



Semnan University

Journal of Transportation Infrastructure Engineering

Journal homepage: <https://jtie.semnan.ac.ir/?lang=en>

ISSN: 2821-0549



Research Article

Effect of Cement Content and Curing Time on Unconfined Compressive Strength and Soil Elasticity Coefficient

Mahmoud Nikkhah Shahmirzadi ^{a*}, Alireza Khalaj ^b, Arezoo Tahan ^c

^a Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Semnan Branch, Islamic Azad University, Semnan, I. R. Iran.

^b Graduated MSc., Department of Civil Engineering, Semnan Branch, Islamic Azad University, Semnan, I. R. Iran.

^c Associate Professor, Department of Chemistry, Semnan Branch, Islamic Azad University, Semnan, I. R. Iran.

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2024-12-13

Revised: 2025-03-30

Accepted: 2025-04-05

Keywords:

Cement;

Compaction;

Unconfined compressive strength;

Stress-strain.

ABSTRACT

Building the buildings and other engineering structures on weak or soft soil is very risky because such soil is prone to different settlements due to its low shear resistance and high compressibility. Improving some soil properties such as bearing capacity and shear resistance characteristics can be done by one of the methods of improvement, which is stabilization. In this article, the effect of cement on soil properties in the southeast region of Semnan was investigated. The main objective of this research is to investigate the effect of cement on the compressive strength of sandy clay with silty soil. The tests used in this research included compaction and unconfined compressive strength. Laboratory samples were prepared by static compaction method. The samples were made in 95% of the maximum dry unit mass in order to achieve the best density and with different percentages of cement (2, 4, 6, 8, 10). With increasing the cement from 2% to 8%, the unconfined compressive strength of the cement soil increases and adding more cement causes the unconfined compressive strength to decrease. With increasing the amount of cement from 2% to 8%, the elasticity coefficient increased with a low slope, but with the increase of cement up to 10%, the trend of changes was strongly increasing. Adding cement increases the maximum dry unit weight. By adding cement to the soil, its resistance increases; This increase in strength is a function of the percentage of cement used and the curing time. The results obtained from the soil elasticity coefficient indicate an increase in the brittleness of the soil mixed with cement, which increases with the increase in the percentage of cement used or the curing time. Adding cement changes the fracture of the samples from soft to brittle.

* Corresponding author.

E-mail address: nik_khah@yahoo.com

How to cite this article: Nikkhah Shahmirzadi, M., Khalaj, A. and Tahan, A. (2025). Effect of cement content and curing time on unconfined compressive strength and soil elasticity coefficient). *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*, 11(1), 59-82. <https://doi.org/10.22075/jtie.2025.35698.1706>

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



مقاله پژوهشی

تأثیر مقدار سیمان و زمان عمل‌آوری بر مقاومت فشاری محدود نشده و ضریب ارتجاعی خاک

محمود نیکخواه شه میرزادی^{۱*}، علیرضا خلیج^۲، آرزو طحان^۳

^۱ استادیار گروه مهندسی عمران، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران.
^۲ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه مهندسی عمران، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران.
^۳ دانشیار گروه شیمی، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران.

چکیده

ساخت ساختمان‌ها و سایر سازه‌های مهندسی روی خاک ضعیف یا نرم، بسیار مخاطره‌آمیز است زیرا چنین خاکی به دلیل مقاومت برشی کم و تراکم‌پذیری زیاد، مستعد نشست‌های متفاوت است. بهبود برخی از خواص خاک مانند ظرفیت باربری و ویژگی‌های مقاومت برشی خاک را می‌توان با یکی از روش‌های بهسازی، یعنی تثبیت، انجام داد. در این مقاله، تأثیر سیمان بر خصوصیات خاک واقع در منطقه جنوب شرقی سمنان مورد بررسی قرار گرفت. هدف اصلی این پژوهش، بررسی اثر سیمان بر مقاومت فشاری خاک ماسه‌ای رس‌دار به همراه لای است. آزمایش‌های مورد استفاده در این تحقیق شامل تراکم و مقاومت فشاری محدود نشده بود. نمونه‌های آزمایشگاهی به روش تراکم استاتیک تهیه شدند. نمونه‌ها در ۹۵ درصد جرم مخصوص خشک بیشینه به‌منظور رسیدن به بهترین تراکم و با درصد‌های مختلف سیمان (۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰) ساخته شدند. با ازدیاد سیمان از ۲ تا ۸ درصد، مقاومت فشاری محدود نشده خاک سیمان افزایش یافته و افزودن بیشتر سیمان باعث کاهش مقاومت فشاری محدود نشده گردید. با ازدیاد مقدار سیمان از ۲ تا ۸ درصد، مقدار ضریب ارتجاعی با شیب ملایمی افزایش یافته ولی ازدیاد بیشتر سیمان تا ۱۰ درصد، روند تغییرات به شدت افزایشی بود. ازدیاد سیمان باعث افزایش وزن مخصوص خشک بیشینه شد. با افزودن سیمان به خاک، مقاومت آن افزایش یافت؛ این افزایش مقاومت تابعی از درصد سیمان به‌کار رفته و زمان عمل‌آوری است. نتایج به‌دست آمده از ضریب ارتجاعی خاک، حاکی از افزایش شکنندگی خاک اختلاط یافته با سیمان است که با افزایش درصد سیمان به‌کار رفته و یا زمان عمل‌آوری، این شکنندگی بیشتر شد. افزودن سیمان، گسیختگی نمونه‌ها را از نرم به شکننده تغییر داد.

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۹/۲۳

بازنگری مقاله: ۱۴۰۴/۰۱/۱۰

پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۱/۱۶

واژگان کلیدی:

سیمان،

تراکم،

مقاومت فشاری محدود نشده،

تنش-کرنش،

سمنان.

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: nik_khah@yahoo.com

استناد به این مقاله: نیکخواه شه میرزادی، محمود، خلیج، علیرضا و طحان، آرزو. (۱۴۰۴). تأثیر مقدار سیمان و زمان عمل‌آوری بر مقاومت فشاری محدود نشده و ضریب ارتجاعی خاک. مهندسی زیر ساخت‌های حمل و نقل، ۱۱(۱)، ۵۷-۸۲. <https://doi.org/10.22075/jtie.2025.35698.1706>

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

۱. مقدمه

در سال‌های اخیر، با رشد جمعیت جهان، زمین‌های مناسب ساخت و ساز رو به کاهش است. نیاز به بهبود و اصلاح زمین‌های نامناسب و استفاده بهینه از خاک‌های موجود، رقابت شدیدی در بین مهندسان عمران ایجاد کرده است. پراکندگی و گسترده‌ی خاک‌های مسئله‌دار و خاک‌هایی با درصد رطوبت زیاد و کارایی کم برای عملیات عمرانی، مشکلات زیادی را مطرح کرده است (اسلامی، ۲۰۰۴). بهسازی خاک‌های مسئله‌دار، یکی از موضوعات مورد علاقه مهندسان ژئوتکنیک می‌باشد (بابالار و همکاران، ۲۰۱۶). به‌منظور بهبود خواص فیزیکی و شیمیایی خاک، اقدام به بهسازی آن می‌کنند (خلوصی و همکاران، ۲۰۱۷). بهسازی خاک به روش‌های گوناگونی مانند فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیک صورت می‌پذیرد (بابالار و همکاران، ۲۰۱۶). یکی از مزایای اصلی سیمان در مقایسه با سایر مواد قابل استفاده برای بهسازی، آن است که سیمان طبق دستورالعمل مشخص و مطابق استاندارد تهیه می‌شود و در بیشتر مناطق به آسانی قابل دسترس است؛ از این‌رو، به‌وسیله پژوهشگران برای امور بهسازی خاک به آن توجه می‌شود (خلوصی و همکاران، ۲۰۱۷). تثبیت خاک، به بهبود خواص فیزیکی و مهندسی آن برای تأمین اهداف از پیش تعیین‌شده اطلاق می‌شود (طاهرخانی، ۲۰۱۶). با تثبیت خاک می‌توان ظرفیت باربری پی‌ها، بسترهای اساس و زیراساس، بستر فرودگاه‌ها و ریل‌های راه‌آهن را افزایش داد (بنده زاده و همکاران، ۲۰۱۱). انواع مختلفی از مواد افزودنی برای تثبیت خاک به کار می‌رود که انتخاب نوع آن به عوامل مختلفی مثل جنس خاک، شرایط جوی، هدف از تثبیت، و مسائل زیست‌محیطی و اقتصادی بستگی دارد (طاهرخانی، ۲۰۱۶). مقرون به صرفه بودن و اجرای سریع تثبیت‌کننده‌ها موجب شد تا در سال‌های اخیر در کشور ایران هم گرایش به استفاده از این تثبیت‌کننده‌ها فزونی یابد (مقدس‌نژاد و مدرس، ۲۰۱۰). این

روش در بیشتر موارد در پروژه‌های راه‌سازی به‌منظور اصلاح خاک‌های نرم و کم‌مقاومت، بهبود مشخصات فنی خاک‌ها و مصالح شنی، ایجاد لایه‌های اساس و زیراساس با قابلیت باربری زیاد، بازسازی روسازی‌های فرسوده با استفاده از مصالح موجود مورد استفاده قرار گرفته است. مطالعات گسترده‌ای در زمینه چگونگی بهبود خواص خاک‌ها به این روش صورت پذیرفته است؛ از جمله، می‌توان به موارد زیر اشاره نمود.

کسنولی و همکاران (۲۰۰۷) تأثیر مقدار سیمان را بر مقاومت فشاری محدود نشده خاک ماسه‌ای رس‌دار مورد بررسی قرار دادند. نتایج این پژوهش نشان داد که مقاومت فشاری محدود نشده به‌صورت خطی با درصد سیمان افزایش یافت.

حق شنو و عربانی (۲۰۰۸) خصوصیات ماسه تثبیت شده با سیمان را بررسی نمودند. نتایج این پژوهش نشان داد که افزودن سیمان تا حد معین، موجب افزایش مقاومت فشاری ماسه تثبیت شده با سیمان می‌شود. موهانتان و سریع‌السیری (۲۰۰۸) در یک تحقیق، نقش مثبت سیمان در بهبود خواص خاک با آزمایش-های تراکم، مقاومت فشاری محدود نشده را مورد بررسی قرار دادند.

سریع‌السیری و موهانتان (۲۰۰۹) تأثیر مقدار سیمان بر مشخصات ژئوتکنیک دو نوع خاک را مورد بررسی قرار دادند. با ازدیاد مقدار سیمان، تنش حداکثر محوری به مقدار قابل توجهی افزایش یافته و با افزایش مقدار سیمان، رفتار خاک شکننده‌تر شد. با ازدیاد مقدار سیمان، مقدار رطوبت بهینه افزایش و وزن مخصوص خشک بیشینه کاهش یافت.

یون و ابوفرسخ (۲۰۰۹) مشخصات تراکمی و مقاومت فشاری محدود نشده خاک ماسه‌ای لای‌دار را مورد بررسی قرار دادند. با ازدیاد چگالی خشک، مقاومت فشاری محدود نشده افزایش یافت؛ ولی بیشترین مقاومت فشاری محدود نشده مربوط به بیشترین مقدار

چگالی خشک نبود. با ازدیاد درصد رطوبت، مقدار مقاومت فشاری محدود نشده افزایش یافت و پس از رسیدن به قله، ازدیاد درصد رطوبت باعث کاهش مقاومت فشاری شد.

