

Effect of Wet-Dry Cycles on the Compressive Strength of Soil Improved with Fibers, Cement, and Tree Gum

S.A.H. Hoseini¹, M. Bayat^{2*}, M. Mousivand³, R. Ajalloeian⁴

1- Ph.D. student, Department of Civil Engineering, Najafabad branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

2- Associate professor, Department of Civil Engineering, Najafabad branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

3- Assistant professor, Department of Civil Engineering, Gonbad Kavoods Branch, Islamic Azad University, Gonbad Kavoods, Iran

4- Professor, Department of Geology, University of Isfahan, Isfahan, Iran

ABSTRACT

Numerous studies have explored the mechanical properties of soils enhanced with various materials, including natural and synthetic fibers, either alone or combined with traditional stabilizers such as cement and lime. However, limited research has compared the performance of different natural and synthetic fibers—such as hemp, glass, cotton, and virgin fibers—under similar conditions. This study investigates the effects of these fibers at varying cement percentages, along with the partial replacement of cement by Persian gum, on the unconfined compressive strength (UCS) of soil. Experiments were conducted on samples containing cement and Persian gum after 28 days of curing under moisture-retention conditions. The results revealed that fiber inclusion significantly enhanced the UCS of the soil. Cement, as a stabilizer, yielded the highest UCS improvement, with a maximum increase of 414%. However, partially replacing cement with Persian gum led to a reduction in UCS, highlighting the limitations of Persian gum as a standalone or complementary stabilizing agent under the conditions tested. The optimal gum content was determined to be 2.75%, achieving an improvement of approximately 69% in UCS compared to untreated soil. Wet-dry cycle tests showed poor performance of fiber- and gum-reinforced specimens, with complete failure observed during the cycles. In contrast, cement-stabilized specimens exhibited better durability under these conditions.

ARTICLE INFO

Receive Date: 18 January 2025

Revise Date: 14 June 2025

Accept Date: 09 July 2025

Keywords:

Soil improvement

Cement

Fiber

Persian Gum

Wet-Dry Cycles

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2025.497561.3617

*Corresponding author: Meysam Bayat.

Email address: bayat.m@pci.iaun.ac.ir

تاثیر دوره‌های تر و خشک شدگی بر مقاومت فشاری خاک بهسازی شده با الیاف، سیمان و صمغ درختان

سید امیر حسین حسینی^۱، میثم بیات^{۲*}، محسن موسیوند^۳، رسول اجل لوئیان^۴
 ۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران
 ۲- دانشیار، گروه مهندسی عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران
 ۳- استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد گنبد کاووس، دانشگاه آزاد اسلامی، گنبد کاووس، ایران
 ۴- استاد، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

چکیده

مطالعات متعددی برای بررسی خواص مکانیکی خاک‌های بهسازی شده با استفاده از مواد مختلف، از جمله الیاف طبیعی و مصنوعی، چه به تنهایی و چه در ترکیب با تثبیت‌کننده‌های سنتی مانند سیمان و آهک، انجام شده است. باین حال، تحقیقات محدودی در مقایسه عملکرد الیاف طبیعی و مصنوعی مختلف مانند کنف، شیشه، پنبه و الیاف ویرجین تحت شرایط مشابه وجود دارد. در این مطالعه، اثرات این الیاف در درصد‌های مختلف سیمان و همچنین جایگزینی جزئی سیمان با صمغ درختان بر مقاومت فشاری محدود نشده^۱ (UCS) خاک بصورت آزمایشگاهی بررسی شد. آزمایش‌های UCS برای نمونه‌های حاوی سیمان و صمغ فارسی پس از ۲۸ روز عمل‌آوری در شرایط حفظ رطوبت انجام گرفت. نتایج نشان داد که افزودن الیاف به خاک، منجر به بهبود قابل ملاحظه عملکرد مقاومت فشاری محدود نشده شد. استفاده از سیمان به عنوان تثبیت‌کننده، بیشترین بهبود را در مقاومت فشاری محدود نشده نشان داد و حداکثر بهبود ۴۱۴ درصدی حاصل شد. باین حال، جایگزینی جزئی سیمان با صمغ درختان منجر به کاهش مقاومت فشاری گردید که محدودیت‌های صمغ را به عنوان یک عامل تثبیت‌کننده منفرد یا مکمل تحت شرایط مطالعه شده نشان می‌دهد. مقدار بهینه صمغ ۲/۷۵ درصد شناسایی شد که منجر به بهبود مقاومت فشاری محدود نشده تا ۶۹ درصد نسبت به خاک بدون اصلاح شد. نتایج آزمایش‌ها تحت دوره‌های تر و خشک‌شدگی^۲ (WDC) مقاومت بسیار پایین نمونه‌های بهسازی شده با الیاف و صمغ را نشان داد، بطوریکه نمونه‌ها در طول دوره‌های تر و خشک‌شدگی کاملاً از بین رفتند؛ این در حالی بود که نمونه‌های حاوی سیمان عملکرد بهتری از خود نشان دادند.

کلمات کلیدی: بهسازی خاک، سیمان، الیاف، صمغ فارسی، تر و خشک‌شدگی

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	شناسه دیجیتال:	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
10.22065/jsce.2025.497561.3617	10.22065/jsce.2025.497561.3617	۱۴۰۴/۱۲/۲۹	۱۴۰۴/۰۴/۱۸	۱۴۰۴/۰۴/۱۸	۱۴۰۴/۰۳/۲۴	۱۴۰۳/۱۰/۲۹
			میثم بیات		*نویسنده مسئول:	
			bayat.m@pci.iaun.ac.ir		پست الکترونیکی:	

¹ Unconfined Compression Strength

² Wet-Dry Cycles

۱- مقدمه

خاک‌های سست معمولاً با خواص مکانیکی و ژئوتکنیکی ضعیف، مانند مقاومت کم و تغییر حجم بالا مشخص می‌شوند که باعث می‌شود برای تحمل بارهای وارد شده بدون بهسازی نامناسب باشند [۴-۱]. برای مقابله با این چالش‌ها، روش‌های تثبیت و بهسازی به‌طور گسترده برای بهبود عملکرد خاک به کار گرفته می‌شود. افزودنی‌های سنتی، مانند سیمان و آهک، به‌طور گسترده‌ای در تثبیت خاک استفاده می‌شوند تا مقاومت را افزایش دهند، تغییر حجم ناشی از بار وارده را کاهش دهند و دوام در برابر پدیده‌های طبیعی را بهبود بخشند [۷-۵]. با این حال، این افزودنی‌ها اغلب منجر به رفتار ترد می‌شوند، زیرا پیوندهای سیمانی سختی را درون بافت خاک تشکیل می‌نمایند که می‌تواند تحت بارگذاری منجر به شکست‌های ناگهانی شود [۸-۱۰]. سیمان و آهک عمدتاً از طریق واکنش‌های هیدراتاسیون و پوزولانی با ذرات خاک واکنش می‌دهند که منجر به تشکیل ترکیبات سیمانی مانند هیدرات‌های سیلیکات کلسیم^۳ (C-S-H) و هیدرات‌های آلومینات کلسیم^۴ (C-A-H) می‌شود. این ترکیبات به‌عنوان عوامل چسباننده عمل کرده و یک چارچوب سخت ایجاد می‌کنند که ساختار خاک را تقویت کرده و تغییر شکل‌پذیری آن را کاهش می‌دهند. علاوه بر این، با افزایش دوره عمل‌آوری سیمان و آهک، خاک را با پرکردن حفره‌ها و کاهش تخلخل، فشرده نموده و منجر به افزایش مقاومت برشی و مقاومت فشاری می‌شود. مواد سیمانی همچنین دوام بلندمدت خاک‌های ضعیف را با کاهش رفتار انقباض-انبساط و بهبود مقاومت در برابر عواملی مانند دوره‌های تر و خشک شدگی و ذوب و یخبندان تقویت می‌کنند. این اثرات ترکیبی، سیمان و آهک را در تبدیل خاک‌های ضعیف به بستری قوی و پایدار برای کاربردهای عمرانی و زیرساخت‌ها بسیار مؤثر می‌سازد.

پیشرفت‌های اخیر بر استفاده از الیاف طبیعی یا مصنوعی به‌عنوان روشی برای غلبه بر محدودیت‌های روش‌های تثبیت سنتی متمرکز شده است. گنجاندن الیاف در خاک‌های تثبیت‌شده با سیمان یا آهک، شکنندگی را کاهش داده و چقرمگی را با پل زدن بر روی میکروتکرک‌ها و توزیع یکنواخت‌تر تنش‌ها بهبود می‌بخشد. الیاف، چه طبیعی (مانند کنف، کویر، و پنبه) و چه مصنوعی (مانند شیشه، پلی‌پروپیلن، الیاف بکر، و پلی‌استر)، تأثیر قابل‌توجهی بر میکروساختار و ماکروساختار خاک‌های تقویت‌شده با الیاف دارند [۹-۱۱]. الیاف طبیعی و مصنوعی عمدتاً از نظر منشأ، ترکیب و خواص تفاوت دارند. الیاف طبیعی از گیاهان یا حیوانات به‌دست می‌آیند و قابل‌تجزیه بیولوژیکی، تجدیدپذیر و دوستدار محیط‌زیست هستند [۱۲-۱۳]. این الیاف معمولاً دارای مقاومت کششی و الاستیسیته خوبی هستند، اما ممکن است محدودیت‌هایی مانند جذب رطوبت و آسیب‌پذیری در برابر فساد در طول زمان داشته باشند. از سوی دیگر، الیاف مصنوعی ساخته‌شده توسط انسان هستند که معمولاً از پلیمرهای مبتنی بر پتروشیمی مانند پلی‌پروپیلن، پلی‌استر یا شیشه تولید می‌شوند [۱۵-۱۴]. این الیاف برای داشتن دوام بالا، مقاومت در برابر تخریب محیطی و خواص ویژه مانند مقاومت کششی و مقاومت شیمیایی طراحی شده‌اند. برخلاف الیاف طبیعی، الیاف مصنوعی معمولاً قابل‌تجزیه بیولوژیکی نیستند، اما از نظر کیفیت و عملکرد یکنواخت‌تر هستند. انتخاب بین الیاف طبیعی و مصنوعی بستگی به نیازهای خاص یک کاربرد، از جمله ملاحظات محیطی، خواص مکانیکی و مقرون به‌صرفه بودن دارد.

