

ارزیابی خواص مکانیکی و دوام خاک ماسه‌بادی تثبیت‌شده با کopolymerهای امولسیون

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

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

۲- پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، تهران، ایران

چکیده

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 کopolymer امولسیونی دوستدار محیط‌زیست با نام‌های کopolymer استایرن آکریلات و کopolymer استایرن بوتادین با سه غلظت متفاوت مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور ابتدا با انجام آزمایش تراکم مقدار پلیمر امولسیونی 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 ۶/۰۳٪ و مقدار بهینه پلیمر خالص B70 برابر ۴/۰۲٪ 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.

کلمات کلیدی

تثبیت خاک، پلیمر دوستدار محیط‌زیست، کopolymer استایرن آکریلات، کopolymer استایرن بوتادین، ماسه‌بادی

* Corresponding Author: Email: mokhtar@yazd.ac.ir

از دیرباز خاک‌ها جایگاه مهمی در علوم عمرانی به خود اختصاص داده‌اند؛ چراکه تمامی سازه‌های عمرانی بر روی خاک بنا می‌شود [1]. از این رو خاک بستر سازه‌های عمرانی باید خواص مهندسی مطلوبی را دارا باشند که در غیر این صورت مهندسين با اتخاذ روش‌هایی سبب بهبود خواص مهندسی خاک می‌شوند که بهسازی خاک نام دارد [2, 3]. این در حالی است که امروزه گرم شدن کره زمین و افزایش آلودگی محیط‌زیست به یک معضل جهانی تبدیل شده است و از طرفی ساخت‌وساز سازه‌های مختلف تأثیر قابل توجهی بر محیط‌زیست، مصرف انرژی و میزان انتشار CO₂ دارد [4, 5]. 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 کاهش یابد. یکی از روش‌های نوظهور سازگار با محیط‌زیست تثبیت خاک، تثبیت با پلیمرهاست [6, 7]. پلیمرها علاوه بر اینکه در زمینه‌های مختلف از جمله صنایع غذایی، نساجی، پزشکی و کشاورزی کاربرد هستند؛ در زمینه‌ی مهندسی ژئوتکنیک نیز به‌عنوان تثبیت‌کننده خاک مورد توجه مهندسان قرار گرفته‌اند [8, 9]. از این رو پژوهش‌های متعددی در این زمینه انجام شده است؛ به‌عنوان نمونه سلطانی جیقه 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 اتربرگ، 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 قابل توجهی در مقاومت 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 تثبیت‌نشده و تثبیت‌شده، به‌ویژه پس از سیکل اول رخ می‌دهد [10]. در سال ۲۰۲۰ نیز قاسم‌زاده و همکارانش به بررسی خاک رس تثبیت‌شده با یک پلیمر امولسیون‌ی پرداختند و یافتند که مقاومت خاک رس تثبیت‌شده به این روش تا ۸ برابر افزایش می‌یابد. همچنین نتایج نشان داد که با ثابت نگه‌داشتن سایر پارامترها، با افزایش غلظت، مقاومت خاک رس افزایش می‌یابد [11]. گلهاشم^۱ و اویگار^۲ نیز در مطالعه‌ای تغییر حجم و مقاومت فشاری تک‌محوری یک خاک آبرفتی تثبیت‌شده 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 [12]. در سال ۲۰۲۰ پژوهشی با هدف بررسی ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک‌های ریزدانه‌ی اصلاح‌شده 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 تثبیت‌شده با پلیمر انجام شد. نتایج نشان می‌دهد که با افزودن پلیمر، مقاومت فشاری و نسبت باربری کالیفرنیا هر دو خاک افزایش می‌یابد [13].

بای^۶ و همکارانش نیز در سال ۲۰۲۱ به بررسی رفتار خاک ماسه تثبیت‌شده 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 [14]. در سال ۲۰۲۲ پژوهشی تحت عنوان تثبیت خاک مسئله‌دار در ساخت‌وساز جاده با کوپلیمر مایع توسط عبدالواحد^۷ و محمود^۸ انجام شد. در این تحقیق، نسبت‌های مختلف پلیمر برای تثبیت خاک متورم شونده

¹ Golhashem

² Uygur

³ Co-polymer of Butyl Acrylate and Styrene

⁴ Kolay

⁵ Dhakal

⁶ Bai

⁷ Abdel-wahed

⁸ Mahmoud

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 [15]. کومار^۱ 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 تثبیت‌شده با مقادیر مختلف امولسیون پلیمری و زمان‌های عمل‌آوری مختلف برای ارزیابی خواص خاک ماسه‌ای تثبیت‌شده انجام شد. نتایج این پژوهش بیانگر بهبود پارامترهای مقاومتی و مدول ارتجاعی خاک تثبیت‌شده است [16].

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 این‌گونه خاک‌ها مورد بررسی قرار دادند. بدین منظور ۲، ۳، ۴ و ۵٪ بوتادین رابر به نمونه‌های خاک رمبند تریق شد و در مدت‌زمان‌های 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 [17]. در پژوهشی دیگر سلطانی جیقه 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 [18]. علاوه بر این‌ها در سال ۲۰۲۳، مطالعه‌ای در خصوص بررسی عملکرد خاک تثبیت‌شده با پلیمرهای سازگار با محیط‌زیست در برابر چرخه‌ی ذوب و یخ توسط بوزیگیت^۲ و همکارانش انجام شد. بدین منظور سه نوع پلیمر شامل صمغ زانتان، صمغ گوار^۳ 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 [19].

بوآونتورا^۴ 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^۵ و همکارانش پژوهشی در خصوص پلیمر پلی‌آکریل آمید به عنوان ماده افزودنی به خاک رس متورم شونده برای کنترل پدیده تورم انجام دادند. از این رو سه درصد مختلف، ۲/۵٪، 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 پلی‌آکریل آمید، تورم به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. علاوه بر این نتایج بیانگر آن است که افزودن پلیمر باعث بهبود مقاومت خاک می‌شود [21]. 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 به طور قابل توجهی افزایش پیدا کرده است [1]. در سال ۲۰۲۳، دبارما^۶ 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 CBR، UCS و Mr اساس و زیراساس می‌شود [22].

¹ Kumar

² Bozyigit

³ guar gum

⁴ Boaventura

⁵ Panda

⁶ Debbarma

وانگ^۱ 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، 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 قابل توجهی 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 قابل توجهی بهبود می‌بخشد [23]. هانگ^۲ 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 فعال شده با آب (WAP^۳) پرداختند. پلیمر مورد استفاده در این مطالعه یک پلیمر مایع است و ویسکوزیته آن به ۲۵ سانتی پواز می‌رسد، به این معنی که به اندازه 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 [24]. در مطالعه‌ی دیگری وانگ و همکارانش خاک سیلتی تثبیت شده 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 [25].

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 تثبیت شده با ۲٪ گوارگام و آگارگام به ترتیب ۲۱٪ و ۱۰٪ کاهش یافته است و چسبندگی مؤثر ماسه تثبیت شده با ۲٪ گوارگام و آگارگام به ترتیب به ۱۰۷ و ۱۴۸ کیلوپاسکال افزایش پیدا کرده است. علاوه بر این یقین تحقیق نشان داد که آزمون UPV می‌تواند پارامترهای مقاومت مکانیکی و برشی کوتاه‌مدت و بلندمدت ماسه و ماسه سیلتی تثبیت شده با آگارگام و گوارگام را تخمین بزند [26]. همچنین مگروسه و همکارانش به بررسی عملکرد خاک ماسه تثبیت شده با پلیمری پلی‌وینیل‌استات همراه با الیاف سیسال پرداختند و یافتند که همبستگی مثبت بین غلظت پلی‌وینیل‌استات و مقاومت فشاری تک‌محوره در بازه آزمایش شده وجود دارد و استفاده از پلیمر همزمان با الیاف سبب بهبود چشم‌گیری عملکرد خاک ماسه می‌شود [27].

همان‌گونه که اشاره شد، مطالعات متعددی در خصوص به‌کارگیری پلیمرها در تثبیت خاک انجام شده است؛ با این حال، با توجه به افزایش نگرانی‌های زیست‌محیطی، استفاده از مواد کم‌هزینه و سازگار با محیط‌زیست به‌عنوان جایگزین روش‌های متداول بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است. در همین راستا، نوآوری اصلی این پژوهش در به‌کارگیری دو کوپلیمر امولسیون‌ی جدید و دوستدار محیط‌زیست 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 به‌عنوان گزینه‌ای سازگار با محیط‌زیست برای تثبیت خاک و ارائه شواهد تجربی از کارایی آن‌ها در بهبود رفتار خاک قابل بیان است.

¹ Wang

² Huang

³ Water-activated polymer

۲- روش انجام تحقیق

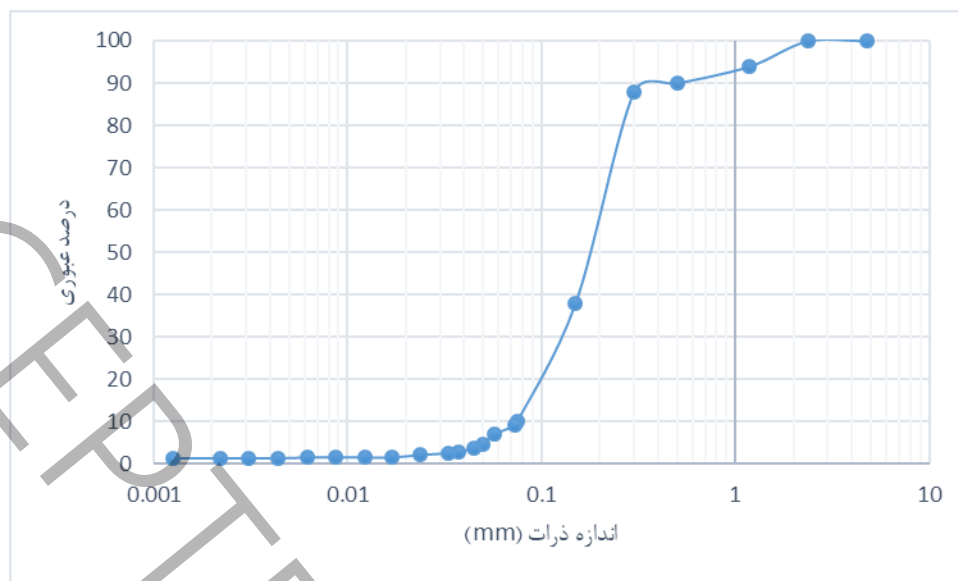
۲-۱- مواد مصرفی

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 D85۴ 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 (Cu) و ضریب انحنای (Cc) دانه‌بندی خاک مورد نظر به ترتیب برابر ۲/۷ و ۰/۸ است.