مقدس‌نژاد و مدرس (۲۰۱۰) اثر مقدار سیمان و مدت زمان عمل‌آوری بر مقاومت فشاری محدود نشده دو نوع از خاک‌های مناطق شمالی کشور را مورد مطالعه قرار دادند. کرنش حد گسیختگی خاک ماسه‌ای کمتر از رسی است. مقدار کرنش حد گسیختگی برای نمونه‌های ۲۷ روزه نسبت به ۷ روزه کاهش یافته است.

سریع‌السیری و همکاران (۲۰۱۱) خواص مهندسی دو نوع خاک تثبیت‌شده با سیمان را در آزمایش‌های تراکم و فشاری محدود نشده مورد بررسی قرار دادند. ازدیاد سیمان باعث افزایش درصد رطوبت بهینه در آزمایش تراکم و افزایش قابل ملاحظه مقاومت فشاری محدود نشده شده است. با افزایش سیمان، رفتار خاک شکننده‌تر شد. در خاک ماسه‌ای، با ازدیاد درصد سیمان، کرنش نظیر تنش محوری حداکثر از ۲ درصد به ۱ درصد کاهش یافت.

سرکار و همکاران (۲۰۱۲) رفتار خاک رس با خاصیت خمیری کم را در آزمایش‌های تراکم و فشاری محدود نشده مورد بررسی قرار دادند. با ازدیاد مقدار سیمان، درصد رطوبت بهینه در آزمایش تراکم افزایش یافت. تا مقدار ۷/۵ درصد سیمان، رشد مقاومت فشاری محدود نشده سریع بود و پس از آن، مقدار مقاومت فشاری محدود نشده به تدریج افزایش یافت.

صدیقی و همکاران (۲۰۱۴) تأثیر مقدار سیمان بر وزن مخصوص خشک و مقاومت فشاری سه نوع خاک مسئله‌دار را مورد بررسی قرار دادند. با ازدیاد مقدار سیمان، درصد رطوبت ماسه بندر انزلی و خاک گس گرگان افزایش یافت. ضریب ارتجاعی نیز با ازدیاد میزان سیمان به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافت.

خطیبی و همکاران (۲۰۱۵) تأثیر مقدار سیمان و زمان

عمل‌آوری بر منحنی تنش-کرنش و مقاومت فشاری محدود نشده خاک رس را مورد بررسی قرار دادند. ازدیاد سیمان به خاک، موجب افزایش مقاومت و نیز پیدایش خاصیت شکنندگی در نمونه‌ها شد؛ به طوری که این خصوصیت با افزایش درصد سیمان افزایش یافت. افزایش زمان عمل‌آوری، باعث افزایش مقاومت مخلوط خاک سیمان شد. نمودارهای تنش-کرنش نشان داد که افزایش زمان عمل‌آوری موجب افزایش مقاومت و خصوصیت شکنندگی نمونه می‌شود.

ملاعباسی و شوش‌پاشا (۲۰۱۶) تأثیر مقدار سیمان، درصد رطوبت و مدت زمان عمل‌آوری بر منحنی رفتاری تنش-کرنش و مقاومت فشاری محدود نشده خاک ماسه بد دانه‌بندی شده بابل‌سر را مورد بررسی قرار دادند. بیشینه مقاومت فشاری محدود نشده تک‌محوری با ازدیاد درصد سیمان، افزایش یافته و کرنش متناظر آن کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده رفتار ترد و شکننده نمونه‌ها است. با ازدیاد رطوبت تا ۱۱ درصد، مقاومت فشاری محدود نشده افزایش و بعد از ۱۱ درصد، کاهش یافت.

ملاعباسی و شوش‌پاشا (۲۰۱۶) تأثیر مقدار سیمان بد دانه‌بندی شده بابل‌سر را بر منحنی تنش-کرنش و مقاومت فشاری محدود نشده مورد بررسی قرار دادند. با ازدیاد مقدار سیمان از ۴ درصد به ۸ درصد، حداکثر تنش محوری به‌طور قابل توجهی افزایش و کرنش نظیر تنش محوری حداکثر، کاهش یافت.

ریبیر و همکاران (۲۰۱۶) تأثیر درصد رطوبت و سیمان بر مقاومت فشاری محدود نشده خاک ماسه‌ای لای‌دار را مورد بررسی قرار دادند. برای هر درصد وزنی سیمان، یک مقدار درصد رطوبت بهینه برای رسیدن به حداکثر مقدار مقاومت فشاری محدود نشده خاک سیمان وجود دارد.

فورسلینی و همکاران (۲۰۱۶) تأثیر مقدار سیمان و زمان عمل‌آوری بر مقاومت فشاری محدود نشده و ضریب ارتجاعی خاک ماسه بد دانه‌بندی شده را مورد

دیگر، نتایج به‌دست آمده از ضریب ارتجاعی خاک، حاکی از افزایش شکنندگی خاک اختلاط یافته با سیمان است.

یائو و همکاران (۲۰۲۰) نشان دادند که رابطه بین مقاومت فشاری و مقدار سیمان در زمان‌های عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روزه، خطی است.

دینگ و همکاران (۲۰۲۲) به این نتیجه رسیدند که با افزایش مقدار سیمان، کرنش گسیختگی کاهش یافت. وو و همکاران (۲۰۲۳) تأثیر زمان عمل‌آوری بر مقاومت فشاری محدود نشده را بررسی کردند. نرخ رشد مقاومت فشاری نمونه‌های ۲۸ روزه نسبت به ۷ روزه حدود ۲۰ درصد بود.

لیو و همکاران (۲۰۲۵) نشان دادند که برای خاک ماسه‌ای، بیشترین مقاومت فشاری محدود نشده در مقدار سیمان ۸ درصد حاصل شد.

همانطور که از مروری بر تحقیقات گذشته برمی‌آید، رفتار مصالح خاکی مخلوط با سیمان، بسیار پیچیده است و این پیچیدگی بیشتر ناشی از عوامل ناشناخته مؤثر بر رفتار این نوع از مصالح است. گرچه تحقیقات زیادی در زمینه استفاده از سیمان در خاک‌های مختلف، صورت پذیرفته است، تحقیقات در خصوص اثر سیمان بر خواص فیزیکی و مکانیکی آن‌ها بسیار محدود است. تعیین درصد سیمان بهینه با استفاده از آزمایش تراکم، تأثیر مقدار سیمان بر حداکثر جرم مخصوص خشک و رطوبت بهینه در آزمایش تراکم، تأثیر مقدار سیمان و مدت زمان عمل‌آوری بر منحنی رفتاری تنش-کرنش و مقاومت فشاری محدود نشده آزمایش تک‌محوری، تأثیر مقدار سیمان و زمان عمل‌آوری بر ضریب ارتجاعی و تعیین رابطه ضریب ارتجاعی و مقاومت فشاری محدود نشده از جمله اهداف مهم این پژوهش آزمایشگاهی است.

بررسی قرار دادند. با ازدیاد مقدار سیمان و زمان عمل‌آوری، مقاومت فشاری محدود نشده و ضریب ارتجاعی افزایش یافت.

وو و همکاران (۲۰۱۶) تأثیر مقدار سیمان و زمان عمل‌آوری بر مشخصات تراکمی و مقاومت فشاری محدود نشده خاک ریزدانه را مورد بررسی قرار دادند. با ازدیاد مقدار سیمان، حداکثر جرم مخصوص خشک در آزمایش تراکم اصلاح شده افزایش یافت. با ازدیاد درصد سیمان و مدت زمان عمل‌آوری، مقاومت فشاری محدود نشده افزایش یافت.

بهمی و همکاران (۲۰۱۶) تأثیر مقدار سیمان و مدت زمان عمل‌آوری بر مقاومت فشاری محدود نشده خاک رس را مورد مطالعه قرار دادند. با ازدیاد سیمان، مقاومت فشاری محدود نشده افزایش یافت.

ناصری و همکاران (۲۰۱۶) تأثیر مدت زمان عمل‌آوری بر منحنی رفتاری تنش-کرنش و مقاومت فشاری محدود نشده خاک رس با خاصیت خمیری زیاد را مورد بررسی قرار دادند. با افزایش مدت زمان عمل‌آوری، شیب نمودار تنش-کرنش و مقاومت فشاری محدود نشده خاک سیمان افزایش یافت.

طاهرخانی (۲۰۱۶) اثر مقدار سیمان و مدت زمان عمل‌آوری را بر مقاومت فشاری دو نوع خاک رس را مورد بررسی قرار داد. مقاومت فشاری با ازدیاد مقدار سیمان، حدود ۵ تا ۷ درصد، افزایش یافت.

تاج‌الدینی و همکاران (۲۰۱۶) تأثیر زمان عمل‌آوری بر مقاومت فشاری محدود نشده را مورد بررسی قرار دادند. با گذشت زمان، مقاومت فشاری محدود نشده افزایش یافت.

خلوصی و همکاران (۲۰۱۷) تأثیر مقدار سیمان و زمان عمل‌آوری بر مقاومت فشاری محدود نشده خاک رس با خاصیت خمیری کم (CL) را مورد بررسی قرار دادند. بیشترین وزن مخصوص خشک و کمترین رطوبت بهینه در مقدار سیمان ۵ درصد به دست آمد. از طرف

۲. مواد و روش‌ها

در این بخش، ابتدا به مصالح مصرفی، روش نمونه‌گیری، خصوصیات هر کدام، و روش‌های مورد استفاده در تعیین هر یک از ویژگی‌ها پرداخته خواهد شد. سپس، شرح مختصری از نوع آزمایش‌های انجام شده جهت بررسی خصوصیات تراکمی و مقاومتی خاک سیمان و روش‌های انجام آن ارائه خواهد شد.

۲-۱. خاک

منطقه مورد مطالعه با طول جغرافیایی ۵۳/۵۰ درجه شرقی

و عرض جغرافیایی ۳۵/۵۷ درجه شمالی در مقابل نیم-ایستگاه متروک راه‌آهن و ۱۵ کیلومتری جنوب شرقی سمنان قرار دارد. در سمت جنوب نقشه، چهار گوش زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ سمنان قابل مشاهده است (شکل ۱). نمونه‌برداری خاک از محل، مطابق روش استاندارد ASTM D75 انجام شده است. خاک از عمق ۵۰ تا ۷۰ سانتی‌متری نمونه‌برداری شد. نمونه در حالت دست-خورده با حفاری دستی به مقدار کافی برای تمامی آزمایش‌ها جمع‌آوری شد. برای تعیین جرم مخصوص خاک در محل، از روش مخروط ماسه مطابق استاندارد ASTM D1556 استفاده شد (شکل ۲). نتایج حاصل از این آزمایش در جدول ۱ ارائه شده است.



