

اثر تغییرات دما در خصوصیات تورمی خاک‌های ریزدانه‌ی بهسازی شده با پلیمر سدیم آلزینات در حجم ثابت

محمد بهزادی‌پور (دانشجوی کارشناسی ارشد)

نوید خیاط* (دانشیار)

گروه مهندسی عمران، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

مهندسی عمران شریف، تابستان ۱۴۰۳
دوری ۴۰، شماره ۲، صص. ۲۹-۳۸، (پژوهشی)

بسترهای خاکی مناطق با شرایط اقلیمی گرم و خشک، که تغییرات دمای آنها زیاد است، در زمان بهره‌برداری متحمل سیکل‌های حرارتی متعددی می‌شوند. از طرفی، استفاده از برخی افزودنی‌های صنعتی برای بهبود خصوصیات ژئوتکنیکی خاک، موجب آسیب‌های جدی به محیط زیست می‌شود. در پژوهش حاضر، اثر پلیمر سدیم آلزینات، که جدیداً جهت بهسازی خواص ژئوتکنیکی خاک‌ها به عنوان افزودنی سازگار با محیط زیست پیشنهاد شده است، با درصد‌های وزنی ۵/۰ و ۱۰/۰ و شبیه‌سازی دمای استان خوزستان در دامنه‌ی ۲۳ تا ۴۵ درجه‌ی سانتی‌گراد، بر روی خاک‌های متورم شونده با سنن عمل‌آوری ۱ و ۱۴ روزه بررسی شد. مشاهدات حاکی از تشدید تصاعدی پتانسیل تورم تا ۸۳٪ با تکرار بازه‌های دما و ثابت شدن تغییرات تورمی و یا به اصطلاح پیری تورمی است. همچنین نتایج آنالیز XRD و XRF نمونه‌ها، بیانگر تشکیل کانی پالیکورسکیت است، که خود یکی از عوامل تشدید پتانسیل تورم خاک‌های رسی است، که با استفاده از عکس میکروسکوپ الکترونی روبشی FESEM نیز مشاهده‌پذیر است.

واژگان کلیدی: پتانسیل تورم، خاک‌های رسی، خاک‌های متورم‌شونده، فشار تورم، سدیم آلزینات.

mohammadbehzadipour9@yahoo.com
navid.khayat@iau.ac.ir

۱. مقدمه

خاک‌های متورم‌شونده یا منبسط شونده، گروهی از خاک‌های مسئله‌دار هستند که تغییر حجم آنها در اثر جذب و از دست دادن آب اتفاق می‌افتد. بی‌توجهی به پدیده‌ی اخیر از جمله مشکلاتی است که موجب بروز خسارت‌هایی در حین اجرا و همچنین در زمان بهره‌برداری از سازه‌های عمرانی و هر نوع ساخت و ساز دیگر،^[۱] به ویژه کف سازه‌های آبی و یا روسازی‌ها بوده است. عموماً بالغ بر ۶۰٪ از سازه‌های احداث شده در ساخت‌گاه‌هایی با شرایط مشابه، متحمل خسارت‌های جزئی از قبیل ترک و حدود ۱۰٪ از آنها به شدت آسیب می‌بینند، که دیگر قابل تعمیر نیستند.^[۲] خاک‌های متورم‌شونده در سیستم طبقه‌بندی متحد (USCS)^۱ جزء گروه خاک‌های ریزدانه و معمولاً مخلوطی از کانی‌های رسی و غیررسی هستند، که مشخصات ژئوتکنیکی آن‌ها توسط بخش رسی‌شان کنترل می‌شود. این گروه از خاک‌ها مقدار قابل توجهی کانی مونت‌موریلونیت^۲ دارند، که با جذب آب متورم (آب دولایه) و در اثر خروج آب منقبض می‌شوند.^[۳] کانی‌های مونت‌موریلونیت، که از دو بخش اصلی سیلیکا و گیسیت *

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۲/۳/۱۷، اصلاحیه ۱۴۰۲/۶/۲۵، پذیرش ۱۴۰۲/۷/۱۰.

استاد به این مقاله:

بهزادی‌پور، محمد و خیاط، نوید، ۱۴۰۳. اثر تغییرات دما در خصوصیات تورمی خاک‌های ریزدانه‌ی بهسازی شده با پلیمر سدیم آلزینات در حجم ثابت. مهندسی عمران شریف،

۴۰(۲)، صص. ۲۹-۳۸. DOI:10.24200/J30.2023.62385.3224

پدیده‌ی اخیر بود.^[۹] دانگ^۸ و همکاران (۲۰۱۶)، با افزودن الیاف حاصل از تفاله‌ی نیشکر، کاهش فشار تورم را گزارش دادند.^[۱۰] طبق مشاهده‌ها، عوامل سنتی در مقایسه با روش‌های غیرسنتی نتایج قابل قبول‌تری را نشان داده‌اند، به گونه‌ای که سیمان و آهک در مقایسه با سایر افزودنی‌ها، از جمله الیاف و پلیمرها تأثیر بیشتری را در کاهش پتانسیل تورم داشته‌اند.^[۱۱] اثر تغییرات دما در پتانسیل تورم خاک‌های رسی نیز اتفاقی قابل توجه است. از این رو مطالعاتی در این زمینه انجام گرفته است. ویلار^۹ و همکاران (۲۰۰۴)، با بررسی اثر دما در بنتونیت متراکم شده، کاهش فشار تورم را به عنوان تابعی از دما اعلام کردند.^[۱۲] ترپسی^{۱۰} و همکاران (۲۰۱۵)، با افزایش دما شاهد کاهش فشار تورم برای بنتونیت ۸۰ MX بودند.^[۱۳] باگ^{۱۱} و همکاران (۲۰۱۷)، در یک پژوهش آزمایشگاهی به بررسی اثر دما در فشار تورم در حجم ثابت، یک نمونه‌ی بنتونیت و یک نمونه خاک رس محلی هندوستان پرداختند. آن‌ها افزایش فشار تورم را در هر دو نمونه‌ی خاک با افزایش دما مشاهده کردند.^[۱۴] یی^{۱۲} و همکاران (۲۰۱۳)، نیز همچنین افزایش فشار تورم را با افزایش دما در بنتونیت GMZ^{۰۱} گزارش کردند.^[۱۵] چن^{۱۳} و همکاران (۲۰۱۸)، در یک مطالعه‌ی آزمایشگاهی به بررسی آثار دما در فشار تورم بنتونیت GMZ با غلظت‌های مختلف از NaCl و CaCl₂ پرداختند. آن‌ها در دمای ۲۰ و ۶۰ درجه‌ی سانتی‌گراد، کاهش فشار تورم را با افزایش غلظت محلول رؤیت کردند.^[۱۶] بررسی نتایج حاصل از مطالعات پیشین نشان می‌دهد که اثر دما در خاک‌های رسی متفاوت است. واکنش‌های تبدیلی معمولاً باعث تغییرات مهمی در مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک‌های رسی می‌شود.^[۱۷] طبق بیشتر بررسی‌های انجام شده، خاک‌های رسی که یون سدیم دارند، با افزایش دما دچار تشدید پتانسیل تورم می‌شوند. این در حالی است که یون کلسیم، پتانسیل تورم را با افزایش دما کاهش می‌دهد.^[۱۴] به‌طور کلی تثبیت خاک‌های مسئله‌دار به روش‌های گوناگون و با مصالح مختلفی انجام می‌گیرد. در این میان، فرایند تولید مصالح غیرسنتی از قبیل سیمان و آهک، هر ساله باعث تولید میلیون‌ها تن از آلاینده‌های جانبی، از جمله: گرد و غبار، فلزات سنگین و انتشار گازهای سمی کربنیک در جو شده است، که خطرهای بهداشتی، تنفسی و آلودگی زیست‌محیطی را به دنبال خواهد داشت و منابع طبیعی و انرژی زیادی را مصرف می‌کنند.^[۱۸، ۱۹] براساس نتایج مطالعات به عمل آمده، عمده‌ی آثار منفی زیست‌محیطی در بخش فیزیکی، به ترتیب شامل: آلودگی و فرسایش خاک، آلودگی هوا و آلودگی صوتی و عمده‌ی آثار منفی در بخش بیولوژیکی، به ترتیب زیست‌گاه است.^[۲۰] بنابراین، توسعه‌ی افزودنی‌های سازگار با محیط زیست ضروری است. استفاده از مواد شیمیایی غیرسنتی کم‌کربن، از جمله: رزین‌ها، پلیمرها، و نانوپلیمرها، اخیراً برای بهبود خواص ژئوتکنیک خاک نامطلوب معرفی شده‌اند. از طرفی، جایگزینی تثبیت‌کننده‌های سنتی با پلیمرهای سازگار با محیط زیست به دلیل نیاز به انرژی کمتر برای ساخت این مواد می‌تواند عملیات تثبیت را اقتصادی‌تر کند.^[۲۱، ۲۲] سدیم آلژینات،^{۱۴} که یک بیوپلیمری تجزیه‌پذیر است، به تازگی مورد توجه پژوهشگران جهت تثبیت خصوصیات ژئوتکنیکی خاک‌های مسئله‌دار قرار گرفته است. در این خصوص، چانگرونک پنچ^{۱۵} و همکاران (۲۰۱۷)، به مطالعه بر روی تثبیت بیولوژیک خاک‌های شنی پرداختند و دریافتند که افزایش قابل توجه مقاومت فشاری سطحی با تشکیل سدیم آلژینات بر روی سطح خاک آن بوده است.^[۲۳] یونگ‌ژائو^{۱۶} و همکاران (۲۰۱۹)، با افزودن پلیمر سدیم آلژینات به بدنه‌ی لُس،^{۱۷} اقدام به بهسازی ذرات خاک کردند و دریافتند که سدیم آلژینات نه فقط می‌تواند حدهای روانی و خمیری و دانه‌بندی ذرات لُس را تغییر دهد، بلکه با انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری، تک‌محوری، و سه‌محوری شاهد افزایش استحکام، مقاومت برشی و مقاومت در برابر آب‌شستگی نیز بوده‌اند. در پژوهش حاضر، آنالیزهای SEM و

