



Semnan University



Research Article

Evaluation of Unconfined Compressive Strength and Durability of Carbonate and Silicate Sands Treated with Persian Gum Biopolymer and Calcium Chloride Binding Agent

Masoud Mohseninia^a, Hossein Salehzadeh^{b*}, Saeed Rahmati^a

^a Graduated MSc., Department of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

^b Associate Professor, Department of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2024-01-21

Revised: 2024-03-02

Accepted: 2024-03-05

Keywords:

Soil improvement;

Firouzkooch sand;

Hormuz sand;

Biopolymer;

Persian gum.

ABSTRACT

The constraints such as altering soil acidity and environmental concerns stemming from the use of traditional soil stabilizers, like cement, have justified the exploration of environmentally friendly, cost-effective materials with fewer secondary risks, such as biopolymers. This study focuses on examining the effect of adding Persian gum and calcium chloride to two types of soils, silicate sand from Firouzkooch and carbonate sand from Hormuz. For this purpose, initial parameters such as weight percentage of Persian gum and molarity of calcium chloride were evaluated through an unconfined compressive strength test, identifying optimal additive percentages. Then, the impact of factors such as curing time, curing place, and wetting-drying cycles on the compressive strength and durability of the optimized treated specimens was investigated. Results of this research indicate that compressive strength of Persian gum-treated Firouzkooch and Hormuz sands increases up to 2.75 MPa and 3 MPa, respectively, after a 28-day curing period at 40 °C with the optimal Persian gum percentage (2.5% and 3%). Under dry conditions, Persian gum and calcium chloride-treated Firouzkooch and Hormuz sands at the optimal percentage (1.5% Persian gum and 3 molar calcium chloride for Firouzkooch sand and 2.5% Persian gum and 2 molar calcium chloride for Hormuz sand) achieve compressive strengths of 6.2 MPa and 5.1 MPa, respectively, after 28 days, representing a 125% and 70% improvement compared to specimens treated with Persian gum. Persian gum exhibits acceptable durability against wetting and drying cycles, demonstrating initial dry and wet uniaxial compressive strengths (after immersion in the water) for Firouzkooch and Hormuz sands treated with Persian gum, which were initially 2200 and 200, 2250 and 240 kPa, respectively. After undergoing 10 wetting and drying cycles, these strengths decreased to 750 and 110, 600 and 80 kPa, respectively, and will maintain this resistance in subsequent cycles.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jtie.2024.33064.1663>

* Corresponding author.

E-mail address: salehzadeh@iust.ac.ir

How to cite this article: Salehzadeh, H., Mohseninia, M., & Rahmati Sardasht, S. (2023). Evaluation of Unconfined Compressive Strength and Durability of Carbonate and Silicate Sands Treated with Persian Gum Biopolymer and Calcium Chloride Binding Agent. *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*, 9(4), 21-36. doi: [10.22075/jtie.2024.33064.1663](https://doi.org/10.22075/jtie.2024.33064.1663)

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Semnan University

مجله زیر ساخت های حمل و نقل

وبسایت نشریه: <https://jtie.semnan.ac.ir/?lang=en>

شاپا: 2821-0549



مقاله پژوهشی

ارزیابی مقاومت فشاری محدود نشده و دوام ماسه کربناته و سیلیکاته بهسازی شده با

بیوپلیمر صمغ فارسی و عامل پیوندساز کلسیم کلرید

مسعود محسنی نیا^۱، حسین صالحزاده^{۲*}، سعید رحمتی^۱

^۱ فارغ التحصیل کارشناسی ارشد ژئوتکنیک، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

^{۲*} دانشیار، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۱۱/۰۱

بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۱۲/۱۲

پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۱۲/۱۵

واژگان کلیدی:

بهسازی خاک،

ماسه فیروزکوه،

ماسه هرمز،

صمغ فارسی،

بیوپلیمر.

چکیده

محدودیت‌هایی نظیر تغییر اسیدیته خاک و نگرانی‌های زیست‌محیطی ناشی از استفاده از مواد سنتی تثبیت‌کننده خاک همچون سیمان، بررسی استفاده از مواد دوست‌دار محیط‌زیست و ارزان، با خطرات ثانویه کمتر، همچون بیوپلیمرها را توجیه‌پذیر ساخته است. در این مطالعه، به بررسی اثر افزودن صمغ فارسی و کلسیم کلرید به دو خاک ماسه‌ای سیلیکاته فیروزکوه و کربناته هرمز پرداخته شده است. بدین منظور، توسط آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده پارامترهای اولیه همچون درصد وزنی صمغ فارسی، مولاریته کلسیم کلرید مورد ارزیابی و درصد‌های بهینه مواد افزودنی شناسایی گردید. سپس، تأثیر پارامترهای محل و مدت گیرش و چرخه‌های متوالی خیس و خشک بر مقاومت فشاری و دوام نمونه‌های بهسازی‌شده بهینه صورت گرفت. نتایج این پژوهش نشان داد که مقاومت فشاری ماسه فیروزکوه و هرمز بهسازی‌شده با درصد بهینه صمغ فارسی (۲/۵ و ۳ درصد) به ترتیب تا ۲/۷۵ و ۳ مگاپاسکال پس از گیرش ۲۸ روزه در گرمکن ۴۰ درجه افزایش پیدا می‌کند. در شرایط خشک، ماسه فیروزکوه و هرمز بهسازی‌شده با صمغ فارسی و کلسیم کلرید در درصد بهینه (۱/۵ درصد صمغ و ۳ مولار برای فیروزکوه و ۲/۵ درصد و ۲ مولار برای هرمز)، مقاومت ۲۸ روزه به ترتیب ۶/۲ و ۵/۱ مگاپاسکال کسب می‌کنند که نسبت به نمونه بهسازی‌شده با صمغ فارسی، ۱۲۵ درصد و ۷۰ درصد افزایش داشته است. صمغ فارسی دوام قابل قبولی در برابر چرخه‌های متوالی خیس و خشک از خود نشان داد. به طوری که مقاومت فشاری تک‌محوری خشک و خیس (پس از غرقاب شدن در آب) ماسه فیروزکوه و هرمز بهسازی‌شده با صمغ فارسی، ابتدا به ترتیب ۲۲۰۰، ۲۰۰، ۲۲۵۰ و ۲۴۰ کیلوپاسکال بوده که پس از ۱۰ چرخه متوالی خیس و خشک به ترتیب به مقادیر ۷۵۰، ۱۱۰، ۶۰۰ و ۸۰ کیلوپاسکال میل کرده و این مقاومت را در چرخه‌های بعدی حفظ خواهد کرد.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jtie.2024.33064.1663>

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: salehzadeh@iust.ac.ir

استناد به این مقاله: صالحزاده، حسین، محسنی نیا، مسعود & رحمتی سردشت، سعید. (۱۴۰۲). (ارزیابی مقاومت فشاری محدود نشده و دوام ماسه کربناته و سیلیکاته بهسازی شده با بیوپلیمر صمغ فارسی و عامل پیوندساز کلرید کلسیم. مهندسی زیر ساخت های حمل و نقل، (۴)۹، ۳۶-۲۱. doi: 10.22075/jtie.2024.33064.1663

۱. مقدمه

به شدت مورد توجه قرار گرفته است (چانگ و همکاران، ۲۰۲۰). این بهسازی شامل استفاده از ژئوپلیمرها، بیوپلیمرها و رسوب‌های زیستی کربنات کلسیم می‌شود. ژئوپلیمرها، یک طبقه نوین از مصالح ساختمانی، تازه وارد بازار شده‌اند. اصطلاح ژئوپلیمر را برای اولین بار داویدوویتس (۱۹۹۱) معرفی کرد و این مصالح را به‌عنوان شاخه‌ای جدید از مواد آلومیناسیلیکاتی با ساختار سه‌بعدی توصیف کرد. این مواد از ترکیب پیش‌مواد ژئوپلیمر با فعال‌سازهای قلیایی به‌دست می‌آیند. پیش‌مواد ژئوپلیمر شامل مواد گسترده‌ای از آلومیناسیلیکات و حتی زیاله‌های صنعتی نظیر خاکستر بادی، پوزولان‌های طبیعی، متاکائولن، سرباره کوره، لجن قرمز و خاکستر پوسته برنج هستند. به‌منظور استفاده از ژئوپلیمرها از فعال‌سازهای قلیایی شامل محلول‌های سدیم سیلیکات، پتاسیم سیلیکات، کلسیم کاربید و سدیم هیدروکسید یا ترکیبی از این موارد در تحقیقات اخیر استفاده وسیعی صورت گرفته است (پروویتس و ون دوتتر، ۲۰۰۹؛ ماراگکس و همکاران، ۲۰۰۹؛ فتچوآی و همکاران، ۲۰۱۴؛ چنگ و همکاران، ۲۰۱۷؛ جیانوپولو و همکاران، ۲۰۰۹؛ میمرین و وازکوئز، ۲۰۰۱؛ پان و همکاران، ۲۰۰۳؛ دتفان و چندپراسیرت، ۲۰۰۹). استفاده از ژئوپلیمر در بهسازی انواع خاک‌ها به دلیل تولید کم کربن دی‌اکسید، داشتن مقاومت فشاری زیاد در زمان کوتاه، و دوام زیاد، در حال افزایش است. به‌عنوان مثال، گودرزی و سلیمی (۲۰۱۵) تأثیر ژئوپلیمر سرباره کوره آهن‌گدازی بر اصلاح خاک و اگر را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها از ۲/۵، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۳۰ درصد سرباره کوره آهن‌گدازی استفاده کردند. نتایج حاکی از این بود که افزودن ۲۰ تا ۲۵ درصد سرباره کوره آهن‌گدازی منجر به کاهش پتانسیل واگرایی، افزایش شاخص پلاستیسیته و افزایش مقاومت شد. میائو و همکاران (۲۰۱۷)، تثبیت خاک رس با استفاده از خاکستر آتشفشانی را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها گزارش کردند که افزودن ۱۰ درصد خاکستر آتشفشانی

