

تأثیر شرایط اولیه خاک و محیط گیرش بر مقاومت کششی خاک ماسه‌ای بهسازی شده با صمغ فارسی

مسعود محسنی نیا، فارغ التحصیل کارشناسی ارشد ژئوتکنیک، دانشکده عمران، دانشگاه علم و

صنعت ایران، تهران

حسین صالح‌زاده*، دانشیار، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

salehzadeh@iust.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۱۶ - پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۱۴

چکیده

مقاومت کششی مناسب یکی از پارامترهای مهم در خاک‌های در معرض تنش کششی به‌شمار می‌آید. در سالیان اخیر، برای کنترل ترک و افزایش قابلیت کششی خاک، از مواد بیوپلیمری استفاده وسیعی صورت گرفته است. در این مطالعه آزمایشگاهی، قابلیت کششی ماسه بهسازی‌شده با صمغ فارسی مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور، تأثیر پارامترهای تراکم اولیه خاک، شیوه اختلاط مواد با یکدیگر، دما و رطوبت محل گیرش و زمان گیرش بر مقاومت کششی نمونه‌های بهسازی‌شده توسط آزمایش کشش غیرمستقیم ارزیابی گردید. پس از بررسی نتایج، مشخص گردید که اضافه کردن محلول یکنواخت صمغ - آب (شامل ۲٪ وزنی صمغ و ۱۶٪ وزنی آب نسبت به وزن خاک خشک) به خاک خشک بهترین شیوه اختلاطی و تراکم اولیه نسبی ۵۰٪ برای خاک، تراکم بهینه برای کسب بیشترین مقاومت کششی بوده است. همچنین، ارتباط مستقیمی بین افزایش دما و کاهش رطوبت با افزایش مقاومت کششی برقرار است، به طوری که با افزایش دمای محل گیرش از ۲۵ درجه در اتاق به ۵۰ درجه در گرمکن و کاهش رطوبت نسبی محیط گیرش از ۷۰ به ۱۵ و سپس به صفر درصد، مقاومت کششی حداکثر به ترتیب از ۱۵۴ به ۲۷۰ و ۴۴۲ کیلوپاسکال افزایش پیدا می‌کند.

واژه‌های کلیدی: مقاومت کششی، ماسه فیروزکوه، بهسازی خاک، بیوپلیمر، صمغ فارسی.

۱. مقدمه

خاک به طور معمول در معرض انواع تنش‌های برشی، فشاری و کششی قرار می‌گیرد. تثبیت و بهسازی خاک به منظور بهبود خواص مکانیکی آن، همچون افزایش مقاومت کششی، یکی از حیطه‌های مهم در مهندسی ژئوتکنیک به‌شمار می‌آید (کاسارانو، ۱۹۹۳؛ تنگ و همکاران، ۲۰۱۵). پایداری و مقاومت خاک یکی از ملاحظات مهم در پروژه‌های عمرانی و گسترش زیرساخت‌ها به‌شمار می‌آیند. مقاومت کششی به‌عنوان پارامتر مهم در کنترل گسترش ترک و تغییرشکل در اثر تنش تحمیل شده، تأثیر ویژه‌ای در پایداری و ظرفیت باربری خاک دارد. بدون مقاومت کششی مناسب، خاک مستعد لغزش و گسیختگی بوده و خسارات و خطراتی جانبی را به همراه خواهد داشت (هی و همکاران، ۲۰۱۸).

موادی همچون سیمان (کنسولی و همکاران، ۲۰۱۱)، الیاف‌ها (دیویا و همکاران، ۲۰۱۴) و ژئوستنتیک‌ها (وو و همکاران، ۲۰۱۳) از گذشته برای افزایش استحکام کششی خاک به‌طور وسیع مورد استفاده قرار می‌گرفته‌اند. اما به دلایل مختلفی چون نگرانی‌های زیست‌محیطی سیمان، ناشی از افزایش گازهای گلخانه‌ای (ترنر و کولینز، ۲۰۱۳)، کاهش مقاومت کششی خاک‌های بهسازی‌شده با فیبرها به دلیل قابلیت زیست-تخریب‌پذیری در اثر جذب آب و شکستن دیواره‌های سلولی پلیمری و تجزیه توسط میکروارگانیسم‌ها (بوردولوی و همکاران، ۲۰۱۷)، استفاده از آنها را با محدودیت و نگرانی همراه ساخته است (چائوهان و همکاران، ۲۰۰۸؛ جوادیان و همکاران، ۲۰۱۶؛ فاگون و همکاران، ۲۰۱۷). الیاف گیاهی علاوه بر سازگاری بهتر با محیط‌زیست، در بهبود خواص مکانیکی خاک همچون افزایش مقاومت فشاری (گائو و همکاران، ۲۰۱۵)، دوام در برابر چرخه خیس-خشک (زیگلر و همکاران، ۱۹۹۸) و مقاومت کششی و دوام در برابر چرخه‌های متوالی

ذوب-انجماد (فاگون و همکاران، ۲۰۱۷) عملکرد بهتری نسبت به سایر الیاف دارد.

