



تقویت پارامترهای مقاومتی خاک ماسه فیروزکوه بهسازی شده با صمغ گیاهی فارسی

مسعود محسنی نیا، حسین صالح زاده*

دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۳۰
بازنگری: ۱۴۰۲/۰۱/۲۵
پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۱۰
ارائه آنلاین: ۱۴۰۲/۰۲/۲۶

کلمات کلیدی:

بهسازی خاک ماسه ای
صمغ فارسی
ماسه فیروزکوه
مقاومت فشاری محدود نشده
ماسه سیمانی شده

خلاصه: روش های بهسازی متعددی برای بهبود مشخصات مکانیکی و فیزیکی خاک برای احداث سازه و مانند آن پیشنهاد شده است. یکی از روش های بهسازی، استفاده از عناصر دوست دار محیط زیست مانند صمغ گیاهی فارسی به عنوان یک بایوپلیمر جدید هیدروکروئیدی تجدیدپذیر است. در این راستا، در پژوهش آزمایشگاهی حاضر تاثیر اضافه کردن این صمغ به ماسه فیروزکوه ۱۶۱ مورد بررسی قرار گرفت. مخلوط آب - صمغ فارسی در درصد های مختلفی نسبت به وزن خاک خشک اضافه شد و نمونه های ساخته شده تحت آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده قرار گرفت تا حالت های بهینه ترکیب شناسایی شود. علاوه بر متغیر بودن درصد های وزنی آب و صمغ اضافه شده به خاک، اثر مقدار وزنی خاک، اثر دمای گیرش (دمای اتاقک-گرمکن)، اثر مدت گیرش (۷ تا ۵۶ روز) بررسی شدند. برای تفسیر اثر افزودن صمغ فارسی، چندین آزمایش میکروسکوپ الکترونی روبشی بر روی نمونه های خشک منتخب انجام گردید. نتایج به وضوح افزایش مقاومت فشاری محدود نشده نمونه های بهسازی شده با صمغ فارسی تا ۴ مگاپاسکال ناشی از وجود گروه های فراوان کربوکسیل و هیدروکسیل در صمغ را نشان می دهد. نمونه های عمل آوری شده در دمای اتاق با رطوبت نسبی ۱۵٪ به دلیل خاصیت آب دوستی صمغ گیاهی و افزایش انعطاف پذیری پیوند های ایجاد شده، مقاومت کمتری نسبت به نمونه های مشابه عمل آوری شده در گرمکن را تجربه کردند.

۱- مقدمه

همچون بایوپلیمرها شده اند و تحقیق ها در این زمینه گسترش یافته است، اگرچه برای اطمینان کافی در مورد تاثیرهای مورد انتظار از این مواد در درازمدت به خصوص از حیث نداشتن ویژگی های منفی سیمان احتیاج به بررسی های بیش تری است [۶]. تنها برتری بایوپلیمرها نسبت به موادی چون سیمان پرتلند در کاهش اثرات جانبی مخرب همچون افزایش گازهای گلخانه ای نیست بلکه این مواد به فراوانی در طبیعت یافت شده و قابلیت تجدیدپذیری دارند و از این رو در حفظ منابع فسیلی برای آیندگان می توانند مثرتر باشد [۷]. در خاک های دانه ای، محلول های بایوپلیمری می توانند با قرار گرفتن میان و روی سطح دانه های جامد خاک باعث ایجاد پیوندهای فیزیکی بین دو یا چندین دانه شده و با از دست رفتن رطوبت، ساختار مستحکم به خود گرفته و خاصیت چسبندگی خاک را افزایش دهند و همچنین با انتقال خود به داخل حفرات موجود در خاک، باعث پرشوندگی و کاهش نفوذپذیری شوند [۸]. شیوه واکنش محلول های بایوپلیمری با خاک های رسی برخلاف خاک های دانه ای پیچیده است. به دلیل وجود بارهای الکتریکی در ذرات خاک رس، محلول های بایوپلیمری می توانند به طور مستقیم با ذرات خاک

نشست و تراکم پذیری، استعداد روانگرایی، نفوذپذیری، ظرفیت باربری خاک های ماسه ای همواره مورد توجه مهندسان ژئوتکنیکی قرار داشته است. در جاهایی که این ویژگی ها انتظار طرح را برآورده نمی سازد و امکان تغییر مکان طرح به دلایل اجرایی و اقتصادی ممکن نیست، گزینه بهسازی این مشخصات متناسب با توجه به نوع خاک، عمق بهسازی، نیروی انسانی و تجهیزات در دسترس، مطرح می شود [۱]. از گذشته برای رسیدن به شرایط ایده آل بهسازی از روش های مختلف بهسازی همچون بهسازی شیمیایی با موادی نظیر سیمان و آهک استفاده فراوان شده است [۲، ۳]. دلایل مختلفی همچون نگرانی های زیست محیطی ناشی از افزایش گاز های گلخانه ای، گرم شدن کره زمین [۴]، انتشار آلودگی های سیمانی در اثر وقوع حوادث طبیعی چون زلزله [۵] استفاده از سیمان را با محدودیت های زیست محیطی رو به رو کرده است. بنابه دلایل مذکور در سالیان اخیر، مهندسان ترغیب به استفاده از مواد کم کربن با قابلیت پایداری با محیط زیست و آلودگی کمتر