شکل ۱. محل نمونه‌برداری از خاک مینا



شکل ۲. نمونه‌گیری مربوط به آزمایش دانسیته در محل به روش مخروط ماسه

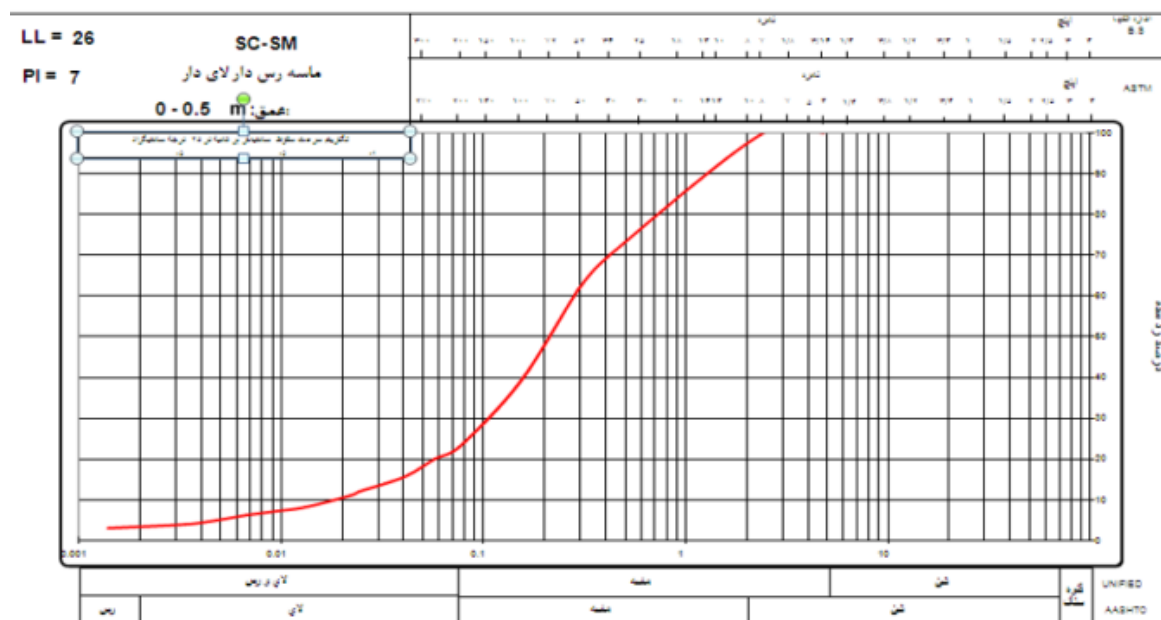
تأثیر مقدار سیمان و زمان عمل‌آوری بر مقاومت فشاری محدود نشده و ضریب ارتجاعی خاک

جدول ۱. نتایج آزمایش جرم مخصوص خاک در محل

جرم مخصوص خشک (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	جرم مخصوص تر (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	مقدار رطوبت (درصد)	عمق نمونه‌برداری (متر)
۱/۶۱	۱/۶۸	۴/۲	۰/۵

همچنین با روش شستشو برای مصالح ریزدانه انجام پذیرفت. علاوه بر این، روی نمونه فیلر، آزمایش دانه‌بندی و هیدرومتری به روش ASTM D7928 انجام و نتایج حاصل از دانه‌بندی خاک در شکل ۳ ترسیم گردیده است.

نمونه خاک اخذ شده از محل دیو پس از حمل به آزمایشگاه، مطابق استاندارد ASTM D2487 به مقدار مورد نیاز برای آزمایش دانه‌بندی مطابق الزامات ASTM D6913 تقلیل داده شد. آزمایش دانه‌بندی مصالح خاکی بر اساس استاندارد ASTM D6913 و



شکل ۳. منحنی دانه‌بندی خاک مینا

جدول ۲. نتایج ویژگی‌های انواع خاک مورد استفاده در تحقیق

نوع خاک	Class	C _c	C _u	D ₁₀	D ₃₀	D ₅₀	D ₆₀	D ₉₀	Pass#200
مینا	SC-SM	۱۴	۲۱/۲۴	۰/۰۲	۰/۱۲	۰/۲۲	۰/۲۸۰	۱/۴۵	۲۳

سیمان به خاک مینا، اختلاط خشک مجموعه به صورت دستی و نهایتاً اضافه کردن رطوبت مورد نیاز (مجموع رطوبت مورد نیاز جهت تراکم و هیدراته شدن سیمان) و اختلاط مجدد به صورت کاملاً همگن و یکنواخت در لایه‌های یکسان (سه لایه) تا حصول جرم مخصوص خشک ساخته شده‌اند. تراکم استاتیک به دلیل سادگی کار، وارد کردن انرژی یکسان به هر لایه و در نتیجه یکنواختی در تراکم لایه‌ها و نزدیک‌تر بودن شیوه تراکم به روش تراکم در محل، به تراکم دینامیک ترجیح داده می‌شود. نمونه‌های خاک سیمان به روش B بر اساس استاندارد ASTM D1633 ساخته شده است. بدین منظور، نمونه‌ها در قالبی با ارتفاع ۱۴۲/۲ و قطر ۷۱/۱ میلی‌متر (نسبت ارتفاع به قطر ۲) در سه لایه ریخته شده متراکم شدند. بنابراین، از روش سعی و خطا استفاده شده و میزان نیروی وارده به منظور تراکم هر نمونه در هنگام ساخت به گونه‌ای تعیین شد که وزن واحد حجم خشک نمونه ساخته شده پس از خارج کردن از قالب، برابر ۹۵ درصد وزن واحد حجم خشک بیشینه نمودار تراکمی مربوط به آن نمونه شود. در هنگام ساخت نمونه‌ها، رطوبت خاک با اضافه کردن آب به شرایط رطوبت بهینه رسیده بود. پس تمامی نمونه‌های ساخته شده برای انجام آزمایش‌های بعدی دارای ۹۵ درصد وزن واحد حجم خشک بیشینه و رطوبت بهینه متناظر با نمودار تراکمی مربوطه بودند. حتی‌الامکان سعی شد در هنگام ساخت، یکنواخت‌ترین مخلوط تهیه و هنگام بیرون آوردن نمونه از داخل قالب، کمترین دست‌خوردگی ایجاد شود. نمونه‌ها در ۹۵ درصد جرم مخصوص خشک بیشینه (با تراکم ۹۵ درصد پروکتور اصلاح شده، جرم مخصوص خشک ۱/۸۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب) و مقدار رطوبت بهینه (۹/۶ درصد) به منظور رسیدن به بهترین تراکم، برای هر ترکیب ساخته شدند. پس از تفکیک مصالح خاک مینا، نمونه‌های خاک سیمان با درصد‌های ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ ساخته شدند. دستگاه آزمایش تعیین مقاومت فشاری محدود نشده در شکل ۴ نشان داده شده است.

برای تعیین درصد رطوبت خاک از روش ASTM D2216 استفاده شد که در این آزمایش چگونگی تعیین آزمایشگاهی درصد رطوبت توسط اندازه‌گیری جرم خاک، که جرم آنها در اثر خشک شدن و از دست دادن رطوبت کاهش می‌یابد، محاسبه می‌نماید. با توجه به اینکه خاک محل مورد آزمایش دارای سولفات آبدار و سایر ترکیباتی که مقدار قابل ملاحظه‌ای آب هیدراته دارند، بدین جهت به منظور عدم کاهش آب مولکولی این مواد در دمای ۶۰ درجه سلسیوس، درصد رطوبت خاک تعیین شد. از روش‌های آزمون استاندارد ASTM D4318 برای تعیین حد روانی، حد خمیری و گام خمیری استفاده شد.

۲-۲. سیمان پرتلند

در این مطالعه، از سیمان پرتلند نوع ۲ مطابق استاندارد ASTM C150 استفاده شد که از کارخانه سیمان تهران با جرم مخصوص ۳/۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب تهیه شده بود.

۲-۳. روش آماده‌سازی نمونه‌ها

برای دستیابی به اهداف این تحقیق، تهیه نمونه‌های آزمایشی مناسب نیاز است. نمونه‌های مورد نظر در این پژوهش شامل نمونه‌هایی از خاک طبیعی و خاک سیمان است. مقدار سیمان لازم برای هر مخلوط، بر اساس وزن خشک خاک محاسبه شد. مقدار وزنی سیمان به صورت نسبت وزن سیمان به وزن خشک خاک تعریف شد. برای ساخت نمونه‌های خاک سیمان از مقادیر ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ درصد وزنی سیمان در زمان‌های عمل‌آوری ۳، ۷ و ۲۸ روز استفاده شد. به منظور یکسان‌سازی شرایط ساخت بین نمونه‌های خاک مینا و دارای سیمان، در ساخت تمامی نمونه‌ها روش کوبش مرطوب با تراکم (ساخت نمونه‌ها با روش تراکم استاتیک) به کار رفت. نمونه‌های دارای سیمان با اضافه کردن درصدی از پیش تعیین‌شده

تأثیر مقدار سیمان و زمان عمل‌آوری بر مقاومت فشاری محدود نشده و ضریب ارتجاعی خاک



شکل ۴. دستگاه آزمایش تعیین مقاومت فشاری محدود نشده

۴-۲. عمل‌آوری نمونه‌های خاک سیمان

نمونه‌های خاک سیمان پس از ساخت، به مدت ۱۲ ساعت با قالب درون اتاق رطوبت در دمای ۲۴ درجه و رطوبت ۹۳ درصد قرار داده شدند و پس از خروج نمونه‌ها از قالب، مجدداً نمونه‌ها در اتاق رطوبت تا زمان

آزمایش نگهداری گردیدند (شکل ۵). کلیه عملیات ساخت و عمل‌آوری نمونه‌های خاک سیمان بر اساس دستورالعمل ASTM D1632 انجام پذیرفت. از این روش در تحقیق وو و همکاران (۲۰۲۳) نیز استفاده شده است.



شکل ۵. اتاق رطوبت جهت عمل‌آوری نمونه‌ها

۲-۵. روش آزمایش تراکم

یکی از مهم‌ترین خصوصیات خاک سیمان، میزان تراکم آن است، زیرا مهم‌ترین خواص آن، یعنی مقاومت، نفوذپذیری و دوام مخلوط را کنترل می‌کند. هدف از انجام آزمایش تراکم، رسم منحنی تغییرات جرم مخصوص خشک بر حسب رطوبت و به‌دست آوردن مقادیر جرم مخصوص خشک بیشینه و رطوبت بهینه خاک است.

حداکثر دانسیته خشک نمونه‌ها به روش آشتوی اصلاح شده (A) طبق استاندارد ASTM D1557 انجام شد و رطوبت بهینه نمونه‌ها نیز از این طریق تعیین گردید. به‌منظور تهیه نمونه‌های آزمایشی، ابتدا آزمایش تراکم استاندارد روی خاک طبیعی و مخلوط خاک سیمان با درصد‌های سیمان (صفر، ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰) در سه زمان عمل‌آوری ۳، ۷ و ۲۸ روز انجام گرفته و منحنی استاندارد تراکمی برای آنها تعیین گردید. سپس با توجه به رطوبت بهینه و وزن واحد حجم خشک حداکثر به‌دست آمده از آزمایش تراکم استاندارد، نمونه‌های مورد نظر برای اندازه‌گیری مقاومت فشاری محدود نشده خاک، به روش تراکم استاتیک ساخته شدند.