بهسازی با بیوپلیمرها در چند سال اخیر به دلیل عملکرد سیمانی عالی و سازگاری با محیط‌زیست در مهندسی ژئوتکنیک مورد توجه قرار گرفته است (چنگ و همکاران، ۲۰۱۵؛ سئو و همکاران، ۲۰۲۱؛ قاسم‌زاده و همکاران، ۲۰۲۲؛ کار و همکاران، ۲۰۲۲؛ ژانگ و همکاران، ۲۰۲۲). بیوپلیمرها از منابع طبیعی مانند گیاهان، حیوانات و میکروارگانیسم‌ها به دست می‌آیند (فاتحی و همکاران، ۲۰۲۱) و نسبت به مواد تقویت‌کننده سنتی پایداری و سازگاری بیشتری با محیط‌زیست دارند. این مواد، علاوه بر قابلیت زیست‌تخریب‌پذیری، هزینه و آلودگی کمتری را در پروژه‌های عمرانی به همراه دارند. اگرچه علاوه بر مقیاس آزمایشگاهی، در پروژه‌های اجرایی نیز بیوپلیمرها در حال بررسی می‌باشند اما صنعتی شدن این ماده نیاز به ارزیابی تمامی جوانب زیست‌محیطی، اقتصادی و اجرایی دارد. درصد ماده پلیمری، شیوه اختلاط مواد و مدت زمان گیرش از فاکتورهای بسیار تأثیرگذار بر مقاومت کششی نمونه‌های بهسازی شده عنوان می‌شود. چن و همکاران (۲۰۲۰) تأثیر افزودن صمغ زانتان به خاک ماسه‌ای را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که ۲٪ صمغ با افزایش پیوند تماسی و چسبندگی باعث افزایش مقاومت کششی ماسه تا ۴۰۰ کیلوپاسکال می‌شود. ترتیب ترکیب مواد با یکدیگر، که در مراجع به‌عنوان شیوه اختلاط مواد شناخته می‌شود، تأثیر به‌سزایی در پارامترهای مقاومتی و دوام نمونه‌های بهسازی‌شده با مواد بیوپلیمری دارد. نتایج گیلزگی و همکاران (۲۰۱۶) نشان داد که افزودن پلیمر مایع به مخلوط خاک رسی خشک و آب (شیوه ۲) نسبت به افزودن آب به مخلوط پلیمر مایع و خاک خشک (شیوه ۱) در ایجاد یک نمونه یکنواخت پوشیده‌شده با بیوپلیمر همراه با خلل و فرج کمتر مؤثرتر بوده است. همچنین، شیوه ۲ نسبت به شیوه ۱ مقاومت فشاری محدود نشده

زمان گیرش نمونه‌های بهسازی شده توسط آزمایش کشش غیرمستقیم (قطری)^۲ در این مطالعه مطابق ASTM C496/C496M - 11 مورد بررسی قرار گرفتند.

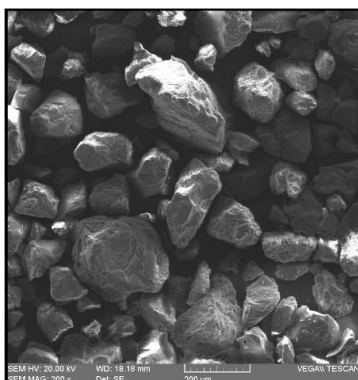
۲. مصالح مورد استفاده

۲-۱. خاک

در این مطالعه، از خاک منطقه فیروزکوه، واقع در اطراف شهر تهران، استفاده و از شرکت تأمین ماسه ریخته‌گری در کیسه‌های ۳۰ کیلوگرمی خریداری شده است. اندازه دانه‌های این خاک بین ۰/۰۷۵ تا ۱/۲ میلی‌متر است و قسمت اعظم آن را سیلیس تشکیل می‌دهد. تصویر میکروسکوپی خاک ماسه فیروزکوه در شکل ۱، ترکیبات شیمیایی و فیزیکی این خاک که از آزمایش XRF مطابق ASTM 8064، دانه‌بندی مطابق ASTM D422، تعیین چگالی دانه‌های جامد مطابق ASTM D854-02، تعیین وزن مخصوص خشک حداقل و حداکثر مطابق ASTM D4254-00 به دست آمده، در جدول ۱ قابل مشاهده است.

چهار برابری و زمان پایداری غوطه‌وری در آب بیشتری از خود نشان داد. در مطالعه آزمایشگاهی دیگری، اثر افزودن پلیمر فعال‌شونده با آب متیلن دی‌فنیل دی‌ایزوسیانات^۱ بر مقاومت فشاری محدود نشده خاک ماسه‌ای مورد بررسی قرار گرفت (رضایی ملک و همکاران، ۲۰۱۷). نتایج آن‌ها نشان داد که تأثیر شیوه اختلاط اولیه مواد با یکدیگر در مقاومت فشاری نهایی نمونه‌های بهسازی شده ناچیز، نسبت بهینه بیوپلیمر به آب دو به یک و بهترین شیوه برای گیرش نمونه، گیرش اولیه چهار روزه در هوای آزاد و گیرش ثانویه چهار روزه در آب عنوان گردید.

این مطالعه، تلاش می‌کند تا قابلیت کششی ماسه فیروزکوه، بهسازی شده با صمغ گیاهی فارسی، را مورد ارزیابی قرار دهد. برای جلوگیری از افزایش پارامترهای مورد بررسی و همچنین امکان مقایسه نتایج مقاومت فشاری محدود نشده و مقاومت کششی نمونه‌های بهسازی شده، در تحقیق حاضر از درصدهای بهینه مواد افزودنی به دست آمده از مطالعه اخیر (محسنی نیا و صالح زاده، ۲۰۲۳) شامل ۲٪ صمغ و ۱۶٪ آب نسبت به وزن خاک خشک) استفاده شده است. پارامترهای شیوه اختلاط مواد با یکدیگر، دما و رطوبت محل گیرش و



شکل ۱. تصویر میکروسکوپی ماسه فیروزکوه (شماره ۱۶۱)

²- Splitting tensile strength

¹- Methylene Diphenyl Diisocyanate (MDI)

جدول ۱. مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک

مشخصات فیزیکی خاک								
G_s	e_{max}	e_{min}	D_{50}	C_u	C_c	$\gamma_d, DR=0.3$	$\gamma_d, DR=0.5$	$\gamma_d, DR=0.7$
۲/۶۴۸	۰/۵۹۶	۰/۹۰۴	۰/۲۸mm	۲/۰۴	۰/۹۴۵	۱۴/۶۳ KN/m ³	۱۵/۱۵ KN/m ³	۱۵/۷ KN/m ³
ترکیبات شیمیایی خاک (بر حسب درصد)								
LOI	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂			
۰/۱۶	۰/۱	۰/۴۴	۰/۸۳	۱/۱۷	۹۷/۳			

زیادی دارد اما بر خلاف صمغ عربی به طور کامل در آب حل نمی‌شود. این صمغ از دو بخش محلول و نامحلول در آب تشکیل شده است. برخلاف بخش محلول در آب، که قابلیت ایجاد شبکه را حتی در آب سرد دارا می‌باشد، بخش نامحلول حتی در حضور یون‌های فلزی و مواد روان‌کننده قابلیت ایجاد شبکه را ندارد (خدایی و همکاران، ۲۰۲۰). در شکل ۲، تصویر صمغ فارسی خریداری شده از شرکت فریر اصفهان به حالت پودر سفید مشاهده می‌شود.



