

اثر ماستیک پلی یورتان B بر خصوصیات مکانیکی خاک‌های رمنده

ساحل سهرابی شکفتی^۱ و سیدحبيب موسوی جهرمی^{۲*}

^۱ دانشجوی دکتری عمران، دانشکده عمران، دانشگاه تبریز

^۲ استاد دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

چکیده

در طبیعت خاک‌هایی یافت می‌شوند که با افزایش درصد رطوبت تحت تنش ثابت، میزان کاهش حجم بسیار زیادی از خود نشان می‌دهند. این خاک‌ها به خاک‌های رمنده موسوم‌اند. با توجه به گستره خاک‌های رمنده در مناطق مختلف و همچنین به دلیل اهمیت اجرای پروژه‌های عمرانی در محل وجود این خاک‌ها، تثبیت این خاک‌ها از اهمیت خاصی برخوردار است. در این تحقیق جهت تثبیت خاک‌های رمنده از درصد اختلاط‌های مختلف از ماده پلی‌یورتان B که یکی از الاستومرهای پرمصرف مهندسی در جهان است، استفاده شده است. خاک مورد نظر از منطقه حمیدیه در نزدیکی شهر اهواز جمع‌آوری گردیده و آزمایشات ژئوتکنیکی اولیه روی آن انجام شده است. سپس آزمایش برش مستقیم به منظور بررسی میزان تأثیر این ماده روی پارامترهای مقاومت برشی انجام گرفته و در نهایت تأثیر این ماده روی میزان رمنندگی خاک بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد این ماده پارامترهای مقاومت برشی را تغییر داده و شاخص رمنندگی را کاهش می‌دهد. به طوری که به ازای درصد اختلاط ۵، میزان شاخص رمنندگی ۹۲٪ کاهش یافته است.

واژگان کلیدی: خاک رمنده، آزمایش برش مستقیم، شاخص رمنندگی، پلی‌یورتان B.

۱- مقدمه

ایران وجود دارند. اما شرایط حاکم بر محیط‌های خشک بیشتر مستعد تشکیل خاک‌های رمنده می‌باشد [۲]. با توجه به گسترش نسبتاً وسیع این خاک‌ها و لزوم طراحی سدها، کانال‌های آبیاری و سایر ابنیه‌های فنی در این مناطق و نیز با توجه به توسعه شهرنشینی و لزوم گسترش برخی شهرهای بزرگ روی این خاک‌ها، بررسی تثبیت و بهسازی خاک‌های رمنده از اهمیت دو چندان برخوردار می‌شود [۳]. تحقیقات بسیاری در مورد تثبیت و بهسازی انواع خاک‌ها انجام گرفته است که در ادامه به برخی از آن‌ها اشاره می‌گردد. Alawaji در سال ۲۰۰۱ آزمایشاتی را جهت تثبیت خاک رمنده با استفاده از ماسه- ژئوگرید انجام داد. وی نتیجه گرفت که تثبیت با استفاده از این ترکیب، موجب ۹۵٪ کاهش در میزان نشست، ۲۰۰٪ افزایش در مدول الاستیسیته و ۳۲۰٪ افزایش ظرفیت باربری می‌شود. همچنین نتایج او نشان دادند که تأثیر ماسه- ژئوگرید با افزایش پهنای ژئوگرید و کاهش عمق ژئوگرید افزایش پیدا می‌کند [۴]. وکیلی و همکاران در سال ۱۳۸۷ آزمایشاتی را روی خاک رمنده انجام دادند و افزایش آهک و زمان عمل‌آوری را روی میزان رمنندگی خاک بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که در صورتی که در اصلاح خاک رمنده زمان کافی وجود داشته باشد، درصد اختلاط بهینه آهک، ۳٪ و در شرایطی که زمان کافی در اختیار نباشد، درصد اختلاط بهینه ۵٪ می‌باشد. آن‌ها با انجام آزمایش تک محوری روی خاک رمنده به این

یکی از مهم‌ترین مسائل ژئوتکنیکی که کاربری طرح را می‌تواند تحت تأثیر قرار دهد و یا منجر به تخریب آن گردد، خاک‌های مسئله‌دار می‌باشد. خاک‌های مسئله‌دار به خاک‌های واگرا، متورم شونده، رمنده، روانگرا و انحلال‌پذیر اطلاق می‌شود. در این تحقیق به طور خاص به خاک‌های رمنده پرداخته شده است. رمنندگی به ریزش ناگهانی خاک اطلاق می‌شود در اثر از بین رفتن مقاومت عامل پیوند دهنده ذرات خاک ایجاد می‌شود میزان رمنندگی ایجاد شده وابسته به نسبت تخلخل اولیه خاک است [۱]. ویژگی‌های اصلی که باعث می‌شوند خاک‌ها خصوصیات فروریزی از خود نشان دهند، عبارتند از: میزان لای بالا (بیش از ۳۰٪)، تخلخل بالا (بیش از ۴۰٪)، درجه اشباع پایین (زیر ۶۰٪) و نرم‌شدگی سریع در آب [۲]. خاک‌های رمنده در حالت طبیعی با درصد رطوبت اندک، دارای مقاومت ظاهری نسبتاً زیادی هستند. ولی پس از جذب رطوبت و اشباع شدن، فضای خالی بین ذره‌ها شدیداً کاهش می‌یابد و خردشدگی در ساختار خاک به وجود می‌آید که منجر به نشست‌های ناگهانی و نامتقارن در خاک می‌گردد. این موضوع می‌تواند عواقب جبران‌ناپذیری برای سازه‌ای که روی این خاک احداث شده است به دنبال داشته باشد. این گونه خاک‌ها بیشتر در نواحی گرم و خشک و مناطق بیابانی یافت می‌شوند. البته خاک‌های رمنده منحصر به نواحی خشک نبوده و در اغلب نقاط دنیا بالاخص

با توجه به تحقیقات انجام شده در زمینه خاک‌های رمبنده مشخص گردید که برای انجام هرگونه عملیات ساخت و ساز روی این نوع خاک‌ها بایستی ساختمان آن‌ها اصلاح گردد. از آن‌جا که بهسازی ساختمان این خاک‌ها با مواد مختلف نتایج متفاوتی را در پی دارد، در این تحقیق تأثیر ماده پلی یورتان B با درصد اختلاط‌های مختلف (۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲، ۳ و ۵ درصد وزنی)، بر بهبود ساختمان خاک‌های رمبنده مورد بررسی قرار گرفته و پارامترهای مقاومت برشی و شاخص رمبندگی برای این درصد‌های اختلاط به دست آمده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- ماده پلی یورتان B

