****

مجله علمی – پژوهشی

مهندسی عمران مدرس

دوره بیست یکم، شماره 6، سال1400

**تأثير ماده پليمری رزین پلی‌استر بر حدود اتربرگ و مقاومت تک‌‌محوری خاک‌ بنتونیت**

**حسین سلطانی جیقه1\*، عبدالرضا ابری2، آیت اسدیان تراکمه3**

1. دانشیار گروه مهندسی عمران دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه شهید مدنی آذربایجان
2. استادیارگروه شیمی دانشکده علوم پایه دانشگاه شهید مدنی آذربایجان
3. کارشناس ارشد مهندسی ژئوتکنیک گروه مهندسی عمران دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه شهید مدنی آذربایجان

[**hsoltani@azaruniv.ac.ir**](mailto:hsoltani@azaruniv.ac.ir)

\*

تاریخ دریافت 18/08/97 تاریخ پذیرش: 09/06/98

**چکيده**

افزودنی‌های رایج در تثبيت خاک‌های مسئله‌دار، سیمان، آهک و غیره است که پرهزینه‌ و دارای مضررات زیست‌محیطی هستند. از جمله راهکارهای جدید جایگزین کردن آنها با افزودنی‌های جدید مانند پلیمرها است. در این پژوهش، اثر رزین پلیمری پلی‌استر 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 مقادير مختلف رزین پلیمری پلی‌استر‌ 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 تغییرشکل‌پذیری آن شده است. زیاد شدن مدت زمان عمل‌آوری سبب بهبود هرچه بیشتر این ویژگی‌ها نیز می‌شود. تحليل تصاوير ميکروسکوپ الکترونی، آنالیز XRD و طیف‌سنجی FTIR حاکي 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 کليدي:** تثبيت بنتونیت؛ رزین پلی‌استر؛ مقاومت تک‌محوري؛ عکس‌برداري الکتروني؛ آنالیز XRD؛ طیف‌سنجی FT-IR.

**1- مقدمه**

خاک‌های ریزدانه حاوی درصد زیادی از کانی‌های رسی (به ویژه مونت‌موریلونیت) در حالت خشک مقاومت نسبتاً خوبی دارند، ولی به علت ساختار ویژه و بار منفی در سطح کانی‌ها، در حضور آب رطوبت بیشتری جذب کرده و به حالت خمیری در آمده و متورم می‌‌شوند. همچنین رطوبت باعث کاهش مقاومت این خاک‌ها و در نتیجه ظرفیت باربری آنها می‌‌شود. همچنین، ممکن است به دلیل نشست‌ بیشتر در قشرهای زیرسطحی متشکل از این خاک‌ها، تغییرشکل‌های وسیع و مخرب در سازه‌های ساخته شده روی آنها یا خود سازه خاکی ایجاد شود. وجود چنین خاک‌های مسئله‌دار و نبود مصالح با کیفیت در محل، منجر به جابه‌جايي زياد مصالح و افزايش هزينه ساخت سازه‌هاي عمرانی می‌شود. بنابراین، از دیدگاه اقتصادی، مهندسین سعی می‌کنند تا بیشترین استفاده را از مصالح محلي داشته ‌باشند.

از این‌رو، برای افزایش مقاومت و ظرفیت باربري، کنترل خواص خمیری و نشست، و جلوگيري از تورم، خاک‌های مسئله‌دار با مواد افزودنی تثبیت می‌شوند تا مصالح تثبیت‌شده بتواند بدون تحمل تغییرشکل‌های زیاد، بارهای وارد شده را تحمل نماید [2 ,1]. مواد افزودنی سنتی و متداول سیمان، آهک و غیره هستند که با وجود بهبود ویژگی‌های خاک، آثار زیست‌محیطی نامطلوبی دارند [4, 3] . این آثار در مراحل تولید، بهره‌برداری و بعد از آن وجود دارد که شامل آلودگي هوا و آب‌هاي زيرزميني منطقه، از بين رفتن پوشش گياهي و غیره هستند [5].

با توجه به تولید و استفاده سیمان و آهک در حجم زیاد، انرژی زیادی صرف آنها می‌شود که یکی از موجب ایجاد گازهای گلخانه‌ای است. برای نمونه، یک تن سیمان پرتلند نیاز به چهار گیگاژول انرژی دارد که به ازای آن یک تن دی‌اکسید کربن وارد اتمسفر می‌شود [7, 6]. در نتیجه، هفت درصد از دی‌اکسیدکربن موجود در اتمسفر به دلیل تولید سالانه 9/6 میلیارد تن سیمان در جهان است. علاوه بر آن، استخراج مواد خام برای تولید سیمان، آهک و همچنین زغال سنگ برای تأمین سوخت موجب تشدید جنگل‌زدائی و از بین رفتن لایه‌‌های خاک‌ می‌شود [8]. از سوی دیگر، اضافه شدن بیش از حد آهک به خاک باعث بوجود آمدن واکنش‌های ثانویه‌ای شده، که مواد خروجی حاصل از واکنش‌ها با حل شدن در آب ورودی به آب‌های زیرزمینی وارد، و سبب آلودگی می‌شوند. در اثر جریان آب‌های زیرزمینی، این آلاینده می‌تواند به مکان‌های دیگر انتشار یافته و سبب ایجاد عوارض مخرب روی حاصل‌خیزی خاک و آلودگی محصولات کشاورزی شود. همچنین آب‌های زیرزمینی آلوده با ورود به سایر منابع آبی منطقه، سلامتی موجودات زنده را به خطر می‌اندازند [5].

