



University Of Qom

Civil Infrastructure Researches

Journal of
Civil Infrastructure
Researches

Online ISSN: 2783-140X
journal homepage: <https://cer.qom.ac.ir/>



Effect of Magnesium Oxide and Lime on the Improvement a Clay Soil Contaminated with MTBE

Armin Ansar Shourijeh¹, Ali Raeesi Estabragh² , Mohadeseh Amini³

1. Faculty of Agricultural Engineering and Technology, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: arminansar@gmail.com
2. Corresponding author, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: raeesi@ut.ac.ir
3. Faculty of Agricultural Engineering and Technology, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: amini.mohadeseh@ut.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 25 Jun 2022
Revised 01 Sep 2022
Accepted 01 Sep 2022

Keywords:
Improvement,
MTBE,
MgO,
Lime.

ABSTRACT

In this study, the improvement a clay soil contaminated with MTBE (methyl tert-butyl ether) using magnesium oxide and hydrated lime was studied. Soil contaminated with MTBE was prepared in the laboratory, then mixed with different percentages of magnesium oxide and hydrated lime. Natural soil was also mixed with the same percentages used with the desired additives. Atterberg limits, compaction, Unconfined compressive strength, and SEM tests were performed on all samples. To determine the strength, the samples were prepared by static method and tested after 7, 14, and 28 days of curing time. The results showed that magnesium oxide and lime both increase the strength and E_{50} and thus improve the properties natural and contaminated soil, which are function of the percentage of used additives and curing time. The Comparison of improvement results showed that the final strength in natural soil is higher than in contaminated soil. In addition, the comparison of the results showed that lime has less effect on soil improvement compared to magnesium oxide. The SEM results also showed that the increase in strength is due to the cement materials produced during the carbonation process, which makes the particles paste to each other and causes a rigid body.

Cite this article: Ansar Shourijeh, Armin., Raeesi Estabragh, Ali., & Amini, Mohadeseh. (2023). Effect of Magnesium Oxide and Lime on the Improvement a Clay Soil Contaminated with MTBE. *Civil Infrastructure Researches*, 9(1), 29-45. <https://doi.org/10.22091/cer.2022.8328.1409>



Publisher: University of Qom.
© The Authors.

DOI: <https://doi.org/10.22091/cer.2022.8328.1409>

تأثیر دو ماده افزودنی منیزیم‌اکسید و آهک بر روی بهسازی یک خاک رسی آلوده به متیل ترت‌بوتیل‌اتر

آرمنین انصار شوریجه^۱, علی رئیسی استبرق^{۲*}, محدثه امینی^۳

۱. دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: arminansar@gmail.com
۲. نویسنده مسئول، استاد، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: raeesi@ut.ac.ir
۳. دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: amini.mohadeseh@ut.ac.ir

چکیده

در این پژوهش، خواص فیزیکی و مکانیکی یک خاک رسی آلوده به ماده آلی متیل ترت‌بوتیل‌اتر (MTBE) و امکان بهسازی آن با استفاده از دو ماده افزودنی منیزیم‌اکسید و آهک هیدراته مورد بررسی قرار گرفت. خاک رسی به صورت مصنوعی با MTBE آلوده گردید و مواد افزودنی منیزیم‌اکسید و آهک هیدراته در درصد های وزنی مختلف به خاک طبیعی و خاک آلوده اضافه شد. سپس آزمایش‌های فیزیکی و مکانیکی خاک شامل حدود اتربرگ، تراکم، مقاومت فشاری تکمحوری و میکروسکوپ الکترونی رویشی (SEM) روی نمونه‌های مختلف خاک صورت گرفت. جهت انجام آزمایش‌های مقاومتی، نمونه‌های آزمایشگاهی به روش تراکم استاتیکی تهیه شدند و مقاومت آنها در زمان‌های عمل آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روز تعیین شد. نتایج نشان داد که افزودن MTBE به خاک، منجر به کاهش حدود اتربرگ، پارامترهای تراکمی و مقاومت فشاری خاک در مقایسه با خاک طبیعی می‌شود. همچنین مشاهده شد که منیزیم‌اکسید و آهک هر دو سبب افزایش میزان مقاومت و مدول الاستیسیته مربوط به ۵۰٪ از مقاومت نهایی (E_{50}) و در نتیجه بهسازی خاک طبیعی و آلوده به MTBE می‌گرددند که این افزایش، تابعی از درصد مواد افزودنی مورد استفاده و زمان عمل آوری می‌باشد. علاوه بر این، مقایسه نتایج نمونه‌های بهسازی شده با یکدیگر نشان داد که مقاومت ایجاد شده در خاک طبیعی از خاک آلوده بیشتر می‌باشد و آهک تأثیر کمتری بر روی بهسازی خاک در مقایسه با منیزیم‌اکسید دارد. همچنین نتایج SEM نشان داد که افزایش مقاومت نمونه‌های بهسازی شده، در اثر تشکیل مواد سیمانی‌کننده طی عمل کربناتیون می‌باشد که این امر سبب چسباندن ذرات به یکدیگر و تولید یک جسم صلب می‌شود.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۰۴

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۶/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۱۰

کلیدواژه‌ها:
رس آلوده،
بهسازی،
متیل ترت‌بوتیل‌اتر،
منیزیم‌اکسید،
آهک.

استناد: انصار شوریجه، آرمنین؛ رئیسی استبرق، علی؛ و امینی، محدثه. (۱۴۰۲). تأثیر دو ماده افزودنی منیزیم‌اکسید و آهک بر روی بهسازی یک خاک رسی آلوده به متیل ترت‌بوتیل‌اتر. پژوهش‌های زیرساخت‌های عمرانی، ۹(۱)، ۲۹-۴۵.
<https://doi.org/10.22091/cer.2022.8328.1409>

۱- مقدمه

متیل ترت بوتیل اتر (MTBE)^۱ یک ماده هیدروکربنی اکسیژن دار است که به منظور بهبود احتراق مواد نفتی، به مواد مصرفی سوخت افزوده می شود تا موجب کاهش آلودگی هوا گردد. این ماده در بین سایر مواد اکسیژن دار بهبوددهنده احتراق، بیشترین استفاده و مقبولیت را به دلیل عدد اکتان بالا، هزینه های پایین تولید و سهولت اختلاط با مواد سوختی دارد [۴]. ماده MTBE به دلیل داشتن حلالیت بالا در آب، پس از ورود به محیط خاک می تواند به آسانی وارد سفره های آب زیرزمینی شده و آنها را آلوده سازد. این ماده، علاوه بر خطراتی که برای محیط زیست دارد، ماده ای سلطان زا نیز می باشد و در صورت وارد شدن به چرخه طبیعت مشکلات بسیاری را ایجاد می کند [۵ و ۶].

بهسازی خاک های رسی و آلوده معمولاً با استفاده از روش شیمیایی انجام می گردد. در روش شیمیایی یک سری مواد افزودنی مانند سیمان، آهک، خاکستر بادی و غیره با درصد های وزنی مشخص به خاک اضافه می شوند و با انجام یک سری واکنش های شیمیایی با خاک سبب بهسازی خاک می گرددند. در سال های اخیر، پژوهش های بسیاری در ارتباط با بهسازی خاک طبیعی و آلوده با استفاده از مواد افزودنی مختلف و مقایسه عملکرد مواد افزودنی با یکدیگر صورت گرفته است. به عنوان مثال، میزبانی و همکاران، برای بهسازی و تثبیت یک خاک رسی از سرباره کوره ذوب آهن، خاکستر بادی و دیاتومیت استفاده نمودند و دریافتند که سرباره در تثبیت خاک عملکرد بهتری نسبت به خاکستر بادی و دیاتومیت دارد [۷]. همچنین فانیکومار^۲ و همکاران، با انجام پژوهشی در خصوص بهسازی خاک آلوده به گازوئیل دریافتند که کاربرد برخی مواد افزودنی مانند خاک اره نه تنها سبب اصلاح خواص مکانیکی آنها می شود، بلکه در جذب مواد آلاینده موجود در خاک نیز موثر است [۸].

آلودگی، ورود هرگونه عنصر یا ترکیب شیمیایی به محیط است که در بلندمدت یا کوتاه مدت زندگی انسان و محیط زیست را به خطر می اندازد. آلاینده ها می توانند منشأهای گوناگونی داشته باشند، ولی به طور کلی، آلاینده ها به دو دسته آلی و غیرآلی تقسیم می شوند. از اواسط قرن هفدهم میلادی، در اثر رشد صنایع و معادن، میزان آلودگی گسترش پیدا کرده است. این آلاینده ها به دلیل مدیریت نادرست و ناکارآمد از راه های مختلفی وارد محیط زیست به ویژه خاک می شوند. حضور این آلاینده ها در محیط زیست می تواند مخاطرات بسیار زیادی را برای انسان و سایر موجودات به همراه داشته باشد. آلاینده ها می توانند از طریق نشت از فاضلاب ها، نشت از مخازن سوخت، رهاسازی زباله های خانگی و صنعتی در رودخانه ها و غیره وارد محیط زیست شوند. این ترکیبات شیمیایی با ورود به محیط خاک و حرکت درون منافذ آن در اثر نیروی ثقل، وارد سفره های آب زیرزمینی شده و علاوه بر آلودگی خاک، سبب آلوده شدن منابع آب زیرزمینی نیز می شوند [۱]. شایان ذکر است آلودگی خاک نه تنها مشکلاتی برای محیط زیست ایجاد می کند، بلکه خواص فیزیکی و مکانیکی خاک را نیز تغییر می دهد و با کاهش ظرفیت برابری خاک و نشست پی سبب بروز خسارت به سازه های بنا شده روی آنها می شود [۲]. احمدی و همکاران در سال ۲۰۲۱، خواص ژئوتکنیکی یک خاک ماسه- کائولینیتی آلوده به نفت خام را مورد تحقیق و بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که با افزایش درصد آلودگی خاک، وزن واحد حجم خشک بیشینه، درصد رطوبت بهینه، نفوذپذیری و pH خاک کاهش می یابد. آنها همچنین دریافتند که افزودن نفت خام به خاک حاوی درصد رس پایین، سبب کاهش زاویه اصطکاک و به خاک حاوی درصد رس بالا سبب افزایش این پارامتر می شود [۳].