پلی یورتان B یکی از الاستومرهای پرمصرف مهندسی با کاربردهای فراوان در جهان است که از واکنش یک دی ایزوسیانات با دی‌ال یا دی‌آمین تشکیل شده و عمدتاً شامل دو بخش نرم و سخت هستند. بخش نرم زنجیره متیلنی یک پلی‌اتر یا پلی‌استر پلی‌ال با وزن مولکولی بالا بوده و بخش سخت نیز شامل عوامل یورتان، یا گروه آروماتیکی در دی‌ایزوسیانات است. این الاستومر دارای خواص منحصر به فردی از جمله مقاومت مکانیکی و سایشی بالا، انعطاف‌پذیری در دمای پایین، قابلیت تراش و کشسانی زیاد و مقاومت در برابر جذب آب، روغن‌ها و حلال‌ها است. مهم‌ترین ویژگی این گروه از پلیمرها این است که پس از واکنش، ساختاری پایدار بوجود می‌آید. با توجه به خواص ذکر شده در مورد پلی یورتان B در این تحقیق از این ماده جهت بهسازی ساختار خاک‌های رمبنده استفاده شده است. این ماده مایع و دارای رنگ قهوه‌ای سوخته می‌باشد که شکل (۱) نمایی از این ماده را نشان می‌دهد.



شکل ۱- نمایی از پلی یورتان B

نتیجه رسیدند که با افزایش درصد آهک و زمان عمل‌آوری مقاومت تک محوری نمونه‌ها افزایش می‌یابد [۵]. محمدعلی-زاده رفیعی در سال ۱۳۸۸ آزمایشاتی را جهت تثبیت خاک رمبنده واقع در ایستگاه راه آهن سمنان با استفاده از تزریق آهک و سیمان انجام داد و به این نتیجه رسید که تزریق آهک و سیمان، پتانسیل رمبندگی را ۷۰٪ کاهش می‌دهد و با انجام آزمایش سه محوری CU به این نتیجه رسید که پس از انجام تزریق افزایش قابل ملاحظه‌ای در مشخصات مقاومت برشی خاک ایجاد شده است [۶]. Ghrici و Harichane اثر آهک و پوزولانی را بر شاخص خمیری خاک‌های رسی (CL و CH) بررسی کرده‌اند و به این نتیجه رسیدند که با افزایش آهک یا پوزولانی به خاک‌های رسی، شاخص خمیری کاهش می‌یابد و هنگامی که هر دو ماده به خاک اضافه می‌شود، برای خاک‌های CH حد مایع کاهش و حد خمیری افزایش می‌یابد که کاهش شاخص خمیری را در پی خواهد داشت. در مورد خاک‌های CL افزودن این مواد به خاک، تغییر قابل ملاحظه‌ای در حد مایع به وجود نمی‌آورد و فقط حد خمیری افزایش می‌یابد که کاهش شاخص خمیری را در پی خواهد داشت. طبق بررسی‌های آن‌ها مقدار این کاهش به ازای ۴٪ آهک و پوزولانی قابل ملاحظه خواهد بود. استفاده از آهک تنها و آهک+پوزولانی، خاک را از گروه CL و یا CH به گروه MH تغییر می‌دهد [۷]. Ziaie Moayed و همکاران در سال ۲۰۱۰ آزمایشاتی را برای تثبیت خاک‌های رمبنده (مطالعه موردی جاده هشتگرد- طالقان) انجام دادند. آن‌ها تأثیر هم‌زمان آهک و میکروسیلیس را روی خاک با درصد اختلاط ۲٪ آهک و درصد اختلاط ۱٪، ۳٪ و ۵٪ میکروسیلیس بررسی نمودند و به این نتیجه رسیدند که اختلاط ۲٪ آهک با ۱٪ سیلیس مقاومت فشاری خاک را به طور رضایت‌بخشی بالا برده و خاک را برای زیرسازی جاده مناسب می‌گرداند [۸]. Huangjing و Gasaluck در سال ۲۰۱۰ آزمایشاتی را برای تثبیت خاک شل^۱ با استفاده از مواد افزودنی شیمیایی انجام دادند. آن‌ها برای تثبیت از سیمان و خاکستر آتشفشانی، و همچنین سیمان و خاکستر پوسته برنج استفاده کردند. نتایج آزمایش نشان می‌دهند که بهترین نسبت سیمان به خاکستر ۶۰ به ۴۰ درصد وزنی می‌باشد و همچنین نتایج آزمایش CBR (نسبت باربری کالیفرنیا) نشان می‌دهند که مخلوط سیمان- خاکستر به میزان ۱/۵٪ وزن خاک شل، مقاومت فشاری را بسیار بالا می‌برد [۹].

۲-۲- آزمایش برش مستقیم

مایعی که مورد استفاده قرار می‌گیرد، تعیین می‌شود. شاخص فروریزشی I_e در تنش قائم ۲۰۰ کیلوپاسکال به دست می‌آید. پس از تعیین پتانسیل ریبندگی، با توجه به جدول (۱) رده‌بندی شاخص ریبندگی انجام گرفته و درجه ریبندگی نمونه‌ها قبل و بعد از تثبیت تعیین می‌گردد [۱۱].

جدول ۱- جدول رده‌بندی شاخص ریبندگی

| شاخص ریبندگی | درجه ریبندگی |
|--------------|--------------|
| ۰-۰/۱ | غیر ریبنده |
| ۰/۱-۲ | کم |
| ۲-۶ | متوسط |
| ۶-۱۰ | نسبتاً شدید |
| >۱۰ | شدید |

۳- نتایج و بحث

خاک مورد مطالعه از منطقه حمیدیه در نزدیکی شهر اهواز جمع‌آوری گردید. ابتدا آزمایشات تعیین حدود اتربرگ، تراکم، برش مستقیم و تعیین شاخص ریبندگی جهت تعیین برخی از خصوصیات فیزیکی و ژئوتکنیکی این خاک انجام گرفت. در مرحله بعد، این خاک با ماده افزودنی پلی‌یورتان B با درصد اختلاط‌های مختلف (۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲، ۳ و ۵ درصد وزنی)، ترکیب گشته و ۲۴ ساعت جهت اختلاط بهتر به حال خود رها گشته، سپس مجدداً آزمایشات ذکر شده روی این نمونه‌ها انجام گرفت. در ادامه به بررسی آزمایشات انجام شده و نتایج آن قبل و بعد از ترکیب با ماده پلی‌یورتان B پرداخته شده است.

