجه کند که تأثیر مستقیمی بر مقاومت خاک دارد.

در این خصوص موسوی و همکارانش با بررسی تأثیر تثبیت کننده امولسیون پلیمری وینیل اکریلیک بر پتانسیل تورم و CBR ماسه جنگلی اظهار داشتند که تثبیت خاک با پلیمر امولسیونی منجر به افزایش چشمگیر مقاومت کالیفرنیا می شود؛ زیرا پلیمر پس از اختلاط با خاک و از دست دادن آب، یک شبکه سه بعدی از پیوندهای پلیمری در میان ذرات خاک تشکیل می دهند. این شبکه، ذرات خاک را به طور محکم به یکدیگر متصل کرده و پیوندهای سیمانی شدیدی ایجاد می کند که هم چسبندگی بین ذرات را افزایش می دهد و هم اصطکاک داخلی آن ها را بهبود می بخشد. در نتیجه، خاک تثبیت شده در برابر تغییر شکل و نفوذ که اساس آزمایش CBR است مقاومت بسیار بالاتری از خود نشان می دهد [۴۴]. همچنین موسوی و کرموند با بررسی تأثیر پلیمر امولسیونی CBR PLUS بر ماسه رس دار یافتند که افزایش مقاومت کالیفرنیا در تثبیت خاک با پلیمر امولسیونی تنها تا یک مقدار بهینه اتفاق می افتد؛ زیرا در این نقطه، پلیمر به طور کامل و با حداکثر کارایی، فضای خالی بین ذرات خاک را پر کرده و یک شبکه یکپارچه و مستحکم از پیوندهای پلیمری ایجاد می کند. در صورت افزودن پلیمر بیش

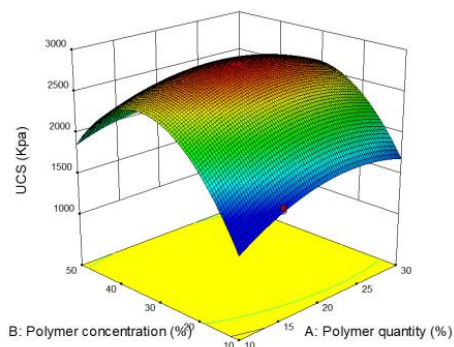
جدول ۳. روابط بین پارامترهای مستقل و وابسته.

Table 3. Relationships between independent and dependent parameters.

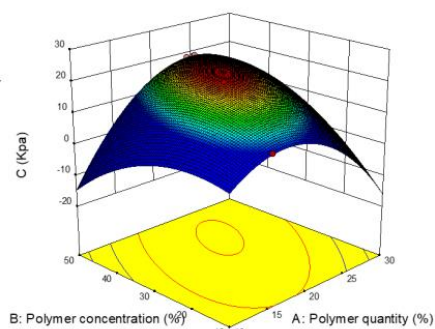
نوع پلیمر	پارامتر وابسته	رابطه	R ²
A70	مقاومت تک‌محوری	$UCS = -1009.997 + 130.1496x + 157.215y - 0.64753xy - 2.61044x^2 - 2.28153y^2$	0.996
	کرنش نهایی	$Strain = +3.62577 - 0.25156x + 0.39140y$	0.929
	مقاومت کششی	$ITS = -1484.64289 + 153.64010x + 27.89808y + 1.53898xy - 4.62116x^2 - 0.90222y^2$	0.999
	چسبندگی	$C = -32.74531 + 4.54934x + 0.15798y + 0.060163xy - 0.15252x^2 - 0.020075y^2$	0.999
	زاویه اصطکاک	$Friction = +11.02609 + 1.91739x + 1.04421y + 4.00220E - 003xy - 0.041325x^2 - 0.018177y^2$	0.998
	افت وزنی در اثر چرخه ذوب و یخ	$F - T = +6.50001 + 0.014025x - 0.086142y$	0.885
	افت وزنی در اثر چرخه تر و خشک	$W - D = +6.38391 - 0.063558x - 0.062440y$	0.954
	مقاومت کالیفرنیا	$CBR = +2.6638 + 1.8022x - 0.83569y + 0.1308xy - 0.1496x^2 - 0.0285y^2$	0.954
	مقاومت تک محوری	$UCS = -3.58942E + 005 + 59498.94514x - 1665.49701y + 154.45507xy - 2457.17676x^2 - 5.36958y^2$	0.998
	کرنش نهایی	$Strain = -2.53570 + 0.34878x + 0.088220y$	0.925
B70	مقاومت کششی	$ITS = -1.35017E + 005 + 22209.08186x - 589.54026y + 56.82505xy - 916.86536x^2 - 2.15661y^2$	0.998
	چسبندگی	$C = -1995.19700 + 329.32292x - 8.83040y + 0.83493xy - 13.58225x^2 - 0.030551y^2$	0.998
	زاویه اصطکاک	$Friction = -1849.10514 + 310.62438x - 8.46827y + 0.77542xy - 12.79013x^2 - 0.026571y^2$	0.998
	افت وزنی در اثر چرخه ذوب و یخ	$F - T = +9.20642 - 0.14220x - 0.070891y$	0.977
	افت وزنی در اثر چرخه تر و خشک	$W - D = -9.042 + 1.284x - 0.117y$	0.968
	مقاومت کالیفرنیا	$CBR = 2.48812 + 1.5526x - 0.2949y + 0.11542xy - 0.16254x^2 - 0.0199y^2$	0.967



