

## Laboratory Studies on the Effect of Microsilica and Heat on Strength and Durability Soil-Cement Mixtures In the construction of watershed dams

Aram Sametzadeh<sup>1\*</sup>, Alireza khaloo<sup>2</sup>, Hamzeh Saeediyan<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Soil Conservation and Watershed Management Research, Khuzestan Agricultural and Natural Resource Research Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Ahvaz, Iran.

<sup>2</sup> Department of Structural Engineering, faculty of Civil Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

### Article Info

### ABSTRACT

**Article type:** Research Article

### Article history:

Received: 16June2024

Revised: 12October2024

Accepted: 21October 2024

Published online: 29March2026

### Keywords:

Soil  
Cement  
Microsilica  
Compressive strength  
Wetting and drying

**Objective:** Developing construction projects and shortage of based materials have increased the necessity of using cheap and available materials. For this aims soil-cement has used for the last several decades, but there are limited studies on the effect of silica fume and curing temperature on the mixture.

**Material and Methods:** In this laboratory, study soil and water used were from upstream basin of Karkheh dam. Physical, mechanical and chemical tests for soil and water were performed according to the ASTM criteria. Different cylindrical samples of soil-cement-S.F mixtures at optimum moisture were made based on modified AASHTO method. Samples were cured at 27°C and 40°C in 7 and 14 days in humid room. Wetting and drying tests also compressive strength testes at 7, 14 and 28 days were performed.

**Results and Discussion:** Statistical analysis of results with SAS software showed that the increase of cement, S.F, and special curing temperature enhanced strength and durability of the mixtures. According to the USBR criteria, all samples can be used in construction projects.

**Conclusions:** Also, the research results showed that it is possible to construct watershed management dams using a mixture of soil-cement-microsilica at a cost of about 50% of stone, cement or concrete, which can be a dramatic development for the construction of watershed management dams in the future, and also the use of this mixture reduces environmental degradation and the use of soil at the dam construction site and also increases the speed of watershed management operations.

\*Corresponding author, Email: [aram\\_sametzadeh@yahoo.com](mailto:aram_sametzadeh@yahoo.com)

Cite this article: Sametzadeh, A., khaloo, A., & Saeediyan, H. (2025). Laboratory Studies on the Effect of Microsilica and Heat on Strength and Durability Soil-Cement Mixtures. *Journal of New Approaches in Water Engineering and Environment*.



© The Author(s).

DOI: 10.22034/nawee.2024.463241.1088

Publisher: Gonbad Kavous University.



## بررسی آزمایشگاهی تاثیر میکروسیلیس و حرارت در افزایش مقاومت و دوام مخلوط‌های

### خاک - سیمان در احداث سدهای آبخیزداری

آرام صامت زاده<sup>۱</sup>، علیرضا خالو<sup>۲</sup>، حمزه سعیدیان<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup> بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات، آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اهواز، ایران.

<sup>۲</sup> گروه سازه، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران.

اطلاعات مقاله	چکیده
<p><b>نوع مقاله:</b> مقاله پژوهشی</p> <p><b>تاریخ دریافت:</b> ۱۴۰۳/۰۳/۲۷</p> <p><b>تاریخ بازنگری:</b> ۱۴۰۳/۰۷/۲۱</p> <p><b>تاریخ پذیرش:</b> ۱۴۰۳/۰۷/۳۰</p> <p><b>تاریخ انتشار:</b> ۱۴۰۵/۰۱/۰۹</p>	<p><b>هدف:</b> با توسعه پروژه‌های آبخیزداری و کمبود مصالح، نیاز به استفاده از مصالح مناسب، در دسترس و ارزان بیشتر می‌شود. خاک-سیمان یکی از مصالحی است که به این منظور چندین دهه استفاده شده لیکن تاثیر میکروسیلیس و حرارت محیط بر پارامترهای مقاومت و پایداری این مخلوط کمتر مورد مطالعه قرار گرفته است.</p> <p><b>مواد و روش‌ها:</b> در این پژوهش خاک و آب مورد استفاده از حوضه بالادست سد کرخه تهیه شد. آزمایش‌های مشخصات فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی خاک و آب طبق استاندارد های ASTM انجام شد. مخلوط‌های استوانه‌ای مختلف خاک-سیمان- میکروسیلیس تحت رطوبت بهینه مخلوط به روش آشتو اصلاحی ساخته شد. آزمایش‌های تر و خشک شدن و مقاومت فشاری نمونه‌های ۱۴، ۷ و ۲۸ روزه در دمای ۲۷°C و ۴۰°C و شرایط رطوبتی ۷ و ۱۴ روزه طبق استانداردهای ASTM انجام شد.</p> <p><b>یافته‌ها:</b> تحلیل نتایج با نرم افزار آماری SAS نشان داد سیمان، میکروسیلیس و بخصوص حرارت تاثیر بسزایی در افزایش مقاومت و دوام مخلوط دارند و طبق ضوابط USBR از کلیه مخلوط‌های مورد بررسی در احداث پروژه‌های آبخیزداری می‌توان استفاده کرد.</p> <p><b>نتیجه گیری:</b> نتایج تحقیق نشان داد که امکان احداث سدهای آبخیزداری با استفاده از مخلوط خاک - سیمان - میکروسیلیس با هزینه حدود ۵۰ درصد سنگ و سیمان و یا بتن وجود دارد که می‌تواند تحولی شگرف برای احداث سدهای آبخیزداری در آینده باشد و همچنین استفاده از این مخلوط باعث کاهش تخریب های زیست محیطی و استفاده از خاک موجود در محل احداث سدها و همچنین باعث افزایش سرعت در اجرای عملیات آبخیزداری می‌شود.</p>
<p><b>کلیدواژه‌ها:</b> خاک، سیمان، میکروسیلیس، مقاومت فشاری، تر و خشک شدن</p>	

\*نویسنده مسئول، Email: [aram\\_sametzadeh@yahoo.com](mailto:aram_sametzadeh@yahoo.com)

استناد: صامت زاده، آرام، خالو، علیرضا و سعیدیان، حمزه (۱۴۰۵). بررسی آزمایشگاهی تاثیر میکروسیلیس و حرارت در افزایش مقاومت و دوام مخلوط‌های خاک - سیمان در احداث سدهای آبخیزداری. *رویکردهای نوین در مهندسی آب و محیط زیست*.

<http://doi.org/10.22034/nawee.2024.463241.1088>



## مقدمه

با گسترش جمعیت نیاز به احداث جاده‌ها، ساختمان‌سازی، سازه‌های آبی و دیگر پروژه‌های آبخیزداری روز به روز بیشتر می‌شود. مصالح مرغوب مانند سنگ، شن و ماسه که عمده مصالح ساخت و ساز را تشکیل می‌دهند دارای منابع محدود و در بسیاری مناطق نایاب و حمل و نقل آن‌ها نیز پرهزینه است و بهره‌برداری بیش از حد از آن‌ها موجب تخریب عرصه‌های منابع طبیعی و زیست محیطی شده است. این مسئله موجب کندی توسعه پروژه‌های آبخیزداری در مناطق محروم و افزایش شدید هزینه‌های اجرایی شده است. کاربرد خاک و سیمان برای اولین بار (Hansen, 1986)، (USBR, 1990) در سال ۱۹۱۷ میلادی توسط T.H. Amies با نام خاک‌آمیز (Soilamies)، به عنوان یک اختراع در فیلادلفیا آمریکا به ثبت رسید. در سال ۱۹۲۲ اداره بزرگراه‌های ایالت‌های داکوتای جنوبی، آیووا و کارولینای جنوبی، این مخلوط را جهت تثبیت بستر جاده‌ها و احداث بزرگراه‌ها به‌کاربردند که نتایج بدست آمده رضایت بخش بود (رحیمی و عباسی، ۱۳۷۴). پس از آن انجمن سیمان پرتلند (PCA)<sup>۱</sup> و اداره راه ایالات متحده تحقیقات گسترده‌ای را در این زمینه آغاز کردند و متعاقب آن استفاده از این مخلوط در پروژه‌های زیادی خصوصاً طرح‌های راهسازی و همچنین پوشش بدنه و کف کانال‌های آبیاری در سایر مناطق و ایالت‌های آمریکا به سرعت توسعه یافت (صامت زاده و همکاران، ۱۳۹۱).

Starry و Kowalski (۲۰۰۷) بر روی تکنیک‌های جدید تثبیت خاک تحقیق کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که استفاده از مصالح اساس تثبیت شده با سیمان علاوه بر اقتصادی بودن موجب افزایش دوام، مقاومت، کاهش تمرکز تنش و ترک‌های ناشی از خستگی و تغییر شکل‌های ناشی از بارهای ترافیکی می‌شود. بنابراین گسیختگی لایه زیر اساس، گودی و ناهمواری سطح جاده کاهش می‌یابد. Zarijawi (۲۰۰۹) در تحقیق خود با عنوان تاثیر افزودن سیمان و میکروسیلیس بر روی مقاومت برشی و خصوصیات تراکمی خاک‌های رسی نتیجه گرفت که اضافه کردن میکروسیلیس به همراه سیمان به خاک رسی موجب کاهش حداکثر چگالی خشک خاک، افزایش رطوبت بهینه و مقاومت فشاری مخلوط حاصل شده است. Ajorloo (۲۰۱۰) بر روی بهبود رفتار و خصوصیات مکانیکی ماسه‌های سست در ترکیب با سیمان به روش اختلاط عمیق تحقیق کرد. او نتیجه گرفت که ترکیب ماسه‌های سیلیسی با مقدار کمی سیمان، آهک و میکروسیلیس موجب افزایش سریع مقاومت برشی مخلوط می‌شود. Fakour و Rahimi (۱۹۹۴) برای نخستین بار استفاده از سیمان پرتلند را در تثبیت خاک‌های واگرا مورد مطالعه قرار دادند و نتایج آن‌را با کاربرد امولسیون قیر و سیمان مقایسه کردند و تثبیت خاک‌های واگرا را با ۵٪ تا ۱۰٪ سیمان توصیه نمودند. Rahimi و همکاران (۲۰۰۶) کاربرد ترکیب‌های مختلف مخلوط خاک مارن سازند آغاچاری و سیمان را در احداث سازه‌های آبی مورد ارزیابی و تحقیق قرار دادند و نتیجه گرفتند که افزایش درصد سیمان و افزایش مدت زمان عمل‌آوری نمونه‌ها موجب افزایش پارامترهای مقاومت و پایداری مخلوط می‌شود و امکان کاربرد برخی از ترکیب‌های خاک و سیمان در طراحی و ساخت سازه‌های آبخیزداری وجود دارد. Beitollahpour Chaharmahali و Raeisi Estabragh (۲۰۱۰) بر روی تعیین درصد بهینه سیمان در ملات خاک - سیمان برای تثبیت کانال‌های آبیاری تحقیق کردند. آن‌ها گزارش کردند که با توجه به معیارهای مقاومت فشاری و تر و خشک شدن استفاده از مخلوط خاک با ۱۲٪ سیمان برای خاک‌های رسی با پلاستیسیته پایین جهت کاربرد در ساخت کانال‌های آبیاری مناسب است. Bagherpour و Janalizadeh (۲۰۰۳) بر روی تثبیت خاک‌های ریزدانه بوسیله افزودن میکروسیلیس به همراه آهک یا سیمان تحقیق کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که با اضافه شدن مقدار میکروسیلیس در مخلوط خاک-سیمان، نشانه خمیری به صورت صعودی افزایش می‌یابد همچنین مقاومت فشاری محدود نشده مخلوط‌های آهکی و سیمانی با افزودن میکروسیلیس بالا می‌رود. Olapour و Osareh Mostaghim (۲۰۱۲) در تحقیق خود با عنوان ارزیابی مقاومت خاک‌های غیرچسبنده (دشت حمیدیه)، تثبیت شده با سیمان و میکروسیلیس و مقایسه آن با افزودن خاک

