



Review Article

## Comparison of Lime and Xanthan Gum Performance in Marl Soil Stabilization

Alireza Ghasemi<sup>a</sup>, Maryam Mokhtari<sup>b\*</sup>, Sara Sarafraz<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Master of Science in Geotechnical Engineering, Department of Civil Engineering, Yazd University, Yazd, I. R. Iran.

<sup>b</sup> Associate Professor, Department of Road and Geotechnics, Department of Civil Engineering, Yazd University, Yazd, I. R. Iran.

<sup>c</sup> PhD candidate, Department of Road and Geotechnics, Department of Civil Engineering, Yazd University, Yazd, I. R. Iran.

### PAPER INFO

#### **Paper history:**

Received: 2025-06-08

Revised: 2026-05-09

Accepted: 2026-05-14

#### **Keywords:**

Marl soil,  
Soil stabilization,  
Lime,  
Xanthan gum,  
Eco-friendly.

### ABSTRACT

Marly soils are classified as problematic soils and are widely distributed in Iran and many other regions of the world. Although these soils generally exhibit adequate strength and bearing capacity under dry conditions, the presence of moisture can substantially reduce their mechanical strength and bearing capacity, thereby emphasizing the need for appropriate stabilization techniques. In this study, lime, as a conventional stabilizing agent, and xanthan gum biopolymer, as an environmentally friendly additive, were used to improve the engineering properties of marl soil. The mechanical behavior of marl soil stabilized with lime at 3%, 4%, and 5% by dry weight of soil and xanthan gum at 0.5%, 1%, and 1.5% by dry weight of soil, with some additional tests conducted up to 2%, was investigated and compared. The experimental program included compaction, unconfined compressive strength, direct shear, and California Bearing Ratio tests. Results showed that increasing the lime content up to 4% increased the dry density from 1.68 g/cm<sup>3</sup> to 1.88 g/cm<sup>3</sup>, while addition of 1% xanthan gum increased dry density to 1.91 g/cm<sup>3</sup>. The unconfined compressive strength increased by 4.33 times in lime-treated specimens and by 7.66 times in xanthan gum-treated specimens. Moreover, direct shear test results indicated that cohesion of marl soil increased by 44% with addition of 5% lime, whereas use of 1.5% xanthan gum led to a 152% increase in cohesion. The internal friction angle increased from 17.7° to 23.5° for specimens treated with 4% lime and to 26.37° for specimens stabilized with 1.5% xanthan gum. In addition, the CBR value increased by 111% for soil treated with 4% lime and by 122% for soil stabilized with 1.5% xanthan gum. Overall, the findings indicate that both lime and xanthan gum can improve mechanical properties and bearing capacity of marl soil, while xanthan gum shows promising potential as an environmentally friendly stabilizing additive for geotechnical applications.

\* Corresponding author.

E-mail address: [mokhtari@yazd.ac.ir](mailto:mokhtari@yazd.ac.ir)

**How to cite this article:** Ghasemi, A., Mokhtari, M., & Sarafraz, S. (2026). Comparison of lime and xanthan gum performance in marl soil stabilization. *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*, 12(1), 93-115.  
<https://doi.org/10.22075/jtie.2026.38019.1726>

© 2025 The Author(s). Journal of Transportation Infrastructure Engineering published by Semnan University Press.

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



مقاله پژوهشی

مقایسه عملکرد آهک و زانتان‌گام در تثبیت خاک مارن

علیرضا قاسمی<sup>۱</sup>، مریم مختاری<sup>۲\*</sup>، سارا سرافراز<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> کارشناس ارشد مهندسی ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران.

<sup>۲</sup> دانشیار، گروه راه و ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران.

<sup>۳</sup> دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

خاک‌های مارنی از جمله خاک‌های مسئله‌دار با پراکندگی زیاد در ایران و سایر نقاط جهان می‌باشند. این خاک‌ها در حالت خشک دارای ظرفیت باربری و مقاومت مناسبی می‌باشند؛ ولی در صورت وجود رطوبت، مقاومت و ظرفیت باربری آن‌ها به شدت کاهش می‌یابد که این موضوع لزوم تثبیت خاک مارن را افزایش می‌دهد. در تحقیق پیش رو، برای تثبیت خاک مارن، از آهک به عنوان یک تثبیت‌کننده سنتی و بیوپلیمر زانتان‌گام که یک تثبیت‌کننده دوست‌دار محیط‌زیست است، استفاده شده است. در این تحقیق، رفتار مکانیکی خاک مارن تثبیت‌شده با مقادیر وزنی ۳، ۴ و ۵ درصد آهک و زانتان‌گام با مقادیر وزنی ۱، ۰/۵ و ۱/۵ خاک خشک و برخی آزمایش‌ها تا ۲ درصد مورد بحث و مقایسه قرار گرفته است. این بررسی‌ها با استفاده از آزمایش‌های تراکم، مقاومت فشاری تک‌محوره، برش مستقیم و CBR صورت گرفته است. با توجه به نتایج به دست آمده، با افزایش میزان آهک تا ۴ درصد، دانسیته خشک از  $1/68 \text{ g/cm}^3$  به  $1/88 \text{ g/cm}^3$  و برای ۱ درصد زانتان‌گام به  $1/91 \text{ g/cm}^3$  برآورد شده است. میزان افزایش به دست آمده از آزمایش تک‌محوری برای آهک  $4/33$  برابر و زانتان‌گام  $7/66$  برابر است. همچنین، با انجام آزمایش برش مستقیم، میزان چسبندگی برای ۵ درصد آهک افزایش ۴۴ درصدی نسبت به خاک مارن و برای ۱/۵ درصد زانتان‌گام این میزان ۱۵۲ درصد افزایش می‌یابد. در مورد زاویه اصطکاک داخلی برای ۴ درصد آهک از  $17/7$  به  $23/5$  و برای ۱/۵ درصد زانتان‌گام به  $26/37$  افزایش یافته است. مقدار عدد CBR نیز برای ۴ درصد آهک ۱۱۱ درصد و برای ۱/۵ درصد زانتان‌گام به  $122\%$  افزایش یافته است.

دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۳/۱۸

بازنگری مقاله: ۱۴۰۵/۰۲/۱۹

پذیرش مقاله: ۱۴۰۵/۰۲/۲۴

واژه‌های کلیدی:

خاک مارن،

تثبیت خاک،

آهک،

زانتان‌گام،

دوست‌دار محیط‌زیست.

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: [mokhtari@yazd.ac.ir](mailto:mokhtari@yazd.ac.ir)

استناد به این مقاله: قاسمی، علیرضا، مختاری، مریم و سرافراز، سارا. (۱۴۰۵). مقایسه عملکرد آهک و زانتان‌گام در تثبیت خاک

مارن. مهندسی زیرساخت‌های حمل و نقل، ۱۲(۱)، ۹۳-۱۱۵.

<https://doi.org/10.22075/jtie.2026.38019.1726>

© 2025 The Author(s). Journal of Transportation Infrastructure Engineering published by Semnan University Press.

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

## ۱. مقدمه

خاک‌های مارنی از جمله خاک‌های مسئله‌دار هستند که به دلیل منشأ دریایی دارای پراکندگی زیادی در ایران و سایر نقاط جهان می‌باشند. این خاک‌ها در حالت خشک دارای ظرفیت باربری و مقاومت مناسبی هستند؛ اما به دلیل داشتن درصد بالایی از رس، نسبت به رطوبت حساس بوده و خاک دچار تورم و کاهش مقاومت و ظرفیت باروری می‌شود. در مناطقی که پروژه‌های راه‌سازی روی بستر مارنی اجرا گردیده‌اند، پس از مدتی استفاده از این مصالح در بستر راه و بارندگی مشکلات بسیاری برای این جاده‌ها به وجود آورده و دچار ترک‌خوردگی‌های شدید می‌گردند. این مشکلات در مناطقی که تراز آب زیرزمینی نزدیک به سطح زمین باشد، بسیار شدیدتر می‌شود. بنابراین، احداث سازه‌های ژئوتکنیک روی بسترهایی با خاک‌های بد و نامرغوب، مانند خاک مارن، همواره یکی از مشکلات مهندسين ژئوتکنیک به شمار می‌آید.

همان‌طور که ذکر شد، با توجه به پراکندگی زیاد اجرای پروژه‌های مختلف روی بسترهای مارنی غیرقابل گریز است. احداث و بهره‌برداری از سازه‌هایی روی بستر مارنی با توجه به سطح آب زیرزمینی و یا بارندگی که سبب رسیدن رطوبت به این خاک‌ها می‌شود، می‌تواند سازه‌ها را دچار مشکل کند. تعویض خاک نامرغوب اولین راه‌حلی است که به ذهن می‌آید؛ اما اگر امکان تعویض خاک فراهم نباشد، باید با روش‌هایی مناسب از این مشکلات جلوگیری به عمل آید. یکی از روش‌های مقابله با این مشکلات و رفع آنها، بهسازی خاک است. بهسازی خاک عبارت است از تقویت خاک‌های ضعیف و بازسازی آن‌ها تا رسیدن به شرایط مطلوب که از دیرباز مورد توجه کارشناسان بوده است. روش‌های مختلفی

برای بهسازی خاک وجود دارد که روش شیمیایی یکی از پرکاربردترین آنهاست. در این روش، تثبیت خاک با افزودن یک یا چند ماده شیمیایی به خاک و انجام فعل‌وانفعالات شیمیایی مابین خاک و مواد افزوده‌شده صورت می‌گیرد. از جمله مواد مورد استفاده در این روش می‌توان به آهک، سیمان، قیر، خاکستر بادی، ضایعات و سرباره‌های کوره و خرده لاستیک اشاره کرد. از بین مواد بیان‌شده، سیمان و آهک از دیرباز جهت تثبیت خاک مورد استفاده بوده‌اند و اثرات مهمی بر مشخصات فنی خاک می‌گذارند. برای انتخاب نوع و مقدار ماده تثبیت‌کننده ابتدا می‌بایست به شناسایی نوع خاک و کارایی مورد استفاده خاک، که همان هدف از تثبیت خاک است، پرداخته شود (طباطبائی، ۲۰۱۵؛ لیتل و همکاران، ۱۹۸۷). علاوه بر این، زانتان گام یکی دیگر از مواد تثبیت‌کننده خاک و دوست‌دار محیط‌زیست نیز هست. زانتان گام<sup>۱</sup> یک پلی‌ساکارید<sup>۲</sup> است و بیشتر در صنایع غذایی به‌عنوان افزودنی مواد غذایی کاربرد دارد. با تخمیر گلوکز<sup>۳</sup> یا ساکارز<sup>۴</sup> (دانه شکر) به کمک باکتری زانتوموناس کمپستریس<sup>۵</sup> می‌توان به این ماده دست پیدا کرد (روسلام و انگلند، ۲۰۱۰). زانتان گام یک بیوپلیمر بسیار پایدار است و برخلاف سایر گام‌ها، مقاومت بالایی تحت تغییرات زیاد دما و pH از خود نشان می‌دهد. یکی از چالش‌های مهم در استفاده از زانتان گام به‌عنوان یک ماده تثبیت‌کننده زیست‌پایه، تأثیر شرایط محیطی بر عملکرد آن است. زانتان گام به‌دلیل ماهیت پلیمری خود، نسبت به عوامل فیزیکی و شیمیایی محیطی حساس است. دمای بالا می‌تواند موجب تخریب پیوندهای مولکولی این پلی‌ساکارید و در نتیجه کاهش استحکام چسبندگی در توده خاک شود. از سوی دیگر، تغییرات رطوبت باعث تورم و جمع‌شدگی زانتان گام شده و ممکن است پایداری بلندمدت خاک تثبیت‌شده را تحت تأثیر قرار دهد.