(الف)

(A)



(ب)

(B)

شکل 1: الف- محل برداشت خاک ب-دانه‌بندی خاک ماسه‌بادی مورد استفاده

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

در این پژوهش خاک موردنظر با دو پلیمر امولسیون‌ی دوستدار محیط‌زیست 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.

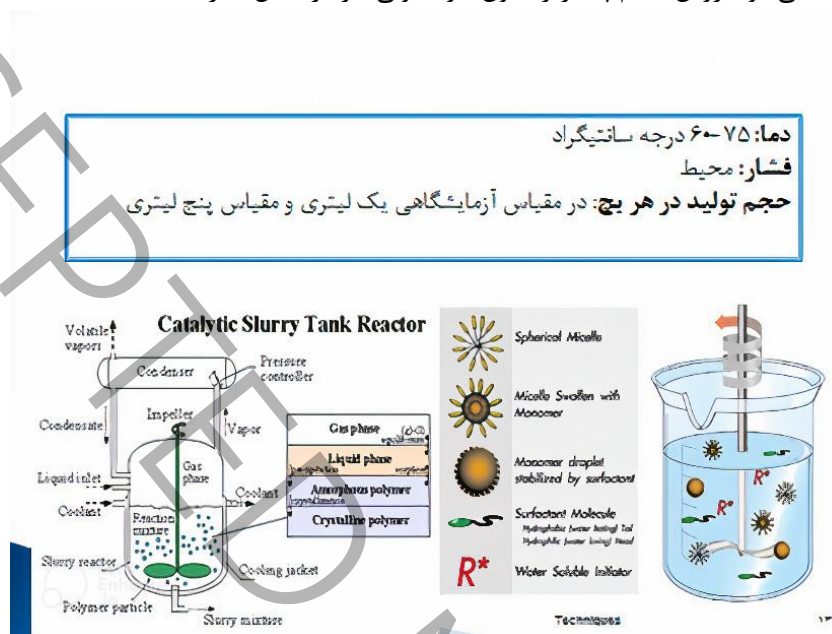
لازم به ذکر است که میزان مونومر استایرن در ساختار کوپلیمر برای هر دو پلیمر ۷۰٪ است؛ از این‌رو در این پژوهش کوپلیمر استایرن آکریلات و کوپلیمر استایرن بوتادین به ترتیب با حرف اختصاری A70 و B70 نمایش داده می‌شود. این پلیمرها به صورت مایعی شیری‌رنگ است که PH آن بین ۶ تا ۷ است و درصد جامد آن وابسته به غلظت 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

¹ Styrene-Acrylate Copolymer

² Styrene-Butadiene Copolymer

مونومرها در فاز آبی توسط امولسیفایر انجام می‌شود و سپس شروع واکنش با یک آغازگر محلول در آب مانند پتاسیم پرسولفات در حضور پایدار کننده‌هایی که ممکن است یونی، غیر یونی یا کلونیدی باشند، انجام می‌گیرد. وظیفه پایدار کننده‌ها 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 امولسیون نیز در شکل ۲ ارائه شده است.



شکل 2: پلیمریزاسیون امولسیونی مونومر

Figure 2. Emulsion polymerization of the monomer

۲-۲- روش ساخت نمونه و برنامه آزمایش‌ها

در این مطالعه ابتدا با کمک آزمایش تراکم برای غلظت‌های مختلف پلیمر، مقدار بهینه برای رسیدن به حداکثر وزن مخصوص تعیین گردید. سپس نمونه‌های مربوط به هر آزمایش با مخلوط کردن ماسه با مقادیر بهینه پلیمر با غلظت‌های مختلف تهیه شد و سپس به نمونه‌ها به مدت ۱۴ روز وقت داده شد تا کاملاً خشک شوند. لازم به ذکر است که در این پژوهش آزمایش‌های مقاومت تک‌محوری، 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.

2-2-1- 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 می‌شود (شکل ۳) [28].



شکل 3: آزمایش تراکم

Figure 3. Compaction test

2-2-2- آزمایش مقاومت تک محوری

مقاومت تک محوری خاک ماسه‌ای (UCS^1) یکی از پارامترهای مهم در مهندسی ژئوتکنیک است که نشان‌دهنده توانایی خاک در تحمل بار است یا به عبارتی دیگر برای تعیین مقاومت فشاری محصور نشده خاک مطابق استاندارد ASTM D ۲۱۶۶ انجام می‌گردد (شکل ۴) [29].



(ب)
(B)



(الف)
(A)

شکل 4: الف- نمونه و قالب آزمایش تک محوری ب- نمایی از انجام آزمایش تک محوری

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

2-2-3- آزمایش مقاومت برش مستقیم

اهمیت مقاومت برشی در خاک به دلیل نقش حیاتی آن در پایداری سازه‌ها و خاک، به‌ویژه در پروژه‌های ژئوتکنیکی، بسیار زیاد است. این مقاومت نشان‌دهنده توانایی خاک در تحمل نیروهای برشی است که می‌تواند منجر به گسیختگی و فرونشست خاک شود. آزمایش برش مستقیم یکی از روش‌های معمول برای تعیین مقاومت برشی خاک است و نتایج آن برای طراحی سازه‌هایی مانند سدها، تونل‌ها و شیروانی‌ها، همچنین برای ارزیابی پایداری خاک در برابر پدیده‌های 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 می‌گیرد (شکل ۵) [30].

¹Unconfined Compressive Strength



(ب)

(B)



(الف)

(A)

شکل 5: الف- نمونه و قالب آزمایش برش مستقیم ب-نمایی از دستگاه آزمایش برش مستقیم

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

2-2-4- آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم (برزیلی)

مقاومت کششی غیرمستقیم در خاک ماسه از این جهت اهمیت دارد که به عنوان یک پارامتر مهم در طراحی و ارزیابی پایداری سازه های خاکی، به ویژه در مناطقی که در معرض تنش کششی هستند، عمل می کند. این مقاومت نشان دهنده توانایی خاک در تحمل نیروهای کششی بدون شکست یا ترک خوردگی است و بر اساس آزمایش های غیرمستقیم، مانند آزمایش کشش غیرمستقیم (برزیلی)، اندازه گیری می شود؛ این آزمایش مطابق استاندارد ASTM C496 انجام شد. این آزمایش در واقع یک آزمایش فشاری قطری است که در آن، نمونه استوانه ای شکل مصالح، تحت اثر نیروی فشاری وارد بر سطح جانبی آن قرار می گیرد که این نحوه بارگذاری سبب به وجود آمدن تنش های کششی در امتداد قطر بارگذاری شده، می شود (شکل ۶). مقاومت کششی نمونه ها از رابطه ۱ قابل محاسبه است [31]. در رابطه ۱، P بیشترین نیروی وارده بر نمونه بر حسب نیوتن، L طول نمونه بر حسب میلی متر و d قطر نمونه بر حسب میلی متر است.



شکل 6: آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم خاک

Figure 6. Indirect tensile strength test of the soil

$$T = \frac{2P}{\pi Ld}$$

(۱)

2-2-5- آزمایش دوام

در این پژوهش به منظور بررسی دوام نمونه های خاک تثبیت شده از آزمایش چرخه تر و خشک و چرخه ذوب و یخ استفاده شد. آزمایش چرخه تر و خشک شدگی خاک اهمیت زیادی در مهندسی ژئوتکنیک دارد؛ چراکه این آزمایش به بررسی اثرات تغییرات

رطوبت بر خواص فیزیکی و مکانیکی خاک می‌پردازد و در درک رفتار خاک در شرایط مختلف محیطی بسیار مهم است. از این رو در این پژوهش نمونه‌های استوانه‌ای خاک تثبیت‌شده مطابق استاندارد ASTM D559 تحت آزمایش چرخه تر و خشک‌شدگی قرار گرفتند (مطابق شکل ۷-الف) [32].

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 تثبیت‌شده در برابر چرخه ذوب و یخ حائز اهمیت است [33]. بدین منظور نمونه‌های استوانه‌ای خاک تثبیت‌شده مطابق استاندارد ASTM D560 تحت آزمایش چرخه ذوب و یخ قرار گرفتند (شکل ۷-ب) [34]. لازم به ذکر است که حداکثر درصد افت مجاز پس از چرخه تر و خشک و ذوب و یخ ۱۴٪ است.



شکل 7: الف- آزمایش چرخه تر و خشک ب- آزمایش چرخه ذوب و یخ
Figure 7. (A) Wet-dry cyclic test; (B) freeze-thaw cyclic test.

2-2-6 - 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).



