مهندسی عمران شریف (تابستان ۱۳۹۳)
دوره‌ی ۲-۳۰، شماره‌ی ۲، ص. ۷۷-۸۵

Original Article

# تثبیت ماسه‌ی سیلتی مسئله‌دار با استفاده از میکروسیلیس و آهک جهت کاهش میزان تورم و افزایش توان باربری

**علی قربانی*** (استادیار)
**مسعود کریمی** (کارشناسی ارشد)
**دانشکده‌ی مهندسی، دانشگاه گیلان**

ماسه‌ی سیلتی سولفاته، خاک تشکیل‌دهنده‌ی مناطق وسیعی از کویر مرکزی ایران است، که مقاومت فشاری ناچیز و پتانسیل تورم زیاد ناشی از وجود سولفات گچ دارد. راه‌سازی در این مناطق مستلزم تثبیت خاک بستر و لایه‌های روسازی است. در این پژوهش، با افزودن درصدهای مختلف میکروسیلیس و آهک و انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری محدودنشده، نسبت باربری کالیفرنیا (CBR)[1] و تورم تثبیت این خاک مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهند که با مقادیر بسیار کم میکروسیلیس و آهک، مقاومت نمونه‌ها به‌طور چشمگیری افزایش و پتانسیل تورم کاهش می‌یابد. عدد CBR نمونه‌ی تثبیت‌شده با ۱٪ میکروسیلیس و ۱٪ آهک حدود ۸۰ به دست آمد که برای عملیات راه‌سازی بسیار مناسب است. عکس‌برداری میکروسکوپ الکترونی هم نشان‌دهنده‌ی نقش اصلی میکروسیلیس در تشکیل ریزساختارهای کریستالی و در نتیجه، افزایش قابل توجه مقاومت نمونه‌های تثبیت‌نشده‌ی خاک است.

**واژگان کلیدی:** ماسه‌ی سیلتی، تثبیت خاک، میکروسیلیس، آهک، CBR، مقاومت فشاری محدودنشده، پتانسیل تورم.

ghorbani@guilan.ac.ir
mkarimi@gmail.com

## ۱. مقدمه

در سال‌های اخیر، استفاده از پسماندهای صنعتی در تثبیت خاک‌های مسئله‌دار افزایش چشمگیری یافته است. به‌کارگیری این مواد در پروژه‌های عمرانی، علاوه‌بر اثرات مثبت آن بر محیط زیست، توجیه اقتصادی نیز دارد.[۱و۲] خاکستر بادی، خاکستر ته کوره، خاکستر پوسته‌ی برنج و سرباره‌ی کوره‌ی آهن‌گدازی از جمله‌ی این پسماندها هستند. این مواد به تنهایی و یا در ترکیب با ماده‌ی فعال‌کننده‌یی مانند سیمان و آهک در حضور آب می‌توانند باعث به وجودآمدن واکنش‌های پوزولانی و در نتیجه افزایش مقاومت در خاک شوند. هیدروسیلیکات کلسیم و هیدروآلومینات کلسیم محصول این واکنش‌ها هستند، که منجر به بهبود مشخصات ژئوتکنیکی خاک می‌شوند.[۱-۴]

امروزه میکروسیلیس به‌عنوان ماده‌ی نوینی در بهبود پارامترهای ژئوتکنیکی خاک مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. میکروسیلیس پوزولان بسیار قوی است، که به‌عنوان محصول جانبی در کارخانه‌ی آلیاژ فروسیلیسیم تولید می‌شود و تا قبل از دهه‌ی هفتاد میلادی به‌صورت غبار وارد اتمسفر می‌شد. میکروسیلیس، ماده‌ی سرطان‌زاست و برای سلامت انسان و محیط زیست بسیار خطرناک است و از این رو، از اوایل دهه‌ی هفتاد میلادی کارخانه‌های تولیدکننده ملزم به جمع‌آوری و دفن آن شده‌اند.[۲] اما امروزه با پژوهش‌های وسیعی که بر روی آن انجام شده است، این ماده نه فقط تهدیدی برای محیط زیست به‌حساب نمی‌آید؛ بلکه به شکل وسیعی در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرد. میکروسیلیس به دلیل برخورداری از سطح مخصوص بسیار بالا و شکل دانه‌یی گردگوشه و میزان سیلیس زیاد (تا ۹۵٪) می‌تواند جایگزین سیمان شود.[۳و۵و۶] شرط لازم برای شرکت میکروسیلیس در واکنش‌های پوزولانی، وجود ماده‌یی فعال‌کننده‌نظیر آهک است. هنگامی که میکروسیلیس با آهک ترکیب شود، در حضور آب می‌تواند PH محیط را افزایش دهد و با کربنات کلسیم ($Ca(OH)_2$) موجود در آهک واکنش دهد، و ژل هیدروسیلیکات کلسیم (C-S-H) تولید کند.[۳و۷و۸]

نتایج پژوهش‌های صورت‌گرفته بر روی میکروسیلیس نشان‌دهنده‌ی اثرات مثبت این افزودنی در تثبیت خاک‌های مسئله‌دار است.[۹و۱۰] اضافه‌کردن ۲۵٪ وزنی میکروسیلیس به خاک رس، مقاومت فشاری محدودنشده را تا میزان ۱۳۸ کیلوپاسکال افزایش می‌دهد و با افزایش این مقدار به ۳۰٪، افزایش مقاومت چندانی به وجود نمی‌آید؛ که این مطلب، نشان‌دهنده‌ی مقدار بهینه‌ی میکروسیلیس در عملیات تثبیت خاک است. همچنین میکروسیلیس پارامترهای تراکمی خاک را نیز دچار تغییر می‌کند. اضافه‌کردن میکروسیلیس باعث افزایش درصد رطوبت بهینه و کاهش وزن

---

* نویسنده مسئول
*تاریخ: دریافت ۱۳۹۱/۲/۲۶، اصلاحیه ۱۳۹۱/۱۰/۲، پذیرش ۱۳۹۱/۱۰/۲۴.*

مخصوص خشک بیشینه‌ی خاک می‌شود. افزایش درصد رطوبت بهینه به دلیل نحوه‌ی توزیع ذرات، تغییر در اندازه‌ی ذرات و سطح ویژه‌ی نمونه‌های تثبیت‌شده است.[۴] همچنین علت کاهش وزن مخصوص نیز افزایش مقادیر بالای میکروسیلیس با وزن مخصوص کم است، که فضای خالی ذرات را پر می‌کند.[۱۱] اضافه‌کردن میکروسیلیس به خاک رس، باعث بالارفتن مقاومت و دوام خاک در برابر آب‌شدن و یخ‌زدگی می‌شود[۴] و افزودن ۳۰ تا ۵۰ درصد میکروسیلیس، میزان تورم خاک رس را از ۱۸/۷٪ به ۲/۷٪ کاهش می‌دهد.[۱۲] میکروسیلیس نفوذپذیری خاک‌های رسی را به‌شدت کاهش می‌دهد و به همین دلیل می‌تواند در بهسازی پوشش رسی محل‌های دفن زباله مورد استفاده قرارگیرد،[۱۱] و همچنین باعث کاهش حد روانی و نشانه‌ی خمیری و افزایش حد خمیری رس‌ها می‌شود و در حقیقت رس‌های با حالت خمیری زیاد (CH) را به رس‌های با حالت خمیری کم (CL) تبدیل می‌کند.[۱۱و۱۲] در پژوهش دیگری از مخلوط میکروسیلیس و سیمان در ساخت گروت برای ایجاد مقاومت در ماسه استفاده شد و نتایج، نشان‌دهنده‌ی اثر مثبت میکروسیلیس در ساخت گروت‌های سیمانی است. مقدار بهینه‌ی میکروسیلیس به‌کار رفته ۵٪ است و با افزایش این میزان به ۱۰٪، افت شدیدی در میزان مقاومت فشاری محدودنشده‌ی خاک روی می‌دهد.[۱۳] قابل ذکر است که اثر میکروسیلیس بر روی خاک ماسه‌ی سیلتی همچنان ناشناخته باقی مانده است و ضرورت انجام پژوهش در این زمینه کاملاً احساس می‌شود.[۱۴]