در سطح میکروساختاری، الیاف، تعامل بین ذرات خاک و تثبیت‌کننده‌ها را تقویت کرده و تمایل به آغاز و گسترش ترک‌ها را کاهش می‌دهند. در سطح ماکروساختاری، الیاف به‌عنوان عناصر تقویتی عمل کرده و چسبندگی، مقاومت اصطکاکی و مقاومت کششی را بهبود می‌دهد که این موضوع منجر به افزایش ظرفیت باربری و مقاومت به تغییر شکل خاک می‌شود [۱۶-۱۸]. این رویکرد ترکیبی تثبیت با مواد سیمانی و تقویت با الیاف‌ها، نه‌تنها خواص مکانیکی خاک‌های ضعیف را بهبود می‌بخشد، بلکه راه‌حل پایدارتر و مقاوم‌تری برای کاربردهای ژئوتکنیکی فراهم می‌کند [۱۰، ۱۹]. با تنظیم نوع و میزان الیاف در خاک‌های تثبیت‌شده، مهندسان می‌توانند عملکرد خاک‌های ضعیف را برای نیازهای مختلف ساختمانی بهینه‌سازی کرده و هم‌زمان استحکام و دوام آن‌ها را تضمین کنند.

³ Calcium Silicates Hydrates

⁴ Calcium Aluminate Hydrates

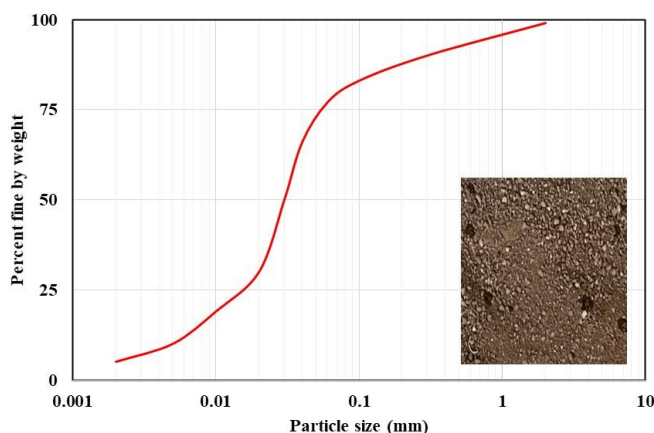
بیوپلیمرها، پلیمرهای طبیعی هستند که توسط موجودات زنده تولید می‌شوند یا از منابع بیولوژیکی تجدیدپذیر سنتز می‌شوند [۲۰]. آن‌ها جایگزین‌های پایدار و دوستدار محیط‌زیست برای پلیمرهای مصنوعی به دلیل قابلیت تجزیه بیولوژیکی، غیرسمی با توانایی بهبود مواد هستند [۲۱]. یکی از نمونه‌های بارز آن صمغ فارسی^۵ است که یک بیوپلیمر گیاهی است که از درختان بادام استخراج می‌شود که معمولاً در مناطق خشک ایران یافت می‌شود. صمغ فارسی به خاطر ظرفیت بالای نگهداری آب، خواص چسبندگی و سازگاری زیستی خود شناخته شده است و آن را به ماده‌ای امیدوارکننده برای کاربردهای مختلف مهندسی تبدیل کرده است [۲۲، ۲۳]. در کاربردهای مهندسی، بیوپلیمرها به طور فزاینده‌ای برای بهبود عملکرد و پایداری مواد استفاده می‌شوند [۲۴]. آن‌ها می‌توانند دوام و استحکام بتن را افزایش دهند، به عنوان عوامل تثبیت‌کننده در بهبود رفتار خاک عمل کرده و ردپای زیست‌محیطی فرآیندهای ساختمانی را کاهش دهند [۲۵]. بیوپلیمرها، همچنین در تصفیه آب، کنترل فرسایش و به عنوان افزودنی‌هایی برای بهبود کارپذیری و چسبندگی مواد ساختمانی کاربرد دارند [۲۶]. در مهندسی ژئوتکنیک، بیوپلیمرها به دلیل توانایی خود در تثبیت خاک‌های ضعیف و کاهش اثرات زیست‌محیطی، توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند، [۲۷، ۲۸]. زمانی که با خاک ترکیب می‌شوند، زیست‌پلیمرها یک ماتریس چسبیده تشکیل می‌دهند که ذرات را به هم پیوند داده و مقاومت برشی را بهبود می‌بخشد. همچنین منجر به کاهش نفوذپذیری خاک شده و مقاومت در برابر فرسایش را افزایش می‌دهد. به عنوان مثال، صمغ فارسی با خواص چسبندگی و آب‌دوستی منحصر به فرد خود در تثبیت خاک، به ویژه در محیط‌های خشک و نیمه‌خشک، پتانسیل بالایی نشان داده است. علاوه بر این، بیوپلیمرها می‌توانند در تثبیت شیب‌ها و کنترل گرد و غبار استفاده شوند و به عنوان یک جایگزین پایدار برای تثبیت‌کننده‌های سنتی مانند سیمان و آهک عمل کنند [۲۷].

در این مطالعه، رویکرد نوآورانه‌ای برای بهبود خواص مکانیکی خاک‌های ضعیف با استفاده از الیاف طبیعی و مصنوعی به عنوان افزودنی جهت بهسازی خاک‌های ضعیف ارائه شده است. فراتر از تقویت ساده با الیاف، تکنیک‌های تثبیت پیشرفته‌ای را با افزودن ترکیب‌های مختلفی از سیمان، بیوپلیمر و الیاف بررسی شده است. در نهایت دوام نمونه‌های بهسازی شده با افزودنی‌های مورد نظر را در برابر دوره‌های تر و خشک شدگی مورد بررسی قرار گرفته شده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مصالح

خاک استفاده شده در این مطالعه، خاک رسی بود که طبق سیستم طبقه‌بندی خاک‌های متحد (USCS) به عنوان CL طبقه‌بندی می‌شود. خاک رسی با حالت خمیری کم که در ناحیه اطراف شهرکرد جمع‌آوری شده است. منحنی توزیع اندازه ذرات و خواص فیزیکی و ژئوتکنیکی خاک در شکل ۲ و جدول ۱ به ترتیب ارائه شده‌اند.



شکل ۱: خاک رسی مورد استفاده در این تحقیق به همراه منحنی دانه‌بندی آن

⁵ Persian Gum

جدول ۱: خصوصیات فیزیکی و ژئوتکنیکی خاک مورد استفاده

مقدار	خصوصیت
۱۶	ماسه (%)
۶۶	لای (%)
۱۸	رس (%)
۲۶/۵	حد روانی (%)
۱۱/۶	شاخص خمیری (%)
۲/۲۶	Gs
۱۷	رطوبت بهینه (%)
۱/۸۵	وزن مخصوص حداکثر (g/cm^3)
1×10^{-6}	ضریب نفوذپذیری (cm/s)

مواد استفاده شده به عنوان افزودنی در این مطالعه الیافها، سیمان و صمغ فارسی بوده است. چهار نوع الیاف (شیشه، ویرجین، پنبه و کنف) برای تقویت نمونه‌های خاک به کار گرفته شدند. الیاف شیشه و کنف با طول متوسط ۳۰ میلی‌متر استفاده شدند، در حالی که الیاف ویرجین و پنبه به صورت توده‌ای به خاک افزوده شدند که در این حالت مفهوم طول کاربرد ندارد. خواص فیزیکی و مکانیکی این الیاف در جدول ۲ ارائه شده است و نقش آن‌ها در تثبیت خاک به شرح زیر خلاصه شده است.

الیاف مصنوعی شیشه، بسیار مقاوم و دارای استحکام کششی عالی، ثبات حرارتی و مقاومت بالا در برابر تخریب محیطی هستند که آن‌ها را برای تقویت خاک‌ها در شرایط سخت ایده‌آل می‌سازد. الیاف ویرجین، که آن‌ها نیز مصنوعی هستند، از پلیمرهای خالص و دست‌نخورده ساخته شده‌اند و نسبت به الیاف بازیافتی، استحکام بالا، دوام زیاد و کیفیت یکنواخت‌تری دارند. از طرف دیگر، الیاف پنبه که از منابع گیاهی طبیعی به دست می‌آیند، زیست‌تخریب‌پذیر و تجدیدپذیر بوده و گزینه‌ای سازگار با محیط زیست با استحکام کششی متوسط و ظرفیت جذب آب خوب ارائه می‌دهند. با این حال، در شرایط سخت و به مرور زمان قابل تجزیه هستند. الیاف کنف، گزینه‌ای طبیعی دیگر، از ساقه گیاه کنف استخراج می‌شوند و به دلیل استحکام کششی بالا، دوام و مقاومت در برابر تجزیه میکروبی، برای کاربردهای ژئوتکنیکی با تمرکز بر پایداری مناسب هستند. مقدار الیاف مصرفی در این مطالعه، از صفر تا ۰/۵ درصد به صورت وزنی متغیر بود.

جدول ۲: خصوصیات فیزیکی و مکانیکی الیاف‌های مورد استفاده

خصوصیت	الیاف کنف ^۶ (HF)	الیاف پنبه ^۷ (CF)	الیاف ویرجین ^۸ (VF)	الیاف شیشه ^۹ (GF)
نوع	طبیعی	طبیعی	مصنوعی	مصنوعی
طول متوسط (mm)	۳۰	N/A	N/A	۳۰
مقاومت کششی (MPa)	۶۹۰	۵۵۰	۶۰۰	۲۵۰۰
مدول الاستیک (GPa)	۴۰	۱۲	۱.۵	۷۰
جرم مخصوص (g/cm^3)	۱/۴۸	۱/۵۴	۱.۳	۲/۵۵
N/A: الیاف بهم پیوسته بوده و طول قابل اندازه‌گیری نبود				

سایر مصالح مورد استفاده در این تحقیق سیمان و صمغ فارسی بودند. در این مقاله، سیمان پرتلند نوع II به عنوان عامل اصلی تثبیت‌کننده برای نمونه‌ها انتخاب شد.