* نویسنده عهده دار مکاتبات: salehzadeh@iust.ac.ir

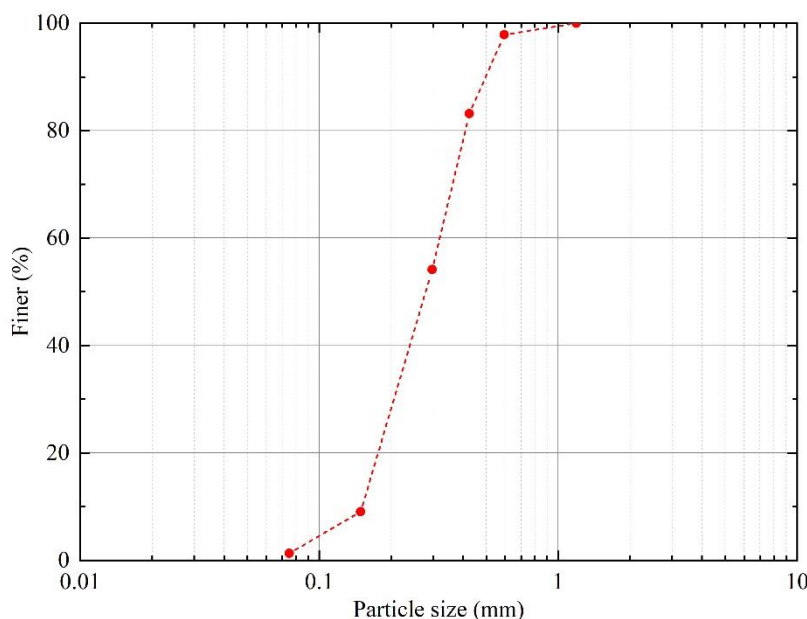


رسی تبادل یا برهم کنش یونی داشته و پیوند شیمیایی میان آن‌ها شکل بگیرد [۹-۱۱]. اصولاً بایوپلیمرها به سه دسته کلی گیاهی، میکروارگانیزی و حیوانی تقسیم بندی می شوند. از معروف ترین بایوپلیمر های گیاهی که به طور طبیعی از گیاهان و ضایعات کشاورزی به دست می آیند، می توان به صمغ های گیاهی گوار، آگار و آلگانیث اشاره کرد [۱۲]. صمغ گوار پلی ساکارید یونی است که به هر دو حالت آنیونی و کاتیونی از درختان گوار به وفور (در حدود ۱ میلیون تن در جهان) بدست می آید. از این صمغ اقتصادی به دلیل وجود گروه های هیدروکسیل فراوان، برای ایجاد هیدروژل قوی در میان ذرات جامد خاک استفاده می کنند [۱۳]. صمغ آگار پلی ساکارید ژلاتینی وابسته به دماست که از جلبک های قرمز دریایی استخراج می شود و در دمای حدود ۹۰ درجه سانتی گراد، قابلیت انحلال در آب را دارا می باشد. برای ایجاد شبکه و ژل مستحکم، محلول آب-آگار باید تا دمای حدود ۳۵ درجه سانتی گراد سرد شود [۱۴]. در بررسی آزمایشگاهی در سال ۲۰۱۳ خاتمی و همکاران آزمایش های تعیین مقاومت فشاری محدود نشده و سه محوری بر روی نمونه های ماسه فوتین بلو بهسازی شده با صمغ آگار و نشاسته انجام داده و نتایج را با نمونه های بهسازی نشده مقایسه کردند [۱۵]. در این بررسی مشخص شد که زاویه اصطکاک داخلی ماسه فوتین بلو بهسازی شده با آگار از حدود ۳۲ درجه به حدود ۲۵ درجه در نسبت های مختلف از آگار کاهش می یابد ولی چسبندگی خاک به طور چشمگیری افزایش یافته و باتوجه به رابطه $\tau = c + \sigma \tan(\varphi)$ مقاومت برشی نمونه های بهسازی شده نسبت به خاک اولیه افزایش می یابد. در سال ۲۰۱۹ اسمیتا و همکاران نشان دادند که ترکیب خاک ماسه سیلت دار با صمغ آگار نسبت به نمونه های ماسه ای سیلتی بهسازی نشده در ساعات های اولیه گیرش چسبندگی بیشتر و زاویه اصطکاک کمتر دارد (مقاومت های اولیه تمامی نمونه تقریباً برابر است) ولی بعد از گذشت ۲۸ روز زاویه اصطکاک نمونه های بهسازی شده از بهسازی نشده پیشی می گیرد و افزایش مقاومت حدود ۱۰۰ درصدی نسبت به نمونه های بهسازی نشده پیدا می کند [۱۶]. صمغ فارسی (که صمغ پارسی یا شیرازی نیز به آن گفته می شود) یک صمغ با ماهیت پلی ساکریدی و منشأ گیاهی است که در بسیاری از استان های ایران همچون استان فارس و آذربایجان شرقی به رنگ های مختلفی چون سفید، قرمز و زرد یافت می شود [۱۷]. از این صمغ تجزیه پذیر دوست دار محیط زیست از گذشته برای مقاصد مختلفی در صنایع چون بهبود سریع تر زخم ها [۱۸، ۱۹]، به عنوان عامل تثبیت کننده در صنایع غذایی، نگهداری بهتر میوه ها [۲۰] و کمک به کاهش درد دندان [۲۱] استفاده وسیع شده است.

درجدید ترین تحقیق، قاسم زاده و همکاران توانستند باموفقیت خاک رسی را با صمغ فارسی تثبیت و عملکرد آن را با نمونه های بهسازی شده با زانتان گام و گوارگام مقایسه کنند [۲۲]. نتایج آن‌ها نشان داد که صمغ فارسی در مقایسه با زانتان و گوار، در بهبود پارامتر های مقاومتی خاک همچون زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی خاک عملکرد بسیار مناسبی داشته دارد و باتوجه به درصد چربی بسیار پایین این ماده (چربی زیاد عامل مخربی برای تزریق یا پخش یکنواخت ماده در بافت خاک به شمار می آید) و هم چنین قیمت پایین تر این ماده نسبت به سایر بایوپلیمر های معروف همچون گوار و زانتان، از نظر مهندسی بررسی بیشتر این ماده را توجیه پذیر می سازد. در منابع در مورد اثر ترکیب صمغ فارسی با ماسه فیروزکوه، که خاک دانه ای مرجع در تحقیق های داخل کشور معرفی شده است، گزارشی دیده نمی شود. تنها گزارش در این مورد که همزمان با این تحقیق منتشر شد، مقاله ای با عنوان "کاربرد ژئوتکنیک زیست محیطی صمغ فارسی در تثبیت خاک ماسه ای" است [۲۳]. در این بررسی آزمایشگاهی نمونه های بهسازی شده عمل آوری شده با صمغ فارسی در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد تحت آزمایش های مقاومت فشاری محدود نشده، برش مستقیم، نسبت باربری کالیفرنیا و سه محوری استاتیکی تحکیم نیافته زهکشی نشده و نفوذپذیری در درصد های وزنی مختلف صمغ فارسی (نسبت به وزن خشک خاک) مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج این پژوهش نشان داد که صمغ فارسی باعث کاهش نفوذپذیری (کاهش ۹۹ درصدی) و افزایش مقاومت فشاری محدود نشده (تا ۱/۳ مگاپاسکال) و چسبندگی (تا ۹۰ کیلوپاسکال) شده ولی همچون اکثر بایوپلیمر های گیاهی در شرایط اشباع، زاویه اصطکاک داخلی خاک (تا حدود ۵ درجه با ۰.۳٪ وزنی صمغ) را کاهش می دهد. در تحقیق حاضر به بررسی متغیرهای دیگری چون تاثیر تغییر درصد رطوبت، تراکم اولیه خاک، محل گیرش بر مقاومت فشاری محدود نشده پرداخته شده و برای شبیه سازی بهتر شرایط واقعی خاک در طبیعت و مکانیزم شکست نمونه ها، برخلاف تحقیق گذشته از نمونه های استوانه ای به قطر ۱۰ سانتی متر و ارتفاع ۲۰ سانتی متر استفاده گردید.

بنای این تحقیق بر این است پس از بررسی و انجام آزمایش های اولیه شاخص خاک (همچون دانه بندی، تعیین وزن مخصوص ویژه دانه های جامد خاک، تعیین درجه تخلخل حداقل و حداکثر خاک)، برای دستیابی به حالت بهینه نمونه هایی درگرمکن و به مدت ۱۴ روز ساخته شده و تحت آزمایش فشاری محدود نشده مقاومتشان بر اساس تغییرات زیر بررسی شود:

- تغییرمیزان آب درازای درصد صمغ فارسی ثابت (اثر نسبت درصد



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی خاک ماسه فیروزکوه ۱۶۱

Fig. 1. Particle size curve of Firoozkooch sand (No161)

(7) و وزن مخصوص ۹/۸۱ کیلونیوتن بر متر مکعب در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد استفاده شده است.

۲-۲- خاک

در این پژوهش از ماسه فیروزکوه شماره ۱۶۱ که خاک مساله‌دار و شناخته شده‌ای در پژوهش‌های داخلی به حساب می‌آید، استفاده شد. براساس مندرجات ارائه شده در جدول ۱ به دست آمده از منحنی دانه بندی (شکل ۱)، این خاک منطبق بر سامانه طبقه بندی متحد (UCSC) در دسته ماسه های بدانه بندی شده (SP) قرار می‌گیرد.