^۱- Methyl Tert-Butyl Ether

^۲- Phanikumar

افزودنی منیزیم‌اکسید در تثبیت خاک‌ها، بهدلیل صرف انرژی کمتر حین تولید و ایجاد آلودگی بهمراتب کمتر نسبت به سیمان، برتری دارد [۱۴ و ۱۵]. همچنین منیزیم‌اکسید بهدلیل توانایی بالای آن در تبادل یونی و تثبیت آلاینده‌های مختلف، در تثبیت خاک‌های رسی استفاده می‌گردد [۱۶]. اینگار و التبا^۹ از مخلوط منیزیم‌اکسید بههمراه خاکستر بادی و ترکیب سیمان و خاکستر بادی، بهمنظور تثبیت در یک خاک رسی، استفاده نمودند. این پژوهشگران اعلام نمودند که ترکیب حاوی منیزیم‌اکسید بهمراتب کارایی بیشتری نسبت به ترکیب حاوی سیمان دارد [۱۷]. همچنین امینی و همکاران، مطالعاتی در خصوص بهسازی یک خاک رسی آلوده به ماده آلی فناوران با استفاده از ماده افزودنی منیزیم‌اکسید انجام دادند و اعلام کردند که ماده مذکور سبب بهسازی و تثبیت خاک آلوده به فناوران می‌شود [۱۸]. گودرزی و موحدراد نیز از سرباره کوره ذوب‌آهن (GGBS^{۱۰}) به‌منظور تثبیت یک خاک رسی آلوده به روی استفاده نمودند. نتایج پژوهش آنها نشان داد که GGBS فعال شده در تثبیت و جامدسازی مؤثرتر می‌باشد [۱۹].

در سال‌های اخیر، پژوهشگران بسیاری به بررسی تأثیر آلاینده‌های آلی بر روی خاک و بهسازی و پاکسازی آنها با استفاده از مواد افزودنی مختلف پرداختند. استبرق و همکاران در سال ۲۰۱۷، تثبیت و جامدسازی یک خاک رسی آلوده به MTBE را با افزودن سیمان و مخلوط سیمان و بنتونیت در درصدهای مختلف مورد آزمایش و بررسی قرار دادند. آنها اعلام نمودند که اگرچه هر دو ماده افزودنی به‌کار برده شده سبب افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ها می‌شود، لیکن در فرآیند آبشوبی تأثیر سیمان در کاهش غلظت آلاینده در مقایسه با ترکیب سیمان-

فرآیند بهسازی خاک با استفاده از آهک، مشابه سیمان می‌باشد و این ماده در توده خاک پس از ترکیب شدن با آب و انجام فرآیند هیدراتیون، با تولید مواد کلسیم‌سیلیکات‌هیدراته (CSH^۳) و کلسیم‌آلومینات‌هیدراته (CAH^۴)، ماده سیمانی‌کننده‌ای را تولید می‌کند که سبب بهبود خواص مکانیکی خاک می‌گردد. مقاومت ایجاد شده توسط آهک با مقدار ماده سیمانی‌کننده تولید شده و همچنین میزان درصد اختلاط این ماده افزودنی با خاک، رابطه مستقیم دارد. در واقع میزان آهک مورد استفاده می‌باشد با مقادیر رس موجود در خاک متناسب باشد. اینگلز^۵ گزارش کرد بهمنظور حصول نتیجه مطلوب، می‌باشد بهزاری هر یک درصد از کانی رسی موجود، ۱۰ درصد آهک به آن افزوده شود [۹]. همچنین پژوهشگرانی مانند شروود^۶، بل^۷ و بل و کولتارد^۸ از آهک برای بهسازی خاک‌های رسی استفاده نمودند [۱۰-۱۲].

پیش از این در پژوهش‌های بسیاری، از سیمان به‌عنوان ماده افزودنی بهمنظور بهسازی خاک‌های آلوده به آلاینده‌های شیمیایی استفاده شده است. لیکن سیمان دارای هزینه تولید نسبتاً زیادی می‌باشد و از طرفی در فرآیند تولید آن مقدار زیادی کربن‌دی‌اکسید وارد محیط می‌گردد که سبب آلوده شدن محیط‌زیست می‌شود. برای رفع مشکلات ذکر شده، پژوهشگران، منیزیم‌اکسید را به‌عنوان جایگزین مناسب برای سیمان معرفی نمودند. تولید این ماده نسبت به سیمان از لحاظ اقتصادی مقرن به‌صرفه‌تر بوده و همچنین انرژی کمتری برای تولید این ماده مورد نیاز است. از طرف دیگر، منیزیم‌اکسید در هنگام انجام واکنش‌های شیمیایی، مقداری کربن‌دی‌اکسید از محیط نیز جذب می‌کند [۱۳]. محققان دیگری نیز به این موضوع اشاره کردند که استفاده از ماده

^۳- Calcium Silicate Hydrate

^۴- Calcium Aluminate Hydrate

^۵- Ingles

^۶- Sherwood

^۷- Bell

^۸- Colthard

^۹- Ingar

^{۱۰}- Ground Granulated Blast Furnace Slag

آلوده به MTBE را مورد بررسی قرار دادند [۲۴]. با توجه به مطالب ذکر شده می‌توان نتیجه‌گیری کرد که بهسازی خاک آلوده به MTBE جهت حفاظت از محیط‌زیست و جلوگیری از نشت آن به منابع آب سطحی و زیرزمینی امری ضروری می‌باشد. همان‌طور که اشاره گردید، پژوهش در این زمینه بسیار محدود می‌باشد. بنابراین، در این تحقیق، بهسازی یک خاک رسی آلوده به MTBE با استفاده از مواد افزودنی منیزیم‌اکسید و آهک مورد بررسی قرار گرفت تا یک بانک اطلاعاتی از اثر مواد افزودنی مختلف بر روی بهسازی خاک رسی تهیه گردد و پژوهشگران با در نظر گرفتن ماده آلاینده و شرایط اقتصادی، بهترین ماده تثبیت‌کننده را انتخاب نمایند.

۲- مواد و روش‌ها

مواد اصلی مورد استفاده در این پژوهش خاک، MTBE، منیزیم‌اکسید، آهک و آب می‌باشد که در ادامه، خصوصیات هر کدام به صورت جداگانه بیان خواهد شد.

۱-۱- خاک

در این پژوهش، از خاک رسی موجود در آزمایشگاه استفاده گردید. خواص فیزیکی و مکانیکی خاک مورد استفاده براساس استاندارد ASTM تعیین شد. نتایج آزمایش دانه‌بندی این خاک براساس استاندارد-ASTM-D422-07 نشان داد که این خاک متتشکل از ۳ درصد ماسه، ۶۵ درصد سیلت و ۳۲ درصد رس می‌باشد. همچنین حد روانی (LL)، حد خمیری (PL) و شاخص خمیری (PI) آن براساس ۱۰-ASTM-D4318 به ترتیب برابر ۱/۵، ۳۱/۵ و ۱۸٪ تعیین شد. براساس نتایج حاصل از دانه‌بندی و حدود اتربرگ، خاک مذکور در سامانه طبقه‌بندی خاک به روش متحده (USCS) طبقه‌بندی گردید و مشخص شد که خاک از نوع رسی با پلاستیسیته پایین (CL) می‌باشد.

بنتونیت بسیار ناچیز می‌باشد [۲۰]. سبحانی‌نژاد و همکاران نیز، بهسازی یک خاک رسی آلوده به گازوئیل را با افزودن درصدهای مختلفی از آهک هیدراته، سیلیکا و ترکیب این دو ماده در درصدهای گوناگون مورد مطالعه و بررسی قرار دادند. نتایج پژوهش آنها نشان داد که ترکیب دو ماده افزودنی ذکر شده در بهسازی خاک مورد مطالعه بسیار مؤثرتر از اثر هریک از آنها به صورت جداگانه می‌باشد [۲۱]. علاوه‌بر این، حمیدی و حاجی‌محمدی، به بررسی اثر سیمان و آهک هیدراته در بهسازی نمونه‌هایی از یک خاک رسی که به صورت مصنوعی به دو ماده آلاینده آلی آنتراسن و گلیسرول آلوده شده بودند، پرداختند. آنها نتیجه‌گیری نمودند که چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک آلوده با افزایش درصد آلاینده کاهش می‌یابد. همچنین نتایج پژوهش آنها نشان داد که اگرچه دو ماده افزودنی به کار رفته سبب افزایش مقاومت و بهسازی هریک از خاک‌های آلوده می‌شود، لیکن سیمان در بهسازی خاک آلوده به آنتراسن و آهک در تثبیت خاک آلوده به گلیسرول برتری دارد [۲۲]. همچنین حمیدی و عبدالوس، به تعیین و اصلاح خواص مکانیکی یک خاک رسی آلوده به گلیسرول و آنتراسن با استفاده از افزودنی‌هایی مانند سیمان و آهک هیدراته و با انجام آزمایش‌هایی شامل تراکم اصلاح‌شده و نسبت باربری کالیفرنیا (CBR) مورد بررسی قرار دادند. نتایج پژوهش آنها نشان داد که تأثیر سیمان در بهبود خواص خاک آلوده به آنتراسن و گلیسرول بیشتر از آهک هیدراته می‌باشد [۲۳].

بررسی منابع نشان می‌دهد که در خصوص بهسازی خاک‌های رسی آلوده به MTBE پژوهش‌های زیادی صورت نپذیرفته است. در این زمینه فقط می‌توان به پژوهش استبرق و همکاران اشاره کرد که با افزودن سیمان، اقدام به بهسازی خاک رسی آلوده به MTBE نمودند [۲۰]. همچنین ایشان در پژوهشی دیگر، با استفاده از روش الکتروکینتیک، پاکسازی یک خاک رسی

سیلیسیم اکسید و ۰/۶٪ آلومینیوم اکسید می‌باشد. وزن مولکولی و وزن مخصوص آن به ترتیب برابر ۴۰/۳۰۴ و ۳/۵۵ گرم بر مول می‌باشد. همچنین میانگین اندازه ذرات و سطح ویژه آن نیز برابر (μm) ۶۰ و (m^2/g) ۳۰۰-۲۵۰ می‌باشد.

۴-۲-آهک

در این پژوهش، از آهک هیدراته به عنوان یکی از مواد ثبیت‌کننده، مورد استفاده قرار گرفت. آهک هیدراته به صورت بسته‌بندی از فروشنده محلی تهیه شد. براساس اطلاعات دریافت شده از تولید کننده، خواص آن به صورت خلاصه در جدول ۳ ارائه شده است.