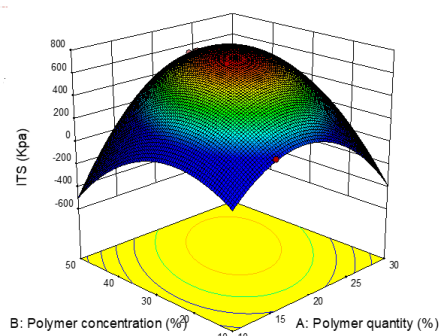
(ب)
(B)



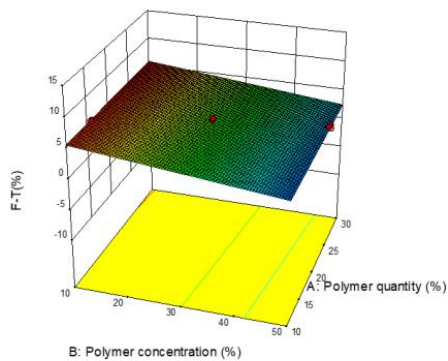
(الف)
(A)



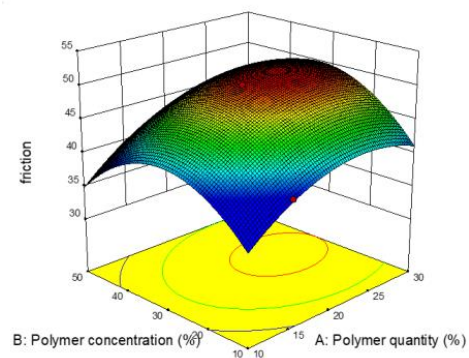
(د)
(D)



(ج)
(C)



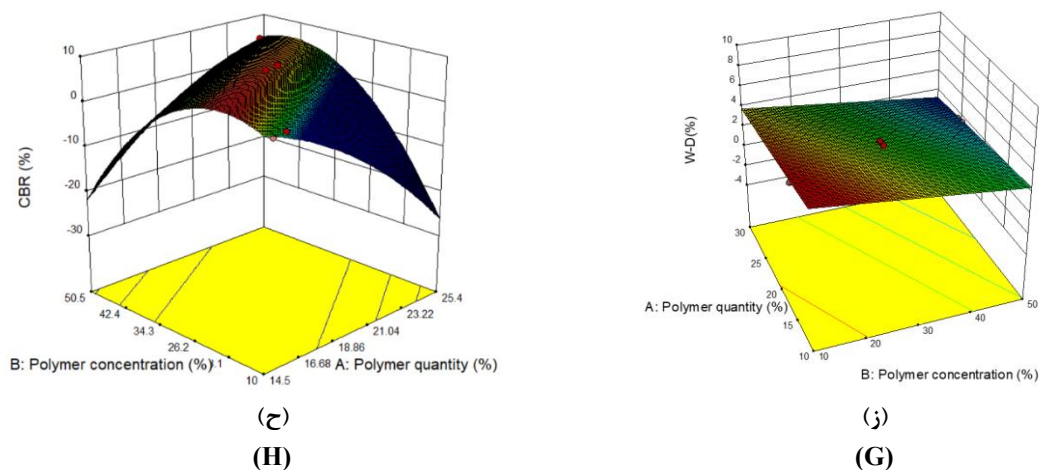
(و)
(F)



(ه)
(E)

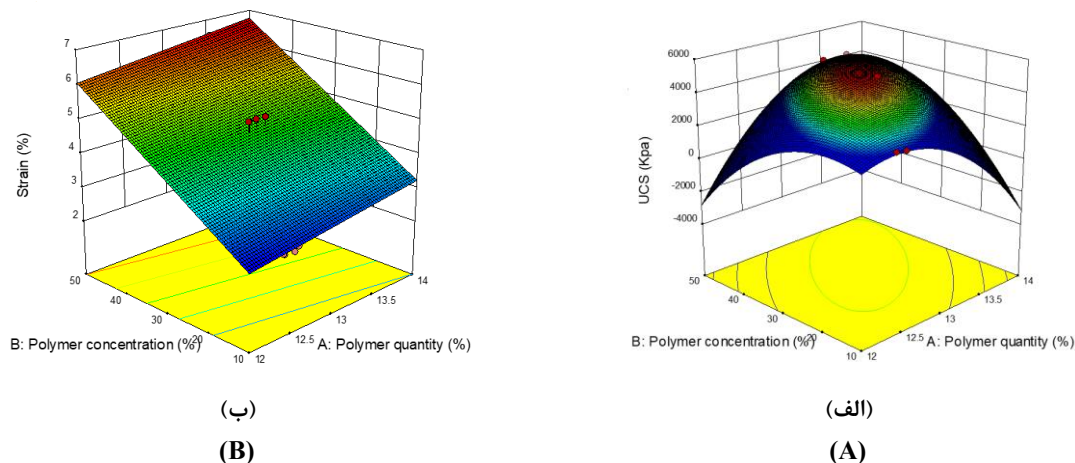
شکل ۱۸. نمودار دویعدی روابط پارامترهای مستقل و وابسته خاک تثبیت شده با پلیمر A70: الف-مقاومت تک محوری ب-کرنش نهایی ج-مقاومت کششی غیر مستقیم د-چسبندگی خاک ه-زاویه اصطکاک ذرات خاک و-درصد افت وزنی ناشی از چرخه ذوب و یخ ز-درصد افت وزنی ناشی از چرخه تر و خشک ح-مقاومت کالیفرنیا. (ادامه دارد)