4- Sucrose

5- Xanthomonas Campestris

1- Xanthan gum

2 - Polysaccharide

3- Glucose

نتایج آزمایش‌های سه‌محوری و برزیلی روی خاک مارن بیانگر افزایش مقاومت برشی و کششی مارن‌های متراکم و همچنین تداوم این افزایش در مدت زمان عمل‌آوری بود.

در مطالعه گائو و همکاران (۲۰۲۵) نشان داده شد که افزودن بیوپلیمر زانتان‌گام به خاک نرم موجب کاهش نسبت تخلخل و افزایش مقاومت فشاری UCS می‌گردد و بنابراین گزینه‌ای پایدار برای تثبیت خاک‌های بسیار مرطوب محسوب می‌شود.

در تحقیق بالدوینو و همکاران (۲۰۲۵) استفاده از زانتان‌گام در مخلوط خاک و مصالح بازیافتی آسفالت (RAP) منجر به افزایش چشمگیر مدول سختی و بهبود دوام تحت شرایط چرخه‌ای شد؛ که نشان می‌دهد کاربرد این افزودنی فراتر از خاک‌های معمولی نیز امکان‌پذیر است.

قاسمی و همکاران (۲۰۱۵) در تحقیقی با انتخاب خاک ماسه‌ای در حالت خالص، افزایش پایداری خاک را با افزودن درصدهای مختلف بیوپلیمر زانتان‌گام (۱، ۲ و ۵ درصد)، بررسی کردند.

ترکیب آهک با خاک‌های استوایی نشان داد که علاوه بر بهبود مقاومت فشاری، تغییرات ریزساختاری و مواد سیمانی جدید تولید شده قابل مشاهده هستند. بنابراین تثبیت سنتی خاک همچنان اثربخش است (دینیز و همکاران، ۲۰۲۴).

مطالعه روی خاک‌های رسی نشان داده که افزودن تنها ۲ تا ۵ درصد آهک می‌تواند به صورت قابل ملاحظه‌ای مقاومت برشی و شاخص‌های فرسایش داخلی را کاهش دهد؛ که حاکی از کارایی اقتصادی و سریع تثبیت با آهک است (عادل و همکاران، ۲۰۲۴).

تحقیقی توسط ال عمودی و همکاران (۲۰۱۰) برای ارزیابی امکان استفاده از سیمان پرتلند یا آهک هیدراته برای تثبیت خاک مارن و اثر آن‌ها بر مقاومت و دوام انجام

همچنین قرار گرفتن در معرض تابش فرابنفش (UV) در محیط‌های باز می‌تواند باعث شکست زنجیره‌های پلیمری و کاهش تدریجی اثر تثبیت شود. از این‌رو، بررسی پایداری عملکرد زانتان‌گام در برابر عوامل محیطی و پیشنهاد راهکارهایی برای افزایش دوام آن (مانند اختلاط با مواد معدنی یا پوشش‌دهی سطحی) از موضوعات مهم در به‌کارگیری این ماده در پروژه‌های عمرانی محسوب می‌شود.

این ماده در شرایط مختلف اکسایش، محیط‌های اسیدی و بازی و در محیط‌هایی که میزان نمک بالاست مقاوم است. این ماده به صورت پودر سفید تا کرم‌رنگ موجود است (نولت و همکاران، ۱۹۹۲؛ برگمن و همکاران، ۲۰۰۸). لازم به ذکر است که زانتان‌گام در سال ۱۹۵۰ کشف گردید و فرمول شیمیایی آن  $(C_{35}H_{49}O_{29})_n$  است (لطیفی و همکاران، ۲۰۱۶).

از این‌رو، پژوهش‌های متعددی در خصوص تثبیت خاک با آهک و زانتان‌گام انجام شده است که در این قسمت به آن پرداخته می‌شود. در خصوص تثبیت خاک با آهک می‌توان به پژوهش نوری‌لا به و همکاران در سال ۲۰۰۷ اشاره کرد. در این پژوهش، از آهک برای بهسازی خاک مارن تبریز استفاده کردند. آن‌ها دریافتند که با افزایش درصد آهک، وزن مخصوص خشک حداکثر خاک کاهش و درصد رطوبت بهینه افزایش می‌یابد. همچنین، حد روانی کاهش یافته و حد خمیری افزایش می‌یابد. مقاومت در حدود ۵۰۰-۲۰۰ درصد افزایش می‌یابد که سرعت افزایش مقاومت در هفته‌ی اول بیشتر بوده و پس از آن مقاومت به آرامی افزایش می‌یابد. طبق نتایج این تحقیق، مقدار آهک بهینه معادل ۱/۵ درصد به دست آمده است. در تحقیق انجام شده توسط نونس (۲۰۱۰) تأثیر آهک بر مقاومت برشی و کششی، تراکم‌پذیری ادنومتر<sup>۱</sup> و برخی ویژگی‌های هیدرولیکی مارن‌ها و رفتار آن‌ها در طول زمان عمل‌آوری بررسی شد.

## 1- Odeometry

گرفت. با افزودن سیمان به مارن، وزن مخصوص خشک حداکثر افزایش یافته، اما افزودن آهک موجب کاهش وزن مخصوص گردید. آن‌ها میزان مؤثر سیمان و آهک را برای بهسازی خاک به ترتیب ۵ و ۷ درصد اعلام نمودند. همچنین، گرین و آسیه (۲۰۱۱) روی مارن‌های هوازده حاصل از مناطق اطراف الجزیره تحقیقی را انجام دادند. آن‌ها این مصالح را با افزودنی‌هایی مانند آهک و سیمان در مقادیر کم مورد تثبیت قرار دادند. با بررسی نتایج، اثر آهک در تثبیت این مارن‌های هوازده مؤثرتر از سیمان بوده و میزان بهینه آهک معادل ۴ درصد به دست آمد.

علاوه بر این، بلابچی و همکاران<sup>۱</sup> در سال ۲۰۱۲، چهار نوع خاک متورم شونده از منطقه تمسن<sup>۲</sup> در شمال غربی الجزایر را با استفاده از شیرآهک مورد آزمایش قرار دادند. خاک‌های ۱ و ۲، مارن‌های بسیار پلاستیک و خاک‌های ۳ و ۴، رس خالص بسیار پلاستیک با کرنات کلسیم بسیار کم بودند. با توجه به واکنش‌های یونی بین شیرآهک و کانی‌های رسی که فرآیند فلوکولاسیون را تشکیل می‌دهند و همچنین تبادل کلسیم با سایر کاتیون‌ها در رس، شاخص خمیری خاک‌ها کاهش می‌یابد. از این آزمایش نتیجه گرفته شد که به دلیل وقوع واکنش‌های پوزولانی، میزان رطوبت بهینه و وزن مخصوص در ابتدا به ترتیب افزایش و کاهش یافتند و از ۶ درصد شیرآهک، وزن مخصوص خشک شروع به افزایش نمود. همچنین، شیرآهک سبب افزایش pH خاک‌ها نیز شد (زینب و همکاران، ۲۰۱۲).

فیوضی و همکاران در سال ۲۰۱۶، اثر بهسازی خاک مارن با آهک را بر پارامترهای مقاومت برشی مورد تحقیق قرار دادند. آن‌ها آهک با مقادیر ۲، ۵ و ۸ درصد را مخلوط و در زمان‌های ۱، ۷ و ۱۵ روز، عمل‌آوری کردند و سپس با انجام آزمایش برش مستقیم، تأثیر چشم‌گیر آهک بر

پارامترهای مقاومت برشی و چسبندگی خاک مارن را نشان دادند.

در خصوص تثبیت خاک با زانتان گام نیز می‌توان به پژوهش آیلدین و همکاران (۲۰۱۷) اشاره کرد. در این مطالعه، برای تثبیت خاک واگرا از زانتان گام و گوارگام در شرایط خشک و مرطوب استفاده شد. خاک واگرا در حالت غیراشباع به صورت پایدار است و دارای تنش برشی بالایی است؛ اما زمانی که در آب غوطه‌ور می‌شود دچار تغییر حجم زیاد و ناپایداری می‌شود که برای هر دو بیوپلیمر افزایش چسبندگی، کاهش پتانسیل واگرایی، افزایش رطوبت بهینه و کاهش وزن مخصوص خشک مشاهده شده است. رفتار خاک تثبیت‌شده با گوارگام در مقایسه با زانتان گام در حدود ۲۰٪ بیشتر بهبود یافته است. در پژوهشی دیگر، دهقان و همکاران (۲۰۱۹) با استفاده از دو نوع بیوپلیمر زانتان گام و گوارگام تحقیقات خود را با استفاده از آزمایش‌های مختلف روی خاک رمنده انجام دادند. نتایج برای دو بیوپلیمر نشان‌دهنده کاهش وزن مخصوص و نفوذپذیری در خاک رمنده است. در این تحقیق، اثر زانتان گام روی اصلاح خاک بهتر از گوارگام بود (خسروی و طبرسا، ۲۰۱۹).

همچنین، نی و همکاران (۲۰۲۱) روی تثبیت مخلوط‌های رس ماسه‌دار با بیوپلیمر زانتان گام تحقیقاتی را انجام دادند. آن‌ها ماسه فوجیان<sup>۳</sup> حوالی چین<sup>۴</sup> را با رس کائولین، بنتونیت و بیوپلیمر زانتان گام مخلوط کردند. نتایج نشان داد که تثبیت با زانتان گام تأثیر بهتری بر مقاومت فشاری تک‌محوری مخلوط ماسه-کائولین نسبت به ماسه-بنتونیت دارد. همچنین، آن‌ها متوجه شدند که مقدار رطوبت بهینه برای دستیابی به مقاومت حداکثر به ترتیب ۳/۷۵٪ و ۵/۷۵٪ برای ماسه-کائولین و ماسه-بنتونیت، است. علاوه بر این، باگریاچیک و

3- Fujian  
4- China

1- Belabbaci et al.  
2- Tlemcen

## ۲. روش تحقیق

همان‌طور که اشاره شد، هدف از این تحقیق بررسی رفتار مکانیکی خاک مارن تثبیت‌شده با زانتان‌گام و مقایسه هم‌زمان آن با آهک است. در این پژوهش، پس از تهیه خاک مارن و تعیین خصوصیات آن، این خاک با درصدهای مختلف آهک و زانتان‌گام تثبیت شد و سپس آزمایش‌های تراکم، CBR، تک‌محوری و برش مستقیم روی نمونه‌های تثبیت‌شده با آهک و زانتان‌گام انجام گردید. در ادامه، مواد مورد استفاده در این تحقیق و روش انجام آن با جزئیات بیان می‌گردد.