XRD بیانگر تغییرات ریزساختاری است، که افزودن سدیم آلژینات موجب ایجاد یک ماده‌ی کلوئیدی برای محصور کردن و ایجاد پیوند مابین ذرات خاک شده است.^[۲۴] طرفی و همکاران (۲۰۲۱)، در یک پروژه‌ی پژوهشی، با ترکیب محلول پلیمر سدیم آلژینات با درصد‌های ۰/۲۵، ۰/۷۵، ۱ و ۱/۲۵ به خاک رس با خاصیت خمیری بالا، به بررسی رفتار تورم آزاد نمونه‌ی متراکم‌شده پرداختند. ایشان نمونه‌ی ترکیب‌شده با محلول ۰/۷۵٪ را به عنوان بهترین درصد جهت کاهش خصوصیت تورمی خاک نسبت به نمونه‌ی شاهد تعیین کردند. این اتفاق در حالی بود که سایر نمونه‌ها، متحمل تورمی بیش از نمونه‌ی شاهد بودند.^[۲۵] بخشی‌زاده و همکاران (۲۰۲۲)، نیز در یک پژوهش آزمایشگاهی با اضافه کردن محلول پلیمر سدیم آلژینات با درصد‌های مختلف به خاک رس با شاخص خمیری بالا، اقدام به تثبیت و بررسی تغییرات نمونه‌های بهسازی شده کردند و نتایج حاکی از افزایش مقاومت تک‌محوری خاک بوده است.^[۲۶] مشاهدات میدانی بیانگر این موضوع است که لایه‌های سطحی برخی از نقاط استان خوزستان، از جمله بخش‌هایی از مسجدسلیمان، اغلب دارای نهشته‌های ریزدانه (رسی) هستند. مطالعات مکانیک خاک نشان می‌دهد که خاک‌های ریزدانه، پتانسیل تورم دارند، که تأثیر درجه حرارت بالای منطقه و بالابودن سطح آب زیرزمینی از عوامل مؤثر در تشدید پدیده‌ی تورم خاک است.

در پژوهش حاضر، تغییرات فشار تورم در حجم ثابت با شبیه‌سازی تغییرات دمای هوای استان خوزستان و خاکی با سابقه‌ی وجود کانی پالی‌گورسکیت^{۱۸} ترکیب با پلیمر سدیم آلژینات و در شرایطی غیراسیدی بررسی شده است. در دشت خوزستان، به دلیل بالابودن تراز آب زیرزمینی (در برخی نقاط، ۲ متر زیر تراز زمین طبیعی) تثبیت خاک بستر، یکی از ملزومات اجرای هر پروژه‌ی عمرانی است. از طرفی بالابودن درصد رس موجود در خاک منطقه و استفاده از همین خاک در طراحی سازه‌های خاکی، نظیر: راهسازی و یا مخازن دفن زباله به جهت کاهش هزینه‌های اجرای پروژه، پدیده‌ی تورم یکی از مشکلات قابل پیش‌بینی است. پدیده‌ی تورم در منطقه‌ی خوزستان با ایجاد تغییرات متعدد دما در فصول پاییز و زمستان با بازه‌های دمایی بالا، موجب ایجاد تغییراتی در خصوصیات ژئوتکنیکی سازه‌های خاکی می‌شود. این اتفاق یکی از بزرگ‌ترین مشکلات پیش رو در هنگام گودبرداری سازه‌های منطقه است، که اغلب به دلیل بالابودن فشار آب منفذی، با معضل جوشش در کف گود و در نهایت نشست در اطراف و یا ریزش دیواره‌ی گود همراه است، که در این حالت باید از سازه‌های نگهدارنده نظیر شمع و یا پرده‌ی آب‌بند استفاده کرد. از طرفی، تزریق گل حفار (بنتونیت) برای جلوگیری از ریزش دیواره‌ی شمع در هنگام اجرا، موجب ترکیب خاک با بنتونیت می‌شود، که نتیجه‌ی آن افزایش شاخص خمیری و در نهایت، افزایش فشار تورم خاک است. از روش‌های اجرایی مرسوم برای مهار جوشش آب از کف گود، استفاده از روش تزریق پرفشار یا جت‌گروتینگ^{۱۹} است، که با تزریق دوغاب سیمان و یا آهک در عمق زمین انجام می‌شود. به دلیل آب‌شستگی مواد تزریق‌شده، امکان استفاده از هر ماده‌ای جهت تثبیت خاک وجود ندارد. از این رو، پلیمر سدیم آلژینات به دلیل تشکیل بافت کلوئیدی به دور ذرات خاک، در مقابل آب‌شستگی مقاوم است، که می‌توان از آن به عنوان یک ماده‌ی زیست‌محیطی تخریب‌پذیر جهت بهسازی خاک استفاده کرد.

۲. مواد و روش‌های انجام آزمایش

۱.۲. خاک مورد آزمایش

برای انجام آزمایش، از یک نمونه خاک رس تهیه شده از معدنی در شهر مسجدسلیمان

جدول ۱. درصد ترکیب‌های شیمیایی خاک مورد آزمایش.

ترکیب	درصد وزنی
SiO _۲	۵۵٫۰۸
Al _۲ O _۳	۱۱٫۶۱
Fe _۲ O _۳	۲٫۶۳
CaO	۹٫۵۷
Na _۲ O	۱٫۶۸
MgO	۳٫۶۹
K _۲ O	۱٫۲۳
TiO _۲	۰٫۳۲
MnO	۰٫۰۴
P _۲ O _۵	۰٫۰۷
L.O.I.	۱۴٫۰۸
مجموع ترکیب‌ها	
	۱۰۰

جدول ۲. درصد ترکیب‌های شیمیایی پلیمر سدیم آلزینات.

ترکیب	درصد وزنی
Fe _۲ O _۳	۰٫۴۶
CaO	۰٫۷۵
Na _۲ O	۱۲٫۰۷
K _۲ O	۰٫۰۱
TiO _۲	۰٫۰۲
MnO	۰٫۰۱
P _۲ O _۵	۰٫۰۵
L.O.I.	۸۶٫۶۴
مجموع ترکیب‌ها	
	۱۰۰

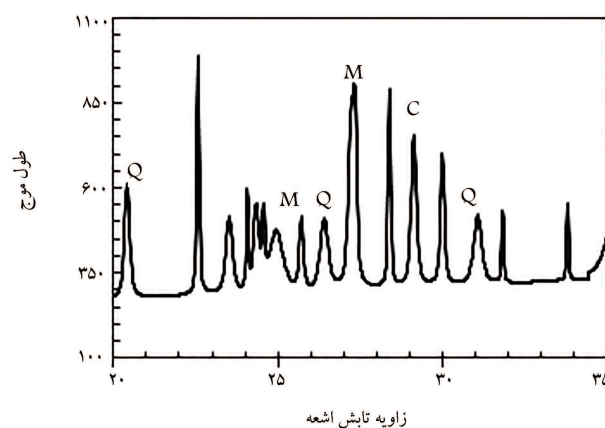
بودن و همچنین خاصیت تجزیه‌پذیری، بسیار به آن توجه شده است.^[۲۷] پلیمر استفاده شده، که به صورت پودری با سایز ذرات نانو است، بعد از ریختن درون همزن مغناطیسی و ترکیب با آب مقطر به یک محلول با ویسکوزیته‌ی بالاتر از آب تبدیل شد. در پژوهش حاضر، محلول اخیر با درصد‌های وزنی ۱ و ۵/۱ به مقدار رطوبت بهینه با خاک مخلوط شد. طبق مشاهدات به عمل آمده استفاده از ماده‌ی مذکور به دلیل ویسکوزیته‌ی بالا در درصد‌های بیشتر از ۱، از نظر اجرایی و در احجام بالا به عنوان رطوبت بهینه، کاری بسیار دشوار است، که نه به روش ترکیب و نه به روش تزریق قابل اجرا نیست.