همچنین صمغ فارسی مورد استفاده، به عنوان یک پلی‌ساکارید (بیوپلیمر طبیعی)، از درختان بادام در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران استخراج شد. عناصر معدنی مانند منیزیم، کلسیم، آهن، روی، سدیم و پتاسیم به عنوان کاتیون‌های دوگانه و تک‌گانه در

⁶ Hemp Fiber

⁷ Cotton Fiber

⁸ Virgin Fiber

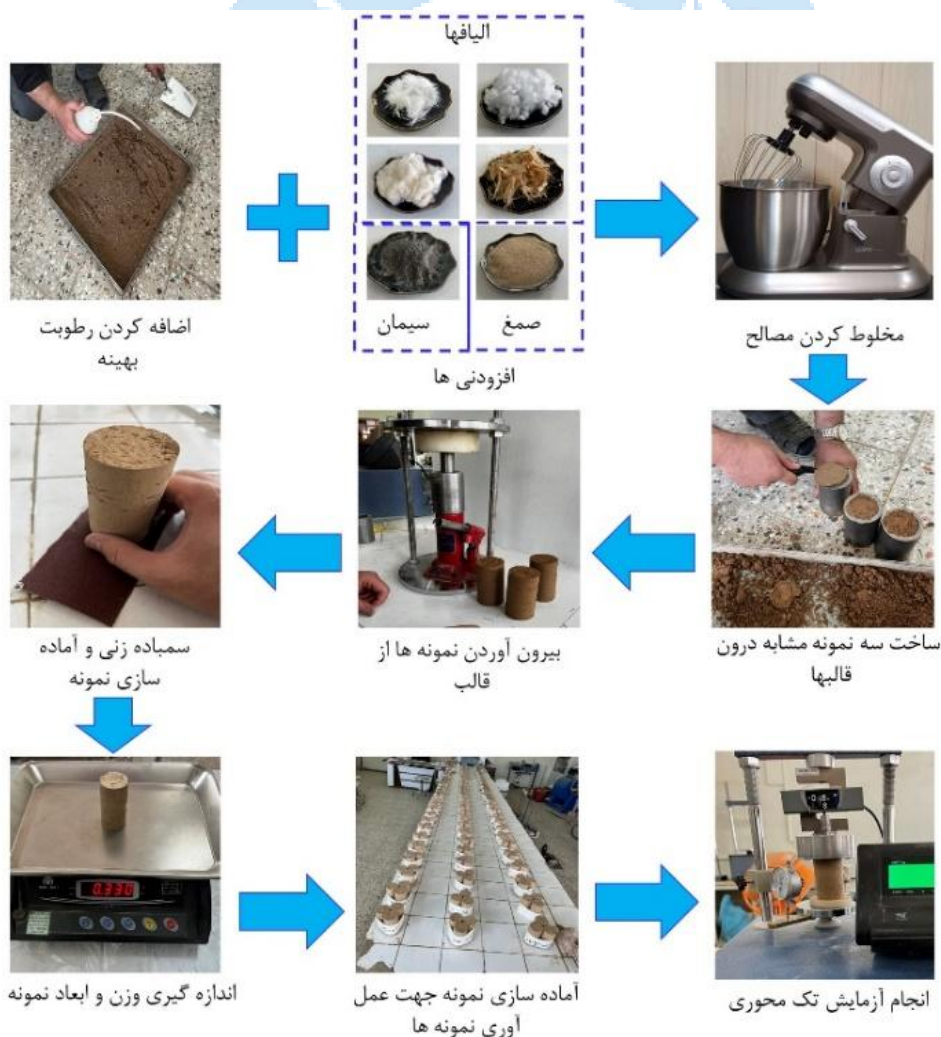
⁹ Glass Fiber

این صمغ وجود دارند. صمغ بکار رفته بصورت پودر سفید با خصوصیت اسیدیته ۴ با درصد خلوص ۹۶ درصد بود. این بیوپلیمر از مونوساکاریدهایی شامل عربینوز و گالاکتوز و نیز زایلوز، رامنوز و مانوز تشکیل شده است.

زمانی که صمغ فارسی با آب مخلوط می‌شود، یک محلول ژل مانند ویسکوز تشکیل می‌دهد که دارای قدرت چسبندگی قابل توجهی است و موجب افزایش پیوستگی ذرات خاک می‌شود و یک بافت یکنواخت تر و پایدارتر ایجاد می‌کند. افزودن این صمغ به خاک، خواص مکانیکی آن را بهبود می‌بخشد، نفوذپذیری را کاهش می‌دهد و مقاومت در برابر فرسایش را افزایش می‌دهد. علاوه بر این، طبیعت زیست‌تخریب پذیر و سازگار با محیط‌زیست این بیوپلیمر آن را به گزینه‌ای عالی برای جایگزینی تثبیت‌کننده‌های مصنوعی تبدیل می‌کند که به ارتقای شیوه‌های مهندسی پایدار کمک می‌کند.

۲-۲- آماده‌سازی نمونه‌ها

قبل از وارد کردن صمغ فارسی به خاک، یک سری مراحل آماده‌سازی انجام شد تا عملکرد بهینه آن در تثبیت خاک تضمین شود. ابتدا، صمغ خام فارسی با استفاده از یک آسیاب مکانیکی خرد شد تا به ذرات کوچکتر تبدیل شود. سپس، ماده خرد شده الک شد و تنها بخشی که از الک شماره ۱۰۰ عبور کرد برای استفاده انتخاب شد تا اندازه ذرات ریز و یکنواختی حاصل شود. سپس صمغ فرآوری شده در آب داغ با دمای تقریباً ۹۰ درجه سانتی‌گراد به نسبت ۱:۳ حل شد تا فرآیند هیدراتاسیون و انحلال صمغ تسهیل شود و محلول ویسکوز همگن تشکیل شود. آزمایش‌های اولیه نشان داد که این نسبت برای دستیابی به ویسکوزیته و کارایی مطلوب بهینه بود.



شکل ۲: مراحل مختلف آماده سازی نمونه ها و انجام آزمایش تک محوری

استفاده از آب بیشتر باعث رقیق شدن بیش از حد محلول می‌شد و اثر چسبندگی آن کاهش می‌یافت و مخلوط کردن یکنواخت با خاک دشوار می‌شد. از سوی دیگر، استفاده از آب کمتر باعث تولید محلولی غلیظ و ویسکوز می‌شد که فرآیند مخلوط کردن را پیچیده می‌کرد و احتمال گلوله‌شدن صمغ را افزایش می‌داد. این تعادل باعث شد که صمغ فارسی به طور مؤثر در ماتریس خاک وارد شود و خواص تثبیت کننده خاک را تقویت کند. محلول به طور کامل هم زده شد تا از مخلوط شدن یکنواخت و کامل آن اطمینان حاصل شود. پس از آن، مخلوط برای سه روز در دمای اتاق رها شد تا خنک شود، به طوری که صمغ به طور کامل هیدراته شده و خواص چسبندگی خود را به دست آورد. این فرآیند، برای تقویت قدرت چسبندگی صمغ و تضمین اثربخشی آن به عنوان تثبیت کننده خاک حیاتی بود. محلول صمغ فارسی آماده شده سپس برای وارد کردن به خاک آماده شد، جایی که انتظار می‌رفت پیوستگی خاک را بهبود بخشد، شکنندگی را کاهش دهد و خواص مکانیکی کلی خاک را تقویت کند.

آماده سازی نمونه‌ها در این مطالعه طبق یک فرآیند استاندارد شده انجام شد تا از یکپارچگی و قابلیت اطمینان نتایج اطمینان حاصل شود. در ابتدا، خاک جمع‌آوری شده در گرمخانه در دمای حدود ۱۰۵ سانتیگراد به مدت ۲۴ ساعت خشک شد تا تمام رطوبت آن از بین برود و یک پایه یکنواخت برای افزودن آب و افزودنی‌ها فراهم شود. روند آماده‌سازی نمونه‌ها در شکل ۲ نشان داده شده است. پس از خشک کردن، آب به خاک اضافه شد تا رطوبت بهینه آن که از طریق آزمایش‌های استاندارد تراکم پروتکتور تعیین شده، به دست آید. مقدار آب به دقت اندازه‌گیری و با خاک مخلوط شد تا توزیع یکنواختی حاصل شود. سپس مقادیر مورد نیاز افزودنی‌ها، شامل الیاف، سیمان و صمغ فارسی به خاک میزبان اضافه شده است. خاک مرطوب و افزودنی‌ها در یک همزن مکانیکی مخلوط شدند تا ترکیب همگنی به دست آید. فرآیند مخلوط کردن برای مدت زمان مشخصی انجام شد تا افزودنی‌ها به طور یکنواخت در سراسر خاک توزیع شوند. پس از آن، مخلوط خاک آماده شده در قالب‌های با قطر ۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر در سه لایه بوسیله چکش متراکم شد. پس از بیرون آوردن نمونه‌ها از قالب، آن‌ها برای مدت‌های مشخصی بسته به نوع افزودنی، عمل‌آوری شدند. نمونه‌های حاوی الیاف در محیط کنترل شده نگهداری شده و پس از ۷ روز عمل‌آوری مورد آزمایش قرار گرفتند تا اثرات کوتاه‌مدت تقویت الیاف ارزیابی شود. در مقابل، نمونه‌های تثبیت شده با سیمان یا بیوپلیمر برای ۲۸ روز عمل‌آوری شدند تا هیدراتاسیون کافی انجام شده و مقاومت لازم، قبل از آزمایش ایجاد شود.

۲-۳- آزمایشات آزمایشگاهی

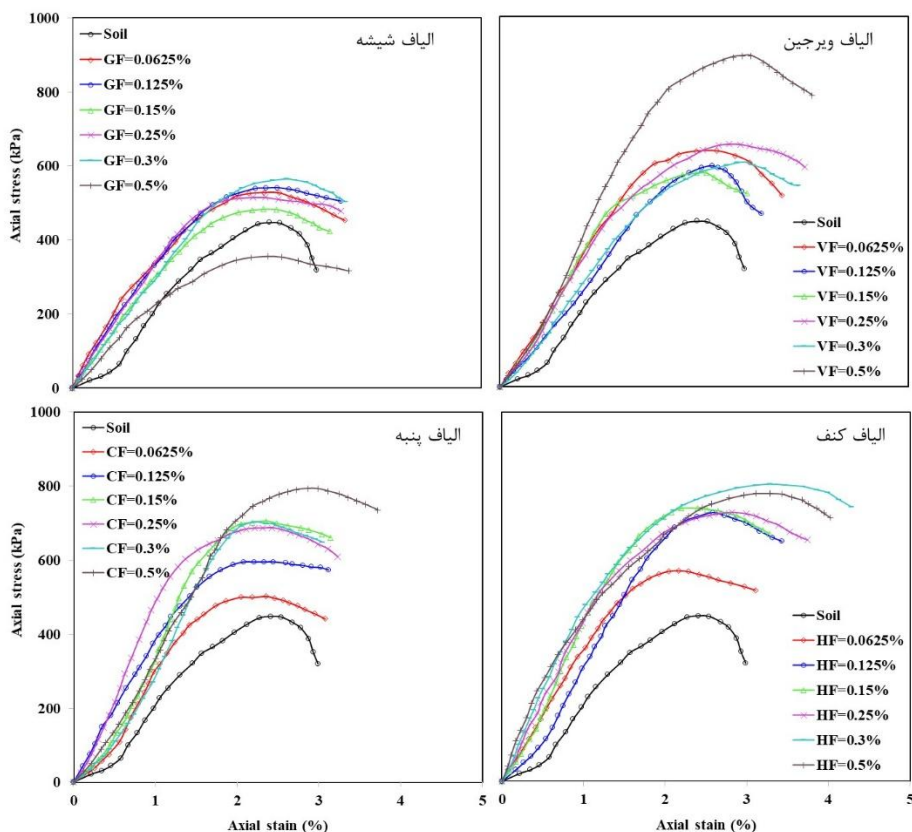
در مطالعه حاضر، از آزمایش مقاومت فشاری (UCS) برای ارزیابی استحکام نمونه‌های بهبود یافته با افزودنی‌های مختلف از جمله الیاف، سیمان و زیست‌پلیمر، طبق استاندارد ASTM D2166 استفاده شده است. برای هر شرایط آزمایشی، سه نمونه با شرایط یکسان تهیه شده و در نهایت آزمایش شده است و میانگین مقدار UCS ثبت شده، بعنوان نتیجه نهایی در نظر گرفته شده است. این موضوع متضمن دقت و قابلیت اطمینان نتایج خواهد بود. نمونه‌ها تحت بارگذاری محوری با نرخ کرنش ثابت ۱٪ در دقیقه قرار گرفتند و بارگذاری تا زمانی ادامه یافت که تنش به مقدار اوج خود برسد.