شکل ۲. پودر صمغ فارسی

تراکم کاهش یافته به قالب اضافه و متراکم گردید. برای ایجاد درگیری بیشتر بین لایه‌های خاک، پس از ریختن متراکم شدن هر لایه، به وسیله کاردک شیارهایی در هر دو راستای قائم و افقی ایجاد شد و سپس لایه بعدی اجرا گردید. برای جلوگیری از چسبیدن نمونه‌ها به جدار داخلی قالب، سطح داخلی قالب توسط تعلق نازک چرب شده با گریس از سطح خارجی نمونه جدا گردید. برای جلوگیری از تأثیر دما و رطوبت محل تهیه بر مقاومت کششی نمونه‌های بهسازی شده، قالب پس از تهیه نمونه

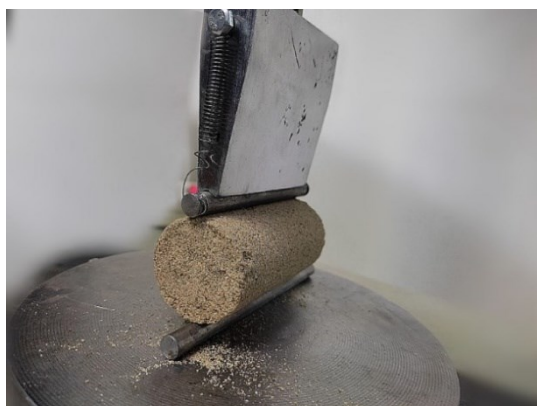
۲-۲. صمغ فارسی

صمغ فارسی، صمغ گیاهی است که سرشار از گروه‌های هیدروکسیل می‌باشد و اخیراً در بهسازی خاک مورد استفاده قرار گرفته است (قاسم‌زاده و مدیری، ۲۰۲۰؛ محسنی‌نیا و صالح‌زاده، ۲۰۲۳). این صمغ گیاهی که ماهیت پلی‌ساکاریدی دارد از تنه درختان بادام وحشی در استان‌های فارس و آذربایجان غربی به دست می‌آید (دبستانی و همکاران، ۲۰۱۸). اگرچه به دلیل قابلیت زیاد جذب آب و خواص امولسیون‌ی به صمغ عربی شباهت

۳. شیوه ساخت و انجام آزمایش

برای انجام آزمایش مقاومت کششی از قالب استوانه‌ای شکل به قطر ۳/۸۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۸ سانتی‌متر (نسبت ارتفاع به قطر = ۲/۰۸) استفاده شد. بدین منظور، با توجه به مشخص بودن وزن مخصوص خشک خاک در هر تراکم نسبی، خاک خشک شده در گرمکن با میزان مشخص آب (۱۶٪ نسبت به وزن خاک خشک) و صمغ فارسی (۲٪ نسبت به وزن خاک خشک) به وسیله همزن دستی به خوبی مخلوط و در چهار مرحله مطابق روش

نرخ کرنشی ۶ میلی‌متر بر دقیقه روی نمونه، از دو میله استوانه‌ای فلزی توپر به قطر یک سانتی‌متر و ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر در بالا و پایین نمونه استفاده گردید (شکل ۳). با توجه به بیشترین نیروی فشاری تا لحظه گسیختگی، مطابق ASTM C496/C496M-11 مقاومت کششی نمونه طبق رابطه (۱) محاسبه گردید. برای بررسی تکرارپذیری، هر نمونه ۳ بار تکرار شد و از بررسی مقاومت‌هایی که با میانگین بیش از ۱۵ درصد اختلاف داشتند صرف‌نظر گردید.



شکل ۳. قرارگیری نمونه زیر دستگاه فشاری

مخلوط خاک خشک و پودر صمغ و ج) اضافه کردن پودر صمغ به مخلوط خاک خشک و آب، برای اولویت ترکیب مواد با یکدیگر، در نظر گرفته شد. اگر چه در مقاصد اجرایی معمولاً از ترکیب شیوه بهسازی کمتر استفاده می‌گردد، اما در تحقیق حاضر، برای ارزیابی بهترین شیوه استفاده از ماده جدید صمغ فارسی در بهسازی خاک ماسه‌ای، ترکیب دو شیوه افزایش تراکم و افزودن صمغ به منظور دستیابی به مقاومت مکانیکی بهتر و هزینه احتمالی کمتر نیز بررسی شده است. همچنین، با توجه به اهمیت شیوه ترکیب مواد و محدودیت اجرایی از قبیل فشار تزریق، در مقاصد اجرایی در کشور، اولویت ترتیب اختلاط مواد ارزیابی گردید.

بلافاصله باز شده و نمونه برای عمل‌آوری به محل مورد نظر انتقال یافت.

