



Semnan University



Research Article

## Experimental Investigation of the Effect of Cement and Recycled HDPE Granules on the Strength, Durability and Microstructure of Sandy Soil

Gholipoor Noroozi\*<sup>1</sup>, Ashkan, Ardakani, Alireza<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Department of Civil Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, I. R. Iran.

### PAPER INFO

#### *Paper history:*

Received: 2025-12-06

Revised: 2026-03-29

Accepted: 2026-03-30

#### *Keywords:*

Cement stabilized soil,  
Recycled HDPE,  
Granules,  
Strength,  
Durability under wetting  
–drying cycles,  
Scanning electron  
microscopy (SEM).

### ABSTRACT

Increasing environmental threats from cement manufacturing and disposal of plastic and polymer waste necessitated the implementation of sustainable alternatives in soil stabilization. This study focuses on the effects of application of cement and recycled high-density polyethylene (HDPE) granules on the strength, and microstructure of sandy soil. The mixtures were prepared with different amounts of cement (5%, 8%, and 11% dry weight) and recycled HDPE granules (2%, 4%, 6%, and 8% dry weight) and were subjected to UCS and ITS testing. The microstructural study was also done using scanning electron microscopy (SEM). Tests showed that increasing cement content from 5% to 11% produced compressive strength increases of 340% and a 261% increase in tensile strength over the control sample, which made it more brittle in terms of mechanical response; however, incorporating recycled HDPE granules at the optimal amounts (4-6%) made the mixture more ductile and better overall mechanically. Moreover, the results indicated that incorporating HDPE granules within the range of 4%–6%, in conjunction with optimum cement content, can effectively enhance the durability and strength retention of the stabilized soil under wetting–drying cycles, whereas higher contents lead to a reduction in performance. SEM observations showed that HDPE granules were compatible with the cementitious matrix at these optimum levels. The findings suggest that recycled HDPE granules are able to be used in optimal amounts to improve the mechanical performance of cement-stabilized soils, whereas the sustainable management of polymer waste in geotechnical engineering is served better. Unlike earlier studies that mostly employed virgin or non-recycled polyethylene on clayey soils, this study, for the first time, employs recycled HDPE granules to enhance the mechanical behavior of sandy soils and thus brings novel insights into the mechanisms by which their strength is improved.

\* Corresponding author.

E-mail address: [ashkan.gh@eng.ikiu.ac.ir](mailto:ashkan.gh@eng.ikiu.ac.ir)

**How to cite this article:** Gholipoor Noroozi, A., & Ardakani, A. (2026). Experimental investigation of the effect of cement and recycled HDPE granules on the strength, durability and microstructure of sandy soil. *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*, 11(4), 107-140.

<https://doi.org/10.22075/jtie.2026.39971.1750>

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



مقاله پژوهشی

بررسی آزمایشگاهی تأثیر سیمان و گرانول‌های HDPE بازیافتی بر مقاومت، دوام و

ریزساختار خاک ماسه‌ای

اشکان قلی‌پور نوروژی<sup>۱\*</sup>، علیرضا اردکانی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.

چکیده	اطلاعات مقاله
<p>با توجه به نگرانی‌های فزاینده‌ی زیست‌محیطی ناشی از تولید سیمان و دفع ضایعات پلاستیکی و پلیمری، استفاده از مواد جایگزین پایدار در تثبیت خاک مورد توجه قرار گرفته است. در این تحقیق، تأثیر سیمان و گرانول پلی‌اتیلن بازیافتی با دانسیته‌ی بالا (HDPE) بر مقاومت و ریزساختار خاک ماسه‌ای بررسی شده است. مخلوط‌هایی با مقادیر مختلف سیمان (۵، ۸ و ۱۱ درصد وزنی) و گرانول HDPE بازیافتی (۲، ۴، ۶ و ۸ درصد وزنی) تهیه شده و تحت آزمایش‌های مقاومت فشاری محصورنشده (UCS) و مقاومت کششی غیرمستقیم (ITS) قرار گرفته‌اند. همچنین، تحلیل ریزساختاری با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) انجام شده است. نتایج نشان داد که افزایش مقدار سیمان از ۵ به ۱۱ درصد موجب افزایش مقاومت فشاری تا ۳۴۰ درصد و افزایش مقاومت کششی تا ۲۶۱ درصد، نسبت به نمونه‌ی شاهد می‌شود، اما رفتار مکانیکی تردتری ایجاد می‌کند. افزودن گرانول HDPE بازیافتی در مقادیر بهینه (۴-۶ درصد)، سبب بهبود شکل‌پذیری و افزایش مقاومت مکانیکی شد. همچنین، نتایج نشان داد که افزودن گرانول HDPE در محدوده‌ی ۴ تا ۶ درصد، در کنار مقادیر بهینه‌ی سیمان، می‌تواند به‌طور مؤثری دوام و نگهداشت مقاومت خاک تثبیت‌شده را در برابر چرخه‌های تر و خشک شدن بهبود بخشد، در حالی که مقادیر بالاتر منجر به افت عملکرد می‌شوند. نتایج ریزساختار نیز مؤید سازگاری گرانول HDPE با ماتریس سیمانی در مقادیر بهینه بود. این نتایج نشان می‌دهند که می‌توان از گرانول‌های HDPE بازیافتی در یک مقدار بهینه برای بهبود مقاومت مکانیکی خاک‌های تثبیت‌شده با سیمان استفاده نمود. این امر، به مدیریت پایدار پسماندهای پلیمری با کاربرد آنها در مهندسی ژئوتکنیک نیز کمک می‌کند. برخلاف اکثر مطالعات قبلی که از پلی‌اتیلن‌های دست‌نخورده یا غیربازیافتی استفاده کرده و عمدتاً بر خاک‌های رسی متمرکز بوده‌اند، ویژگی منحصربه‌فرد این تحقیق، در بکارگیری گرانول‌های HDPE بازیافتی برای بهسازی خاک‌های ماسه‌ای و بررسی رفتار مقاومتی آنها است.</p>	<p>دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۹/۱۵ بازنگری مقاله: ۱۴۰۵/۰۱/۲۹ پذیرش مقاله: ۱۴۰۵/۰۱/۱۰</p> <p>واژه‌های کلیدی: خاک تثبیت‌شده با سیمان، گرانول HDPE بازیافتی، مقاومت، دوام در برابر تر و خشک شدن، میکروسکوپ الکترونی روبشی.</p>

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: [ashkan.gh@eng.ikiu.ac.ir](mailto:ashkan.gh@eng.ikiu.ac.ir)

استناد به این مقاله: قلی‌پور نوروژی، ا. و اردکانی، ع. ۱۴۰۴. بررسی آزمایشگاهی تأثیر سیمان و گرانول‌های HDPE بازیافتی بر مقاومت، دوام و ریزساختار خاک ماسه‌ای. مهندسی زیرساخت‌های حمل و نقل، ۱۱(۴)، ۱۰۷-۱۴۰.

## ۱. مقدمه

۲۰۲۰؛ نگی و همکاران، ۲۰۱۷). این خواص، با افزایش مقدار سیمان و طولانی‌تر شدن زمان عمل‌آوری بهبود می‌یابند، در حالی که رطوبت بهینه کاهش یافته و وزن مخصوص خشک حداکثر افزایش می‌یابد (یانگ و همکاران، ۲۰۲۰). همچنین، افزودن سیمان به خاک رس منجر به افزایش مقاومت فشاری تا ۶۸ درصد و کاهش شاخص خمیری تا ۳۴ درصد شده است (نگی و همکاران، ۲۰۱۷). در مطالعه‌ای جامع، روشن و رشید (۲۰۲۴)، عملکرد خاک‌های تثبیت شده با سیمان را نسبت به سایر مواد نظیر آهک، ژئوپس و بیوپلیمر از نظر دوام و مقاومت بررسی کردند. نتایج نشان داد که عملکرد خاک تثبیت شده با سیمان به طور قابل توجهی تحت تأثیر نوع خاک، نوع و میزان سیمان، دوره‌ی عمل‌آوری، شاخص خمیری و شرایط زیست‌محیطی است. گو و همکاران (۲۰۲۱) گزارش نموده‌اند که با افزایش مقدار سیمان و مدت زمان عمل‌آوری، مقاومت فشاری خاک ماسه‌ای به شکل قابل توجهی افزایش می‌یابد. سایر مطالعات نیز به بهبود مقاومت فشاری و چسبندگی خاک‌های چسبنده، و افزایش سختی اولیه‌ی خاک‌های ماسه‌ای (ساس و گلوخوفسکی، ۲۰۱۶)، بهبود مقاومت کششی، مقاومت فشاری و سختی برشی اولیه در ماسه‌های با دانه‌بندی یکنواخت (کورتا و همکاران، ۲۰۲۴) و افزایش مقاومت فشاری ۲۸ روزه، مقدار CBR غرقاب، مدول عکس‌العمل بستر و مدول گسیختگی در خاک‌های رس، ماسه و شن (پونگسیواساتیت و همکاران، ۲۰۱۹)، در اثر افزودن سیمان اشاره کرده‌اند. به طور کلی، مطالعات انجام شده، بر نقش مثبت سیمان در بهبود ویژگی‌های مکانیکی خاک، از جمله افزایش مقاومت فشاری، افزایش سختی، کاهش تراکم‌پذیری، و تغییر رفتار مکانیکی خاک به رفتار تردتر تأکید دارند (جیانگ و همکاران، ۲۰۱۵؛ استارچر و لیو، ۲۰۱۳؛ کنسولی و همکاران، ۱۹۹۸، ۲۰۰۴).

در کشورهای در حال توسعه، پروژه‌های عمرانی با سرعت فزاینده‌ای در حال گسترش هستند که این امر تقاضا برای مصالح ساختمانی با کارایی بالا را نیز افزایش داده است (دریایی و کاشفی‌پور، ۲۰۱۱). خاک به عنوان یکی از عناصر حیاتی در تأمین پایداری سازه‌ها نقش اساسی ایفا می‌کند. با این حال، خاک‌های سست یا نرم طبیعی، فاقد مقاومت مکانیکی کافی برای تحمل بارهای محوری، جانبی یا ترفیکی بوده و در نتیجه می‌توانند منجر به ناپایداری، ایجاد ترک و در نهایت گسیختگی سازه شوند (اونیلوو، ۲۰۱۹).

خصوصیات خاک را می‌توان از طریق روش‌های بهسازی مکانیکی (مانند تراکم و زهکشی)، یا شیمیایی (مانند استفاده از مواد سیمانی) بهبود بخشید (چانگ و همکاران، ۲۰۱۶). متداول‌ترین روش تثبیت خاک، استفاده از سیمان پرتلند است که طی آن ترکیبات هیدراته‌ای نظیر ژل کلسیم-سیلیکات-هیدرات (C-S-H) و کلسیم-آلومینات-هیدرات (C-A-H) تشکیل می‌شوند. این ترکیبات، موجب افزایش مقاومت فشاری و خمشی، سختی و دوام خاک می‌گردند (اونیلوو، ۲۰۱۹؛ ارن و فیلیز، ۲۰۰۹). تثبیت خاک با سیمان، سبب افزایش ظرفیت باربری، کاهش حساسیت به رطوبت و پدیده‌ی تورم/انقباض، و کاهش شاخص خمیری آن می‌شود (گروس و وین، ۲۰۲۰). با این وجود، خاک مورد استفاده در تثبیت با سیمان، باید دارای شرایطی از جمله مواد آلی کمتر از ۲ درصد و عاری از املاح مخرب نظیر سولفات‌ها باشد، چرا که این مواد ممکن است فرآیند هیدراتاسیون را مختل کنند (پاتل، ۲۰۱۹).

مطالعات متعددی گزارش داده‌اند که افزودن سیمان به خاک، موجب افزایش مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته، مقاومت برشی و کاهش کرنش شکست می‌گردد که در نهایت رفتار تردتری را در خاک ایجاد می‌کند (شوش‌پاشا و شیروانی، ۲۰۱۵؛ یانگ و همکاران،

مطالعات بسیاری استفاده از پلاستیک‌های بازیافتی نظیر پلی‌اتیلن ترفتالات (پت)، پلی‌اتیلن، پلی‌پروپیلن، پلی‌وینیل کلراید و سایر پلیمرهای مصنوعی را برای بهبود خواص مکانیکی خاک مورد بررسی قرار داده‌اند. این مطالعات، اثرات مثبت ضایعات پلاستیک را بر ویژگی‌هایی مانند مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مقاومت برشی، CBR، افزایش کرنش شکست و شکل‌پذیری، پایداری حجمی، نفوذپذیری، دوام در برابر چرخه‌های تر و خشک، و عملکرد زیست‌محیطی گزارش کرده‌اند (کومار و همکاران، ۲۰۰۶؛ گوناسکاران و سانديا، ۲۰۱۸؛ پانتاوانه، ۲۰۱۹؛ جاسیم و همکاران، ۲۰۲۱؛ مکا و پاتل، ۲۰۲۱؛ مداح و همکاران، ۲۰۲۲؛ الماجد و همکاران، ۲۰۲۲). بنا بر گزارش آنها، تأثیر این افزودنی‌ها، به شکل (مثلاً پودر، نوار، گرانول و غیره)، اندازه و مقدار آنها بستگی داشته و مکانیسم‌های اصلی عملکرد آنها، شامل تسلیح ماتریس خاک، پر کردن فضاهای خالی، ایجاد اتصال بین ذرات، و افزایش سختی و چقرمگی خاک است.

در سال‌های اخیر، مطالعاتی به بررسی تأثیر افزودن همزمان سیمان و ضایعات پلیمری یا پلاستیکی بر خواص مکانیکی و دوام خاک پرداخته‌اند. ترکیب فرآیند هیدراتاسیون سیمان با تسلیح الیافی، منجر به بهبود مقاومت فشاری، کاهش ترک‌خوردگی و افزایش شکل‌پذیری مخلوط‌ها شده است (استارچر و لیو، ۲۰۱۳). عملکرد مکانیکی این ترکیبات، تحت تأثیر نوع و مقدار الیاف (تاجدینی و همکاران، ۲۰۱۸)، نوع خاک، دوره‌ی عمل‌آوری (خطاک و الراشیدی، ۲۰۰۶) و میزان سیمان (یانگ و همکاران، ۲۰۲۲؛ صفدر و همکاران، ۲۰۲۲) قرار دارد. مطابق مطالعات قبلی، تسلیح الیافی نه تنها موجب افزایش مقاومت کششی می‌شود (خطاک و الراشیدی، ۲۰۰۶؛ عربانی و حق‌شنو، ۲۰۱۹)، بلکه ترکیب آن با افزودنی‌هایی نظیر سیمان و آهک می‌تواند منجر به افزایش چقرمگی، دوام در برابر یخبندان-ذوب و بهبود

تولید سیمان، علیرغم مزایای فراوان، با انتشار حدود ۰/۹۵ تن دی‌اکسید کربن به ازای هر تن تولید همراه است. علاوه بر این، تولید سیمان، سبب برهم‌زدن اکوسیستم‌ها، کاهش قابلیت تجزیه‌پذیری زیستی و ممانعت از رشد پوشش گیاهی می‌شود (چانگ و همکاران، ۲۰۱۶؛ اسمیتا و ساچان، ۲۰۱۶). همچنین، خاک‌های تثبیت شده با سیمان ممکن است در معرض تخریب ناشی از حملات سولفاتی، چرخه‌های تر و خشک شدن و یخبندان-ذوب قرار گیرند و دچار افت عملکرد شوند (فیروززی و همکاران، ۲۰۱۷؛ بهمنش و محمدنژاد، ۲۰۱۳). برخی از نقیصه‌های رفتاری خاک سیمانی، از جمله حساسیت به ترک، ریزساختار نامناسب در ناحیه‌ی خمیر سیمان و ذرات خاک، و رفتار ترد باعث شده‌اند تا محققان به دنبال استفاده از مواد افزودنی جایگزین یا ترکیبی باشند. در این راستا، پژوهش‌های متعددی به استفاده از افزودنی‌های مختلف نظیر ژئولیت، نانوسیلیس، خاکستر پوسته‌ی برنج، ژئوپلیمر، فسفوژنپس، قیر امولسیون، دوده‌ی سیلیس و ضایعات حاصل از ساخت و تخریب پرداخته‌اند (ویبوو و همکاران، ۲۰۲۳؛ کولکارنی و ماندال، ۲۰۲۲؛ ملاعباسی و همکاران، ۲۰۲۲؛ زنگ و همکاران، ۲۰۲۴؛ غدیر و رنجبر، ۲۰۱۸؛ گینگامتو و شولاپاول، ۲۰۱۸؛ وو و همکاران، ۲۰۲۲؛ نگوین و فان، ۲۰۲۱؛ چون و همکاران، ۲۰۲۰؛ باریسوغلو و همکاران، ۲۰۲۵). استفاده از این ضایعات در کاربردهای مهندسی عمران می‌تواند به عنوان روشی پایدار و مقرون‌به‌صرفه برای مدیریت مواد زائد و بهسازی خاک مورد استفاده قرار گیرد (مکارچیان و الیاس، ۲۰۱۳؛ بابو و چوکسی، ۲۰۱۱). یکی از آلاینده‌های مهم زیست‌محیطی، پسماندهای پلاستیکی هستند که از دهه‌ی ۱۹۵۰ تا کنون حدود ۳/۸ میلیارد تن تولید شده‌اند و نزدیک به ۶۰ درصد آنها در محل‌های دفن زباله یا مکان‌های غیرمجاز تخلیه شده‌اند (آمنا، ۲۰۲۲؛ گنگوار و تیواری، ۲۰۲۱).

مطالعه‌ای مرتبط با پژوهش حاضر، توسط تبسم و بیمستی (۲۰۲۲) انجام شده که در آن از گرانول‌های HDPE و پلی‌پروپیلن بازیافتی برای بهبود مقاومت خاک‌های رسی کائولینیت استفاده شده است. مطالعه‌ی مذکور، عمدتاً بر رفتار کوتاه‌مدت (مقاومت فشاری پس از ۳ و ۷ روز عمل‌آوری) تمرکز داشته و گرچه امکان‌پذیری استفاده از پلیمرهای بازیافتی در خاک‌های چسبنده را نشان داده، اما به ارزیابی مقاومت فشاری و کششی در درازمدت (۲۸ روز) و تحلیل ریزساختار نپرداخته است. در مقابل، پژوهش حاضر بر خاک‌های ماسه‌ای متمرکز است، جایی که مکانیسم‌های پیونددهی ذرات، پرکردن حفرات و تغییر ساختار ماتریس، اساساً با خاک‌های چسبنده تفاوت دارد. در این مطالعه، از گرانول‌های HDPE حاصل از بازیافت ضایعات، در ترکیب با سیمان استفاده شده است تا عملکرد مکانیکی (مقاومت فشاری و کششی) و دوام در برابر تر و خشک شدن مورد ارزیابی قرار گیرد. به منظور درک بهتر نحوه‌ی تشکیل پیوند بین ماتریس سیمانی و گرانول‌های HDPE، بررسی‌های ریزساختاری نیز به کمک SEM و با استفاده از نرم‌افزار ImageJ انجام شده است.

