

تأثیر ماده پلیمری رزین پلی استر بر حدود اتربرگ و مقاومت تک محوری خاک بنتونیت

حسین سلطانی جیقه^{۱*}، عبدالرضا ابری^۲، آیت اسدیان تراکمه^۳

۱. دانشیار گروه مهندسی عمران دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه شهید مدنی آذربایجان

۲. استادیار گروه شیمی دانشکده علوم پایه دانشگاه شهید مدنی آذربایجان

۳. کارشناس ارشد مهندسی ژئوتکنیک گروه مهندسی عمران دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه شهید مدنی آذربایجان

*hsoltani@azaruniv.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۱۸

چکیده

افزودنی‌های متداول در تثبیت خاک‌های مسئله‌دار، سیمان، آهک و غیره هستند که بیشتر پرهزینه و دارای مضرات زیست‌محیطی هستند. از جمله راهکارهای جدید، جایگزین کردن آنها با افزودنی‌های جدید مانند پلیمرها است. در این پژوهش، اثر رزین پلیمری پلی استر بر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک ریزدانه بنتونیت با خمیری بالا با انجام آزمایش‌های حدود اتربرگ و تک‌محوری فشاری بررسی شد. نتایج نشان می‌دهند که افزودن مقادیر مختلف رزین پلیمری پلی استر موجب کاهش حد روانی، افزایش حد خمیری و به تبع آن کاهش دامنه خمیری خاک بنتونیت می‌شود. همچنین این افزودنی مقاومت تک‌محوری خاک را چند برابر بهبود بخشیده و سبب کاهش تغییر شکل پذیری آن شده است. زیاد شدن مدت زمان عمل‌آوری سبب بهبود هرچه بیشتر این ویژگی‌ها نیز می‌شود. تحلیل تصاویر میکروسکوپ الکترونی، آنالیز XRD و طیف‌سنجی FTIR حاکی از آن است که این ماده در بین لایه‌های ساختار خاک نفوذ کرده و با ایجاد برهم‌کنش مؤثر باعث نزدیک شدن و چسبیدن لایه‌ها به یکدیگر شده و با جذب آب کمتر موجب بهبود ویژگی‌های خمیری و مقاومتی خاک شده است.

واژگان کلیدی: تثبیت خاک؛ پلی استر؛ مقاومت تک‌محوری؛ عکس‌برداری الکترونی؛ آنالیز XRD؛ FT-IR.

۱- مقدمه

خاک‌های رسی در حالت خشک مقاومت نسبتاً خوبی دارند، ولی با جذب آب به حالت خمیری درآمده، متورم شده و مقاومت و ظرفیت باربری آن‌ها کاهش می‌یابد. همچنین، ممکن است به دلیل نشست، تغییر شکل‌های مخرب در سازه‌های روی آنها یا خود سازه خاکی ایجاد شود. وجود چنین خاک‌های مسئله‌دار و نبود مصالح مناسب در محل، منجر به افزایش هزینه ساخت میشود. بنابراین، از دیدگاه اقتصادی، مهندسين سعی می‌کنند بیشینه استفاده را از مصالح محلی داشته باشند.

برای افزایش مقاومت، کنترل خواص خمیری، نشست و تورم، خاک‌های مسئله‌دار با مواد افزودنی تثبیت می‌شوند تا بتواند بدون تغییر شکل‌های زیاد، بارهای وارد شده را تحمل نماید [1, 2]. مواد افزودنی متداول مانند سیمان، آهک و غیره آثار زیست‌محیطی نامطلوبی دارند [3, 4]. این آثار شامل آلودگی هوا و آب‌های زیرزمینی منطقه، از بین رفتن پوشش گیاهی و غیره هستند [5].

کارخانجات تولید سیمان و آهک از عوامل اصلی ایجاد گازهای گلخانه‌ای است. برای نمونه، انرژی لازم برای تولید یک تن سیمان پرتلند، یک تن دی‌اکسید کربن وارد اتمسفر می‌کند [6, 7]. هفت درصد از دی‌اکسید کربن موجود در اتمسفر به دلیل تولید سالانه ۶/۹ میلیارد تن سیمان در جهان است. علاوه بر آن، استخراج مواد خام در تولید سیمان، آهک و زغال‌سنگ برای تأمین سوخت موجب تشدید جنگل‌زدائی و از بین رفتن لایه‌های خاک می‌شود [8]. اضافه شدن بیش از حد آهک به خاک باعث می‌شود که مواد حاصل از واکنش‌ها به آب‌های زیرزمینی وارد شده و سبب آلودگی شوند. این آلاینده می‌تواند در اثر جریان آب‌های زیرزمینی منتشر و عوارض مخرب بر حاصلخیزی خاک ایجاد و آلودگی محصولات کشاورزی شده و سلامتی موجودات زنده را به خطر بیندازد [5].

امروزه، استفاده از مواد افزودنی موادی مانند پلیمرها، نانوپلیمرها، نمک‌ها، رزین‌ها، چسب‌های طبیعی و غیره به دلیل هزینه و معایب کم، اجرای آسان‌تر و سازگاری بیشتر با محیط‌زیست در تثبیت خاک مورد توجه هستند [9]. از اولین تلاش‌ها برای کاهش استفاده از سیمان و آهک، جایگزین کردن مقداری از آنها با انواع ضایعات صنعتی و کشاورزی بودند. گزینه‌های بعدی محلول کلرید کلسیم و امولسیون قیر بودند [10]. به تازگی، مواد پلیمری و نانوپلیمری عرضه شده‌اند

که با کاهش شدید فضای خالی توده خاک، و با ایجاد چسبندگی و پیوستگی زیاد در ساختار، مقاومت و استحکام را بالا می‌برند. مضرات زیست‌محیطی و آثار آلاینده پلیمرها کم بوده و از نظر اقتصادی مقرون به صرفه هستند [11, 12].