Fig. 18. Two-dimensional plots illustrating the relationships between independent and dependent parameters for soil stabilized with polymer A70: (A) unconfined compressive strength, (B) ultimate strain, (C) indirect tensile strength, (D) soil cohesion, (E) soil friction angle, (F) weight loss percentage due to freeze-thaw cycles, (G) weight loss percentage due to wet-dry cycles, and (H) California Bearing Ratio (CBR). (Continued)



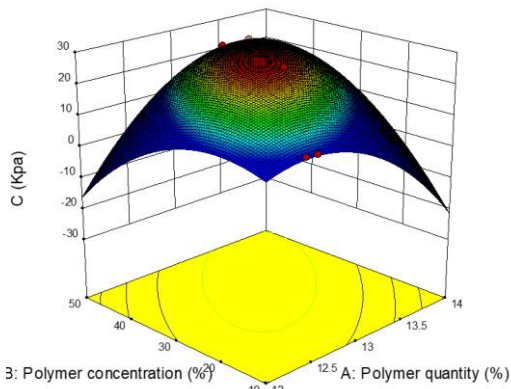
شکل ۱۸. نمودار دوبعدی روابط پارامترهای مستقل و وابسته خاک تثبیت‌شده با پلیمر A70: الف-مقاومت تک محوری ب-کرنش نهایی ج-مقاومت کششی غیر مستقیم د-چسبندگی خاک ه-زاویه اصطکاک ذرات خاک و-درصد افت وزنی ناشی از چرخه ذوب و یخ ز-درصد افت وزنی ناشی از چرخه تر و خشک ح-مقاومت کالیفرنیا

Fig. 18. Two-dimensional plots illustrating the relationships between independent and dependent parameters for soil stabilized with polymer A70: (A) unconfined compressive strength, (B) ultimate strain, (C) indirect tensile strength, (D) soil cohesion, (E) soil friction angle, (F) weight loss percentage due to freeze-thaw cycles, (G) weight loss percentage due to wet-dry cycles, and (H) California Bearing Ratio (CBR).

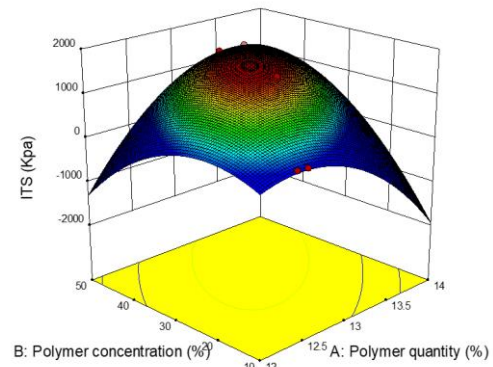


شکل ۱۹. نمودار دوبعدی روابط پارامترهای مستقل و وابسته خاک تثبیت‌شده با پلیمر B70: الف-مقاومت تک محوری ب-کرنش نهایی ج-مقاومت کششی غیر مستقیم د-چسبندگی خاک ه-زاویه اصطکاک ذرات خاک و-درصد افت وزنی ناشی از چرخه ذوب و یخ ز-درصد افت وزنی ناشی از چرخه تر و خشک ح-مقاومت کالیفرنیا. (ادامه دارد)

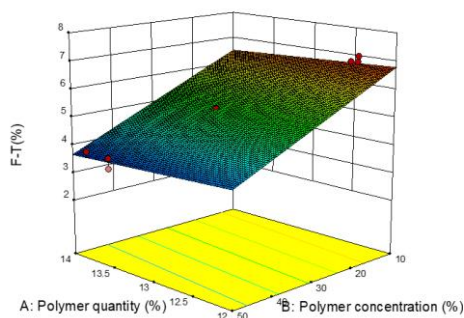
Fig. 19. Bivariate correlation plots showing the relationships between independent and dependent variables for soil stabilized with polymer B70: (A) Unconfined Compressive Strength (UCS), (B) ultimate strain, (C) indirect tensile strength, (D) soil cohesion, (E) soil internal friction angle, (F) weight loss due to freeze-thaw cycles, (G) weight loss due to wet-dry cycles, and (H) California Bearing Ratio (CBR). (Continued)



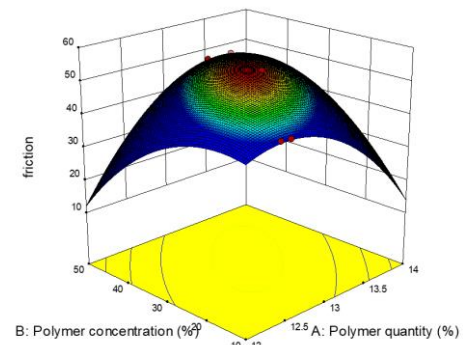
(د)
(D)



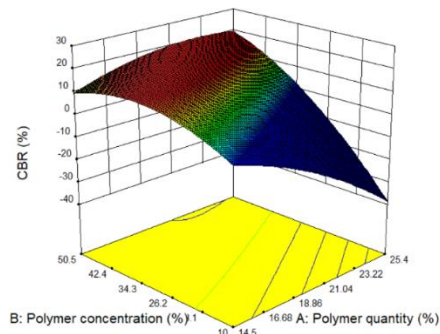
(ج)
(C)



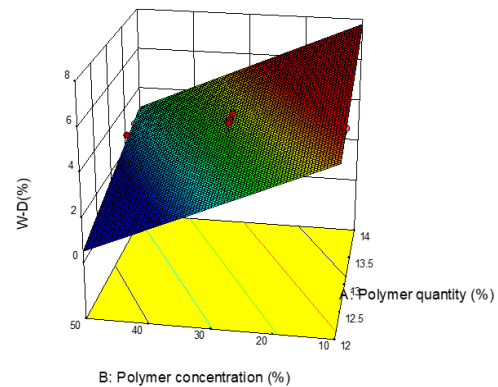
(و)
(F)



(ه)
(E)



(ح)
(H)



(ز)
(G)

شکل ۱۹. نمودار دوی بعدی روابط پارامترهای مستقل و وابسته خاک تثبیت شده با پلیمر B70: الف-مقاومت تک محوری ب-کرنش نهایی ج-مقاومت کششی غیر مستقیم د-چسبندگی خاک ه-زاویه اصطکاک ذرات خاک و-درصد افت وزنی ناشی از چرخه ذوب و یخ ز-درصد افت وزنی ناشی از چرخه تر و خشک ح-مقاومت کالیفرنیا.