با پیشرفت تکنولوژی و افزایش جمعیت، نیاز به گسترش زیرساخت‌ها از جمله راه‌سازی، خطوط راه‌آهن، پل و سد، روزبه‌روز افزایش می‌یابد (دی‌یونگ و همکاران، ۲۰۱۰). در بسیاری از موارد، خواص فنی خاک به مشخصات مطلوب نمی‌رسد و نیاز به بهسازی جهت بهبود خصوصیات ژئوتکنیک خاک، از جمله کنترل تورم و انقباض، کاهش شاخص پلاستیسیته، افزایش مقاومت فشاری و کششی و افزایش دوام در برابر فرسایش آبی و باد حس می‌شود (باردن و سایدس، ۱۹۷۱؛ ژانگ و تائو، ۲۰۰۸).

یکی از روش‌های سنتی بهسازی خاک، استفاده از تثبیت‌کننده‌های شیمیایی است. علاوه بر استفاده وسیع در سایر حیطه‌های عمرانی همچون ساخت‌وساز، سیمان پرتلند یکی از سنتی‌ترین تثبیت‌کننده‌های شیمیایی برای بهسازی خاک است. صنعت سیمان به‌اندازه‌ای بزرگ است که در انتشار پنج تا هشت درصد از دی‌اکسید کربن جهانی نقش دارد. تولید یک تن سیمان حدود یک تن دی‌اکسید کربن تولید می‌کند و در عین حال، برای تولید هر تن سیمان متوسط ۱۲۱ لیتر سوخت فسیلی و ۱۱۱ کیلووات-ساعت برق مصرف می‌شود که بعد از فولاد و آلومینیوم، بیشترین مصرف انرژی در فرآیند تولید دارند (کرایوسکا، ۲۰۱۸؛ اسکریونر و کرکپاتریک، ۲۰۰۸؛ ال-بکری و همکاران، ۲۰۱۳؛ اسلام و همکاران، ۲۰۱۵). انتظار می‌رود تولید سیمان از ۲/۵ میلیارد تن در سال ۲۰۱۶ به ۴/۴ میلیارد تن در سال ۲۰۵۰ افزایش یابد. به‌منظور مقابله با مشکلات مرتبط با تولید سیمان، استفاده از مواد نوین دوست‌دار محیط‌زیست به‌عنوان جایگزین برای سیمان می‌تواند علاوه بر بهسازی خاک، باعث آلودگی محیط‌زیستی کمتری شود (المنتصیر و همکاران، ۲۰۱۸).

در دو دهه اخیر، بهسازی انواع خاک با استفاده از مواد کم‌کربن که از لحاظ محیط‌زیست پایدارتر هستند،

پس از ۱۰ چرخه تر و خشک با افزودن صمغ ژلان نشان داده شد (چانگ و همکاران، ۲۰۱۵). در تحقیق اکبرنژاد و همکاران (۲۰۱۶) بهسازی خاک ماسه‌ای بد دانه‌بندی شده با استفاده از صمغ زانتان در یک تا پنج درصد بررسی شد. نتایج آزمایشگاهی آن‌ها نشان داد که استفاده از پنج درصد صمغ زانتان، چسبندگی را از ۴ به ۶۷ کیلوپاسکال، زاویه اصطکاک را از ۳۱ به ۳۶ درجه و مقاومت فشاری را از ۱۶۷ به ۳۸۹ کیلوپاسکال در تنش همه‌جانبه ۵۰ کیلوپاسکال افزایش داده و از سوی دیگر باعث انعطاف‌پذیر شدن نمونه‌ها در درصد اختلاط بیشتر خاک شده و پایداری خاک را افزایش داده است.

صمغ فارسی، بیوپلیمری هیدروکلوئیدی است که از ترشحات گیاه بادام وحشی در مناطق خشک و نیمه‌خشک جنگل‌های زاگرس در ایران به دست می‌آید (عبداللهی و رئوفی، ۲۰۲۲). علاوه بر استفاده وسیع این بیوپلیمر در صنایع غذایی (خرم و همکاران، ۲۰۱۷)، پزشکی و داروسازی، اخیراً عملکرد این ماده در بهسازی خاک‌ها مورد بررسی قرار گرفته است (محسنی نیا و صالح‌زاده، ۲۰۲۴). نتایج پژوهش‌ها نشان داد که پودر صمغ فارسی در افزایش مقاومت فشاری محدود نشده، مقاومت برشی و کششی خاک‌های ماسه‌ای (محسنی نیا و صالح‌زاده، ۲۰۲۳ a؛ محسنی نیا و صالح‌زاده، ۲۰۲۳ b) و رسی (قاسم‌زاده و مدیری، ۲۰۲۰) عملکرد بسیار مناسبی داشته و بررسی‌های بیشتر این ماده، با توجه به قیمت مناسب و حجم تولیدی زیاد آن را توجیه‌پذیر می‌سازد. اصلاح ساختار فیزیکی و شیمیایی بیوپلیمرها به منظور دستیابی به شبکه پیوندی قوی‌تر، غلیظ‌تر و افزایش حلالیت‌پذیری بیوپلیمرها به شیوه‌های مختلفی مورد آزمایش و بررسی قرار گرفته است. در بهسازی خاک‌ها، تغییر مشخصات رئولوژی بیوپلیمرها به منظور رفع مشکل خاص در برخی از تحقیقات اخیر مورد ارزیابی قرار گرفته است (قاسم‌زاده و همکاران، ۲۰۲۱؛ ون و همکاران، ۲۰۱۹؛ لی و همکاران، ۲۰۲۳). در این پژوهش،

به همراه فعال‌سازهای قلیایی به خاک رس منجر به کاهش پلاستیسیته خاک از ۳۴/۸ به ۱۴/۲ و کاهش درصد تورم خاک از ۱۵/۷ به ۳ گردید. در مطالعه‌ای دیگر، تأثیر خاکستر بادی و سرباره کوره آهن‌گدازی بر ثبات رس سیلتی مورد بررسی قرار گرفت و گزارش شد که با افزایش دمای عمل‌آوری نمونه‌ها، مقاومت نمونه‌ها نیز افزایش می‌یابد و دلیل آن افزایش سرعت ژئوپلیمراسیون بوده است (سوکیپراسرت و همکاران، ۲۰۲۱).