پلیمرها اولین بار در سال ۱۹۹۲ در نروژ برای بازسازی خاکریز پایه پل استفاده شدند [13]. بررسی راج و همکاران نشانگر اثر مثبت پلیمرهای مایع در بهبود خواص رس‌ها است [12]. ستونی و همکاران دریافتند که مقاومت فشاری خاک تثبیت‌شده با پلیمرها بیشتر از مقاومت نمونه‌های شاهد است [14]. اوزتاش و همکاران دریافتند که با افزایش درصد پلیمر پلی‌وینیل الکل، پایداری و مقاومت خاک ریزدانه زیاد می‌شود [15]. افزودن پلیمر اکریلیک محلول در آب به رس مقاومت تک محوری را زیاد کرده و نرخ بهبود با افزایش مقدار پلیمر و زمان عمل‌آوری افزایش می‌یابد [16].

ال-خانباشی نشان داد با زیاد شدن مقدار امولسیون پلیمر استایرن اکریلیک، مقاومت و مدول الاستیسیته ماسه زیاد می‌شود [17]. افزودن کوپلیمر امولسیون‌ی به رس، دانسیته خشک و مقاومت را بیشتر می‌کند [18]. تینگل و همکاران با افزودن امولسیون‌های پلیمری به ماسه سیلت‌دار، مقاومت تک‌محوری و سختی را افزایش دادند [19]. جورجس و همکاران با افزودن پلیمر پلی‌الکترولیت به انواع رس، مقاومت و وزن مخصوص خشک را زیاد کردند [20]. پلیمر مایع BS-100 مقاومت خاک را در مدت زمان کم زیاد و احتمال ترک‌خوردگی را کاهش داد. عملکرد این ماده در برابر یخبندان و نفوذ آب خوب بوده و در جلوگیری از نشست و آسیب‌های موجود در نواحی سردسیر نقش خوبی دارد [21].

افزودنی‌های پلی‌استر رزین مصنوعی و غیراشباع هستند که از واکنش اسیدهای آلی دو عاملی و الکل‌های چند عاملی تشکیل و در زنجیره اصلی خود گروه عاملی استر دارند [22]. پلی‌استرها به شکل مایع غلیظ بوده و پس از مخلوط با سخت‌کننده به حالت ژله‌ای درآمده و سخت می‌شوند. هنگام سفت شدن، مولکول‌ها به هم نزدیک شده و پلی‌استر سخت‌شده را نمی‌توان به حالت مایع برگرداند. برای آماده کردن پلی‌استر، با ماده شتاب‌دهنده مخلوط و به هم زده می‌شود و سپس ماده سخت‌کننده به آن افزوده می‌شود. زمان گیرش پلی‌استر به مقدار مواد شتاب‌دهنده و سخت‌کننده و دمای هوا بستگی دارد و با تغییر این عوامل می‌توان زمان گیرش را تنظیم

به آن اضافه شده و کاملاً مخلوط شد. سپس ۲/۰ درصد وزن رزین پلی استر، متیل اتیل کتون پروکسید ($C_8H_{18}O_6$) به عنوان سخت کننده افزوده شد.

۳-۲-آزماده سازی و عمل آوری نمونه ها

افزودنی پلی استر با درصدهای ۱/۰، ۲/۵، ۵/۰ و ۷/۵ و آب مقطر تا رسیدن به رطوبت بهینه به بتونیت اضافه شده و به مدت یک هفته داخل اتاقک رطوبت با دمای $25^{\circ}C$ عمل آوری شده، و آزمایش های حدود اتربرگ بر روی آنها انجام شد. بلافاصله پس از اختلاط خاک و پلی استر، برای انجام آزمایش تک محوری، نمونه های استوانه ای با ۹۸ درصد وزن مخصوص خشک حداکثر و رطوبت بهینه متناظر متراکم شدند. قطر و ارتفاع نمونه ها به ترتیب ۵ و ۱۰ سانتی متر بودند و در زمان های ۷، ۱۴ و ۲۸ روز داخل اتاقک رطوبت در دمای $25^{\circ}C$ و رطوبت نسبی ۱۰۰ درصد عمل آوری شدند.

شکل ۱. منحنی دانه بندی خاک بتونیت استفاده شده

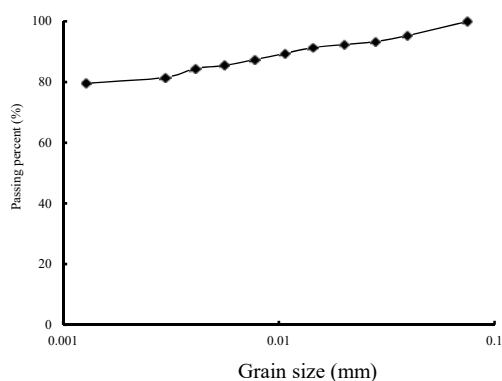


Fig.1. Grading curve of used bentonite soil.

جدول ۱. مشخصات پایه خاک بتونیت.

Property	Description
Finer than 0.075 mm	100
Liquid limit (%)	226
Plastic limit (%)	47
Plasticity index (%)	179
Optimum moisture (%)	42
Maximum dry density (kN/m^3)	12.20
Specific gravity	2.78
USCS classification	CH

Table 1. Index properties of bentonite soil

کرد [22]. آراسان و همکاران دریافتند که پلی استر در زمان کوتاه مقاومت ماسه را چند ده برابر زیاد و با افزایش زمان عمل آوری مقاومت بیشتر می شود [23].

هدف از این پژوهش، بررسی اثر رزین پلی استر بر ویژگی های خمیری و مقاومتی بتونیت است. برای این منظور، آزمایش های حدود اتربرگ و مقاومت فشاری تک محوری روی خاک بتونیت و بتونیت حاوی مقادیر مختلف رزین پلی استر انجام شد. همچنین برای ارائه مفاهیم چگونگی تأثیر این ماده بر خاک بتونیت، تصاویر SEM از نمونه ها تهیه شده و آنالیز XRD و FT-IR بر روی آنها انجام شد.