قابل به ذکر است که برای آماده‌سازی نمونه‌ها، ابتدا خاک مارن جمع‌آوری‌شده از منطقه ابرکوه در استان یزد خشک و از الک شماره ۴ عبور داده شد تا دانه‌بندی یکنواختی حاصل شود. سپس افزودنی‌ها (آهک و زانتان‌گام) به نسبت‌های وزنی مشخص (۳، ۴ و ۵ درصد برای آهک و ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد برای زانتان‌گام) بر اساس وزن خشک خاک اندازه‌گیری شدند. فرآیند اختلاط به‌صورت خشک انجام گرفت تا توزیع یکنواخت افزودنی در کل حجم خاک تضمین شود. در این مرحله، خاک و افزودنی به مدت حدود ۱۰ دقیقه در میکسر مکانیکی با سرعت ثابت مخلوط شدند. سپس آب مقطر مطابق درصد رطوبت بهینه هر نمونه به مخلوط اضافه و عملیات اختلاط به مدت ۵ دقیقه دیگر ادامه یافت تا خمیری یکنواخت حاصل شود. پس از اتمام اختلاط، مخلوط‌ها در کیسه‌های پلاستیکی در بسته به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق ( $25 \pm 2$  درجه سلسیوس) نگهداری شدند تا واکنش‌های اولیه بین خاک و افزودنی کامل گردد. لازم به ذکر است که یکنواختی اختلاط نقش مهمی در توزیع مؤثر مواد تثبیت‌کننده دارد؛ به‌طوری که در نمونه‌های دارای زانتان‌گام، اختلاط بیش از حد ممکن است موجب شکست زنجیره‌های پلیمری و کاهش

محموداوغلو<sup>۱</sup> در سال ۲۰۲۱، بررسی‌های آزمایشگاهی روی خاک‌های درشت‌دانه تثبیت‌شده با زانتان‌گام انجام دادند. آن‌ها نمونه‌های مختلف در زمان‌های ۱، ۷، ۲۱، ۲۸، ۵۶ و ۱۱۲ روز را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد طی ۵۶ روز (تا ۹۹/۳ درصد) به بیشترین میزان بهبود که در حدود ۲/۲ برابر ظرفیت باربری خاک تثبیت نشده است، می‌رسد. همچنین آن‌ها به این نتیجه رسیدند که تنها ۱/۲۵٪ نسبت افزودنی زانتان‌گام جهت دستیابی به بالاترین مقادیر ظرفیت باربری، پایداری بلندمدت و همچنین بالاترین کارایی کافی بوده و به میزان بیشتری بیوپلیمر زانتان‌گام نیاز نیست. آن‌ها همچنین تثبیت را با استفاده از مواد دیگری همچون سیمان، آهک و خاکستر بادی در زمان‌های عمل‌آوری مختلف مورد تحقیق قرار دادند.

همان‌طور که اشاره شد، پژوهش‌های متعددی در خصوص بهسازی خاک با دو ماده تثبیت‌کننده آهک و زانتان‌گام انجام شده است. اما هدف از این تحقیق بررسی پارامترهای مقاومتی خاک مارن تثبیت‌شده با زانتان‌گام و همچنین مقایسه این پارامترها با تثبیت‌کننده سنتی آهک است. علاوه بر آن، اثر زمان عمل‌آوری طولانی بر مقاومت فشاری زانتان‌گام و برآورد اقتصادی استفاده از هر دو افزودنی نیز بررسی شده است، که این موارد نوآوری این تحقیق نسبت به مطالعات پیشین محسوب می‌شوند.

اگرچه آهک تأثیرات بسزایی در اصلاح خاک‌ها داشته و به‌عنوان یک ماده پرکاربرد در بهسازی خاک شناخته می‌شود، اما اثرات زیست‌محیطی آن باعث شده است که در این تحقیق از بیوپلیمر زانتان‌گام نیز استفاده شود تا بتوان با جایگزینی آن با آهک از این اثرات مخرب جلوگیری کرد.

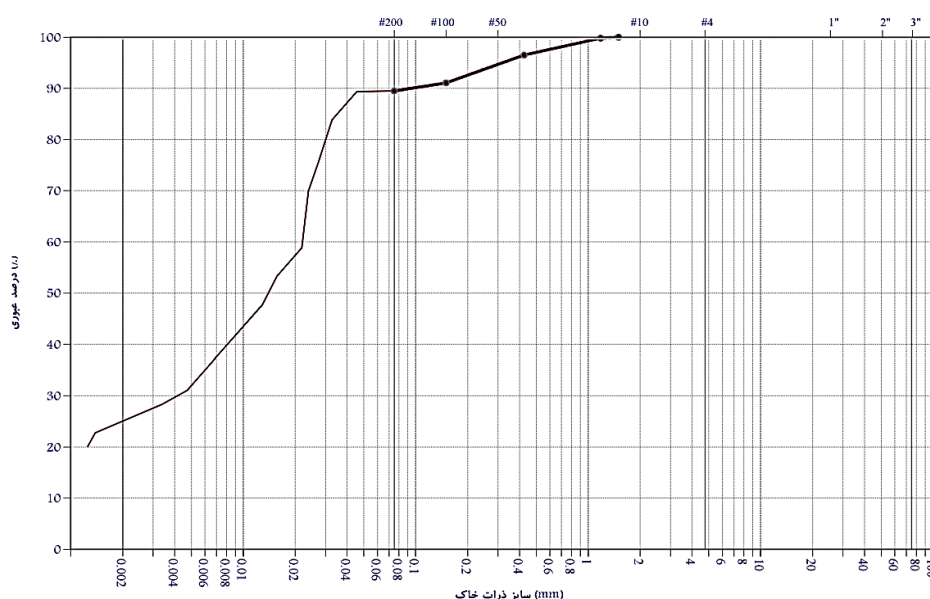
کارایی ماده گردد؛ در حالی که در نمونه‌های آهک، اختلاط ناکافی می‌تواند باعث باقی ماندن دانه‌های آزاد آهک و افت مقاومت شود. بنابراین رعایت زمان و روش صحیح اختلاط از عوامل مؤثر بر دقت نتایج آزمایش‌ها است.

## ۱.۲. مواد مصرفی

### ۱.۱.۲. خاک مارن

خاک مورد استفاده در این تحقیق از پروژه راه‌آهن یزد- اقلید در کیلومتر ۱۳۲+۲۰۰ از این خط آهن در محدوده شهرستان ابرکوه استان یزد، در عمق ۲ متری از سطح زمین برداشت شده است. ترکیب شیمیایی تقریبی خاک مارن مطابق با مطالعات آزمایشگاهی شامل: سیلیس

( $\text{SiO}_2$ )، کربنات کلسیم ( $\text{CaCO}_3$ )، آلومینا ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) و اکسید منیزیم ( $\text{MgO}$ ) است. نمونه‌برداری از سه نقطه در عمق ۲ متری که یکی از این نقاط با توجه به سطح آب زیرزمینی در معرض آب قرار داشت، گرفته شده است. با توجه به در ارتباط بودن خاک این منطقه با سطح بالای آب زیرزمینی و همچنین ضعف فنی خاک مارن در برابر رطوبت، لزوم این تحقیق بیش‌ازپیش اهمیت می‌یابد. همچنین در شکل ۱، نمودار دانه‌بندی خاک مورد استفاده ارائه گردیده است. نام خاک مورد استفاده مطابق طبقه‌بندی متحده و طبقه‌بندی آشتو به ترتیب CL و (۱۳) A-۶ و حدود اتربرگ آن  $\text{PI}=15$ ،  $\text{PL}=20$  و  $\text{LL}=35$  است. سایر مشخصات خاک مارنی مورد استفاده در جدول ۲ ارائه شده است.



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی خاک مورد استفاده

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مارن

| ویژگی                                 | استاندارد   | مقادیر       |
|---------------------------------------|-------------|--------------|
| رنگ                                   |             | قهوه‌ای روشن |
| درصد رطوبت                            | ASTM D 2216 | ۶/۵          |
| وزن مخصوص مرطوب ( $\frac{gr}{cm^3}$ ) | ASTM D 698  | ۱/۹۹         |
| رد شده از الک ۲۰۰                     | ASTM D 4318 | ۹۰           |
| درصد حد خمیری                         | ASTM D 4318 | ۲۰           |

| ویژگی                                       | استاندارد   | مقادیر |
|---------------------------------------------|-------------|--------|
| درصد حد روانی                               | ASTM D 4318 | ۳۵     |
| شاخص خمیری                                  | ASTM D 4318 | ۱۵     |
| سیستم طبقه‌بندی متحد خاک                    |             | CL     |
| درصد رطوبت بهینه                            | ASTM D 698  | ۱۸/۶   |
| دانسیته خشک حداکثر ( $\frac{gr}{cm^3}$ )    | ASTM D 698  | ۱/۶۸   |
| میزان چسبندگی ( $\frac{kg}{cm^2}$ )         | ASTM D 3080 | ۰/۲۵   |
| زاویه اصطکاک داخلی                          | ASTM D 3080 | ۱۷/۷   |
| مقاومت فشاری تک‌محوری ( $\frac{kg}{cm^2}$ ) | ASTM D 2166 | ۱/۲    |
| درصد CBR                                    | ASTM D 1883 | ۹      |
| pH                                          | ASTM D 4972 | ۷/۸    |

## ۲.۱.۲. آهک

برای تثبیت خاک می‌توان از آهک زنده (CaO) یا زودگیر، آهک شکفته (Ca(OH)<sub>2</sub>) و آهک زنده دولومیتی استفاده نمود. از بین انواع آهک‌ها، آهک زنده در تثبیت خاک‌ها اثر بهتری نسبت به مابقی آهک‌ها دارد؛ اما آهک زنده در واکنش با آب با تولید گاز دی‌اکسید کربن (CO<sub>2</sub>) و گرما همراه بوده و برای سلامتی انسان

## ۳.۱.۲. زانتان‌گام

بیوپلیمرها با اتصال کوالانسی<sup>۱</sup> به هم متصل و دارای یک زنجیره طولانی می‌باشند. آن‌ها که قابل تجزیه نیز می‌باشند از مایکرومولکول‌های بیولوژی<sup>۲</sup> تشکیل شده‌اند. این مواد هم به صورت طبیعی و هم به صورت مصنوعی وجود دارند. چهار نوع اصلی بیوپلیمر عبارتند از: نشاسته، شکر، سلولز و مواد مصنوعی. این بیوپلیمر نوعی پلی‌ساکارید آنیونی بوده که از اسید گلوکرونیک، مانوز D و گلوکان پیوسته تشکیل شده است و ساختار شیمیایی آن (C<sub>35</sub>H<sub>49</sub>O<sub>29</sub>) است.

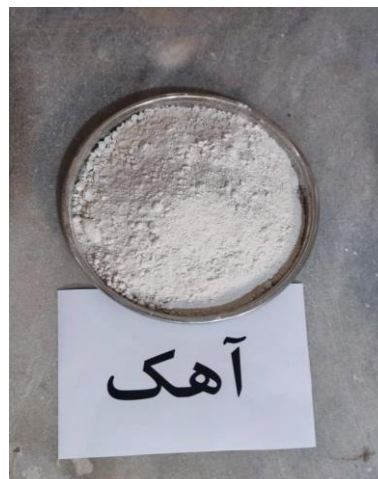
نتایج تحقیقات انجام شده در مورد تثبیت خاک با بیوپلیمرها نشان‌دهنده اثر مثبت این مواد در افزایش

خطرآفرین است. از این رو کار کردن با آهک هیدراته یا شکفته ایمنی بیشتری دارد (روح بخشان و کلانتری، ۲۰۱۶). در این تحقیق، جهت تثبیت خاک مارن از آهک زنده (شکل ۲-الف) با مقادیر ۳، ۴ و ۵ درصد وزنی نسبت به خاک خشک استفاده شده است که این درصدها با توجه به نتایج دیگر تحقیقات و بازه ترکیبی ۰/۵ تا ۳ درصد زانتان‌گام انتخاب شده است.

مقاومت و کاهش انقباض و ترک ایجاد شده روی خاک است (کولایپا و پراوین کومار، ۲۰۱۸). شکل ۲-ب، زانتان‌گام مورد استفاده در این پژوهش را نمایش می‌دهد و همچنین جدول ۲، مشخصات زانتان‌گام مورد استفاده را ارائه می‌کند. بوازا و همکاران<sup>۳</sup> در سال ۲۰۰۹، روی ماسه سیلتی، آزمایش نفوذپذیری برای بررسی اثر آب‌بندی بیوپلیمرهای گوارگام، زانتان‌گام و سدیم آلگینات با درصدهای اختلاط ۰/۵، ۱ و ۲ انجام دادند. چانگ و همکاران (۲۰۱۵)، چهار نوع خاک ماسه، رس، خاک طبیعی و خاک زرد قرمز (رس کم مایه ماسه‌دار) را با استفاده از بیوپلیمر زانتان‌گام با درصدهای ۰/۵، ۱ و ۱/۵ مورد آزمایش قرار دادند. لازم به ذکر است که در این مطالعه نیز خاک مارن با ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد وزنی خاک خشک، زانتان‌گام تثبیت شد.