امروزه با پیشرفت علوم، استفاده از مواد افزودنی با هزینه و معایب کم، اجرای آسان‌تر و سازگاری بیشتر با محیط زیست، در تثبیت خاک مورد توجه قرار گرفته است که موادی مانند پلیمرها، نانوپلیمرها، نمک‌ها، رزین‌ها، اسیدها، آنزیم‌ها، چسب‌های طبیعی و غیره از جمله آنها هستند [9]. از اولین تلاش‌ها برای کاهش استفاده از سیمان و آهک، جایگزین کردن مقداری از آنها با انواع ضايعات صنعتی شامل سرباره کوره آهن‌گدازی، گرد کوره سیمان، خاکستر بادی، و میکروسیلیس، انواع ضايعات کشاورزی شامل کاه گندم و سبوس برنج، ضايعات درخت خرما و غیره بودند. گزینه‌های بعدی محلول کلرید کلسیم و امولسیون قیر بودند که امروزه نیز مصرف می‌شوند [10]. در دهه‌های اخیر، مواد پلیمری و نانوپلیمری با ضرر زیست‌محیطی خیلی کم به بازار عرضه شده‌اند که با کاهش شديد فضای خالی توده خاک چسبندگی شديدی ايجاده کرده و با ایجاد پیوستگی بیشتر در ساختار خاک، مقاومت و استحکام آن را بالا می‌برند. آثار آلاینده پلیمر‌ها به محیط زيست کم بوده و از نظر اقتصادی مقرون به صرفه بودن آنها تأيید شده است [11, 12].

پلیمرها برای اولین بار در سال 1992 در نروژ برای بازسازی خاکريز پايه پل استفاده شدند [13]. بررسی ماکروسکوپی و میکروسکوپی راچ و همکاران نشانگر تأثیر مثبت پلیمرهای مایع در بهبود خواص خاک‌های رسی است [12]. سنتونی و همکاران مشاهده نمودند که مقاومت فشاری خاک تثبیت‌شده با پلیمرهای طبیعی و مصنوعی بیشتر از مقاومت فشاری نمونه‌های شاهد است [14]. اوزتاش و همکاران به این نتیجه رسیدند که، پس از 42 ساعت‌ عمل‌آوری نمونه‌ها، با افزایش درصد پلیمر پلی‌وینیل الکل، پایداری مصالح خاکی ریزدانه، استحکام و مقاومت آنها به طور چشمگیری زیاد می‌شود [15]. افزودن پلیمر اکریلیک محلول در آب به خاک‌های رسی نشان داد که مقاومت فشاری تک محوری به طور مشخص زیاد شده و نرخ افزایش مقاومت در 8 روز اول بیشتر بوده و پس از آن تا 14 روز تقریباً ثابت مانده است. همچنین مقاومت تک محوری با افزایش مقدار پلیمر و مدت زمان عمل‌آوری افزایش می‌یابد [16].

ال- خانباشی اثر ماده امولسیون پایه آبی از پلیمر استایرن اکریلیک را به دو حالت افزودن پلیمر با روش اسپري و مخلوط نمودن به ماسه تراکم‌‌‌ناپذیر بررسی کرد. در هر دو روش تهیه نمونه‌ها، مقاومت فشاري و مدول الاستیسیته با افزایش میزان پلیمر به‌طور خطی زیاد شد [17]. افزودن کوپلیمر امولسیونی متیل متاکریلیک بوتیل اکریلیک به خاک رس منجر به افزایش دانسیته خشک و مقاومت خاک شد که ماکزیمم مقاومت در عرض یک هفته حاصل شد [18]. تینگل و همكاران با افزودن شش نوع امولسیون پلیمری به خاک ماسه‌ای سیلت‌دار، مقاومت فشاری تک ‌محوری و سختی خاک را افزایش دادند [19]. جورجس و همکاران نشان دادند که با افزودن پلیمر پلی‌الکترولیت به سه نوع رس، مقاومت فشاری و وزن مخصوص خشک آنها افزایش می‌یابد [20]. پلیمر مایع BS-100 نیز مقاومت خاک را در مدت زمان کم زیاد نموده و منجر به کاهش زمان ساخت سازه‌ها شده و احتمال ترک‌خوردگی را کاهش می‌دهد. آزمایش‌ها‌ نشان می‌دهند که این ماده در برابر آثار ناشی از یخبندان و نفوذ آب عملکرد بسیار خوبی داشته و در جلوگیری از نشست و دیگر آسیب‌های ناشی از مناطق سردسیر نقش بسیار خوبی دارد [21].

