مجله انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران
پاییز و زمستان ۱۳۹۵، جلد نهم، شماره ۳ و٤، صفحه ۷۱ تا ۸۳

بررسی اثر افزودنی‌های پلیمر مایع وینیل استات و کربنات کلسیم میکرونیزه برمدول الاستیسیته خاک ماسه لای‌دار

علی محمد رجبی[۱*]، علی‌رضا حسینی[۲]

دریافت مقاله: ۹۵/۱۰/۱۰ پذیرش مقاله: ۹٦/۰٦/۰۱

چکیده

تثبیت و بهسازی خاک یکی از شاخه‌های علم ژئوتکنیک است که با استفاده از آن ویژگی‌های مهندسی و ژئومکانیکی خاک‌های ضعیف (از جمله مقاومت، شکل‌پذیری و ظرفیت‌باربری) را بهبود می‌دهند. در این تحقیق از پودرمیکرونیزه کربنات کلسیم و پلیمر مایع وینیل‌استات به‌عنوان دو ماده افزودنی جهت تثبیت خاک ماسه‌لای‌دار و بررسی تاثیر آن بر مدول الاستیسیته خاک استفاده شده است. به این منظور پس از انجام آزمایش‌های شاخص خاک، پودر میکرونیزه کربنات‌کلسیم و پلی‌وینیل‌استات با درصدهای مختلف ۱، ۲، ۳ و ٤ به خاک افزوده شده و طی زمان‌های عمل‌آوری متفاوت آنی، ۱، ۷، ١٤ و ۲۸روزه آزمایش مقاومت تراکم تک‌محوری روی نمونه‌های تثبیت شده انجام و مدول الاستیسیته خاک در شرایط مختلف آزمایش، تعیین شده است. همچنین به‌منظور بررسی چگونگی تغییر خصوصیات ساختاری هریک از نمونه‌ها، تصویربرداری SEM روی ۳ نمونه از خاک قبل و بعد از اختلاط انجام شده است. طبق نتایج آزمایش‌های انجام شده، به‌طورکلی افزایش مقدار افزودنی تا درصدی معین در یک زمان عمل‌آوری ثابت، باعث افزایش مقدار مدول الاستیسیته شده است. همچنین با افزایش زمان عمل‌آوری در یک درصد ثابت افزودنی، مدول الاستیسیته به مقدار قابل توجهی افزایش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد تاثیر پلی‌وینیل‌استات بر افزایش مقدار مدول الاستیسیته روی خاک ماسه لای‌دار نسبت به پودر میکرونیزه کربنات کلسیم بیشتر است.

کلید واژه‌ها: *پودرمیکرونیزه کربنات کلسیم، پلی وینیل استات، مدول الاستیسته، ماسه لای‌دار، تثبیت خاک*

۱. گروه زمین‌شناسی مهندسی، دانشکده زمین شناسی، پردیس علوم، دانشگاه تهران، تهران amrajabi@ut.ac.ir
۲. دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران، ژئوتکنیک، دانشگاه قم
* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

گسترش قابل‌توجه خاک‌های مسئله‌دار در ساختگاه بسیاری از پروژه‌های عمرانی از یک طرف و به‌طورکلی ضعف مقاومت برشی و نبود مقاومت کششی در خاک‌ها از طرف‌دیگر، منجر به توسعه روش‌های مختلف بهسازی و تثبیت مهندسی خاک‌ها شده است. اخیرا استفاده از تثبیت شیمیایی به‌عنوان یکی از روش‌های بهسازی خاک مورد توجه مهندسین ژئوتکنیک قرار گرفته است. در این روش با استفاده از مواد و مصالح مناسب و مفاهیم علمی مهندسی خاک، مشخصات مهندسی و مکانیکی خاک از جمله مقاومت، شکل‌پذیری و ظرفیت باربری بهبود می‌یابد.

در خصوص بهبود ویژگی‌های مقاومتی خاک‌ها با استفاده از افزودنی‌های مختلف مطالعات بسیاری انجام شده است. Vedenskaya et al. (1971) با استفاده از موادی از خانواده پلیمرها، امکان تحکیم و بهسازی سیلت، ماسه و رس‌ها را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این تحقیقات نشان داد که مقاومت فشاری خاک‌های مورد بررسی به علت افزایش پیوندهای هیدروژنی و بین مولکولی به طور قابل‌توجهی افزایش می‌یابد. آن‌ها افزایش مقاومت ماسه‌لای‌دار را با مخلوط ۵٪ از ماده افزودنی پلیمری، از مقدار ۲٤٥۲ به ۲۹٤۲ کیلوپاسکال گزارش کرده و پیشنهاد دادند مقدار بهینه افزودنی می‌تواند بین محدوده ۵ تا ۱۰ درصد متغیر باشد.

Al-Khanbashi and Gamal. (2003) اثر ماده امولسیون آبی پلیمر استیرن اکریلیک را بر بهبود ساختار ماسه‌های بادی مورد مطالعه قرار دادند. در این بررسی، با استفاده از دو روش اسپری و مخلوط کردن پلیمر به خاک ماسه‌ای، مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته به‌طور خطی با افزایش میزان پلیمر افزایش می‌یابد. همچنین تصاویر میکروسکوپ الکترونی نشان‌داد که افزایش خواص مقاومتی خاک به دلیل پوشش پلیمر بر روی ذرات ماسه و گسترش اتصال بین آن‌ها می‌باشد.

افزودن آهک و نانو پلیمر به خاک‌های ماسه‌رس‌دار منجر به تغییر در پارامترهای مقاومتی خاک می‌شود؛ به طوری که با افزودن پلیمر به خاک رفتارخاک به سمت جذب آب کمتر و دامنه خمیری بیشتر میل می‌کند. از طرفی افزودن آهک به خاک نسبت به پلیمر، در بلند مدت تاثیر بیشتری در افزایش مقاومت فشاری دارد. همچنین افزودن هر دو ماده منجر به افزایش چسبندگی خاک می‌شود(طباطبایی و سلامت، ۱۳۹۲).

Tolleson et al. (2003) تأثیر نوعی محلول آنزیمی را روی نسبت باربری کالیفرنیا (CBR)، سختی و مدول الاستیسیته خاکی با دانه‌بندی گسترده و پلاستیک مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان‌داد در هردو حالت خشک و مرطوب نمونه‌ها، پارامترهای مورد بررسی نتایج بالاتری نسبت به حالت بدون آنزیم نشان می‌دهند.

Anagnostopoulos (2005) تأثیر نوع دوغاب پلیمری بر خواص فیزیکی و مکانیکی خاک‌های ماسه‌ای را مورد بررسی قرار داد. در این مطالعه دوغاب مورد استفاده شامل سیمان، رس و آب، به‌همراه درصدهای مختلفی از امولسیون اکریلیک رزین و متیل متااکریلات بوده است. این دو ماده به‌طور گسترده به‌عنوان مواد مضاف غیرسمی در ساختمان‌های بتنی استفاده می‌شوند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که افزودن این مواد منجر به افزایش خواص فیزیکی و مکانیکی خاک ماسه مورد تحقیق شده است.