بیوپلیمرها (پلیمرهای آلی که از منابع طبیعی تولید می‌شوند) یکی دیگر از مواد نوین بهسازی خاک‌ها در سال‌های اخیر به شمار می‌آیند. بر اساس منبع آن‌ها، بیوپلیمرها به سه گروه اصلی گیاهی، حیوانی و میکروارگانسمی تقسیم می‌شوند (نیاواناکیس، ۲۰۱۵). گوار، لیگنین، آگار، بتا-گلوکان و آلژینات از جمله معروف‌ترین بیوپلیمرهای گیاهی هستند که در مطالعات پیشین مورد استفاده قرار گرفته‌اند (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۵؛ تنگبندی و نورزاد، ۲۰۱۷؛ اسمیتا و رانگاسوامی، ۲۰۲۰؛ چانگ و چو، ۲۰۱۲؛ سولدو و همکاران، ۲۰۲۰). بهسازی با بیوپلیمرها به دلیل توانایی بهبود ویژگی‌های مکانیکی خاک‌ها حتی در نسبت کم بیوپلیمر به خاک، سازگاری با محیط‌زیست و ماهیت غیرسمی، در قرن اخیر، در مهندسی ژئوتکنیک مورد توجه قرار گرفته است (کولشرشتا و همکاران، ۲۰۱۷؛ کابالار و دمیر، ۲۰۲۰؛ کابالار و چاناکچی، ۲۰۱۱؛ خاتمی و اوکلی، ۲۰۱۳؛ فاتحی و همکاران، ۲۰۱۸). در مطالعه سولدو و همکاران (۲۰۲۰)، تأثیر ۰/۵، ۱ و ۲ درصد بیوپلیمرهای زانتان و گوار در دو نوع خاک ماسه‌ای تمیز و سیلتی تحت آزمایش‌های دوام و مقاومت فشاری محدود نشده مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که نمونه‌ها در غلظت بهینه یک درصد، در طول چرخه‌های تر و خشک شدن، بیش از ۷۰ درصد از جرم اصلی خود و تا ۴۵ درصد از مقاومت اولیه خود را طی هفت چرخه تر و خشک شدن حفظ کردند. در مطالعه دیگری نیز بهبود عملکرد نمونه‌ها

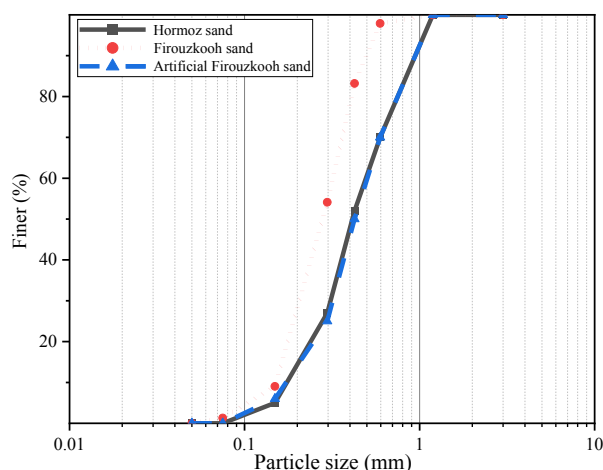
کربناته هرمز از اعماق سطحی سواحل جزیره هرمز واقع در شمال خلیج فارس تهیه شده است. به منظور اجتناب از رفتار سیمانی ماسه‌های کربناته، در این پژوهش به رفتار خالص خاک کربناته پرداخته شده و از مصالح غیرسیمانی استفاده شده است. منحنی‌های دانه‌بندی دو ماسه فیروزکوه و هرمز در شکل ۱ نشان داده شده‌اند.

برای حذف تأثیر پارامتر اندازه دانه‌ها بر مقاومت نمونه‌های بهسازی‌شده، از دانه‌بندی مصنوعی (به‌وسیله الک) مشابه ماسه هرمز برای ماسه فیروزکوه استفاده گردید. مطابق شکل ۱، ضریب یکنواختی و انحنای دو خاک ماسه هرمز و فیروزکوه مصنوعی به ترتیب $2/83$ و $1/12$ بود که طبق سیستم نام‌گذاری متحد خاک‌ها، در دسته خاک‌های ماسه‌ای بد دانه‌بندی‌شده (SP) قرار می‌گیرند.

به تأثیر عامل پیوندساز کلسیم کلرید در افزایش مقاومت فشاری نمونه‌های ماسه‌ای بهسازی‌شده با صمغ فارسی پرداخته شده است. همچنین، به دلیل عدم وجود ارزیابی عملکرد صمغ فارسی در برابر چرخه‌های متوالی خیس و خشک در منابع، آزمایش دوام روی نمونه‌های بهسازی‌شده صورت پذیرفت.

۲. مصالح مورد استفاده

خاک سیلیکاته ماسه فیروزکوه (شماره ۱۶۱) با داشتن ظرفیت باربری کم و خاک کربناته جزیره هرمز به دلیل امکان ریزش و تغییرشکل زیاد در برابر فشارهای آستانه مقاومت و امکان آسیب به زیرساخت‌های عمرانی به‌عنوان خاک‌های مسئله‌دار این پژوهش در نظر گرفته شدند. ماسه فیروزکوه از شرکت تأمین ماسه و ماسه



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی خاک ماسه فیروزکوه و هرمز

بهسازی و از کلسیم کلرید خشک^۱ به‌عنوان عامل اقتصادی افزایش غلظت پیوندهای بیوپلیمری بین‌دانه‌ای استفاده گردید. صمغ فارسی به شکل پودر سفیدرنگ با خلوص بیش از ۹۹٪ از شرکت فریر اصفهان و کلسیم کلرید خشک (برند مرک آلمان) به شکل گرانول از بازار محلی خریداری گردید.

مواد افزودنی مورد مطالعه این پژوهش شامل پودر آسیاب‌شده گرانول‌های طبیعی صمغ فارسی (شکل ۲) به‌دست آمده از مراتع و جنگل‌های واقع در استان فارس و کلسیم کلرید خشک می‌باشد. در این بررسی، از صمغ فارسی به دلیل وجود گروه‌های کربوکسیل و هیدروکسیل فراوان، لزجت و چسبندگی زیاد به‌عنوان ماده اصلی

^۱ - Dehydrated calcium chloride



شکل ۲. پودر سفید صمغ فارسی

۳. ساخت و نگهداری نمونه‌ها

از نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۴ سانتی‌متر و ارتفاع ۸ سانتی‌متر (نسبت ارتفاع به قطر : ۲) برای اندازه‌گیری مقاومت فشاری محدود نشده نمونه‌های بهسازی‌شده استفاده گردید. لازم به ذکر است که برای ایجاد یک حالت سست مستعد بهسازی، از تراکم اولیه حدود ۳۰٪ برای هر دو خاک استفاده گردید. سپس، پس از انجام آزمایش‌های اولیه، متناسب با حجم قالب و روابط وزنی-حجمی خاک، مقادیر مورد نیاز خاک خشک‌شده در گرمکن ۱۱۰ درجه سلسیوس مشخص و برای ساخت نمونه استفاده گردید. برای ساخت نمونه‌های بهسازی‌شده تنها با بیوپلیمر، مقدار مشخص صمغ (۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲، ۲/۵ و ۳ درصد نسبت به وزن خاک خشک) در آب مقطر (درصد رطوبت اولیه تمامی نمونه‌ها به مقدار ثابت ۱۵٪ است) به‌طور کامل حل و به خاک اضافه و برای ایجاد یک مخلوط یکنواخت، به‌خوبی به مدت سه دقیقه توسط کاردک و همزن دستی مخلوط گردید. برای ساخت نمونه شامل صمغ و کلسیم کلرید، با توجه به مولاریته (۰/۵ تا ۳ مولار) مقدار کلسیم کلرید شناسایی و ابتدا کلسیم کلرید و سپس صمغ در آب مقطر حل و به خاک اضافه می‌شود. دو محل گیرشی اتافک با دمای ثابت کنترل‌شده ۲۲ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی کم (۲۰ تا ۳۰ درصد) و گرمکن با رطوبت نسبی صفر و دمای ۴۰ درجه سلسیوس (شکل ۳-الف) برای ارزیابی

عملکرد خاک بهسازی‌شده در دمای زیاد (همچون سازه‌های فراساحلی با سطح آب زیرزمینی پایین یا دور شده از معرض آب توسط شیوه‌هایی چون سپری برای خاک‌های کربناته) و در دمای کمتر در حضور رطوبت مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین، به دلیل تغییرات سطح آب زیرزمینی (به‌خصوص در خاک کربناته) آزمایش چرخه‌های خیس و خشک برای ارزیابی مقاومت خیس و خشک و دوام نمونه‌ها صورت پذیرفت.