در این پژوهش، سعی بر آن است که خلأ موجود در ادبیات تحقیق از طریق موارد زیر برطرف گردد:

- کاربرد گرانول‌های HDPE بازیافتی در بهسازی خاک‌های ماسه‌ای تثبیت‌شده با سیمان
- ارزیابی مقاومت فشاری و مقاومت کششی در خاک بهسازی شده با سیمان و گرانول HDPE بازیافتی
- ارزیابی دوام مخلوط در شرایط محیطی، شامل چرخه‌های تر و خشک شدن
- تحلیل ریزساختاری جهت توضیح رفتار خاک بهسازی شده با سیمان و گرانول HDPE بازیافتی.

ریزساختار شود (تاماسوکی و همکاران، ۲۰۲۳). مطالعات دیگر با کاربرد نوارهای پت و پلی‌اتیلن با دانسیته‌ی بالا (HDPE) نشان داده‌اند که این ترکیبات موجب بهبود چسبندگی و افزایش مقاومت فشاری به میزان ۴۵/۶ درصد (سیلویر و همکاران، ۲۰۲۰)، کاهش شاخص خمیری و افزایش وزن مخصوص خشک حداکثر (یوهانا و همکاران، ۲۰۲۴)، و افزایش چقرمگی، پایداری بعد از ترک، و حفظ مقاومت کششی (سبحان و ماشناد، ۲۰۰۲) می‌شوند.

تحلیل‌های ریزساختار خاک سیمانی مسلح شده با ضایعات پلاستیک با روش‌های SEM و EDS نیز نشان داده‌اند که ضایعات پلاستیک می‌توانند با پر کردن فضای بین ذرات و ایجاد پیوستگی بهتر، از گسترش ترک‌ها جلوگیری کنند (یانگ و همکاران، ۲۰۲۲؛ گیرینیواس و هاناماساگار، ۲۰۲۴).

با وجود تحقیقات گسترده در زمینه‌ی استفاده از پسماندهای پلاستیکی و پلیمری در تثبیت خاک و تولید مصالح ساختمانی، بخش عمده‌ی مطالعات روی خاک‌های ریزدانه یا رسی انجام شده است و عموماً از پلاستیک‌ها و پلیمرهای غیربازیافتی یا خرد شده استفاده شده است. به ویژه، مطالعات اندکی به بررسی مقاومت خاک ماسه پس از بهسازی با گرانول‌های HDPE بازیافتی در ترکیب با سیمان پرداخته‌اند؛ موضوعی که اهمیت نوآوری پژوهش حاضر را برجسته می‌کند. برخلاف الیاف که نیاز به جهت‌گیری و مکانیزم پل‌زنی پس از شکست دارند، یا ضایعات در شکل پودر که ممکن است هنگام اختلاط ذرات بزرگتر تشکیل داده و فرآیند هیدراتاسیون را مختل کنند، گرانول‌های بازیافتی به طور یکنواخت در ماتریس خاک توزیع می‌شوند، با ایجاد قفل و بست مکانیکی، تخلخل را اصلاح کرده، تمرکز تنش را کاهش داده و بدون ممانعت از هیدراتاسیون، ساختار خاک را بهبود می‌بخشند.

خمیری (PL) و حد مایع (LL) قابل اندازه گیری نبودند، که این موضوع نشان دهندهی فقدان کانی های رسی یا سیلتی لازم برای بروز رفتار خمیری است. آزمایش تراکم استاندارد مطابق با روش ASTM-D698 انجام شد. بر اساس نتایج، وزن مخصوص خشک حداکثر ( $\gamma_{dmax}$ ) برابر با ۱۶/۹ کیلونیوتن بر متر مکعب و رطوبت بهینه (OMC) معادل ۱۳/۹ درصد تعیین گردید. همچنین، چگالی ویژه ذرات جامد (Gs) با استفاده از روش پیکنومتر و طبق استاندارد ASTM-D854 برابر ۲/۷۰۲ محاسبه شد که در محدودهی معمول برای ماسه ها قرار دارد.

برای بررسی ترکیب کانی شناسی خاک، آزمون پراش اشعهی ایکس (XRD) با استفاده از دستگاه X-ray Diffractometer انجام گرفت. الگوی پراش حاصل، حضور برجستهی کانی کوارتز را با چندین پیک تیز و پرشدت در زوایای مختلف 2θ نشان داد که دال بر غالب بودن فاز سیلیسی و ساختار کریستالی منظم نمونه است. همچنین، حضور کانی کلسیت نیز با پیک هایی با شدت کمتر شناسایی شد که به وجود مقدار محدودی از کربنات کلسیم در ترکیب خاک اشاره دارد. فقدان پیک های پهن یا نامشخص در الگوی پراش، نشان دهندهی نبود فازهای آمورف و کانی های رسی در نمونه است، که این یافته با نتایج حدود آتربرگ و رفتار غیرپلاستیک خاک مطابقت دارد. به طور کلی، نتایج آزمون XRD تأیید می کنند که خاک مورد استفاده، دارای ترکیبی نسبتاً خالص، کریستالی و عمدتاً سیلیسی با منشأ آواری- بادی است. منحنی دانه بندی و الگوی پراش XRD نمونهی خاک، به ترتیب در شکل های ۱ و ۲ ارائه شده اند.

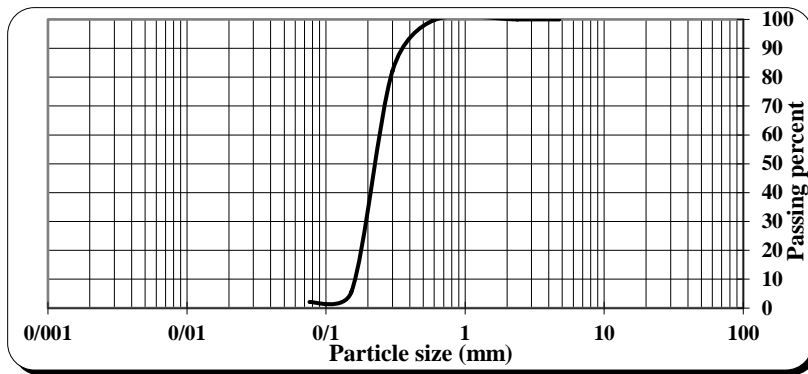
یافته های این تحقیق، در حوزهی تثبیت پایدار خاک حائز اهمیت است، زیرا نشان می دهند که استفادهی مؤثر از پسماندهای پلیمری می تواند به عنوان رویکردی مناسب در بهبود عملکرد مکانیکی خاک های ماسه ای در کاربردهای ژئوتکنیک و روسازی مورد توجه قرار گیرد.

## ۲. مواد و روش ها

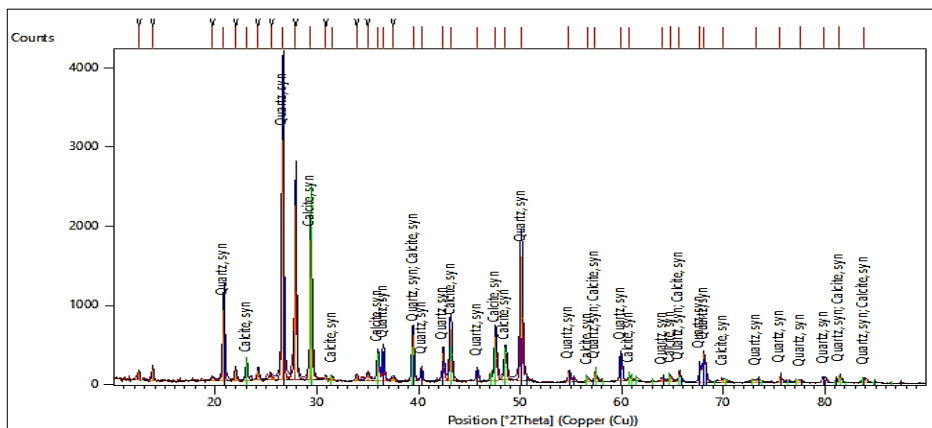
### ۲-۱. خاک

نمونهی ماسه ای مورد استفاده در این پژوهش، از نواحی کویری شهرستان ورزانه، واقع در شرق استان اصفهان برداشت گردید. به منظور شناسایی ویژگی های فیزیکی و مهندسی این خاک، مجموعه ای از آزمایش های استاندارد آزمایشگاهی شامل دانه بندی، چگالی ویژه، حدود آتربرگ و تراکم، مطابق با استانداردهای ASTM انجام شدند. آزمایش دانه بندی بر اساس استانداردهای ASTM-D422 و ASTM-D2487 اجرا شد. بر اساس نتایج به دست آمده، مقادیر D<sub>10</sub>، D<sub>30</sub> و D<sub>60</sub>، به ترتیب برابر با ۰/۱۶، ۰/۱۹ و ۰/۲۵ میلی متر محاسبه گردید. از این داده ها، ضریب یکنواختی (Cu) برابر ۱/۶ و ضریب انحنای دانه بندی (Cc) معادل ۰/۹ برآورد شد. این مقادیر، بیانگر دانه بندی ضعیف و توزیع یکنواخت ذرات در محدودهی ماسه ای هستند، به گونه ای که خاک فاقد مقدار قابل توجهی از ذرات بسیار ریز یا درشت می باشد. بر اساس منحنی دانه بندی و با استناد به سیستم طبقه بندی متحد خاک ها (USCS)، نمونه در گروه SP (ماسه ی بدانه بندی شده) طبقه بندی می شود.

بررسی حدود آتربرگ بر اساس روش ASTM-D4318 نشان داد که خاک فاقد رفتار خمیری است و در دسته ی خاک های غیرپلاستیک قرار می گیرد. مقادیر حد



شکل ۱. منحنی توزیع اندازه‌ی ذرات خاک



شکل ۲. الگوی XRD نمونه‌ی خاک

سولفات‌های متوسط مناسب است. سیمان مصرفی، از شرکت سهامی عام سیمان اصفهان (همدانیان) تأمین گردید. ترکیب شیمیایی و ویژگی‌های فیزیکی این سیمان در محدوده‌ی مشخص شده توسط استاندارد ASTM-C150 قرار دارد. ترکیب شیمیایی سیمان (بر اساس آنالیز XRF) در جدول ۱ ارائه شده است.

## ۲-۲. مواد افزودنی

### ۲-۲-۱. سیمان

در این پژوهش، از سیمان پرتلند تیپ II به‌عنوان عامل تثبیت‌کننده استفاده شد. این نوع سیمان، دارای گیرش متوسط و حرارت هیدراتاسیون کمتری نسبت به سیمان تیپ I بوده و برای شرایط محیطی با احتمال حملات

جدول ۱. آنالیز شیمیایی (XRF) سیمان

پارامتر	SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> A	Loss
مقدار (درصد)	۲۰/۳۴	۶۳/۶۴	۴/۷۵	۳/۹۲	۲/۰۲	۲/۲۸	۵/۹۶	۱/۶۰

استفاده شد. این ماده‌ی پلیمری از شرکت بهتاش پلیمر اسپادانا خریداری شد. گرانول‌های HDPE مورد استفاده در این پژوهش، از بازیافت پسماندهای پلی‌اتیلن، شامل بطری‌های دورریز، فیلم‌های بسته‌بندی و ظروف خانگی

۲-۲-۲. گرانول پلی‌اتیلن بازیافتی با دانسیته‌ی بالا (HDPE)  
برای بهبود خواص مکانیکی و دوام نمونه‌های تثبیت شده با سیمان، از گرانول پلی‌اتیلن با دانسیته‌ی بالا (HDPE)

نسبی ۰/۹۵ گرم بر سانتیمتر مکعب و نقطه ذوب در حدود ۱۴۰-۱۳۰ درجه سلسیوس بودند. مشخصات فیزیکی و شیمیایی این گرانولها، مطابق با اطلاعات ارائه شده توسط تولیدکننده، و ارزیابی بر اساس استانداردهای ASTM-D792 برای دانسیته و ASTM-D3418 برای دمای ذوب انجام شده است. تصویر گرانولهای مورد استفاده، در شکل ۳ نمایش داده شده است.



شکل ۳. گرانول HDPE بازیافتی

تهیه شدند که از مراکز بازیافت محلی در شهر اصفهان جمع آوری گردیده‌اند. پلاستیک‌های جمع آوری شده پس از شست‌وشو، خردایش، ذوب و گرانول‌سازی توسط شرکت بهتاش پلیمر اسپادانا واقع در شهرک صنعتی شمال اصفهان، به گرانول‌های HDPE بازیافتی با اندازه‌ی متوسط ۳ تا ۴ میلی‌متر تبدیل شدند. گرانول‌های HDPE بازیافتی، دارای سطحی صاف و یکنواخت، دانسیته‌ی

۳-۲. آماده‌سازی نمونه‌ها و انجام آزمایش‌ها  
برای تهیه‌ی نمونه‌های آزمایشگاهی، ابتدا خاک، سیمان (در مقادیر ۵، ۸ و ۱۱ درصد وزنی نسبت به خاک خشک) و گرانول HDPE بازیافتی (در مقادیر ۲، ۴، ۶ و ۸ درصد وزنی نسبت به خاک خشک)، به صورت خشک و دستی در سینی‌های بزرگ مخلوط شدند تا توزیع یکنواخت ذرات حاصل شود. سپس، آب لازم بر اساس درصد رطوبت بهینه‌ی حاصل از آزمایش تراکم استاندارد (مطابق استاندارد ASTM-D698) به تدریج به مخلوط خشک افزوده شد و عملیات اختلاط مرطوب تا حصول یکنواختی کامل ادامه یافت. مخلوط آماده‌شده در قالب‌های استوانه‌ای با قطر ۴۹/۵ میلی‌متر و ارتفاع ۱۱۰ میلی‌متر، در پنج لایه‌ی تقریباً مساوی ریخته شد. هر لایه با استفاده از میله‌ای فولادی و با وارد کردن ۲۵ ضربه‌ی ملایم متراکم گردید. پس از تراکم، نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط درون قالب باقی ماندند. در ادامه، نمونه‌ها از قالب خارج شده و برای جلوگیری از تبخیر رطوبت، ابتدا با پوشش پلاستیکی (سلفون) پوشانده شده و سپس در کیسه‌های زیپ‌دار پلی‌اتیلنی قرار گرفتند. نحوه‌ی عمل‌آوری نمونه‌ها در شکل ۴ ارائه شده است.  
فرآیند عمل‌آوری نمونه‌ها به مدت ۲۸ روز در دمای ثابت  $23 \pm 2$  درجه سلسیوس در شرایط کنترل شده‌ی آزمایشگاهی انجام شد. پس از پایان دوره‌ی عمل‌آوری، نمونه‌ها برای انجام آزمون‌های مقاومت فشاری، مقاومت کششی غیرمستقیم و دوام آماده شدند.

مهندسی زیرساخت‌های حمل و نقل، سال یازدهم، پیاپی چهل و چهارم، زمستان ۱۴۰۴



ب



الف

شکل ۴. الف) آماده‌سازی؛ و ب) قرارگیری نمونه‌ها داخل نایلون زیپ‌دار به منظور عمل‌آوری

نمونه‌ها دارای قطر ۴۹/۵ میلی‌متر و ارتفاع ۱۱۰ میلی‌متر بودند و نسبت ارتفاع به قطر (L/D) مطابق الزامات استاندارد حفظ شد. همچنین، اطمینان حاصل گردید که حداکثر اندازه‌ی ذرات موجود در مخلوط، از یک‌دهم قطر نمونه تجاوز نکند. برای هر طرح اختلاط، سه نمونه مورد آزمون قرار گرفت و میانگین نتایج به عنوان مقاومت فشاری نهایی گزارش شد.

داده‌های مربوط به نیرو و تغییر مکان به صورت پیوسته ثبت گردید و از منحنی تنش-کرنش برای تحلیل دقیق رفتار نمونه‌ها استفاده شد. دستگاه مورد استفاده، دستگاه تست یونیورسال Santam مدل STM-150 با ظرفیت بارگذاری ۱۵۰ تن (معادل ۱۵۰۰ کیلو نیوتن) بود. تصویر دستگاه مورد استفاده برای انجام آزمون UCS، در شکل ۵ ارائه شده است.

### ۲-۳-۱. آزمایش مقاومت فشاری محصورنشده (UCS)

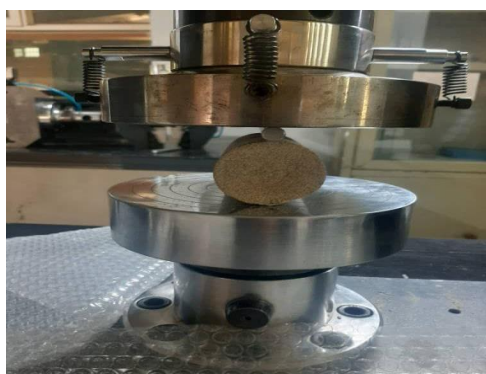
مقاومت فشاری محصورنشده، تنش فشاری نهایی است که یک نمونه‌ی استوانه‌ای محصورنشده از خاک می‌تواند در آزمون فشار ساده تحمل کند تا دچار گسیختگی شود. بر اساس استاندارد ASTM-D2166، مقاومت فشاری محصورنشده، به عنوان بار حداکثر حاصل در واحد سطح، یا بار در واحد سطح در کرنش محوری ۱۵ درصد (هر کدام که زودتر اتفاق افتد)، تعریف می‌شود.

در این پژوهش، آزمایش UCS روی نمونه‌ها مطابق استاندارد ASTM-D2166 انجام شد. نمونه‌ها تحت بارگذاری فشاری با نرخ تغییر مکان ثابت ۰/۵ میلی‌متر بر دقیقه قرار گرفتند. فرآیند بارگذاری تا وقوع گسیختگی کامل، یا رسیدن به ۱۵ درصد کرنش محوری (هر کدام که زودتر محقق شود) ادامه یافت.



شکل ۵. دستگاه انجام آزمایش مقاومت فشاری

نیروی بیشینه‌ی ثبت شده در لحظه‌ی گسیختگی، به همراه ابعاد هندسی نمونه، برای محاسبه‌ی مقاومت کششی غیرمستقیم استفاده گردید. برای اعمال بار یکنواخت خطی، از دستگاه مقاومت فشاری استفاده شد که با افزودن یک میله‌ی استوانه‌ای فلزی توپر به قطر ۱۰ میلی‌متر در قسمت فوقانی، شرایط مورد نیاز بارگذاری آزمون ITS فراهم گردید (شکل ۶). برای هر طرح اختلاط، سه نمونه مورد آزمایش قرار گرفت و میانگین نتایج به عنوان مقاومت نهایی گزارش شد.