ب



الف

شکل ۲. الف) آهک مصرفی و ب) زانتان گام مصرفی

جدول ۲. مشخصات فنی بیوپلیمر زانتان گام

| مشخصات                       | استاندارد     |
|------------------------------|---------------|
| شکل ظاهری                    | پودر زرد روشن |
| درصد رد شده از الک ۲۰۰       | بیشتر از ۹۲   |
| درصد رد شده از الک ۱۰۰       | ۱۰۰           |
| درصد کاهش وزن در اثر خشک شدن | کمتر از ۱۵    |
| ph                           | ۶-۸           |
| درصد خاکستر                  | کمتر از ۱۶    |
| درصد پیرویک اسید             | بیشتر از ۱/۵  |
| میزان سرب برحسب ppm          | کمتر از ۲     |
| درصد میزان نیتروژن           | کمتر از ۱/۵   |
| میزان فلزات سنگین برحسب ppm  | کمتر از ۲۰    |
| باکتری سالمونا               | ندارد         |

## ۲.۲. آزمایش‌های انجام شده

### ۱.۲.۲. آزمایش تراکم

این آزمایش به منظور ارزیابی میزان فشردگی خاک و به دست آوردن میزان آب مورد نیاز در عملیات میدانی بر اساس استاندارد ASTM D-698 انجام می‌گردد (شکل ۳-الف) (ASTM D698, 2012). آزمایش تراکم به منظور یافتن درصد رطوبت بهینه و وزن مخصوص

خشک بیشینه خاک مارن و نمونه‌های مختلف اختلاط خاک مارن با آهک و زانتان گام انجام شده است. این آزمایش به دو روش آشتوی استاندارد و آشتوی اصلاح شده انجام می‌شود که در تحقیق حاضر از روش تراکم اصلاح شده استفاده شده است.

## ۲.۲.۲. آزمایش فشاری تک محوری

این آزمایش به عنوان یکی از آزمایش‌های پایه در اکثر پروژه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد و همچنین سریع‌ترین روش برای تعیین مقاومت خاک‌ها است. آزمایش فشاری تک محوری بر اساس استاندارد ASTM D 2166 روی خاک مارن و ترکیب این خاک با درصد‌های مختلف زانتان گام و آهک انجام شده است (شکل ۳-ب (ASTM D2166, 2016)).

## ۳.۲.۲. آزمایش برش مستقیم

مقاومت برشی یکی از خصوصیات ژئوتکنیکی است که از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. برای تحلیل و حل مسائل پایداری از قبیل محاسبه فشار زمین، ظرفیت باربری فونداسیون، پایداری شیب یا پایداری خاکریزها و سدهای خاکی و غیره استفاده می‌شود (بولس، ۱۹۹۷). در این پژوهش نیز به منظور بررسی پارامترهای مقاومت برشی، نمونه خاک مارن و ترکیب خاک مارن با درصد‌های مختلف زانتان گام و آهک از این روش بر اساس استاندارد ASTM D 3080 استفاده شده است (شکل ۳-ج) (ASTM D3080, 2004).

## ۴.۲.۲. آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا (CBR)

در این پژوهش، آزمایش CBR مطابق با استاندارد ASTM D1883 انجام گردید. نتیجه حاصل از این آزمایش، یک عدد را به عنوان نسبت باربری به دست می‌آورد که این عدد طبق تعریف عبارت است از نسبت نیروی لازم برای فروبردن پیستونی با شکل، سرعت و عمق معین در خاک مورد آزمایش به نیروی لازم برای فروبردن همان پیستون با همان سرعت و عمق در مصالح استاندارد (عبدالمکی و خواجه فرد، ۲۰۲۰). در این تحقیق، خاک مارن و ترکیب خاک مارن با درصد‌های مختلف آهک و زانتان گام، تحت آزمایش CBR قرار گرفته‌اند. بدین صورت که برای انجام آزمایش CBR، خاک مارن و ترکیب‌های مختلف آهک را به میزان لازم

آب برای درصد رطوبت بهینه ترکیب کرده و سپس شیرآهک به خاک اضافه می‌گردد و برای زانتان گام بدین صورت که ابتدا خاک خشک را با زانتان گام به خوبی ترکیب کرده و سپس به آن میزان رطوبت بهینه اضافه می‌گردد و نمونه‌گیری انجام می‌شود. پس از انجام زمان عمل‌آوری بدین صورت که قالب‌ها را به مدت ۷۲ ساعت داخل آب قرار داده تا اشباع شوند و سپس توسط دستگاه شکل ۳-د، نمونه بارگذاری می‌شود.

دلیل انتخاب این بازه زمانی، رسیدن وزن نمونه‌ها به حالت پایدار در مدت ۷۲ ساعت بوده است. مطابق با روش استاندارد ASTM D1883، اشباع زمانی کامل تلقی می‌شود که تغییر وزن نمونه در ۲۴ ساعت کمتر از ۱ درصد باشد. در این پژوهش، نمونه‌ها پس از ۷۲ ساعت به این پایداری رسیده‌اند و افزایش مدت زمان تا ۹۶ ساعت تغییری در درجه اشباع ایجاد نکرده است. بنابراین، انتخاب مدت زمان ۷۲ ساعت از نظر فنی مطابق معیار "رسیدن به حالت پایدار وزنی" بوده و با الزامات استاندارد مغایرت ندارد. همچنین، در تعیین مقدار CBR، هر دو مقدار نفوذ ۲/۵ میلی‌متر و ۵ میلی‌متر طبق روش استاندارد اندازه‌گیری شده‌اند و مقدار نهایی CBR بر اساس مقدار بزرگ‌تر انتخاب شده است. لازم به ذکر است که مراحل بارگذاری، سرعت نفوذ (1.27 mm/min) و قرائت نیرو مطابق الزامات ASTM انجام شده و نتایج ارائه شده بر همین اساس به دست آمده‌اند.

## ۵.۲.۲. آزمایش تعیین pH

pH خاک نشان‌دهنده میزان بازی یا اسیدی بودن محیط‌های آبی است. این آزمایش طبق استاندارد ASTM D 4972 انجام شده است. نحوه انجام این آزمایش بدین صورت است که مقدار ۲ گرم خاک را با ۱۰ سی‌سی آب مقطر مخلوط و مدت ۱۵ دقیقه به خوبی تکان داده می‌شود. پس از رد نمودن از صافی، میزان pH با کاغذ اندازه‌گیری pH تعیین می‌شود.



ب



الف



د

ج

شکل ۳. الف) آزمایش تراکم، ب) آزمایش مقاومت تک محوری، ج) آزمایش مقاومت برشی و د) آزمایش CBR

## ۶.۲.۲. بررسی ریزساختاری SEM

میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM<sup>۱</sup> به منظور تصویربرداری از نمونه و تعیین ویژگی‌های سطحی و مورفولوژی آن استفاده می‌شود. در این روش، قدرت بزرگ‌نمایی آن بسیار بیشتر از میکروسکوپ‌های نوری است و تا چند صد هزار برابر می‌تواند تصویربرداری کنند. در این پژوهش نیز به منظور بررسی هرچه دقیق‌تر مخلوط خاک تثبیت‌شده از این روش استفاده شد. برای انجام آنالیز SEM، نمونه‌های خاک تثبیت‌شده با آهک و زانتان‌گام ابتدا از نواحی بدون ترک و شکست انتخاب شدند. سپس نمونه‌ها در دمای محیط به مدت ۲۴ ساعت خشک شدند تا رطوبت مؤثر از ساختار خارج شود؛ بدون اینکه ساختار میکرو از بین برود.

پس از خشک کردن اولیه، قطعات کوچک (حدود ۱×۱ سانتی‌متر) از نمونه‌ها جدا شده و تحت خلأ، در خشک‌کن قرار گرفتند. برای جلوگیری از تجمع بار الکتریکی، سطح نمونه‌ها با لایه‌ای نازک از طلا پوشش‌دهی شد. سپس نمونه‌ها روی پایه‌ی آلومینیومی نصب و در دستگاه SEM قرار گرفتند.

بدین منظور، نمونه‌هایی شامل خاک تثبیت نشده، خاک تثبیت‌شده با ۳ درصد آهک و همچنین نمونه خاک تثبیت‌شده با ۱ درصد زانتان‌گام مورد بررسی قرار گرفت.

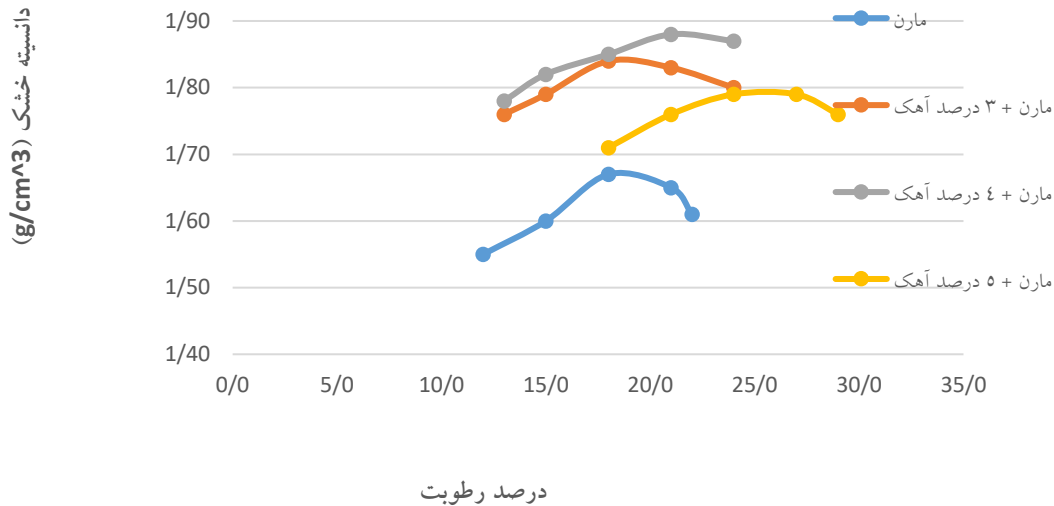
## ۳. نتایج و بحث

### ۱.۳. نتایج آزمایش تراکم

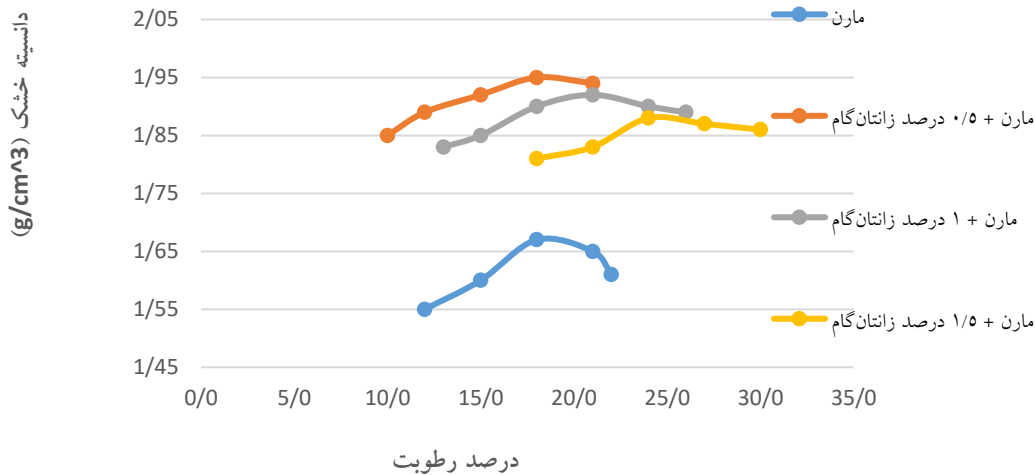
همان‌طور که بیان شد، آزمایش تراکم به منظور یافتن درصد رطوبت بهینه ( $\omega_{opt}$ ) و وزن مخصوص خشک بیشینه ( $\gamma_{dmax}$ ) خاک مارن و نمونه‌های اختلاط خاک مارن با درصدهای مختلف آهک و زانتان‌گام انجام شده است (ASTM D698-12, 2012). در شکل ۴-الف، نتایج آزمایش تراکم روی ترکیب خاک مارن با درصدهای مختلف آهک نمایش داده شده است، افزودن آهک به