یکی از مواد پلیمر‌ی که در صنایع مختلف مانند صنایع سنگ طبیعی و مصنوعی، کشتی‌سازی، پروفیل‌سازی، چسب و… کاربرد دارد رزین‌های پلی‌استر هستند [22]. این پلیمرها نوعی رزین مصنوعی و غیراشباع هستند که از واکنش اسیدهاي آلی دو‌ عاملی و الکل‌هاي چند عاملی تشکیل می‌شوند و در زنجیره اصلی خود گروه عاملی استر دارند [23]. پلی‌استرها در ابتدا به شکل مایع نسبتاً غلیظ هستند و مدتی پس از مخلوط با سخت‌کننده به حالت ژله‌ای در‌آمده و سپس سخت و محکم می‌شوند. به هنگام سفت شدن پلی‌استر، مولکول‌ها به هم نزدیک شده و پلی‌استر سخت شده را دیگر نمی‌توان به حالت مایع برگرداند. مناسب‌ترین شرایط برای کار با پلی‌استر، دمای 20 درجه است. پلی‌استرها می‌توانند توسط مقادیر متنوعی از شتابگرها و پروکسیدها پخت شوند. سخت‌کننده‌ها معمولاً پروکسیدهای آلی مثل بنزوئیل‌ پروکساید یا متیل‌اتیل‌کتون پروکسید و شتاب‌دهنده‌ها هم معمولاً کبالت و یا آمین هستند. برای آماده کردن پلی‌استر، اول ماده شتاب‌دهنده در آن ریخته و خوب 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 کرد [23]. آراسان و همکاران دریافتند که پلی‌استر در مدت زمان کوتاه مقاومت ماسه را چند ده برابر زیاد می‌کند و با افزایش زمان عمل‌آوری مقاومت زیاد ‌می‌شود [24].

هدف از این پژوهش، بررسی اثر رزین پلی‌استر بر ویژگی‌های خمیری و مقاومتی بنتونیت است. برای این منظور، آزمایش‌های حدود اتربرگ و مقاومت فشاری تک‌محوری روی خاک بنتونیت و بنتونیت حاوی مقادیر مختلف رزین‌پلی‌استر انجام شد. همچنین برای ارائه مفاهیم چگونگی تأثیر این ماده بر خاک بنتونیت تصاویرSEM از نمونه‌ها تهیه شده و آنالیز XRD و FT-IR روی آنها انجام شد.

**2- مواد و روش‌ها**

**2-1- خاک**

مونت‌موریلونیت کانی فعال اغلب خاک‌های ریزدانه‌ای است که بیشتر مشکلات خاک‌های رسی را ایجاد می‌کند. به همین خاطر در اين پژوهش، از خاک رس ريزدانه بنتونیت با خواص خميري بالا استفاد شد که کمینه ۸۵ درصد کانی‌های تشکیل‌دهنده آن، کانی مونت‌موریلونیت است [25]. بنتونیت در محیط آبی بین هفت تا بیست برابر حجم خود آب جذب کرده و متورم می‌شود و به علت وجود پیوندهای ضعیف واندروالسی میان لایه‌های بنتونیت، لایه‌ها به راحتی روی یکدیگر می‌لغزند. هر گرم از این خاک دارای سطح بزرگ ۶۰۰ تا ۸۰۰ مترمربع است [26].

برای شناسایی ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی پایه این خاک آزمایش‌های دانه‌بندی و هیدرومتری طبق استاندارد ASTM D422-63(2007)e2، حدود اتربرگ طبق استاندارد ASTM D4318-10، تراکم پروکتور استاندارد طبق روش ASTM D698-12e2 و وزن مخصوص نسبی مطابق روش ASTM D854-14 بر روی آن انجام شدند [27-30]. منحنی دانه‌بندی این خاک در شکل (1) و برخی از مشخصات مهم آن در جدول (1) ارائه شده است.

برای شناسایی عناصر عمده تشکیل‌دهنده خاک آزمون طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDAX) انجام شد و نتایج آن در شکل ‌(2) ارائه شده است. ملاحظه می‌شود بنتونیت استفاده شده شامل عناصر اکسیژن، سیلسیوم، کلسیم، گوگرد، نیتروژن، آلومینیوم، سدیم، کلر و منیزیم، با نسبت‌های مشخص، و با فرمول عمومی (Na, CaO)(Al, Mg)(Si4O10)3 (OH)6 nH2O است و عنصر کلر و گوگرد ناخالصی این خاک هستند.

**شکل 1.** منحني دانه‌بندي خاک بنتونیت مورد استفاده**.**



**Fig. 1.** Grading curve of used bentonite soil.

**جدول 1.** مشخصات پایه خاک بنتونیت.

|  |  |
| --- | --- |
| Description | Property |
| 100 | Finer than 0.075 mm |
| 226 | Liquid limit (%) |
| 47 | Plastic limit (%) |
| 179 | Plasticity index (%) |
| 42 | Optimum moisture (%) |
| 12.20 | Maximum dry density (kN/m3) |
| 2.78 | Specific gravity |
| CH | USCS classification |

**Table 1.** Index properties of bentonite soil.

**2-2- ماده افزودنی**

ماده پلیمری رزین پلی‌استر غیراشباع با فرمول شیمیایی (C10H8O4)n و با مشخصات ارائه شده در جدول (2) به عنوان ماده تثبیت‌کننده خاک استفاده شد. برای آماده‌سازی ماده پلیمری، ابتدا به میزان 0/1% وزن پلیمر، محلول کبالت نفتات (CoC22H14O4) به عنوان شتاب‌‌دهنده‌ واکنش به آن اضافه ‌شده و کاملاً مخلوط ‌شد. سپس 0/2% وزن رزین پلی‌استر، متیل‌اتیل کتون پروکسید (C8H18O6) به عنوان سخت‌کننده افزوده شد.

