



Assessment of the effect of Ground Granulated Blast-furnace Slag (GGBS) and activated GGBS on stabilization of a clay soil contaminated with glycerol

Amir Jahani¹ | Ali Raesi Estabragh² | Mohammad Jahani³ | Gholamali Vakili⁴

1. Corresponding Author, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: amir.jahani73@ut.ac.ir
2. Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: raeesi@ut.ac.ir
3. Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Hormozgan, Bandar-Abbas, Iran. E-mail: jahani.m.edu@gmail.com
4. Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: ghvakili5@ut.ac.ir

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: Sep. 30, 2023

Revised: Nov. 21, 2023

Accepted: Dec. 3, 2023

Published online: Jan. 21, 2024

Keywords:

Activated GGBS,
Clay Soil,
GGBS,
Glycerol,
MgO.

ABSTRACT

The stabilization of a clay soil contaminated with glycerol was studied through a series of experimental tests. Contaminated soil was artificially prepared with percentages of 4,8 and 12% from the solution of glycerol with concentration of 50%. GGBS and activated GGBS with MgO or mixture of MgO and cement were used as agent materials. They were added and mixed with both natural and contaminated soil at percentages of 5,10 and 15%. Atterberg limits, compaction and unconfined strength tests (UCS) were performed on both soils with and without agents. The results showed that these parameters varied when adding glycerol or different agents and the extent of these changes were dependent on the percentage of glycerol and the type of agent. In addition, it was resulted that under constant conditions, strength values were dependent on the curing time. E_{50} (Elastic coefficient) for each strength test was calculated and the variations in its value corresponded to changes in strength. Comparing the results indicated that the effect of activated GGBS in increasing the strength and E_{50} of both soils were greater than that of GGBS alone. Based on the SEM results, it was revealed that the increase in the strength of stabilized soil is due to the production of chemical bonds between the particles of soil.

Cite this article: Jahani, A., Raesi Estabragh, A., Jahani, M., & Vakili, Gh, (2024) Assessment of the effect of Ground Granulated Blast-furnace Slag (GGBS) and activated GGBS on stabilization of a clay soil contaminated with glycerol, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 54 (11), 1647-1665. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.365905.669583>

© The Author(s).

Publisher: The University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.365905.669583>



ارزیابی اثر سرباره کوره ذوب آهن (GGBS) و GGBS فعال شده در بهسازی خاک رس CL آلوده به گلیسرول

امیر جهانی^۱ | علی ریسی استبرق^۲ | محمد جهانی^۳ | غلامعلی وکیلی^۴۱. نویسنده مسئول، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکدهگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: amir.jahani73@ut.ac.ir۲. گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکدهگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: raeesi@ut.ac.ir۳. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران. رایانامه: jahani.m.edu@gmail.com۴. گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکدهگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: ghvakili5@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله | چکیده

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۷/۸
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۸/۳۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۹/۱۲
تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۱۱/۱

واژه‌های کلیدی:

اکسیدمینیزیم،
خاک رس،
سرباره دانه‌ای کوره ذوب آهن،
سرباره فعال شده،
گلیسرول.

در این کار تحقیقاتی امکان بهسازی یک خاک رس از نوع CL آلوده به محلول گلیسرول با استفاده از سرباره دانه‌ای کوره ذوب آهن (GGBS) و GGBS فعال شده با اکسیدمینیزیم (MgO) و همچنین GGBS فعال شده با مخلوط MgO و سیمان مورد مطالعه قرار گرفت. خاک آلوده به طور مصنوعی با افزودن درصد‌های وزنی ۴، ۸ و ۱۲ از محلول ۵۰ درصد گلیسرول تهیه گردید. مخلوط‌های مواد افزودنی یادشده با درصد‌های وزنی ۵، ۱۰ و ۱۵ به خاک آلوده به گلیسرول اضافه و مخلوط گردید و سپس آزمایش‌های حدود اتربرگ، تراکم استاندارد، مقاومت تک‌محوری و SEM روی نمونه‌های مذکور انجام شد. مقاومت نهایی و E₅₀ نمونه‌ها در زمان‌های عمل‌آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه تعیین گردید. نتایج نشان داد که تغییرات در مقادیر نتایج حدود اتربرگ و پارامترهای تراکمی تابع درصد آلاینده و مواد افزودنی است و همچنین مقادیر مقاومت نهایی و E₅₀ نیز برای درصد ثابت آلاینده و مواد افزودنی، تاثیرپذیر از زمان عمل‌آوری است. علاوه بر این، مقایسه نتایج نشان داد که فعال‌سازی GGBS با اضافه کردن MgO و یا مخلوط MgO و سیمان، در نهایت منجر به بهبود عملکرد آن در افزایش مقاومت فشاری و افزایش E₅₀ نمونه‌های خاک آلوده، می‌گردد. نتایج SEM نیز آشکار کرد که بهسازی خاک در نتیجه واکنش‌های شیمیایی است که بین ذرات خاک و مواد افزودنی صورت می‌پذیرد.

استناد: جهانی؛ امیر، ریسی استبرق؛ علی، جهانی؛ محمد، وکیلی؛ غلامعلی، (۱۴۰۲) ارزیابی اثر سرباره کوره ذوب آهن (GGBS) و GGBS فعال شده در بهسازی خاک رس

CL آلوده به گلیسرول، مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۴ (۱۱)، ۱۶۶۵-۱۶۴۷. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.365905.669583>

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.365905.669583>

مقدمه

آلودگی را می‌توان عنصری تلقی کرد که از طرق گوناگون ممکن است وارد محیط زیست شود و موجب اثرات نامطلوب بر چرخه زندگی انسان و یا دیگر موجودات گردد. آلودگی‌ها را معمولاً به دو گروه آلی و غیرآلی تقسیم‌بندی می‌نمایند. منشا اکثر آلاینده‌های آلی هیدروکربن-های نفتی می‌باشد. آن‌ها به روش‌های مختلف مانند نشت از مخازن ذخیره‌سازی مواد نفتی و واحدهای صنعتی مانند پالایشگاه‌ها و مجتمع‌های پتروشیمی وارد محیط زیست بخصوص خاک شده که در نهایت منجر به مشکلات زیست‌محیطی می‌گردد. آلاینده‌های یاد شده قادر به ایجاد تغییرات نامناسب در خصوصیات فیزیکی و مکانیکی خاک هستند (Fang, 1986; Rajabi & Sharifipour, 2019). بنابراین مطالعه خاک‌های آلوده از لحاظ زیست‌محیطی و همچنین اقتصادی بسیار حائز اهمیت می‌باشد.

تاکنون پژوهش‌های متعددی در خصوص بررسی تغییرات فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مختلف آلوده شده بوسیله آلاینده‌ها انجام شده است (Calabrese et al., 2006; Estabragh et al., 2018; Khamehchiyan et al., 2007; Pascucci, 2011; Yong, 2000). پژوهش‌گران بیان نمودند که عمل متقابل بین خاک و آلاینده به شدت تحت تاثیر خصوصیات خاک مانند اندازه ذرات، ویژگی‌های پیوند بین ذرات و ظرفیت تبادل یونی بین آن‌ها و همچنین خصوصیات آلاینده می‌باشد. در خاک‌های زیردانه ممکن است این عمل‌های متقابل از نوع فیزیکوشیمیایی باشند. در این شرایط، آلاینده می‌تواند توسط ذرات خاک جذب شود و ساختار خاک را تغییر دهد و در نهایت خصوصیات فیزیکی و مکانیکی آن هم تغییر کند (Estabragh, Ghayamara, et al., 2022). فنگ و همکاران به منظور ارزیابی عمل متقابل خاک و آلاینده‌های هیدروکربنی، معیاری تحت عنوان شاخص حساسیت^۱ را تعریف کردند به طوری که هرچه این شاخص بیشتر باشد واکنش آلاینده و خاک بیشتر است. شاخص یادشده برای خاک رسی بین ۰/۶ تا ۰/۹ تعیین شده است و نشان دهنده تاثیرپذیری بسیار بالای خاک رسی در مقابل آلاینده‌های آلی است (Fang, 1986).

بر اساس نتایج پژوهش‌های گذشته، مقادیر حدود اتربرگ انواع مختلف خاک به علت آلودگی به آلاینده‌ای مختلف آلی تغییر می‌کند که البته روند یکسانی بین تغییرات آن‌ها مشاهده نشده است (Calabrese et al., 2006; Fine et al., 1997; Harrison, 2006; Kabata-Pendias, 2000; Montanarella et al., 2015; Yong, 2000). راتناویرا و میگودا هم با مطالعه خواص فیزیکی و مکانیکی خاک‌های ریزدانه آلوده شده به محلول گلیسرول، کاهش مقاومت را برای آن‌ها گزارش کردند اما برای خاک دانه‌ای، تغییر معنی‌داری در منحنی‌های تنش- کرنش مشاهده نمودند (Ratnaweera & Meegoda, 2006). سینگ و همکاران با انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوری روی خاک‌های رسی با پلاستیسیته کم و زیاد و نیز خاک‌های دانه‌ای آلوده به نفت خام، به این نتیجه رسیدند وجود آلاینده نفت خام در خاک، موجب کاهش مقاومت خاک می‌گردد (Singh et al., 2009). خسروی و همکاران آزمایش‌های برش مستقیم و مقاومت فشاری محدود نشده را بر روی نمونه‌هایی از رس کائولینیت آلوده به درصد‌های مختلف گازوئیل انجام دادند (Khosravi et al., 2013). آن‌ها گزارش کردند که در این شرایط چسبندگی خاک افزایش یافته اما زاویه اصطکاک داخلی آن در نتیجه آلودگی نسبت به خاک طبیعی کاهش می‌یابد. با این حال، آن‌ها به‌طور کلی گزارش نمودند که رفتار فیزیکی و مکانیکی خاک در صورت آلوده شدن به آلاینده‌های نفتی تغییر می‌کند. استبرق و همکاران نیز تحقیقات گسترده‌ای در خصوص تاثیر آلاینده‌های آلی مانند گلیسرول بر خواص فیزیکی و مکانیکی خاک‌های مختلف رسی انجام دادند. آن‌ها نتیجه‌گیری کردند که با اضافه شدن آلاینده گلیسرول به خاک‌های رسی، حدود روانی و خمیری خاک کاهش یافته و این روند با افزایش غلظت آلاینده افزایش می‌یابد. آن‌ها همچنین از نتایج آزمایش تراکم دریافتند که خاک‌های رسی آلوده نسبت به خاک طبیعی دارای مقادیر بالاتری از وزن واحد حجم خشک بشینه و مقادیر کمتری از رطوبت بهینه هستند و همچنین کاهش مقاومت فشاری نهایی را نسبت به خاک طبیعی نتیجه‌گیری کردند (Estabragh et al., 2018; Singh et al., 2009).

در سال‌های اخیر با هدف بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی خاک‌های آلوده و به‌منظور استفاده از آن‌ها به عنوان منبع قرضه برای اجرای پروژه و یا احداث سازه بر روی آن‌ها، بهسازی آن‌ها به روش‌های مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است. یکی از روش‌های بهسازی خاک‌های مذکور، روش شیمیایی است که در این روش مواد افزودنی مانند سیمان، آهک، خاکستر بادی و یا اختلاط آن‌ها با نسبت‌های متفاوت با یکدیگر به خاک آلوده اضافه می‌شوند و واکنش‌های شیمیایی که بین ذرات خاک و مواد افزودنی رخ می‌دهد، سبب بهبود خواص خاک می‌شود.