شکل 8- آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا
Figure 8. California Bearing Ratio (CBR) test

2-2-7- بررسی ریزساختاری

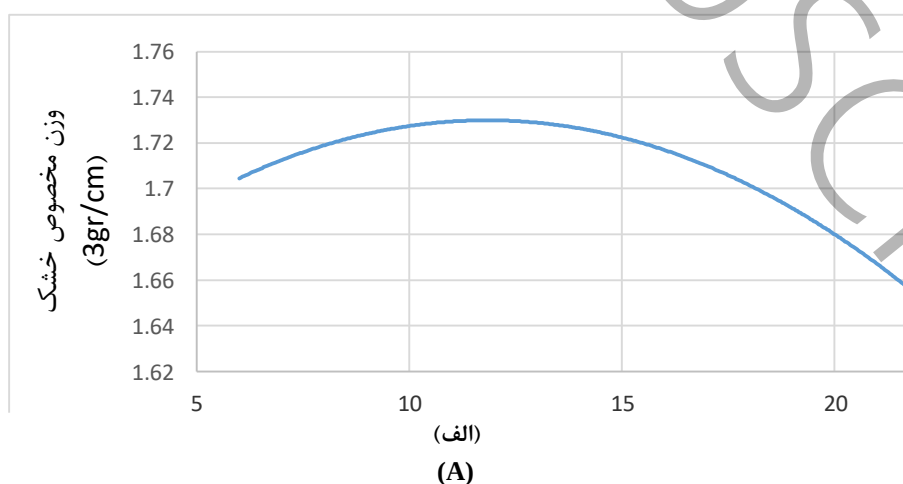
به منظور بررسی هرچه دقیق تر اثر درصدهای مختلف پلیمرهای مورد استفاده بر بافت خاک ماسه‌بادی و عملکرد آن، بررسی ریزساختاری به روش SEM انجام شد. بررسی ریزساختاری با روش SEM برای بلوک خاکی تثبیت شده با پلیمر، نقش کلیدی در درک مکانیسم تثبیت و بهینه‌سازی خواص دارد. این روش امکان مشاهده‌ی مستقیم نحوه‌ی پوشش 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.

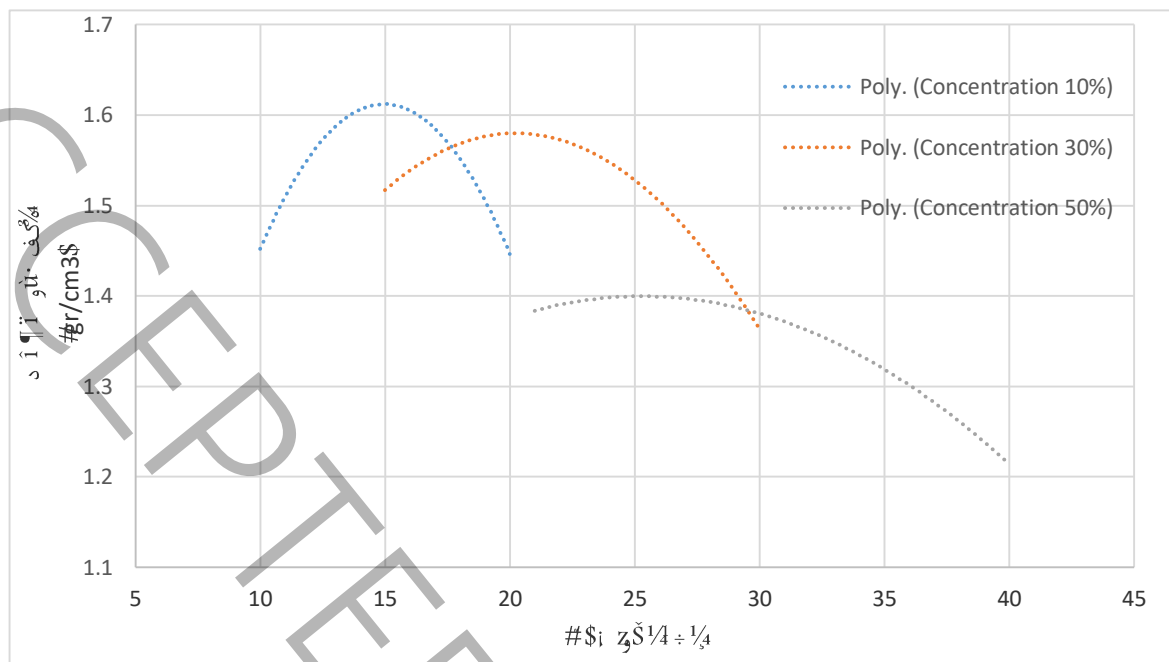
۳- نتایج و بحث

همان‌طور که اشاره شد هدف این پژوهش بررسی خصوصیات مکانیکی خاک ماسه‌بادی تثبیت شده با دو پلیمر امولسیون دوستدار محیط زیست با غلظت‌های مختلف است. ابتدا به منظور تعیین مقادیر بهینه پلیمرها با غلظت‌های مختلف آزمایش تراکم انجام شد. در ادامه نمونه خاک‌های تثبیت شده 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. در نهایت نتایج آزمایش‌ها با نرم‌افزار Design-Expert و SPSS تحلیل شد.

3-1- نتایج آزمایش تراکم

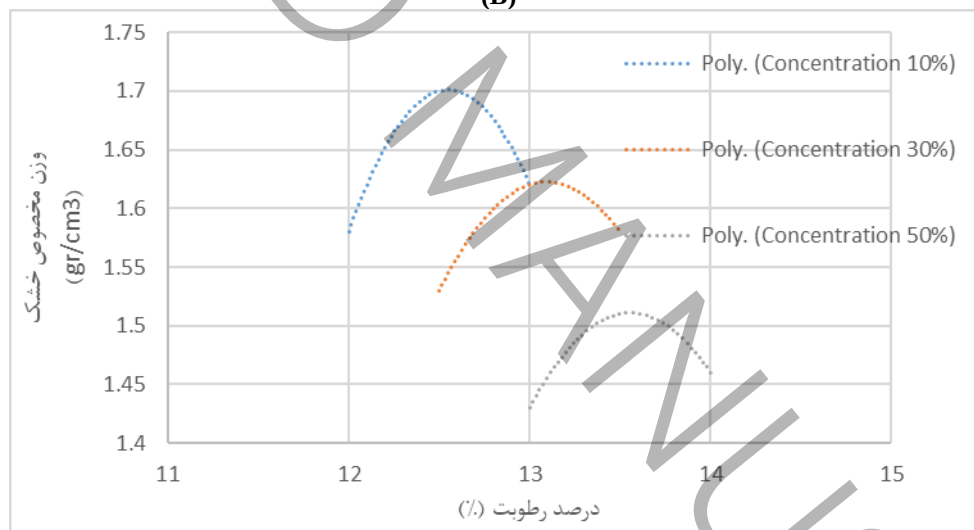
در این پژوهش به کمک نتایج آزمایش تراکم مقدار پلیمر بهینه در غلظت‌های مختلف را برای رسیدن به حداکثر وزن مخصوص خشک خاک تعیین گردید و در ادامه به منظور ساخت نمونه‌های مربوط به سایر آزمایش‌ها مقدار پلیمر امولسیون برای تثبیت مشخص شد. نتایج آزمایش تراکم در شکل ۹ ارائه شده است که مطابق آن با افزایش غلظت، مقدار پلیمر مورد نیاز برای رسیدن به حداکثر وزن مخصوص خاک افزایش می‌یابد؛ چراکه با افزایش غلظت و گرانیوی 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؛ به‌طوری‌که پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد که با افزایش غلظت پلیمر، مقدار پلیمر بهینه افزایش و حداکثر وزن مخصوص خشک کاهش می‌یابد [20], [11]. 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.





(ب)

(B)



(ج)

(C)

شکل 9: نمودار وزن مخصوص خشک و درصد رطوبت بهینه الف-آب ب-پلیمر A70 ج-پلیمر B70
Figure 9. Dry unit weight and optimum moisture content curves for (A) water, (B) polymer A70, and (C) polymer B70

جدول 1: نام گذاری نمونه های خاک تثبیت شده

Table 1. Naming of stabilized soil samples

نام اختصاری پلیمر	نام نمونه	غلظت پلیمر (%)	درصد پلیمر امولسیونی حاصل از آزمایش تراکم (درصد وزن خشک خاک)	درصد پلیمر خالص
A70	A1	۱۰	۱۵	۱/۵

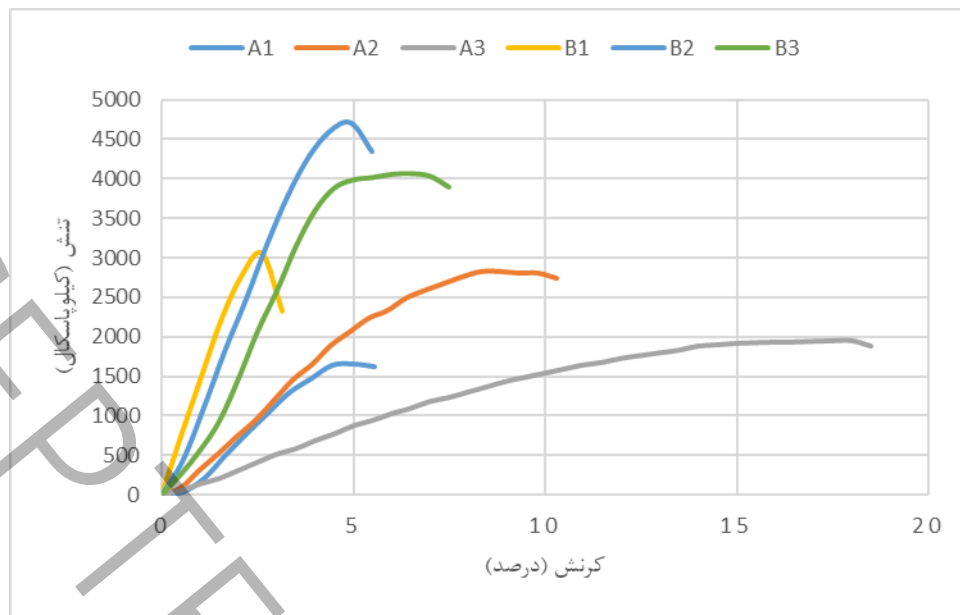
۶/۰۳	۲۰/۱	۳۰	A2	B70
۱۲/۰۵۵	۲۴/۱۱	۵۰	A3	
۱/۲۶	۱۲/۶	۱۰	B1	
۴/۰۲	۱۳/۱	۳۰	B2	
۶/۸	۱۳/۶	۵۰	B3	