۲-۳-۲. آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم (ITS)<sup>۱</sup> مقاومت کششی، یکی از مشخصه‌های کلیدی مصالح تثبیت شده‌ی مورد استفاده در روسازی‌ها و سازه‌هایی است که تحت تنش‌های کششی یا خمشی قرار می‌گیرند (نگی و همکاران، ۲۰۱۷). در این تحقیق، مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌ها، با استفاده از روش آزمون برزیلی و بر اساس استاندارد ASTM-C496 اندازه‌گیری شد. در این روش، نمونه‌های استوانه‌ای در وضعیت افقی قرار گرفته و تحت بارگذاری فشاری قطری قرار گرفتند تا گسیختگی رخ دهد. آزمون با نرخ بارگذاری ثابت معادل ۰/۵ میلی‌متر بر دقیقه انجام شد.



شکل ۶. تغییر ایجاد شده در دستگاه مقاومت فشاری برای انجام آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم، از زوایای مختلف

عمل‌آوری شده در مدت ۲۸ روز، ابتدا به مدت ۵ ساعت در آب با دمای  $23 \pm 2$  درجه‌ی سلسیوس غوطه‌ور شدند و سپس به مدت ۴۲ ساعت در گرمخانه با دمای  $70 \pm 2$  درجه‌ی سلسیوس خشک شدند.

هر دوره‌ی کامل، یک چرخه‌ی تر-خشک محسوب شد. آزمایش‌ها برای ۱، ۳، ۶، ۹ و ۱۲ چرخه انجام شد. پس از اتمام هر مرحله، جرم خشک نمونه‌ها اندازه‌گیری و درصد افت وزنی<sup>۲</sup> محاسبه گردید. به علاوه، مقاومت فشاری محصورنشده‌ی نمونه‌ها تعیین شد. برای تحلیل کاهش مقاومت ناشی از شرایط متناوب رطوبتی، از

### ۲-۳-۳. آزمایش دوام در برابر چرخه‌های تر و خشک شدن

با توجه به آثار مخرب چرخه‌های تر و خشک شدن و یخبندان-ذوب ناشی از تغییرات اقلیمی بر مقاومت و سختی خاک‌های بهسازی‌شده، ارزیابی دوام مصالح تثبیت شده از لحاظ کاهش جرم و افت مقاومت فشاری، ضروری است. این پدیده‌ها می‌توانند موجب نشست، ترک‌خوردگی و کاهش عملکرد سازه‌های عمرانی شوند. در این میان، دوام در برابر رطوبت، به ویژه در پروژه‌های راهسازی، از شاخص‌های کلیدی عملکرد درازمدت مصالح محسوب می‌شود. در این پژوهش، آزمون دوام بر اساس روش استاندارد انجام شد. نمونه‌های

<sup>۱</sup> Indirect Tensile Strength  
1- Weight Loss

فراهم کرده و معیار قابل اتکایی برای مقایسه‌ی ترکیبات مختلف ارائه می‌دهد. مراحل مختلف انجام آزمایش دوام، در شکل ۷ نشان داده شده است.

شاخص ضریب کاهش مقاومت<sup>۱</sup> که از نسبت مقاومت فشاری باقیمانده پس از طی چرخه به مقاومت اولیه محاسبه می‌شود، استفاده گردید. استفاده از دو شاخص افت وزنی و SRF به طور همزمان، امکان تحلیل دقیق‌تری از عملکرد دوام مخلوط‌ها را در شرایط محیطی

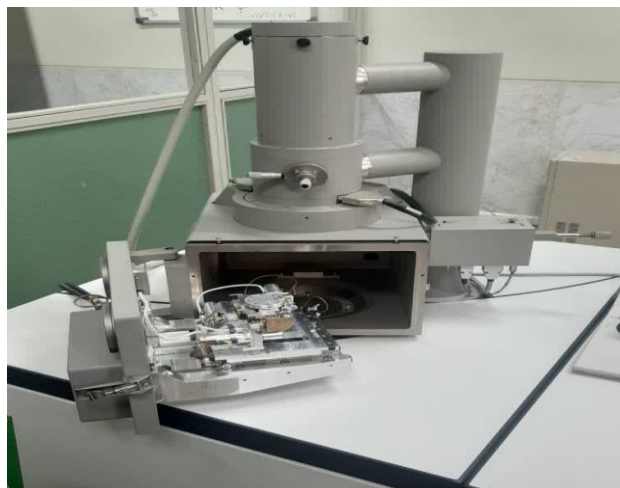


شکل ۷. مراحل انجام آزمایش دوام در برابر تر و خشک شدن: الف) عمل‌آوری نمونه‌ها، ب) خارج کردن نمونه‌ها از نایلون پس از طی دوره‌ی عمل‌آوری و قرارگیری در هوای آزاد، ج) غوطه‌ور نمودن نمونه‌ها در آب به مدت ۵ ساعت، و د) قرار دادن نمونه‌ها پس از برس‌زنی در گرمخانه در دمای  $70 \pm 2$  درجه‌ی سلسیوس به مدت ۴۲ ساعت

تصاویر SEM با استفاده از دستگاه نشان داده شده در شکل ۸، در بزرگ‌نمایی‌های مختلف تهیه شدند. تحلیل‌های انجام‌شده روی تصاویر، شامل ارزیابی مورفولوژی ماتریس سیمانی، میزان و توزیع تخلخل، نحوه‌ی پراکندگی ذرات HDPE، و بررسی تعامل فازهای سیمان و گرانول پلیمری در مقیاس میکروسکوپی بود. این بررسی‌ها به شناسایی اثرات ریزساختاری HDPE بر پیوستگی، تراکم و همگنی ساختار ترکیب‌های تثبیت شده کمک می‌کنند.

۲-۳-۴. بررسی ریزساختار با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) به منظور بررسی ساختار داخلی نمونه‌های خاک-سیمان و خاک-سیمان-گرانول HDPE بازیافتی، از تصویربرداری با میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شد. نمونه‌ها از طرح‌های اختلاط منتخب، بر اساس عملکرد مکانیکی (مقاومت فشاری) انتخاب گردیدند. پس از انجام آزمایش مقاومت فشاری، بخش‌هایی از نمونه‌های شکست‌خورده در دمای محیط خشک شدند و به منظور افزایش رسانایی سطح، با لایه‌ای نازک از طلا پوشش داده شدند.

## 2- Strength Reduction Factor – SRF



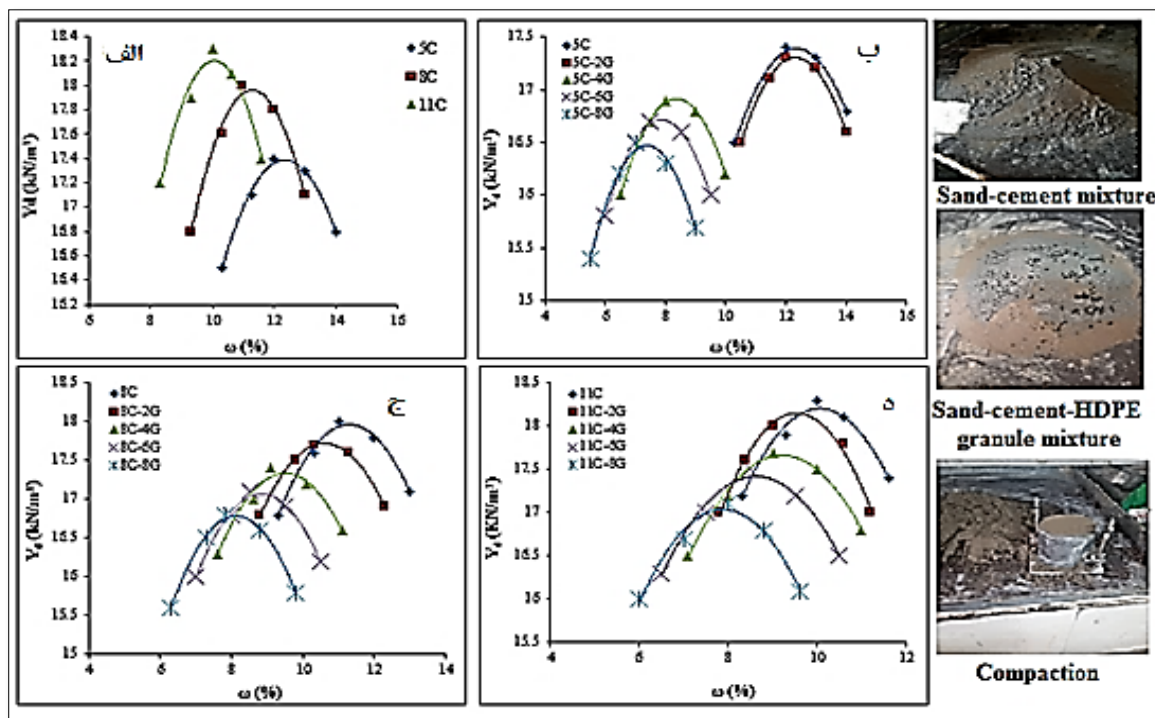
شکل ۸. دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی

### ۳. نتایج و بحث

#### ۳-۱. نتایج آزمایش تراکم

منحنی‌های حاصل از آزمایش تراکم استاندارد برای نمونه‌های خاک ماسه‌ای تثبیت شده با مقادیر مختلف

سیمان (۵، ۸ و ۱۱ درصد وزنی) و نمونه‌های خاک ماسه‌ای تثبیت شده با سیمان و مقادیر مختلف گرانول HDPE (از صفر تا ۸ درصد وزنی)، به تفکیک سطوح مختلف سیمان (۵، ۸ و ۱۱ درصد)، در شکل ۹ ارائه شده‌اند.



شکل ۹. منحنی‌های تراکم: الف) نمونه‌های خاک-سیمان، و نمونه‌های خاک-سیمان-گرانول HDPE، به ازای ب) ۵ درصد سیمان، ج) ۸ درصد سیمان و د) ۱۱ درصد سیمان

### ۳-۱-۱. بررسی تأثیر مقدار سیمان بر مشخصه‌های تراکم

بررسی منحنی‌های تراکم خاک-سیمان نشان می‌دهد که با افزایش مقدار سیمان از صفر تا ۱۱ درصد، وزن مخصوص خشک حداکثر به صورت پیوسته افزایش یافته است. این روند را می‌توان به پرشدن فضای خالی بین ذرات ماسه، ایجاد پیوندهای سیمانی و در نتیجه بهبود تراکم‌پذیری و تشکیل ساختاری منسجم‌تر نسبت داد. افزون بر این، به دلیل چگالی ویژه‌ی بالاتر سیمان نسبت به ذرات ماسه، انتظار می‌رود حضور آن چگالی کلی مخلوط را افزایش دهد.

در مقابل، رطوبت بهینه با افزایش درصد سیمان کاهش یافته است. این موضوع، عمدتاً ناشی از مصرف آب در واکنش‌های هیدراتاسیون، کاهش حجم فضای بین‌ذره‌ای نیازمند آب، و کم‌شدن میزان آب آزاد در مخلوط است. نتایج به‌دست‌آمده با گزارش‌های پیشین همخوانی دارد؛ به طوری که نوروزنژاد و همکاران (۲۰۲۱) و آکینوومی و همکاران (۲۰۲۲) نیز افزایش وزن مخصوص خشک حداکثر و کاهش رطوبت بهینه را در ماسه‌ی سیمانی گزارش کرده‌اند.

با این حال، برخی مطالعات نتایج متفاوتی ارائه کرده‌اند. برای نمونه، احمدی چناربینی و همکاران (۲۰۲۱) نشان داده‌اند که افزایش سیمان از ۶ تا ۱۲ درصد در خاک رسی، باعث افزایش همزمان وزن مخصوص خشک حداکثر و رطوبت بهینه می‌شود. همچنین، ملاعباسی و همکاران (۲۰۲۲) و پانتاوانه و همکاران (۲۰۱۹)، کاهش وزن مخصوص خشک حداکثر را در خاک رس حاوی سیمان گزارش کرده‌اند. این تفاوت‌ها را می‌توان ناشی از نوع خاک (ماسه‌ای در برابر رسی)، ویژگی‌های فیزیکی و کانی‌شناسی متفاوت، و نوع یا مقدار سیمان مصرف‌شده دانست. بنابراین نتایج آنها قابل تعمیم مستقیم به خاک مورد استفاده در پژوهش حاضر نیست.

### ۳-۱-۲. بررسی تأثیر گرانول HDPE بازیافتی بر مشخصه‌های تراکم

بررسی منحنی‌های تراکم در شکل ۸ نشان می‌دهد که با افزایش درصد گرانول HDPE، وزن مخصوص خشک حداکثر به طور پیوسته کاهش یافته است. این رفتار در تمامی سطوح سیمان مشاهده می‌شود و می‌توان آن را به چگالی کمتر گرانول‌های HDPE نسبت به ذرات ماسه و سیمان و نیز جایگزینی حجمی ذرات سنگین‌تر با ذرات سبک پلیمری نسبت داد. علاوه بر این، رطوبت بهینه نیز با افزایش مقدار گرانول کاهش یافته است. این امر به دلیل عدم جذب آب توسط ذرات HDPE است. به عبارت دیگر، گرانول‌ها بخشی از حجم مخلوط را اشغال می‌کنند، اما در واکنش‌های سیمانی و فرآیند جذب آب مشارکتی ندارند. بنابراین میزان آب مورد نیاز برای دستیابی به تراکم بهینه کاهش می‌یابد.

به طور کلی، نتایج نشان می‌دهند که افزودن گرانول‌های HDPE به مخلوط خاک-سیمان، موجب کاهش همزمان وزن مخصوص خشک حداکثر و رطوبت بهینه می‌شود. این روند با گزارش‌های پیشین نیز سازگار است. آکینوومی و همکاران (۲۰۲۲) نشان داده‌اند که افزودن ۲ تا ۱۵ درصد ضایعات پلاستیک به ماسه‌ی تثبیت‌شده با ۱۰ درصد سیمان باعث کاهش وزن مخصوص خشک حداکثر و کاهش ابتدایی رطوبت بهینه تا سطح ۲ درصد و سپس افزایش آن در مقادیر بالاتر می‌شود. همچنین، یوهانا و همکاران (۲۰۲۴) با بررسی تراکم خاک رسی بهسازی‌شده با نوارهای ضایعات پلاستیک و سیمان، افزایش وزن مخصوص خشک حداکثر و رطوبت بهینه تا مقدار بهینه‌ی افزودنی و کاهش آنها در سطوح بالاتر را گزارش کرده‌اند. علاوه بر این، پدرسو و همکاران (۲۰۲۳) در مطالعه‌ی روی خاک ماسه‌ای-رسی تثبیت‌شده با سیمان نشان داده‌اند که استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن موجب کاهش وزن مخصوص خشک حداکثر و ثابت ماندن رطوبت بهینه

که در آن،  $P$  بار اعمال شده‌ی معین، بر حسب کیلونیوتن (پوند) و  $A$  متوسط مساحت مقطع عرضی متناظر، بر حسب میلی‌متر مربع (اینچ مربع) است. منحنی‌های تنش- کرنش مربوط به این آزمون برای مقادیر مختلف سیمان و گرانول HDPE در شکل ۱۰ و روند و میزان تغییرات مقاومت فشاری محصورنشده برای نمونه‌های مختلف در شکل ۱۱ ارائه شده است. الگوی شکست نمونه‌های خاک- سیمان و خاک- سیمان- گرانول HDPE را می‌توان در شکل ۱۲ مشاهده نمود.

می‌شود؛ یافته‌ای که از منظر تغییرات وزن مخصوص خشک با نتایج پژوهش حاضر همخوانی دارد.

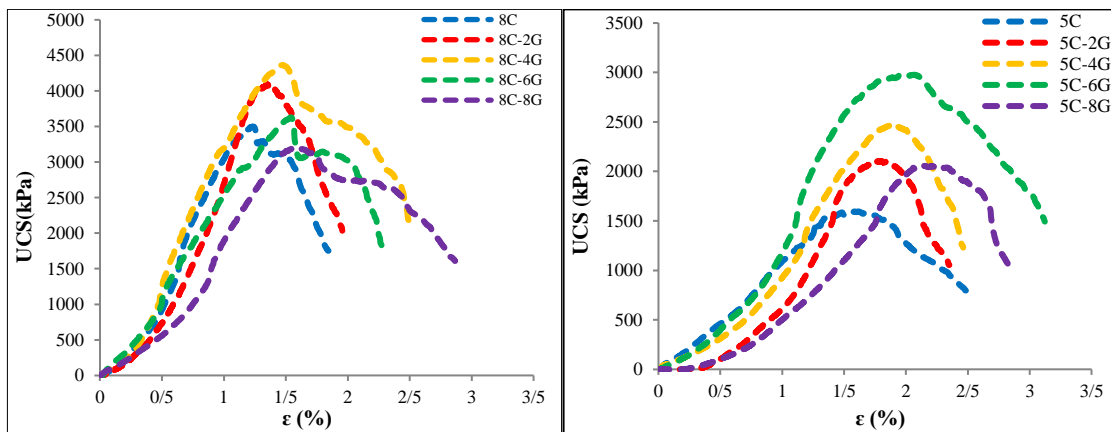
### ۲-۳. نتایج آزمایش مقاومت فشاری محصورنشده

در این مطالعه، تأثیر افزودن سیمان به خاک ماسه‌ای بر مقاومت فشاری آن و همچنین تأثیر افزودن گرانول HDPE بازبافتی بر مقاومت فشاری محصورنشده‌ی خاک ماسه‌ای تثبیت شده با سیمان بررسی شد.