۳- نتایج و بحث‌ها

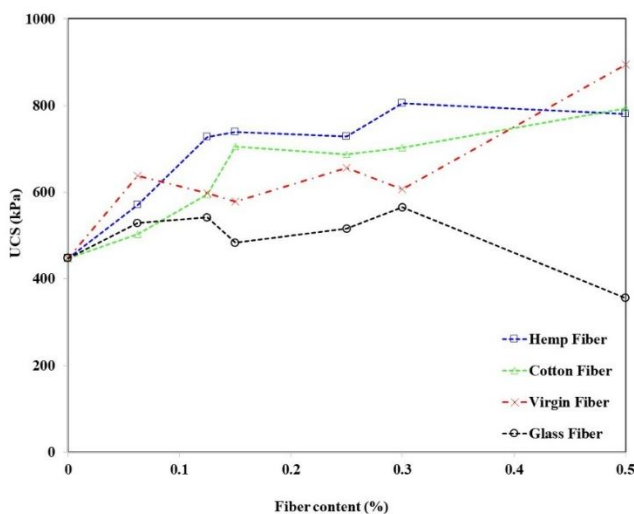
۳-۱- مقاومت فشاری نمونه‌های بهسازی شده با الیاف

شکل ۳ نتایج آزمایش‌های تک محوری برای نمونه‌های تقویت شده با الیاف با مقادیر مختلف الیاف را نشان می‌دهد. تغییرات مقادیر مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی الیاف در مقابل درصد الیاف برای الیاف‌های مختلف در شکل ۴ نشان داده شده است. همانطور که از این شکل‌ها مشاهده می‌شود، اضافه کردن الیاف به طور قابل توجهی، مقاومت فشاری خاک طبیعی را بهبود داده است که اثربخشی بهسازی خاک با الیاف را نشان می‌دهد. با این حال، در یک مورد خاص (۵/۰ درصد الیاف شیشه)، مشاهده شد که مقاومت تک محوری کمتر از خاک طبیعی بوده است. این ناهنجاری ممکن است به عدم پیوند کافی بین الیاف شیشه‌ای و توده خاک نسبت داده شود که منجر به ایجاد سطوح اتصال ضعیف و کاهش اثر بهسازی شود. تغییرات مقاومت تک محوری نمونه‌های حاوی درصد‌های مختلف الیاف نسبت به نمونه

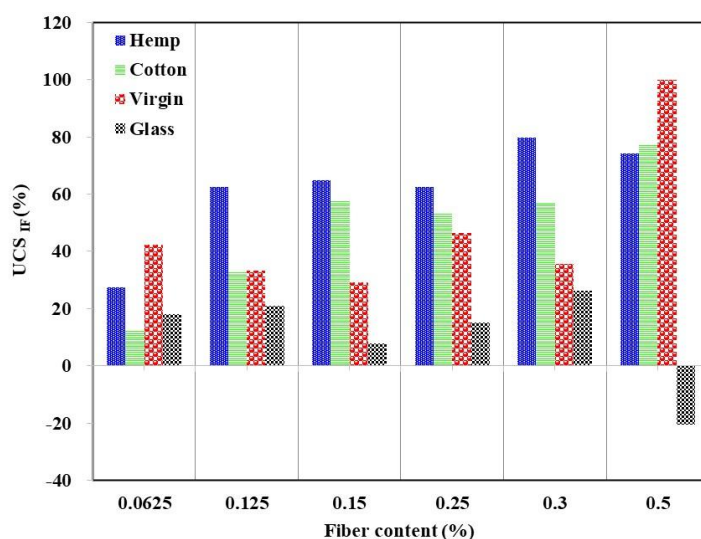
خاک طبیعی در شکل ۵ نشان داده شده است. در این شکل محور عمودی (UCS_{IF}) است که تغییر مقاومت فشاری نمونه بهسازی شده با الیاف را نسبت به نمونه خاک طبیعی نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که در بین الیاف آزمایش شده، الیاف کنف بهترین عملکرد را داشته و مقادیر مقاومت تک محوری بالاتری در بیشتر مقادیر الیاف نشان می‌دهد. این موضوع می‌تواند به دلیل مقاومت کششی بالاتر، دوام و سازگاری بهتر کنف با خاک باشد که مکانیسم انتقال بار را تقویت کرده و توزیع تنش یکنواخت‌تری فراهم می‌آورد. از طرف دیگر مقدار بهینه الیاف‌های مختلف مصرفی در خاک رسی مورد مطالعه، متفاوت است که می‌تواند بدلیل اندرکنش متفاوت الیاف‌ها با ذرات خاک باشد. بیشترین مقدار افزایش مقاومت در نمونه حاوی ۰/۵ درصد الیاف ویرجین بدست آمده است که حدود ۱۰۰٪ افزایش مقاومت فشاری نشان داده است.



شکل ۳: تاثیر الیاف‌های مختلف بر مقاومت فشاری تک محوری بر روی نمونه‌های بهسازی شده



شکل ۴: تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی الیاف در مقابل مقدار الیاف



شکل ۵: درصد تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های بهسازی شده با درصدهای مختلف الیاف نسبت به خاک طبیعی

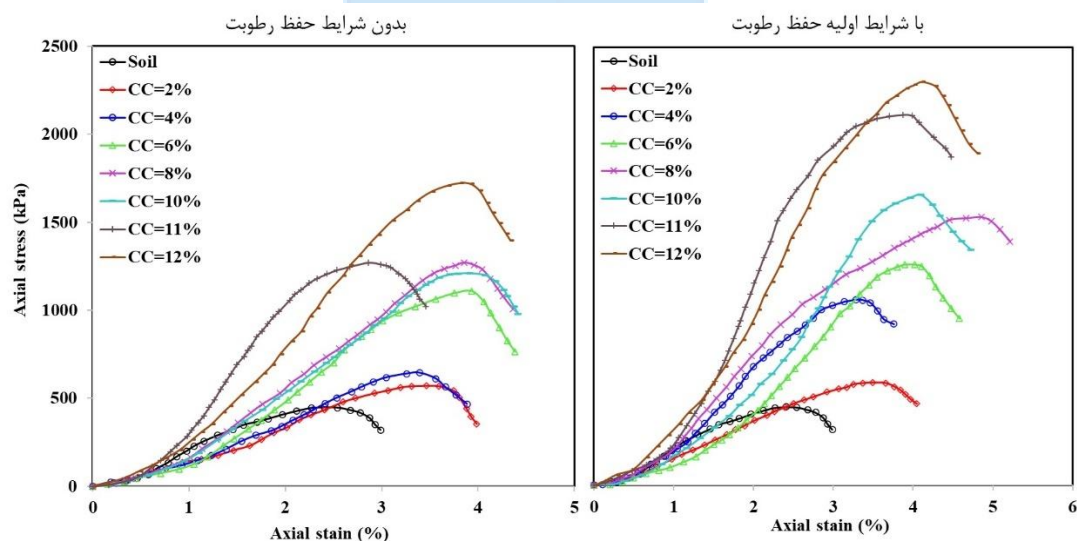
۳-۲- مقاومت فشاری نمونه‌های بهسازی شده با سیمان

در این بخش، آزمایش‌های UCS بر روی دو گروه از نمونه‌های خاک تثبیت‌شده با سیمان انجام شد که میزان سیمان در آن‌ها از ۰٪ تا ۱۲٪ متغیر بود. گروه اول شامل نمونه‌هایی بود که تحت شرایط ویژه‌ای برای حفظ رطوبت ثابت عمل‌آوری شدند، در حالی که گروه دوم تحت شرایط آزمایشگاهی استاندارد بدون اقدامات اضافی برای حفظ رطوبت قرار گرفتند. برای شرایط ویژه عمل‌آوری، نمونه‌ها در دو لایه نایلون زپی قرار گرفتند و به مدت سه روز در داخل یک ظرف آب قرار داده شدند. پس از آن، نمونه‌ها به محیط آزمایشگاهی بدون پوشش منتقل شدند. این شرایط، رطوبت اولیه بهینه برای هیدراتاسیون سیمان فراهم می‌شد که منجر به تشکیل ماتریسی متراکم و همبسته می‌شود. در مقابل، نمونه‌های گروه دوم بدون هیچ‌گونه پوشش یا کنترل رطوبت اضافی در معرض محیط آزمایشگاهی قرار گرفتند. این روش شرایط عمل‌آوری معمولی را منعکس می‌کند که ممکن است منجر به تغییرات در سطح رطوبت به دلیل تبخیر شود. تمام نمونه‌ها پس از دوره عمل‌آوری ۲۸ روزه تحت آزمایش قرار گرفتند تا تأثیر شرایط عمل‌آوری بر استحکام خاک تثبیت‌شده با سیمان بررسی شود. تأثیر زمان عمل‌آوری بر استحکام نمونه‌های تثبیت‌شده با سیمان در این مطالعه در نظر گرفته نشد، زیرا این تأثیر در تحقیقات پیشین به‌طور گسترده مستند شده است. مطالعات متعددی نشان داده‌اند که مدت زمان عمل‌آوری طولانی‌تر، معمولاً مقاومت فشاری خاک‌های تثبیت‌شده با سیمان را بهبود می‌بخشد، زیرا هیدراتاسیون در طول زمان ادامه می‌یابد و منجر به تشکیل پیوندهای سیمانی قوی‌تر می‌شود [۲۹-۳۱]. برای حفظ تمرکز بر مقایسه تأثیر شرایط عمل‌آوری (حفظ رطوبت در مقابل عمل‌آوری در معرض هوا) و جلوگیری از معرفی متغیرهای اضافی، زمان عمل‌آوری ثابت ۲۸ روزه انتخاب شده است.