۲-۳- صمغ فارسی

صمغ مورد استفاده در این تحقیق، صمغ فارسی خریداری شده از شرکت فریر اصفهان به حالت پودر سفید رنگ با درصد خلوص بالا (۹۶٪) بود. این صمغ دارای خاصیت اسیدیته (PH) و رطوبت نسبی به ترتیب ۴ و ۰.۸٪ بوده و دارای چربی و پروتئین بسیار کم می‌باشد. سدیم و منیزیم و کلسیم و پتاسیم عناصر مهم تشکیل دهنده این صمغ می‌باشند [۲۴]. در جدول ۲ مشخصات مکانیکی صمغ فارسی و تصویر پودر صمغ فارسی در شکل ۲ آورده است.

وزنی آب به صمغ فارسی همانند آب به سیمان)

- تغییر درصد صمغ فارسی در ازای درصد آب ثابت (میزان آب برگزیده مرحله قبل) نسبت به وزن خاک خشک،

- تغییر همزمان هر دو متغیر فوق (صمغ و آب) در نسبت آب به صمغ برگزیده دومرحله قبل

- تغییر تراکم و افزایش میزان وزنی خاک خشک (وزن مخصوص های مختلف) برای نمونه منتخب در درصد های بدست آمده.

بدین ترتیب مقادیر وزنی صمغ، آب و خاک بهینه شناسایی می‌گردد. سپس اثر زمان و محل گیرش بر روی مقاومت نمونه های بهینه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

۲-۲- مصالح و روش‌ها

مصالح مورد استفاده در این پژوهش شامل خاک ماسه فیروزکوه شماره ۱۶۱، آب مقطر، پودر سفید رنگ صمغ فارسی می‌باشند که در ادامه به بررسی مشخصات فیزیکی و شیمیایی هر یک پرداخته می‌شود.

۲-۱- آب

برای جلوگیری و حذف اثرات ناشی از وجود یون ها و ناخالصی های موجود در آب، در این تحقیق از آب مقطر با خاصیت اسیدیته متوسط (PH-

جدول ۱. مشخصات فیزیکی خاک

Table 1. Mechanical properties of soil

G_s	e_{max}	e_{min}	$D_{50}[\text{mm}]$	C_c	C_u
۲/۶۴۸	۰/۵۹۶	۰/۹۰۴	۰/۲۸	۰/۹۴۵	۲/۰۴۲

جدول ۲. مشخصات مکانیکی صمغ فارسی

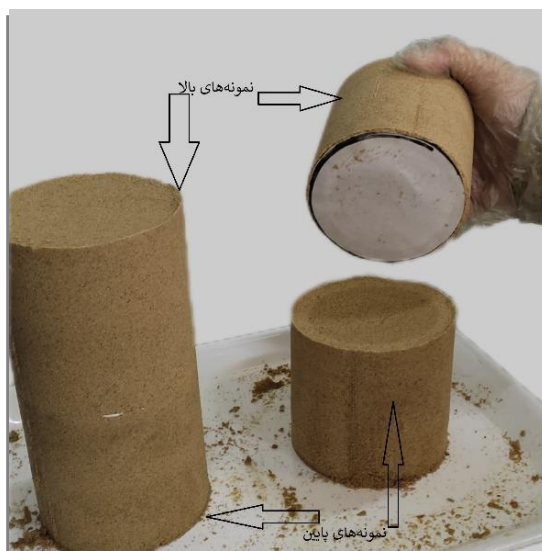
Table 2. Mechanical properties of Persian Gum

مقدار	مشخصه
۴/۳۱	درصد اسیدیته
۸/۷۳	درصد رطوبت
۲/۱۷	درصد خاکستر
۰/۲۱	درصد چربی
۰/۷۳	درصد تانین



شکل ۲. پودر سفید صمغ فارسی

Fig. 2. White Persian Gum powder



شکل ۳. نمونه‌های بررسی یکنواختی با ارتفاع برابر قطر ده سانتی‌متری پس از دو روز گیرش در گرمکن

Fig. 2. Uniformity check samples with height equal to the diameter of 10 cm after 2 days curing in oven

۳- ساخت نمونه برای آزمایش

برای تهیه نمونه های آزمایشی از قالب استاندارد جداشونده به قطر ۱۰ سانتی متر و ارتفاع ۲۰ سانتی متر (نسبت قطر به ارتفاع ۱ به ۲) استفاده شد. بدین منظور بعد از انجام آزمایش های اولیه (شامل تعیین وزن مخصوص ویژه دانه های جامد خاک، درجه تخلخل حداقل و حداکثر) مطابق روابط وزنی- حجمی میزان خاک مورد نیاز برای ساخت هر نمونه در تراکم ۳۰ درصد (به عنوان حالت سست برای بهسازی) محاسبه و به مدت ۲۴ ساعت خاک مورد نظر در گرمکن با دمای ۱۱۰ درجه سانتی گراد کاملاً خشک گردید تا رطوبت موجود در خاک به حداقل رسید. برای تهیه هر نمونه ابتدا مقدار صمغ مورد را در مقدار مشخص آب و با دمای ۲۵ درجه حل کرده و به وسیله همزن دستی و دست در دمای اتاق به مدت ۳ دقیقه به طور یکنواخت با خاک مخلوط می کنیم. درون قالب را با طلق نازک چرب شده پوشانده تا از چسبیدن نمونه به قالب جلوگیری شود. سپس به روش تراکم کاهش یافته، مواد در ۴ مرحله به قالب اضافه می شود و بلافاصله به محل گیرش (اتاقک یا گرمکن) انتقال داده شده (به دلیل جلوگیری از تاثیر دما و رطوبت محل ساخت نمونه در گیرش اولیه) و و قالب و طلق از نمونه به آرامی جدا می گردد.

۴- برنامه آزمایش ها

به دلیل بزرگ بودن ارتفاع نمونه های فشاری تک محوری، برای اطمینان از یکنواختی تراکم و پخش همگن مواد در خاک در تمامی ارتفاع نمونه، با توجه به شیوه ساخت نمونه، ۲ نمونه (با ۲ بار تکرار) با نسبت ارتفاع برابر قطر (قطر و ارتفاع نمونه برابر ۱۰ سانتی متر) مطابق شکل ۳ بر روی همدیگر ساخته و برای جلوگیری از چسبیدن دو نمونه به یکدیگر، به وسیله کاغذ چرب شده نازک از یکدیگر جدا شدند. این نمونه ها به مدت ۲۱ روز در گرمکن عمل آوری شدند و سپس آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده بر روی آنها صورت پذیرفت. پس از اثبات همگنی و یکنواختی، ابتدا با ثابت در نظر گرفتن مقدار وزنی صمغ نسبت به وزن خشک خاک (۱/۵٪)، تغییرات وزنی آب را بر روی نمونه اعمال شده و نمونه هایی با درصد رطوبت ۸ تا ۱۵ درصد تهیه می گردد. عمل آوری نمونه های مذکور در گرمکن با دمای ۵۰ درجه سانتی گراد و رطوبت نسبی صفر درصد به مدت ۱۴ روز انجام شد. پس از انجام آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده بر روی نمونه های فوق الذکر، درصد رطوبت نمونه در مقاومت بیشینه مبنا قرار داده شد و تغییرات وزنی بر روی درصد صمغ نسبت به وزن خشک خاک اعمال گردید (۵/۰٪ تا ۳٪ صمغ). پس از پیدا کردن بهترین نمونه از حیث مقاومت، باتوجه به میزان آب

نقاط کمتر از ۱۰٪ بوده و یکنواخت بودن نمونه‌ها اثبات گردید. همچنین این اطلاعات به ما نشان می‌دهد که نمونه‌های پایینی که تحت سربار ناشی از وزن نمونه‌های بالا بوده متراکم تر شده است و مقاومت اوج بیشتری نسبت به نمونه‌های بالایی از خود نشان داده است.

