



Evaluation of the Effect of Activated GGBS and Hydrated Lime on the Improvement of a Clay Soil Contaminated with Methyl Tert-Butyl Ether

Armin Ansar Shourijeh¹, Ali Raeesi Estabragh²

1. Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: arminansar@ut.ac.ir

2. Corresponding Author, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: raeesi@ut.ac.ir

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: July. 11, 2022

Revised: Sep. 11, 2022

Accepted: Sep. 14, 2022

Published online: Oct. 23, 2022

Keywords:

Pollutant,
Improvement,
methyl tert-butyl ether,
GGBS,
Lime.

ABSTRACT

In this research, the improvement of a clay soil contaminated with MTBE using GGBS activated by magnesium oxide and slaked lime was studied. Contaminated soil with MTBE was artificially prepared in the laboratory with a concentration of 2.25 g (MTBE)/kg (soil) and activated GGBS with slaked lime was added to it with different percentages. Experiments including Atterberg limit, compaction, uniaxial strength and SEM were conducted on samples of natural soil, contaminated and those which were mixed with the mentioned additives. The results showed that the used additives increase the strength of natural and contaminated soil and this improvement is a function of percentage of the used materials and the curing time. In general, adding the used additives increases the strength by 14-22% by increasing the mixing percentage and curing time. In addition, the strength of natural soil with a same percentage of additives and the same processing time is about 3 to 7% higher than contaminated soil. Comparison of the effect of two additives clarified that lime has a greater effect in improving than activated GGBS. The SEM results also clarified that the hydration of the additives cause producing the cementitious materials which improves the mechanical behavior of the soil.

Cite this article: Ansar Shourijeh, A., & Raeesi Estabragh, A. (2022). Evaluation of the effect of activated GGBS and hydrated lime on the improvement of a clay soil contaminated with methyl tert-butyl ether. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53 (8), 1743-1756.

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ijswr.2022.345688.669316>



ارزیابی اثر GGBS فعال شده و آهک هیدراته بر روی بهسازی یک خاک رسی آلوده به متیل تریت بوتیل اتر

آرمین انصار شوریجه^۱، علی رئیسی استبرق^۲۱. گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. ایمیل: arminansar@ut.ac.ir۲. نویسنده مسئول، گروه مهندس آبیاری و آبادانی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. ایمیل: raeesi@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	
تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۴/۲۰	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۶/۲۰	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۶/۲۳	
تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۸/۱	
واژه‌های کلیدی: آلاینده، بهسازی، متیل تریت بوتیل اتر، GGBS، آهک.	در این کار تحقیقاتی بهسازی یک خاک رسی آلوده شده به MTBE با استفاده از GGBS فعال شده به وسیله منیزیم اکسید و آهک آبدیده مورد مطالعه قرار گرفت. خاک آلوده به MTBE در آزمایشگاه با غلظت ۲/۲۵ g(MTBE)/kg(soil) به‌طور مصنوعی تهیه گردید و GGBS فعال شده با آهک آبدیده با درصد‌های مختلف به آن اضافه شد. آزمایش‌هایی شامل حدود اتربرگ، تراکم، مقاومت تک محوری و SEM روی نمونه‌هایی از خاک طبیعی، آلوده و اختلاط یافته با مواد افزودنی مذکور صورت پذیرفت. نتایج نشان داد که مواد افزودنی مورد استفاده موجب افزایش مقاومت خاک طبیعی و آلوده می‌گردد و این بهسازی تابعی از درصد مواد مورد استفاده و زمان عمل‌آوری می‌باشد. به‌طور کلی اضافه نمودن مواد افزودنی مورد استفاده باعث افزایش ۱۴ تا ۲۲ درصدی مقاومت با افزایش درصد اختلاط و زمان عمل‌آوری می‌گردد. علاوه بر این مقاومت خاک طبیعی با درصد ثابت مواد افزودنی و زمان عمل‌آوری یکسان حدود ۳ تا ۷ درصد بیشتر از خاک آلوده می‌باشد. مقایسه اثر دو ماده افزودنی روشن نمود که آهک اثر بیشتری در بهسازی نسبت به GGBS فعال شده دارد. نتایج SEM نیز روشن نمود که بهسازی تحت اثر تولید مواد سیمانی کننده ناشی از هیدراسیون این مواد افزودنی می‌باشد.

استناد: انصار شوریجه، آرمین؛ رئیسی استبرق، علی. (۱۴۰۱). ارزیابی اثر GGBS فعال شده و آهک هیدراته بر روی بهسازی یک خاک رسی آلوده به متیل تریت بوتیل اتر.

مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۳ (۸)، ۱۷۵۶-۱۷۴۳.

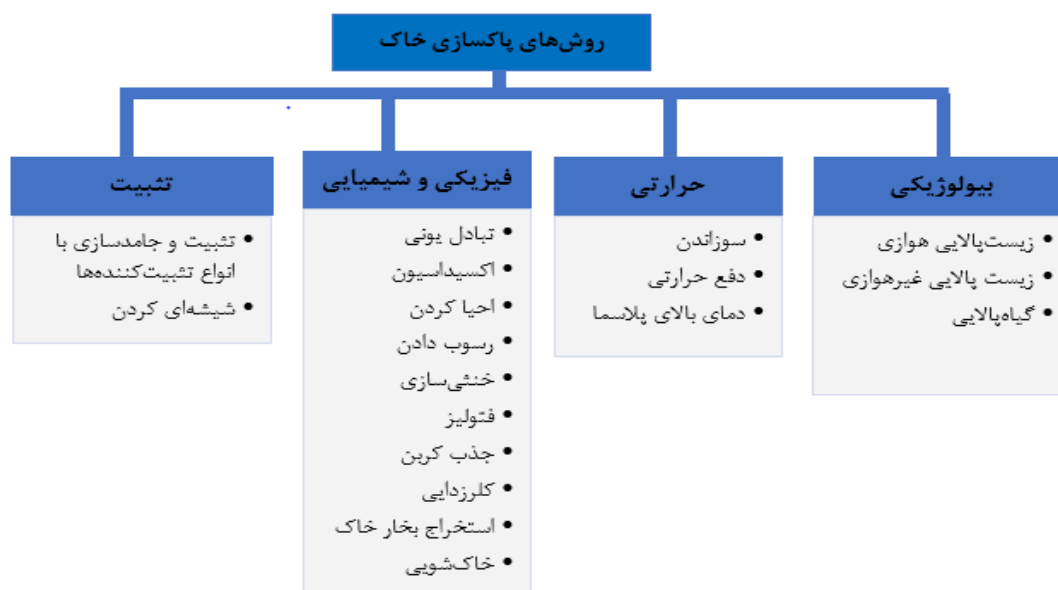
DOI: <http://doi.org/10.22059/ijswr.2022.345688.669316>

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

مقدمه

متیل ترت بوتیل اتر با فرمول شیمیایی $C_4H_9OCH_3$ ، از واکنش شیمیایی متانول و ایزوبوتیلن تولید می‌گردد، که از سال ۱۹۷۰ به عنوان اکتان بهبود دهنده به سوخت‌ها اضافه گردید (Deeb, 2003). از سال ۱۹۷۹ این ماده به عنوان ماده‌ای که موجب سوخت کامل مواد سوختی در وسایل نقلیه گردید، مطرح شد. به طوری که افزودن آن به مواد سوختی مانند بنزین یا گازوئیل موجب افزایش عدد اکتان (به خصوص در بنزین) و کاهش انتشار مواد آلاینده به محیط‌زیست مانند سرب می‌گردد (Atienza, 2005). این خواص مطلوب موجب گردید که تولید آن در سال ۱۹۸۳ به ۲۴/۱ میلیارد پوند در آمریکا برسد و مقدار آن در بین مواد آلی تولید شده رتبه دوم را کسب کند (Squillace, 1999). علیرغم این خواص مطلوب در کاهش آلودگی ناشی از مواد سوختی در محیط‌زیست مشخص گردید این ماده سرطان‌زا است و می‌تواند زندگی انسان را دچار مخاطره نماید. این ماده میزان حلالیت بالایی در آب دارد و همچنین جذب آن در خاک بسیار محدود است. لذا می‌تواند در خاک نفوذ کند و به سرعت خود را به لایه‌های زیرین خاک و در نهایت سفره‌های آب زیرزمینی برساند (Belpugi, 1995). بنابراین پس از آن استفاده از این ماده در بسیاری از کشورهای اروپایی و آمریکایی قدغن گردید، لیکن در بسیاری از کشورهای جهان سوم این ماده هنوز مورد استفاده قرار می‌گیرد. آلودگی خاکها به MTBE ممکن است ناشی از ریختن این مواد بر روی زمین در ایستگاه‌های ذخیره این مواد یا شکستگی لوله‌های انتقال این مواد باشد (Atienza et al., 2005). شناسایی خواص فیزیکی و مکانیکی و روش‌های بهسازی خاک‌ها از اهمیت زیادی برخوردار است. زیرا ممکن است این خاکها به‌عنوان منابع قرضه در احداث پروژه‌های دیگر مورد استفاده قرار گیرند و یا پروژه‌هایی بر روی آنها احداث گردد. بهسازی خاکها به روش شیمیایی از طریق اضافه نمودن موادی مانند سیمان یا آهک امکان‌پذیر است. همچنین بهسازی خاکها به روشهای مختلف انجام می‌شود که در چارت زیر به صورت خلاصه ارائه می‌گردد.