**جدول 2.** مشخصات فیزیکی و شیمیایی رزین پلی‌استر [31].

|  |  |
| --- | --- |
| Description | Property |
| Clear liquid | Appearance |
| Unsaturated polyester resin | Type of resin |
| 380-480 | Viscosity (gr/cm3) |
| 63 | Solid percent |
| 28 | Acid number |
| > 37 | Hardness (kgf/mm2) |
| > 55 MPa | Tensile strength |
| > 100 MPa | Flexural strength |

**Table 2.** Physical and chemical properties of polyester resin [31].

**2-3-آماده‌سازی و عمل‌آوری نمونه‌ها‌**

ماده افزودنی پلی‌استر با مقادیر 0/1%، 5/2%، 0/5% و 5/7% و آب مقطر تا رسیدن به رطوبت بهینه به خاک بنتونیت اضافه شده و به مدت یک هفته در داخل اتاقک رطوبت با دمای °C25 عمل‌آوری شده و آزمایش‌های حدود اتربرگ روی آنها انجام شد. همچنین، بلافاصله پس از اختلاط خاک و پلی‌استر، برای انجام آزمایش‌های تک محوری نمونه‌های استوانه‌ای با 98 درصد وزن مخصوص خشک بیشنه و رطوبت بهینه متناظر تهیه شدند. قطر و ارتفاع این نمونه‌ها‌ به ترتیب 5 و 10 سانتی‌متر بودند که در 4 لایه با ضخامت مساوی متراکم شده و در مدت زمان‌های 7، 14 و 28 روز در داخل اتاقک رطوبت در دمای °C25 و رطوبت نسبی 100 % عمل‌آوری شدند.

**2-4- آزمايش‌هاي انجام شده**

2-4-1-آزمايش‌هاي حدود اتربرگ

برای تعیین ویژگی‌های خمیری نمونه‌ها، یعنی حد روانی، حد خمیری و شاخص خمیری، آزمایش‌ حدود اتربرگ طبق استاندارد ASTM D4318–10 روی بنتونیت خالص و تثبیت ‌شده انجام گرفت [28].

**2-4-2- آزمايش‌هاي فشاری تک محوری**

آزمایش تک‌محوری طبق استاندارد ASTM D2166M-16 با دستگاه سه‌محوری بدون فشار جانبی و به صورت کنترل کرنش با سرعت بارگذاری mm/min 5/0 انجام شد [32].

**2-4-3- آزمون‌ طیف‌سنجی پرتو ایکس (XRD)**

روش پراش پرتو ایکس از آن جهت که روش مستقیمی در تعیین نوع فازها و ساختار مواد است، بسیار اهمیت دارد. بنابراین، برای اندازه‌گيري ميانگين فواصل بين لايه‌ها، تعيين موقعيت دانه‌ها، فهميدن ساختار مواد ناشناخته و تعيين مشخصات ساختاري از قبیل اندازه و شكل ذرات نمونه‌های آزمایش شده از این آزمون بهره گرفته شد.

**2-4-4- آنالیز تبدیل فوریه مادون قرمز (FTIR)**

مشابه اثر انگشت هیچ دو مولکولی با ساختار مشابه طیف مادون‌قرمز مشابهی تولید نمی‌کنند و ساختار مولکولی مواد نیز خالص است. این شاخصه، طیف‌سنجی مادون قرمز را برای آنالیز انواع مختلف مواد مفید می‌سازد. در این پژوهش، برای تشخیص مواد مجهول ایجاد شده احتمالی، تعیین کیفیت یا یکنواختی نمونه‌ها، آنالیز و شناسایی مخلوط ترکیبات نمونه‌ها، تعیین ساختار و نوع پیوند بین ذرات در نمونه‌ها از این آنالیز استفاده شد.