۴. برنامه آزمایش‌ها و دستگاه‌های اندازه‌گیری

برای پیدا کردن درصد بهینه مواد اختلاطی، ابتدا روی نمونه‌های بهسازی‌شده عمل‌آوری‌شده به مدت هفت روز در گرمکن توسط دستگاه فشار-کشش یونیورسال^۱ واقع در دانشکده عمران دانشگاه علم و صنعت ایران، با ظرفیت اسمی ۵۰ کیلونیوتن و دقت یک نیوتن آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده با نرخ جابه‌جایی یک میلی‌متر بر دقیقه، مطابق ASTM D2166 صورت پذیرفت (شکل ۳-ب و ج). لازم به ذکر است که نرخ کرنش پیشنهادی مطابق استاندارد ۰/۵ تا ۲ درصد کرنش در دقیقه می‌باشد که با توجه به ابعاد نمونه، نرخ جابه‌جایی یک میلی‌متر بر دقیقه برای انجام آزمایش‌های این پژوهش انتخاب گردید. سختی دستگاه عاملی تعیین‌کننده در رفتار بعد از اوج^۲ (به‌خصوص در خاک‌های ترد شکن و سنگ‌ها) بوده که با توجه به امکان استخراج رفتار

^۱- Universal testing machine

^۲- Post peak behavior

نتایج، پیدا کردن درصد صمغ بهینه و مقایسه عملکرد بهسازی دو خاک می‌باشد. برخلاف مقاومت فشاری محدود نشده کم دو ماسه فیروزکوه و هرمز بهسازی نشده، به دلیل افزایش سختی و چسبندگی ناشی از حضور پیوندها و شبکه مستحکم^۲ بین دانه‌ای، مقاومت فشاری محدود نشده هر دو خاک مذکور بهسازی شده افزایش چشمگیری پیدا می‌کند. از حیث نوع خاک، مقاومت فشاری خاک فیروزکوه بهسازی شده با افزایش درصد بیوپلیمر، روند افزایشی سریع‌تری نسبت به خاک هرمز بهسازی شده داشته ولی مقاومت فشاری بیشینه هفت روزه هر دو خاک به مقدار ۲/۲ مگاپاسکال میل می‌کند. اگرچه در خاک ماسه هرمز با افزایش درصد بیوپلیمر اضافه شده، روند افزایشی مقاومت ادامه پیدا می‌کند، اما شدت افزایش مقاومت در درصدهای بیوپلیمری بیشتر کم می‌شود. به طوری که با تجاوز از مقدار ۳/۱، مقدار افزایش مقاومت کمتر از ۱۰۰ کیلوپاسکال می‌باشد. با افزودن بیوپلیمر، مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه بهسازی شده ماسه فیروزکوه ابتدا روند افزایشی داشته (تا ۲/۵ درصد) و سپس روند نزولی را تجربه می‌کند. بنابراین، با توجه به مقاومت فشاری حداکثری ماسه بهسازی شده فیروزکوه و هرمز، درصد صمغ بهینه برای این دو خاک به ترتیب ۲/۵ و ۳ درصد می‌باشد. علت افزایش درصد صمغ فارسی بهینه و کاهش نسبت درصد رطوبت به صمغ بهینه (افزایش غلظت محلول) نسبت به تحقیق پیشین (محسنی‌نیا و صالح‌زاده، ۲۰۲۳) را می‌توان تغییر دانه‌بندی خاک عنوان کرد. ایجاد دانه‌بندی مصنوعی در ماسه فیروزکوه باعث افزایش متوسط قطر ذرات خاک (D_{50}) (نسبت به دانه‌بندی ماسه فیروزکوه) شده که بالتبع با افزایش میزان صمغ (برای ایجاد پیوندهای ضخیم‌تر) و همچنین افزایش غلظت محلول صمغ-آب (به منظور افزایش مقاومت پیوندها) همراه بوده است.

بعد از اوج نمونه‌های بتنی و سخت‌تر بودن سختی دستگاه نسبت به تمامی نمونه‌های بهسازی شده، مشکلی برای استخراج رفتار بعد از اوج نمونه‌های بهسازی شده وجود ندارد. البته در نمونه‌های بسیار ترد، به دلیل حساسیت زیاد نمونه در محدوده نزدیک به اوج منحنی، امکان شکست ناگهانی نمونه وجود دارد که برای بررسی رفتار بعد از اوج این نمونه‌ها باید از دستگاه فشاری مجهز به سروکنترل^۱ استفاده کرد. سپس، اثر سن و محل گیرش بر نمونه‌های بهسازی شده بهینه مورد ارزیابی قرار گرفت. برای بررسی دوام مقاومتی، مقاومت فشاری خشک و خیس نمونه‌های بهسازی شده بهینه هفت روزه پس از طی شدن چرخه‌های متوالی خیس و خشک مطابق ASTM D559-03 بررسی شد. مطابق ASTM D559-03 چرخه اول خیس شامل غرقاب کردن نمونه هفت روزه عمل‌آوری شده در گرمکن به مدت یک روز در حمام آب (شکل ۳-د) و چرخه اول خشک شامل خشک کردن نمونه خیس به مدت یک روز در گرمکن ۷۰ درجه تعریف گردید. لازم به ذکر است که زمان یک روزه برای خیس و خشک شدن کامل نمونه طبق بررسی آزمایشگاهی مناسب بوده و نیازی به افزایش زمان چرخه احساس نشد.

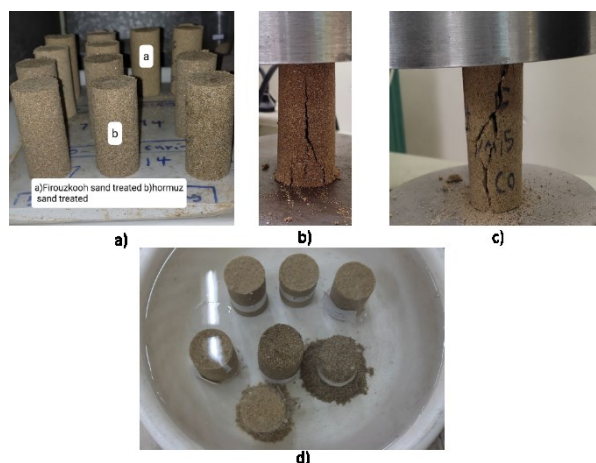
۵. تحلیل نتایج

۵-۱. تأثیر درصد بیوپلیمر

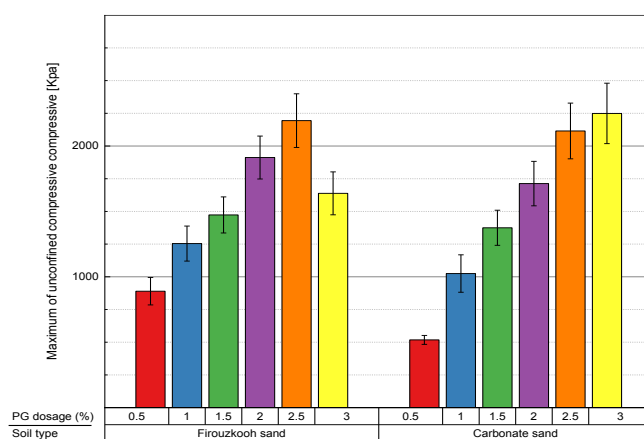
در شکل ۴، مقاومت فشاری محدود نشده خاک‌های ماسه فیروزکوه و هرمز بهسازی شده با درصدهای مختلف وزنی صمغ فارسی (نسبت به وزن خشک خاک) و رطوبت اولیه ثابت ۱۵٪ پس از گذشت هفت روز عمل‌آوری در دمای افزایش یافته ۴۰ درجه سلسیوس نشان داده شده است. تفاوت نتایج آزمایش‌های تکرارپذیری برای هر نمونه بهسازی شده توسط نوار خطا روی شکل نشان داده شده است. هدف از بررسی این

²- Bio-film

¹- Servo control device



شکل ۳. الف) گیرش نمونه‌های بهسازی شده در گرمکن، ب) تصویر شکست نمونه هرمز بهسازی شده، ج) تصویر شکست نمونه فیروزکوه بهسازی شده و د) قرارگیری نمونه‌های بهسازی شده در حمام آب



شکل ۴. مقاومت فشاری محدود نشده ماسه فیروزکوه و هرمز بهسازی شده با صمغ فارسی

ساختار درشت مولکولی صمغ فارسی (گروه‌های کربوکسیلی و هیدروکسیلی موجود در صمغ فارسی) واکنش می‌دهد و باعث تقویت غلظت هیدروژل^۱ ایجاد شده می‌گردد. همچنین، کلسیم کلرید در سطح تماسی بین زل‌دانه‌های جامد خاک، در کنار صمغ فارسی، باعث افزایش چسبندگی تماسی گشته و به دلیل گرماده بودن فرآیند انحلال کلسیم کلرید در آب، گیرش اولیه پیوندهای بین‌دانه‌ای را تسریع می‌بخشد. اگرچه با افزایش مولاریته کلسیم کلرید به‌طور کلی مقاومت فشاری محدود نشده افزایش پیدا کرده اما در هر نمونه نسبت بهینه‌ای بین مولاریته کلسیم کلرید و درصد صمغ فارسی