2-3- نتایج آزمایش مقاومت تک محوری

همان‌طور که اشاره شد آزمایش مقاومت فشاری تک محوری 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 قابل توجهی سبب افزایش مقاومت و شکل‌پذیری خاک شدند؛ در یک پلیمر خاص، با افزایش مقدار پلیمر ابتدا مقاومت تک محوری افزایش و سپس کاهش می‌یابد؛ به‌طوری که در خاک تثبیت‌شده با پلیمر A70 مقاومت تک محوری 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 تک محوری 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 در مخلوط در تمامی جهات و به‌صورت منظم پخش شده و پس از تراکم، اصطکاک و گیرداری خوبی بین دانه‌های خاک ایجاد می‌کند؛ اما افزودن پلیمر بیش از یک حد مشخص سبب پخش نامنظم پلیمر مخلوط و در نتیجه عدم تراکم مناسب می‌شود که افت مقاومت را نیز به همراه دارد. درواقع می‌توان گفت با افزایش مقدار پلیمر از یک حدی به بعد، پلیمر مانع از ارتباط مؤثر ذرات خاک با یکدیگر می‌شود که افت مقاومت را در پی دارد. همچنین مطابق شکل ۱۰ با افزایش پلیمر میزان انعطاف‌پذیری نمونه هنگام شکست افزایش یافته به‌طوری که با نمونه‌های A3 و B3 بیشترین کرنش را هنگام شکست دارند که دلیل آن را می‌توان خاصیت انعطاف‌پذیری پلیمر دانست. دلیل افزایش مقاومت و انعطاف‌پذیری خاک تثبیت‌شده با پلیمر را می‌توان این‌گونه بیان کرد که با خشک شدن مخلوط خاک و پلیمر امولسیون‌ی شبکه‌ای از زنجیره‌های پلیمری در اطراف ذرات خاک تشکیل می‌شود که افزایش مقاومت مکانیکی و شکل‌پذیری نمونه‌ها را در پی دارد [35]، [11].

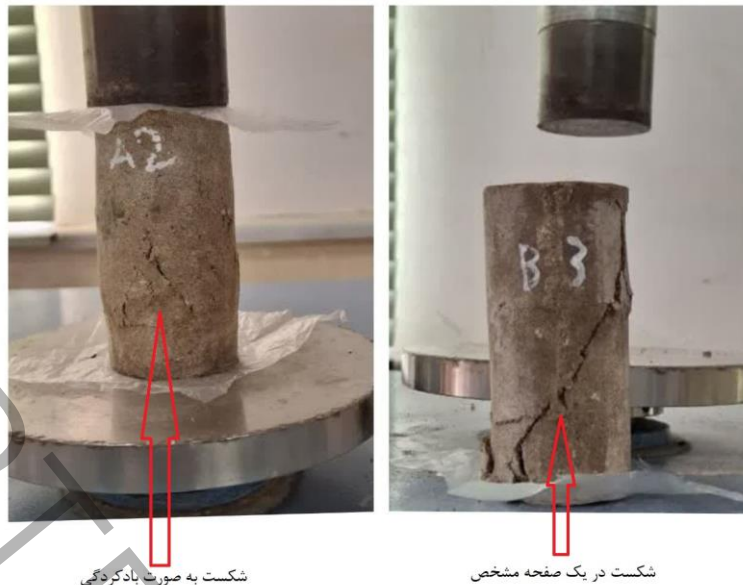
لازم به ذکر است که نتایج این پژوهش با نتایج پژوهش‌های پیشین نیز همخوانی دارد؛ به‌عنوان نمونه در پژوهشی که در سال ۲۰۲۲ توسط کومار و همکارانش به‌منظور بررسی خواص خاک ماسه‌ای تثبیت‌شده با پلیمر امولسیون‌ی انجام شد، نشان داد که با تبخیر آب پلیمر امولسیون‌ی در مخلوط خاک تثبیت‌شده، پیوند بین ذرات خاک ایجادشده 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 تک محوری 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 [16]. علاوه بر این نتایج تحقیقات شیا^۱ و همکارانش در سال ۲۰۲۴ نشان می‌دهد که با افزایش مقدار پلیمر امولسیون‌ی به‌منظور تثبیت خاک، ابتدا مقاومت فشاری تک محوری 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 [36].

¹ Xia



شکل 10: نمودار تنش-کرنش حاصل از آزمایش مقاومت فشاری تک-محوری
 Figure 10. Stress-strain curve obtained from the unconfined compression strength test

از طرفی دیگر مطابق شکل ۱۰ با مقایسه نتایج مقاومت فشاری خاک 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 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 به صورت خم‌های شکل یا بادکردگی صورت می‌گیرد که بیانگر شکستی انعطاف‌پذیر است [14] و شکست نمونه‌های تثبیت‌شده با پلیمر B70 در صفحه‌ای با زاویه ۴۵ درجه صورت می‌گیرد که نشانگر یک شکست ترد است [37]. 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.



شکل 11: نحوه شکست نمونه‌های تثبیت‌شده با پلیمر تحت آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری
Figure 11. Failure modes of polymer-stabilized specimens under unconfined compression tests

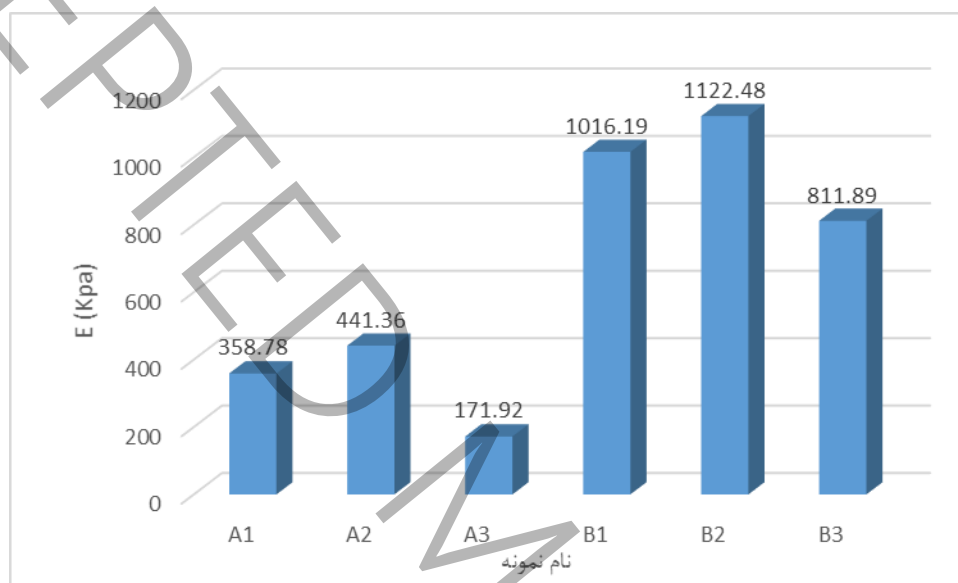
از دیگر نتایج قابل‌استخراج از آزمایش تک‌محوری محاسبه مدول الاستیسیته است که یکی از مسائل اصلی در مهندسی عمران به حساب می‌آید؛ چراکه هر چه مقدار این پارامتر بیشتر باشد، مصالح در برابر تنش‌های وارده تغییر شکل کمتری خواهد داشت [38]. این پارامتر با ترسیم نمودار تنش و کرنش حاصل می‌شود؛ به‌طوری‌که مدول الاستیسیته 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 ارائه شده است که بر اساس آن نمونه B2 بیشترین مدول الاستیسیته و در نتیجه کمترین تغییر شکل را در مقابل بار وارده دارد.

3-3- 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 و 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 زل‌های پلیمر در اطراف ذرات خاک منجر به تشکیل پل‌هایی بین ذرات می‌شود که در هم‌بستگی درون ماتریکس خاک را بهبود می‌بخشد و در نتیجه مقاومت برشی خاک بهبود می‌یابد. همچنین با توجه به نتایج نمونه‌های A2 و B2 از آن جهت که دارای پارامترهای مقاومتی برشی حداکثر هستند، نمونه‌های بهینه به حساب می‌آیند. لازم به ذکر است که به‌کارگیری پلیمر با غلظت ۵۰٪ سبب افت پارامترهای مقاومت برشی شده و دلیل آن را می‌توان عدم توزیع یکنواخت پلیمر در مخلوط خاک تثبیت‌شده دانست. علاوه بر این نتایج نشان می‌دهد که خاک تثبیت‌شده با پلیمر B70 نسبت به خاک تثبیت‌شده با پلیمر A70 مقاومت برشی بیشتری داراست که علاوه بر خواص مکانیکی این پلیمر، گرانی 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 تثبیت‌شده با محلول پلیمر نشان می‌-

^۱ Boaventura

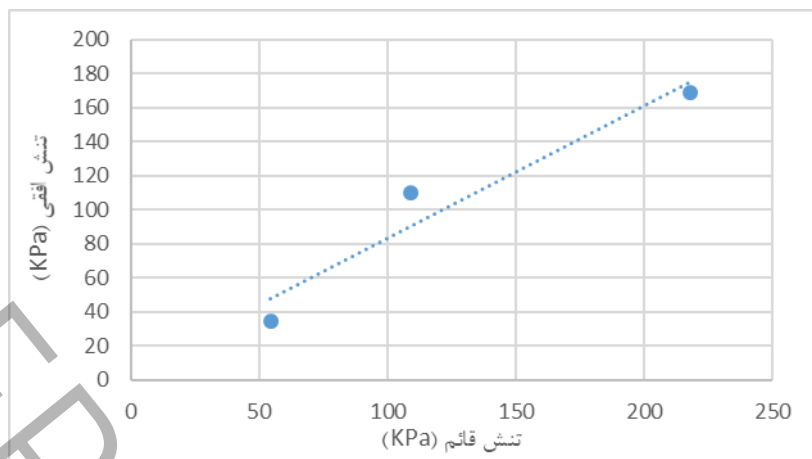
دهد که پس از گذشت ۲ روز از ساخت نمونه‌ها و خشک شدن کامل آن‌ها، افزایش قابل توجهی در مقاومت برشی خاک تثبیت شده مشاهده می‌شود که دلیل آن را می‌توان افزایش چسبندگی بین ذرات خاک و افزایش پیوستگی ذرات خاک دانست [20]. علاوه بر این نتایج این پژوهش با پژوهش باباتونده^۱ و همکارانش نیز مطابقت دارد. مطابق نتایج پژوهش ایشان در سال ۲۰۲۴، به کارگیری پلیمر برای تثبیت خاک سبب کاهش فضاهاى خالی شده و یک نمونه فشرده تری را ایجاد می‌کند و به هم پیوستگی ذرات را افزایش 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 [39] که با نتایج تحقیق پیشرو همخوانی دارد.