۶-۱-۲ اثر تغییرات درصد رطوبت بر مقاومت فشاری محدود نشده مطابق شکل ۵ تمامی نمونه‌ها با درصد صمغ ثابت (۱/۵٪ نسبت به وزن خاک خشک) مقاومت قابل توجهی نسبت به ماسه فیروزکوه (مقاومت فشاری محدود نشده صفر) پیدا کرده‌اند. روند افزایشی مقاومت تا رسیدن به ۱۲٪ رطوبت افزایش پیدا کرده (تا ۳۰۴۲ کیلوپاسکال) و با تجاوز درصد رطوبت از ۱۲٪، مقاومت نمونه‌ها روند کاهشی پیدا کرده است. باتوجه به رطوبت ذاتی صمغ فارسی (حدود ۹٪) و قابلیت جذب تا ۱۴ گرم آب به ازای هر گرم صمغ، یکی از دلایل محتمل کاهش مقاومت فشاری محدود نشده نمونه‌ها، اضافه شدن آب بیش از حد نیاز برای ایجاد محلول مقاوم و کاهش غلظت محلول (رقیق تر شدن) اضافه شده به خاک و کاهش خاصیت چسبندگی محلول (پس از خشک شدن) در بین دانه‌های جامد خاک دانست.

۶-۱-۳ اثر تغییرات درصد وزنی صمغ بر مقاومت فشاری محدود نشده براساس نتایج مرحله قبل، رطوبت ۱۲٪ مینا قرار گرفته و تغییرات درصد وزنی صمغ با ثابت در نظر گرفتن درصد رطوبت بر روی نمونه‌ها اعمال شده است. مطابق نتایج شکل ۶ مقاومت نمونه‌ها ابتدا روند افزایشی داشته و پس از تجاوز مقدار صمغ از ۱/۵٪، این روند کاهشی می‌شود. مطابق مطالعات انجام شده بر روی صمغ فارسی و مشاهده آزمایشگاهی در این پژوهش، قسمت اعظم صمغ فارسی در آب نامحلول بوده و نقشی در تشکیل پیوندهای چسبنده بین دانه‌ای ندارد [۲۱]. بنابراین یکی از دلایل محتمل برای کاهش مقاومت فشاری محدود نشده نمونه‌ها، افزایش قسمت نامحلول صمغ فارسی (باتوجه به ثابت بودن درصد رطوبت) و کاهش درگیری بین دانه‌ای به دلیل روزدگی صمغ غیرمحلول بر روی دانه‌های جامد عنوان کرد. باتوجه به شکل ۵ و ۶ می‌توان استنباط کرد که در هر دو حالت، بیشترین مقاومت فشاری محدود نشده نمونه‌ها در نمونه ۱/۵٪ صمغ و رطوبت ۱۲٪ رخ می‌دهد. لذا در بخش آخر برای اطمینان از پیدا کردن درصد‌های بهینه متغیرها، نمونه‌هایی با درصد‌های مختلف وزنی صمغ و آب با نسبت ثابت ۸ (مطابق نمونه برگزیده تا اکنون) تهیه و مورد آزمایش قرار می‌دهیم.

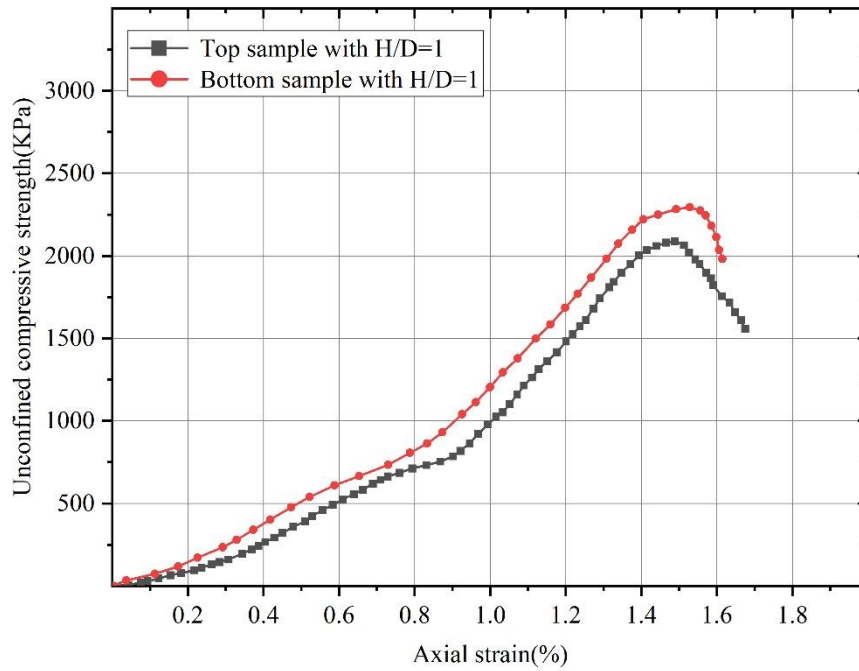
به صمغ نمونه برگزیده مقاومتی، تغییرات افزایشی و کاهشی دو متغیر آب و صمغ را به نسبت آب به صمغ نمونه برگزیده اعمال می‌کنیم. (افزایش و کاهش آب و صمغ در نسبت ثابت برگزیده). بدین ترتیب تمامی حالت‌های محتمل برای دو متغیر آب و صمغ مورد ارزیابی قرار گرفته و درصد‌های آب و صمغ نمونه بیشینه مقاومتی، به عنوان مینا و مقدار بهینه در ادامه پژوهش در نظر گرفته می‌شود. سپس تغییرات بر روی میزان وزن خشک خاک (افزایش و کاهش تراکم) در مقادیر بهینه صمغ و آب، مورد بررسی قرار گرفته است و میزان خاک نمونه با بیشترین مقاومت، به عنوان تراکم بهینه انتخاب می‌گردد. لازم به ذکر است در نمونه‌های با درصد بهینه وزنی آب و صمغ و خاک، فرآیند تکرار پذیری (۳ بار تکرار)، گیرش در دمای اتاق (۲۵ درجه سانتی‌گراد) با رطوبت ۱۵٪ و مدت گیرش نیز مورد ارزیابی قرار گرفت. در انتها از نمونه‌های ماسه فیروزکوه بهسازی شده، دارای بیشترین و کمترین مقاومت فشاری محدود نشده، عکس برداری میکروسکوپی انجام شد تا در تفسیر نتایج حاصله استفاده شوند.

۵- آزمایش‌ها

برای انجام آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده، از دستگاه یونیورسیال فشاری-کششی (ساخت ایران) واقع در دانشکده عمران دانشگاه علم و صنعت استفاده شد. مطابق استاندارد ASTM D216، نمونه‌ها با نرخ کرنش ۱ میلی‌متر بر دقیقه تا لحظه گسیختگی تحت بارگذاری پیوسته قرار گرفتند و سپس با توجه به میزان جابه‌جایی و نیرو، طبق روابط ذکر شده در استاندارد، نمودار تنش-کرنش برای هر نمودار استخراج گردید و مقاومت نهایی نمونه‌ها گزارش شد. برای انجام آزمایش تصویر برداری میکروسکوپی نیز از دستگاه TESCAN-VEGA II واقع در دانشکده مواد دانشگاه علم و صنعت استفاده شد.