۳.۲. آب

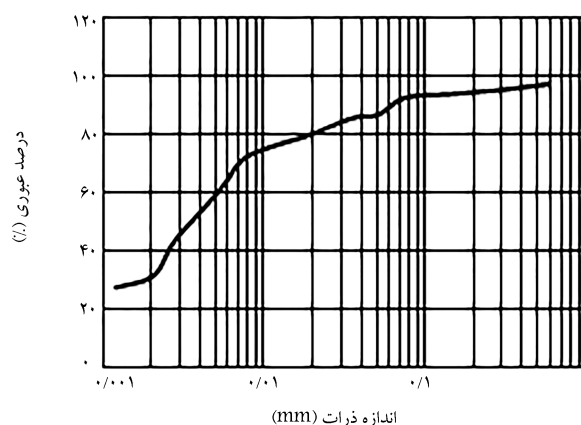
ترکیب شیمیایی آب استفاده شده جهت انجام آزمایش، در مقدار تغییر حجم و پتانسیل تورمی مؤثر است. لذا در پژوهش حاضر، جهت حذف آثار شیمیایی آب در نمونه‌ها در کلیه اقدام‌های صورت گرفته از جمله آزمون‌های شناسایی و تهیه‌ی محلول پلیمر از آب مقطر استفاده شده است.

۴.۲. متد C استاندارد ۹۶ – ASTM ۴۵۴۶

در آزمایش تورم با حجم ثابت (متد C استاندارد ASTM)، که به نام آزمایش تعیین فشار تورم نیز موسوم است. روش کار به این گونه است که نمونه در دستگاه ادنومتر



شکل ۱. آنالیز پراش اشعه‌ی پرتو ایکس بنتونیت با زاویه‌ی تابش ۲θ (M: مونت موریلونیت؛ Q: کوآرتز؛ C: کلسیت).



شکل ۲. نمودار دانه‌بندی خاک پایه.

واقع در شمال شرقی استان خوزستان، که به عنوان مناسب‌ترین معدن قرضه جهت تأمین ریزدانه‌ی پروژه‌های عمرانی است، استفاده شده است. خاک مورد آزمایش، دارای حد روانی ۳۸، حد خمیری ۲۴ و شاخص خمیری ۱۴ بوده است، که به دلیل نیاز به خاک با شاخص خمیری بالا، با افزودن ۲۵٪ بنتونیت، پارامتر حد خمیری به ۴۲ رسید. بنتونیت مصرفی در پژوهش حاضر، به رنگ سفید روشن بود، که جزء دسته‌ی بنتونیت‌های دارای یون سدیم است. آنالیز پراش اشعه‌ی ایکس بنتونیت ذکر شده در شکل ۱ مشاهده می‌شود.

خاک پایه‌ی استفاده شده در آزمایش حاضر، ترکیبی از خاک رس و بنتونیت؛ به نسبت ۳ به ۱ (۷۵٪ رس + ۲۵٪ بنتونیت) با وزن مخصوص $1/47 \text{ gr/cm}^3$ بوده است، که با توجه به سیستم طبقه‌بندی متحد، در دسته‌ی خاک‌های رسی با شاخص خمیری بالا (CH) قرار گرفت. نتایج آزمایش دانه‌بندی (هیدرومتری) و آنالیز ساختاری خاک پایه در شکل ۲ و جدول ۱ ارائه شده است.

۲.۲. پلیمر

پلیمر استفاده شده در پژوهش حاضر، پودری سفیدرنگ و بدون بو به نام سدیم آلزینات (آلزینیک اسید سدیم سالت) و یک پلی ساکراید با فرمول شیمیایی $(C_6H_7O_6Na)_n$ بوده است، که آنالیز شیمیایی آن در جدول ۲ ارائه شده است. پلیمر سدیم آلزینات از جلبک‌های دریایی قهوه‌ای رنگ، که در سواحل شمالی آتلانتیکا، آسیا و آمریکای شمالی رشد می‌کند، به دست می‌آید؛ که به دلیل خاصیت بیوپلیمری و ارزان قیمت

قرار می‌گیرد و سربار کوچکی بر آن اعمال می‌شود. سپس نمونه در معرض آب قرار داده می‌شود و در اثر جذب آب تمایل به متورم شدن پیدا می‌کند، که به محض ایجاد تورم، سربار به مقداری افزایش پیدا می‌کند تا از تورم آن جلوگیری شود. این کار تا زمان پایان تورم و رسیدن به حالت تعادل ادامه می‌یابد و به این ترتیب فشار تورم در حجم ثابت اندازه‌گیری می‌شود.

۵.۲. مراحل تهیه‌ی نمونه و آزمایش‌های انجام گرفته

برای بررسی فشار تورم خاک رس با تغییرات دما، می‌توان از دستگاه ادئومتر اصلاح شده جهت انجام آزمایش استفاده کرد. روش معمول، اندازه‌گیری تورم با حجم ثابت است. در پژوهش حاضر، جهت بررسی اثر دما، بخشی با قابلیت تنظیم دما و ثبت داده‌ها به دستگاه اضافه شد؛ که در ادامه، به معرفی بیشتر جزئیات آن اشاره شده است. در پژوهش حاضر، خاک رس با درصد‌های مشخصی از محلول پلیمر به عنوان رطوبت بهینه (مشابه روش آماده‌سازی نمونه جهت انجام آزمون تراکم استاندارد) میکس و به مدت ۲۴ ساعت درون سه لایه پلاستیک قرار داده شد. دلیل این کار، سرعت پایین جذب رطوبت توسط کانی‌های رسی و جلوگیری از تبخیر آب است. این تذکر لازم است که استفاده از روش مذکور جهت ترکیب محلول پلیمر به عنوان رطوبت بهینه با خاک به دلیل ویسکوزیته‌ی بالای ماده‌ی مذکور، منطقی‌ترین روش برای ایجاد یک نمونه‌ی همگن است. در ادامه، خاک آزمایش شده مطابق شکل ۳ به مدت ۳۰ دقیقه تحت فشار استاتیکی متراکم شد.

سپس خاک متراکم شده با استفاده از یک جک هیدرولیک و بدون وارد کردن ضربه از درون قالب تراکم خارج و مشابه شکل ۴ - الف نمونه‌ها با سنین ۱ و ۱۴ روزه برداشت و در موعد مقرر آزمایش شدند. به جهت استفاده از نمونه‌ی متراکم شده برای انجام آزمایش فشار تورم، مشابه شکل ۴ - ب، رینگ دستگاه ادئومتر با دقت و به آرامی درون نمونه فرو رفت و با کاردک سطح آن پرداخت و آماده‌ی



شکل ۳. دستگاه تراکم استاتیکی.



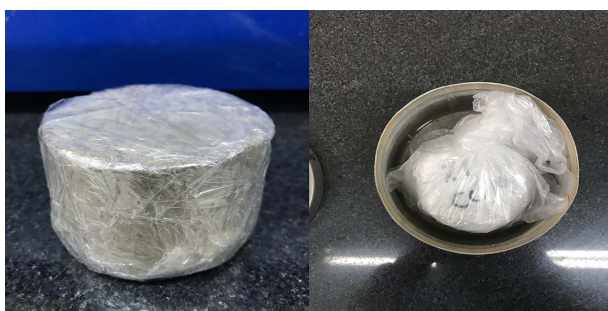
شکل ۴. نمونه‌ی متراکم شده‌ی خارج شده از دستگاه تراکم استاتیکی.

آزمایش شد (شکل ۴ - پ).

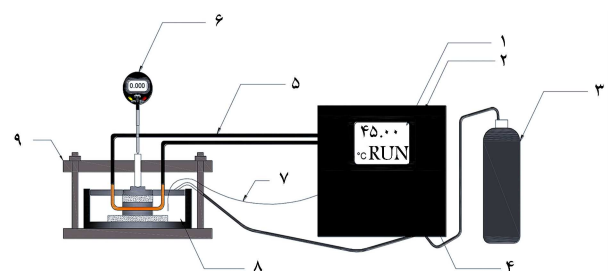
در آزمایش حاضر، به دلیل اهمیت بالای میزان رطوبت اولیه‌ی نمونه در لحظه‌ی شروع آزمایش تورم و به منظور بالا بردن هر چه بیشتر دقت و جلوگیری از تبخیر آب، نمونه‌های ۱۴ روزه بعد از تراکم درون سه لایه پلاستیک کاملاً عایق شدند و مطابق شکل ۵، درون یک ظرف دربسته‌ی غوطه‌ور در آب قرار گرفتند.