۳-۱- نتایج آزمایشات قبل از ترکیب

در این مرحله روی نمونه خاک تهیه شده از منطقه حمیدیه بدون ترکیب با هیچ ماده‌ای آزمایشات مختلفی انجام گرفت که در ادامه این آزمایشات و نحوه انجام آن‌ها ذکر می‌گردد:

۳-۱-۱- نتایج حاصل از دانه‌بندی

پس از انجام آزمایش آشویی از الک ۲۰۰، آزمایش دانه‌بندی خاک برای بخش درشت‌دانه به روش دانه‌بندی با الک و برای قسمت ریزدانه با استفاده از دستگاه مسترسایزر صورت گرفت. نتیجه این آزمایشات در شکل (۱) ارائه گردیده است.

در این تحقیق جهت انجام آزمایش برش مستقیم از قالبی با شکل مکعب مستطیل و با ابعاد ۶۰×۶۰×۲۰ میلی‌متر که از دو قسمت مجزا تشکیل گردیده استفاده شده است. سرعت اعمال نیرو در این تحقیق ۰/۵ میلی‌متر بر دقیقه تنظیم گردیده و این آزمایشات در وزن مخصوص خشک حداکثر و رطوبت بهینه انجام گرفته است. آزمایش برشی می‌تواند با کنترل تنش و یا کنترل تغییر شکل باشد [۱۰] که در این تحقیق از آزمایش برش مستقیم با کنترل تنش استفاده شده است و نمونه‌ها تحت تنش‌های قائم ۵/۴، ۱۰۹ و ۲۱۸ کیلوپاسکال قرار گرفته‌اند.

۳-۲- آزمایش تعیین شاخص ریبندگی

در این تحقیق جهت تعیین میزان ریبندگی از معیار استاندارد ASTM D5333-03 استفاده شده است. نحوه انجام این آزمایش بدین صورت است که یک نمونه خاک با رطوبت طبیعی به گونه‌ای تراشیده و آماده می‌گردد که متناسب با حلقه آزمایش تحکیم در استاندارد ASTM D2435 گردد. سپس بارهای قائم به صورت پیش‌رونده اعمال می‌شوند تا به فشار ۲۰۰ کیلوپاسکال برسند. در انتهای این بارگذاری نمونه با مایع (معمولاً آب مقطر) غرقاب می‌شود و به مدت یک روز به همان صورت نگه داشته می‌شود. در این مدت تغییر شکل‌های نمونه دنبال می‌شود و سپس آزمایش تحکیم تا رسیدن به بارگذاری حداکثر ادامه می‌یابد. قابلیت ریبندگی با رابطه زیر تعریف می‌شود.

$$I_c = \frac{\Delta e}{1 + e_0} \times 100 \quad (1)$$

که در این رابطه، Δe تغییر در منافذ ناشی از مرطوب‌سازی و e_0 نسبت منافذ اولیه است. از آنجایی که آزمایش به صورت یک بعدی انجام می‌گیرد، رابطه (۱) را به شکل زیر نیز می‌توان نوشت:

$$I_c = \frac{\Delta h}{1 + h_0} \times 100 \quad (2)$$

که در رابطه (۲)، Δh تغییر در ارتفاع نمونه ناشی از مرطوب‌سازی و h_0 ارتفاع اولیه نمونه است. قابلیت فروریزشی I_c برای تخمین نشست لایه خاک مورد استفاده قرار می‌گیرد. مقدار I_c از معادله‌های بالا بر اساس تنش قائم اعمال شده به نمونه و

جدول ۲- حدود اتربرگ خاک مورد مطالعه

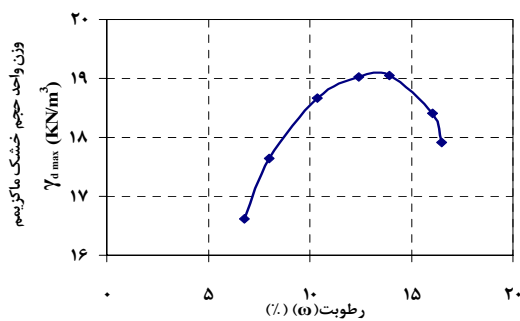
| حد انقباض | شاخص خمیری | حد خمیری | حد روانی |
|-----------|------------|----------|----------|
| ۱۵/۲ | ۵/۸۲ | ۱۸/۳ | ۲۴/۱۲ |

۳-۱-۴- آزمایش نفوذپذیری

آزمایش نفوذپذیری طبق استاندارد ASTM D 2434 روی خاک مورد نظر انجام شد و نفوذپذیری خاک مورد مطالعه 0.02 cm/hr به دست آمد [۱۱].

۳-۱-۵- آزمایش تراکم

آزمایش تراکم طبق استاندارد ASTM D 698 روی خاک مورد نظر انجام شد و منحنی تراکم مطابق با شکل (۲) به دست آمد [۱۱].

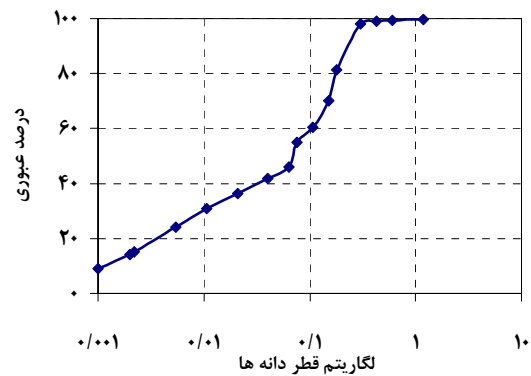


شکل ۲- منحنی تراکم خاک مورد مطالعه

همان طور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود، خاک دارای وزن واحد حجم خشک حداکثر $19.06 \text{ کیلو نیوتن بر مترمکعب}$ و رطوبت بهینه 13.93 درصد می‌باشد.

۳-۱-۶- آزمایش تعیین شاخص رمبندگی

آزمایش تعیین شاخص رمبندگی با توجه به ASTM D 5333 روی خاک مورد مطالعه انجام گرفت [۱۱]. با توجه به نتایج به دست آمده، شاخص رمبندگی برای خاک مورد مطالعه $1.17/5$ می‌باشد که طبق جدول (۱) در طبقه خاک‌های شدیداً رمبند قرار می‌گیرد. شکل (۳) نمودار فشردگی آزمایش پتانسیل رمبندگی خاک مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل ۱- منحنی دانه‌بندی خاک

با توجه به منحنی دانه‌بندی خاک از شکل (۱) و با استفاده از حدود جداکننده اندازه دانه‌های خاک در استاندارد AASHTO می‌توان به این نتیجه رسید که خاک مورد بررسی دارای 14% رس، 41% لای و 45% ماسه می‌باشد. بر اساس آزمایشات انجام گرفته مشخص گردید که 55% ذرات خاک از الک شماره ۲۰۰ عبور کرده‌اند (بیش از 50 درصد) که از این میزان، 14% متعلق به ذرات رس می‌باشد. همچنین نشانه خمیری این خاک $5/82$ (کمتر از 50) می‌باشد. در نتیجه این خاک در سیستم رده‌بندی متحد، در گروه CL-ML قرار می‌گیرد. از طرف دیگر با توجه به این که حدود 55 درصد ذرات خاک از الک ۲۰۰ عبور می‌کند (بیش از 35 درصد) و این خاک دارای حد روانی $24/12$ (کمتر از 40) و حد خمیری $5/82$ (کمتر از 10) می‌باشد، خاک مورد نظر در گروه A-4 قرار می‌گیرد. شاخص گروه برای خاک مورد نظر ۱ به دست می‌آید. در نتیجه رده‌بندی خاک در سیستم آشتو به صورت A-4(1) می‌باشد.