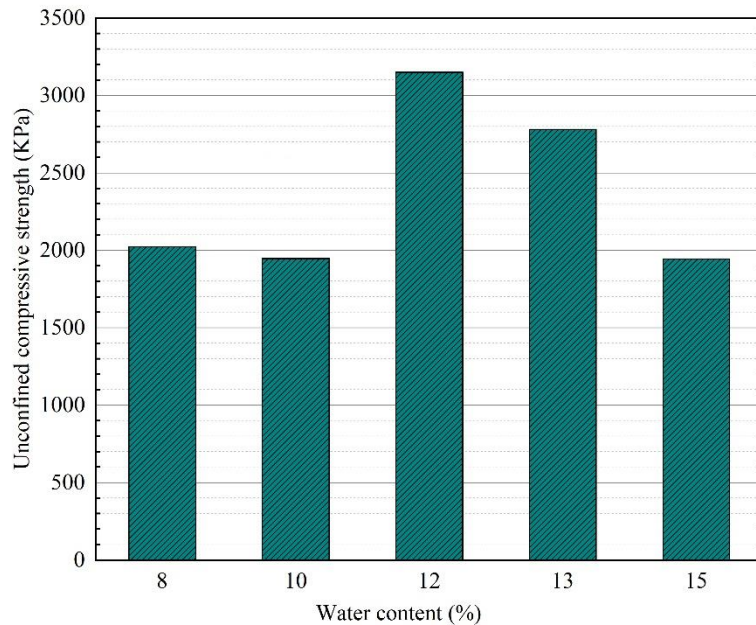
۶- نتایج

۶-۱-۱ نتایج آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده
۶-۱-۱-۱ بررسی یکنواختی نمونه‌های مقاومت فشاری محدود نشده
میانگین مقاومت نمونه‌های پایین و نمونه‌های بالا در شکل ۴ نشان داده شده‌است. با توجه به نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری محدود نشده نمونه‌های بهسازی شده یکنواخت (ارتفاع برابر قطر) در شکل، نمونه‌های زیرین و بالایی روند تنش-کرنش مشابهی داشته و تفاوت دو نمودار در اکثر



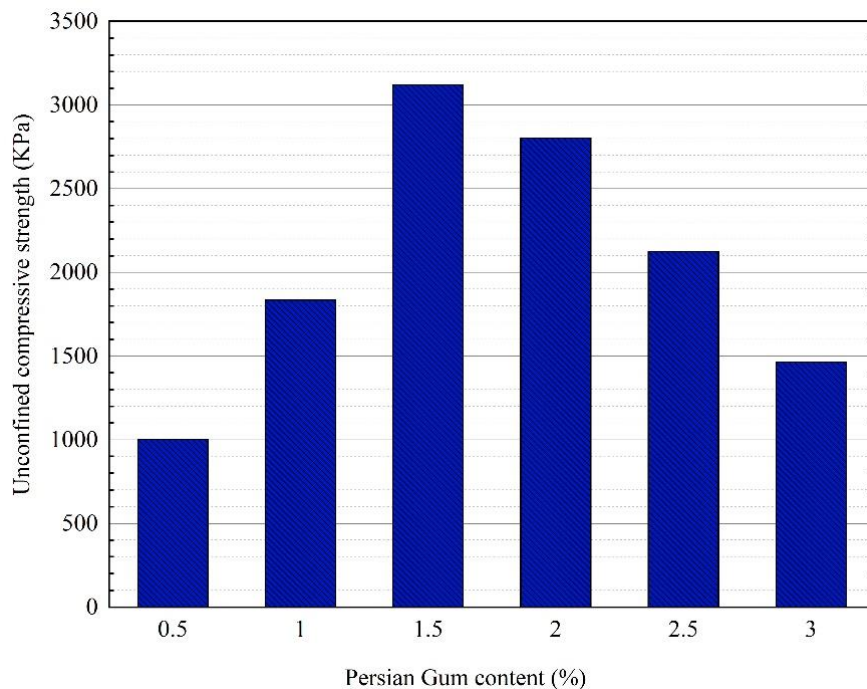
شکل ۴. نمودار تنش- کرنش محوری نمونه‌های بررسی یکنواختی (۱/۵٪ صمغ + ۱۰٪ رطوبت در تراکم نسبی اولیه ۳۰٪ برای خاک)

Fig. 4. Stress-axial strain curves of uniformity check samples (1.5% Persian Gum+10% water content+ initial DR for soil=30%)



شکل ۵. مقاومت فشاری محدود نشده نمونه‌های بهسازی شده با ۱/۵٪ صمغ فارسی در درصد رطوبت‌های مختلف

Fig. 5. Unconfined compressive strength of treated samples with 1.5% Persian Gum in different water content relative to dry soil mass



شکل ۶. مقاومت فشاری محدود نشده نمونه‌های بهسازی شده با ۱۲٪ رطوبت در درصد‌های مختلف صمغ

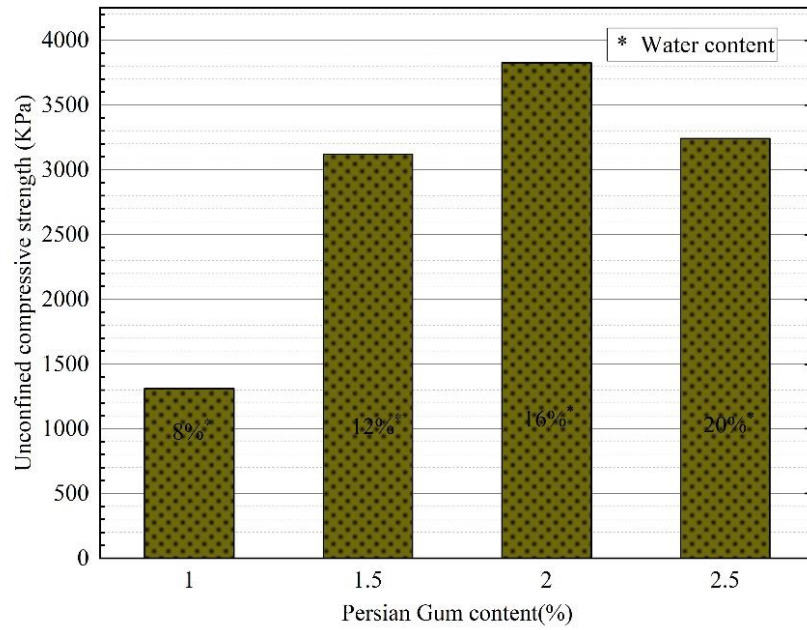
Fig. 6. Unconfined compressive strength of treated samples with 12% water content in different Persian gum content relative to dry soil mass

۶-۱-۴ اثر افزایش میزان خاک خشک (اثر تراکم) بر مقاومت فشاری محدود نشده

پس از تحصیل بیشترین مقاومت فشاری نمونه‌ها به ازای ۲٪ آب و ۱۶٪ صمغ، اثر افزایش تراکم ناشی از افزایش میزان خاک خشک (به ازای ۲٪ صمغ و ۱۲٪ رطوبت) بررسی شد. مطابق شکل ۷، مقاومت نمونه‌ها با افزایش وزن مخصوص ابتدا افزایش پیدا کرده و سپس روند کاهشی را دنبال می‌کند. علت این امر را می‌توان در کاهش نسبت منافذ نمونه دانست. طبق مطالعه ای در سال ۲۰۱۹، مقدار نسبت منافذ نمونه بر روی تعداد، طول و ضخامت‌های پیوندهای بین دانه‌ای ایجاد شده توسط بایوپلیمرها تأثیر می‌گذارد [۲۵]. با افزایش تراکم، به دلیل کاهش مساحت موجود، تعداد و ضخامت پیوندها بین دانه‌های جامد خاک روند کاهشی و طول پیوندها روند افزایشی پیدا می‌کنند. بنابراین می‌توان با استدلالی مشابه، کاهش مقاومت نمونه‌ها با عبور از وزن مخصوص خشک ۱۵/۱۵ کیلونیوتن بر متر مکعب را به کاهش تعداد و ضخامت پیوندهای ایجاد شده نسبت داد.