۲- مواد و روش ها

۲-۱- خاک

در این پژوهش، رس بتونیت، که حداقل ۸۵ درصد کانی های آن مونت موریلونیت است، استفاده شد [24]. بتونیت در محیط آبی ۷ تا ۲۰ برابر حجم خود آب جذب کرده و متورم می شود و به علت پیوندهای ضعیف و اندروالسی میان لایه های، لایه ها به راحتی روی یکدیگر می لغزند [25]. آزمایش های دانه بندی و هیدرومتری، حدود اتربرگ، تراکم پروکتور استاندارد و توده ویژه به ترتیب طبق روش های استاندارد ASTM D4318-10، ASTM D422-63(2007)e2، ASTM D854-14 و ASTM D698-12e2 روی بتونیت انجام شد [26-29]. منحنی دانه بندی خاک در شکل (۱) و برخی مشخصات مهم آن در جدول (۱) ارائه شده است.

برای شناسایی عناصر عمده خاک آزمون طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDAX) انجام شد. ملاحظه شد که بتونیت استفاده شده شامل عناصر اکسیژن، سیلیسیم، کلسیم، گوگرد، نیتروژن، آلومینیوم، سدیم، کربن و منیزیم با نسبت های مشخص و با فرمول عمومی $(C_{10}H_8O_4)_n (Na, CaO)(Al, Mg)(Si_4O_{10})_3 (OH)_6 nH_2O$ است و عنصر کربن و گوگرد ناخالصی آن هستند (شکل ۲).

۲-۲- ماده افزودنی

ماده پلیمری رزین پلی استر غیر اشباع با فرمول شیمیایی $(C_{10}H_8O_4)_n$ و با مشخصات جدول (۲) به عنوان ماده تثبیت کننده خاک استفاده شد. برای آماده سازی ماده پلیمری، ابتدا به میزان ۱/۰٪ وزن پلیمر، محلول کبالت نفتات ($CoC_{22}H_{14}O_4$) به عنوان شتاب دهنده واکنش

شکل ۲. آنالیز EDAX خاک بتونیت.

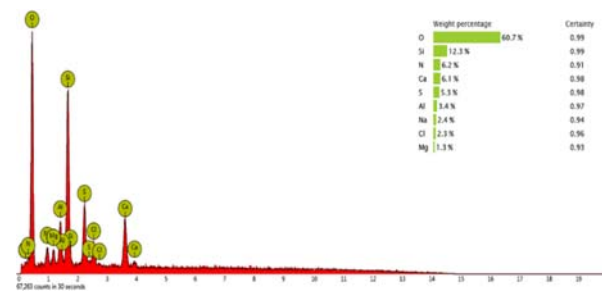


Fig. 2. EDAX analysis of bentonite soil

جدول ۲. مشخصات رزین پلی استر [30].

Property	Description
Appearance	Clear liquid
Type of resin	Unsaturated polyester resin
Viscosity (gr/cm ³)	380-480
Solid percent	63
Acid number	28
Hardness (kgf/mm ²)	> 37
Tensile strength	> 55 MPa
Flexural strength	> 100 MPa

Table 2. Properties of polyester resin [30].

۲-۴-۵- عکسبرداری میکروسکوپی (SEM)

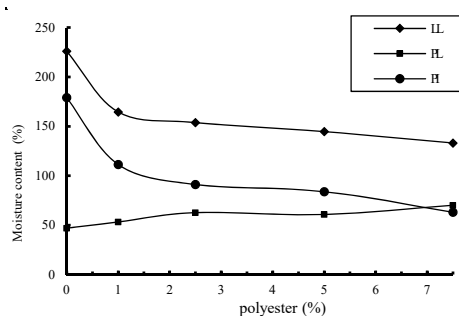
به منظور بررسی ریزساختار و توزیع فضایی بین ذرات خاک طبیعی و تثبیت شده، مشاهده دقیق تر تغییرات ایجاد شده در نمونه ها و تفسیر مناسب نتایج، عکس برداری از ریزساختار نمونه ها توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی با بزرگنمایی های مختلف صورت گرفت.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- آزمایش های حدود اتبرگ

با افزودن پلی استر حد روانی کم و حد خمیری بتونیت زیاد و به تبع آن دامنه خمیری کم شد. بدین صورت که با افزودن ۱/۰ درصد ماده پلی استر، حد روانی بتونیت از ۲۲۶٪ به ۱۶۵٪ کاهش یافت. سپس با افزایش میزان پلی استر از ۱/۰ تا ۷/۵ درصد، روند کاهش حد روانی ملایم شده و مقدار آن در ۷/۵ درصد به ۱۳۳٪ رسید. حد خمیری بتونیت با افزودن پلی استر از ۴۷٪ در بتونیت خالص به ۷۰٪ در نمونه با ۷/۵ درصد افزودنی افزایش یافت. بنابراین، دامنه خمیری بتونیت از ۱۷۹٪ به ۱۱۱٪، ۹۱٪، ۸۴٪ و ۶۳٪ به ترتیب در نمونه های حاوی ۱/۰، ۲/۵، ۵/۰ و ۷/۵ درصد پلی استر کاهش یافت (شکل ۳).

شکل ۳. اثر رزین پلی استر بر حدود اتبرگ خاک بتونیت.



۲-۴-۲- آزمایش های انجام شده

۲-۴-۱- آزمایش های حدود اتبرگ

برای تعیین ویژگی های خمیری نمونه ها، یعنی حد روانی، حد خمیری و شاخص خمیری، آزمایش حدود اتبرگ طبق استاندارد ASTM D4318-10 روی بتونیت خالص و تثبیت شده انجام گرفت [27].

۲-۴-۲- آزمایش های فشاری تک محوری

آزمایش تک محوری طبق ASTM D2166M-16 با دستگاه سه محوری بدون فشار جانبی به صورت کنترل کرنش با نرخ بارگذاری ۰/۵ mm/min انجام شد [31].