برای انجام آزمایش کشش غیرمستقیم از دستگاه فشاری یونیورسال ساخت ایران با ظرفیت نیروی اسمی ۵۰ کیلونیوتن و دقت ۵ نیوتن استفاده گردید. قبل از قرار دادن نمونه، قطر نمونه به وسیله کولیس با دقت ۰/۱ میلی‌متر در سه مکان بالا، وسط و پایین سطح جانبی نمونه اندازه‌گیری و میانگین آن‌ها گزارش شد. همچنین، ارتفاع نمونه در سه مکان مختلف اندازه‌گیری و میانگین‌گیری گردید. برای اعمال بار یکنواخت خطی با

$$T_{SPT} = 2P/\pi hd \quad (1)$$

T_{SPT} =
Maximum splitting tensile strength
(MPa)

P = Maximum compression load (N)

h = Height (mm)

d = Diameter (mm)

۴. برنامه انجام آزمایش‌ها

در این پژوهش، بعد از انجام آزمایش اولیه شناسایی خاک، ابتدا تأثیر شیوه اختلاط مواد با یکدیگر و تراکم نسبی اولیه خاک مورد ارزیابی قرار گرفت. بدین منظور، سه تراکم نسبی اولیه ۰/۳۰، ۰/۵۰ و ۰/۷۰ برای خاک خشک و سه شیوه اختلاطی: الف) اضافه کردن محلول یکنواخت صمغ- آب به خاک خشک، ب) اضافه کردن آب به

خاک (حدود ۱۵۰ کیلوپاسکال) بوده است. اگر چه در مراجع، شیوه اختلاطی مواد بیوپلیمیری با خاک‌های دانه‌ای تأثیر زیادی در مقاومت فشاری و کششی آن‌ها نداشته است (رضایی ملک و همکاران، ۲۰۱۷)، اما در تحقیق حاضر، در هر تراکم نسبی اولیه ۳۰، ۵۰ و ۷۰ درصد برای خاک، مقاومت نمونه‌های بهسازی شده به ترتیب تا ۳۵، ۴۰ و ۴۰ درصد تفاوت داشته است. علت این امر را می‌توان اندرکنش آب-صمغ فارسی دانست. در اثر ترکیب یکنواخت اولیه آب با پودر صمغ فارسی (شیوه اختلاطی ۱)، بخش قابل انحلال صمغ به خوبی در آب حل شده و با اضافه شدن محلول یکنواخت آب-صمغ به خاک خشک، پیوندهای مؤثر بین دانه‌ای بیشتری نسبت به دو شیوه اختلاطی دیگر ایجاد می‌کند. دلیل این اتفاق این است که در اثر اضافه کردن آب به مخلوط صمغ-خاک (شیوه اختلاطی ۲) و یا اضافه کردن صمغ به خاک مرطوب (شیوه اختلاطی ۳) بخشی از آب توسط دانه‌های خشک آب جذب می‌شود و قسمتی از پودر قابل انحلال، در آب حل نشده و با همزدن مواد با یکدیگر، صمغ مرطوب روی دانه‌های جامد کشیده می‌شود و پیوند قوی بین دانه‌ای ایجاد نمی‌کند. علاوه بر شیوه اختلاطی، با افزایش تراکم نسبی اولیه خاک، مقاومت کششی ابتدا افزایش و سپس روند کاهشی را دنبال می‌کند. در ابتدا، با افزایش تراکم نسبی اولیه خاک از ۳۰٪ به ۵۰٪، حجم حفرات موجود در خاک کاهش پیدا کرده و محلول افزوده شده به خاک به خوبی در بین دانه‌های جامد پیوندهای ضخیم‌تری ایجاد می‌کند. بنابراین، پس از خشک شدن، پیوندهای بیوپلیمیری ایجاد شده در نمونه بهسازی شده با تراکم اولیه ۵۰٪ نسبت به ۳۰٪ چسبندگی بیشتری به خاک بخشیده و باعث افزایش قابلیت کششی خاک می‌شود. علت احتمالی کاهش مقاومت کششی با عبور تراکم اولیه از ۵۰٪ به ۷۰٪ را می‌توان به ارتباط بین کاهش بیش از حد حجم حفرات و افزایش طول و کاهش ضخامت پیوندهای بیوپلیمیری ایجاد شده نسبت داد (لی

سپس، تراکم و شیوه اختلاطی نمونه بهسازی شده با بیشترین مقاومت فشاری محدود نشده به عنوان تراکم و شیوه اختلاطی بهینه در نظر گرفته شد. به منظور بررسی عملکرد صمغ-آب در شرایط جوی مختلف موجود در کشور (همچون دمای زیاد در استان خوزستان و رطوبت زیاد در استان‌های ساحلی) محل‌های گیرشی مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور، عمل‌آوری نمونه‌های بهسازی شده دو محل گیرشی گرمکن با دمای ۵۰ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی صفر درصد و اتاق با دمای ۲۵ درجه سلسیوس و دو رطوبت نسبی ۱۵٪ و ۷۰٪ انجام گردید. همچنین، به منظور دستیابی به زمان عمل‌آوری بهینه، عمل‌آوری نمونه‌ها تا ۲۱ روز برای نمونه‌های عمل‌آوری شده در گرمکن و تا ۱۲۰ روز برای نمونه‌های عمل‌آوری شده در دمای اتاق ادامه پیدا کرد. در انتها، با توجه به نتایج مقاومت فشاری محدود نشده نمونه‌های مشابه به دست آمده از مطالعه اخیر (محسنی‌نیا و صالح‌زاده، ۲۰۲۳)، ارتباط بین مقاومت فشاری محدود نشده و مقاومت کششی غیرمستقیم مورد ارزیابی قرار گرفت.