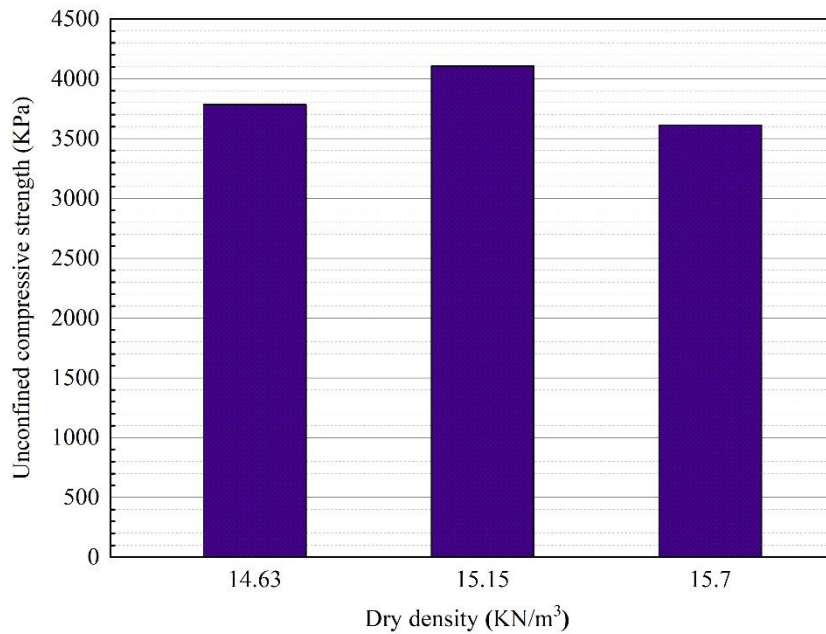
۶-۱-۴ اثر تغییرات همزمان مقدار صمغ و آب به نسبت ۸:۱ بر مقاومت فشاری محدود نشده

تغییرات همزمان مقدار صمغ و آب به نسبت ۸:۱ با تغییر مقدار صمغ از ۱٪ تا ۲/۵٪ در نمونه‌ها بررسی شد. مطابق نتایج شکل ۷، با افزایش تدریجی میزان صمغ، محلول یکنواخت ایجاد شده دانه‌های جامد بیشتری از خاک را در برمی‌گیرد و با پیوندهای دو یا چندگانه بهم متصل می‌سازد و از این رو، پس از خشک شدن نمونه باعث ایجاد چسبندگی بیشتر در نمونه و به تبع مقاومت فشاری بیشتری می‌شود. با تجاوز مقدار صمغ از ۲٪ (رطوبت ۱۶٪)، محلول اضافه شده به خاک علاوه بر ایجاد پیوند بین دانه‌های جامد خاک، سطح روی دانه‌ها را نیز در بر می‌گیرند و با افزایش ریزدگی در بین دانه‌های جامد، مقاومت فشاری نمونه‌ها به دلیل خاصیت روغنکاری بین دانه‌های کمی کاهش می‌یابد. این چنین بنظر می‌رسد که مقدار ۲٪ درصد صمغ فارسی مقدار بهینه دوز این ماده برای ترکیب با خاک به شمار می‌آید و بعد از آن افزودن صمغ دیگر تأثیر مثبت مقاومتی نداشته و مقدار بیش از حد نیاز به حساب می‌آید.



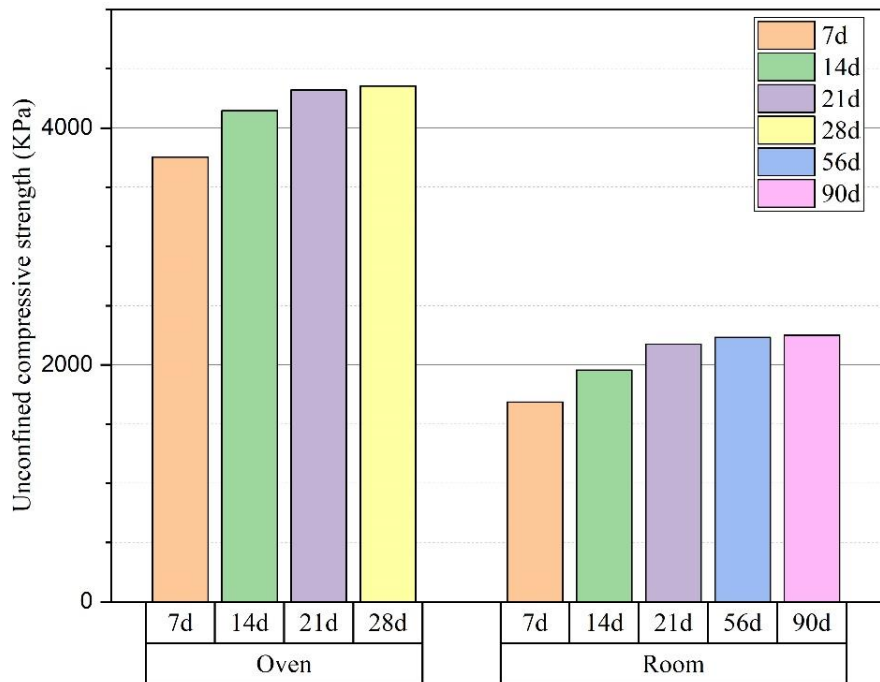
شکل ۷. مقاومت فشاری محدود نشده نمونه‌های بهسازی شده با درصد‌های مختلف صمغ و رطوبت در نسبت ثابت ۸:۱

Fig. 7. Unconfined compressive strength of treated samples with different water and Persian Gum content relative to dry soil mass in constant ratio of 8:1



شکل ۸. مقاومت فشاری محدود نشده نمونه‌های بهسازی شده بهینه در وزن مخصوص‌های خشک نهایی متفاوت

Fig. 8. Unconfined compressive strength of optimum treated samples in different final dry density



شکل ۹. مقاومت فشاری محدود نشده نمونه‌های بهسازی شده بهینه عمل آوری شده در محل و مدت متفاوت

Fig. 9. Unconfined compressive strength of optimum treated samples in different curing time and place

سرعت مستحکم نشده و بخشی از مقاومت خود را صرف ننگه داشتن دانه‌ها و جلوگیری از ریزش نمونه می‌کنند و طول پیوندهای بین دانه‌ای در این مدت افزایش و ضخامت و مقاومت نهایی آن‌ها در برابر فشار کاهش می‌یابد (افزایش قطر متوسط نمونه‌های عمل آوری شده در اتاق و کاهش قطر متوسط نمونه‌های عمل آوری شده در گرمکن در آزمایشگاه رویت شد) گر چه نمونه‌های عمل آوری شده در اتاق با مقاومت نهایی کمتر به زمان عمل آوری بیشتری نیاز دارند اما بر خلاف نمونه‌های عمل آوری شده در گرمکن (شکل ۱۰) دارای کرنش نهایی شکست بیشتر بوده و به صورت ناگهانی گسیخته نمی‌شوند (گسیختگی ناگهانی در خاک همچون شکست ترد در بتن بسیار خطرناک می‌باشد). با توجه به اعداد شکل ۹ می‌توان دریافت که صمغ فارسی در شرایط خشک پیوندهای موثرتری ایجاد کرده و اگر چه با افزایش رطوبت محل و کاهش دمای محیط گیرش، مقاومت فشاری محدود نشده کمتری نسبت به دمای بالاتر و رطوبت کمتر (مقاومت نهایی نمونه‌های بهسازی شده در اتاقک ۲/۳ مگاپاسکال است که ۵۰٪ نسبت به نمونه‌های مشابه عمل آوری شده در گرمکن می‌باشد) به خاک ماسه‌ای می‌دهد اما همچنان مقاومت قابل ملاحظه‌ای نسبت به حالت بهسازی نشده دارد.