مقاومت فشاری نمونه‌ها با استفاده از رابطه‌ی (۱)

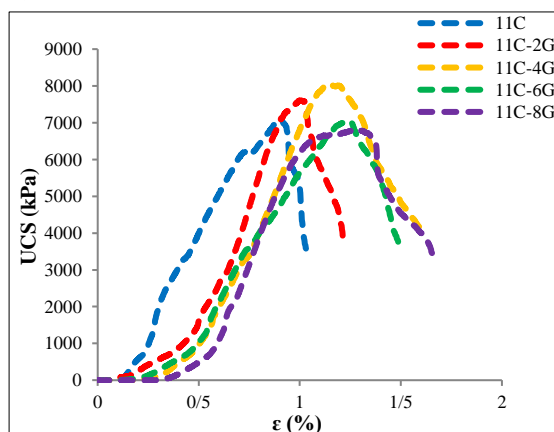
محاسبه گردید:

$$\sigma_c = (P/A) \quad (1)$$



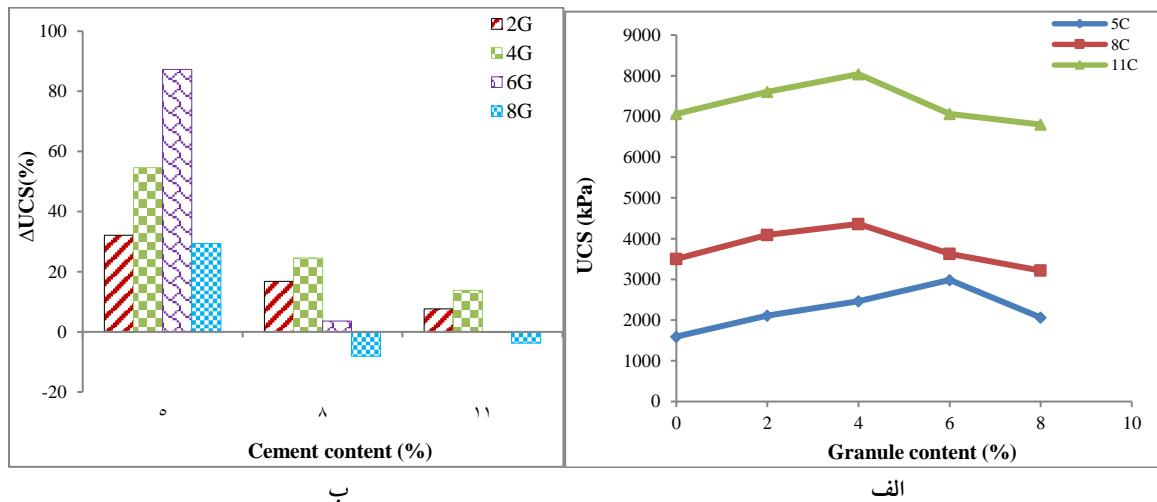
ب

الف



ج

شکل ۱۰. منحنی‌های تنش- کرنش نمونه‌های خاک- سیمان، با و بدون گرانول، برای: الف) مقدار سیمان ۵ درصد، ب) مقدار سیمان ۸ درصد و ج) مقدار سیمان ۱۱ درصد



شکل ۱۱. الف) روند و ب) میزان تغییرات مقادیر مقاومت فشاری محصورنشده در نمونه‌های مختلف



شکل ۱۲. نحوه‌ی شکست: الف) نمونه‌ی خاک-سیمان؛ و ب) نمونه‌ی خاک-سیمان-گرانول HDPE

ترکیبات بهینه استخراج شده و در جدول ۲ گزارش گردیده است. از آنجایی که در مقدار ۸ درصد گرانول، افت شدید عملکرد مکانیکی و تخریب ریزساختار آغاز می‌شود، مقادیر مدول سکانت مربوط به ترکیبات حاوی مقادیر مختلف سیمان و ۸ درصد گرانول نیز در جدول ارائه شده است. پارامتر مدول سکانت، از شیب خطی که مبدأ مختصات را به نقطه‌ی متناظر با ۵۰ درصد مقاومت فشاری نهایی ( $qu/2$ ) روی منحنی‌های تنش-کرنش (شکل‌های ۱۰-الف تا ج) متصل می‌کند، تعیین شده است.

روند منحنی‌های تنش-کرنش، به وضوح نشان‌دهنده‌ی انتقال رفتار از حالت ترد به نیمه‌شکل‌پذیر، با افزایش درصد HDPE است، به طوری که نمونه‌های بدون HDPE یا با مقادیر کم، شکست ناگهانی و شیب اولیه‌ی زیاد دارند؛ در حالی که نمونه‌های حاوی مقدار بهینه‌ی HDPE رفتار شکل‌پذیرتری با افزایش کرنش شکست نشان می‌دهند. با این حال، به منظور درک عمیق‌تر اثر افزودنی‌ها بر رفتار تغییرشکل‌پذیری خاک تثبیت‌شده، پارامتر مدول سکانت ( $E_{50}$ ) به عنوان شاخصی از سختی اولیه، برای نمونه‌های شاهد و

جدول ۲. مقادیر مدول سکانت مخلوط‌های مختلف خاک-سیمان-گرانول HDPE

نام نمونه	مقاومت نهایی (کیلوپاسکال)	کرنش شکست (درصد)	مدول سکانت ( $E_{50}$ ، مگاپاسکال)
5C (نمونه‌ی حاوی ۵ درصد سیمان)	۱۵۹۵/۱۴	۱/۶۰	۱۱۲ $\cong$
5C-6G (نمونه‌ی حاوی ۵ درصد سیمان و ۶ درصد گرانول HDPE (مقدار بهینه))	۲۹۸۶/۷۸	۱/۹۹	۱۲۵ $\cong$
5C-8G (نمونه‌ی حاوی ۵ درصد سیمان و ۸ درصد گرانول HDPE)	۲۰۶۳/۷۵	۲/۳۰	۸۵ $\cong$
8C (نمونه‌ی حاوی ۸ درصد سیمان)	۳۵۰۰/۹۲	۱/۲۳	۲۶۷ $\cong$
8C-4G (نمونه‌ی حاوی ۸ درصد سیمان و ۴ درصد گرانول HDPE (مقدار بهینه))	۴۳۶۲/۴۱	۱/۴۷	۳۰۷ $\cong$
8C-8G (نمونه‌ی حاوی ۸ درصد سیمان و ۸ درصد گرانول HDPE)	۳۲۱۵/۷۴	۱/۶۰	۱۷۴ $\cong$
11C (نمونه‌ی حاوی ۱۱ درصد سیمان)	۷۰۶۴/۵۸	۰/۹۰	۸۵۰ $\cong$
11C-4G (نمونه‌ی حاوی ۱۱ درصد سیمان و ۴ درصد گرانول HDPE (مقدار بهینه))	۸۰۴۰/۶۵	۱/۱۵	۶۶۷ $\cong$
11C-8G (نمونه‌ی حاوی ۱۱ درصد سیمان و ۸ درصد گرانول HDPE)	۶۸۰۱/۵۰	۱/۲۸	۱۷۵ $\cong$

بسیار سخت و ترد است، افزودن ۴ درصد گرانول HDPE، اگرچه مقاومت را به مقدار حداکثری ۸۰۰۰/۲۵ کیلوپاسکال رسانده، اما مدول سکانت را نسبت به نمونه‌ی سیمانی خالص (حاوی ۱۱ درصد سیمان) تعدیل کرده و به ۶۶۷ مگاپاسکال کاهش داده است. این تعدیل سختی در کنار افزایش کرنش شکست، از تردی بیش از حد جلوگیری کرده و اجازه‌ی تغییرشکل و جذب انرژی بیشتری به نمونه می‌دهد و نشانگر بهبود چقرمگی است. در مجموع، تحلیل داده‌های تنش-کرنش نمونه‌ها با استخراج مدول سکانت نشان می‌دهد که افزودن HDPE تأثیر قابل توجهی بر رفتار ترد/شکل‌پذیر مخلوط‌ها دارد. نمونه‌های فاقد HDPE یا با مقادیر کم آن، دارای مدول‌های بالا و کرنش شکست پایین هستند که نشان‌دهنده‌ی رفتار ترد و شکست ناگهانی است. در مقابل، نمونه‌های حاوی مقدار بهینه‌ی HDPE (۶-۴ درصد)، با مدول سکانت مناسب و کرنش شکست بالاتر، رفتار نیمه‌شکل‌پذیر و توانایی جذب انرژی بیشتری نشان می‌دهند. مقادیر مدول سکانت نشان می‌دهند که حضور HDPE

با توجه به مقادیر جدول ۲، افزایش مقدار سیمان از ۵ به ۱۱ درصد، منجر به افزایش قابل توجه مقاومت فشاری شده است. با این حال، این بهبود مقاومت، با افزایش شدید مدول سکانت (از ۱۱۲ به ۸۵۰ مگاپاسکال) و کاهش همزمان کرنش شکست از ۱/۶۰ به ۰/۹۰ درصد همراه بوده است. بر اساس تئوری‌های مکانیک خاک، این روند، نشان‌دهنده‌ی تبدیل خاک به یک ماتریس صلب و کاملاً ترد است که در آن، نمونه تحت بارهای وارده، پیش از وقوع شکست، توانایی بسیار کمی برای جذب انرژی و تغییرشکل جانبی دارد. افزودن گرانول‌های HDPE در مقادیر بهینه، تغییرات معناداری در رفتار تنش-کرنش ایجاد کرده است. در سطح ۵ درصد سیمان، حضور گرانول‌ها علاوه بر افزایش مقاومت، مدول سکانت را به ۱۲۵ مگاپاسکال افزایش داده و همزمان کرنش شکست را به ۱/۹۹ درصد (حدود ۲۴/۴ درصد افزایش نسبت به کرنش نمونه‌ی شاهد) رسانده است. این پدیده، بیانگر انتقال رفتار از حالت ترد به شکل‌پذیر است. در سطح ۱۱ درصد سیمان که ماتریس

این روند با یافته‌های مطالعات پیشین از جمله تیمور و آتاپک (۲۰۱۰)، قنبری و همکاران (۲۰۲۲)، چان (۲۰۱۲)، لی و همکاران (۲۰۲۳)، حقیقت‌جو و ذوالفقاری‌فر (۲۰۲۲)، و شوش‌پاشا و شیروانی (۲۰۱۵) همخوانی دارد. این پژوهش‌ها نیز افزایش مقاومت فشاری و کاهش شکل‌پذیری را در اثر افزایش مقدار سیمان گزارش کرده‌اند.

### ۳-۲-۲. بررسی تأثیر افزودن گرانول HDPE بازیافتی

#### بر مقاومت فشاری محصورنشده

بررسی شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نشان می‌دهد که افزودن گرانول‌های HDPE اثر قابل توجهی بر رفتار مقاومت فشاری محصورنشده‌ی مخلوط‌های خاک-سیمان دارد. در هر سه سطح سیمان (۵، ۸ و ۱۱ درصد)، مقاومت فشاری تا یک مقدار بهینه از گرانول افزایش یافته و در مقادیر بالاتر کاهش پیدا می‌کند.

در ترکیب‌های حاوی ۵ درصد سیمان، افزودن HDPE تا ۶ درصد وزنی، موجب افزایش مقاومت فشاری در محدوده‌ی ۲۹/۴ تا ۸۷/۲۴ درصد نسبت به نمونه‌ی شاهد شده است. این بهبود را می‌توان به پرشدن حفرات، بهبود تماس بین ذرات و نقش پل‌زنی گرانول‌ها در محدود کردن گسترش ترک‌ها نسبت داد. همچنین، کرنش شکست از ۱/۶۰ به ۱/۹۹ درصد افزایش یافته است (معادل ۱۰ تا ۴۳/۷۵ درصد افزایش)، که نشان‌دهنده‌ی شکل‌پذیری بیشتر ناشی از حضور فاز پلیمری است. با این حال، افزودن ۸ درصد گرانول، موجب کاهش مقاومت از ۲۹۸۶/۸ کیلوپاسکال (در ۶ درصد HDPE) به ۲۰۶۳/۷۵ کیلوپاسکال شده است.

در نمونه‌های شامل ۸ درصد سیمان، افزایش مقدار گرانول تا ۴ درصد باعث رشد مقاومت از ۳۵۰۰/۹۲ به ۴۳۶۲/۴۱ کیلوپاسکال (معادل ۱۶/۸ تا ۲۴/۶ درصد افزایش) و افزایش کرنش شکست از ۱/۲۳ به ۱/۴۷ درصد می‌شود. اما در مقادیر بالاتر (۶ و ۸ درصد

علاوه بر بهبود مقاومت، تغییر شکل‌پذیری و شکل منحنی تنش-کرنش را بهبود می‌بخشد و رفتار مخلوط را از ترد به شکل‌پذیر نزدیک می‌کند. در مقادیر گرانول بیشتر از ۶ درصد، کاهش مدول و کرنش شکست مشاهده می‌شود که ناشی از افزایش ناپیوستگی و کاهش پیوستگی ماتریس سیمانی است. در نمودارها نیز مشخص است که نمونه‌های حاوی ۸ درصد گرانول، بعد از رسیدن به پیک، به سرعت دچار افت تنش می‌شوند که نشان‌دهنده‌ی شکست زودرس به دلیل عدم قفل‌وبست فیزیکی مناسب در مقادیر بالای گرانول HDPE است. با توجه به جدول ۲ نیز افت شدید مدول در نمونه‌ی 11C-8G از ۶۶۷ به ۱۷۵ مگاپاسکال تأیید می‌کند که گرانول‌ها در این درصد تجمع کرده و پیوستگی ماتریس سیمانی را مختل کرده‌اند. در نهایت، این نتایج تأیید می‌کنند که مقدار بهینه‌ی HDPE، نه تنها مقاومت و ریزساختار، بلکه رفتار مکانیکی تحت بارگذاری تنش-کرنش را نیز بهبود می‌دهد و تحلیل مدول، یک ابزار قوی برای ارزیابی رفتار ترد/شکل‌پذیر مخلوط‌ها ارائه می‌کند.

### ۳-۲-۱. بررسی تأثیر مقدار سیمان بر مقاومت فشاری

#### محصورنشده

بر اساس نتایج آزمون مقاومت فشاری محصورنشده و منحنی‌های تنش-کرنش ارائه‌شده در شکل‌های ۱۰ و ۱۱، افزایش مقدار سیمان از ۵ به ۱۱ درصد (در غیاب گرانول HDPE)، موجب رشد قابل توجه مقاومت فشاری در محدوده‌ی ۱۱۹/۵ تا ۳۴۲/۹ درصد نسبت به نمونه‌ی شاهد شده است. این افزایش، عمدتاً به تشکیل محصولات هیدراتاسیون سیمان و ایجاد پیوندهای مقاوم بین ذرات ماسه نسبت داده می‌شود. با وجود این، افزایش مقاومت با کاهش کرنش شکست همراه بوده است؛ به‌گونه‌ای که کرنش شکست در بازه‌ی ۲۲/۹۴ تا ۴۳/۷۵ درصد کاهش یافته است. این رفتار، نشان‌دهنده‌ی تردشدگی نمونه‌ها با افزایش مقدار سیمان و کاهش توانایی آنها در جذب انرژی پیش از شکست است.

حد HDPE، منجر به جدایش فازی و افزایش تخلخل شده که کاهش مقاومت کلی را به دنبال دارد.

در مجموع، افزودن گرانول HDPE به عنوان یک ماده‌ی مسلح کننده در خاک‌های ماسه‌ای سیمانی، در صورت رعایت نسبت بهینه، می‌تواند بهبود همزمان مقاومت و شکل‌پذیری را به ارمغان آورد. در این پژوهش، مقدار بهینه‌ی گرانول برای ترکیب با ۵ درصد سیمان، معادل ۶ درصد وزنی و برای سطوح ۸ و ۱۱ درصد سیمان، معادل ۴ درصد وزنی تعیین گردید.

### ۳-۳. نتایج آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم

به منظور ارزیابی عملکرد کششی نمونه‌های خاک-سیمان و خاک-سیمان-گرانول HDPE بازیافتی، مقاومت کششی غیرمستقیم اندازه‌گیری شد. مقادیر ITS با استفاده از روش آزمون برزیلی و مطابق با استاندارد ASTM-C496 محاسبه شدند. رابطه‌ی مورد استفاده برای محاسبه‌ی مقاومت کششی به صورت زیر است:

$$ITS = 2P/(\pi LD) \quad (2)$$

که در آن، ITS مقاومت کششی دونیم شدن بر حسب کیلوپاسکال، P بار حداکثر اعمال شده در زمان گسیختگی بر حسب کیلونیوتن، L طول نمونه بر حسب متر و d قطر نمونه بر حسب متر است. نحوه‌ی انجام آزمایش مقاومت کششی و الگوی شکست نمونه‌ها در شکل ۱۳ نشان داده شده است. روند تغییرات مقاومت کششی نمونه‌ها در سطوح مختلف سیمان (۵، ۸ و ۱۱ درصد است) و در مقادیر گرانول HDPE از صفر تا ۸ درصد. همچنین، میزان تغییرات مقاومت کششی نمونه‌های حاوی گرانول، نسبت به مقاومت کششی متناظر در نمونه‌های فاقد گرانول، در شکل ۱۴ نمایش داده شده است.

گرانول)، مقاومت به ترتیب به ۳۶۲۷/۵ و ۳۲۱۵/۷۴ کیلوپاسکال کاهش پیدا می‌کند.

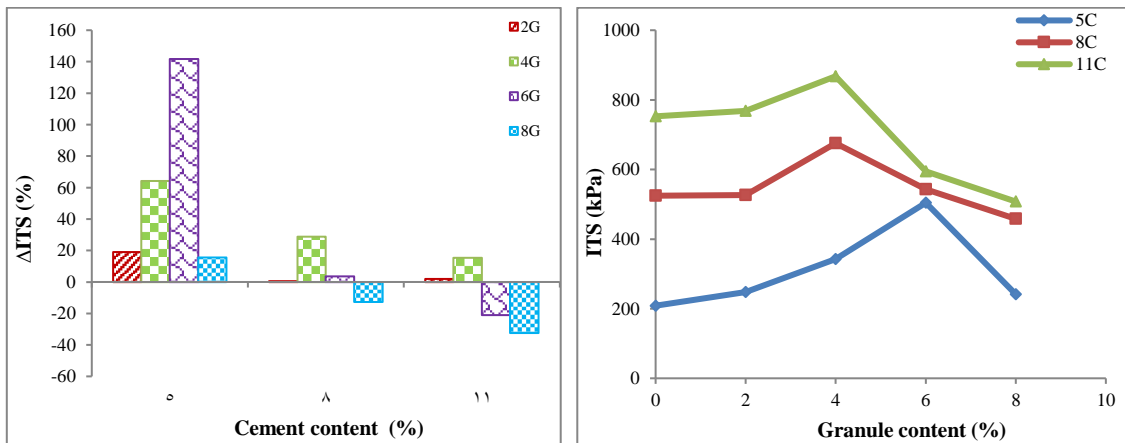
در ترکیب‌های دارای ۱۱ درصد سیمان، بیشترین مقاومت فشاری، با افزودن ۴ درصد گرانول و مقدار ۸۰۴۰/۶۵ کیلوپاسکال به دست آمده است. با افزایش HDPE به ۶ و ۸ درصد، مقاومت به ترتیب به ۷۰۶۳/۳۱ و ۶۸۰۱/۵۰ کیلوپاسکال کاهش یافته است.