خاک مارن سبب افزایش درصد رطوبت بهینه و کاهش دانسیته خشک بیشینه می‌گردد. زمانی که آهک با خاک مارن ترکیب می‌شود، دو نوع واکنش تبادل کاتیونی یا کوتاه‌مدت و واکنش پوزولانی یا درازمدت صورت می‌پذیرد. واکنش تبادل کاتیونی بلافاصله و در مدت زمان کوتاهی تقریباً برای تمامی خاک‌های ریزدانه ترکیب‌شده با آهک صورت می‌گیرد. در این واکنش، بین کاتیون‌های تک‌ظرفیتی قابل ترکیب خاک رس با کاتیون‌های آهک (یون‌های دو ظرفیتی کلسیم و یا یون‌های چند ظرفیتی) تبادل صورت می‌گیرد. بنابراین، در اثر واکنش تبادل کاتیونی و تشکیل محصولات پوزولانی مانند C-S-H و C-A-H در میان ذرات خاک حفره‌های هوا ایجاد شده که این حفره‌ها با ایجاد یک محیط متخلخل سبب کاهش وزن مخصوص بیشینه و همچنین افزایش رطوبت بهینه به جهت افزایش میزان آب برای پر کردن نمونه‌ها می‌گردد (روح بخشان و کلانتری، ۲۰۱۶). نتایج تثبیت خاک مارن با زانتان‌گام در شکل ۴-ب نمایش داده شده است. بیوپلیمر زانتان‌گام زمانی که با خاک ترکیب می‌شود به صورت مستقیم با ذرات ریز خاک و آب مورد واکنش قرار می‌گیرد. هرچه میزان افزودن زانتان‌گام بیشتر شود، میزان زانتان‌گام اضافی با جذب آب سبب تولید سوسپانسیونی چسبناک شده که فاصله بین ذرات را افزایش و سبب افزایش حجم کلی خاک می‌گردد. در واقع نتایج تثبیت خاک مارن با زانتان‌گام نشان‌دهنده اثر مثبت زانتان‌گام بر کاهش دانسیته خشک حداکثر و افزایش درصد رطوبت بهینه است (چانگ و همکاران، ۲۰۱۵).

در بیان کلی، در هر دو افزودنی، میزان کاهش وزن مخصوص محدود بوده و به دلیل افزایش چسبندگی و همبستگی بین ذرات، اثر منفی بر مقاومت مکانیکی خاک ندارد. ولی نمی‌توان اثر مثبت قابل توجهی هم برای آن قائل شد.



الف



ب

شکل ۴. منحنی آزمایش تراکم: الف) خاک مارن تثبیت شده با آهک و ب) خاک مارن تثبیت شده با زانتان گام

### ۲.۳. نتایج آزمایش تک محوری

بررسی مقاومت خاک مارن تثبیت شده با آهک برای ۳، ۴ و ۵ درصد آهک از ۷ و ۲۸ روز عمل آوری در شکل ۵-الف نمایش داده شده است. افزودن آهک به خاک سبب افزایش چشمگیر مقاومت تک محوری می گردد. علت این افزایش واکنش پوزولانی بین خاک و آهک است. آهک با افزایش pH خاک سبب حل شدن سیلیکات و آلومینات موجود در خاک شده و این مواد پس از آزاد شدن با

کلسیم موجود در آهک واکنش داده و سبب تشکیل سیلیکات کلسیم و آلومینات کلسیم می شوند که مانند چسب طبیعی عمل نموده و افزایش مقاومت و دوام خاک را در پی دارد. این افزایش مقاومت با افزودن آهک تا زمانی که یون سیلیکات در خاک موجود باشد ادامه داشته و پس از آن سبب کاهش مقاومت خاک می گردد (کوسلانات، ۲۰۰۶؛ مرادی و همکاران، ۲۰۱۲). این کاهش مقاومت را می توان به چند عامل نسبت داد. اولاً،

عمل آوری ۷ و ۲۸ روزه در شکل ۵-ب نمایش داده شده است. مطابق با نتایج، مشاهده می شود که مقدار مقاومت فشاری خاک تثبیت شده با افزایش درصد وزنی زانتان گام افزایش یافته و مقاومتی بسیار بالاتر از خاک مارن تثبیت شده با آهک به دست آمده است.

زمان هفت روزه عمل آوری برای بهسازی خاک مارن با زانتان گام کافی نیست. اما در زمان ۲۸ روز عمل آوری تمامی نمونه ها حداقل مقاومت کافی را به دست آورده و همچنین مدول الاستیسیته خاک نیز افزایش می یابد. بنابراین، می توان نتیجه گرفت که با افزایش زمان عمل آوری با توجه به چسبندگی بیشتر زانتان گام با ذرات ریزدانه خاک، مقاومت فشاری به صورت غیرخطی افزایش و با افزایش درصد زانتان گام این روند سیر نزولی پیدا می کند. همچنین، برای درک بهتر زمان عمل آوری زانتان گام نمونه ای با ۱/۵ درصد زانتان گام و سن ۱۵۰ روز مورد آزمایش قرار گرفت و میزان مقاومت آن معادل  $(\frac{Kg}{cm^2}) 15$  به دست آمده که نشان دهنده بهبود عملکرد زانتان گام در گذشت زمان است. مطابق با آزمایش های انجام شده، مقدار درصد بهینه زانتان گام در محدوده ۱ تا ۲ درصد است. افزایش درصد زانتان گام با توجه به لزجت زانتان گام در تماس با آب، ویسکوزیته مخلوط افزایش یافته و ضمن سختی اجرا، کاهش کارایی مخلوط را در پی خواهد داشت.

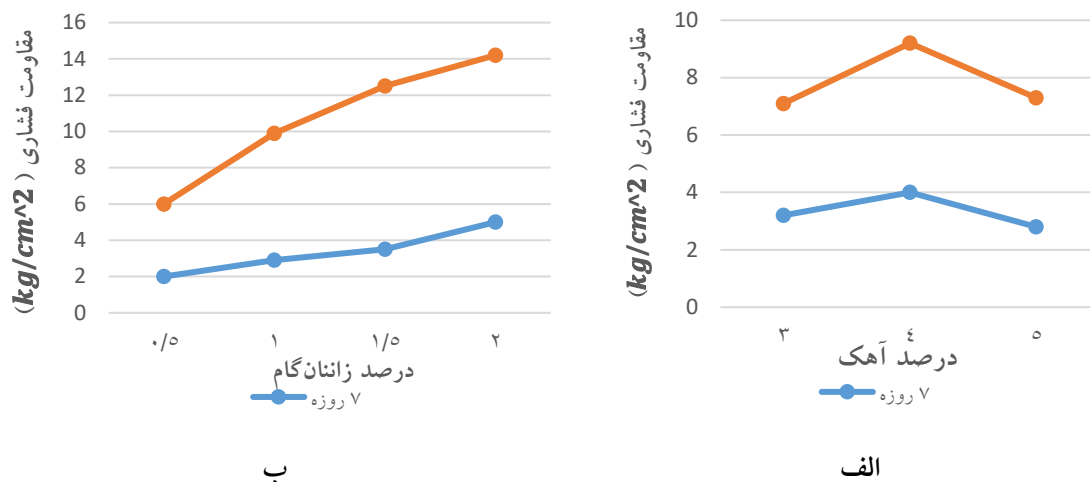
برای مقایسه دو ماده تثبیت کننده آهک و زانتان گام می توان با بررسی نتایج مقاومت فشاری به این مهم دست یافت. همان طور که در شکل ۵ مشاهده شد، هر دو تثبیت کننده باعث افزایش مقاومت فشاری خاک مارن شده اند و با توجه به نتایج به دست آمده از پژوهش نشان دهنده چسبندگی بسیار قوی تر ترکیب خاک با زانتان گام بوده که می توان نتیجه گرفت افزایش مقاومت خاک بهسازی شده با زانتان گام نسبت به آهک بسیار بیشتر است.

در مقادیر زیاد آهک، نسبت کلسیم به سیلیس و آلومینا در خاک از حالت بهینه خارج شده و واکنش های پوزولانی به طور کامل انجام نمی شوند؛ در نتیجه، بخشی از آهک به صورت آزاد باقی می ماند که باعث ایجاد تخلخل و کاهش چسبندگی بین ذرات خاک می گردد. ثانیاً، افزایش بیش از حد آهک موجب افزایش قلیائیت و کاهش میزان رطوبت مؤثر در واکنش های شیمیایی می شود که خود منجر به ضعف در تشکیل ترکیبات پایدار نظیر C-S-H و C-A-H می گردد.

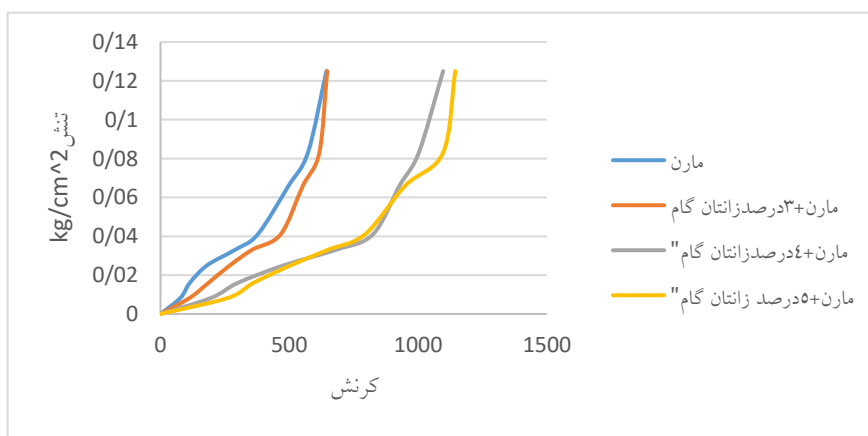
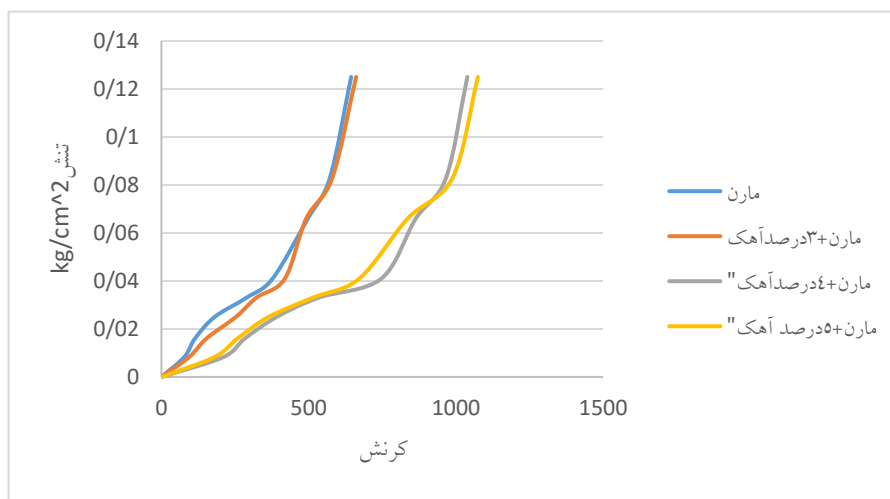
به علاوه، توزیع غیریکنسان ذرات آهک در حجم خاک در درصد های بالا می تواند باعث تشکیل نقاط ضعف موضعی و رفتار شکننده تر نمونه ها شود.