۲-۶. روش آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده

مقاومت فشاری نیز یکی از خصوصیات مهم خاک سیمان است. مقاومت فشاری خاک تثبیت شده، یکی از ضوابط اصلی برای انتخاب نوع و مقدار تثبیت‌کننده است. آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده (تک‌محوری) رایج‌ترین آزمایش برای ارزیابی مقاومت فشاری خاک-های تثبیت شده با سیمان است و به منزله شاخصی برای

سنجش کیفیت بهسازی خاک‌ها استفاده می‌شود. آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده، یکی از آزمون‌های آزمایشگاهی پرکاربرد در پروژه‌های روسازی و تثبیت خاک است. مقاومت فشاری محدود نشده اغلب به‌عنوان شاخصی برای تعیین کمیت بهبود خاک در اثر بهسازی استفاده می‌شود. مقاومت فشاری محدود نشده، یکی از متداول‌ترین آزمایش‌ها برای ارزیابی اثر افزودنی‌ها در بهسازی خاک است. برای تعیین مقاومت فشاری در آزمایشگاه، از آزمایش تک‌محوری مطابق استاندارد ASTM D1633 استفاده شد. در آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده، بار با نرخ ثابت به نمونه وارد می‌شود تا نمونه گسیخته شود. ظرفیت دستگاه فشاری ۲۵۰۰ کیلوگرم نیرو و شامل دو فک است، که فک بالا متحرک و فک پایین ثابت است و نرخ نیروها توسط سیستم دیجیتالی که به‌منظور تنظیم نرخ دلخواه اثر نیروها طراحی شده است، با حرکت قائم خود باعث گسیختگی مصالح می‌شود. این آزمون بر اساس استاندارد ASTM D2166 و با روش کنترل کرنش انجام شد. بار محوری با سرعت یک دهم میلی‌متر در دقیقه تا وقوع گسیختگی کامل نمونه اعمال شد. در طول آزمایش، داده‌ها (بار اعمال شده و تغییرشکل حاصل) به‌صورت پیوسته ثبت و تنش و کرنش وارد شده به نمونه‌ها محاسبه شد. سپس با توجه به داده‌های ثبت شده، اقدام به ترسیم منحنی تنش-کرنش برای هر نمونه گردید. هم‌زمان با آزمایش مقاومت فشاری، ضریب ارتجاعی مماسی در قسمت خطی منحنی تنش-کرنش نیز تعیین شد (شکل ۶). مشخصات کلیه آزمایش‌های مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۳ ارائه شده است.

تأثیر مقدار سیمان و زمان عمل آوری بر مقاومت فشاری محدود نشده و ضریب ارتجاعی خاک



شکل ۶. نمونه در حال تعیین مقاومت فشاری محدود نشده

جدول ۳. مشخصات آزمایش‌ها و استانداردهای مورد استفاده در این پژوهش

نام آزمایش	روش استاندارد
نمونه برداری خاک از محل	ASTM D75
تعیین جرم مخصوص خاک در محل	ASTM D1556
تهیه نمونه برای طبقه بندی خاک	ASTM D2487
آزمایش دانه بندی خاک با الک	ASTM D6913
آزمایش دانه‌بندی خاک به روش هیدرومتري	ASTM D7928
تعیین درصد رطوبت خاک	ASTM D2216
تعیین نوع سیمان پرتلند	ASTM C150
تهیه نمونه‌های خاک سیمان	ASTM D1633
عملیات ساخت و عمل‌آوری نمونه‌های خاک سیمان	ASTM D1632
روش آزمایش تراکم	ASTM D1557
تعیین مقاومت فشاری نمونه‌ها	ASTM D2166
تعیین سیمان بهینه	ASTM D558

۳. نتایج و بحث

برای درک تأثیر سیمان بر رفتار تراکمی و مقاومتی خاک، نتایج آزمایش‌های تراکم و مقاومت فشاری محدود نشده در ادامه ارائه و در خصوص اهم یافته‌ها بحث شده است. با توجه به پیچیدگی رفتار مصالح خاک سیمان، بایستی با انجام و تحلیل آزمایش‌های مورد نیاز، شناخت نسبت به رفتار آن را افزایش داد. در اثر انجام آزمایش می‌توان نقش پارامترهای مؤثر بر رفتار این مصالح را

تعیین نمود. در این تحقیق، سعی شد رفتار مصالح خاک سیمان تحت اثر آزمایش‌های تراکم و فشاری محدود نشده مورد بررسی قرار گیرد. در این بخش، نتایج آزمایش‌های تراکم و تک‌محوری ارائه گردیده است.

۳-۱. تعیین درصد بهینه سیمان در آزمایش تراکم

برای تعیین درصد سیمان لازم به‌منظور تثبیت خاک‌ها با سیمان از روش‌های وزن مخصوص - درصد رطوبت

طبق استاندارد ASTM D558 استفاده شد. ضمناً آزمایش فشاری تک‌محوری، یک آزمایش تکمیلی است و برای تعیین حداقل مقاومت قابل قبول خاک تثبیت شده با سیمان انجام می‌شود. مقدار سیمان مورد نیاز به طور تقریبی برای انواع مختلف خاک طبق طبقه‌بندی ASTM و ASHTO و بر اساس آزمایش‌های وزن مخصوص و آزمایش‌های تر و خشک شدن و یخ‌زدان در جدول ۳ آورده شده است.

(ASTM D558) و آزمایش تر و خشک شدن (ASTM D559) و آزمایش ذوب- یخ‌زدان (ASTM D560) استفاده می‌شود (نشریه ۲۶۸). به دلیل اینکه اولاً با استفاده از نتایج این آزمایش، درصد رطوبت بهینه و همچنین مقدار آب لازم برای تثبیت خاک و سیمان در کارگاه مشخص می‌گردد و ثانیاً کنترل نتیجه عملیات تثبیت خاک در کارگاه، بر اساس وزن مخصوص خشک خاک تثبیت شده با سیمان انجام می‌شود. لذا، جهت تعیین سیمان بهینه از آزمایش وزن مخصوص- درصد رطوبت

جدول ۳. تخمین مقدار سیمان بهینه برای خاک‌های با رده‌های طبقه‌بندی مختلف بر اساس آیین‌نامه ۲۶۸

مقدار سیمان برای آزمایش‌های تر و خشک شدن و یخ‌زدان- ذوب (درصدوزنی)	تخمین مقدار سیمان برای آزمایش وزن مخصوص-درصد رطوبت (درصد وزنی)	حدود معمول سیمان مورد نیاز		رده خاک	
		درصد وزنی	درصد حجمی	یونیفاید	آشتو
۳-۵-۷	۵	۳-۵	۵-۷	GW, GP, GM, SW SP, SM	A-۱-a
۴-۶-۸	۶	۵-۸	۷-۹	GM, GP, SM, SP	A-۱-b
۵-۷-۹	۷	۵-۹	۷-۱۰	GM, GC, SM, SC	A-۲
۷-۹-۱۱	۹	۷-۱۱	۸-۱۲	SP	A-۳
۸-۱۰-۱۲	۱۰	۷-۱۲	۸-۱۲	CM, ML	A-۴
۸-۱۰-۱۲	۱۰	۸-۱۳	۸-۱۲	ML, MH, CH	A-۵
۱۰-۱۲-۱۴	۱۲	۹-۱۵	۱۰-۱۴	CL, CH	A-۶
۱۱-۱۳-۱۵	۱۳	۱۰-۱۶	۱۰-۱۴	OH, MH, CH	A-۷

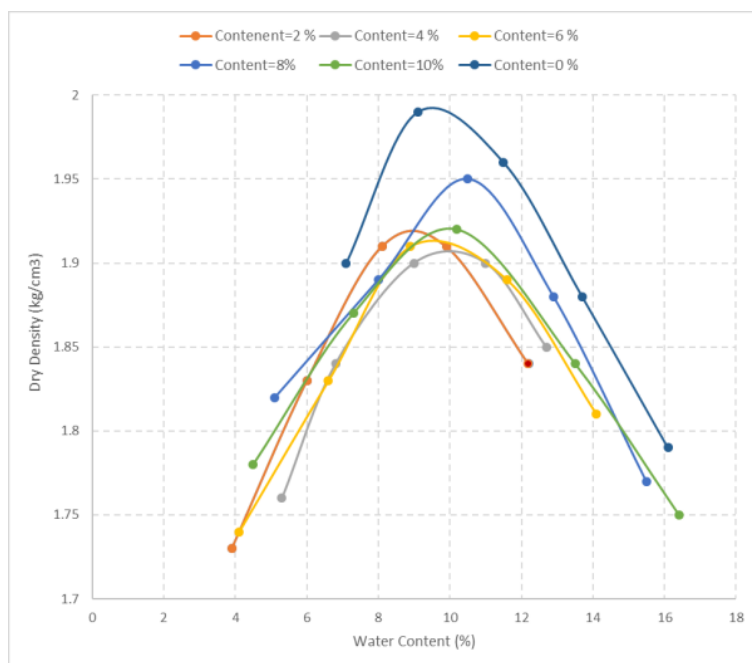
نمودار تغییرات حداکثر جرم مخصوص خشک (MDD) بر حسب درصد سیمان در شکل ۸ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، بیشینه جرم مخصوص خشک حداکثر، در مقدار سیمان ۸ درصد حاصل شد. این نتیجه با تعدادی از نتایج قبلی، همخوانی دارد (سرکار و همکاران، ۲۰۱۲ و سریع‌السیری و موهانتان، ۲۰۰۹).

نمودار تغییرات درصد رطوبت بهینه (OMC) بر حسب درصد سیمان در شکل ۹ نشان داده شده است.

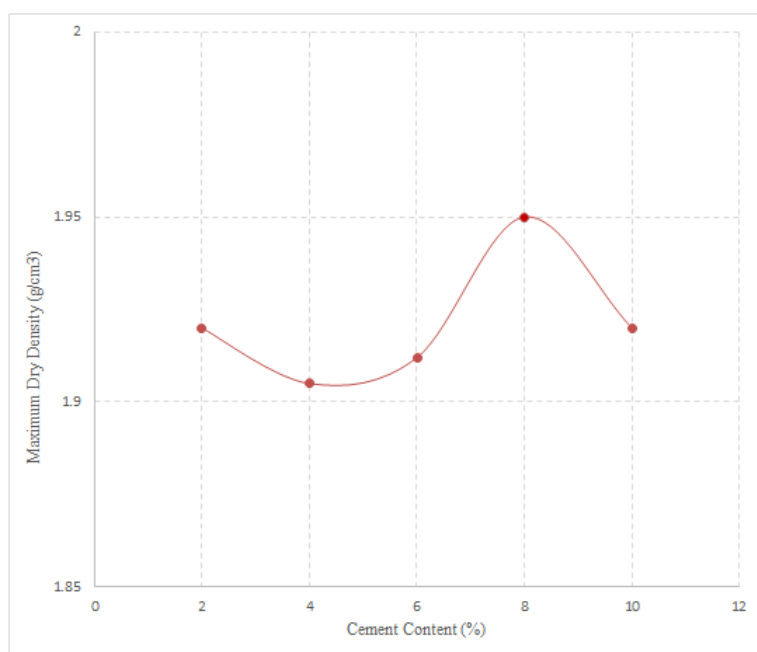
خواص ژئوتکنیک خاک به رطوبت و جرم مخصوصی که در آن خاک متراکم می‌شود، بستگی دارد (کومار و گوپتا، ۲۰۱۶). نمونه خاک بر اساس نتایج دانه‌بندی و حدود آتربرگ، دارای رده SC-SM است. آزمایش تراکم روی خاک مبنا انجام شد که جرم مخصوص خشک آزمایشگاهی ۱/۹۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب و رطوبت بهینه ۹ درصد به دست آمد. جهت تعیین سیمان بهینه، از روش تراکم آزمایشگاهی با مقادیر مختلف سیمان استفاده شد (شکل ۷).

