

# اثر تغییرات دما بر خصوصیات تورمی خاک‌های ریزدانه بهسازی شده با پلیمر سدیم آلزینات در حجم ثابت.

محمد بهزادی پور<sup>۱</sup>، نوید خیاط<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناس ارشد مهندسی ژئوتکنیک، گروه مهندسی عمران، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

۲- دانشیار گروه مهندسی عمران، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

پست الکترونیکی نویسندگان:

۱- [mohammadbehzadipour@yahoo.com](mailto:mohammadbehzadipour@yahoo.com)

۲- [khayat@iauhvaz.ac.ir](mailto:khayat@iauhvaz.ac.ir)

## چکیده:

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 این تحقیق اثر پلیمر سدیم آلزینات که جدیداً جهت بهسازی خواص ژئوتکنیکی خاک‌ها به عنوان افزودنی سازگار با محیط زیست پیشنهاد شده است با درصد‌های وزنی ۰/۵ و ۱ و شبیه سازی دمای استان خوزستان در دامنه ۲۳ تا ۴۵ درجه سانتیگراد، بر روی خاک‌های متورم شونده با سنین عمل آوری ۱ و ۱۴ روزه بررسی شد. مشاهدات حاکی از تشدید تساعدی پتانسیل تورم تا ۸۳٪ با تکرار بازه‌های دما و ثابت شدن تغییرات تورمی و یا به اصطلاح پیری تورمی می‌باشد. همچنین نتایج آنالیز *XRD* و *XRF* نمونه‌های بیانگر تشکیل کانی پالیگورسکیت بوده که خود یکی از عوامل تشدید پتانسیل تورم خاک‌های رسی می‌باشد که با استفاده از عکس میکروسکوپ الکترونی روبشی *FESEM* نیز قابل مشاهده می‌باشد.

## واژگان کلیدی:

پتانسیل تورم، خاک‌های رسی، خاک‌های متورم شونده، فشار تورم، سدیم آلزینات.

\* دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز

ایمیل: [khayat@iauhvaz.ac.ir](mailto:khayat@iauhvaz.ac.ir) (نویسنده مسئول مقاله)

# Evaluation of Temperature Variation Effects on the Swelling Characteristics of Fine-graded Soils improvement with Sodium Alginate in Constant Volume condition.

M.behzadipour<sup>١</sup> N.khayat<sup>٢</sup>

<sup>١</sup>-Master. Student, Department of Civil Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran

<sup>٢</sup>-Associate Professor, Department of Civil Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.

## Abstract:

In some regions with hot and dry climate conditions, the temperature varies greatly between day and night. Therefore, the materials used in construction projects are exposed to a large number of thermal cycles on a daily basis. In this research, the application of sodium alginate polymer as an eco-friendly additive for soil stabilization and improvement of its geotechnical characteristics is studied. The study involves conducting geotechnical tests on both control and stabilized soil samples (with and without sodium alginate polymer) such as standard compaction test, swelling tests, and measuring Atterberg limits, while specimens were subjected to the same temperature variations as those recorded in the Khuzestan province, in the southwest of Iran. In fact, this study aims to investigate the effect of temperature ranges on the changes in swelling potential of high plasticity clayey soils stabilized with sodium alginate polymer. Consolidation tests were carried out on compacted clay samples - containing different concentrations of sodium alginate polymer with treatment durations of ١ and ١٤ days - in accordance with the method C of ASTM standard. The temperature range considered in this research was ٢٣ to ٤٥°C due to the simulation of the temperature in Khuzestan province in the spring and autumn seasons. Observations indicated an increase in the swelling potential up to %١٣ in a sigmoidal manner with the repetition of temperature ranges and the stabilization of swelling changes, or so-called aging of swelling, which occurs with the repetition of temperature fluctuations. Additionally, the samples were analyzed using X-ray Diffraction XRD and X-ray Fluorescence (XRF) techniques to investigate the changes in their compositions. These methods revealed the formation of palygorskite mineral in specimens. This mineral intensifies the soil's swelling potential and is considered one of the contributing factors to the observed increase in swelling in the stabilized soil samples containing sodium alginate polymer.

## Keywords:

Swelling potential, clay soils, expansive soils, swelling pressure, Sodium alginate.

