

اثر پودر شیشه بازیافتی بر پتانسیل واگرایی و پارامترهای ژئوتکنیکی خاک‌های واگرا

محمد بهبودی^۱، امیرعلی زاد*^۲، مریم یزدی^۳، امین توحیدی^۴

^۱ دانشجوی دکتری ژئوتکنیک، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران و منابع زمین، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی
^۲ استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران و منابع زمین، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی
^۳ استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران و منابع زمین، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی
^۴ استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران و منابع زمین، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی

دریافت: ۱۴۰۱/۹/۲۰، بازنگری: ۱۴۰۱/۱۲/۵، پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۲۱، نشر آنلاین: ۱۴۰۱/۱۲/۲۱

چکیده

وجود پدیده واگرایی در رس‌ها به دلیل پراکنده شدن و افزایش نیروی دافعه بین ذرات تحت شرایط خاصی، مشکلات زیادی را برای پروژه‌های عمرانی ایجاد می‌کند. با توجه به پیشرفت صنعت بازیافت مواد زائد و تأثیر آن‌ها در کاهش مشکلات زیست‌محیطی، در این پژوهش از پودر شیشه بازیافتی جهت بهسازی خاک‌های واگرا (Dispersive Soil) استفاده شده است. برای این منظور ترکیبات مختلفی از پودر شیشه به مقدار وزنی صفر، ۲، ۴، ۶ و ۸ درصد وزن خاک، به رس واگرا افزوده شد سپس نمونه‌ها تحت آزمایش‌های مختلف ژئوتکنیکی قرار گرفتند و میزان تغییرات پتانسیل واگرایی و همچنین بهبود ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد، با افزودن ۸ درصد پودر شیشه به خاک، پتانسیل واگرایی به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. در این حالت طبق نتایج آزمایش هیدرومتری دوگانه، پتانسیل واگرایی حدود ۷۱/۷ درصد کاهش یافت و بر اساس نتایج آزمایش کرامب، خاک در رده خاک‌های غیرواگرا قرار گرفت. همچنین نتایج آزمایش حدود اتربرگ نشان‌دهنده کاهش شاخص خمیری نمونه‌ها است. بررسی نتایج آزمایش تراکم نشان داد با افزودن پودر شیشه به خاک پیوستگی مناسبی بین ذرات خاک به‌وجود آمده و حداکثر چگالی خشک افزایش یافته است. بیشترین افزایش مقاومت فشاری محدود نشده در دوره عمل‌آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه در نمونه‌های اصلاح شده با ۶ درصد پودر شیشه مشاهده شد. علت اصلی افزایش مقاومت، تغییر در ساختار خاک واگرا در اثر واکنش‌های پوزولانی (Pozzolanic reactions) و تشکیل ژل هیدرات سیلیکات کلسیم (Calcium silicate hydrate gel) بود که باعث ایجاد ساختاری متراکم‌تر و در نهایت منجر به بهبود ویژگی‌های مقاومتی خاک واگرا شده است.

کلیدواژه‌ها: خاک واگرا، پودر شیشه بازیافتی، تثبیت خاک، آزمایش هیدرومتری دوگانه، آزمایش کرامب.

۱- مقدمه

خاک‌های متراکم، تخریب و از بین رفتن جاده‌ها و رگاب در سدهای خاکی شود (Sherard و همکاران، ۱۹۷۶). در گذشته توصیه بر عدم استفاده از خاک‌های واگرا بود، اما امروزه با توجه به گسترش روزافزون ساخت پروژه‌های عمرانی و احتمال برخورد با این نوع خاک‌ها و همچنین اقتصادی نبودن جایگزینی آن‌ها با مصالح مرغوب، بررسی رفتار خاک‌های واگرا و یافتن روش‌های بهسازی آن‌ها از نظر مباحث ژئوتکنیکی از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. از طرفی مقادیر روبه رشد انواع مختلف مواد پسماند، کمبود فضای دفن زباله و مشکلات زیست‌محیطی ناشی از آن‌ها، بر یافتن راه‌کارهای خلاقانه برای

وجود پدیده واگرایی در رس‌ها، رفتار این نوع خاک‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد. تجربه نشان داده است عدم توجه به این مسئله مشکلات زیادی را برای سازه‌ها ایجاد نموده و حتی در برخی موارد منجر به خرابی سازه گردیده است. پدیده واگرایی در خاک‌ها به حضور کانی‌های رسی فعال مانند مونتوریلونیت و حضور کاتیون‌های سدیم وابسته است (Ouhadi و همکاران، ۲۰۰۶). در توصیف رفتار خاک‌های واگرا می‌توان گفت، هنگامی که این خاک‌ها در معرض آب قرار می‌گیرند، ذرات رسی پراکنده شده و به‌صورت ذرات معلق باقی می‌مانند. بر این اساس وقوع واگرایی ممکن است باعث شکل‌گیری پدیده‌هایی چون فرسایش

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۹۱۲۳۳۴۴۷۴۹

آدرس ایمیل: mohammad.eng63@gmail.com (م. بهبودی)، a.zad@iauctb.ac.ir (ا. زاد)، mar.yazdi@iauctb.ac.ir (م. یزدی)،

amin.tohidi@yahoo.com (ا. توحیدی).

Ouhadi و همکاران (۲۰۱۴) به بررسی نرخ رشد و پیشرفت واکنش‌های پوزولانی خاک واگرا و آهک در کوتاه‌مدت و بلندمدت از منظر ریزساختاری پرداختند. نتایج نشان داد در نمونه‌های حاوی ۲٪ و ۴٪ آهک علت اصلی افزایش مقاومت تغییر در ساختار خاک و کلوخه شدن آن بود. به‌منظور بررسی اثرات زیست‌محیطی استفاده از پودر شیشه بازیافتی و رفع نگرانی عمومی در مورد استفاده از آن در کاربردهای عمرانی، آزمایش‌های مختلفی توسط Disfani و همکاران (۲۰۱۲) انجام شد. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که پودر شیشه جایگزین مناسبی برای سنگ‌دانه‌های طبیعی در راه‌سازی می‌باشد. و استفاده از پودر شیشه در پروژه‌های عمرانی هیچ خطری برای آب‌های سطحی یا زیرزمینی در طول عمر مفید پروژه نخواهد داشت. همچنین مقادیر غلظت قابل نشت نمونه‌های شیشه بازیافتی نیز با طبقه‌بندی زباله‌های خطرناک معرفی شده توسط سازمان حفاظت محیط زیست (EPA) ایالات متحده مقایسه شد. این مقایسه نشان داد خطرات زیست‌محیطی استفاده از پودر شیشه بازیافتی در کاربردهای عمرانی ناچیز است.

Ashiq و همکاران (۲۰۲۲) بهبود پایداری خاک رس سطح زیرین جاده را با استفاده از پودر شیشه بازیافتی مورد بررسی قرار دادند. طبق نتایج انجام شده استفاده از پودر شیشه علاوه بر افزایش مقادیر CBR و کاهش ۲۶ درصدی در کرنش تورمی، کاهش قابل توجهی (حدود ۱۹٪) در هزینه‌ها داشت. همچنین نتایج نشان داد پودر شیشه خطر زیست‌محیطی بسیار پایینی برای آب‌های زیرزمینی دارد. ترکیب‌های مختلف پودر شیشه و سیمان برای تثبیت سیلت با پلاستیسیته بالا مطابق با زمان‌های مختلف عمل‌آوری ارزیابی شد، نتایج نشان داد که دوام و مقاومت فشاری خاک اصلاح شده با افزایش زمان عمل‌آوری افزایش می‌یابد (Baldovino و همکاران، ۲۰۲۰).

Ibrahim و همکاران (۲۰۲۱) مطالعه آزمایشگاهی بر روی خاک رس با درصد‌های مختلف پودر شیشه انجام دادند، آن‌ها به این نتیجه رسیدند حداکثر چگالی خشک و مقاومت فشاری خاک‌های اصلاح شده با افزایش نسبت پودر شیشه افزایش می‌یابد. در گذشته برای تثبیت خاک از افزودنی‌های متداول همچون سیمان، آهک، خاکستر بادی، قیر و دیگر مواد استفاده می‌شد. اما افزایش سریع قیمت آن‌ها در بازار به دلیل افزایش هزینه انرژی در تولید آن‌ها استفاده از این مواد را به‌عنوان اصلاح کننده خاک غیراقتصادی کرده است (Ashiq و همکاران، ۲۰۲۲).