**2-4-5- عکس‌برداري ميکروسکوپی (SEM)**

به منظور بررسي ريزساختار و توزيع فضايي بين ذرات خاک طبيعي و تثبيت‌شده، مشاهده دقیق‌تر وضعیت و تغییرات ایجاد شده در نمونه‌ها و تفسير مناسب نتايج، عکس‌برداري از ريزساختار نمونه‌ها توسط ميکروسکوپ الکتروني روبشي با بزرگ‌نمایی‌های مختلف صورت گرفت**.**

**3- نتايج و بحث**

**3-1- آزمایش‌های حدود اتربرگ**

تغییرات حدود اتربرگ خاک‌ بنتونیت با میزان پلی‌استر در شکل (3) ارائه شده است. دیده می‌شود که با افزودن رزین پلی‌استر حد روانی کم و حد خمیری زیاد شده و به پیروی از آن دامنه خمیری کاهش ‌یافته است. بدین صورت که با افزودن 0/1 درصد ماده پلی‌استر، حد روانی از 226% برای نمونه خالص به 165% در نمونه تثبیت‌ شده کاهش یافته است. بعد از آن با افزایش میزان پلی‌استر از 0/1 تا 5/7 درصد، روند کاهش حد روانی ملایم شده و مقدار آن در 5/7 درصد به 133% رسیده است. حد خمیری بنتونیت با افزودن ماده پلی‌استر از 47% در بنتونیت خالص به 70% در نمونه حاوی 5/7 درصد افزودنی زیاد شده است. بنابراین، دامنه خمیری خاک بنتونیت از 179% به 111%، 91%، 84% و 63% به ترتیب برای نمونه‌های تثبیت‌شده با مقادیر 0/1، 5/2، 0/5 و 5/7 درصد ماده پلی‌استر کاهش یافته است.

**شکل 2.** آنالیز EDAX خاک بنتونیت.

**Fig. 2.** EDAX analysis of bentonite soil.

**شکل 3.** اثر رزین پلی‌استر برحدود اتربرگ خاک بنتونیت.



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

**3-2- آزمایش‌های فشاری تک ‌محوری**

نتایج آزمایش‌های تک‌محوری به صورت نمودارهای تنش-کرنش، تغییرات مقاومت تک محوری، تغییرشکل‌پذیری وچگونگی گسیختگی برحسب مقدار ماده افزودنی در زمان‌های عمل‌آوری 7، 14 و 28 روز در دمای 25 درجه سانتی‌گراد برای نمونه‌های خاک‌ آزمایش شده ارائه می‌شود.

**3- 3- منحنی‌های تنش- کرنش**

نمودار تنش- کرنش نمونه‌های خالص و تثبیت‌شده بنتونیت در زمان‌های عمل‌آوری 7، 14 و 28 روز در شکل‌ (4) آمده است. با افزایش میزان پلی‌استر 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 تثبیت‌شده به مراتب زیاد شده است‌.

**شکل 4.** منحنی‌های تنش- کرنش نمونه‌ها پس از مدت زمان عمل‌آوری: الف) 7 روزه، ب) 14 روزه و ج) 28 روزه

.

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

**3-4- مقاومت فشاری تک محوری**

تغییرات مقاومت فشاری تک‌محوری خاک‌ با مقدار افزودنی، در زمان­های عمل­آوری 7، 14 و 28 روز، در شکل (5) آمده است. با افزودن 0/1، 5/2، 0/5 و 5/7 درصد پلی‌استر به بنتونیت، پس از 7 روز عمل‌آوری، مقاومت خاک از 298 کیلوپاسکال به ترتیب به 596، 787، 909 و 1164 کیلوپاسکال رسیده است. پس از 14 روز عمل‌آوری، مقاومت از 313 کیلوپاسکال به ترتیب به 712، 803، 974 و 1281 کیلوپاسکال و در عمل‌آوری 28 روز، از 309 کیلوپاسکال به ترتیب به 734، 876، 1107 و 1394 کیلوپاسکال رسیده است. یعنی اینکه افزودن 0/1، 5/2، 0/5 و 5/7 درصد پلی‌استر به بنتونیت، مقاومت تک محوری را در مدت زمان 7 روز عمل‌آوری به ترتیب تا 100%، 164%، 205% و 291%، در مدت زمان 14 روز عمل‌آوری به ترتیب تا 127%، 156%، 211% و 309% و در مدت زمان عمل‌آوری 28 روز نیز به ترتیب تا 137%، 183%، 258% و 350% افزایش داده است.

با مقایسه منحنی‌‌های شکل (5) می‌توان گفت که افزایش میزان رزین پلی‌استر همواره باعث افزایش مقاومت خاک بنتونیت شده است. نرخ افزایش مقاومت تا 0/1 درصد پلی‌استر با شیب تند بوده و بعد از آن تا 5/7 درصد ماده افزودنی، با شیب کمتری افزایش می‌یابد. این بدین معنی است که افزایش چند برابری ماده پلی‌استر منجر به افزایش چند برابری مقاومت نمی‌شود. طولانی بودن زمان عمل‌آوری نیز منجر به ازدیاد مقاومت نمونه‌ها می‌شود، لیکن با افزایش زمان عمل‌آوری از 7 روز به 28 روز مقاومت نمونه‌ها با شیب ملایمی زیاد می‌شود؛ یعنی اینکه ماده پلی‌استر در مدت زمان کم اثر خود را در بهبود مقاومت نشان داده است.