## ۱- مقدمه:

خاک‌های متورم شونده یا منبسط شونده، گروهی از خاک‌های مسئله دار هستند که تغییر حجم این خاک‌ها در اثر جذب و از دست دادن آب اتفاق می‌افتد. عدم توجه به این پدیده از جمله مشکلاتی است که موجب بروز خساراتی در حین اجرا و همچنین در زمان بهره برداری 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 ساختمان‌هایی با چنین شرایط، متحمل خسارات جزئی از قبیل ترک و حدود ۱۰ درصد از این سازه‌ها به شدت آسیب می‌بینند که دیگر قابل تعمیر نیستند [۲]. این خاک‌ها در سیستم طبقه‌بندی متحد<sup>۱</sup> جزء گروه خاک‌های ریزدانه بوده و به طور معمول مخلوطی از کانی‌های رسی و غیر رسی هستند که مشخصات ژئوتکنیکی این خاک‌ها توسط بخش رسی آنها کنترل می‌شود. این گروه از خاک‌ها دارای مقدار قابل توجهی کانی مونت‌موریلونیت بوده که با جذب آب متورم شده (آب دولایه) و بر اثر خروج آب منقبض می‌شوند [۳،۴]. کانی‌های مونت‌موریلونیت که از دو بخش اصلی سیلیکا و گیبسیت تشکیل شده اند، شامل یک لایه اکتاهدرال که ما بین دو لایه تتراهدرال قرار گرفته است می‌باشند [۵]، [۶]. در این کانی‌ها هیچ‌گونه پیوند ثانویه‌ای برای متصل نمودن لایه‌ها وجود ندارد. بنابراین می‌توان گفت که ذرات آنها در حقیقت یک ورقه تکی می‌باشند و به‌صورت یک فیلم نازک توصیف می‌شوند. از این رو مولکول‌های آب علاوه بر جذب سطحی، مابین صفحات کانی‌های مونت‌موریلونیت و در داخل فضای بین لایه‌ای یافت می‌شوند [۷]. لروی<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۰۴) در تحقیق بر روی این کانی پدیده ذکر شده را آب سه لایه نامیدند که نشان دهنده قدرت جذب بیشتر آب به نسبت سایر کانی‌های رسی می‌باشد [۸]. تا کنون روش‌های متعددی برای کاهش و یا تثبیت خاک‌های متورم شونده ارائه شده است. به این منظور روش‌ها و افزودنی‌های مختلفی از جمله روش‌های سنتی مانند ترکیب آهک و سیمان و نیز روش‌های صنعتی مانند افزودن انواع پلیمر

و الیاف‌ها تا کنون مورد بررسی قرار گرفته است. در این خصوص الراوس<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۰۵) با افزودن آهک به خاک، فشار تورم خاک مورد مطالعه را به صفر رساندند [۱]. نالبانت‌اقلو<sup>۴</sup> (۲۰۰۴) با افزودن خاکستر بادی به خاک به مطالعه بر روی تغییرات پتانسیل تورم خاک پرداخت که شاهد کاهش این پدیده بود [۹]. دانگ<sup>۵</sup> و همکاران (۲۰۱۶) با افزودن الیاف حاصل از تفاله نیشکر کاهش فشار تورم را گزارش دادند [۱۰]. طبق مشاهدات عوامل سنتی در مقایسه با تکنیک‌های غیر سنتی نتایج قابل قبول تری را نشان داده اند، 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 بر پتانسیل تورم خاک‌های رسی نیز اتفاقی قابل توجه است. از این رو تحقیقاتی در این زمینه انجام گرفته است. ویلار<sup>۶</sup> و همکاران (۲۰۰۴) با بررسی اثر دما بر بنتونیت متراکم شده، کاهش فشار تورم را به عنوان تابعی از دما اعلام کردند [۱۲]. تریپی<sup>۷</sup> و همکاران (۲۰۱۵) با افزایش دما شاهد کاهش فشار تورم برای بنتونیت MX 80 بودند [۱۳]. باگ<sup>۸</sup> و همکاران (۲۰۱۷) در یک تحقیق آزمایشگاهی به بررسی اثر دما بر فشار تورم در حجم ثابت، یک نمونه بنتونیت و یک نمونه خاک رس محلی هندوستان پرداختند. آنها افزایش فشار تورم را در هر دو نمونه خاک با افزایش دما مشاهده کردند [۱۴]. یی<sup>۹</sup> و همکاران (۲۰۱۳) نیز همچنین افزایش فشار تورم را با افزایش دما در بنتونیت GMZ 01 گزارش کردند [۱۵]. چن<sup>۱۰</sup> و همکاران (۲۰۱۸) در یک تحقیق آزمایشگاهی به بررسی اثرات دما بر فشار تورم بنتونیت GMZ با غلظت‌های مختلف از NaCl و CaCl<sub>2</sub> پرداختند. آنها در دما ۲۰ و ۶۰ درجه سانتیگراد، کاهش فشار تورم را با افزایش غلظت محلول رویت کردند [۱۶]. بررسی نتایج حاصل از مطالعات پیشین نشان می‌دهد که اثر دما بر خاک‌های رسی متفاوت است. واکنش‌های تبدیلی معمولاً باعث تغییرات مهمی در مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک‌های رسی می‌گردد [۱۷]. طبق اکثر بررسی‌های انجام شده، خاک‌های رسی که دارای یون سدیم هستند، با افزایش دما دچار تشدید پتانسیل تورم می‌شوند. این در حالی