۵-۲-آب

آب مورد استفاده در این پژوهش از نوع شرب بوده که دارای اسیدیته ۷/۷۶ و (dS/m) EC ۱/۲ می‌باشد. همچنین میزان غلظت یون کلر و یون‌های کلسیم و منیزیم در آن نیز به ترتیب برابر ۱/۷ و (meq/l) ۹/۱ اندازه‌گیری گردید.

جدول ۳- مشخصات آهک مورد استفاده

مقدار	مشخصه آهک
۸۸ (%)	حد روانی (LL)
۳۱ (%)	حد خمیری (PL)
۵۷ (%)	شاخص خمیری (PI)
۱۳ (%)	حد انقباض (SL)
۲/۷۶	G _s
۴۹ (%)	رس
۳۷ (%)	سیلت
۱۴ (%)	ماسه

۶-۲- تهیه خاک آلوده و نمونه‌های مقاومتی

پیش از انجام مراحل اصلی این پژوهش، به منظور تعیین بیشینه میزان ظرفیت خاک برای جذب MTBE آزمایش جذب انجام گردید و بیشینه میزان جذب این ماده توسط خاک، ۰/۹ گرم MTBE به ازای هر کیلوگرم خاک تعیین شد. همچنین به منظور آلوده‌سازی خاک،

نتایج آزمایش تراکم استاندارد انجام شده براساس استاندارد ۱۲ ASTM-D698 نیز نشان داد که رطوبت بهینه و وزن واحد حجم خشک بیشینه خاک به ترتیب برابر ۱۶/۱۷ درصد و ۱۸/۱۲ کیلونیوتن بر مترمکعب می‌باشد. ویژگی‌های شیمیایی خاک مورد نظر نیز تعیین شد که نتایج آن در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- مشخصات شیمیایی خاک طبیعی

مقدار	مشخصه شیمیایی
۷/۹۶	pH
(dS/m) ۲/۶۲	EC
(meq/l) ۶/۸	SO ₄ ²⁻
(meq/l) ۱۰	Cl ⁻
(meq/l) ۱۲/۵	HCO ₃ ⁻
(meq/l) ۹/۸۹	Na ⁺
(meq/l) ۱۷/۱	Ca ⁺
(meq/l) ۰/۹۵	Mg ²⁺

MTBE -۲-۲

در پژوهش حاضر، به منظور آلوده کردن خاک از MTBE که از تولیدات شرکت مرک آلمان است، استفاده گردید. براساس اطلاعات اخذ شده از شرکت مذکور، بخشی از خواص فیزیکی و شیمیایی آن ماده در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲- مشخصات MTBE مورد استفاده

مقدار	مشخصه
C ₅ H ₁₂ O	فرمول شیمیایی
۵۵/۲	نقطه جوش (°C)
-۱۰۹	نقطه ذوب (°C)
۸۸/۱۵	جرم مولکولی (g/mol)
۰/۷۴	چگالی (g/cm ³)
۵۱/۲۶	حلایلت در آب (mg/l)
مایع بی‌رنگ	شکل ظاهری

۳-۲- منیزیم اکسید

منیزیم اکسید مورد استفاده از نوع تجاری می‌باشد که از شرکت شیمی دارویی نوترون تهیه گردید. این ماده شامل ۰/۸۵٪ منیزیم اکسید، ۱/۷٪ کلسیم اکسید، ۰/۹۴٪ منیزیم اکسید،

بارگذاری تکمحوری (شکل ۱-الف) با سرعت $1/5$ mm/min (mm/min) متراکم گردید. برای تهیه نمونه‌های حاوی مواد افزودنی نیز به خاک طبیعی و آلوده، منیزیم‌اکسید (با درصد های وزنی $0,0/25$ ، $0,0/25$ ، $0,0/25$ ، $0,0/25$ ، $0,0/25$ و $0,0/25$) و آهک (با درصد های وزنی $2/5$ ، 5 و 10) اضافه گردید، سپس آزمایش‌های حدود اتربرگ و تراکم استاندارد بر روی این مخلوط‌ها صورت پذیرفت. همچنین پس از انجام این آزمایش‌ها، نمونه‌های لازم برای انجام آزمایش تعیین مقاومت فشاری تکمحوری به شیوه ذکر شده تهیه شدند و نمونه‌ها همانند شکل ۱-ب در محفظه مخصوصی که دارای دمای ثابت 25 درجه سانتی‌گراد با رطوبت نسبی 90% در زمان‌های 7 ، 14 و 28 روز نگهداری شدند و پس از گذشت زمان عمل‌آوری، نمونه‌ها به‌منظور تعیین مقاومت تحت بارگذاری قرار گرفتند.

۷-۲-روش انجام آزمایش‌ها

در این پژوهش، آزمایش‌هایی شامل حدود اتربرگ، تراکم، مقاومت فشاری تکمحوری براساس استانداردهای ASTM صورت پذیرفت. آزمایش مقاومت فشاری تکمحوری براساس استاندارد ASTM-D1633-00 و بهروش کرنش کنترل‌شونده انجام گردید. در آزمایش تعیین مقاومت، نمونه‌ها تحت تأثیر بارگذاری با سرعت 1 تا لحظه گسیختگی قرار گرفتند.



(ب)

شکل ۱- (الف) دستگاه بارگذاری تکمحوری مورد استفاده و (ب) نمونه‌های قرار گرفته درون محفظه مخصوص

مقدار $2/5$ برابر این ماده به خاک طبیعی اضافه گردید. در این مرحله، مقدار وزنی از آلاینده مورد استفاده با آب مخلوط گردید و سپس به صورت اسپری به خاک اضافه شد. شایان ذکر است به‌منظور کمینه کردن تأثیر رطوبت بر نتایج آزمایش، میزان آب مصرفی برابر با حداقل میزان حلایت MTBE در آب یعنی $51/26$ g/l در نظر گرفته شد. پس از آلوده کردن خاک، مخلوط مذکور به مدت 24 ساعت درون کیسه‌های نایلونی مسدود شده نگهداری گردید تا فرآیند جذب و عمل متقابل بین خاک و آلاینده تکمیل گردد. لازم به ذکر است انتخاب زمان تماس آلاینده با خاک براساس نتایج پژوهش تابع بردار و همکاران صورت گرفته است [۲۵]. جهت ارزیابی اثر آلاینده بر خواص فیزیکی و مکانیکی خاک، آزمایش‌هایی شامل حدود اتربرگ، تراکم و مقاومت فشاری تکمحوری بر روی نمونه‌ها انجام شد. برای انجام آزمایش مقاومت فشاری تکمحوری، نمونه‌هایی از خاک آلوده به‌روش تراکم استاتیکی که دارای قطر و ارتفاع 50 و 100 میلی‌متر بودند، تهیه گردید. وزن واحد حجم و رطوبت نمونه‌های تهیه شده برابر با وزن واحد حجم خشک بیشینه و رطوبت بهینه حاصل از نتایج آزمایش تراکم استاندارد نمونه مورد نظر می‌باشد. برای تهیه نمونه‌ها، نمونه‌های خاک درون قالب مخصوصی در سه لایه ریخته شد [۲۶ و ۲۷]. سپس تحت تأثیر نیروی مشخصی که پیش از آن با سعی و خطای هر کدام از نمونه‌ها تعیین شده بود، توسط دستگاه



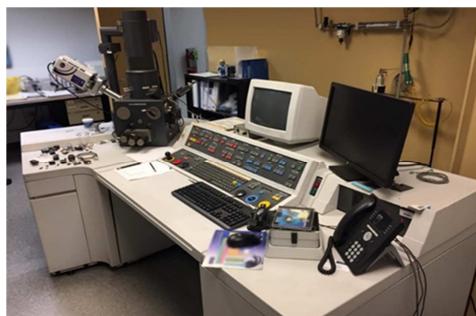
(الف)

از آنیون‌ها و کاتیون‌ها می‌باشد، وجود دارد. افزودن آب به خاک رسی موجب می‌گردد که این رسوبات در آب حل شوند و یون‌ها به صورت محلول در بیایند. عموماً غلظت کاتیون‌ها در اطراف ذره رس، حداکثر است و با افزایش فاصله از آن، غلظت کاتیون‌ها و آنیون‌ها به ترتیب کاهش و افزایش می‌یابد. در نتیجه، یون‌ها در اطراف ذره رسی توزیع می‌شوند. این سیستم توزیع بار الکتریکی تولید شده در اطراف ذره رس بر اثر افزودن آب تحت عنوان لایه مضاعف دوگانه نامیده می‌شود. تعیین افزایش یا کاهش ضخامت این لایه در پیدایش ساختار خاک و خواص مکانیکی آن بسیار حائز اهمیت می‌باشد [۲۸].

۲-۳- آزمایش حدود اتربرگ

همان گونه که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، مقادیر LL، PL و PI برای خاک طبیعی به ترتیب برابر با ۳۱/۵، ۱۳/۵ و ۱۸ درصد می‌باشد و افزودن MTBE به خاک سبب کاهش حدود اتربرگ شده است. از آنجاکه ضریب ثابت دیالکتریک محلول MTBE استفاده شده در این پژوهش کمتر از آب معمولی می‌باشد، این امر سبب کاهش ضخامت لایه مضاعف، چسبیدن ذرات به یکدیگر و در نتیجه، کاهش سطح ویژه ذرات در مقایسه با خاک طبیعی می‌شود که این تغییرات، حدود اتربرگ خاک آلوده را در مقایسه با خاک طبیعی کاهش می‌دهد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که اضافه نمودن منیزیم‌اکسید به خاک سبب افزایش مقادیر حدود اتربرگ نسبت به خاک طبیعی می‌شود که این افزایش تابعی از درصد منیزیم‌اکسید مورد استفاده می‌باشد. به عنوان مثال، با افزودن ۵٪ منیزیم‌اکسید حد روانی از ۳۱/۵٪ (خاک طبیعی) به ۳۹٪ و حد خمیری از ۱۳/۵٪ (خاک طبیعی) به ۲۲٪ تغییر پیدا کرده است که با افزایش میزان منیزیم‌اکسید مصرفی به ۲۰٪، این مقادیر به ترتیب برابر ۴۴ و ۲۴/۵ درصد شده است. سطح ویژه منیزیم‌اکسید در حدود (m²/g) ۲۵۰-۳۰۰ می‌باشد که در مقایسه با خاک طبیعی عدد بزرگی است. بنابراین این ماده قدرت جذب

در طول بارگذاری، تغییرات گیج نیرو و تغییر طول قرائت شد و پس از آن میزان تنفس و کرنش هریک از نمونه‌ها محاسبه گردید. شایان ذکر است میزان مقاومت نمونه‌ها در نقطه گسیختگی، به عنوان مقاومت فشاری نهایی آنها در نظر گرفته شد. همچنین به منظور مشخص شدن تأثیر آلاینده و ماده افزودنی بر روی ریزساختار خاک، عکس‌برداری میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM^{۱۱}) از نمونه‌های مختلف خاک و در زمان‌های عمل آوری متفاوت صورت پذیرفت. این نمونه‌ها پس از خرد شدن بر روی پایه‌های مخصوص قرار گرفتند و پس از لایه‌نشانی طلا به روش کندوپاش از آنها عکس‌برداری شد (شکل ۲).