شکل ۱. انواع روش‌های بهسازی

Ahmadi et al. (2021) خصوصیات خاک ماسه‌ای که بوسیله نفت خام آلوده شده بودند مورد مطالعه قرار دادند. Karkush & Kareemi (2021) اثر آلودگی نفتی را در خصوص مشخصات و رفتار شمع‌هایی که در خاک رسی آلوده قرار داشتند را بررسی کردند. بهسازی خاکهای آلوده به مواد هیدروکربنی نفتی بوسیله محققین مختلفی مورد تحقیق و بررسی قرار گرفتند. مانند: Estabragh et al. (2022), Liska (2008), Hamidi & Hajimohamadi (2021), Abdelhalim et al. (2021), Estabragh et al. (2020), Pakbaz et al. (2012). جهانی و همکاران (۱۴۰۱). آن‌ها به این نتیجه دست یافتند که سیمان و آهک از مواد افزودنی می‌باشند که نقش مهمی در بهسازی این خاکها دارا می‌باشند.

Kholoosi et al. (2017) برای بهسازی خاک آلوده به MTBE از سیمان استفاده نمودند و به نتایج مطلوب دست یافتند. مواد افزودنی دیگر مانند GGBS فعال شده و آهک برای بهسازی خاکها آلوده به MTBE هنوز به کار نرفته‌اند. GGBS یک محصول جانبی تولید شده در صنایع آهن و فولاد می‌باشد. در کوره‌های ذوب آهن هنگامی که آهن یا سنگ آهن در حال ذوب شدن است، سرباره تولید می‌شود. این سرباره مایع که دارای درجه حرارت ۱۵۰۰ درجه سانتی‌گراد است، به‌وسیله فشار زیاد آب، سرد می‌شود و پس از سرد



شدن به شکل دانه‌های گرد در می‌آید، که با پودر شدن آن و همچنین خرد کردن آن GGBS تولید می‌گردد (Higgins, 2005). این ماده در بسیاری موارد از جمله در فرآیند تولید سیمان به‌عنوان ماده افزایش‌دهنده مقاومت، ایجادکننده مقاومت در برابر نفوذ کلریدها و همچنین ایجادکننده مقاومت در برابر حملات سولفاتی مورد استفاده است (Kogbara, 2011). به‌علاوه پیش از این به‌صورت مخلوط با آهک، در کارهای عمرانی برای جلوگیری از انبساط خاک رس در مجاورت سولفات‌ها مورد استفاده قرار گرفته است (Higgins, 2005). این ماده به‌تنهایی میزان کمی از هیدراسیون را از خود نشان می‌دهد، لذا برای تثبیت و جامدسازی خاک‌های آلوده، می‌بایست از ترکیب آن با یک ماده قلیایی‌کننده استفاده نمود (Nidzam, 2010). بنابراین محققین پیشنهاد نموده‌اند که جهت غلبه بر این مشکل بایستی GGBS فعال گردد و سپس مورد استفاده قرار گیرد. معمولاً برای فعال نمودن آن از سیمان، آهک یا خاکستر بادی با نسبت‌های خاصی استفاده می‌گردد که با درصد‌های وزنی مشخص به خاک آلوده مورد آزمایش اضافه می‌گردد. در سال‌های اخیر منیزیم‌اکسید به‌عنوان یک فعال‌کننده مطرح شده است به‌طوری‌که (Li et al., 2012) نشان دادند که مقاومت ۷ و ۲۸ روزه ماسه بهسازی شده با GGBS فعال‌شده با اکسید منیزیم بیشتر از سایر مواد فعال‌کننده مانند سیمان یا آهک می‌باشد.

ضرورت انجام پژوهش

همانگونه که بیان گردید خاک‌های رسی و آلوده شده به مواد هیدروکربنی نفتی دارای خواص فیزیکی و مکانیکی مطلوبی نمی‌باشند. بنابراین اگر در اجرای یک پروژه عمرانی به‌عنوان منبع قرضه مورد استفاده قرار گیرند یا سازه‌ای بر روی آنها احداث گردد، ممکن است مشکلاتی در پایداری پروژه اجرا شده ایجاد گردد. بنابراین جهت اطمینان از پایداری این ابنیه‌ها می‌بایست بهسازی این خاک‌ها قبل از هر اقدامی صورت گیرد. هدف این پژوهش بهسازی یک خاک رسی آلوده شده به MTBE می‌باشد که با افزودن GGBS فعال شده با منیزیم اکسید و یا آهک در درصد‌های وزنی و زمان عمل‌آوری مختلف با انجام آزمایشات لازم مورد بررسی و مطالعه قرار می‌گیرد. همچنین این پژوهش در سال ۱۴۰۰ در دانشگاه تهران انجام شده است.

مواد و روش‌ها

مواد مورد استفاده در این پژوهش، خاک، MTBE، GGBS فعال شده با منیزیم‌اکسید، آهک و آب می‌باشد که خصوصیات هرکدام به صورت خلاصه به شرح زیر بیان خواهد شد.

خاک

در این پژوهش از یک خاک رسی استفاده گردید. این خاک به صورت مصنوعی در آزمایشگاه تهیه گردید بدین منظور که نمونه‌ها یکنواخت و تکرارپذیر باشند و تاثیر آن در نتایج محدود گردد. همچنین آزمایشات شناسایی خواص فیزیکی و مکانیکی خاک بر اساس استاندارد ASTM انجام شد که نتایج آن در جدول (۱) ارائه شده است. نتایج آزمایش دانه‌بندی این خاک بر اساس استاندارد ASTM-D422-07 نشان داد که این خاک متشکل از ۳٪ ماسه، ۶۵٪ سیلت و ۲۲٪ رس می‌باشد. همچنین حد روانی، حد خمیری و شاخص خمیری آن بر اساس ASTM-D4318-10 به ترتیب برابر ۳۲/۵٪، ۱۵٪ و ۱۷/۵٪ تعیین گردید. بر اساس نتایج حاصل از دانه‌بندی و حدود اتربرگ خاک مذکور در سیستم متحد (USCS) طبقه بندی گردید و مشخص شد که خاک از نوع رسی با پلاستیسیته پایین (CL) می‌باشد. نتایج آزمایش تراکم استاندارد مطابق با استاندارد ASTM-D698-12 نیز نشان داد که رطوبت بهینه و وزن واحد حجم خشک بیشینه خاک به ترتیب برابر ۱۸٪ و ۱۶ (kN/m³) می‌باشد. ویژگی‌های شیمیایی خاک نیز تعیین شد و نتایج آن در جدول (۲) نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌گردد این خاک دارای pH و EC معادل ۷/۹۶ و ۲/۶۲ (dS/m) می‌باشد.

متیل‌ترت‌بوتیل‌اتر

MTBE مورد استفاده در این تحقیق، از محصولات تولید شده شرکت مرک آلمان بوده که به صورت مایع بی‌رنگ می‌باشد. بر اساس اطلاعات اخذ شده از شرکت مذکور، بخشی از خواص فیزیکی و شیمیایی آن ماده در جدول (۳) آورده شده است. ثابت دی‌الکتریک و ضریب جذب آن به ترتیب ۲/۶ و ۱/۱۵ می‌باشد و نیز مقدار حلالیت آن در آب برابر ۵۱/۲۶ g/L است. به‌علاوه ضریب پخشیدگی آن نیز در آب و هوا به ترتیب ۰/۰۷۹۲ cm²/s و ۹/۴۱ می‌باشد.