Fig. 19. Bivariate correlation plots showing the relationships between independent and dependent variables for soil stabilized with polymer B70: (A) Unconfined Compressive Strength (UCS), (B) ultimate strain, (C) indirect tensile strength, (D) soil cohesion, (E) soil internal friction angle, (F) weight loss due to freeze-thaw cycles, (G) weight loss due to wet-dry cycles, and (H) California Bearing Ratio (CBR).

جدول ۴. نتایج آزمون کولموگوروف-اسمیرنوف.

Table 4. Kolmogorov-Smirnov test results.

نام پارامتر	Sig.	نام پارامتر	Sig.
UCS	۰/۰۵۸	C	۰/۱۳۳
ITS	۰/۰۷۲	friction	۰/۰۹۶
T-F	۰/۲	W-D	۰/۲

توجه اشکال ۱۸-ب و ۱۹-ب با افزایش مقدار پلیمر امولسیون و غلظت آن، مقدار کرنش نهایی افزایش می‌یابد که به منزله انعطاف‌پذیری بیشتر نمونه‌ها در برابر بار وارده است. همچنین اشکال ۱۸-و، ۱۸-ز، ۱۹-و و ۱۹-ز بیانگر آن است که با افزایش مقدار پلیمر درصد افت وزنی در اثر چرخه‌های ذوب و یخ و تر و خشک کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است که با روابط ارائه‌شده در جداول ۳ می‌توان عملکرد خاک تثبیت‌شده با این دو پلیمر را با دقت خوبی تخمین زد و این تحلیل، مبنای تعیین شرایط بهینه تثبیت و پشتیبان اصلی نتیجه‌گیری نهایی پژوهش است.

همان‌طور که اشاره شد خاک تثبیت‌شده با پلیمر B70 مقاومت فشاری، کششی و برشی بیشتری نسبت به خاک تثبیت‌شده با پلیمر A70 دارد و این در حالی است که خاک تثبیت‌شده با پلیمر A70 دوام بیشتری نسبت به خاک تثبیت‌شده با B70 دارد؛ در ادامه به منظور بررسی هرچه دقیق‌تر تأثیر دو پلیمر بر عملکرد مقاومتی خاک از نرم‌افزار SPSS استفاده شد؛ SPSS مخفف «Statistical Package for the Social Sciences» یا همان «بسته آماری برای علوم اجتماعی» است که نخستین نسخه آن در سال ۱۹۶۸ طراحی و توسط «ترمن نی» منتشر شد و به صورت گسترده‌ای برای تحلیل‌های آماری به کار می‌رود [۴۸] و یکی از کاربردهای این نرم‌افزار به کارگیری آزمون‌های آماری است. از این رو مقادیر نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوری، مقاومت کششی غیرمستقیم، مقاومت برشی مستقیم، درصد افت وزنی در اثر چرخه ذوب و یخ ($F-T^1$) و درصد افت وزنی در اثر چرخه تر و خشک ($W-D^2$) در مقدار پلیمر بهینه (نمونه‌های A2 و B2) موردبررسی قرار گرفت. در ابتدا توزیع نرمال داده‌ها به کمک آزمون

کولموگوروف-اسمیرنوف موردبررسی قرار گرفت که نتایج آن در جدول ۴ ارائه‌شده است. مطابق آزمون کولموگوروف-اسمیرنوف که برای جامعه آماری کوچک انجام می‌شود، اگر مقدار Sig. کوچک‌تر از ۰/۰۵ باشد، یعنی داده‌ها به طور نرمال توزیع نشده‌اند و اگر بیشتر از ۰/۰۵ باشد، یعنی داده‌ها به طور نرمال توزیع شده‌اند که مطابق جدول ۵ مقدار Sig. بزرگ‌تر از ۰/۰۵ بوده و بدین معناست که داده‌ها به صورت نرمال است.

با توجه به نرمال بودن داده‌ها، از آزمون T مستقل برای مقایسه معناداری اختلاف نتایج میان خاک تثبیت‌شده با پلیمر A70 (گروه ۱)، B70 (گروه ۲) و خاک تثبیت نشده (گروه ۳) استفاده شد که نتایج آن در جدول ۵ ارائه‌شده است. مطابق جدول ۵، از آنجاکه مقدار Sig. (2-tailed) برای نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوری، مقاومت کششی غیرمستقیم و دوام کمتر از ۰/۰۵ است، اختلاف مقاومت فشاری، کششی و خواص دوام خاک تثبیت‌شده با پلیمر A70 و B70 قابل‌ملاحظه و معنادار است؛ این در حالی است که پارامترهای مقاومت برشی خاک تثبیت‌شده با این دو پلیمر معنادار نیست؛ چراکه مقدار Sig. (2-tailed) بیشتر از ۰/۰۵ است؛ اما در مقایسه خاک تثبیت نشده و تثبیت‌شده با پلیمرهای A70 و B70، پارامترهای مقاومت برشی اختلاف معناداری با یکدیگر دارند و این بدین معناست که هر دو پلیمر به طور مؤثری سبب بهبود مقاومت برشی خاک می‌شود.