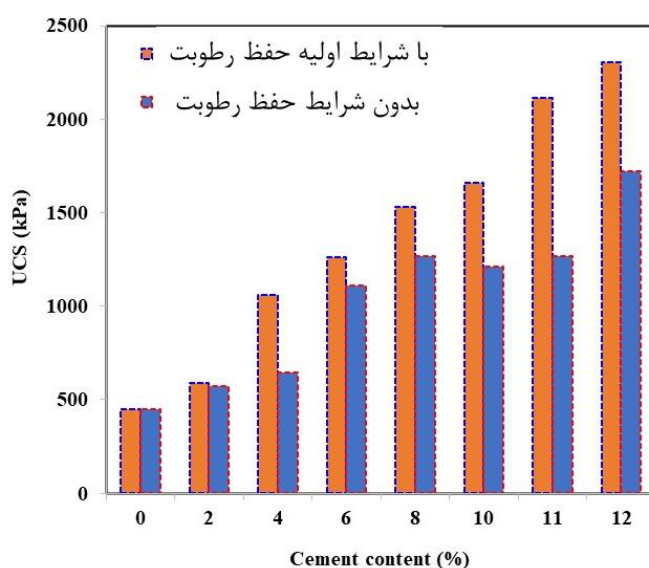
نمودارهای تنش-کرنش برای دو گروه از نمونه‌های تثبیت‌شده با سیمان — نمونه‌ها با شرایط اولیه حفظ رطوبت و نمونه‌ها بدون شرایط حفظ رطوبت در شکل ۶ نشان داده شده است. تغییرات مقادیر مقاومت فشاری با مقدار سیمان در شکل ۷ نمایش داده شده است. نتایج نشان می‌دهند که مقادیر مقاومت فشاری با افزایش میزان سیمان مصرفی، برای هر دو شرایط عمل‌آوری به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد، که اثربخشی سیمان به عنوان یک عامل تثبیت‌کننده را تأکید می‌کند.

با این حال، شرایط عمل‌آوری نقش مهمی در عملکرد نمونه‌های تثبیت‌شده با سیمان ایفا می‌کند. برای یک مقدار سیمان مشخص، مقاومت فشاری نمونه‌ها تحت شرایط اولیه حفظ رطوبت همواره بالاتر از مقادیر مقاومت فشاری نمونه‌های بدون شرایط حفظ رطوبت است. این تفاوت به این دلیل است که حفظ رطوبت در طول عمل‌آوری اطمینان حاصل می‌کند که هیدراتاسیون سیمان بصورت

کامل انجام شده و باعث تشکیل یک ماتریس متراکم تر می شود. در مقابل، عمل آوری در معرض هوا معمولاً به هیدراتاسیون ناکافی منجر می شود، به ویژه در مقادیر بالاتر سیمان، که منجر به پیوندهای ضعیف تر و مقادیر مقاومت فشاری پایین تر می شود. هیدراتاسیون سیمان یک فرآیند شیمیایی است که نیاز به آب کافی برای تسهیل واکنش بین ذرات سیمان و مولکول های آب دارد، که منجر به تشکیل محصولات هیدراتاسیون مانند کلسیم سیلیکات هیدراته (C-S-H) و هیدروکسید کلسیم (C-H) می شود. در عمل آوری با حفظ رطوبت، دسترسی به آب کافی فرآیند هیدراتاسیون را در طول دوره عمل آوری حفظ می کند و از واکنش کامل و تشکیل شبکه ای پیوسته از محصولات هیدراتاسیون اطمینان حاصل می کند. این موضوع منجر به بهبود ساختار خاک، فشردگی بیشتر و مقادیر بالاتر مقاومت فشاری می شود. در مقابل، عمل آوری در معرض هوا، معمولاً به هیدراتاسیون ناکافی منجر می شود. علت این موضوع را می توان تبخیر سریع رطوبت از سطح نمونه، به ویژه در شرایط محیطی غیرقابل کنترل دانست. با تبخیر آب، فرآیند هیدراتاسیون به طور زود هنگام متوقف می شود، که منجر به باقی ماندن ذرات سیمان واکنش داده نشده و فضاهای خالی در ماتریس خاک می شود. این هیدراتاسیون ناقص، باعث کاهش کمیت و کیفیت ژل سیلیکاتی C-S-H می شود که منجر به پیوندهای ضعیف تر و مقادیر مقاومت فشاری پایین تر می شود. در مقادیر بالاتر سیمان، تقاضای آب افزایش می یابد که اثرات منفی رطوبت ناکافی در نمونه های عمل آوری شده در معرض هوا را تشدید می کند. در نتیجه، مزایای استحکام سیمان در مقادیر بالاتر به طور کامل در غیاب حفظ رطوبت مناسب تحقق نمی یابد.



شکل ۶: نتایج آزمایش های تک محوری بر روی نمونه های بهسازی شده با سیمان با شرایط عمل آوری متفاوت



شکل ۷: تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های بهسازی شده با سیمان تحت شرایط عمل آوری متفاوت

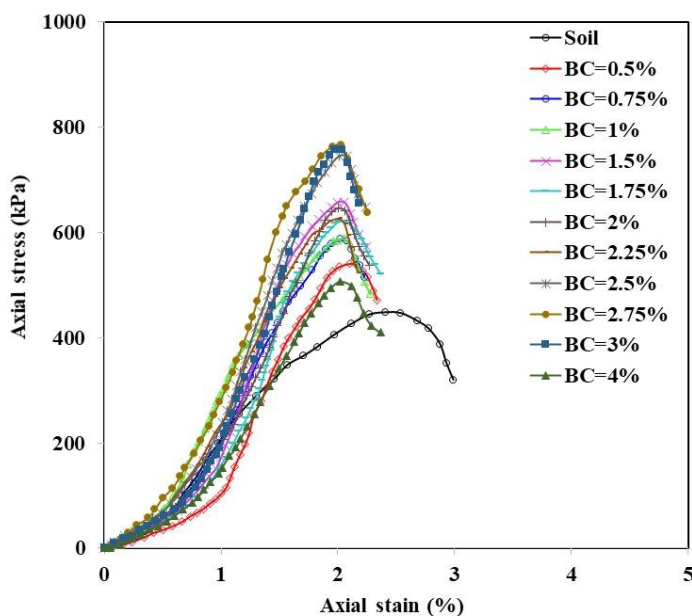
تأثیر شرایط عمل آوری با افزایش محتوای سیمان بیشتر مشهود می‌شود. به عنوان مثال، در محتوای سیمان ۲٪، تفاوت مقاومت فشاری بین دو گروه نمونه با شرایط عمل آوری متفاوت حداقل است و حدود ۴٪ است. با این حال، با افزایش میزان سیمان، این تفاوت به طور قابل توجهی رشد می‌کند و به ۱۲۹٪ در محتوای سیمان ۱۲٪ می‌رسد. این روند نشان دهنده نقش حیاتی رطوبت کافی در دستیابی به حداکثر مزایای تثبیت سیمان است، به ویژه در درصدهای بالاتر سیمان. تحقیقات مشابه دیگری نیز اثر قابل توجه شرایط عمل آوری بر رفتار مکانیکی نمونه‌های تثبیت شده با سیمان را نشان داده‌اند [۳۲-۳۵].

۳-۳. مقاومت فشاری نمونه‌های بهسازی شده با صمغ فارسی

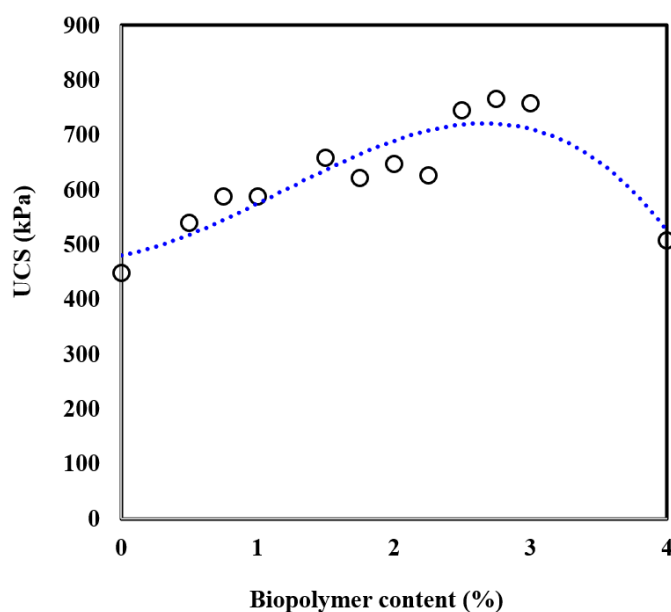
در این بخش، محلول‌های صمغ فارسی با مقادیر مختلف از ۰ تا ۴٪ وزن خشک خاک، به نمونه‌ها اضافه شده و سپس آزمایش مقاومت فشاری پس از دوره عمل آوری ۲۸ روزه انجام شد. شرایط عمل آوری این نمونه‌ها مشابه روش حفظ رطوبت برای نمونه‌های تثبیت شده با سیمان صورت گرفت. شکل ۸ و ۹ منحنی‌های تنش-کرنش و تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های تثبیت شده با بیوپلیمر را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که با حضور بیوپلیمر در خاک رسی تا ۲/۷۵٪، مقاومت فشاری خاک تثبیت شده افزایش حدود ۶۷ درصدی را از خود نشان می‌دهد. ادبی و همکاران [۳۶] نیز نتایج مشابهی بر روی خاک ماسه‌ای بهسازی شده با صمغ ایرانی بدست آوردند. آنها درصد بهینه استفاده از صمغ ایرانی را ۲/۵ درصد اعلام نمودند. ویدهی و موقال [۳۷] بر اساس نتایج آزمایشها، نشان دادند که درصد بهینه صمغ زانتان و صمغ گوار به ترتیب ۲ و ۱ درصد است. علت افزایش مقاومت خاک در حضور بیوپلیمر را می‌توان به ساختار رشته‌ای و ظرفیت بالای چسبندگی این صمغ در خاک [۳۸] و وزن مولکولی بیشتر این بیوپلیمر دانست. این موضوع به علت تغییری که در ساختار خاک بهسازی شده می‌نماید، منجر به یک بافت توپر شده که با کاهش فضاهاى خاک همراه است [۳۹]. همچنین ظرفیت نگهداری آب این نوع از بیوپلیمر نسبت به خاک رس بیشتر بوده که این موارد می‌تواند منجر به بهبود اتصال بین دانه‌های رسی شده و در نتیجه منجر به افزایش مقاومت خاک بهسازی شده با آن می‌شوند. گروه‌های کربوکسیل و هیدروکسیل زیادی که در ساختار شیمیایی صمغ ایرانی وجود دارد منجر به ایجاد فضای ارتباطی زیادی برای اتصال با ذرات خاک می‌شود که می‌تواند منجر به افزایش مقاومت نمونه در برابر بارهای خارجی (کششی و فشاری) شود [۴۰].