شکل 12: مقادیر مدول الاستیسیته خاک تثبیت شده

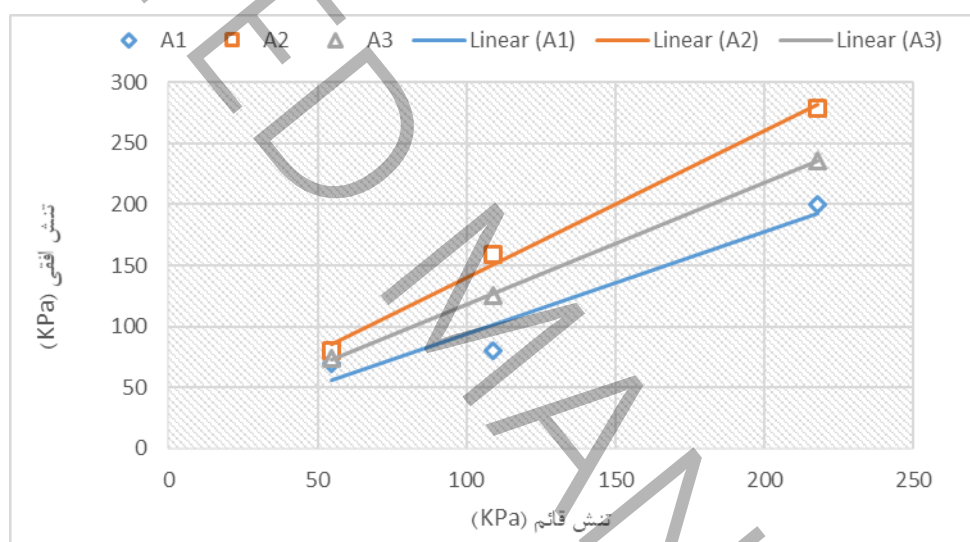
Figure 12. Elastic modulus values of the stabilized soil

¹ Babatunde



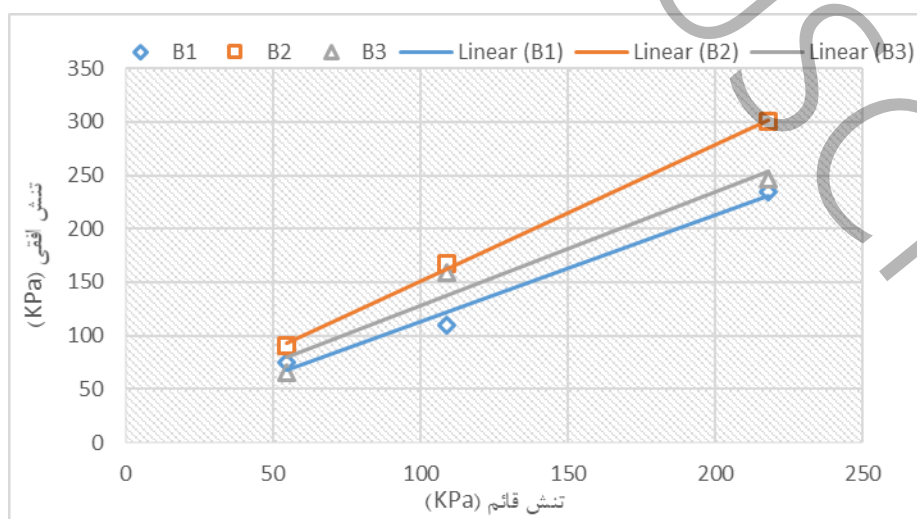
(الف)

(A)



(ب)

(B)

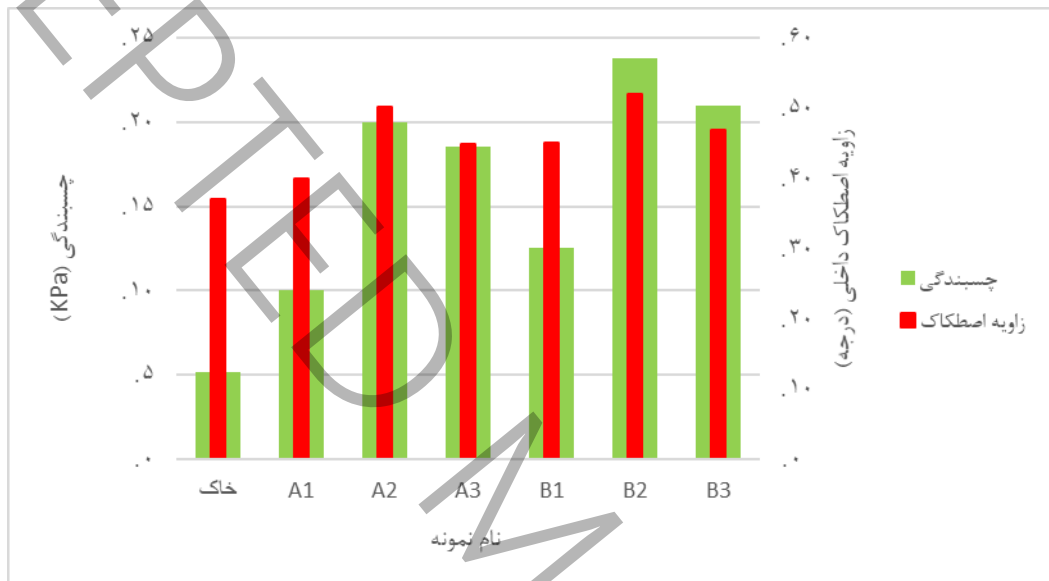


(ج)

(C)

شکل 13: نمودار تنش افقی-تنش قائم الف- خاک تثبیت نشده ب- خاک تثبیت شده با A70 ب- خاک تثبیت شده با B70

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



شکل 14: چسبندگی و زاویه اصطکاک خاک تثبیت نشده و تثبیت شده با پلیمر

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

جدول 2: مقاومت برشی خاک تثبیت نشده و تثبیت شده با پلیمر

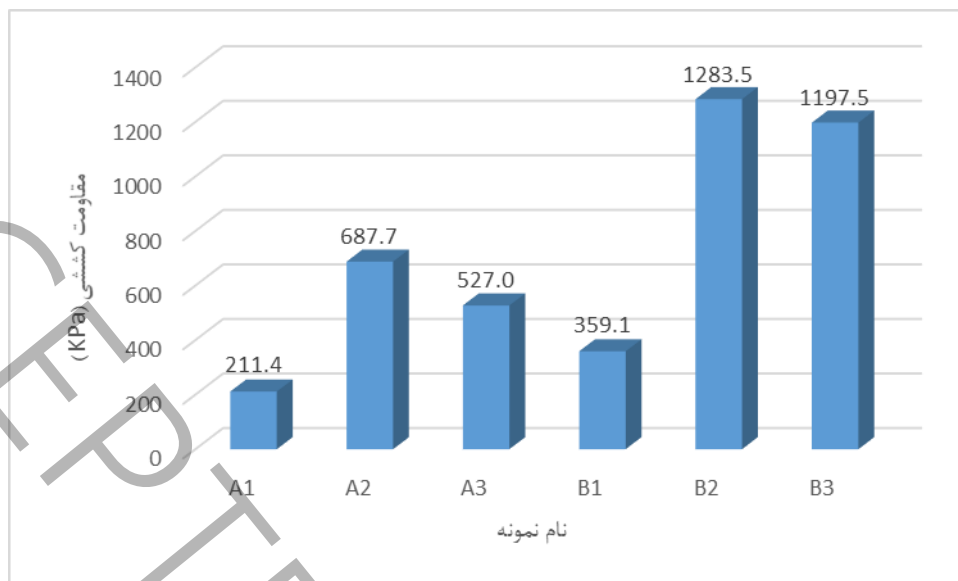
Table 2. Shear strength of unstabilized and polymer-stabilized soil

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

۱۴۷/۵۳	۱۰۹	
۲۷۵/۰۶	۲۱۸	
۷۱/۶۹	۵۴/۵	A3
۱۲۴/۸۷	۱۰۹	
۲۳۱/۲۵	۲۱۸	
۶۵/۶۹	۵۴/۵	B1
۱۱۸/۸۸	۱۰۹	
۲۲۵/۲۷	۲۱۸	
۹۳	۵۴/۵	B2
۱۶۲/۲۱	۱۰۹	
۳۰۰/۶۴	۲۱۸	
۷۸/۷۷	۵۴/۵	B3
۱۳۶/۵۴	۱۰۹	
۲۵۲/۰۸	۲۱۸	

3-4- نتایج آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم

در این بخش اثر پلیمرهای امولسیون دوسدار محیط‌زیست A70 و B70 بر مقاومت کششی غیرمستقیم خاک ماسه‌بادی موردبررسی قرار می‌گیرد. شکل ۱۵ نتایج حاصل از آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های خاک ماسه‌بادی تثبیت‌شده 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 تثبیت‌شده 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 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 ۶/۱۸٪، ۲۸٪ برابر می‌شود. از این‌رو 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 با 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 [40].