۵. تحلیل نتایج و بحث

۵-۱. نتایج آزمایش کشش غیرمستقیم

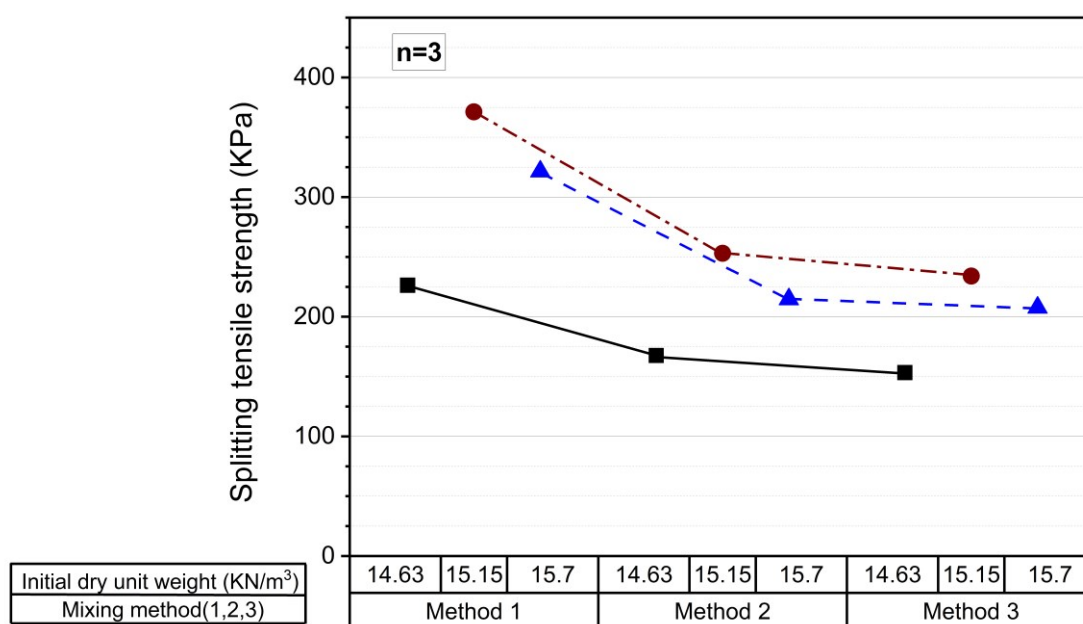
۵-۱-۱. تأثیر تراکم اولیه خاک و شیوه اختلاط بر

مقاومت کششی نمونه‌های بهسازی شده

نتایج مقاومت کششی هفت روزه نمونه‌های بهسازی شده عمل‌آوری شده در گرمکن، در سه تراکم نسبی اولیه ۳۰، ۵۰ و ۷۰ درصد برای خاک و سه شیوه اختلاطی مواد با یکدیگر در شکل ۴ نشان داده شده است. مطابق شکل ۴، بیشترین مقاومت کششی در حالت اختلاطی به شیوه ۱ و تراکم اولیه ۵۰ درصد برای خاک (حدود ۳۸۰ کیلوپاسکال) و کمترین مقاومت کششی در حالت اختلاطی به شیوه ۳ و تراکم نسبی اولیه ۳۰ درصد برای

می توان گفت که در درصد مواد اختلاطی مشخص، به- طور کلی، تراکم تأثیر مثبتی بر افزایش مقاومت کششی نمونه بهسازی شده می گذارد. از این رو، در مقاصد اجرایی تزریق یا ترکیب، اضافه کردن محلول یکنواخت صمغ فارسی- آب به خاک پیشنهاد می شود. همچنین، در اثر محدودیت های مالی، اجرایی و حتی کسب مقاومت کششی مطلوب تر، افزایش تراکم اولیه خاک تا ۵۰٪ و سپس تزریق یا ترکیب محلول صمغ فارسی- آب به خاک پیشنهاد می شود.

و چنگ، ۲۰۱۹). اگرچه افزایش تراکم در ابتدا باعث ضخیم تر شدن پیوندهای بین دانه ای ایجاد شده می شود، اما با گذر تراکم از میزان مشخص و کاهش بیش از حد نسبت منافذ خاک، محلول اضافه شده باعث ایجاد پیوندهای بین دانه ای با طول بیشتر و تعداد و ضخامت کمتر شده و در نتیجه پس از خشک شدن نمونه، چسبندگی و مقاومت کششی کمتری به خاک ماسه ای می بخشد؛ اما همچنان مقاومت کششی بیشتری نسبت به نمونه بهسازی شده با تراکم نسبی اولیه ۳۰٪ دارد. بنابراین،



شکل ۴. مقاومت کششی نمونه های بهسازی شده در تراکم نسبی اولیه و شیوه اختلاطی مختلف

داده اند به طوری که نمونه های عمل آوری شده در گرمکن، اتاقک با رطوبت نسبی کم و زیاد به ترتیب بعد از ۲۱، ۹۰ و ۱۲۰ روز به مقاومت حداکثری خود رسیده و بعد از آن روند افزایشی چشمگیری از خود نشان نداده و به گیرش نهایی خود رسیده اند. همچنین، تفاوت محسوس ۶۰ و ۱۹۰ درصدی بین مقاومت حداکثری نمونه های عمل آوری شده در گرمکن با به ترتیب نمونه های عمل آوری شده در اتاقک با رطوبت نسبی کم و زیاد مشاهده می گردد. علت این امر را می توان ارتباط مستقیم بین انعطاف پذیری پیوندهای بیوپلیمری

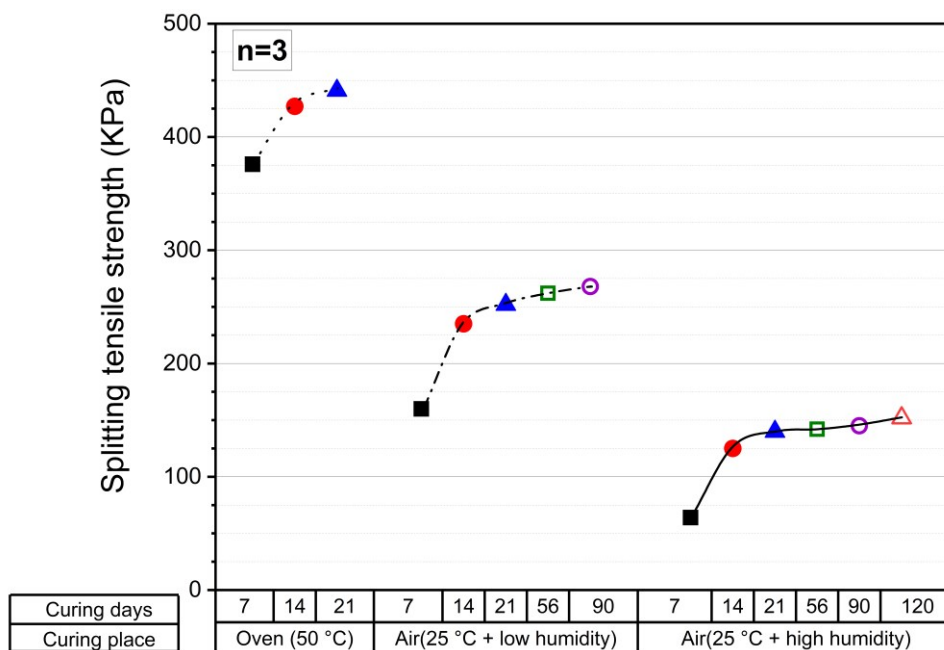
۱-۲. تأثیر مدت عمل آوری و دما و رطوبت محل