احداث راه بر روی ماسه‌های کویری همواره موضوع مشکل‌سازی برای مهندسان عمران بوده است. این نوع خاک‌ها معمولاً ریزدانه و حاوی مقادیرکمی سیلت هستند و مقاومت ناچیزی دارند و برای عملیات راه‌سازی مناسب نیستند.[۱۵و۱۶] ایران نیز با داشتن بیش از ۳۰ میلیون هکتار بیابان و شوره‌زار همواره در معرض این مشکل قرار داشته است. درکویر مرکزی ایران، جاده‌یی به طول ۲۳۰ کیلومتر بین دو شهر جندق و گرمسار در حال احداث است و از آنجایی که خاک ماسه‌ی سیلتی منطقه، خصوصیات مقاومتی لازم را برای ساخت جاده ندارد، نیاز به عملیات بهسازی دارد. همچنین این خاک دارای ۲۵٪ سولفات گچ ($CaSo_4.2H_2O$) است، که در شرایط اشباع می‌تواند باعث تورم و کاهش مقاومت خاک شود. به‌منظور حل این مشکل از مخلوط میکروسیلیس و آهک برای تثبیت شیمیایی و بهبود خصوصیات ژئوتکنیکی خاک بهره گرفته شده است. میکروسیلیس دارای مقدار سیلیس زیاد، خاصیت پوزولانی مطلوب و همچنین توجیه اقتصادی و زیست‌محیطی است و آهک نیز به‌عنوان فعال‌کننده‌ی واکنش درکنار میکروسیلیس به‌کار می‌رود.

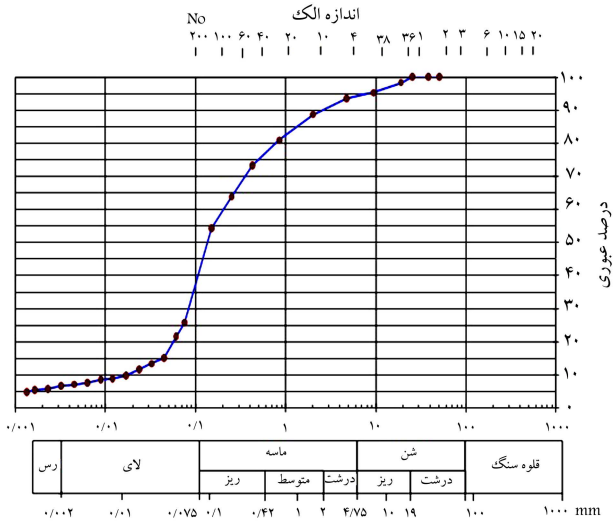
در این پژوهش، تأثیرات افزودنی میکروسیلیس ـ آهک بر روی افزایش مقاومت فشاری محدودنشده، CBR و کاهش پتانسیل تورم خاک ماسه‌ی سیلتی سولفات‌دار مورد بررسی قرار می‌گیرد و مقدار بهینه‌ی آن برای استفاده در پروژه‌ی ذکرشده تعیین می‌شود. و سپس با استفاده از عکس‌برداری الکترونی ساختمان کانی‌های تشکیل‌یافته در نمونه‌های تثبیت‌شده مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

## ۲. مصالح

### ۱.۲. خاک

خاک مورد استفاده در این پژوهش، از خاک‌های مسئله‌دارکویر مرکزی ایران است. منحنی دانه‌بندی خاک در شکل ۱ نشان داده شده است.

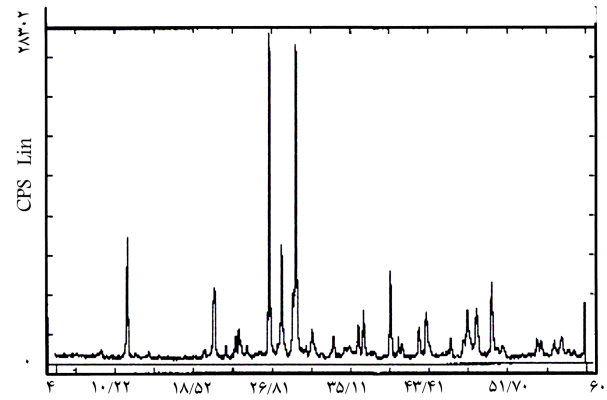
این خاک بر پایه‌ی سیستم طبقه‌بندی یونیفاید (USCS) با استاندارد شماره‌ی ASTM-D۲۴۸۷ دانه‌بندی شده است و درگروه SM قرار می‌گیرد. بیش از ۷۰٪




شکل ۱. نمودار دانه‌بندی خاک.

جدول ۱. نتایج آنالیز شیمیایی خاک.

| نام شیمیایی | درصد |
|---|---|
| $(MG,Fe)_6$ | ۲ |
| $KAL_2SI_3ALO_{10}(OH)_2$ | ۴ |
| $KALSI_3O_8$ | ۵ |
| $NaALSI_3O_8$ | ۲۰ |
| $CaSO_4,2H2O$ | ۲۵ |
| $CaCO_3$ | ۲۰ |
| $SIO_2$ | ۲۳ |
| L.O.I | ۱ |




شکل ۲. نمودار آزمایش XRD خاک.

خاک از الک نمره‌ی ۴۰ عبورکرده است. این خاک دارای ۲۵٪ سیلت و ۲٪ رس است و عمدتاً از نوع ماسه‌ی ریز است. نتایج آزمایش XRD خاک در جدول ۱ نشان داده شده است و بر این اساس این خاک دارای ۲۳٪ دی اکسید سیلیسیم و ۲۵٪ سولفات گچ است. سولفات موجود در خاک می‌تواند در اثر همجواری با آهک و آب باعث مشکلات تورمی در خاک شود. نمودار آزمایش XRD در شکل ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲. نتایج آنالیز شیمیایی آهک.

| نام شیمیایی | درصد | نام شیمیایی | درصد |
|---|---|---|---|
| $K_2O$ | ۴ | $Fe_2O_3$ | ۰/۱۳ |
| $SO_3$ | ۰/۸ | $AL_2O_3$ | ۰/۲۴ |
| Mg O | ۲/۶۵ | $SIO_2$ | ۱/۳۶ |
| Ca O | ۵۱/۶۴ | L.O.I | ۳۹/۱۸ |

جدول ۳. نتایج آنالیز شیمیایی میکروسیلیس.

| نام شیمیایی | درصد | نام شیمیایی | درصد |
|---|---|---|---|
| Mg O | ۰/۵~۲ | S | ۰/۰۴~۰/۰۸ |
| Ca O | ۰/۵~۱/۵ | MnO | ۰/۰۲~۰/۰۷ |
| $Fe_2O_3$ | ۰/۳~۱/۳ | $P_2O_5$ | ۰/۰۴ |
| $AL_2O_3$ | ۰/۶~۱/۲ | LoI | ۰/۴~۳ |
| $SIO_2$ | ۹۰~۹۵ | PH | ۶/۶~۸/۸ |
| C | ۰/۲~۰/۴ | Moisture | ۰/۰۱~۰/۴ |
| $Na_2O_3$ | ۰/۳~۰/۵ | | |

## ۲.۲. آهک

آهک مورد استفاده از کارخانه‌یی در نزدیکی محل پروژه تهیه شده و از نوع آهک هیدراته است و بیش از ۵۱٪ آن را آهک زنده (CaO) تشکیل می‌دهد. نتایج آنالیز شیمیایی آن در جدول ۲ ارائه شده است.