بررسی منابع نشان می‌دهد که سیمان به عنوان متداول‌ترین ماده شیمیایی، برای بهسازی خاک غیرآلوده و خاک آلوده به آلاینده‌های



آلی مورد استفاده قرار گرفته است. در خصوص عملکرد سیمان پژوهش‌گران متعددی تاثیر مثبت و قابل توجه افزودن این ماده در بهسازی خواص خاک آلوده و غیر آلوده را گزارش نموده‌اند (جهانی و همکاران، ۱۴۰۱); (Estabragh et al., 2016; Jahani, Shahnoori, et al., 2023; Khosravi et al., 2013). لیکن فرآیند تولید سیمان شامل مسائل اقتصادی و مشکلات زیست‌محیطی چشمگیری می‌شود که می‌توان به مصرف بالای انرژی، مصرف منابع تجدیدناپذیر و همچنین انتشار گاز گلخانه‌ای دی‌اکسیدکربن اشاره کرد (Abu-Farsakh et al., 2015; Estabragh et al., 2016; Estabragh, Ghayamara, et al., 2022; Estabragh, Jahani, et al., 2022; Khosravi et al., 2013; Little & Nair, 2009; Yi et al., 2014a). به منظور جایگزینی سیمان مطالعات بسیاری انجام شده به طوری که در سال‌های اخیر استفاده از محصولات جانبی صنایع ذوب‌آهن بسیار مورد توجه واقع شده است. سرباره دانه‌ای کوره ذوب‌آهن^۱ (GGBS) یکی از این مواد است. استفاده از این ماده شامل مزایایی نسبت به سیمان معمولی و آهک است مانند مقاومت بالا در برابر نفوذ کلریدها، افزایش دوام در برابر عوامل جوی و حمله سولفات‌های موجود در خاک می‌باشد و علاوه بر این در خصوص هزینه‌های تولید و ملاحظات زیست‌محیطی، استفاده از آن نسبت به سیمان بسیار توجیه‌پذیر می‌باشد (جهانی، ۱۴۰۲); (Estabragh, Jahani, et al., 2022; Estabragh, Khajepour, et al., 2022; Jahani et al., 2022, 2023). در صنایع ذوب‌آهن و طی فرآیند تولید آهن، محصول فرعی دیگری به نام سرباره که به صورت مذاب است تولید می‌شود. اگر این ماده مذاب به وسیله آب به سرعت خنک شود به صورت ذرات دانه‌های شیشه‌ای و با اندازه‌ای شبیه به ماسه تشکیل می‌شود. مواد مذکور آسیاب شده در نهایت تحت عنوان سرباره دانه‌ای کوره ذوب‌آهن نامیده می‌شود (شایان به ذکر است که به منظور سهولت در نگارش، از این به بعد از واژه سرباره به جای سرباره دانه‌ای کوره ذوب‌آهن استفاده می‌شود).

تاکنون عملکرد سرباره در بهسازی خاک‌های طبیعی مورد بررسی محققین (Akinwumi, 2014; Estabragh, Jahani, et al., 2022; Wild et al., 1996) واقع شده است. آن‌ها مواردی چون افزایش مقاومت فشاری، افزایش ظرفیت باربری کالیفرنیا و کاهش پتانسیل تغییرحجم را از مزایای کاربرد آن گزارش نموده‌اند. نتایج تحقیق‌های انجام شده در این خصوص نشان می‌دهد که اگر سرباره به تنهایی جهت بهسازی خاک به کار رود به علت سرعت فرآیند هیدراسیون بسیار آهسته و کند، افزایش قابل توجهی در مقاومت فشاری و سایر پارامترهای فیزیکی و مکانیکی خاک ایجاد نمی‌گردد (Yi et al., 2014a). محققین توصیه کردند که برای غلبه بر این خاصیت، فعال‌سازی سرباره قبل از افزودن به خاک مد نظر قرار گیرد. در این خصوص، سیمان، آهک و هیدروکسیدهای قلیایی خاکی مانند $(OH)Ca_2$ ، $(OH)Sr_2$ و $(OH)Ba$ نیز مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. هم‌اکنون مشخص شده که مواد مذکور توانایی تسهیل هیدراسیون سرباره و افزایش عملکرد آن را دارند (Jin et al., 2015). برای فعال‌سازی سرباره، معمولاً مواد مذکور را با نسبت خاصی از سرباره مخلوط می‌کنند و سپس درصد لازم از مخلوط حاصل را برای بهسازی به خاک اضافه می‌نمایند. در سال‌های اخیر نیز اکسیدمنیزیم به عنوان ماده فعال‌کننده سرباره پیشنهاد شده است. استبرق و همکاران (Estabragh, Jahani, et al., 2022) (al., 2022) همکاران (Jegandan et al., 2010) و یی و همکاران (Yi et al., 2014b) گزارش کردند که در صورت اضافه شدن اکسیدمنیزیم به عنوان فعال‌کننده به سرباره، مقاومت فشاری خاک را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد. یی و همکاران (Yi et al., 2012) (et al., 2012) با مقایسه اثر اکسیدمنیزیم و هیدروکسیدکلسیم در فعال‌سازی هیدراسیون سرباره، نتیجه‌گیری کردند که فعال‌سازی سرباره با اکسیدمنیزیم می‌تواند ۲۰ تا ۳۰ درصد عملکرد بهتری در افزایش مقاومت تک‌محوری نسبت به فعال‌سازی با هیدروکسیدکلسیم داشته باشد. همچنین ارزیابی تاثیر اضافه نمودن سیمان به سرباره در هیدراسیون سرباره مورد مطالعه پژوهش‌گران قرار گرفته است. در این خصوص پژوهش‌گران بیان نمودند که در اثر هیدراسیون سیمان و تولید فرآورده‌های آن که غالباً شامل هیدروکسیدهای قلیایی است، خاصیت قلیایی مجموعه به شدت افزایش یافته و در نهایت منجر به تسریع هیدراسیون سرباره می‌گردد (Häkkinen, 1993).

بررسی منابع موجود نشان می‌دهد که تاکنون پژوهشی در خصوص ارزیابی تاثیر مخلوط اکسیدمنیزیم و سیمان در فعال‌سازی سرباره و عملکرد آن در بهسازی خاک‌های طبیعی و آلوده به آلاینده‌های هیدروکربنی صورت نپذیرفته است. بنابراین با در نظر گرفتن مشکلات احتمالی در زمینه‌های اقتصادی و زیست‌محیطی می‌بایست مطالعاتی در خصوص اثر آن‌ها بر خواص خاک‌های معمولی و آلوده انجام شود و سپس ارزیابی و مقایسه آن‌ها صورت پذیرد. در این کار تحقیقاتی بهسازی یک خاک رسی معمولی و نیز آلوده شده به محلول گلیسرول با استفاده از سرباره و همچنین سرباره فعال شده با اکسیدمنیزیم و مخلوط اکسیدمنیزیم و سیمان در درصدهای مختلف مورد مطالعه قرار می‌گیرد. آزمایش‌هایی شامل حدود اتربرگ، تراکم استاندارد، مقاومت تک‌محوری و SEM^2 روی نمونه‌های گوناگون صورت می‌پذیرد و در

^۱ Ground Granulated Blast-furnace Slag

^۲ Scanning Electron Microscopy

نهایت نتایج مورد بررسی، مقایسه و ارزیابی قرار می‌گیرند.

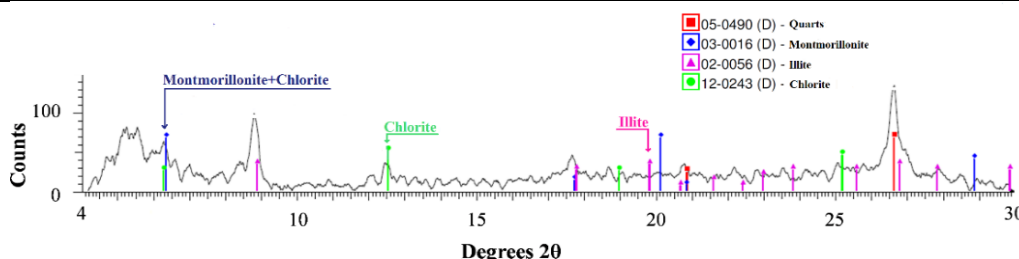
مواد و روش‌ها

خاک

خاک مورد استفاده در این تحقیق یک نوع خاک رسی شامل ۲۷ درصد ماسه، ۳۳ درصد سیلت و ۴۰ درصد رس است. حدود روانی، خمیری و انقباض این خاک بر اساس نتایج آزمایش حدود اتربرگ به ترتیب برابر ۴۶/۴، ۲۳/۸ و ۱۳ درصد و شاخص خمیری آن ۲۲/۶ درصد می‌باشد. وزن واحد حجم خشک بیشینه و رطوبت بهینه نیز بر اساس آزمایش تراکم استاندارد به ترتیب برابر ۱۷/۷ (kN/m³) و ۱۷/۵ درصد تعیین گردید. با توجه به نتایج آزمایش‌های حدود اتربرگ و دانه‌بندی، این خاک بر اساس سیستم طبقه‌بندی متحد (USCS)، رس با خاصیت خمیری (پلاستیسیته) پایین (CL) طبقه‌بندی گردید. همچنین نتایج آزمایش‌های شیمیایی خاک نیز در جدول (۱) آورده شده‌است. علاوه بر این، آزمایش پراش پرتو ایکس (XRD^۱) روی خاک انجام شد و نتایج نشان داد که کانی‌های این خاک شامل کوارتز، کلسیت و فلدسپار (سدیم، کلسیم و پتاسیم) و کانی‌های رسی آن نیز شامل ایلیت، کلریت و مونت‌موریلونیت می‌باشد. نتایج آزمایش XRD در شکل (۱) ارائه شده‌است. منبع قرصه خاک مورد استفاده، منطقه دشت تاکستان در استان قزوین می‌باشد.

جدول ۱. ویژگی‌های شیمیایی خاک مورد استفاده

مشخصه	pH	EC	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	So ₄ ²⁻	CaCO ₃	مواد آلی
واحد اندازه‌گیری	-	(dS/m)	(meq/L)	(meq/L)	(meq/L)	(meq/L)	(meq/L)	(meq/L)	(%)	(%)
مقدار	۸/۲	۵/۰۳	۴۲	۴۶	۲/۲	۲۶/۲	۳/۷	۱۹/۲	۴/۲	۰/۲



شکل ۱. نتایج آزمایش XRD مربوط به خاک طبیعی (کانی‌های رسی)

آب

آب مورد استفاده در این تحقیق، آب شرب لوله‌کشی استان البرز و شهر کرج است و میزان اسیدته (pH) و هدایت الکتریکی (EC) آن به ترتیب برابر ۷/۷۲ و ۱/۲ (dS/m) اندازه‌گیری گردید.

گلیسرول

این ماده هیدروکربنی به‌طور گسترده در صنایع شیمیایی به‌خصوص در صنایع داروسازی و تولید مواد شوینده مورد استفاده قرار می‌گیرد. گلیسرول در آب به خوبی حل شده و دارای لزجت بالایی در مقایسه با آب می‌باشد. همچنین مطابق اطلاعات کسب شده از شرکت تولید کننده ضریب ثابت دی‌الکتریک آن در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد معادل ۴۸ است. دلایل انتخاب گلیسرول به عنوان ماده آلاینده در این تحقیق شامل غیر سمی بودن آن، سهولت در مخلوط کردن با آب و همچنین تاثیر قابل توجه در خصوصیات خاک، می‌باشد. از طرفی محققین مطالعات گسترده‌ای در مورد اثر آن روی خاک انجام داده‌اند. بنابراین می‌توان نتایج حاصل از این کار را با کارهای مشابه مقایسه و در خصوص درستی آزمایشات قضاوت نمود. تصویر گلیسرول مورد استفاده در شکل (۲ الف) قابل مشاهده است.

سیمان

سیمان مورد استفاده در این تحقیق، سیمان پرتلند نوع ۱ یا معمولی و مطابق کاتالوگ کارخانه دارای وزن مخصوص ۳/۱۵ و درجه نرمی بلین ۴۱۰۰ (cm²/g) می‌باشد. سایر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی آن بر اساس استاندارد ASTM مشخص گردید که نتایج آزمایش‌ها نشان داد که غلظت نرمال، زمان گیرش اولیه و نهایی آنها به ترتیب معادل ۲۵/۵ درصد، ۱۶۰ و ۲۲۰ دقیقه است. همچنین آزمایش‌های

مقاومتی نشان دادند که میزان مقاومت فشاری، کششی و خمشی نمونه‌های ۷ روزه آن نیز به ترتیب برابر مقادیر ۱۹/۲، ۲/۷ و ۴/۳ مگاپاسکال می‌باشد. تصویر سیمان مورد استفاده در شکل (۲ ب) قابل مشاهده است.

سرپاره

سرپاره مورد نظر از کارخانه ذوب آهن اصفهان تهیه گردید. مطابق اطلاعات کسب شده از کارخانه ذوب آهن اصفهان، ترکیبات شیمیایی آن عبارتند از ۴۱/۵ درصد اکسید کلسیم، ۳۵/۵ درصد اکسید سیلیسیم، ۱۱/۵ درصد اکسید آلومینیوم، ۰/۵ درصد اکسید آهن، ۸ درصد اکسید منیزیم، ۰/۳ درصد اکسید پتاسیم، ۰/۲ درصد دی‌اکسید تیتانیوم و ۰/۲ درصد اکسید سدیم. میانگین اندازه ذرات سرپاره نیز، ۵۰ میکرون با سطح ویژه حدود $(28-6 \text{ m}^2/\text{g})$ می‌باشد. تصویر سرپاره مورد استفاده در شکل (۲ ج) قابل مشاهده است.