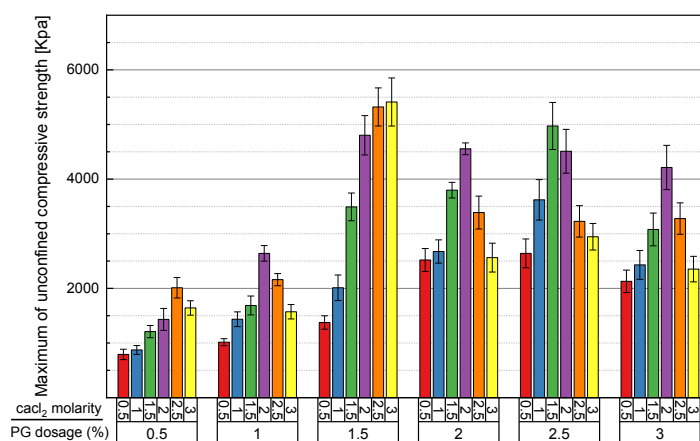
۲-۵. تأثیر مولاریته کلسیم کلرید

در شکل‌های ۵ و ۶، نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری محدود نشده صورت گرفته روی نمونه‌های فیروزکوه و هرمز بهسازی شده با صمغ فارسی (۰/۵ تا ۳ درصد) و کلسیم کلرید (۰/۵ تا ۳ مولار) نشان داده شده است. گیرش نمونه‌های بهسازی شده در گرمکن ۴۰ درجه سلسیوس و به مدت هفت روز انجام گرفت. هدف از این بخش، پیدا کردن بهترین ترکیب مقدار صمغ و کلسیم کلرید به‌منظور ایجاد پیوندهای بین‌دانه‌ای قوی‌تر و در نتیجه مقاومت فشاری بیشتر می‌باشد. کلسیم کلرید پس از حل شدن در آب به‌وسیله یون‌های فعال Ca^{2+} با

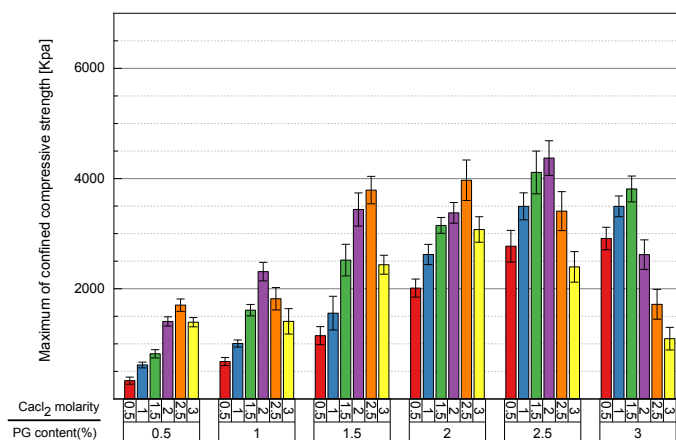
^۱- Hydrogel

است که نسبت به نمونه بهسازی شده با ۱/۵ درصد صمغ فارسی و نمونه بهسازی شامل ۰/۵ درصد صمغ فارسی حل شده در ژل هیدراته ۳ مولار کلسیم کلرید به ترتیب ۲۶۰٪ و ۳۲۸٪ مقاومت بیشتری از خود نشان داده است. همچنین، نمونه هرمز بهسازی شده با ۲/۵ درصد صمغ در محلول ۲ مولار کلسیم کلرید مقاومت فشاری ۴۳۰۰ کیلوپاسکال از خود نشان داده که نسبت به مقاومت فشاری نمونه مشابه بهسازی شده تنها با ۲/۵ درصد صمغ و نمونه شامل ۰/۵ درصد صمغ حل شده در ژل ۲ مولاری کلسیم کلرید به ترتیب ۱۹۰٪ و ۳۰۷٪ بیشتر بوده است.

وجود دارد. نسبت بهینه درصد صمغ فارسی به مولاریته کلسیم کلرید برای خاک فیروزکوه به ترتیب ۰/۲، ۰/۵، ۰/۵، ۱/۶۷ و ۱/۵ و برای خاک هرمز ۰/۲، ۰/۵، ۰/۶، ۰/۸، ۱/۲۵ و ۲ به ترتیب برای مقدار صمغ ۰/۵ تا ۳ درصد بوده است. بنابراین، می توان به نقش مکملی کلسیم کلرید (اما تأثیرگذار) در افزایش مقاومت فشاری محدود نشده نمونه های بهسازی شده اشاره کرد زیرا با افزایش درصد صمغ فارسی، مقدار مولاریته بهینه کاهش پیدا کرده و مقاومت فشاری نمونه های بهسازی شده افزایش پیدا می کند. به عنوان مثال، نمونه فیروزکوه بهسازی شده با ۱/۵ درصد صمغ در محلول ۳ مولار کلسیم کلرید، مقاومت فشاری ۵۴۲۱ کیلوپاسکال از خود نشان داده



شکل ۵. مقاومت فشاری محدود نشده ماسه فیروزکوه بهسازی شده با صمغ فارسی و کلسیم کلرید

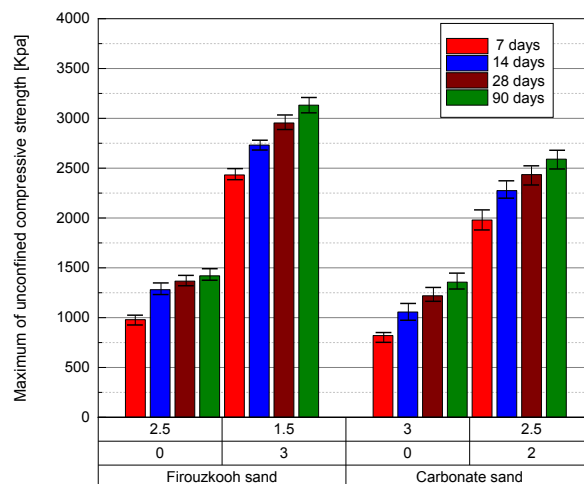


شکل ۶. مقاومت فشاری محدود نشده ماسه هرمز بهسازی شده با صمغ فارسی و کلسیم کلرید

۳-۵. تأثیر مدت و محل گیرش

با توجه به نتایج بخش‌های ۱-۵ و ۲-۵ دو نمونه بهینه بهسازی شده تنها با صمغ فارسی و دو نمونه بهینه بهسازی شده از ترکیب صمغ فارسی با عامل کمکی افزایش غلظت و ایجادکننده پیوند^۱ (کلسیم کلرید) برای بررسی تأثیر مدت و محل گیرش مورد آزمایش قرار گرفتند. در شکل‌های ۷ و ۸، نتایج مقاومت فشاری محدود نشده نمونه‌های بهینه بهسازی شده عمل‌آوری شده در گرمکن ۴۰ درجه سلسیوس و دمای محیط (۲۲ درجه سلسیوس) نشان داده شده است. نمونه‌های عمل‌آوری شده در گرمکن و دمای محیط بعد از ۲۸ روز و ۹۰ روز به مقاومت نهایی خود رسیده و بعد از آن افزایش مقاومت چشمگیری مشاهده نمی‌شود. همچنین، مشاهده می‌شود که بین نمونه‌های مشابه عمل‌آوری شده در گرمکن و دمای محیط تفاوت مقاومتی محسوسی وجود دارد. به عنوان مثال، مقاومت فشاری نهایی نمونه فیروزکوه عمل‌آوری شده در گرمکن و دمای محیط به ترتیب ۲/۷۵ و ۱/۲۵ مگاپاسکال بوده است. علت تفاوت ۵۰ تا ۶۰ درصدی بین مقاومت نهایی نمونه‌های عمل‌آوری شده در گرمکن و دمای اتاق را می‌توان به

سخت‌شدگی اولیه بیشتر پیوندها (ناشی از دما)، کاهش مقاومت فشاری، کششی و ضخامت پیوندهای بین‌دانه‌ای عنوان کرد (محسنی نیا و صالح‌زاده، ۲۰۲۳). اگرچه کلسیم کلرید در دمای عمل‌آوری بیشتر (گرمکن) باعث تسریع روند افزایش مقاومت می‌گردد اما در دمای عمل‌آوری محیط حساسیت بیشتری نسبت به رطوبت محیط و دمای کمتر نشان داده و نسبت به نمونه عمل‌آوری شده در گرمکن روند افزایش مقاومت کندتری از خود نشان می‌دهد. شکل ۹، نمودار تنش- کرنش نمونه‌های فیروزکوه و هرمز بهسازی شده بهینه با صمغ فارسی و کلسیم کلرید (به ترتیب FPGC و CPGC) را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۹، کاهش دمای محیط گیرش اگرچه باعث کاهش مقاومت و سختی نمونه بهسازی شده گردیده، اما کرنش محوری نظیر نقطه مقاومت را افزایش می‌دهد. همچنین، می‌توان گفت که کاهش دمای محیط گیرش باعث ایجاد قابلیت شکل‌پذیری بیشتر و جلوگیری از شکست ترد نمونه می‌گردد. لازم به ذکر است که تفاوت رفتاری ذکر شده برای نمونه‌های بهسازی شده با صمغ فارسی و عمل‌آوری شده در گرمکن و محیط نیز صادق بوده است.