رس در تراکم‌های مختلف نتیجه گرفتند که افزودن سیمان و میکروسیلیس نسبت به افزودن خاک رس به خاک و همچنین افزایش تراکم مخلوط، مقاومت فشاری را به مراتب بیشتر می‌کند. در این پژوهش مقاومت فشاری تک محوری مخلوط خاک با ۳٪ سیمان و ۱٪ میکروسیلیس (هر دو نسبت به وزن خشک خاک) در تراکم ۹۰٪ حدود (Mpa) ۰/۵ بدست آمده است. Olapour و همکاران (۲۰۱۳) بر روی تاثیر سیکل‌های یخ زدگی بر روی خاک رس تثبیت شده با سیمان و میکروسیلیس تحقیق کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که اضافه کردن میکروسیلیس به خاک تثبیت شده با سیمان تاثیر بسیار خوبی بر روی خصوصیات ژئوتکنیکی آن می‌گذارد و مقاومت این نوع مخلوط‌ها را در برابر یخ زدن و ذوب شدن متوالی افزایش می‌دهد. در این پژوهش بیشترین مقاومت فشاری مخلوط رس با ۷٪ سیمان و ۵٪ میکروسیلیس (هر دو نسبت به وزن خشک خاک) برابر با (Mpa) ۲/۵ بدست آمده است. در خصوص پیشینه تحقیق خاک-سیمان و کاربردهای آن موارد زیادی در مرجع (Sametzadeh, 2011) آمده است که می‌توان به آن مراجعه نمود. با توجه به استفاده روز افزون از این مخلوط در پروژه‌های بزرگ آبخیزداری به عنوان مصالح مناسب، در دسترس و ارزان و وجود مطالعات اندک و محدود در زمینه تاثیر میکروسیلیس بر روی خصوصیات فیزیکی و مکانیکی مخلوط‌های خاک-سیمان نسبت به تغییر دمای محیط اجرا، ضرورت طراحی بهینه این مخلوط در فصول گرم و سرد سال بیشتر احساس می‌شود. افزودن نانو سیلیس و میکروسیلیس به مخلوط خاک و سیمان موجب افزایش مقاومت فشاری، تراکم، کاهش نفوذپذیری و خلل و فرج مخلوط می‌شود (Zerahtanlahoni and Tajdini, 2022). Mostaar و همکاران (۲۰۲۱) بر روی تاثیر افزودن میکروسیلیس بر روی خاک رس تثبیت شده با سیمان تحقیق کردند. آنها در ۴ سطح میکروسیلیس (۰٪، ۱٪، ۳٪ و ۵٪) را به خاک رس تثبیت شده با ۷٪ سیمان اضافه کردند. نتایج نشان داد که افزودن میکروسیلیس به مخلوط خاک و سیمان موجب افزایش مقاومت فشاری (تا حداکثر ۲۵ kg/cm<sup>2</sup>)، کاهش پارامترهای ژئوتکنیکی نظیر نشست، نسبت تخلخل، نشانه تورم و نشانه فشردگی خاک می‌شود. آنچه که در این پژوهش به عنوان نوآوری انجام شده، اثر فردی و متقابل افزودن پودر میکروسیلیس به صورت درصدی از وزن سیمان مصرفی و تغییر دمای عمل‌آوری بر روی پارامترهای مقاومت و دوام مخلوط‌های مختلف خاک-سیمان ساخته شده به روش آشتو اصلاحی بوده است که تا کنون کمتر مورد مطالعه قرار گرفته. توضیح اینکه در بیشتر تحقیقات انجام شده مقدار میکروسیلیس بر اساس درصدی از وزن خشک خاک اضافه شده است و روش تراکم مخلوط نیز به روش پراکتور بوده که این موضوع علاوه بر اینکه هزینه تهیه مخلوط حاصل را افزایش می‌دهد از مقاومت فشاری کمتری نیز برخوردار می‌باشد. از نتایج مهم این پژوهش می‌توان به امکان طراحی بهینه این مخلوط در پروژه‌های بزرگ آبخیزداری و کاهش قابل توجه هزینه‌های اجرایی اشاره نمود. مسلماً دست یابی به این موضوع از نظر علمی، فنی و اقتصادی در سطح کشور و جهان بسیار پر اهمیت می‌باشد.

## مواد و روش‌ها

### نحوه نمونه‌برداری و آزمایش‌های مقدماتی

پس از تعیین محل قرصه مناسب از مجاورت سازه‌های کنترل فرسایش و رسوب در حوضه آبخیز دختر برجی اندیمشک (بالادست سد کرخه)، ابتدا خاک رویه و هوازده کنار زده شد و سپس از عمق (mm) ۱۵۰ تا (mm) ۵۰۰ خاک، نمونه برداری انجام شد. کلوخه‌های خاک ابتدا با بکوب دستی خرد شد و از الک شماره ۴ عبور داده شد و سپس جهت خشک شدن در دستگاه آون و در دمای °C ۹۰ به مدت ۲۴ ساعت نگهداری شد تا پس از سرد شدن تا دمای محیط برای انجام آزمایش‌های مختلف مورد استفاده قرار گیرد. جهت شناسایی مشخصات خاک آزمایش دانه‌بندی هیدرومتری (ASTM D422) و حدود آتربرگ خاک (ASTM D423,424,427) انجام شد و خاک مورد آزمایش طبق استانداردهای یونیفاید<sup>۲</sup> و آشتو<sup>۳</sup> طبقه‌بندی شد. آزمایش‌های مشخصات شیمیایی خاک و آب (طبق استانداردهای مختلف ASTM) و تراکم مخلوط‌های مختلف خاک-

سیمان-میکروسیلیس به روش آشتو اصلاحی (AASHTO T180-70, ASTM D1557-70) در ۴ سطح سیمان شامل ۰٪، ۸٪، ۱۰٪ و ۱۲٪ سیمان نسبت به وزن خشک خاک و ۳ سطح میکروسیلیس شامل ۰٪، ۵٪ و ۱۰٪ میکروسیلیس نسبت به وزن سیمان مصرفی انجام شد. آب و سیمان مورد استفاده به ترتیب آب قابل شرب از منابع آبی موجود در منطقه اجرای طرح و سیمان تپ ۲ خوزستان بود.

### روش اختلاط مخلوط‌های خاک-سیمان-میکروسیلیس

یکی از مهمترین نکات در استفاده از مخلوط‌های خاک-سیمان-میکروسیلیس اختلاط مصالح به صورت همگن با یکدیگر است. در این تحقیق ابتدا سیمان و میکروسیلیس مطابق با نسبت‌های طرح اختلاط با یکدیگر مخلوط گردید. خاک لازم جهت ساخت نمونه‌ها با سیمان و میکروسیلیس مخلوط شده به خوبی مخلوط شد و سپس حدود ۸۰٪ مقدار آب لازم طبق رطوبت بهینه مخلوط بر روی خاک و سیمان پخش شد و پس از ورز دادن با دست مجدداً ۲۰٪ آب باقی‌مانده بر روی مخلوط پخش شده و همان عملیات تکرار شد. برای جلوگیری از پدیده تبخیر، مخلوط حاصل بلافاصله در کیسه پلاستیکی محبوس شد و پس از ۱۵ تا ۲۰ دقیقه نگهداری، برای ساخت نمونه‌ها مورد استفاده قرار گرفت.

### آزمایش مقاومت فشاری تک محوری

این آزمایش به منظور ارزیابی مقاومت فشاری مخلوط‌های خاک-سیمان و خاک-سیمان-میکروسیلیس به عنوان مهمترین پارامتر مقاومتی انجام شده است. در این آزمایش نمونه‌های ساخته شده در ابعاد استوانه‌ای به قطر (mm) ۱۰۰ و ارتفاع (mm) ۱۱۶/۴ طبق استاندارد ASTM D1633-A در ۳ سطح مختلف ۸٪، ۱۰٪ و ۱۲٪ سیمان نسبت به وزن خشک خاک و ۳ سطح مختلف ۰٪، ۵٪ و ۱۰٪ میکروسیلیس نسبت به وزن سیمان مصرفی و مطابق با رطوبت بهینه مخلوط در ۹ طرح اختلاط طبق روش آشتو اصلاحی در قالب مولد فلزی متراکم شد. به منظور ارزیابی تاثیر دمای محیط عمل‌آوری در فصول معتدل و گرم سال بر روی تغییرات مقاومت فشاری مخلوط‌های خاک-سیمان و خاک-سیمان-میکروسیلیس، نمونه‌ها دو ساعت پس از ساخته شدن (پس از گیرش اولیه) در دو شرایط دمایی °C ۲۷ و °C ۴۰ درجه سانتیگراد نگهداری شدند تا در سن ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه تحت آزمایش مقاومت فشاری تک محوری قرار گیرند. به منظور ایجاد شرایط مناسب جهت انجام فرایند هیدراتاسیون و افزایش مقاومت فشاری، نمونه‌های ۷ روزه به مدت ۷ روز و نمونه‌های ۱۴ و ۲۸ روزه به مدت ۱۴ روز در شرایط محیطی اشباع از رطوبت نگهداری شدند. جهت تامین این شرایط نمونه‌ها دو ساعت پس از ساخته شدن در پارچه کفنی مرطوب و کیسه پلاستیکی در بسته قرار داده شدند. نگهداری نمونه‌ها در دمای °C ۲۷ و °C ۴۰ به ترتیب در محیط آزمایشگاهی و دستگاه گرم خانه (آون) انجام شد. علت ۲ نوع شرایط رطوبتی و دمایی در نظر گرفته شده به ترتیب مطابق با امکانات اجرایی در پروژه‌های آبخیزداری و دمای محیط در فصول مختلف سال در استان خوزستان بوده است. در مجموع برای ۳ سطح سیمان، ۳ سطح میکروسیلیس، ۳ مدت زمان عمل‌آوری و ۲ شرایط دمایی تعداد ۵۴ آزمایش مقاومت فشاری با ۳ تکرار انجام شد.