اکسید منیزیم (MgO)

اکسید منیزیم مورد استفاده در این کار تحقیقاتی، محصولی از شرکت شیمی دارویی نوترون می‌باشد که شامل ۹۴/۲ درصد اکسید منیزیم، ۱/۷ درصد اکسید کلسیم، ۰/۸۵ درصد اکسید سیلیسیم و ۰/۶۲ درصد اکسید آهن و ۰/۱۶ درصد اکسید آلومینیوم می‌باشد. وزن مخصوص، میانگین اندازه ذرات و سطح ویژه آن نیز به ترتیب معادل ۳/۵۵، $(60 \mu\text{m})$ و $(250-300 \text{ m}^2/\text{g})$ می‌باشد. مشخصات فیزیکی و شیمیایی اکسید منیزیم مطابق با اطلاعات شرکت تولید کننده می‌باشد. تصویر اکسید منیزیم مورد استفاده در شکل (۲ د) قابل مشاهده است.



شکل ۲. مواد مورد استفاده در آزمایش. (الف) گلیسرول، (ب) سیمان، (ج) سرپاره، (د) اکسید منیزیم

تهیه خاک آلوده

به منظور تهیه خاک آلوده به محلول گلیسرول، گلیسرول با نسبت وزنی ۵۰ درصد با آب مقطر مخلوط شد. محلول تهیه شده در درصدهای وزنی ۴، ۸ و ۱۲ به صورت اسپری در چندین لایه به خاک رسی اضافه و مخلوط گردید و خاک آلوده به مدت ۷ روز در کیسه پلاستیکی مسدود شده‌ای جهت انجام واکنش‌های شیمیایی لازم، نگهداری گردید.

تهیه نمونه‌های آزمایش مقاومت تک‌محوری

در این پژوهش از مواد افزودنی سرپاره، اکسید منیزیم و سیمان استفاده شده است. اختلاط افزودنی‌های مورد استفاده شامل این موارد است: سرپاره به تنهایی، سرپاره فعال شده با اکسید منیزیم (با نسبت وزنی ۳ (سرپاره) به ۱ (اکسید منیزیم))، سرپاره فعال شده با مخلوط اکسید منیزیم و سیمان (با نسبت وزنی ۳ (سرپاره) به ۰/۵ (اکسید منیزیم) به ۰/۵ (سیمان)). سپس درصدهای ۵، ۱۰ و ۱۵ از اختلاط‌های مذکور حاصله برای بهسازی خاک طبیعی و خاک آلوده استفاده شد. برای ساخت نمونه‌های لازم به منظور تعیین مقاومت، ابتدا خاک طبیعی و خاک آلوده با هر یک از ترکیب‌های افزودنی مخلوط شد. سپس آزمایش تراکم استاندارد جهت به دست آوردن وزن واحد حجم خشک بیشینه و رطوبت بهینه روی مخلوط‌های تهیه شده صورت پذیرفت. در ادامه رطوبت‌های اولیه مخلوط‌های یاد شده ابتدا با افزودن آب به مقدار رطوبت بهینه حاصله از نتایج تراکم رسانده شد، سپس با استفاده از روش تراکم استاتیکی اقدام به تهیه نمونه‌های مورد نیاز گردید. در این روش، مخلوط‌های یاد شده در یک قالب ویژه ریخته شد و متراکم گردید به طوری که وزن واحد حجم خشک بیشینه آن با وزن واحد حجم خشک بیشینه منحنی تراکمی مربوطه برابر شد. نمونه‌های تهیه شده مطابق استاندارد ASTM-D163-07 در دمای ثابت ۲۵ درجه سانتی‌گراد و رطوبت بالای ۹۵ درصد در اتاقک مخصوصی نگهداری شدند و آزمایش مقاومت تک‌محوری در زمان‌های عمل‌آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه بر روی آن‌ها صورت گرفت.

آزمایش‌ها

آزمایش‌های صورت گرفته بر روی خاک طبیعی، خاک آلوده و اختلاط هر یک از آن‌ها با سرپاره، مخلوط سرپاره و اکسید منیزیم و مخلوط سرپاره و اکسید منیزیم و سیمان شامل حدود اتربرگ، تراکم استاندارد، مقاومت تک‌محوری و SEM می‌باشد. ارزیابی اضافه کردن هر یک از مواد افزودنی ذکر شده با درصدهای مختلف به خاک طبیعی و خاک آلوده، با انجام آزمایش‌های فوق بر اساس استاندارد ASTM صورت

گرفت. آزمایش مقاومت تک محوری هم مطابق استاندارد ASTM-D1633-00 روی نمونه‌هایی حاوی خاک طبیعی، خاک آلوده، خاک طبیعی و خاک آلوده با افزودنی‌ها انجام شد. در طول آزمایش، میزان بار وارد شده و تغییر شکل ایجاد شده در نمونه به صورت پیوسته ثبت شدند. سپس با توجه به داده‌های به دست آمده اقدام به تعیین منحنی تنش- کرنش هر یک از نمونه‌ها گردید و در نهایت مقادیر کشسانی مربوط به ۵۰ درصد مقاومت نهایی از منحنی‌های تنش-کرنش مربوطه محاسبه گردید. هم‌چنین به منظور بررسی و تحلیل ریزساختار نمونه‌های خاک در ابعاد میکروسکوپی، اقدام به تهیه تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی شد. در این پژوهش، آزمایش SEM روی نمونه‌های مختلف صورت پذیرفت. شکل (۳) تصاویری از آزمایش‌ها و نمونه‌ها ارائه می‌شود.



شکل ۳. تصاویر وسایل انجام آزمایش (الف) اجزای قالب مورد استفاده برای تهیه نمونه‌های آزمایش تک محوری (ب) دستگاه بارگذاری تک محوری و نحوه قرارگیری نمونه (ج) نمونه گسیخته شده در دستگاه بارگذاری تک محوری (د) وسایل انجام آزمایش تراکم استاندارد

نتایج

آزمایش حدود اتربرگ و تراکم استاندارد

نتایج آزمایش حدود اتربرگ و تراکم استاندارد برای نمونه‌های محتوی خاک طبیعی، خاک آلوده به ۴، ۸ و ۱۲ درصد وزنی محلول گلیسرول، مخلوط خاک طبیعی با افزودنی‌ها، مخلوط خاک آلوده به درصدهای وزنی مختلف محلول گلیسرول با افزودنی‌ها در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول ۲. نتایج آزمایش حدود اتربرگ و تراکم استاندارد

آلودگی خاک (%)	مشخصه	فاقد افزودنی	سرباره			سرباره و اکسیدمنیزیم			سرباره و اکسیدمنیزیم و سیمان
			۱۵٪	۱۰٪	۵٪	۱۵٪	۱۰٪	۵٪	
صفر	حد روانی (%)	۴۶/۴	۴۷	۴۹/۶	۵۳	۴۸	۵۲	۵۴	۳۹
	حد خمیری (%)	۲۳/۸	۲۳	۲۴	۲۵/۷	۲۴	۲۶	۲۸	۲۵
	شاخص خمیری (%)	۲۲/۶	۲۳/۶	۲۵/۶	۲۸	۲۶	۲۶	۲۴	۲۴
	ω_{opt} (%)	۱۷/۵	۲۱	۱۹/۸	۱۹	۲۱/۶	۲۲/۶	۲۱	۲۰/۵
	$\gamma_{d max}$ (kN/m ³)	۱۷/۷	۱۷	۱۷/۷	۱۷	۱۶/۲	۱۶/۴	۱۶/۱	۱۶/۵
۴	حد روانی (%)	۴۴	۴۳	۴۴/۵	۴۶	۴۵	۴۶/۵	۴۸	۴۷
	حد خمیری (%)	۲۱	۲۲	۲۴/۵	۲۶/۵	۲۰	۲۲	۲۴/۵	۲۲
	شاخص خمیری (%)	۲۳	۲۱	۲۰/۵	۱۹/۵	۲۵	۲۴/۵	۲۳/۵	۲۵
	ω_{opt} (%)	۱۸	۱۹	۱۸/۵	۱۹	۱۹	۱۹	۱۸	۱۷
	$\gamma_{d max}$ (kN/m ³)	۱۷/۵	۱۷	۱۷/۲	۱۷	۱۷/۲	۱۷	۱۷/۳	۱۷/۸
۸	حد روانی (%)	۴۰	۳۸	۳۹	۴۰	۴۰	۴۱	۴۲	۴۱
	حد خمیری (%)	۲۰/۵	۲۴	۲۵/۵	۲۱	۲۳	۲۳/۵	۲۵	۲۱
	شاخص خمیری (%)	۱۹/۵	۱۵	۱۵	۱۹/۵	۱۷	۱۷/۵	۱۷	۲۰
	ω_{opt} (%)	۱۵/۵	۱۵	۱۴/۸	۱۵	۱۴/۵	۱۴/۷	۱۴/۵	۱۴/۵
	$\gamma_{d max}$ (kN/m ³)	۱۸	۱۸	۱۸/۱	۱۸	۱۷/۹	۱۷/۷	۱۷/۹	۱۷/۹
۱۲	حد روانی (%)	۳۹	۳۸	۳۷	۴۱	۴۱	۴۲	۴۴	۴۱
	حد خمیری (%)	۱۸	۲۱	۲۱/۵	۲۱	۲۲	۲۳/۵	۲۱	۲۰
	شاخص خمیری (%)	۲۱	۲۱	۱۷/۵	۲۱	۲۰	۱۹/۵	۲۰	۲۱
	ω_{opt} (%)	۱۲	۱۲	۱۱/۵	۱۲	۱۲	۱۱/۲	۱۱/۵	۱۱/۵
	$\gamma_{d max}$ (kN/m ³)	۱۸/۳	۱۷/۹	۱۷/۹	۱۸	۱۷/۹	۱۷/۸	۱۷/۹	۱۸/۳



قابل مشاهده می‌باشد که حد روانی خاک طبیعی ۴۶/۴ درصد اندازه‌گیری شد. با اضافه نمودن محلول گلیسرول به میزان ۴، ۸ و ۱۲ درصد، حد روانی خاک آلوده به ترتیب به مقادیر ۴۴، ۴۰ و ۳۹ درصد تغییر یافته است. حد خمیری نیز برای خاک طبیعی مقدار ۲۳/۸ درصد تعیین گردید. با اضافه شدن ۴، ۸ و ۱۲ درصد وزنی محلول گلیسرول، به ترتیب مقادیر ۲۱، ۲۰/۵ و ۱۸ درصد برای حد خمیری اندازه‌گیری شد.

نتایج آزمایش تراکم استاندارد (جدول (۲)) نشان می‌دهد که رطوبت بهینه و وزن واحد حجم خشک بیشینه برای خاک طبیعی به ترتیب ۱۷/۵ درصد و $۱۷/۷ \text{ (kN/m}^3\text{)}$ تعیین گردید. با اضافه نمودن محلول گلیسرول به خاک به میزان ۴، ۸ و ۱۲ درصد وزنی، رطوبت بهینه به ترتیب به مقادیر ۱۸، ۱۵/۵ و ۱۲ درصد تغییر یافتند. وزن واحد حجم خشک بیشینه نیز برای درصد‌های یادشده گلیسرول در خاک به ترتیب به مقادیر ۱۷/۵، ۱۸ و $۱۸/۳$ کیلونیوتن بر مترمکعب تعیین شده است. مطابق جدول (۲)، تغییرات قابل توجه‌ای در مقادیر پارامترهای تراکمی خاک آلوده در صورت اضافه شدن مواد افزودنی مختلف نشان داده نشده است. به عنوان مثال در خاک آلوده به ۴ درصد وزنی محلول گلیسرول، رطوبت بهینه ۱۸ درصد و وزن واحد حجم خشک بیشینه $۱۷/۵ \text{ (kN/m}^3\text{)}$ می‌باشد. با اضافه شدن ۵ درصدی مواد افزودنی سرباره، مخلوط سرباره و اکسیدمنیزیم و مخلوط سرباره و اکسیدمنیزیم و سیمان به خاک آلوده یادشده، رطوبت بهینه به ترتیب مقادیر ۱۹، ۱۹ و ۱۸ درصد، و وزن واحد حجم خشک بیشینه به ترتیب مقادیر ۱۷، ۱۷ و $۱۷/۳$ کیلونیوتن بر مترمکعب اندازه‌گیری شده است.