۳-۱-۲- آزمایش تعیین چگالی نسبی

این آزمایش با توجه به استاندارد ASTM D854 برای خاک مورد مطالعه انجام گرفته و چگالی نسبی خاک مورد مطالعه $2/73$ به دست آمد [۱۱].

۳-۱-۳- آزمایش حدود اتربرگ

آزمایش حد روانی، حد خمیری و حد انقباض خاک مورد مطالعه با توجه به معیار ASTM D 4318 انجام گرفت که نتایج آن در جدول (۲) آمده است [۱۱].

۳-۲-۱- آزمایش حدود اتربرگ

نتایج حاصل از آزمایش حدود اتربرگ روی شش درصد اختلاط متفاوت با توجه به معیار ASTM D 4318 در جدول (۳) آمده است.

همان طور که از جدول (۳) برداشت می‌شود، افزودن این ماده به خاک تغییر قابل ملاحظه‌ای در حد روانی به وجود نیاورده است. اما با افزایش ماده افزودنی، حد خمیری کاهش و به تبع آن شاخص خمیری افزایش یافته است. به طوری که به ازای درصد اختلاط ۵، مقدار کاهش حد خمیری و افزایش شاخص خمیری نسبت به خاک شاهد به ترتیب برابر با ۲۴/۴۸ و ۹۲ درصد می‌باشد.

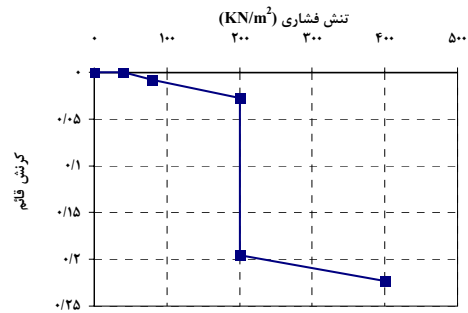
جدول ۳- نتایج آزمایش حدود اتربرگ بر روی خاک ترکیب

شده با پلی یورتان B

| درصد اختلاط | حد روانی | حد خمیری | شاخص خمیری |
|-------------|----------|----------|------------|
| ۰ | ۲۴/۱۲ | ۱۸/۳ | ۵/۸۲ |
| ۰/۵ | ۲۴/۲۳ | ۱۸/۳۳ | ۵/۹ |
| ۱ | ۲۴/۴۱ | ۱۸/۳۱ | ۶/۱ |
| ۱/۵ | ۲۴/۸۸ | ۱۶/۳۵ | ۸/۵۳ |
| ۲ | ۲۴/۴۲ | ۱۵/۷۱ | ۸/۷۱ |
| ۳ | ۲۴/۸ | ۱۴/۲۸ | ۱۰/۵۲ |
| ۵ | ۲۵ | ۱۳/۸۲ | ۱۱/۱۸ |

۳-۲-۲- آزمایش تراکم

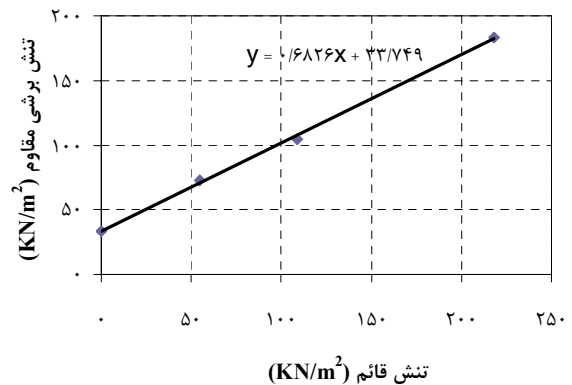
جدول (۴) نتایج حاصل از آزمایش تراکم روی شش درصد اختلاط مختلف را نشان می‌دهد. بر اساس این جدول با افزودن این ماده به خاک تغییر قابل ملاحظه‌ای در وزن حجمی خشک حداکثر به وجود نیامده است؛ اما میزان رطوبت بهینه با افزایش درصد اختلاط کاهش می‌یابد. به طوری که این کاهش نسبت به خاک شاهد به ازای درصد اختلاط ۵ برابر با ۲۷/۳۵ درصد می‌باشد. لازم به ذکر است که ماده پلی یورتان B به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۱۵۰ درجه سانتیگراد در درون آون قرار داده شد و هیچ تبخیری از آن صورت نگرفت.



شکل ۳- نمودار فشردگی آزمایش پتانسیل رهمبندگی خاک مورد مطالعه

۳-۱-۷- آزمایش برش مستقیم

جهت تعیین مقدار چسبندگی ظاهری و زاویه اصطکاک داخلی، آزمایش برش مستقیم مطابق با روش توضیح داده شده در قسمت مواد و روش‌ها روی خاک مورد مطالعه انجام گرفت که نتایج این آزمایش در شکل (۴) ارائه گردیده است.

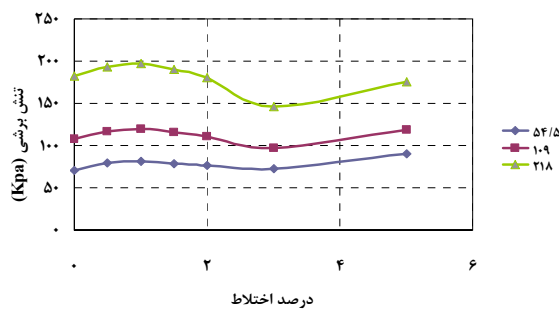


شکل ۴- نمودار تعیین پارامترهای مقاومت برشی برای خاک مورد مطالعه

با توجه به شکل (۴) مقدار چسبندگی ظاهری ۳۳/۷۵ کیلونیوتن بر متر مربع و مقدار زاویه اصطکاک داخلی ۳۴/۳۱ درجه به دست می‌آید.