از طرفی پودر شیشه بازیافتی یک ماده ضایعاتی صنعتی است که می‌تواند به‌صورت بسیار ارزان در دسترس باشد. بنابراین استفاده از آن برای تثبیت خاک‌های مسئله‌دار در مقایسه با سایر افزودنی‌ها به‌میزان قابل توجهی مقرون به‌صرفه است (Mujtaba و

Arulrajah) بازیافت و استفاده مجدد از مواد پسماند تأکید می‌کند (همکاران، ۲۰۱۱).

پودر شیشه بازیافتی با داشتن درصد بالای سیلیس دارای خصوصیتی است که محققین در گذشته با بررسی مشخصات ژئوتکنیکی آن، امکان استفاده از آن را در تثبیت خاک و کاربردهای عمرانی مناسب دانسته‌اند.

Vakili و همکاران (۲۰۲۰) به بررسی رفتار خاک‌های واگرای تثبیت شده با نانوسیلیس پرداختند. بر اساس نتایج حاصل از آزمایش‌ها، زمان عمل‌آوری نمونه‌های تثبیت شده با نانوسیلیس نقش مهمی در کاهش واگرایی و همچنین بهبود مقاومت فشاری نمونه‌ها داشته است. مطالعات نشان دادند افزودن هیدروکسیل آلومینیوم به خاک واگرا، باعث بهبود واگرایی خاک شده و مقاومت برشی نمونه‌های اصلاح شده با ۰/۴ میلی مول بر گرم هیدروکسیل به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد (Liu و همکاران، ۲۰۲۲).

Mittal و Gidday (۲۰۲۰) بهبود ویژگی‌های خاک واگرای بستر روسازی را با استفاده از آهک مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد با افزایش مقدار آهک پتانسیل واگرایی کاهش، مقاومت فشاری تک‌محوری و نسبت باربری کالیفرنیا افزایش می‌یابد. تأثیر کاتیون‌ها و آنیون‌ها روی خاک‌های رسی واگرا بررسی شد، نتایج آزمایش‌ها نشان داد پتانسیل واگرایی در غلظت الکترولیت کم، به دلیل تسلط نیروی دافعه بر نیروی جاذبه افزایش می‌یابد (Abbaslou و همکاران، ۲۰۲۰).

Abbasi و همکاران (۲۰۱۸) به بررسی اثر نانوذرات رس بر پتانسیل واگرایی خاک‌های رسی پرداختند. نتایج نشان داد افزودن نانورس به خاک واگرا به‌طور کلی موجب کاهش پتانسیل واگرایی خاک می‌شود. همچنین مشخص شد زمان عمل‌آوری نقش چشم‌گیری در تثبیت خاک با نانو ذرات رس داشت. تأثیر نانو ذرات سیلیس را بر روی خاک رس اصلاح شده با سیمان بررسی کردند. با افزودن نانوذرات سیلیس به خاک واگرا، تراکم و خواص هیدرولیکی آن بهبود یافت و مقاومت فشاری آن تا ۸۰ درصد افزایش پیدا کرد (Bahmani و همکاران، ۲۰۱۴).

Moravej و همکاران (۲۰۱۸) نشان دادند که باکتری باسیلوس اسفاریکوس در تثبیت واگرایی خاک مؤثر است و واگرایی خاک با افزایش زمان عمل‌آوری کاهش می‌یابد.

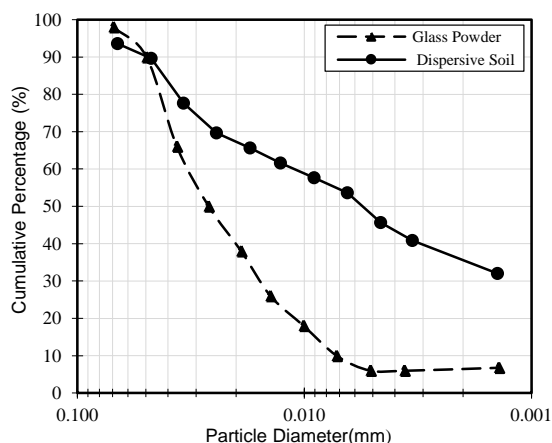
Eberemu و همکاران (۲۰۱۳) بر روی مشخصات ژئوتکنیکی خاک رس اصلاح شده با پودر شیشه مطالعاتی انجام دادند. نتایج نشان داد با افزایش مقدار شیشه تا ۲۰ درصد، مقاومت اصطکاکی ذرات خاک افزایش پیدا کرده که موجب بهبود مشخصات ژئوتکنیکی خاک شده است.

پدیده واگرایی و فرسایش خاک در تراز شالوده سازه‌ها، بهبود خصوصیات مهندسی این خاک مورد نظر بوده است.

شکل (۱) منحنی دانه‌بندی خاک رس واگرای مطالعه شده را نشان می‌دهد. طبق سیستم طبقه بندی یونیفاید (USCS)^۳، خاک مورد مطالعه به‌عنوان رس با پلاستیسیته کم (CL) طبقه‌بندی شد. مشخصات فیزیکی و مکانیکی خاک رس واگرا در جدول (۱) و مشخصات شیمیایی آن در جدول (۲) نشان داده شده است. پودر شیشه بازیافتی از شرکت نانوسرام ایرانیان اصفهان تهیه شده است. منحنی دانه‌بندی آن در شکل (۱) و مشخصات شیمیایی آن در جدول (۲) ارائه شده است. پودر شیشه استفاده شده دارای رنگی سفید و ذرات غیرکروی با اندازه ۱ تا ۱۲۶ میکرومتر می‌باشد. شکل (۲) پودر شیشه بازیافتی مورد استفاده را نشان می‌دهد.

جدول ۱- مشخصات فیزیکی و مکانیکی رس واگرا

مقدار	خصوصیات خاک	مرجع اندازه‌گیری
۷/۲۳	درصد واگرایی	ASTM D 4221-99
CL	نوع خاک در طبقه‌بندی یونیفاید	ASTM_D2487
۳۲	حد روانی (%)	ASTM_D4318
۱/۱۸	حد خمیری (%)	ASTM_D4318
۹/۱۳	دامنه خمیری (%)	ASTM_D4318
۳/۱۴	مقاومت فشاری محدود نشده (kg/cm ²)	ASTM_D2166
۱/۷۳	حداکثر وزن مخصوص خشک (g/cm ³)	ASTM_D698
۲/۱۲	رطوبت بهینه (%)	ASTM_D698
۲/۶۵	چگالی ویژه	ASTM_D854



شکل ۱- منحنی دانه‌بندی رس واگرا و پودر شیشه بازیافتی

همکاران، ۲۰۲۰). با رشد روزافزون جمعیت و گسترش صنعتی شدن، هرساله مقدار زیادی ضایعات تولید می‌شود که این امر می‌تواند پیامدهای منفی و مخربی بر محیط‌زیست داشته باشد. دفع ایمن این ضایعات اقدامی لازم و حیاتی است که سبب شده اخیراً مطالعات برای بازیافت و استفاده مجدد از آن‌ها در موارد مختلف گسترش یابد. یکی از زباله‌های چالش‌برانگیز برای محیط‌زیست، زباله‌های شیشه‌ای است که در صدر فهرست زباله‌های جامد قرار گرفته است. حجم تولید جهانی شیشه در سال ۲۰۰۵ نزدیک به ۱۳۰ میلیون تن برآورد شد. در استرالیا، تقریباً ۸۵۰۰۰۰ تن شیشه در سال استفاده می‌شود، درحالی‌که تنها ۴۰ درصد برای استفاده مجدد بازیافت می‌شود. به‌طور معمول شیشه حدود ۴۵۰ سال طول می‌کشد تا تجزیه شود. بنابراین، استفاده از این‌گونه پسماندها و بازیافت کامل آن‌ها موجب سلامت محیط‌زیست خواهد شد (Javed و Chakraborty، ۲۰۲۰).