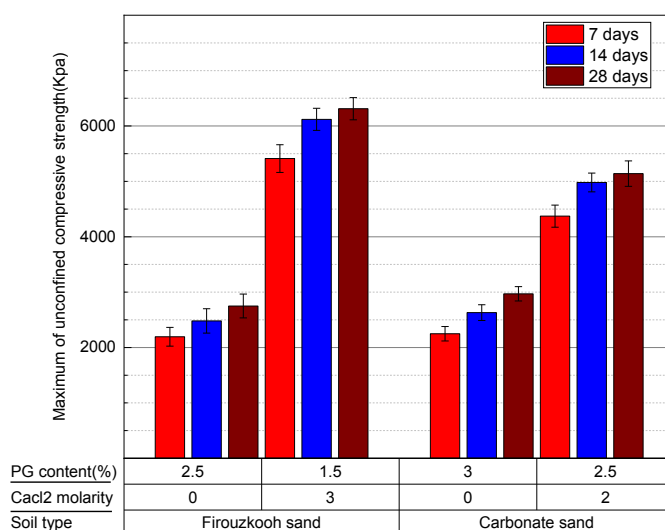


شکل ۷. مقاومت فشاری محدود نشده ماسه فیروزکوه و هرمز بهسازی شده با صمغ فارسی و کلسیم کلرید بهینه

عمل‌آوری شده در گرمکن

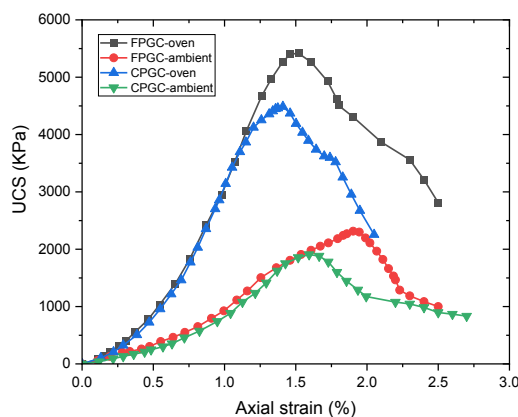
^۱- Supplementary crosslinker agent

ارزیابی مقاومت فشاری محدود نشده و دوام ماسه کربناته و سیلیکاته بهسازی شده با بیوپلیمر صمغ فارسی و عامل...



شکل ۸. مقاومت فشاری محدود نشده ماسه فیروزکوه و هرمز بهسازی شده با صمغ فارسی و کلسیم کلرید بهینه

عمل آوری شده در محیط



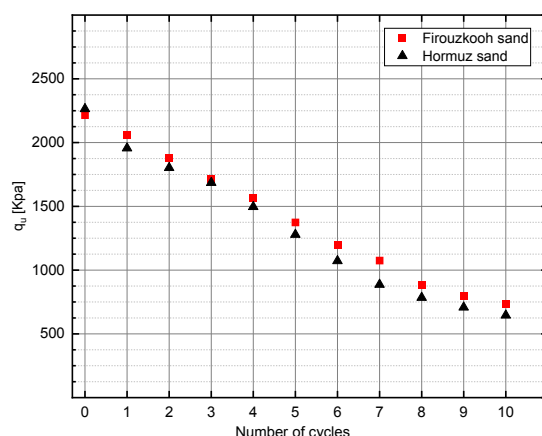
شکل ۹. نمودار تنش- کرنش نمونه‌های بهسازی شده بهینه عمل آوری شده در گرمکن و محیط به مدت ۷ روز

صمغ فارسی پس از طی کردن چرخه‌های متوالی خیس و خشک در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که پیوندهای بین‌دانه‌ای در نمونه‌های حاوی کلسیم کلرید به دلیل حل شدن یون‌های کلر و کلسیم در آب دچار تخریب می‌شوند و لذا دوام بسیار کمی در برابر چرخه‌های متوالی خیس و خشک از خود نشان می‌دهند (شکل ۳-د). مطابق شکل‌های ۱۰ و ۱۱، مقاومت فشاری هر دو خاک بهسازی شده با صمغ فارسی (در هر دو شرایط خیس و خشک) پس از هر بار اعمال چرخه، روند کاهشی را دنبال می‌کنند و پس از چرخه ۷ تقریباً به مقاومت ثابتی میل می‌کنند.

۴-۵. دوام در برابر چرخه‌های خیس و خشک متوالی برای ارزیابی دوام مقاومتی نمونه‌های بهسازی شده، چرخه‌های متوالی خیس و خشک روی نمونه‌های بهینه صورت پذیرفت و مقاومت فشاری محدود نشده نمونه‌ها پس از گذراندن هر چرخه در حالت خشک و خیس اندازه‌گیری گردید. لازم به ذکر است که چرخه اول برای اندازه‌گیری مقاومت خیس نمونه شامل غرقاب کردن نمونه به مدت یک روز در حمام آب بوده و مقاومت خشک نمونه پس از خشک کردن نمونه خیس در گرمکن ۷۰ درجه به مدت یک روز اندازه‌گیری می‌شود. نتایج مقاومت فشاری محدود نشده نمونه‌های بهسازی شده با

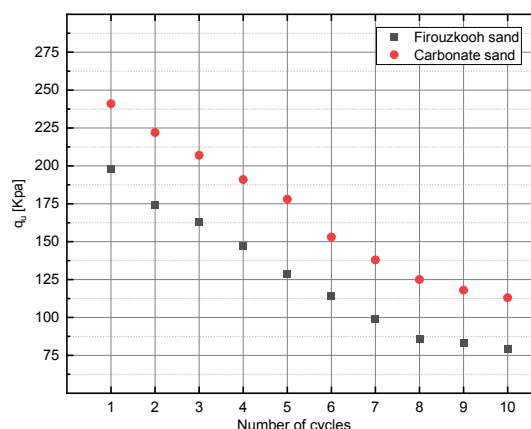
می‌کنند. اگرچه با خشک شدن تدریجی نمونه، پیوندهای بین‌دانه‌ای جدا شده مجدداً به شبکه متصل گشته اما به دلیل از دست رفتن ساختار اولیه شبکه بین‌دانه‌ای و همچنین به دلیل مصرف شدن بخشی از مقاومت پیوندها، مقاومت خشک نمونه پس از هر چرخه کاهش پیدا می‌کند (اما به‌طور معناداری از مقاومت خیس نمونه مشابه بیشتر است).

در اثر نفوذ آب به داخل نمونه به دلیل خاصیت آبدوستی^۱ صمغ فارسی، پیوندهای بیوپلیمری دچار تورم شده و بخشی از پیوندها در اثر واکنش‌های تنش- کرنشی^۲ و جابه‌جایی برگشت‌ناپذیر^۳ از شبکه مستحکم بین‌دانه‌ای خارج می‌گردد (چانگ و همکاران، ۲۰۱۷). همچنین، در شرایط خیس، پیوندهای بین‌دانه‌ای منعطف‌تر بوده و مقاومت فشاری و کششی کمتری تحمل



شکل ۱۰. مقاومت فشاری محدود نشده نمونه‌های بهینه بهسازی شده (در حالت خشک) پس از طی کردن چرخه‌های خیس و

خشک متوالی



شکل ۱۱. مقاومت فشاری محدود نشده نمونه‌های بهینه بهسازی شده (در حالت خیس) پس از طی کردن چرخه‌های خیس و

خشک متوالی

بررسی در شکل ۱۲ نشان داده شده‌اند. مطابق شکل ۱۲ و با انطباق پیک‌های قابل مشاهده در الگوی پراش نمونه

۵-۵. آزمایش پراش اشعه ایکس (XRD)