۶.۲. دستگاه ادئومتر اصلاح شده

دستگاه ادئومتر اصلاح شده از نوع دستگاه تحکیم مرسوم (بارگذاری از جلو) با قابلیت اعمال تغییرات دما است. کلیه‌ی اجزاء دیگر دستگاه تحکیم مطابق با استانداردهای جهانی است. در شکل ۶، نمایی از سیستم اعمال دمای نصب شده روی دستگاه تحکیم مشاهده می‌شود. دستگاه استفاده شده در آزمایش حاضر، به صورت خودکار عمل کرده و بعد از پایان هر گام طبق برنامه‌ی از پیش تعریف شده، وارد مرحله‌ی بعد شده است. در هنگام تعریف گام‌ها، کاربر دمای هدف و مدت زمانی را که باید دستگاه خود را به آن دما برساند، برای نرم‌افزار تعریف می‌کند. سپس مدت زمان آزمون مشخص می‌شود، که بسته به نوع آزمون متفاوت است. در طول مدت آزمایش، دمای درون سلول از طریق یک ترموکوپل به یک ترموستات دیجیتال منتقل می‌شود، که در صورت هرگونه تغییر در دمای موردنظر، فرمان تنظیم مجدد دما توسط نرم‌افزار صادر می‌شود. به منظور جلوگیری از کاهش آب در اثر تبخیر در طول مدت آزمایش، پمپ تعبیه‌شده درون دستگاه طبق زمان‌بندی تعریف شده، مقدار مشخصی آب را درون سلول تزریق می‌کند. در زمان انجام آزمایش، کلیه‌ی تغییرات ارتفاع نمونه از قبیل افزایش و یا کاهش حجم به وسیله‌ی یک ساعت اندیکاتور دیجیتال با دقت ۰/۰۰۱ میلی‌متر ثبت و ذخیره شده است.



شکل ۵. شرایط نگهداری نمونه‌ی ۱۴ روزه.



شکل ۶. سیستم اعمال دما نصب شده روی دستگاه تحکیم؛ ۱. ترموستات دیجیتال؛ ۲. دستگاه اعمال تغییرات دما؛ ۳. مخزن آب جهت تزریق در حین انجام آزمون؛ ۴. پمپ آب جهت تزریق از مخزن به سلول؛ ۵. لوله‌های سیرکولاتور متصل به سیستم اعمال دما؛ ۶. ساعت اندیکاتور؛ ۷. حسگر تغییر دما (ترموکوپل)؛ ۸. سلول دستگاه تحکیم؛ ۹. دستگاه تحکیم با خصوصیت بارگذاری از جلو.



شکل ۷. بارگذاری تدریجی با ماسه.

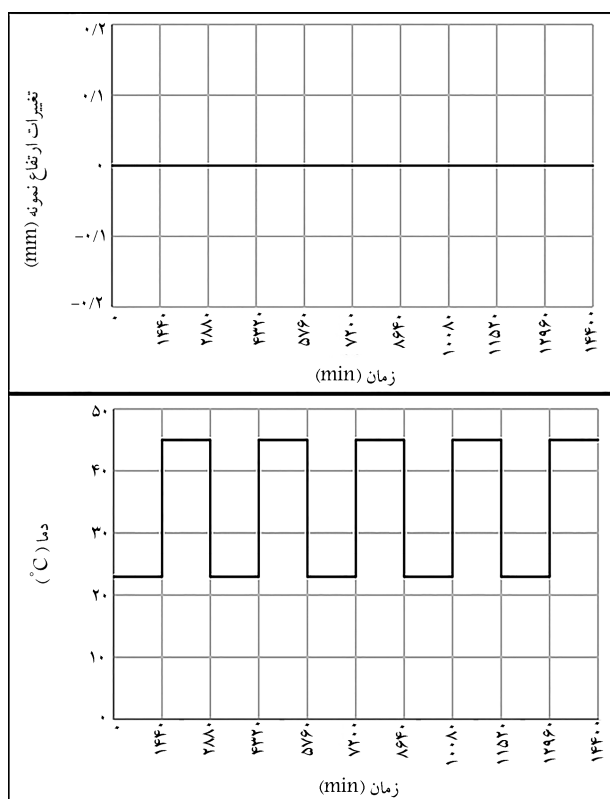
۷.۲. روند انجام آزمایش فشار تورم

بعد از قرار دادن نمونه درون دستگاه ادئومتر و غرقاب کردن با آب مقطر، نمونه در دمای ۲۳ درجه‌ی سانتی‌گراد شروع به تورم کرد. با شروع تورم، بارگذاری به گونه‌ای انجام شد که در تمام مدت آزمایش، نمونه در حجم اولیه (ارتفاع اولیه‌ی نمونه) باقی ماند. به‌منظور بالا بردن دقت آزمایش و خشنی‌کردن فشار تورم ایجاد شده، از روش بارگذاری تدریجی مطابق شکل ۷ استفاده شده است.

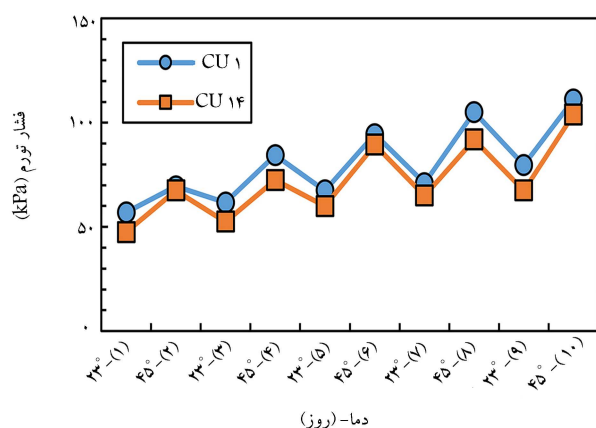
در روش اخیر، به محض جذب آب و ایجاد تورم در نمونه با اضافه کردن مقدار اندکی ماسه به‌عنوان وزنه، تغییر حجم ایجاد شده خشنی شد. این فرایند تا ۲۴ ساعت ادامه پیدا کرد و سپس دستگاه وارد گام دمایی جدید (۴۵ درجه) شد، که جهت شبیه‌سازی هر چه بیشتر تغییرات دما، این اتفاق در بازه‌ی زمانی ۱۸۰ دقیقه اعمال و کلیه‌ی مراحل خشنی کردن فشار تورم همانند گام قبل انجام شد. دلیل انتخاب گام‌های ۲۴ ساعته، رساندن نمونه به حالت تعادل در هر گام است. منظور از حالت تعادل، رسیدن به شرایطی است که نمونه از تمام پتانسیل موجود برای ایجاد تغییرات در خود استفاده کرده باشد. در آزمایش حاضر، به سربار نهایی وارد شده به نمونه در هر گام، فشار تورم اطلاق می‌شود. این تغییرات دما با زمان‌های ۲۴ ساعت به مدت ۱۰ روز و در حجم ثابت بررسی شده است. بنابراین، تمام نمونه‌ها در شرایط تهیه‌ی ذکر شده و تغییرات فشار تورم آنها در طول مدت آزمایش بررسی شد. در پژوهش حاضر، برای رسیدن به فشار تورم نهایی دقیق پس از نصب محفظه‌ی بارگذاری، دستگاه به گونه‌ی کالیبراسیون شد که قبل از اعمال بار با افزودن ماسه، هیچ‌گونه فشاری از جانب محفظه به نمونه وارد نشود. روند تعریف‌شده‌ی نرم‌افزار جهت تغییرات دما و تغییر ارتفاع نمونه در شکل ۸ مشاهده می‌شود. این تذکر لازم است که در زمان بررسی فشار تورم در حجم ثابت، باید دقت زیادی درخصوص اعمال بار به نمونه صورت گیرد. لذا، طبق مشاهده‌های به‌عمل آمده در زمان انجام آزمایش، در صورت ایجاد تورم در خاک و خروج از حالت حجم اولیه، باید فشاری چند برابر فشار واقعی جهت خشنی کردن تورم ایجاد شده به نمونه وارد کرد و در غیر این صورت، زمانی طولانی جهت بازگشت به حجم اولیه نیاز است. در واقع می‌توان تورم را نقطه‌ی مقابل تحکیم دانست، که طبق تعریف فرایندی زمان‌بر است.