تأثیر مقدار سیمان و زمان عمل‌آوری بر مقاومت فشاری محدود نشده و ضریب ارتجاعی خاک

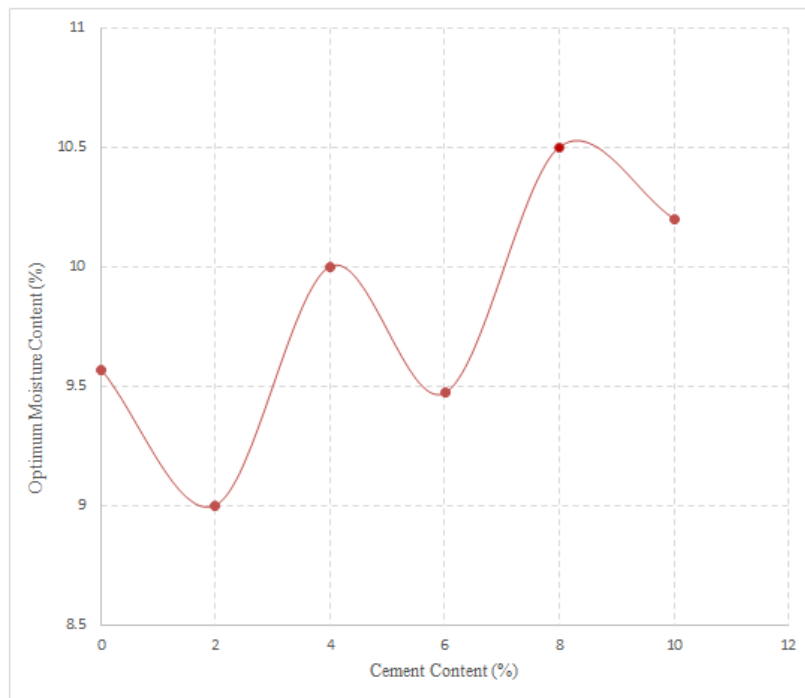
همانطور که مشاهده می‌شود، بیشینه درصد رطوبت بهینه، در مقدار سیمان ۸ درصد حاصل شده است. از طرفی، با ازدیاد مقدار سیمان، درصد رطوبت بهینه افزایش یافته است. این نتیجه با تعدادی از نتایج قبلی، همخوانی دارد (سریع‌السیری و همکاران، ۲۰۱۱).



شکل ۷. نمودار تراکم مخلوط با صفر، ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ درصد سیمان



شکل ۸. تغییرات حداکثر جرم مخصوص خشک بر حسب مقدار سیمان



شکل ۹. تغییرات رطوبت بهینه بر حسب مقدار سیمان

افزایش شکنندگی نمونه‌ها با ازدیاد سیمان است. یکی دیگر از آثار افزودن سیمان، افزایش سختی نمونه‌ها است. با ازدیاد مقدار سیمان، شیب نمودار تنش- کرنش افزایش یافته است.

۳-۳. تأثیر مدت زمان عمل‌آوری بر منحنی رفتاری تنش- کرنش

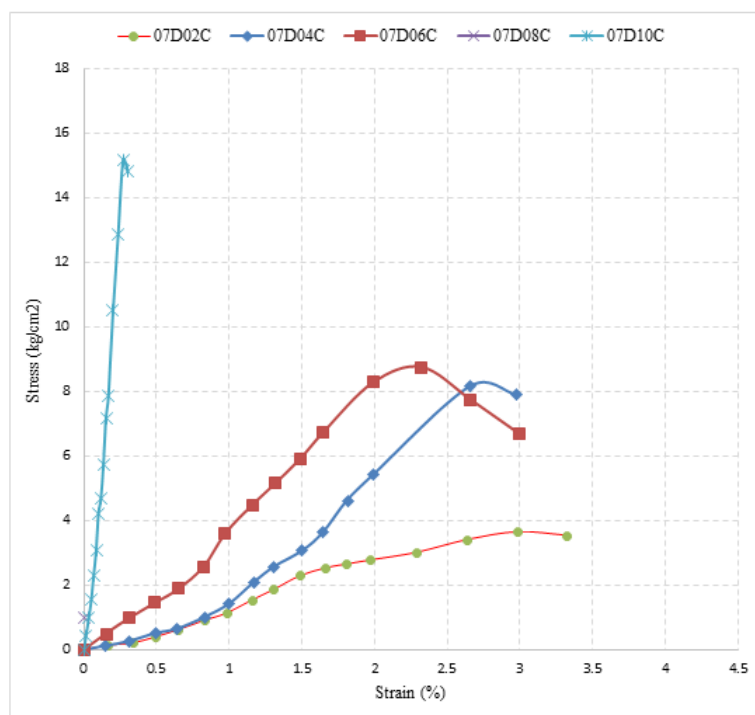
در شکل ۱۱، نمودارهای تنش- کرنش نمونه‌های ۳، ۷ و ۲۸ روزه با مقدار ۸ درصد سیمان نشان داده شده است. با افزایش مدت زمان عمل‌آوری، مقدار مقاومت فشاری محدود نشده و ضریب ارتجاعی افزایش می‌یابد. به عبارتی، یکی از آثار افزایش زمان عمل‌آوری، افزایش سختی نمونه‌ها است. در تحقیقات قبلی نیز ازدیاد سختی با افزایش زمان عمل‌آوری مشاهده شده است (بیلمازوغلو، ۲۰۲۴).

علت را می‌توان ریزتر بودن سیمان نسبت به ذرات خاک دانست. هر چه مقدار ریزدانه‌ها بیشتر باشد، سطح ویژه بیشتری دارد، بنابراین برای روان‌کاری، به آب بیشتری نیاز است. از طرفی، افزایش درصد رطوبت با ازدیاد مقدار سیمان را می‌توان به واکنش پوزولانی و هیدراتاسیون سیمان با خاک نسبت داد (وو و همکاران، ۲۰۱۶).

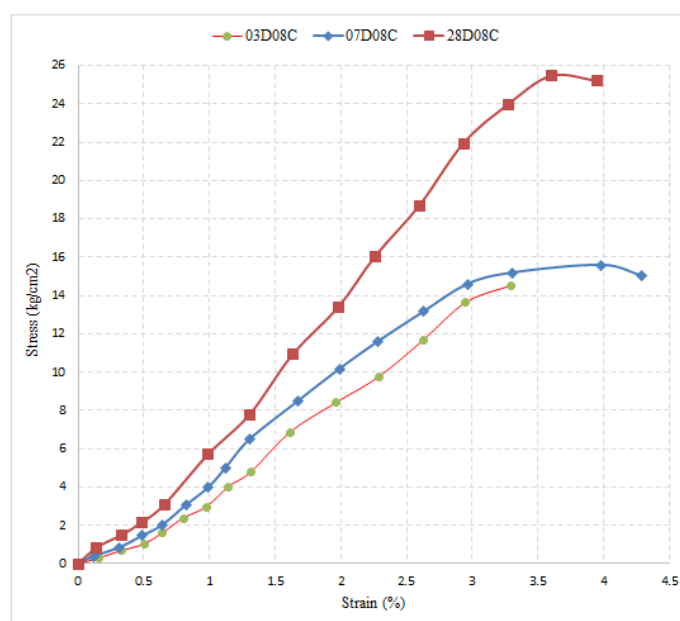
۳-۲. تأثیر سیمان بر منحنی رفتاری تنش- کرنش آزمایش فشاری محدود نشده

در شکل ۱۰، نمودار تنش- کرنش نمونه‌های ۷ روزه با مقادیر مختلف سیمان نشان داده شده است. با افزایش درصد سیمان، رفتار نمونه‌ها از شکل‌پذیری به شکنندگی تغییر می‌کند. با افزودن سیمان، ضمن اینکه حالت رفتار نمونه‌ها نسبت به خاک مبنا تغییر می‌کند، کرنش متناظر نقطه تنش حداکثر در نمونه‌های سیمانه با افزایش درصد سیمان در تمامی آزمایش‌ها کاهش می‌یابد که تأییدی بر

تأثیر مقدار سیمان و زمان عمل‌آوری بر مقاومت فشاری محدود نشده و ضریب ارتجاعی خاک



شکل ۱۰. تأثیر مقدار سیمان بر منحنی رفتاری تنش- کرنش نمونه‌های ۷ روزه

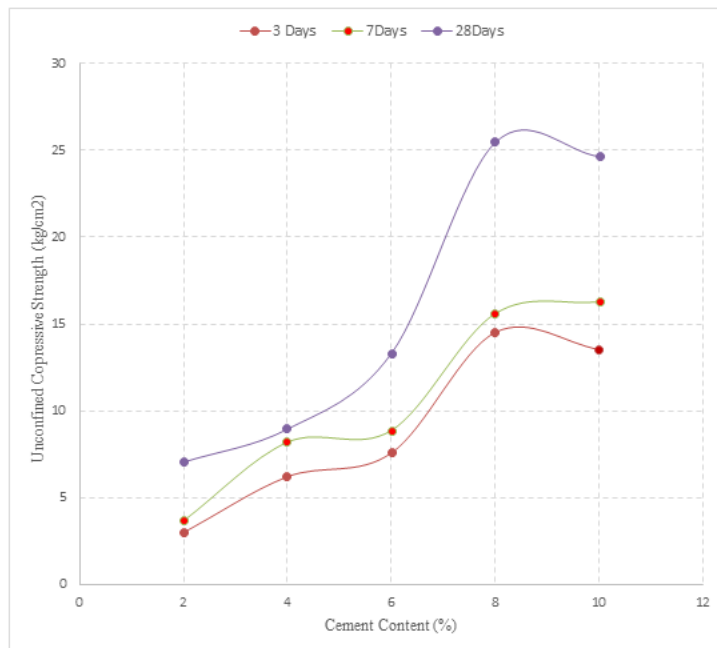


شکل ۱۱. تأثیر زمان عمل‌آوری بر منحنی رفتاری تنش- کرنش نمونه‌های با درصد سیمان

است. در ابتدا تنش با افزایش کرنش، به سرعت افزایش می‌یابد تا به مقدار حداکثر خود برسد. پس از رسیدن به اوج تنش، با افزایش کرنش برای تمام ترکیب‌های خاک

۳-۴- تأثیر سیمان بر مقاومت فشاری محدود نشده
برای آزمایش‌های انجام شده، مقدار مقاومت فشاری محدود نشده، مربوط به حداکثر تنش محوری ثبت شده

و سیمان، مقدار تنش کاهش می‌یابد. نمودار تغییرات مقاومت فشاری محدود نشده نمونه‌های ۳، ۷ و ۲۸ روزه با درصدهای مختلف سیمان در شکل ۱۲ ترسیم شده است.



شکل ۱۲. تأثیر مقدار سیمان بر مقاومت فشاری محدود نشده نمونه‌های ۳، ۷ و ۲۸ روزه

است که نسبت به نمونه ۲ درصد سیمان به مقدار ۳۲۶ درصد رشد داشته است.