این رفتار، با یافته‌های خطاک و الرشیدی (۲۰۰۶)، یوهانا و همکاران (۲۰۲۴)، ژائو و همکاران (۲۰۲۴) و زفوناریچ و همکاران (۲۰۲۴) همسو است. این مطالعات، بر نقش حیاتی مقدار بهینه‌ی افزودنی‌ها در ارتقاء عملکرد مکانیکی خاک‌های سیمانی تأکید دارند. در مقابل، آکینوومی و همکاران (۲۰۲۲)، کاهش کلی مقاومت را با افزودن ضایعات پلاستیکی به خاک سیمانی گزارش کرده‌اند، هرچند که مقاومت در مقادیر کم (۲ درصد)، نسبت به درصد‌های بالاتر، بیشتر بوده است. این تفاوت‌ها بر اهمیت خواص ذاتی ماده‌ی افزودنی، اندازه‌ی ذرات، توزیع آنها و نحوه‌ی تعامل با ماتریس سیمانی تأکید می‌ورزد. بهبود شکل‌پذیری، افزایش کرنش شکست و گذار از رفتار ترد به رفتار انعطاف‌پذیر ناشی از تسلیح با الیاف، در مطالعات شن و همکاران (۲۰۲۱)، تبسم و بیماستی (۲۰۲۲)، حقیقت‌جو و ذوالفقاری‌فر (۲۰۲۲)، و قبری و همکاران (۲۰۲۲) نیز گزارش شده است.

روند رفتاری دو مرحله‌ای مشاهده شده (افزایش اولیه تا رسیدن به مقدار بهینه و سپس کاهش در مقادیر بالاتر)، منعکس‌کننده‌ی تأثیر مثبت گرانول HDPE در مقادیر کم بر بهبود ساختار سیمانی و همچنین ایجاد ناپوستگی، ناهمگونی توزیع و کاهش تماس مؤثر خاک با سیمان در مقادیر بالاتر است. در مقادیر بهینه (۴ تا ۶ درصد)، گرانول‌ها با ایفای نقش همزمان پرکنندگی و تقویت‌کنندگی، باعث افزایش چگالی موضعی و ممانعت از گسترش ترک‌ها می‌شوند. با این حال، مقدار بیش از



شکل ۱۳. آزمایش کشش غیرمستقیم: الف) نحوه‌ی قرارگیری نمونه جهت انجام آزمایش کشش غیرمستقیم و ب) تصاویر شکست نمونه حین انجام آزمایش و پس از آن



شکل ۱۴. الف) روند و ب) میزان تغییرات مقادیر مقاومت کششی غیرمستقیم در نمونه‌های مختلف، نسبت به نمونه‌ی متناظر فاقد گرانول

### ۳-۳-۱. بررسی تأثیر مقدار سیمان بر مقاومت کششی

#### غیر مستقیم

مخلوط را بهبود می‌بخشد (شوش‌پاشا و شیروانی، ۲۰۱۵؛ نگی و همکاران، ۲۰۱۷).

فرآیند هیدراتاسیون سیمان در حضور آب، منجر به تشکیل محصولات سیمانی مانند C-S-H می‌شود که یک ماتریس پیوسته بین ذرات خاک ایجاد می‌کند. این ماتریس، ذرات ماسه را به یکدیگر متصل کرده و در نهایت مقاومت کششی نهایی مخلوط را افزایش می‌دهد (نگی و همکاران، ۲۰۱۷؛ گاسپارد و همکاران، ۲۰۰۳). تشکیل این پیوندهای سیمانی، همچنین باعث کاهش

بررسی شکل ۱۴ الف) نشان می‌دهد که در نمونه‌های ماسه-سیمان بدون گرانول HDPE، افزایش درصد سیمان، منجر به رشد قابل توجهی در مقاومت کششی غیرمستقیم می‌گردد. مقایسه‌ی نمونه‌ی حاوی ۵ درصد سیمان با نمونه‌ی حاوی ۱۱ درصد سیمان، حاکی از افزایش تقریبی ۲/۶ برابری مقاومت کششی در این بازه است. این روند، با اصول تثبیت خاک توسط چسباننده‌های هیدرولیکی مانند سیمان مطابقت دارد، زیرا افزایش مقدار سیمان به طور کلی خواص مقاومتی

افزایش مقاومت کششی تحت بارگذاری غیرمستقیم است.

فضای خالی بین ذرات، محدود کردن جابجایی نسبی آنها و افزایش سختی کلی ترکیب می شود که نتیجه ی آن،

### ۳-۳-۲. بررسی تأثیر افزودن گرانول HDPE بازیافتی

#### بر مقاومت کششی غیر مستقیم

چسبندگی بین فازهای سیمانی و خاک، افزایش تخلخل، ناهمگونی توزیع گرانول و ویژگی های سطحی گرانول (مانند سطح صاف و شکل کروی) رخ می دهد. این شرایط می تواند منجر به ایجاد نواحی با تمرکز تنش در ماتریس شده و شکست زودهنگام تحت بارگذاری کششی را به همراه داشته باشد. مطالعه ی سبحان (۲۰۰۸) نیز بر اهمیت خواص هندسی مواد مسلح کننده، از جمله طول و نسبت ابعادی الیاف، در ویژگی های مقاومتی مخلوط های سیمانی تأکید دارد.

نتایج آزمون مقاومت کششی غیرمستقیم (شکل ۱۴ ب)) نشان داد که افزودن گرانول های HDPE به ترکیب ماسه-سیمان، تأثیر قابل توجهی بر عملکرد کششی نمونه ها دارد. این تأثیر، به شدت به مقدار سیمان و درصد گرانول وابسته است؛ به طوری که برای هر سطح سیمان، مقدار بهینه ای از HDPE وجود دارد که بیشترین مقاومت کششی را حاصل می کند. در مقادیر فراتر از این حد بهینه، روند کاهش در مقاومت کششی مشاهده شد.

الگوی مشاهده شده در این تحقیق، مبنی بر افزایش اولیه و سپس کاهش مقاومت با تغییر غلظت افزودنی ها، با یافته های پژوهش های متعددی همسو است. به عنوان مثال، ژائو و همکاران (۲۰۲۴)، در مطالعه ی خود گزارش کرده اند که کاربرد الیاف پلی پروپیلن، پلی وینیل الکل و الیاف شیشه در مقدار بهینه، منجر به افزایش ۱۰۴ تا ۱۱۱ درصدی مقاومت کششی در خاک کائولن سیمانی شده می گردد و اشاره کردند که مقادیر بالاتر باعث افت عملکرد شده است. در بررسی ترن و همکاران (۲۰۱۹)، افزایش مقدار سیمان از ۴ به ۱۲ درصد، موجب افزایش ۵/۴ برابری مقاومت کششی ۲۸ روزه در مقایسه با خاک شاهد گردید. این مطالعه همچنین نشان داد که گنجاندن الیاف کلاله ی ذرت در خاک لای سیمانی شده، مقاومت کششی را افزایش می دهد، هرچند که با افزایش مقدار سیمان، مقاومت کششی کاهش یافته است؛ نتیجه ای که صرف نظر از نوع المان تسلیح، با یافته های مطالعه ی حاضر مطابقت دارد. پائول و همکاران (۲۰۲۵) نیز افزایش تقریبی ۵ برابری مقاومت کششی را پس از افزودن ۵ درصد سیمان به خاک رس گزارش کرده و

در نمونه های حاوی ۵ درصد سیمان، افزودن گرانول HDPE تا ۶ درصد، منجر به افزایش مقاومت کششی تا حدود ۱۴۲ درصد نسبت به نمونه ی فاقد گرانول گردید. حتی در مقدار ۸ درصد گرانول، مقاومت همچنان حدود ۱۵/۶۲ درصد بالاتر از نمونه ی غیرمسلح باقی ماند. برای نمونه های حاوی ۸ و ۱۱ درصد سیمان، مقدار بهینه ی HDPE برابر با ۴ درصد بود که به ترتیب، افزایش ۲۸/۸۳ و ۱۵/۳۰ درصدی در مقاومت کششی را به همراه داشت. در مقادیر بالاتر، کاهش مقاومت مشاهده گردید. به عنوان مثال، در سطح ۱۱ درصد سیمان و ۸ درصد گرانول، کاهش معادل ۳۲/۵۴ درصد نسبت به نمونه ی سیمانی گزارش شد.

این یافته ها، نقش گرانول HDPE را به عنوان عامل تسلیح کننده در مخلوط خاک-سیمان تأیید می کنند. گرانول ها با مهار رشد ریزترک ها و مشارکت در انتقال تنش، مقاومت کششی را بهبود می بخشند. این رفتار، قبلاً در خصوص عملکرد الیاف در بتن و کامپوزیت های سیمانی نیز گزارش شده است (شوش پاشا و شیروانی، ۲۰۱۵؛ گاسپارد و همکاران، ۲۰۰۳). با این حال، در مقادیر بالاتر از حد بهینه، کاهش مقاومت ناشی از کاهش

### ۳-۴. نتایج آزمایش دوام در برابر تر و خشک شدن

جهت ارزیابی دوام مکانیکی نمونه‌ها در برابر چرخه‌های رطوبتی، از روش آزمون استاندارد ASTM-D559 استفاده شد. در این آزمون، نمونه‌ها تحت چرخه‌های متوالی تر و خشک شدن قرار گرفتند و مقادیر مقاومت فشاری، افت وزنی، و ضریب کاهش مقاومت (SRF) اندازه‌گیری شد. نتایج این آزمون‌ها در ادامه تحلیل شده‌اند. میزان تغییرات مقاومت فشاری، مقادیر افت وزنی و مقادیر ضریب کاهش مقاومت، در برابر چرخه‌های تر و خشک شدن، برای مقادیر مختلف سیمان و گرانول، به ترتیب، در شکل‌های ۱۵، ۱۶ و ۱۷ نشان داده شده‌اند.

### ۳-۴-۱. بررسی تأثیر سیمان و گرانول HDPE

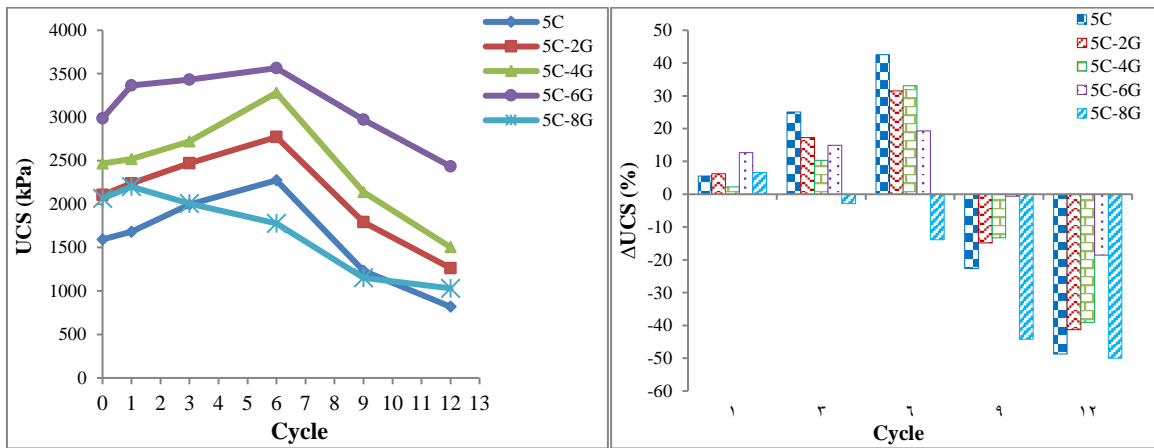
#### بازیافتی بر دوام خاک ماسه‌ای تحت چرخه‌های تر و خشک شدن

نتایج آزمون‌های دوام در برابر تر و خشک شدن نشان داد که در نمونه‌های فاقد گرانول، مقاومت فشاری در چرخه‌های ابتدایی (تا چرخه‌ی سوم یا ششم) افزایش یافته و سپس روند کاهشی به خود می‌گیرد. این افزایش اولیه، به هیدراتاسیون ثانویه‌ی سیمان نسبت داده می‌شود؛ در حالی که افت مقاومت در چرخه‌های انتهایی، ناشی از توسعه‌ی ریزترک‌ها، انقباض خشک‌شدگی و تضعیف پیوندهای ماتریس سیمانی است. این روند، با نتایج گزارش‌شده در مطالعات پیشین همخوانی دارد که رفتار دو مرحله‌ای (افزایش اولیه و تخریب تدریجی) را برای مصالح سیمانی تحت چرخه‌های رطوبتی گزارش کرده‌اند.

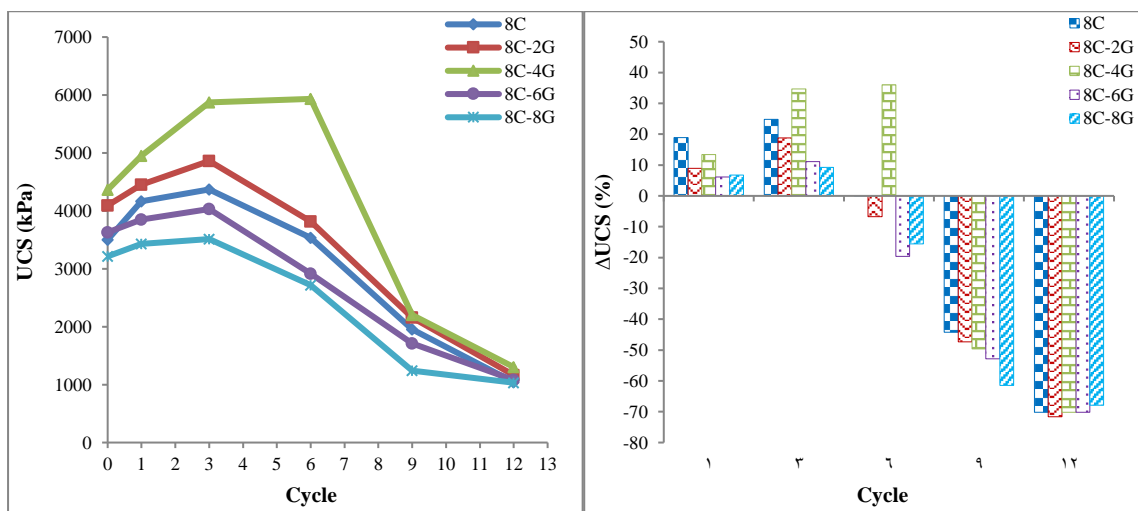
افزودن همزمان سیمان و الیاف نایلون و جوت را موجب افزایش چشمگیر مقاومت کششی (تا ۱۵۶۵ درصد نسبت به خاک شاهد) دانستند. مطالعات پیشین نیز نتایجی همسو با یافته‌های مطالعه‌ی حاضر ارائه کرده‌اند. وانگ و همکاران (۲۰۲۰)، افزایش ۲۸/۶ درصدی مقاومت کششی ۲۸ روزه در خاک رس لای‌دار را با افزایش مقدار سیمان از ۱۵ به ۱۸ درصد گزارش نمودند و همچنین تأثیر مثبت افزودن مقدار بهینه‌ی الیاف بازالت به خاک سیمانی را بر مقاومت کششی تأیید کردند. کنسولی و همکاران (۲۰۱۱) نیز افزایش مقاومت کششی را در نمونه‌های سیمانی، چه با الیاف پلی‌پروپیلن و چه بدون آن، با افزایش مقدار سیمان از ۱ به ۷ درصد مشاهده کردند.

در نهایت، همانطور که در نتایج این تحقیق مشاهده شد، با افزایش میزان سیمان، مقدار بهینه‌ی گرانول HDPE کاهش یافت (از ۶ درصد در ۵ درصد سیمان، به ۴ درصد در ۸ و ۱۱ درصد سیمان). این پدیده، احتمالاً به دلیل تشکیل یک ماتریس سیمانی سخت‌تر و تردتر در مقادیر بالای سیمان رخ می‌دهد که توانایی کمتری برای جای دادن حجم بالایی از گرانول‌ها دارد. علاوه بر این، تماس مؤثر بین سیمان و خاک در حضور مقادیر زیاد گرانول مختل شده و فرآیند تراکم نیز تحت تأثیر قرار می‌گیرد.

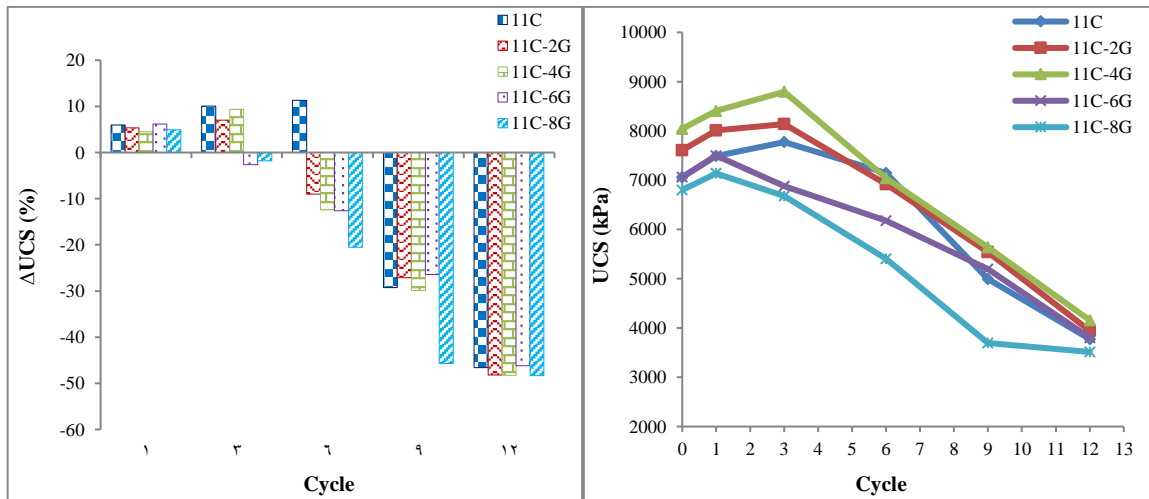
این یافته‌ها، در کنار نتایج مطالعات پیشین، نشان می‌دهد که افزودن گرانول HDPE در مقادیر بهینه می‌تواند به بهبود عملکرد کششی، کاهش مصرف سیمان و استفاده‌ی مؤثر از ضایعات پلاستیکی در راستای اهداف توسعه‌ی پایدار در مهندسی ژئوتکنیک کمک کند.