۲-۴-۳- آزمون طیف سنجی پرتو ایکس (XRD)

برای اندازه گیری میانگین فواصل بین لایه ها، تعیین موقعیت دانه ها، فهمیدن ساختار مواد ناشناخته و تعیین مشخصات ساختاری از قبیل اندازه و شکل ذرات نمونه ها از روش پراش پرتو ایکس بهره گرفته شد.

ازدیاد مقاومت نمونه‌ها می‌شود، لیکن با افزایش زمان عمل‌آوری مقاومت با شیب ملایمی زیاد می‌شود؛ یعنی اینکه ماده پلی استر در مدت زمان کم اثر خود را در بهبود مقاومت نشان داده است.

۳-۵- تغییر شکل پذیری

تغییرات مدول تغییر شکل سکانت (E_{50}) نمونه‌ها مطابق شکل (۶) نشان داد که با افزایش درصد پلی استر، مدول تغییر شکل روند افزایشی دارد. با طولانی شدن زمان عمل‌آوری شکل پذیری نمونه‌ها کم شده و نمونه‌ها با وجود مقاومت فشاری بالا حالت تردتری نسبت به بتونیت خالص دارند.

شکل ۴. منحنی‌های تنش- کرنش نمونه‌ها پس از مدت زمان عمل‌آوری: الف (۷ روزه، ب) ۱۴ روزه و ج) ۲۸ روزه.

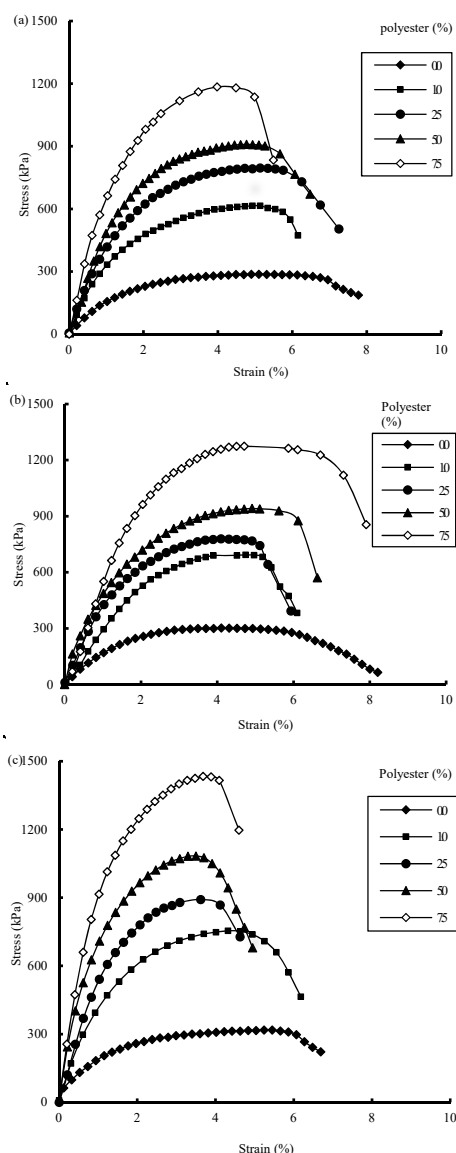


Fig. 3. Effect of polyester resin on the Atterberg limits of bentonite soil.

۳-۲- آزمایش‌های فشاری تک محوری

نتایج آزمایش‌های تک‌محوری به صورت نمودارهای تنش- کرنش، تغییرات مقاومت، تغییر شکل پذیری و چگونگی گسیختگی بر حسب مقدار افزودنی در زمان‌های عمل‌آوری مختلف در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد برای نمونه‌های ارائه خاک می‌شود.

۳-۳- منحنی‌های تنش- کرنش

نمودار تنش- کرنش نمونه‌ها در زمان‌های عمل‌آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روز در شکل (۴) آمده است. با افزایش میزان پلی استر مقاومت نمونه‌ها بیشتر و کرنش گسیختگی آنها کمتر شده است و رفتار خاک ترد و شکننده‌تر شده است. همچنین با بیشتر شدن مدت زمان عمل‌آوری، مقاومت خاک‌های تثبیت شده به مراتب زیاد شده است.

۳-۴- مقاومت فشاری تک محوری

تغییرات مقاومت فشاری تک‌محوری خاک با مقدار افزودنی، در زمان‌های عمل‌آوری مختلف در شکل (۵) آمده است. با افزودن ۱/۰، ۲/۵، ۵/۰ و ۷/۵ درصد پلی استر به بتونیت، پس از ۷ روز عمل‌آوری، مقاومت خاک از ۲۹۸ کیلوپاسکال به ترتیب به ۵۹۶، ۷۸۷، ۹۰۹ و ۱۱۶۴ کیلوپاسکال رسیده است. پس از ۱۴ روز، مقاومت از ۳۱۳ کیلوپاسکال به ترتیب به ۷۱۲، ۸۰۳، ۹۷۴ و ۱۲۸۱ کیلوپاسکال و در عمل‌آوری ۲۸ روز، از ۳۰۹ کیلوپاسکال به ترتیب به ۷۳۴، ۸۷۶، ۱۱۰۷ و ۱۳۹۴ کیلوپاسکال رسیده است. یعنی اینکه افزودن ۱/۰، ۲/۵، ۵/۰ و ۷/۵ درصد پلی استر به بتونیت، مقاومت تک محوری را در مدت زمان ۷ روز عمل‌آوری به ترتیب تا ۱۰۰٪، ۱۶۴٪، ۲۰۵٪ و ۲۹۱٪، در مدت زمان ۱۴ روز عمل‌آوری به ترتیب تا ۱۲۷٪، ۱۵۶٪، ۲۱۱٪ و ۳۰۹٪ و در مدت زمان عمل‌آوری ۲۸ روز نیز به ترتیب تا ۱۳۷٪، ۱۸۳٪، ۲۵۸٪ و ۳۵۰٪ افزایش داده است.