جهت دستیابی به درصد مناسب و بهینه آهک برای بهسازی خاک مارن، درصد آهکی که بیشترین میزان مقاومت را در ۲۸ روز عمل آوری ایجاد کرده است به عنوان درصد بهینه آهک در نظر گرفته شده است. بر اساس استاندارد که مرجعی برای ارزیابی کارایی مخلوط مواد افزودنی برای تثبیت است، در صورتی که خاک مورد بهسازی مقاومت فشاری بیش از ۳۴۵ kPa داشته باشد، عملیات بهسازی کارآمد در نظر گرفته خواهد شد (ASTM D4609, 2001). بنابراین، خاک هایی که پس از بهسازی با آهک و عمل آوری مقاومتی بیش از ۳۴۵ کیلو پاسکال داشته باشند به عنوان خاک های واکنش دار در نظر گرفته می شوند، در غیر این صورت، خاک های بدون واکنش در نظر گرفته می شوند (کاتبی و کیومرثی، ۲۰۱۱). بنا بر نتایج به دست آمده، مشاهده می شود که خاک مارن تثبیت شده با ۴ درصد آهک بیشترین میزان مقاومت را در زمان ۲۸ روز عمل آوری داشته که می توان نتیجه گرفت درصد بهینه آهک برای بهسازی خاک مارن مورد آزمایش ۴ درصد است. مقدار مقاومت فشاری خاک مارن تثبیت شده با زانتان گام با مقادیر ۰/۵، ۱/۰، ۱/۵ و ۲ درصد زمان

## مقایسه عملکرد آهک و زانتان گام در تثبیت خاک مارن



شکل ۵. منحنی آزمایش مقاومت فشاری تک محوره خاک مارن تثبیت شده با: الف) آهک و ب) زانتان گام



شکل ۶. منحنی تنش-کرنش خاک مارن و ترکیب آن با درصد های مختلف دوره عمل آوری ۲۸ روزه: الف) آهک و ب) زانتان گام

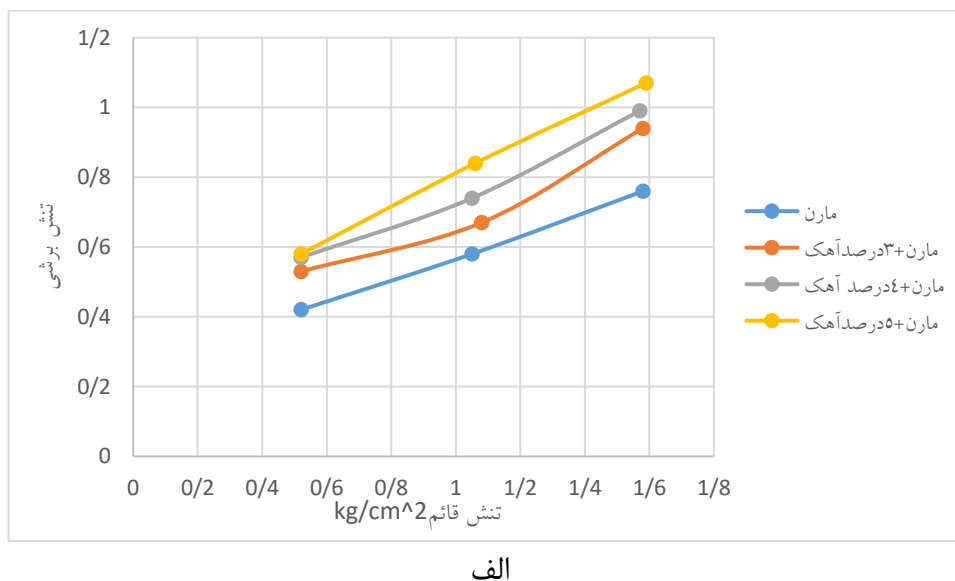
### ۳.۳. نتایج آزمایش برش مستقیم

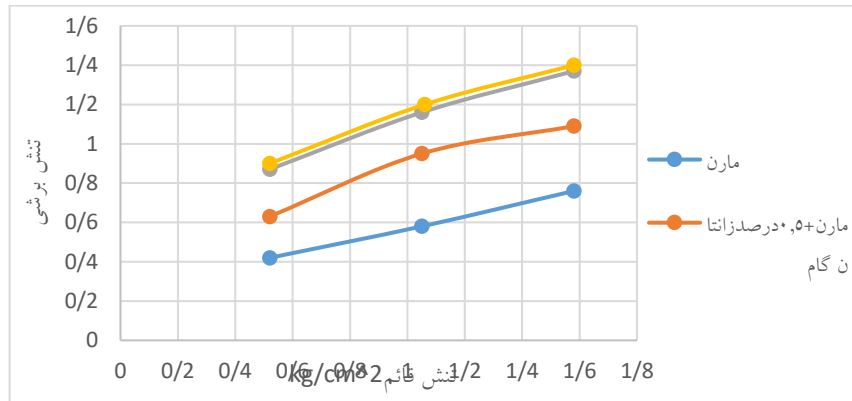
برای بررسی پارامترهای مقاومت برشی خاک و اثر تثبیت آهک و زانتان گام بر خاک مارن، آزمایش برش مستقیم انجام شده است. پارامترهای مهم خاک که از این آزمایش با ترسیم نمودار تنش برشی برحسب تنش قائم به دست می‌آیند (شکل ۶-الف) عبارتند از چسبندگی (C) و زاویه اصطکاک داخلی. نتایج آزمایش برش مستقیم در مورد تثبیت این خاک با آهک با زمان عمل‌آوری ۲۸ روزه در جدول ۳ نمایش داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد، در مدت ۲۸ روز عمل‌آوری، با افزایش میزان آهک تا ۵ درصد، میزان چسبندگی افزایش می‌یابد، به نحوی که میزان چسبندگی خاک تثبیت‌شده با آهک ۵ درصد نسبت به خاک اصلی ۱/۴۴ برابر افزایش می‌یابد. همچنین، زاویه اصطکاک داخلی خاک نیز افزایشی بدین صورت داشته است که با افزودن آهک به میزان ۳ درصد تا ۴ درصد، زاویه اصطکاک خاک روند افزایشی داشته؛ اما با افزودن ۵ درصد آهک، زاویه اصطکاک نسبت به خاک اصلی افزایش اما نسبت به خاک تثبیت‌شده با ۴ درصد آهک افزایش کمتری داشته است. میزان افزایش زاویه اصطکاک خاک تثبیت‌شده با ۴ درصد آهک نسبت به خاک اصلی ۱/۳۳ برابر است. پارامترهای مقاومت برشی نمونه‌های تثبیت‌شده خاک

مارن با زانتان گام نیز در زمان عمل‌آوری ۲۸ روزه در جدول ۳ نمایش داده شده است. میزان چسبندگی خاک مارن تثبیت‌شده با ۱/۵ درصد زانتان گام نسبت به خاک اصلی ۲/۵۲ برابر است. این افزایش نشان‌دهنده واکنش بالای این ماده بر خاک مارن است. قابل ذکر است که مقادیر بالای ۱/۵ درصد به دلیل ویسکوزیته‌ی زیادی که زانتان گام ایجاد می‌کند، مخلوط خاک و زانتان گام به خوبی انجام نمی‌شود، ضمن اینکه مقادیر بالا از نظر اقتصادی نیز مقرون به صرفه نمی‌باشد.

همچنین، در مورد زاویه اصطکاک نیز افزایش تقریباً ۱/۵ برابری را از خود نشان داده است. در بررسی پارامترهای مقاومت برشی نیز نتایج نشان‌دهنده اثرگذاری بهتر زانتان گام نسبت به آهک است.

در بیان کلی، رفتار خاک در برابر هر دو ماده از دیدگاه مکانیکی قابل توجیه است، زیرا هر دو افزودنی بر اتصال بین ذرات خاک تأثیر می‌گذارند. در حضور آهک، واکنش‌های پوزولانی و تشکیل ترکیبات سیمانی C-S-H و C-A-H سبب افزایش چسبندگی بین ذرات می‌شود. در مورد زانتان گام نیز افزایش چسبندگی ناشی از ایجاد شبکه پلیمری ژل‌مانند بین ذرات خاک است که موجب بهبود انسجام و کاهش گسیختگی در سطوح برشی می‌شود.





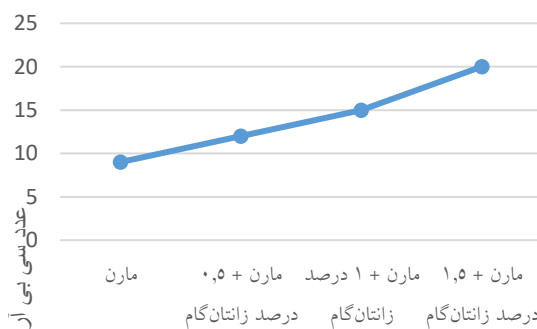
ب

شکل ۷. منحنی تنش برشی - قائم خاک مارن مصرفی با درصدهای مختلف: الف) آهک و ب) زانتان گام

جدول ۳. میزان زاویه اصطکاک داخلی و ضریب چسبندگی خاک مارن تثبیت شده

| نوع خاک                    | زاویه اصطکاک داخلی<br>(درجه) | ضریب چسبندگی (C) |
|----------------------------|------------------------------|------------------|
| مارن                       | ۱۷/۷                         | ۰/۲۵             |
| مارن + ۳ درصد آهک          | ۲۰/۷                         | ۰/۳۲             |
| مارن + ۴ درصد آهک          | ۲۳/۵                         | ۰/۳۵             |
| مارن + ۵ درصد آهک          | ۲۳/۷                         | ۰/۳۶             |
| مارن + ۰/۵ درصد زانتان گام | ۲۱/۹                         | ۰/۴۷             |
| مارن + ۱/۰ درصد زانتان گام | ۲۵/۸                         | ۰/۶۱             |

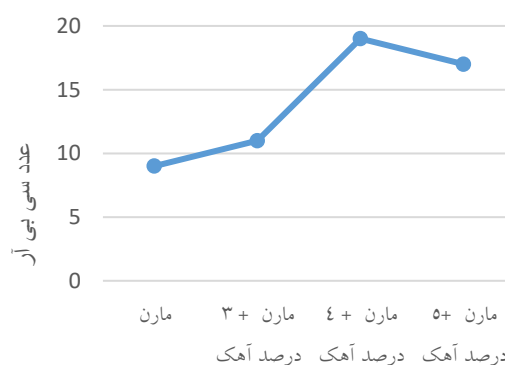
در شکل ۸-الف نمایش داده شده است. نتایج نشان دهنده افزایش میزان CBR و ظرفیت باربری خاک با افزودن آهک و زانتان گام می باشند.