Osinubi and Nwaiwu (2006) مطالعاتی در خصوص تاثیر افزودن آهک روی خصوصیات تراکم‌پذیری و مقاومت فشاری تک‌محوری خاک رس انجام دادند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که بالاترین مقاومت فشاری تک‌محوری زمانی حاصل می‌شود که عمل تراکم بلافاصله بعد از مخلوط شدن خاک رس و آهک انجام شود. همچنین نمونه تهیه شده با نسبت اختلاط ۵٪ آهک و زمان عمل‌آوری ۲۸روزه، بالاترین مقاومت تک محوری فشاری و مدول الاستیسیته را نشان داده است.

Zhu and Liu (2008) به‌منظور اصلاح رفتار مکانیکی نوعی خاک سیلتی، اثر ماده تثبیت‌کننده جدیدی شامل ترکیبی از سیمان، خاکستر بادی و آهک هیدراته را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان‌داد افزودن این ماده به مقدار قابل‌توجهی مقاومت خاک سیلتی را افزایش و کرنش انقباضی آن را

کاهش می‌دهد. بعلاوه اینکه، از نقطه نظر مکانیکی و کاربردی در پروژه‌های راه، افزودن ٤٪ از این ماده، روشی اقتصادی برای تثبیت این نوع خاک‌ها است. نتیجه این مطالعه نشان داد، سیلت تثبیت‌شده دارای مقاومت اولیه و سختی بالا و تغییر شکل انقباضی کم است که این موضوع نیازهای بستر راه در بزرگراه‌ها را ارضا می‌کند. Zhu and Liu (2008) همچنین آزمایش‌هایی جهت تثبیت خاک‌های رس‌سیلتی انجام داده و تاثیر همزمان آهک و میکروسیلیس را روی خاک با ۲درصد آهک و ۱، ۳ و ۵ درصد میکروسیلیس بررسی نمودند و به این نتیجه رسیدند که اختلاط آهک و سیلیس به ترتیب به مقدار ۲ و ۱ درصد، مقاومت فشاری خاک را به‌طور رضایت بخشی افزایش می‌دهد.

Modarresi and Nosoudy (2015) اثر افزودنی‌های کربنات‌کلسیم و مواد شیمیایی نوین را بر پارامترهای مقاومتی خاک رس با پلاستیسیته پایین(CL) مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که استفاده از این نوع افزودنی‌ها، حد خمیری خاک را کاهش می دهد در حالی که مقاومت فشاری خاک با افزایش‌درصد این افزودنی‌ها و بالا رفتن زمان عمل‌آوری افزایش می‌یابد اما از یک زمان معینی به بعد این افزایش محسوس نیست.

Kumar and Sivapullaiah(2015) تغییرات پارامترهای مقاومتی خاک رس ماسه‌ای را با افزودن درصدهای مختلف کربنات‌کلسیم مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که با افزایش درصد کربنات‌کلسیم و زمان عمل‌آوری، پارامترهای مقاومتی خاک بهبود می‌یابند. مطابق با این بررسی‌ها، در یک زمان ثابت عمل‌آوری، مقاومت فشاری خاک با افزودن ۲ و ٤ درصد آهک تقریبا برابر است در حالی که با افزودن ٦ درصد آهک در زمان عمل‌آوری ۲۸روز، بیشترین افزایش مقاومت حاصل می‌شود.

از آنجا که درخصوص اثر افزودنی‌های مختلف روی مدول الاستیسیته خاک مطالعات کمتری انجام شده است، در این تحقیق تاثیر دو ماده پلی وینل‌استات و پودر میکرونیزه کربنات‌کلسیم با درصدهای مختلف در زمان‌های عمل‌آوری آنی، ۱، ۷، ١٤ و ۲۸روزه بر روی مدول الاستیسیته خاک ماسه لای‌دار مورد بررسی قرار گرفته است.

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱. مواد افزودنی و خاک مورد استفاده

از آنجا که وجود لای در خاک‌های ماسه لای‌دار می‌تواند پتانسیل مساله‌دار بودن آن‌ها را افزایش دهد و از طرفی این نوع خاک، یکی از فراوان ترین خاک‌ها در پهنه شهرستان کرج بوده و معمولا به عنوان بستر سازه‌های عمرانی واقع می‌شود لذا در این تحقیق، نوعی خاک ماسه لای‌دار از منطقه‌ای در کرج واقع در استان البرز تهیه شده و آزمایش‌های شناسایی طبق استانداردهای موجود روی این خاک انجام شده است (جدول۱). سپس به منظور امکان‌سنجی بهسازی خاک ماسه لای‌دار، اثر دو ماده افزودنی شامل پلی‌وینل‌استات و پودر میکرونیزه کربنات‌کلسیم روی این خاک مورد بررسی قرار گرفته است.

جدول ۱. مشخصات خاک مورد استفاده

U.S.C.S	LL	PI	Cc	Cu	D_{10}	D_{60}	D_{30}	D_{10}
SM	NLL	NPI	۱/۷۳	۱۱۳/۵۳	۲۵/٤	۳/۱۷۹	۰/۳۹۳	۰/۰۲۸

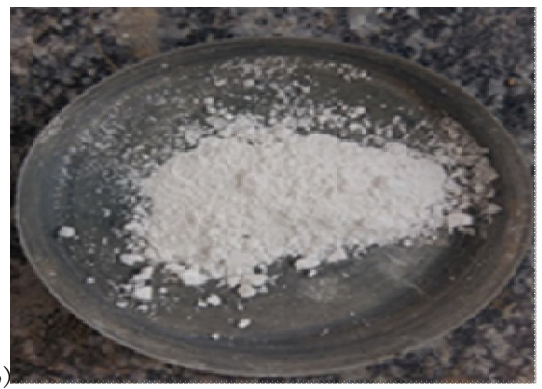
پلی‌وینیل‌استات در سال ۱۹۱۲ و اولین بار توسط کالاته در آلمان ساخته شد. این ماده چسبناک که بمنظور تهیه چسب‌چوب و بتن استفاده می‌شود با از دست‌دادن رطوبت سفت می‌شود. این ماده غیرسمی، سازگار با محیط‌زیست و مقاوم در برابر هوا بوده و برای کاربرد درمناطق حساس از نظر زیست‌محیطی و نفوذپذیری مناسب است. ویژگی‌های

فیزیکی و شیمیایی پلی‌وینیل‌استات و تصویری از این ماده به ترتیب در جدول۲ و شکل۱ نشان شده است.