الگوهای پراش پرتو ایکس مربوط به نمونه‌های مورد

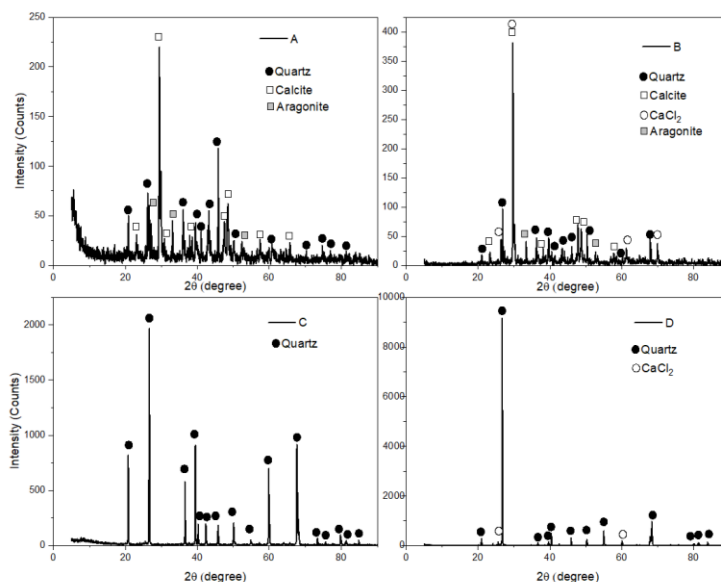
³- Plastic deformation

¹- Hydrophilic

²- Stress-strain reactions

۱۰ درجه نیز مشاهده می‌شود. این در حالی است که در ماسه فیروزکوه بهسازی شده با صمغ فارسی و کلسیم کلرید، مجدداً شدیدترین پیک‌ها مربوط به فاز کوارتز بوده اما در کنار آن پیک‌های مربوط به فاز کلسیم کلرید نیز قابل مشاهده است که وجود این فاز در ترکیب مورد بررسی را به اثبات می‌رساند. عدم تشکیل پیک جدید در این الگوهای پراش پس از مخلوط نمودن صمغ فارسی و همچنین کلسیم کلرید به مواد اولیه بیانگر عدم تشکیل محصولی جدید ناشی از واکنش بین این مواد می‌باشد. با این حال، پیک مربوط به ترکیبات آمورف صمغ فارسی در این نتایج مشاهده شده که بیانگر چسبیدن این ترکیبات روی سطح ذرات موجود در این کامپوزیت است. در واقع، حضور ترکیبات آلی قطبی و گروه‌های عاملی پلاری نظیر گروه‌های هیدروکسیلی و کربوکسیلی در صمغ فارسی می‌تواند با ایجاد پیوند هیدروژنی بین ذرات باعث افزایش استحکام ساختار شده و در نتیجه مقاومت فشاری نمونه را افزایش داده است.

ماسه کربناته بهسازی شده با صمغ فارسی روی الگوهای پراش ماسه کربناته بهسازی نشده (رضوانی و همکاران، ۲۰۲۰) مشخص شد که سه فاز در این نتایج وجود داشته است. فاز اول در این نمونه مربوط به ساختار کریستالی کلسیت، فاز دوم مربوط به ساختار کریستالی آراگونیت و فاز سوم مربوط به ساختار کریستالی کوارتز بوده است. همچنین، ترکیبات آمورف موجود در صمغ باعث ایجاد یک پیک پهن در زوایای کمتر از ۱۰ درجه شده است. در نمونه ماسه کربناته بهسازی شده با صمغ فارسی و کلسیم کلرید، مشخص است که علاوه بر سه فاز کلسیت، آراگونیت و کوارتز که در نمونه قبل نیز مشاهده شده بود، پیک‌های مربوط به فاز کلسیم کلرید نیز در این نمونه قابل مشاهده است که وجود این فاز در این کامپوزیت را به اثبات می‌رساند. در نمونه ماسه فیروزکوه، بر خلاف نمونه‌های قبلی که در آنها فاز کربنات کلسیم غالب بود، فاز کوارتز غالب است (کریمیان و همکاران، ۲۰۲۱). در ماسه فیروزکوه بهسازی شده با صمغ فارسی، یک پیک پهن مربوط به ترکیبات آلی موجود در زوایای کمتر از



شکل ۱۲. الگوی پراش اشعه ایکس نمونه‌های بهسازی شده: الف) ماسه کربناته بهسازی شده با صمغ فارسی، ب) ماسه کربناته بهسازی شده با صمغ فارسی و کلسیم کلرید، ج) ماسه فیروزکوه بهسازی شده با صمغ فارسی و د) ماسه فیروزکوه بهسازی شده با صمغ فارسی و کلسیم کلرید

۶. نتیجه گیری

- نمونه‌های عمل‌آوری شده در گرمکن دارای مقاومت بیشتر، کرنش محوری نظیر اوج کمتر و سختی بیشتر نسبت به نمونه‌های عمل‌آوری شده در محیط می‌باشند.

- به دلیل حل شدن یون‌های کلر و کلسیم در آب و تخریب پیوندهای بین‌دانه‌ای در نمونه‌های حاوی کلسیم کلرید، این نمونه‌ها دوام بسیار کمی در برابر چرخه‌های متوالی خیس و خشک از خود نشان می‌دهند. اما نمونه‌های بهسازی شده با صمغ فارسی، دوام قابل قبولی در برابر چرخه‌های متوالی خیس و خشک داشتند.

- مقاومت خیس و خشک نمونه‌های بهسازی شده با صمغ فارسی پس از طی کردن ۱۰ چرخه متوالی خیس و خشک برای هر دو ماسه فیروزکوه و هرمز به ترتیب در حدود ۸۰ و ۶۰ کیلوپاسکال بود که نسبت به مقاومت فشاری محدود نشده نزدیک صفر هر دو ماسه بهسازی نشده، چسبندگی قابل قبولی دارند.

لازم به ذکر است که صمغ فارسی به طور وسیعی در ایران یافت می‌شود و سالانه صدها تن از آن به کشورهای دیگر صادر می‌شود (عباسی و محمدی، ۲۰۱۳). اگر چه با توجه به عملکرد قابل توجه در بهسازی خاک و منابع وسیع آن، ارزیابی استفاده از آن در پروژه‌های کوچک و بعضاً بزرگ عمرانی توجیه علمی و اقتصادی دارد. اما سایر عوامل چون امکان ترکیب یا تزریق مواد در محل پروژه و بررسی پارامترهای مقاومتی و غیره در محل نیازمند بررسی‌های بیشتر می‌باشد.

در این پژوهش، به تأثیر افزودن صمغ فارسی و عامل پیوندساز کلسیم کلرید در مقاومت و دوام نمونه‌های ماسه‌ای پرداخته شد. بدین منظور، آزمایش‌های مقاومت فشاری محدود نشده و دوام بر دو نوع خاک ماسه‌ای فیروزکوه و هرمز انجام شد. نتایج حاصل از این تحقیق عبارتند از:

- افزودن صمغ فارسی باعث افزایش چشمگیر مقاومت فشاری هفت روزه هر دو خاک تا حدود ۲/۲ مگاپاسکال شد که علت آن افزایش سختی و چسبندگی ناشی از حضور پیوندها و شبکه مستحکم بین‌دانه‌ای بوده است. این افزایش مقاومت در خاک فیروزکوه در مقدار بهینه ۲/۵ درصد و در خاک هرمز در مقدار بهینه ۳ درصد اتفاق افتاد.

- با افزایش مولاریته کلسیم کلرید، به‌طور کلی مقاومت فشاری محدود نشده افزایش پیدا کرد. در خاک فیروزکوه، ۱/۵ درصد صمغ فارسی به همراه کلسیم کلرید ۳ مولار بهترین ترکیب را داشت و این مقادیر برای خاک هرمز به ترتیب ۲/۵ درصد و ۲ مولار به دست آمد.

- نمونه‌های بهینه عمل‌آوری شده در گرمکن برای هر دو خاک، مقاومت نهایی حدوداً دو برابری نسبت به نمونه‌های بهینه عمل‌آوری شده در دمای اتاق نشان دادند. علت این تفاوت، سخت‌شدگی اولیه بیشتر پیوندها به علت دمای بیشتر در گرمکن بوده است.

۷. مراجع

- Abbasi, S. and Mohammadi, S. 2013. "Stabilization of milk–orange juice mixture using Persian gum: Efficiency and mechanism". *Food Biosci.*, 2: 53-60. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2013.04.002>
- Abdollahi, S. and Raoufi, Z. 2022. "Gelatin/Persian gum/bacterial nanocellulose composite films containing Frankincense essential oil and Teucrium polium extract as a novel and bactericidal wound dressing". *J. Drug Deliv. Sci. Tech.*, 72: 103423.
- Akbarnejad, S., Ghaemi, M., Arab Ameri, M. and Ahangari, K. 2016. "The effect of xanthan gum biopolymer on coarse-grained soil (Babolsar soil)". *National Civil Engineering Congress*, <https://sid.ir/paper/889688/fa>
- Al Bakri, A. M. M., Abdulkareem, O. A., Rafiza, A. R., Zarina, Y., Norazian, M. N. and Kamarudin, H. 2013. "Review on processing of low calcium fly ash geopolymer concrete". *Australian J. Basic Appl. Sci.*, 7(5): 342-349.