مقدار مقاومت فشاری محدود نشده نمونه ۲۸ روزه برای ۲ درصد سیمان، برابر ۷/۰۴ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع به دست آمده و برای مقادیر سیمان ۴، ۶ و ۸ درصد نیز به ترتیب برابر ۸/۹۴، ۱۳/۳۱ و ۲۵/۴۷ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع است. بیشترین مقاومت فشاری محدود نشده مربوط به نمونه ۸ درصد سیمان می‌باشد که نسبت به نمونه ۲ درصد سیمان به مقدار ۲۶۲ درصد رشد داشته است.

همانگونه که مشاهده می‌شود تمامی منحنی‌ها در مدت‌های عمل‌آوری ۳، ۷ و ۲۸ روزه تا سیمان ۸ درصد روند رشد صعودی داشته‌اند و دو نمودار ۳ و ۲۸ روز در سیمان ۱۰ درصد روند کاهشی، ولی نمونه ۷ روزه در سیمان ۱۰ درصد نیز نسبت به ۸ درصد به مقدار ۴/۲ درصد رشد داشته است که مشخص کننده سیمان بهینه

مقدار مقاومت فشاری محدود نشده نمونه ۳ روزه برای ۲ درصد سیمان برابر ۲/۹۸ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع به دست آمده و برای مقادیر سیمان ۴، ۶ و ۸ درصد نیز به ترتیب برابر ۶/۲، ۷/۵۷ و ۱۴/۵۲ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع است. بیشترین مقاومت فشاری محدود نشده، مربوط به نمونه ۸ درصد سیمان است که نسبت به نمونه ۲ درصد سیمان به مقدار ۳۸۷ درصد رشد داشته است. با افزایش مقدار سیمان از ۲ به ۸ درصد، منحنی دارای روند صعودی است ولی در نمونه ۱۰ درصد سیمان، مقاومت فشاری محدود نشده کاهش یافته است.

مقدار مقاومت فشاری محدود نشده نمونه ۷ روزه برای ۲ درصد سیمان برابر ۳/۶۶ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع به دست آمده و برای مقادیر سیمان ۴، ۶، ۸ و ۱۰ درصد نیز به ترتیب برابر ۸/۱۹، ۱۱/۸۷، ۱۵/۸ و ۱۶/۲۸ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع است. بیشترین مقاومت فشاری محدود نشده مربوط به نمونه ۸ درصد سیمان

در ۸ درصد است.

در تحقیقات پوچالارد و همکاران (۲۰۲۵)، بیشترین مقاومت فشاری محدود نشده در ۸ درصد سیمان حاصل شد.

نقطه اوج تنش محوری در اثر افزودن سیمان و عمل‌آوری به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابد. اما کرنش متناظر با آن از حدود ۳ درصد به ۰/۳ درصد کاهش یافته است. بنابراین افزودن سیمان باعث می‌شود نمونه‌ها رفتار شکننده‌ای در مقایسه با حالت بدون سیمان داشته باشند. می‌توان دید که نمونه‌های سیمان‌دار پس از رسیدن به مقاومت نهایی، به‌طور ناگهان دچار گسیختگی می‌شوند. کاهش کرنش متناظر با حداکثر تنش محوری می‌تواند در نتیجه شکستن پیوند صلب بین ذرات خاک و عامل تثبیت کننده یعنی سیمان باشد (سریع‌السیری و همکاران، ۲۰۱۱).

در چندین پژوهش قبلی هم با افزایش مقدار سیمان، حداکثر مقاومت فشاری در کرنش طولی کمتری ایجاد شده است (لیو و همکاران، ۲۰۲۵؛ هو و همکاران، ۲۰۲۳؛ بوالوانگ و همکاران، ۲۰۲۴).

رابطه مقاومت فشاری محدود نشده و مقدار سیمان در شکل ۱۳ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، تا مقدار ۸ درصد سیمان، مقاومت فشاری محدود نشده و درصد سیمان تقریباً به‌صورت خطی افزایش می‌یابد که با تعدادی از تحقیقات قبلی تطابق دارد (کنسولی و همکاران، ۲۰۰۷؛ موریرا و همکاران، ۲۰۱۹). در تحقیقات بالدوینو و همکاران (۲۰۲۱)، رابطه خطی مقاومت فشاری محدود نشده با مقدار سیمان تا ۹ درصد مشاهده شد.

نتایج مقاومت خاک طبیعی و خاک سیمان نشان‌دهنده افزایش مقاومت خاک سیمان نسبت به خاک طبیعی است (خطیبی و همکاران، ۲۰۱۵). علت آن می‌تواند افزودن سیمان به خاک باشد که موجب یک سری واکنش‌های شیمیایی می‌شود. این دسته واکنش‌ها در دو مرحله انجام

می‌شود. در مرحله اول، سیمان با جذب رطوبت، عمل هیدراسیون را انجام می‌دهد که موجب آزادشدن یون‌های کلسیم در محیط می‌شود. یون‌های آزادشده، در اثر تبادل کاتیونی با ذرات رس، موجب کاهش پلاستیسیته خاک می‌شوند. در مرحله دوم، یک سری اتصالات شیمیایی بین ذرات خاک و سیمانی که در مجاورت هم قرار دارند به وجود می‌آید. آهک تشکیل شده در طول فرآیند هیدراسیون سیمان با رس، واکنش نشان می‌دهد و ماده ژلاتینی ثانویه‌ای را می‌سازد که این ماده موجب پیدایش اتصالات قوی بین کانی‌های رسی و ذرات سیمان می‌شود. این اتصالات یک شبکه لانه زنبوری تشکیل می‌دهند که مانع لغزش ذرات روی یکدیگر می‌شوند و در نتیجه جسمی صلب و مقاوم تشکیل می‌دهد. واکنش‌های صورت پذیرفته در این دو مرحله، موجب افزایش مقاومت می‌شوند.

هیدراتاسیون و واکنش‌های پوزولانی تأثیر قابل توجهی بر ازدیاد مقاومت خاک با افزایش سن دارند (رجم و همکاران، ۲۰۲۳).

۳-۵. تأثیر مدت زمان عمل‌آوری بر مقاومت

فشاری محدود نشده

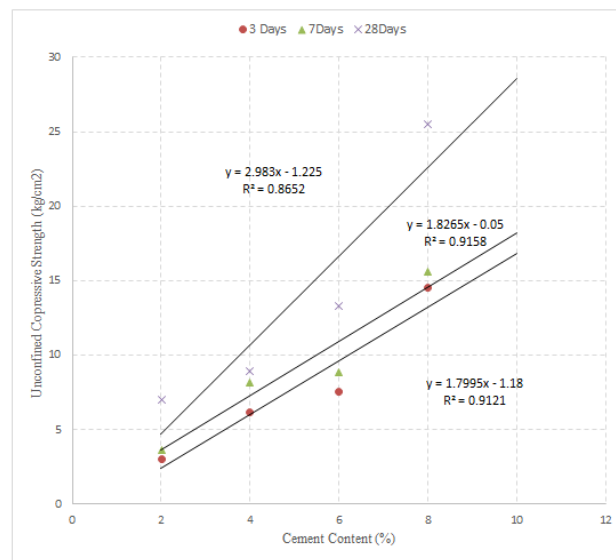
در شکل ۱۴، تأثیر زمان عمل‌آوری بر مقاومت فشاری محدود نشده نشان داده شده است. مطابق شکل، مقاومت فشاری ارتباط مستقیم با درصد سیمان دارد. مقدار مقاومت فشاری محدود نشده برای ۲ درصد سیمان با توجه به طی زمان نمونه ۲۸ روزه نسبت به نمونه ۳ روزه به مقدار ۱۳۶ درصد رشد داشته است. این افزایش مقاومت فشاری برای مقادیر ۴، ۶، ۸ و ۱۰ درصد سیمان به ترتیب برابر ۴۴، ۷۶، ۷۵ و ۸۲ درصد است.

همانطور که مشاهده می‌شود، مقاومت فشاری با افزایش مدت زمان عمل‌آوری بهبود یافت. علت را می‌توان به این صورت بیان نمود که با افزایش زمان عمل‌آوری، به دلیل انجام واکنش‌های پوزولانی وابسته به

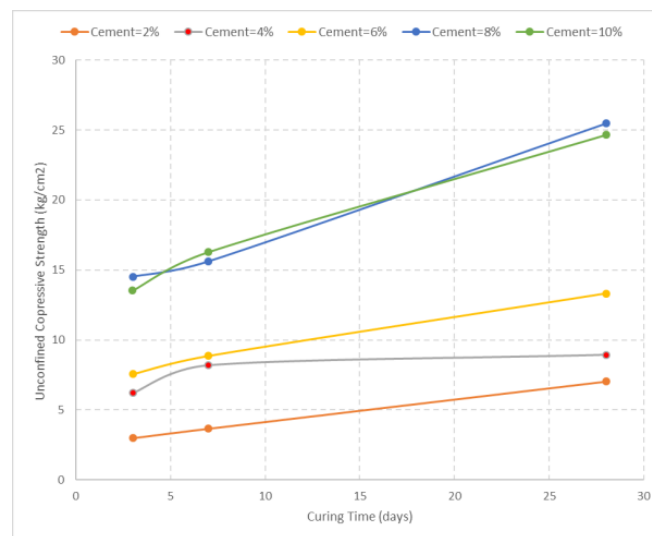
خاکی که توسط چسبندگی و اصطکاک ذرات خاک و همچنین واکنش‌های پوزولانی کمک می‌کند، توضیح داد (گولو و همکاران، ۲۰۱۷). با ازدیاد زمان عمل‌آوری، مقاومت فشاری محدود نشده افزایش می‌یابد. این نتیجه با تحقیقات قبلی توافق خوبی دارد (امینی و حمیدی، ۲۰۱۴). افزایش زمان عمل‌آوری باعث ایجاد پیوند سیمانی بهتر بین دانه‌ها و افزایش مقاومت مخلوط می‌شود.

زمان، مقاومت افزایش می‌یابد. افزایش زمان عمل‌آوری، منجر به ایجاد پیوند سیمانی بهتر بین دانه‌ها و افزایش مقاومت مخلوط خاک سیمان می‌شود (بی و همکاران، ۲۰۱۴)؛ هارا و شیراب، ۲۰۲۳).