### آزمایش تر و خشک شدن

این آزمایش مطابق با استاندارد ASTM D559-57 بر روی نمونه‌های ۷ روزه که در شرایط اشباع از رطوبت و دمای محیط آزمایشگاهی عمل‌آوری شده‌اند انجام می‌شود. مطابق با ضوابط USBR حداکثر افت وزنی میانگین ۳ نمونه نباید از ۶٪ تجاوز کند. مجموعاً ۹ آزمایش برای ۹ طرح اختلاط در ۳ تکرار انجام شد. در این پژوهش ضوابط USBR نیز به عنوان معیار در نظر گرفته شده است. برای سادگی نامگذاری طرح اختلاط‌های مختلف از کدهای جدول (۱) استفاده شده است. در نمودارهایی که کد طرح اختلاط شامل دو متغیر است، متغیر سوم به عنوان پارامتر اصلی در محور افقی نمودار نمایش داده شده است.

جدول ۱- نام گذاری طرح اختلاط‌های مختلف خاک-سیمان-میکروسیلیس

کد طرح اختلاط	دمای عمل آوری (°C)	میکروسیلیس (%)	سیمان (%)
C <sub>8</sub> M <sub>0</sub> T <sub>27</sub>	۲۷	۰	۸
C <sub>8</sub> M <sub>0</sub> T <sub>40</sub>	۴۰	۰	۸
C <sub>10</sub> M <sub>0</sub> T <sub>27</sub>	۲۷	۰	۱۰
C <sub>10</sub> M <sub>0</sub> T <sub>40</sub>	۴۰	۰	۱۰
C <sub>12</sub> M <sub>0</sub> T <sub>27</sub>	۲۷	۰	۱۲
C <sub>12</sub> M <sub>0</sub> T <sub>40</sub>	۴۰	۰	۱۲
C <sub>8</sub> M <sub>5</sub> T <sub>27</sub>	۲۷	۵	۸
C <sub>8</sub> M <sub>5</sub> T <sub>40</sub>	۴۰	۵	۸
C <sub>10</sub> M <sub>5</sub> T <sub>27</sub>	۲۷	۵	۱۰
C <sub>10</sub> M <sub>5</sub> T <sub>40</sub>	۴۰	۵	۱۰
C <sub>12</sub> M <sub>5</sub> T <sub>27</sub>	۲۷	۵	۱۲
C <sub>12</sub> M <sub>5</sub> T <sub>40</sub>	۴۰	۵	۱۲
C <sub>8</sub> M <sub>10</sub> T <sub>27</sub>	۲۷	۱۰	۸
C <sub>8</sub> M <sub>10</sub> T <sub>40</sub>	۴۰	۱۰	۸
C <sub>10</sub> M <sub>10</sub> T <sub>27</sub>	۲۷	۱۰	۱۰
C <sub>10</sub> M <sub>10</sub> T <sub>40</sub>	۴۰	۱۰	۱۰
C <sub>10</sub> M <sub>10</sub> T <sub>27</sub>	۲۷	۱۰	۱۲
C <sub>12</sub> M <sub>10</sub> T <sub>40</sub>	۴۰	۱۰	۱۲

## نتایج و بحث

نتایج مشخصات فیزیکی و مکانیکی خاک در جدول (۲) و مشخصات شیمیایی خاک و آب مصرفی در جدول (۳) ارائه شده است. در جدول (۴) نیز نتایج آزمایش تراکم برای مخلوط‌های مختلف خاک-سیمان-میکروسیلیس ذکر شده است. این جدول نشان می‌دهد که با افزایش مقدار سیمان و میکروسیلیس در مخلوط، مقدار رطوبت بهینه و حداکثر چگالی خشک خاک تغییر چندانی نداشته است. به نظر می‌رسد ممکن است علت آن مربوط به انجام تراکم مخلوط به روش آشتو اصلاحی باشد. با توجه به آزمایش دانه بندی و حدود آتبرگ، خاک مورد آزمایش طبق روش‌های متحد و آشتو رده بندی شد که به ترتیب در رده‌های SM و A-4 قرار گرفت. نتایج آزمایش تر و خشک شدن در جدول (۵) ارائه شده است همچنین نمودارهای مقاومت فشاری مخلوط‌های مختلف خاک-سیمان-میکروسیلیس و همچنین تاثیر افزایش سیمان، میکروسیلیس و دمای عمل آوری بر مقاومت فشاری مخلوط در شکل‌های (۱) تا (۱۵) ارائه شده است.

جدول ۲- مشخصات فیزیکی و مکانیکی نمونه خاک مورد آزمایش

Clay (%)	Silt (%)	Sand (%)	Grave (%)	C <sub>c</sub>	C <sub>u</sub>	D <sub>50</sub> (mm)	D <sub>60</sub> (mm)	D <sub>30</sub> (mm)	D <sub>10</sub> (mm)	PL (%)	LL (%)	PI (%)
۱۷/۴۷	۲۵/۴۲	۵۷/۱۱	---	۷/۹۷	۵۷/۷	۰/۰۷۹۹	۰/۱۰۳۹	۰/۰۳۸۶	۰/۰۰۱۸	۱۷	۲۱/۲	۴/۲

جدول ۳- نتایج آزمایش مشخصات شیمیایی نمونه خاک مورد آزمایش

PH	EC×103 (mmhos/cm)	Soluble Anion (meq/l)					Soluble Cations ( meq/l)				نمونه
		Sum	SO <sub>4</sub> --	CL-	HCO <sub>3</sub> -	CO <sub>3</sub> -	Sum	K+	Na+	Ca++& Mg++	
۷/۵۸	۱/۱۰۴	۱۶/۶۹	۱/۹۸	۳/۷۱	۱۱/۰	-	۱۱۱/۰۶	۰/۷۲	۱/۷۵	۸/۶	خاک
۸/۰۰	۰/۴۷	۵/۳۷	۲/۳۷	۱/۲	۱/۸	---	۵/۳۷-	---	۱/۵۷	۳/۸	آب

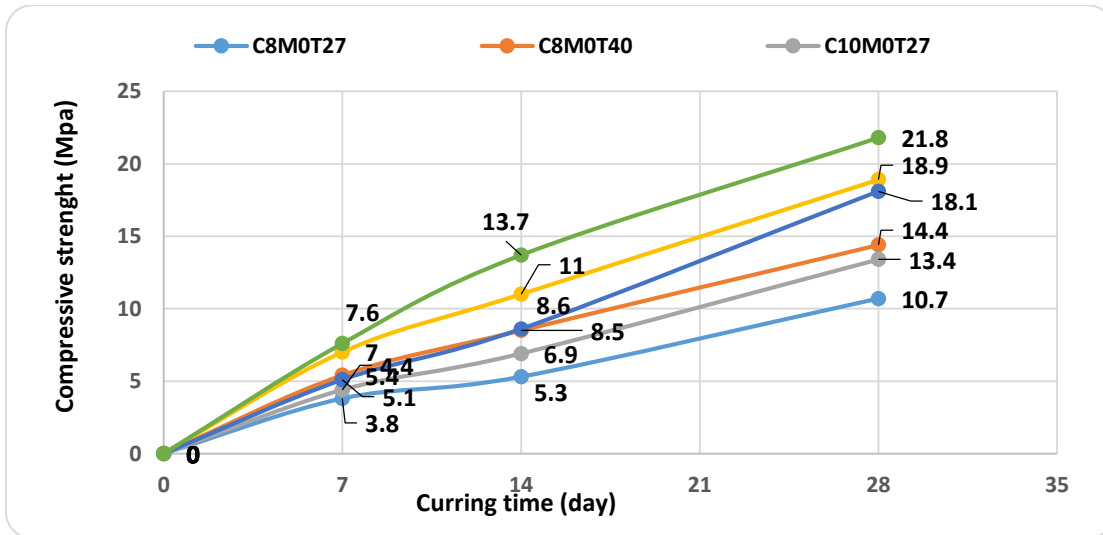
جدول ۴- نتایج آزمایش تراکم برای مخلوطهای مختلف خاک- سیمان- میکروسیلیس

سیمان (%)	میکروسیلیس (%)	رطوبت بهینه (%)	ماکزیمم دانسیته خشک (g/cm <sup>3</sup> )
۰	۰	۹/۵	۲/۰۱
۸	۰	۱۱/۰	۱/۹۸
۱۰	۰	۹/۵	۲/۰۰
۱۲	۰	۱۱/۱	۱/۹۹
۸	۵	۱۱/۵	۱/۹۷
۱۰	۵	۱۱/۰	۱/۹۵
۱۲	۵	۱۱/۰	۱/۹۸
۸	۱۰	۱۱/۵	۱/۹۸
۱۰	۱۰	۱۱/۰	۱/۹۸
۱۲	۱۰	۱۲/۰	۱/۹۸

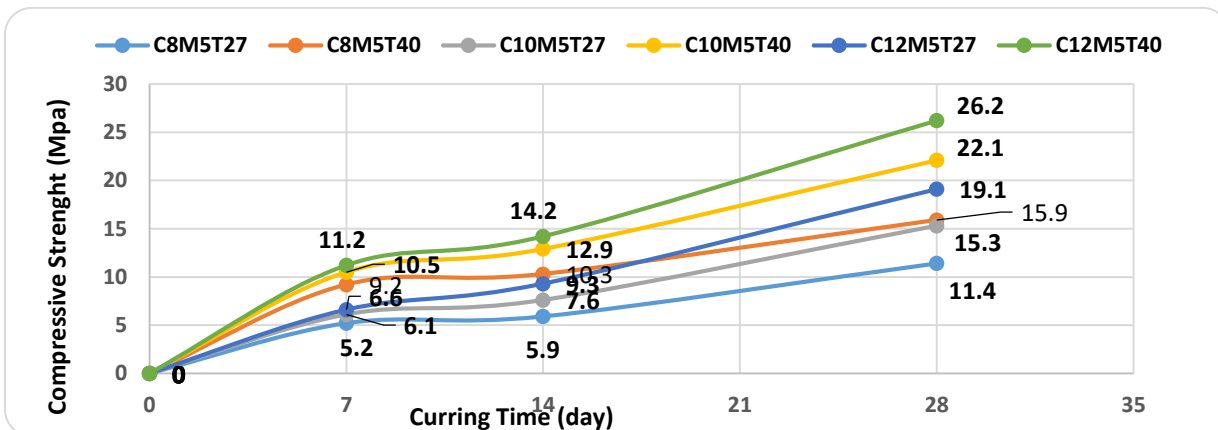
جدول ۵- نتایج آزمایش تر و خشک شدن مخلوطهای مختلف خاک- سیمان- میکروسیلیس