۳-۲- نتایج آزمایشات بعد از ترکیب

در مرحله بعد، ماده پلی یورتان B در ۶ حالت مختلف از درصدهای اختلاط (۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲، ۳ و ۵ درصد وزنی)، با خاک مورد مطالعه ترکیب شده و آزمایشات تعیین حدود اتربرگ، تراکم، برش مستقیم و تعیین شاخص رهمبندگی روی آن‌ها انجام گرفت که نتایج حاصل در ادامه بررسی شده است.



شکل ۵- نمودار مقایسه‌ای تنش برشی برای درصد‌های اختلاط ماده پلی یورتان B

افزودن مواد شیمیایی به خاک موجب شروع چندین واکنش می‌گردد که از آن جمله می‌توان به واکنش تبادل یون‌های مثبت، واکنش تجمع-تراکم، واکنش هیدراسیون و واکنش پوزولانی اشاره نمود. در رابطه (۳) که به سری لیوتروپی موسوم است، ترتیب کلی تبادل یون‌هایی که معمولاً در خاک یافت می‌شوند، نشان داده شده است [۱۲].

$$Na^+ < K^+ < Mg^{2+} < Ca^{2+} < Al^{3+} < Fe^{3+} \quad (3)$$

در واکنش تبادل یون‌های مثبت، هر یک از یون‌ها تمایل به جایگزینی یون‌هایی که در سمت چپ آن قرار دارند داشته و به این ترتیب یون‌های یک ظرفیتی با یون‌های چند ظرفیتی جایگزین می‌شوند. ذرات رس با داشتن بار الکتریکی منفی مانند آنیون عمل می‌کند که در اطراف آن مقدار زیادی کاتیون وجود دارد. سطح ذره رس و مجموعه کاتیون‌های معلق در اطراف آن تشکیل یک لایه دوگانه الکترواستاتیک را می‌دهند. هرچه از سطح ذرات رس دورتر شویم، جاذبه آنیون‌ها و کاتیون‌ها کمتر می‌شود و رفته رفته از غلظت کاتیون‌ها کاسته می‌شود. نوع کاتیون‌ها و مقدار آن‌ها روی ضخامت این لایه اثر می‌گذارد. هرچه کاتیون دارای بار بیشتر باشد، باعث کمتر شدن ضخامت لایه می‌شود. مثلاً به ازای یک کلسیم دو بار منفی رس و به ازای یک سدیم، یک بار منفی رس کم می‌شود. بنابراین سدیم بیشتری نسبت به کلسیم مورد نیاز است. هرچه سدیم بیشتر شود، ضخامت لایه دوگانه بیشتر می‌شود و باعث واگرایی (پراکندگی) خاک می‌گردد. بر اساس آزمایشات انجام شده در آزمایشگاه شیمی خاک دانشکده مهندسی آب دانشگاه شهید چمران مشخص گردید که اضافه کردن ماده پلی یورتان B به خاک رمبنده مورد آزمایش، موجب کاهش سدیم و افزایش کلسیم می‌گردد که نتایج این آزمایش در جدول (۶) ارائه گردیده‌اند.

جدول ۴- نتایج آزمایش تراکم بر روی خاک مخلوط شده با

پلی یورتان B

| میزان رطوبت بهینه (%) | وزن مخصوص خشک حداکثر (KN/m ³) | میزان پلی یورتان B |
|--------------------------|--|-----------------------|
| ۱۳/۹۳ | ۱۸/۷۳ | ۰ |
| ۱۳/۵۳ | ۱۸/۸۰ | ۰/۵ |
| ۱۳/۴۷ | ۱۸/۶۴ | ۱ |
| ۱۳/۲ | ۱۸/۵۴ | ۱/۵ |
| ۱۳ | ۱۸/۵ | ۲ |
| ۱۲/۸۹ | ۱۸/۴۳ | ۳ |
| ۱۰/۱۲ | ۱۸/۵۳ | ۵ |

۳-۲-۳- آزمایش برش مستقیم

آزمایش برش مستقیم مطابق با روش توضیح داده شده در قسمت مواد و روش‌ها روی خاک مورد مطالعه انجام گرفت که در جدول (۵) نتایج آزمایش برش مستقیم روی شش درصد اختلاط متفاوت ذکر شده است.

همان طور که از جدول (۵) مشاهده می‌شود، بیشترین میزان چسبندگی در درصد اختلاط ۵ و بیشترین میزان زاویه اصطکاک داخلی در درصد اختلاط ۱ رخ می‌دهد. میزان چسبندگی در درصد اختلاط ۵ نسبت به خاک شاهد ۸۱٪ افزایش یافته است.

شکل (۵) که از رابطه تنش گسیختگی مور-کولمب به دست آمده است نشان می‌دهد که بیشترین تنش برشی در درصد اختلاط ۱ به وجود می‌آید. نتایج به دست آمده از آزمایش شیمی خاک نشان می‌دهند که در نسبت اختلاط ۱، میزان سدیم و میزان کلسیم نسبت به خاک شاهد به ترتیب کاهش و افزایش یافته است.

جدول ۵- نتایج آزمایش حدود اتربرگ بر روی خاک ترکیب

شده با پلی یورتان B

| درصد اختلاط | C (KN/m ³) | φ (°) |
|-------------|------------------------|-------|
| ۰ | ۳۳/۷۵ | ۳۴/۳۱ |
| ۰/۵ | ۴۰/۹۷ | ۳۴/۸۶ |
| ۱ | ۴۲/۹ | ۳۵/۲۱ |
| ۱/۵ | ۴۱/۱۱ | ۳۴/۳۵ |
| ۲ | ۴۱/۲۶ | ۳۲/۲۶ |
| ۳ | ۴۷/۶۴ | ۲۴/۲۶ |
| ۵ | ۶۱/۲۶ | ۲۷/۶۷ |

جدول ۶- نتایج آزمایش شیمی خاک

| درصد اختلاط | Na (mg/lit) | Ca (mg/lit) |
|-------------|-------------|-------------|
| ۰ | ۸۹ | ۱۶/۶ |
| ۰/۵ | ۸۶/۲۰ | ۱۷/۶۵ |
| ۱ | ۸۲/۵۰ | ۱۷/۸ |
| ۱/۵ | ۸۶/۵۰ | ۱۷/۴۵ |
| ۲ | ۸۶/۵۰ | ۱۷/۴ |
| ۳ | ۸۶ | ۱۷/۲ |
| ۵ | ۸۵/۵۵ | ۱۷/۲۵ |

جدول ۷- نتایج حاصل از آزمون رمبندگی بر روی خاک ترکیب

شده با پلی‌یورتان B

| شاخص رمبندگی | درصد اختلاط |
|--------------|-------------|
| ۱۷/۵ | ۰ |
| ۹/۵۲ | ۰/۵ |
| ۷/۳۴ | ۱ |
| ۴/۲۲ | ۱/۵ |
| ۳/۵۲ | ۲ |
| ۲/۳۷ | ۳ |
| ۱/۳ | ۵ |

با توجه به نتایج به دست آمده از آزمایش شیمی خاک، میزان سدیم در درصد اختلاط ۱٪ از درصد‌های دیگر و همچنین از خاک شاهد کمتر بوده و همچنین میزان کلسیم در این درصد بیشتر از درصد‌های دیگر است. می‌توان گفت احتمالاً یکی از دلایل بالاتر بودن مقاومت برشی در درصد اختلاط ۱٪، جایگزینی کلسیم به جای سدیم می‌باشد.