جدول۲. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی پلی وینیل استات مورد استفاده در این مطالعه

مشخصه	مقدار
شکل ظاهری	مایع
رنگ	شیری رنگ
حلالیت در آب	محلول
ویسکوزیته	۱۳۰۰(Pa.sec)
جرم حجمی	۱/۰٤ (gr/cm3)
pH	۹/٤

(الف)



(ب)

شکل۱. تصویری از (الف) پلی‌وینیل‌استات (ب) پودر میکرونیزه کربنات‌کلسیم مورد استفاده در این مطالعه

پودر میکرونیزه کربنات‌کلسیم، پودری در مقیاس میکرون (به‌طور معمول کمتر از۲۰میکرون) بوده و حاصل آسیاب‌کردن سنگ‌آهک و برخی عناصر جزئی دیگر می‌باشد. خصوصیات شیمیایی پودر میکرونیزه کربنات کلسیم مورد استفاده در این تحقیق در جدول۳ نشان داده شده است. همچنین شکل۱ تصویری از پودر میکرونیزه کربنات کلسیم مورد استفاده در این مطالعه را نشان می دهد.

جدول۳. خصوصیات شیمیایی پودرمیکرونیزه کربنات کلسیم مورد استفاده دراین مطالعه

عناصر	درصد
$CaCo_3$	۹۸/۹٦
$MgCo_3$	۰/۵۹
Al_2O_3	۰/۰٤۵
Fe_2O_3	۰/۰٤٤
Sn	<۰/۰۰۱
Pb	<۰/۰۰۱
Cd	<۰/۰۰۰۱
Mn	۰/۰۰٤۱
Cu	<۰/۰۰۰۱
SiO_2	۰/۱۲

۲-۲. مدول الاستیسیته خاک و روش‌های تعیین آن

مدول الاستیسیته، شیب خط تنش-کرنش در بخش‌الاستیک منحنی رفتار خاک است و به‌طور عمومی با علامت E نمایش داده می‌شود. در صورتی‌که این شیب در ابتدای منحنی محاسبه شود، به آن مدول الاستیسیته اولیه (E_0) گویند. از آنجایی‌که منحنی تنش-کرنش مصالح همواره خطی نیست از مدول‌الاستیسیته مماسی وتری E_{50} استفاده می‌شود. برای محاسبه مدول وتری در ۵۰٪ مقاومت(E_{50})، خطی از مبدا مختصات به نقطه ۵۰٪ مقاومت نهایی رسم شده و شیب آن تعیین می‌گردد. شیب تعیین شده برابر مدول الاستیسیته وتری می‌باشد (حسینی، ۱۳۸۵).

مدول الاستیسیته خاک به سه روش آزمایشگاهی، صحرایی و تجربی قابل تعیین است. در روش آزمایشگاهی نتایج هریک از آزمون‌های تحکیم، مقاومت فشاری تک‌محوری، برش مستقیم و مقاومت فشاری سه محوری می‌تواند برای تعیین مدول الاستیسیته مورد استفاده قرار گیرد. همچنین نتایج آزمون‌های صحرایی نظیر بارگذاری صحرایی، پرسیومتری و دیلاتومتری تخت برای محاسبه مدول‌الاستیسیته خاک کاربرد

دارد. در این تحقیق از نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری جهت تعیین مدول الاستیسیته وتری خاک تثبیت شده استفاده شده است.

۳. برنامه‌ریزی آزمایش‌ها

به منظور بررسی تاثیر افزودنی‌های پلی‌وینیل‌استات و پودر میکرونیزه کربنات‌کلسیم روی خاک ماسه‌لای‌دار کرج، آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری مطابق استاندارد ASTM D2166-85 روی نمونه‌های تثبیت‌شده با درصدهای۱، ۲، ۳ و٤ در زمان‌های عمل‌آوری آنی، ۱، ۷، ١٤ و ۲۸ روزه انجام شده است. در این مطالعه، آزمایش‌های مقاومت فشاری تک محوری بر روی نمونه آماده شده در شرایط رطوبت بهینه ۱۲/۵۰ درصد و دانسیته نسبی ۱/۹۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب انجام شده است. نمونه‌های مورد آزمایش، استوانه‌ای و به قطر و ارتفاع به ترتیب ۵۰ و۱۰۰ میلی‌متر انتخاب شده‌اند. نمونه‌ها با استفاده از روش تراکم کاهش یافته متراکم شده‌اند که در آن کنترل تراکم بر اساس تغییر ضخامت لایه‌ها انجام می‌گیرد. بدین ترتیب که با ثابت نگه داشتن وزن خاک و سطح مقطع لایه‌ها، هر لایه در ضخامتی بیشتر از ضخامت نهایی طراحی شده‌اش، کوبیده شده و در نهایت ضخامت تمام لایه‌ها مساوی بدست می‌آید. میزان افزایش ضخامت لایه‌ها از بیشترین مقدار برای لایه اول، که دارای بیشترین کاهش تراکم است تا کمترین افزایش برای لایه آخر، که تراکم نهایی نمونه را دارد، به صورت خطی تغییر می‌کند. سپس نمونه‌های خاک متراکم اعم از تثبیت شده یا نشده، با مخلوط کردن دستی خاک خشک، پلی‌وینیل‌استات یا پودر میکرونیزه کربنات کلسیم و آب آماده شد. برای اختلاط مناسب نمونه‌ها ابتدا هر یک از افزودنی ها را با خاک مخلوط کرده و سپس به صورت تدریجی به آن آب اضافه نموده و بمنظور تهیه یک مخلوط یکپارچه ترکیب گردید. سپس مخلوط مورد نظر به سه قسمت مساوی تقسیم شده و در داخل قالب آزمایش تا رسیدن به وزن مخصوص مورد نظر متراکم گردیدند. سپس برای اعمال شرایط عمل‌آوری، نمونه‌ها داخل یک فضای بسته و در دمای محیط قرار داده شدند. پس از گذشت زمان مورد نظر، آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری بر روی هر یک از نمونه‌ها انجام شد. همانطور که پیش‌تر ذکر شد، هدف از این مطالعه، بهسازی خاک ماسه لای‌دار با استفاده از پلی وینیل استات و پودر میکرونیزه کربنات‌کلسیم با درصدهای ۱، ۲، ۳ و٤ در زمان‌های عمل‌آوری آنی، ۱، ۷، ١٤ و۲۸ روزه می‌باشد. در این آزمایش جهت ساخت نمونه‌ها، از قالبی با قطر و ارتفاع به ترتیب ٤/۹۷ و۱۰/۰۵ سانتی‌متر استفاده شده و نمونه‌ها در سه لایه متراکم شده‌اند. شکل ۲ تصویری از نمونه‌ها را قبل و بعد از انجام آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری نشان می‌دهد. در ادامه، به منظور بررسی ساختار میکروسکوپی و مطالعه مرز بین ذرات خاک و افزودنی‌ها در نمونه‌های تثبیت‌شده، تصویربرداری SEM روی۳ نوع نمونه بدون افزودنی و نمونه‌های تثبیت‌شده با هر یک از افزودنی‌ها انجام شده است. دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی به صورت معمول در خلا و در محیط کاملا خشک جهت حصول باریکه الکترونی و با انرژی بالا برای تصویربرداری و آنالیز شیمیایی مورد استفاده قرار می‌گیرند. نمونه‌هایی که داخل دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی قرار می‌گیرند باید کاملا خشک، عاری از هرگونه خواص مغناطیسی، دارای رسانایی بالایی در ابعاد مناسب (میرجلیلی و حمزه‌بیگی، ۱۳۹۲). به صورت کلی آماده‌سازی نمونه‌های میکروسکوپ الکترونی روبشی به ترتیب عبارت از نمونه‌برداری، آماده‌سازی نمونه‌های مختلف بر حسب اندازه، شکل و جنس نمونه، تمیز و خشک‌کردن نمونه، چسباندن نمونه‌ها، پوشش‌دهی نمونه درصورت نیاز و نهایتاً تصویربرداری می‌باشد.