GGBS

همانطور که بیان گردید، عمده تحقیقات انجام شده در زمینه تثبیت و جامدسازی خاک‌های آلوده، بر پایه سیمان یا ترکیبات حاوی سیمان بوده، اما به‌منظور توسعه پایدار، امکان استفاده از مواد بازیافتی از سایر مواد تولید شده در صنعت، که قابلیت استفاده به‌عنوان مواد چسباننده

را دارا هستند، نیز باید در نظر گرفته شود. GGBS یکی از این مواد می باشد که امکان استفاده در زمینه بهسازی خاک های آلوده را دارا می باشد. GGBS استفاده شده در این تحقیق از کارخانه ذوب آهن اصفهان تهیه شده است که خصوصیات آن در جدول (۴) ارائه شده است. این ماده با نسبت ۱ به ۴ با منیزیم اکسید مخلوط گردید و سپس با درصد های وزنی ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱ به خاک طبیعی و آلوده به MTBE اضافه گردید.

جدول ۱. مشخصات فیزیکی و مکانیکی خاک طبیعی

مقادیر	مشخصات خاک
۲/۶	وزن مخصوص ذرات جامد (g _s)
۳ (%)	میزان ماسه
۶۵ (%)	میزان سیلت
۲۲ (%)	میزان رس
۳۲/۵ (%)	حد روانی (Il)
۱۵ (%)	حد خمیری (pl)
۱۷/۵ (%)	شاخص خمیری
CL	طبقه بندی سیستم متحد
۱۸ (%)	رطوبت بهینه
۱۶(kN/m ³)	وزن واحد حجم خشک بیشینه

جدول (۲) 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⁺

جدول ۳. مشخصات MTBE مورد استفاده

مقدار	مشخصه MTBE(C ₅ H ₁₂ O)
۵۵/۲	نقطه جوش (°C)
-۱۰۹	نقطه ذوب (°C)
۸۸/۱۵	جرم مولکولی (g/mol)
۰/۷۴	چگالی (g/cm ³)
۵۱/۲۶	خلالیت در آب (mg/L)

جدول ۴. مشخصات GGBS مورد استفاده

مقدار	مشخصه GGBS
۴۱/۵	CaO%
۳۵/۵	SiO ₂ %
۱۱/۵	Al ₂ O ₃ %
۰/۵	Fe ₂ O ₃ %
۸/۰	MgO%
۰/۳	K ₂ O%
۰/۴	TiO ₂ %
۰/۲	Na ₂ O%
۵۰	اندازه میانگین ذرات (μm)
۲۸-۶	سطح ویژه (m ² /g)

آهک

در این پژوهش، از آهک به عنوان یکی از مواد تثبیت کننده، و با درصد‌های وزنی ۲/۵، ۵، ۱۰ به خاک طبیعی و خاک آلوده به MTBE افزوده گردید. آهک به صورت هیدراته شده و بسته بندی از فروشنده محلی مصالح تهیه شد.

آب

آب مورد استفاده از نوع شرب بوده که دارای اسیدیته ۷/۷۶ و EC معادل با ۱/۲ ds/m می‌باشد. همچنین غلظت یون کلر و یون‌های کلسیم و منیزیم در آن نیز به ترتیب برابر با ۱/۷ meq/L و ۹/۱ اندازه گیری شد.

تهیه خاک آلوده و نمونه‌های مقاومتی

به منظور آلوده نمودن خاک مورد استفاده در این پژوهش $2/25 \text{ g(mtbe)/kg(soil)}$ (Estabragh et al., 2017) با توجه به وزن نمونه‌ها به خاک طبیعی اضافه شد. در این مرحله مقدار وزنی از آلاینده مورد استفاده با آب مخلوط گردیده و به صورت اسپری با خاک مخلوط شد. مقدار آب برابر با حداقل میزان حلالیت MTBE یعنی $51/26 \text{ g/L}$ در آب بوده که به منظور حداقل کردن تأثیر رطوبت بر نتایج آزمایش، این مقدار در نظر گرفته شد. پس از تعیین وزن مورد نیاز MTBE برای آلوده کردن خاک با توجه به وزن خاک، این مقادیر با آب مخلوط گردید و به خاک افزوده شد، تا مدت یک هفته درون کیسه نایلونی و سربسته قرار داده شد تا فرآیند جذب و عمل متقابل بین خاک و آلاینده تکمیل گردد. همچنین به منظور بررسی تأثیر آلاینده و مواد افزودنی بر روی مقاومت خاک، نمونه‌های مقاومتی به منظور تعیین مقاومت خاک، تهیه گردید. لذا برای خاک آلوده و طبیعی، همچنین اختلاط این دو با مواد افزودنی، میزان رطوبت بهینه و وزن واحد حجم خشک ماکزیمم برای هر کدام از درصد‌های انتخابی با انجام آزمایش تراکم، استاندارد تعیین شد. پس از تعیین رطوبت بهینه و همچنین تهیه نمودار تراکمی برای هر کدام از درصد‌های مواد افزودنی و خاک، رطوبت اولیه نمونه‌های ۶۰۰ گرمی خاک با افزودن آب، به رطوبت بهینه تعیین شده، متناظر با هر کدام از نمونه‌ها رسانیده شد. سپس با اعمال بار استاتیکی بر روی نمونه‌ها، وزن واحد حجم آنها، به مقدار وزن واحد حجم خشک ماکزیمم تحت اثر بار اعمال شده، رسید. نمونه‌های خاک در سه لایه درون قالب مخصوص ریخته شده و تحت اثر نیروی مشخصی که پیش از آن با سعی و خطا برای هر کدام از نمونه‌ها تعیین گردید، متراکم شد. نمونه‌های خاک در قالب‌های مخصوص که دارای سه قسمت بوده و شامل دو گردنی در بالا و پایین آن می‌شود، با سرعت $1/5 \text{ mm/min}$ ، همانگونه که در شکل (۲-الف) نشان داده شد، تحت اثر نیرو متراکم گردید. پس از انجام تراکم، قسمت‌های اضافی در بالا و پایین نمونه تراشیده شدند تا در نهایت یک نمونه با طول ۱۰۰ و قطر ۵۰ میلی‌متر تهیه شود. همچنین شایان ذکر است، در نمونه‌های حاوی منیزیم‌اکسید به دلیل ایجاد حرارت هیدراسیون، میزان رطوبت حدود ۲ تا ۳ درصد بیشتر از رطوبت بهینه، به منظور جبران تأثیر حرارت در نظر گرفته شد. نمونه‌های تهیه شده درون اتاقک نشان داده شده در شکل (۲-ب)، که دارای رطوبت اشباع بیش از ۹۰٪ و دمای ۲۲ درجه سانتیگراد بود، به مدت ۷، ۱۴ و ۲۸ روز نگهداری شد. همچنین تمام مراحل ذکر شده برای نمونه‌های حاوی آهک نیز انجام شد که نتایج آن در ادامه آورده شده است.



شکل ۲. الف) نحوه قرارگیری نمونه‌ها درون قالب (ب) نمونه‌های قرار گرفته درون محفظه مخصوص

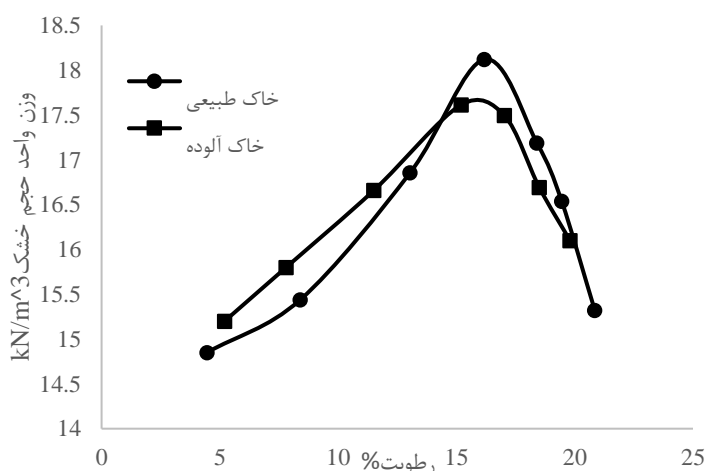
روش انجام آزمایش‌ها

در این پژوهش آزمایش‌های انجام شده (اتربرگ، تراکم، مقاومت تک محوری) بر اساس استانداردهای ASTM انجام گردید. آزمایش مقاومت تک محوری بر اساس استاندارد ASTM-D1633-00 و به روش کرنش کنترل شونده انجام گردید. در آزمایش تعیین مقاومت، نمونه‌ها تحت بار گذرای با سرعت 1 mm/min تا گسیختگی نمونه، قرار گرفتند. در طول بارگذاری تغییرات نشانگر نیرو و تغییر طول قرائت شدند و پس از آن تنش و کرنش نمونه تحت بارگذاری محاسبه گردید. همچنین تنش گسیختگی در تمام نمونه‌ها به عنوان مقاومت

نهایی آنها در نظر گرفته شد. به منظور مشخص شدن تاثیر آلاینده و ماده افزودنی بر روی ریز ساختار خاک عکس‌های SEM از تمامی نمونه‌ها و در زمان‌های مختلف عمل‌آوری تهیه گردید. این نمونه‌ها پس از خرد شدن بر روی پایه‌های مخصوص قرار گرفتند و پس از لایه نشانی طلا به روش کندوپاش مورد عکس برداری قرار گرفتند.