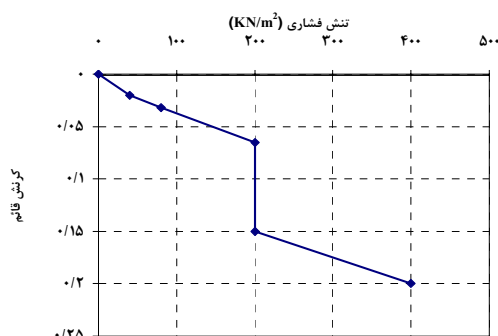
۳-۲-۴- آزمایش تعیین شاخص رمبندگی

آزمایش تعیین شاخص رمبندگی با توجه به معیار ASTM D 5333 روی خاک مورد مطالعه انجام گرفت. در جدول (۷) نتایج آزمایش شاخص رمبندگی روی شش درصد اختلاط متفاوت ارائه گردیده است. همان طور که از نتایج این جدول مشاهده می‌شود، با افزودن این ماده به خاک، شاخص رمبندگی کاهش می‌یابد و هرچه درصد اختلاط این ماده افزایش یابد، میزان شاخص رمبندگی افت بیشتری پیدا می‌کند. برای درصد اختلاط ۰/۵ و ۱، خاک در گروه خاک‌های با درصد رمبندگی نسبتاً شدید قرار می‌گیرد. در درصد اختلاط ۱/۵، ۲ و ۳، شاخص رمبندگی متوسط و در درصد اختلاط ۵، شاخص رمبندگی کم است. در این نسبت اختلاط، شاخص رمبندگی نسبت به خاک شاهد ۹۲٪ کاهش یافته است.

با افزایش شاخص خمیری، رمبندگی کاهش می‌یابد [۱۳]. این امر به این دلیل می‌باشد که هرچه شاخص خمیری بالاتر می‌رود، فعالیت رس و نیز نیروهای بین مولکولی افزایش یافته و در نتیجه شاخص رمبندگی کاهش می‌یابد. همچنین هر چه شاخص خمیری کمتر باشد، ذرات درشت‌دانه‌تر و در نتیجه از هم گسسته‌تر خواهند بود و در نهایت رمبندگی بیشتر خواهد بود.

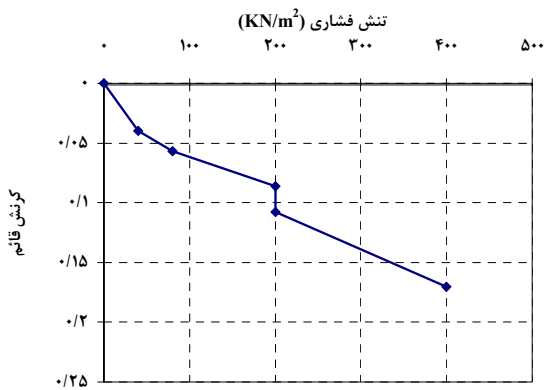
با توجه به نتایج جدول (۳) و (۷)، با افزایش درصد اختلاط، شاخص خمیری افزایش و درجه رمبندگی به دلایل مذکور کاهش می‌یابد. قابل ذکر است که ماده پلی‌یورتان B یک ماده روغنی می‌باشد که اطراف ذرات خاک را احاطه نموده و مانع از جذب آب توسط ذرات خاک می‌شود و در نتیجه با افزایش درصد اختلاط این ماده، رمبندگی کاهش می‌یابد.

شکل‌های (۶) تا (۱۱) نمودارهای فشردگی آزمایش پتانسیل رمبندگی خاک ترکیب شده با درصد‌های اختلاط متفاوت را نشان می‌دهد. آنچه که از این نمودارها به وضوح مشخص است، تأثیر این ماده در کم کردن شاخص رمبندگی است. به طوری که با افزایش درصد اختلاط، میزان کرنش قائم شدیداً کاهش پیدا می‌کند. شکل (۱۲) جهت نشان دادن عملکرد این ماده در بالا بردن میزان مقاومت خاک ترسیم شده است. همان‌طور که از این نمودار مشخص است به ازای درصد اختلاط ۵، خاک کمترین تغییرات کرنش را داراست.

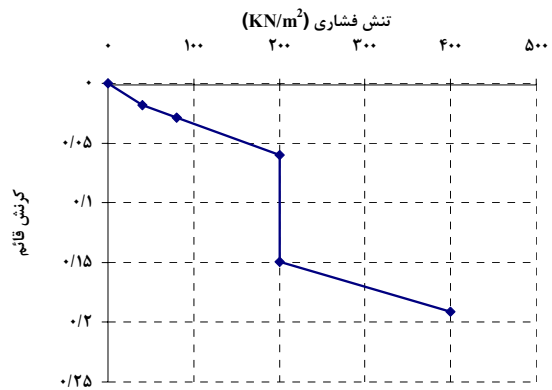


شکل ۶- نمودار فشردگی آزمایش پتانسیل رمبندگی خاک

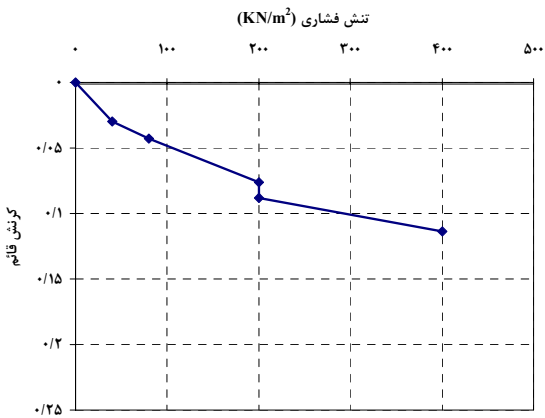
ترکیب شده با ۰/۵٪ اختلاط ماده پلی‌یورتان B