میانگین درصد افت وزن	درصد افت	مجموع افت وزن (گرم)	وزن خشک نمونه قبل از آزمایش (گرم)	طرح اختلاط درصد میکروسیلیس	درصد سیمان
	۱/۴۷	۲۹/۵	۲۰۰۱		
۱/۴۷	۱/۶۶	۳۳/۵	۲۰۲۳	۰	۸
	۱/۲۸	۲۶/۰	۲۰۲۵		
	۱/۳۵	۲۷/۵	۲۰۳۷		
۱/۵۱	۱/۴۱	۲۹/۰	۲۰۵۰	۰	۱۰
	۱/۷۶	۳۶/۰	۲۰۴۰		
	۱/۵۱	۳۱/۰	۲۰۴۷		
۱/۶۶	۱/۷۵	۳۶/۰	۲۰۵۴	۰	۱۲
	۱/۷۲	۳۵/۵	۲۰۶۰		
	۰/۷۲	۱۴/۵	۲۰۰۱/۵		
۰/۸۳	۰/۹۶	۱۹/۰	۱۹۸۳	۵	۸
	۰/۸۰	۱۶/۰	۱۹۷۵		
	۰/۷۰	۱۴/۰	۲۰۰۲		
۰/۷۱	۰/۷۵	۱۵/۰	۱۹۸۸	۵	۱۰
	۰/۶۷	۱۳/۵	۲۰۰۱		
	۰/۶۲	۱۲/۵	۲۰۱۲		
۰/۷۴	۰/۸۶	۱۷/۰	۱۹۸۲	۵	۱۲
	۰/۷۴	۱۵/۰	۲۰۱۵		
	۰/۹۸	۱۹/۵	۱۹۹۵		
۱/۱۲	۱/۲۵	۲۴/۵	۱۹۵۵	۱۰	۸
	۱/۱۲	۲۲/۰	۱۹۶۹		
۰/۷۷	۰/۷۳	۱۴/۵	۱۹۸۰	۱۰	۱۰

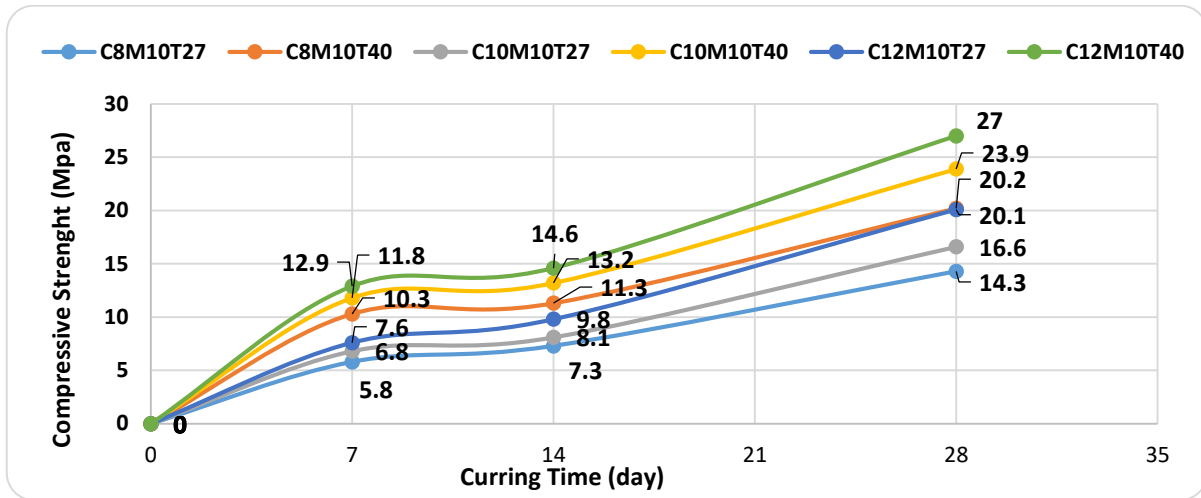
	۰/۸۰	۱۶/۰	۱۹۹۲		
	۰/۷۹	۱۵/۵	۱۹۶۲		
	۰/۷۸	۱۵/۵	۱۹۸۸		
۰/۷۱	۰/۶۳	۱۲/۵	۱۹۷۵	۱۰	۱۲
	۰/۷۱	۱۴/۰	۱۹۷۳		



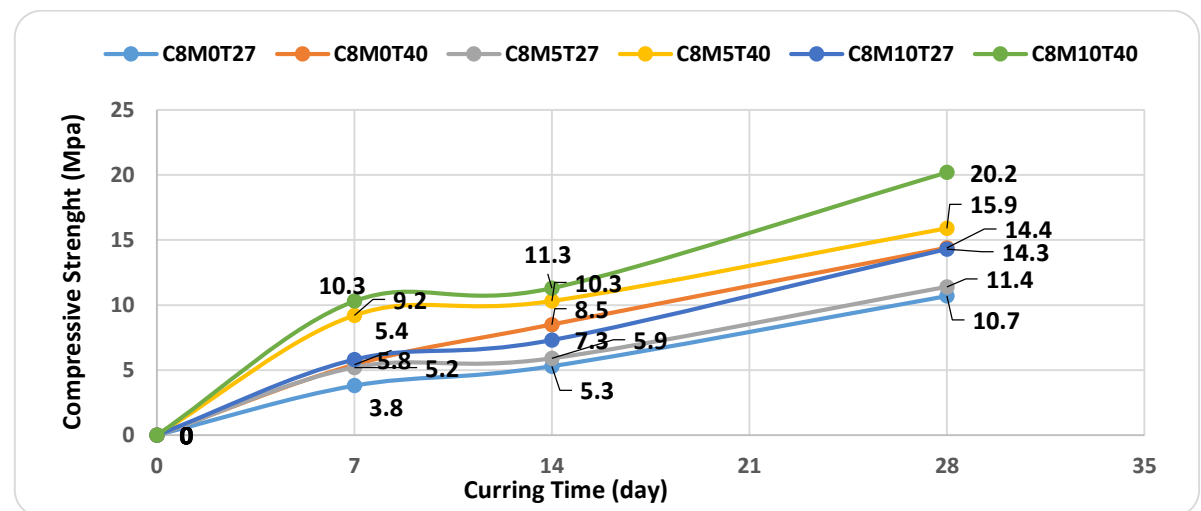
شکل ۱- نمودار مقاومت فشاری مخلوط‌های مختلف خاک-سیمان



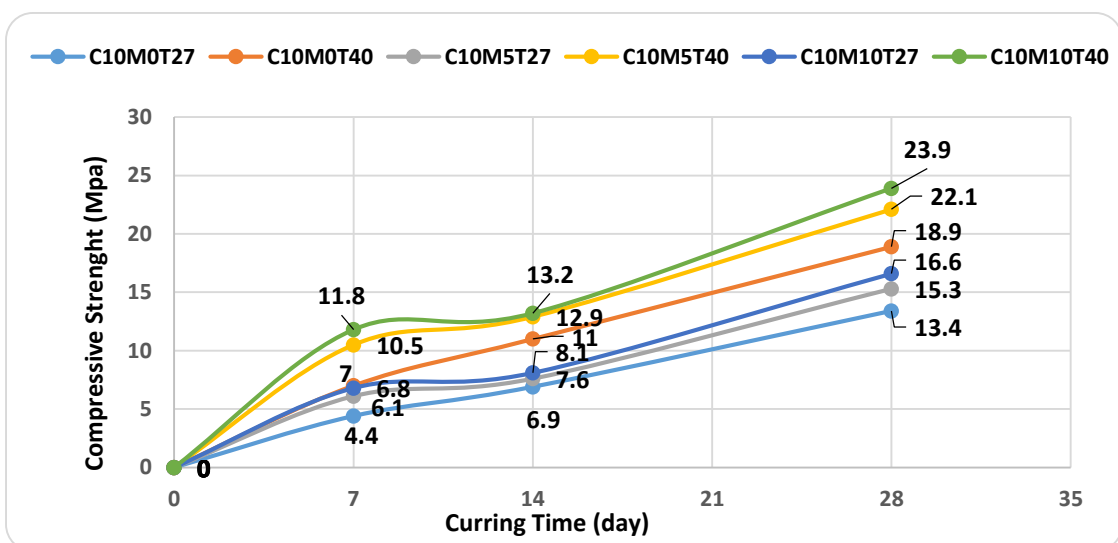
شکل ۲- نمودار مقاومت فشاری مخلوط‌های مختلف خاک-سیمان با ۰.۵٪ میکروسیلیس



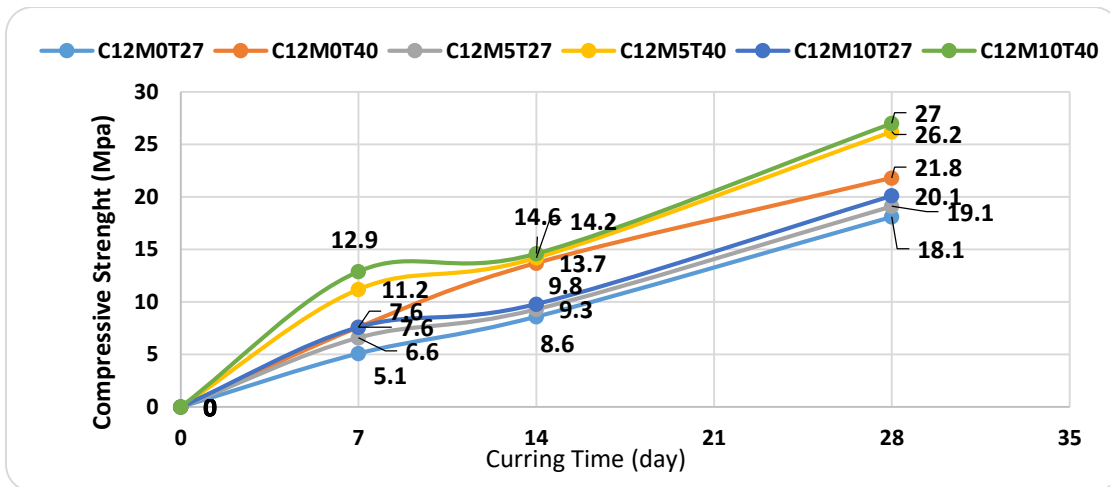
شکل ۳- نمودار مقاومت فشاری مخلوط‌های مختلف خاک-سیمان با ۱۰٪ میکروسیلیس