**3-5- تغییرشکل‌پذیری**

برای ارزیابی اثر رزین پلی‌استر بر میزان شکل­پذیری خاک بنتونیت، تغییرات مدول تغییرشکل سکانت (E50) نمونه­ها بر حسب مقدار پلی‌استر در زمان­های عمل‌آوری مختلف در شکل (6) ارائه شده است. از این شکل‌ مشاهده می‌شود که با افزایش درصد پلی‌استر، در هر سه زمان عمل­آوری، تغییرات مدول تغییرشکل همواره روند افزایشی دارد. همچنین با زیاد شدن زمان عمل‌آوری مدول تغییرشکل بیشتر می‌شود؛ یعنی اینکه شکل‌پذیری نمونه­ها کم شده و نمونه‌ها با وجود مقاومت فشاری بالا حالت تردتری نسبت به بنتونیت خالص دارند.

**شکل 5.** اثر افزودنی پلی‎استر بر مقاومت تک‌‌محوری بنتونیت.



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

**شکل 6.** اثر ماده پلی‎استر بر مدول تغییرشکل بنتونیت.

****

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

**3-6- چگونگی گسیختگی نمونه‌ها**

تصاویر نمونه‌ها بعد از گسیختگی در پایان آزمایش تک‌محوری در شکل‌ (7) ارائه شده است. ملاحظه می‌شود که در خاک بنتونیت تثبیت ‌نشده در هر سه زمان عمل‌آوری صفحه گسیختگی به صورت مورب است، و در نمونه‌های حاوی رزین پلی‌استر با افزایش مقدار ماده صفحه شکست کم کم از حالت منظم خارج شده، و به حالت قائم یا به صورت خیلی به هم ریخته و نامشخص در آمده است.

**شکل 7.** چگونگی گسیختگی نمونه‌های: الف) تثبیت‌نشده، و ب) تا ر‍) تثبیت‌شده به ترتیب با 0/1، 5/2، 0/5 و 7 درصد پلی‌استر.

****

**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**.**

**3-7- تصاویر میکروسکوپی روبشی (SEM)**

تصاویر عکس­برداری میکروسکوپی روبشی برخی نمونه‌ها در بزرگ­نمایی­های 5 و 10 میکرومتر در شکل (8) ارائه شده است. دیده می­شود که ساختار بنتونیت خالص به حالت صفحات نازک لایه‌لایهاست و بین آنها حفرهای ریز و درشتی وجود دارند، ولی در نمونه تثبیت ‌شده با پلی‌استر ساختار از حالت لایه‌ای به حالت فولوکوله درآمده و بافت خاک به ساختار خاک‌های درشت دانه نزدیک‌تر شده است. یعنی افزودن پلی‌استر باعث شده ذرات ریز خاک به هم چسبند‌ه و اندزه آنها بزرگتر شود. همچنین، حفرهای ریز بین ذرات پر شده و تعداد آنها کاهش یافته، ولی اندازه حفرهای بین دانه‌های درشت تشکیل شده بزرگتر شده است. با گذشت زمان این تغییرات واضح‌تر شده‌اند. تغییر ساختار از حالت لایه لایه به صورت دانه‌ای شکل از عوامل افزایش مقاومت و کاهش ویژگی‌های خمیری بنتونیت است. این روند در نمونه تثبیت شده با زمان عمل‌آوری 28 روزه مشهودتر است.

**3-8- آنالیز طیف‌سنجی پراش پرتو ایکس (XRD)**

نتایج آزمون طیف‌سنجی پراش پرتو ایکس نمونه‌های خاک‌ بنتونیت خالص و تثبیت شده، در زمان‌های عمل‌آوری 7، 14 و 28 روز در شکل‌ (9) ارائه شده است. در هر سه زمان عمل‌آوری، طیف‌های شاخص نمونه خالص در زوایای 2θ = 9°, 20°, 23°, 27°, 28°, 30°, 36°, 54°, 62° و در نمونه‌های تثبیت‌شده با 5/2 و 5 درصد پلی‌استر نیز در زوایای 2θ = 20°, 23°, 27°, 30°, 36°, 54°, 62° دیده می‌شوند. ملاحظه می‌شود که پیک‌های شاخص نمونه‌های تثبیت‌شده دارای شدت‌های کم و حالت‌ پهن‌تری نسبت به نمونه خالص دارند و پیک زاویه 2θ = 9°, 29° به کل حذف شده است. این تغییرات نشان‌دهنده نزدیک شدن لایه‌های تشکیل‌دهنده خاک بنتونیت به هم است که سبب افزایش مقاومت شده است. همچنین مشاهده می‌شود که در نمونه‌های ‌تثبیت‌شده با پلی‌استر، پیک جدیدی ایجاد نشده است و این هم بیانگر عدم تشکیل ساختار جدید در خاک است.

**3-9- آزمون طیف‌سنجی تبدیل فوریه مادون‌قرمز**

از تجزیه و تحلیل طیف‌های مادون قرمز نشان داده شده در شکل (10) دیده می‌شود که بین خاک‌ بنتونیت و رزین پلی‌استر برهم‌کنش مؤثری صورت گرفته و این ماده به ساختار خاک نفوذ کرده و با تغییر ساختار منجر به افزایش مقاومت خاک شده است. پیک‌های ایجاد شده در ناحیه مابین cm-1 3400 تا cm-1 3600 مربوط به حضور آب در ساختار خاک است که گروه عاملی (H-O) در این خاک در ناحیه cm-1 55/3447 خود را نشان داده است. گروه عاملی کربونیل (-C=O-) که پیک شاخصه مربوط به پلی‌استر است در ناحیه cm-1 1650 تا cm-1 1750 خود را نشان می‌دهد که مطابق شکل (10) در خاک بنتونیت تثبیت‌شده با 5/2 و 0/5 درصد پلی‌استر به ترتیب در نواحی cm-1 7/1734 و cm-1 98/1728 ایجاد شده است.