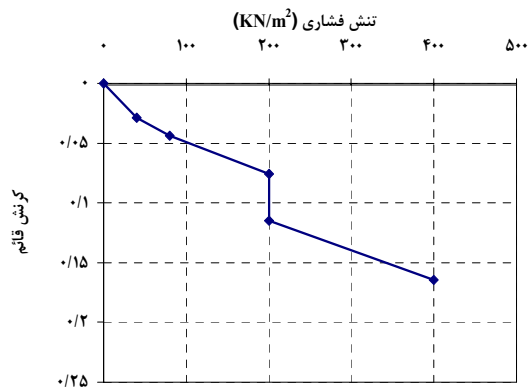
شکل ۱۰- نمودار فشردگی آزمایش پتانسیل رمبندگی خاک ترکیب شده با ۳٪ اختلاط ماده پلی یورتان B



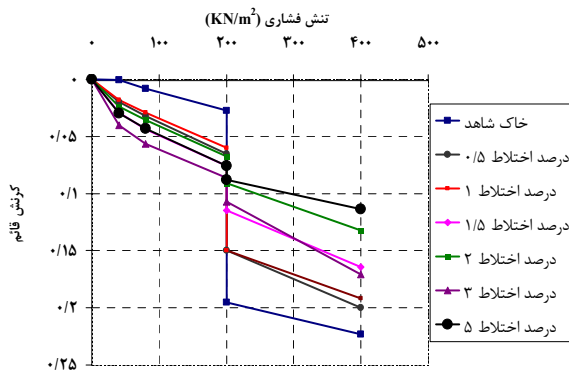
شکل ۷- نمودار فشردگی آزمایش پتانسیل رمبندگی خاک ترکیب شده با ۱٪ اختلاط ماده پلی یورتان B



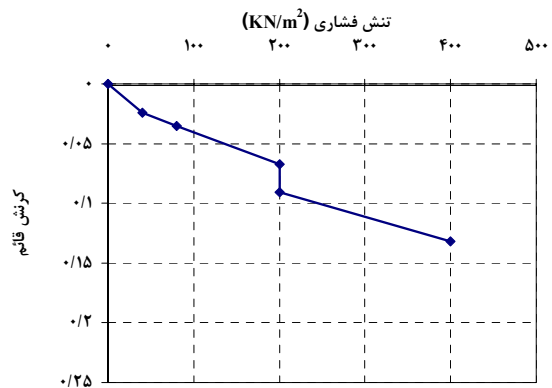
شکل ۱۱- نمودار فشردگی آزمایش پتانسیل رمبندگی خاک ترکیب شده با ۵٪ اختلاط ماده پلی یورتان B



شکل ۸- نمودار فشردگی آزمایش پتانسیل رمبندگی خاک ترکیب شده با ۱/۵٪ اختلاط ماده پلی یورتان B



شکل ۱۲- مقایسه نمودار فشردگی آزمایش پتانسیل رمبندگی خاک شاهد با خاک ترکیب شده با درصد‌های مختلف از ماده پلی یورتان B



شکل ۹- نمودار فشردگی آزمایش پتانسیل رمبندگی خاک ترکیب شده با ۲٪ اختلاط ماده پلی یورتان B

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق برای بهسازی خصوصیات خاک‌های رمبنده از ماده پلی‌یورتان B استفاده شد. مهم‌ترین نتایج حاصله به شرح ذیل می‌باشند:

- پلی‌یورتان B یک ماده روغنی است که در برابر جذب آب از خود مقاومت نشان می‌دهد. این ماده ذرات خاک را فرا گرفته و مانع جذب آب توسط خاک می‌گردد و در نتیجه با افزایش این ماده، شاخص رمبندگی کاهش می‌یابد.

- با افزایش درصد ماده افزودنی، میزان رطوبت بهینه کاهش می‌یابد. به طوری که این کاهش نسبت به خاک شاهد به ازای درصد اختلاط ۵ برابر با ۲۱٪ می‌باشد.

- با افزایش درصد ماده افزودنی، تغییر قابل ملاحظه‌ای در حد روانی به وجود نیامده است. اما شاخص خمیری افزایش می‌یابد. بیشترین افزایش در نسبت اختلاط ۵٪ می‌باشد که مقدار آن نسبت به خاک شاهد ۹۲٪ افزایش نشان می‌دهد.

- با انجام آزمایش برش مستقیم روی خاک ترکیب شده با پلی‌یورتان B، این نتیجه به دست می‌آید که بیشترین مقاومت برشی در درصد اختلاط ۱ می‌باشد که در این درصد اختلاط، چسبندگی ۲۷٪ و مقدار زاویه اصطکاک داخلی ۳٪ افزایش داشته است.

- نتایج آزمایش رمبندگی نشان می‌دهند که با افزایش درصد ماده افزودنی، شاخص رمبندگی کاهش می‌یابد که این میزان برای درصد اختلاط‌های ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲، ۳ و ۵ به ترتیب برابر با ۴۵٪، ۵۸٪، ۷۵٪، ۸۶٪ و ۹۲٪ خواهد بود.

۵- مراجع

- [4] Alawaji, H. A., "Settlement and Bearing Capacity of Geogrid-Reinforced Sand Over Collapsible Soil", *Earth-Science*, 2001, 75-88.
- [۵] وکیلی، ا.، زمردیان، م.، وکیلی، ا. ح.، آرام، م.، "بررسی تأثیر آهک بر خصوصیات مکانیکی و فیزیکی خاکهای رمبنده"، چهاردهمین کنفرانس دانشجویان عمران سراسر کشور، ۱۳۸۷.
- [۶] رفیعی، ب. م. ع.، "پایداری سازی خاک رمبنده با استفاده از تکنولوژی تزریق - مطالعه موردی راه آهن سمنان - دامغان"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی قزوین، ۱۳۸۸.
- [7] Ghrici, M., Harichane, Kh., "Effect of Combination of Lime and Natural Pozzolana on the Plasticity of Soft Clayey Soils", *The 2nd International Conference on New Developments in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2009.
- [8] Ziaie Moayed, R., Izadi, E., Heidari, S., "Improvement of Saline Silty Sand Soil Behavior Using Lime and Micro Silica", *The 5th Civil Engineering Conference in the Asian Region and Australasian Structural Engineering Conference*, 2010.
- [9] Huangjing, S., Gasaluck, W., "The Stabilization of Loess by Chemical Additives for Road Base", *EJGE*, 2010, 15, 1651-1668.
- [۱۰] داس، بی. ام.، "اصول مهندسی ژئوتکنیک، جلد اول - مکانیک خاک"، ترجمه شاپور طاحونی، مؤسسه انتشارات پارس آئین، تهران، ۱۳۸۶.
- [11] Day, R. W., "Soil Testing Manual", McGraw-Hill, 2001.
- [۱۲] طباطبایی، ا. م.، "روسازی راه"، انتشارات مرکز نشر دانشگاهی، تهران، ۱۳۷۹.
- [۱۳] مقدس، ح. ن.، نیکودل، م.، بهرامی، ک.، "ارزیابی قابلیت رمبندگی خاک‌های لسی حوزه قرناوه در شمال کلاله، استان گلستان"، مجله انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران، ۱۳۹۰، ۴ (۱-۲)، ۳۹-۴۶.
- [1] Jennings, J. E., Knight, K., "A Guide to Construction or with materials Exhibiting Additional Settlement due to Collapse of Grain Structure", *The 6th Regional Conference for Africa on Soil Mechanics & Foundation Engineering, Durban, South Africa*, September, 1975, pp 99-105.
- [۲] مخبری، م.، "بررسی عوامل مؤثر بر تغییر شکل حجمی خاک‌های رمبنده"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شیراز، ۱۳۷۴.
- [3] Derbyshire, E., "Geological Hazards in Loess Terrains with Particular Reference to the Loess Regions of China", *Earth-Science*, 2001, 31-60.