- ASTM D2166. 2016. "Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil". West Conshohocken, PA, United States of America.
- ASTM D559-03. 2003. "Test methods for wetting and drying compacted soil-cement mixtures". Annual Book of ASTM Standards, Conshohocken, PA, USA.
- Barden, L. and Sides, G. 1971. "Sample disturbance in the investigation of clay structure". *Geotech.*, 21(3): 211-222.
- Cabalar, A. F. and Demir, S. 2020. "Fall-cone testing of different size/shape sands treated with a biopolymer". *Geomech. Eng.*, 22(5): 441.
- Cabalar, A. F. and Canakci, H. 2011. "Direct shear tests on sand treated with Xanthan gum". *Proc. Inst. Civ. Eng.-Ground Improve.*, 164(2): 57-64.
- Chang, I. and Cho, G. C. 2012. "Strengthening of Korean residual soil with β -1, 3/1, 6-galucan biopolymer". *Constr. Build. Mater.*, 30: 30-35.
- 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.
- Chang, I., Im, J., Lee, S. W. and Cho, G. C. 2017. "Strength durability of gellan gum biopolymer-treated Korean sand with cyclic wetting and drying". *Constr. Build. Mater.*, 143: 210-221.
- Chang, I., Lee, M., Tran, A. T. P., Lee, S., Kwon, Y. M., Im, J. and Cho, G. C. 2020. "Review on biopolymer-based soil treatment (BPST) technology in geotechnical engineering practices". *Transpor. Geotech.*, 24: 100385.
- Davidovits, J. 1991. "Geopolymers: Inorganic polymeric new materials". *J. Therm. Anal. Calorim.*, 37(8): 1633-1656.
- DeJong, J. T., Mortensen, B. M., Martinez, B. C. and Nelson, D. C. 2010. "Bio-mediated soil improvement". *Ecol. Eng.*, 36(2): 197-210.
- Detphan, S. and Chindaprasirt, P. 2009. "Preparation of fly ash and rice husk ash geopolymer". *Int. J. Miner., Metall. Mater.*, 16(6): 720-726.
- El Mountassir, G., Minto, J. M., van Paassen, L. A., Salifu, E. and Lunn, R. J. 2018. "Applications of microbial processes in geotechnical engineering". *Adv. Appl. Microbiol.*, 104: 39-91.
- Fatehi, H., Abtahi, S. M., Hashemolhosseini, H. and Hejazi, S. M. 2018. "A novel study on using protein based biopolymers in soil strengthening". *Constr. Build. Mater.*, 167: 813-821.
- Geng, J., Zhou, M., Zhang, T., Wang, W., Wang, T., Zhou, X., ... and Hou, H. 2017. "Preparation of blended geopolymer from red mud and coal gangue with mechanical co-grinding preactivation". *Mater. Struct.*, 50: 1-11.
- Giannopoulou, I., Dimas, D., Maragkos, I. and Panias, D. 2009. "Utilization of metallurgical solid by-products for the development of inorganic polymeric construction materials". *Global NEST J.*, 11(2): 127-136.
- Ghasemzadeh, H. and Modiri, F. 2020. "Application of novel Persian gum hydrocolloid in soil stabilization". *Carbohydr. Polym.*, 246: 116639.
- Ghasemzadeh, H., Modiri, F. and Darvishan, E. 2021. "A novel clean biopolymer-based additive to improve mechanical and microstructural properties of clayey soil". *Clean Technol. Environ. Policy*, 1-13.
- Goodarzi, A. R. and Salimi, M. 2015. "Stabilization treatment of a dispersive clayey soil using granulated blast furnace slag and basic oxygen furnace slag". *Appl. Clay Sci.*, 108: 61-69.
- Islam, A., Alengaram, U. J., Jumaat, M. Z., Bashar, I. I. and Kabir, S. A. 2015. "Engineering properties and carbon footprint of ground granulated blast-furnace slag-palm oil fuel ash-based structural geopolymer concrete". *Constr. Build. Mater.*, 101: 503-521.
- Karimian, A., Hassanlourad, M. and Karimi, G. R. 2021. "Insight into the properties of surface percolated biocemented sand". *Geomicrobiol. J.*, 38(2): 138-149.
- Khatami, H. R. and O'Kelly, B. C. 2013. "Improving mechanical properties of sand using biopolymers". *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 139(8): 1402-1406.
- Khorrarn, F., Ramezani, A. and Hosseini, S. M. H. 2017. "Shellac, gelatin and Persian gum as alternative coating for orange fruit". *Sci. Hortic.*, 225: 22-28.
- Krajewska, B. 2018. "Urease-aided calcium carbonate mineralization for engineering applications: A review". *J. Adv. Res.*, 13: 59-67.
- Kulshreshtha, Y., Schlangen, E., Jonkers, H. M., Vardon, P. J. and Van Paassen, L. A. 2017. "CoRncrete: A corn starch based building material". *Constr. Build. Mater.*, 154: 411-423.
- Lee, M., Chang, I. and Cho, G. C. 2023. "Advanced biopolymer-based soil strengthening binder with trivalent chromium-xanthan gum crosslinking for wet strength and durability enhancement". *J. Mater. Civ. Eng.*, 35(10): 04023360.
- Maragkos, I., Giannopoulou, I. P. and Panias, D. 2009. "Synthesis of ferronickel slag-based geopolymers". *Miner. Eng.*, 22(2): 196-203.

- Miao, S., Shen, Z., Wang, X., Luo, F., Huang, X. and Wei, C. 2017. "Stabilization of highly expansive black cotton soils by means of geopolymerization". *J. Mater. Civ. Eng.*, 29(10): 04017170.
- Mohseninia, M. and Salehzadeh, H. 2023a. "Enhancing strength parameters of Firouzkooch sandy soil improved with Persian herbal gum". *Amirkabir J. Civ. Eng.*, 55(6): 1123-1136. [In Persian]
- Mohseninia, M. and Salehzadeh, H. 2023b. "Effect of initial soil and curing conditions on tensile strength of sandy soil treated with Persian gum". *J. Transpor. Infrastruct. Eng.*, 9(2): 51-62. [In Persian]
- Mohseninia, M. and Salehzadeh, H. 2024. "Assessment of key factors impacting permeability in treated Firouzkooch siliceous sand and Hormuz carbonate sand using Persian gum biopolymer". *Civ. Infrastruct. Res.* Article in Press. doi: 10.22091/cer.2024.9999.1515
- Mymrin, V. A. and Vázquez-Vaamonde, A. J. 2001. "Red mud of aluminium production waste as basic component of new construction materials". *Waste Manag. Res.*, 19(5): 465-469.
- Niaounakis, M. 2015. "Biopolymers: Applications and trends". William Andrew.
- Pan, Z., Li, D., Yu, J. and Yang, N. 2003. "Properties and microstructure of the hardened alkali-activated red mud-slag cementitious material". *Cement Concrete Res.*, 33(9): 1437-1441.
- Phetchuay, C., Horpibulsuk, S., Suksiripattanapong, C., Chinkulkijniwat, A., Arulrajah, A. and Disfani, M. M. 2014. "Calcium carbide residue: Alkaline activator for clay-fly ash geopolymer". *Constr. Build. Mater.*, 69: 285-294.
- Provis, J. L. and Van Deventer, J. S. J. 2009. "Geopolymers: Structures, processing, properties and industrial applications". Elsevier.
- Rezvani, R., Tutunchian, M. A. and Shahnazari, H. 2020. "Methods for estimating the post-cyclic settlement of Hormuz Island calcareous sand: An experimental study". *Eur. Phys. J. Plus*, 135(3): 273.
- Scrivener, K. L. and Kirkpatrick, R. J. 2008. "Innovation in use and research on cementitious material". *Cement Concrete Res.*, 38(2): 128-136.
- Smitha, S. and Rangaswamy, K. 2020. "Effect of biopolymer treatment on pore pressure response and dynamic properties of silty sand". *J. Mater. Civ. Eng.*, 32(8): 04020217.
- Soldo, A., Miletić, M. and Auad, M. L. 2020. "Biopolymers as a sustainable solution for the enhancement of soil mechanical properties". *Sci. Reports*, 10(1): 267.
- Soldo, A. and Miletić, M. 2022. "Durability against wetting-drying cycles of sustainable biopolymer-treated soil". *Polym.*, 14(19): 4247.
- Sukprasert, S., Hoy, M., Horpibulsuk, S., Arulrajah, A., Rashid, A. S. A. and Nazir, R. 2021. "Fly ash based geopolymer stabilisation of silty clay/blast furnace slag for subgrade applications". *Road Mater. Pavement Design*, 22(2): 357-371.
- Ta'negonbadi, B. and Noorzad, R. 2017. "Stabilization of clayey soil using lignosulfonate". *Transpor. Geotech.*, 12: 45-55.
- Wen, K., Li, Y., Huang, W., Armwood, C., Amini, F. and Li, L. 2019. "Mechanical behaviors of hydrogel-impregnated sand". *Constr. Build. Mater.*, 207: 174-180.
- Zhang, Z. and Tao, M. 2008. "Durability of cement stabilized low plasticity soils". *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 134(2): 203-213.
- Zhang, T., Liu, S., Cai, G. and Puppala, A. J. 2015. "Experimental investigation of thermal and mechanical properties of lignin treated silt". *Eng. Geol.*, 196: 1-11.