الف



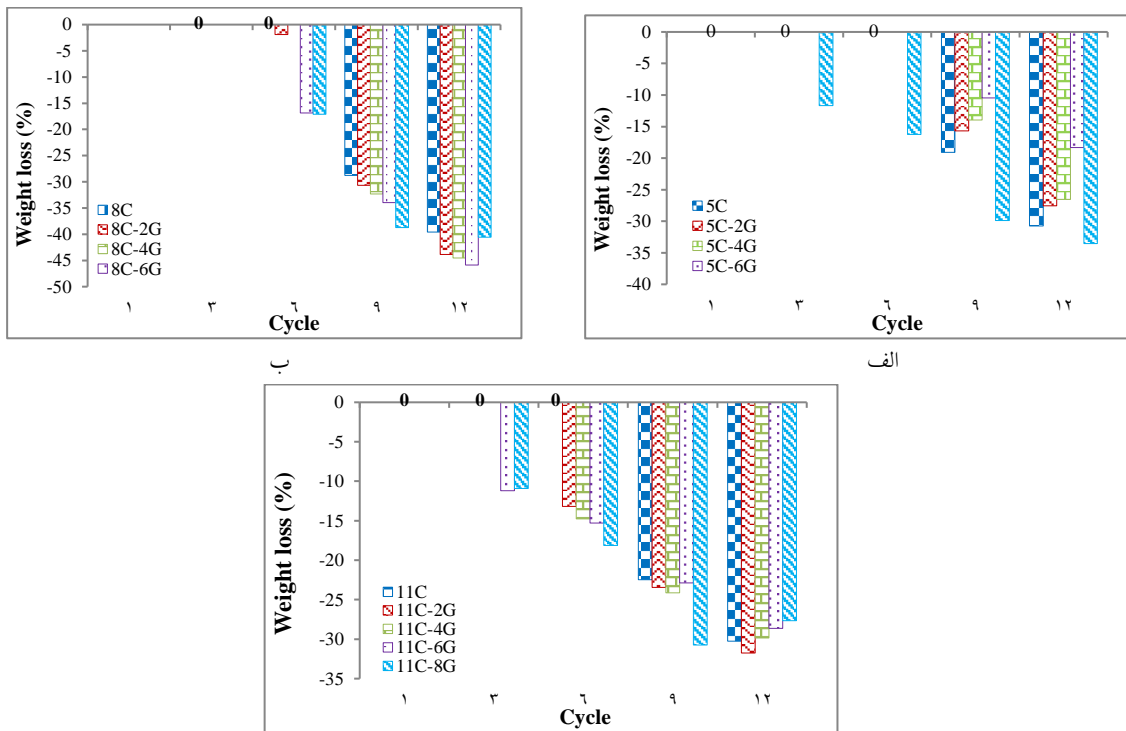
ب



ج

شکل ۱۵. روند تغییرات مقادیر مقاومت فشاری در برابر چرخه‌های مختلف تر و خشک شدن، به ازای: الف) ۵ درصد سیمان، ب) ۸ درصد سیمان و ج) ۱۱ درصد سیمان، با و بدون گرانول HDPE

بررسی آزمایشگاهی تأثیر سیمان و گرانول‌های HDPE بازیافتی بر مقاومت، دوام و ریزساختار خاک ماسه‌ای



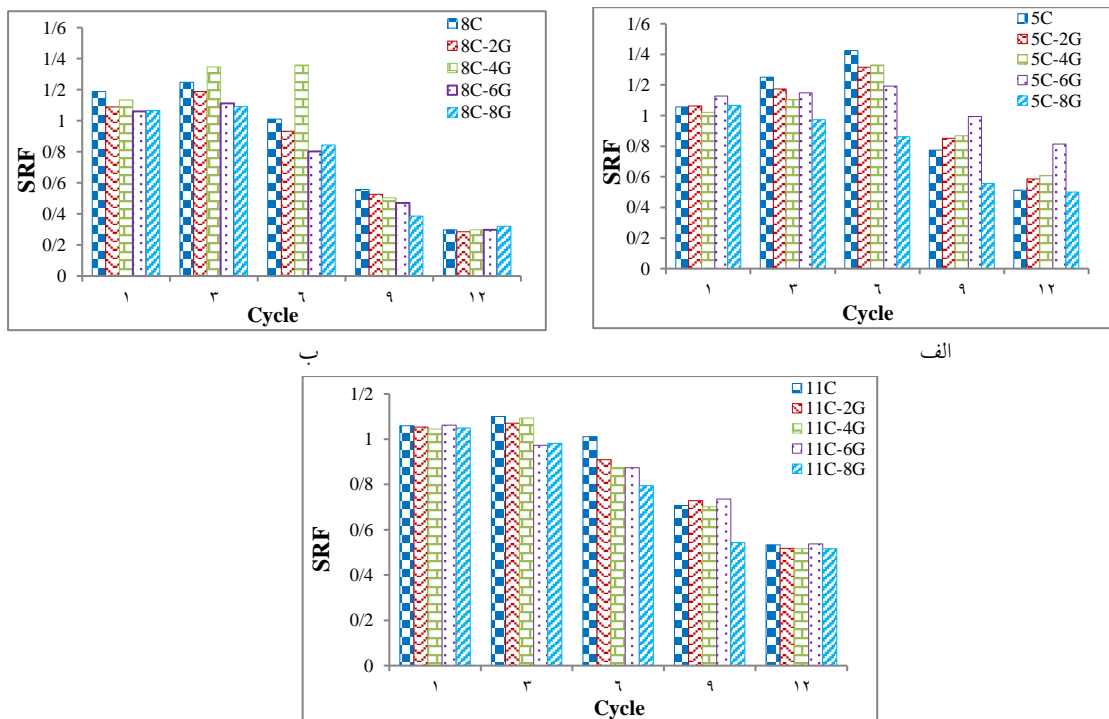
ب

الف

ج

شکل ۱۶. مقادیر ضریب افت وزنی تحت چرخه‌های مختلف تر و خشک شدن، به ازای:

(a) ۵ درصد سیمان، (b) ۸ درصد سیمان و (c) ۱۱ درصد سیمان، با و بدون گرانول HDPE



ب

الف

ج

شکل ۱۷. ضریب کاهش مقاومت (SRF) تحت چرخه‌های مختلف تر و خشک شدن، به ازای:

(الف) ۵ درصد سیمان، (ب) ۸ درصد سیمان و (ج) ۱۱ درصد سیمان، با و بدون گرانول HDPE

محدودسازی گسترش ترک‌ها، بهبود انسجام ساختاری و کاهش تمرکز تنش، می‌توانند دوام مصالح تثبیت‌شده را در برابر چرخه‌های محیطی افزایش دهند. در عین حال، این پژوهش‌ها تأکید دارند که افزایش بیش از حد مقدار افزودنی، به دلیل ایجاد تخلخل بیشتر و اختلال در پیوستگی ماتریس، منجر به کاهش عملکرد مکانیکی و دوام می‌شود؛ موضوعی که در نتایج حاضر نیز به‌وضوح مشاهده گردید.

در مجموع، نتایج این تحقیق، ضمن تأیید روندهای گزارش‌شده در ادبیات موضوعی نشان می‌دهند که عملکرد دوام خاک‌های تثبیت‌شده تابع یک تعادل حساس بین مقدار سیمان و افزودنی پلیمری است. بر این اساس، محدوده‌ی بهینه شامل ۵ تا ۱۱ درصد سیمان و ۴ تا ۶ درصد گرانول HDPE پیشنهاد می‌شود که در آن، بیشترین نگهداشت مقاومت، کمترین افت وزنی و مناسب‌ترین پایداری ریزساختاری حاصل می‌گردد.

### ۳-۵. تحلیل ریزساختار

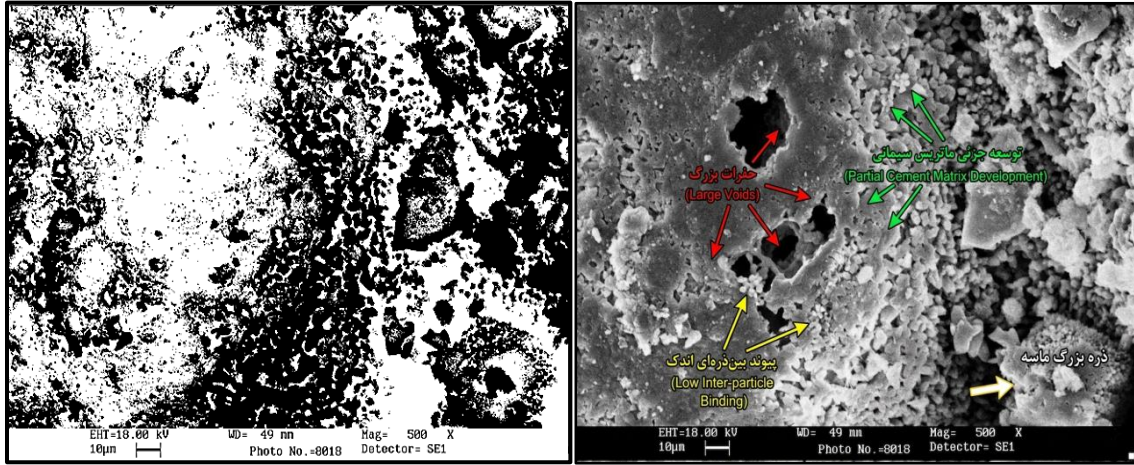
به منظور بررسی دقیق ساختار داخلی نمونه‌ها، تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) تهیه شد. این تصاویر، شامل نمونه‌های خاک ماسه‌ای خالص (بدون گرانول)، نمونه‌های خاک-سیمان، و نمونه‌های حاوی ترکیب خاک-سیمان-گرانول HDPE در مقادیر مختلف (۴ و ۸ درصد وزنی گرانول) با سیمان ثابت، در شکل ۱۸ (با بزرگنمایی ۵۰۰ برابر) نمایش داده شده‌اند. تحلیل ریزساختار، با هدف ارزیابی اثر گرانول‌های HDPE بازیافتی بر توسعه‌ی تخلخل، پراکندگی گرانول‌ها و پیوستگی ماتریس سیمانی در خاک ماسه‌ای تثبیت‌شده با سیمان، با استفاده از نرم‌افزار ImageJ برای تحلیل کمی تصاویر صورت گرفت.

از نظر افت وزنی، تمامی نمونه‌های فاقد گرانول، پس از چرخه‌ی ششم دچار کاهش جرم شده و در چرخه‌ی دوازدهم مقادیری بین حدود ۳۰ تا ۴۰ درصد افت وزنی را تجربه کردند که به‌مراتب بالاتر از حدود مجاز ارائه شده در استانداردهای ACI 230.1R-09 و USACE است. این موضوع نشان می‌دهد که استفاده از سیمان به‌تنهایی، علیرغم بهبود مقاومت اولیه، برای تأمین دوام در برابر چرخه‌های تر و خشک شدن کافی نیست. ضریب نگهداشت مقاومت (SRF) نیز این روند را تأیید کرده و نشان داد که نمونه‌ی حاوی ۸ درصد سیمان کمترین پایداری را دارد، در حالی که نمونه‌های حاوی ۵ و ۱۱ درصد سیمان، عملکرد نسبتاً بهتری از نظر حفظ مقاومت ارائه می‌دهند.

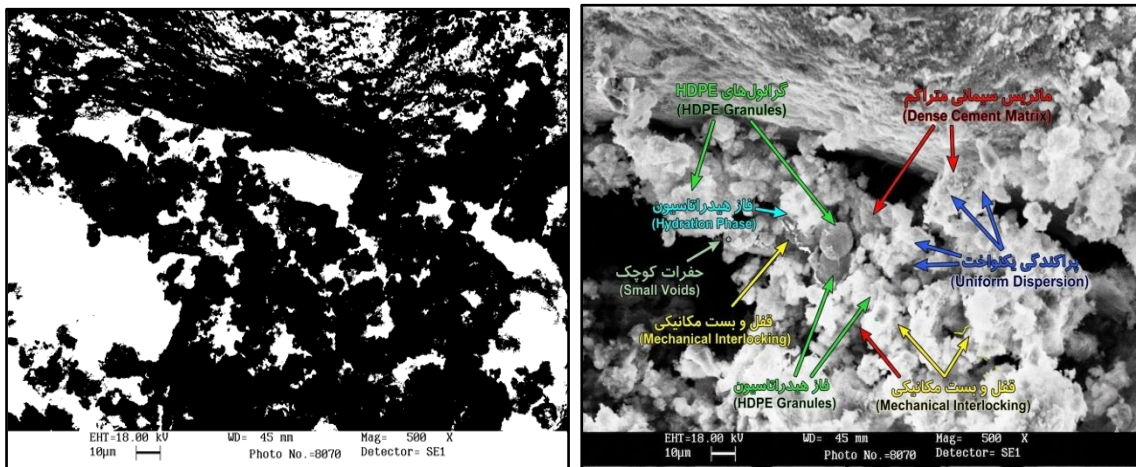
با افزودن گرانول HDPE، رفتار نمونه‌ها به‌طور قابل توجهی بهبود یافت. اما این تأثیر به‌شدت تابع مقدار گرانول و درصد سیمان بود. در نمونه‌های حاوی ۵ درصد سیمان، افزودن ۴ تا ۶ درصد گرانول، منجر به افزایش مقاومت فشاری در چرخه‌های اولیه، کاهش افت وزنی و افزایش SRF تا حدود ۰/۸۱ در چرخه‌ی دوازدهم) شد. در مقابل، افزایش مقدار گرانول به ۸ درصد، باعث کاهش محسوس دوام (افت مقاومت تا حدود ۵۰ درصد) گردید که به افزایش تخلخل، ناهمگنی و کاهش پیوستگی بین ماتریس سیمانی و گرانول نسبت داده می‌شود. روند مشابهی در ترکیب‌های حاوی

۸ و ۱۱ درصد سیمان مشاهده شد، به‌طوری که بهترین عملکرد عموماً در محدوده‌ی ۴ تا ۶ درصد گرانول حاصل گردید و مقادیر بالاتر گرانول موجب افت عملکرد شدند. این یافته‌ها، با نتایج مطالعات سربیکومار و نئیر (۲۰۲۱)، جعفری و اثنی‌عشری (۲۰۱۲) و سهل‌آبادی و همکاران (۲۰۲۱) هم‌راستا است.

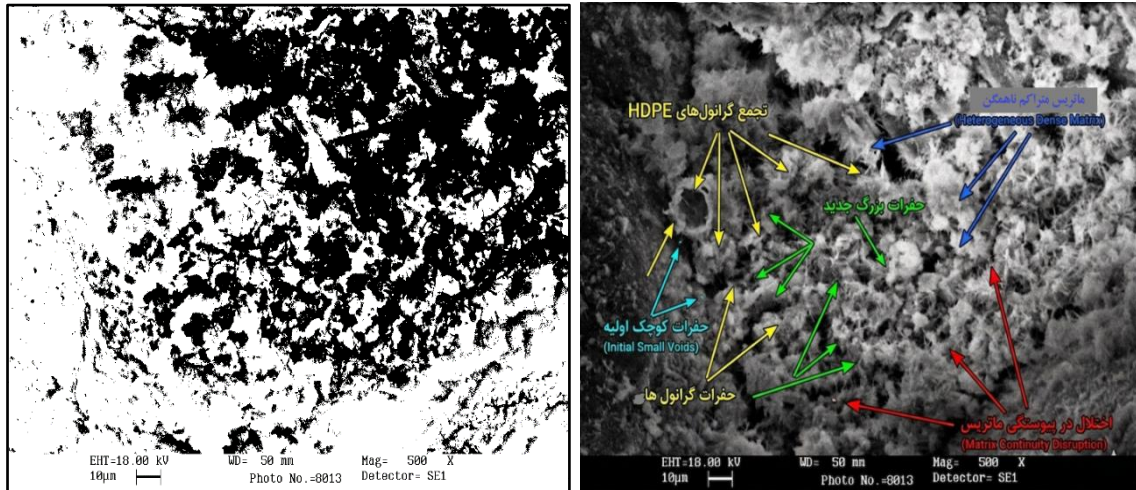
در این مطالعات نیز نشان داده شده است که افزودنی‌های پلیمری یا الیافی، در مقادیر بهینه، از طریق



الف



ب



ج

شکل ۱۸. تصاویر SEM و تصاویر باینری متناظر حاصل از آستانه‌گذاری در نرم‌افزار ImageJ برای نمونه‌های: الف) خاک-۱۱ درصد سیمان، ب) خاک-۱۱ درصد سیمان-۴ درصد گرانول HDPE و ج) خاک-۱۱ درصد سیمان-۸ درصد گرانول

### HDPE

اصلاح ساختار حفرات بود که منجر به افزایش ظرفیت انتقال بار در نمونه گردید.

خاک-سیمان+ ۸ درصد گرانول HDPE: تجمع گرانول‌ها و افزایش قابل ملاحظه‌ی اندازه‌ی حفرات در این ترکیب، منجر به شکست زودرس نمونه‌ها در آزمایش مقاومت فشاری شد.

به طور کلی، ترکیب تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی با شاخص‌های عددی ریزساختاری، ابزاری قدرتمند برای درک سازوکار تأثیر افزودنی‌های پلیمری بر خاک‌های تثبیت‌شده فراهم می‌آورد. بررسی ویژگی‌های ریزساختاری، از جمله توزیع اندازه‌ی حفرات و الگوی پراکندگی گرانول‌ها، نشان داد که افزودنی خنثی مانند HDPE، بسته به مقدار مصرف و میزان سازگاری آن با سیستم خاک-سیمان، می‌تواند روند تثبیت خاک را تقویت یا تضعیف کند.

### ۳-۶. تبیین مکانیزم‌های بهبود مقاومت

تحلیل رفتار مکانیکی مخلوط خاک-سیمان-گرانول HDPE را می‌توان در قالب یک سیستم سه‌فازی، متشکل از ذرات خاک (اسکلت اصلی)؛ ماتریس سیمانی (عامل پیونددهنده‌ی سخت و ترد) و گرانول‌های HDPE (فاز مسلح‌کننده‌ی انعطاف‌پذیر) تبیین نمود. در این سیستم، محصولات هیدراتاسیون سیمان به‌عنوان ماتریس پیوسته عمل کرده و ذرات ماسه اسکلت باربر اصلی را تشکیل می‌دهند. افزودن گرانول‌های HDPE، موجب ایجاد فاز ثانویه‌ای در ساختار شده که از طریق مکانیزم‌هایی نظیر توزیع مجدد تنش، انحراف مسیر ترک و پل‌زنی ترک‌ها، رفتار ترد سیستم را به سمت رفتار شکل‌پذیرتر سوق می‌دهد. در مقادیر بهینه، این گرانول‌ها با بهبود آرایش ذرات و پر کردن بخشی از فضاها، باعث افزایش تراکم و کاهش پیوستگی مسیر ترک‌ها می‌شوند. با این حال، در مقادیر بالاتر، به دلیل کاهش پیوستگی ماتریس سیمانی و ایجاد نواحی ضعیف در فصل مشترک بین فاز

تفاوت‌های قابل توجهی در ریزساختار نمونه‌ها بین ترکیب خاک و ۱۱ درصد سیمان، و مخلوط‌های حاوی سیمان و ۴ و ۸ درصد گرانول HDPE بازیافتی مشاهده شد. در نمونه‌ی خاک-۱۱ درصد سیمان، توسعه‌ی جزئی ماتریس سیمانی به همراه وجود حفرات درونی و پیوند بین‌ذره‌ای اندک دیده شد. تحلیل آستانه‌گذاری و شمارش ذرات در نرم‌افزار ImageJ، میانگین اندازه‌ی حفرات را  $90/98$  میکرون و تخلخل کل را  $53/6$  درصد نشان داد که با مقاومت فشاری متوسط حاصل ( $7064/6$  کیلوپاسکال) مطابقت دارد.