۳. نتایج آزمایش‌های انجام گرفته

نتایج حاصل از بررسی فشار تورم نمونه‌های با سنین عمل‌آوری ۱ و ۱۴ روزه، در



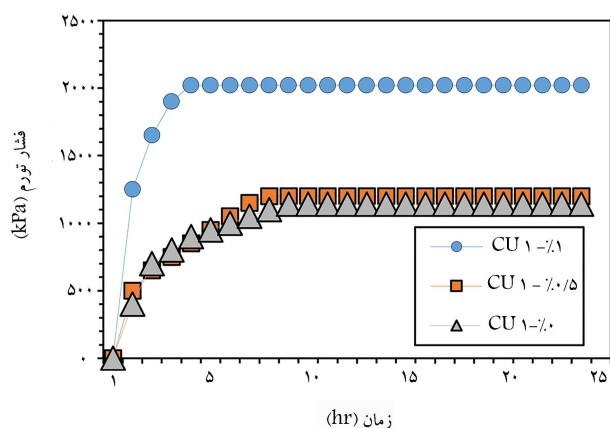
شکل ۸. روند تغییرات دما و گنج تغییر شکل.



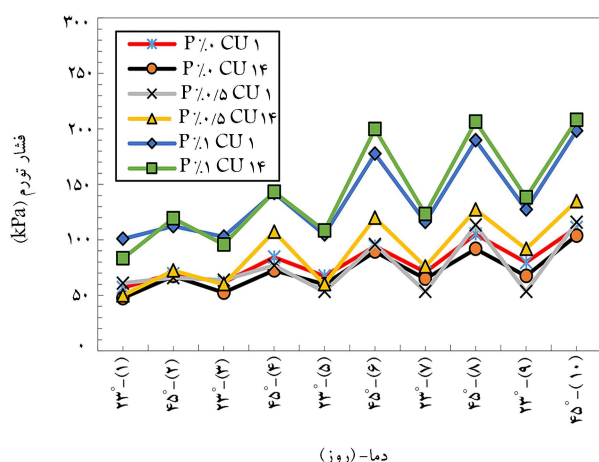
شکل ۹. تغییرات فشار تورم خاک پایه در زمان‌های عمل‌آوری ۱ و ۱۴ روزه.

شکل‌های ۹ تا ۱۱ مشاهده می‌شود. در پژوهش حاضر، حرف P نماد پلیمر و CU ۲۰ نماد زمان عمل‌آوری است. مطابق شکل ۹، فشار تورم نمونه‌ی ۱۴ روزه در تمامی گام‌های آزمایش به طور میانگین ۱۱٪ پایین‌تر از نمودار نمونه‌ی ۱ روزه بوده است. این اتفاق بیانگر کاهش پتانسیل تورم خاک‌های دارای سدیم در گذر زمان است، که طبق مطالعات به عمل آمده، در مطالعات سایر پژوهشگران در این زمینه نیز گزارش شده است.^[۲۸]

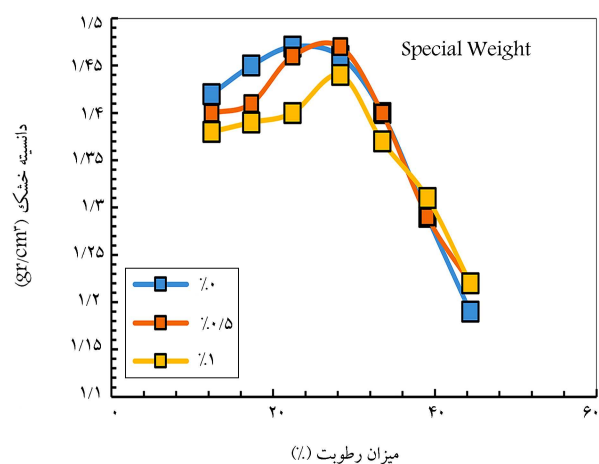
طبق پیش‌بینی و مشاهده‌ی نمودار فشار تورم خاک پایه، نمونه با زمان عمل‌آوری ۱۴ روزه ترکیب شده با محلول ۵٪ از پلیمر سدیم آلزینات، فشار تورم کمتری در حدود ۱۸٪ را نسبت به نمونه‌ی ۱ روزه در گام اول از خود نشان داد (شکل ۱۰). این در حالی است که در گام بعدی با بالا رفتن دما، پتانسیل تورم به گونه‌ای افزایش یافته است که نمودار فشار تورم تا پایان مدت آزمایش به طور میانگین ۲۵٪ بالاتر از نمونه‌ی ۱ روزه بوده است.



شکل ۱۲. مقایسه‌ی نمودار سرعت ایجاد تورم نمونه‌های ۱ روزه.

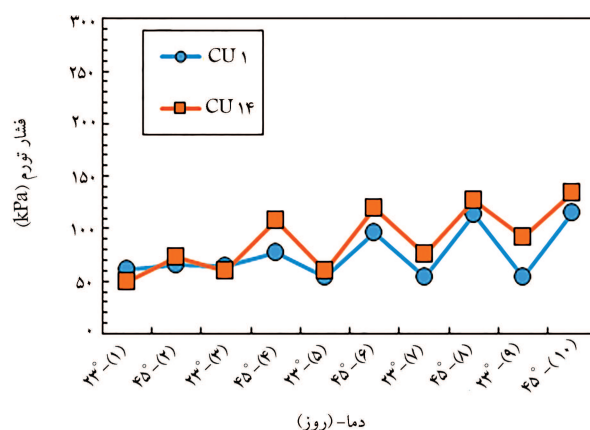


شکل ۱۳. مقایسه‌ی نمودار فشار تورم نمونه‌ها.

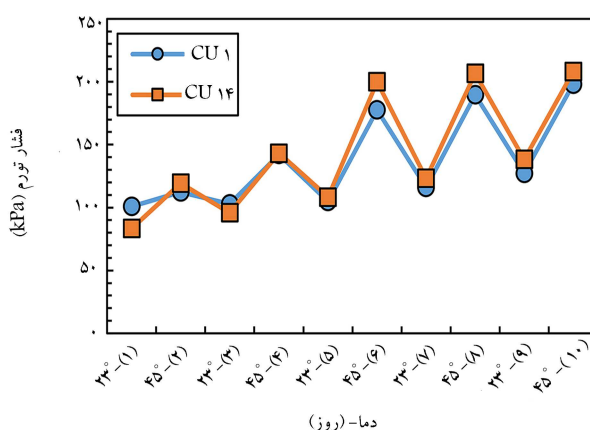


شکل ۱۴. تغییرات دانسیته و میزان رطوبت.

شده است. در واقع می‌توان ادعا کرد که افزودن پلیمر سدیم آلزینات با غلظت ۰/۵٪ تغییر چشمگیری در پتانسیل تورم خاک و وزن مخصوص آن به نسبت نمونه‌ی شاهد ایجاد نکرده است (شکل ۱۴). ولی همان‌طور که مشهود است، بالا رفتن فشار تورم با افزودن پلیمر با غلظت ۱٪ در هر دو سن به گونه‌ای چشمگیر است که به‌طور میانگین موجب بالا رفتن ۸۳٪ فشار تورم نسبت به نمونه‌ی خاک پایه شده است. دلیل پدیده‌ی مذکور را می‌توان افزایش چشمگیر یون سدیم در محیط دانست، که با



شکل ۱۵. تغییرات فشار تورم ترکیب ۰/۵٪ در زمان‌های عمل‌آوری ۱ و ۱۴ روز.



شکل ۱۶. تغییرات فشار تورم ترکیب ۱٪ در زمان‌های عمل‌آوری ۱ و ۱۴ روزه.

براساس نتایج ارائه شده، نمودار فشار تورم خاک ترکیب شده با پلیمر ۱٪ در شکل ۱۱، همانند غلظت ۰/۵٪، فشار تورم نمونه‌ی ۱۴ روزه در روز اول تقریباً ۱۷٪ کمتر از فشار تورم ایجاد شده در نمونه‌ی ۱ روزه بوده است. همچنین با افزایش دما، نمونه‌ی ۱٪ رفتاری مشابه نمونه‌ی ۰/۵٪ از خود نشان داده و موجب بالا رفتن ۵٪ پتانسیل تورم با زمان عمل‌آوری ۱۴ روزه شده است. طبق مشاهدات انجام گرفته، سرعت بالا رفتن فشار تورم در نمونه‌ی خاک ترکیب‌شده با محلول پلیمر با غلظت ۱٪ در هر دو سن عمل‌آوری، بیش از سایر نمونه‌ها بوده است. این اتفاق در هر گام تغییر دما، مطابق شکل ۱۲، موجب رسیدن به فشار تورم نهایی در ساعت‌های اولیه‌ی شروع آزمایش شده است.