۳-۸- نتایج بررسی ریزساختاری

در تصاویر میکروسکوپی حاصل از SEM (شکل ۲۰)، تفاوت بارزی میان رفتار ریزساختاری خاک تثبیت‌شده با دو نوع پلیمر A70 و B70 قابل‌مشاهده است. در نمونه تثبیت‌شده با پلیمر A70، شبکه‌ای الیافی و

1. freeze-thaw
2. Wet-dry

توزیع نقطه‌ای سبب چسبندگی موضعی بین ذرات و افزایش تراکم تماس‌ها در مقیاس میکروسکوپی می‌گردد؛ بنابراین، شبکه کلی خاک پیوندهای کوتاه‌تر اما محکم‌تر و سخت‌تر ایجاد می‌کند که مقاومت بالاتری به نمونه می‌دهد. با این حال، به دلیل عدم وجود پیوندهای انعطاف‌پذیر زنجیره‌ای، شکست در این نوع نمونه‌ها ترد و ناگهانی است.

۴- نتیجه‌گیری

امروزه پلیمرها در زندگی انسان‌ها جایگاه ویژه‌ای دارند و صنعت ساخت‌وساز از این موضوع مستثنا نیست. این در حالی است که تبدیل شدن مشکل آلودگی محیط‌زیست به یک معضل جهانی سبب شده است که به‌کارگیری مواد دوستدار محیط‌زیست در ساخت‌وساز ازجمله بهسازی خاک حائز اهمیت شود که یکی از این مواد پلیمرهایی سازگار با محیط زیستی هستند و یکی از کاربردهای آن‌ها بهبود مشخصات مهندسی خاک‌هاست. از این‌رو در این پژوهش عملکرد خاک ماسه‌بادی تثبیت‌شده با دو پلیمر دوستدار محیط‌زیست مورد بررسی قرار گرفت و نتایج آن به شرح زیر است:

- مقدار پلیمر امولسیون مورد نیاز برای رسیدن به حداکثر مقدار تراکم برای پلیمر A70 به ترتیب برای غلظت‌های ۱۰، ۳۰ و ۵۰٪ برابر با ۱۵، ۲۰/۱ و ۲۴/۱۱ و برای پلیمر B70 برابر ۱۲/۶، ۱۳/۱ و ۱۳/۶ است.
- در یک پلیمر خاص، با افزایش مقدار پلیمر ابتدا مقاومت تک‌محوری افزایش و سپس کاهش می‌یابد؛ به‌طوری‌که می‌توان گفت مقدار بهینه پلیمر خالص A70 برابر با ۶/۰۳٪ و مقدار بهینه پلیمر خالص B70 برابر ۴/۰۲٪ است.
- با افزایش پلیمر میزان انعطاف‌پذیری نمونه هنگام شکست افزایش یافته به‌طوری‌که نمونه‌های A70-3 و B70-3 بیشترین کرنش را هنگام شکست دارند.
- تثبیت خاک با پلیمرهای A70 و B70 سبب بهبود مقاومت برشی خاک می‌شود؛ به‌طوری‌که با افزودن پلیمر A70 به ترتیب زاویه اصطکاک و چسبندگی به ترتیب تا ۱/۳۵ و ۳/۸ برابر و با افزودن پلیمر B70 تا ۱/۴ و ۴/۶ افزایش یافته است.
- نتایج نشان می‌دهد که با افزایش مقدار پلیمر، ابتدا مقاومت کششی افزایش و سپس کاهش می‌یابد؛ به‌طوری‌که با توجه به نتایج آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم مقدار بهینه پلیمر A70 برابر با ۶/۰۳٪ و مقدار بهینه پلیمر B70 برابر ۴/۰۲٪ است.
- با افزایش مقدار پلیمر میزان افت وزنی ناشی از چرخه ذوب و یخ

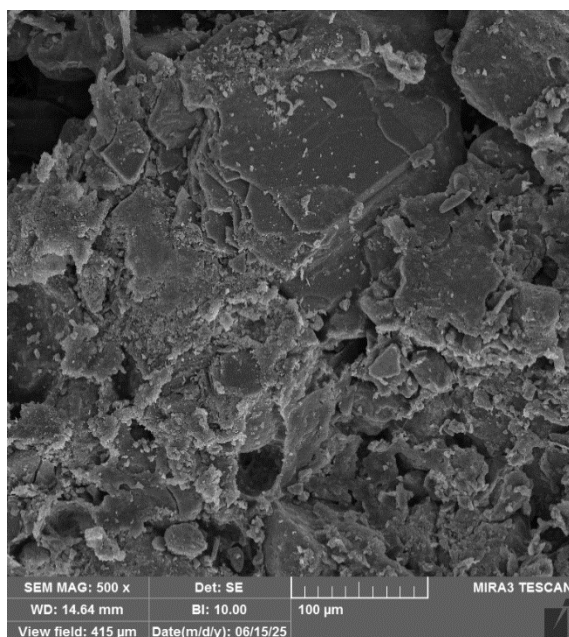
جدول ۵. نتایج آزمون آماری T.

Table 5. T-test statistical results.