نتایج

همان گونه که در جدول (۵) مشاهده می‌شود مقادیر PL,LL و PI برای خاک طبیعی به ترتیب برابر با ۳۳/۵، ۱۵ و ۱۷/۵ درصد می‌باشد. در حالی که برای خاک آلوده به MTBE، این مقادیر بین یک تا دو درصد کاهش یافته و اثر آلاینده بر این خواص از خاک را نشان می‌دهد. در صورت وجود آلاینده، این مقادیر کاهش یافته و همچنین با تأثیر گذاری بر خواص رس موجود در خاک، باعث کاهش وزن واحد حجم بیشینه خاک شده است (شکل ۳). همانگونه که در جدول مشاهده می‌شود استفاده از مخلوط MgO و GGBS باعث کاهش مقادیر LL و PL و افزایش مقدار PI نسبت به خاک طبیعی می‌گردد. اگرچه مقادیر حدود اتربرگ نسبت به خاک طبیعی افزایش یافته است اما با افزایش درصد وزنی GGBS، مقادیر LL و PL سیر کاهشی را دارا می‌باشد و بر خلاف آنها PI افزایش یافته است (جدول ۵). به طور مثال حد روانی برای خاک طبیعی با افزایش درصد اختلاط از ۰/۲۵٪ به یک درصد، از ۳۳٪ به ۳۱/۹٪ کاهش می‌یابد. همین روند در خاک آلوده نیز مشاهده می‌شود با این تفاوت که مقادیر LL و PL نسبت به خاک طبیعی اختلاط یافته با مخلوط کاهش می‌یابند. به عنوان مثال حد خمیری از ۱۳/۲٪ برای خاک طبیعی اختلاط یافته با ۰/۲۵٪ مخلوط به ۱۳٪ برای خاک آلوده اختلاط یافته با مخلوط می‌رسد. با افزودن آهک به خاک طبیعی و آلوده (جدول ۶)، LL، سیر افزایشی خود را دارد اما PL روند نزولی را دارا می‌باشد، که به سبب آن PI نیز افزایش پیدا کرده است. همچنین مقادیر حدود اتربرگ در نمونه‌های آلوده نسبت به نمونه‌های خاک طبیعی دارای کاهش می‌باشد. به طور مثال با درصد اختلاط ۱۰ حد روانی برای خاک طبیعی از ۳۶٪ به ۳۵٪ برای خاک آلوده اختلاط یافته با آهک می‌رسد.



شکل ۳. نمودار تراکم خاک طبیعی و آلوده

شکل (۳) تغییرات وزن واحد حجم خشک بیشینه و رطوبت بهینه حاصل از آزمایش تراکم استاندارد را برای خاک طبیعی و خاک آلوده، نشان می‌دهد. افزودن MTBE به خاک باعث جابه‌جا شدن نمودار تراکم به سمت پایین و چپ نسبت به خاک طبیعی می‌گردد. به عبارت دیگر افزودن MTBE باعث کاهش وزن واحد حجم خشک بیشینه و رطوبت بهینه می‌گردد. مقادیر وزن واحد حجم خشک بیشینه و رطوبت به ترتیب از $18/12$ و $16/17$ ٪ برای خاک طبیعی به $17/62$ و $15/3$ ٪ برای خاک آلوده می‌رسد. وجود MTBE درون خاک باعث می‌شود تا اتصال و پیوند ذرات نسبت به حالت طبیعی قوی‌تر گردیده و در مقابل انرژی ثابت تراکمی از خود مقاومت نشان دهد. لذا فضای بین ذرات کاهش نمی‌یابد که این پدیده منجر به کاهش وزن واحد حجم خشک می‌گردد. همچنین از طرفی به دلیل افزایش درجه فلوکولاسیون و تجمع ذرات سطح ویژه کاهش می‌یابد که این تغییر در ساختار خاک، موجب کاهش توانایی آن برای جذب آب می‌گردد.



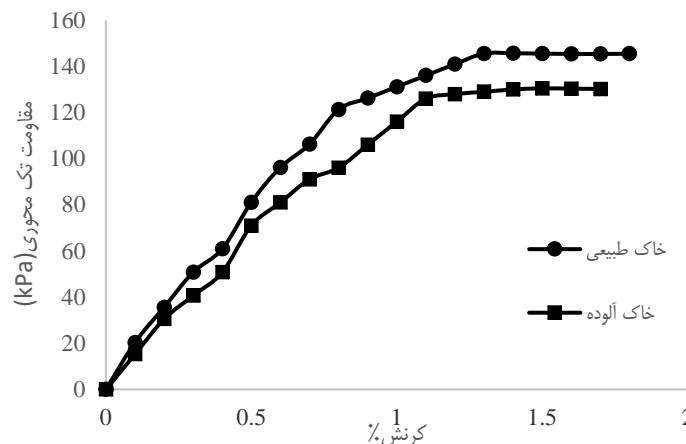
جدول ۵. مقادیر حدود اتربرگ و ویژگی‌های تراکمی در رابطه با نمونه‌های حاوی GGBS فعال شده

ردیف	خاک (%)	MTBE	منیزیم اکسید و GGBS (%)	حدود اتربرگ			ویژگی‌های تراکمی	
				حد روانی (%)	حد خمیری (%)	نشانه خمیری	رطوبت بهینه (%)	وزن واحد حجم خشک بیشینه (kN/m ³)
۱	۱۰۰	-	۰	۳۲/۵	۱۵	۱۷/۵	۱۶/۱۷	۱۸/۱۲
۲	۱۰۰	✓	۰	۳۰	۱۲	۱۸	۱۵/۳	۱۷/۶۲
۳	۹۹/۷۵	-	۰/۲۵	۳۳	۱۳/۲	۱۹/۸	۱۶/۵۵	۱۸/۶
۴	۹۹/۵	-	۰/۵	۳۲/۵	۱۲/۵	۲۰	۱۶/۷۹	۱۸/۲
۵	۹۹	-	۱	۳۱/۹	۱۱/۳	۲۰/۶	۱۷/۱	۱۷/۸۹
۶	۹۹/۷۵	✓	۰/۲۵	۳۲/۵	۱۳	۱۹/۵	۱۶/۷	۱۸/۱۶
۷	۹۹/۵	✓	۰/۵	۳۲	۱۲/۲	۱۹/۸	۱۶/۵۱	۱۷/۸۴
۸	۹۹	✓	۱	۳۱/۴	۱۱/۲	۲۰/۲	۱۶/۹	۱۷/۴