آزمایش مقاومت تک‌محوری

به منظور بررسی تاثیر اضافه نمودن مواد افزودنی سرباره، سرباره فعال شده با اکسیدمنیزیم و همچنین سرباره فعال شده با مخلوط اکسیدمنیزیم و سیمان در مقاومت فشاری خاک طبیعی و خاک آلوده به محلول گلیسرول، آزمایش مقاومت تک‌محوری در شرایط مختلف بر روی نمونه‌ها صورت پذیرفت. سپس منحنی‌های تنش-کرنش با استفاده از داده‌های آزمایش ترسیم گردید. در ادامه مقادیر کشسانی (E) نمونه‌ها از روش‌های ضریب کشسانی اولیه ($E_{initial}$)، ضریب کشسانی مربوط به ۳۰ درصد مقاومت نهایی (E_{30}) و ضریب کشسانی مربوط به ۵۰ درصد مقاومت نهایی (E_{50}) محاسبه گردید. با ارزیابی نتایج ضرایب یادشده، مشاهده شد که روند منطقی و معنادار بین مقادیر کشسانی مربوط به ۵۰ درصد مقاومت نهایی نمونه‌ها وجود دارد. به همین دلیل در ادامه، نتایج آزمایش‌های مقاومتی بر حسب مقادیر کشسانی متناظر با ۵۰ درصد مقاومت نهایی (E_{50}) ارائه می‌گردد. لازم به ذکر است که مقادیر مقاومت تک‌محوری و E_{50} خاک طبیعی به ترتیب برابر ۴۲۰ (MPa) و ۲۳ و مقادیر مقاومت تک‌محوری خاک آلوده به درصد‌های ۴، ۸ و ۱۲ محلول گلیسرول به ترتیب برابر ۳۲۰، ۲۹۳ و ۲۶۶ کیلوپاسکال و مقادیر E_{50} آن‌ها به ترتیب برابر ۱۹، ۱۶ و ۱۳ مگاپاسکال اندازه‌گیری شد. در جدول (۳) نتایج مربوط به E_{50} و مقاومت فشاری نهایی تمامی نمونه‌های خاک طبیعی و خاک آلوده اختلاط یافته با افزودنی‌ها بر حسب مگاپاسکال ارائه شده است.

به عنوان مثال ملاحظه می‌شود که با افزودن سرباره به میزان ۱۰ درصد وزنی به خاک آلوده به گلیسرول به میزان ۸ درصد، E_{50} در زمان عمل‌آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روز مقادیر ۵۱، ۸۰ و ۸۳ مگاپاسکال تعیین گردید. در همین زمان‌های عمل‌آوری و درصد از خاک آلوده، با افزودن ۱۰ درصد وزنی سرباره فعال شده با اکسیدمنیزیم، مقادیر ۶۵، ۷۸ و ۱۲۱ مگاپاسکال و همچنین با افزودن ۱۰ درصد وزنی سرباره فعال شده با مخلوط اکسیدمنیزیم و سیمان، مقادیر ۱۰۶، ۱۵۴ و ۱۶۹ مگاپاسکال اندازه‌گیری شد. نتایج نشان می‌دهد که برای خاک طبیعی و خاک آلوده اختلاط یافته با ماده افزودنی مشخص در درصد ثابت وزنی، مقادیر E_{50} تاثیرپذیر از زمان عمل‌آوری و درصد وزنی ماده آلاینده گلیسرول در مخلوط می‌باشد.

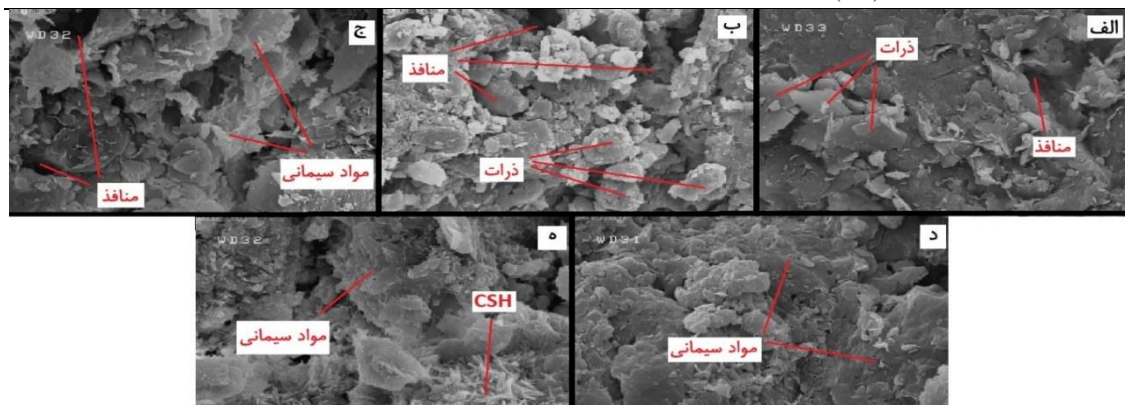
آزمایش SEM

تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه‌های مربوطه در شکل (۴) ارائه شده است. نمونه‌ها شامل خاک طبیعی، خاک آلوده و خاک آلوده-سرباره، خاک آلوده-مخلوط سرباره و اکسیدمنیزیم، خاک آلوده-مخلوط سرباره، اکسیدمنیزیم و سیمان می‌باشد. برای تهیه نمونه‌ها، از خاک ۸ درصد آلوده به محلول گلیسرول و مقادیر ۱۰ درصد وزنی مواد افزودنی استفاده شد و زمان عمل‌آوری نمونه‌های بهسازی شده با افزودنی‌ها نیز ۱۴ روز در نظر گرفته شد. این آزمایش‌ها در آزمایشگاه نانوالکترونیک دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه تهران انجام شد. در شکل (۴ الف) مشاهده می‌شود توده خاک طبیعی متشکل از ذراتی است که به یکدیگر چسبیده‌اند و برخی از آن‌ها نیز تقریباً بصورت پراکنده هستند. همچنین منافذ و فضاهای خالی بسیار محدود است و دارای ابعاد کوچکی می‌باشند. با اضافه شدن گلیسرول (شکل ۴ ب)، ذرات جذب یکدیگر شده و تشکیل ذرات درشت‌تر و مجتمع داده‌اند. همچنین منافذ و فضاهای خالی از لحاظ ابعاد نسبت به خاک طبیعی

نیز بیشتر شده‌اند. به عبارتی درجه فلوکوله شدن نسبت به خاک طبیعی بیشتر شده است. با اضافه شدن سرباره به خاک آلوده (شکل ۴ ج)، همچنان فضای خالی در توده خاک مشاهده می‌شود. همچنین قابل ملاحظه است که مواد سیمانی تولید شده ناشی از هیدراسیون سرباره باعث اتصال ذرات شده است. در شرایط فعال شدن سرباره توسط اکسیدمنیزیم، تصویر میکروسکوپی (شکل ۴ د) نشان می‌دهد که محصولات تولید شده ناشی از هیدراسیون سرباره و اکسید منیزیم باعث اتصال تمام ذرات خاک گردیده و بخشی از منافذ خاک در مقایسه با خاک آلوده را پر کرده‌اند به طوری که خاک به صورت کامل یکپارچه شده و فضای خالی بین ذرات قابل مشاهده نمی‌باشد. در شکل (۴ ه) نیز مواد سیمانته کننده مانند ژل کلسیم‌سیلیکاته هیدراته (CSH) که از واکنش هیدراسیون سرباره فعال شده با سیمان و اکسیدمنیزیم تولید شده است، در بین ذرات قابل ملاحظه است. در این حالت نیز مواد سیمانی موجب اتصال ذرات خاک و یکپارچگی شده است. همچنین فضای خالی نیز در بین ذرات قابل مشاهده است.

جدول ۳. مقادیر مقاومت فشاری نهایی و E₅₀ مربوط به تمام نمونه‌های بهسازی شده

پارامتر	زمان عمل- آوری (روز)	سرباره			سرباره و اکسیدمنیزیم			سرباره و اکسیدمنیزیم و سیمان		
		۱۰٪	۱۵٪	۵٪	۱۰٪	۱۵٪	۵٪	۱۰٪	۱۵٪	۵٪
E ₅₀ (MPa)	۷	۷۵	۹۲	۱۳۵	۹۳	۱۷۵	۲۳۷	۱۹۰	۳۱۲	
UCS (kPa)		۱۱۰۶	۱۱۵۳	۱۸۵۵	۱۱۲۳	۱۳۸۴	۱۸۸۵	۱۹۰۹	۲۵۱۷	
E ₅₀ (MPa)		۱۰۵	۱۳۱	۱۷۸	۱۱۲	۳۲۲	۴۱۶	۲۳۷	۳۸۵	
UCS (kPa)	۱۴	۱۴۲۰	۱۵۱۳	۲۳۱۴	۱۸۰۰	۲۲۶۰	۲۵۲۴	۲۵۹۲	۲۶۸۹	
E ₅₀ (MPa)		۱۲۹	۲۲۴	۲۲۹	۱۶۴	۵۲۰	۶۰۰	۶۴۰	۵۳۳	
UCS (kPa)		۱۸۹۱	۲۰۲۰	۲۵۲۰	۲۲۸۱	۲۶۱۷	۲۹۸۲	۳۱۵۷	۳۳۴۷	
E ₅₀ (MPa)	۷	۴۶	۶۲	۱۱۲	۸۸	۱۰۲	۱۴۰	۱۳۱	۱۵۳	
UCS (kPa)		۹۲۲	۱۰۰۶	۱۷۰۹	۱۲۹۷	۱۴۰۹	۱۹۸۹	۱۸۹۹	۱۹۵۵	
E ₅₀ (MPa)		۶۳	۸۳	۱۴۰	۱۱۴	۱۱۸	۱۷۶	۱۹۴	۱۹۶	
UCS (kPa)	۱۴	۱۱۹۷	۱۲۴۴	۱۸۶۰	۱۵۰۵	۱۶۰۴	۲۱۷۲	۲۲۶۵	۲۲۶۰	
E ₅₀ (MPa)		۱۰۹	۱۳۱	۱۷۱	۱۳۲	۱۵۶	۲۳۲	۲۳۰	۲۹۱	
UCS (kPa)		۱۵۵۷	۱۶۵۳	۲۰۱۴	۱۸۳۰	۲۴۳۷	۲۹۴۷	۳۱۵۷	۳۱۰۸	
E ₅₀ (MPa)	۷	۴۱	۵۱	۷۷	۷۰	۶۵	۱۱۳	۱۰۶	۱۳۶	
UCS (kPa)		۸۹۳	۹۴۷	۱۳۱۶	۱۲۰۴	۱۲۸۰	۱۴۲۳	۱۲۴۵	۱۹۰۴	
E ₅₀ (MPa)		۶۹	۸۰	۸۹	۸۹	۷۸	۱۴۳	۱۵۴	۱۶۴	
UCS (kPa)	۱۴	۱۳۳۴	۱۳۷۳	۱۴۵۳	۱۳۹۴	۱۴۵۴	۱۷۰۰	۱۴۵۲	۲۲۶۰	
E ₅₀ (MPa)		۷۵	۸۳	۱۲۹	۱۱۹	۱۲۱	۱۸۹	۱۱۳	۲۳۲	
UCS (kPa)		۱۳۲۸	۱۳۳۸	۱۹۶۳	۱۴۹۹	۱۸۰۵	۲۱۴۰	۱۵۷۷	۲۸۵۷	
E ₅₀ (MPa)	۷	۳۲	۴۱	۶۰	۵۸	۶۵	۸۲	۷۰	۸۵	
UCS (kPa)		۷۷۲	۸۵۵	۱۰۹۷	۱۰۷۲	۱۱۴۸	۱۳۰۲	۸۹۷	۱۴۵۲	
E ₅₀ (MPa)		۴۴	۵۸	۷۸	۷۳	۷۷	۹۶	۱۰۳	۱۰۷	
UCS (kPa)	۱۴	۹۶۹	۱۰۹۸	۱۳۴۸	۱۲۰۸	۱۲۷۴	۱۵۰۲	۱۲۷۳	۱۷۵۴	
E ₅₀ (MPa)		۵۶	۶۳	۹۲	۹۵	۱۰۴	۱۱۷	۹۱	۱۵۸	
UCS (kPa)		۱۱۴۲	۱۱۴۶	۱۴۳۱	۱۴۵۷	۱۶۰۶	۱۶۵۶	۱۴۲۴	۲۳۳۸	

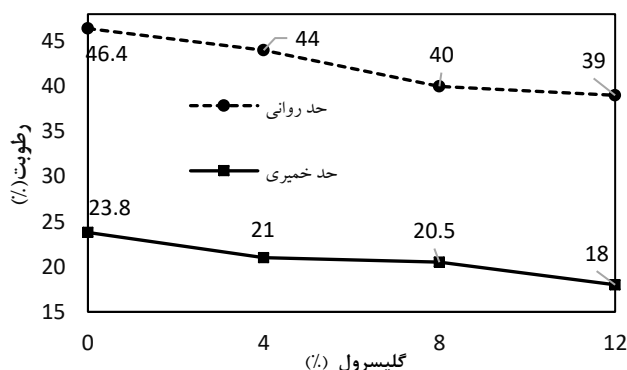


شکل ۴. نتایج SEM- (الف) خاک طبیعی، (ب) خاک آلوده، (ج) خاک آلوده + ۱۰٪ سرباره، (د) خاک آلوده + ۱۰٪ سرباره و اکسیدمنیزیم (ه) خاک آلوده + ۱۰٪ سرباره و اکسیدمنیزیم و سیمان

بحث

حدود اتربرگ

نتایج حدود اتربرگ برای خاک طبیعی و خاک آلوده به محلول گلیسرول در درصد‌های وزنی مختلف در شکل (۵) ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که اضافه شدن محلول گلیسرول و همچنین افزایش درصد وزنی آن در خاک، موجب ایجاد روند کاهشی در حدود روانی و خمیری نسبت به خاک طبیعی گردید. این یافته‌ها با نتایج گزارش شده توسط Estabragh et al., 2018 (Singh et al., 2008, 2009)، مطابقت دارد و ولی با نتایج Kermani & Ebadi, 2012 مطابقت ندارد.