شکل ۲- دستگاه SEM مورد استفاده

۳- نتایج و بحث

با توجه به اهمیت لایه مضاعف دوگانه در سطح رس، لازم است قبل از بیان کردن نتایج و بحث در مورد آنها، تئوری این لایه به صورت خلاصه بیان شود.

۱-۳- لایه مضاعف دوگانه

سطح ذرات رس در حالت خشک یا مرطوب از نظر بار الکتریکی خنثی نبوده و حامل بار الکتریکی منفی می‌باشند، بنابراین می‌توانند کاتیون‌های موجود اطراف خود را جذب نمایند. از طرفی کاتیون‌های مورد نیاز جهت خنثی نمودن بار الکتریکی ذرات و ایجاد تعادل الکتریکی در رسوبات نمکی موجود در فضای بین ذرات، که ترکیبی

^{۱۱}- Scanning Electron Microscope

آهک (۴۹٪) بیشتر از درصد آن در خاک طبیعی (۳۲٪) می‌باشد. این امر نشان می‌دهد که اضافه نمودن آهک و جایگزین نمودن آن با درصدی از خاک در حجم ثابت، سبب افزایش ذرات با سطح ویژه بیشتر می‌شود که این امر حدود اتربرگ را تغییر می‌دهد. شایان ذکر است این تغییرات متناسب با میزان درصد آهک افزودنی است.

۳-۳- آزمایش تراکم استاندارد

شکل ۳، متحنی‌های تراکمی نمونه‌های خاک معمولی و خاک آلوده به MTBE را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، مقادیر وزن واحد حجم خشک بیشینه و رطوبت بهینه برای خاک طبیعی برابر با $18/1$ و $16/2$ درصد به دست آمده است که این مقادیر برای خاک آلوده برابر با $17/6$ و $15/3$ درصد می‌باشد. به عبارت دیگر، افزودن MTBE سبب کاهش هر دو پارامتر تراکمی شده است.

همان‌طور که بیان شد، افزودن MTBE به خاک سبب افزایش درجه فلوکولاسیون، چسبیدن ذرات به یکدیگر، کاهش سطح ویژه و در نتیجه، کاهش درصد رطوبت بهینه خاک می‌شود. از طرف دیگر، اتصال و پیوند ذرات به یکدیگر در این حالت موجب می‌گردد تا فضاهای بیشتری در توده خاک آلوده نسبت به خاک طبیعی ایجاد شود که این اتصالات در برابر انرژی تراکمی اعمال شده مقاوم می‌باشند. در نتیجه، این امر موجب می‌گردد که در حجم ثابت، خاک آلوده دارای تخلخل بیشتری در مقایسه با خاک طبیعی داشته باشد که این موضوع کاهش وزن واحد حجم خشک بیشینه خاک آلوده را در پی خواهد داشت.

جدول‌های ۴ و ۵ تغییرات وزن واحد حجم خشک بیشینه و رطوبت بهینه به دست آمده از آزمایش تراکم استاندارد نمونه‌های خاک طبیعی و خاک آلوده اختلاط‌یافته با درصدهای مختلف مواد افزودنی منیزیم اکسید و آهک را نشان می‌دهد. در جدول ۴

آب زیادی را از خود نشان می‌دهد و سبب افزایش حدود اتربرگ می‌گردد. بنابراین اختلاط آن با خاک سبب جذب آب شده و با افزایش درصد ماده افزودنی، مقدار آب جذب شده و در نتیجه میزان LL و PL افزایش یافته است. این نتایج با یافته‌های گزارش شده توسط لیسکا و واندپر^{۱۲} و استبرق و همکاران مطابقت دارد [۲۹ و ۳۰]. همچنین مشاهده می‌گردد که تغییرات LL و PL خاک آلوده حاوی ماده افزودنی، مشابه تغییرات حدود اتربرگ خاک طبیعی اختلاط‌یافته با منیزیم اکسید است.علاوه بر این، مقایسه نتایج مندرج شده در جدول ۴ نشان می‌دهد که مقادیر حدود اتربرگ در خاک آلوده حاوی منیزیم اکسید کمتر از خاک طبیعی اختلاط‌یافته با منیزیم اکسید است. به عنوان مثال در نمونه حاوی ۱۰ درصد منیزیم اکسید، مقدار LL و PL برای خاک طبیعی به ترتیب برابر ۴۲ و ۲۳٪ می‌باشد، که این مقادیر در خاک آلوده به ترتیب به ۳۸ و ۲۲ درصد رسیده است. علت این پدیده را می‌توان در افزودن MTBE به خاک مرتبط دانست. افزودن این ماده به خاک موجب می‌گردد تا ساختمان خاک درجه فلوکولاسیون بیشتری نسبت به خاک طبیعی پیدا کند، که تصاویر SEM شکل ۸ مؤید این موضوع می‌باشد. بنابراین در این حالت چسبندگی بین ذرات بیشتر از خاک طبیعی بوده و قدرت جذب آب به علت کاهش سطح ویژه، کاهش می‌یابد و در نتیجه سبب کاهش مقادیر LL و PL می‌شود.

نتایج آزمایش حدود اتربرگ نمونه‌های اختلاط‌یافته با آهک در جدول ۵ آورده شده است. با توجه به جدول ۵ مشاهده می‌گردد که با افزودن آهک به خاک طبیعی و آلوده، LL همانند منیزیم اکسید، روندی افزایشی داشته، در حالی که، PL روند نزولی در پیش گرفته است که به سبب آن، PI نیز افزایش پیدا کرده است. همان‌طور که در جدول ۳ نشان داده شده است، درصد رس تشکیل دهنده

¹²- Liska and Vandeperre

واحد حجم خشک بیشینه و رطوبت بهینه به ترتیب برابر $16/34$ و 20 درصد می‌باشد که این مقادیر در مقایسه با خاک طبیعی به ترتیب کاهش و افزایش داشته است.

مشاهده می‌گردد که افزودن منیزیم‌اکسید به خاک طبیعی و خاک آلوده سبب کاهش وزن واحد حجم خشک بیشینه و افزایش رطوبت بهینه می‌گردد. به عنوان مثال، با افزودن 20% منیزیم‌اکسید به خاک طبیعی، مقادیر وزن

جدول ۴- مقادیر حدود اتربرگ و ویژگی‌های تراکمی نمونه‌های حاوی منیزیم‌اکسید

ویژگی‌های تراکمی	حدود اتربرگ					منیزیم‌اکسید (%)	MTBE	خاک (%)
وزن واحد حجم خشک بیشینه (kN/m^3)	رطوبت بهینه (%)	نشانه خمیری (%)	حد خمیری (%)	حد روانی (%)				
۱۸/۱۲	۱۶/۱۷	۱۸	۱۳/۵	۳۱/۵	صفر	-	۱۰۰	
۱۷/۶۲	۱۵/۳	۱۸	۱۲	۳۰	صفر	✓	۱۰۰	
۱۸/۰۳	۱۶/۲۶	۱۸	۱۴	۳۲	۰/۱۲۵	-	۹۹/۸۷۵	
۱۷/۹۲	۱۶/۴۳	۱۸/۵	۱۴/۵	۳۳	۰/۲۵	-	۹۹/۷۵	
۱۷/۸۴	۱۶/۵۱	۲۰	۱۵	۳۵	۰/۵	-	۹۹/۵	
۱۷/۴	۱۶/۹	۱۷	۲۲	۳۹	۵	-	۹۵	
۱۶/۹	۱۷/۹۷	۱۹	۲۳	۴۲	۱۰	-	۹۰	
۱۶/۳۴	۲۰	۱۹/۵	۲۴/۵	۴۴	۲۰	-	۸۰	
۱۷/۴۲	۱۵/۳۵	۱۷/۷	۱۲/۸	۳۰/۵	۰/۱۲۵	✓	۹۹/۸۷۵	
۱۷/۳۴	۱۵/۴۲	۱۷	۱۴	۳۱	۰/۲۵	✓	۹۹/۷۵	
۱۷/۲۸	۱۵/۶۸	۱۶,۹	۱۴/۸	۳۱/۷	۰/۵	✓	۹۹/۵	
۱۷/۸۵	۱۷/۸۵	۱۵/۷	۲۱	۳۶/۷	۵	✓	۹۵	
۱۶/۷	۱۸/۳۳	۱۶	۲۲	۳۸	۱۰	✓	۹۰	
۱۶/۱	۱۸/۹	۱۷	۲۳	۴۰	۲۰	✓	۸۰	

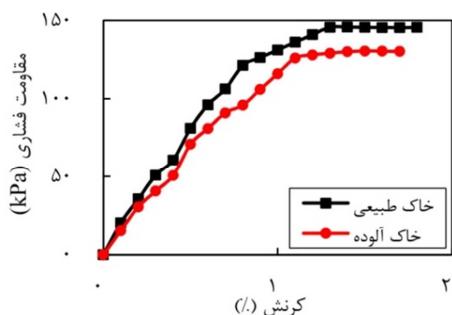
جدول ۵- مقادیر حدود اتربرگ و ویژگی‌های تراکمی نمونه‌های حاوی آهک