## ۳.۲. میکروسیلیس

میکروسیلیس سیلیکای، ریزدانه‌ی غیرکریستالی است که محصول جانبی کوره‌ی قوسی الکتریکی در کارخانه‌ی تولید آلیاژ فروسیلیسیم است. شکل فیزیکی آن به‌صورت پودر و دانه‌های آن کروی شکل است. سیلیکای کروی بسیار فعال‌تر از کوارتز کریستالی است و این مطلب باعث شرکت گسترده‌تر میکروسیلیس در واکنش‌های پوزولانی می‌شود و از این جهت بر پوزولان‌های دیگر (مانند خاکستر بادی) برتری دارد.[۱۷،۷] قطر ذرات میکروسیلیس مورد استفاده بین ۰/۱ تا ۰/۲ میکرون است و میزان دی اکسید سیلیسیم ($SiO_2$) موجود در آن به ۹۰ الی ۹۵٪ می‌رسد. در جدول ۳، برخی مشخصات شیمیایی و فیزیکی میکروسیلیس نمایش داده شده است.

# ۳. روش‌ها و آزمایش‌ها

## ۱.۳. آماده‌سازی نمونه‌ها

برای آماده‌ساختن نمونه‌ها ابتدا میکروسیلیس و آهک با نسبت‌های مختلف با هم مخلوط و سپس به خاک اضافه شد. پس از اختلاط کامل، آب به میزان درصد رطوبت بهینه‌ی هر مخلوط به مخلوط خشک اضافه شد و مجدداً عمل اختلاط انجام پذیرفت. خاک مورد استفاده در ساخت نمونه‌ها از الک شماره‌ی ۴ رد شده است. تمامی نمونه‌ها به‌صورت دستی مخلوط شدند و در هنگام اختلاط در هر دو حالت خشک و مرطوب نهایت دقت جهت همگن‌بودن مخلوط انجام پذیرفت. برای ساخت نمونه‌های مختلف از درصدهای مختلف میکروسیلیس (۰، ۱، ۲، ۵، ۱۰ و ۱۵) و نیز درصدهای مختلف آهک (۰، ۱، ۳ و ۵) استفاده شد. به این ترتیب ۲۳ ترکیب مختلف برای انجام آزمایش‌ها تعریف شده است.

## ۲.۳. آزمایش PH

آزمایش PH روش سریعی برای تعیین مقدار آهک مورد نیاز برای تثبیت خاک است، که بر طبق استاندارد شماره‌ی ASTM۶۲۷۶ با عنوان آزمایش ایدز و گریم[۲] انجام می‌شود. خاک از الک نمره‌ی ۴۰ و همچنین پودر میکروسیلیس به همراه آهک نیز از الک شماره ۶۰ عبور داده شدند. برای انجام واکنش‌های پوزولانی، PH محیط باید تقریباً به ۱۲/۶ برسد. لذا برای ترکیب‌های آهک و میکروسیلیس مختلف (حاوی سه مقدار ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد پودر میکروسیلیس) و برای ۶ مقدار مختلف آهک (۱ تا ۶ درصد) آزمایش PH انجام شد. طبق نتایج حاصله، قرارگرفتن محدوده‌ی تغییرات PH در بازه‌ی ۱۲/۶۴ و ۱۳/۵۴، آهک و میکروسیلیس به‌عنوان مصالحی مناسب برای تثبیت مورد ارزیابی قرار گرفتند.

## ۳.۳. آزمایش‌های تراکم

با توجه به سولفاته (نمکی) بودن خاک پروژه و همچنین تخلخل بالای آن، خاک مورد آزمایش عموماً به‌صورت کلوخه‌یی و با شکل لانه‌زنبوری است و تراکم بسیار کمی دارد. از آنجایی که امکان رسیدن به بیشینه‌ی تراکم در نتیجه‌ی ارتعاش مقدور نبود، لذا در ابتدا به کمک چکش‌های لاستیکی، خاک مورد آزمایش خرد و از آزمایش پروکتور استفاده شد. عموماً یکی از پرکاربردترین روش‌های تراکم درخاک‌های ماسه‌ی سیلتی که بنا بر تثبیت این نوع خاک‌هاست، استفاده از آزماش پروکتور است. آزمایش‌های تراکم براساس استاندارد شماره‌ی ASTM D۱۵۵۷-۰۲ انجام شد و میزان رطوبت بهینه و بیشینه‌ی وزن مخصوص خشک تمامی مخلوط‌ها به‌دست آمد .

## ۴.۳. آزمایش‌های CBR و تورم

آزمایش‌های CBR براساس استاندارد شماره‌ی ASTMD۱۸۸۳-۱۸۸۸۷ انجام شدند. قطر و ارتفاع قالب‌های استوانه‌یی مورد استفاده در این آزمایش به ترتیب ۱۵/۲۴ و ۱۲/۱۹۲ سانتی‌متر هستند. برای هر مخلوط ۱۲ نمونه ساخته شد که ۶ نمونه برای عمل‌آوری خشک و ۶ نمونه برای عمل‌آوری اشباع در دو زمان عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روزه در نظر گرفته شد. در مجموع برای تمامی درصدهای ترکیبی تعداد ۲۸۸ نمونه ساخته شد. پس از آماده‌سازی هر مخلوط با درصدهای مختلف آهک و میکروسیلیس، ۳ نمونه از آن با تراکم‌های مختلف ساخته شد. برای این منظور خاک مخلوط در ۵ لایه و هر لایه با ۱۰، ۳۰ و ۶۵ ضربه در قالب‌ها متراکم شدند. هدف از به کار بردن ۱۰ و ۳۰ ضربه، رسیدن به ۹۰ الی ۹۵ درصد بیشینه‌ی وزن مخصوص خشک (بیشینه‌ی تراکم حاصل از تراکم آزمایشگاهی) و تعداد ۶۵ ضربه در نمونه‌های سوم به منظور رسیدن به ۱۰۰٪ وزن مخصوص خشک بیشینه است. سپس نمونه‌های ساخته‌شده از درون قالب‌ها خارج و داخل پوشش‌های پلاستیکی دو لایه قرار گرفتند (برای حفظ رطوبت نمونه‌ها) و تحت دمای ثابت آزمایشگاه در دو زمان عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روزه نگهداری شدند.

به منظور اشباع‌کردن نمونه‌های مورد نیاز با سنین مختلف، آنها از داخل پوشش‌های پلاستیکی خارج و به مدت ۹۶ ساعت درون محفظه‌ی آب قرار داده شدند. سرباری معادل ۲/۲۶ کیلوگرم به‌طور ثابت طی این مدت بر روی نمونه‌ها قرار گرفت. این وزنه‌ها در حقیقت نقش سربار ناشی از روسازی راه را دارند، که بر لایه‌های زیرین اعمال می‌شوند. در واقع این وزن سربار، فشاری معادل با فشار

ناشی از وزن لایه‌های زیر اساس، اساس و آسفالت را به خاکریز وارد می‌کند. برای اندازه‌گیری میزان تورم نمونه‌ها یک گیج کرنش‌سنج در طی مدت اشباع‌سازی بر روی آنها نصب شد و میزان تورم نمونه‌ها در حالت اشباع سنجیده شد. نمونه‌ها در شرایط خشک و اشباع در دستگاه بارگذاری نفوذ استاندارد قرارگرفتند. مقدار نفوذ سنبه‌ی استوانه‌یی در این آزمایش برابر با ۱٫۲۷ میلی‌متر در دقیقه بوده است.