توجه به مسائل زیست‌محیطی، اقتصادی، فنی و حتی محدود بودن منابع انرژی و مواد معدنی اولیه در فرایند تولید مواد افزودنی سنتی مانند آهک و سیمان، می‌تواند به‌خوبی نشان‌دهنده ضرورت پژوهش در ارتباط با استفاده از مواد جایگزین در کاربردهای مهندسی عمران به‌ویژه اصلاح و تثبیت خاک‌های مسئله‌دار باشد. بنابراین استفاده از پودر شیشه بازیافتی به‌دلیل اقتصادی بودن و نقش آن به‌عنوان یک ماده بازیافتی در کاهش مشکلات زیست‌محیطی می‌تواند روشی مؤثر برای بهبود خصوصیات ژئوتکنیکی خاک‌ها به‌شمار آید. علی‌رغم آن‌که تأثیر استفاده از پودر شیشه در بهبود خصوصیات مقاومتی خاک‌ها توسط محققین مورد بررسی قرار گرفته است اما استفاده از پودر شیشه و تأثیر آن در بهسازی خاک‌های مسئله‌دار به‌ویژه خاک‌های رسی واگرا به‌طور خاص مورد مطالعه قرار نگرفته است. بنابراین هدف از این پژوهش بررسی تأثیر افزودن پودر شیشه بازیافتی بر کاهش پتانسیل واگرایی خاک‌های رسی و ارزیابی بهبود خصوصیات ژئوتکنیکی آن‌ها شامل حدود اتربرگ، درصد رطوبت بهینه، حداکثر چگالی خشک، مقاومت فشاری محدود نشده و اعتباربخشی آن به‌وسیله تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)^۲ است.

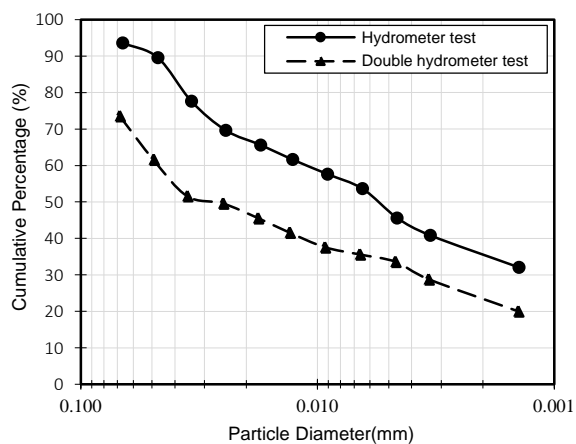
۲- مواد و روش‌ها

خاک واگرای طبیعی مورد استفاده در این پژوهش از محدوده شهرستان میناب در استان هرمزگان انتخاب شده است. نمونه‌های خاک از عمق نیم تا یک متری تهیه شد و در کیسه‌های پلاستیکی به آزمایشگاه انتقال داده شد. منطقه مورد مطالعه در محدوده در نظر گرفته شده برای اجرای سازه‌های صنعتی است. با توجه به وجود ترک‌ها، حفره‌های فراوان و فرونشست خاک و احتمال وقوع

واکنش شدید قرار گرفته است. آزمایش هیدرومتری دوگانه، روی هر یک از نمونه‌ها در دو مرحله انجام شد. در مرحله اول، آزمایش هیدرومتری مطابق با استاندارد ASTM D 422-63 صورت پذیرفت که در آن از ماده پراکنده‌ساز هگزامتافسفات سدیم با غلظت ۴٪ و هم‌زن مکانیکی برای جداسازی ذرات استفاده شد. در مرحله دوم، آزمایش مطابق با استاندارد ASTM D 4221-99 و بدون ماده پراکنده‌ساز و با استفاده از هم‌زن دستی انجام شد. نتایج آزمایش هیدرومتری دوگانه بر روی خاک واگرا در شکل (۳) ارائه شده است. جهت تعیین میزان پتانسیل واگرایی در آزمایش هیدرومتری دوگانه، از معیار بل و ماود^۵ در جدول (۳) استفاده شد. بر اساس نتایج ارائه شده در شکل (۳) و با استفاده از رابطه (۱)، میزان پتانسیل واگرایی خاک حدود ۷۳٪ حاصل شد که بر اساس معیار بل و ماود خاک در رده خاک‌های با واگرایی شدید قرار گرفته است. سپس جهت ارزیابی خصوصیات ژئوتکنیکی خاک واگرایی مورد مطالعه، آزمایش‌های تعیین حدود اتربرگ بر اساس استاندارد ASTM D4318، تراکم استاندارد بر اساس استاندارد ASTM D698 و آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده بر اساس استاندارد ASTM D2166 انجام گردید. همچنین برای بررسی ساختار و ریخت‌شناسی نمونه خاک واگرایی مورد مطالعه از دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل TESCAN-MIRA3 استفاده شد.

$$\text{Dispersion Percent} = \frac{F(0.005)_2}{F(0.005)_1} \times 100 \quad (1)$$

در رابطه (۱)، $F(0.005)_1$ درصد عبوری از قطر ۰/۰۰۵ میلی‌متر در آزمایش هیدرومتری معمولی (با ماده پراکنده‌ساز) و $F(0.005)_2$ درصد عبوری از قطر ۰/۰۰۵ میلی‌متر در آزمایش هیدرومتری دوگانه (بدون ماده پراکنده‌ساز) است.



شکل ۳- نتایج آزمایش هیدرومتری دوگانه خاک مورد مطالعه

جدول ۲- مشخصات شیمیایی رس واگرا و پودر شیشه بازیافتی

ترکیب شیمیایی	درصد وزنی	
	پودر شیشه بازیافتی	خاک رس واگرا
SiO ₂	۷۱/۶۹	۵۲/۳۶
Al ₂ O ₃	۰/۸۴	۱۱/۳۳
MgO	۵/۴۲	۴/۱۲
CaO	۷/۹۵	۱۱/۲۷
Fe ₂ O ₃	۰/۴۷	۵/۱۳
Na ₂ O	۱۳/۳۵	۱/۷۷
K ₂ O	۰/۲۷	۲/۳۸
TiO ₂	۰/۰۱	۰/۵۵
MnO	-	۰/۱۲
P ₂ O ₅	-	۰/۳۰
LOI	-	۱۰/۶۷



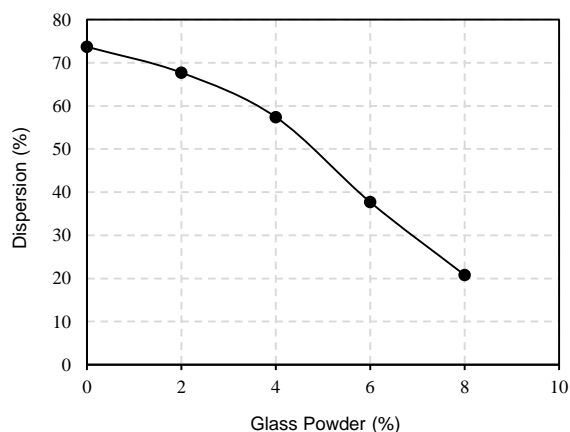
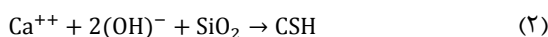
شکل ۲- پودر شیشه بازیافتی مورد استفاده

در بخش مطالعات آزمایشگاهی، ابتدا به منظور بررسی واگرایی خاک منطقه، آزمایش کرامب و هیدرومتری دوگانه انجام شد. آزمایش کرامب شناخت اولیه خوبی از فرسایش پذیری خاک رس به دست می‌دهد. آزمایش کرامب طبق استاندارد ASTM D6572 انجام شد. ابتدا مکعب کوچکی از خاک به ابعاد تقریبی ۱۰ میلی‌متر تهیه و به آرامی درون یک ظرف حاوی ۲۵۰ میلی‌لیتر آب مقطر قرار داده شد. سپس در زمان‌های ۲ دقیقه، ۶۰ دقیقه و ۳۶۰ دقیقه، شدت واکنش آن نسبت به آب، مورد ارزیابی قرار گرفت. با شروع عمل جذب آب در خاک، تمایل ذرات کلوئیدی برای جدا شدن از خاک و رفتن به داخل محلول مشاهده شد. برحسب میزان عکس‌العمل خاک در پایان زمان معین، چهار درجه‌بندی بدون واکنش، واکنش خفیف، واکنش متوسط و واکنش شدید قابل رخ دادن است که در واکنش شدید، ذرات کلوئیدی به طور کامل کف ظرف را می‌پوشانند. برای تعیین میزان پتانسیل واگرایی در آزمایش کرامب از معیار واگرایی^۴ استفاده شد که بر این اساس، خاک منطقه مورد مطالعه در رده خاک‌های با