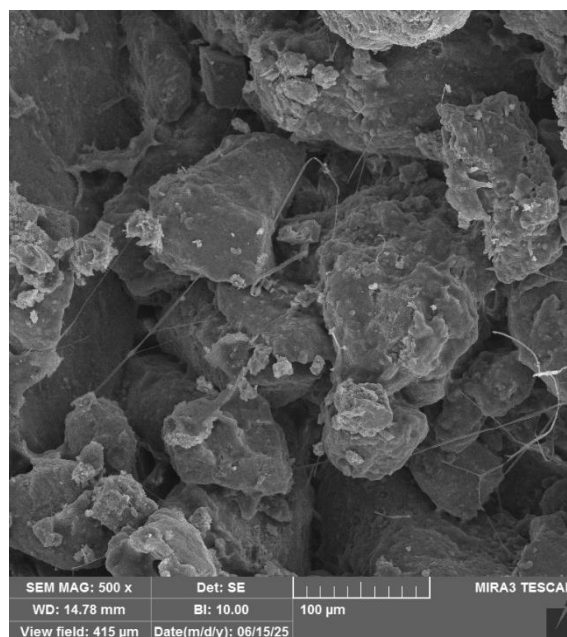
پارامتر مورد بررسی	گروه‌های مورد بررسی	Sig. (2-tailed)
UCS	۱	۰/۰
	۲	
ITS	۱	۰/۰
	۲	
T-F	۱	۰/۰۰۶
	۲	
W-D	۱	۰/۰
	۲	
C	۱	۰/۰۷۸
	۲	
C	۱	۰/۰
	۳	
C	۲	۰/۰
	۳	
friction	۱	۰/۴۶۵
	۲	
friction	۱	۰/۰۳
	۳	
friction	۲	۰/۰۲
	۳	

درهم‌تنیده مشابه تار عنکبوت تشکیل شده که به‌صورت زنجیره‌هایی بین ذرات خاک گسترش یافته است. این ساختار موجب افزایش چشمگیر پیوستگی میان ذرات و ایجاد اتصالی انعطاف‌پذیر در توده خاک می‌شود. در نتیجه هنگام اعمال بار، شکست در نمونه‌های حاوی پلیمر A70 به‌صورت تدریجی و همراه با تغییر شکل قابل ملاحظه رخ می‌دهد. این رفتار نشانگر ایجاد یک ماتریس پلیمری چکش‌خوار است که انرژی مکانیکی را جذب و پخش می‌کند، در نتیجه تنش‌های موضعی کاهش یافته و نمونه خاصیت انعطاف‌پذیری بالا از خود نشان می‌دهد.

در مقابل، در تصویر مربوط به خاک تثبیت‌شده با پلیمر B70، فاز پلیمری به‌صورت ذرات ریز و پراکنده روی سطح سنگ‌دانه‌ها مشاهده می‌شود. این



(ب)
(B)



(الف)
(A)

شکل ۲۰. تصاویر میکروسکوپی در مقیاس $100\mu m$ لف-آ2 ب-آ2

Fig. 20. Microscopic images at scale $100\mu m$ (A) A2, (B) B2.

سپاسگزاری

داده‌های این مقاله حاصل از رساله دکتری تحت عنوان "بررسی عملکرد بلوک خاکی تثبیت‌شده با پلیمر" مستخرج شده است؛ از این‌رو از شرکت پیچک تأمین به‌منظور حمایت مالی این پژوهش قدردانی می‌شود.

منابع

- [1] M. Miri, M. Amel-Sakhi, M. Jiriyaei-Sharahi, Investigation of the effect of adding ethylene-vinyl acetate on the strength parameters of granular soil, Amirkabir Civil Engineering Journal, 55(1) (2023) 41-60, doi: 10.22060/ceej.2022.21307.7683 (in Persian).
- [2] P. Daneshgar, S. Ghafarpour Jahromi, H. Arzani, Investigation of the behavior of Ahvaz sand soil stabilized with metakaolin, Amirkabir Journal of Civil Engineering, 55(2) (2023) 337-358, doi: 10.22060/ceej.2022.21851.7838 (in Persian).
- [3] S. Ghayani, M. Jiriyaei Sherahi, B. A. Mohammadnejad, Evaluation of clay stabilization with calcium

کاهش می‌یابد؛ به‌طوری‌که با افزایش مقدار پلیمر A70 از ۱۵ تا ۲۵٪ و با افزایش مقدار پلیمر B70 از ۱۲/۶ تا ۱۳/۶٪ میزان درصد افت وزنی ناشی از چرخه ذوب و یخ به ترتیب حدود ۵۲ و ۱۲/۶٪ کاهش می‌یابد.

- همچنین با افزایش مقدار پلیمر میزان افت وزنی ناشی از چرخه تر و خشک کاهش می‌یابد؛ به‌طوری‌که با افزایش مقدار پلیمر A70 از ۱۵ تا ۲۵٪ و با افزایش مقدار پلیمر B70 از ۱۲/۶ تا ۱۳/۶٪ میزان درصد افت وزنی ناشی از چرخه خشک و تر به ترتیب حدود ۶۶ و ۱۳/۶٪ کاهش می‌یابد
- با روابط ارائه‌شده در جداول ۳ و ۴ حاصل از تحلیل آماری با نرم‌افزار Design-Expert می‌توان عملکرد خاک تثبیت‌شده با این دو پلیمر را با دقت خوبی پیش‌بینی کرد.
- نتایج آزمون T با استفاده از نرم‌افزار SPSS در خصوص مقایسه عملکرد خاک تثبیت‌شده با این دو پلیمر نشان می‌دهد که اختلاف معناداری بین مقاومت فشاری، کششی و خواص دوام خاک تثبیت‌شده با پلیمر A70 و B70 وجود دارد؛ این در حالی است که اختلاف پارامترهای مقاومت برشی خاک تثبیت‌شده با این دو پلیمر معنادار نیست.