جدول ۶. مقادیر حدود اتربرگ و ویژگی‌های تراکمی در رابطه با نمونه‌های حاوی آهک

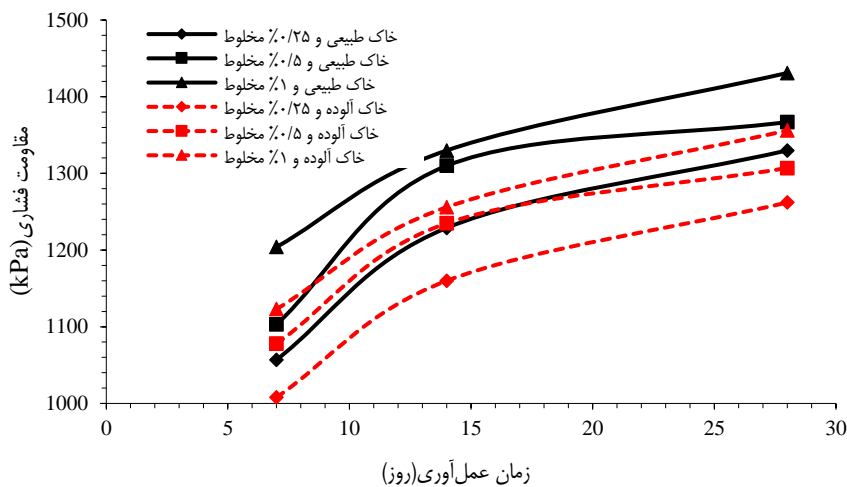
ردیف	خاک (%)	MTBE	آهک (%)	حدود اتربرگ			ویژگی‌های تراکمی	
				حد روانی (%)	حد خمیری (%)	نشانه خمیری (%)	رطوبت بهینه (%)	وزن واحد حجم خشک بیشینه (kN/m ³)
۱	۱۰۰	-	۰	۳۲/۵	۱۵	۱۷/۵	۱۶/۱۷	۱۸/۱۲
۲	۱۰۰	✓	۰	۳۰	۱۲	۱۸	۱۵/۳	۱۷/۶۲
۳	۹۷/۵	-	۲/۵	۳۴	۱۳	۲۱	۱۸	۱۷/۶۹
۴	۹۵	-	۵	۳۵	۱۲	۲۳	۱۸/۹	۱۷/۳۹
۵	۹۰	-	۱۰	۳۶	۱۱/۵	۲۴/۵	۲۰/۳۱	۱۷/۱۳
۶	۹۷/۵	✓	۲/۵	۳۲	۱۳	۱۹	۱۷/۶	۱۶/۸۴
۷	۹۵	✓	۵	۳۴/۴	۱۳/۹	۲۰/۵	۱۸/۵	۱۶/۵
۸	۹۰	✓	۱۰	۳۵	۱۴	۲۱	۱۹/۸۱	۱۶/۱۱

نتایج به دست آمده از آزمایشات مقاومت نشان می‌دهد که افزودن MTBE به خاک سبب کاهش مقاومت و رسیدن مقاومت خاک طبیعی از ۱۴۵/۷ به ۱۳۰/۲ کیلوپاسکال می‌گردد (شکل ۴). در این پژوهش، GGBS فعال شده با اکسید منیزیم با درصدهای وزنی ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱ با نسبت ۴ GGBS و ۱ منیزیم اکسید به نمونه‌های خاک افزوده شدند. با توجه به نتایج بدست آمده گرچه این ماده افزودنی با درصد پایین اختلاط با خاک مخلوط شده است، اما مقاومت تک‌محوری نمونه‌ها افزایش قابل توجهی داشته‌اند. به طور مثال برای نمونه خاک طبیعی اختلاط یافته با ۰/۲۵٪ مخلوط و زمان عمل آوری ۷ روز، مقاومت تک‌محوری نمونه از ۱۰۵۷ kPa به ۱۲۰۴ kPa برای ۱ درصد اختلاط و زمان عمل آوری مشابه می‌رسد (شکل ۵). همچنین مقاومت نمونه اختلاط یافته با ۱٪ مخلوط از ۱۲۰۴ kPa برای زمان عمل آوری ۷ روز به ۱۴۳۱ kPa در ۲۸ روز زمان عمل آوری می‌رسد. نتایج نشان می‌دهد با افزایش درصد اختلاط و همچنین افزایش زمان عمل آوری مقاومت تک‌محوری نمونه‌های تهیه شده افزایش می‌یابد. این روند در مورد نمونه‌های حاوی آلاینده نیز دیده می‌شود با این تفاوت که نمونه حاوی آلاینده نسبت نمونه مشابه فاقد آلاینده مقاومت کمتری از خود نشان می‌دهد (شکل ۵). در این پژوهش نیز از ۲/۵، ۵ و ۱۰ درصد آهک به عنوان ماده افزودنی استفاده شد. نتایج مندرج در شکل (۶) نشان می‌دهد که مقاومت تک‌محوری نمونه خاک طبیعی اختلاط یافته با ۲/۵٪ آهک با زمان عمل آوری ۱۴ روز از ۱۳۰۵ به ۱۴۴۲ kPa برای خاک طبیعی اختلاط یافته با ۱۰ درصد آهک در مدت زمان عمل آوری مشابه می‌رسد. همچنین مقاومت تک‌محوری نمونه خاک اختلاط یافته با ۵٪ آهک در زمان عمل آوری ۷ روز از ۱۲۹۹ kPa به ۱۲۰۹ kPa برای خاک آلوده در شرایط مشابه می‌رسد. بنابراین با افزودن آهک و افزایش درصد اختلاط آن مقاومت تک‌محوری نمونه‌ها افزایش می‌یابد و همچنین افزایش زمان عمل آوری نیز باعث افزایش آن می‌شود. از طرفی همانگونه که پیشتر گفته شد، افزودن MTBE به نمونه‌ها سبب کاهش مقاومت آنها می‌گردد (شکل ۶).

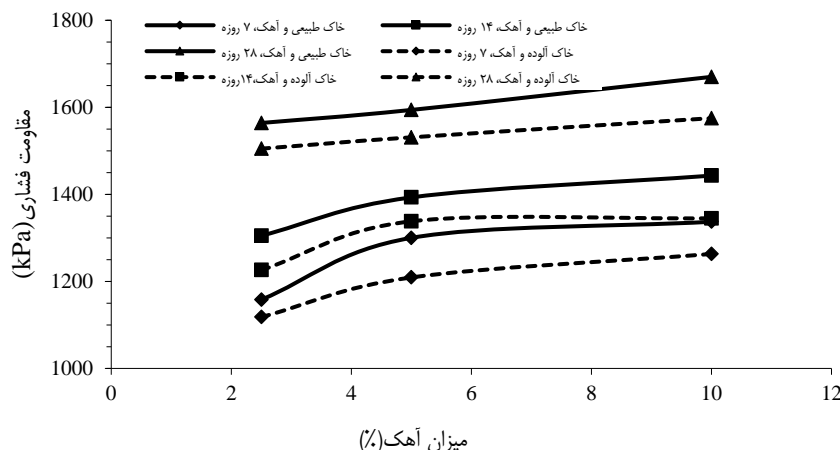


شکل ۴. نمودار تنش- کرنش مربوط به خاک طبیعی و خاک آلوده

همانگونه که در شکل (۵) نیز مشاهده می‌گردد، افزودن GGBS فعال شده سبب افزایش مقاومت تک محوری می‌گردد. این افزایش تابع درصد اختلاط این مخلوط با نمونه‌های مختلف و همچنین زمان عمل‌آوری آن می‌باشد. همچنین روند نشان داده شده در نمودار شکل (۵) به خوبی نشان می‌دهد که با افزایش زمان عمل‌آوری و تکمیل فرآیند هیدراسیون مقاومت تک محوری نمونه‌های خاک طبیعی و آلوده اختلاط یافته با GGBS فعال شده افزایش می‌یابد. همچنین شکل (۶) برای نمونه‌های حاوی آهک رسم شده است که این شکل نیز نشان می‌دهد افزایش مقاومت خاک با درصد ماده افزودنی و زمان عمل‌آوری رابطه مستقیم داشته و با افزایش آنها مقاومت نیز افزایش می‌یابد.

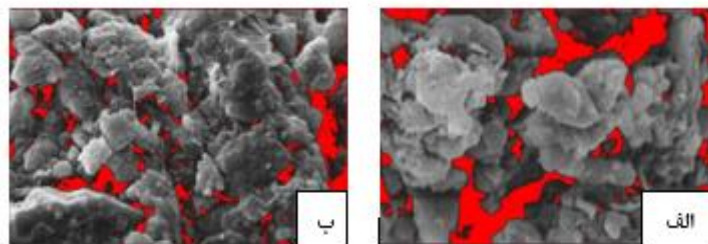


شکل ۵. مقاومت نهایی نمونه‌های مختلف با درصد مختلف GGBS فعال شده با منیزیم اکسید بر حسب زمان عمل‌آوری

