بهسازی خاک آلوده به ماده آلی گلیسرول با منیزیم‌اکسید

فاطمه جانداری*، علی رئیسی استبرق، جمال عبدالهی علی‌بیک، محدثه امینی، آرمین انصار شوریجه

دانشگاه تهران، گروه آبیاری وآبادانی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۱۹ تاریخ پذیرش: ۱٤۰۰/۰۲/۱۵

چکیده

در این کار پژوهشی امکان بهسازی خاک رسی آلوده به محلول گلیسرول با استفاده از MgO مورد بررسی قرار گرفت. برای آلوده کردن خاک از محلول ۵۰٪ گلیسرول که در درصدهای وزنی ٤، ۸ و ۱۲٪ به خاک اضافه شده بود، استفاده گردید. آزمایش‌های حدود اتربرگ، تراکم، مقاومت تک‌محوری و عکس‌برداری SEM روی نمونه‌های خاک طبیعی، آلوده و بهسازی شده با MgO در درصدهای وزنی ۵، ۸ و ۱۲٪ صورت پذیرفت. نتایج نشان داد که افزودن محلول گلیسرول به خاک سبب کاهش حدود اتربرگ، درصد رطوبت بهینه و مقاومت تک‌محوری و افزایش وزن واحد حجم خشک بیشینه در مقایسه با خاک طبیعی می‌شود. تغییرات این پارامترها تابعی از درصد آلاینده بوده به‌گونه‌ای که هر چه درصد آلاینده بیشتر باشد، تغییرات بیان شده بیشتر می‌شود. با اضافه کردن MgO به خاک طبیعی و آلوده، افزایش مقادیر حدود اتربرگ و مقاومت تک‌محوری نمونه‌ها مشاهده شد که این افزایش در نمونه‌های مقاومتی تابعی از درصد MgO و زمان عمل‌آوری می‌باشد. همچنین نتایج عکس‌برداری SEM نشان‌دهنده تغییر ساختار خاک و فولکوله‌تر شدن ذرات آن در مقایسه با خاک طبیعی با اضافه کردن محلول گلیسرول به خاک می‌باشد.

واژگان کلیدی: خاک رسی، گلیسرول، منیزیم‌اکسید.

مقدمه

خاک‌های رسی عمدتا با مشخصه‌های مقاومت کم، تغییرپذیری حجم و تراکم‌پذیری زیاد و همچنین نفوذپذیری کم شناخته می‌شوند. بنابراین بهسازی این خاک‌ها به‌منظور کاربرد در اجرای پروژه‌های عمرانی مختلف و یا احداث پروژه‌ای بر روی آنها ضروری به نظر می‌رسد. این خاک‌ها ممکن است به‌وسیله مواد آلاینده نفتی به‌دلیل مواردی مانند نشت از مخازن مواد نفتی احداث شده و یا حوادث غیرمترقبه در انتقال آنها و نیز رها شدن فاضلاب کارخانه‌های شیمیایی یا پالایشگاهی، آلوده شوند. خواص اولیه مکانیکی و فیزیکی آنها نیز بر اثر این امر دچار تغییراتی می‌گردد که میزان آن بستگی به نوع خاک

* نویسنده مسئول: fateme.jandari@gmail.com

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

و مواد آلاینده اثرکننده دارد. فانگ[1] [۱] شاخصی تحت عنوان درجه حساسیت معرفی نمود که مقدار آن برای خاک‌های مختلف بین ۰-۱ می‌باشد. هرچه درجه حساسیت بیشتر باشد، عمل متقابل شیمیایی خاک و آلاینده بیشتر بوده و خواص آن تحت تاثیر آلاینده بیشتر تغییر می‌کند و بالعکس.

محققان روش‌های مختلفی برای بهسازی این خاک‌ها ارائه نموده‌اند که برحسب نوع خاک و شرایط آن متفاوت می‌باشند. یکی از روش‌های متداول بهسازی خاک‌های رسی، روش شیمیایی می‌باشد. در روش شیمیایی معمولا یک درصد وزنی مشخص از مواد افزودنی مانند آهک و سیمان به خاک رسی اضافه می‌کنند. واکنش‌های شیمیایی که معمولاً شامل تبادل یونی و پوزولانی است، بین ذرات خاک و مواد افزودنی صورت می‌پذیرد که موجب کاهش خواص رسی خاک و بهبود و ارتقاء خواص فیزیکی و مکانیکی آنها می‌گردد. استفاده از آهک با محدودیت‌هایی همراه است، لیکن سیمان کاربرد گسترده‌ای نسبت به آهک دارد. محققین مختلفی از جمله سزر[2] و همکاران [۲] گزارش کردند که سیمان در طیف وسیعی از خاک‌های رسی به‌منظور بهسازی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. اگرچه در سال‌های اخیر سیمان کاربرد وسیعی پیدا نموده، لیکن تولید سیمان مستلزم صرف انرژی زیادی می‌باشد زیرا دمای پخت کلینکر حدود ۱۴۵۰ درجه سانتی‌گراد است. از طرف دیگر در حین تولید سیمان مقدار زیادی CO_2 وارد محیط می‌شود که این امر مشکلات زیست‌محیطی ایجاد می‌نماید. برای رفع این مشکلات، پژوهشگرانی از جمله آنلور و التبا[3] [۳] و هریسون[4] [۴] MgO را به‌عنوان جایگزین سیمان معرفی نمودند. آنها بیان داشتند که تولید MgO جهت بهسازی خاک در حرارت حدود ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد صورت می‌پذیرد. بنابراین در تولید آن، انرژی کمتری نسبت به سیمان مورد نیاز است. همچنین CO_2 کمتری از تولید آن وارد محیط‌زیست می‌شود. از طرف دیگر حین فرآیند هیدراسیون آن، مقداری از CO_2 محیط اطراف جذب می‌گردد. اخیرا محققینی مانند لیسکا[5] و همکاران [۵] و وندپر[6] و همکاران [۶] دریافتند که می‌توان MgO را با مواد افزودنی دیگر مخلوط و سپس از آن به‌عنوان مواد افزودنی استفاده نمود که در بهسازی بسیار موثر می‌باشد.

شناسایی خواص و روش بهسازی خاک‌های آلوده رسی مدت زمان زیادی است که مورد توجه محققین قرار گرفته است. میگودا و راتناویرا[7] [۷] تحقیقات گسترده‌ای بر روی خواص فیزیکی و مکانیکی آنها انجام داده‌اند. آنها گزارش نمودند که

---

[1] Fang

[2] Sezer

[3] Unluer and Al-Tabbaa

[4] Harrison

[5] Liska

[6] Vandeperre

[7] Meegoda and Ratnaweera

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

تغییر در خواص فیزیکی و مکانیکی خاک‌های مذکور تابعی از نوع آلاینده و نوع خاک می‌باشد. اخیراً محققینی مانند پوپالا[8] و همکاران [٨] ، چو[9] و همکاران [٩] و نیز استبرق و همکاران [١٠] بهسازی این خاک‌ها را برای استفاده و کاربرد در مراحل اجرا و ساخت پروژه‌های عمرانی انجام داده‌اند و نتیجه‌گیری کرده‌اند که افزودنی‌هایی مانند سیمان در این خصوص بسیار مؤثر می‌باشد. بررسی منابع موجود نشان می‌دهد که گرچه پژوهش‌های گسترده‌ای در خصوص بهسازی خاک‌های رسی با MgO صورت پذیرفته است، لیکن در خصوص بهسازی خاک‌های آلوده به مواد هیدروکربنی نفتی گزارشی ارائه نشده است. بنابراین هدف از این پژوهش، بهسازی یک خاک رسی آلوده به گلیسرول با MgO می‌باشد و نتایج آن با نتایج بهسازی خاک غیرآلوده مقایسه و ارزیابی می‌گردد.

مواد و روش‌ها

مواد مورد استفاده در این پژوهش خاک، گلیسرول، منیزیم‌اکسید و آب می‌باشد که در ادامه به بیان ویژگی‌های آنها پرداخته می‌شود.