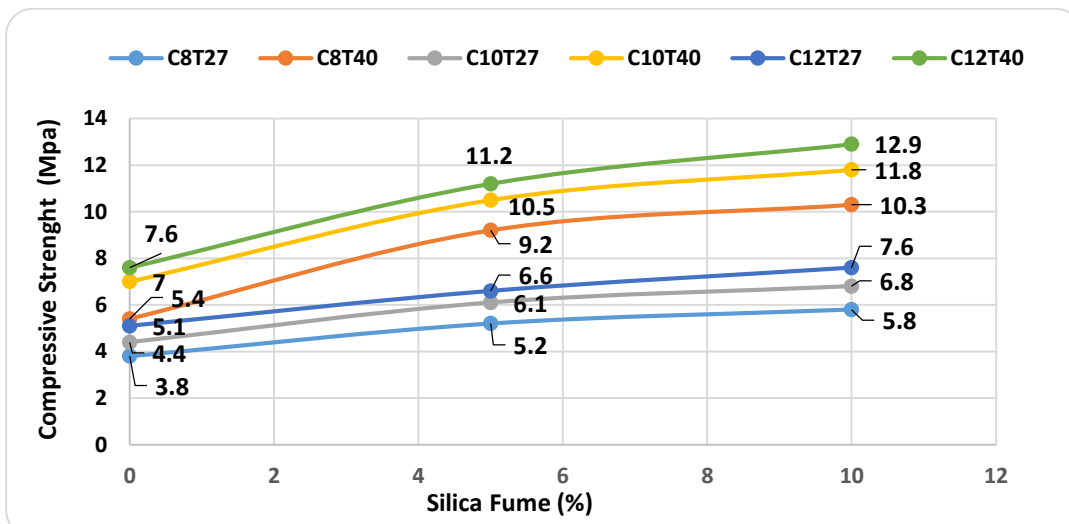
شکل ۴- نمودار مقاومت فشاری مخلوط‌های مختلف خاک-سیمان-میکروسیلیس با ۸٪ سیمان



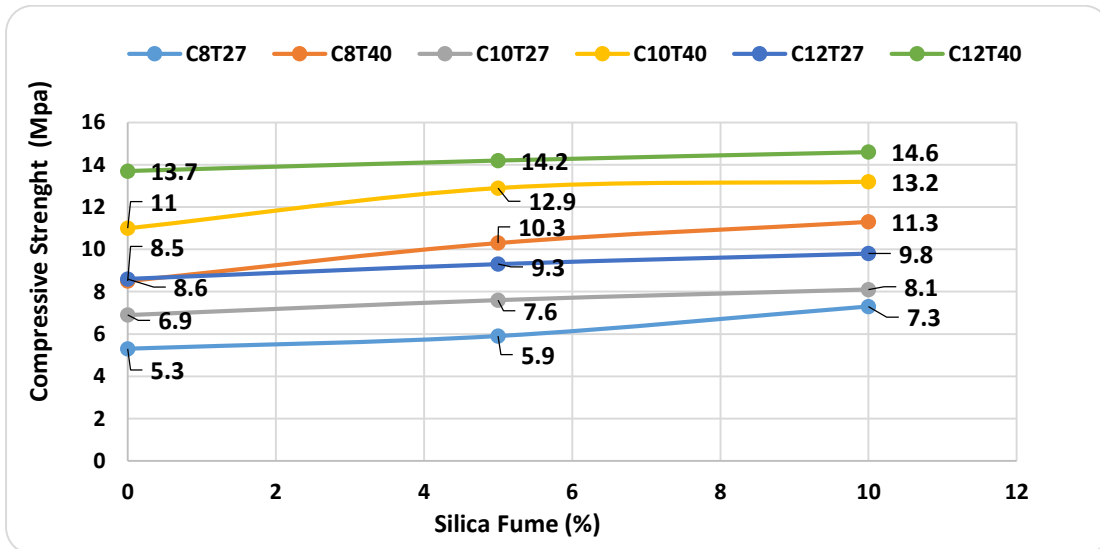
شکل ۵- نمودار مقاومت فشاری مخلوط‌های مختلف خاک-سیمان-میکروسیلیس با ۱۰٪ سیمان



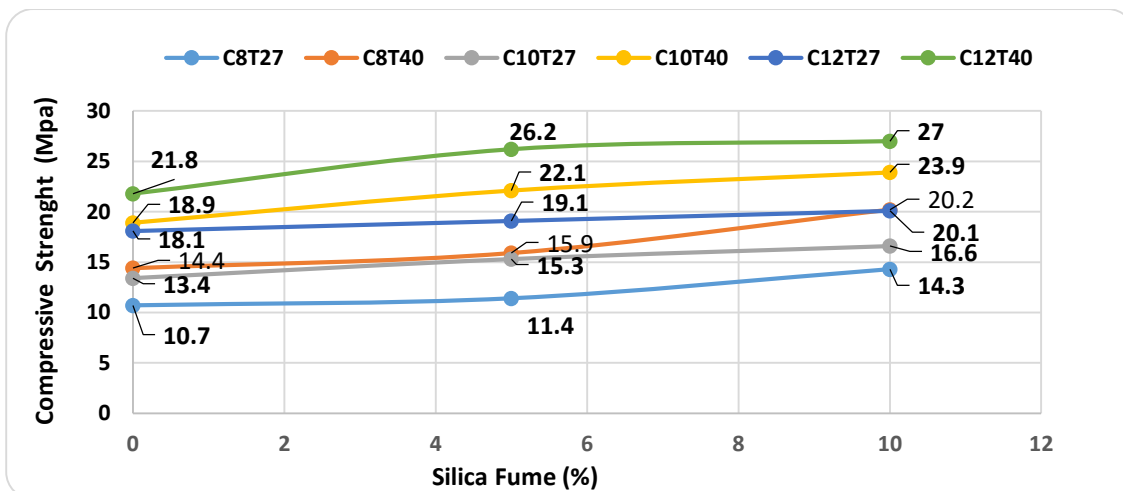
شکل ۶- نمودار مقاومت فشاری مخلوط‌های مختلف خاک-سیمان-میکروسیلیس با ۱۲٪ سیمان



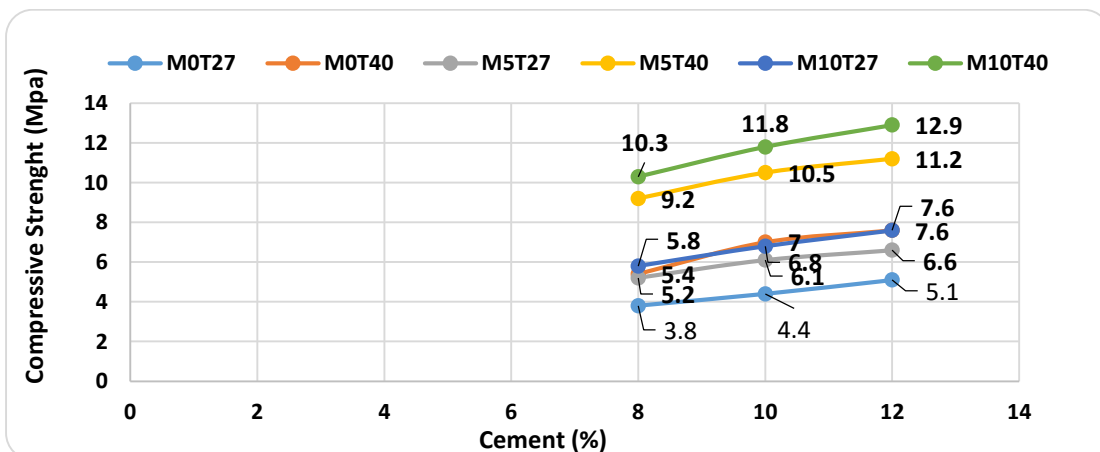
شکل ۷- نمودار تاثیر میکروسیلیس بر مقاومت فشاری مخلوط‌های ۷ روزه خاک-سیمان-میکروسیلیس در دمای ۲۷ °C و ۴۰ °C



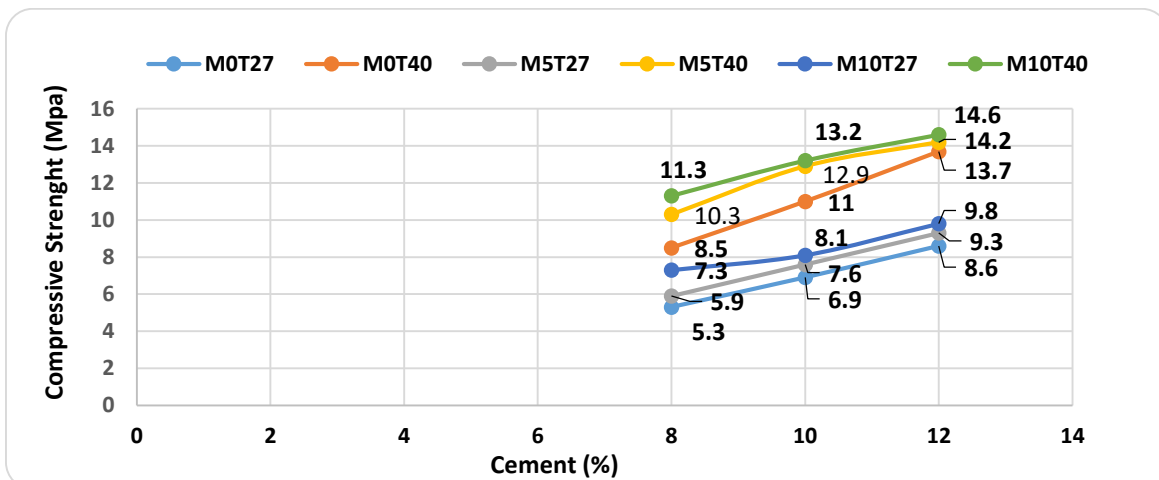
شکل ۸- نمودار تاثیر میکروسیلیس بر مقاومت فشاری مخلوط های ۱۴ روزه خاک-سیمان-میکروسیلیس در دمای ۲۷ °C و ۴۰ °C



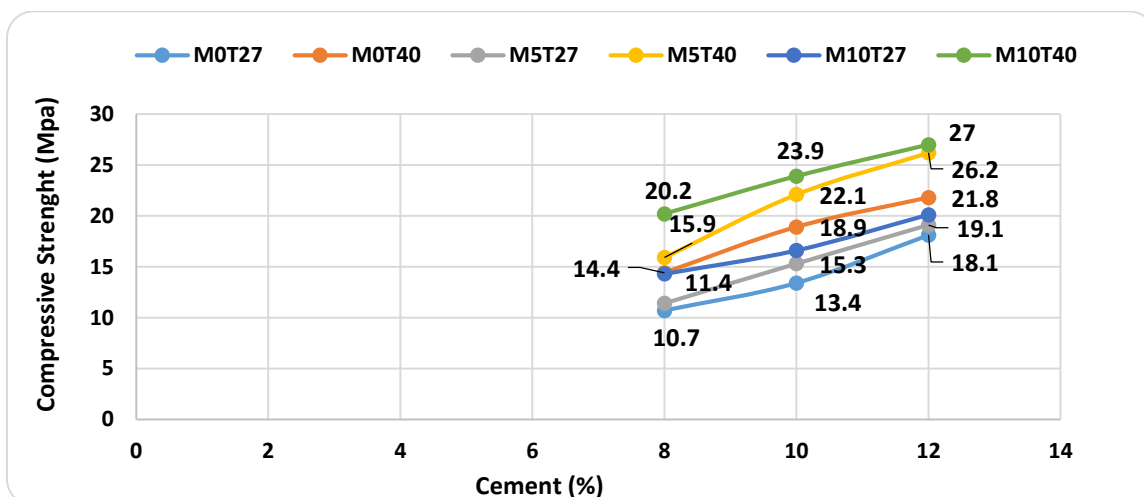
شکل ۹- نمودار تاثیر میکروسیلیس بر مقاومت فشاری مخلوط های ۲۸ روزه خاک-سیمان-میکروسیلیس در دمای ۲۷ °C و ۴۰ °C