جدول ۳- تعیین پتانسیل واگرایی در آزمایش هیدرومتری

دوگانه بر اساس معیار Bell و Maud (۱۹۹۴)	
درصد واگرایی	پتانسیل واگرایی خاک
≤ ۱۵	غیرواگرا
۱۵ - ۳۰	واگرایی ناچیز
۳۰ - ۵۰	واگرایی ملایم
≥ ۵۰	واگرایی شدید

کاهش واگرایی را می‌توان این‌طور بیان نمود، با توجه به این‌که پودر شیشه حاوی مقادیر قابل توجهی از ذرات آلومینوسیلیکاتی آمورف می‌باشد. افزایش میزان پودر شیشه تا مقدار بهینه آن سبب بالا رفتن مقادیر سیلیس حالت آمورف و افزایش واکنش‌های پوزولانی شده و شرایط مناسبی را برای تشکیل پیوند با ذرات خاک ایجاد می‌کند. بنابراین در طی فرآیند تثبیت، در اثر انجام واکنش‌های آبی تبادل کاتیونی از جمله جایگزینی یون Ca^{2+} با Na^{+} موجود در خاک و همچنین واکنش‌های پوزولانی بین سیلیس با کلسیم خاک و تشکیل ژل سیمانی هیدرات سیلیکات کلسیم (CSH) (Vakili و همکاران، ۲۰۲۰)، نیروی جاذبه و اندروالسی بین کانی‌های رسی افزایش یافته و ساختار خاک از حالت پراکنده به حالت مجتمع تبدیل می‌شود که این باعث پیوند بهتر بین ذرات خاک شده و در نهایت منجر به کاهش شدت واگرایی می‌شود. رابطه (۲) واکنش پوزولانی اولیه بین سیلیس و کلسیم خاک را نشان می‌دهد.



شکل ۴- تغییرات پتانسیل واگرایی بر اساس آزمایش هیدرومتری دوگانه

جدول ۴- تغییرات پتانسیل واگرایی خاک بر اساس آزمایش

کرامب	
نمونه	نتیجه آزمایش
خاک طبیعی	واکنش شدید
خاک + ۲٪ پودر شیشه	واکنش متوسط
خاک + ۴٪ پودر شیشه	واکنش متوسط
خاک + ۶٪ پودر شیشه	واکنش خفیف
خاک + ۸٪ پودر شیشه	بدون واکنش

۳-۲- نتایج آزمایش حدود اتربرگ

ویژگی‌های پلاستیسیته در خاک‌ها را می‌توان با ویژگی‌های شاخصی مانند حد روانی، حد خمیری و شاخص خمیری نشان

در ادامه به منظور بررسی تأثیر پودر شیشه بازبافتی بر میزان تغییرات پتانسیل واگرایی خاک و همچنین نقش آن در بهبود خصوصیات ژئوتکنیکی خاک واگرا، نمونه‌های تهیه شده از منطقه، در خردکن برقی خرد شده و از الک نمره ۴۰ عبور داده شد. سپس پودر شیشه با درصدهای مختلف صفر، ۲، ۴، ۶ و ۸ درصد وزنی خاک، طی مراحل آزمایش به خاک واگرا اضافه شد و به خوبی مخلوط شده است. بعد از عمل اختلاط، نمونه‌ها در ظرف‌های پلاستیکی جهت انجام واکنش به مدت ۷ روز نگهداری شدند. بر این اساس آزمایش‌های کرامب، هیدرومتری مضاعف، تعیین حدود اتربرگ، تراکم استاندارد و مقاومت فشاری محدود نشده بر روی ترکیب‌های مختلف خاک و پودر شیشه بر اساس استانداردهای ASTM ذکر شده در بالا انجام شد. قابل ذکر است، انتخاب درصدهای پودر شیشه بر اساس پژوهش‌های پیشین انجام شده توسط محققین صورت پذیرفته است (Benny و همکاران، ۲۰۱۷؛ Keramatikerman و همکاران، ۲۰۲۰). همچنین نمونه‌های آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده در قالب‌های استوانه‌ای به قطر ۴/۸۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۹/۵ سانتی‌متر تهیه شدند.

۳- نتایج و بحث

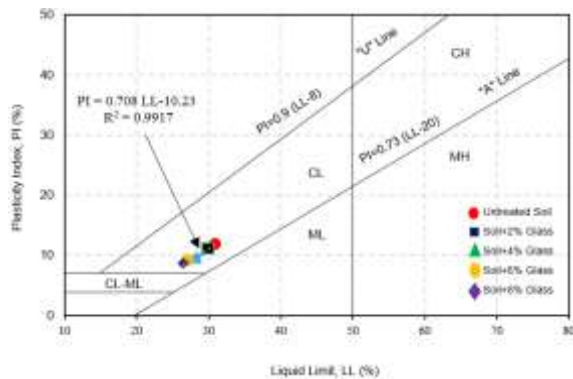
۳-۱- بررسی تغییرات پتانسیل واگرایی

به‌منظور بررسی تأثیر پودر شیشه بازبافتی بر میزان پتانسیل واگرایی خاک بر اساس نتایج آزمایش هیدرومتری دوگانه، نرخ تغییرات درصد واگرایی به ازای افزودن درصدهای مختلف پودر شیشه در شکل (۴) ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش درصد پودر شیشه، نرخ تغییرات پتانسیل واگرایی خاک روند ثابت کاهشی داشته است. بیشترین کاهش درصد واگرایی به ازای افزودن ۸٪ پودر شیشه رخ داد. در این حالت درصد واگرایی از ۷۳/۷ درصد با کاهش نسبی ۷۱/۷ درصدی به ۲۰/۸ درصد رسیده است که بر اساس معیار بل و مواد خاک در رده‌ی خاک‌های با واگرایی ناچیز محسوب می‌شود. داده‌های اخذ شده از آزمایش کرامب که در جدول (۴) ارائه شده است، نتایج این بخش را تأیید می‌کند. طبق آزمایش کرامب و بر اساس معیار واگر، با افزودن ۸٪ پودر شیشه به خاک واگرا، واگرایی به‌طور کامل بهبود یافته و خاک در رده خاک‌های غیر واگرا قرار گرفته است. علت

کاهش شاخص خمیری باعث افزایش چگالی خاک رس واگرا می‌شود که بر ویژگی‌های تراکم، فشردگی، تورم و مقاومت خاک تأثیر می‌گذارد. بنابراین می‌توان کاهش شاخص خمیری را به‌عنوان یک تغییر مفید در بهبود کارایی نمونه‌های خاک اصلاح شده در نظر گرفت.