- (ASCE)MT.1943-5533.0003287.
- [12] M. Reza Golhashem, E. Uygur, Volume change and compressive strength of an alluvial soil stabilized with butyl acrylate and styrene, *Constr. Build. Mater.*, 255 (2020) 119352, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119352.
- [13] P. K. Kolay, B. Dhakal, Geotechnical properties and microstructure of liquid polymer amended fine-grained soils, *Geotech. Geol. Eng.*, 38(3) (2020) 2479-2491, doi: 10.1007/s10706-019-01163-x.
- [14] Y. Bai, J. Liu, Y. Cui, X. Shi, Z. Song, C. Qi, Mechanical behavior of polymer stabilized sand under different temperatures, *Constr. Build. Mater.*, 290 (2021) 123237, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123237.
- [15] T. Abdel-wahed, A. O. Mahmoud, Enhancement of polymer on road problematic soil stabilization, *Sohag Eng. J.*, 2(1) (2022) 48-55, doi: 10.21608/sej.2022.126328.1010.
- [16] P. Kumar, A. J. Puppala, J. S. Tingle, S. Chakraborty, S. S. C. Congress, Resilient characteristics of polymer emulsion-treated sandy soil, *Transp. Res. Rec.*, 2676(9) (2022) 526-538, doi: 10.1177/03611981221087238.
- [17] S. Jalali, M. Amel Sakhi, M. Momeni Raghavadi, S. A. Hosseini, R. Khajovi, Improving the creep properties of undisturbed soil using polymeric materials, *Journal of the Iranian Society of Engineering Geology*, 15(4) (2023) 127-139 (in Persian).
- [18] H. Soltani-Jiqeh, A. Abri, A. Asadian-Trakmeh, The effect of polyester resin polymer material on Atterberg limits and uniaxial strength of bentonite soil, *Modarres Civil Engineering*, 22(12) (2022) 261-271 (in Persian).
- [19] I. Bozyigit, H. O. Zingil, S. Altun, Performance of eco-friendly polymers for soil stabilization and their resistance to freeze-thaw action, *Constr. Build. Mater.*, 379 (2023) 131133.
- [20] N. F. Boaventura, T. F. Sousa, M. D. Casagrande, The application of an eco-friendly synthetic polymer as a sandy soil stabilizer, *Polymers*, 15(24) (2023) 4626, doi: 10.3390/polym15244626.
- [21] G. P. Panda, A. Bahrami, T. V. Nagaraju, H. F. Isleem, lignosulfonate additive, considering different mixing methods, *Amirkabir Civil Engineering Journal*, 53(2) (2021) 659-674, doi: 10.22060/ceej.2020.16461.6238 (in Persian).
- [4] B. Iftikhar et al., A machine learning-based genetic programming approach for the sustainable production of plastic sand paver blocks, *J. Mater. Res. Technol.*, 25 (2023) 5705-5719, doi: 10.1016/j.jmrt.2023.07.034.
- [5] W. Ahmad, A. Ahmad, K. A. Ostrowski, F. Aslam, P. Joyklad, A scientometric review of waste material utilization in concrete for sustainable construction, *Case Stud. Constr. Mater.*, 15 (2021) e00683, doi: 10.1016/j.cscm.2021.e00683.
- [6] A. Al-Khanbashi, A. M. O. Mohamed, A. Moet, B. Hadi, Stabilization of desert sand using water-born polymers, in: *Geoengineering in Arid Lands*, (2026) 143-147.
- [7] S. Shafqatian, G. Moradi, H. Katabi, Laboratory investigation of the effect of chemical and biological stabilization on the properties of roadbed clay, *Amirkabir Civil Engineering Journal*, 53(7) (2021) 2821-2836, doi: 10.22060/ceej.2020.17493.6588 (in Persian).
- [8] K. Prince, P. A. J., C. S. S. Chandra, T. J. S., Laboratory durability evaluation of sandy soil stabilized with synthetic polymer, in: *Geotechnical Frontiers 2025*, (2025) 277-286.
- [9] A. Almajed, K. Lemboye, A. A. B. Moghal, A critical review on the feasibility of synthetic polymers inclusion in enhancing the geotechnical behavior of soils, *Polymers (Basel)*, 14(22) (2022) 5004.
- [10] H. Soltani-Jigheh, M. Bagheri, A. R. Amani-Ghadim, Use of hydrophilic polymeric stabilizer to improve strength and durability of fine-grained soils, *Cold Reg. Sci. Technol.*, 157 (2019) 187-195, doi: 10.1016/j.coldregions.2018.10.011.
- [11] H. Ghasemzadeh, A. Mehrpajouh, M. Pishvaei, M. Mirzababaei, Effects of curing method and glass transition temperature on the unconfined compressive strength of acrylic liquid polymer-stabilized kaolinite, *J. Mater. Civ. Eng.*, 32(8) (2020) 4020212, doi: 10.1061/