نرخ افزایش مقاومت تا ۱/۰ درصد پلی استر با شیب تند و بعد از آن تا ۷/۵ درصد افزودنی، با شیب کمتری زیاد می‌شود. یعنی اینکه افزایش چند برابری پلی استر منجر به افزایش چند برابری مقاومت نمی‌شود. طولانی بودن زمان عمل‌آوری منجر به

افزایش مقاومت و کاهش ویژگی‌های خمیری بنتونیت می‌باشد. با گذشت زمان عمل‌آوری تغییرات ایجاد شده مشهودتر است.

۸-۳- آنالیز طیف‌سنجی پراش پرتو ایکس

نتایج آزمون طیف‌سنجی پراش پرتو ایکس بنتونیت خالص و تثبیت‌شده، در زمان‌های عمل‌آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روز در شکل (۹) آمده است. در هر سه زمان عمل‌آوری، طیف‌های شاخص نمونه خالص در زوایای $9^\circ, 20^\circ, 23^\circ, 27^\circ, 28^\circ, 30^\circ, 36^\circ$ و $54^\circ, 62^\circ$ و در نمونه‌های تثبیت‌شده با ۲/۵ و ۵ درصد پلی‌استر در زوایای $20^\circ, 23^\circ, 27^\circ, 30^\circ, 36^\circ, 54^\circ, 62^\circ$ دیده می‌شوند. پیک‌های شاخص نمونه‌های تثبیت‌شده دارای شدت‌های کم و حالت پهن‌تری نسبت به نمونه خالص دارند و پیک زاویه $20^\circ, 29^\circ$ به کل حذف شده است. تغییرات نشانگر نزدیک شدن لایه‌های خاک به هم هست که سبب افزایش مقاومت شده است. در نمونه‌های تثبیت‌شده، پیک جدیدی ایجاد نشده و بیانگر عدم تشکیل ساختار جدید در خاک است.

۹-۳- آزمون تبدیل فوریه مادون قرمز

طیف‌های مادون قرمز مطابق شکل (۱۰) نشان می‌دهند که بین بنتونیت و پلی‌استر برهم‌کنش مؤثری صورت گرفته و این ماده با نفوذ در ساختار خاک سبب افزایش مقاومت شده است. پیک‌های ایجاد شده در ناحیه مابین 3400 cm^{-1} تا 3600 cm^{-1} مربوط به حضور آب در ساختار خاک می‌باشد که گروه عاملی (H-O) در ناحیه $3447/55\text{ cm}^{-1}$ خود را نشان داده است. گروه عاملی کربونیل (C=O-)، که پیک شاخصه مربوط به پلی‌استر می‌باشد، در ناحیه 1650 cm^{-1} تا 1750 cm^{-1} خود را نشان می‌دهد که در خاک تثبیت‌شده با ۲/۵ و ۵/۰ درصد پلی‌استر به ترتیب در نواحی $1734/7\text{ cm}^{-1}$ و $1728/98\text{ cm}^{-1}$ ایجاد شده است. شدت این پیک در نمونه با افزودنی زیاد بیشتر می‌باشد. به‌طوری که شدت آن در ۲/۵ و ۵/۰ درصد پلی‌استر به ترتیب ۹۷٪ و ۴۷٪ است و نشانگر مشارکت بیشتر پلی‌استر در ساختار خاک است.

Fig. 4. Stress-strain curves of specimens after curing time of: a) 7 days, b) 14 days, and c) 28 days.

شکل ۵. اثر افزودنی پلی‌استر بر مقاومت تک‌محوری بنتونیت.

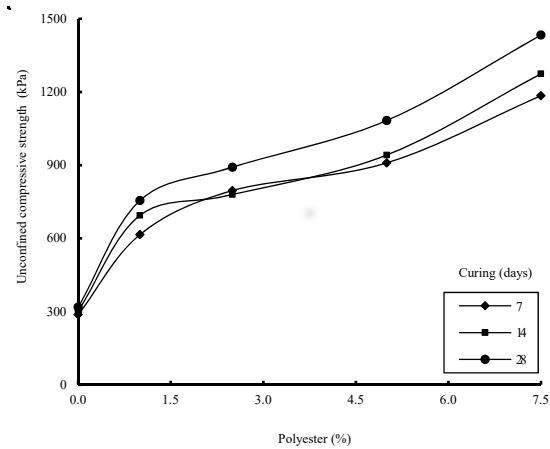


Fig. 5. Effect of polyester stabilizer on unconfined strength of bentonite soil.

شکل ۶. اثر ماده پلی‌استر بر مدول تغییر شکل بنتونیت.

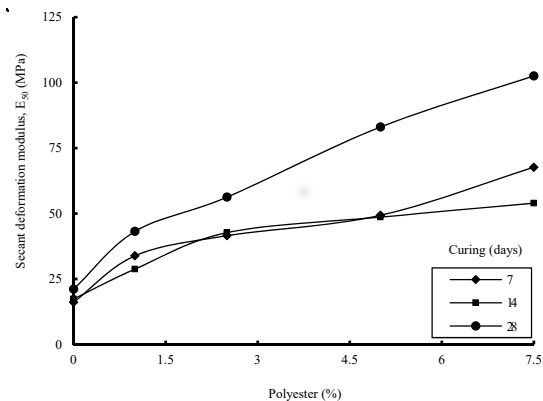


Fig. 6. The Effect of polyester material on deformation modulus of bentonite.

۷-۳- تصاویر میکروسکوپی روبشی (SEM)

تصاویر میکروسکوپی نمونه‌ها مطابق شکل (۸) نشان می‌دهند که ساختار بنتونیت صفحات نازک لایه‌لایه بوده و بین آنها حفرات ریز و درشتی وجود دارند، ولی ساختار نمونه تثبیت‌شده با پلی‌استر، از حالت لایه‌ای به فولوکوله درآمده و به ساختار خاک‌های درشت‌دانه نزدیک‌تر شده است. یعنی افزودن پلی‌استر باعث چسبیدن ذرات ریز خاک به هم و بزرگ شدن اندازه آنها شده است. همچنین، حفرات ریز بین ذرات پر شده و تعداد آنها کاهش یافته، ولی اندازه حفرات بین دانه‌های درشت بزرگتر شده است. تغییر ساختار از حالت لایه‌لایه به دانه‌ای شکل از عوامل

stabilized with 5% polyester cured 14 and 28 days respectively

شکل ۹. نتایج آنالیز XRD بنتونیت خالص و تثبیت شده در زمانهای عمل آوری: الف) ۷ روز، ب) ۱۴ روز و ج) ۲۸ روز.