ویژگی‌های تراکمی	حدود اتربرگ					آهک (%)	MTBE	خاک (%)
وزن واحد حجم خشک بیشینه (kN/m^3)	رطوبت بهینه (%)	نشانه خمیری (%)	حد خمیری (%)	حد روانی (%)				
۱۸/۱۲	۱۶/۱۷	۱۸	۱۳/۵	۳۱/۵	صفر	-	۱۰۰	
۱۷/۶۲	۱۵/۳	۱۸	۱۲	۳۰	صفر	✓	۱۰۰	
۱۷/۶۹	۱۸	۲۱	۱۳	۳۴	۲/۵	-	۹۷/۵	
۱۷/۳۹	۱۸/۹	۲۳	۱۲	۳۵	۵	-	۹۵	
۱۷/۱۳	۲۰/۳۱	۲۴/۵	۱۱/۵	۳۶	۱۰	-	۹۰	
۱۶/۸۴	۱۷/۶	۱۹	۱۳	۳۲	۲/۵	✓	۹۷/۵	
۱۶/۵	۱۸/۵	۲۰/۵	۱۳/۹	۳۴/۴	۵	✓	۹۵	
۱۶/۱۱	۱۹/۸۱	۲۱	۱۴	۳۵	۱۰	✓	۹۰	

منیزیم‌اکسید مانند یک خاک رسی عمل کرده و با اعمال انرژی تراکمی، این انرژی مستهلك و به مایع منفذی وارد می‌شود که در این حالت امکان جابه‌جایی ذرات وجود ندارد. این پدیده با افزایش فضای بین ذرات و تجمع آب در این فضاهای همچنین با افزایش درصد منیزیم‌اکسید،

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، منیزیم‌اکسید دارای سطح ویژه بالایی می‌باشد، بنابراین قدرت جذب آب این ماده زیاد است که این امر در افزایش درصد رطوبت بهینه مؤثر است. همچنین از آنجاکه متوسط اندازه ذرات منیزیم‌اکسید برابر با 60 میکرومتر است، بنابراین

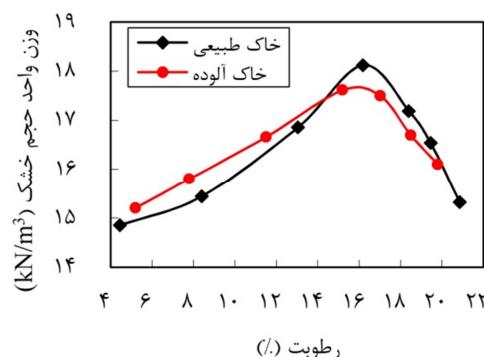
طبیعی از ۱۴۵/۷ به ۱۳۰/۲ کیلوپاسکال در خاک آلوده می‌گردد (شکل ۴). همانگونه که پیشتر بیان شد، افزودن MTBE به خاک سبب کاهش ضخامت لایه مضاعف خاک می‌شود. این کاهش بهدلیل کمتر بودن ضریب ثابت دیالکتریک این ماده (۲/۶) نسبت به آب (۸۰) اتفاق می‌افتد. کاهش ضخامت لایه مضاعف سبب فلوكوله شدن ذرات خاک می‌شود. با فلوكوله شدن ذرات خاک، اصطکاک بین ذرات افزایش می‌یابد و در نتیجه، سبب افزایش مقاومت فشاری خاک می‌شود. لیکن برخلاف انتظار، همانگونه که در شکل ۴ مشاهده می‌گردد، میزان مقاومت فشاری تکمحوری نمونه خاک آلوده در مقایسه با مقاومت نمونه خاک طبیعی کاهش داشته است.



شکل ۴- منحنی‌های تنیش- کرنش نمونه‌های خاک طبیعی و خاک آلوده

دلیل این پدیده را می‌توان در گرانروی MTBE جست‌وجو کرد. از آنجا که MTBE دارای گرانروی بیشتری نسبت به آب می‌باشد، این امر سبب افزایش روان‌کاری و کاهش اصطکاک بین ذرات می‌شود. همین پدیده سبب می‌شود تا ذرات در اثر نیروی وارد شده، راحت‌تر بر روی یکدیگر بلغزند و در نتیجه سبب کاهش مقاومت نمونه خاک شوند. این نتایج با نتایج بهدهست آمده توسط راتناوارا و میگودا^{۱۳} و همکاران مطابقت دارد [۲۹ و ۳۲]. شکل‌های ۵ و ۶ با توجه به مقاومت فشاری نهایی نمونه‌ها در نقطه گسیختگی و با توجه به درصد اختلاط ماده افزودنی و زمان عمل‌آوری بهدهست

افزایش می‌یابد که سبب کاهش وزن واحد حجم خشک بیشینه و افزایش درصد رطوبت بهینه خاک می‌گردد.



شکل ۳- منحنی‌های تراکمی خاک طبیعی و خاک آلوده

این یافته‌ها با نتایج ارائه شده توسط واندپر و همکاران و استبرق و همکاران مطابقت دارد [۲۹ و ۳۱]. شایان ذکر است این روند تغییرات برای خاک آلوده حاوی منیزیم‌اکسید نیز مشاهده می‌شود، بهطوری که مقدار وزن واحد حجم خشک بیشینه و رطوبت بهینه نمونه خاک آلوده اختلاط‌یافته با ۰.۲۰٪ منیزیم‌اکسید به ترتیب به مقادیر (۱۶/۱ kN/m³ و ۱۸/۹ درصد می‌رسد. بررسی و مقایسه نتایج مندرج شده در جدول ۵ نیز نشان‌دهنده کاهش وزن واحد حجم خشک بیشینه و افزایش رطوبت بهینه نمونه‌های خاک طبیعی و آلوده حاوی ماده افزودنی آهک در مقایسه با نمونه‌های خاک طبیعی و آلوده (بدون ماده افزودنی) می‌باشد که این تغییرات با افزایش درصد ماده افزونی بیشتر شده است. علت این امر آن است که افزودن آهک سبب فلوكوله شدن ذرات خاک و در نتیجه، تشکیل پیوندهایی در این ساختار می‌گردد که با افزایش تخلخل خاک سبب کاهش وزن واحد حجم خشک بیشینه خاک می‌شود. شایان ذکر است این تغییرات با درصد ماده افزودنی آهک به خاک نسبت معکوس دارد.

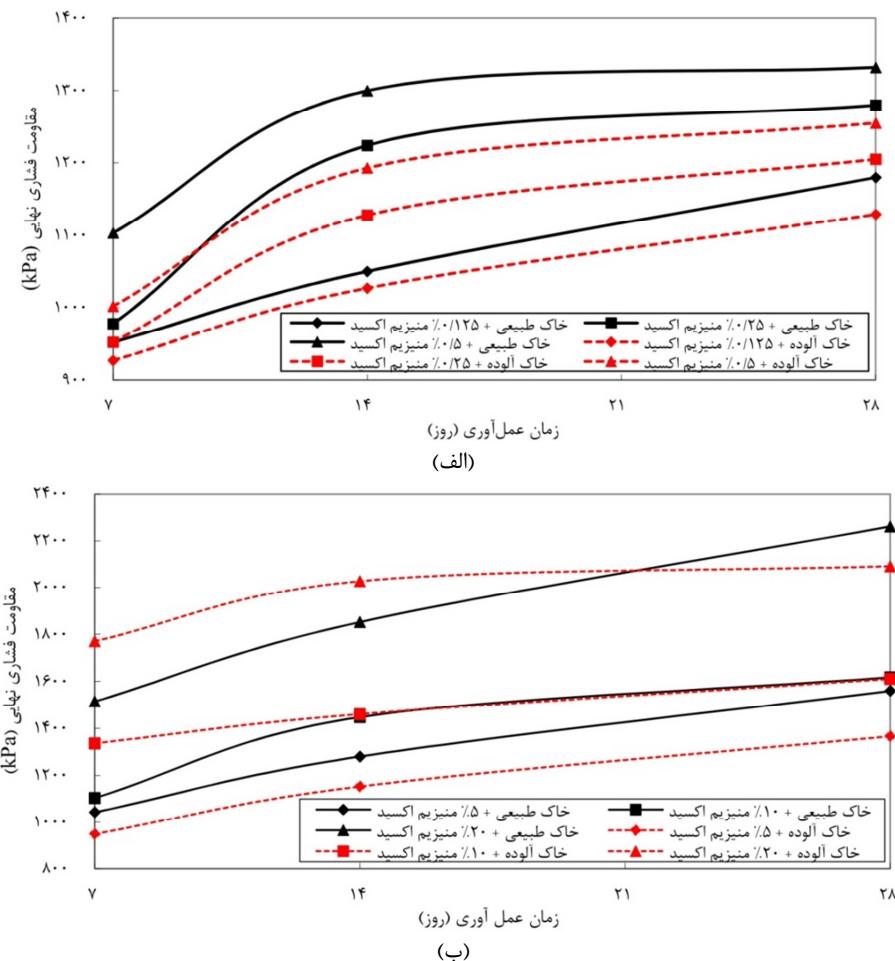
۴-۳- آزمایش مقاومت فشاری تکمحوری

نتایج بهدهست آمده از آزمایش‌های مقاومتی نشان می‌دهد که افزودن MTBE به خاک سبب کاهش مقاومت فشاری تکمحوری و رسیدن مقاومت خاک

^{۱۳}- Ratnaweera and Meegoda

شده، برابر ۹۵۲ کیلوپاسکال به دست آمده است، که با افزایش درصد اختلاط به ۲۰ درصد این مقدار به ۱۵۱۵ کیلوپاسکال می‌رسد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که با گذشت زمان عمل‌آوری، مقاومت نمونه‌های مختلف خاک افزایش می‌یابد.

آمده است. همانگونه که در شکل ۵ مشاهده می‌شود با افزایش درصد اختلاط ماده افزودنی منیزیم‌اکسید، مقاومت فشاری نهایی نمونه‌های مختلف خاک (اعم از خاک طبیعی و آلوده) افزایش می‌یابد. به طوری که در زمان عمل‌آوری ۷ روز بهازای درصد ماده افزودنی ۰/۱۲۵، بیشینه مقاومت فشاری خاک طبیعی در برابر بار وارد



شکل ۵- مقاومت فشاری نهایی نمونه‌های مختلف با (الف) ۰/۱۲۵ و ۰/۱۰۰ و ۰/۵ و (ب) ۰/۲۰ و ۰/۱۰ و ۰/۵ درصد منیزیم‌اکسید بر حسب زمان عمل‌آوری

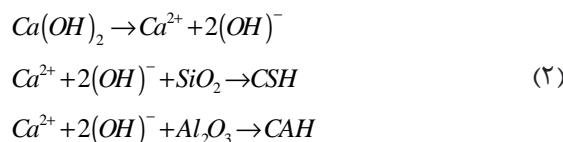
منجر به کاهش ضخامت لایه مضاعف می‌شود. به طوری که ساختمان خاک دارای درجه فلوکوله و چسبندگی ذرات بیشتری نسبت به خاک طبیعی می‌شود. در ابتدای فرآیند هیدراسیون، MgO به $Mg(OH)_2$ تبدیل می‌شود، که از این ماده تحت عنوان بروسیت^{۱۴} یاد می‌شود.