واکنش‌های پوزولانی، واکنش‌های آهسته‌ای هستند که معمولاً در سنین ۲۸ روزه و بالاتر در مواد سیمانی رخ می‌دهند. با توجه به UCS بهبود یافته در ۳ و ۷ روز، چنین بهبودی را می‌توان با مقاومت برشی نمونه‌های



شکل ۱۳. رابطه بین مقاومت فشاری محدود نشده و درصد سیمان



شکل ۱۴. تأثیر مدت زمان عمل‌آوری بر مقاومت فشاری محدود نشده (۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ درصد)

۶-۳. تأثیر مقدار سیمان و زمان عمل‌آوری بر

ضریب ارتجاعی

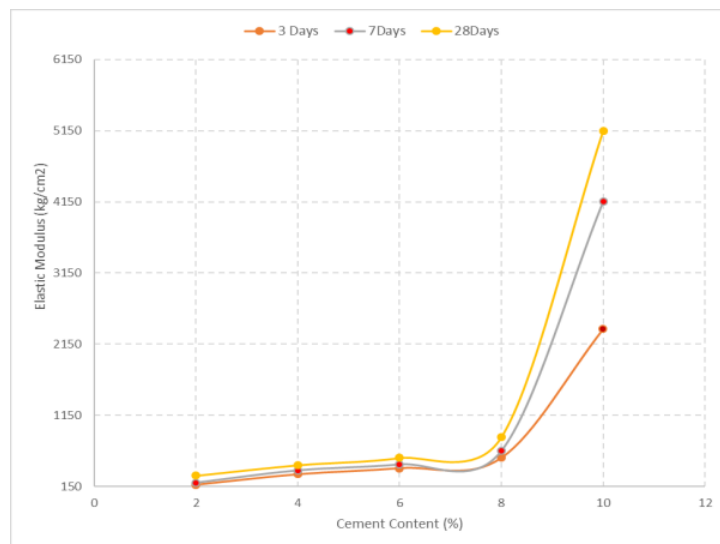
ضریب ارتجاعی را می‌توان به نوعی مبین سختی محوری خاک دانست. تأثیر درصد سیمان بر ضریب ارتجاعی مماسی (تانزانت) برای نمونه‌های خاک سیمان در شکل ۱۵ نشان داده شده است. شیب نمودار تغییرات ضریب ارتجاعی بر حسب درصد سیمان برای نمونه‌های ساخته شده با مقادیر ۲ تا ۸ درصد سیمان، کند است، ولی در محدوده ۸ تا ۱۰ درصد سیمان، این شیب به شدت افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده تغییر در رفتار خاک است. در این محدوده، سختی و شکنندگی نمونه‌های خاک سیمان افزایشی است. مشاهده می‌شود که ضریب ارتجاعی به‌طور قابل توجهی با ازدیاد درصد سیمان، افزایش می‌یابد. بنابراین، نمونه‌ها در این محدوده، تغییرشکل بسیار کمتری خواهند داشت (فورسلینی و همکاران، ۲۰۱۶؛ سانتانا و همکاران، ۲۰۲۱).

۷-۳. رابطه ضریب ارتجاعی و مقاومت فشاری

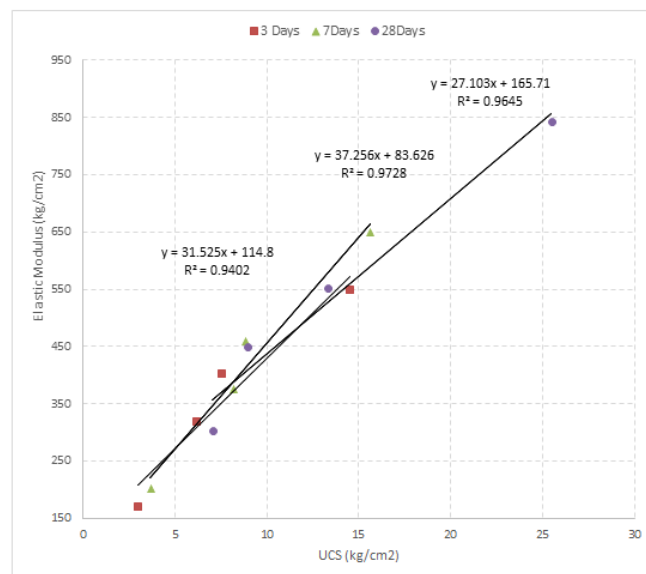
محدود نشده

منحنی‌های برازش (شکل ۱۶) می‌تواند به پژوهشگر امکان درک کامل‌تری از رفتار مقاومتی نمونه‌ها را بدهد. همانطور که توسط منحنی‌ها نشان داده شده است، برای تمام زمان‌های عمل‌آوری و مقادیر سیمان ۲ تا ۸ درصد، ضریب ارتجاعی (E_s) به‌خوبی با مقاومت فشاری محدود نشده (UCS) در سطح قوی ضرایب همبستگی، رابطه خطی دارد ($R^2 > 0.94$).

همبستگی مقادیر E_s در مقابل UCS برای نمونه‌ها به دست آمده است. مشاهده می‌شود که E_s با افزایش UCS افزایش می‌یابد که با یافته‌های مطالعات گذشته مطابقت دارد (گولو و همکاران، ۲۰۱۷، بوزیگیت و همکاران، ۲۰۲۱).



شکل ۱۵. تأثیر درصد سیمان و زمان عمل‌آوری بر ضریب ارتجاعی



شکل ۱۶. رابطه ضریب ارتجاعی و مقاومت فشاری محدود نشده تا ۸ درصد سیمان

۴. نتیجه گیری

بهینه خاک سیمان، در مقدار سیمان ۸ درصد حاصل شد. از طرفی، با ازدیاد مقدار سیمان، درصد رطوبت بهینه افزایش یافت.

- مقدار سیمان بهینه بر اساس آزمایش‌های تراکم آزمایشگاهی و مقاومت فشاری محدود نشده برابر ۸ درصد تعیین گردید که بر اساس جدول دستورالعمل تثبیت لایه‌های خاکریز و روسازی راه‌ها (نشریه ۲۶۸) در محدوده ۵ تا ۹ درصد وزنی قرار دارد.

- نقطه اوج تنش محوری در اثر افزودن سیمان و عمل‌آوری، به‌طور چشمگیری افزایش یافت. با ازدیاد درصد سیمان، رفتار نمونه‌ها از شکل‌پذیری به شکنندگی تغییر می‌کند. با افزودن سیمان، ضمن اینکه حالت رفتار نمونه‌ها نسبت به خاک مبنا تغییر می‌کند، کرنش متناظر نقطه تنش حداکثر در نمونه‌های سیمانه با افزایش درصد سیمان در تمامی آزمایش‌ها کاهش یافت. یکی دیگر از آثار افزودن سیمان، افزایش سختی نمونه‌ها است. با ازدیاد مقدار سیمان، شیب نمودار تنش-کرنش افزایش یافت. نمونه‌های سیمان‌دار پس از رسیدن به مقاومت نهایی، به‌طور ناگهان دچار گسیختگی شدند.

- با افزایش مدت زمان عمل‌آوری، مقدار مقاومت

مطالعه حاضر به بررسی ویژگی‌های مهندسی خاک تثبیت شده با سیمان پرداخته است. در این پژوهش، آزمایش‌هایی مانند تراکم و مقاومت فشاری محدود نشده برای ارزیابی رفتار مخلوط خاک سیمان انجام شد. اهم نتایج به دست آمده در زیر ارائه شده است.

- نمونه خاک بر اساس نتایج دانه‌بندی و حدود آتربرگ طبق طبقه‌بندی متحد، خاک ماسه‌ای لای‌دار (SC-SM) است. با توجه به انجام آزمایش تراکم اصلاح شده، جرم مخصوص خشک خاک مبنا ۱/۹۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب و رطوبت بهینه آن ۹ درصد به دست آمد.

- جهت تعیین سیمان بهینه، از روش تراکم آزمایشگاهی با درصدهای مختلف سیمان استفاده شد که سیمان بهینه ۸ درصد تعیین گردید.

- تغییر مشخصات تراکمی در درصدهای کمتر سیمان، قابل توجه است. در حالی که تغییرات خصوصیات تراکمی آن در درصدهای بیشتر سیمان، حداقل است.

- بیشینه جرم مخصوص خشک حداکثر و رطوبت

فشاری محدود نشده و ضریب ارتجاعی افزایش یافت. به عبارتی، یکی از آثار افزایش زمان عمل‌آوری، ازدیاد سختی نمونه‌ها است.

- تمامی منحنی‌ها در مدت‌های عمل‌آوری ۳، ۷ و ۲۸ روزه تا سیمان ۸ درصد، روند رشد صعودی داشته‌اند و دو نمونه ۳ و ۲۸ روزه در سیمان ۱۰ درصد روند کاهشی، ولی نمونه ۷ روزه از سیمان ۱۰ درصد به ۸ درصد، به مقدار ۴/۲ درصد رشد داشته است که مشخص‌کننده سیمان بهینه در ۸ درصد می‌باشد.

- تا مقدار ۸ درصد سیمان، رابطه مقاومت فشاری محدود نشده و درصد سیمان تقریباً به صورت خطی و افزایشی است.

- رفتار نمونه‌های خاک سیمان، به مقدار سیمان آنها بستگی دارد. به عبارتی، اگر مقدار سیمان کمتر از بهینه باشد، بیشتر رفتار خاک تعیین‌کننده است. ولی چنانچه مقدار سیمان مصرفی زیاد باشد، رفتار نمونه‌ها به رفتار مصالحی چون بتن نزدیک می‌شود. دلیل آن را بدین صورت می‌توان بیان نمود که تا زمانی که نقش سیمان به عنوان یک ماده چسباننده عمل کرده و رفتار خاک غالب باشد، این رابطه خطی برقرار است؛ ولی چنانچه مقدار سیمان افزایش پیدا کند، رفتار مصالح به بتن نزدیک می‌شود.

- مقاومت فشاری، ارتباط مستقیم با درصد سیمان دارد. مقدار مقاومت فشاری محدود نشده برای ۲ درصد سیمان با توجه به طی زمان نمونه ۲۸ روزه نسبت به نمونه ۳ روزه به مقدار ۱۳۶ درصد رشد داشته است. این افزایش مقاومت فشاری برای مقادیر ۴، ۶، ۸ و ۱۰ درصد سیمان به ترتیب برابر ۴۴، ۷۶، ۷۵ و ۸۲ درصد است. با ازدیاد زمان عمل‌آوری، مقاومت فشاری محدود نشده افزایش می‌یابد.

- با افزایش درصد سیمان در سنین ۳، ۷ و ۲۸ روزه، رفتار نمونه‌ها از شکل‌پذیری به شکنندگی تغییر می‌کند.

با افزودن سیمان، ضمن اینکه حالت رفتار نمونه‌ها نسبت به خاک مبنا تغییر می‌کند، کرنش متناظر نقطه مقاومت حداکثر در نمونه‌های سیمانه با افزایش درصد سیمان در تمامی آزمایش‌ها کاهش می‌یابد که تأییدی بر افزایش شکنندگی نمونه‌ها با افزایش سیمان است. نمونه‌های ساخته شده با مقادیر ۲ تا ۸ درصد سیمان، دارای ضریب ارتجاعی با شیب کند می‌باشد. ولی در محدوده ۸ الی ۱۰ درصد سیمان، رفتار شکننده است. یکی دیگر از آثار افزودن سیمان، افزایش سختی نمونه‌ها است. ضریب ارتجاعی به‌طور قابل توجهی با ازدیاد درصد سیمان، افزایش یافت.

- با ازدیاد مقاومت فشاری، ضریب ارتجاعی افزایش یافت. رابطه بین مقاومت فشاری محدود نشده و درصد سیمان برای مقادیر ۲ تا ۸ درصد و تمام زمان‌های عمل‌آوری، به صورت خطی است. مقدار زیاد ضریب تعیین ($R^2 > 0.94$)، این رابطه خطی را با اطمینان بالایی تأیید می‌کند.