### ۵.۳. آزمایش مقاومت فشاری محدودنشده

آزمایش‌های مقاومت فشاری محدودنشده با روش کنترل کرنش و با سرعت ۱ میلی‌متر در دقیقه بر طبق استاندارد شماره‌ی ASTM ۲۱۶۶-۸۷در دو حالت خشک و مرطوب انجام شدند. مشابه با روش ساخت نمونه‌های CBR، نمونه‌ها ساخته شدند و در دستگاه تراکم هاروارد متراکم شدند. در این آزمایش، تراکم نمونه‌ها بر خلاف آزمایش CBR متغیر نیست و همه‌ی مخلوط‌ها درون دستگاه‌هاروارد در ۵ لایه و با ۲۵ ضربه چکش ساخته شدند. بعد از عملیات تراکم، نمونه‌ها درون پوشش پلاستیکی در دمای ثابت اتاق و در دو زمان عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روزه به‌صورت خشک نگهداری شدند. برای ساخت نمونه‌های مرطوب طبق دستورالعمل انجمن آهک آمریکا[۱۸] ابتدا دور تا دور نمونه‌ها با پارچه‌یی که قابلیت جذب آب داشته باشد، پوشانیده شد و یک سنگ متخلخل نیز در پایین آنها قرار داده شد. سپس یک کیسه‌ی نایلونی دور تا دور نمونه پیچیده شد و مجموعه‌ی فوق با یک کش محکم بسته شد. نمونه‌ها در یک سینی پر از آب طوری قرارگرفت که فقط سنگ متخلخل با آب تماس داشته باشد. زمان عمل‌آوری در حالت مرطوب ۲۴ ساعت است. برای هر آزمایش ۳ نمونه ساخته شد و میانگین مقادیر آن به‌عنوان نتیجه‌ی آزمایش مورد استفاده قرارگرفت.

## ۴. تجزیه و تحلیل نتایج

### ۱.۴. اثر افزودنی میکروسیلیس ـ آهک بر PH

با آزمایش PH می‌توان غلظت یون‌های هیدروژن را در محلول اندازه‌گیری کرد. برای انجام واکنش پوزولانی، PH محیط باید تقریباً به ۱۲٫۶ برسد.[۱۹] در برخی منابع مقدار کمینه‌ی PH برابر ۱۲٫۴ بیان شده است.[۲۰] مقدار PH محیط همچنین می‌تواند در مورد خواص تورمی و شکل‌گیری کانی اترینگایت نیز تأثیرگذار باشد. این کانی در حضور آهک و PH زیاد به‌صورت یک میله‌ی نازک به‌وجود می‌آید و هر چه آهک آزاد محیط بیشتر شود، اندازه‌ی آن بزرگ‌تر و ضخیم‌تر می‌شود. در غیاب آهک و سولفات‌سدیم و هنگامی که PH محیط پایین باشد، امکان نازک‌شدن اترینگایت و حتی از بین‌رفتن آن وجود دارد.[۲۱] این تذکر لازم است که رسیدن به مقدار PH تقریبی ۱۲٫۴ تا ۱۲٫۶ لزوماً شرط کافی برای انجام واکنش‌های پوزولانی خاک و آهک نیست. در نتیجه باید توجه داشت که داده‌های این روش باید با دیگر آزمایش‌های انجام‌شده مطابقت داده شوند. در شکل ۳، تغییرات PH محیط پس از اضافه‌کردن افزودنی میکروسیلیس ـ آهک مشاهده می‌شود.

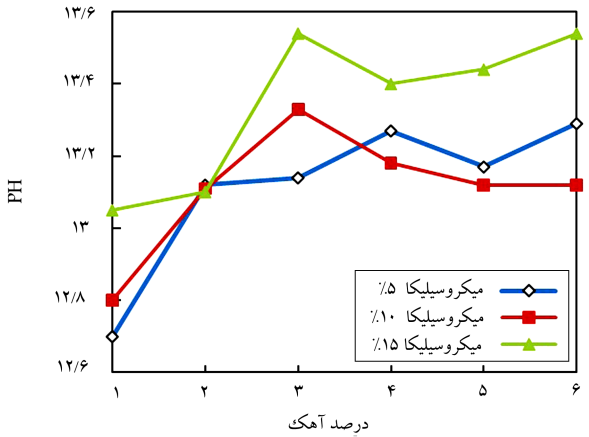
بر طبق نتایج به دست‌آمده مقدار PH در محدوده‌ی بین ۱۲٫۶۴ تا ۱۳٫۵۴ قرار می‌گیرد و این امر به معنی آن است که حضور میکروسیلیس و آهک می‌تواند به‌خوبی محیط را برای عملیات تثبیت مهیا سازد. از طرف دیگر، با توجه به همین موضوع می‌توان بیان کرد که ترکیب آهک و میکروسیلیس یک ترکیب بازی بسیار قوی است و برای تولید کانی هیدروسیلیکات‌کلسیم (C-S-H) ایده‌آل است.

نتایج حاصله نشان می‌دهند که با اضافه‌کردن ۵٪ میکروسیلیس و ۱٪ آهک، PH به مقدار ۱۲٫۷ می‌رسد. به‌طورکلی در میزان آهک ۳٪ برای درصدهای مختلف میکروسیلیس، نتایج خوبی حاصل شده است؛ به‌طوری که برای میکروسیلیس ۱۰٪ و ۱۵٪ بهترین نتایج در این مقدار آهک حاصل شده است. از آنجایی که مقدار PH در محدوده ۳٪ تا ۶٪ آهک تغییرات چندانی ندارد، می‌توان نتیجه‌گرفت که بیشترین مقاومت در این میزان آهک به‌دست می‌آید. اما مقدار بهینه‌ی آهک برای انجام واکنش‌های پوزولانی ۱٪ است.

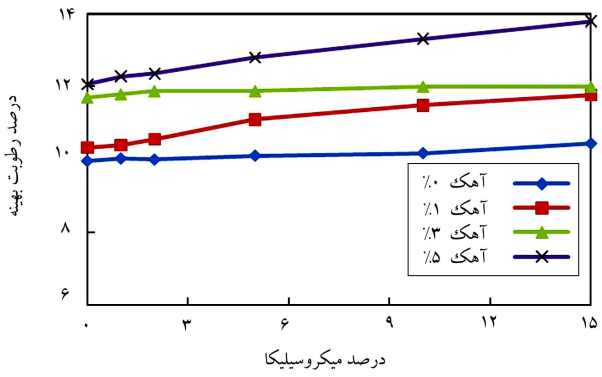
### ۲.۴. اثر افزودنی میکروسیلیس ـ آهک بر میزان رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک بیشینه

در شکل ۴، تغییرات درصد رطوبت بهینه و در شکل ۵، نیز تغییرات وزن مخصوص خشک بیشینه‌ی حاصل از آزمایش پروکتور اصلاح‌شده برای مخلوط‌ها نشان داده شده‌اند.