شکل 15: نتایج آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم

Figure 15. Results of the indirect tensile strength test

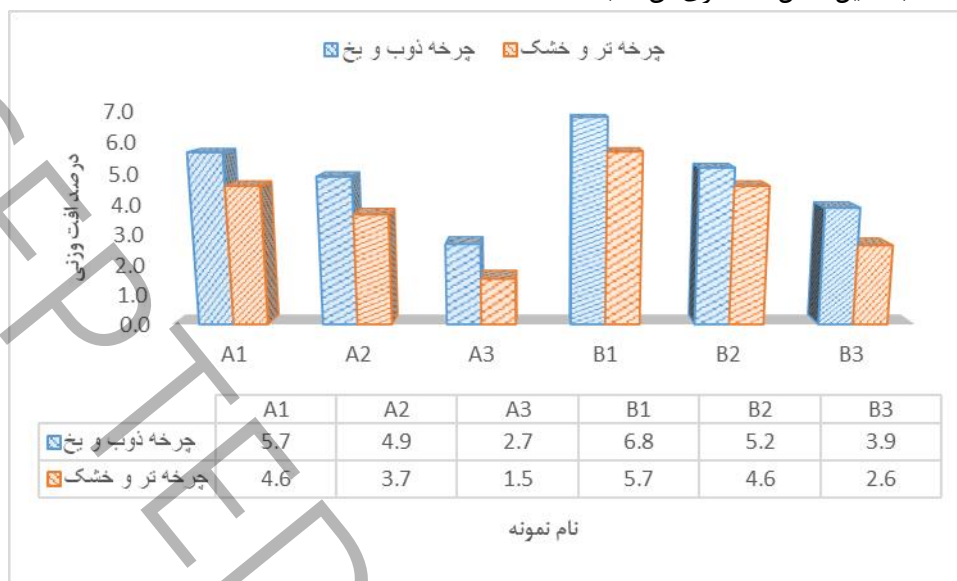
3-5- نتایج آزمایش دوام

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 [41] 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 پلی‌اکریل‌آمید آنیونی، پلیمر پلی‌اکریل‌آمید 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 [19]. 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 [41]. 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 [42].

¹ Bozyigit

² Bai

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 [43].



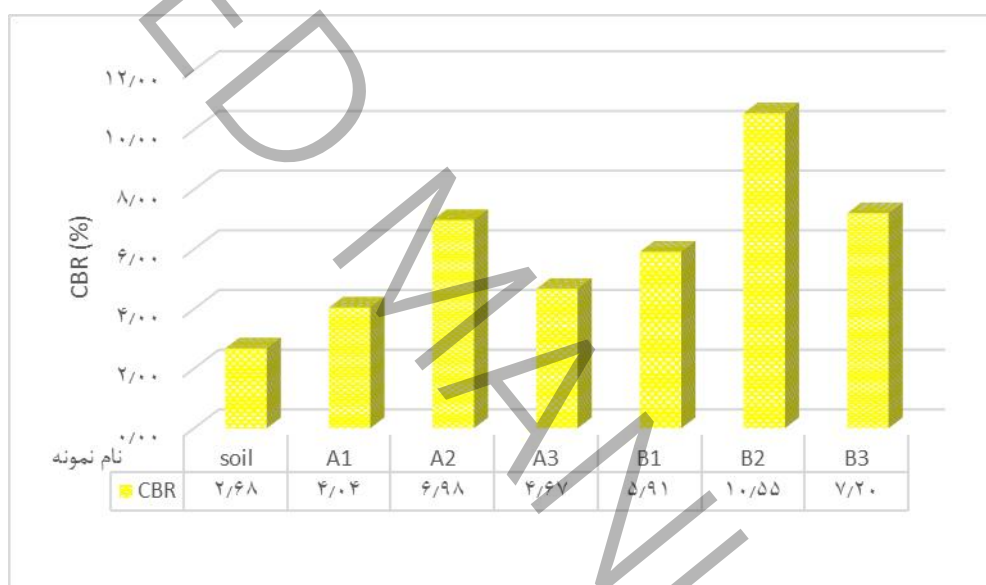
شکل 16: نتایج آزمایش دوام

Figure 16. Durability test results

3-6- نتایج آزمایش CBR

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 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 فرآیندها منجر به افزایش چسبندگی بین ذرات و افزایش مقاومت CBR می‌گردد. حال آنکه با افزایش مقدار پلیمر تا حد بهینه، پلیمر سطح تمام ذرات خاک را به‌طور یکنواخت و کامل بپوشاند و این امر حداکثر پیوند بین ذرات را ایجاد می‌کند و ساختار خاک را به یک توده منسجم و مقاوم تبدیل می‌نماید. همچنین پلیمر با پر کردن بخشی از فضای خالی، بدون آنکه ذرات را به‌طور کامل از هم جدا کند، به تراکم بهتر خاک کمک می‌کند و ذرات خاک در تماس نزدیک با یکدیگر باقی می‌مانند؛ درواقع به‌عنوان یک چسب قوی ایفای نقش می‌کند. این در حالی است که افزایش پلیمر بیش از حد بهینه، اثرات معکوس دارد و باعث کاهش مقاومت می‌گردد؛ چراکه در مقادیر بسیار بالا، پلیمر دیگر فقط یک چسب نیست، بلکه به‌عنوان یک فاز نرم و انعطاف‌پذیر، جایگزین بخشی از ذرات خاک می‌شود. از آنجایی که مقاومت ذاتی پلیمر از مقاومت ذرات شن و ماسه کمتر است، وجود بیش از حد آن در مخلوط، به‌طور کلی مقاومت کل کامپوزیت را کاهش می‌دهد. در نقطه بهینه، پلیمر ذرات را به هم می‌چسباند، اما در مقادیر بیش از حد، لایه‌های ضخیم پلیمر بین ذرات خاک، آن‌ها را از یکدیگر جدا می‌کند؛ درواقع 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 می‌برد و این کاهش درگیری ذرات، مستقیماً به کاهش CBR منجر می‌شود. علاوه بر این مقادیر زیاد پلیمر می‌تواند ساختار خاک را تغییر دهد و باعث ایجاد کلوخه‌های 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 تثبیت‌کننده 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 می‌شود؛ زیرا پلیمر پس از اختلاط با خاک و از دست دادن آب، یک شبکه سه‌بعدی از پیوندهای پلیمری در میان ذرات خاک تشکیل می‌دهند. این شبکه، ذرات خاک را به‌طور محکم به یکدیگر متصل کرده و پیوندهای سیمانی شدیدی ایجاد می‌کند که هم چسبندگی بین ذرات را افزایش می‌دهد و هم اصطکاک داخلی آن‌ها را بهبود می‌بخشد. در نتیجه، خاک تثبیت شده در برابر تغییر شکل و نفوذ که اساس آزمایش CBR است مقاومت بسیار بالاتری از خود نشان می‌دهد [44]. همچنین موسوی و کرموند با بررسی تأثیر پلیمر امولسیونی CBR PLUS بر ماسه رس‌دار یافتند که افزایش مقاومت کالیفرنیا در تثبیت خاک با پلیمر امولسیونی تنها تا یک مقدار بهینه اتفاق می‌افتد؛ زیرا در این نقطه، پلیمر به‌طور کامل و با حداکثر کارایی، فضای خالی بین ذرات خاک را پر کرده و یک شبکه یکپارچه و مستحکم از پیوندهای پلیمری ایجاد می‌کند. در صورت افزودن پلیمر بیش از این حد بهینه، نه تنها تمامی ذرات پوشش داده‌شده و فضای بیشتری برای ایجاد پیوندهای قوی‌تر وجود ندارد، بلکه مقدار اضافی پلیمر به‌عنوان یک لایه نرم و روان‌کار بین ذرات عمل می‌کند. 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 می‌شود [45] که با نتایج این پژوهش همخوانی دارد.



شکل ۱۷- نتایج آزمایش دوام
Figure 17. Durability test results

7-3- نتایج تحلیل آماری

همان‌طور که اشاره شد به‌منظور بررسی هرچه دقیق‌تر عملکرد خاک تثبیت‌شده از تحلیل آماری استفاده شد. به‌منظور بررسی خواص خاک تثبیت‌شده با مقادیر و غلظت‌های مختلف دو کوپلیمر امولسیونی دوستدار محیط‌زیست، از روش سطح پاسخ RSM^1 که در سال ۱۹۵۱ توسط باکس و ویلسون معرفی شد که شامل یک مجموعه از روش‌های آماری و ریاضیات کاربردی برای ساخت مدل‌های تجربی است و نرم‌افزار Design-Expert استفاده شد. نرم‌افزار Design Expert نیز یک بسته نرم‌افزاری آماری از Stat-Ease Inc است که نه تنها برای طراحی آزمایش بهینه کاربرد دارد؛ بلکه به کمک آن می‌توان رابطه بین پارامترهای وابسته و مستقل را تعیین کرد [46], [47]. در این پژوهش درصد پلیمر امولسیونی (درصد جرمی خاک خشک) و غلظت پلیمر امولسیونی را