خاک

در این پژوهش برای آن‌که بیشترین واکنش بین ماده آلی گلیسرول و خاک رخ دهد و همچنین با توجه به نظریه فانگ تصمیم گرفته شد یک خاک رسی با چسبندگی یا پلاستیسیته بالا مورد استفاده قرار بگیرد. ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک مورد استفاده بر اساس استاندارد ASTM تعیین گردید که نتایج آنها در جدول (١) آورده شده است. نتایج آزمایش دانه‌بندی این خاک بر اساس استاندارد ASTM-D422-07 نشان داد که این خاک متشکل از ٣٪ ماسه، ٦٨٪ سیلت و ٢٩٪ رس می‌باشد. همچنین حد روانی، حد خمیری و شاخص خمیری آن بر اساس ASTM-D4318-10 به‌ترتیب برابر ٧٣٪، ٢٦٪ و ٤٧٪ اندازه‌گیری شده است. بر اساس نتایج حاصل از دانه‌بندی و حدود اتربرگ خاک مذکور در سامانه طبقه‌بندی متحد (USCS) طبقه‌بندی گردید و مشخص شد که خاک از نوع رسی با پلاستیسیته بالا (CH) می‌باشد. نتایج آزمایش تراکم استاندارد مطابق با استاندارد ASTM-D698-12 نیز نشان داد که رطوبت بهینه و وزن واحد حجم خشک بیشینه خاک به‌ترتیب برابر ٢٣٪ و(kN/m^3) ١٤/١٢ می‌باشد. ویژگی‌های شیمیایی خاک نیز تعیین و نتایج آن در جدول (٢) نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌گردد این خاک دارای pH و EC معادل ٨/٥٤ و (dS/m) ٥/٥٥ می‌باشد.

[8] Puppala

[9] Chew

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

جدول۱- ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک مورد استفاده

مشخصات	مقادیر
وزن مخصوص ذرات جامد (G_s)	۲/۷۵
رس	۲۹ (٪)
سیلت	٦۸ (٪)
ماسه	۳ (٪)
حد روانی (LL)	۷۳ (٪)
حد خمیری (PL)	۲٦ (٪)
شاخص خمیری (PI)	٤۷
سامانه طبقه‌بندی متحد	CH
رطوبت بهینه	۲۳ (٪)
وزن واحد حجم خشک بیشینه	۱٤/۱۲(kN/m^3)

جدول۲- ویژگی‌های شیمیایی خاک مورد استفاده

مشخصات	مقادیر
pH	۸/٥٤
EC	٥/٥٥(dS/m)
SO_4^{2-}	۷/٤٥(meq/l)
Cl^-	۲۷/٥(meq/l)
HCO_3^-	۱۸/۷٥(meq/l)
Na^+	٤٥/۷٤(meq/l)
Ca^+	۳/۸٥(meq/l)
Mg^{2+}	۰/۹٥(meq/l)

گلیسرول

در این کار پژوهشی، از گلیسرول به‌عنوان ماده آلاینده استفاده گردید. مطابق اطلاعات شرکت تولیدکننده، فرمول شیمیایی آن $C_3H_5(OH)_3$، لزوجت مطلق (Pa.s) ۱/٤ و چگالی آن نیز معادل (g/cm^3) ۱/۲٦ می‌باشد. در این کار تحقیقاتی از محلول ٥۰٪ گلیسرول برای آلوده نمودن خاک با درصدهای وزنی ٤، ۸ و۱۲٪ استفاده شده است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

منیزیم‌اکسید

منیزیم‌اکسید مورد استفاده از نوع تجاری می‌باشد و بر اساس گزارش استبرق و همکاران [١١] شامل ٩٤/٢٪ منیزیم‌اکسید، ١/٧٪ کلسیم‌اکسید، ٠/٨٥٪ سیلیسیم‌اکسید و ٠/٦٪ آلومینیوم‌اکسید می‌باشد. وزن مولکولی و وزن مخصوص آن به‌ترتیب معادل (g/mol) ٤٠/٣٠٤ و ٣/٥٥ می‌باشد. میانگین اندازه ذرات و سطح ویژه آن معادل (μm) ٦٠ و (m^2/g) ٣٠٠–٢٥٠ می‌باشد.

آب

در این پژوهش از آب شرب با اسیدیته (pH) ٧/٧٦ و هدایت الکتریکی (EC) (dS/m)٠/٠١ برای انجام آزمایش‌ها و تهیه نمونه‌ها استفاده گردید.

تهیه خاک آلوده و نمونه‌های مقاومتی

در تهیه خاک آلوده به محلول گلیسرول، مقدار وزنی ٤، ٨ و ١٢٪ از محلول ٥٠٪ گلیسرول با توجه به وزن خاک خشک شده در هوا، انتخاب و بر روی لایه‌های خاک به‌صورت اسپری اضافه گردید و عمل اختلاط با دست صورت گرفت. سپس مخلوط حاصل در یک کیسه نایلونی، حداقل به مدت یک هفته نگهداری شد تا واکنش بین گلیسرول و خاک به حالت تعادل برسد. برای تهیه خاک اختلاط‌یافته با MgO، مقدار وزنی MgO به‌عنوان ماده افزودنی در این کار معادل ٥، ٨ و ١٢٪ محاسبه گردید. پس از انتخاب مقدار خاک معمولی یا آلوده در درصدهای مذکور، MgO با خاک طبیعی و یا آلوده مخلوط گردید. سپس آزمایش تراکم استاندارد روی نمونه‌هایی از خاک اختلاط‌یافته با درصدهای مختلف MgO انجام و وزن واحد حجم خشک بیشینه و درصد رطوبت بهینه برای هر نمونه تعیین شد. برای تهیه نمونه‌های مورد نظر روش تراکم استاتیکی مورد استفاده قرار گرفت. برای انجام تراکم استاتیکی از قالب ویژه به قطر ٥٠ میلی‌متر و ارتفاع ١٠٠ میلی‌متر و یک دستگاه بارگذاری استفاده شد. برای تهیه نمونه‌های مختلف از خاک طبیعی، خاک آلوده به گلیسرول، مخلوط خاک طبیعی و MgO و مخلوط خاک آلوده و MgO، مقدار لازم از هریک از آنها انتخاب و وزن گردید. سپس رطوبت آنها به مقدار رطوبت بهینه منحنی تراکمی مربوطه با اضافه نمودن رطوبت رسانده شد. سپس نمونه خاک را در سه لایه در قالب مربوطه ریخته و به‌وسیله دستگاه بارگذاری با سرعت (mm/min) ١/٥ به آن نیرو وارد شد. مقدار بار وارده به هر لایه از روش سعی و خطا برای هرکدام از مخلوط‌های فوق تعیین گردید. به‌طوری که تحت تاثیر آن بار وارده، وزن واحد حجم خشک آن لایه معادل وزن واحد حجم خشک بیشینه حاصل از منحنی تراکمی مربوطه باشد. نمونه‌های تهیه شده با قطر و ارتفاع ٥٠ و ١٠٠ میلی‌متر مطابق با استاندارد ASTM-D1632-07 در اتاقک مخصوص در شرایط رطوبت نسبی بالای ٩٠٪ و دمای ٢٥ درجه سانتی‌گراد نگهداری و در زمان‌های عمل‌آوری ٧، ١٤ و ٢٨ روز آزمایش لازم بر روی آنها صورت پذیرفت. در شکل (١)، اجزای قالب استفاده شده برای ساخت نمونه‌ها، اتاقک نگهداری نمونه‌ها و دستگاه بارگذاری تک‌محوری برای ساخت و تعیین مقاومت نمونه‌ها نشان داده شده است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

الف ب ج

شکل ۱- الف) اجزای قالب مورد استفاده برای ساخت نمونه‌های آزمایشی، ب) نحوه نگهداری نمونه‌ها در اتاقک مخصوص و ج) دستگاه بارگذاری تک‌محوری مورد استفاده

روش انجام آزمایش‌ها

آزمایش‌های مورد نظر در این پژوهش (حدود اتربرگ، تراکم و مقاومت تک‌محوری) بر اساس استاندارد ASTM صورت پذیرفت. در آزمایش مقاومت تک‌محوری، تعیین مقاومت از روش کرنش کنترل‌شونده و بر اساس استاندارد ASTM-D1633-00 صورت پذیرفت. بار اعمال شده به نمونه (mm/min) ۱ انتخاب شد که این سرعت بارگذاری به‌وسیله محققین دیگر مانند کومار[10] و همکاران [۱۲] و نیز استبرق و همکاران [۱۱] به‌کار رفته است. در طول آزمایش مقدار بار اعمال شده روی نمونه به‌طور مرتب ثبت و تا زمان مشاهده گسیختگی در نمونه، ادامه داشت. مقاومت در لحظه گسیختگی به‌عنوان مقاومت نهایی نمونه در نظر گرفته شد. این روش تعیین مقاومت برای همه‌ی نمونه‌هایی که در زمان‌های عمل‌آوری متفاوت قرار داشتند، انجام پذیرفت. همچنین در این پژوهش به‌منظور بررسی ریزساختار خاک، عکس‌برداری SEM روی نمونه‌هایی از خاک طبیعی، خاک آلوده‌شده به گلیسرول، مخلوط خاک و MgO و نیز مخلوط خاک آلوده و MgO صورت پذیرفت. نمونه‌های مذکور در شرایط درصد رطوبت بهینه و وزن واحد حجم خشک بیشینه تهیه شدند. قطعه‌ای از این نمونه‌ها از طریق خرد کردن از آنها جدا شد. هر قطعه با قرارگیری بر روی پایه مخصوص با دستگاه لایه‌نشانی طلا به‌روش کندوپاش، پوشانده شد و با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی از آن عکس‌برداری گردید.