با این حال، در درصدهای بیشتر پلیمر در آن از ۲/۷۵ تا ۳ درصد، از مقاومت خاک کاسته می‌شود. با افزایش بیشتر بیوپلیمر در خاک تا ۴٪، کاهش قابل توجهی در مقاومت فشاری قابل مشاهده است. این نشان دهنده آن است که محتوای بهینه بیوپلیمر ۲/۷۵٪ است

که منجر بدست آمدن بالاترین مقدار مقاومت فشاری برابر با ۷۶۶ کیلوپاسکال می‌شود. کاهش مقاومت فشاری پس از مقدار بهینه بیوپلیمر می‌تواند به اشباع بیش از حد توده خاک نسبت داده شود، جایی که بیوپلیمر اضافی پیوستگی ذرات خاک را کاهش داده و انسجام درون توده تثبیت شده را مختل می‌کند. با این حال، افزایش مقاومت فشاری با بیوپلیمر به طور قابل توجهی کمتر از تثبیت با سیمان تحت همان شرایط عمل‌آوری و مدت زمان است. با وجود محدودیت‌های آن، استفاده از صمغ فارسی به عنوان یک جایگزین دوستدار محیط زیست برای تثبیت خاک قابل پیشنهاد است، به ویژه در پروژه‌هایی که افزایش کمی در مقاومت فشاری لازم است و نیاز به کاهش اثرات زیست‌محیطی سیمان وجود دارد. اما برای کاربردهایی که به مقادیر مقاومت فشاری بالایی نیاز است، برتری سیمان نسبت به بیوپلیمر صمغ فارسی مشهود است.



شکل ۸: تاثیر بیوپلیمر صمغ فارسی به عنوان تثبیت‌کننده خاک رسی بر مقاومت فشاری تک محوری خاک



شکل ۹: تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های بهسازی شده با مقادیر مختلف بیوپلیمر صمغ فارسی

صمغ ایرانی همانند سایر بیوپلیمرها به واسطه خاصیت چسبندگی خود منجر به اتصال بین دانه‌های مختلف خاک شده و در نتیجه افزایش مقاومت از خود نشان داده است این موضوع توسط محققان مختلفی مانند کومار و همکاران [۴۱]، اربانی و همکاران [۴۲]، و رونگ و همکاران [۴۳] نیز مشاهده شده است.

۳-۴- مقاومت فشاری نمونه‌های بهسازی شده تحت دوره‌های تر و خشک شدگی

در این بخش از آزمایش‌ها، اثر دوره‌های تر و خشک‌شدگی بر روی مقاومت نمونه‌های بهسازی شده با افزودنی‌های مختلف بررسی شده است. در این مطالعه سعی شده است از روشی نزدیک به روش ارائه شده در ASTM D559 استفاده شود. برای این منظور ۱۰ (ده) دوره تر و خشک‌شدگی بر روی نمونه‌ها اعمال شده است که هر دوره شامل قرار دادن نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت درون ظرف آب و بعد از آن خارج کردن آن‌ها از درون آب و نگهداری آن‌ها در شرایط محیط آزمایشگاهی به مدت ۲۴ ساعت است. همانطور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، نمونه‌های حاوی الیاف و صمغ فارسی مقاومتی در برابر دوره‌های تر و خشک‌شدگی نداشته است و بعد از اعمال چندین دوره تر و خشک‌شدگی، نمونه‌ها قبل از مرحله بارگذاری دچار تخریب شده است. بطوریکه امکان بارگذاری بر روی نمونه‌ها وجود نداشت.



شکل ۱۰: تخریب نمونه‌های حاوی الیاف و صمغ فارسی در زمان اعمال دوره‌های تر و خشک‌شدگی

همانطور که در شکل ۱۱ نشان داده شده است، نمونه‌های حاوی سیمان اگر چه دچار تخریب جزئی بعد از اعمال دوره‌های تر و خشک‌شدگی شده است، ولی امکان بارگذاری بر روی آنها وجود داشت. از طرف دیگر، اثر تخریبی دوره‌های تر و خشک‌شدگی با افزایش مقدار سیمان، کاهش یافته است.

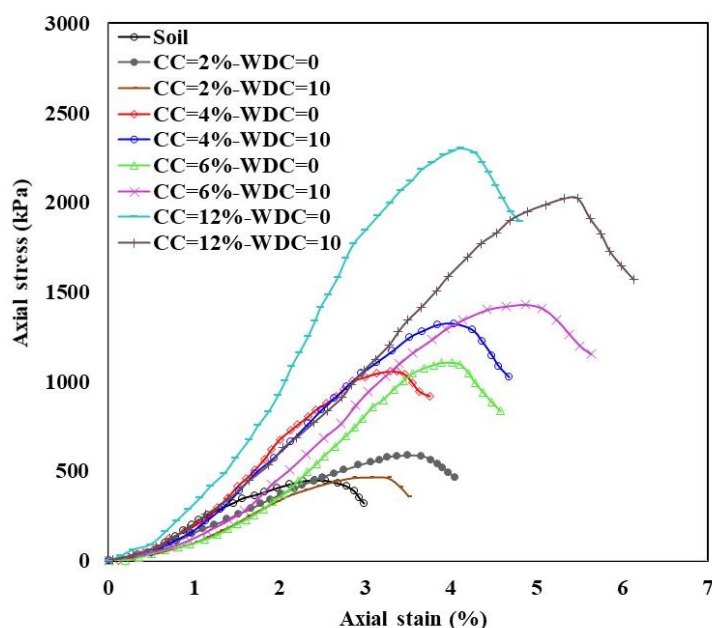


شکل ۱۱: وضعیت نمونه‌های حاوی سیمان پس از پایان دوره‌های تر و خشک‌شدگی

برای بررسی دقیق‌تر اثر دوره‌های تر و خشک‌شدگی بر روی نتایج آزمایش تک‌محوری، نمودارهای تنش-کرنش نمونه‌ها با و بدون دوره‌های تر و خشک‌شدگی در شکل ۱۲ ارائه شده است. مقادیر مقاومت فشاری حداکثر نمونه‌ها در درصدهای مختلف سیمان در دو گروه

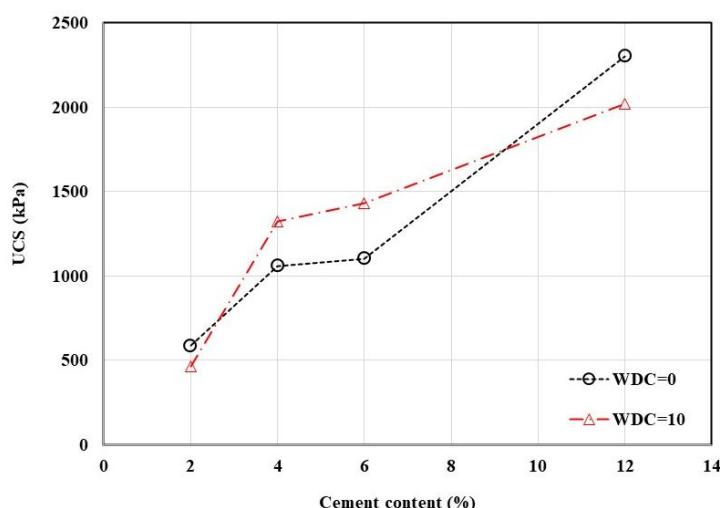
از آزمایش‌ها با و بدون دوره‌های تر و خشک‌شدگی در شکل ۱۳ نشان داده شده است. در این نمودارها، WDC^{10} (تعداد سیکل‌های تر و خشک‌شدگی) می‌باشند. نتایج نشان می‌دهند که در نمونه‌های حاوی ۲ و ۱۲ درصد سیمان، اعمال دوره‌های تر و خشک‌شدگی باعث کاهش مقاومت فشاری نمونه‌ها شده است. این کاهش ممکن است به دلیل ایجاد ترک‌های میکروسکوپی و کاهش انسجام بین ذرات خاک و سیمان پس از چرخه‌های تر و خشک‌شدگی باشد که موجب کاهش توانایی پیوستگی و استحکام نمونه‌ها می‌شود. در دوره‌های تر و خشک‌شدگی، به دلیل انقباض و انبساط سطحی نمونه‌ها در معرض تغییرات رطوبت، می‌تواند به ویژه در نمونه‌هایی با سیمان کمتر، آسیب‌های ساختاری به نمونه وارد شود. در مقابل، در نمونه‌های حاوی ۴ و ۶ درصد سیمان، اعمال دوره‌های تر و خشک‌شدگی نه تنها باعث کاهش مقاومت نشده است بلکه باعث افزایش مقاومت فشاری شده است. این افزایش مقاومت ممکن است به دلیل فرآیندهای هیدراتاسیون سیمان باشد که تحت تأثیر چرخه‌های تر و خشک‌شدگی بهبود یافته‌اند. در این دوره‌ها، ممکن است در اثر تغییرات رطوبتی، هیدراتاسیون سیمان در مناطق خاصی از نمونه بیشتر و در نتیجه افزایش مقاومت فشاری مشاهده شده باشد. همچنین، اثرات دوره‌های تر و خشک‌شدگی در این درصد سیمان‌ها ممکن است به شکل بهبود پیوستگی سیمان با ذرات خاک و ایجاد پیوندهای مقاوم‌تر در ساختار نمونه‌ها نمود پیدا کرده باشد.