۱.۳. خلاصه‌ی نتایج فشار تورم

در شکل ۱۳، نتایج کلیه‌ی آزمایش‌های انجام گرفته به صورت خلاصه شده جمع‌آوری شده است. طبق مشاهدات انجام گرفته، مقدار فشار تورم خاک پایه بعد از ترکیب با محلول پلیمر به‌عنوان رطوبت همیشه دچار تغییرات قابل ملاحظه‌ای شده است. طبق روال تعریف شده، فشار تورم تمامی نمونه‌ها در ۱۰ روز با تغییر بازه‌های دما مشابه شکل ۸ و در حجم ثابت اندازه‌گیری شد. در مطالعات پیشین، افزایش فشار تورم با بالا رفتن دما گزارش شده است.^[۱۶] همان‌طور که در نتایج به‌عمل آمده مشاهده می‌شود، آزمایش‌های انجام گرفته بر روی خاک پایه، نمونه‌ی ۱۴ روزه فشار تورم کمتری نسبت به نمونه‌ی ۱ روزه داشته است. این اتفاق در غلظت ۰/۵٪ موجب افزایش بازه‌های تورم با تغییرات دما در نمونه‌ی ۱۴ روزه به نسبت نمونه‌ی ۱ روزه

آلژینات به خاک رس موجب افزایش تجمع محصولات معلق با ماهیت ژلاتینی بر روی سطح ذرات رس می‌شود، که این امر باعث بالارفتن حدود اتربرگ خاک می‌شود.

از طرفی محیط‌هایی غیراسیدی با سابقه‌ی وجود کانی پالی‌گورسکیت به دلیل عدم انحلال منیزیم و سیلیس موجود در خاک، مستعد تشکیل و پدیدار شدن مجدد این کانی با فرمول شیمیایی $2H_2O + 2H_2O + [Si_2O_5]_n(OH)_m(MgAl)_n$ هستند. درواقع، رابطه‌ی مستقیمی بین PH و تشکیل پالی‌گورسکیت وجود دارد. [۳۱] نتایج حاصل از آزمون اسیدیته‌ی خاک، که به روش عصاره‌گیری انجام شد، در جدول ۵ ارائه شده است.

کانی پالی‌گورسکیت، ظاهری میکروفیبری دارد و به دلیل بالا بودن بار سطحی و آزاد کردن منیزیم در محیط موجب کاهش پایداری، افزایش بار سطحی، [۳۲] و در نهایت تشدید قدرت جذب کانی‌های رسی می‌شود. این کانی با استفاده از آنالیز پراش اشعه‌ی پرتو ایکس (شکل ۱۶) در تمامی نمونه‌ها شناسایی شده است، که با استفاده از عکس میکروسکوپ الکترونی روبشی در شکل ۱۷ مشاهده می‌شود، اما به دلیل حالت فیزیکی پلیمر و ایجاد یک بافت کلونیدی به دور ذرات رس، فقط در نمونه‌ی خاک پایه مشاهده می‌شود. تصاویر میکروسکوپی از نمونه‌های رسی بعد از ترکیب با پلیمر سدیم آلژینات نشان می‌دهند که افزودنی اخیر با پوشاندن کانی‌های رسی و افزایش ظرفیت جذب نمونه‌ها، امکان افزایش پتانسیل تورم را فراهم می‌آورد. در پژوهش حاضر، مشاهده‌های آنالیز ساختاری موجود در جدول ۶، بیانگر ایجاد تغییرات در ترکیب‌های شیمیایی و تحریک واکنش‌های تبدیلی در نمونه‌هاست. واکنش‌های تبدیلی معمولاً باعث تغییرات مهمی در مشخصات فیزیکی و شیمیایی رس می‌شوند. [۱۷] در واکنش تبدیلی مذکور، یون‌های بین‌لایه‌ی رسی، مانند سدیم با یون‌کلسیم خاک جایگزین و باعث افزایش تمایل ذرات خاک به جذب آب و در نهایت، باعث افزایش ضخامت آب دولایه می‌شود.

جدول ۵. اسیدیته‌ی مصالح استفاده شده.

خاک پایه	ترکیب ۱٪	ترکیب ۰٫۵٪	آب مقطر
۱۰	۸	۹	۷

جدول ۶. آنالیز ساختاری و ترکیب‌های شیمیایی نمونه‌ها.

نمونه	خاک پایه	P%۰٫۵CU ۱۴	P%۰٫۱CU ۱۴	P%۱CU ۱۴
Na ₂ O	۲۰٫۴	۲۲٫۵۵	۲۷٫۵۵	۲۷٫۴۴
SO _۲	< ۰٫۰۱	< ۰٫۰۱	< ۰٫۰۱	< ۰٫۰۱
Fe _۲ O _۳	۲٫۸	۲٫۸	۲٫۸	۲٫۸
MgO	۳٫۹	۴٫۱	۴٫۱	۴٫۱
Cl	< ۰٫۰۱	< ۰٫۰۱	< ۰٫۰۱	< ۰٫۰۱
SrO	۰٫۱	۰٫۱	۰٫۱	۰٫۱
Al _۲ O _۳	۸	۸٫۵	۸٫۵	۸٫۵
K _۲ O	۲٫۲	۲٫۲	۲٫۳	۲٫۲
L.O.I.	۱۲٫۴	۱۰٫۴	۵٫۱	۵٫۲
SiO _۲	۳۵٫۲	۳۴٫۹	۳۴٫۲	۳۴٫۷
CaO	۱۴٫۰۶	۱۳٫۹	۱۴٫۹	۲٫۲
La&Lu	< ۰٫۰۱	< ۰٫۰۱	< ۰٫۰۱	< ۰٫۰۱
P _۲ O _۵	< ۰٫۰۱	< ۰٫۰۱	< ۰٫۰۱	< ۰٫۰۱

افزایش دما موجب بالا رفتن فشار آب منفذی، فشار هیدراتاسیون، فشار اسمزی، [۲۹] افزایش انرژی حرارتی و انتشار یون‌ها و همچنین ضخامت آب دولایه شده است، که در نهایت پتانسیل تورم را افزایش داده است. [۱۶] این در حالی است که افزودن سدیم آلژینات با غلظت ۱٪، موجب کاهش و افزایش رطوبت بهینه‌ی خاک شده است، که نتایج آن در جدول ۳ ارائه شده است.

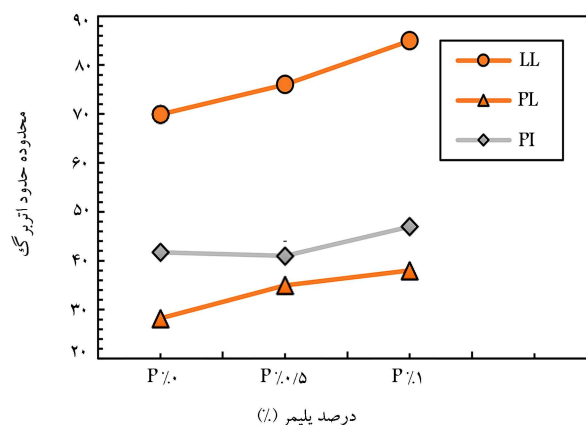
طبق مشاهده‌ها و نتایج به‌دست آمده، فشار تورم در نمونه‌های با غلظت‌های مختلف پلیمر در سنین ۱۴ روزه تفاوت زیادی با نمونه‌های ۱ روزه نداشته است، به گونه‌ای که بعد از ۳ گام، فشار تورم تمامی غلظت‌ها، در هر دو سن عمل‌آوری تقریباً مشابه گام هم‌دمای قبلی بوده است. در واقع، نمونه‌ها از کلیه‌ی پتانسیل موجود جهت ایجاد جذب آب استفاده کرده‌اند و دیگر عامل تحریک‌کننده‌ای برای تورم بیشتر وجود نداشته است. کلاً گفته می‌شود که اثر دما در فشار تورم خاک‌های رسی به دلیل حضور کاتیون‌های تعویض‌پذیر در مجتمع‌های تبدیلی بین کانی‌هاست. از این رو، خاک‌های دارای سدیم با بالارفتن دما دچار افزایش فشار تورم می‌شوند. همان‌طور که در آنالیز ساختاری نمونه‌ها مشهود است، در پژوهش حاضر، اضافه کردن سدیم آلژینات به خاک رس باعث تشدید یون‌سدیم در محیط شده است. هنگامی که سدیم در محیط موجود باشد، پوششی از یون‌های معلق بر روی سطح ذرات رس تشکیل می‌شود. [۳۰] این ترکیب با بالا رفتن میزان سدیم موجود در خاک باعث افزایش خواص خمیری خاک ترکیب‌شده با پلیمر ۱٪ شده است (جدول ۴ و شکل ۱۵)، که در نهایت موجب افزایش پتانسیل تورم با بالا رفتن دما شده است. [۱۶، ۱۴] در واقع، افزودن محلول پلیمر سدیم

جدول ۳. تغییرات دانسیته و رطوبت بهینه.