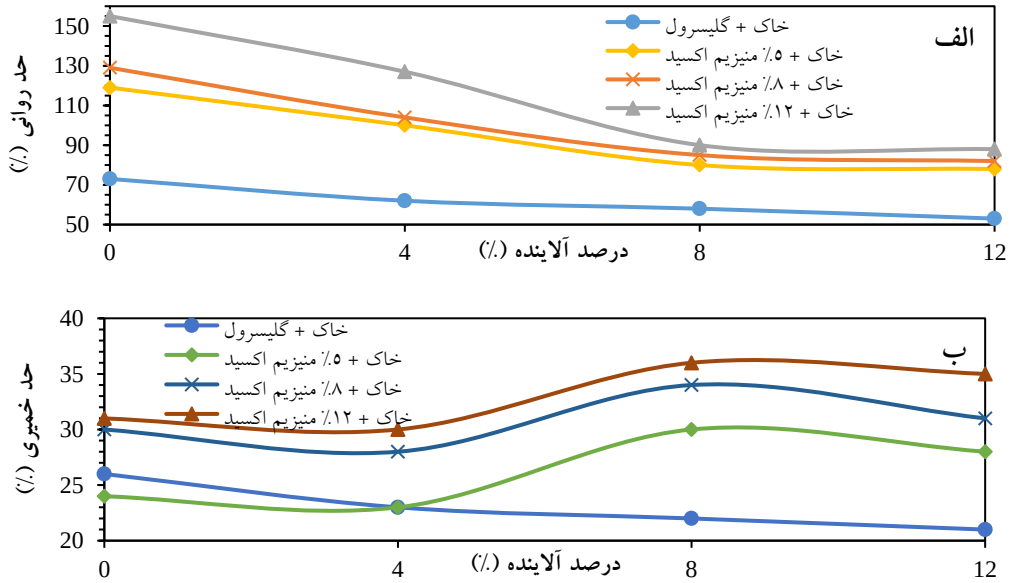
نتایج

شکل (۲) نتایج آزمایش حدود اتربرگ را برای خاک طبیعی و آلوده به محلول گلیسرول در درصدهای مختلف MgO نشان می‌دهد. همان طور که در شکل (۲-الف) مشاهده می‌شود، افزودن محلول گلیسرول در درصدهای ٤، ۸ و ۱۲٪ به خاک سبب کاهش حد روانی می‌شود. همچنین روند کاهشی برای تغییرات حد خمیری در شکل (۲-ب) مشاهده می‌گردد. شکل (۲-الف) نشان می‌دهد که حد روانی خاک از ۷۳٪ (خاک طبیعی) به ۵۳٪ (خاک آلوده به ۱۲٪ محلول گلیسرول) تغییر

[10] Kumar

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

می‌یابد و حد خمیری آن از ۲٦٪ به ۲۱٪ می‌رسد (شکل (۲–ب)). همچنین نتایج نشان می‌دهد که حدود اتربرگ با افزودن MgO به خاک طبیعی و آلوده به محلول گلیسرول افزایش قابل ملاحظه‌ای در مقایسه با خاک طبیعی پیدا می‌کند. در شکل (۲–الف) مشاهده می‌شود که حد روانی در خاک طبیعی اختلاط‌یافته با ۵، ۸ و ۱۲٪ MgO به‌ترتیب برابر ۱۱۹، ۱۲۹ و ۱۵۵٪ می‌باشد و حد خمیری آنها برابر ۲٤، ۳۰ و ۳۱٪ (شکل (۲–ب)) گردیده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که با افزایش درصد MgO از ۵ به ۱۲٪، حدود اتربرگ خاک آلوده به‌ازای درصد ثابت محلول گلیسرول روندی افزایشی داشته است. به‌طور مثال در شکل (۲–الف) ملاحظه می‌شود که به‌ازای افزودن ۵، ۸ و ۱۲٪ MgO به خاک آلوده حاوی ۱۲٪ محلول گلیسرول، حد روانی آنها به‌ترتیب برابر ۷۸، ۸۲ و ۸۸٪ تغییر می‌نماید و حد خمیری آنها برابر ۲۸، ۳۱ و ۳۵٪ می‌گردد (شکل (۲–ب)). از نتایج مندرج در شکل (۲–الف) می‌توان نتیجه‌گیری نمود که حد روانی به‌ازای درصد ثابت MgO و با افزایش درصد محلول گلیسرول روندی کاهشی داشته لیکن شکل (۲–ب) نشان‌دهنده روند افزایشی تغییرات حد خمیری می‌باشد. به‌عنوان مثال حد روانی خاک آلوده حاوی ٤، ۸ و ۱۲٪ محلول گلیسرول اختلاط‌یافته با ۱۲٪ MgO برابر ۱۲۷، ۹۰ و ۸۸٪ (شکل (۲–الف)) و حد خمیری آنها برابر ۳۰، ۳٦ و ۳۵٪ می‌باشد (شکل (۲–ب)).



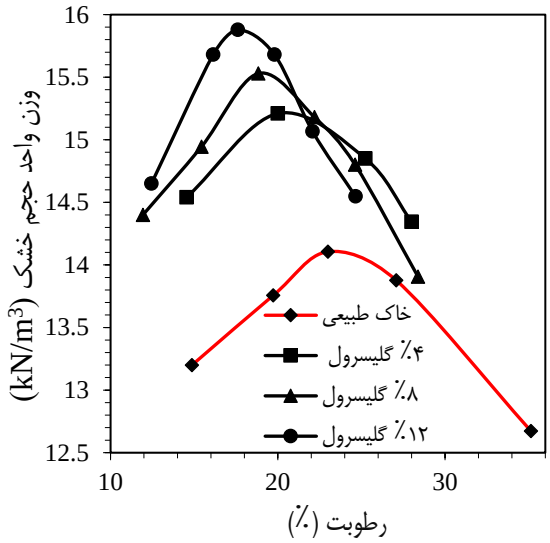
شکل ۲- نتایج تغییرات حدود اتربرگ خاک طبیعی و خاک آلوده در درصدهای مختلف محلول گلیسرول و MgO،

الف) تغییرات حد روانی و ب) تغییرات حد خمیری

منحنی‌های تراکمی استاندارد خاک طبیعی و خاک آلوده به محلول گلیسرول در درصدهای ٤، ۸ و ۱۲٪ در شکل (۳) نشان داده شده است. بر اساس این شکل با افزودن محلول گلیسرول به خاک، منحنی تراکمی به سمت چپ و بالای منحنی خاک طبیعی حرکت می‌کند. به‌عبارت دیگر افزودن محلول گلیسرول به خاک، سبب افزایش وزن واحد حجم خشک بیشینه و