این نتایج نشان می‌دهند که اثر دوره‌های تر و خشک‌شدگی بر روی خواص مکانیکی نمونه‌های سیمانی بسته به میزان سیمان موجود در مخلوط می‌تواند متفاوت باشد. در درصد‌های پایین سیمان، دوره‌های تر و خشک‌شدگی ممکن است به دلیل ضعف در ساختار و هیدراتاسیون ناقص سیمان، تاثیر منفی بگذارد، در حالی که در درصد‌های بالاتر سیمان، این دوره‌ها می‌توانند به بهبود عملکرد فشاری کمک کنند. بنابراین، در طراحی و استفاده از مواد سیمانی در پروژه‌های ژئوتکنیکی، توجه به درصد سیمان و اثرات محیطی مانند چرخه‌های تر و خشک‌شدگی ضروری است تا بهینه‌ترین نتایج به دست آید.



شکل ۱۲: اثرات دوره‌های تر و خشک‌شدگی بر روی نتایج آزمایش تک محوری بر روی نمونه‌های تثبیت شده با سیمان

¹⁰ Wet Dry Cycles

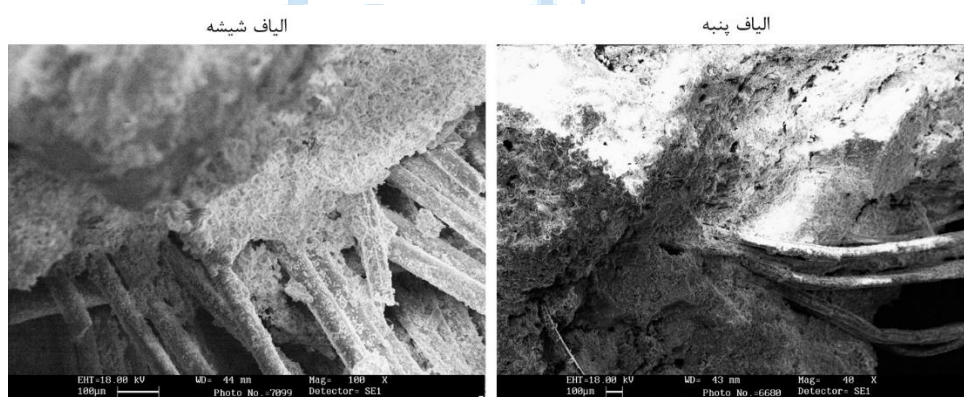


شکل ۱۳: مقاومت فشاری نمونه‌ها بدون و با اعمال دوره‌های تر و خشک‌شدگی

به منظور ارزیابی اقتصادی صمغ ایرانی در مقابل سیمان، با توجه به میزان بهینه هرکدام، مشخص گردید که سیمان نسبت به صمغ ایرانی از نظر هزینه اولیه مقرون به صرفه‌تر است. با این حال، با توجه به ایجاد اثرات مثبت کوتاه‌مدتی مانند عدم نیاز به مراقبت و نگهداری (دوره عمل‌آوری) زیاد، و آثار بلندمدتی که بر خصوصیات شیمیایی خاک مانند بهبود مکانیزم چسبندگی بین دانه‌ها و نیز کاهش آلودگی محیط زیست می‌تواند جایگزین مناسبی برای سیمان برای بهسازی خاک رسی باشد.

۳-۵- عکس‌های میکروسکوپی

جهت بررسی میکروساختار نمونه‌های بهسازی شده با الیاف، نمونه‌ای از عکسهای میکروسکوپی نمونه‌ها بعد از آزمایش در شکل ۱۴ ارائه شده است. این نتایج بعنوان نمونه برای نمونه‌های حاوی الیاف شیشه و پنبه ارائه شده است. همانطور که در شکل ۱۴ نشان داده شده است، در اینجا پوشش ذرات خاک بر روی سطح الیاف وجود دارد که این باعث افزایش درگیری الیاف با توده خاک می‌شود. این امر در نهایت موجب افزایش مقاومت فشاری خاک خواهد شد. از طرف دیگر، توزیع الیاف در خاک تابعی از نوع الیاف است که این موضوع در تفاوت توزیع الیاف پنبه و الیاف شیشه در شکل ۱۴ نشان داده شده است. در واقع خصوصیات متفاوت الیاف و همچنین نوع توزیع الیاف در توده خاک باعث ایجاد اختلاف رفتاری در نمونه‌های حاوی الیاف شده است.



شکل ۱۴: عکسهای میکروسکوپی نمونه‌های حاوی الیاف

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق، اثر افزودنی‌های مختلف بر روی مقاومت فشاری نمونه‌های رسی بررسی شده است و در نهایت اثر دوره‌های تر و خشک‌شدگی بر روی آنها نیز بررسی شده است. برای این منظور، مجموعه‌ای از آزمایش‌های تک محوری انجام شده است. با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان نتایج زیر را استخراج کرد:

۱- اضافه کردن الیاف به‌طور قابل توجهی مقاومت فشاری خاک طبیعی را بهبود داده است، که اثربخشی بهسازی خاک با الیاف را تایید می‌کند. از بین الیاف آزمایش‌شده، الیاف کنف بهترین عملکرد را از خود نشان داد و در بیشتر درصد‌های الیاف، مقادیر بالاتری از مقاومت فشاری را نشان داد. این به دلیل مقاومت کششی بالاتر و سازگاری بهتر کنف با خاک رسی است که مکانیسم انتقال بار را تقویت کرده و توزیع تنش یکنواخت‌تری ایجاد می‌کند. با این حال، در برخی موارد مانند نمونه‌های حاوی ۰/۵ درصد الیاف شیشه، مشاهده شد که مقاومت فشاری کاهش یافته و کمتر از خاک طبیعی بود. این نتایج نشان می‌دهند که بهترین عملکرد در مقادیر مختلف الیاف، به میزان تعامل الیاف با ذرات خاک و نوع الیاف بستگی دارد.

۲- برای هر دو شرایط عمل‌آوری (حفظ رطوبت و بدون حفظ رطوبت)، با افزایش محتوای سیمان، مقاومت فشاری نمونه‌ها به‌طور قابل توجهی افزایش یافت. این موضوع اثربخشی سیمان به عنوان یک عامل تثبیت‌کننده را تایید می‌کند. با این حال، تفاوت‌های قابل توجهی در مقاومت فشاری نمونه‌ها تحت دو شرایط عمل‌آوری مشاهده شد. به‌ویژه، نمونه‌های تحت شرایط حفظ رطوبت همواره مقادیر مقاومت فشاری بالاتری نسبت به نمونه‌های بدون حفظ رطوبت داشتند. این تفاوت به دلیل هیدراتاسیون بهینه سیمان در شرایط حفظ رطوبت است که منجر به تشکیل ماتریسی متراکم‌تر و مقاوم‌تر می‌شود. در مقابل، عمل‌آوری در معرض هوا به هیدراتاسیون ناکافی منجر می‌شود، بخصوص در مقادیر بالاتر سیمان، که موجب کاهش کیفیت و کمیت محصولات هیدراتاسیون مانند C-S-H و به تبع آن، کاهش مقاومت فشاری می‌شود. این اثرات در مقادیر بالاتر سیمان مشهودتر است و نشان می‌دهد که حفظ رطوبت در طول عمل‌آوری نقشی حیاتی در بهبود مقاومت فشاری نمونه‌های تثبیت‌شده با سیمان ایفا می‌کند.

۳- استفاده از صمغ فارسی به عنوان یک تثبیت‌کننده بیوپلیمر، موجب بهبود مقاومت فشاری خاک می‌شود، مقدار بهینه این بیوپلیمر در این تحقیق ۲/۷۵ درصد بدست آمد. با افزایش درصد بیوپلیمر تا ۲/۷۵ درصد، مقاومت فشاری افزایش یافت. با افزایش بیشتر آن از ۲/۷۵ تا ۴ درصد، این موضوع منجر به کاهش مقاومت فشاری خاک تثبیت شده با آن شد. این موضوع احتمالاً به دلیل اشباع بیش از حد توده خاک و کاهش پیوستگی ذرات خاک و بیوپلیمر است. این امر نشان می‌دهد که محتوای بهینه بیوپلیمر برای بهبود مقاومت فشاری خاک ۲/۷۵ درصد است. با اینکه تثبیت خاک با بیوپلیمر اثرات مثبتی در بهبود مقاومت فشاری دارد، این اثرات به‌طور قابل توجهی کمتر از تثبیت با سیمان است. استفاده از صمغ فارسی به عنوان یک جایگزین محیط‌زیستی برای تثبیت خاک می‌تواند در پروژه‌هایی که نیاز به افزایش متوسط مقاومت فشاری دارند و در عین حال نیاز به کاهش اثرات زیست‌محیطی سیمان وجود دارد، مفید واقع شود. با این حال، برای کاربردهایی که نیاز به مقاومت فشاری بالاتر دارند، سیمان همچنان بهترین گزینه برای تثبیت خاک باقی می‌ماند.

۴- دوره‌های تر و خشک‌شدگی تأثیر متفاوتی بر روی مقاومت فشاری نمونه‌های تثبیت‌شده با سیمان دارند. برای نمونه‌های حاوی ۲ و ۱۲ درصد سیمان، اعمال دوره‌های تر و خشک‌شدگی باعث کاهش مقاومت فشاری می‌شود که ممکن است به دلیل ایجاد ترک‌های میکروسکوپی و کاهش انسجام بین ذرات خاک و سیمان باشد. این کاهش مقاومت می‌تواند به دلیل انقباض و انبساط سطحی نمونه‌ها در اثر تغییرات رطوبت در دوره‌های تر و خشک‌شدگی باشد. در مقابل، برای نمونه‌های حاوی ۴ و ۶ درصد سیمان، این دوره‌ها نه تنها موجب کاهش مقاومت نشده‌اند بلکه موجب افزایش مقاومت فشاری نیز شده‌اند. این افزایش ممکن است به دلیل فرآیندهای هیدراتاسیون سیمان باشد که در اثر چرخه‌های تر و خشک‌شدگی بهبود یافته‌اند. همچنین، این دوره‌ها می‌توانند باعث بهبود پیوستگی سیمان با ذرات خاک و ایجاد پیوندهای مقاوم‌تر در ساختار نمونه‌ها شوند. در نهایت، نتایج نشان می‌دهند که تأثیر دوره‌های تر و خشک‌شدگی بر خواص مکانیکی نمونه‌های سیمانی بسته به درصد سیمان متفاوت است و در درصد‌های پایین سیمان، این دوره‌ها اثر

منفی دارند، در حالی که در درصدهای بالاتر سیمان می‌توانند موجب بهبود عملکرد فشاری شوند. بنابراین، توجه به درصد سیمان و اثرات محیطی مانند چرخه‌های تر و خشک‌شدگی در طراحی پروژه‌های خاکی ضروری است. از طرف دیگر، نمونه‌های بهسازی شده با الیاف و صمغ فارسی مقاومت کافی در برابر رطوبت‌های تر و خشک‌شدگی نداشته‌اند و بعد از اعمال چند دوره‌های تر و خشک‌شدگی، نمونه‌ها کامل مقاومت خود را از دست می‌دهند.