تأثیر افزودن پودر شیشه به خاک واگرا را می‌توان با ترسیم بر روی نمودار پلاستیسیته بهتر توضیح داد. بر اساس نتایج آزمایش حدود اتربرگ و طبق سیستم طبقه‌بندی یونیفاید، با افزودن پودر شیشه به خاک، همه نمونه‌ها در رده‌ی رس با پلاستیسیته کم (CL) طبقه‌بندی شدند. این موضوع در شکل (۶) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود همه نمونه‌ها بین خطوط A و U قرار دارند. همبستگی خطی بین PI و LL برای نمونه‌ها با $R^2 = 0.9917$ در معادله (۳) ارائه شده است.

$$PI = 0.708LL - 10.23 \quad (3)$$

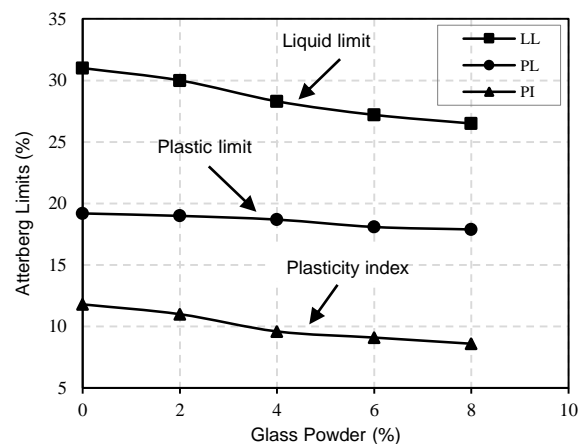


شکل ۶- موقعیت نمونه‌ها بر روی نمودار پلاستیسیته

۳-۳- نتایج آزمایش تراکم

نتایج آزمایش تراکم برای نمونه‌های ترکیب شده با درصد‌های مختلف پودر شیشه در شکل (۷) ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش درصد پودر شیشه رطوبت بهینه کاهش می‌یابد، بیشترین کاهش رطوبت بهینه در ۸٪ پودر شیشه رخ داده است که حدود ۲۲/۱٪ می‌باشد. دلیل این رفتار را می‌توان این‌گونه مطرح نمود، با توجه به این‌که قابلیت جذب آب پودر شیشه بسیار کمتر از خاک رسی است، بنابراین با افزودن پودر شیشه به خاک رطوبت بهینه کاهش می‌یابد. از طرفی با افزایش پودر شیشه به خاک، حداکثر چگالی خشک خاک افزایش می‌یابد. دلیل آن می‌تواند چگالی بیشتر پودر شیشه نسبت به خاک باشد. که با نتایج تحقیقات پیشین نظیر Ashiq و همکاران (۲۰۲۲) و Blayi و همکاران (۲۰۲۰) نیز هم‌خوانی و مطابقت دارد. درواقع با افزودن پودر شیشه بازیافتی به خاک، شرایط لازم برای فشردگی و پیوستگی بین ذرات خاک فراهم شده و موجب متراکم‌تر شدن ذرات خاک رس می‌شود. بنابراین با کاهش فضای خالی بین ذرات

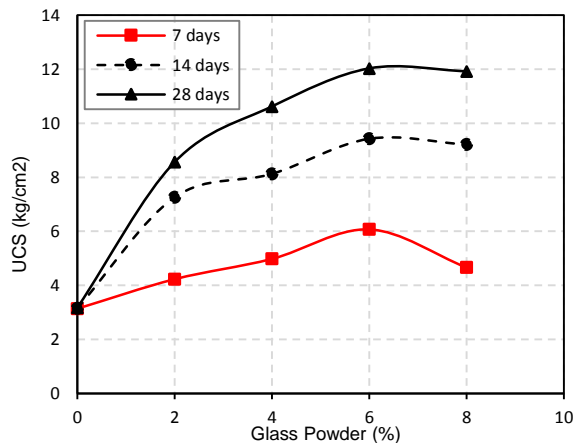
داد. به‌عبارت دیگر مقدار شاخص خمیری درک خوبی از رفتار ویژگی‌های خاک ارائه می‌کند (Afrasiabian و همکاران، ۲۰۲۱). طبق نتایج آزمایش حدود اتربرگ، با افزودن پودر شیشه به نمونه‌ها، حد روانی، حد خمیری و شاخص خمیری خاک کاهش می‌یابد. این نتایج با مطالعات Mujtaba و همکاران (۲۰۲۰) هم‌خوانی و مطابقت دارد. در شکل (۵) منحنی تغییرات حدود اتربرگ با درصد‌های مختلف پودر شیشه نشان داده شده است. با افزودن ۸٪ پودر شیشه به خاک بیشترین کاهش حدود اتربرگ رخ داده است. در این حالت، حد روانی حدود ۱۳/۵٪، حد خمیری حدود ۶/۷٪ و شاخص خمیری خاک حدود ۲۷/۱٪ کاهش یافته است. با توجه به این‌که پودر شیشه توانایی کمتری در جذب آب نسبت به خاک رس دارد موجب کاهش حد روانی می‌شود. از سوی دیگر، درصد بالای سیلیس در پودر شیشه که باعث می‌شود پودر شیشه به‌عنوان یک ماده غیرپلاستیک با انعطاف‌پذیری کم، عمل کند، کاهش حد خمیری را در پی خواهد داشت.



شکل ۵- تغییرات حدود اتربرگ برای نمونه‌های اصلاح شده با درصد‌های مختلف پودر شیشه

بنابراین با جایگزین شدن بخشی از خاک توسط پودر شیشه بازیافتی، علاوه بر کاهش حد روانی و حد خمیری خاک، شاخص خمیری نیز کاهش می‌یابد. این رفتار مشاهده شده را می‌توان به حل‌شدگی بخشی از کانی‌های رسی و جانشینی یون‌های کلسیم ناشی از واکنش‌های شیمیایی و تبادل کاتیونی با یون‌های سدیم و پتاسیم موجود در لایه دوگانه خاک رسی نسبت داد. به‌عبارت دیگر با افزودن پودر شیشه بازیافتی به خاک، در اثر انجام واکنش‌های شیمیایی و تبادل کاتیونی از یک سو و تشکیل ژل هیدرات سیلیکات کلسیم (CSH) ناشی از واکنش‌های پوزولانی از سوی دیگر، شرایط لازم برای کاهش ضخامت لایه دوگانه فراهم شده و شاخص خمیری که تابعی از ضخامت لایه دوگانه می‌باشد، با کاهش ضخامت لایه دوگانه، کاهش پیدا می‌کند. به‌طورکلی

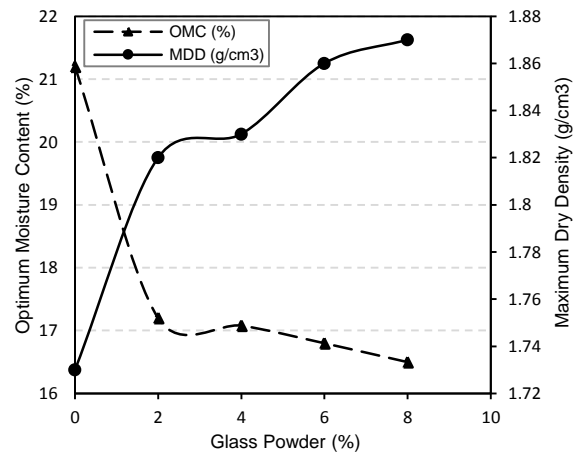
واکنش‌های پوزولانی شرکت نمی‌کند که این امر منجر به کاهش چسبندگی بین سطح خاک و پودر شیشه و در نهایت کاهش انسجام خاک شده است. بنابراین با افزودن ۸٪ پودر شیشه به خاک، در پی کاهش انسجام خاک، مقاومت آن نیز کاهش یافته است. این نتایج با مطالعات Baldovino و همکاران (۲۰۲۱)، Ibrahim و همکاران (۲۰۲۱) و Canakci و همکاران (۲۰۱۶) هم‌خوانی و مطابقت دارد.



شکل ۸- تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌ها با درصدهای مختلف پودر شیشه در مدت زمان عمل‌آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روز

در شکل (۹) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از ساختار خاک واگرا ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود ساختار خاک پراکنده می‌باشد. افزودن پودر شیشه به خاک، باعث می‌شود ساختار پراکنده خاک به ساختاری متراکم تبدیل شود. این موضوع در شکل (۱۰) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، افزودن ۶٪ پودر شیشه (مقدار بهینه در آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده) به خاک واگرا باعث لخته شدن ساختار خاک و کاهش منافذ آن شده است. به عبارتی دیگر، با افزودن پودر شیشه به خاک، در اثر واکنش‌های شیمیایی ترکیبات جدیدی شامل ژل هیدرات سیلیکات کلسیم (CSH) تشکیل شده است. این ژل حفره‌های درون خاک را پر کرده و موجب کاهش تخلخل و افزایش تراکم ساختار خاک می‌شود که در نهایت منجر به افزایش مقاومت خاک شده است. در مجموع نتایج کسب شده در این پژوهش در مقایسه با نتایج سایر پژوهش‌های دیگر، نشان از تطبیق خوب و قابل قبول این نتایج می‌باشد. از طرفی استفاده از پودر شیشه در تثبیت خاک‌های واگرا به‌عنوان یکی از انواع مواد بازیافتی و پسماند، نقش مهمی در کاهش مشکلات زیست‌محیطی و اقتصادی دارد.