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

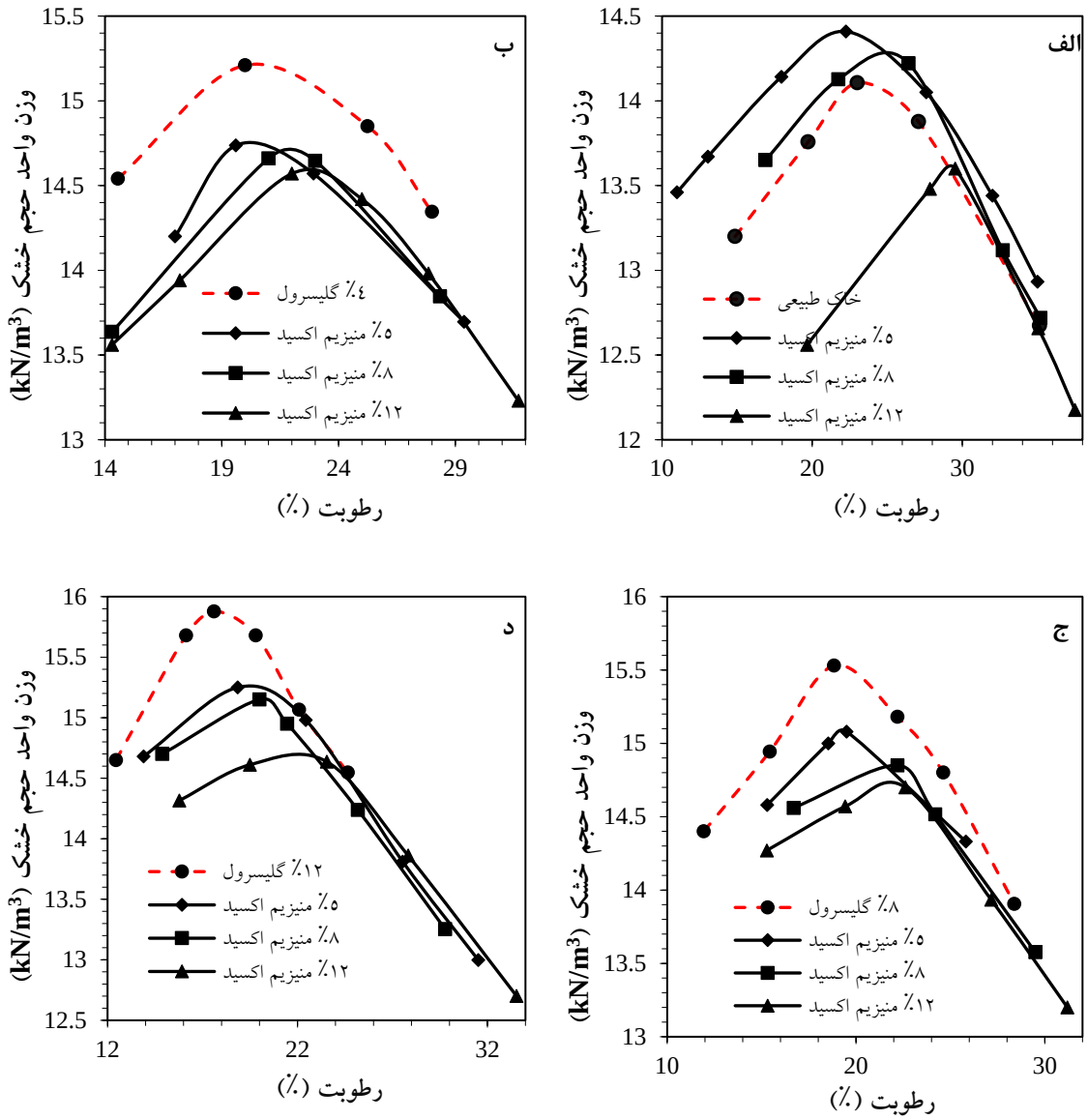
کاهش درصد رطوبت بهینه شده است. درصد رطوبت بهینه و وزن واحد حجم خشک بیشینه خاک طبیعی به‌ترتیب برابر ٪۲۳ و (kN/m^3) ۱٤/۱ بوده که این مقادیر به‌ازای افزودن ٤٪ محلول گلیسرول برابر ٪۲۰ و (kN/m^3) ۱۵/۲۱، ٪۸ محلول گلیسرول برابر ٪۱۸/۸۳ و (kN/m^3) ۱۵/۵۳ و ۱۲٪ محلول گلیسرول برابر ٪۱۷/٦ و (kN/m^3) ۱۵/۸۷ شده است.



شکل۳- منحنی تراکم استاندارد خاک طبیعی و خاک آلوده به محلول گلیسرول در درصدهای متفاوت

نتایج آزمایش تراکم خاک طبیعی اختلاط‌یافته با درصدهای متفاوت MgO و خاک آلوده حاوی درصدهای مختلف MgO در شکل (٤) نشان داده شده است. بر اساس شکل (٤-الف) با افزودن درصدهای مختلف MgO به خاک طبیعی، درصد رطوبت بهینه روندی افزایشی داشته به‌گونه‌ای که به‌ازای افزودن ۵، ۸ و ۱۲٪ MgO به‌ترتیب برابر ۲۳، ۲۵/۵ و ۲۹/۲۵٪ شده است. وزن واحد حجم خشک بیشینه خاک نیز به‌ازای ۵٪ MgO برابر (kN/m^3) ۱٤/٤ گردید که با افزایش مقدار MgO، روند کاهشی پیدا می‌کند و با اضافه کردن ۸ و ۱۲٪ MgO به‌ترتیب برابر ۱٤/۲۵ و (kN/m^3) ۱۳/۵۹ می‌گردد. با توجه به شکل (٤-ب، ج و د) به‌طور کلی با اضافه کردن MgO به خاک آلوده حاوی ٤، ۸ و ۱۲٪ محلول گلیسرول، رطوبت بهینه روندی افزایشی و وزن واحد حجم خشک بیشینه روندی کاهشی داشته است. به‌عنوان مثال بر اساس شکل (٤-د)، رطوبت بهینه خاک آلوده به ۱۲٪ محلول گلیسرول به‌ازای افزودن ۵، ۸ و ۱۲٪ MgO به‌ترتیب برابر ۱۹/۲۵، ۲۰/۵ و ۲۳٪ و وزن واحد حجم خشک بیشینه به‌ترتیب برابر ۱۵/۲۵، ۱۵/۱۵ و (kN/m^3) ۱٤/۷ شده است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]



شکل ٤- منحنی تراکم استاندارد خاک طبیعی اختلاط‌یافته با درصدهای متفاوت MgO و خاک آلوده حاوی درصدهای مختلف MgO

نتایج آزمایش‌های مقاومتی انجام شده روی نمونه‌های مختلف به‌صورت تنش-کرنش محاسبه و منحنی آنها ترسیم گردید. مقادیر مقاومت نهایی و کرنش مربوط به مقاومت نهایی از منحنی‌های تنش-کرنش استخراج گردید. همچنین E_{50} (ضریب الاستیک مربوط به ٥٠٪ از مقاومت نهایی) نمونه‌ها نیز از منحنی‌های تنش-کرنش از روش وتری محاسبه گردید و تمامی نتایج مربوطه در جدول (٣) آورده شد. همان طور که در این جدول مشاهده می‌شود، مقاومت نهایی خاک طبیعی و کرنش مربوط به آن به‌ترتیب برابر ٤٨٨ kPa و ٣٪ می‌باشد. این مقادیر برای خاک آلوده به محلول‌های ٤، ٨ و ١٢٪ برابر ٢٣٤، ١٦٣ و ١١٧ kPa و ٥/٣٪ می‌باشد. این نتایج نشان می‌دهد که افزودن محلول گلیسرول به خاک سبب کاهش مقاومت و افزایش

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

نرم‌شدگی[11] نمونه‌ها در مقایسه با خاک طبیعی می‌شود. همچنین اطلاعات مندرج در این جدول نشان‌دهنده آنست که افزودن MgO به خاک موجب افزایش خاصیت شکنندگی در نمونه در مقایسه با خاک طبیعی می‌شود. همچنین مقایسه مقادیر E_{50} با مقاومت نهایی نمونه‌ها نشان می‌دهد که افزایش مقاومت موجب افزایش E_{50} می‌گردد و بالعکس. البته این امر در برخی از نمونه‌ها صادق نمی‌باشد که علت آن به شکل منحنی تنش-کرنش به‌دست‌آمده از آزمایش و پراکندگی در داده‌های ثبت شده مرتبط می‌باشد.