¹ Response Surface Methodology

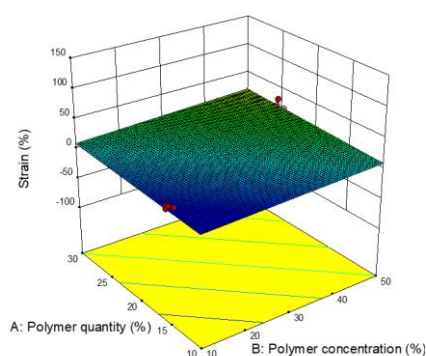
به عنوان پارامترهای مستقل و نتایج آزمایش‌های انجام شده را به عنوان متغیر وابسته در نظر گرفت و تحلیل آماری انجام داد. در جدول ۴ روابط ارائه شده توسط نرم افزار Design Expert و شکل ۱۸ و ۱۹ نمودارهای دوبعدی مربوط به این روابط را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که روابط جدول ۳، پارامتر X درصد پلیمر امولسیون (درصد جرمی خاک خشک) و Y غلظت پلیمر امولسیونی 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 تک‌محوری، مقاومت کششی، پارامترهای مقاومت برشی و مقاومت کالیفرنیا خاک افزایش و سپس کاهش می‌یابد. مقدار پلیمر امولسیونی و غلظت آن که سبب دستیابی به مقاومت‌های حداکثری می‌شود، مربوط به پلیمرها با غلظت ۳۰٪ و درصد پلیمر امولسیونی متناسب با آن حاصل شده از آزمایش تراکم است؛ از این رو می‌توان گفت دو نمونه $A2$ و $B2$ نمونه‌های بهینه هستند. همچنین با توجه اشکال ۱۸-ب و ۱۹-ب با افزایش مقدار پلیمر امولسیونی 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 ارائه شده در جداول ۳ می‌توان عملکرد خاک تثبیت شده 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.

جدول ۳: روابط بین پارامترهای مستقل و وابسته

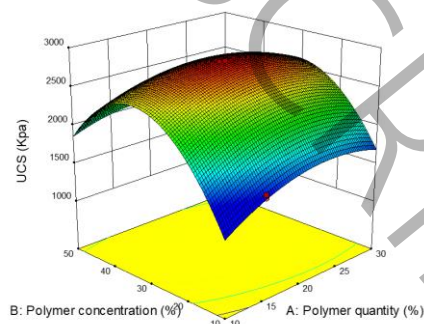
Table 3. Relationships between independent and dependent parameters

نوع پلیمر	پارامتر وابسته	رابطه	R^2
A70	مقاومت تک‌محوری	$UCS = -1009.997 + 130.1496x + 157.215y - 0.64753xy - 2.61044x^2 - 2.28153y^2$	۰/۹۹۶
	کرنش نهایی	$Strain = +3.62577 - 0.25156x + 0.39140y$	۰/۹۲۹
	مقاومت کششی	$ITS = -1484.64289 + 153.64010x + 27.89808y + 1.53898xy - 4.62116x^2 - 0.90222y^2$	۰/۹۹۹
	چسبندگی	$C = -32.74531 + 4.54934x + 0.15798y + 0.060163xy - 0.15252x^2 - 0.020075y^2$	۰/۹۹۹
	زاویه اصطکاک	$Friction = +11.02609 + 1.91739x + 1.04421y + 4.00220E - 003xy - 0.041325x^2 - 0.018177y^2$	۰/۹۹۸
	افت وزنی در اثر چرخه ذوب و یخ	$F - T = +6.50001 + 0.014025x - 0.086142y$	۰/۸۸۵
	افت وزنی در اثر چرخه تر و خشک	$W - D = +6.38391 - 0.063558x - 0.062440y$	۰/۹۵۴

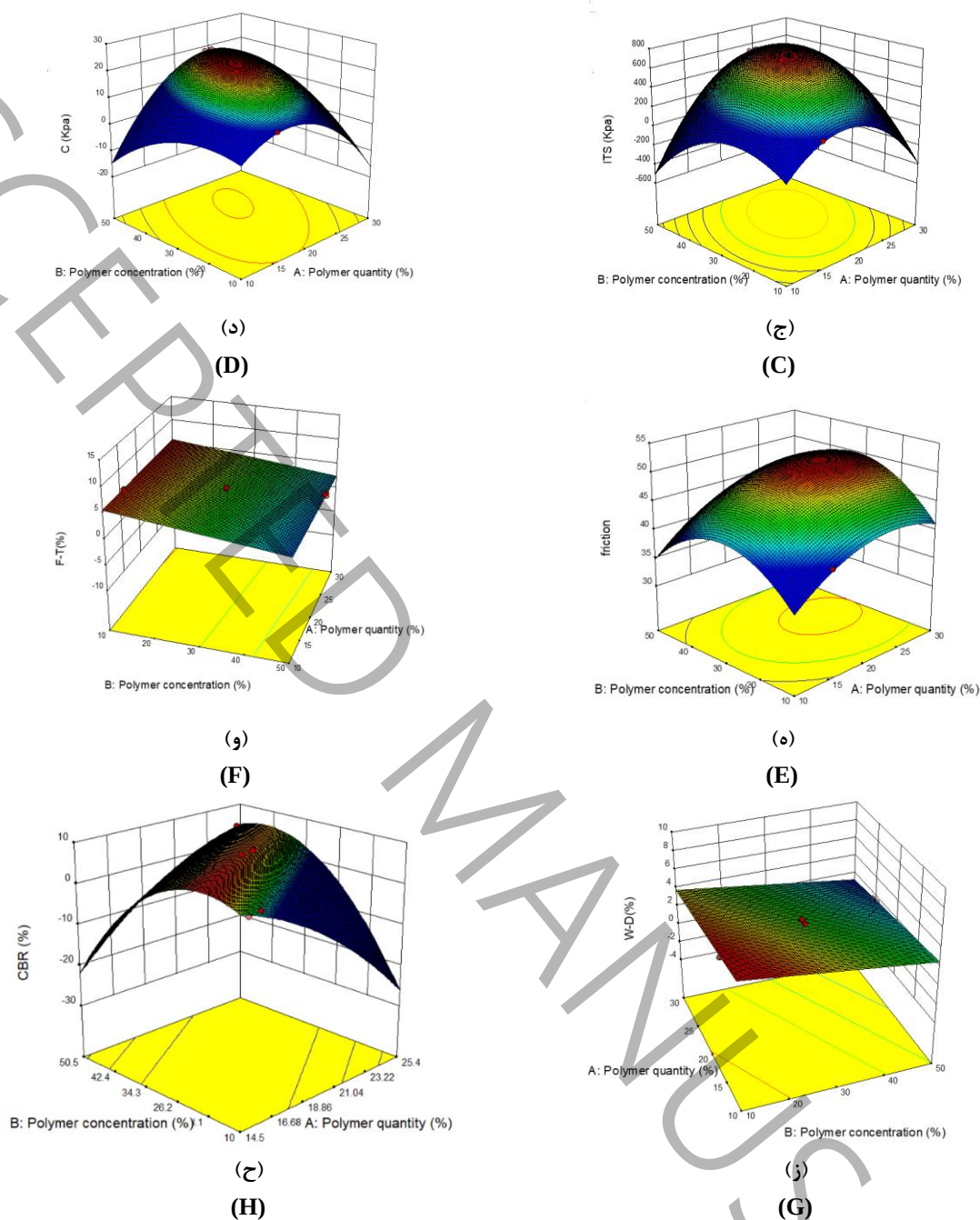
	مقاومت کالیفرنیا	$CBR = +2.6638 + 1.8022x - 0.83569y + 0.1308xy - 0.1496x^2 - 0.0285y^2$	۰٫۹۵۴
B70	مقاومت تک محوری	$UCS = -3.58942E + 005 + 59498.94514x - 1665.49701y + 154.45507xy - 2457.17676x^2 - 5.36958y^2$	۰٫۹۹ ۸
	کرنش نهایی	$Strain = -2.53570 + 0.34878x + 0.088220y$	0.925
	مقاومت کششی	$ITS = -1.35017E + 005 + 22209.08186x - 589.54026y + 56.82505xy - 916.86536x^2 - 2.15661y^2$	۰٫۹۹ ۸
	چسبندگی	$C = -1995.19700 + 329.32292x - 8.83040y + 0.83493xy - 13.58225x^2 - 0.030551y^2$	۰٫۹۹۸
	زاویه اصطکاک	$Friction = -1849.10514 + 310.62438x - 8.46827y + 0.77542xy - 12.79013x^2 - 0.026571y^2$	۰٫۹۹۸
	افت وزنی در اثر چرخه ذوب و یخ	$F - T = +9.20642 - 0.14220x - 0.070891y$	۰٫۹۷۷
	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)

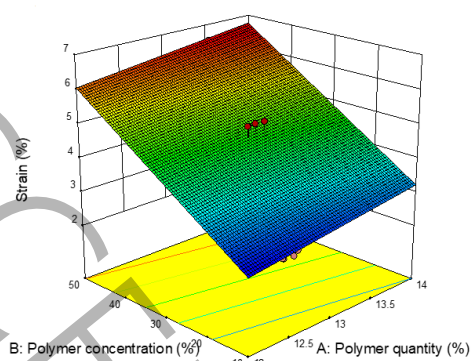


(الف)
(A)

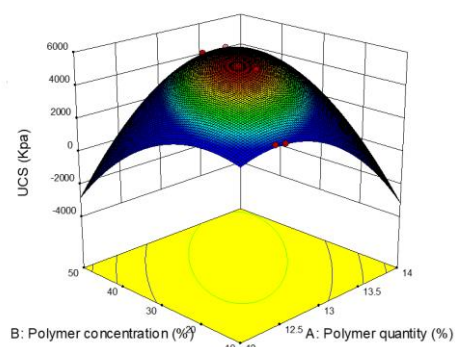


شکل 18: نمودار دوبعدی روابط پارامترهای مستقل و وابسته خاک تثبیت شده با پلیمر A70: الف-مقاومت تک محوری ب- کرنش نهایی ج-مقاومت کششی غیر مستقیم د-چسبندگی خاک ه-زاویه اصطکاک ذرات خاک و-درصد افت وزنی ناشی از چرخه ذوب و یخ ز-درصد افت وزنی ناشی از چرخه تر و خشک ح-مقاومت کالیفرنیا