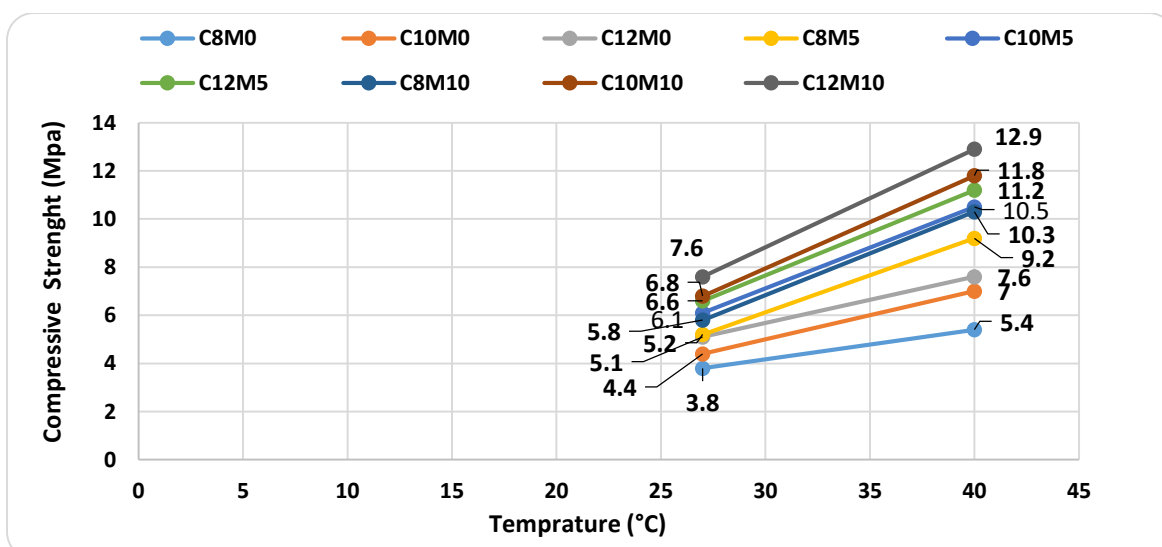
شکل ۱۰- نمودار تاثیر مقدار سیمان بر مقاومت فشاری مخلوط های ۷ روزه خاک-سیمان-میکروسیلیس در دمای ۲۷ °C و ۴۰ °C



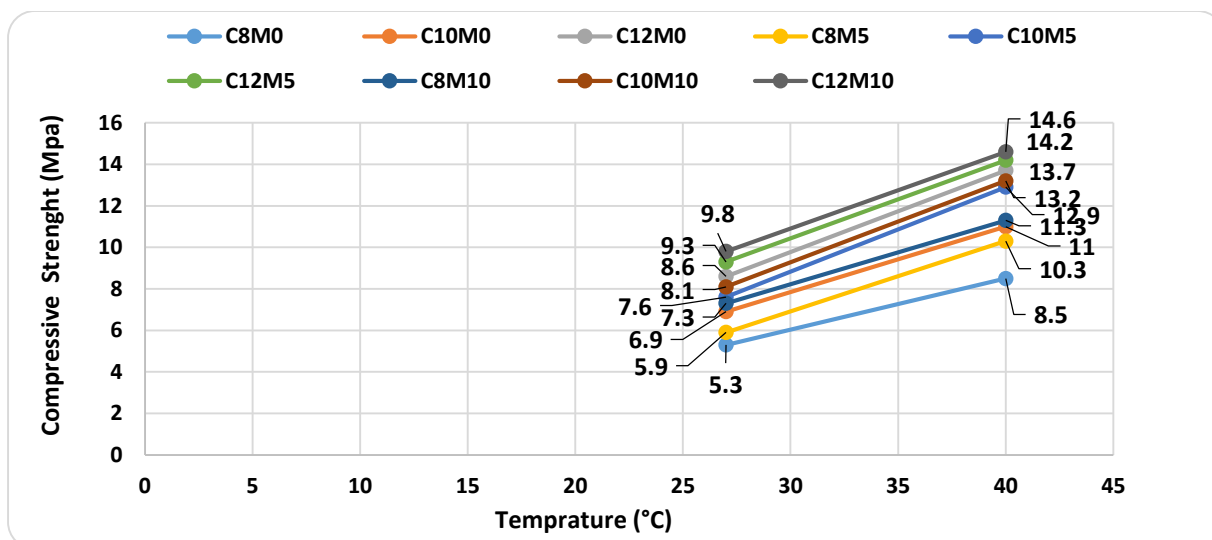
شکل ۱۱- نمودار تاثیر مقدار سیمان بر مقاومت فشاری مخلوط های ۱۴ روزه خاک-سیمان-میکروسیلیس در دمای ۲۷ °C و ۴۰ °C



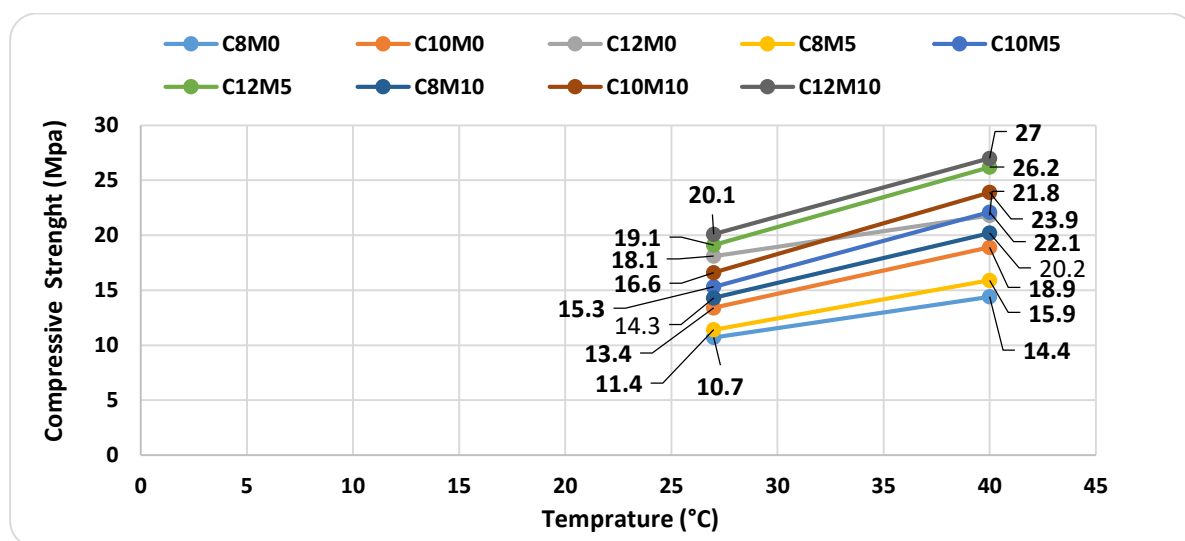
شکل ۱۲- نمودار تاثیر مقدار سیمان بر مقاومت فشاری مخلوط های ۲۸ روزه خاک-سیمان-میکروسیلیس در دمای ۲۷ °C و ۴۰ °C



شکل ۱۳- نمودار تاثیر دمای عمل آوری بر مقاومت فشاری مخلوط های ۷ روزه خاک-سیمان-میکروسیلیس



شکل ۱۴- نمودار تاثیر دمای عمل آوری بر مقاومت فشاری مخلوط های ۱۴ روزه خاک-سیمان-میکروسیلیس



شکل ۱۵- نمودار تاثیر دمای عمل آوری بر مقاومت فشاری مخلوط های ۲۸ روزه خاک-سیمان-میکروسیلیس

شکل های شماره (۱) تا (۶) نشان می دهد که افزایش مقادیر سیمان، میکروسیلیس و دمای عمل آوری موجب افزایش مقاومت فشاری نمونه ها شده است. ضمناً تاثیر افزایش دما از  $27^{\circ}\text{C}$  به  $40^{\circ}\text{C}$  بر مقاومت فشاری در تمام حالات بیشتر از افزایش ۲٪ سیمان است. بررسی شکل های شماره (۷) تا (۹) نشان می دهد که افزایش میکروسیلیس از صفر به ۱۰٪ موجب افزایش مقاومت فشاری نمونه ها شده است. بیشترین و کمترین تاثیر آن در سن ۲۸ روزه گی به ترتیب برای طرح اختلاط های C8T40 و C12T27 بوده است. شکل های شماره (۱۰) تا (۱۲) نشان می دهد که طبق انتظار افزایش سیمان از ۸٪ به ۱۲٪ موجب افزایش مقاومت فشاری نمونه ها شده است. بیشترین و کمترین تاثیر آن در سن ۲۸ روزه گی به ترتیب برای طرح اختلاط های M10T27 و M5T40 بوده است. در ضمن مقاومت نمونه C8M10T40 تقریباً با C12M10T27 برابر است. به

عبارت دیگر تاثیر افزایش دما از  $27^{\circ}\text{C}$  به  $40^{\circ}\text{C}$  معادل افزایش ۴٪ سیمان بوده است. همچنین بررسی شکل‌های شماره (۱۳) تا (۱۵) نشان می‌دهد که تاثیر افزایش دما از  $27^{\circ}\text{C}$  به  $40^{\circ}\text{C}$  موجب افزایش فوق‌العاده مقاومت فشاری نمونه‌ها شده است. بیشترین و کمترین تاثیر آن به ترتیب برای طرح اختلاط‌های C10M10 و C12M0 یا C8M0 بوده است.