۶-۱-۶- اثر زمان و محل گیرش نمونه‌ها بر مقاومت فشاری محدود نشده برای بررسی زمان و دمای محیط گیرش، نمونه‌هایی با درصد‌های اختلاطی بهینه (۲٪ صمغ + ۱۶٪ آب) ساخته و در گرمکن با دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی صفر درصد و اتاقک با دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی پانزده درصد در مدت‌های مختلف زمانی عمل آوری شدند. مطابق شکل ۹ در هر دو محیط گیرش (گرمکن یا اتاق) با افزایش زمان گیرش مقاومت فشاری محدود نشده نهایی نمونه افزایش پیدا کرده و نمونه‌های عمل آوری شده در گرمکن و اتاق به ترتیب در ۲۱ و ۵۶ روز به حداکثر مقاومت خود رسیدند و پس از آن روند افزایش مقاومت چشمگیری دیده نمی‌شود. با افزایش زمان گیرش در گرمکن، با از دست رفتن سریع رطوبت نمونه (رطوبت ناشی از وجود آب و رطوبت ذاتی صمغ) پیوندهای ایجاد شده، ساختار مستحکم و تردتر به خود می‌گیرند اما در اتاقک به دلیل نیازمند بودن به مدت زمان بیشتر برای خشک شدن پیوندهای ایجاد شده پس از گذشت ۵۶ روز تقریباً خشک می‌شوند. اگر چه در اتاقک نمونه‌ها پس از گذشت ۵۶ روز کاملاً خشک می‌شوند اما به دلیل وجود رطوبت در محل و دمای پایین‌تر، در مدت زمان گیرش پیوند‌های بین دانه‌ای بر خلاف گرمکن، به



(ب)

(الف)

شکل ۱۰. ظاهر نمونه‌ها بعد از آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده (الف) نمونه عمل‌آوری شده در گرمکن (ب) نمونه عمل‌آوری شده در اتاق

Fig. 10. Appearance of samles after unconfined compressive strength a) Room cured sample b) Oven cured sample

ارتباطی^۲ جداگانه بین دانه‌ای باعث افزایش ۴ برابری مقاومت نسبت به نمونه بهسازی شده با ۰/۵ درصد وزنی صمغ (شکل ۱۱-ب) شده است. یکی از عوامل دیگر تقویت مقاومت فشاری در شکل ۱۱-پ نسبت به شکل ۱۱-ب، اثر همپوشانی باندهای ارتباطی می‌توان عنوان کرد. به طوری که با شکست یا آسیب یک پیوند (مثل ناحیه ۲ در شکل ۱۱-پ) در اثر فشار استاتیکی، دانه خاک به علت وجود پیوندها و چسبندگی بین دانه‌ای حرکت نکرده اما در شکل پیوندهای ضعیف همانند شکل ۱۱-ب، در اثر شکست یک پیوند بین دانه‌ای، نیرو ضربه‌ای علاوه بر بار استاتیکی به پیوندهای دیگر مجاور منتقل شده و باعث شکست پیوندهای ضعیف (و حتی پیوندهای قوی تر در اثر تشدید ضربه بر اثر جابه جایی) در اطراف پیوند مذکور می‌شود.

۷- نتیجه گیری

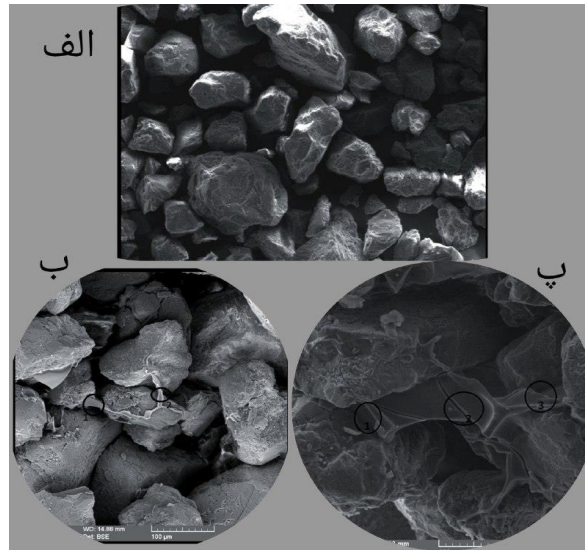
پس از انجام آزمایش های مقاومت فشاری محدود نشده بر روی نمونه های ماسه فیروزکوه بهسازی شده با پودر صمغ فارسی با درصد های مختلف وزنی صمغ و رطوبت نسبت به وزن خشک و بررسی اثر تراکم ناشی از افزایش وزن جامد خشک خاک خلاصه نتایج بدست آمده در این پژوهش

2 Bridge bond

۶-۲- آزمایش SEM

برای بررسی بیشتر پیوندهای ایجاد شده ناشی از اضافه کردن محلول آب-صمغ فارسی، چندین آزمایش تصویر برداری میکروسکوپی بر روی ماسه فیروزکوه بهسازی نشده، نمونه بهسازی شده با بیش ترین و کمترین مقاومت فشاری محدود نشده انجام شد (شکل ۱۱). نمونه کم مقاومت (شکل ۱۱-ب) (با ۰/۵٪ وزنی صمغ + ۱۲٪ رطوبت) پیوند های بسیار کوتاه و کم ضخامتی در روی سطح خارجی دانه های جامد درگیر پیوند ایجاد کرده و باعث افزایش مقاومت فشار تک محوری خاک فیروزکوه (با مقاومت تک محوری صفر) (شکل ۱۱-الف) تا مقدار ۹۸۰ کیلوپاسکال می شود. با افزایش درصد صمغ، پیوندهای ایجاد شده بین سطح خارجی یک دانه خاک با دانه های خاک مجاور ضخیم تر شده و سطح بیشتری از دانه های درگیر پیوند را شامل می شود و همچنین در فضای خالی بین دانه ها با پر کردن حفرات و ایجاد چسبندگی در سطح تماس دانه ها، باعث افزایش مقاومت فشاری نمونه می شود. در نمونه با ۲٪ آب و ۱۶٪ صمغ (شکل ۱۱-پ)، که بهترین حالت مقاومتی را در بین تمامی نمونه های بهسازی بوده، محلول اضافه شده بین هر دانه خاک و دانه های اطراف آن با چسبندگی^۱ در سطح تماس و پیوندهای

1 Cohesion bond



شکل ۱۱. تصاویر ساختار میکروسکوپی نمونه‌ها الف) بهسازی نشده ب) ماسه بهسازی شده (۵٪ صمغ + ۸٪ رطوبت) پ) ماسه بهسازی شده (۲٪ صمغ + ۱۶٪ رطوبت)

Fig. 11. Microstructures of samples a) Untreated sample b) Treated sample (with 0.5% Persian Gum and 8% water content) c) Treated sample with (2% Persian Gum and 16% water content)