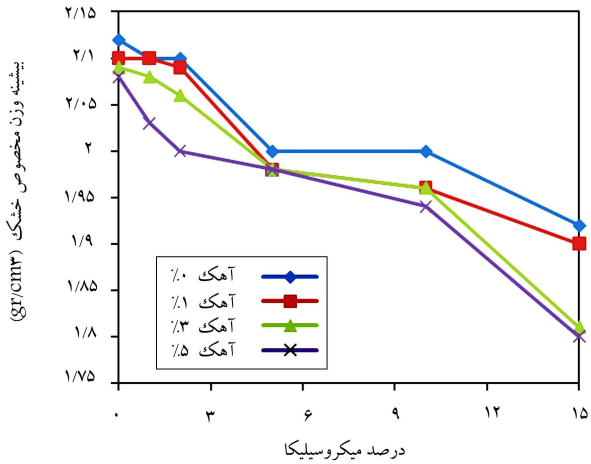
مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار میکروسیلیس و آهک در خاک ماسه‌ی سیلتی، درصد رطوبت بهینه افزایش و وزن مخصوص خشک بیشینه کاهش پیدا می‌کند. با توجه به شکل ۵، کمترین درصد رطوبت مربوط به نمونه‌ی خاک طبیعی (بدون افزودنی) و به میزان ۹٫۹۵٪ است و بیشترین میزان رطوبت در نمونه‌یی مشاهده می‌شود که بیشترین میزان افزودنی، یعنی ۱۵٪ میکروسیلیس و ۵٪ آهک، را دارد. بر اساس شکل ۵، بیشترین وزن مخصوص خشک بیشینه به میزان ۲٫۱۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب مربوط به نمونه‌ی خاک طبیعی (بدون افزودنی) و کمترین وزن مخصوص خشک به میزان ۱٫۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب نیز مربوط به نمونه‌ی



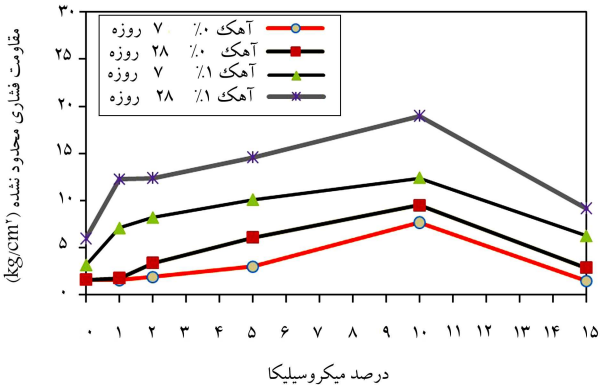

شکل ۳. اثر افزودنی میکروسیلیس ـ آهک بر تغییرات PH.




شکل ۴. اثر افزودنی میکروسیلیس ـ آهک در میزان رطوبت.




شکل ۵. اثر افزودنی میکروسیلیس ـ آهک در وزن مخصوص خشک بیشینه‌ی نمونه‌ها.




شکل ۶. تأثیر میکروسیلیس در مقاومت فشاری محدودنشده‌ی نمونه‌های خشک.

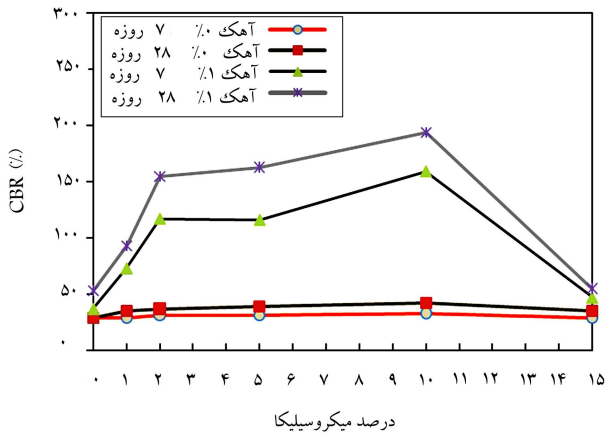
ساخته‌شده با ۱۵٪ میکروسیلیس و ۵٪ آهک است.

افزایش درصد رطوبت بهینه به دلیل نحوه‌ی توزیع ذرات، کاهش اندازه‌ی ذرات و افزایش سطح ویژه‌ی نمونه‌های تثبیت شده است.[۴،۱۱،۲۲و۲۳] از طرفی به دلیل چگالی پایین میکروسیلیس و آهک نسبت به خاک، اضافه‌کردن آن باعث کاهش وزن مخصوص خشک خاک شده است.[۱۱و۲۴]

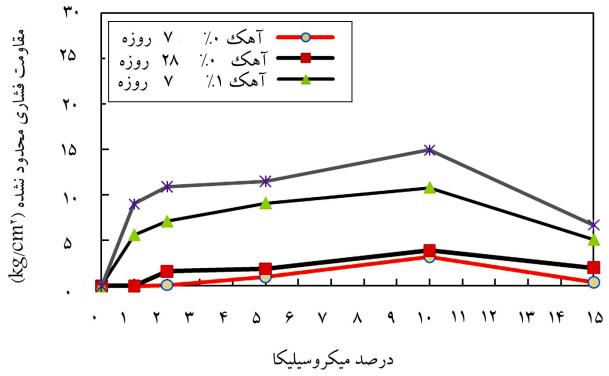
## ۳.۴. اثر میکروسیلیس بر مقاومت فشاری محدودنشده‌ی خشک

تأثیر اضافه‌کردن میکروسیلیس در مقاومت فشاری محدودنشده‌ی خشک نمونه‌های بدون آهک و نمونه‌های حاوی ۱٪ آهک در عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روزه در شکل ۶ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با اضافه‌کردن میکروسیلیس به خاک ماسه‌ی سیلیتی مقاومت فشاری آن افزایش پیدا کرده است. نتایج حاصله با نتایج دیگر پژوهشگران بر روی خاک رس، که نشان‌دهنده‌ی افزایش مقاومت رس در اثر اضافه‌کردن میکروسیلیس است، همخوانی دارد.[۸و۲۵]

بیشترین میزان مقاومت در شرایط خشک و اشباع در میزان ۱۰٪ میکروسیلیس به‌دست آمده است. اما با افزایش میزان میکروسیلیس به ۱۵٪، مقاومت نمونه‌ها افت پیدا می‌کند. در پژوهش‌های مشابهی که بر روی میکروسیلیس صورت گرفته است، سایر پژوهشگران نیز بیان داشته‌اند که میکروسیلیس دارای میزان بهینه‌یی برای اختلاط با خاک است.[۱۱و۱۳] این پدیده احتمالاً در اثر کاهش وزن مخصوص خشک




شکل ۷. اثر میکروسیلیس بر عدد CBR نمونه‌های خشک.




شکل ۸. تأثیر میکروسیلیس بر مقاومت فشاری محدودنشده‌ی نمونه‌های اشباع.

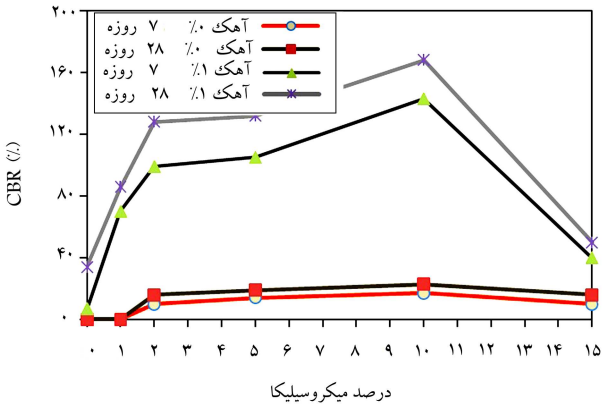
خاک در پی افزایش میکروسیلیس صورت می‌پذیرد. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که میزان بهینه‌ی میکروسیلیس برای رسیدن به بیشینه‌ی مقاومت در خاک ماسه‌ی سیلیتی ۱۰٪ است.

## ۴.۴. اثر میکروسیلیس بر عدد CBR

شکل ۷ نشان می‌دهد که اضافه‌کردن میکروسیلیس به طرز چشمگیری مقاومت CBR خاک را افزایش می‌دهد. مشابه آزمایش مقاومت فشاری محدودنشده‌ی عدد CBR با افزایش میکروسیلیس تا میزان ۱۰٪ افزایش پیدا می‌کند و سپس با افزایش میکروسیلیس به ۱۵٪ و کاهش وزن مخصوص نمونه‌ها، مقاومت CBR کاهش می‌یابد. نکته‌ی حائز اهمیت در نتایج به‌دست‌آمده این است که مقاومت CBR نمونه‌های حاوی ۱٪ میکروسیلیس و ۱٪ آهک به ۸۰ رسیده است. از آنجایی که خاک‌هایی که CBR بالاتر از ۵۰ دارند، برای استفاده در روسازی راه‌ها مناسب هستند؛ در نتیجه استفاده از میکروسیلیس در تثبیت ماسه‌های سیلیتی مناطق کویری در ایران، توجیه اقتصادی بسیار خوبی دارد.