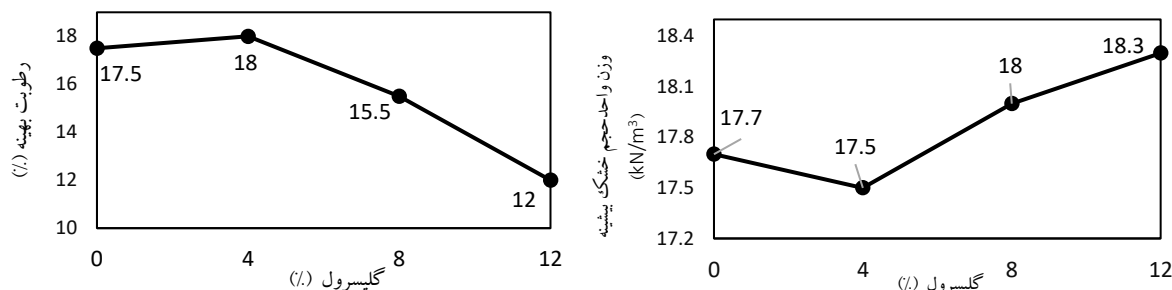
شکل ۵. نتایج آزمایش حدود اتربرگ برای خاک طبیعی و خاک آلوده به درصد‌های مختلف گلیسرول

کاهش حدود روانی و خمیری ناشی از اضافه نمودن محلول گلیسرول نسبت به خاک طبیعی را می‌توان با استفاده از تئوری لایه مضاعف که در خصوص توزیع یون‌های باردار در مجاورت سطح باردار منفی ذرات رس است، توجیه کرد (Winterkorn & Pamukcu, 1991). ضریب ثابت دی الکتریک محلول گلیسرول بسیار کمتر از آب است (۶۰ در مقابل ۸۱ برای آب). با اضافه شدن این آلاینده، موجب کاهش ضخامت لایه مضاعف شده و در نتیجه درجه فوله‌کوله شدن خاک افزایش می‌یابد. در این شرایط ذرات خاک بهم چسبیده و سطح ویژه خاک کاهش یافته و در نتیجه پتانسیل جذب آب خاک کاهش می‌یابد و در نهایت منجر به کاهش حدود روانی و خمیری می‌گردد (Izdebska-Mucha et al., 2011). با مقایسه ساختار خاک در مقیاس میکروسکوپی مربوط به نمونه‌های خاک طبیعی (شکل ۴ الف)) و خاک آلوده به محلول گلیسرول (شکل ۴ ب))، قابل ملاحظه است که در حالت طبیعی ذرات خاک تقریباً بصورت نیمه‌پراکنده هستند. با اضافه شدن محلول گلیسرول به خاک، ذرات خاک جذب یکدیگر شده و تشکیل ساختار مجتمع مانند داده‌اند و سطح ویژه به شدت کاهش یافته است.

تراکم استاندارد

نتایج آزمایش تراکم استاندارد (شکل ۶)) نشان می‌دهد که با اضافه شدن محلول گلیسرول به میزان ۴ درصد وزنی به خاک طبیعی، رطوبت بهینه از ۱۷/۵ به ۱۸ درصد افزایش و وزن واحد حجم خشک بیشینه از $7/17 \text{ (m}^3/\text{kN)}$ به $5/17 \text{ (kN/m}^3)$ کاهش یافته است. با افزایش درصد محلول گلیسرول از ۴ به ۸ و ۱۲، روند معکوس شده و رطوبت بهینه به ترتیب به مقادیر ۱۵/۵ و ۱۲ درصد کاهش یافته و وزن واحد حجم خشک بیشینه نیز به مقادیر ۱۸ و $18/3$ کیلونیوتن بر مترمکعب افزایش یافته است. نتایج پژوهش می‌توان بیان نمود که با اضافه شدن محلول گلیسرول به میزان ۴ درصد وزنی به خاک رسی منجر به کاهش ضخامت لایه مضاعف شده و در نتیجه ساختار خاک به سمت فوله‌کوله شدن تمایل می‌یابد. در این شرایط از ساختار خاک، فضای بین ذرات خاک افزایش یافته و همچنین منافذ با ابعاد قابل توجه در خاک شکل می‌گیرد. این موارد با مشاهده و مقایسه تصاویر میکروسکوپی مربوط به نمونه‌های خاک طبیعی (شکل ۴ الف)) و خاک آلوده به گلیسرول (شکل ۴ ب)) قابل ملاحظه است. آب در فضاهای بوجودآمده در بین ذرات خاک جای گرفته و منجر به افزایش رطوبت بهینه می‌گردد. از طرفی به دلیل ماهیت تراکم‌ناپذیری آب، وزن واحد حجم خشک بیشینه خاک نیز کاهش می‌یابد. با افزایش درصد محلول گلیسرول در خاک رسی به ۸ و ۱۲، می‌توان بیان کرد که با وجود مقادیر قابل توجه از این ماده هیدروکربنی در خاک، بخشی از آن بین ذرات خاک قرار می‌گیرد. گلیسرول دارای ویسکوزیته بیشتری نسبت به آب است و بنابراین تحت انرژی ثابت تراکمی ذرات به سهولت

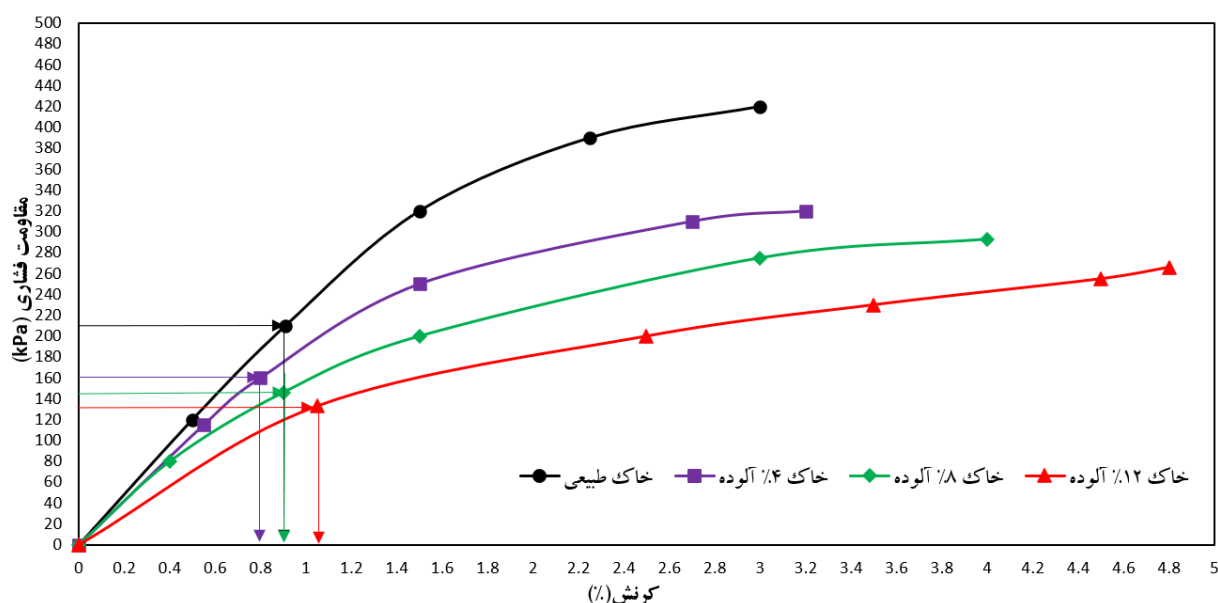
می‌توانند جابجا شوند و موجب کاهش فضای خالی بین ذرات خاک شود. این فرآیند در نهایت می‌تواند منجر به افزایش وزن واحد حجم خشک بیشینه و کاهش رطوبت بهینه گردد (Kermani et al., 2007; Khamsehchiyan et al., 2007; Acar et al., 1991; Al-Sanad & Ismael, 1997; Izdebska-Mucha et al., 2011; Ebadi, 2012;).



شکل ۶. نتایج آزمایش تراکم برای خاک آلوده به درصدهای مختلف گلیسرول

آزمایش مقاومت تک‌محوری

نتایج آزمایش مقاومت تک‌محوری برای خاک طبیعی و خاک آلوده به درصدهای وزنی مختلف محلول گلیسرول در شکل (۷) در صفحه تنش-کرنش ارائه شده است. همچنین مقادیر ۵۰ درصد مقاومت نهایی و مقدار کرنش متناظر آن‌ها به منظور محاسبه E_{50} برای هر یک از نمونه‌ها با فلش در شکل مشخص شده است. لازم به ذکر است که نمونه‌های فوق به دلیل اینکه فاقد مواد افزودنی بودند، زمان عمل‌آوری برای آن‌ها لحاظ نشد و همگی بعد از یک مدت محدود از زمان ساخت (۳ ساعت) تعیین مقاومت گردیدند.

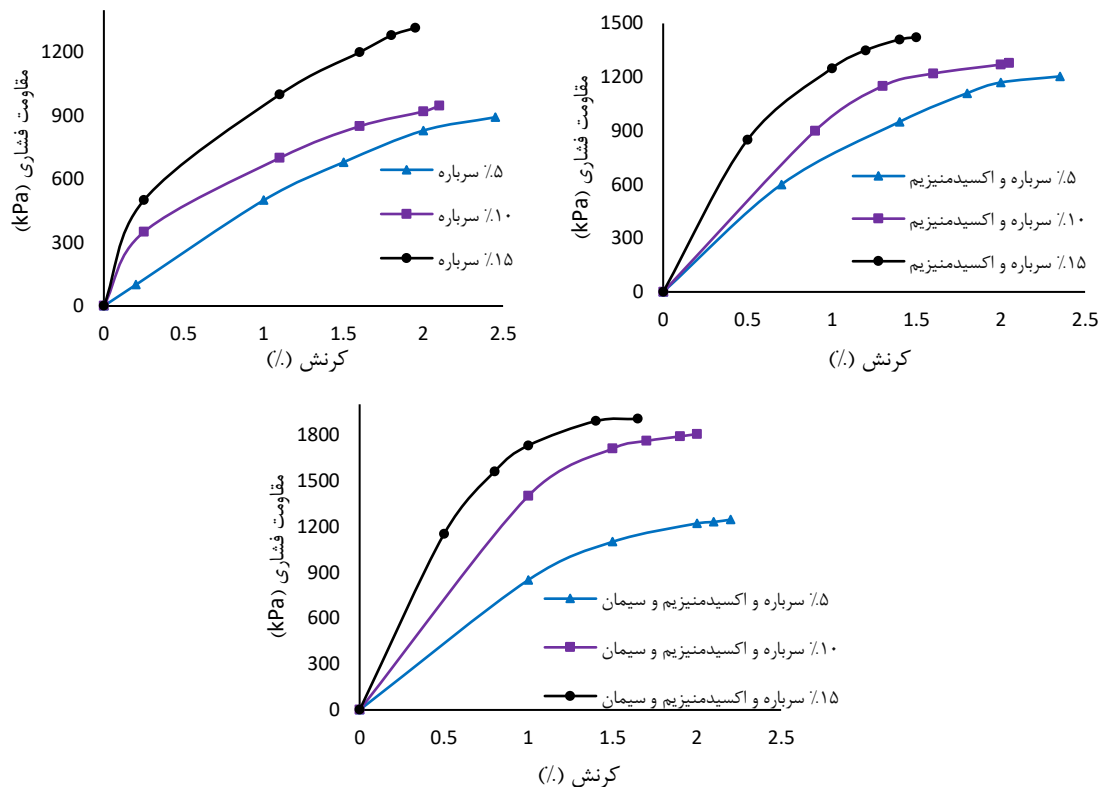


شکل ۷. نمودارهای تنش-کرنش مربوط به نمونه‌های خاک طبیعی و خاک آلوده به محلول گلیسرول

نتایج نشان می‌دهد مقاومت فشاری نهایی خاک طبیعی برابر 420 (kPa) در کرنش ۳ درصد است. با اضافه شدن ۴، ۸ و ۱۲ درصد وزنی محلول گلیسرول به خاک، مقادیر مقاومت فشاری نهایی به ترتیب ۳۲۰، ۲۹۳ و ۲۶۶ کیلوپاسکال در کرنش‌های ۳/۲، ۴ و ۴/۸ درصد تعیین گردید. نتایج نشان می‌دهد که با اضافه نمودن و همچنین افزایش درصد وزنی محلول گلیسرول در خاک، مقاومت فشاری نهایی کاهش و کرنش نیز افزایش یافته است. در این خصوص نتایج پژوهش حاضر با نتایج ارائه شده با (Estabragh و Khosravi) (et al., 2013) و (et al., 2018) مطابقت دارد.