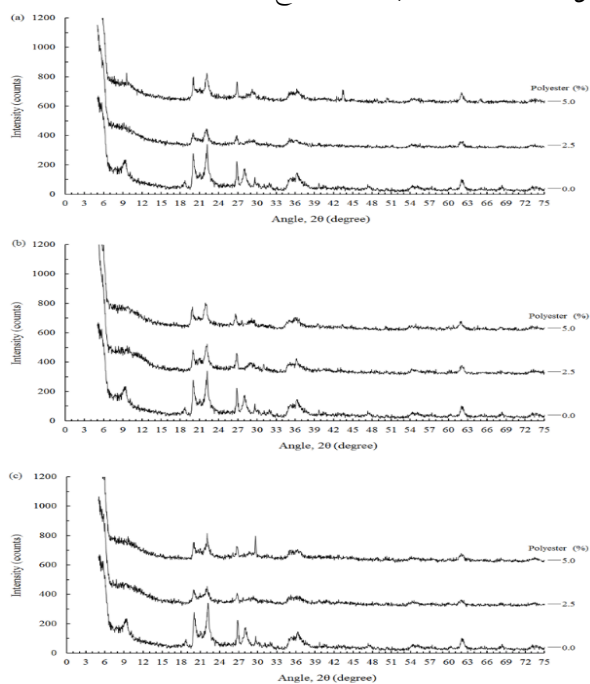


Fig. 9. Results of XRD analysis of pure and stabilized bentonite after curing time of: a) 7 days, b) 14 days, and c) 28 days.

شکل ۱۰. نتایج آزمون طیفسنجی FT-IR نمونه‌ها پس از ۲۸ روز عمل آوری: الف) بنتونیت خالص، ب) بنتونیت حاوی ۲/۵٪ پلی استر و ج) بنتونیت حاوی ۵/۰٪ پلی استر.

شکل ۷. چگونگی گسیختگی نمونه‌های: الف) تثبیت نشده، و ب) تا ر) تثبیت شده به ترتیب با ۱/۰، ۲/۵، ۵/۰ و ۷ درصد پلی استر.

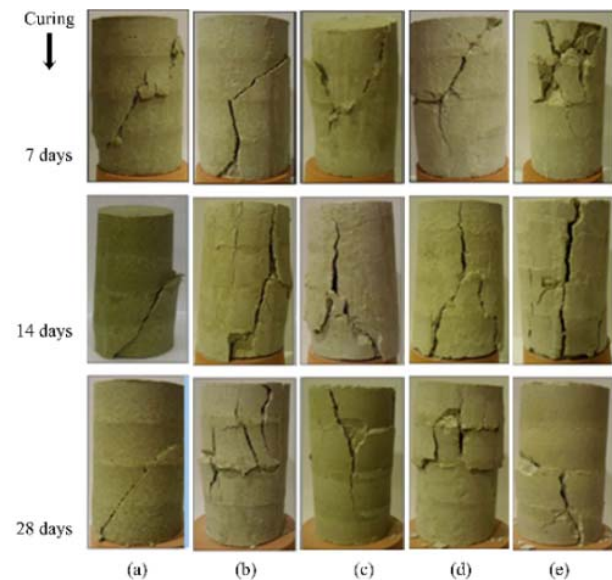


Fig. 7. Failure mechanism of samples cured at different times: a) pure bentonite, and b-e) bentonite stabilized with 1.0, 2.5, 5.0 and 7.5 percent polyester resin respectively.

شکل ۸. تصاویر میکروسکوپی روبشی با بزرگنمایی‌های ۵ و ۱۰ میکرومتر برای نمونه‌های: الف) تثبیت نشده، ب) و ج) به ترتیب بنتونیت تثبیت شده با ۵٪ پلی استر در زمانهای عمل آوری ۱۴ و ۲۸ روز.

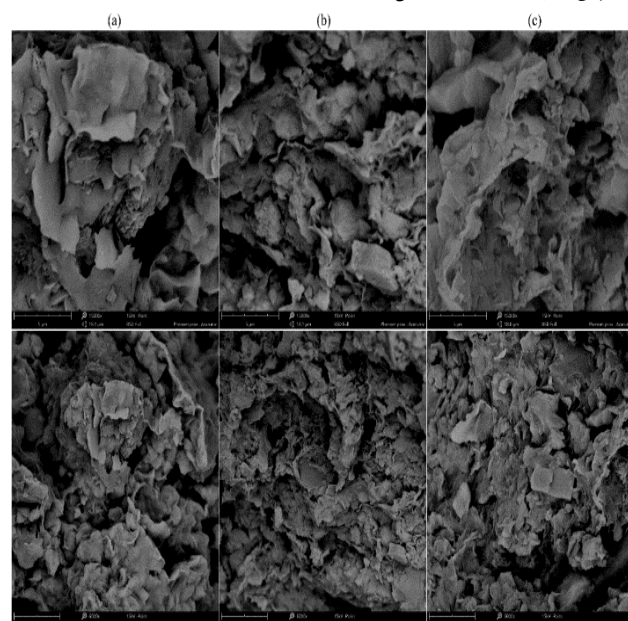


Fig. 8. Field microscopic images with different magnifications: a) pure bentonite; b) and c) bentonite

۵- تشکر و قدردانی

این پژوهش با حمایت مالی دانشگاه شهید مدنی آذربایجان انجام شده است. به این وسیله از همه مسئولین دانشگاه تشکر و قدردانی می‌شود.