الف)

ب)

شکل۲. تصویری از نمونه‌ها قبل و بعد از انجام آزمایش مقاومت فشاری تک محوری

٤. نتایج و بحث

آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری به‌دلیل عدم اعمال فشار همه جانبه بر نمونه، مقادیر کمتری نسبت به سایر آزمون‌ها برای مدول الاستیسیته به دست می‌دهد. مدول الاستیسیته برجای خاک، بطور معمول بین ٤ تا ۱۳ برابر مدول الاستیسیته حاصل از آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری است و عدم وجود فشار همه‌جانبه در حین آزمایش، دلیل دستیابی به مقادیر بسیار محافظه کارانه برای مدول الاستیسیته خاک از نتایج این آزمایش است(قنبری، ۱۳۸۸).

همانطور که پیش‌تر ذکر شد، در این مطالعه نمونه‌ها توسط پودر میکرونیزه کربنات‌کلسیم و پلی‌وینیل‌استات تثبیت شده و آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری روی آن انجام شده است. با توجه به نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری و ترسیم نمودارهای تنش-کرنش، مدول الاستیسیته در درصدهای ۱تا ٤، در زمان‌های عمل‌آوری متفاوت، ترسیم شده است.

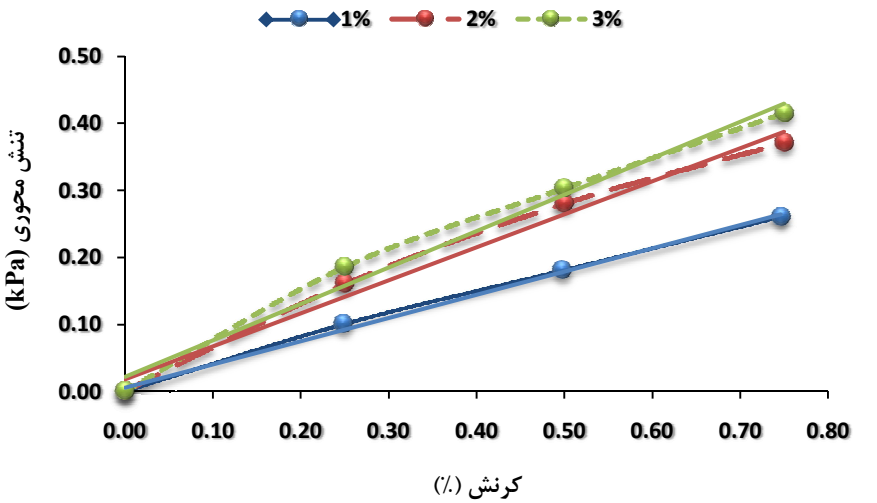
همان‌گونه که در جدول٤ مشاهده می‌شود، با افزایش پلی‌وینیل‌استات در خاک از ۱ به ۲ درصد، مدول الاستیسیته نیز افزایش می‌یابد. اما در مقدار افزودنی از۲ به ۳ درصد، به‌دلیل گسیخته شدن نمونه‌ها در کرنش گسیختگی بالاتر، شیب خط نمودار تنش-کرنش و در نتیجه مدول الاستیسیته خاک کاهش می‌یابد.

جدول۳. تغییرات مدول الاستیسیته خاک تثبیت‌شده با پلی وینیل استات و پودرمیکرونیزه کربتات کلسیم در زمان‌های عمل‌آوری متفاوت

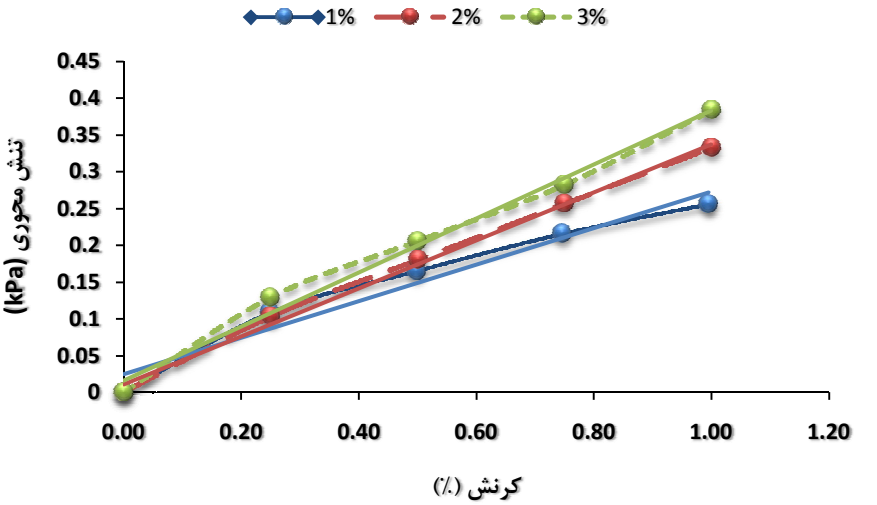
زمان	مدول الاستیسیته خاک تثبیت شده با پلی وینیل استات (MPa)				مدول الاستیسیته خاک تثبیت شده با پودرمیکرونیزه کربتات کلسیم(MPa)			
	۱٪	۲٪	۳٪	٤٪	۱٪	۲٪	۳٪	٤٪
آنی	۳۳/۹	٤۹/۲	٥٤/٤	٦٤	۲٤/۸	۳۲/٦	۳٦/۷	**۳۳/٥**
۱ روزه	۷۳/٥	۹۸/۷	۸٦/۸	۸٥/٥	۳٦/۷	٥۱/٤	٥۹/۰	**٥٤/۲**
۷ روزه	۱٤٦/۰	۲۰٦/٦	۱۹۳/۷	۱۸۹/٥	٦٤/٦	۷۳/۹	۷٤/۷	**۷۰/۱**
۱٤روزه	۱٥۸/۰	۲۱۹/۷	۲۰٦/۷	۲۰۰/۷	۷۱/۸	۷۸/۸	۸٥/٥	**۸۰/۲**
۲۸روزه	۱٦۳/۸	۲۲۷/۱	۲۰٦/۸	۲۰۱/٥	۷۱/۸	۸۰/٥	۸٥/٦	**۷۹/٥**

همچنین با افزودن پودر میکرونیزه کربنات‌کلسیم و افزایش زمان عمل‌آوری، به‌دلیل افزایش بیشتر مقدار تنش‌محوری نسبت به کرنش گسیختگی، مقدار مدول الاستیسیته افزایش یافته است.