## ۵.۴. تأثیر شرایط اشباع بر مقاومت فشاری محدودنشده و CBR

چنان‌که از مقایسه‌ی شکل‌های ۶ و ۸ دیده می‌شود، میزان افزایش مقاومت تک‌محوری نمونه‌های خشک در مقایسه با نمونه‌های اشباع، با افزایش درصد میکروسیلیس بیشتر است. در شکل ۸، تغییرات مقاومت فشاری محدودنشده‌ی اشباع نمونه‌هایی




**شکل ۹. تاثیر میکروسیلیس بر CBR نمونه‌های اشباع.**

که با درصدهای مختلف میکروسیلیس و با ۱٪ آهک و بدون آهک تثبیت شده‌اند، نشان داده شده است. شکل ۹، نیز تغییرات CBR این نمونه‌ها را نشان می‌دهد.

مقایسه‌ی شکل‌های ۶ الی ۹ نشان می‌دهد که بیشینه‌ی میزان کاهش مقاومت در اثر اشباع‌سازی نمونه‌هایی که با میکروسلیکا (حتی با درصد بسیارکم به میزان ۱٪) و ۱٪ آهک تثبیت شده‌اند، حدود ۲۵٪ است. در حالی که میزان کاهش مقاومت نمونه‌هایی که با درصدهای بسیار بالای میکروسیلیس (حتی بالای ۱۰٪) ولی بدون آهک تثبیت شده‌اند، بسیار زیاد (۱۰۰٪ و بیشتر) شده است. این امر ثابت می‌کند که میکروسیلیس به تنهایی تثبیت‌کننده‌ی مناسبی برای خاک مورد مطالعه نیست و به‌کارگیری مقدارکمی آهک برای رسیدن به مقاومت مورد نیاز، خصوصاً در شرایط اشباع، ضرورت دارد. همچنین مشاهده می‌شود نمونه‌هایی که در حضور آهک و با درصد بالای میکروسیلیس (۵٪ به بالا) تثبیت شده‌اند، میزان تفاوت مقاومت در دو حالت خشک و اشباع بسیارکم است. در مقابل، برای نمونه‌هایی که با مقادیر کمتر میکروسیلیس تثبیت شده‌اند (بین ۰ و ۲٪)، اختلاف مقاومت حالت خشک و اشباع بیشتر است. بنابراین هر چه درصد میکروسیلیس در نمونه‌ها بیشتر باشد، اختلاف مقاومت نمونه‌های اشباع با نمونه‌های خشک کمتر می‌شود. سه نمونه‌یی که کمترین اختلاف مقاومت حالت خشک و اشباع در آنها مشاهده شده است، همگی حاوی ۱۰٪ و ۱۵٪ میکروسیلیس بوده‌اند. دلیل این پدیده، ریزی ذرات میکروسیلیس و همچنین ساختمان کانی‌هایی است که از واکنش میکروسیلیس با آهک و آب پدید می‌آیند. مطابق مطالعات انجام‌شده با عکس‌برداری میکروسکوپ الکترونی که در ادامه مورد بررسی قرار خواهد گرفت، این کانی‌ها دارای ساختمان کریستالی هستند و به دلیل کاهش چشمگیر منافذ و حفره‌های خالی خاک، نفوذپذیری آن به‌طور چشمگیری کاهش پیدا می‌کند. به همین دلیل آب کمتری به داخل حفره‌های خاک راه پیدا می‌کند و احتمالاً این موضوع منجر به افزایش مقاومت نمونه‌های اشباع شده است.

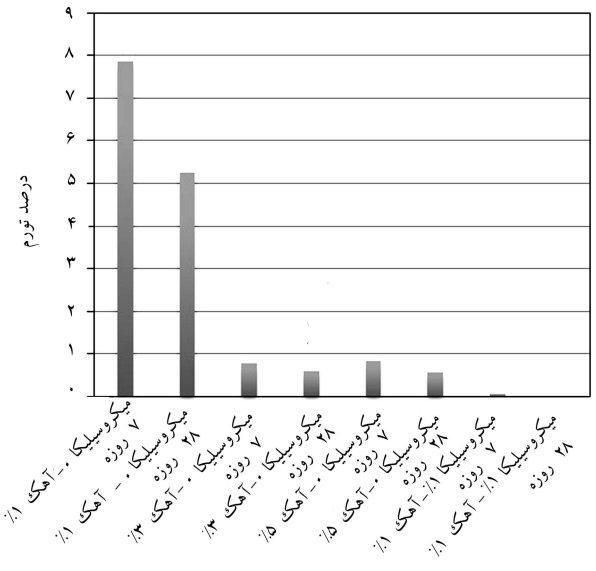
## ۶.۴. اثر زمان عمل‌آوری بر مقاومت فشاری

بر اساس نتایج نشان داده‌شده در شکل‌های ۶ الی ۹، همواره مقاومت نمونه‌های ۲۸ روزه از ۷ روزه بیشتر است؛ اما تقریباً ۷۰٪ مقاومت در ۷ روز اول عمل‌آوری حاصل شده است. دلیل این موضوع این است که سرعت واکنش‌های پوزولانی حاصل از میکروسیلیس در مقایسه با سایر پوزولان‌ها بیشتر است. و به همین علت بخش زیادی از سیلیس و آلومین درون مخلوط در ۷ روز اول وارد واکنش شده است و به هیدروسیلیکات‌کلسیم تبدیل می‌شوند. در نتیجه بعد از این زمان، به علت کمبود این مواد روند افزایش مقاومت نیز به کندی صورت می‌گیرد. اما روند افزایش مقاومت نمونه‌هایی که بدون میکروسیلیس و فقط با آهک تثبیت شده‌اند، متفاوت است؛ به‌طوری که این نمونه‌ها در ۷ روز اول تقریباً به نصف میزان بیشینه‌ی مقاومت نهایی خود رسیده‌اند. بنابراین، استفاده از میکروسیلیس برای تثبیت خاک مورد مطالعه باعث افزایش سرعت تثبیت می‌شود و این امر در عملیات راه‌سازی بسیار مهم است. نتیجه‌ی به‌دست‌آمده در این پژوهش با نتایج سایر پژوهشگران (۲۰۰۷) همخوانی دارد. آنها نشان دادند که در ماسه‌های بهبودیافته با میکروسیلیس و سیمان تقریباً ۸۰٪ مقاومت نهایی در ۷ روز اول حاصل می‌شود.[۱۵و۲۰]

## ۷.۴. اثر میکروسیلیس بر تورم

نتایج آزمایش‌های تورم، که بر روی نمونه‌های متعدد با درصدهای مختلف آهک و با ۱٪ میکروسیلیس و بدون میکروسیلیس تثبیت شدند، در شکل ۱۰ نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که میزان تورم نمونه‌های فاقد میکروسیلیس و تثبیت‌شده با فقط آهک، نسبتاً زیاد و بین ۱٪ تا ۷٪ متغیر است. اما استفاده از میکروسیلیس، باعث کاهش شدید میزان تورم می‌شود؛ به طوری که فقط با افزودن ۱٪ میکروسیلیس، به نمونه‌های فوق میزان تورم آن‌ها به صفر رسیده است. به طورکلی با اضافه‌کردن آهک به خاک، PH محیط افزایش پیدا می‌کند و این پدیده باعث آزادشدن آلومین و سیلیس موجود در خاک می‌شود و همچنین ذرات رس موجود در خاک نیز با افزایش PH محیط حل می‌شود و آلومین و سیلیس آزاد می‌کنند. از آنجایی که خاک مورد مطالعه، درصد قابل توجهی سولفات دارد؛ می‌توان گفت که عامل تورم در این نوع خاک، واکنش آلومین آزادشده با سولفات خاک است که باعث پدیدآمدن کانی اترینگایت می‌شود. اترینگایت یک کانی تورم‌زاست که در صورت وجود آب در محیط، قابلیت جذب آب بالایی دارد و پتانسیل تورم خاک را افزایش می‌دهد.