مراجع

- [1] Bayat M, Khosravian Homami A, Mousivand M (2021) Shear Strength and Wind Erosion Potential of Biologically Improved Sand. *Geomicrobiology Journal* 38:631–638. <https://doi.org/10.1080/01490451.2021.1917733>
- [2] Hakimelahi N, Bayat M, Ajalloeian R, Nadi B (2023) Effect of woven geotextile reinforcement on mechanical behavior of calcareous sands. *Case Studies in Construction Materials* 18:e02014. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02014>
- [3] Salehi M, Bayat M, Saadat M, Nasri M (2022) Prediction of unconfined compressive strength and California bearing capacity of cement- or lime-pozzolan-stabilised soil admixed with crushed stone waste. *Geomechanics and Geoengineering* 00:1–12. <https://doi.org/10.1080/17486025.2022.2040606>
- [4] Sharma K, Kumar A (2021) Influence of rice husk ash, lime and cement on compaction and strength properties of copper slag. *Transportation Geotechnics* 27:100464. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100464>
- [5] Asgari MR, Baghebanzadeh Dezfouli A, Bayat M (2015) Experimental study on stabilization of a low plasticity clayey soil with cement/lime. *Arab J Geosci* 8:1439–1452. <https://doi.org/10.1007/s12517-013-1173-1>
- [6] Bayat M, Asgari MR, Mousivand M (2013) Effects of cement and lime treatment on geotechnical properties of a low plasticity clay. In: *International Conference on Civil Engineering Architecture & Urban Sustainable Development* 27&28 November
- [7] Feng W-Q, Bayat M, Bin L, et al (2024) Shear Strength Enhancement in Soil Using Polyurethane Foam Adhesive and Cement Injections. *Int J of Geosynth and Ground Eng* 10:97. <https://doi.org/10.1007/s40891-024-00603-w>
- [8] Tang C, Shi B, Gao W, et al (2007) Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil. *Geotextiles and Geomembranes* 25:194–202. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2006.11.002>
- [9] Ghasem Ghanbari P, Momeni M, Mousivand M, Bayat M (2022) Unconfined compressive strength characteristics of treated peat soil with cement and basalt fibre. *International Journal of Engineering* 35:1089–1095
- [10] Hadi Sahlabadi S, Bayat M, Mousivand M, Saadat M (2021) Freeze–Thaw Durability of Cement-Stabilized Soil Reinforced with Polypropylene/Basalt Fibers. *Journal of Materials in Civil Engineering* 33:04021232. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0003905](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0003905)
- [11] Eshaghzadeh M, Bayat M, Ajalloeian R, Hejazi SM (2021) Mechanical behavior of silty sand reinforced with nanosilica-coated ceramic fibers. *Journal of Adhesion Science and Technology* 35:2664–2683. <https://doi.org/10.1080/01694243.2021.1898857>
- [12] Elfaleh I, Abbassi F, Habibi M, et al (2023) A comprehensive review of natural fibers and their composites: an eco-friendly alternative to conventional materials. *Results in Engineering* 101271

- [13] Ramamoorthy SK, Skrifvars M, Persson A (2015) A Review of Natural Fibers Used in Biocomposites: Plant, Animal and Regenerated Cellulose Fibers. *Polymer Reviews* 55:107–162. <https://doi.org/10.1080/15583724.2014.971124>
- [14] Atiqah A, Mastura MT, Ali BAA, et al (2017) A Review on Polyurethane and its Polymer Composites. *Current Organic Synthesis* 14:233–248. <https://doi.org/10.2174/1570179413666160831124749>
- [15] Mann GS, Singh LP, Kumar P, Singh S (2018) Green composites: A review of processing technologies and recent applications. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*. <https://doi.org/10.1177/0892705718816354>
- [16] Ghanbari M, Bayat M (2022) Effectiveness of reusing steel slag powder and polypropylene fiber on the enhanced mechanical characteristics of cement-stabilized sand. *Civil Engineering Infrastructures Journal* 0:1–19. <https://doi.org/10.22059/CEIJ.2021.319310.1742>
- [17] Nourmohammadi M, Aghaei Z, Bayat M (2024) Impact of Freezing and Thawing Cycles on Mechanical Performance of Carbon Fiber-Reinforced Cement-Stabilized Sand. *Journal of Environmental Friendly Materials* 8:49–57
- [18] Shahidi S, Bayat M, Zareei SA (2024) Enhancing Mechanical Behavior of Silica and Calcareous Sand through Polyurethane Foam, Nanomaterial, and Fiber. *Indian Geotech J*. <https://doi.org/10.1007/s40098-024-00971-0>
- [19] Kakroudi HA, Bayat M, Nadi B (2024) Static and dynamic characteristics of silty sand treated with nano-silica and basalt fiber subjected to freeze-thaw cycles. *1 37:085–095*
- [20] Kakkalameli S, Daphedar AB, Faniband B, et al (2022) Biopolymers and Environment. In: Nadda AK, Sharma S, Bhat R (eds) *Biopolymers*. Springer International Publishing, Cham, pp 19–33
- [21] Kaplan DL (1998) Introduction to Biopolymers from Renewable Resources. In: Kaplan DL (ed) *Biopolymers from Renewable Resources*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp 1–29
- [22] Abbasi S (2019) Persian Gum (*Amygdalus scoparia* Spach). In: Razavi SMA (ed) *Emerging Natural Hydrocolloids*, 1st ed. Wiley, pp 273–298
- [23] Hedayati S, Ansarifar E, Tarahi M, et al (2023) Influence of Persian gum and almond gum on the physicochemical properties of wheat starch. *Gels* 9:460
- [24] Philip E, Reshmy R (2024) Applications of Biopolymers in Construction and Civil Engineering. In: Reghunadhan A, H A, Thomas S (eds) *Applications of Biopolymers in Science, Biotechnology, and Engineering*, 1st ed. Wiley, pp 265–289
- [25] Datta C (2011) Starch as a biopolymer in construction and civil engineering. *Handbook of Bioplastics and Biocomposites Engineering Applications* 24:317
- [26] Losini AE, Grillet A-C, Bellotto M, et al (2021) Natural additives and biopolymers for raw earth construction stabilization—a review. *Construction and Building Materials* 304:124507
- [27] Fatehi H, Ong DE, Yu J, Chang I (2021) Biopolymers as green binders for soil improvement in geotechnical applications: A review. *Geosciences* 11:291
- [28] Jang J (2020) A Review of the Application of Biopolymers on Geotechnical Engineering and the Strengthening Mechanisms between Typical Biopolymers and Soils. *Advances in Materials Science and Engineering* 2020:1465709. <https://doi.org/10.1155/2020/1465709>

- [29] Ghanizadeh AR, Heidarabadzadeh N, Bayat M, Khalifeh V (2022) Modeling of unconfined compressive strength and Young's modulus of lime and cement stabilized clayey subgrade soil using Evolutionary Polynomial Regression (EPR). *International Journal of Mining and Geo-Engineering* 56:257–269
- [30] Salehi M, Bayat M, Saadat M, Nasri M (2021) Experimental Study on Mechanical Properties of Cement-Stabilized Soil Blended with Crushed Stone Waste. *KSCE J Civ Eng* 25:1974–1984. <https://doi.org/10.1007/s12205-021-0953-5>
- [31] Tavakol K, Bayat M, Nadi B, Ajalloeian R (2023) Combined Influences of Cement, Rice Husk Ash and Fibre on the Mechanical Characteristics of a Calcareous Sand. *KSCE J Civ Eng*. <https://doi.org/10.1007/s12205-023-0695-7>
- [32] Chaipayut S, Arwaedo N, Kingnoi N, et al (2022) Effect of curing conditions on the strength of soil cement. *Case Studies in Construction Materials* 16:e01082
- [33] Pongsivasathit S, Horpibulsuk S, Piyaphipat S (2019) Assessment of mechanical properties of cement stabilized soils. *Case Studies in Construction Materials* 11:e00301
- [34] Tran TQ, Ju H, Nguyen T-N, et al (2023) Effects of curing temperature on cement-stabilized soils. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, p 012097
- [35] Zhang R, Zheng J, Bian X (2017) Experimental investigation on effect of curing stress on the strength of cement-stabilized clay at high water content. *Acta Geotech* 12:921–936. <https://doi.org/10.1007/s11440-016-0511-3>
- [36] Adabi, M., Darvishan, E., Eyvazi, G., & Jahanbaksh Motlagh, H. (2022). Geoenvironmental application of novel persian gum biopolymer in sandy soil stabilization. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 47(10), 12915-12929.
- [37] Vydehi, K. V., & Moghal, A. A. B. (2022). Effect of biopolymeric stabilization on the strength and compressibility characteristics of cohesive soil. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 34(2), 04021428.
- [38] Dabestani, M., Kadkhodae, R., Phillips, G. O., & Abbasi, S. (2018). Persian gum: A comprehensive review on its physicochemical and functional properties. *Food Hydrocolloids*, 78, 92-99.
- [39] Abbasi, S. (2017). Challenges towards characterization and applications of a novel hydrocolloid: Persian gum. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 28, 37-45.
- [40] Lee, S., Im, J., Cho, G. C., & Chang, I. (2019). Tri-axial shear behavior of xanthan gum biopolymer-treated sand. In *Eighth International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering* (pp. 179-186). Reston, VA: American Society of Civil Engineers.
- [41] Kumar, S., Yadav, B. D., & Raj, R. (2024). A review on the application of biopolymers (xanthan, agar and guar) for sustainable improvement of soil. *Discover Applied Sciences*, 6(8), 393.
- [42] Arabani, M., Shalchian, M. M., & Baghbani, A. (2024). A state-of-the-art review on interactive mechanisms and multi-scale application of biopolymers (BPs) in geo-improvement and vegetation growth. *Journal of Environmental Management*, 358, 120905.
- [43] Rong, X., Deng, S., Liang, B., Zhuang, J., Yu, Y., & Wu, Z. (2024). Mechanical behavior and strengthening mechanism of loess stabilized with xanthan gum and guar gum biopolymers. *Materials Research Express*, 11(10), 105305.