که منجر به کاهش رطوبت بهینه می‌شود، زمانی که دانه‌های خاک تحت عمل تراکم قرار می‌گیرند، پیوستگی نسبتاً مناسبی بین ذرات خاک به‌وجود می‌آید که به تراکم بهتر ذرات کمک می‌کند و در نهایت حداکثر چگالی خشک خاک افزایش می‌یابد. بر اساس نتایج ارائه شده در شکل (۷)، بیشترین افزایش حداکثر چگالی خشک خاک در ۸٪ پودر شیشه به‌دست آمده است که حدود ۸/۱٪ می‌باشد.



شکل ۷- تغییرات درصد رطوبت بهینه و حداکثر چگالی خشک نمونه‌ها با درصدهای مختلف پودر شیشه

۳-۴- نتایج آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده

نتایج ارائه شده در شکل (۸) نشان می‌دهد مقاومت فشاری ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه نمونه‌ها با افزایش مقدار پودر شیشه تا ۶٪ افزایش یافته است و پس از آن کاهش مقاومت اتفاق افتاده است. بیشترین مقدار افزایش مقاومت در نمونه‌های اصلاح شده با ۶٪ پودر شیشه اتفاق افتاده است. در این حالت مقاومت ۷ روزه حدود ۲ برابر، مقاومت ۱۴ روزه حدود ۳ برابر و مقاومت ۲۸ روزه حدود ۳/۸ برابر مقاومت نمونه اصلاح نشده می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود زمان عمل‌آوری تأثیر مثبتی بر مقاومت فشاری دارد. پودر شیشه می‌تواند به‌عنوان یک پوزولان موجب جلوگیری از کرناسیون و افزایش واکنش‌های سمینتاسیون گردد. همین عامل باعث فراهم آمدن شرایط مناسب جهت انجام واکنش‌های پوزولانی بین SiO_2 با Ca^{2+} خاک و تشکیل ژل سیمانی هیدرات سیلیکات کلسیم (CSH) و ایجاد ساختاری متراکم‌تر در خاک می‌گردد بنابراین افزودن پودر شیشه تا مقدار بهینه (۶ درصد) منجر به افزایش بهتر مقاومت می‌شود. از طرفی طبق نتایج، مقدار بیشتر پودر شیشه (۸ درصد) منجر به کاهش مقاومت شده است. دلیل آن را می‌توان این‌طور بیان نمود که، پودر شیشه یک ماده بدون چسبندگی است و هنگامی که در درصدهای کمی (تا درصد بهینه) افزایش یابد باعث افزایش مقاومت می‌شود. اما مقدار بیشتر از درصد بهینه در

جایگزینی یون Ca^{2+} با Na^{+} موجود در خاک و تشکیل ژل CSH در اثر واکنش‌های پوزولانی بین سیلیس موجود در پودر شیشه با کلسیم خاک، می‌باشد.

۲) بر اساس نتایج آزمایش تراکم، با افزودن پودر شیشه به خاک، رطوبت بهینه کاهش می‌یابد و شرایط لازم برای فشردگی و پیوستگی بین ذرات خاک فراهم شده و موجب افزایش حداکثر چگالی خشک خاک می‌شود. افزایش درصد پودر شیشه در نرخ کاهش رطوبت بهینه و نرخ افزایش حداکثر چگالی خشک، تأثیر مثبت داشت.

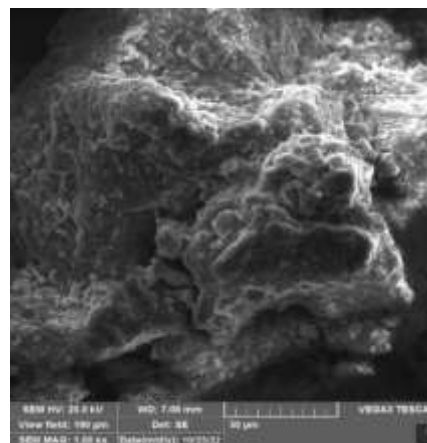
۳) با افزودن پودر شیشه به خاک، حدود اتربرگ برای همه نمونه‌های اصلاح شده نسبت به نمونه اصلاح نشده کاهش یافت. در اثر انجام واکنش‌های شیمیایی و تبادل کاتیونی بین پودر شیشه و خاک، ضخامت لایه دوگانه کاهش پیدا کرد و شاخص خمیری دوگانه، کاهش یافت. بیشترین کاهش شاخص خمیری خاک (حدود ۲۷٪) در نمونه‌های اصلاح شده با ۸ درصد پودر شیشه حاصل شد. بر اساس نتایج آزمایش حدود اتربرگ و طبق سیستم طبقه‌بندی یونیفاید، همه نمونه‌ها در رده‌ی رس با پلاستیسیته کم (CL) طبقه‌بندی شدند.

۴) مقاومت تک‌محوری نمونه‌ها در دوره عمل‌آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه با افزودن پودر شیشه افزایش یافت. در نمونه‌های اصلاح شده با ۶ درصد پودر شیشه بیشترین افزایش مقاومت اتفاق افتاد است که در این حالت مقاومت ۷ روزه حدود ۲ برابر، مقاومت ۱۴ روزه حدود ۳ برابر و مقاومت ۲۸ روزه حدود ۳/۸ برابر مقاومت نمونه اصلاح نشده می‌باشد. علت اصلی افزایش مقاومت، تغییر در ساختار خاک واگرا در اثر واکنش‌های پوزولانی و تشکیل ترکیبات جدیدی مانند ژل هیدرات سیلیکات کلسیم (CSH) است.

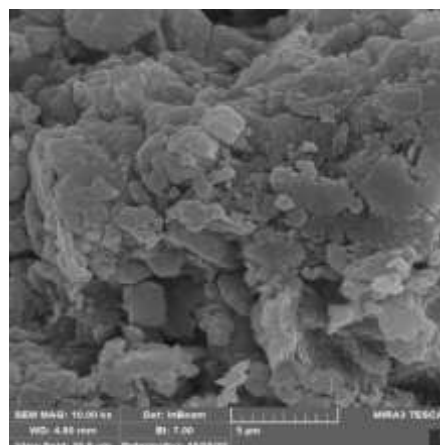
۵) در تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مشاهده شد که ژل هیدرات سیلیکات کلسیم (CSH) تشکیل شده حفره‌های درون خاک را پر کرده و موجب کاهش تخلخل و افزایش تراکم ساختار خاک می‌شود.

۵- مراجع

- ASTM_D2487, "Standard practice for classification of soils for engineering purposes", Unified Soil Classification System, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017. <https://doi.org/10.1520/D2487-17E01>
- ASTM_D4318, "Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils", ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017. <https://doi.org/10.1520/D4318-17E01>
- ASTM_D2166, "Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil", ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016. <https://doi.org/10.1520/D2166D2166M-16>



شکل ۹- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از خاک واگرا



شکل ۱۰- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نمونه اصلاح شده با ۶ درصد پودر شیشه

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، اثر افزودن پودر شیشه بازیافتی به مقدار وزنی صفر، ۲، ۴، ۶ و ۸ درصد وزن خاک، بر کاهش پتانسیل واگرایی خاک‌های رسی و بهبود خصوصیات ژئوتکنیکی آن‌ها بررسی شد. برای این منظور آزمایش‌های مختلفی شامل حدود اتربرگ، درصد رطوبت بهینه، حداکثر چگالی خشک، مقاومت فشاری محدود نشده و اعتباربخشی آن به وسیله تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) انجام شد. نتایج به دست آمده را این گونه می‌توان خلاصه نمود:

- ۱) بر اساس نتایج آزمایش کرامب و هیدرومتری دوگانه، پتانسیل واگرایی خاک به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافت. بیشترین کاهش درصد واگرایی به ازای افزودن ۸ درصد پودر شیشه رخ داده است. در این حالت طبق نتایج آزمایش هیدرومتری دوگانه درصد واگرایی حدود ۷/۷ درصد کاهش یافت و بر اساس نتایج آزمایش کرامب، خاک در رده خاک‌های غیرواگرا قرار گرفت. علت اصلی کاهش واگرایی انجام واکنش‌های آبی تبادل کاتیونی از جمله