**شکل 8**.تصاویر میکروسکوپی روبشی با بزرگنمایی‌های 5 و 10 میکرومتر برای نمونه‌های: الف) تثبیت‌نشده، ب) و ج) به ترتیب بنتونیت تثبیت‌شده با 5% پلی‌استر در زمان‌های عمل‌آوری 14 و 28 روز**.**



**Fig. 8**. Field microscopic images with different magnifications: a) pure bentonite; b) and c) bentonite stabilized with 5% polyester cured 14 and 28 days respectively**.**

**شکل 9.** نتایج آنالیز XRD بنتونیت خالص و تثبیت‌شده با پلی‌استر در زمان‌های عمل‌آوری: الف) 7 روز، ب) 14 روز و ج) 28 روز.



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

**شکل 10.** نتایج آزمون طیف‌سنجی FT-IR نمونه‌ها پس از 28 روز عمل‌آوری: الف) بنتونیت خالص، ب) بنتونیت حاوی 5/2% پلی‌استر و ج) بنتونیت حاوی 0/5% پلی‌استر.



**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.

ملاحظه میشود که شدت این پیک در نمونه با افزودنی زیاد بیشتر است. بدین حالت که شدت آن در 5/2 و0/5 درصد پلی‌استر به ترتیب 97% و 47% است و نشانگر مشارکت بیشتر پلی‌استر در ساختار خاک تثبیت‌شده است.

**4- نتیجه‌گیری**

در اين پژوهش، اثر ماده پليمري رزین پلی‌استر بر حدود اتربرگ و مقاومت تک‌محوری خاک‌ بنتونیت مورد بررسي قرار گرفته است و اهم نتايج حاصل از اين پژوهش شامل موارد زیر است:

- افزودن رزین پلی‌استر به خاک بنتونیت سبب کاهش حد روانی و افزایش حد خمیری می‌شود و به تبع آن‌ دامنه خمیری کم می‌شود. مقدار کاهش حد روانی و دامنه خمیری نمونه‌های حاوی 5/7 درصد پلی‌استر به ترتیب حدود 41% و 65% است.

- افزودن رزین پلی‌استر مقاومت تک‌محوری خاک بنتونیت را افزایش داده و نرخ افزایش به مقدار ماده افزودنی و زمان عمل‌آوری بستگی دارد. ماده پلی‌استر در مدت زمان کم اثر خود را در بهبود مقاومت نشان داده و گذشت زمان باعث بالا رفتن مقاومت نمونه‌ها می‌شود؛ به طوری که افزودن 0/1، 5/2، 0/5 و 5/7 درصد رزین پلی‌استر، پس از 28 روز، مقاومت تک محوری بنتونیت را به ترتیب تا 137%، 183%، 258% و 350% افزایش داده است.

- وجود رزین پلی‌استر تغییرشکل‌پذیری 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 تثبیت‌ شده این است که رزین پلی‌استر در بین لایه‌های ساختار خاک نفوذ کرده و با ایجاد برهم‌کنش مؤثر باعث می‌شود لایه‌ها به هم نزدیک شده یا به یکدیگر بچسبند.

**5- تشکر و قدرداني**

اين پژوهش با حمايت مالي دانشگاه شهيد مدني آذربايجان انجام شده است. بدينوسيله از همه مسئولين دانشگاه تشکر و قدرداني مي‌شود.