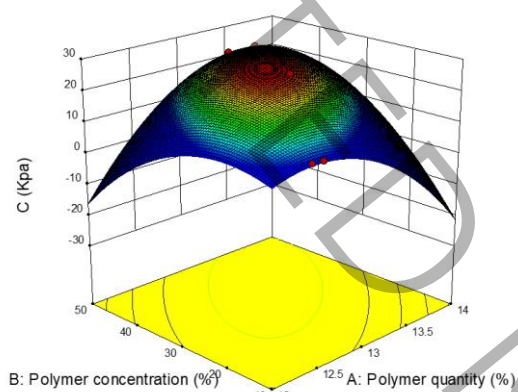
Figure 18. Two-dimensional plots illustrating the relationships between independent and dependent parameters for soil stabilized with polymer A70: (A) unconfined compressive strength, (B) ultimate strain, (C) indirect tensile strength, (D) soil cohesion, (E) soil friction angle, (F) weight loss percentage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



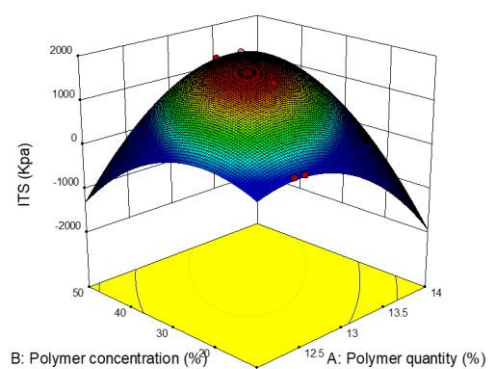
(ب)
(B)



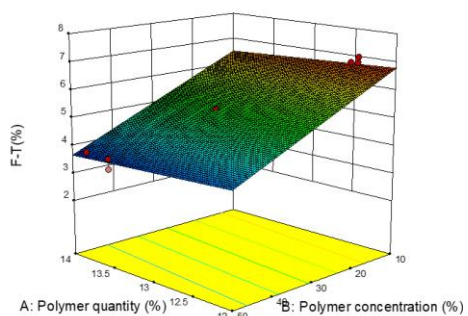
(الف)
(A)



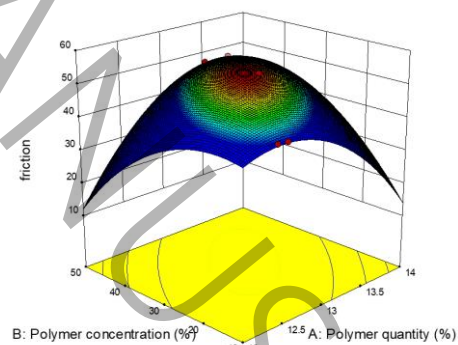
(د)
(D)



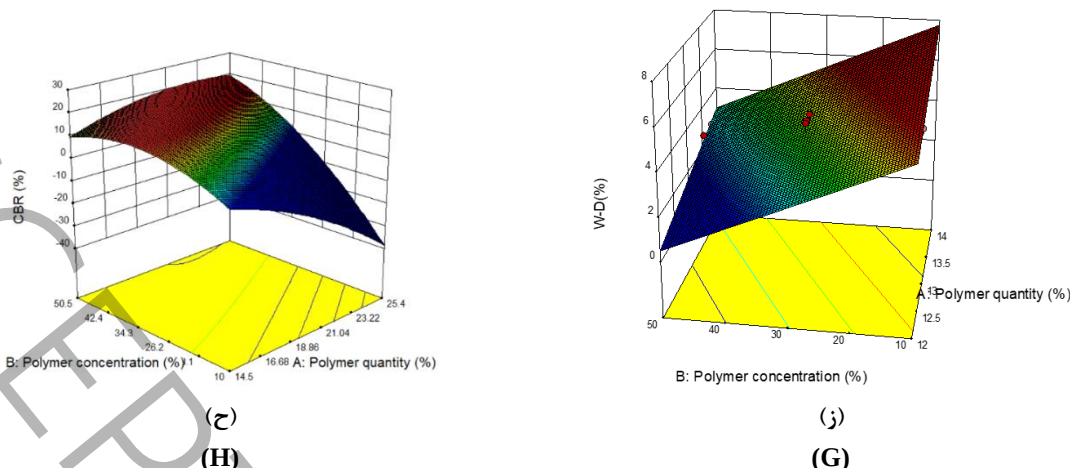
(ج)
(C)



(و)
(F)



(ه)
(E)



شکل 19: نمودار دوبعدی 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

Figure 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).

همان‌طور که اشاره شد خاک تثبیت شده با پلیمر B70 مقاومت فشاری، کششی و برشی بیشتری نسبت به خاک تثبیت شده با پلیمر A70 دارد و این در حالی است که خاک تثبیت شده با پلیمر A70 دوام بیشتری نسبت به خاک تثبیت شده با B70 دارد؛ در ادامه به منظور بررسی هرچه دقیق‌تر تأثیر دو پلیمر بر عملکرد مقاومتی خاک از نرم افزار 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 «نرمن نی» منتشر شد و به صورت گسترده‌ای برای تحلیل‌های آماری به کار می‌رود [48] 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) مورد بررسی قرار گرفت. در ابتدا توزیع نرمال داده‌ها به کمک آزمون کولموگورف-اسمیرنوف مورد بررسی قرار گرفت که نتایج آن در جدول ۵ ارائه شده است. مطابق آزمون کولموگورف-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.

جدول ۵: نتایج آزمون کولموگورف-اسمیرنوف

Table 5. 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

¹freeze-thaw

²Wet-dry

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 ۶ ارائه شده است. مطابق جدول ۶، از آنجا که 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 به‌طور مؤثری سبب بهبود مقاومت برشی خاک می‌شود.

جدول 6-نتایج آزمون آماری T

Table 6. T-test statistical results

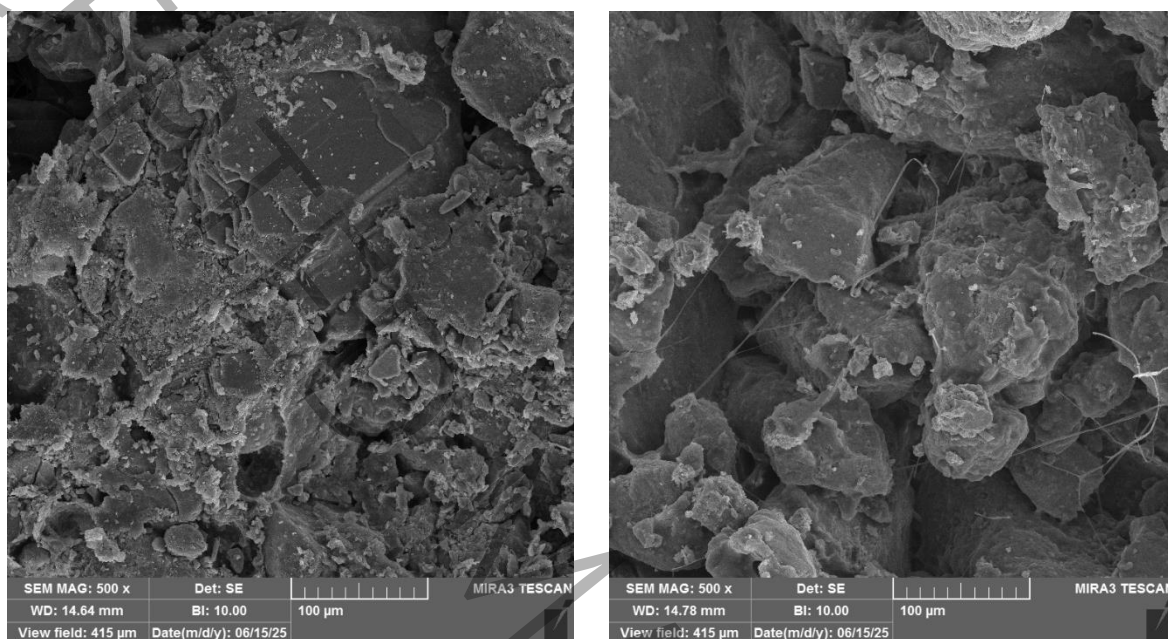
Sig. (2-tailed)	گروه‌های موردبررسی	پارامتر موردبررسی
۰/۰	۱	UCS
	۲	
۰/۰	۱	ITS
	۲	
۰/۰۰۶	۱	T-F
	۲	
۰/۰	۱	W-D
	۲	
۰/۰۷۸	۱	C
	۲	
۰/۰	۱	C
	۳	
۰/۰	۲	C
	۳	
۰/۴۶۵	۱	friction
	۲	
۰/۰۳	۱	friction
	۳	
۰/۰۲	۲	friction
	۳	

7-3-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 درهم‌تنیده مشابه تار عنکبوت تشکیل‌شده 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 به صورت ذرات ریز و پراکنده روی سطح سنگ‌دانه‌ها مشاهده می‌شود. این 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.



(ب) (الف)
(B) (A)

شکل ۲۰- تصاویر میکروسکوپی در مقیاس $100\mu\text{m}$ لف A2- ب B2

Figure 20. Microscopic images at scale $100\mu\text{m}$ (A) A2, (B) B2.

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 از جمله 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 این رو 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 امولسیون‌ی مورد نیاز برای رسیدن به حداکثر مقدار تراکم برای پلیمر A70 به ترتیب برای غلظت‌های ۱۰، ۳۰ و ۵۰٪ برابر با ۲۰/۱، 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 افزایش‌یافته 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 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.

۴- 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.

۵- 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 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/(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, 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 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, 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 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. Jabroui, 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).

ACCEPTED MANUSCRIPT