- International Journal of Engineering Research and Technology, 2017, 6.
<https://doi.org/10.17577/IJERTV6IS050024>
- Bahmani SH, Huat BB, Asadi A, Farzadnia N, "Stabilization of residual soil using SiO₂ nanoparticles and cement", Construction and Building Materials, 2014, 64, 350-359.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.086>
- Bell F, Maud R, "Dispersive soils: a review from a South African perspective", Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 1994, 27, 195-210.
<https://doi.org/10.1144/GSL.QJEGH.1994.027.P3.02>
- Canakci H, Aram AL, Celik F, "Stabilization of clay with waste soda lime glass powder", Procedia Engineering, 2016, 161, 600-605.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.705>
- Disfani M, Arulrajah A, Bo M, Sivakugan N, "Environmental risks of using recycled crushed glass in road applications", Journal of Cleaner Production, 2012, 20, 170-179.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.07.020>
- Eberemu AO, Edeh JE, Gbolokun A, "The geotechnical properties of lateritic soil treated with crushed glass cullet", Advanced Materials Research, 2013, 20, 170-179.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.824.21>
- Gidday BG, Mittal S, "Improving the characteristics of dispersive subgrade soils using lime", Heliyon, 6, e03384, 2020.
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03384>
- Ibrahim HH, Mawlood YI, Alshkane YM, "Using waste glass powder for stabilizing high-plasticity clay in Erbil city-Iraq", International Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 15, 496-503.
<https://doi.org/10.1080/19386362.2019.1647644>
- Javed SA, Chakraborty S, "Effects of waste glass powder on subgrade soil improvement", World Scientific News, 2020, 144, 30-42.
- Keramatikerman M, Chegenizadeh A, Nikraz H, "Soil stabilisation using glass powder", International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology, 2020.
<https://doi.org/10.33564/IJEAST.2020.v04i11.060>
- Liu J, Chen P, Lu Z, Yao H, "Experimental Study on the Modification Mechanisms of Dispersive Soil Treated with Hydroxyl Aluminum", Geofluids, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/2680516>
- Mujtaba H, Khalid U, Farooq K, Elahi M, Rehman Z, Shahzad HM, "Sustainable utilization of powdered glass to improve the mechanical behavior of fat clay", Journal of Civil Engineering, 2020, 24, 3628-3639. <https://doi.org/10.1007/s12205-020-0159-2>
- Moravej S, Habibagahi G, Nikoee E, Niazi A, "Stabilization of dispersive soils by means of biological calcite precipitation", Geoderma, 2018, 315, 130-137.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.11.037>
- ASTM_D698, "Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort", ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014. <https://doi.org/10.1520/D0698-12R21>
- ASTM_D854, "Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer", ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014. <https://doi.org/10.1520/D0854-23>
- ASTM_D6572-00, "Standard test method for determining dispersive characteristics of clayey soils by crumb test", ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014. <https://doi.org/10.1520/D6572-21>
- ASTM_D4221-99, "Standard test method for dispersive characteristics of clay soil by double hydrometer", ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014. <https://doi.org/10.1520/D4221-11>
- Ashiq SZ, Akbar A, Farooq K, Mujtaba H, "Sustainable improvement in engineering behavior of siwalik clay using industrial waste glass powder as additive", Case Studies in Construction Materials, 16, e00883, 2022.
<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00883>
- Afrasiabian A, Salimi M, Movahedrad M, Vakili AH, "Assessing the impact of GBFS on mechanical behaviour and microstructure of soft clay", International Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 15, 327-337.
<https://doi.org/10.1080/19386362.2019.1565393>
- Abbaslou H, Hadifard H, Ghanizadeh AR, "Effect of cations and anions on flocculation of dispersive clayey soils", Heliyon, 6, e03462, 2020.
<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00883>
- Arrieta Baldovino JDJ, Dos Santos Izzo R, Da Silva ÉR, Lundgren Rose J, "Sustainable use of recycled-glass powder in soil stabilization", Journal of Materials in Civil Engineering, 2020, 32, 04020080.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003081](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003081)
- Abbasi N, Farjad A, Sepehri S, "The use of nanoclay particles for stabilization of dispersive clayey soils", Geotechnical and Geological Engineering, 2018, 36, 327-335. <https://doi.org/10.1007/s10706-017-0330-9>
- Arulrajah A, Piratheepan J, Aatheesan T, Bo M, "Geotechnical properties of recycled crushed brick in pavement applications", Journal of Materials in Civil Engineering, 2011, 23, 1444-1452.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000319](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000319)
- Baldovino JJ, Izzo RL, Rose JL, Domingos MD, "Strength durability and microstructure of geopolymers based on recycled-glass powder waste and dolomitic lime for soil stabilization", Construction and Building Materials, 2021, 271, 121874.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121874>
- Blayi RA, Sherwani AFH, Ibrahim HH, Faraj RH, Daraei A, "Strength improvement of expansive soil by utilizing waste glass powder", Case Studies in Construction Materials, 2020, 13, e00427.
<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00427>
- Benny JR, Jolly J, Sebastian JM, Thomas M, "Effect of glass powder on engineering properties of clayey soil",

- Ouhadi VR, Yong RN, Amiri M, Ouhadi MH, "Pozzolanic consolidation of stabilized soft clays", *Applied Clay Science*, 2014, 95, 111-118.
<https://doi.org/10.1016/j.clay.2014.03.020>
- Ouhadi V, Goodarzi A, "Assessment of the stability of a dispersive soil treated by alum", *Engineering Geology*, 2006, 85, 91-101.
<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2005.09.042>
- Sherard JL, Dunnigan LP, Decker RS, "Identification and nature of dispersive soils", *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 1976, 102, 287-301. <https://doi.org/10.1061/AJGEB6.0000256>
- Vakili AH, Shojaei SI, Salimi M, Bin Selamat MR, Farhadi MS, "Contact erosional behaviour of foundation of pavement embankment constructed with nanosilica-treated dispersive soils", *Soils and Foundations*, 2020, 60, 167-178.
<https://doi.org/10.1016/j.sandf.2020.02.001>

EXTENDED ABSTRACT

Effect of Recycled Glass Powder on Dispersivity Potential and Geotechnical Parameters of Dispersive Soils

Mohammad Behboudi, Amir Ali Zad *, Maryam Yazdi, Amin Towhidi

Department of Civil Engineering, Faculty of Civil and Earth Resources Engineering, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Received: 11 December 2022; **Review:** 24 February 2023; **Accepted:** 12 March 2023

Keywords:

Dispersive soil, Recycled glass powder, Soil stabilization, Double hydrometric test, Crumb test.

1. Introduction

The presence of dispersion in clays affects the behavior of these types of soils. Experience has shown that not paying attention to this issue has created many problems for civil projects and even led to their destruction in some cases. In the past, it was recommended not to use divergent soils, but today, due to the expansion of civil projects and the possibility of dealing with these types of soils, it is very important to investigate their behavior and find appropriate methods of improvement. Ibrahim et al. (2021) conducted a laboratory study on clay with different percentages of glass powder. They concluded that the maximum dry density and unconfined compression strength of modified soils increase with the increase in glass powder ratio. Different combinations of glass powder and cement were evaluated for silt stabilization according to different curing times. The results have shown that the durability and compressive strength of the modified soil increases with increasing curing time period (Baldovino et al., 2020). Using recycled glass powder can be an effective way to improve the geotechnical properties of soils due to its economic nature and its role as a recycled material in reducing environmental problems. Even though the effect of using glass powder in improving the resistance properties of soils has been investigated by researchers, the use of glass powder and its effect in improving problematic soils, especially dispersive clays, have not been specifically studied. Therefore, the purpose of this research is to investigate the effect of adding recycled glass powder on reducing the dispersivity potential of clay soils and improving their geotechnical properties.

2. Materials and methods

The physical and mechanical properties of dispersive clay are shown in table 1. The glass powder used has non-spherical particles with a size of 1 to 126 micrometers. To investigate the effect of recycled glass powder on the changes in soil divergence potential and also its role in improving the geotechnical properties of dispersive clay, glass powder with different percentages of 0, 2, 4, 6, and 8 percent by weight of soil was added to dispersive clay during the testing processes. Then, crumb tests, double hydrometer, Etterberg limits, standard compaction, and unconfined compression strength were performed on different combinations of soil and glass powder based on ASTM standards.