نتایج این تحقیق آزمایشگاهی نشان داد که تثبیت خاک با سیمان می‌تواند باعث افزایش قابل ملاحظه مقاومت فشاری و ضریب ارتجاعی خاک‌ها شود. بنابراین، برای به حداقل رساندن نشست تحت اثر بارهای سنگین، یا در خاک‌های طبیعی ضعیف، می‌توان از روش تثبیت خاک با سیمان استفاده نمود. با توجه به نحوه گسیختگی نمونه‌های سیمان‌دار، هنگام استفاده از درصدهای زیاد سیمان در کارهای عملی، باید با احتیاط بیشتری مقدار بار مجاز را انتخاب نمود. با توجه به اثرات زیست‌محیطی سیمان در بخش‌های فیزیکی و بیولوژیک، می‌توان با استفاده از مقدار بهینه سیمان در بهسازی خاک، به میزان زیادی آسیب‌های آن بر محیط‌زیست، بهداشت عمومی، طبیعت، سلامت اکوسیستم و زندگی بشر را کاهش داد.

۵. مراجع

- Amini, Y. and Hamidi, A. 2014. "Triaxial shear behavior of a cement-treated sand-gravel mixture". *J. Rock Mech. Geotech. Eng.*, 6(5): 455-465.
- ASTM D75. 2019. "Standard practice for sampling aggregates".
- ASTM D558. 2019. "Standard test methods for moisture-density (unit weight) relations of soil-cement mixtures".
- ASTM D1556. 2024. "Standard test method for density and unit weight of soil in place by sand-cone method".
- ASTM D1557. 2021. "Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using modified effort".
- ASTM D1632. 2017. "Standard practice for making and curing soil-cement compression and flexure test specimens in the laboratory".
- ASTM D1633. 2017. "Standard test methods for compressive strength of molded soil-cement cylinders".
- ASTM D2166. 2024. "Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil".
- ASTM D2216. 2019. "Standard test methods for laboratory determination of water (moisture) content of soil and rock by mass".
- ASTM D2487. 2017. "Standard practice for classification of soils for engineering purposes (unified soil classification system)".
- ASTM D6913. 2017. "Standard test methods for particle-size distribution (gradation) of soils using sieve analysis".
- ASTM D7928. 2021. "Standard test method for particle-size distribution (gradation) of fine-grained soils using the sedimentation (hydrometer) analysis".
- ASTM C150. 2024. "Standard specification for portland cement".
- Bahmani, S. H., Farzadnia, N., Asadi, A. and Huat, B. B. K. 2016. "The effect of size and replacement content of nanosilica on strength development of cement treated residual soil". *Constr. Build. Mater.*, 118: 294-306.
- Babalar, M., Raeisi Estabragh, A., Beitollahpoor, I. and Soltani, A. 2016. "Regression model for predicting the compressive strength of treated soil-cement with resin". *Iran. J. Soil Water Res.*, 47(1): 197-204. [In Persian]
- Baldovino, J. D. J. A., Moreira, E. B., Carazzai, É., Rocha, E. V. D. G., dos Santos Izzo, R., Mazer, W. and Rose, J. L. 2021. "Equations controlling the strength of sedimentary silty soil-cement blends: Influence of voids/cement ratio and types of cement". *Int. J. Geotech. Eng.*, 15(3): 359-372.
- Bandehzadeh O., Davoudi, M. H. and Astaneh, M. F. 2011. "Study of the effect of lime and percentage of lime and flyash aggregate on the physical and mechanical properties of fine grained soils". *Modares Civ. Eng. J.*, 11(3). [In Persian]
- Bozyigit, I., Bulbul, F., Alp, C. and Altun, S. 2021. "Effect of randomly distributed pet bottle strips on mechanical properties of cement stabilized kaolin clay". *Eng. Sci. Technol. Int. J.*, 24(5): 1090-1101.
- Bualuang, T., Jitsangiam, P., Nusit, K., Rattanasak, U. and Chindaprasirt, P. 2024. "Enhancing lateritic soil for sustainable pavement subbase with polymer-modified cement: A comparative study of styrene butadiene rubber and styrene acrylic latex applications". *Case Stud. Constr. Mater.*, 21: e03760.
- Consoli, N. C., Foppa, D., Festugato, L. and Heineck, K. S. 2007. "Key parameters for strength control of artificially cemented soils". *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 133(2): 197-205.
- Ding, F., Song, L. and Yue, F. 2022. "Study on mechanical properties of cement-improved frozen soil under uniaxial compression based on discrete element method". *Processes*, 10(2): 324.
- Eslami, A. 2004. "Foundation engineering design and construction. BHRC Publication, Tehran, pp. 77-96.
- Forcelini, M., Garbin, G. R., Faro, V. P. and Consoli, N. C. 2016. "Mechanical behavior of soil cement blends with Osorio sand. *Proc. Eng.*, 143: 75-81.
- Güllü, H., Canakci, H. and Al Zangana, I. F. 2017. "Use of cement based grout with glass powder for deep mixing". *Constr. Build. Mater.*, 137: 12-20.

- Haq Sheno, H. and Arabani, M. 2008. "The effects of polymer fiber waste on the strength properties of sand stabilized with cement. 4th National Congress of Civil Engineering. [In Persian]
- Hara, H. and Shirabe, Y. 2023. "Strength estimation method for arbitrary age of cement-treated soil based on high-temperature curing history". *Soils Found.*, 63(2): 101295.
- Hu, Z., Wang, Y. and Wang, C. 2023. "Study on mechanical properties of dredged silt stabilized with cement and reinforced with alginate fibers". *Case Stud. Constr. Mater.*, 18: e01977.
- Khatibi, M., Raeesi Estabragh, A., Abbasi, N. and Abdolahi Alibeyk, J. 2015. "Experimental assessment of soil-cement mechanical behavior incorporated with organic pollution". *Iran. J. Soil Water Res.*, 46(1): 141-149. [In Persian]
- Kholoosi, M. M., Raeesi Estabragh, A. and Abdollahi, J. 2017. "Effect of cement on geotechnical properties of hydrocarbon-contaminated clay soil". *Modares Civ. Eng. J.*, 17(2): 93-106. [In Persian]
- Kumar, A. and Gupta, D. 2016. "Behavior of cement-stabilized fiber-reinforced pond ash, rice husk ash-soil mixtures". *Geotext. and Geomembranes*, 44(3): 466-474.
- Liu, W., Huang, X., Yin, W. and Liu, G. 2025. "Static and dynamic characteristics of cement-treated and untreated aeolian sand from the Tengger desert hinterland: Laboratory tests and prediction models". *Constr. Build. Mater.*, 458: 139733.
- Mola-Abasi H. and Pasha, E. 2016. "Evaluation of zeolite effect on strength of babolsar sand stabilized with cement using unconfined compression test". *Modares C. Eng. J.*, 16(5): 203-213. [In Persian]
- Mola-Abasi, H. and Shooshpasha, I. 2016. "Influence of zeolite and cement additions on mechanical behavior of sandy soil". *J. Rock Mech. Geotech. Eng.*, 8(5): 746-752.
- Moghadasnejad, F. and Modarres, A. 2010. "Soil stabilization with waterproof cement for road applications. Amirkabir J. Civ. Eng.", 42(1): 55-63. [In Persian]
- Moreira, E. B., Baldovino, J. A., Rose, J. L. and dos Santos Izzo, R. L. 2019. "Effects of porosity, dry unit weight, cement content and void/cement ratio on unconfined compressive strength of roof tile waste-silty soil mixtures". *J. Rock Mech. Geotech. Eng.*, 11(2): 369-378.
- Muhunthan, B. and Sariosseiri, F. 2008. "Interpretation of geotechnical properties of cement treated soils". Washington State Department of Transportation.
- Naseri, F., Irani, M. and Dehkhodarajabi, M. 2016. "Effect of graphene oxide nanosheets on the geotechnical properties of cemented silty soil". *Arch. of Civ. Mech. Eng.*, 16: 695-701.
- Pochalard, S., Wungsumpow, C. and Piriyaikul, K. 2025. "Enhancement of compressive strength in cement admixed Bangkok Clay with glass fiber and bottom ash for eco-friendly functional road materials". *Mech. Adv. Compos. Struct.*, 12(2): 279-292.
- Redjem, M., Hidjeb, M., Lamri, I. and Boudjellal, K. 2023. "Unconfined compressive strength of weakly cemented compacted sand under different loads". *Geotech. Eng.*, 54(4): 00465828.
- Ribeiro, D., Néri, R. and Cardoso, R. 2016. "Influence of water content in the UCS of soil-cement mixtures for different cement dosages". *Proc. Eng.*, 143: 59-66.
- Santana, T., Gonçalves, J., Pinho, F. and Micaelo, R. 2021. "Effects of the ratio of porosity to volumetric cement content on the unconfined compressive strength of cement bound fine grained soils". *Infrastruct.*, 6(7): 96.
- Sariosseiri, F. and Muhunthan, B. 2009. "Effect of cement treatment on geotechnical properties of some Washington State soils". *Eng. Geol.*, 104(1-2): 119-125.
- Sariosseiri, F., Razavi, M., Carlson, K. and Gh., B. 2011. "Stabilization of soils with portland cement and CKD and application of CKD on slope erosion control". *Geo-Frontiers 2011: Adv. Geotech. Eng.*, pp. 778-787.
- Sarkar, G., Islam, Md. R., Alamgir, M. and Rokonuzzaman, Md. 2012. "Study on the geotechnical properties of cement based composite fine-grained soil". *Int. J. Adv. Struct. Geotech. Eng.*, 1(2): 42-49.
- Sedighi, P., Eslami, A. and Aflaki, E. 2014. "Effect of cement treatment on shear strength parameters of difficult soil from southern coastlines of the Caspian Sea". *Sharif J. Civ. Eng.*, 29-2(4): 97-107. [In Persian]
- Taherkhani, H. 2016. "Investigation and comparison of compressive strength of clay soils stabilized by cement, lime and CBR Plus". *Modares Civ. Eng. J.*, 16(4): 161-174.
- Tajdini, M., HajialilueBonab, M. and Hassanzadeh, M. 2016. "Laboratory investigation of effective parameters in compressive and bending strength of cement soil materials and numerical investigation of the use of these materials for the Bakhtiari dam. *Sharif J. Civ. Eng.*, 32.2(3.1): 35-46. [In Persian]

- Vu, T. B., Dang, V. Q., Ngo, Q. A. and Ho, L. S. 2023. "Influence of some factors on the mechanical properties of cement-treated clay for shallow mixing in Vietnam: A comparative study". *Results Eng.*, 17: 101011.
- Wu, Z., Deng, Y., Liu, S., Liu, Q., Chen, Y. and Zha, F. 2016. "Strength and micro-structure evolution of compacted soils modified by admixtures of cement and metakaolin". *Appl. Clay Sci.*, 127: 44-51.
- Yao, K., Pan, Y., Jia, L., Yi, J. T., Hu, J. and Wu, C. 2020. "Strength evaluation of marine clay stabilized by cementitious binder". *Marine Georesour. Geotech.*, 38(6): 730-743.
- Yilmazoglu, M. U. 2024. "Effect of bone ash and rice husk ash on the unconfined compressive strength of silt soil". *Kastamonu University J. Eng. Sci.*, 10(1): 22-28.
- Yi, Y., Liska, M. and Al-Tabbaa, A. 2014. "Properties of two model soils stabilized with different blends and contents of GGBS, MgO, lime, and PC". *J. Mater. Civ. Eng.*, 26(2): 267-274.
- Yoon, S. and Abu-Farsakh, M. 2009. "Laboratory investigation on the strength characteristics of cement-sand as base material". *KSCE J. Civ. Eng.*, 13: 15-22.