شکل۳و٤ به ترتیب نمودارهای تنش-کرنش خاک تثبیت‌شده با درصدهای مختلف پلی‌وینیل‌استات و پودر میکرونیزه کربنات‌کلسیم در زمان عمل‌آوری آنی را نشان می‌دهد که با ترسیم شیب نمودار در۵۰٪ مقاومت بیشینه فشاری تک‌محوری، مقدار مدول الاستیسیته در هریک از درصدها تعیین شده است.

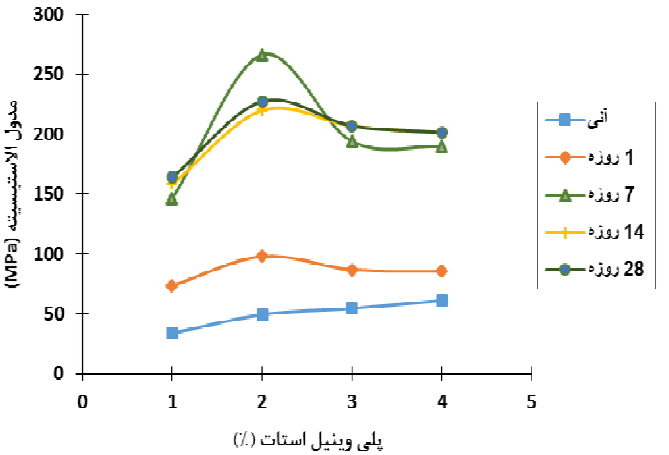


شکل۳. منحنی تنش-کرنش حاصل از آزمایش مقاومت فشاری خاک تثبیت شده با پلی وینیل استات در زمان آنی

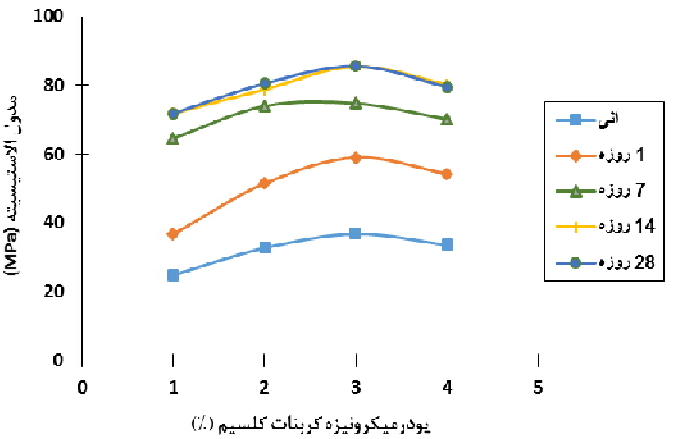


شکل٤. منحنی تنش-کرنش حاصل از آزمایش مقاومت فشاری تک محوری خاک تثبیت شده با پودرمیکرونیزه کربنات کلسیم در زمان آنی

شکل۵ تغییرات مدول‌الاستیسیته را در درصدهای مختلف پلی‌وینیل‌استات در زمان‌های عمل‌آوری مختلف نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با افزایش زمان عمل‌آوری، نمونه تثبیت‌شده مقدار تنش‌گسیختگی بیشتری را تحمل کرده و مدول‌الاستیسیته افزایش یافته است. مطابق شکل۵ پس از گذشت ۱ روز از عمل‌آوری، جهش قابل توجهی در افزایش مدول الاستیسیته به خصوص برای نمونه‌های تثبیت‌شده با ۲ درصد پلی‌وینیل‌استات ملاحظه می‌شود و در زمان‌های ١٤ و ۲۸ روزه و احتمالا بعد از آن، تقریباً افزایش مدول الاستیسیته ناچیز است. همین بررسی در شکل٦ برای نمونه تثبیت‌شده با پودرمیکرونیزه کربنات کلسیم نشان داده شده است. با افزایش مقدار پودر میکرونیزه کربنات‌کلسیم به‌دلیل وقوع واکنش پوزولانی و خروج سیلیکات و آلومینات از نمونه خاک تثبیت‌شده، مقدار مقاومت خاک افزایش یافته و نمونه تنش گسیختگی بیشتری را تحمل می‌کند و مدول الاستیسیته نیز افزایش یافته است. همچنین در یک درصد ثابت افزودنی با افزایش زمان عمل‌آوری، مقدار مدول الاستیسیته به‌دلیل وقوع واکنش تابع زمان پوزولانی، افزایش یافته است و پس از پایان این واکنش‌ها افزایش مدول الاستیسیته ناچیز است، بطوریکه در زمان‌های ١٤ و ۲۸ روزه، منحنی‌های تغییرات مدول الاستیسیه همپوشانی دارند (شکل٦). بررسی منحنی‌های شکل ۵ و ٦ نشان می‌دهد مقدار مدول الاستیسته بیشینه خاک تثبیت‌شده با پلی‌وینیل‌استات ۲/٦۵ برابر مدول‌الاستیسیته بیشینه خاک تثبیت شده با پودر میکرونیزه کربنات‌کلسیم به‌دست آمده است.

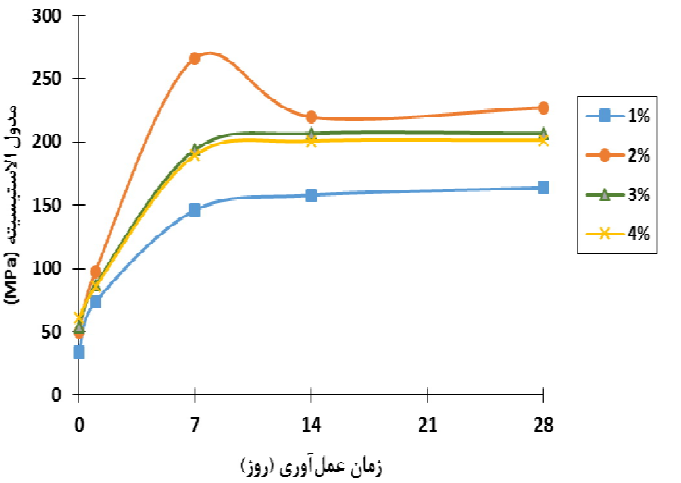


شکل۵. تغییرات مدول الاستیسیته خاک تثبیت شده با پلی وینیل استات در زمان عمل‌آوری متفاوت