^{۱۴}- Brucite

بنابراین براساس شکل ۵ می‌توان گفت که افزودن منیزیم‌اکسید سبب افزایش مقاومت فشاری نهایی نمونه‌های مختلف خاک آلوده و غیرآلوده می‌شود که میزان این افزایش تابع زمان عمل‌آوری و میزان منیزیم‌اکسید افزوده شده می‌باشد. هنگامی که منیزیم‌اکسید به خاک افزوده می‌شود، ابتدا تبادل یونی بین این ماده و خاک صورت می‌گیرد که این تبادل یونی

آهک و زمان عمل‌آوری رابطه مستقیم داشته و با افزایش این دو پارامتر، مقاومت نیز افزایش می‌یابد. این افزایش در نمونه‌های حاوی آلایینده و خاک طبیعی مشاهده می‌شود، لیکن با این تفاوت که مقاومت فشاری نهایی خاک طبیعی اختلاط‌یافته با آهک در تمام درصدها از مقاومت فشاری خاک آلوده اختلاط‌یافته با آهک بیشتر می‌باشد.

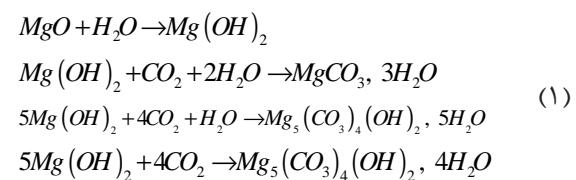
معمولًا آهک به صورت زنده یا هیدراته برای بهسازی خاک مورد استفاده قرار می‌گیرد. هنگامی که آهک به خاک اضافه می‌گردد، pH محیط افزایش یافته و به سمت قلیایی شدن می‌رود. تحت این شرایط، آهک با کانی‌های سازنده رسی که سیلیکا و آلومینا می‌باشند، واکنش نشان می‌دهد. این عمل سبب می‌گردد تا خواص خاک رسی تغییر کند و بهسازی آن صورت گیرد. خلاصه‌ای از واکنش‌های حاصله بین خاک و آهک به صورت روابط (۲) می‌باشد:



بنابراین مواد تولید شده فوق یعنی CSH و CAH که به صورت ژل می‌باشند، می‌توانند ذرات را به هم بچسبانند و یا در فضای بین ذرات قرار گیرند و سبب افزایش مقاومت شوند. فرآیند فوق معمولًا طی ۵ تا ۷ روز خاتمه می‌یابد و بعد از این، ساختار این مواد تغییر می‌کند و مقاومت به مقدار نهایی خود می‌رسد.

همچنین مقدادیر مدول الاستیسیته مربوط به ۵۰٪ از مقاومت نهایی (E_{50}) تمامی نمونه‌ها براساس منحنی‌های تنش-کرنش هریک از آنها محاسبه گردید. با توجه به شکل ۷ و محاسبات صورت گرفته، E_{50} خاک طبیعی و خاک آلوده به ترتیب برابر $15/8$ و $13/9$ مگاپاسکال به دست آمد. این نتایج نشان می‌دهد که افزودن MTBE به خاک سبب کاهش مدول الاستیسیته خاک می‌شود. نتایج محاسبات مربوط به نمونه‌های خاک طبیعی و آلوده بهسازی شده با منیزیم اکسید در شکل ۷-

بروسیت با کربن‌دی اکسید محیط و آب ترکیب می‌شود و موادی مانند نسکوهنیت^{۱۵}، هیدرومگنزیت^{۱۶}، دیپینجیت^{۱۷} را تولید می‌کند که این مواد در افزایش میزان مقاومت فشاری نهایی خاک تأثیر بسزایی دارند [۳۳ و ۱۳]. این پژوهشگران همچنین به این نتیجه دست یافتند که در بین مواد تولید شده در اثر فرآیند کربناسیون، نسکوهنیت دارای مقاومت بیشتری نسبت به سایر مواد تولید شده می‌باشد که این افزایش مقاومت نیز در طول زمان صورت می‌گیرد. تصاویر SEM ارائه شده در شکل‌های ۹ و ۱۰، وجود این مواد را در توده خاک تصدیق می‌کند. فرآیند کربناسیونی که موجب افزایش میزان مقاومت نمونه‌های موجود می‌گردد را می‌توان به شکل روابط زیر بیان نمود:



روابط فوق، روند تولید محصولات کربناسیون منیزیم اکسید را نشان می‌دهد که به ترتیب عبارت‌اند از: برووسیت، نسکوهنیت، دیپینجیت و هیدرومگنزیت. نتایج موجود در شکل ۵-ب نشان می‌دهد که در زمان‌های عمل‌آوری ۷ و ۱۴ روز برای درصدهای اختلاط ۱۰ و ۲۰ درصد منیزیم اکسید، میزان مقاومت فشاری نهایی نمونه‌های خاک آلوده بهسازی شده بیشتر از مقاومت نمونه‌های خاک طبیعی بهسازی شده می‌باشد. در این حالت می‌توان گفت مواد تولید شده در طی فرآیند کربناسیون با MTBE واکنش می‌دهند و مواد سیمانی کننده را تولید می‌کنند که سبب افزایش مقاومت خاک آلوده می‌گردد. شکل ۶ نیز نشان می‌دهد که میزان افزایش مقاومت فشاری نهایی خاک با درصد ماده افزودنی

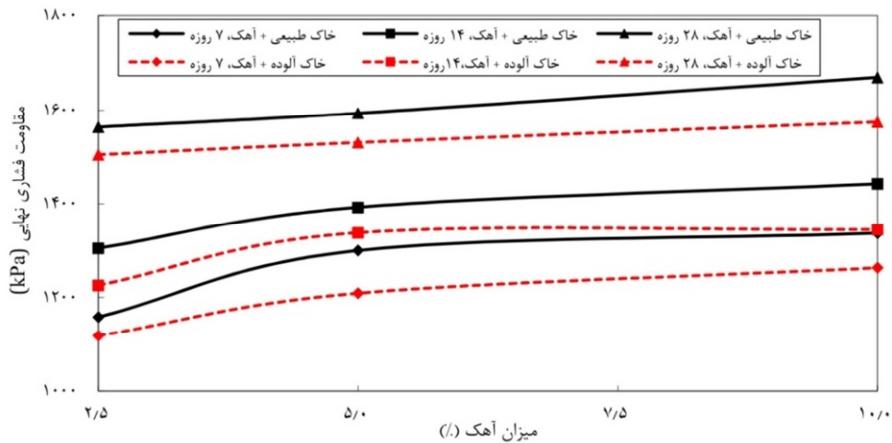
¹⁵- Nesquehonite

¹⁶- Hydromagnesite

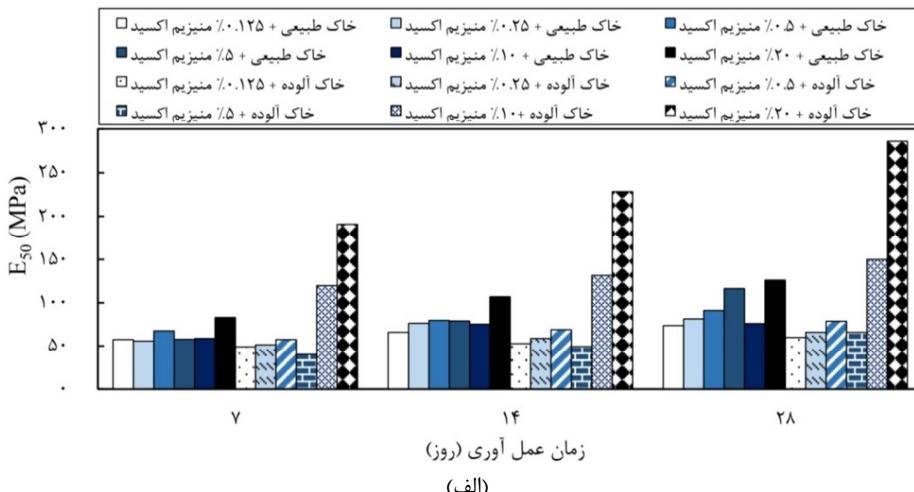
¹⁷- Dypingite

مقایسه با نمونه‌های خاک آلوده و طبیعی (بدون ماده افزودنی) می‌شود.