ب

۴.۳. نتایج آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا

در این آزمایش، پس از زمان عمل آوری سه روزه، نمونه ها تحت آزمایش CBR قرار گرفته که نتایج به دست آمده



الف

شکل ۸. نتایج CBR خاک مارن تثبیت شده طی عمل آوری ۳ روزه با: الف) آهک و ب) زانتان گام

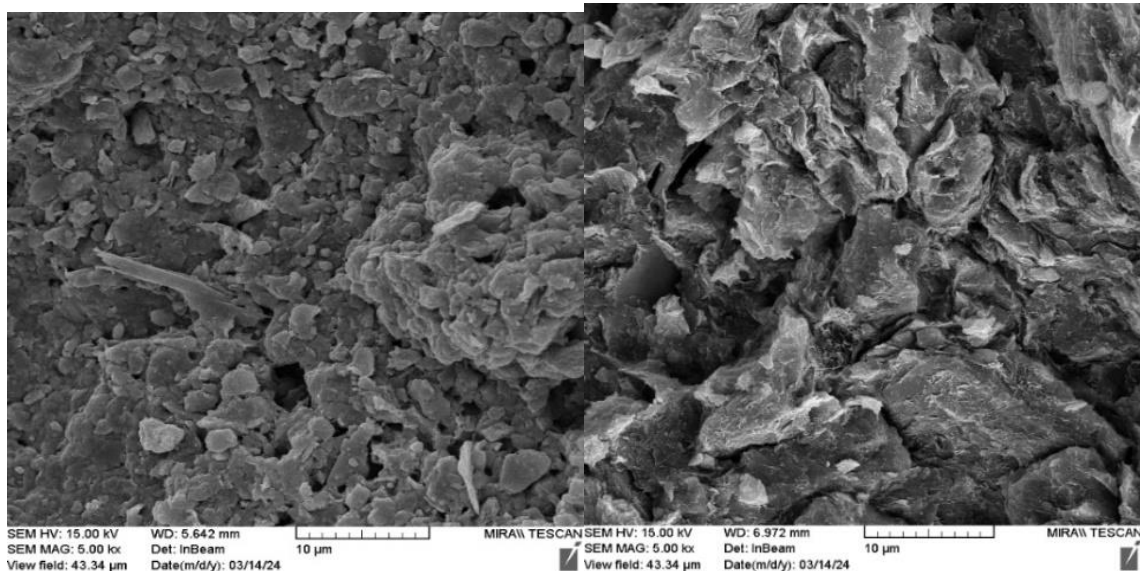
### ۵.۳. نتایج تحلیل SEM

همان‌طور که اشاره شد، به‌منظور بررسی هرچه دقیق‌تر تأثیر آهک و زانتان‌گام بر خاک، از بررسی ریزساختاری استفاده شده که تصاویر حاصل‌شده در شکل ۹ نمایش داده شده است. شکل ۹-الف تصویر خاک مارنی بدون هیچ‌گونه مواد افزودنی تثبیت‌کننده است و شکل‌های ۹-ب و ۹-ج به ترتیب بیانگر خاک مارنی تثبیت‌شده با ۳ درصد آهک و ۱ درصد زانتان‌گام است. در تصاویر مربوط به نمونه‌های حاوی آهک، تشکیل ساختارهای کریستالی و سوزنی‌شکل کلسیم-سیلیکات-هیدرات (C-S-H) و کلسیم-آلومینات-هیدرات (C-A-H) مشاهده شد که حاصل واکنش‌های پوزولانی بین ترکیبات آهک و سیلیس و آلومیناهای موجود در خاک مارن هستند. این محصولات سیمانی نقش اصلی را در افزایش مقاومت و کاهش تخلخل خاک دارند، زیرا فضاهای خالی بین ذرات را پر کرده و پیوندهای سخت بین ذرات ایجاد می‌کنند.

در نمونه‌های حاوی زانتان‌گام، شبکه‌ای پیوسته از

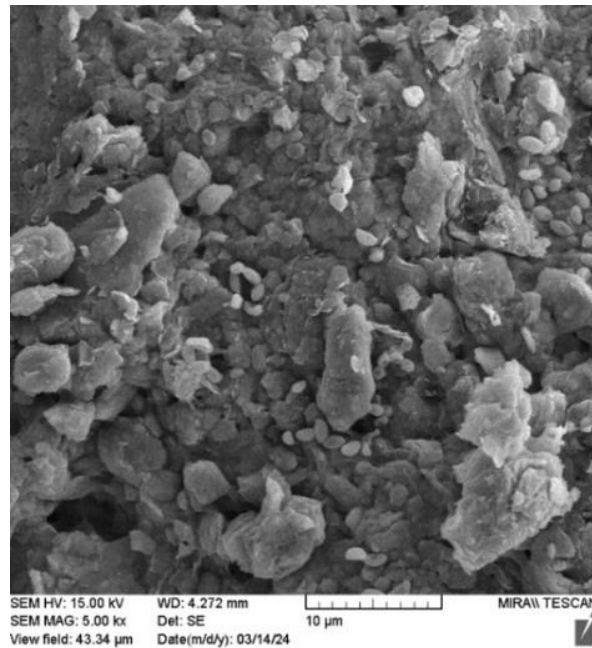
ماده ژل‌مانند بر سطح ذرات خاک مشاهده می‌شود که سبب افزایش چسبندگی بین‌ذره‌ای و انسجام ساختار خاک شده است. زانتان‌گام با ایجاد فیلم نازک پلیمری اطراف ذرات خاک، تخلخل را کاهش داده و از گسیختگی موضعی جلوگیری می‌کند.

با وجود اینکه آنالیز EDS می‌تواند برای شناسایی عناصر تشکیل‌دهنده فازهای سیمانی و محصولات واکنش پوزولانی مفید باشد، در این تحقیق، هدف اصلی، تحلیل تغییرات ساختاری، تراکم، انسجام و نحوه توزیع افزودنی‌ها در مقیاس میکروسکوپی بوده است. از آنجا که بسیاری از محصولات سیمانی مانند C-S-H و C-A-H دارای مورفولوژی مشخص و قابل تشخیص در تصاویر SEM هستند (ژل‌مانند، پولکی و رشته‌ای)، استفاده از تصاویر SEM برای تحلیل رفتار میکروسکوپی نمونه‌ها کاملاً کافی بوده و اطلاعات لازم را برای تبیین تغییرات مقاومت مکانیکی فراهم کرده است.



ب

الف



ج

شکل ۹. تصاویر SEM: الف) خاک مارن، ب) خاک تثبیت شده با ۳٪ آهک و ج) خاک تثبیت شده با ۱٪ زانتان گام

### ۶.۳. آزمایش pH نمونه های تثبیت شده

در آزمایش pH نمونه های تثبیت شده پس از ۲۸ روز عمل آوری بررسی می شود. بر طبق انتظار، افزودن آهک و زانتان گام سبب افزایش pH نمونه ها می شود. وجود یون های  $(OH)^-$  و  $(Ca)^+$  در آهک باعث شروع واکنش پوزولانی در خاک شده و با ایجاد محیط قلیایی، pH خاک افزایش می یابد. ماده زانتان گام با پیوند کاتیونی و هیدروژنی بین دو گروه کربوکسیل و هیدروکسیل با بارهای الکتریکی بین ذرات ریزدانه ایجاد پیوستگی و افزایش pH را در پی دارد. میزان pH نمونه های خاک مارن تثبیت شده در جدول ۴ آورده شده است.

جدول ۴. نتایج آزمایش PH

| نوع مخلوط                      | pH  |
|--------------------------------|-----|
| خاک مارن                       | ۷/۸ |
| خاک مارن + ۳ درصد آهک          | ۸/۹ |
| خاک مارن + ۴ درصد آهک          | ۹   |
| خاک مارن + ۵ درصد آهک          | ۹/۲ |
| خاک مارن + ۰/۵ درصد زانتان گام | ۸/۲ |
| خاک مارن + ۱ درصد زانتان گام   | ۸/۳ |
| خاک مارن + ۱/۵ درصد زانتان گام | ۸/۴ |

#### ۴. نتیجه گیری

با توجه به خصوصیات خاک مارن و بر اساس نتایج تحقیقات پیشین و نتایج به دست آمده، مشخص شد که این خاک بسیار ضعیف و ظرفیت باربری بسیار کمی در حالت غیرخشک دارد که این موارد لزوم تثبیت و بهسازی این نوع خاک را ضروری می‌سازد. جهت بهسازی خاک مارن، روش‌های مختلفی از جمله سیمان، گچ، آهک و ... استفاده شده است. هرچند این موارد در تثبیت خاک مارن اثر مثبتی ایجاد کرده‌اند، اما از اثرات زیست‌محیطی و ایجاد خطرات بر سلامتی انسان در زمان اختلاط این مواد نمی‌توان چشم‌پوشی کرد. بنابراین برای رفع این اثرات نامطلوب در این تحقیق از یک بیوپلیمر برای تثبیت خاک مارن استفاده شده است و به مقایسه آن با تثبیت‌کننده سنتی آهک پرداخته شده است. بدین منظور، خاک مورد نظر با درصد‌های مختلف آهک و زانتان‌گام تثبیت شد و سپس تحت آزمایش‌های تراکم، مقاومت فشاری تک‌محوری، مقاومت برشی مستقیم و مقاومت CBR و همچنین pH قرار گرفت. نتایج این پژوهش به شرح زیر است:

۱. با توجه به آزمایش تراکم، اختلاط خاک مارن با آهک و زانتان‌گام، میزان رطوبت بهینه و وزن واحد حجم خشک بیشینه خاک تغییراتی ایجاد می‌کند. بدین صورت که با افزودن این دو ماده به خاک، وزن واحد خشک بیشینه کاهش و درصد رطوبت بهینه افزایش می‌یابد.
۲. با افزودن آهک به خاک مارن، مقاومت فشاری نمونه‌ها در زمان عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روز افزایش یافته است. روند افزایش مقاومت فشاری تا میزان ۴ درصد آهک به صورت صعودی و سپس مسیر نزولی پیدا کرده است. همچنین، با توجه به نتایج آزمایش‌ها، می‌توان درصد بهینه آهک را ۴ درصد انتخاب کرد.
۳. در تثبیت خاک مارن با افزودن زانتان‌گام، مقاومت فشاری نمونه‌ها در زمان ۷ و ۲۸ روز عمل‌آوری افزایش می‌یابد. اما در زمان ۷ روز عمل‌آوری هیچ‌کدام از نمونه‌ها

حداقل معیار مقاومت را تأمین نمی‌کنند.

۴. در فرایند بهسازی خاک مارن، با اضافه نمودن آهک به این خاک، پارامترهای مقاومت برشی تغییرات مثبتی از خود نشان می‌دهند بدین‌صورت که میزان چسبندگی خاک با میزان ۴ درصد آهک نسبت به خاک اصلی ۱/۴۴ برابر می‌شود.

۵. میزان زاویه اصطکاک داخلی خاک نیز روندی افزایشی داشته است بدین‌صورت که در خاک تثبیت‌شده با ۴ درصد آهک نسبت به خاک اصلی ۱/۳۳ برابر رشد داشته است.

۶. در مورد خاک تثبیت‌شده با زانتان‌گام با درصد وزنی ۱/۵ درصد، میزان افزایش چسبندگی و زاویه اصطکاک به ترتیب ۲/۵۲ و ۱/۵ برابر نسبت به خاک اصلی می‌شود. ۷. با استفاده از آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا (CBR) میزان بهینه آهک و زانتان‌گام برای تثبیت خاک مارن به ترتیب ۴ و ۱/۵ درصد به دست آمد که میزان افزایش درصدی هر دو به ترتیب ۲/۱۱ و ۲/۲۲ است.

۸. هردو ماده آهک و زانتان‌گام با ایجاد محیط قلیایی سبب افزایش pH نمونه‌ها می‌شوند.

۹. نتایج حاصل از آزمایش‌های فشاری تک‌محوره (UCS)، برش مستقیم و CBR نشان می‌دهد که بین این سه پارامتر رابطه‌ای مستقیم و همبسته وجود دارد. افزایش مقاومت فشاری تک‌محوره منجر به افزایش همزمان در چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی (به‌دست‌آمده از آزمایش برش مستقیم) و در نتیجه بهبود ظرفیت باربری (CBR) شده است. به‌طور کلی، در نمونه‌های تثبیت‌شده با آهک و زانتان‌گام، روند تغییرات این سه شاخص مشابه بوده است. این افزایش‌ها با رشد ظرفیت باربری CBR به میزان ۲.۱۱ و ۲.۲۲ برابر به‌ترتیب در نمونه‌های آهک و زانتان‌گام همراه بوده است. این همبستگی مثبت نشان می‌دهد که بهبود خواص مکانیکی خاک در اثر تثبیت، حاصل افزایش نیروهای چسبندگی بین ذرات و کاهش تخلخل است. در نمونه‌های دارای زانتان‌گام، به‌دلیل ایجاد

## ۵. تحلیل هزینه - فایده

الف) افزایش طول عمر سازه ها : زانتان گام با افزایش مقاومت خاک و کاهش تغییر شکل ها می تواند نیاز به تعمیرات و نگهداری مکرر را کاهش دهد، که این امر هزینه های عملیاتی پروژه را در بلندمدت کم می کند.