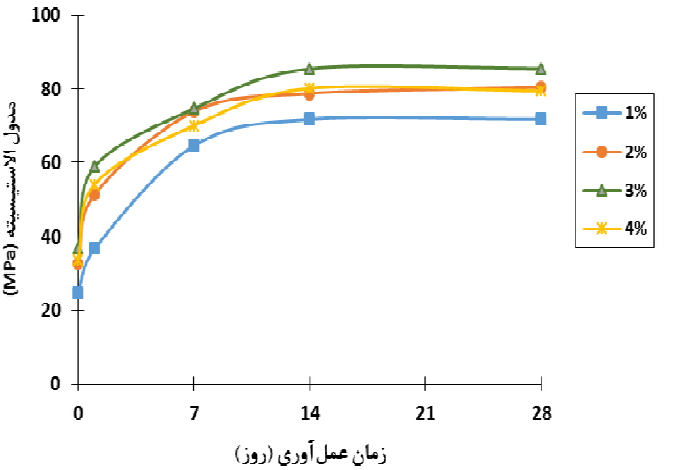


شکل٦. تغییرات مدول الاستیسیته خاک تثبیت شده با پودر میکرونیزه کربنات کلسیم در زمان عمل‌آوری متفاوت

شکل۷ و۸ به‌ترتیب تاثیر زمان عمل‌آوری بر مدول الاستیسیته خاک تثبیت شده با پلی‌وینیل‌استات و پودرمیکرونیزه کربنات‌کلسیم را نشان می‌دهند. مطابق با شکل‌های ۷ و ۸ در زمان‌های ثابت عمل‌آوری، مقدار افزایش مدول الاستیسیته برای خاک تثبیت شده با پلی وینیل استات بیشتر از خاک تثبیت شده با پودر میکرونیزه کربنات کلسیم است. به هرحال در زمان عمل‌آوری ١٤ روزه، مقدار مدول لاستیسیته برای هر دو نوع افزودنی ثابت می‌ماند.



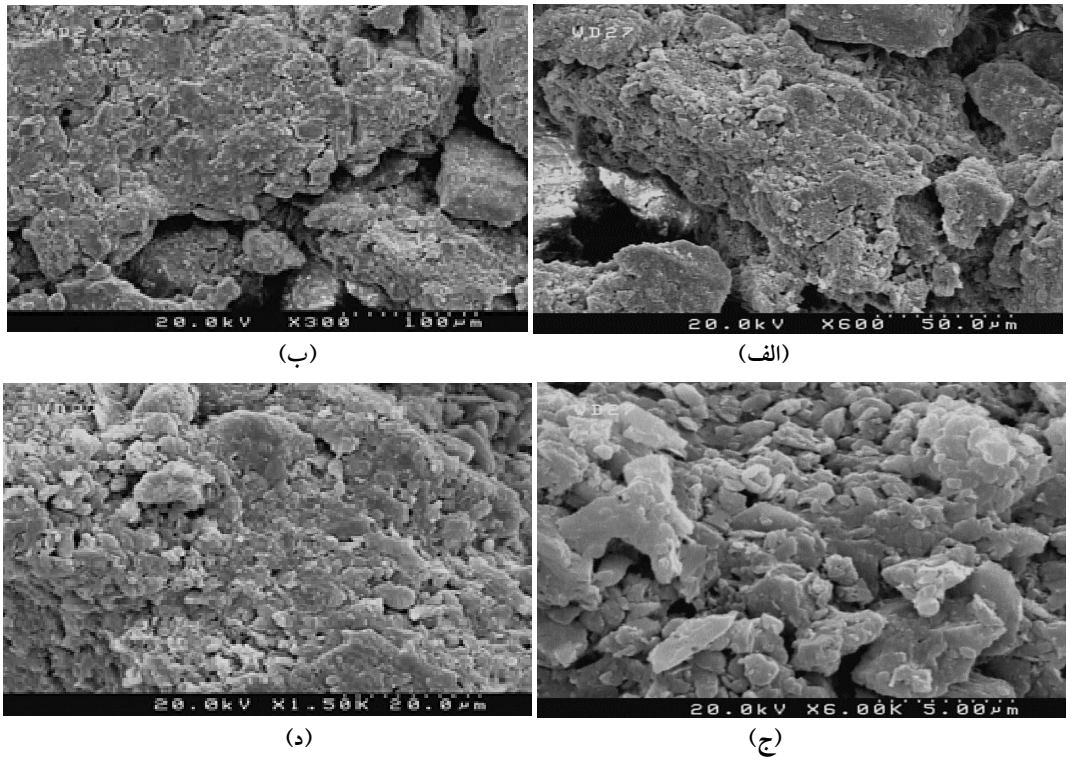
شکل۷. تاثیر زمان عمل‌آوری بر مدول الاستیسیته خاک تثبیت شده با پلی وینیل استات



شکل۸. تاثیر زمان عمل‌آوری بر مدول الاستیسیته خاک تثبیت شده با پودر میکرونیزه کربنات کلسیم

۵. تصویربرداری SEM

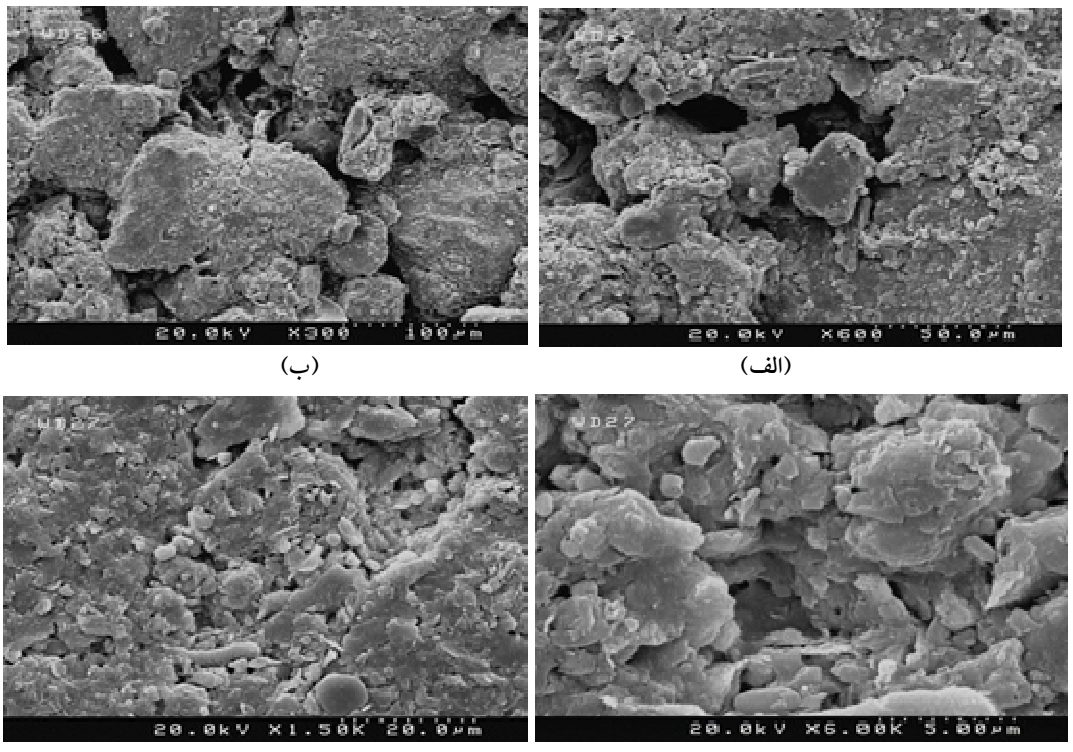
همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد، به‌منظور بررسی چگونگی تغییر خصوصیات ساختاری هریک از نمونه‌ها، تصویربرداری SEM روی۳ نمونه از خاک قبل و بعد از اختلاط انجام‌شده‌است. برای این منظور تصویربرداری از نمونه بدون افزودنی، نمونه تثبیت‌شده با ۳ درصد پلی‌وینیل‌استات و نمونه تثبیت‌شده با ۳ درصد پودر میکرونیزه کربنات‌کلسیم در مقیاس مختلف انجام شده است. در شکل ۹ بافت نمونه خاک ماسه لای‌دار فاقد افزودنی، در چهار مقیاس۲۵۰، ۵۰۰، ۱۲۵۰ و ٦۰۰۰ برابر برای بررسی بهتر پیوند لای‌ها و ریزدانه‌ها نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل ۹ مشخص است ذرات لای و ریزدانه خاک در کنار یکدیگر به‌صورت قفل و بست شده قرار گرفته‌اند.