به دلیل ویسکوزیته بیشتر محلول گلیسرول نسبت به آب، وجود این ماده در خاک رسی می‌تواند به طور قابل توجهی اصطکاک بین ذرات را کاهش دهد و در نتیجه لغزش و جابجایی ذرات تحت بارگذاری تسهیل یابد که موجب کاهش مقاومت نسبت به خاک طبیعی

می‌گردد. (Izdebska-Mucha et al., 2011) گزارش کردند که وجود آلاینده‌های هیدروکربنی در خاک رسی می‌تواند منجر به تغییر نوع تماس ذرات خاک رس از سطح به سطح یا لبه به لبه (اصطکاک بیشتر) به نوع لبه به سطح (اصطکاک کمتر) بشود که به نوبه خود می‌تواند باعث کاهش اصطکاک بین ذرات خاک باشد. چنین شرایطی در نهایت منجر به کاهش مقاومت فشاری و افزایش کرنش نسبت به خاک طبیعی می‌شود. برخی پژوهش‌گران نیز گزارش کردند که افزودن ترکیبات هیدروکربنی ضمن اعمال تغییرات در واکنش بین ذرات خاک و بافت خاک، در نهایت ممکن است منجر به کاهش زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی خاک شود (Rajabi & Sharifipour, 2017). مقادیر مقاومت فشاری نهایی مربوط به نمونه‌های محتوی خاک طبیعی و خاک آلوده اختلاط یافته با افزودنی‌ها در جدول (۳) ارائه شده است. همچنین به عنوان مثال نمودار تنش-کرنش مربوط به نمونه‌های حاوی خاک آلوده به ۸ درصد محلول گلیسرول بهسازی شده با مواد افزودنی در زمان عمل‌آوری ۷ روزه در شکل (۸) ارائه شده است.

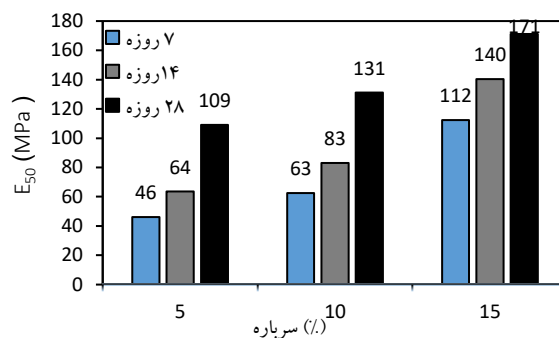


شکل ۸. نمودارهای تنش-کرنش مربوط به نمونه‌های حاوی خاک آلوده به ۸ درصد محلول گلیسرول بهسازی شده با مواد افزودنی در زمان عمل‌آوری ۷ روزه

مقادیرمدول کشسانی

مقادیر کشسانی مربوط به ۵۰ درصد مقاومت نهایی (E_{50}) برای خاک طبیعی ۲۳ مگاپاسکال و برای خاک آلوده به محلول گلیسرول با درصد‌های وزنی ۴، ۸ و ۱۲ به ترتیب ۱۹، ۱۶ و ۱۳ مگاپاسکال تعیین گردید. ملاحظه می‌شود که با اضافه شدن محلول گلیسرول و افزایش درصد وزنی آن در خاک، مقادیر E_{50} خاک کاهش یافته است. تغییرات مقادیر E_{50} ناشی از کاهش مقاومت فشاری نهایی و افزایش تغییر شکل نمونه‌های محتوی محلول گلیسرول است. در خصوص تاثیر اضافه شدن محلول گلیسرول در مقاومت فشاری نهایی و تغییر شکل خاک نیز در بخش گذشته بحث لازم صورت گرفت.

مطابق با نتایج (جدول (۳)) افزودن سربراره به خاک طبیعی و خاک آلوده به محلول گلیسرول، منجر به افزایش E_{50} گردید. همچنین با افزایش درصد وزنی سربراره در خاک طبیعی و خاک آلوده و همچنین افزایش زمان عمل‌آوری نمونه‌ها، E_{50} به صورت قابل ملاحظه‌ای افزایش یافت. به عنوان مثال E_{50} خاک آلوده به ۴ درصد وزنی محلول گلیسرول، ۱۹ مگاپاسکال اندازه‌گیری شد و همان‌گونه که در شکل (۹) قابل مشاهده است، با افزودن ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد وزنی سربراره به خاک مذکور، در زمان عمل‌آوری ۷ روزه مقادیر E_{50} به ۴۶، ۶۳ و ۱۱۲ مگاپاسکال و در زمان عمل‌آوری ۲۸ روزه مقادیر متناظر به ترتیب به ۱۰۹، ۱۳۱ و ۱۷۱ مگاپاسکال افزایش یافت.



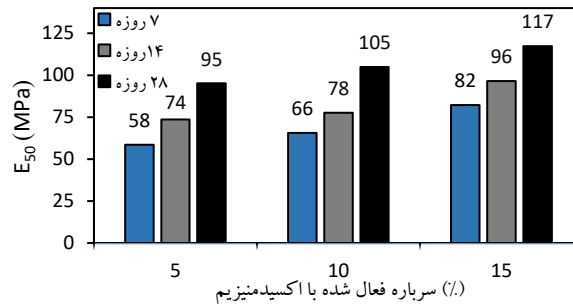
شکل ۹. E₅₀ مربوط به نمونه‌های خاک ۴٪ آلوده اختلاط یافته با سرباره

با بررسی و مقایسه عکس‌های میکروسکوپی تهیه شده از ساختار خاک آلوده (شکل ۴-ب) و خاک آلوده-سرباره (شکل ۴-ج)، تفاوت‌های قابل توجهی می‌توان ملاحظه کرد. با توجه به تصاویر مذکور می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که اضافه شدن سرباره به خاک آلوده منجر به تغییر در آرایش ذرات خاک و ایجاد ساختار تقریباً یکپارچه در اثر فرآیند هیدراسیون سرباره می‌شود. نتایج به‌دست آمده در پژوهش حاضر با نتایجی که (Nidzam & Kinuthia, 2010) گزارش شده است، مطابقت دارد. آن‌ها با انجام آزمایش‌های گوناگون در خصوص بهسازی خاک رس توسط سرباره بیان کردند که با افزودن سرباره و انجام هیدراسیون، ساختار اولیه خاک به ساختار یکپارچه تغییر یافته و در نهایت منجر به افزایش مقاومت خاک می‌شود. آن‌ها در خصوص عملکرد سرباره در افزایش مقاومت خاک رس عنوان کردند که فرآیندی مشابه آنچه در هیدراسیون سیمان مطرح است در اینجا هم رخ می‌دهد که باعث تشکیل مواد سیمانته‌کننده می‌شود. با بررسی تصاویر تهیه شده از آزمایش SEM (شکل ۴) از ساختار خاک آلوده بهسازی شده با سرباره و مقایسه آن با ساختار میکروسکوپی خاک آلوده، مشخص است که ساختار خاک آلوده با افزودن سرباره، به شکل ساختاری از ذرات بهم چسبیده تشکیل شده است و مواد سیمانی تشکیل شده ناشی از هیدراسیون سرباره، منجر به یکپارچه شدن و افزایش مقاومت خاک شده است. در نتیجه با توجه به نتایج مشخص می‌شود سرباره، توانایی قابل توجهی در بهسازی خاک رسی آلوده به گلیسرول دارد.

با این حال برخی پژوهش‌گران گزارش‌هایی مبنی بر سرعت پایین هیدراسیون سرباره و عملکرد ضعیف و کند آن در افزایش مقاومت و بهسازی خاک رس منتشر کرده‌اند (al., 1996; Abu-Farsakh et al., 2015; Jegandan et al., 2010; Jin et al., 2015; Wild et al., 1996). کینوتیا عنوان کرد که فرآیند هیدراسیون سرباره و در نتیجه عملکرد آن در بهسازی خاک رسی به عواملی مانند ترکیبات شیمیایی آن، سطح ویژه سرباره و درجه حرارت محیط بستگی دارد (Kinuthia, 1997). شای و دی این امر را چنین توجیه کردند که در تماس سرباره با آب، در مراحل اولیه هیدراسیون، یک لایه ضخیم کریستالی متخلخل شامل Si-Al-O در سطح ذرات سرباره شکل می‌گیرد (Shi & Day, 1993). ریچاردسون و همکاران گزارش کردند که این لایه به مانند یک لایه پوششی در برابر آب، نفوذناپذیر عمل می‌کند و مانع از انجام بیشتر واکنش‌های هیدراسیون می‌شود. لایه پوششی مذکور باعث جذب یون‌های H⁺ و افزایش OH⁻ و در نهایت افزایش pH و خاصیت قلیایی محیط شود. اما این افزایش مقدار در خاصیت قلیایی مجموعه، هم‌چنان برای شکستن پیوندهای Si-O و Al-O سرباره به‌منظور تشکیل ترکیبات کلسیم‌سیلیکات‌هیدراته (CSH)، کلسیم‌آلومینات‌هیدراته (CAH) و کلسیم‌سیلیکات‌آلومینات‌هیدراته (CASH) کافی نیست و هیدراسیون با سرعت بسیار آهسته‌ای انجام می‌گیرد (Richardson et al., 1994). آن‌ها هم‌چنین عنوان کردند که تنها مقدار کمی از ژل CSH پس از ۱۵۰ روز در معرض آب بودن سرباره، تشکیل شده است.

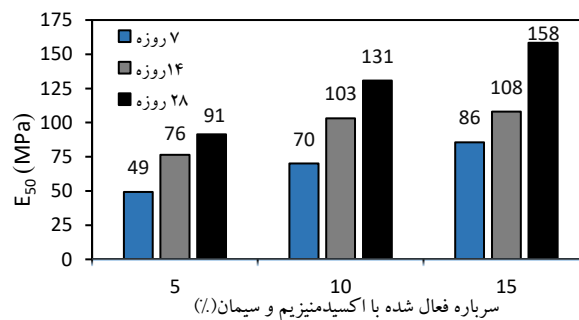
نتایج آزمایش مقاومتی (جدول ۳) نشان داد که افزودن سرباره فعال شده با اکسیدمنیزیم و همچنین سرباره فعال شده با مخلوط اکسیدمنیزیم و سیمان به خاک طبیعی و خاک آلوده به محلول گلیسرول منجر به افزایش مقاومت فشاری و کاهش تغییر شکل نمونه و این فرآیند در نهایت افزایش E₅₀ خاک آلوده شده است. شایان به ذکر است که با افزایش درصد وزنی افزودنی‌های مذکور در خاک طبیعی و خاک آلوده و همچنین افزایش زمان عمل‌آوری نمونه‌ها، این روند افزایشی ادامه‌دار بود و مقادیر بالاتر E₅₀ به دست آمد. به عنوان مثال E₅₀ خاک آلوده به ۱۲ درصد وزنی محلول گلیسرول، ۱۳ مگاپاسکال اندازه‌گیری شد و همان‌گونه که در شکل (۱۰) قابل مشاهده است، با افزودن ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد وزنی سرباره فعال شده با اکسیدمنیزیم به همین خاک آلوده (۱۲ درصد محلول گلیسرول)، در زمان عمل‌آوری ۷ روزه مقادیر E₅₀ به ۵۸، ۶۶ و ۸۲ مگاپاسکال و در زمان عمل‌آوری ۲۸ روزه مقادیر متناظر به ترتیب به ۹۵، ۱۰۵ و ۱۱۷ مگاپاسکال افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است که نتایج فوق با یافته‌های محققینی مانند (Estabragh, Jahani, et al., 2022; Jegandan et al., 2010; Yi et al., 2010) مطابقت دارد.

al., 2012, 2014b, 2014a که مطالعاتی در خصوص تاثیر مواد افزودنی یادشده بر خواص خاک طبیعی را انجام دادند، مطابقت دارد.