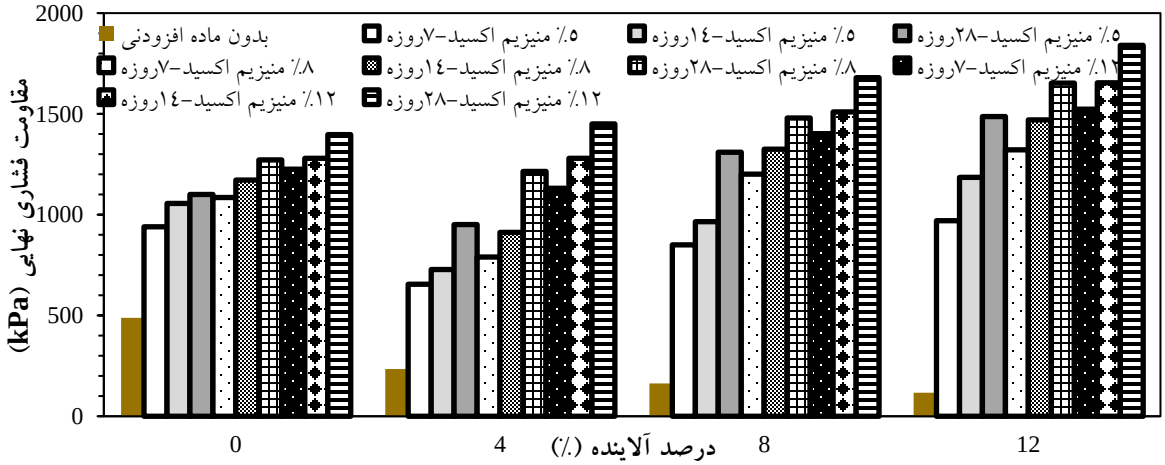
جدول۳- نتایج مقاومت نهایی، کرنش در مقاومت نهایی و E_{50} نمونه‌های مورد آزمایش

آلاینده (٪)	زمان عمل‌آوری	MgO (%)											
		۰			۵			۸			۱۲		
		q (kPa)	ε (%)	E_{50} (MPa)	q (kPa)	ε (%)	E_{50} (MPa)	q (kPa)	ε (%)	E_{50} (MPa)	q (kPa)	ε (%)	E_{50} (MPa)
۰	۰	٤٨٨	۳	۳۳	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	۷	–	–	–	۹٤۰	۱/٦	۵۱/۵	۱۰۸۵	۱/۹	٦۲/٤	۱۲۲٦	۱/۸	۹۷/۳
	۱٤	–	–	–	۱۰۵٦	۱/۸	٦۲/۵	۱۱۷۲	۱/٦	۷۸/۱	۱۲۸۰	۱/٦	۸۲/۱
	۲۸	–	–	–	۱۱۰۰	۱/٦	۸۰/۹	۱۲۷۲	۱/۵	۹٤/۲	۱۳۹٦	۱/٦	۱۱۲/٦
٤	۰	۲۳٤	۵/۳	۱۷/۲	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	۷	–	–	–	٦۵۵	۱/٦	۳۹/۹	۷۹۰	۱/۵	٤٦/۷	۱۱۳۱	۱/٤	۸۹/۸
	۱٤	–	–	–	۷۳۰	۱/٤	۷۱/٦	۹۱۲	۱/۳	۱۲۰	۱۲۸۰	۱/۱	۱۹۳/۹
	۲۸	–	–	–	۹۵۰	۱/٦	٦۰/۵	۱۲۱۵	۱/۸	۷۸/٤	۱٤۵۰	۱/۹	۹٦/۷
۸	۰	۱٦۳	۵/۳	٦/۷	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	۷	–	–	–	۸۵۰	۱/٦	٦۸	۱۲۰۰	۱/۳	۱۲۱/۲	۱٤۰۱	۱/۲	۱٤۵/۹
	۱٤	–	–	–	۹٦۵	۱/٦	۷۷/۲	۱۳۲۵	۱/٦	۱۰۰/٤	۱۵۱۰	۱/٤	۱٦۹/۷
	۲۸	–	–	–	۱۳۱۰	۱/۸	۷۹/۹	۱٤۸۰	۱/٦	۱۰۲/۸	۱٦۸۰	۱/۹	۱۵۵/٦
۱۲	۰	۱۱۷	۵/۳	۵/٤	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	۷	–	–	–	۹۷۰	۱/۷	٦۵/۵	۱۳۲۱	۱/۵	۱۰۰/۱	۱۵۲۳	۱/۵	۱۳۸/۵
	۱٤	–	–	–	۱۱۸۵	۱/۸	۵۷	۱٤۷۰	۲	۷۹/۹	۱٦۵٤	۱/۵	۱۱۸/۱
	۲۸	–	–	–	۱٤۸۷	۱/۲	۱۲۱/۹	۱٦۵۳	۱/۲	۱٦۲	۱۸٤۰	۱	۲٤۲/۱

[11] Softening

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

برای مقایسه بهتر نتایج آزمایش‌های مقاومتی، نتایج مقاومت فشاری نهایی تمامی نمونه‌های مورد آزمایش به‌صورت نمودار ستونی در شکل (۵) آورده شده است. همان طور که در این شکل مشاهده می‌گردد، مقاومت فشاری نهایی خاک طبیعی برابر ٤٨٨ kPa می‌باشد که با افزودن گلیسرول به خاک، مقاومت کاهش می‌یابد. به‌گونه‌ای که مقاومت فشاری نهایی خاک آلوده به ٤٪ محلول گلیسرول، برابر ٢٣٤ kPa می‌باشد که نشان‌دهنده کاهش ٥٢٪ مقاومت فشاری است. همچنین مقاومت فشاری نهایی خاک آلوده به ۸ و ١٢٪ محلول گلیسرول کاهشی برابر ٦٦/٦ و ٧٦٪ در مقایسه با مقاومت خاک طبیعی داشته است. با توجه به شکل (۵) مشاهده می‌شود که مقاومت فشاری نهایی نمونه‌های بهسازی شده خاک طبیعی و خاک آلوده، با افزایش درصد MgO و زمان عمل‌آوری افزایش می‌یابد. به‌عنوان مثال مقاومت فشاری نهایی نمونه‌های خاک طبیعی اختلاط‌یافته با ۵، ۸ و ١٢٪ MgO در زمان عمل‌آوری ٧ روز به‌ترتیب برابر ٩٤٠، ١٠٨٥ و ١٢٢٦ kPa گردیده است که این مقادیر با گذشت زمان افزایش پیدا کرده و به‌ازای زمان عمل‌آوری ٢٨ روز، به‌ترتیب برابر ١١٠٠، ١٢٧٢ و ١٣٩٦ kPa شده است. این روند در مورد نمونه‌های خاک آلوده بهسازی شده نیز صادق می‌باشد. به‌عنوان مثال مقاومت فشاری نهایی نمونه خاک آلوده به ٤٪ محلول گلیسرول، ٢٣٤ kPa بوده که پس از بهسازی با ۵٪ MgO در زمان‌های عمل‌آوری ٧، ١٤ و ٢٨ روز به‌ترتیب به مقادیری برابر ٦٥٥، ٧٣٠ و ٩٥٠ kPa می‌رسد. با افزایش درصد MgO به ١٢٪، مقاومت فشاری نهایی نمونه‌ها در زمان‌های عمل‌آوری ٧، ١٤ و ٢٨ روز به‌ترتیب برابر ١١٣١، ١٢٨٠ و ١٤٥٠ kPa می‌شود. این روند تغییرات برای نمونه‌های آلوده به ۸ و ١٢٪ محلول گلیسرول نیز مشاهده گردید. همچنین مقایسه نتایج نشان می‌دهد که مقاومت فشاری نهایی نمونه‌های آلوده به ١٢٪ گلیسرول که با درصدهای مختلف MgO بهسازی شده‌اند، همواره بیشتر از نمونه‌های خاک طبیعی بهسازی شده می‌باشد. این امر در مورد نمونه‌های آلوده به ۸٪ گلیسرول که با مقادیر ۸ و ١٢٪ MgO اختلاط یافته‌اند نیز ملاحظه می‌گردد، لیکن این تغییرات برای نمونه‌های حاوی ٤٪ گلیسرول بهسازی شده مشاهده نمی‌شود.