### تحلیل آماری نتایج مقاومت فشاری

برای تجزیه و تحلیل نتایج از برنامه نرم‌افزاری آماری SAS-VER 9.1<sup>۵</sup> استفاده گردید. این نرم افزار برای تحلیل آماری آزمون‌های چند متغیره و همچنین بدست آوردن روابط رگرسیونی چند متغیره از قابلیت‌های بیشتری نسبت به نرم افزارهای MINITAB و SPSS برخوردار است. برای تحلیل آماری نتایج این پژوهش به منظور مقایسه پارامترهای مقاومت فشاری از روش آزمایشی اسپلیت در قالب طرح‌های کاملاً تصادفی انجام شد. الگوی انجام آزمایش‌ها شامل یک نوع خاک، ۳ سطح سیمان، ۳ سطح میکروسیلیس، ۳ سطح مدت زمان عمل آوری و ۲ سطح دمای عمل آوری با سه تکرار بوده است. تجزیه واریانس مربوط به اثرات فردی سطوح سیمان، میکروسیلیس و دمای عمل آوری بر افزایش مقاومت فشاری نمونه‌های ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه نشان داد که بین نمونه‌های مختلف اختلاف معنی داری در سطح یک درصد وجود دارد. همچنین مقایسه میانگین‌ها به کمک روش آزمون دانکن<sup>۶</sup> انجام شد. مطابق با این روش بیشترین میزان افزایش مقاومت فشاری در بین سطوح مختلف سیمان و میکروسیلیس برای نمونه‌های ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه، مربوط به افزایش مقدار سیمان از ۸٪ به ۱۰٪ و افزایش مقدار میکروسیلیس از ۰٪ به ۵٪ بوده است. همچنین بیشترین درصد افزایش مقاومت فشاری برای کلیه مخلوط‌ها در این پژوهش نیز مربوط به افزایش دمای عمل آوری از  $27^{\circ}\text{C}$  به  $40^{\circ}\text{C}$  بوده است. این نشان می‌دهد که با افزایش دمای محیط محل اجرای پروژه‌های آبخیزداری می‌توان مقادیر سیمان، میکروسیلیس و یا هر دو را کاهش داد و با طراحی بهینه مخلوط کاهش قابل ملاحظه‌ای را در هزینه‌های آبخیزداری ایجاد کرد. در جدول (۶) میانگین بیشترین تاثیر تغییرات مقادیر سیمان، میکروسیلیس و دمای عمل آوری در افزایش مقاومت فشاری به روش دانکن برای سنین مختلف ارائه شده است.

جدول ۶- میانگین بیشترین تاثیر تغییرات مقادیر سیمان، میکروسیلیس و دمای عمل آوری در افزایش مقاومت فشاری به روش دانکن

نوع متغیر	نمونه‌های ۷ روزه			نمونه‌های ۱۴ روزه			نمونه‌های ۲۸ روزه		
	رشد متغیر	مقدار (Mpa)	درصد	رشد متغیر	مقدار (Mpa)	درصد	رشد متغیر	مقدار (Mpa)	درصد
سیمان	۸٪ به ۱۰٪	۱/۰۹	۱۶/۵	۸٪ به ۱۰٪	۱/۷۹	۱۸/۰	۸٪ به ۱۰٪	۳/۸۸	۲۶/۸
میکروسیلیس	۰٪ به ۵٪	۲/۵۷	۴۶/۲	۰٪ به ۵٪	۱/۳۴	۱۵/۵	۰٪ به ۵٪	۲/۱۳	۱۳/۰
دمای عمل آوری	$27^{\circ}\text{C}$ به $40^{\circ}\text{C}$	۳/۹	۶۹/۰	$27^{\circ}\text{C}$ به $40^{\circ}\text{C}$	۴/۸۰	۶۴/۸	$27^{\circ}\text{C}$ به $40^{\circ}\text{C}$	۵/۷۲	۳۷/۰

### اثرات متقابل متغیرهای مورد بررسی در افزایش مقاومت فشاری

تحلیل واریانس اثرات متقابل متغیرهای مورد بررسی نشان داد که به استثنای اثرات متقابل سیمان-میکروسیلیس-دمای عمل‌آوری برای نمونه‌های ۷ روزه و همچنین سیمان-دمای عمل‌آوری، میکروسیلیس-دمای عمل‌آوری و سیمان-میکروسیلیس-دمای عمل‌آوری برای نمونه‌های ۱۴ روزه، کلیه اثرات متقابل متغیرهای مورد بررسی برای سنین ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه در افزایش مقاومت فشاری دارای اختلاف معنی‌داری در سطح ۱٪ بین نمونه‌های مختلف بوده‌اند. بنابراین همان‌طوری که انتظار می‌رفت افزایش سیمان، میکروسیلیس و دمای عمل‌آوری موجب افزایش مقاومت فشاری شده است. در این پژوهش نمونه‌هایی که دارای بیشترین و کمترین مقادیر فوق بوده‌اند دارای مقاومتی به ترتیب معادل (Mpa) ۲۷ و (Mpa) ۱۰/۶۶ بوده‌اند. نتایج نشان داد که میانگین مقاومت فشاری نمونه‌های ۷ و ۲۸ روزه نه تنها از حداقل مقاومت لازم (جهت کاربرد در پروژه‌های آبخیزداری) مطابق با ضوابط USBR که به ترتیب معادل با (Mpa) ۴/۱ و (Mpa) ۶/۱ می‌باشد بیشتر هستند بلکه از فاصله نسبی قابل توجهی نیز بهره می‌برند.

### تجزیه واریانس نتایج افت وزنی در آزمایش تر و خشک شدن

تحلیل آماری طرح برای مقایسه پارامترهای تر و خشک شدن از روش آزمایشی اسپلیت پلات در قالب طرح‌های کاملاً تصادفی با استفاده از نرم افزار آماری SAS انجام شد. الگوی انجام آزمایش‌ها شامل یک نوع خاک، ۳ سطح سیمان، ۳ سطح میکروسیلیس، یک مدت زمان عمل‌آوری و سه تکرار بوده است. تجزیه واریانس نتایج افت وزنی در آزمایش تر و خشک شدن نشان داد که برای اثرات میکروسیلیس در سطح یک درصد و برای اثرات متقابل سیمان-میکروسیلیس در سطح ۵٪ اختلاف معنی‌داری برای افت وزنی نمونه‌ها وجود دارد. لیکن برای اثرات سیمان هیچ گونه اختلاف معنی‌داری در نتایج افت وزنی بین نمونه‌های مختلف وجود نداشت. نتایج مقایسه میانگین‌های مربوط به اثر سطوح میکروسیلیس و اثرات متقابل سیمان-میکروسیلیس بر افت وزنی در آزمایش تر و خشک شدن به روش آزمون دانکن نشان داد که عوامل مذکور در کاهش افت وزنی به ترتیب ۱٪ و ۵٪ اختلاف معنی‌داری دارند. همچنین ارزیابی نتایج نشان داد که میانگین افت وزنی نمونه‌ها نه تنها از حداکثر مجاز مطابق با ضوابط USBR که معادل ۶٪ می‌باشد کمتر هستند بلکه از فاصله نسبی قابل توجهی نیز برخوردار بودند. مقایسه نتایج این تحقیق با نتایج تحقیقات Rahimi و همکاران (۲۰۰۶)، Janalizadeh و Bagherpour (۲۰۰۳)، Moghimi Rad (۲۰۰۶)، Zarijawi (۲۰۰۹) و Olapour و همکاران (۲۰۱۳) نشان می‌دهد که مقاومت فشاری بدست آمده در این تحقیق در تمام موارد مشابه، بیشتر از مخلوط‌های خاک-سیمان و یا خاک-سیمان-میکروسیلیس مورد مطالعه در دیگر تحقیقات بوده است تا آن جا که مقاومتی نظیر بتن‌های سازه‌ای نیز حاصل شده است. به نظر می‌رسد توزیع دانه بندی مناسب خاک، کمتر بودن آنیون‌ها و کاتیون‌های خاک، کیفیت بالای آب مصرفی، روش اختلاط مصالح با یکدیگر و بکار بردن روش تراکم به روش آشتو اصلاحی که نسبت به روش پراکتور استاندارد دارای انرژی تراکمی بیشتری است در این پژوهش نسبت به سایر تحقیقات موجب افزایش قابل توجه مقاومت فشاری شده است. همچنین مقایسه نتایج این تحقیق با حداقل مقاومت‌های فشاری لازم طبق ضوابط USBR، AASHTO، برای مصالح اساس تثبیت شده با سیمان (Tabatabaei, 1994) و همچنین ضوابط نشریه شماره ۲۶۸ (سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور، ۱۳۸۲) نشان می‌دهد که تمامی نمونه‌های ساخته شده از حداقل مقاومت لازم جهت کاربرد در پروژه‌های آبخیزداری برخوردار می‌باشند. خاک مورد استفاده در این پژوهش بدلیل داشتن حدود ۴۳٪ رس و لای جهت ساخت بتن مناسب نیست لیکن همان‌طور که نتایج این پژوهش نشان داد با ترکیب مقدار مناسب سیمان و میکروسیلیس و عمل‌آوری در شرایط مناسب به مقاومتی معادل (Mpa) ۲۷ که همانند

بتن‌های سازه‌ای می‌باشد می‌توان رسید. بنابراین از این مخلوط می‌توان به عنوان مصالح جایگزین بتن، آجر، سنگ و سیمان، ریپ رپ و ... در پروژه‌های آبخیزداری استفاده نمود. لازم به توضیح است که استفاده از مخلوط‌های خاک-سیمان- میکروسیلیس در پروژه‌های سد سازی، جاده‌سازی، تثبیت بستر، تثبیت سواحل رودخانه‌ها، سازه‌های آبی و پروژه‌های آبخیزداری بسیار مقرون به صرفه و مناسب است زیرا عمدتاً از خاک حاصل از خاکبرداری محل سازه استفاده می‌شود، علاوه بر آن تخریب‌های زیست محیطی کمتری نیز ایجاد می‌کند لیکن استفاده از آن در تیرها، ستون‌ها، نواحی با تنش بالا و همچنین نواحی با شدت فرسایش پذیری خیلی زیاد مناسب نیست و هرگز توصیه نمی‌شود زیرا چسبندگی این مخلوط با آرماتور و همچنین چسبندگی بین دانه‌های آن نسبت به بتن ضعیف‌تر است. باید توجه داشت که اجرای صحیح این مخلوط در پروژه‌های آبخیزداری نیاز به طراحی مناسب مطابق با نوع خاک، شرایط اقلیمی و آموزش صحیح پرسنل طراح، ناظر و مجری دارد و تا زمانی که موارد مذکور تامین نشده باشد نباید انتظار نتیجه مطلوب داشت.