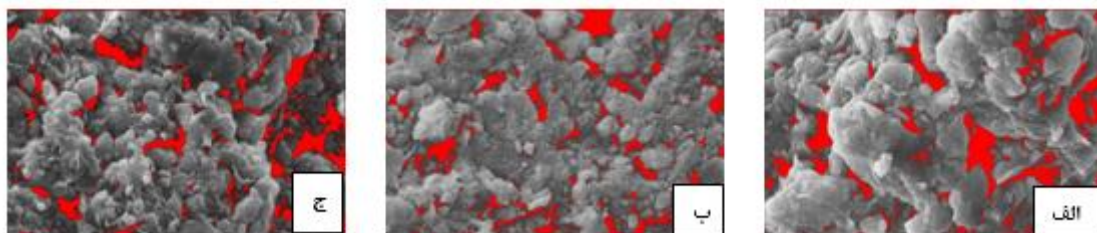


شکل ۶. مقاومت نهایی نمونه‌های مختلف با درصد مختلف آهک بر حسب زمان عمل‌آوری

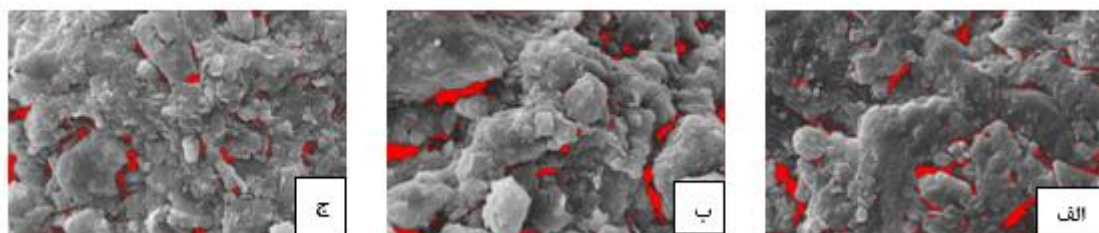
به منظور شناسایی ساختار خاک رسی از آزمایش میکروسکوپ الکترونی استفاده می‌گردد. رس‌ها عموماً دارای دو ساختار ریز و درشت می‌باشند که به وسیله این دستگاه و آزمایش می‌توان از آن‌ها عکس برداری نمود و به ساختمان آن‌ها پی برد. نتایج به دست آمده از این آزمایش که بر روی تمام نمونه‌های خاک طبیعی و آلوده اختلاط یافته با مواد افزودنی انجام شده است، در شکل (۷) ارائه گردید. همانگونه که مشاهده می‌شود، هردو آنها دارای ساختمان فلوکوله می‌باشند، لیکن درجه فلوکولاسیون در خاک آلوده افزایش یافته، و فضاهای بین خاک کمتر شده‌اند. MTBE به دلیل دارا بودن ضریب دی‌الکتریک کمتر نسبت به آب باعث کاهش ضخامت لایه مضاعف رس موجود در خاک شده، و این امر فضاهای خالی بین ذرات را کاهش می‌دهد (Hamidi et al. 2022). همچنین حضور MTBE در خاک باعث سهولت جابه‌جایی ذرات شده و ذرات در فضاهای خالی قرار می‌گیرند و با توجه به افزایش درجه فلوکولاسیون ساختار خاک، فضاهای خالی کمتری در خاک آلوده نسبت به خاک طبیعی دیده می‌شود. شکل‌های (۸) و (۹) نمونه‌های خاک طبیعی و آلوده اختلاط یافته با مخلوط اکسید منیزیم و GGBS را نشان می‌دهد. همانگونه که در نتایج حاصله قابل مشاهده است، افزودن این مخلوط باعث کاهش فضاهای خالی بین ذرات شده است و این امر با چسبیدن این ماده به ذرات خاک صورت می‌پذیرد. قرار گرفتن این مخلوط در فضاهای بین ذرات باعث ایجاد پیوند بین ذرات خاک شده، و در نتیجه مقاومت خاک افزایش می‌یابد. همچنین بروسیت به عنوان یکی از محصولات هیدراسیون منیزیم اکسید، تولید شده است و با ایجاد پیوند بین ذرات سبب افزایش مقاومت خاک و بهسازی آن می‌گردد. همچنین به طور مثال در مدت زمان ۱۴ روز در شکل (۸) قسمت الف برای ۰/۲۵ درصد ماده اضافه شده، دارای فضای خالی کمتری نسبت به ۱ درصد در قسمت (ج)، می‌باشد. این امر به دلیل افزایش منیزیم اکسید حاضر درون خاک می‌باشد. همچنین در شکل (۹) مشاهده می‌گردد خاک آلوده دارای ساختمان فلوکوله‌تری نسبت به خاک بدون آلاینده می‌باشد و به دلیل حضور ترکیب ماده افزودنی فضاهای خالی بین ذرات بیشتر بوده و این امر سبب کاهش مقاومت خاک آلوده اختلاط یافته با ترکیب منیزیم اکسید و GGBS نسبت به ترکیب خاک طبیعی و ماده افزودنی می‌شود.



شکل ۷. میکروگراف‌های SEM برای نمونه‌های الف) خاک طبیعی ب) خاک آلوده



شکل ۸. میکروگراف‌های SEM مربوط به نمونه‌های خاک طبیعی و مخلوط GGBS و منیزیم اکسید با درصدهای الف) ۰/۲۵ (ب) ۰/۵ (ج) با زمان عمل‌آوری ۱۴ روز



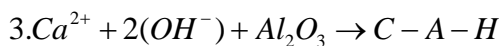
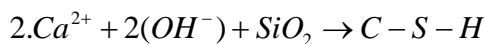
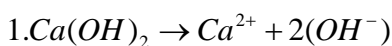
شکل ۹. میکروگراف‌های SEM مربوط به نمونه‌های خاک آلوده و مخلوط GGBS و منیزیم اکسید با درصدهای الف) ۰/۲۵ (ب) ۰/۵ (ج) با زمان عمل‌آوری ۱۴ روز