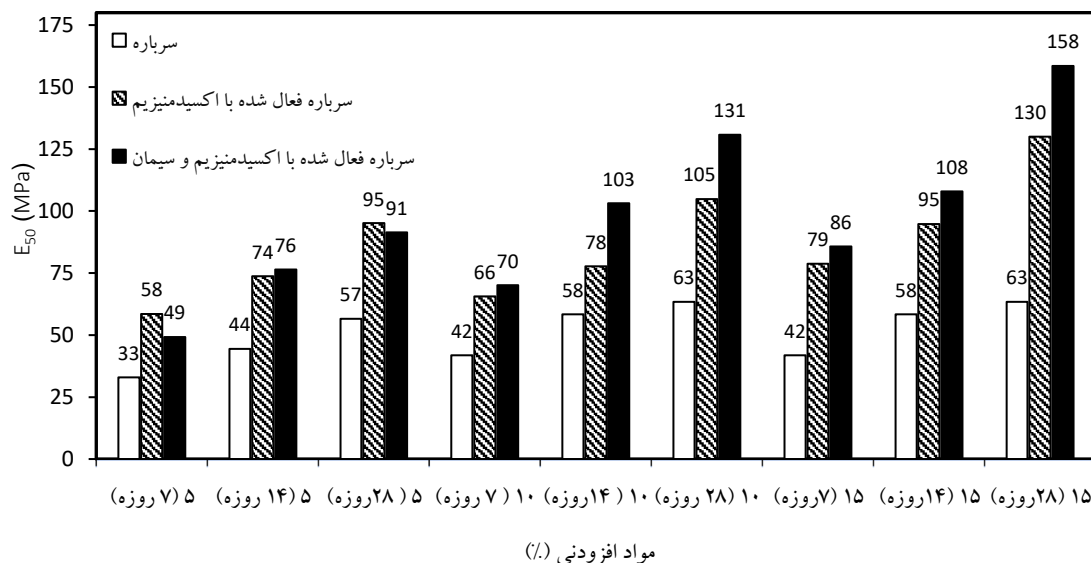
شکل ۱۰. E_{50} مربوط به نمونه‌های خاک ۱۲٪ آلوده اختلاط یافته با سرباره فعال شده با اکسیدمنیزیم

همان‌گونه که بیان شد E_{50} خاک آلوده شده با ۱۲ درصد وزنی محلول گلیسرول ۱۳ مگاپاسکال اندازه‌گیری گردید. مطابق شکل (۱۱) مشاهده می‌شود که با افزودن سرباره فعال شده با مخلوط اکسیدمنیزیم و سیمان به میزان ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد وزنی و در زمان عمل‌آوری ۷ روزه به همین خاک آلوده، مقادیر E_{50} به ۴۹، ۷۰ و ۸۶ مگاپاسکال و در زمان عمل‌آوری ۲۸ روزه مقادیر متناظر به ترتیب به ۹۱، ۱۳۱ و ۱۵۸ مگاپاسکال افزایش یافته است.



شکل ۱۱. E_{50} مربوط به نمونه‌های خاک ۱۲٪ آلوده اختلاط یافته با سرباره فعال شده با اکسیدمنیزیم و سیمان

شکل (۱۲) تغییرات مقادیر E_{50} ناشی از افزودن مواد افزودنی به خاک ۱۲ درصد آلوده را به صورت نمودار نشان می‌دهد. از نمودار شکل می‌توان دریافت که در درصد آلودگی، درصد مواد افزودنی و زمان عمل‌آوری یکسان، برای نمونه‌های بهسازی شده با سرباره فعال شده با اکسیدمنیزیم و یا مخلوط اکسیدمنیزیم و سیمان مقادیر بالاتری از E_{50} در مقایسه با نمونه‌های بهسازی شده با سرباره بدست آمد.



شکل ۱۲. مقادیر E_{50} مربوط نمونه‌های حاوی خاک ۱۲٪ آلوده به گلیسرول اختلاط یافته با افزودنی‌ها

این موضوع نشان می‌دهد که عمل هیدراسیون سرباره در صورت فعال شدن با اکسیدمنیزیم و یا مخلوط اکسیدمنیزیم و سیمان سریع‌تر رخ می‌دهد و سبب تولید مواد سیمانته‌کننده و در نتیجه سبب افزایش مقاومت می‌شود. جین و همکاران بیان کردند در صورت استفاده از سرباره فعال شده به وسیله اکسید منیزیم در بهسازی خاک، در گام اول از فرآیند هیدراسیون، پیوندهای موجود در واحدهای سازنده سرباره نظیر Ca-O ، Mg-O ، Si-O-Si و Al-O-Si از بین می‌روند و به طور همزمان نیز MgO انحلال می‌یابد (et al., 2015). Jin با انحلال MgO ، ماهیت قلیایی مجموعه به شدت افزایش یافته و موجب تسریع در شکستن پیوندهای Si-O-Si و Al-O-Si سرباره می‌شود. سپس یون منیزیم با Si-O و Al-O ترکیب می‌گردد و ماده سیمانته‌کننده‌ای با نام منیزیم سیلیکات هیدراته (MSH) و منیزیم آلومینات هیدراته با ترکیب (MAH) تولید می‌شود که حجیم‌تر و چگال‌تر از کلسیم سیلیکات هیدراته (CSH) است و سبب پر کردن فضاهای خالی بین ذرات و چسبیدن ذرات خاک به یکدیگر می‌شود (با ملاحظه تصویر میکروسکوپی از ساختار خاک آلوده اخلاط یافته با سرباره و اکسیدمنیزیم (شکل ۴ د))، مشاهده می‌شود که فضای خالی به شدت کاهش یافته است). این امر افزایش مقاومت فشاری نهایی نمونه‌های بهسازی شده خاک آلوده با سرباره فعال شده را سبب می‌گردد و در نهایت منجر به افزایش E_{50} آن می‌شود.

سیمان پرتلند نیز به دلیل خواص شیمیایی مواد تشکیل دهنده آن، این قابلیت را دارد که به عنوان فعال‌کننده، موجب تسریع هیدراسیون سرباره بشود. هکینن بیان نمود که با انجام هیدراسیون سیمان، Ca(OH)_2 تولید شده که موجب افزایش ماهیت قلیایی مجموعه و در نهایت تسریع هیدراسیون سرباره می‌شود. از طرفی سیمان علاوه بر نقش فعال‌کننده هیدراسیون سرباره، نقش پرکاربردی در افزایش مقاومت فشاری و بهسازی خاک‌های طبیعی و آلوده دارد (Häkkinen, 1993). کزدی عملکرد سیمان در افزایش مقاومت و بهسازی خاک را به واکنش‌های صورت گرفته بین ماده افزودنی سیمان با ذرات خاک نسبت داد (Kezdi, 1967). وی بیان نمود که این واکنش‌ها عبارتند از: (۱) هیدراسیون سیمان که منجر به تولید هیدروکسید کلسیم می‌شود، (۲) جذب هیدروکسید کلسیم توسط ذرات رس و (۳) واکنش‌های پوزولانی ذرات خاک رس با هیدروکسید کلسیم. بنابراین با اضافه کردن سیمان به خاک، یون‌های کلسیم در طی فرآیند هیدراسیون اولیه سیمان آزاد می‌گردد و تبادل کاتیونی با ذرات خاک صورت می‌گیرد. در مرحله هیدراسیون سیمان، pH محلول نیز افزایش می‌یابد که این امر سبب از بین رفتن پیوندهای سیلیکات‌ها و آلومینات‌های موجود در خاک رس و حل شدن آن‌ها در محلول مایع منفذی می‌شود. این مواد حل شده با یون‌های کلسیم واکنش شیمیایی می‌دهند و مواد سیمانته‌کننده‌ای تولید می‌کنند. مواد تولید شده مانند کلسیم سیلیکات هیدراته (CSH) و کلسیم آلومینات هیدراته (CAH) سبب چسبیدن ذرات خاک به یکدیگر و تشکیل توده جامد می‌شود که این امر منجر به افزایش مقاومت خاک می‌گردد.

نتیجه‌گیری

در این کار تحقیقاتی بهسازی یک خاک رسی معمولی و آلوده به محلول گلیسرول با افزودن سرباره، سرباره فعال شده با اکسیدمنیزیم و سرباره فعال شده با مخلوط اکسیدمنیزیم و سیمان مورد مطالعه قرار گرفت و نتایج زیر حاصل گردید:

آلودگی خاک به محلول گلیسرول موجب کاهش حدود اثربرگ نسبت به خاک طبیعی می‌گردد به طوری که با اضافه شدن ۴، ۸ و ۱۲ درصد محلول گلیسرول، حدود روانی به ترتیب ۲/۵، ۶/۵ و ۷/۵ درصد و مقادیر حدود خمیری نیز به ترتیب ۳، ۳/۵ و ۶ درصد کاهش یافتند. با آلوده شدن خاک، وزن واحد حجم خشک بیشینه و رطوبت بهینه تغییر می‌نمایند. برای خاک آلوده به میزان ۸ و ۱۲ درصد، به ترتیب ۲ درصد و ۵/۵ درصد کاهش در رطوبت بهینه و همچنین مقدار ۰/۳ و ۰/۶ کیلونیوتن بر متر مکعب افزایش در واحد حجم خشک بیشینه نسبت به خاک طبیعی مشاهده گردید.

آلوده شدن خاک موجب کاهش مقاومت نهایی و E_{50} نسبت به خاک طبیعی شد. آلوده نمودن خاک به محلول گلیسرول با درصدهای وزنی ۴، ۸ و ۱۲ موجب کاهش مقاومت فشاری به ترتیب به میزان ۲۳، ۳۰ و ۳۶ درصد نسبت به حالت طبیعی گردید. همچنین مقادیر E_{50} خاک آلوده به مقادیر فوق، به ترتیب ۱۷، ۳۰ و ۴۳ درصد کاهش یافتند. مشاهده می‌شود که روند تغییرات نیز تابع درصد وزنی محلول گلیسرول در خاک است بطوری که با افزایش درصد وزنی محلول گلیسرول، این تغییرات نسبت به خاک طبیعی بیشتر می‌شود.

سرباره و سرباره فعال شده در بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی خاک رس طبیعی و آلوده به محلول گلیسرول موثر می‌باشند و این روند تابعی از درصد وزنی آن‌ها و زمان عمل‌آوری می‌باشد. به عنوان مثال در خاک آلوده به ۴ درصد محلول گلیسرول، با افزایش درصد وزنی مخلوط سرباره و اکسیدمنیزیم از ۵ به ۱۰ و ۱۵ در زمان عمل‌آوری ۷ روزه، مقاومت تک‌محوری به ترتیب ۹ درصد و ۵۳ درصد افزایش یافت. همچنین با افزایش زمان عمل‌آوری از ۷ به ۱۴ و ۲۸ در درصد وزنی ثابت ۵، مقاومت تک‌محوری خاک آلوده مذکور به



ترتیب ۱۶ و ۲۳ درصد افزایش یافت. این افزایش ناشی از انجام واکنش‌های شیمیایی بین مواد افزودنی و خاک می‌باشد که نتایج این مورد را تایید می‌نماید.