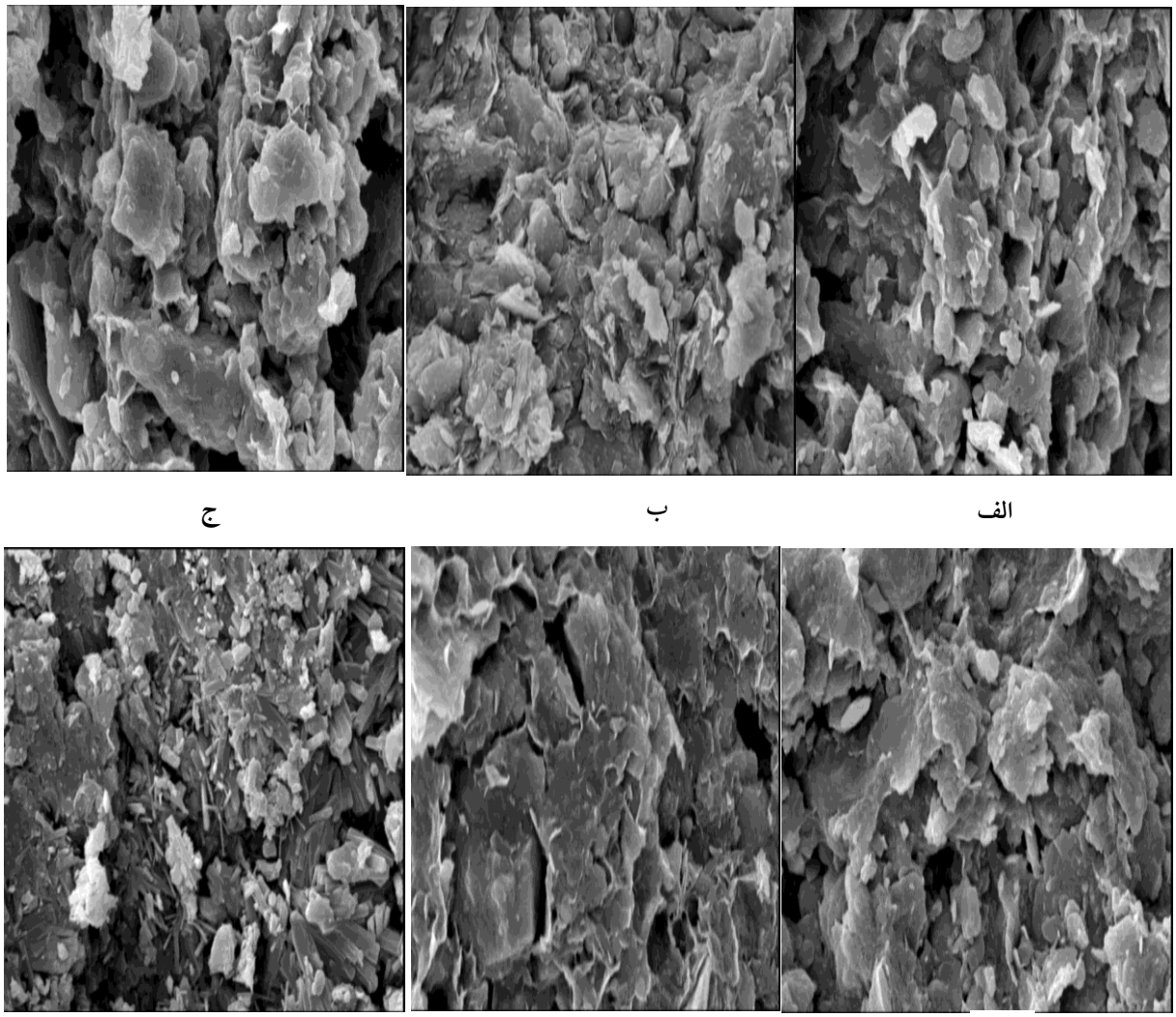


شکل ۵- نتایج آزمایش مقاومت فشاری نهایی تمامی نمونه‌های مورد آزمایش

در شکل (٦) نتایج میکروساختار نمونه‌های خاک طبیعی، خاک آلوده به محلول گلیسرول و نمونه‌های بهسازی شده توسط MgO قابل مشاهده می‌باشد. همان طور که در شکل (٦-الف) مشاهده می‌گردد، ذرات خاک در نمونه خاک طبیعی، بدون هیچ‌گونه اتصالی در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند و فضاهای خالی فراوانی بین ذرات وجود دارد. با افزودن محلول گلیسرول به خاک (شکل٦-ب و ج) مشاهده می‌شود که ساختار خاک در مقایسه با نمونه خاک طبیعی، فولکوله‌تر و درشت‌دانه‌تر شده

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

است. با بهسازی خاک طبیعی با ۱۲٪ MgO و زمان عمل‌آوری ۱٤ روز (شکل٦-د)، موادی در اثر کربناسیون MgO به محیط اضافه شده که سبب پیوند ذرات خاک به یکدیگر و پر شدن فضاهای خالی بین ذرات گردیده است. همچنین با توجه به شکل (٦-ه و خ) که نشان‌دهنده خاک آلوده حاوی ٤ و ۱۲٪ محلول گلیسرول و بهسازی شده با ۱۲٪ MgO در مدت زمان ۱٤ روز است، ملاحظه می‌گردد که ماده‌ای موجب پر شدن فضاهای خالی بین ذرات و اتصال آنها به یکدیگر شده است.



شکل ٦- نتایج SEM با بزرگ‌نمایی ۳۰۰۰ برابر، الف)خاک طبیعی، ب) خاک آلوده به ٤٪ محلول گلیسرول، ج) خاک آلوده به ۱۲٪ محلول گلیسرول، د) خاک طبیعی + ۱۲٪ MgO، ه) خاک آلوده به ٤٪ محلول گلیسرول + ۱۲٪ MgO (۱٤روزه)، خ) خاک آلوده به ۱۲٪ محلول گلیسرول + ۱۲٪ MgO (۱٤روزه)

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

بحث

به‌منظور تجزیه و تحلیل نتایج این پژوهش ابتدا می‌بایست به بررسی ساختار خاک‌های رسی پرداخت. سطح ذرات رس دارای بار منفی بوده که کاتیون‌های قابل تبادل برای خنثی نمودن بار منفی و ایجاد تعادل الکتریکی، جذب این بارهای منفی می‌شود. در شرایط خشک بودن خاک رسی، کاتیون‌ها با اتصال بسیار محکم و پایدار به سطوح ذرات رس متصل می‌باشند که با افزودن آب به خاک، کاتیون‌ها و آنیون‌ها در محلول آب شناور می‌گردند به‌طوری که غلظت کاتیون‌ها در مجاورت سطح رس زیاد بوده و با افزایش فاصله از ذرات رس، این غلظت کاهش می‌یابد. بنابراین یک لایه پخشیدگی که متشکل از آب و ذرات باردار می‌باشد در اطراف ذرات رس تشکیل می‌گردد که تحت عنوان لایه پخشیدگی مضاعف (DDL) نامیده می‌شود. این لایه با ذرات مجاور خود در عمل متقابل با یکدیگر قرار دارد که این عمل متقابل تحت تاثیر نیروهای جاذبه و یا دافعه صورت می‌پذیرد. در شرایط غالب بودن نیروهای جاذبه، ساختمان فولکوله در خاک ایجاد می‌شود و در غیر این صورت ساختمان خاک پراکنده خواهد بود. همچنین به‌طور کلی می‌توان بیان نمود که کاهش ضخامت لایه پخشیدگی مضاعف سبب تشکیل ساختمان فولکوله و افزایش ضخامت این لایه سبب تشکیل ساختمان پراکنده می‌شود. ضخامت لایه پخشیدگی مضاعف تحت تاثیر عواملی مانند ثابت دی‌الکتریک، دما، غلظت الکترولیت و ظرفیت کاتیون می‌باشد.