* Corresponding Author

E-mail addresses: mohammad.eng63@gmail.com (Mohammad Behboudi), a.zad@iauctb.ac.ir (Amir Ali Zad), mar.yazdi@iauctb.ac.ir (Maryam Yazdi), amin.towhidi@yahoo.com (Amin Towhidi).

Table 1. Physical and mechanical characteristics of dispersive clay

Soil property	Value	Standard
Dispersion (%)	73.7	ASTM D 4221-99
Classification (USCS)	CL	ASTM_D2487
Liquid limit (%)	32	ASTM_D4318
Plastic Limit (%)	18.1	ASTM_D4318
Plasticity Index (%)	13.9	ASTM_D4318
Unconfined Compression Strength (kg/cm ²)	3.14	ASTM_D2166
Maximum dry density (g/cm ³)	1.73	ASTM_D698
Optimum moisture content (%)	21.2	ASTM_D698
G _s	2.65	ASTM_D854

3. Results and discussion

3.1. Examining the changes in dispersivity potential

The rate of variation dispersion percentage is presented in Fig. 1. As can be seen, the greatest decrease in the dispersion percentage occurred for the addition of 8% glass powder. In this case, the dispersion percentage has decreased by about 71.7%, which is considered to be in the category of soils with insignificant dispersion according to Bell and Maud's criteria. The data taken from Crumb's test presented in Table 2 confirm the results of this section.

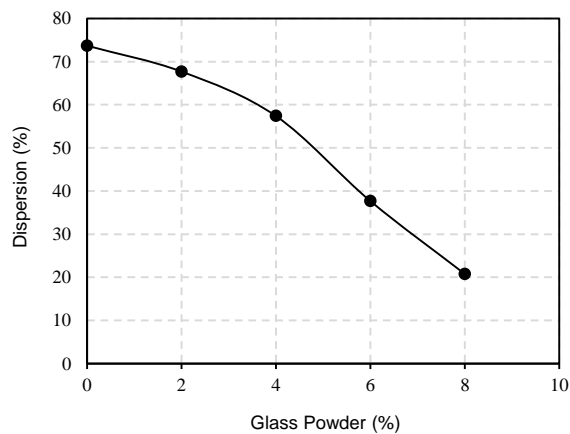


Fig. 1. Variation dispersion percentage based on double hydrometer test

Table 2. Variation dispersion percentage based on the Crumb test

Sample	Test result
Untreated Soil	Strong Reaction
Soil + 2.0% Glass Powder	Moderate Reaction
Soil + 4.0% Glass Powder	Moderate Reaction
Soil + 6.0% Glass Powder	Slight Reaction
Soil + 8.0% Glass Powder	No Reaction

The reason for the decrease in dispersion can be stated as follows, as a result of immediate cation exchange reactions, including the replacement of Ca²⁺ with Na⁺ in the soil, as well as pozzolanic reactions between silica and soil calcium and the formation of calcium silicate hydrate gel (CSH), the attractive force between clay particles increases and the soil structure changes from a dispersed state to a complex state, which causes a better connection between soil particles and ultimately leads to a decrease in the intensity of dispersion.

3.2. The results of the Etterberg limit test

By adding glass powder to the soil, the necessary conditions for compaction and cohesion between the soil particles are provided and it causes the clay particles to become denser. Therefore, by reducing the space between the particles, which leads to a decrease in the optimum moisture content, when the soil particles are subjected to compaction, there is a relatively suitable connection between the soil particles, which helps in better compaction of the particles, and finally, the maximum dry density of the soil increases.

3.3. The results of the Compaction test

By adding glass powder to the soil, the necessary conditions for compaction and cohesion between the soil particles are provided and it causes the clay particles to become denser. Therefore, by reducing the space between the particles, which leads to a decrease in the optimum moisture content, when the soil particles are subjected to compaction, there is a relatively suitable connection between the soil particles, which helps in better compaction of the particles, and finally, the maximum dry density of the soil increases.

3.4. The results of the unconfined compressive strength test

The results showed that the 7, 14 and 28-day compressive strength of the soil increased by 6% with the addition of glass powder and then decreased. Adding glass powder provides suitable conditions for pozzolanic reactions between SiO_2 and Ca^{2+} . As a result of these reactions, new compounds including CSH are formed. CSH fills the holes in the soil and reduces porosity and increases the density of the soil structure, which ultimately leads to an increase in soil resistance. This is shown in Fig. 2.

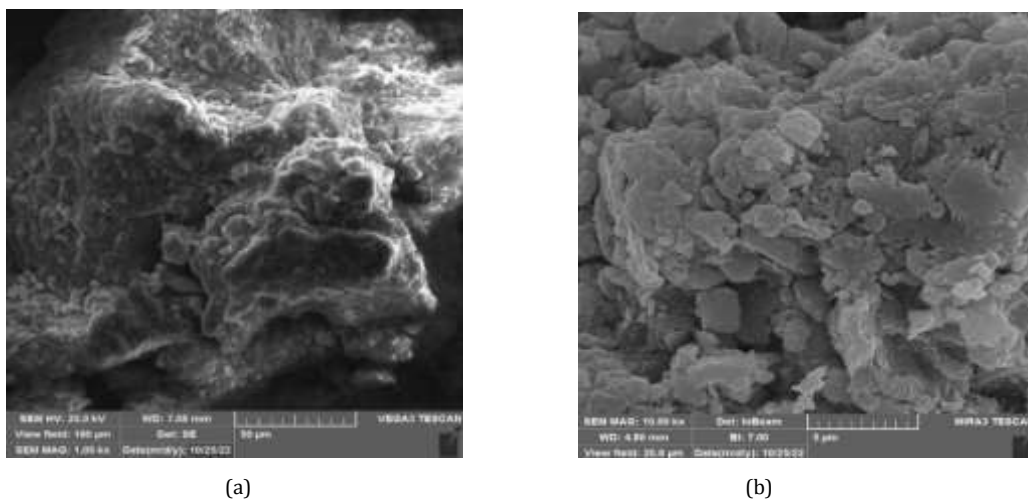


Fig. 2. SEM images: a) natural soil, b) soil with 6% Glass Powder

4. Conclusions

In this research, the effect of adding recycled glass powder on reducing the dispersivity potential of clay soils and improving their geotechnical properties has been investigated. The obtained results can be summarized as follows:

- 1) The dispersivity potential decreased by 71.7% and based on the results of the Crumb test, the soil was classified as non-dispersive soils. The main reason for the decrease in dispersion is the immediate cation exchange reactions, including the replacement of Ca^{2+} with Na^{+} in the soil and the formation of CSH gel due to the pozzolanic reactions between the silica in the glass powder and calcium in the soil.
- 2) Based on the compaction test results, by adding glass powder to the soil, the optimum moisture content is reduced and the necessary conditions for compaction and cohesion between the soil particles are provided and it increases the maximum dry density of the soil.
- 3) By adding glass powder to the soil, the Etterberg limits decreased for all modified samples compared to the unmodified samples.
- 4) The unconfined compressive strength of the samples increased during the 7-day processing period by adding glass powder. The main reason for the increase in resistance is the change in the structure of dispersive clay due to pozzolanic reactions and the formation of new compounds such as CSH.

5. References

ASTM_D2166, "Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil", ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016. <https://doi.org/10.1520/D2166D2166M-16>

- Arrieta Baldovino JDJ, Dos Santos Izzo R, Da Silva ÉR, Lundgren Rose J, "Sustainable use of recycled-glass powder in soil stabilization", *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2020, 32, 04020080. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003081](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003081)
- Ashiq SZ, Akbar A, Farooq K, Mujtaba H, "Sustainable improvement in engineering behavior of siwalik clay using industrial waste glass powder as additive", *Case Studies in Construction Materials*, 16, e00883, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00883>
- Ibrahim HH, Mawlood YI, Alshkane YM, "Using waste glass powder for stabilizing high-plasticity clay in Erbil city-Iraq", *International Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, 15, 496-503. <https://doi.org/10.1080/19386362.2019.1647644>