افزودن ۴ درصد گرانول به خاک سیمانی موجب بهبود چشمگیر ویژگی‌های ریزساختاری و اصلاح ساختار تخلخل شد، به طوری که میانگین اندازه‌ی حفرات به  $82/08$  میکرون و تخلخل کل به  $34/17$  درصد کاهش یافت. گرانول‌ها به صورت یکنواخت در ماتریس پراکنده شده و بخشی از آنها در فاز سیمانی نفوذ کرده بودند که قفل و بست مکانیکی را تقویت کرده و در عین حال مانع از تشکیل محصولات هیدراتاسیون نشدند. این تغییرات، با افزایش مقاومت فشاری تا  $8040/65$  کیلوپاسکال همراه بود.

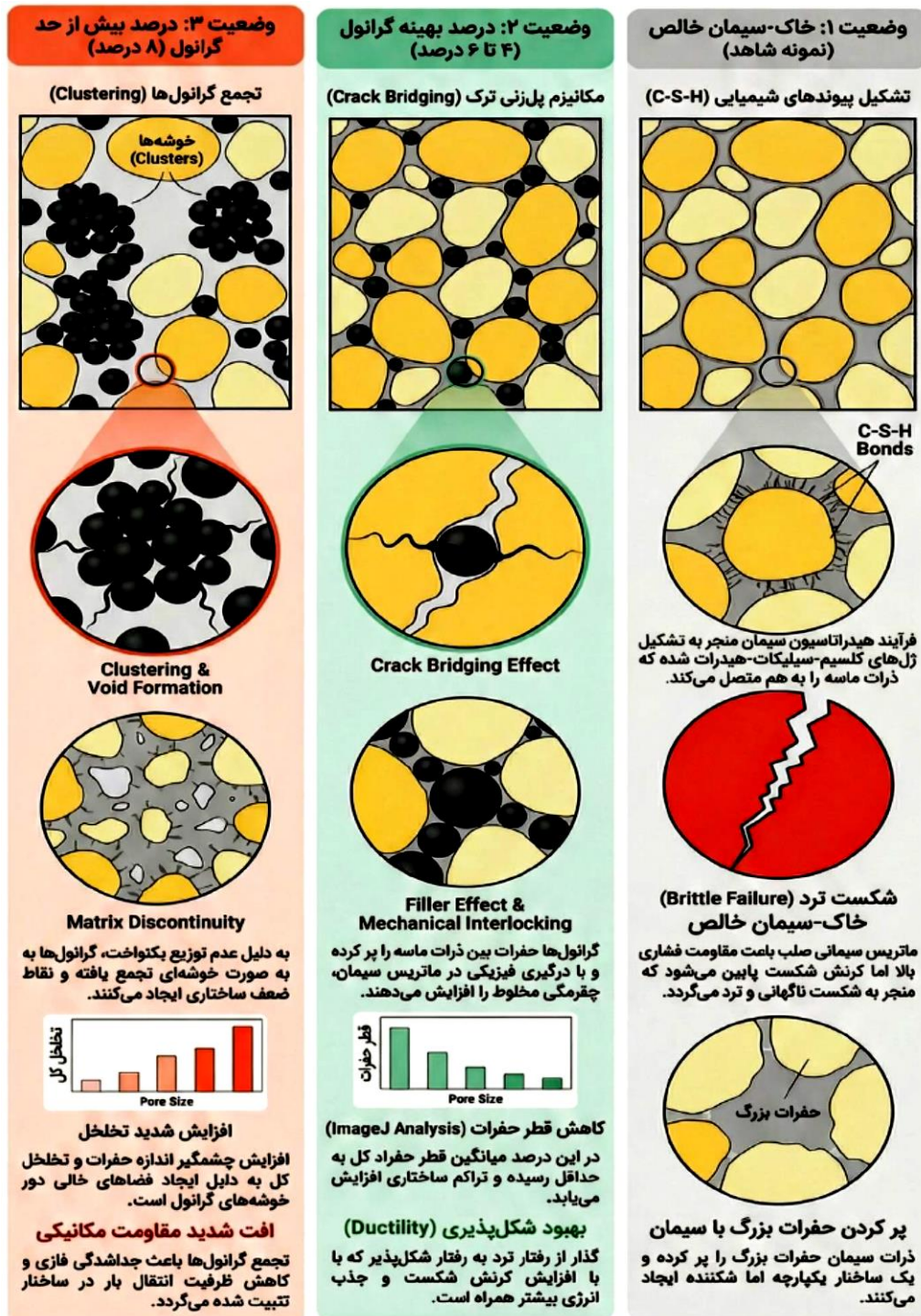
در مقابل، افزودن ۸ درصد گرانول HDPE به خاک سیمانی، موجب ناهمگنی ساختاری و تجمع گرانول‌ها شد که پیوستگی ماتریس سیمانی را مختل کرد. تحلیل سطحی با استفاده از نرم‌افزار ImageJ، افزایش تخلخل تا  $59/04$  درصد و افزایش اندازه‌ی میانگین حفرات تا  $103/97$  میکرون را نشان داد. در نتیجه، مقاومت فشاری به میزان قابل توجهی، تا  $6801/50$  کیلوپاسکال کاهش یافت.

روابط مستقیمی میان تکامل ریزساختار و رفتار مکانیکی در مقیاس ماکرو شناسایی شد:

خاک-سیمان+ ۴ درصد گرانول HDPE: در این حالت، بهبود مقاومت فشاری عمدتاً ناشی از کاهش تخلخل و

پلیمری و سیمانی، کارایی سیستم کاهش یافته و مقاومت مکانیکی افت می‌کند.

مکانیزم‌های تثبیت خاک ماسه با سیمان و گرانول‌های HDPE بازیافتی، به صورت شماتیک،



شکل ۱۹. مدل مفهومی و شماتیک مکانیزم‌های تثبیت خاک ماسه با سیمان و گرانول‌های HDPE بازیافتی

شکست همراه بود که نشان دهنده‌ی گذار رفتار نمونه از حالت انعطاف پذیر به ترد است.

(۲) نتایج این پژوهش نشان دادند که رفتار دوام خاک ماسه‌ای تثبیت شده تحت چرخه‌های تر و خشک، به‌طور همزمان، تابع مقدار سیمان و گرانول HDPE است. در حالی که افزایش سیمان موجب بهبود مقاومت اولیه و بروز هیدراتاسیون ثانویه در چرخه‌های ابتدایی شد، در چرخه‌های بالاتر، به‌ویژه در ترکیب حاوی ۸ درصد سیمان، افت قابل توجه مقاومت و افزایش افت وزنی مشاهده گردید که بیانگر محدودیت پایداری فازهای سیمانی در برابر تنش‌های رطوبتی است. افزودن گرانول HDPE در محدوده‌ی بهینه‌ی ۴ تا ۶ درصد، منجر به بهبود نگهداشت مقاومت، کاهش افت وزنی و افزایش پایداری ساختاری شد، در حالی که مقادیر بالاتر به دلیل افزایش تخلخل و ناهمگنی، اثر معکوسی بر دوام داشتند.

(۳) افزودن ۴ تا ۶ درصد گرانول HDPE بازیافتی (به صورت درصدی از وزن خشک خاک)، موجب بهبود قابل توجه عملکرد مکانیکی در تمامی مقادیر سیمان مورد استفاده شد. با این حال، افزایش مقدار گرانول به بیش از ۸ درصد، منجر به تجمع و خوشه‌بندی گرانول‌ها، اختلال در تشکیل محصولات هیدراتاسیون و کاهش چسبندگی در ماتریس سیمانی گردید. بر این اساس، استفاده‌ی همزمان از سیمان و گرانول HDPE در محدوده‌ی بهینه، به‌عنوان یک راهکار مؤثر برای ارتقاء عملکرد مکانیکی و دوام خاک‌های تثبیت شده پیشنهاد می‌شود.

(۴) نتایج تحلیل ریزساختار نشان داد که گرانول‌های HDPE بازیافتی عمدتاً از طریق قفل و بست فیزیکی و پرکردن حفرات در ماتریس سیمانی عمل می‌کنند و واکنش شیمیایی قابل توجهی با

تعیین مقدار بهینه‌ی گرانول HDPE در این پژوهش، صرفاً بر اساس بیشینه‌ی مقاومت فشاری انجام نشده، بلکه با در نظر گرفتن یک رویکرد چندمعیاره، شامل مقاومت فشاری محصورنشده، مقاومت کششی غیرمستقیم، کرنش شکست و نتایج تحلیل ریزساختاری صورت گرفته است. نتایج نشان داد که در مقادیر بهینه، علاوه بر دستیابی به مقاومت مناسب، بهبود قابل توجهی در شکل‌پذیری و انسجام ریزساختاری نیز حاصل می‌شود. در مقابل، در مقادیر بالاتر، اگرچه در برخی موارد مقاومت همچنان قابل قبول است، اما به دلیل افزایش تخلخل و ناپوستگی در ماتریس سیمانی، عملکرد کلی مخلوط افت می‌کند. در واقع، معیار تعیین مقدار بهینه‌ی گرانول HDPE بازیافتی، تنها حصول بیشترین مقاومت نبوده، بلکه دستیابی به بهترین عملکرد مورد نظر بوده است.

#### ۴. نتیجه‌گیری کلی

این پژوهش با هدف بررسی آزمایشگاهی تأثیر گرانول‌های HDPE بازیافتی بر خواص مکانیکی و ریزساختار خاک ماسه‌ای تثبیت شده با سیمان انجام شد. نتایج آزمایش‌های مکانیکی با تحلیل کمی تصاویر میکروسکوپی و پردازش آنها توسط نرم‌افزار ImageJ تلفیق شدند تا چگونگی تأثیر افزودنی‌های پلیمری غیرواکنش‌پذیر بر ریزساختار خاک، به ویژه در رابطه با کاهش حفرات و فضاهای خالی، پیوستگی ماتریس سیمانی و بهبود عملکرد، مورد بررسی قرار گیرد. یافته‌های اصلی این تحقیق به شرح زیر است:

(۱) افزایش مقدار سیمان از ۵ به ۱۱ درصد، تأثیر چشمگیری بر مقاومت فشاری (تا حدود ۳۴۰ درصد افزایش) و مقاومت کششی غیرمستقیم (حدود ۲۶۱ درصد افزایش) داشت. با این حال، این افزایش، با شکنندگی بیشتر و کاهش کرنش

مناسب) برای تثبیت خاک‌های ماسه‌ای می‌تواند منجر به افزایش مقاومت مکانیکی و بهبود ریزساختار گردد.

#### ۴-۱. محدودیت‌های پژوهش

این پژوهش، عمدتاً روی یک نوع خاک ماسه‌ای غیرچسبنده و بددانه‌بندی‌شده از منطقه‌ی ورزنه (اصفهان)، متشکل از کانی کوارتز با مقدار جزئی مواد رسی، انجام شده است. بنابراین، کارایی و عملکرد گرانول‌های HDPE بازیافتی ممکن است در خاک‌هایی با دانه‌بندی یا شاخص خمیری متفاوت، متغیر باشد. در نتیجه، پیشنهاد می‌شود که پژوهش‌های آتی، عملکرد این افزودنی را در خاک‌های سیلتی و رسی نیز مورد بررسی قرار دهند تا ارزیابی جامع‌تری از قابلیت کاربرد و رفتار مهندسی آن در شرایط مختلف خاکی فراهم گردد.

با توجه به انجام آزمایش‌ها روی یک نوع خاک ماسه‌ای با ویژگی‌های مشخص و تحت شرایط کنترل‌شده‌ی آزمایشگاهی، تعمیم نتایج این پژوهش به سایر انواع خاک‌ها، شرایط محیطی متفاوت و یا ترکیبات مصالح، باید با احتیاط صورت گیرد. عواملی نظیر نوع خاک، میزان رطوبت، شرایط تراکم و ویژگی‌های مصالح افزودنی می‌توانند تأثیر قابل توجهی بر رفتار نهایی مخلوط داشته باشند.

در این پژوهش، تمامی آزمایش‌ها روی نمونه‌ها در سن ۲۸ روز انجام شده است، که این سن به‌عنوان معیار استاندارد مقاومت نهایی خاک-سیمان در مطالعات آزمایشگاهی پذیرفته شده و امکان مقایسه‌ی مستقیم با مطالعات مشابه را فراهم می‌کند. با این حال، لازم است ذکر شود که بررسی مقاومت در سنین کوتاه‌مدت (مثلاً ۷ روز) و بلندمدت (۵۶ یا ۹۰ روز)، می‌تواند اطلاعات تکمیلی ارزشمندی در خصوص روند تکامل مقاومت، نقش گرانول‌های HDPE در تقویت ماتریس سیمانی و رفتار بلندمدت مخلوط ارائه دهد. به‌طور خاص، سنین کوتاه‌مدت می‌توانند دید بهتری نسبت به سرعت هیدراتاسیون و اثر اولیه‌ی HDPE بر استحکام ارائه کنند،

محصولات هیدراتاسیون ندارند. تحلیل کمی تصاویر با نرم‌افزار ImageJ این موضوع را تأیید نمود؛ به طوری که افزودن ۴ درصد گرانول HDPE به مخلوط حاوی ۱۱ درصد سیمان، منجر به کاهش میانگین اندازه‌ی حفرات از ۹۸/۹۰ میکرومتر به ۸۲/۰۸ میکرومتر و کاهش تخلخل کل از ۵۳/۶ درصد به ۳۴/۱۷ درصد گردید. این اصلاحات ریزساختاری نقش مهمی در بهبود رفتار مکانیکی نمونه‌ها ایفا کردند. در مقابل، استفاده از مقدار بیش از حد گرانول (۸ درصد)، منجر به ناهمگنی در ساختار و اختلال در فرآیند تشکیل محصولات هیدراتاسیون شد. (۵) مقدار بهینه‌ی گرانول HDPE، نه صرفاً بر مبنای پیشینه‌ی مقاومت فشاری، بلکه با در نظر گرفتن یک رویکرد چندمعیاره شامل مقاومت فشاری، مقاومت کششی، دوام، شکل‌پذیری و ویژگی‌های ریزساختاری تعیین گردید. این رویکرد، امکان انتخاب ترکیبی با عملکرد متعادل و کارآمد را فراهم می‌سازد.

در مجموع، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که گرانول‌های HDPE بازیافتی، پتانسیل بالایی به‌عنوان یک افزودنی مؤثر و پایدار برای بهبود عملکرد مکانیکی خاک‌های تثبیت‌شده با سیمان دارند. در مقادیر بهینه، این گرانول‌ها منجر به کاهش تخلخل و افزایش چسبندگی ماتریس سیمانی می‌شوند. با این حال، کارایی این افزودنی، به شدت به کنترل دقیق میزان مصرف و توزیع یکنواخت گرانول‌ها در ماتریس خاک - سیمان وابسته است.

این مطالعه، مسیر روشنی را برای بازیافت گرانول‌های HDPE در مهندسی ژئوتکنیک ترسیم می‌کند. برخلاف تحقیقات پیشین که عمدتاً بر خاک‌های رسی یا پلیمرهای غیربازیافتی متمرکز بودند، نتایج حاضر نشان می‌دهد که استفاده از گرانول‌های HDPE بازیافتی (در مقادیر

بدینوسیله قدردانی می‌گردد.

### ۶. تأییدیه اخلاقی

نویسندگان متعهد می‌شوند که مطالب این مقاله را در هیچ مجله دیگری به چاپ نرسانده‌اند.

### ۷. مشارکت‌های نویسندگان

کلیه نویسندگان در تهیه مقاله همکاری داشته‌اند.

### ۸. منابع مالی

این اثر تحت حمایت هیچ سازمان یا موسسه‌ای انجام نشده است.

### ۹. تعارض منافع

نویسندگان مقاله اعلام می‌کنند که در مورد انتشار این مقاله تعارض منافع وجود ندارد.

و سنین بلندمدت می‌توانند دوام و پایداری عملکرد مخلوط را در طول زمان روشن سازند. بنابراین، انجام مطالعات تکمیلی در این بازه‌های زمانی، برای ارزیابی کامل روند تکامل مقاومت و دوام مخلوط‌های خاک-سیمان-HDPE توصیه می‌شود، در حالی که نتایج حاصل از سن ۲۸ روز نیز، اطلاعات معتبر و کاربردی در خصوص رفتار مقاومتی و ریزساختاری مخلوط ارائه می‌دهد.

### ۵. تقدیر و قدردانی

نتایج حاصل از این پژوهش، با حمایت مالی دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) و در چارچوب گرنت پژوهشی شماره‌ی ۲۶۰۰۳۹ به دست آمده است که

### ۱۰. مراجع

- Ahmadi Chenarboni, H., Hamid Lajevardi, S., MolaAbasi, H., & Zeighami, E. 2021. "The effect of zeolite and cement stabilization on the mechanical behavior of expansive soils". *Constr. Build. Mater.*, 272. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121630>
- Akinwumi, I., Soladoye, O., Ajayi, V., & Epelle, P. 2022. "Experimental insight into the containment of plastic waste in cement-stabilised soil as a road pavement layer material". *Infrastructures*, 7(12). <https://doi.org/10.3390/infrastructures7120172>
- Almajed, A., Lemboye, K., & Moghal, A. A. B. 2022. "A critical review on the feasibility of synthetic polymers inclusion in enhancing the geotechnical behavior of soils". *Polymers*, 14(22). <https://doi.org/10.3390/polym14225004>
- Amena, S. 2022. "Utilizing solid plastic wastes in subgrade pavement layers to reduce plastic environmental pollution". *Cleaner Eng. Technol.*, 7. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100438>
- Arabani, M., & Haghsheno, H. 2019. "The effect of polymeric fibers on the mechanical properties of cement-stabilized clay soils in northern Iran". *Int. J. Geotech. Eng.*, 14(5): 557-568. <https://doi.org/10.1080/19386362.2019.1658057>
- ASTM-C150. Standard Specification for Portland Cement. ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
- ASTM-C496. Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens. ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
- ASTM-D422. Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils. ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
- ASTM-D559. Standard Test Methods for Wetting and Drying Compacted Soil-Cement Mixtures. ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
- ASTM-D698. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort. ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
- ASTM-D792. Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement. ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
- ASTM-D854. Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by the Water Displacement Method. ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
- ASTM-D2166. Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil. ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
- ASTM-D2487. Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.