۶- منابع و مراجع

- [1] Cherian R.A. & Shyla Joseph, A. 2017 A comparative study on the influence of traditional, non-traditional and by-product stabilizers on geotechnical properties of Kuttanad clay. *International Research Journal of Engineering and Technology (RJET)*, 4(3), 2521-2536.
- [2] Zarei Y., Nikoodel M.R. & Orumiyei A. 2011 Study and comparison of the effect of cement and lime addition on strength properties of soft clay soils in Mahshahr port in saturated conditions. *6th National Congress of Civil Engineering*, Semnan, Semnan University (In Persian).
- [3] Wallace A., Wallace G.A. & Abouzamzam A.M. 1986 Amelioration of sodic soils with polymers. *Soil Science*, 141(5), 359-362.
- [4] Cheshomi A., Eshaghi A. & Hassanpour J. 2017 Effect of lime and fly ash on swelling percentage and Atterberg limits of sulfate-bearing clay. *Applied Clay Science*, 135, 190-198.
- [5] Budaghpour S. & Kalhor K. 2014 Stabilization of lime soils using its lime and its environmental and economic impacts. *The First National Conference on Soil Mechanics and Pioneering Engineering*, Tehran Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran (In Persian).
- [6] Fenjanchi M. 2014 Environmental impact assessment of Sufian cement factory and determination of effective strategies for reducing environmental pollution in the cement industry of Iran. *7th National Conference and Specialized Exhibition of Environmental Engineering*, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran (In Persian).

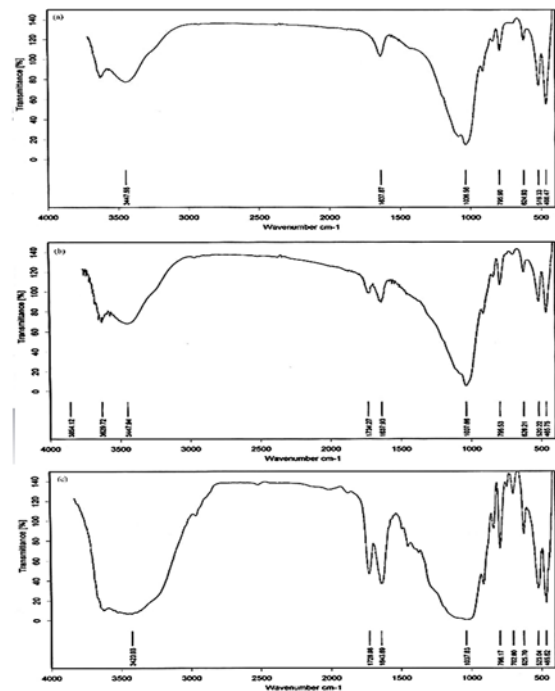


Fig. 10. Results of FTIR spectroscopy of bentonite after 28 days curing: a) pure bentonite, b and c) stabilized with 2.5% and 5.0% polyester resin respectively.

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، اثر ماده پلیمری پلی استر بر حدود اتبرگ و مقاومت تک‌محوری خاک بنتونیت بررسی شد و اهم نتایج حاصل از این پژوهش شامل موارد زیر است:

- افزودن پلی استر به بنتونیت سبب کاهش حد روانی و افزایش حد خمیری شده و به تبع آن دامنه خمیری کم می‌شود. مقدار کاهش حد روانی و دامنه خمیری نمونه‌های حاوی ۷/۵ درصد پلی استر به ترتیب حدود ۴۱٪ و ۶۵٪ است.
- افزودن رزین پلی استر مقاومت تک‌محوری بنتونیت را افزایش داده و نرخ افزایش به مقدار افزودنی و زمان عمل‌آوری بستگی دارد. ماده پلی استر در مدت زمان کم اثر خود را در بهبود مقاومت نشان داده و گذشت زمان باعث بالا رفتن مقاومت نمونه‌ها شد.
- وجود رزین پلی استر تغییر شکل‌پذیری بنتونیت را کاهش می‌دهد، و نمونه‌ها با وجود مقاومت فشاری بالا حالت تردتری نسبت به بنتونیت خالص دارند.
- علت بهبود ویژگی‌های خمیری و مقاومت خاک تثبیت‌شده این است که رزین پلی استر در بین لایه‌های ساختار خاک نفوذ کرده و با ایجاد برهم‌کنش مؤثر باعث می‌شود لایه‌ها به هم نزدیک شده یا به یکدیگر بچسبند.