نتایج حدود اتربرگ (شکل (۲)) نشان داد که افزودن محلول گلیسرول به خاک سبب کاهش حدود اتربرگ در مقایسه با خاک طبیعی می‌شود که این کاهش تابعی از درصد محلول گلیسرول استفاده شده است. علت این امر را می‌توان کمتر بودن ثابت دی‌الکتریک محلول گلیسرول در مقایسه با آب دانست. ثابت دی‌الکتریک آب و گلیسرول معادل ۸۰ و ٤۲/۵ می‌باشد. کاهش ثابت دی‌الکتریک محلول گلیسرول نسبت به آب، سبب کاهش ضخامت لایه مضاعف و تشکیل ذرات درشت‌دانه‌تر و ساختمان فولکوله می‌شود. نتایج عکس‌برداری SEM خاک طبیعی و خاک آلوده به محلول گلیسرول (شکل٦-الف، ب و ج) این امر را به خوبی تائید می‌کند. با تشکیل ساختمان فولکوله و پیدایش ذرات درشت‌تر، سطح ویژه ذرات تشکیل شده در خاک آلوده نسبت به خاک طبیعی کاهش می‌یابد به‌گونه‌ای که موجب کاهش پتانسیل جذب آب به‌وسیله ذرات و در نتیجه کاهش حدود اتربرگ در مقایسه با خاک طبیعی می‌شود. این نتایج با نتایج ارائه شده توسط استبرق و همکاران [۱۰] مطابقت دارد. همچنین شکل (۲) نشان می‌دهد که افزودن MgO به خاک، سبب افزایش حدود اتربرگ می‌شود. دلیل این امر را می‌توان با سطح ویژه بالای ذرات MgO در مقایسه با خاک، توجیه کرد. سطح ویژه MgO برابر با (m^2/g) ۳۰۰- ۲۵۰ می‌باشد که وجود آن باعث افزایش پتانسیل جذب آب می‌شود که این امر خود منجر به افزایش حدود اتربرگ می‌گردد. همچنین با افزایش درصد MgO، حدود اتربرگ نیز افزایش می‌یابد. نتایج به‌دست‌آمده با نتایج حاصله محققینی مانند لیسکا و همکاران [۵] و استبرق و همکاران [۱۱] مطابقت دارد.

در شکل (۳) مشاهده می‌شود که اضافه کردن درصدهای مختلف محلول گلیسرول به خاک، سبب افزایش وزن واحد حجم خشک بیشینه و کاهش درصد رطوبت بهینه در مقایسه با خاک طبیعی می‌گردد. همان طور که بیان گردید، کاهش ثابت دی‌الکتریک مایع منفذی بین ذرات سبب تشکیل ساختمان فولکوله و ذرات درشت‌تر نسبت به خاک طبیعی می‌شود که این

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

امر باعث افزایش وزن واحد حجم خشک بیشینه و کاهش درصد رطوبت بهینه می‌شود. با افزایش درصد محلول گلیسرول، میزان دانه‌ای شدن ذرات خاک افزایش یافته و تغییرات بیشتری در مقادیر پارامترهای تراکمی مشاهده می‌گردد. نتایج به‌دست‌آمده با نتایج پژوهش استبرق و همکاران [۱۰] و راتناویرا و میگودا [۱۳] هماهنگ می‌باشد. شکل (٤-الف) نشان می‌دهد که مقادیر پارامترهای تراکمی (وزن واحد حجم خشک بیشینه و رطوبت بهینه) برای خاک اختلاط‌یافته با ۵ و ۸٪ MgO بیشتر از خاک طبیعی می‌باشد. همچنین نمونه اختلاط‌یافته با ۱۲٪ MgO، دارای رطوبت بهینه بیشتر و وزن واحد حجم خشک بیشینه کمتری در مقایسه با خاک طبیعی می‌باشد. مقایسه نمونه‌های خاک طبیعی اختلاط‌یافته با MgO هم نشان‌دهنده کاهش وزن واحد حجم خشک بیشینه و افزایش درصد رطوبت بهینه با افزایش درصد ماده افزودنی MgO می‌باشد. این نتایج را می‌توان به این‌گونه توجیه کرد که MgO دارای سطح ویژه نسبتا بالایی نسبت به خاک مورد استفاده می‌باشد، به‌گونه‌ای که قدرت جذب آب زیادی را دارا می‌باشد. با افزودن۵٪ MgO به خاک، تولید یون‌های منیزیم با توجه به مایع منفذی صورت می‌پذیرد که آنها با کانی‌های خاک تبادل یونی انجام می‌دهند و موجب چسبیدن ذرات خاک به یکدیگر و تشکیل ذرات درشت‌تر می‌شوند. همچنین ساختار خاک دارای درجه فولکوله بالایی می‌گردد. ذرات درشت تشکیل‌شده دارای سطح ویژه کمی می‌باشند، در نتیجه قدرت جذب آب پایینی را دارند. از طرفی با اعمال انرژی ثابت تراکمی، فضاهای بین ذرات کاهش می‌یابد و در نتیجه وزن واحد حجم خشک بیشینه افزایش می‌یابد. با افزودن ۸٪ MgO به خاک، درصدی از MgO بر اساس ظرفیت تبادل کاتیونی با کانی‌های خاک تبادل حاصل می‌نماید و مابقی آن که بیشتر از ظرفیت تبادل کاتیونی خاک است، در فضاهای بین ذرات قرار می‌گیرد که در جذب آب موثر می‌باشد. از طرفی بین ذرات بار الکتریکی ایجاد می‌کند که این عوامل سبب افزایش رطوبت بهینه و کاهش وزن واحد حجم خشک بیشینه می‌شود. زیرا آب جذب شده اطراف ذرات و بار الکتریکی بین آنها در برابر انرژی تراکمی مقاومت می‌نماید. این روند با افزایش درصد MgO متناسب می‌باشد زیرا همان طور که در شکل (٤-الف) مشاهده می‌شود، تغییر مقادیر پارامترهای تراکمی خاک اختلاط‌یافته با ۱۲٪ MgO در مقایسه با خاک اختلاط‌یافته با ۸٪ MgO بنا به دلایل ذکر شده بیشتر می‌باشد. این نتایج با نتایج گزارش شده توسط محققین دیگر مانند استبرق و همکاران [۱۱] و وندپر و همکاران [٦]، [١٤] و [١٥] مطابقت دارد. افزودن MgO به خاک آلوده نیز موجب کاهش وزن واحد حجم خشک بیشینه و افزایش درصد رطوبت بهینه می‌گردد که دلیل آن را می‌توان ناشی از سطح ویژه زیاد MgO و همچنین ایجاد فضاهای خالی فراوان به‌وسیله آن در بین ذرات دانست.

نتایج مندرج در جدول (۳) نشان می‌دهد که افزودن محلول گلیسرول به خاک، سبب کاهش مقاومت می‌شود که این کاهش تابعی از درصد آلاینده استفاده شده می‌باشد. همان طور که بیان شد، افزودن محلول گلیسرول به خاک سبب فولکوله‌تر شدن ذرات خاک می‌گردد. بنابراین انتظار می‌رود که مقاومت نمونه‌های آلوده بیشتر از مقاومت خاک طبیعی به‌دست آید لیکن نتایج، خلاف این موضوع را نشان می‌دهد. دلیل این امر را می‌توان در وجود اختلاف لزوجت گلیسرول و آب بیان کرد. لزوجت گلیسرول (۱/۵ میلی‌پاسکال ثانیه) بیشتر از آب (۰/۹ میلی‌پاسکال ثانیه) است. بنابراین زمانی که نمونه آلوده تحت تاثیر بارگذاری قرار می‌گیرد، جابه‌جایی ذرات نسبت به یکدیگر در مقایسه با نمونه خاک طبیعی بیشتر بوده که این امر

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

سبب کاهش مقاومت نمونه آلوده نسبت به خاک طبیعی می‌شود. نتایج به‌دست‌آمده با نتایج ارائه شده به‌وسیله استبرق و همکاران [۱۰] و راتناویرا و میگودا [۱۳] نیز قابل تطبیق است.