ب) کاهش مصرف مصالح و حجم کار: به دلیل اثر تثبیت بالاتر زانتان گام، ممکن است مقدار خاک یا مصالح کمتری برای رسیدن به مقاومت مطلوب نیاز باشد. بنابراین، هزینه کلی مواد و حمل و نقل کاهش می یابد.

ج) مزایای محیط زیستی و اقتصادی: استفاده از زانتان گام باعث کاهش نیاز به آهک و سیمان می شود که تولید آن ها انرژی بر و پرهزینه است و همچنین انتشار  $CO_2$  کمتری دارد. این موضوع می تواند هزینه های جرمه زیست محیطی و تأمین مجوزها را کاهش دهد.

د) کاهش زمان اجرا و هزینه نیروی انسانی: تثبیت سریع تر و کارایی بالاتر زانتان گام می تواند زمان اجرای پروژه را کوتاه تر کرده و به تبع آن هزینه نیروی انسانی و ماشین آلات کاهش یابد.

ه) اقتصاد بلندمدت: هرچند هزینه اولیه زانتان گام بیشتر است، اما مجموع هزینه های بلندمدت شامل نگهداری کمتر، کاهش ریسک خرابی، و کاهش مصرف سایر مصالح، می تواند استفاده از آن را در بسیاری از پروژه ها به صرفه تر کند.

## ۶. تقدیر و قدردانی

نویسندگان مراتب سپاس و قدردانی خود را از تمامی پژوهشگران و متخصصانی که در پیشبرد این پژوهش یاری رسان بوده اند، ابراز می دارند. همچنین از همکاری و همراهی کلیه همکاران پژوهشی که بازخوردهای سازنده ای در راستای بهبود کیفیت این مطالعه ارائه نموده اند، تشکر می گردد.

شبکه پلیمری در فضای بین ذره ای، ارتباط بین نتایج سه آزمایش قوی تر مشاهده شد. بنابراین، می توان گفت که آزمایش فشاری تک محوره شاخص مناسبی برای پیش بینی رفتار مقاومتی کلی خاک تثبیت شده، به ویژه برای خاک های مارنی در حضور افزودنی های زیستی مانند زانتان گام است.

۱۰. در بررسی های انجام شده، افزودن زانتان گام در مقایسه با آهک موجب افزایش چشمگیر مقاومت فشاری تک محوره، مقاومت برشی و شاخص باربری (CBR) خاک مارن شده است. این عملکرد برتر را می توان با توجه به ماهیت فیزیکی و شیمیایی زانتان گام نسبت به آهک تبیین کرد.

الف) ماهیت پلیمری زانتان گام:

زانتان گام یک پلی ساکارید طبیعی با زنجیره های بلند مولکولی است که توانایی تشکیل شبکه های ژل مانند را در محیط های مرطوب دارد. این شبکه ها با ذرات ریز خاک درگیر شده و با ایجاد پیوندهای فیزیکی قوی (نظیر نیروهای واندروالسی و پیوند هیدروژنی) موجب افزایش چسبندگی و کاهش تغییر شکل پذیری خاک می شوند.

ب) افزایش چسبندگی بین ذره ای:

مولکول های زانتان گام در حضور آب به ذرات رس و کلسیت موجود در خاک مارن متصل شده و نوعی "پوشش چسبنده" روی سطح ذرات ایجاد می کنند. این رفتار موجب افزایش مقاومت برشی و کاهش نفوذ پذیری خاک می شود. در حالی که آهک عمده تاً از طریق واکنش های شیمیایی تدریجی (پوزولانی) اثر می گذارد که به زمان و شرایط رطوبتی خاص نیاز دارد. پ) اثر بر ریز ساختار خاک: زانتان گام باعث پر شدن فضاهای خالی بین ذرات خاک و افزایش تراکم ساختاری می شود. این پدیده باعث کاهش تخلخل و افزایش مدول الاستیسیته خاک می گردد. در مقابل، افزودن بیش از حد آهک گاهی باعث تجمع ذرات و تخلخل ثانویه می شود.

## ۷. تأییدیه اخلاقی

علیرضا قاسمی نویسنده پایان نامه، سارا سرافراز

نگارنده مقاله و دکتر مریم مختاری مدیریت پروژه و هماهنگی، نظارت و راهنمای کلی پژوهش بوده اند.

نویسندگان تأیید میکنند که این مقاله حاصل پژوهش اصیل آنها بوده و قبلاً در هیچ مجله یا کنفرانس دیگری منتشر نشده و همچنین برای بررسی همزمان به مجله دیگری ارسال نشده است.

## ۱۰. تعارض منافع

نویسندگان تأیید میکنند که هیچ گونه تعارض منافع مرتبط با انتشار این مقاله ندارند.

## ۸. مشارکت‌های نویسندگان

## ۱۱. مراجع

- Abdolmaki, A., & Khajehfard, Z. (2020). "Laboratory evaluation and comparison of the effects of lime-microsilica and lime-nanosilica stabilizers on the strength of fine-grained clay soils in the Mehrshahr-Karaj region under CBR test". In Proceedings of the International Conference on Civil Engineering, Architecture, Development, and Urban Infrastructure Regeneration in Iran. [In Persian]
- Little, D. N., Thompson, R.L., Terrell, R.L., Epps, J.L., Borenberg, E.J., 1987 Soil Stabilization For Roadways and Air fields, AFESC Final Report, U.S.A
- Al-Amoudi, O. S. B., Khan, K., & Al-Kahtani, N. S. (2010). "Stabilization of a Saudi calcareous marl soil". Constr. Build. Mater., 24(10): 1848–1854. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.04.019>
- Aqel, R. A., Al-Majali, M. M., & Al-Tahat, M. D. (2024). "Piping stabilization of clay soil using lime". Geosci., 14(5): Article 122.
- ASTM International. (2001). "Standard guide for evaluating effectiveness of chemicals for soil stabilization (ASTM D4609-01)".
- ASTM International. (2004). "Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions (ASTM D3080-04)".
- ASTM International. (2012). "Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort (600 kN-m/m<sup>3</sup>) (ASTM D698-12e2)".
- ASTM International. ASTM International. (2016). "Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil (ASTM D2166/D2166M-16)".
- Ayeldeen, M., Negm, A., El-Sawwaf, M., & Kitazume, M. (2017). "Enhancing mechanical behaviors of collapsible soil using two biopolymers". J. Rock Mech. Geotech. Eng., 9(2): 329–339. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2016.11.007>
- Bağrıaçık, B., & Mahmutluoğlu, B. (2021). "Model experiments on coarse-grained soils treated with xanthan gum biopolymer". Arab. J. Geosci., 14(16): Article 1621. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-08134-8>
- Baldovino, J. A., Nogueira, J. C., & Consoli, N. C. (2025). "Sustainable stabilization of soil-RAP mixtures using xanthan gum". Sustain., 17(10): Article 4601.
- Ghaemi, M., Akbarnezhad, S., Mohandi Akbarnezhad, M., & Ahangari, K. (2016). Experimental investigation of the effect of xanthan gum biopolymer on sandy soil. First National Conference on Modern Topics in Civil Engineering [in Persian].
- Bergmann, D., Furth, G., & Mayer, C. (2008). "Binding of bivalent cations by xanthan in aqueous solution". Int. J. Biol. Macromol., 43(3): 245–251.
- Bowles, J. E. (1997). "Foundation analysis and design". 5th Edn., McGraw-Hill, New York.
- Chang, I., Im, J., Prasidhi, A. K., & Cho, G. C. (2015). "Effects of xanthan gum biopolymer on soil strengthening". Constr. Build. Mater., 74: 65–72.
- Diniz, D. S., Oliveira, L. S., & Ferreira, A. C. (2024). "Lime stabilization of tropical soil for resilient pavements". Build., 14(5): 873.
- Gao, Y., Chen, L., Zhang, X., & Wu, P. (2025). "Characterization of the mechanical behavior and stabilization mechanism of soft soil treated with xanthan gum biopolymer". Polym., 17(11): Article 1532.
- Grine, K., & Assia, I. (2011). "Stabilisation of weathered marls using lime or cement". In Proceedings of the 64th Canadian Geotechnical Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 5th Pan-American Conference on Teaching and Learning of Geotechnical Engineering.
- Katbi, H., & Kiomarsi, F. (2011). "Effect of organic materials on the compressive strength of lime-stabilized soils". In Proceedings of the 6th National Congress on Civil Engineering. [In Persian]
- Khosravi, M., & Tabarsa, A. (2019). "Investigation of the strength behavior of adding biopolymer to soil-

- cement mixture". In Proceedings of the 11th National Congress on Civil Engineering. [In Persian]
- Koslanant, S. (2006). "Influence of Storage Conditions on Geotechnical Properties of Ariake Clay and on Its Chemical Stabilization". *Dissertation for the Degree of Doctor of Philosophy in Geotechnical Engineering*, Saga University.
- Kullayappa, G., & Praveen Kumar, P. S. (2018). "Experimental study of soil mixed with guar gum as a bio-enzyme". [Journal title missing], 5(8): 160–164.
- Latifi, N., Horpibulsuk, S., Meehan, C. L., Majid, M. Z. A., & Rashid, A. S. A. (2016). "Xanthan gum biopolymer: An eco-friendly additive for stabilization of tropical organic peat". *Environ. Earth Sci.*, 75: 1–10.
- Nouri Labeh-A, Banaye Zirak-Kar S, Mohammad-Alizadeh Rafi B. 2007. Determination of the optimum lime percentage for the stabilization of Tabriz marl soil. 3rd National Congress on Civil Engineering [in Persian].
- Moradi, G., Alizadeh, M., & Pashayan, M. (2012). "Effect of microsilica on the strength and swelling potential of marl soil stabilized with lime". In Proceedings of the 9th International Congress on Civil Engineering. [In Persian]
- Ni, J., Hao, G. L., Chen, J. Q., Ma, L., & Geng, X. Y. (2021). "The optimisation analysis of sand-clay mixtures stabilised with xanthan gum biopolymers". *Sustain.*, 13(7): Article 3732. <https://doi.org/10.3390/su13073732>.
- Nolte, H., John, S., Smidsrød, O., & Stokke, B. T. (1992). "Gelation of xanthan with trivalent metal ions". *Carbohydrate Polym.*, 18(4): 243–251.
- Nunes, D. A. P. A. (2010). "Effects of lime treatment and curing time on the hydro-mechanical characteristics of compacted marls".
- Rosalam, S., & England, R. (2010). "Review of xanthan gum production from unmodified starches by *Xanthomonas campestris* sp". *Enzyme Microb. Technol.*, 39(2): 197–217.
- Rouhbakhshan, A., & Kalantari, B. (2016). "Stabilization of clay soil with lime and stone waste powder". *Amirkabir J. Civ. Eng.* 48(4): 429–438. <https://doi.org/10.22060/ceej.2016.679> [In Persian]
- Zineb, B., Sidi Mohamed, A. M., & Abdelmalek, B. (2012). "Stabilization of expansive soils with milk of lime: The case of clays of Tlemcen, Algeria".
- Feyouzi M., Vakili A., Panjestooni A. (2016). Investigation of the effect of lime stabilization on the shear strength parameters of marl soil. International Conference on Civil Engineering.