**6- منابع**

1. Cherian, R.A. and Shyla Joseph, A. “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), pp. 2521-2536 (2017).
2. Zarei, Y., Nikoodel, M.R. and Orumiyei, A. “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 (2011) (In Persian).
3. Wallace, A., Wallace, G.A. and Abouzamzam, A.M. “Amelioration of sodic soils with polymers”, *Soil Science*, **141**(5), pp. 359-362 (1986).
4. Cheshomi, A., Eshaghi, A. and Hassanpour, J. “Effect of lime and fly ash on swelling percentage and Atterberg limits of sulfate-bearing clay”, *Applied Clay Science*, **135**, pp. 190-198 (2017).
5. Budaghpour, S. and Kalhor, K. “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 (2014) (In Persian).
6. Fenjanchi, M. “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 (2014) (In Persian).
7. Malhotra, V.M. “Making concrete" greener" with fly ash”, *Concrete International*, **21**(5), pp. 61-66 (1999).
8. Shakrkhizadeh, M. “Reducing the environmental impact of concrete”, *Quarterly Journal of Iranian Concrete Institute*, **5**, pp. 18-24 (2001).
9. Latifi, N., Marto, A., and Eisazadeh, A. “Physicochemical behavior of tropical laterite soil stabilized with non-traditional additive”. *Acta Geotechnica*, **11**(2), pp. 433-443 (2016).
10. Scholen, D.E., “Stabilizer mechanisms in nonstandard stabilizers”, *In: Proceeding of 6th International Conference on Low-Volume Roads*, 2, TRB, National Academy Press, June 25-29, Washington, DC, pp. 252-260 (1995).
11. Abadjieva, T. “Chemical stabilization for low cost roads in Botswana”, *In:* *Proceeding of First Road Transportation Technology Transfe Conference in Africa*, Arusha, Tanzania, pp. 409-414 (2001).
12. Rauch, A.F., Harmon, J.S., Katz, I., and Liljestrand, H.M., “Liquid soil stabilizer: Measured effects on engineering properties of clay” *In: Proceedings of 81th Annual Transportation Board Meeting*, Washington, DC, pp. 33-41 (2001).
13. Zandieh, A.R. and Yasrobi, S.S. “Study of factor affecting the compressive strength of sandy soil stabilized with polymer”, Department of Civil Engineering, Tarbiatmodares University, Tehran, Iran (2007).
14. Santoni, R.L., Tingle, J.S., and Nieves, M. “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., pp. 34–42 (2005).
15. Oztas, T., A. Ozbek, and L. Aksakal. “Structural developments in soil treated with polyvinyl alcohol”, *In: Proceedings of International Conference on Sustainable Land Use and Management*, Kanakkale, Turkey, 10-13, pp.143-148, (2007).
16. Abootalebi-Esfahani, M. and Ataee, M. “Improving the properties of road bonding with polymer”, 8th Conference on Asphalt and Asphalt Mixes, [Road, Housing & Urban Development Research](https://en.symposia.ir/ListUniversity/178/1) Holder, Road Transportation Agency, Tehran, Iran, (2016) (In Persian).
17. Al-Khanbashi, A., and El-Gamal, M., “Modification of sandy soil using water borne polymer”, *Journal of Applied Polymer Science*, 88 (10), pp. 2484-2491 (2003).
18. Farzi, Gh.A. and Nasiriyan, N., “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 (2015) (In Persian).
19. Tingle, J.S., Larson, S.L., Weiss, C.A., Newman, J.K., and Peters, J.F., “Constitutive analyses of nontraditional stabilization additives”, No. ERDC-TR-04-5 (2004).
20. Georgees, R.N., Hassan, R.A., Evans, R.P., and Jegatheesan, P. “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), pp. 200-208 (2015).
21. Chen, Y., Dai, W.T., and Wang, L. “Test study on road performance of soils stabilized by liquid stabilizer in seasonally frozen regions”, *In ICCTP: Integrated Transportation Systems: Green, Intelligent, Reliable*, pp. 3245-3252 (2010).
22. Samadi, A. and Hosseini, S.M. “Study of morphology and thermal stability of polyester-clay nanocomposites”, *Third National Conference on New Technologies in Chemistry, Petrochemical and Nano*, Iran, Tehran, Industrial Research Center, (2017) (In Persian).
23. Richardson, T.L., and Lokensgard, E. “Industrial plastics: Theory and applications”, *Cengage Learning*, (2004).
24. Arasan, S., Isik, F., Akbulut, R.K., Zaimoglu, A.S. and Nasirpur, O. “Rapid stabilization of sands with deep mixing method using polyester”, *Periodica Polytechnica. Civil Engineering*, **59** (3), pp. 405-411 (2015).
25. Shadi, K. “Bentonite of soil with thousands of uses”, *Art Ganj Publishing*, Tehran (2012) (In Persian).
26. Hosterman, J.W. and Patterson, S.H. “Bentonite and fuller’s earth resources of the United States”, U.S. Geological Survey Bulletin 1522, 45 p (1992).
27. ASTM D422-63(2007)e2, Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils (Withdrawn 2016), ASTM International, West Conshohocken, PA, (2007).
28. ASTM D4318-10e1, Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils, ASTM International, West Conshohocken, PA, (2010).
29. ASTM D698-12e2 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, (2012).
30. ASTM D854-14 Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer, ASTM International, West Conshohocken, PA, (2014).
31. Bonyankala, “Technical Information Unsaturated polyester resin BUP 612”, (http://www.bonyankala.com) Site of the manufacturer of the product, (2014).
32. ASTM D2166M-16, Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil, ASTM International, West Conshohocken, PA, (2016).

**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, especially those consist of high content clay minerals, generally have high strength in dry state, but they loss their strength when subjected to 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 them with different additive materials. Common additives for stabilization of problematic soils are cement, lime, fly ash, etc., which are almost costly and have environmental consequences. Nowadays, non-traditional material such as polymeric materials 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 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 resin reduces liquid limit and increases plastic limit of bentonite 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, and the rate of improvement gradually decreases with passing 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 cause 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, results of 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 decrease water absorbing tendency in soil minerals and improve the plastic characteristics and shear strength of the soil.

**Keywords:** Bentonite stabilization; polyester resin; unconfined strength; SEM images; XRD analysis; FT-IR spectroscopy

.