(ب) (الف)

(د) (ج)

شکل۹. تصاویر نمونه‌های خاک بدون افزودنی با بزرگنمایی: الف) ۲۵۰، ب) ۵۰۰، ج) ۱۲۵۰ و د) ۶۰۰۰ برابر



(ب) (الف)

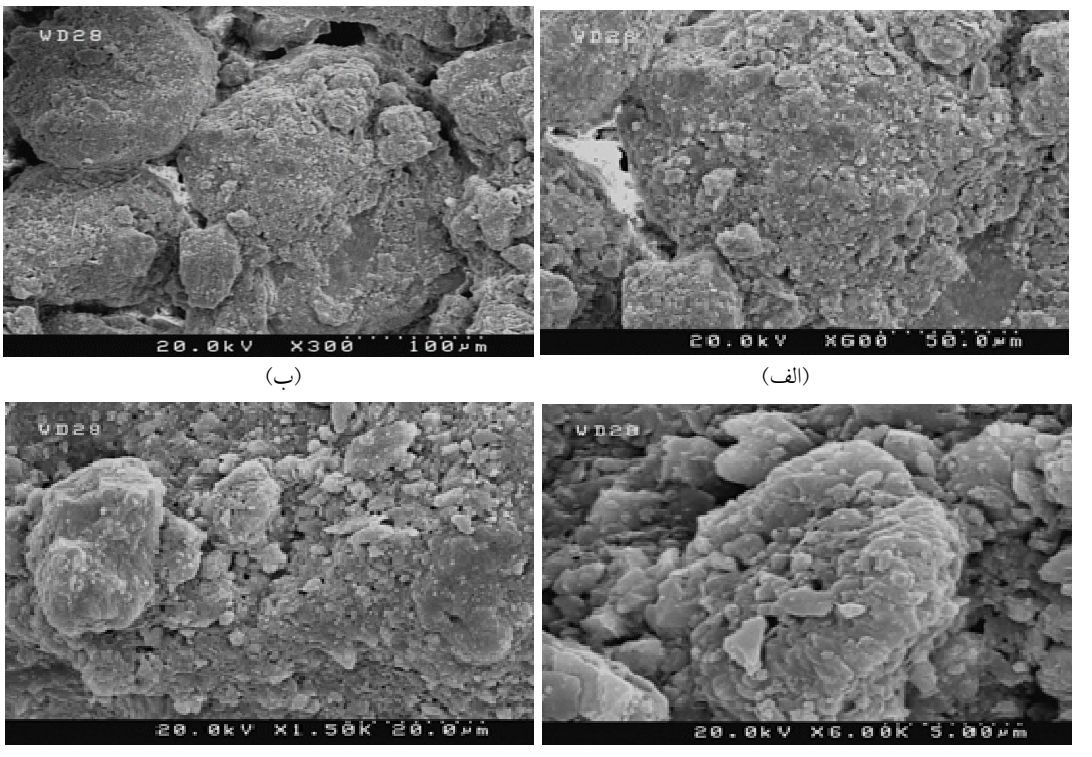
(د) (ج)

شکل۱۰. تصاویر نمونه‌های خاک تثبیت‌شده با ۳٪ پلی‌وینیل‌استات بزرگنمایی: الف) ۲۵۰، ب) ۵۰۰، ج) ۱۲۵۰ و د) ۶۰۰۰ برابر

شکل ۱۰ بافت ماسه‌لای‌دار متراکم و تثبیت‌شده با ٪۳ پلی‌وینیل‌استات را نشان می‌دهد. وجود مواد پلیمری بر سطح ذرات خاک به‌خوبی مشخص است. با بررسی تصاویر گرفته‌شده با مقیاس بزرگتر می‌توان نقش ماده پلیمری را در بین ذرات ماسه‌لای‌دار به‌خوبی مشاهده کرد. همان‌طور که نشان داده شده است ماده پلیمری موردنظر باعث ایجاد پیوستگی بین ذرات شده و یک بافت پیوسته از ذرات ماسه‌لای‌دار و پلی‌وینیل‌استات را تشکیل داده که باعث افزایش مقاومت تراکم تک‌محوری ماسه‌لای‌دار گردیده است.

شکل ۱۱ بافت ماسه لای‌دار متراکم شده با ٪۳ پودر میکرونیزه کربنات‌کلسیم را نشان می‌دهد. همان‌گونه که از شکل مشخص است دانه‌های ماسه‌ای با توجه به انرژی حاصل از تراکم نمونه و وجود پودر میکرونیزه کربنات‌کلسیم، که باعث قفل و بست دانه‌های خاک می‌شود به‌خوبی متراکم شده‌اند. وجود ذرات پودر میکرونیزه کربنات‌کلسیم روی سطح خاک مشخص می‌باشد. با مقایسه دو شکل ۱۰ و ۱۱ می‌توان دریافت که پلی‌وینیل‌استات دارای توزیع یکنواخت‌تری نسبت به پودرمیکرونیزه‌کربنات‌کلسیم روی خاک تثبیت‌شده می‌باشد و تقریبا به صورت زنجیره‌ای پیوسته، دانه‌های خاک را فراگرفته و فاصله ذرات را پرکرده و آن‌ها را با یکدیگر متصل کرده است. به‌همین دلیل خاک تثبیت شد با ۳ درصد پلی وینیل استات منجر به افزایش بیشتر پارامترهای مقاومتی (مدول الاستیسیته) نسبت به وجود پودر میکرونیزه کربنات‌کلسیم در شرایط مشابه شده است.