بحث

ذرات رس در سطح خود دارای بار منفی می‌باشند که نیروهای جاذبه و دافعه‌ای را اطراف آن ذرات ایجاد می‌کند. این نیروها به علت جانشینی ایزومرفیک و همچنین به علت شکست پیوستگی ساختمان مولکولی در لبه ذرات به وجود می‌آیند. هرچه سطح ویژه کانی‌ها بزرگتر باشد، توانایی ایجاد بار منفی نیز در آنها بیشتر است (Mitchel & Soga, 2005). هنگامی که آب به ذرات رسی اضافه می‌شود، رسوبات نمکی موجود در فضاهای بین ذرات خاک درون آب، حل می‌شود، و تعدادی از آنیون و کاتیون‌های مذکور، پیرامون ذرات رس به صورت شناور در می‌آیند، که این پدیده، لایه مضاعف نامیده می‌شود. در لایه مضاعف، مولکول‌های دوقطبی آب به وسیله بار منفی سطح ذرات رس و همچنین به وسیله کاتیون‌ها جذب می‌شوند. افزودن MTBE به خاک موجب می‌گردد تا ساختمان خاک درجه فلوکوله بیشتری نسبت به خاک طبیعی پیدا کند، که شکل (۷) مؤید آن می‌باشد. از طرفی نوع ساختار خاک به ضخامت لایه مضاعف ارتباط دارد و ثابت دی الکتریک از عوامل مؤثر بر آن می‌باشد. MTBE به دلیل دارا بودن ضریب دی‌الکتریک کمتر از آب باعث کاهش ضخامت لایه مضاعف می‌گردد و در نتیجه آن درجه فلوکولاسیون خاک افزایش می‌یابد. بنابراین در این حالت چسبندگی بین ذرات بیشتر از خاک طبیعی است، و قدرت جذب آب به علت کاهش سطح ویژه، کم می‌گردد و موجب کاهش LL و PL می‌شود. در جدول (۵) تغییرات LL و PL برای خاک طبیعی اختلاط یافته با مخلوط MgO و GGBS در درصدهای مختلف آن را نشان می‌دهد. مخلوط مورد استفاده با نسبت ۱:۴ و با درصدهای ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱ به خاک افزوده گردید، که مقدار GGBS به‌طور قابل توجهی بیشتر از MgO می‌باشد. همان‌طور که بیان شد، سطح ویژه GGBS معادل $6-28 \text{ (m}^2/\text{g)}$ است که در مقایسه با MgO که سطح ویژه آن حدود $250 \text{ (m}^2/\text{g)}$ است، به مراتب کمتر می‌باشد. بنابراین مجموعه اختلاط یافته خاک با این مخلوط دارای سطح ویژه کمتری نسبت به خاک طبیعی و MgO می‌باشد. لذا قدرت جذب آب این مجموعه کاهش می‌یابد و این کاهش تابعی از درصد موجود این ماده در خاک می‌باشد که باعث کاهش در مقادیر LL و PL می‌گردد. جدول (۵) مشابه این تغییرات برای خاک آلوده به MTBE و این مخلوط را نشان می‌دهد. این نتایج با نتایج بدست آمده از پژوهش Estabragh *et al.* (2013) مطابقت دارد. تغییرات LL و PL برای هر دو نوع خاک طبیعی و آلوده برای درصدهای مختلف آهک آبدیده افزوده شده به آنها در جدول (۶) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ملاحظه می‌گردد، افزودن آهک موجب افزایش حدود اثر برگ مخصوصا LL می‌گردد. افزودن آهک موجب می‌گردد که pH آب منفذی افزایش یابد، و بار منفی بیشتری روی ذرات خاک تجمع پیدا کنند (Brown, 2005). این واکنش منجر به ایجاد ساختار فلوکوله با فضای زیاد در بین ذرات می‌گردد، که می‌تواند آب زیادی در این فضاها قرار داده و موجب افزایش LL گردد. این نتایج با نتایج منتشر شده توسط Kogbara (2012) مطابقت دارد. شکل (۳) منحنی‌های تراکمی را برای خاک معمولی و خاک آلوده شده به MTBE را نشان می‌دهد. همان‌طور مشاهده می‌گردد مقادیر وزن واحد حجم خشک بیشینه خاک و رطوبت بهینه، برای خاک طبیعی برابر با $18/12 \text{ kN/m}^3$ و $16/17\%$ می‌باشد که این مقادیر برای خاک آلوده برابر با $17/62 \text{ kN/m}^3$ و $15/3\%$ می‌باشد. در شکل (۷) ملاحظه می‌گردد، که درجه فلوکولاسیون ساختار خاک آلوده بیشتر از خاک طبیعی می‌باشد. بنابراین اتصال و چسبیدن ذرات در این حالت بیشتر است، که موجب می‌گردد سطح ویژه ذرات کاهش یابد، و قدرت جذب آنها در مقایسه با خاک طبیعی کاهش یابد. از طرفی اتصال ذرات به یکدیگر در این حالت موجب می‌گردد فضاهای بیشتری در توده خاک آلوده نسبت به خاک طبیعی ایجاد شده، که این اتصالات در برابر انرژی تراکمی مقاوم می‌باشند. در نتیجه توده خاک دارای تخلخل بیشتری نسبت به خاک طبیعی می‌باشد و وزن واحد حجم خشک خاک در این حالت کاهش می‌یابد. افزودن مخلوط GGBS و منیزیم اکسید به هر دو نوع خاک طبیعی و آلوده به MTBE در حالت کلی موجب کاهش وزن واحد حجم خشک بیشینه و افزایش رطوبت بهینه می‌گردد (جدول ۵). نتایج نشان می‌دهد که با استفاده از ۰/۲۵٪ از این مخلوط، مقدار وزن واحد حجم خشک بیشینه برای هر دو نوع خاک آلوده و طبیعی افزایش می‌یابد، لیکن با افزایش درصد اختلاط این مخلوط روند کاهشی آن قابل مشاهده می‌باشد. می‌توان گفت در حالتی که ۰/۲۵٪ از این مخلوط مورد استفاده قرار می‌گیرد، مقدار MgO ناچیز است. بنابراین ماده افزودنی تعیین کننده رفتار خاک، GGBS می‌باشد، که به دلیل دارا بودن پتانسیل جذب آب کمتر نسبت به MgO موجب می‌گردد ذرات خاک به راحتی جابه‌جا شوند و در فضاهای خالی قرار گیرند. لیکن در درصدهای بیشتر این مخلوط مقدار بیشتری از MgO وارد مجموعه می‌گردد که به دلیل سطح ویژه بیشتر نسبت به GGBS و خاک، باعث می‌شود تا وزن واحد حجم خشک و رطوبت بهینه روند گفته شده را طی کنند. مشابه این تغییرات برای خاک آلوده نیز مشاهده می‌گردد. نتایج ارائه شده در جدول (۶) نشان می‌دهد که افزودن آهک، موجب کاهش وزن واحد حجم خشک ماکزیمم و افزایش رطوبت بهینه می‌گردد. افزودن آهک سبب فلوکوله شدن خاک و در نتیجه آن پیوندهایی است که در این ساختار ایجاد می‌گردد، که با افزایش تخلخل خاک باعث کاهش وزن واحد حجم خشک خاک می‌گردد. این تغییرات با درصد افزوده شده آهک به خاک نسبت معکوس دارد.



افزودن MTBE به خاک همانگونه که پیشتر بیان شد، باعث کاهش ضخامت لایه مضاعف خاک می‌گردد. این کاهش به دلیل کمتر بودن ثابت دی‌الکتریک این ماده نسبت به آب اتفاق می‌افتد. این ضریب برای MTBE برابر با ۲/۶ می‌باشد. که همین ضریب برای آب برابر با ۸۰ است. کاهش ضخامت لایه مضاعف موجب فلوکوله شدن خاک می‌گردد. با فلوکوله شدن خاک اصطکاک بین ذرات افزایش می‌یابد و مقاومت خاک افزایش پیدا می‌کند. اما بر خلاف انتظار همانگونه که در شکل (۴) مشاهده می‌گردد، مقاومت خاک طبیعی از ۱۴۵/۷ کیلوپاسکال به ۱۳۰/۲ کیلوپاسکال برای خاک آلوده می‌رسد. دلیل این پدیده را می‌توان در گرانروی MTBE جویا شد. از آن جایی که MTBE دارای گرانروی بیشتری نسبت به آب می‌باشد، باعث افزایش روان کاری و کاهش اصطکاک بین ذرات می‌شود. همین پدیده باعث می‌شود تا ذرات در اثر نیروی وارد شده، راحت‌تر بر روی یکدیگر بلغزند و مقاومت نمونه خاک کاهش یابد. این نتایج با نتایج بدست آمده توسط Ratnaweera & Meegoda (2006) مطابقت دارد. شکل (۵) تغییرات مقاومت نهایی با زمان عمل آوری برای نمونه‌هایی از خاک طبیعی و آلوده به MTBE، بهسازی شده با درصد‌های مختلف از مخلوط MgO و GGBS را نشان می‌دهد. فرآیند هیدراسیون GGBS به تنهایی بسیار کند بوده و برای افزایش آن می‌بایست از یک ماده فعال کننده، مانند سیمان، آهک یا MgO استفاده گردد و به آن اضافه شود (Yi et al., 2013). هنگامی که فرآیند هیدراسیون منیزیم اکسید تکمیل می‌گردد، محصولات مختلفی در طی فرآیند کربناسیون تولید می‌گردد که نقش مهمی در بهسازی و افزایش مقاومت خاک را دارا می‌باشند. Jin et al. (2016) بیان نمودند هنگامی که فرآیند هیدراسیون مخلوط MgO و GGBS انجام می‌گردد ابتدا اتصالات و پیوندهای موجود در GGBS مانند Si-O-Si، Al-O-Si و Ca-O از بین می‌رود. سپس MgO با Al-O و Si-O واکنش نشان می‌دهد، و تولید یک ژل و خمیر سیمانی‌کننده می‌کند، که این ماده ذرات خاک را به هم چسبانده و همچنین فضای بین ذرات را کاهش می‌دهد، که منجر به افزایش مقاومت می‌گردد. هرچه درصد این ماده افزودنی بیشتر باشد، مقدار ژل بیشتری تولید می‌گردد و در نتیجه مقاومت بیشتری تولید می‌شود. این نتایج با توجه به یافته‌های منتشر شده توسط استبرق و همکاران (۲۰۱۷) تایید می‌گردد. این پدیده در مورد نمونه‌های حاوی آلایند نیز رخ می‌دهد که باعث افزایش مقاومت می‌گردد با این تفاوت که حضور MTBE باعث کاهش مقاومت نسبت به نمونه‌های خاک طبیعی اختلاط یافته با این مخلوط می‌گردد. شکل (۶) نمودارهای تغییرات مقاومت نهایی نمونه‌های بهسازی شده خاک معمولی و آلوده به MTBE با استفاده از درصد‌های مختلف آهک و در زمان‌های گوناگون عمل آوری را نشان می‌دهد. همانطور که این نمودارها نشان می‌دهند، در این حالت نیز مقاومت ایجاد شده در نمونه‌ها، وابسته به درصد آهک مصرفی و زمان عمل آوری می‌باشد. معمولاً آهک به صورت زنده یا آبدیده 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 موجب می‌گردد تا خواص خاک رسی تغییر کنند و بهسازی در آن صورت گیرد. خلاصه‌ای از واکنش‌های حاصله بین خاک و آهک به صورت زیر می‌باشد:



بنابراین مواد تولید شده فوق یعنی C-S-H (کلسیم سیلیکات آبدار) و C-A-H (کلسیم آلومینات آبدار) به صورت ژل می‌باشند، که می‌توانند ذرات را به هم بچسبانند یا در فضای بین ذرات قرار گیرند و موجب افزایش مقاومت شوند. فرآیند فوق معمولاً طی ۵ تا ۷ روز خاتمه می‌یابد و بعد از این ساختار این مواد تغییر می‌کند و مقاومت به مقدار نهایی خود می‌رسد.