گیرش بر مقاومت کششی نمونه های بهسازی شده

نتایج مقاومت کششی نمونه های بهسازی عمل آوری شده در گرمکن ۵۰ درجه سلسیوس، رطوبت نسبی صفر و دمای اتاق با دو رطوبت نسبی محیطی کم (۱۵٪) و زیاد (۷۰٪)، با زمان های گیرشی مختلف، در شکل ۵ نشان داده شده است. مطابق شکل ۵، با افزایش زمان گیرش، پیوندهای بین دانه ای ایجاد شده مستحکم تر شده و چسبندگی و مقاومت کششی بیشتری از خود نشان

بیشتری خشک و مستحکم شده و تغییر طول کمتری می‌دهند. افزایش قطر متوسط نمونه‌های عمل‌آوری شده در اتاق نسبت به نمونه‌های گرمکن گواهی بر این ادعا است. با توجه به نتایج شکل ۵، اگر چه بهسازی با صمغ فارسی در مناطق گرمسیر با رطوبت محیطی کمتر نتایج بهتری به ارمغان می‌آورد، اما در شرایط مرطوب و رطوبت نزدیک به اشباع هم باعث افزایش مقاومت کششی خاک ماسه‌ای، از نزدیک به صفر تا به ترتیب ۲۸۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال، می‌شود.

ایجادشده و کاهش دما و افزایش رطوبت نسبی محل دانست. با کاهش دمای محل گیرش و افزایش رطوبت محیط گیرش، پیوندهای بین‌دانه‌ای ایجاد شده دیرتر خشک و مستحکم شده و به دلیل عدم وجود چسبندگی ذاتی در ماسه و انعطاف‌پذیری اولیه پیوندها، برای جلوگیری از ریزش دانه‌های جامد پیوندها دچار کشیدگی و افزایش طول می‌شوند. بنابراین، پس از خشک شدن کامل، مقاومت کششی کمتری متحمل می‌شوند. بالعکس، با افزایش دمای محل گیرش و کاهش رطوبت نسبی محیط گیرش، پیوندهای بین‌دانه‌ای با سرعت



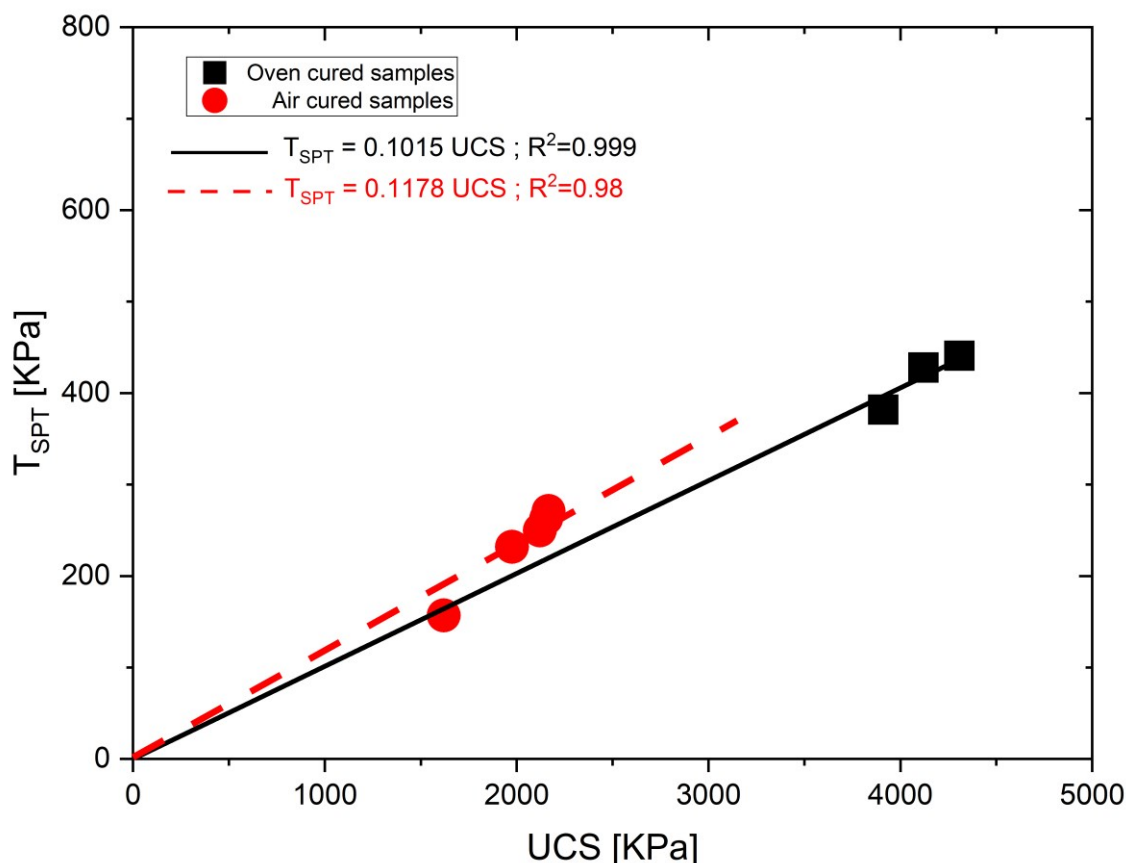
شکل ۵. مقاومت کششی نمونه‌های بهسازی‌شده در مدت و محل‌های گیرشی مختلف

خطی انجام شده مقاومت کششی، نمونه‌های عمل‌آوری شده در گرمکن با دمای ۵۰ درجه سلسیوس و دمای اتاق با رطوبت نسبی ۱۵٪ به ترتیب ۱۰٪ و ۱۱٪ مقاومت فشاری محدود نشده نمونه‌های خود را کسب کرده‌اند. به طور کلی، می‌توان گفت که باندهای بیوپلیمری ایجاد شده در بین دانه‌های جامد خاک، در برابر فشار، عملکرد بهتری داشته و نسبت مقاومت کششی به مقاومت فشاری ۱۰:۱ می‌باشد.