الف آورده شده است. این شکل نشان می‌دهد که افزودن منیزیم اکسید به نمونه‌های خاک سبب افزایش E_{50} در

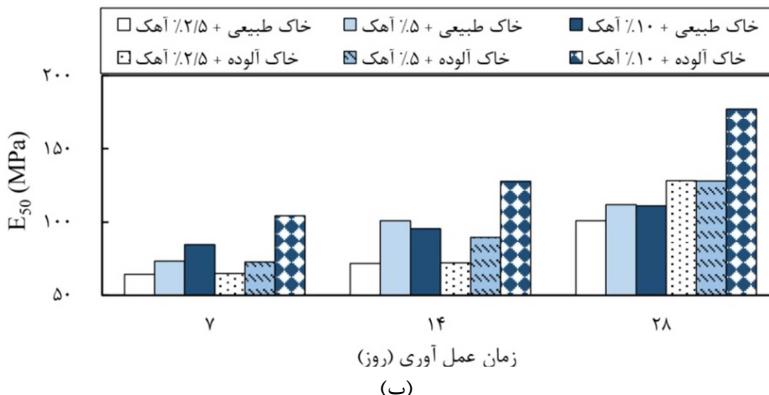


شکل ۶- مقاومت فشاری نهایی نمونه‌های عمل‌آوری متفاوت بر حسب درصدهای مختلف آهک



زمان عمل آوری (روز)

(الف)



زمان عمل آوری (روز)

(ب)

شکل ۷- تغییرات E_{50} نمونه‌های بهسازی شده با درصدهای مختلف ماده افزودنی (الف) منیزیم اکسید و (ب) آهک

به عنوان مثال، بهازی زمان عمل‌آوری ۷ روز با اضافه کردن ۱۲۵/۰ درصد منیزیم اکسید به خاک آلوده، مقدار E_{50} به ۴۸/۸۵ مگاپاسکال رسیده است که با افزایش درصد ماده افزودنی به ۲۰٪، این پارامتر برابر

۱۹۰/۹ مگاپاسکال شده است. همچنین مقایسه مقادیر E_{50} نمونه‌های بهسازی شده نشان می‌دهد که بهازی درصد ثابت ماده افزودنی، مقادیر E_{50} با گذشت زمان افزایش می‌یابد. همچنین بهازی زمان عمل‌آوری ثابت

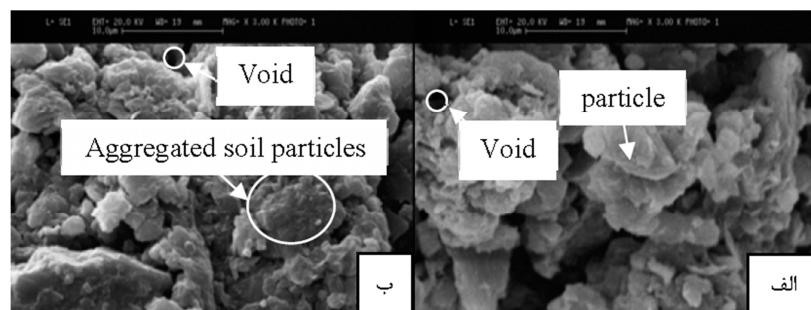
ریزساختار خاک در این پژوهش از نمونه‌های خاک طبیعی، آلوده و اختلاط آنها با یکی از مواد افزودنی عکس‌برداری میکروسکوپی شد. در شکل ۸ ساختمان خاک طبیعی و آلوده به MTBE ارائه شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود، نمونه‌های خاک طبیعی و آلوده دارای ساختمان فلوکوله می‌باشند، لیکن درجه فلوکولاسیون در نمونه خاک آلوده در مقایسه با نمونه خاک طبیعی افزایش یافته و فضاهای بین ذرات خاک کمتر شده است که این امر به دلیل تفاوت ضربی ثابت دیالکتریک محلول MTBE و آب رخ داده است.

افزایش E_{50} نمونه‌های خاک با افزایش درصد ماده افزودنی منیزیم‌اکسید مشاهده می‌شود (البته نتایج کلی ذکر شده در برخی از نمونه‌ها صادق نمی‌باشد که علت آن به شکل منحنی‌های تنش-کرنش نمونه‌های خاک و پراکندگی داده‌های ثبت شده مرتبط می‌باشد).

شکل ۷- ب نیز مقادیر E_{50} را برای نمونه‌های بهسازی شده با آهک نشان می‌دهد که روند تغییرات آنها مانند نمونه‌های بهسازی شده با منیزیم‌اکسید می‌باشد.

SEM-۵-۳ آزمایش

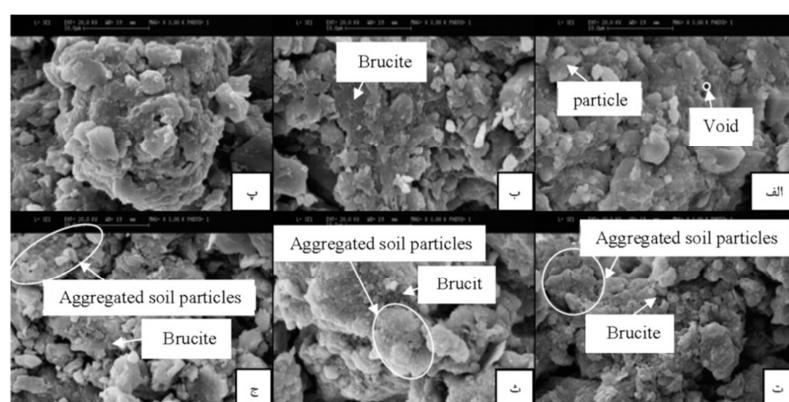
خاک‌های رسی دارای دو ساختمان ریزساختار و درشت‌ساختار می‌باشند. بهمنظور مشاهده تغییرات



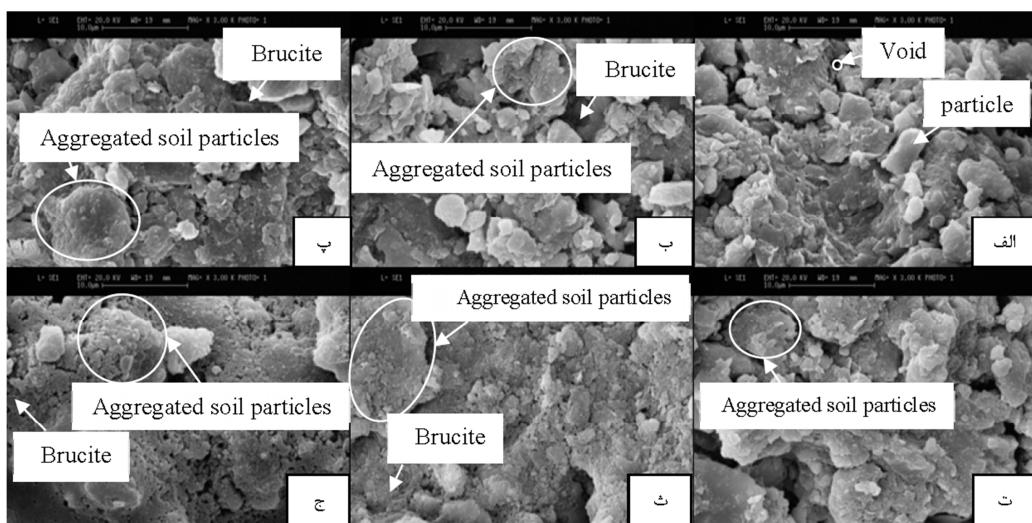
شکل ۸- تصاویر SEM نمونه‌های (الف) خاک طبیعی و (ب) خاک آلوده

منیزیم‌اکسید به خاک طبیعی و آلوده سبب تغییر در ساختار خاک شده است. علاوه بر این مشاهده می‌شود که افزودن منیزیم‌اکسید سبب تولید ماده بروسیت در اثر فرآیند هیدراسيون شده است که مقادیری از بروسیت تولید شده سبب پر شدن فضاهای خالی بین ذرات خاک و ایجاد پیوند بین آنها شده است.

همچنین مشاهده می‌شود که در نمونه‌های مذکور، ذرات خاک بدون هیچگونه پیوندی با یکدیگر در کنار هم قرار دارند. شکل‌های ۹ و ۱۰ تصاویر SEM نمونه‌های خاک طبیعی و آلوده اختلاط یافته با درصدهای گوناگون منیزیم‌اکسید در زمان عمل آوری ۱۴ روز را نشان می‌دهد. همان طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، افزودن



شکل ۹- تصاویر SEM نمونه‌های خاک طبیعی حاوی درصدهای مختلف منیزیم‌اکسید (الف) ۰/۱۲۵، (ب) ۰/۲۵، (پ) ۰/۵، (ت) ۵، (ث) ۰/۵ در زمان عمل آوری ۱۴ روز و (ج) ۰/۱۲۵ در زمان عمل آوری ۲۰ روز



شکل ۱۰- تصاویر SEM نمونه‌های خاک آلوده حاوی درصدهای مختلف منیزیم اکسید، (الف) ۱۲۵، (ب) ۰، (پ) ۰/۲۵، (ت) ۰/۵، (ث) ۰/۰۵ در زمان عمل آوری ۱۴ روز و (ج) ۰/۰۵ در زمان عمل آوری ۲۰ روز

به خاک، وزن واحد حجم خشک بیشینه خاک کاهش می‌یابد. همچنین این ماده بهدلیل دارا بودن سطح ویژه بالا، مانند یک خاک رسی عمل کرده و سبب افزایش خواص خمیرایی خاک و در نتیجه افزایش رطوبت بهینه خاک می‌شود.

۳- مقایسه نتایج مقاومت فشاری نهایی نمونه‌های خاک طبیعی و آلوده اختلالاتیافته با مواد افزودنی مختلف نشان می‌دهد که افزایش مقاومت نمونه‌های خاک طبیعی بهسازی شده با مواد افزودنی منیزیم اکسید و آهک، بیشتر از نمونه‌های خاک آلوده بهسازی شده می‌باشد.

۴- نتایج بهدلست آمده از آزمایش SEM نشان می‌دهد که تغییرات ایجاد شده در خواص فیزیکی و مکانیکی نمونه‌های بهسازی شده بهدلیل انجام یک سری واکنش‌های شیمیایی و تولید یک سری مواد طی فرآیند کربناسیون می‌باشد.

۵- از لحاظ کارایی، استفاده از منیزیم اکسید در درصدهای بسیار پایین تأثیر مطلوب‌تری در بهسازی خاک نسبت به آهک دارد. شایان ذکر است آهک در مقایسه با منیزیم اکسید یک ماده متداول‌تر، با دسترسی آسان‌تر و ارزان‌تر می‌باشد،

۵- نتیجه‌گیری

گاهی اوقات بنا به دلایل اقتصادی لازم است که از خاک‌های آلوده به مواد هیدروکربنی به عنوان منبع قرضه جهت اجرا و احداث یک پروژه استفاده نمود. بهمین خاطر، جهت حصول اطمینان از پایداری آن پروژه می‌بایست قبل از اجرای عملیات مربوطه، خواص فیزیکی و مکانیکی این خاک‌ها و در صورت لزوم روش‌های بهسازی آنها بررسی گردد. در این کار پژوهشی، بررسی خواص فیزیکی و مکانیکی یک خاک رسی آلوده به ماده آلی MTBE و امکان بهسازی آن با استفاده از دو ماده افزودنی منیزیم اکسید و آهک هیدراته با انجام آزمایش‌های حدود اتربرگ، تراکم استاندارد، مقاومت فشاری تکمحوری و SEM صورت گرفت. نتایج قابل استخراج از این پژوهش به شرح زیر است:

۱- افزودن MTBE به خاک سبب کاهش وزن واحد حجم خشک بیشینه، رطوبت بهینه، حدود اتربرگ و مقاومت فشاری تکمحوری خاک در مقایسه با حالت طبیعی می‌شود.