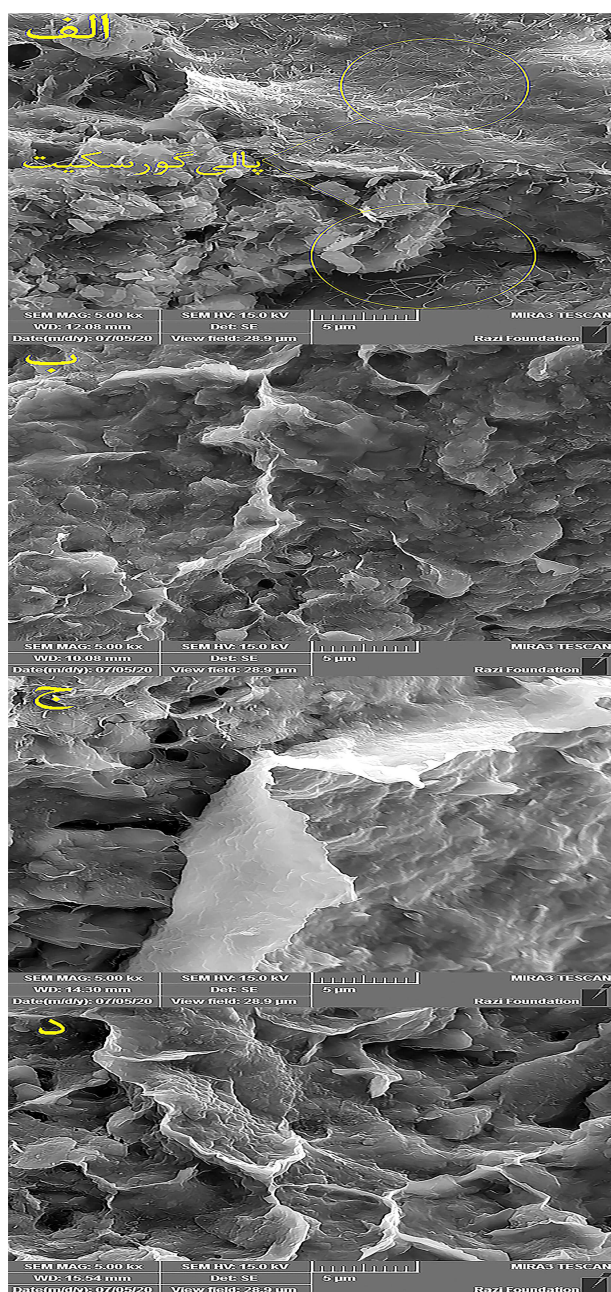
نمونه	$\omega_{opt}(\%)$	$\rho(g/cm^3)$
خاک پایه	۲۵	۱٫۴۷
ترکیب ۰٫۵٪	۲۷	۱٫۴۷
ترکیب ۱٪	۲۸	۱٫۴۴

جدول ۴. تغییرات حدود اتربرگ نمونه‌ها.

نمونه	حد خمیری (PL)	حد روانی (LL)	نشانه‌ی خمیری (PI)
خاک پایه	۲۸	۷۰	۴۲
ترکیب ۰٫۵٪	۳۵	۷۷	۴۲
ترکیب ۱٪	۳۸	۸۵	۴۷



شکل ۱۵. نمودار تغییرات حدود اتربرگ.



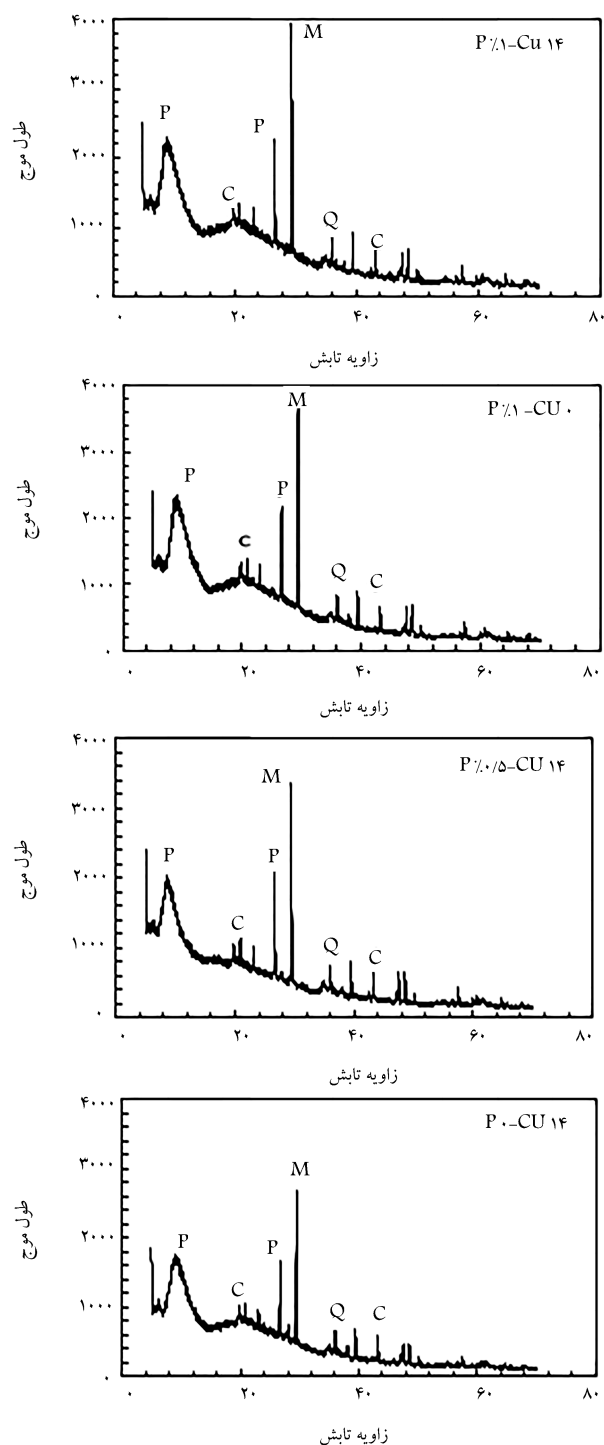
الف) خاک پایه؛ ب) ترکیب $CU\ 0.5\%$ ؛ ج) ترکیب $CU\ 1\%$ ؛ د) ترکیب $CU\ 1\%$.

شکل ۱۷. نمای میکروسکوپی FESEM نمونه‌های آزمایشی.

۲. طبق مشاهده‌های به عمل آمده، خاک‌های متورم‌شونده دارای یون غالب سدیم در گذر زمان و به شرط نبود عامل تحریک‌کننده، دچار روند یکپارختی در فشار تورم می‌شوند؛

۳. بالا رفتن دمای خاک باعث افزایش انرژی حرارتی کانی‌های رسی می‌شود، که در صورت وجود سدیم در محیط، موجب تحریک پتانسیل تورم و درنهایت افزایش قدرت جذب کانی‌های رسی خاک می‌شود؛

۴. کانی پالی‌گورسکیت، ماهیتی سمنتاسیون مانند دارد، که در صورت فراهم بودن شرایط و غیراسیدی بودن محیط، قابلیت تشکیل مجدد را دارد. کانی پالی‌گورسکیت



شکل ۱۶. آنالیز پراش اشعه‌ی پرتو ایکس با زاویه‌ی تابش 2θ (P): پالی‌گورسکیت؛ M: مونت موریلونیت؛ Q: کوآرتز؛ و C: کلسیت.

۴. نتیجه‌گیری

۱. افزودن پلیمر سدیم آلزینات، به خاک رس باعث افزایش محصولات معلق بر روی سطح ذرات رس و نیز موجب بالا رفتن حدروانی و نشانه‌ی خمیری خاک شده است. این اتفاق درنهایت باعث تحریک و تقویت پتانسیل تورم خاک‌های رسی تا ۸۳٪ شده است؛

۶. جهت استفاده از پلیمر سدیم آلزینات برای بهسازی خصوصیات ژئوتکنیکی خاک‌ها با شاخص خمیری بالا در مناطقی با اقلیم گرمسیری مشابه استان خوزستان، در صورت امکان ورود آب به منطقه‌ی موردنظر، باید انتظار ایجاد پدیده‌ی تورم در خاک را داشت و از روش‌های لازم جهت جلوگیری از ایجاد خسارت و یا تخریب سازه استفاده و یا انجام این فعالیت را به فصول سرد سال موکول کرد.

بدیهی است زمان تحکیم بسترهایی که تورم آنها به پایان رسیده است، طولانی‌تر است و باید در آن‌ها انتظار نشست‌ی بیش از حالت عادی را داشت.