نتایج نشان می‌دهد که سرباره فعال شده نسبت سرباره معمولی عملکرد بهتری در بهسازی خاک طبیعی و آلوده دارا می‌باشد. از طرفی مقایسه نتایج نشان می‌دهد که مخلوط اکسیدمنیزیم و سیمان نسبت به اکسیدمنیزیم دارای عملکرد بهتری در فعال‌سازی سرباره و در نتیجه افزایش مقاومت فشاری و مقادیر کشسانی و بهسازی نمونه‌های محتوی خاک طبیعی و آلوده هستند. به عنوان مثال در خاک آلوده به ۸ درصد محلول گلیسرول، افزودن ۱۰ درصد وزنی هر یک از افزودنی‌ها شامل سرباره، مخلوط سرباره و اکسیدمنیزیم و مخلوط سرباره و اکسیدمنیزیم و سیمان، مقادیر E_{50} خاک آلوده یاد شده در زمان عمل‌آوری ۷ روزه به ترتیب ۲۲۰ درصد، ۳۰۰ درصد و ۵۶۰ درصد افزایش یافت.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

منابع

- جهانی، امیر؛ ریسی استبرق، علی؛ خواجه پور، حسین و امینی، محدثه (۱۴۰۱). مقایسه عملکرد سیمان، سرباره کوره ذوب آهن (GGBS) و GGBS فعال شده در بهسازی یک خاک رسی. *مهندسی عمران فردوسی*، ۳۵ (۳)، ۸۹-۱۰۶.
- جهانی، محمد؛ شاهنوری، شهره و مرادی، سعید (۱۴۰۲). اثر ناحیه جزرومدی، مکمل‌های سیمانی و مصالح دریایی بر برخی از پارامترهای دوام بتن. *مهندسی عمران فردوسی*، ۳۶ (۳)، ۶۳-۸۲.

REFERENCES

- Abu-Farsakh, M., Dhakal, S., & Chen, Q. (2015). Laboratory characterization of cementitiously treated/stabilized very weak subgrade soil under cyclic loading. *Soils and Foundations*, 55(3), 504–516.
- Acar, Y. B., Olivieri, I., Quigley, R. M., Fernandez, F., Izdebska-Mucha, D., Trzciński, J., Żbik, M. S., Frost, R. L., & Trzciński, J. (1991). Pore fluid effects on the fabric and hydraulic conductivity of laboratory-compacted clay. *Clay Minerals*, 46(1), 47–58.
- Akinwumi, I. (2014). Soil modification by the application of steel slag. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 58(4), 371–377.
- Al-Sanad, H. A., & Ismael, N. F. (1997). Aging effects on oil-contaminated Kuwaiti sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 123(3), 290–293.
- Calabrese, E. J., Kostecki, P. T., & Dragun, J. (2006). *Contaminated Soils, Sediments and Water Volume 10: Successes and Challenges* (Vol. 10). Springer Science & Business Media.
- Estabragh, A. R., Ghayamara, F., Soltanian, M. R., & Babalar, M. (2022). Effect of ageing on the properties of a clay soil contaminated with glycerol. *Geomechanics and Geoengineering*, 17(2), 586–597.
- 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., 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.
- 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), 4015157.
- Estabragh, A. R., Kholoosi, M., Ghaziani, F., & Javadi, A. A. (2018). Mechanical and leaching behavior of a stabilized and solidified anthracene-contaminated soil. *Journal of Environmental Engineering*, 144(2), 4017098.
- Fang, H.-Y. (1986). *Environmental geotechnology*. Enviro Publishing Co., Inc., Bethlehem, PA.
- Fine, P., Graber, E. R., & Yaron, B. (1997). Soil interactions with petroleum hydrocarbons: abiotic processes. *Soil Technology*, 10(2), 133–153.
- Häkkinen, T. (1993). The influence of slag content on the microstructure, permeability and mechanical properties of concrete Part 1 Microstructural studies and basic mechanical properties. *Cement and Concrete Research*, 23(2), 407–421.
- Harrison, R. M. (2006). *An introduction to pollution science*.
- Izdebska-Mucha, D., Trzciński, J., Żbik, M. S., & Frost, R. L. (2011). Influence of hydrocarbon contamination on clay soil microstructure. *Clay Minerals*, 46(1), 47–58.

- jahani, amir, Raeesi Estabragh, A., khajepour, hossein, & Amini, M. (2022). Comparison of the effect of Cement, Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBS), and activated GGBS on stabilization of a clay soil. *Ferdowsi Civil Engineering*, 35(3), 89–106. <https://doi.org/10.22067/jfcei.2022.74908.1115>. (In Persian)
- Jahani, M., Moradi, S., & Shahnoori, S. (2023). 4-year monitoring of degradation mechanisms of seawater sea-sand concrete exposed to tidal conditions: development of chemical composition and micro-performance. *Construction and Building Materials*, 409, 133475. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133475>
- Jahani, M., Shahnoori, S., Moradi, S., & Ershadi, C. (2022). Cleaner Production Towards a Green Concrete: Multi-scale Experimental Study on Long-term Performance of a Sustainable Modified-SWSSC. *American Journal of Construction and Building Materials*, 6(1), 43–59.
- Jahani, M., Shahnoori, S., Moradi, S., Yazdani, M., & Ershadi, C. (2023). Effect of Tidal conditions, Supplementary Cementitious Materials and Marine's Materials on Some of Concrete Durability Parameters. *Ferdowsi Civil Engineering*, 36(3), 63–82. <https://doi.org/10.22067/jfcei.2023.83067.1239>. (In Persian)
- Jegandan, S., Liska, M., Osman, A. A. M., & Al-Tabbaa, A. (2010). Sustainable binders for soil stabilisation. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement*, 163(1), 53–61.
- 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.
- Kabata-Pendias, A. (2000). *Trace elements in soils and plants*. CRC press.
- Kermani, M., & Ebadi, T. (2012). The effect of oil contamination on the geotechnical properties of fine-grained soils. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 21(5), 655–671.
- Kezdi, A. (1967). STABILIZED EARTH ROADS (IN HUNGARIAN).
- Khamehchiyan, M., Charkhabi, A. H., & Tajik, M. (2007). Effects of crude oil contamination on geotechnical properties of clayey and sandy soils. *Engineering Geology*, 89(3–4), 220–229.
- Khosravi, E., Ghasemzadeh, H., Sabour, M. R., & Yazdani, H. (2013). Geotechnical properties of gas oil-contaminated kaolinite. *Engineering Geology*, 166, 11–16.
- Kinuthia, J. M. (1997). Property changes and mechanisms in lime-stabilised kaolinite in the presence of metal sulphates. University of South Wales (United Kingdom).
- Little, D. N., & Nair, S. (2009). *Recommended practice for stabilization for sulfate rich subgrade soils*. National Highway Cooperative Research Program, Transportation Research Board ...
- Montanarella, L., Badraoui, M., Chude, V., Baptista Costa, I. D. S., Mamo, T., Yemefack, M., Singh Aulakh, M., Yagi, K., Young Hong, S., & Vijarnsorn, P. (2015). *Status of the world's soil resources Main Report*.
- Nidzam, R. M., & Kinuthia, J. M. (2010). Sustainable soil stabilisation with blastfurnace slag—a review. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Construction Materials*, 163(3), 157–165.
- Pascucci, S. (2011). *Soil Contamination*. BoD—Books on Demand.
- Rajabi, H., & Sharifipour, M. (2017). An experimental characterization of shear wave velocity (V s) in clean and hydrocarbon-contaminated sand. *Geotechnical and Geological Engineering*, 35, 2727–2745.
- Rajabi, H., & Sharifipour, M. (2019). Geotechnical properties of hydrocarbon-contaminated soils: a comprehensive review. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78, 3685–3717.
- Ratnaweera, P., & Meegoda, J. N. (2006). Shear strength and stress-strain behavior of contaminated soils. *Geotechnical Testing Journal*, 29(2), 133–140.
- Richardson, I. G., Brough, A. R., Groves, G. W., & Dobson, C. M. (1994). The characterization of hardened alkali-activated blast-furnace slag pastes and the nature of the calcium silicate hydrate (CSH) phase. *Cement and Concrete Research*, 24(5), 813–829.
- Shi, C., & Day, R. L. (1993). Chemical activation of blended cements made with lime and natural pozzolans. *Cement and Concrete Research*, 23(6), 1389–1396.
- Singh, S. K., Srivastava, R. K., & John, S. (2008). Settlement characteristics of clayey soils contaminated with petroleum hydrocarbons. *Soil & Sediment Contamination*, 17(3), 290–300.
- Singh, S. K., Srivastava, R. K., & John, S. (2009). Studies on soil contamination due to used motor oil and its remediation. *Canadian Geotechnical Journal*, 46(9), 1077–1083.
- Wild, S., Kinuthia, J. M., Robinson, R. B., & Humphreys, I. (1996). Effects of ground granulated blast furnace slag (GGBS) on the strength and swelling properties of lime-stabilized kaolinite in the presence of sulphates. *Clay Minerals*, 31(3), 423–433.
- Winterkorn, H. F., & Pamukcu, S. (1991). Soil stabilization and grouting. *Foundation Engineering Handbook*, 317–378.



- Yi, Y., Liska, M., & Al-Tabbaa, A. (2012). Initial investigation into the use of GGBS-MgO in soil stabilisation. In *Grouting and Deep Mixing 2012* (pp. 444–453).
- Yi, Y., Liska, M., & Al-Tabbaa, A. (2014a). Properties and microstructure of GGBS–magnesia pastes. *Advances in Cement Research*, 26(2), 114–122.
- Yi, Y., Liska, M., & Al-Tabbaa, A. (2014b). Properties of two model soils stabilized with different blends and contents of GGBS, MgO, lime, and PC. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 26(2), 267–274.
- Yong, R. N. (2000). *Geoenvironmental engineering: Contaminated soils, pollutant fate, and mitigation*. CRC press.

Assessment of the effect of Ground Granulated Blast-furnace Slag (GGBS) and activated GGBS on stabilization of a clay soil contaminated with glycerol

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Natural clay soils may be contaminated with hydrocarbons due to the leakage from storage tanks or from accidental spills, etc. Interaction between the soil and contaminant can result in changes in the behavior of the soil. In order to carry out construction projects on these sites, the contaminated soil should be treated and stabilized to ensure its mechanical and hydraulic performance through the service life of the project. Contaminated soils can be stabilized using chemical agents such as lime, cement and fly ash. Due to the economic and environmental problems associated with lime and cement, alternative agents are proposed for soil stabilization. It's been proven that Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBS) can serve as an effective agent for soil stabilization. GGBS has mild cementitious characteristics when it is used alone. However, GGBS can be activated by using chemical activators. The aim of this work is to study the effects of GGBS, GGBS+MgO and GGBS+MgO+cement on stabilization of a clay soil contaminated with glycerol.

Materials and Methods

The main materials used in this work included soil, glycerol, GGBS, MgO, water and cement. The clay soil used was classified as a clay soil with low plasticity (CL). The clay soil was contaminated with 4, 8 and 12% solutions of glycerol based on dry weight. GGBS, GGBS+MgO (with a weight ratio of 3:1) and GGBS+MgO+cement (with a weight ratio of 3:0.5:0.5) were considered for preparing the additive mixtures. Samples were prepared by mixing contaminated soil with 5, 10 and 15% of the above agents. The prepared samples with different stabilizers were stored for curing times of 7, 14, and 28 days. Various tests including Atterberg limits, compaction and unconfined compressive strength (UCS) were then performed on mentioned samples including the natural soil and the contaminated soil mixed with various percentages of the selected agents. Scanning electron microscopy (SEM) were also conducted on several samples to obtain information about the microstructure of the samples under different conditions.

Results and discussion

For soil contaminated with different percentages of glycerol, the values of Liquid Limit, Plastic Limit and Plastic Index decreased compared to the natural soil. The reduction in LL and PL values depended on the percentage of glycerol, with a higher reduction observed with increasing glycerol content. The Atterberg limits of the contaminated soil also changed when different mixtures of agents were added at a constant percentage of glycerol. The results of compaction tests showed that for soil contaminated with 4% glycerol, the maximum dry unit weight decreased and optimum water content increased compared to natural soil. However, For the soil contaminated with 8 and 12% glycerol, both maximum dry unit weight and optimum water content increased relative to natural soil.

The final strength of the natural soil is 420 kPa and it changed to 321, 293 and 266 kPa when contaminated with 4, 8 and 12% glycerol, respectively. It was observed that increasing the percentage of glycerol led to a decrease in the strength and E_{50} of the contaminated soil. It can be said that both the dielectric constant and the viscosity of glycerol solution also has an important effect on the behavior of the soil and lead to reduction in final strength. The results show that increase in both curing times and percentages of GGBS, result in increase in final strength, stiffness and the value of E_{50} . It may be due to the fact that reaction between GGBS and clay soil is a cementation process similar to the cementation process between clay and Portland cement. Gels (cementitious materials) produced in this process bind and coat the particles, thereby increasing the strength of the soil stabilized with GGBS. Furthermore, using mixtures of GGBS+MgO and GGBS+MgO+cement as agents proved effective in increasing the final strength and E_{50} of both natural and contaminated soil. The gels produced during hydration can bind the particles together and fill the pores between them, enhancing the strength of the soil. The results also revealed that activating GGBS with MgO or a mixture of MgO and cement was more effective in increasing strength for different percentages of the agents at various curing times.

Keywords: Activated GGBS, Clay Soil, GGBS, Glycerol, MgO.