۲- افزودن منیزیم اکسید به خاک طبیعی سبب تغییر در مشخصات تراکمی و بهبود خواص خمیرایی آن می‌گردد. بدین ترتیب که با افزودن این ماده

این ماده به لحاظ اقتصادی مقرر بوده
و در پروژه‌های عمرانی قابل استفاده خواهد بود.

لیکن نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که برای
بهسازی خاک نیازی به استفاده از منیزیم اکسید
در درصدهای بالا نمی‌باشد. بنابراین استفاده از

References

- [1] Atienza, J., Aragon, P., Herrero, M. A., Puchades, R., & Maquieira, A. (2005). State of the art in determination of MTBE in natural waters and soils, *Critical reviews in analytical chemistry*, 35(4), 317-337. doi: [10.1080/10408340500431280](https://doi.org/10.1080/10408340500431280)
- [2] Karkush, M. O., & Kareem, Z. A. (2021). Investigation the impacts of fuel oil contamination on the behaviour of passive piles group in clayey soils, *European Journal of Civil and Environmental Engineering*, 25(3), 485-501. doi: [10.1080/19648189.2018.1531790](https://doi.org/10.1080/19648189.2018.1531790)
- [3] Ahmadi, M., Ebadi, T., & Maknoon, R. (2021). Effects of crude oil contamination on geotechnical properties of sand-kaolinite mixtures, *Engineering Geology*, 283, 1-13. doi: [10.1016/j.enggeo.2021.106021](https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106021)
- [4] Deeb, R. A., Chu, K. H., Shih, T., Linder, S., Suffet, I., Kavanaugh, M. C., & Alvarez-Cohen, L. (2004). MTBE and Other Oxygenates: Environmental Sources, Analysis, Occurrence, and Treatment, *Environmental Engineering Science*, 20(5), 433-447. doi: [10.1089/109287503768335922](https://doi.org/10.1089/109287503768335922)
- [5] Belpoggi, F., Soffritti, M., & Maltoni, C. (1995). Methyl-tertiary-butyl ether (MTBE)-a gasoline additive-causes testicular and lymphohematopoietic cancers in rats, *Toxicology and Industrial Health*, 11(2), 119-149. doi: [10.1177/074823379501100202](https://doi.org/10.1177/074823379501100202)
- [6] Liang, C., Guo, Y. Y., Chien, Y. C., & Wu, Y. J. (2010). Oxidative degradation of MTBE by pyrite-activated persulfate: Proposed reaction pathways, *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 49(18), 8858-8864. doi: [10.1021/ie100740d](https://doi.org/10.1021/ie100740d)
- [7] Mirzaei, K., Ghanizadeh, A. R., & Bakhtiari, S. (2021). Strength Characteristics of High Plasticity Clay Sub-grade Soil Stabilized with Ground Granulated Blast Furnas Slag, Fly-Ash and Diatomite, *Journal of Civil Infrastructure Researches*, 6(2), 67-78. doi: [10.22091/CER.2021.6858.1241](https://doi.org/10.22091/CER.2021.6858.1241) [In Persian]
- [8] Phanikumar, B. R., Shankar, M. U., & Manikanta, D. (2022). Interaction of diesel oil contaminants with laterite soil and bentonite treated by sawdust -landfill liner, *Geomechanics and Geoengineering: An International Journal*, 1-17. doi: [10.1080/17486025.2022.2067595](https://doi.org/10.1080/17486025.2022.2067595)
- [9] Ingles, O. H. (1987). *Soil stabilization*, Ground Engineer's Reference Book, Butterworth-Heinemann, London, Chapter 38, 1-26.
- [10] Sherwood, P. T. (1993). *Soil Stabilization with Cement and Lime*, Her Majesty's Stationery Office, London.
- [11] Bell, F. G. (1996). Lime stabilization of clay minerals and soils, *Engineering Geology*, 42(4), 223-237. doi: [10.1016/0013-7952\(96\)00028-2](https://doi.org/10.1016/0013-7952(96)00028-2)
- [12] Bell, F. G., & Coulthard, J. M. (1990). Stabilization of clay coils with lime, *Municipal Engineer*, 7(3), 125-140.
- [13] Unluer, C., & Al-Tabbaa, A. (2011). Green Construction with Carbonating Reactive Magnesia Blocks: Effect of Cement and Water Contents, *International Conference on Future Concrete*, Dubai, UAE.
- [14] Shand, M. A. (2006). *The Chemistry and Technology of Magnesia*, 1st edition, John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey.
- [15] Al-Tabbaa, A. (2013). *Reactive magnesia cement*, Eco-efficient concrete, 1st edition, Woodhead Publishing, Sawston, Cambridge, 523-543.
- [16] Jin, F., Gu, K., & Al-Tabbaa, A. (2015). Strength and hydration properties of reactive MgO-activated ground granulated blastfurnace slag paste, *Cement and Concrete Composites*, 57, 8-16. doi: [10.1016/j.cemconcomp.2014.10.007](https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.10.007)
- [17] Iyengar, S., & Al-Tabbaa, A. (2008). Application of Two Novel Magnesia-Based Cements in the Stabilization/Solidification of Contaminated Soils, *American Society of Civil Engineers GeoCongress*, New Orleans, Louisiana, United States, 716-723. doi: [10.1061/40970\(309\)90](https://doi.org/10.1061/40970(309)90)
- [18] Amini, M., Estabragh, A. R., & Abdollahi, J. (2021). Improvement the Behaviors of a Clay Soil Contaminated with Phenanthrene by Using MgO, *Ferdowsi Civil Engineering*, 34(3), 53-66. doi: [10.22067/jfcei.2022.71848.1055](https://doi.org/10.22067/jfcei.2022.71848.1055) [In Persian]
- [19] Goodarzi, A. R., & Movahedrad, M. (2017). Stabilization/solidification of zinc-contaminated kaolin clay using ground granulated blast-furnace slag and different types of activators, *Applied Geochemistry*, 81, 155-165. doi: [10.1016/j.apgeochem.2017.04.014](https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2017.04.014)
- [20] Estabragh, A. R., Khlooshi, M. M., Ghaziani, F., & Javadi, A. A. (2017). Stabilization and Solidification of a Clay Soil Contaminated with MTBE, *Journal of Environmental Engineering*, 143(9), 04017054. doi: [10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0001248](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001248)

- [21] Sobhani Nezhad, R., Nasehi, S. A., Uromeihy, A., & Nikudel, M. R. (2020). Utilization of Nanosilica and Hydrated Lime to Improve the Unconfined Compressive Strength (UCS) of Gas Oil Contaminated Clay, *Geotechnical and Geological Engineering*, 39(3), 2633-2651. doi: [10.1007/s10706-020-01642-6](https://doi.org/10.1007/s10706-020-01642-6)
- [22] Hamidi, A., & Hajimohammadi, M. (2021). Improving the mechanical behaviour of clay contaminated with glycerol and anthracene using lime and Portland cement, *Geomechanics and Geoengineering*, 1-15. doi: [10.1080/17486025.2021.1992515](https://doi.org/10.1080/17486025.2021.1992515)
- [23] Hamidi, A., & Abdoos, S. (2020). Application of Lime and Portland Cement for Improvement of Clay Contaminated with Anthracene and Glycerol, *Journal of Civil Infrastructure Researches*, 5(2), 111-122. doi: [10.22091/CER.2020.5374.1198](https://doi.org/10.22091/CER.2020.5374.1198) [In Persian]
- [24] Estabragh, A. R., Bordbar, A. T., Ghaziani, F., & Javadi, A. A. (2016). Removal of MTBE from a clayey soil using electrokinetic technique, *Environmental Technology*, 37(14), 1745-1756. doi: [10.1080/09593330.2015.1131750](https://doi.org/10.1080/09593330.2015.1131750)
- [25] Tabebordbar, A., Ghaziani, F., Estabragh, A. R., & Liaghat, A. (2014). Adsorption Capacity, Separation Method and Determination of the Concentration of MTBE in Contaminated Kaolinite Clay Soil, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 44(4), 347-355. doi: [10.22059/ijswr.2013.50407](https://doi.org/10.22059/ijswr.2013.50407) [In Persian]
- [26] Estabragh, A. R., Beytolahpour, I., Javadi, A. A. (2011). Effect of Resin on the Strength of Soil-CementMixture, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(7), 969-976. doi: [10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000252](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000252)
- [27] Estabragh, A. R., Khatibi, M., Javadi, A. A. (2016). Effect of Cement on Treatment of a Clay Soil Contaminated with Glycerol, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(4), 04015157. doi: [10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001443](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001443)
- [28] Mitchell, J. K., & Soga, K. (2005). *Fundamentals of soil behavior*, 3rd edition, John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey.
- [29] Estabragh, A. R., Khajepour, H., Javadi, A. A., & Amini, M. (2022). Effect of forced carbonation on the behaviour of a magnesia-stabilised clay soil, *International Journal of Pavement Engineering*, 23(5), 1691-1705. doi: [10.1080/10298436.2020.1821023](https://doi.org/10.1080/10298436.2020.1821023)
- [30] Liska, M., & Vandeperre, L. J. (2008). Influence of carbonation on the properties of reactive magnesia cement-based pressed masonry units, *Advances in Cement Research*, 20(2), 53-64. doi: [10.1680/adcr.2008.20.2.53](https://doi.org/10.1680/adcr.2008.20.2.53)
- [31] Vandeperre, L. J., Liska, M., & Al-Tabbaa, A. (2008). Microstructures of reactive magnesia cement blends, *Cement and Concrete Composites*, 30(8), 706-714. doi: [10.1016/j.cemconcomp.2008.05.002](https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.05.002)
- [32] Ratnaweera, P., & Meegoda, J. (2006). Shear Strength and Stress-Strain behavior of Contaminated Soils, *Geotechnical Testing Journal*, 29(2), 133-140. doi: [10.1520/GTJ12686](https://doi.org/10.1520/GTJ12686)
- [33] Unluer, C., & Al-Tabbaa, A. (2012). Effect of Aggregate Size Distribution on the Carbonation of Reactive Magnesia Based Porous Blocks, *18th Annual International Sustainable Development Research Conference*, Hull, UK.