نتیجه‌گیری

۱- افزودن MTBE به خاک موجب تغییر در مشخصات تراکمی خاک می‌گردد. به این ترتیب که افزودن این ماده به خاک سبب کاهش وزن واحد حجم خشک بیشینه خاک و افزایش رطوبت بهینه آن می‌گردد. همچنین افزودن این ماده سبب می‌گردد تا مقاومت نهایی خاک نیز نسبت به حالت طبیعی کاهش یابد.

۲- افزودن ۰/۲۵٪ مخلوط GGBS و منیزیم اکسید به خاک سبب می‌گردد تا در این درصد افزایش وزن واحد حجم خشک به وجود آمده و پس از افزایش درصد اختلاط موجب می‌گردد تا وزن واحد حجم خشک خاک کاهش یابد. همچنین افزودن مخلوط GGBS و منیزیم اکسید، سبب افزایش مقاومت نهایی خاک می‌گردد که این افزایش با درصد اختلاط این مواد با خاک و زمان عمل آوری، رابطه مستقیم دارد.

۳- مقایسه نتایج مقاومت نمونه‌های خاک طبیعی و آلوده با افزودنی‌های مختلف نشان می‌دهد که در درصد ثابت از مواد افزودنی افزایش مقاومت خاک‌های طبیعی بهسازی شده، بیشتر از مقدار افزایش مقاومت در رابطه با مخلوط خاک‌های آلوده و مواد افزودنی می‌باشد.

۴- افزودن آهک سبب کاهش وزن مخصوص خشک بیشینه و افزایش رطوبت بهینه تراکمی می‌گردد. افزودن آهک با درصد‌های ذکر شده، سبب افزایش مقاومت نهایی خاک می‌گردد. با افزایش درصد آهک اختلاط یافته با خاک طبیعی و آلوده، مقاومت نهایی آن نیز افزایش می‌یابد. همچنین این افزایش با زمان عمل‌آوری نمونه‌ها دارای رابطه مستقیم می‌باشد و در طول زمان عمل‌آوری نیز نمونه‌ها، حالت شکننده به خود می‌گیرند.

۵- تحلیل نتایج SEM نشان می‌دهد که بیشتر تغییرات و همچنین واکنش‌های صورت گرفته درون خاک، در سطح ذرات و در مقیاس‌های بسیار کوچک صورت می‌پذیرد. همچنین نتایج بدست آمده از این آزمایشات نشان می‌دهد که فرآیند هیدراسیون مواد افزودنی به صورت کامل انجام شده و محصولات این فرآیند درون توده خاک موجود می‌باشد. به علاوه این عکس‌ها نشان می‌دهند که افزودن MTBE، سبب فلوکوله شدن ساختار خاک می‌گردد.

فهرست منابع

- جهانی، امیر؛ رئیسی استبرق، علی؛ خواجه‌پور، ح؛ امینی، محدثه. (۱۴۰۱). مقایسه عملکرد سیمان، سرباره کوره ذوب‌آهن (GGBS) و GGBS فعال شده در بهسازی یک خاک رسی. *مهندسی عمران فردوسی*، ۳۵ (۳)، ۸۹-۱۰۶.
- Abdelhalim, R. A., Selamat, M. R., & Ramli, H. (2021). Evaluation of strength properties of oil-contaminated sands upon stabilisation with laterite soil. *International Journal of Pavement Engineering*, 23(9), 2981-2997.
- Ahmadi, S., Ghasemzadeh, H., & Changizi, F. (2021). Effects of thermal cycles on microstructural and functional properties of nano treated clayey soil. *Engineering Geology*, 280, 105929.
- 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
- Belpoggi, F., Soffritti, M., and Maltoni, C. (1995). "Methyl-tertiary-butyl ether (MTBE)—A gasoline additive—causes testicular and lymphomaematopietic cancers in rat." *Toxicol. Ind. Health*, 11(2), 119-149.
- Brown, S., Christensen, B., Lombi, E., McLaughlin, M., McGrath, S., Colpaert, J., et al., (2005). An inter-laboratory study to test the ability of amendments to reduce the availability of Cd, Pb, and Zn in situ. *Environ. Pollut.* 138, 34-45.
- Deeb, R. A., Chu, K.-H., Shih T., Linder S., Suffet, I., Kavanaugh, M. C., & Alvarez-Cohen, L. (2003). "MTBE and other oxygenates: Environmental sources, analysis, occurrence and treatment." *Environ. Eng. Sci.* 20 (5): 433-447.
- Estabragh, A.R.; Pereshkafti, M.R.S.; Parsaei, B; & Javadi, A.A.(2013). "Stabilised expansive soil behavior during wetting and drying." *International journal of pavement engineering*. Vol.14, No.4, PP. 418-427.
- Estabragh, A. R., Jahani, A., Javadi, A. A., & Babalar, M. (2022). Assessment of different agents for stabilisation of a clay soil. *International Journal of Pavement Engineering*, 23(2), 160-170.
- Estabragh, A. R., Afsari, E., Javadi, A. A., & Babalar, M. (2020). Effect of two organic chemical fluids on the mechanical properties of an expansive clay soil.
- Hajimohammadi, M., & Hamidi, A. (2022). Impact of Portland cement and lime on the stabilization and shear strength characteristics of contaminated clay. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 1-26.
- Hamidi, A., Hajimohammadi, M. (2021), "Improving the mechanical behavior of clay contaminated with glycerol and anthracene using lime and Portland cement", *Geomechanics and Geoengineering: An International Journal*, doi.org/10.1080/17486025.2021.1992515.
- Higgins, D.(2005), "Briefing: GGBS and sustainability," *Proc. Inst. Civ. Eng. Constr. Mater.*, 2007, doi: 10.1680/coma.2007.160.3.99.
- Jin, F., Wang, F., Al-Tabbaa, A., (2016). "Three-year performance of in-situ solidified/ stabilised soil using novel MgO-bearing binders." *Chemosphere* 144, 681-688.
- 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 Environmental and Civil Engineering*, 25(3), 485-501.
- Kholoosi, M. M, Estabragh, A. R, Ghaziani, F, and Javadi, A. A;(2017) "Stabilization and Solidification of a Clay Soil Contaminated with MTBE". *Journal of Environmental Engineering, ASCE*.



- Kogbara, R, Al Tabbaa, A.,(2011). “Mechanical and leaching behaviour of slag-cement and lime-activated slag stabilised/ solidified contaminated soil”.
- Kogbara, R.B., Al-Tabbaa, A., Yi, Y., Stegemann, J.A., (2012). “pH-dependent leaching behaviour and other performance properties of cement-treated mixed contaminated soil.” *J. Environ. Sci.* 24, 1630–1638.
- Li, J.S., Xue, Q., Wang, P. and Li, Z.Z.(2012) “Effect of lead (II) on the mechanical behavior and microstructure development of a Chinese clay”, *Applied Clay Science*, 105- 106, pp. 192-199 .
- Liska, M. and Vandeperre, L.J. “Influence of carbonation on the properties of reactive magnesia cement-based pressed masonry units,” vol. 7605, no. 2, pp. 53–64, 2008, doi: 10.1680/adcr.2008.20.2.53.
- Mitchell. K., Soga. J. K., “Chapter11a,” *Fundam. Soil Behav.*, 2005.
- Nidzam. RM., Kinuthia JM. (2012) Sustainable soil stabilisation with blastfurnace slag: a review. *Proc Inst Civ Eng Constr Mater.* 2010;163:157–65.
- Pakbaz, M. S., & Alipour, R. (2012). Influence of cement addition on the geotechnical properties of an Iranian clay. *Applied Clay Science*, 67, 1-4.
- Ratnaweera, P., and Meegoda, J. N. (2006). “Shear strength and stressstrain behaviour of contaminated soils.” *Geotech. Test. J.*, 29(2), 133–140.
- Squillace, P. J., Zogorski, J. S., Wilber, W. G., and Price, C. V. (1996). “Preliminary assessment of the occurrence and possible sources of MTBE in groundwater in the United States, 1993–1994.” *Environ. Sci. Technol.*, 30(5), 1721–1730.
- Yi. Y., Liska. M., Unluer. C., and A. Al-Tabbaa,(2013) “Carbonating magnesia for soil stabilization,” *Can. Geotech. J.*, 2013, doi: 10.1139/cgj-2012-0364.