### نتیجه‌گیری

برای بررسی تاثیر میکروسیلیس و حرارت محیط عمل‌آوری بر روی پارامترهای مقاومت و پایداری مخلوط‌های خاک-سیمان و همچنین طراحی بهینه مخلوط برای کاربرد در پروژه‌های آبخیزداری و کاهش هزینه‌ها این پژوهش انجام شد و نتایج زیر بدست آمد. همان‌طوری که انتظار می‌رفت افزایش مقدار سیمان، میکروسیلیس، دمای عمل‌آوری و سن نمونه‌ها باعث افزایش مقاومت فشاری مخلوط‌های مترکم شده خاک-سیمان- میکروسیلیس شد. افزایش سیمان رابطه معنی داری بر روی کاهش افت وزنی نداشت لیکن افزایش میکروسیلیس رابطه معنی داری بر کاهش افت وزنی نمونه‌های مختلف خاک-سیمان- میکروسیلیس ایجاد نمود. برای کلیه طرح اختلاط‌ها بیشترین مقدار و درصد افزایش مقاومت فشاری مربوط به افزایش دمای عمل‌آوری از ۲۷ به ۴۰ درجه سانتیگراد در شرایط اشباع از رطوبت بوده است. این نشان می‌دهد که افزایش دمای محیط عمل‌آوری تاثیر بسزایی در افزایش مقاومت فشاری مخلوط‌های خاک-سیمان- میکروسیلیس دارد. با توجه به آیین‌نامه‌های معتبر ایرانی و خارجی از کلیه مخلوط‌های مختلف خاک-سیمان- میکروسیلیس مورد پژوهش در این تحقیق می‌توان مطابق با نیازهای طراحی در بسیاری از پروژه‌های مختلف آبخیزداری استفاده نمود. به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که افزایش حرارت محیط عمل‌آوری موجب افزایش قابل توجه مقاومت فشاری مخلوط می‌شود. لذا برای بدست آوردن مقاومت فشاری مشخصی در اجرای پروژه‌های عمرانی با طراحی بهینه مخلوط می‌توان در فصول گرم سال به شرط تامین شرایط اشباع از رطوبت و یا تامین رطوبت کافی برای فرایند هیدراتاسیون مخلوط، مقدار سیمان و میکروسیلیس لازم و هزینه‌های اجرایی را کاهش داد ضمن این‌که عکس این قضیه نیز صادق است. همچنین نتایج تحقیق نشان داد که امکان احداث سدهای آبخیزداری با استفاده از مخلوط خاک - سیمان - میکروسیلیس با هزینه حدود ۵۰ درصد سنگ و سیمان و یا بتن وجود دارد که می‌تواند تحولی شگرف برای احداث سدهای آبخیزداری در آینده باشد و همچنین استفاده از این مخلوط باعث کاهش تخریب‌های زیست محیطی و استفاده از خاک موجود در محل احداث سدها و همچنین باعث افزایش سرعت در اجرای عملیات آبخیزداری می‌شود.

## منابع

- اولی پور، م.، مستعار، م.، حسینی دهدشتی، ع. ۱۳۹۲. بررسی تاثیر سیکل‌های یخ‌زدگی بر روی خاک رس تثبیت شده با سیمان و میکروسیلیس، هفتمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشکده شهید نیکبخت، دانشگاه زاهدان.
- بیت اله پور چهار محالی، ا.، و رئیسی استبرق، ع. ۱۳۸۹. تعیین درصد بهینه سیمان در ملات خاک- سیمان برای تثبیت کانالهای آبیاری، سومین همایش ملی مدیریت شبکه های آبیاری و زهکشی، دانشگاه شهید چمران، دانشکده مهندسی علوم آب، اهواز.
- جانعلی زاده، ع.، باقر پور، ا. ۱۳۸۲. تثبیت خاک‌های ریزدانه بوسیله افزودن میکروسیلیکا به همراه آهک یا سیمان، ششمین کنفرانس بین المللی مهندسی عمران. دانشگاه صنعتی اصفهان.
- رحیمی، ح.، فکور، ک. ۱۳۷۳. بررسی و مقایسه استحکام خاک- مالچ و خاک- سیمان در سازه‌های آبی، شماره ثبت ۷۳/۹۶، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، ص ۱.
- رحیمی، ح.، عباسی، ن. ۱۳۷۴. استفاده از موزائیک خاک- سیمان برای پوشش کانالهای آبیاری، شماره ثبت ۷۴/۴۳۶، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، ص ۱۰۰ تا ۱۰۹.
- رحیمی، ع.، شفاعی بجستان، م.، و ارشم، ع. ۱۳۸۵. بررسی امکان استفاده از مخلوط خاک (مارن سازند آغاچاری) - سیمان در احداث سازه های آبخیزداری، هفتمین سمینار بین المللی مهندسی رودخانه، دانشگاه شهید چمران، اهواز.
- سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور، ۱۳۸۲. دستورالعمل تثبیت لایه های خاکریز و روسازی راهها، انتشارات سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور، تهران، نشریه شماره ۲۶۸، ص ۱ تا ۷ و ۴۸.
- صامت زاده، آ. ۱۳۹۰. بررسی کاربرد خاک- سیمان- میکروسیلیس در پروژه‌های عمرانی، شماره ثبت ۲۷۶۷۶، دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول، ص ۱۹ تا ۱۶ و ص ۲۶ تا ۵۳.
- صامت زاده، آ.، خالو، ع.، زرفام، پ. ۱۳۹۱. بررسی تاثیر حرارت بر افزایش مقاومت فشاری مخلوط‌های خاک و سیمان، نهمین کنگره بین المللی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان.
- طباطبایی، ا. ۱۳۷۳. روسازی راه، مرکز نشر دانشگاهی، تهران، چاپ چهارم، ص ۱۴۳.
- عصاره مستقیم، ل.، اولی پور، م. ۱۳۹۱. ارزیابی مقاومت خاک‌های غیرچسبنده (دشت حمیدیه)، تثبیت شده با سیمان و میکروسیلیس و مقایسه آن با افزودن خاک رس در تراکم‌های مختلف، سومین سمینار ملی مسائل ژئوتکنیکی شبکه‌های آبیاری و زهکشی، مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی.
- مقیمي راد، ا. ۱۳۸۵. بررسی تاثیر تثبیت و بهسازی در کرنش خاک تحت بار ترافیکی، پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران،

دانشگاه شهید چمران اهواز، ص ۱۴ تا ۱۶.

مستعار، م، ایزدیار، پ،، رحیمی، م، ۱۴۰۰. بررسی تاثیر افزودن میکروسیلیس بر روی خاک رس تثبیت شده با سیمان، دوازدهمین کنفرانس ملی مهندسی عمران، معماری و شهرسازی، شیروان.

Ajorloo, A.M. 2010. Characterization of the Mechanical Behavior of Improved Loose Sand for Application in Soil-Cement Deep Mixing, NO d'ordre 40352, Pour obtenir le grade de Docteur, de l'Universite de LILLE 1, pp 112, 2010.

Beitollahpour Chaharmahali, A., Raeisi Estabragh, A. 2010. Determination of the Optimal Percentage of Cement in Soil-Cement Mortar for Stabilization of Irrigation Canals, 3rd National Conference on Irrigation and Drainage Network Management, Shahid Chamran University, Faculty of Water Science Engineering, Ahvaz.

Fares, Y. A. 2007. Soil-Cement Protects Upstream Embankment of Reservoir Against Erosive Wave Action, Government Engineering, <http://govengr.com/articlesJan07/tampa.pdf>, 2007.

Hansen, K. D. 1986. Soil-Cement for Embankment Dams, Bulletin 54, International Commission on Large Dams (ICOLD), Paris, 1986.

Janalizadeh, A., Bagherpour, A. 2003. Stabilization of fine-grained soils by adding microsilica with lime or cement, 6th International Conference on Civil Engineering. Isfahan University of Technology.

Kowalski, T. E., Starry, D.W. 2007. Modern Soil Stabilization Techniques Characterization and Improvement of Soil and Materials Session, Characterization and Improvement of Soil and Materials Session Conference, Saskatchewan, Canada, Transportation Association of Canada, Oct 2007.

Management and Planning Organization of Iran. 2003. Instructions for Fixing Embankment Layers and Road Pavements, Publications of the Management and Planning Organization of Iran, Tehran, No. 268, pp. 1-7 and 48.

Moghimi Rad, A. 2006. Investigating the Effect of Stabilization and Improvement on Soil Strain under Traffic Load, M.Sc. Thesis in Civil Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, pp. 14-16.

Mostaar, M., Izadyar, P., Rahimi, M. 2021. Investigating the Effect of Microsilica Addition on Cement-Stabilized Clay, 12th National Conference on Civil Engineering, Architecture and Urban Planning, Shirvan.

Olapour, M., Mostaar, M., Hosseini Dehdashti, A. 2013. The Effect of Frost Cycles on Clay Stabilized with Cement and Microsilica, 7th National Congress on Civil Engineering, Faculty of Shahid Nikbakht, University of Zahedan.

Osareh Mostaghim, L., Olapour, M. 2012. Evaluation of Resistance of Non-Stick Soils (Hamidieh Plain), Stabilized with Cement and Microsilica and Comparison with Clay Addition at Different Densities, 3rd National Seminar on Geotechnical Issues of Irrigation and Drainage Networks, Agricultural Engineering

Research Institute.

Rahimi, A., Shafaei Bajestan, M., Arsham, A., 2006. Investigation of the Feasibility of Using Soil Mixture (Marl of Aghajari Formation) - Cement in the Construction of Watershed Management Structures, 7th International Seminar on River Engineering, Shahid Chamran University, Ahvaz.

Rahimi, H., Abbasi, N. 1995. Use of Soil-Cement Mosaic for Covering Irrigation Canals, Registration No. 436/74, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Agricultural Technical and Engineering Research Institute, Pp. 100-109.

Rahimi, H., Fakour, K. 1994. Investigation and Comparison of Soil-Mulch and Soil-Cement Strengths in Water Structures, Registration No. 73/96, Agricultural Education and Extension Organization (AREEO), Agricultural Technical and Engineering Research Institute, Pp. 1.

Sametzadeh, A. 2011. Investigation of the Application of Soil-Cement-Microsilica in Civil Projects, Registration No. 27676, Islamic Azad University, Dezful Branch, pp. 19-16 and pp. 26-53.

Sametzadeh, A., Khaloo, A., Zarfam, P. 2012. The Effect of Heat on Increasing Compressive Strength of Soil and Cement Mixtures, 9th International Congress on Civil Engineering, Isfahan University of Technology.

Tabatabaei, A. 1994. Road Pavement, University Publishing Center, Tehran, 4th edition, p. 143.

USBR., 1990. *Embankment Dams, Soil-Cement Slope Protection*, Chapter 17, U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation. Denver Office, USA, 1990.

Zarijawi, M. K. 2009. Effect of adding cement and silica fume with cement on compaction properties and shear strength of clayey soil, Al-Qadisiya journal for engineering sciences, Vol. 2, No. 2, pp. 253-257, 2009.

Zerahtanlahoni, A., Tajdini, M. 2022. Effect of Adding Nano-Sio<sub>2</sub> Particles and Silica Fume on the Physical Parameters of Soil-Cement Materials, 7th International Conference on Researches in Science & Engineering & 4th International Congress on Civil, Architecture and Urbanism in Asia.