بررسی نتایج SEM نشان می‌دهد، در نتیجه افزودن پودر میکرونیزه کربنات‌کلسیم، وقوع واکنش پوزولانی در مرز بین ذرات، باعث خروج سیلیکات و آلومینات از خاک شده و ذرات خاک و افزودنی ساختار مجتمع تشکیل می‌دهند که باعث افزایش پارامترهای مقاومتی و افزایش مدول‌الاستیسیته می‌گردد. همچنین همان‌گونه که در تصاویر نیز مشاهده شد به دلیل وجود کم ذرات رس در خاک ماسه‌لای‌دار، واکنش کربناتاسیون انجام‌شده و پودر میکرونیزه کربنات‌کلسیم تاثیر چندانی نسبت به پلی‌وینیل‌استات در تثبیت خاک ماسه لای‌دار ندارد.



(ب) (الف)

(د) (ج)

شکل ۱۱. تصاویر نمونه‌های خاک تثبیت‌شده با ٪۳ پودرمیکرونیزه کربنات‌کلسیم بزرگنمایی: الف) ۲۵۰، ب) ۵۰۰، ج) ۱۲۵۰ و د) ٦۰۰۰ برابر

٦. نتیجه‌گیری

در این مطالعه تاثیر افزودنی‌های پلی‌وینیل استات و پودر میکرونیزه کربنات کلسیم روی مدول الاستیسیته خاک ماسه لای‌دار تثبیت‌شده در درصدهای ۱، ۲، ۳ و٤ در زمان‌های عمل‌آوری آنی، ۱، ۷، ١٤ و ۲۸ روزه با استفاده از آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری مورد بررسی قرارگرفته است. همچنین جهت بررسی بافت ذرات خاک، تصاویر SEM از نمونه‌هایی از خاک بدون افزودنی، تثبیت‌شده با ۳ درصد پلی‌وینیل‌استات و تثبیت‌شده با ۳ درصد پودر میکرونیزه کربنات کلسیم با بزرگنمایی‌های ۲۵۰، ۵۰۰، ۱۲۵۰ و ٦۰۰۰ برابر تهیه شده است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که به‌طورکلی در یک درصد ثابت هردو نوع افزودنی با افزایش زمان‌عمل‌آوری، مقدار مدول‌الاستیسیته خاک تثبیت شده ابتدا تا درصد بهینه افزایش و سپس کاهش یافته است. همچنین در یک زمان عمل‌آوری ثابت با افزایش مقدار پودر میکرونیزه کربنات‌کلسیم به‌دلیل انجام واکنش پوزولانی وابسته به‌زمان، مدول الاستیسیته تا درصد بهینه (۳ درصد) افزایش‌یافته و پس از آن به‌دلیل وقوع واکنش کربناتاسیون (واکنش زیان‌آور) کاهش یافته است. همچنین برای پلی‌وینیل استات دریک زمان ثابت با افزایش درصد افزودنی تا درصد بهینه (۲درصد)، مدول الاستیسیته افزایش و سپس کاهش یافته است. به طورکلی نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که تاثیر پلی‌وینیل استات بر مدول الاستیسیته خاک تثبیت‌شده از پودر میکرونیزه کربنات‌کلسیم بیشتر است به‌طوری‌که مدول الاستیسیته بیشینه خاک تثبیت شده با پلی‌وینیل‌استات ۲/٦۵ برابر مدول الاستیسیته خاک تثبیت شده با پودر میکرونیزه کربنات‌کلسیم به‌دست آمده است. نتایج تصاویر SEM نشان می‌دهد که در نتیجه افزودن پلی‌وینیل‌استات در مرز بین ذرات باعث افزایش چسبندگی ذرات شده که باعث افزایش مدول الاستیسیته خاک تثبیت‌شده می‌گردد. همچنین با افزودن پودر میکرونیزه کربنات‌کلسیم، وقوع واکنش پوزولانی در مرز بین ذرات، باعث خروج سیلیکات و آلومینات از خاک شده و ذرات‌خاک و افزودنی ساختار مجتمع تشکیل می‌دهند که به نوبه خود باعث افزایش مدول‌الاستیسیته خاک تثبیت‌شده می‌گردد.

٦. تقدیر و تشکر

در پایان از زحمات پرسنل محترم آزمایشگاه مکانیک خاک رایان بتن کرج، خصوصا مدیر عامل محترم، جناب مهندس حیدری کمال تشکر و قدردانی را داریم.

منابع

حسینی، م.، ۱۳۸۵. مقدمه ای بر مکانیک سنگ، انتشارات ایده گستر، چاپ اول.

قنبری، ع.، ۱۳۸۸. مطالعه مدول الاستیسیته خاک در آبرفت جنوب تهران، نشریه علوم زمین. بهار، سال هجدهم، شماره ۷۱، ۸-۳.

طباطبایی، س. و سلامت، ا.، ۱۳۹۲. مطالعه خاک‌های مسئله‌دار در ایران و ارائه راهکارهای بهسازی. طرح پژوهشی مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی.

میرجلیلی، س. و حمزه بیگی، ع.،۱۳۹۲. فرایند پیاده سازی سیستم مدیریت کیفیت بر مبنای ISO/IEC 17025 در آزمایشگاه‌های انجام آزمون، فصلنامه تخصصی دانش آزمایشگاهی ایران، شماره ٤، ۱۳ -۵.

Al-Khanbashi, A., and El-Gamal, M., 2003. Modification of sandy soil using water-borne polymer. Journal of Applied Polymer Science, 88: 2484-2491.

Anagnostopoulos, C.A., 2005. Laboratory Study of an injected granular Soil Whit Polymer Grout. Tunneling and Underground Space Technology, 20: 525-533.

ASTM., 2008. Standard Test Method of Compressive Strength, D2166-85

Kumar Jha, A., and Sivapullaiah, P.V., 2015. Mechanism of improvement in the strength and Volume change behavior of lime stabilized soil, Engineering Geology, 198: 53-64.

Modarresi, A., and Nosoudy, Y., 2015. Clay stabilization using coal waste and lime-Technical and environmental impacts. Applied clay science, 116: 281-288.

Osinubi, K.J., and Nwaiwu, C.M., 2006. Compaction Delay Effects of properties of Lime-Treated Soil. Journal of Materials in Civil Engineering, 18(2): 250-258.

Tolleson, A.R., Shantawi, F.M., Harman, N.E., Mahdavian, E., 2003. An evaluation of strength change on subgrade stabilized with an Enzyme Catalyst Solution using CBR and SSG comparisons. Final report to university Transportation Center Grant, USA.

Vedenskaya, V.A., Ogneva, N.E., Korshak, V.V., Mekhanteva, L.I., Goguadze, Ts.A.E.A. Translation by Inglis E.A., 1971. Consolidation of Over-Moist Soils by Copolymers of Guanidine Acrylate as Methacryloguanidine-Urea Hydrochloride White Certain Alkylidene Bisacrylamides. Rubber and Technical Press, London, England, 7: 55-58.

Zhu, Z.D., and Liu, S.Y., 2008. Utilization of a new Soil Stabilization for Silt Subgrade, Engineering Geology, 97: 192-198.