- Transportation Agency, Tehran, Iran (In Persian).
- [17] Al-Khanbashi A. and El-Gamal M. 2003 Modification of sandy soil using water borne polymer. *Journal of Applied Polymer Science*, **88**(10), 2484-2491.
- [18] Farzi Gh.A. & Nasiriyani N. 2015 Study the effect of Methyl Methacrylic emulsion copolymer-Acrylic Butyl on mechanical properties of clayey soil. *2st National Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Qom, Iran, 14-15 (In Persian).
- [19] Tingle J.S., Larson S.L., Weiss C.A., Newman J.K. & Peters J.F. 2004 Constitutive analyses of nontraditional stabilization additives. No. *ERDC-TR-04-5*.
- [20] Georgees R.N., Hassan R.A., Evans R.P. & Jegatheesan P. 2015 Effect of the use of a polymeric stabilizing additive on unconfined compressive strength of soils. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (2473), 200-208.
- [21] Chen Y., Dai W.T. & Wang L. 2010 Test study on road performance of soils stabilized by liquid stabilizer in seasonally frozen regions. In *ICCTP: Integrated Transportation Systems: Green, Intelligent, Reliable*, 3245-3252.
- [22] Richardson T.L. & Lokensgard E. 2004 Industrial plastics: Theory and applications. *Cengage Learning*.
- [23] Arasan S., Isik F., Akbulut R.K., Zaimoglu A.S. & Nasirpur O. 2015 Rapid stabilization of sands with deep mixing method using polyester. *Periodica Polytechnica. Civil Engineering*, **59**(3), 405-411.
- [24] Shadi K. 2012 Bentonite of soil with thousands of uses. *Art Ganj Publishing*, Tehran (In Persian).
- [25] Hosterman J.W. & Patterson S.H. 1992 Bentonite and fuller's earth resources of the United States. *U.S. Geological Survey Bulletin*, 1522, 45 p.
- [26] ASTM D422-63(2007)e2. 2007 Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils (Withdrawn 2016), ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [27] ASTM D4318-10e1. 2010 Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and
- [7] Malhotra V.M. 1999 Making concrete "greener" with fly ash. *Concrete International*, **21**(5), 61-66.
- [8] Shahrkhezadeh M. 2001 Reducing the environmental impact of concrete. *Quarterly Journal of Iranian Concrete Institute*, **5**, 18-24.
- [9] Latifi N., Marto A. & Eisazadeh A. 2016 Physicochemical behavior of tropical laterite soil stabilized with non-traditional additive. *Acta Geotechnica*, **11**(2), 433-443.
- [10] Scholen D.E. 1995 Stabilizer in nonstandard stabilizers. In: *Proceeding of 6th International Conference on Low-Volume Roads*, 2, TRB, National Academy Press, June 25-29, Washington, mechanisms DC, 252-260.
- [11] Abadjieva T. 2001 Chemical stabilization for low cost roads in Botswana", In: *Proceeding of First Road Transportation Technology Transfe Conference in Africa*, Arusha, Tanzania, 409-414.
- [12] Rauch A.F., Harmon J.S., Katz I. & Liljestrand H.M., 2001 Liquid soil stabilizer: Measured effects on engineering properties of clay" In: *Proceedings of 81th Annual Transportation Board Meeting*, Washington, DC, 33-41.
- [13] Zandieh A.R. & Yasrobi S.S. 2007 Study of factor affecting the compressive strength of sandy soil stabilized with polymer. *Department of Civil Engineering, Tarbiatmodares University*, Tehran, Iran (In Persian).
- [14] Santoni R.L., Tingle J.S. & Nieves M. 2005 Accelerated strength improvement of silty sand with non-traditional additives. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 1936, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 34-42.
- [15] Oztas T., Ozbek A. & Aksakal L. 2002 Structural developments in soil treated with polyvinyl alcohol. *Proceedings of the International Conference on Sustainable Land Use and Management*. Soil Sci. Soc. of Turkey Int. Symp. 143-148.
- [16] Abootalebi-Esfahani M. and Ataee M. 2016 Improving the properties of road bonding with polymer. *8th Conference on Asphalt and Asphalt Mixes*, Road, Housing & Urban Development Research Holder, Road

- Plasticity Index of Soils, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [28] ASTM D698-12e2. 2012 Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12,400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³)), ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [29] ASTM D854-14. 2014 Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [30] Bonyan Kala. 2014 Technical Information Unsaturated polyester resin BUP 612", (<http://www.bonyankala.com>) Site of the manufacturer of the product.
- [31] ASTM D2166M-16. 2016 Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil, ASTM International, West Conshohocken, PA.

Effect of Polyester Polymer Resin on Atterberg Limits and Unconfined Strength of Bentonite Soil

Hossein Soltani-Jigheh¹, Abdolreza Abri², Ayat Asadiyan Tarakomeh³

1. Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University
2. Assistant Professor, Chemical Department, Faculty of Basic Sciences, Azarbaijan Shahid Madani University
3. Master in Geotechnical Engineering, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University

Abstract

Fine-grained soils consist of high content clay minerals generally have high strength in dry state, but they loss their strength when they absorb water as well as they may be swell. These phenomenon may lead to damage the structures located on them and it is required to stabilize these soils with different additive materials. Common additives for stabilization of fine-grained problematic soils are cement, lime, fly ash, etc., which are almost costly and have environmental consequences. Nowadays, non-traditional materials such as polymeric additives were added to the soils in order to their stabilization. In this research, the effect of polyester polymer resin on the physical and mechanical properties of fine-grained bentonite soil, with liquid limit and plasticity index of 226% and 179% respectively, was studied by performing Atterberg limits and unconfined strength tests. For this purpose, a polyester polymer resin were added to the bentonite soil with various amount of 1.0, 2.5, 5.0, and 7.5 percent in dry weight. Soil mixtures were cured about 7 days and Atterberg tests were performed on them. Moreover, cylindrical specimens with 50 mm in diameter and 100 mm in height were prepared and cured during 7, 14 and 28 days. Soil specimens compacted in a splitted steel mold at four equal thickness layers. Then, the unconfined compression tests were carried out on these specimens with loading rate of 0.5 mm/min. The results of Atterberg tests indicated that the addition of polyester polymer resin reduces liquid limit and increases plastic limit of bentonite soil and consequently it is led to decrease in plasticity index of the soil. Maximum decrements in liquid limit and plasticity index observed in treated soil with 7.5 percent polyester, which are about 41.0 and 65.0 percent respectively. In addition, the polyester resin improves the unconfined compressive strength of the soil and the rate of increment is high when the polyester amount rises from 0 to 7.5%. It was revealed that the polyester resin influences the unconfined strength considerably in a short time. For example, adding 5.0 percent polyester polymer resin to bentonite soil improves the strength up to 2.05, 2.11 and 2.58 times respectively after curing times of 7, 14 and 28 days. It also means that after 7 day curing time the improvement effect of stabilizer is considerable and by passing time its effect diminishes. Moreover, adding polyester polymer resin to the soil decreases deformability of soil; it means that this additive causes the treated soil exhibits more brittle behavior rather than the pure soil. The photos of specimen after failure explain that failure surface of pure bentonite is inclined in relation with horizontal, while it tends to vertical direction in treated specimens. Analysis of SEM images, XRD analysis and FTIR spectroscopy suggest that polyester stabilizer penetrates into the layers of soil particles and, by inducing effective interaction makes the layers closer or sticks them together. These phenomena make the soil aggregates larger, decrease the water absorbing tendency in soil minerals and improve the plastic characteristics and the shear strength of the soil.

Keywords: Soil stabilization; polyester; unconfined strength; SEM images; XRD analysis; FTIR