منابع

- [1] J. Han, Principles and practice of ground improvement, John Wiley & Sons, 2015.
- [2] S. Jahandari, M. Saberian, Z. Tao, S.F. Mojtahedi, J. Li, M. Ghasemi, S.S. Rezvani, W. Li, Effects of saturation degrees, freezing-thawing, and curing on geotechnical properties of lime and lime-cement concretes, Cold Regions Science and Technology, 160 (2019) 242-251.
- [3] A. Toghroli, P. Mehrabi, M. Shariati, N.T. Trung, S. Jahandari, H. Rasekh, Evaluating the use of recycled concrete aggregate and pozzolanic additives in fiber-reinforced pervious concrete with industrial and recycled fibers, Construction and Building Materials, 252 (2020) 118997.
- [4] I. Chang, M. Lee, G.-C. Cho, Global CO2 emission-related geotechnical engineering hazards and the mission for sustainable geotechnical engineering, Energies, 12(13) (2019) 2567.
- [5] C. Suksiripattanapong, R. Sakdinakorn, S. Tiyasangthong, N. Wonglakorn, C. Phetchuay, W. Tabyang, Properties of soft Bangkok clay stabilized with cement and fly ash

آزمایشگاهی به صورت ذیل می باشد:

۱- افزودن محلول صمغ حل شده در آب با دمای ۲۵ درجه سانتی گراد به خاک ماسه فیروزکوه باعث ایجاد پیوند های ژله ای بین دانه های جامد خاک شده و با ازدست رفتن رطوبت، ژل ایجاد شده مستحکم تر شده و باعث افزایش مقاومت فشاری محدود نشده نمونه ها می شود.

۲- محلولی ترکیب شده با خاک وابستگی کامل به دما داشته و در دمای افزایش یافته (گرمکن) ساختار مستحکم و ترد نسبت به ساختار منعطف در دمای اتاق ایجاد می کند.

۳- افزایش میزان صمغ و یا رطوبت با عبور از درصد مشخص، باعث افزایش خاصیت روغنکاری و کاهش مقاومت می گردد و حالت بهینه ترکیب ۲٪ صمغ و ۱۶٪ رطوبت به ازای وزن خشک خاک ماسه فیروزکوه شماره ۱۶۱ شناسایی گردید.

۴- عمل آوری در محیط با رطوبت نسبی کمتر نتایج مطلوب تری (مقاومت فشاری بیش تر) را به ارمغان داشته است.

۵- افزایش تراکم اولیه خاک (به عبارت دیگر افزایش مقدار وزنی خاک و کاهش نسبت منافذ) تا رسیدن به وزن مخصوص خشک ۱۵/۱۵ کیلونیوتن بر متر مکعب باعث افزایش درگیری و مقاومت فشاری محدود نشده شده و پس از آن به دلیل کوچک تر شدن منافذ خاک، پیوندهای ایجاد شده کوتاه و طولانی تر بوده و از مقاومت کمتری برخوردار هستند.

- behaviour of silty sands treated with agar biopolymer, *International Journal of Geotechnical Engineering*, 15(4) (2021) 484-495.
- [17] S. Abdollahi, Z. Raoufi, Gelatin/Persian gum/bacterial nanocellulose composite films containing Frankincense essential oil and Teucrium polium extract as a novel and bactericidal wound dressing, *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, 72 (2022) 103423.
- [18] A. Amirsadeghi, A. Jafari, S.-S. Hashemi, A. Kazemi, Y. Ghasemi, A. Derakhshanfar, M.-A. Shahbazi, S.V. Niknezhad, Sprayable antibacterial Persian gum-silver nanoparticle dressing for wound healing acceleration, *Materials Today Communications*, 27 (2021) 102225.
- [19] S. Abbasi, S. Mohammadi, Stabilization of milk–orange juice mixture using Persian gum: Efficiency and mechanism, *Food Bioscience*, 2 (2013) 53-60.
- [20] F. Khorram, A. Ramezani, S.M.H. Hosseini, Shellac, gelatin and Persian gum as alternative coating for orange fruit, *Scientia Horticulturae*, 225 (2017) 22-28.
- [21] S. Abbasi, Persian gum: a novel natural hydrocolloid, *Nutrition and Food Sciences Research*, 4(1) (2017) 1-2.
- [22] H. Ghasemzadeh, F. Modiri, Application of novel Persian gum hydrocolloid in soil stabilization, *Carbohydrate polymers*, 246 (2020) 116639.
- [23] M. Adabi, E. Darvishan, G. Eyvazi, H. Jahanbaksh Motlagh, Geoenvironmental Application of Novel Persian Gum Biopolymer in Sandy Soil Stabilization, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 47(10) (2022) 12915-12929.
- [24] G.S. Mhinzi, Intra-species variation of the properties of gum exudates from *Acacia senegal* var. *senegal* and *Acacia seyal* var. *fistula* from Tanzania, *Bulletin of the Chemical Society of Ethiopia*, 17(1) (2003).
- [25] N.A. Rosli, H.A. Aziz, M.R. Selamat, L.L.P. Lim, M.H. Zawawi, Effect of compaction on physical properties of a sewage sludge and red gypsum mixture as intermediate landfill cover, *Construction and Building Materials*, 289 (2021) 123153.
- geopolymer for deep mixing application, *Case Studies in Construction Materials*, 16 (2022) e01081.
- [6] G.-C. Cho, I. Chang, Cementless soil stabilizer–biopolymer, in: *Proceedings of the 2018 World Congress on Advances in Civil, Environmental, & Materials Research (ACEM18)* Songdo Convensia, Incheon, Korea, 2018, pp. 27-31.
- [7] A. Kar, M.R. Das, D. Mohapatra, An experimental study on use of biopolymer for sustainable stabilization of slopes, *Materials Today: Proceedings*, 62 (2022) 6148-6152.
- [8] J. Huang, R.B. Kogbara, N. Hariharan, E.A. Masad, D.N. Little, A state-of-the-art review of polymers used in soil stabilization, *Construction and Building Materials*, 305 (2021) 124685.
- [9] I. Chang, G.-C. Cho, Strengthening of Korean residual soil with β -1, 3/1, 6-glucan biopolymer, *Construction and Building Materials*, 30 (2012) 30-35.
- [10] I. Chang, J. Im, A.K. Prasadhi, G.-C. Cho, Effects of Xanthan gum biopolymer on soil strengthening, *Construction and Building Materials*, 74 (2015) 65-72.
- [11] A.F. Cabalar, M.H. Awraheem, M.M. Khalaf, Geotechnical properties of a low-plasticity clay with biopolymer, *Journal of materials in civil engineering*, 30(8) (2018) 04018170.
- [12] H. Fatehi, D.E. Ong, J. Yu, I. Chang, Biopolymers as green binders for soil improvement in geotechnical applications: A review, *Geosciences*, 11(7) (2021) 291.
- [13] R. Chudzikowski, Guar gum and its applications, *J Soc Cosmet Chem*, 22(1) (1971) 43.
- [14] I. Chang, A.K. Prasadhi, J. Im, G.-C. Cho, Soil strengthening using thermo-gelation biopolymers, *Construction and Building Materials*, 77 (2015) 430-438.
- [15] H.R. Khatami, B.C. O’Kelly, Improving mechanical properties of sand using biopolymers, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 139(8) (2013) 1402-1406.
- [16] S. Smitha, K. Rangaswamy, D. Keerthi, Triaxial test

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Mohseninia, H. Salehzadeh, Enhancing strength parameters of Firoozkooh sandy soil improved with Persian herbal gum, Amirkabir J. Civil Eng., 55(6) (2023) 1123-1136.

DOI: 10.22060/mej.2019.15465.6128