EXTENDED ABSTRACT

The Effect of Mastic Polyurethane B on the Mechanical Properties of Collapsible Soils

Sahel Sohrabi Shekafti ^a, Seyed Habib Mousavi Jahromi ^{b,*}

Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Faculty of Water Sciences Engineering, University of Shahid Chamran, Ahwaz, Iran

Received: 23 January 2013; **Accepted:** 08 September 2013

Keywords:

Collapsible soil, Direct shear test, Collapse index, Polyurethane B

1. Introduction

One of the most important geotechnical issues is problematic soils (dispersive soils, expansive soils, collapsing soils, liquefying soils, soluble soils ...) which may affect the constructing projects on these soils and may even cancel them [1]. In this research collapsing soils are studied. A sudden collapse of the land is called collapsing. It is because the strength of the bonding among soil particles no longer exists. Studies have shown the of these soils structure need to be improved before constructing any structures on them [2]. Improvement of these soils with various substances leads to different results. The effect of Polyurethane B with different combination percentages (0.5, 1, 1.5, 2, 3 and 5 weight percentage) on improving the structure of these soils were examined.

2. Methodology

Polyurethane B is one of the most common elastomerics in engineering which has numerous uses. It has unique characteristics such as high mechanical and wear resistance, flexibility in low temperature, high cutting potential and elasticity and resistance to absorbing water, oils and solvents. The most significant feature of these polymers is that a fixed structure is obtained after reaction. In this research, direct shear test was used with stress control. Vertical pressures of 54.5, 109 and 218 Kilopascals were applied out on specimens. In order to determine the collapsing rate, ASTM D 5333-03 standard criteria were used [3].

3. Results and discussion

The sample was collected from Hamidiyeh Region near Ahvaz city. Atterberg limits, simple shear test and collapsible index experiments were carried out on the specimen to determine some of the physical and geotechnical features of the soil. The results are shown in Table 1.

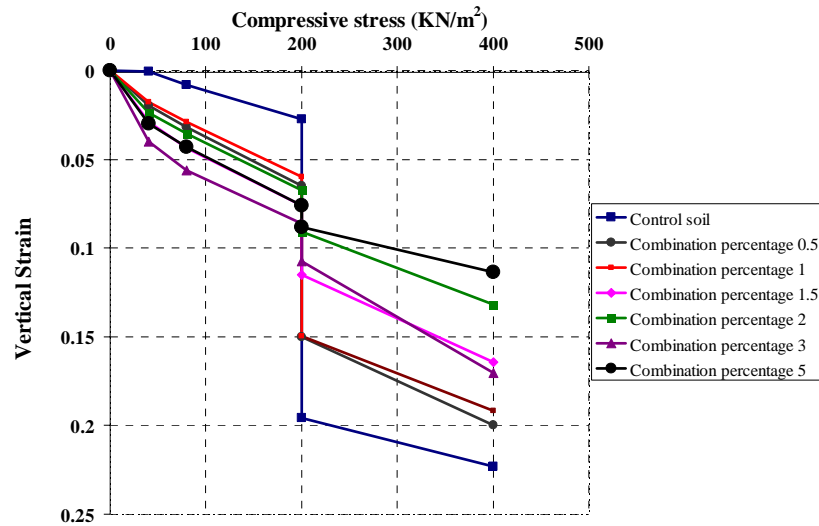
In the next level, the specimen was combined with Polyurethane B with different combination percentages (0.5, 1, 1.5, 2, 3 and 5 weight percentage), and then the above mentioned tests were carried out on the specimen again. The results show that by increasing the additive substance, the plasticity index rises. Shear strength reached its highest value in 1% combination percentage. Adhesion value and angle of internal friction in this combination percentage were 27% and 3% respectively. The results of determining collapsing index are shown in Fig. 1.

* Corresponding Author

E-mail addresses: s.sohrabi84@gmail.com (Sahel Sohrabi Shekafti), habib@musavi.info (Seyed Habib Mousavi Jahromi).

Table 1. The specimen's characteristics

| Angle of internal friction | Adhesion | Collapsing index | Optimized moisture | Maximum dry weight | Plasticity Limit | Liquid Limit | Soil group in Unified Soil Classification System |
|----------------------------|----------|------------------|--------------------|--------------------|------------------|--------------|--|
| 34.31 | 33.75 | 17.5 | 13.93 | 19.06 | 5.82 | 24.12 | CL-ML |

**Fig. 1.** Comparison of the results of collapsing potential test for the intact soil and the soil combined with different percentages of Polyurethane B.

As it is shown in Fig. 1, by increasing the combination percentage, collapsing index decreases (Due to an increase in plasticity index).

4. Conclusions

Collapsing tests revealed that by increasing the percentage of additive substance, collapsing index decreases. The value of collapsing index for 0.5, 1, 1.5, 2, 3 and 5 combination percentages were 45%, 58%, 75%, 86% and 92%. After conducting the direct shear test on the soil which was combined with Polyurethane B, it was concluded that the most shear strength can be obtained in 1% combination percentage. In this combination, the value of adhesion and angle of internal friction were increased 27% and 3%, respectively.

5. References

- [1] Jennings, J. E., Knight, K., "A Guide to Construction or with Materials Exhibiting Additional Settlement Due to Collapse of Grain Structure", The 6th Regional Conference for Africa on Soil Mechanics & Foundation Engineering, Durban, South Africa, September, 1975, pp 99-105.
- [2] Derbyshire, E., "Geological Hazards in Loess Terrains with Particular Reference to the Loess Regions of China", Earth-Science, 2001, 31-60.
- [3] Day, R. W., "Soil Testing Manual", McGraw-Hill, 2001.