با افزایش بار سطحی ذرات رس، موجب بالا رفتن قدرت جذب کانی‌های رسی می‌شود؛

۵. خاک‌های متورم‌شونده با قرارگرفتن در معرض رطوبت، بسته به میزان پتانسیل و عوامل تحریک‌کننده از خود افزایش حجم نشان می‌دهند. به زبان ساده می‌توان گفت که هر خاکی قادر به ایجاد میزان مشخصی فشار تورم است و بعد از رسیدن به فشار تورم نهایی در صورت نبود عامل تحریک‌کننده، دیگر قادر به افزایش حجم نیست؛

پانویس‌ها

1. Unified Soil Classification System (USDS)
2. Montmorillonite
3. Octahedral
4. Tetrahedral
5. Leroy
6. Al-Rawas
7. Nalbantoğlu
8. Dang
9. Villar
10. Tripathy
11. Bag
12. Ye
13. Chen
14. Sodium Alginate
15. Chengrong Peng
16. Yong Zhao
17. Loess
18. Palygorskite
19. Jet-Grouting
20. Cureing

منابع (References)

1. Unified Soil Classification System (USDS)
2. Montmorillonite
3. Octahedral
4. Tetrahedral
5. Leroy
6. Al-Rawas
7. Nalbantoğlu
8. Dang
9. Villar
10. Tripathy
11. Bag
12. Ye
13. Chen
14. Sodium Alginate
15. Chengrong Peng
16. Yong Zhao
17. Loess
18. Palygorskite
19. Jet-Grouting
20. Cureing
- versity of California at Berkeley UCB-NE-4220. <https://skb.com/publication/2492625>.
6. Bradbury, M.H. and Baeyens, B., 2003. Porewater chemistry in compacted re-saturated MX-80 bentonite. *Journal of Contaminant Hydrology*, 61(1-4), pp.329-338. [https://doi.org/10.1016/S01697722\(02\)00125-0](https://doi.org/10.1016/S01697722(02)00125-0).
7. Krupskaya, V.V., Zakusin, S.V., Tyupina, E.A., Dorzhieva, O.V., Zhukhlistov, A.P., Belousov, P.E. and Timofeeva, M.N., 2017. Experimental study of montmorillonite structure and transformation of its properties under treatment with inorganic acid solutions. *Minerals*, 7(4), p.49. <https://doi.org/10.3390/min7040049>.
8. Leroy, P. and Revil, A., 2004. A triple-layer model of the surface electrochemical properties of clay minerals. *Journal of Colloid and Interface Science*, 270(2), pp.371-380. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2003.08.007>.
9. Nalbantoğlu, Z., 2004. Effectiveness of class C fly ash as an expansive soil stabilizer. *Construction and Building Materials*, 18(6), pp.377-381. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.03.011>.
10. Dang, L.C., Fatahi, B. and Khabbaz, H., 2016. Behaviour of expansive soils stabilized with hydrated lime and bagasse fibres. *Procedia Engineering*, 143, pp.658-665. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.093>.
11. Soltani, A., Taheri, A., Khatibi, M. and Estabragh, A.R., 2017. Swelling potential of a stabilized expansive soil: A comparative experimental study. *Geotechnical and Geological Engineering*, 35, pp.1717-1744. <https://doi.org/10.1007/s10706-017-0204-1>.
12. Villar, M.V. and Lloret, A.J.A.C.S., 2004. Influence of temperature on the hydro-mechanical behaviour of a compacted bentonite. *Applied Clay Science*, 26(1-4), pp.337-350. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2003.12.026>.
13. Tripathy, S., Bag, R. and Thomas, H.R., 2015. Enhanced isothermal effect on swelling pressure of compacted MX80 bentonite. In *Engineering Geology for Society and Territory-Volume 6: Applied Geology for Major Engineering Projects*(pp. 537-539). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-09060-3_96.
14. Bag, R. and Rabbani, A., 2017. Effect of temperature on swelling pressure and compressibility char-

- acteristics of soil. *Applied Clay Science*, 136, pp.1-7. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.10.043>.
15. Ye, W.M., Wan, M., Chen, B., Chen, Y.G., Cui, Y.J. and Wang, J., 2013. Temperature effects on the swelling pressure and saturated hydraulic conductivity of the compacted GMZ01 bentonite. *Environmental Earth Sciences*, 68, pp.281-288. <https://doi.org/10.1007/s12665-012-1738-4>.
16. Chen, Y.G., Dong, X.X., Zhang, X.D., Ye, W.M. and Cui, Y.J., 2018. Combined thermal and saline effects on the swelling pressure of densely compacted GMZ bentonite. *Applied Clay Science*, 166, pp.318-326. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2018.10.001>.
17. Rajasekaran, G., 2005. Sulphate attack and ettringite formation in the lime and cement stabilized marine clays. *Ocean Engineering*, 32(8-9), pp.1133-1159. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2004.08.012>.
18. Latifi, N., Horpibulsuk, S., Meehan, C.L., Abd Majid, M.Z., Tahir, M.M. and Mohamad, E.T., 2017. Improvement of problematic soils with biopolymer-an environmentally friendly soil stabilizer. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(2), p.04016204. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001706](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001706).
19. Thangaraj, R. and Thenmozhi, R., 2013. Sustainable concrete using high volume fly ash from thermal power plants. *Ecol. Environ. Conserv.*, 19(2), pp.461-466.
20. Heidari, E.A., Alidadi, H., Sarkhosh, M. and Sadeghian, S., 2017. Zaveh cement plant environmental impact assessment using Iranian Leopold Matrix. *Journal of Research in Environmental Health*, 3(1), pp.84-93. <https://doi.org/10.22038/jreh.2017.23003.1144>.
21. Naeini, S.A. and Ghorbanali, M., 2010. Effect of wet and dry conditions on strength of silty sand soils stabilized with epoxy resin polymer. *Journal of Applied Sciences*, 10(22), pp.2839-2846. <https://doi.org/10.3923/jas.2010.2839.2846>.
22. Buritatum, A., Horpibulsuk, S., Udomchai, A., Suddepong, A., Takaikaew, T., Vichitcholchai, N., Horpibulsuk, J. and Arulrajah, A., 2021. Durability improvement of cement stabilized pavement base using natural rubber latex. *Transportation Geotechnics*, 28, p.100518. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2021.100518>.
23. Peng, C., Zheng, J., Huang, S., Li, S., Li, D., Cheng, M. and Liu, Y., 2017. Application of sodium alginate in induced biological soil crusts: enhancing the sand stabilization in the early stage. *Journal of Applied Phycology*, 29, pp.1421-1428. <https://doi.org/10.1007/s10811-017-1061-2>.
24. Zhao, Y., Zhuang, J., Wang, Y., Jia, Y., Niu, P. and Jia, K., 2020. Improvement of loess characteristics using sodium alginate. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 79, pp.1879-1891. <https://doi.org/10.1007/s10064-019-01675-z>.
25. Torfi, S., Khayat, N. and Horpibulsuk, S., 2021. Sustainable stabilization of compacted clay using sodium alginate for subgrade application. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 7, pp.1-15. <https://doi.org/10.1007/s40891-021-00322-6>.
26. Bakhshizadeh, A., Khayat, N. and Horpibulsuk, S., 2022. Surface stabilization of clay using sodium alginate. *Case Studies in Construction Materials*, 16, p.e01006. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01006>.
27. Bakhshi, M. and Sadeghi, D., 2019. Alginate, a Polymer Purified from Seaweed and Its Applications in Pharmaceutical Nano-biotechnology-A Narrative Review. *Journal of Marine Medicine*, 1(3), pp.121-128. <https://doi.org/10.30491/1.3.1>.
28. Estabragh, A.R., Amini, M. and Soltanian, M.R., 2020. Aging effects on the swelling behavior of compacted bentonite. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 79, pp.2341-2352. <https://doi.org/10.1007/s10064-019-01708-7>.
29. Cho, W.J., Lee, J.O. and Kang, C.H., 2000. Influence of temperature elevation on the sealing performance of a potential buffer material for a high-level radioactive waste repository. *Annals of Nuclear Energy*, 27(14), pp.1271-1284. [https://doi.org/10.1016/S0306-4549\(99\)00124-3](https://doi.org/10.1016/S0306-4549(99)00124-3).
30. Abdi, M.R. and Wild, S., 1993. Sulphate expansion of lime-stabilized kaolinite: I. *Physical characteristics*. *Clay Minerals*, 28(4), pp.555-567. <https://doi.org/10.1180/claymin.1993.028.4.06>.
31. Khademi, H., Hojati, S. 2010. Distribution and formation of phyllosilicates in some of the Central Iran's Tertiary sediments. *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy*, [In Persian]. <http://ijcm.ir/article-1-543-fa.html>.
32. Neaman, A. and Singer, A., 2004. The effects of palygorskite on chemical and physico-chemical properties of soils: A review. *Geoderma*, 123(3-4), pp.297-303. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.02.013>.