اگر فقط از آهک به‌عنوان تثبیت‌کننده‌ی خاک مورد مطالعه استفاده شود، به دلیل کمبود سیلیس در محیط، امکان تشکیل کانی اترینگایت وجود دارد؛ اما چنانچه علاوه‌بر آهک، میکروسیلیس نیز به خاک افزوده شود، هنگامی که PH مناسبی در محیط وجود داشته باشد، میکروسیلیس تبدیل به سیلیکای فعال می‌شود و می‌تواند



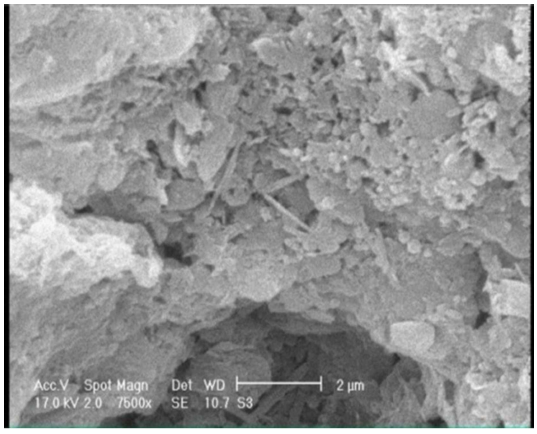

**شکل ۱۰. پتانسیل تورم نمونه‌های تثبیت‌شده با درصدهای مختلف میکروسیلیس و آهک.**

با کلسیم آزاد حاصل از آهک و آلومین موجود در محیط واکنش دهد. وجود کلسیم آزاد و آلومین در محیط باعث تشکیل اترینگایت می‌شوند که به این ترتیب این امکان از بین می‌رود. در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که بیشترین میزان تورم مربوط به حالتی است که ۱٪ آهک به تنهایی برای تثبیت استفاده شده است. اما پس از اضافه‌کردن ۱٪ میکروسیلیس به این نمونه و آزمایش مجدد، پتانسیل تورم کاملاً از بین رفته است. به این ترتیب می‌توان نتیجه گرفت که میکروسیلیس علاوه بر افزایش مقاومت، پتانسیل تورم‌زایی خاک‌های ماسه‌ی سیلتی سولفاته را بهبود می‌بخشد. با بررسی نتایج آزمایش تورم و همچنین آزمایش CBR نمونه‌ها می‌توان گفت که بین میزان تورم و مقاومت نمونه‌ها رابطه‌ی مستقیم وجود دارد و نمونه‌های با مقاومت کمتر، تورم بیشتری از خود نشان می‌دهند و احتمالاً دلیل کاهش تورم در نمونه‌های تثبیت‌شده با ۳٪ و ۵٪ آهک همین نکته است.

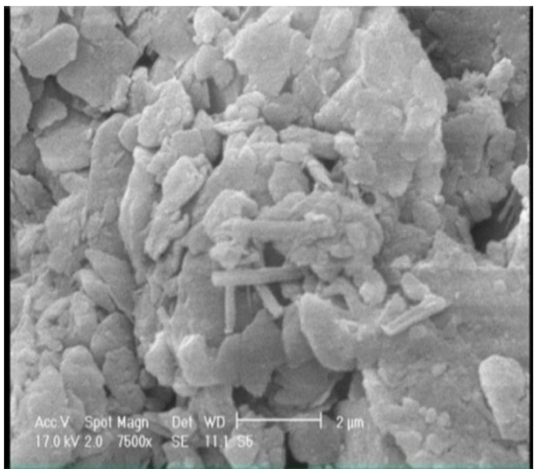
## ۵. بررسی تأثیر میکروسیلیکا بر روی ساختار نمونه‌های تثبیت با استفاده از عکس‌برداری میکروسکوپ الکترونی

برای بررسی بیشتر تأثیر میکروسیلیس بر روی ساختار و ساختمان خاک تثبیت‌شده‌ی دو نمونه از آن به‌وسیله‌ی میکروسکوپ الکترونی (SEM) مورد عکس‌برداری قرار گرفتند. یک نمونه با ۱٪ آهک و ۱٪ میکروسیلیس و یک نمونه هم بدون میکروسیلیس و با ۱٪ آهک بودند. نمونه‌ها پس از آماده‌سازی و اختلاط، در رطوبت بهینه متراکم شدند و در پوشش‌های پلاستیکی در شرایط عمل‌آوری خود قرار گرفتند. و پس از زمان عمل‌آوری، عکس‌برداری از آنها صورت گرفت. در شکل ۱۱، تصویر نمونه‌ی ساخته‌شده با ۱٪ میکروسیلیس و ۱٪ آهک مشاهده می‌شود؛ در این عکس ژل هیدروسیلیکات‌کلسیم دانه‌های سیلیت و ماسه را احاطه کرده است و تا حدودی خلل و فرج موجود در خاک را از بین برده است. مشاهده می‌شود که شکل کانی‌های ایجادشده کریستالی و گردگوشه شده است. ریزساختارها هر چقدر که به شکل کریستالی نزدیک شوند، افزایش مقاومت نمونه‌ی خاک را نشان می‌دهند و اگر شکل کانی‌های شکل‌گرفته به‌صورت گردگوشه باشد، نسبت به حالت کریستالی مقاومت کمتری دارند.

در شکل ۱۲، تصویر میکروسکوپ الکترونی نمونه‌ی بدون میکروسیلیس و ۱٪ آهک مشاهده می‌شود. شکل کانی‌های ایجادشده کروی است و خلل و فرج زیادی




**شکل ۱۱. تصویر عکس‌برداری الکترونی نمونه‌ی ۷ روزه بدون میکروسیلیس و ۱٪ آهک.**




**شکل ۱۲. تصویر عکس‌برداری الکترونی نمونه‌ی ۷ روزه بدون میکروسیلیس و ۱٪ آهک.**

در نمونه مشاهده می‌شود. به طور یقین، این نمونه نباید مقاومت بالایی خصوصاً در شرایط اشباع داشته باشد. با رجوع به نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری محدودنشده و CBR، به روشنی می‌توان صحت این موضوع را مشاهده کرد.

## ۶. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تثبیت شیمیایی یک نوع خاک مسئله‌دار (ماسه‌ی سیلیتی سولفاته) در کویر مرکزی ایران مورد مطالعه قرارگرفته است. نمونه‌های متعدد با درصدهای مختلف میکروسیلیس و آهک ساخته شدند و تحت آزمایش مقاومت فشاری محدودنشده، آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا و تورم قرارگرفتند. خلاصه‌ی نتایج حاصله به این شرح است:

- افزودنی میکروسیلیس ـ آهک ترکیب بازی بسیار قوی است و برای تولید کانی هیدروسیلیکات کلسیم (C-S-H) ایده‌آل است. همچنین، این ترکیب بازی قوی که PH خاک را به‌طور قابل ملاحظه افزایش می‌دهد؛ باعث افزایش سرعت واکنش‌های پوزولانی می‌شود.
- ترکیب میکروسیلیس با آهک اثر قابل ملاحظه‌یی در افزایش مقاومت فشاری محدودنشده و CBR دارد. به‌طوری که حتی با افزودن مقدار ناچیزی از میکروسیلیس و آهک (حدود ۱٪ از هرکدام)، CBR نمونه‌های اشباع به میزان ۸۰٪ افزایش پیدا کرد.
- در ابتدا افزودن میکروسیلیس، سبب افزایش مقاومت نمونه‌ها شد. این روند تا مقدار ۱۰٪ میکروسیلیس، ادامه یافت. اما با افزودن میکروسیلیس از ۱۰٪ به ۱۵٪، مقاومت نمونه‌ها به‌صورت چشمگیری کاهش یافت. این روند را می‌توان با کاهش وزن مخصوص نمونه‌ها در نتیجه افزودن میکروسیلیس توجیه کرد.
- نتایج عکس‌برداری الکترونی نشان داد که استفاده از ترکیب میکروسیلیس با آهک باعث تشکیل کانی‌هایی با ساختمان کریستالی می‌شود. این امر منجر به کاهش تخلخل می‌شود و عامل اصلی افزایش مقاومت نمونه‌های تثبیت‌شده با افزودنی میکروسیلیس ـ آهک است. در مقابل، در نمونه‌های تثبیت‌شده با آهک به تنهایی، به دلیل ساختمان کروی کانی‌های تشکیل‌شده، خلل و فرج نمونه‌ها

بیشتر می‌شود و مقاومت نسبت به حالت استفاده از افزودن توأمان میکروسیلیس و آهک، کاهش می‌یابد.

- تفاوت چشمگیری بین مقاومت خشک و اشباع نمونه‌هایی که برای تثبیت آنها از ترکیب میکروسیلیس با آهک استفاده شد، پدید نیامد. دلیل این امر می‌تواند در اثر ساختمان کریستالی کانی‌های جدید شکل‌گرفته درون خاک بعد از تثبیت باشد. در این حالت، تخلخل خاک کاهش می‌یابد و امکان نفوذ آب به داخل نمونه‌ها در شرایط اشباع بسیار کم می‌شود. در نتیجه کاهش قابل ملاحظه‌یی در مقاومت نمونه‌ها در شرایط اشباع پدید نمی‌آید.
- افزودن میکروسیلیس حتی به میزان ۱٪ به خوبی می‌تواند میزان تورم ناشی از انجام واکنش بین سولفات موجود در خاک ماسه‌ی سیلتی و آهک افزوده‌شده به آن را از بین ببرد.
- نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده از ۱٪ میکروسیلیس به همراه ۱٪ آهک، افزودنی بسیار مناسبی برای بهسازی خاک‌های مسئله‌دار ماسه‌ی سیلیتی سولفاته در کویر مرکزی ایران برای امر راه‌سازی است.

## پانوشت‌ها

1. California Bearing Ratio
2. Eadz & Grim

## منابع (References)


1. Edincliler, A., Baykal, G. and Dengili, K. "Determination of static and dynamic behavior of recycled materials for highways", *Resource, Conservation and Recycling,* **42**(3), pp. 223-237 (2004).
2. Abd El-Aziz, M., Abo-Hashema, M. and El-Shourbagy, M. "The effect of lime-silica fume stabilizer on engineering properties of clayey subgrade", 4th International Engineering Conference, Mansoura-Sharm El-Sheikh, Mansoura University, Egypt, paper No. 96 (2004).
3. Demir, I. and Baspinar, M.S. "Effect of silica sume and expanded perlite addition on the technical properties of the fly ash-lime-gypsum mixture", *Construction and Bulding Material*, **22**(6), pp. 1299-1304 (2008).
4. Kalkan, E. "Effect of silica fume on the geotechnical properties of fine-grained soils exposed to freeze and thaw", *Cold Regions Scince and Technology*, **58**(3), pp. 130-135 (2009).
5. Kaminskas, R. "The effect of pozzolana on the properties of the finest fraction of separated Portland cement, Part II", *Journal of Ceramics Silikaty*, **52**, pp. 183-189 (2008).
6. Akbulut, S. and Arasan, S. "The variations of cation exchange capacity, PH, and zeta potential in expansive soils treated by additives", *International Journal of Civil and Structural Engineering,* **1**, pp. 139-154 (2010).
7. Lin, R.B., Shih, S.M. and Liu, C.F. "Characteristics and reactivities of $Ca(OH)_2$/silica fume sorbents for low-temperature flue gas desulfurization", *Chemical Engineering Science*, **58**(16), pp. 3659-3668 (2003).
8. Tastan, E.O., Edil, T.B., Benson, C.H. and Aydilek, A.H. "Stabilization of organic soils with fly ash", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE,* **137**(9), pp. 819-833 (2011).
9. Makarchian, M. and Mirjafari, S.Y. "Effect of water content on the swelling of stabilized soil with microsilis and lime in presence of sulfate", 8th International Congress on Civil Engineering, Shiraz, Iran (2009) (in Persian).
10. Janalizadeh, A. and Bagherpour, I. "Stabilization of fine grain soils with adding microsilica in presence of lime or cement", 6th International Conference on Civil Engineering, Isfahan, Iran (2003) (in Persian).
11. Kalkan, E. and Akbulut, S. "The positive effects of silica fume on the permeability, swelling pressure and compressive strength of natural clay liners", *Engineering Geology*, **7**3(1-2), pp. 145-156 (2004).
12. Kalkan, E. "Influence os silica fume on the desiccation cracks of compacted clayey soils", *Applied Clay Science*, **43**, pp. 296-302 (2008).
13. Moussa, A., Baligh, F.E., Awad, T.A. and El-Rokh, A. "Sandy soil improvement using grouting", 12th International Colloquium on Structural and Geotechnical Engineering, Faculty of Engineering, Ain Shams University, Egypt (2007).
14. Makarchian, M. and Roshanomid, H. "The effect of gypsum on the clay stabilized with lime and silica fume", 2nd International Conference on Problemastic Soils, Malaysia (2006).
15. Tingle, K.S., Newman, J.K., Larson, S.L., Weiss, C.A. and Rushing, J.F. "Stabilization mechanisms of nontraditional additives", *Transportation Research Board (TRB)*, **1989**, pp. 59-67 (2007).
16. Kalkan, E. "Effects of waste materials-lime additive mixtures on mechanical properties of granular soils", *Bulleting of Engineering Geology and the Environment,* **71**(1), pp. 99-103 (2012).
17. Xu, Y. and Chung, D.D.L. "Improving silica fume cement by using silane", *Cement and Research*, **30**(8), pp. 1305-1311 (2000).
18. National Lime Association, Technical Brief: Mixture Design and Testing Procedures for Lime Stabilized Soil (2006).
19. Sivapullaiah, P.V., Katageri, B. and Herkal, R.N. "Behavior of California bearing ratio of soil-fly ash mixture without additions", 2nd International Conference on Problematic Soils, Malaysia, pp. 325-329 (2006).

20. Kavak, A. and Akyarh, A. "A field application for lime stabilization", *Environ. Geol.,* **51**(6), pp. 987-997 (2007).

21. William, A., Wild, S. and Richard, J.D. "Mechanisms by which ground granulated blast furnace slag prevents sulphate attack of lime-stabilized Kaolinite", *Cement and Concrete Research,* **29**(7), pp. 975-982 (1999).

22. Pera, J., Boumaza, R. and Ambroise, J. "Development of pozzolanic pigment from red mud", *Cement and Concrete Research,* **27**(10), pp. 1513-1522 (1997).

23. Yarbasi, N., Kalkan, E. and Akbulut, S. "Modification of freezing-thawing properties of granular soils with waste additives", *Cold Regions Science and Technology,* **48**, pp. 45-54 (2007).

24. Atom, M.F. and Al-Sharif, M.M. "Soil stabilization with burned olive waste", *Applied Clay Science*, **13**(3), pp. 219-230 (1998).

25. Ola, S.A. "Geotechnical properties and behavior of some stabilized Nigerian lateritic soils", *Quarterly Journal of Engineering Geology,* **11**, pp. 145-160 (1987).