- ASTM-D3418. Standard Test Method for Transition Temperatures and Enthalpies of Fusion and Crystallization of Polymers by Differential Scanning Calorimetry. ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
- ASTM-D4318. Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
- Babu, G. L. S., & Chouksey, S. K. 2011. "Stress-strain response of plastic waste mixed soil". *Waste Manag.*, 31(3): 481–488. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.09.018>
- Barisoglu, E. N., Ghalandari, T., Snoeck, D., Verástegui-Flores, R. D., & Emidio, G. D. 2025. "Utilising construction and demolition waste in soft soil stabilisation: A prediction model for enhanced strength and stiffness". *Transp. Geotech.*, 51. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2025.101530>
- Behmanesh, J., & Mohammadnejad, B. 2013. "Effect of wet-dry cycles on the geotechnical properties of stabilized clayey soil by lime and cement". *Water Soil*, 27(5): 940–948. <https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.31257>
- Chan, C. M. 2012. "Strength and stiffness of a cement-stabilised lateritic soil with granulated rubber addition". *Proc. Inst. Civ. Eng., Ground Improv.*, 165(1): 41–52. <https://doi.org/10.1680/grim.2012.165.1.41>
- Chang, I., Im, J., & Cho, G. C. 2016. "Introduction of microbial biopolymers in soil treatment for future environmentally-friendly and sustainable geotechnical engineering". *Sustainability*, 8: 251. <https://doi.org/10.3390/su8030251>
- Chun, K. T., Choo, H., Kaothon, P., & Yune, C. Y. 2020. "Experimental study on the strength behavior of cement-stabilized sand with recovered carbon black". *Geomech. Eng.*, 23(1): 31–38. <https://doi.org/10.12989/gae.2020.23.1.031>
- Consoli, N. C., Prietto, P. D. M., & Ulbrich, L. A. 1998. "Influence of fiber and cement addition on behavior of sandy soil". *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 124(12): 1211–1214. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)10900241\(1998\)124:12\(1211\)](https://doi.org/10.1061/(asce)10900241(1998)124:12(1211))
- Consoli, N. C., Montardo, J. P., Donato, M., & Prietto, P. D. M. 2004. "Effect of material properties on the behaviour of sand-cement-fibre composites". *Ground Improv.*, 8(2): 77–90. <https://doi.org/10.1680/grim.8.2.77.36370>
- Consoli, N. C., de Moraes, R. R., & Festugato, L. 2011. "Split tensile strength of monofilament polypropylene fiber-reinforced cemented sandy soils". *Geosynthetics Int.*, 18(2): 57–62. <https://doi.org/10.1680/gein.2011.18.2.57>
- Corte, M. B., Festugato, L., Consoli, N., Ibraim, E., & Diambra, A. 2024. "Assessing the mechanical properties of a cemented sand focusing on experimental and theoretical studies". *E3S Web Conf.*, 544: 1001. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202454411001>
- Daryae, M., & Kashefipoor, S. 2011. "Investigation of the effect of adding soft sand and lime on strength properties of clay soils". *Water Soil*, 25(2). <https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.9297> [In Persian]
- Eren, S., & Filiz, M. 2009. "Comparing the conventional soil stabilization methods to the consolid system used as an alternative admixture matter in Isparta Daridere material". *Constr. Build. Mater.*, 23(7): 2473–2480. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.01.002>
- Firoozi, A. A., Guney Olgun, C., Firoozi, A. A., & Baghini, M. S. 2017. "Fundamentals of soil stabilization". *Int. J. Geo-Eng.*, 8(1). <https://doi.org/10.1186/s40703-017-0064-9>
- Gangwar, P. and Tiwari, S. 2021. "Stabilization of soil with waste plastic bottles". *Mater. Today: Proc.*, 47: 3802–3806. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.03.010>
- Gaspard, K. J., Mohammad, L., & Wu, Z. 2003. "Laboratory mechanistic evaluation of soil cement mixtures with fibrillated-polypropylene-fibers". In 82nd Transp. Res. Board Annu. Meet., pp. 12–16.
- Gbenga Matthew, A., & Shola Paul, A. 2018. "Soil stabilization using bitumen emulsion and cement combination as additive". *J. Earth Sci. Eng.*, 8: 66–74. <https://doi.org/10.17265/2159-581X/2018.02.000>
- Ghadir, P., & Ranjbar, N. 2018. "Clayey soil stabilization using geopolymer and Portland cement". *Constr. Build. Mater.*, 188: 361–371. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.207>
- Ghanbari, P. G., Momeni, M., Mousivand, M. and Bayat, M. 2022. "Unconfined compressive strength characteristics of treated peat soil with cement and basalt fibre". *Int. J. Eng. Trans. B: Appl.*, 35(5): 1089–1095. <https://doi.org/10.5829/ije.2022.35.05b.24>
- Girinivas, K. and Hanamasagar, M. M. 2024. "Unconfined compressive strength of cement stabilized soil using industrial wastes including optimization of polypropylene fiber". *Int. J. Eng.*, 37(9): 1847–1856. <https://doi.org/10.5829/ije.2024.37.09c.14>
- Gross, S., & Wayne, A. 2020. "Guide to cement-stabilized subgrade soils". Portland Cement Assoc (PCA).
- Gu, J., Zeng, C., Lyu, H., & Yang, J. 2021. "Effects of cement content and curing period on strength enhancement of cemented calcareous sand". *Mar. Georesour. Geotechnol.*, 39(9): 1083–1095. <https://doi.org/10.1080/1064119X.2020.1804018>

- Gunasekaran, V., & Sandhiya, M. 2018. "Role of thermoplastic granulus for the improvement of strength of clay soil". *Int. J. Trend Sci. Res. Dev.*, 2(5): 96–101. <https://doi.org/10.31142/ijtsrd15787>
- Haghighatjoo, S. M., & Zolfegharifar, S. Y. 2022. "Effects of fibre type and content on unconfined compressive strength of fibre-reinforced lime or cement-stabilised soils". *Geomech. Geoen.*, 17(6): 1962–1972. <https://doi.org/10.1080/17486025.2021.1984589>
- Jafari, M., & Esna-ashari, M. 2012. "Effect of waste tire cord reinforcement on unconfined compressive strength of lime stabilized clayey soil under freeze-thaw condition". *Cold Regions Science and Technology*, 82, 21–29. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2012.05.012>
- Jasim, N. A., Shafiqu, Q. S., & Ibrahim, M. A. 2021. "The effect of adding high-density polyethylene polymer on the engineering characteristics for sandy soil". *J. Eng.*, 27(9): 29–37. <https://doi.org/10.31026/j.eng.2021.09.03>
- Jiang, L., Weng, X. Z., Yang, B. H., Zhang, J., Liu, J. Z., Yan, X. C., & Fang, H. 2015. "Experimental research on mechanical properties of fiber reinforcement cement stabilized soil". *Proc. 2015 Int. Conf. Mater. Sci. Appl.*, 3. <https://doi.org/10.2991/icmsa-15.2015.39>
- Khattak, M. J., & Alrashidi, M. 2006. "Durability and mechanistic characteristics of fiber reinforced soil-cement mixtures". *Int. J. Pavement Eng.*, 7(1): 53–62. <https://doi.org/10.1080/10298430500489207>
- Kulkarni, P. P., & Mandal, J. N. 2022. "Strength evaluation of soil stabilized with nano silica-cement mixes as road construction material". *Constr. Build. Mater.*, 314. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125363>
- Kumar, A., Walia, B. S. and Mohan, J. 2006. "Compressive strength of fiber reinforced highly compressible clay". *Constr. Build. Mater.*, 20(10): 1063–1068. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.02.027>
- Li, J. S., Chen, X., Lang, L., He, X. X., & Xue, Q. 2023. "Evaluation of natural and artificial fiber reinforcements on the mechanical properties of cement-stabilized dredged sediment". *Soils Found.*, 63(3). <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2023.101319>
- Makarchian, M., & Elyas, J. 2013. "Investigation on the effect of geotextiles on pavement bearing capacity (Part 1: Experimental studies)". *Amirkabir J. Civ. Eng.*, 45(1): 43–51. <https://doi.org/10.22060/ceej.2013.15>
- Meddah, A., Goufi, A. E., & Pantelidis, L. 2022. "Improving very high plastic clays with the combined effect of sand, lime, and polypropylene fibers". *Appl. Sci.*, 12(19). <https://doi.org/10.3390/app12199924>
- Meka, M., & Patel, A. 2021. "Analysis of the effect of plastic waste strips on characteristics of fine-grained soils". In *Lecture Notes in Civ. Eng. (Springer Science and Business Media Deutschland GmbH)*, 134: 1–13. [https://doi.org/10.1007/978-981-33-6370-0\\_1](https://doi.org/10.1007/978-981-33-6370-0_1)
- Mola Abasi, H., Kharazmi, P., Khajeh, A., Saberian, M., Jamshidi Chenari, R., Harandi, M., & Li, J. 2022. "Low plasticity clay stabilized with cement and zeolite: An experimental and environmental impact study". *Resour. Conserv. Recycl.*, 184. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106408>
- Nagy, A. C., Cîrcu, A., Moldovan, D. V., Ciubotaru, V. C. and Muntean, L. E. 2017. "Cementtel stabilizált talajminták teherbírása tengelyirányú nyújtóerő esetén". *Műszaki Tudományos Közlemények*, 7: 299–302. <https://doi.org/10.33895/mtk-2017.07.67>
- Norouznejad, G., Shooshpasha, I., Mirhosseini, S. M., Afzalirad, M., & Afzalirad, M. 2021. "Influence of zeolite on the compaction characteristics and shear strength parameters of cemented sand". *Sains Malaysiana*, 50(11): 3181–3191. <https://doi.org/10.17576/jsm-2021-5011-03>
- Nguyen, D. T., & Phan, V. T. A. 2021. "Engineering properties of soil stabilized with cement and fly ash for sustainable road construction". *Int. J. Eng., Trans. B: Appl.*, 34(12): 2665–2671. <https://doi.org/10.5829/IJE.2021.34.12C.12>
- Onyelowe, K. C. 2019. "Review on the role of solid waste materials in soft soils reengineering". *Mater. Sci. Energy Technol., KeAi Commun.* <https://doi.org/10.1016/j.mset.2018.10.004>
- Pantawane, R. 2019. "Effects of waste plastic on cement stabilized soil". *Int. J. Res. Appl. Sci. Eng. Technol.*, 7(3): 2162–2168. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2019.3399>
- Patel, A. 2019. "Geotechnical investigations and improvement of ground conditions". *Geotechnical Investigations and Improvement of Ground Conditions*, pp. 1–201. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2018-0-01307-9>
- Paul, S., Tasnim, A., & Majumder, J. 2025. "Enhancement of micro-mechanical characteristics of expansive soil through synergistic incorporation of jute and nylon fibers with cement". *Results Eng.*, 26: 104685. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104685>
- Pedroso, G. O. M., dos Santos Junior, R. D., Lins da Silva, J., Motta, M. F. B., & Félix, E. F. 2023. "Flexural strength characteristics of fiber-reinforced cemented soil". *Mater.*, 16(11). <https://doi.org/10.3390/ma16114185>

- Pongsivasathit, S., Horpibulsuk, S., & Piyaphipat, S. 2019. "Assessment of mechanical properties of cement stabilized soils". *Case Stud. Constr. Mater.*, 11. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00301>
- Roshan, M. J., & Rashid, A. S. B. A. 2024. "Geotechnical characteristics of cement stabilized soils from various aspects: A comprehensive review". *Arab. J. Geosci.*, 17(1). <https://doi.org/10.1007/s12517-023-11796-1>
- Safdar, M., Newson, T., & Qureshi, H. A. 2022. "Shear strength of fibre reinforced cemented Toyoura sand". *AIMS Geosci.*, 8(1): 68–83. <https://doi.org/10.3934/geosci.2022005>
- Sahlabadi, S., Bayat, M., Mousivand, M., & Saadat, M. 2021. "Freeze–thaw durability of cement-stabilized soil reinforced with polypropylene/basalt fibers". *J. Mater. Civ. Eng.*, 33(9). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0003905](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0003905)
- Sas, W. and Gluchowski, A. 2016. "Effects of stabilization with cement on mechanical properties of cohesive soil–sandy-silty clay". *Ann. Warsaw Univ. Life Sci.–SGGW Land Reclam.*, 45(2): 193–205. <https://doi.org/10.2478/sggw-2013-0016>
- Shen, Y. S., Tang, Y., Yin, J., Li, M. P., & Wen, T. 2021. "An experimental investigation on strength characteristics of fiber-reinforced clayey soil treated with lime or cement". *Constr. Build. Mater.*, 294. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123537>
- Shooshpasha, I. and Shirvani, R. A. 2015. "Effect of cement stabilization on geotechnical properties of sandy soils". *Geomech. Eng.*, 8(1): 17–31. <https://doi.org/10.12989/gae.2015.8.1.017>
- Silveira, M. R., Lodi, P. C., Correia, N. de S., Rodrigues, R. A., & Giacheti, H. L. 2020. "Effect of recycled polyethylene terephthalate strips on the mechanical properties of cement-treated lateritic sandy soil". *Sustainability*, 12(23): 1–19. <https://doi.org/10.3390/su12239801>
- Smitha, S., & Sachan, A. 2016. "Use of agar biopolymer to improve the shear strength behavior of sabarmati sand". *Int. J. Geotech. Eng.*, 1–14. <https://doi.org/10.1080/19386362.2016.1152674>
- Sobhan, K. 2008. "Improving the tensile strength and toughness of a soil-cement-fly ash pavement subgrade with recycled HDPE strips". *Proc. Am. Soc. Civ. Eng.*, 1065–1072. [https://doi.org/10.1061/40971\(310\)133](https://doi.org/10.1061/40971(310)133)
- Sobhan, K., & Mashnad, M. 2002. "Tensile strength and toughness of soil–cement–fly-ash composite reinforced with recycled high-density polyethylene strips". *J. Mater. Civ. Eng.*, 14(2): 177–184. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2002\)14:2\(177\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2002)14:2(177))
- Sreekumar, M, Nair, Deepa, & G. 2021. "Feasibility of plastic waste as reinforcement in the mechanical properties of stabilized lateritic soil blocks". *Proceedings of 36th National Convention of Civil Engineers & National Conference on Innovation, Mechanization and Modern Techniques in Civil Engineering*, organized by Jharkhand State Centre. 10.36375/prepare\_u.iei.a141
- Starcher, R. D., & Liu, C. 2013. "Mechanical behavior of cement- and cement-fiber-improved soft soils". *Geo-Congress 2013: Stability and Performance of Slopes and Embankments III (Am. Soc. Civ. Eng., pp. 2041–2050)*. <https://doi.org/10.1061/9780784412787.206>
- Tabassum, T., & Bheemasetti, T. V. 2022. "Investigative studies on recycled high-density polyethylene and polypropylene pellets for stabilization of kaolinite rich soils". *J. Mater. Civ. Eng.*, 34(8). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0004318](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0004318)
- Tajdini, M., Hajjalilue Bonab, M., & Golmohamadi, S. 2018. "An experimental investigation on effect of adding natural and synthetic fibres on mechanical and behavioural parameters of soil–cement materials". *Int. J. Civ. Eng.*, 16(4): 353–370. <https://doi.org/10.1007/s40999-016-0118-y>
- Teymur, B., & Atapek, B. A. 2010. "Mechanical properties of used tire granulates, sand, and cement mixtures". *Am. Soc. Civ. Eng. (Proceedings/Ground Improvement and Geosynthetics)*, pp. 131–137. [https://doi.org/10.1061/41108\(381\)17](https://doi.org/10.1061/41108(381)17)
- Tran, K. Q., Satomi, T., & Takahashi, H. 2019. "Tensile behaviors of natural fiber and cement reinforced soil subjected to direct tensile test". *J. Build. Eng.*, 24. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.100748>
- Tamassoki, S., Daud, N. N. N., Nejabi, M. N., & Roshan, M. J. 2023. "Fiber reinforced soil mixed lime/cement additives: A review". *Pertanika J. Sci. Technol.*, 31(1). <https://doi.org/10.47836/pjst.31.1.14>
- Wang, S., Chen, F., Xue, Q., & Zhang, P. 2020. "Splitting tensile strength of cement soil reinforced with basalt fibers". *Mater.*, 13(14). <https://doi.org/10.3390/ma13143110>
- Wibowo, D. E., Ramadhan, D. A., Endaryanta, & Prayuda, H. 2023. "Soil stabilization using rice husk ash and cement for pavement subgrade materials". *Rev. La Constr.*, 22(1): 192–202. <https://doi.org/10.7764/RDLC.22.1.192>
- Wu, J., Liu, L., Deng, Y., Zhang, G., Zhou, A., & Xiao, H. 2022. "Use of recycled gypsum in the cement-based stabilization of very soft clays and its micro-mechanism". *J. Rock Mech. Geotech. Eng.*, 14(3): 909–921. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2021.10.002>

- Yang, X., Liang, S., Hou, Z., Feng, D., Xiao, Y., & Zhou, S. 2022. "Experimental study on strength of polypropylene fiber reinforced cemented silt soil". *Appl. Sci.*, 12(16). <https://doi.org/10.3390/app12168318>
- Yang, Y., Li, S., Li, C., Wu, L., Yang, L., Zhang, P., & Huang, T. 2020. "Comprehensive laboratory evaluations and a proposed mix design procedure for cement-stabilized cohesive and granular soils". *Front. Mater.*, 7. <https://doi.org/10.3389/fmats.2020.00239>
- Yohanna, P., Etim, R., Ekene, N., Toluwase, J., Mbah, E., Ayodeji, O., Aliyu, U., Owoicho, M. and Moris, K. 2024. "Case evaluation of structural strength improvement of cement stabilized lateritic soil reinforced with sisal fibers and plastic waste strips". *Discover Civil Engineering*, 1: 00069. <https://doi.org/10.1007/s44290-024-00069-9>
- Zeng, L., Bian, X., Weng, J., & Zhang, T. 2024. "Wetting-drying effect on the strength and microstructure of cement-phosphogypsum stabilized soils". *J. Rock Mech. Geotech. Eng.*, 16(3): 1049–1058. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2023.06.022>
- Zhao, J., Zong, Z., Cen, H., & Jiang, P. 2024. "Analysis of mechanical properties of fiber-reinforced soil cement based on kaolin". *Mater.*, 17: 2153. <https://doi.org/10.3390/ma1709215>
- Zvonarić, M., Barišić, I., & Dokšanović, T. 2024. "Effect of rubber granules and rubber threads on mechanical properties of cement-bound base course". *Constr. Build. Mater.*, 437: 137094. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137094>