مقادیر مقاومت نمونه‌های خاک طبیعی و خاک آلوده بهسازی شده با درصدهای مختلف MgO (شکل(۵)) نشان داد که با افزایش درصد MgO و زمان عمل‌آوری، مقاومت نمونه‌ها افزایش می‌یابد. به‌عبارت دیگر مقاومت ایجاد شده در نمونه‌ها تابعی از درصد MgO اضافه شده و زمان عمل‌آوری می‌باشد. با افزودن MgO به خاک، واکنش‌هایی در خاک رخ می‌دهد که شبیه واکنش‌های سیمان می‌باشد [۱۱]. در مراحل اولیه با تجزیه MgO به Mg^{2+}، بین این کاتیون و کاتیون‌های موجود در کانی‌های رسی تبادل یونی صورت می‌پذیرد که ممکن است باعث ایجاد تغییراتی در لایه مضاعف گردد. سپس مراحل هیدراسیون MgO آغاز می‌گردد که این عمل با جذب آب بین ذرات خاک انجام می‌شود. در طی این فرآیند، MgO به منیزیم‌هیدروکسید تبدیل می‌گردد که تحت عنوان بروسیت[۱۲] نامیده می‌شود. ماده تولید شده (بروسیت) با آب و CO_2 جذب شده از محیط، واکنش نشان داده که این امر منجر به تولید محصولاتی همچون نسکوهنیت[۱۳]، هیدرومگنزیت[۱٤] و دیپینجیت[۱۵] می‌گردد. تولید مواد مذکور موجب افزایش مقاومت نمونه بهسازی شده با MgO می‌شود. به هرحال طی عمل کربناسیون، منیزیم‌کربنات تولید می‌شود که منبع اصلی MgO محسوب می‌شود. آنلور و التبا [۱٦ و ۱۷] بر اساس تحقیقات خود بیان نمودند که مقاومت نسکوهنیت نسبت به سایر مواد بیشتر است. به‌عبارت دیگر این محصول در کسب مقاومت نمونه بهسازی شده، نقش مهمی ایفا می‌کند. بنابراین مراحل کربناسیون که منجر به تولید مواد پیش‌گفته می‌گردد، با جذب آب و CO_2 به مرور زمان انجام می‌گیرد. بدیهی است که عامل زمان در کسب مقاومت بسیار مهم است. تصاویر SEM وجود مواد جدیدی که در اثر کربناسیون MgO در بین ذرات خاک قرار گرفته است را در نمونه خاک طبیعی حاوی ۱۲٪ MgO (شکل (٦–د)) و نمونه‌های خاک آلوده بهسازی شده با ۱۲٪ MgO (شکل (٦–ه و خ) تائید می‌کند. مقایسه نتایج مقاومت فشاری نهایی نمونه‌های بهسازی شده (شکل (۵)) نشان داد که نمونه‌های آلوده به درصدهای بالای محلول گلیسرول هنگامی که با MgO بهسازی می‌شوند، دارای مقاومت بیشتری در مقایسه با نمونه‌های خاک طبیعی بهسازی شده می‌باشند. این امر ممکن است به‌علت تشکیل نمکی آلی–معدنی (علاوه بر موادی که در اثر کربناسیون MgO به خاک اضافه می‌شود)، در نمونه‌های حاوی درصدهای بالای محلول گلیسرول باشد. همان طور که گفته شد، افزودن MgO به خاک موجب تولید منیزیم‌هیدروکسید ($Mg(OH)_2$) می‌گردد که این عمل موجب قلیایی شدن محیط می‌شود. لی و یی[۱٦] [۱۸] بیان کردند که pH خاک در حالت مذکور به ۹–۱۰/۵ تغییر می‌یابد. تغییر pH و قلیاییت محیط، منجر به تولید یون‌های Mg^{2+} و OH^- می‌شود. در نتیجه افزایش یون OH^- تولید شده در محیط، یون‌های H^+ از زنجیره گلیسرول جدا شده و منجر به تولید یک نمک آلی–

[12] Brucite
[13] Nesquehonite
[14] Hydromagnesite
[15] Dypingite
[16] Li and Yi

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

معدنی در محیط می‌شود. این نمک‌ها در بین ذرات رسوب نموده و مانند یک ماده چسباننده باعث اتصال ذرات به یکدیگر و تشکیل یک جسم جامد یکپارچه می‌گردد که افزایش مقاومت را موجب می‌شود.

نتیجه‌گیری

۱. اضافه کردن محلول گلیسرول به خاک رسی سبب تغییر ساختار خاک و فولکوله‌تر شدن ذرات آن می‌شود که این امر سبب کاهش حدود اتربرگ، درصد رطوبت بهینه و مقاومت تک‌محوری و همچنین افزایش وزن واحد حجم خشک بیشینه خاک می‌شود. این تغییرات تابعی از درصد محلول گلیسرول به‌کار رفته می‌باشد، به‌گونه‌ای که هرچه درصد محلول گلیسرول بیشتر باشد، تغییرات این پارامترها بیشتر است.

۲. اضافه کردن MgO به خاک طبیعی و آلوده به گلیسرول سبب افزایش حدود اتربرگ می‌شود.

۳. افزودن درصدهای مختلف وزنی MgO به خاک معمولی و آلوده به گلیسرول، موجب افزایش مقاومت آنها می‌شود که این افزایش به درصد MgO مصرفی و زمان عمل‌آوری بستگی دارد.

منابع

[1] H. Y. Fang, *Introduction to Environmental Geotechnology,* Second Edition, CRC Press, 2016.

[2] A. Sezer, G. Inan, H. R. Yilmaz, and K. Ramyar, “Utilization of a very high lime fly ash for improvement of Izmir clay,” *Build. Environ.*, vol. 41, no. 2, pp. 150–155, 2006.

[3] C. Unluer and A. Al-Tabbaa, “Impact of hydrated magnesium carbonate additives on the carbonation of reactive MgO cements,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 54, pp. 87–97, 2013.

[4] A. J. W. Harrison, “Reactive magnesium oxide cements,” 2005.

[5] M. Liska, L. J. Vandeperre, and A. Al-Tabbaa, “Influence of carbonation on the properties of reactive magnesia cement-based pressed masonry units,” *Adv. Cem. Res.*, vol. 20, no. 2, pp. 53–64, 2008.

[6] L. J. Vandeperre, M. Liska, and A. Al-Tabbaa, “Mixtures of pulverized fuel ash, Portland cement and Magnesium oxide: strength evolution and hydration products,” *6th International Conference on the Science and Engineering of Recycling for Environmental Protection,* 2006.

[7] N. Meegoda, and P. Ratnaweera, “Treatment of Oil-Contaminated Soils for Identification and Classification,” *Geotech. Test. J.*, vol. 18, no. 1, p. 41, 1995.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[8] A. J. Puppala, E. Wattanasanticharoen, and K. Punthutaecha, "Experimental evaluations of stabilisation methods for sulphate-rich expansive soils," *Proc. Inst. Civ. Eng. - Gr. Improv.*, vol. 7, no. 1, pp. 25–35, 2003.

[9] S. H. Chew, A. H. M. Kamruzzaman, and F. H. Lee, "Physicochemical and Engineering Behavior of Cement Treated Clays," *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.*, vol. 130, no. 7, pp. 696–706, 2004.

[10] A. R. Estabragh, M. Khatibi, and A. A. Javadi, "Effect of Cement on Treatment of a Clay Soil Contaminated with Glycerol," *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 28, no. 4, p. 04015157, 2016.

[11] A. R. Estabragh, H. Khajepour, A. A. Javadi, and M. Amini, "Effect of forced carbonation on the behaviour of a magnesia-stabilised clay soil," *Int. J. Pavement Eng.*, 2020.

[12] A. Kumar, B. S. Walia, and A. Bajaj, "Influence of Fly Ash, Lime, and Polyester Fibers on Compaction and Strength Properties of Expansive Soil," *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 19, no. 3, pp. 242–248, 2007.

[13] P. Ratnaweera and J. Meegoda, "Shear Strength and Stress-Strain behavior of Contaminated Soils," *Geotech. Test. J.*, vol. 29, no. 2, 2006.

[14] L. J. Vandeperre, M. Liska, and A. Al-Tabbaa, "Microstructures of reactive magnesia cement blends," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 30, no. 8, pp. 706–714, 2008.

[15] L. J. Vandeperre, M. Liska, and A. Al-Tabbaa, "Hydration and Mechanical Properties of Magnesia, Pulverized Fuel Ash, and Portland Cement Blends," *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 20, no. 5, pp. 375–383, 2008.

[16] C. Unluer and A. Al-Tabbaa, "Effect of Aggregate Size Distribution on the Carbonation of Reactive Magnesia Based Porous Blocks," *8th Int. Conf. Concr. Low Carbon Era*, 2012.

[17] C. Unluer and A. Al-Tabbaa, "Green Construction with Carbonating Reactive Magnesia Blocks: Effect of Cement and Water Contents," *2nd Int. Conf.on Futur. Concr.*, 2011.

[18] W. Li and Y. Yi, "Stabilization/solidification of lead- and zinc-contaminated soils using MgO and CO_2," *J. CO_2 Util.*, vol. 33, pp. 215–221, 2019.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]