۲-۵. ارتباط بین نتایج مقاومت فشاری محدود

نشده و مقاومت کششی

در شکل ۶، ارتباط بین نتایج مقاومت فشاری محدود نشده نمونه‌های بهسازی‌شده عمل‌آوری شده در گرمکن و اتاق، به دست آمده از مطالعه محسنی‌نیا و صالح‌زاده (۲۰۲۳) و نتایج مقاومت کششی نمونه‌های مشابه به دست آمده از تحقیق اخیر، ترسیم شده است. با توجه به برآزش



شکل ۶. ارتباط بین مقاومت فشاری محدود نشده با مقاومت کششی نمونه‌های بهسازی شده

۶. نتیجه‌گیری

- افزایش تراکم نسبی اولیه خاک از ۳۰٪ به ۵۰٪ و ۷۰٪ ابتدا باعث افزایش و سپس کاهش مقاومت کششی نمونه‌های بهسازی شده می‌گردد. کاهش نسبت منافذ در ابتدا باعث نزدیکی دانه‌های جامد به یکدیگر و ایجاد پیوندهای ضخیم‌تر بین دو یا چند دانه و افزایش چسبندگی و مقاومت کششی شده و با افزایش بیشتر تراکم، باعث افزایش طول، کاهش ضخامت و تعداد پیوندهای بین‌دانه‌ای شده و با توجه به ارتباط مستقیم بین تعداد و ضخامت پیوندها با چسبندگی و مقاومت کششی، مقاومت کششی کاهش پیدا می‌کند.
- با افزایش زمان گیرش، مقاومت کششی نمونه‌های بهسازی شده روند افزایشی پیدا کرده و بعد از گیرش نهایی، افزایش مقاومت چشمگیری رویت نگردید.

پس از بررسی اثر مقاومت کششی غیرمستقیم (قطری) بر نمونه‌های بهسازی شده با درصد مواد اختلاطی ثابت (۲ درصد صمغ + ۱۶ درصد رطوبت) و مقایسه با نتایج مقاومت فشاری محدود نشده به‌دست آمده از تحقیق مشابه اخیر (محسنی نیا و صالحزاده، ۲۰۲۳)، گزیده نتایج به‌دست آمده اینچنین بیان می‌شود که:

- اضافه کردن محلول یکنواخت پودر صمغ فارسی - آب به خاک خشک شده (شیوه اختلاطی ۱) بهترین شیوه اختلاطی در کسب بیشترین مقاومت کششی است. علت این امر را می‌توان حل شدن کامل بخش محلول در آب صمغ و عدم جذب اولیه آب توسط دانه‌های جامد خشک خاک عنوان کرد.

- نمونه‌های عمل‌آوری شده در گرمکن و دمای اتاق با رطوبت نسبی کم و زیاد، بعد از به ترتیب ۲۱، ۹۰ و ۱۲۰ روز به گیرش نهایی خود رسیدند.
 - با افزایش رطوبت نسبی محیط گیرش، مقاومت کششی نمونه‌های بهسازی شده کاهش پیدا می‌کند. با توجه به خاصیت آب‌دوستی صمغ فارسی، با افزایش رطوبت نسبی محیط گیرش، پیوندهای بین‌دانه‌ای رفتار منعطف‌تری از خود به نمایش گذاشته و تا رسیدن به گیرش نهایی، برای جلوگیری از ریزش دانه‌های جامد خاک، تغییر شکل ماندگار از خود نشان بجا می‌گذارند و بخشی از مقاومت کششی خود را از دست می‌دهند.
 - با افزایش دمای محیط گیرش، پیوندهای بیوپلیمری ایجاد شده بین دو یا چند دانه سریع‌تر خشک شده و از حالت منعطف به مستحکم تغییر شکل پیدا می‌کنند. با توجه به ارتباط مستقیم بین استحکام پیوندها و چسبندگی بین‌دانه‌ای، مقاومت کششی نمونه‌های عمل‌آوری شده در گرمکن بیشتر از نمونه‌های مشابه اتاق می‌باشند.
 - نمونه بهسازی شده به شیوه اختلاطی ۱ و تراکم نسبی اولیه ۵۰٪ برای خاک با مقاومت کششی ۲۱ روزه
- ۴۴۲ کیلوپاسکال، بهترین عملکرد کششی را از خود نشان داد.
- با مقایسه نتایج مقاومت کششی عمل‌آوری شده با مقاومت فشاری محدود نشده نمونه‌های مشابه، عملکرد صمغ در برابر بهتر از کشش بوده به طوری که نسبت مقاومت کششی به مقاومت فشاری، یک به ده محاسبه گردید.
 - با توجه به نتایج به دست آمده، صمغ فارسی در افزایش مقاومت کششی خاک‌های دانه‌ای، در شرایط مختلف دمایی، دارای عملکرد مناسبی بوده است. همچنین، با توجه به سازگاری نسبتاً خوب با تغییرات جوی (همچون تغییر رطوبت محیط در تغییر فصول سال) امکان بررسی اجرایی و استفاده از آن در شهرهای مختلف کشور را از دید مهندسی قابل قبول می‌سازد. صمغ فارسی، به دلیل چربی بسیار کم (دبستانی و همکاران، ۲۰۱۸) (چربی عاملی مخرب در پخش و تزریق یکنواخت ماده در بافت خاک به-شمار می‌آید) و عملکرد بهتر کششی در صورت ترکیب اولیه با آب، قابلیت بهسازی اجرایی توسط تزریق را دارد، که مطالعات بیشتری را می‌طلبد.