- mechanical properties of hydrophobic polymer-modified soil subjected to freeze–thaw cycles, *Acta Geotech.*, 18(7) (2023) 3623–3642, doi: 10.1007/s11440-023-01804-9.
- [34] ASTM D560, Standard test methods for freezing and thawing compacted soil-cement mixtures, (2012).
- [35] M. Mirzababaei, A. Arulrajah, M. Ouston, Polymers for stabilization of soft clay soils, *Procedia Engineering*, 189 (2017) 25-32.
- [36] C. Xia, X. Cao, J. Wen, J. Li, L. Dai, B. Guan, Effect of acrylate emulsion on the mechanical and microscopic properties of straw fiber-reinforced cement-magnesium slag stabilized soil, *Polymers*, 16(24) (2024) 3462, doi: 10.3390/polym16243462.
- [37] B. Ebrahimi, B. Zare, M. Mokhtari, Investigating the effect of polypropylene fibers on the compressive and tensile strength of organic soil stabilized with lime and xanthan gum biopolymer, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 53(5) (2022) 1853-1870 (in Persian).
- [38] V. Ghiasi, R. Fathi, M. S. C. Shafi, Investigation of the effect of elastic modulus, shear modulus, damping ratio and shear wave velocity in soil dynamic analysis, *Road*, 29(108) (2021) 87-100, doi: 10.22034/road.2021.107905 (in Persian).
- [39] Q. O. Babatunde, H. J. Kim, Y.-H. Byun, Enhancing shear strength of sandy soil using zein biopolymer, *Results Eng.*, 24 (2024) 102891, doi: 10.1016/j.rineng.2024.102891.
- [40] M. Mohseninia, H. Salehzadeh, The effect of initial soil conditions and setting environment on the tensile strength of sandy soil improved with Persian gum, *Transportation Infrastructure Engineering*, 9(2) (2023) 51-62 (in Persian).
- [41] S. A. Naeini, B. Naderinia, E. Izadi, Unconfined compressive strength of clayey soils stabilized with waterborne polymer, *KSCE J. Civ. Eng.*, 16(6) (2012) 943-949, doi: 10.1007/s12205-012-1388-9.
- [42] Y. Bai, J. Liu, H. Xiao, Z. Song, K. Ma, Y. Deng, Soil stabilization using synthetic polymer for soil slope ecological protection, *Eng. Geol.*, 321 (2023) 107155, Response of high swelling montmorillonite clays with aqueous polymer, *Minerals*, 13(7) (2023) 933.
- [22] K. Debbarma, S. Saha, P. P. Sarkar, Application of vinyl acrylic co-polymer on subgrade and sub base pavement stabilization, *Mater. Today Proc.*, (2023), doi: 10.1016/j.matpr.2023.03.653.
- [23] Y. Wang et al., Strength assessment of sand stabilized with synthetic polymer and natural fibers, *Bull. Eng. Geol. Environ.*, 83(6) (2024) 214, doi: 10.1007/s10064-024-03716-8.
- [24] H. Jie, S. Azam, E. Rigoberto, J. Drew, W. Fei, S. Jinhu, Feasibility of using liquid polymer to grout soil with high fine contents, *IFCEE 2024*, (2024) 326-336, doi: 10.1061/9780784485415.034.
- [25] C. Wang et al., Experimental study on the mechanical behaviour of silty soil stabilized with polyurethane, *Constr. Build. Mater.*, 416 (2024) 135251, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2024.135251.
- [26] P. Maleki, M. Gharib, S. S. Kutanaei, H. Ghasemnejad, N. R. Malidarreh, Environmentally friendly method for stabilizing sand and silty sand using biopolymer (non-destructive test method application), *Results Eng.*, 25 (2025) 104376.
- [27] M. Megrouse, Y. Mahmoudi, A. C. Taiba, H. Azaiez, M. Belkhatir, Mechanical properties of sand enhanced by combined polymer stabilizer and natural fibers, *Transp. Infrastruct. Geotechnol.*, 12(1) (2025) 12.
- [28] ASTM D698, Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort (12,400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³)), (2021).
- [29] ASTM D2166, Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil, (2010).
- [30] ASTM D3080, Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions, (2012).
- [31] ASTM C496, Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens, (2017).
- [32] ASTM D559, Standard test methods for wetting and drying compacted soil-cement mixtures, (2012).
- [33] W. Xia et al., Experimental investigation of the

- development in stabilized soil with CBR PLUS and silica sand, J. Traffic Transp. Eng. (English Ed.), 4(4) (2017) 412-421, doi: 10.1016/j.jtte.2017.02.002.
- [46] M. C. Fu et al., Handbook of Simulation Optimization, Springer, 216 (2015).
- [47] A. Jabrouiti, A. A. Ghafrani, Introduction to Response Surface Methodology, in: Fourth National Conference on New Chemical Technologies and Chemical Engineering, (2015) (in Persian).
- [48] M. M. Khobiri, Z. Ghafourifard, Decision Tree in Pavement Safety and Maintenance, Arshadhan, (2021) (in Persian).
- doi: 10.1016/j.enggeo.2023.107155.
- [43] M. S. Baghini, A. Ismail, M. P. Asghar, G. Fendereski, M. Sadeghi, Measuring the effects of styrene butadiene copolymer latex-Portland cement additives on properties of stabilized soil-aggregate base, Int. J. Pavement Res. Technol., 11(5) (2018) 458-469, doi: 10.1016/j.ijprt.2017.12.001.
- [44] F. Mousavi, E. Abdi, H. Rahimi, Effect of polymer stabilizer on swelling potential and CBR of forest road material, KSCE J. Civ. Eng., 18(7) (2014) 2064-2071, doi: 10.1007/s12205-014-0137-7.
- [45] S. E. Mousavi, A. Karamvand, Assessment of strength

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

Z. Ghafouri Fard, M. Mokhtari, M. M. Khabiri, S. M. Jalilian, Evaluation of the Mechanical Properties and Durability of Aeolian Sand Stabilized with Emulsion Copolymers, Amirkabir J. Civil Eng., 58(4) (2026) 479-510.

DOI: [10.22060/ceej.2026.24325.8288](https://doi.org/10.22060/ceej.2026.24325.8288)