۷. مراجع

- Bordoloi, S., Sekharan, S. and Garg, A. 2017. "A review of physio-biochemical properties of natural fibers and their application in soil reinforcement". *Adv. Civ. Eng. Mater.*, 6(1): 323-359.
- Causarano, H. 1993. "Factors affecting the tensile strength of soil aggregates". *Soil Till. Res.*, 28(1): 15-25.
- Chang, I., Im, J., Prasadhi, A. K. and Cho, G. C. 2015. "Effects of Xanthan gum biopolymer on soil strengthening". *Constr. Build. Mater.*, 74: 65-72.
- Chauhan, M. S., Mittal, S. and Mohanty, B. 2008. "Performance evaluation of silty sand subgrade reinforced with fly ash and fibre". *Geotext. Geomembranes*, 26(5): 429-435.
- Chen, C., Peng, Z., Gu, J., Peng, Y., Huang, X. and Wu, L. 2020. "Exploring environmentally friendly biopolymer material effect on soil tensile and compressive behavior". *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 17(23): 9032.
- Consoli, N. C., da Fonseca, A. V., Cruz, R. C. and Silva, S. R. 2011. "Voids/cement ratio controlling tensile strength of cement-treated soils". *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 137(11): 1126-1131.
- Dabestani, M., Kadkhodae, R., Phillips, G. O. and Abbasi, S. 2018. "Persian gum: A comprehensive review on its physicochemical and functional properties". *Food Hydrocolloids*, 78: 92-99.
- Divya, P., Viswanadham, B. and Gourc, J. 2014. "Evaluation of tensile strength-strain characteristics of fiber-reinforced soil through laboratory tests". *J. Mater. Civ. Eng.*, 26(1): 14-23.
- Fagone, M., Loccarini, F. and Ranocchiai, G. 2017. "Strength evaluation of jute fabric for the reinforcement of rammed earth structures". *Compos. Part B: Eng.*, 113: 1-13.
- Fatehi, H., Ong, D. E., Yu, J. and Chang, I. 2021. "Biopolymers as green binders for soil improvement in geotechnical applications: A review". *Geosci.*, 11(7): 291.
- Gao, L., Hu, G., Xu, N., Fu, J., Xiang, C. and Yang, C. 2015. "Experimental study on unconfined compressive strength of basalt fiber reinforced clay soil". *Adv. Mater. Sci. Eng.*, 2015.
- Ghasemzadeh, H. and Modiri, F. 2020. "Application of novel Persian gum hydrocolloid in soil stabilization". *Carbohydrate Polym.*, 246: 116639.
- Ghasemzadeh, H., Mehrpajouh, A. and Pishvaei, M. 2022. "Compressive strength of acrylic polymer-stabilized kaolinite clay modified with different additives". *ACS Omega*, 7(23): 19204-19215.
- Gilazghi, S. T., Huang, J., Rezaeimalek, S. and Bin-Shafique, S. 2016. "Stabilizing sulfate-rich high plasticity clay with moisture activated polymerization". *Eng. Geol.*, 211: 171-178.
- He, S., Bai, H. and Xu, Z. 2018. "Evaluation on tensile behavior characteristics of undisturbed loess". *Energies*, 11(8): 1974.
- Javadian, A., Wielopolski, M., Smith, I. F. and Hebel, D. E. 2016. "Bond-behavior study of newly developed bamboo-composite reinforcement in concrete". *Constr. Build. Mater.*, 122: 110-117.
- Kar, A., Das, M. R. and Mohapatra, D. 2022. "An experimental study on use of biopolymer for sustainable stabilization of slopes". *Mater. Today: Proc.*, 62: 6148-6152.
- Khodaei, D., Oltrogge, K. and Hamidi-Esfahani, Z. 2020. "Preparation and characterization of blended edible films manufactured using gelatin, tragacanth gum and Persian gum". *Lwt.*, 117: 108617.
- Lee, S. and Chang, I. 2019. "Microscopic investigation of interparticle-interaction between sand particles and biopolymer". 13th Australia New Zealand Conference on Geomechanics, Acosta-Martinez and Lehane (Eds.), Australian Geomechanics Society, Sydney, Australia.
- Mohseninia, M. and Salehzadeh, H. 2023. "Enhancing strength parameters of Firouzkooh sandy soil improved with Persian herbal gum". *Amirkabir J. Civ. Eng.*, 55(6): 1-4.
- Rezaeimalek, S., Huang, J. and Bin-Shafique, S. 2017. "Evaluation of curing method and mix design of a moisture activated polymer for sand stabilization". *Constr. Build. Mater.*, 146: 210-220.
- Seo, S., Lee, M., Im, J., Kwon, Y. M., Chung, M. K., Cho, G. C. and Chang, I. 2021. "Site application of biopolymer-based soil treatment (BPST) for slope surface protection: In-situ wet-spraying method and strengthening effect verification". *Constr. Build. Mater.*, 307: 124983.
- Tang, C. S., Pei, X. J., Wang, D. Y., Shi, B. and Li, J. 2015. "Tensile strength of compacted clayey soil". *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 141(4): 04014122.
- Turner, L. K. and Collins, F. G. 2013. "Carbon dioxide equivalent (CO₂-e) emissions: A comparison between geopolymer and OPC cement concrete". *Constr. Build. Mater.*, 43: 125-130.
- Wu, J. T. H., Pham, T. Q. and Adams, M. T. 2013. "Composite behavior of geosynthetic reinforced soil mass". Tech. Report, University of Colorado at Denver, Dept. of Civil Engineering, https://rosap.nrl.bts.gov/view/dot/35838/dot_35838_DS1.pdf
- Zhang, J., Meng, Z., Jiang, T., Wang, S., Zhao, J. and Zhao, X. 2022. "Experimental study on the shear strength of silt treated by Xanthan gum during the wetting process". *Appl. Sci.*, 12(12): 6053.

Ziegler, S., Leshchinsky, D., Ling, H. I. and Perry, E. B. 1998. "Effect of short polymeric fibers on crack development in clays". *Soils Found.*, 38(1): 247-253.