<sup>۶</sup>.Villar

<sup>۷</sup>.Tripathy

<sup>۸</sup>.bag

<sup>۹</sup>.Ye

<sup>۱۰</sup>.chen

<sup>۱</sup> Unified Soil Classification System (USCS)

<sup>۲</sup>. Leroy

<sup>۳</sup>. Al-Rawas

<sup>۴</sup>.Nalbantoğlu

<sup>۵</sup>.Dang

است که یون کلسیم این پتانسیل را با افزایش دما کاهش می‌دهد [۱۴]. به طور کلی تثبیت خاک‌های مسئله دار به روش‌های گوناگون و با مصالح مختلفی انجام می‌گیرد. در این میان فرآیند تولید مصالح غیر سنتی 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 که خطرات بهداشتی، تنفسی و آلودگی زیست محیطی را به دنبال خواهد داشته و منابع طبیعی و انرژی زیادی را مصرف می‌کنند [۱۸، ۱۹]. براساس نتایج مطالعات به عمل آمده، عمده اثرات منفی زیست محیطی در بخش فیزیکی به ترتیب شامل آلودگی و فرسایش خاک، آلودگی هوا و آلودگی صوتی و عمده اثرات منفی در بخش بیولوژیکی به ترتیب شامل تاثیر بر تراکم گونه‌های گیاهی و جانوری و کیفیت زیستگاه می‌باشد [۲۰]. بنابراین، توسعه افزودنی‌های سازگار با محیط زیست ضروری است. استفاده از مواد شیمیایی غیر سنتی کم کربن، از جمله رزین‌ها، پلیمرها و نانو پلیمرها، اخیراً برای بهبود خواص ژئوتکنیک خاک نامطلوب معرفی شده اند. از طرفی جایگزینی تثبیت کننده‌های سنتی با پلیمرهای سازگار با محیط زیست به دلیل نیاز به انرژی کمتر برای ساخت این مواد می‌تواند عملیات تثبیت را اقتصادی تر کند [۱۸، ۲۱، ۲۲]. سدیم آلژینات که یک بیوپلیمری تجزیه پذیر است، به تازگی مورد توجه محققین جهت تثبیت خصوصیات ژئوتکنیکی خاک‌های مسئله دار قرار گرفته است. در این خصوص چانگرونگ پنچ<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۷) به تحقیق بر روی تثبیت بیولوژیک خاک‌های شنی پرداختند. نتایج بیانگر فزایش قابل توجه مقاومت فشاری سطحی با تشکیل از سدیم آلژینات بر روی سطح خاک آن بود [۲۳]. یونگ ژائو<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۱۹) با افزودن پلیمر سدیم آلژینات به بدنه لس<sup>۳</sup> اقدام به بهسازی ذرات خاک نمودند. نتایج نشان داد که سدیم آلژینات نه تنها می‌تواند حد روانی، خمیری و دانه‌بندی ذرات لس را تغییر دهد، بلکه با انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری، تک محوری و سه محوری شاهد افزایش استحکام، مقاومت برشی و مقاومت در برابر آب شستگی بودند. در این پژوهش آنالیزهای *SEM* و *XRD* بیانگر تغییرات ریزساختاری بوده که افزودن سدیم آلژینات موجب ایجاد یک ماده کلئیدی

برای محصور کردن و ایجاد پیوند مابین ذرات خاک گردیده است [۲۴]. طرفی و همکاران (۲۰۲۱) در یک پروژه تحقیقاتی، 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 نمونه متراکم شده پرداختند. آنها نمونه ترکیب شده با محلول ۰/۷۵٪ را به عنوان بهترین درصد جهت کاهش خصوصیت تورمی خاک نسبت به نمونه شاهد تعیین نمودند. این اتفاق درحالی بود که سایر نمونه‌ها متحمل تورمی بیش از نمونه شاهد بودند [۲۵]. بخشی‌زاده و همکاران (۲۰۲۲) نیز در یک تحقیق آزمایشگاهی با اضافه کردن محلول پلیمر سدیم آلژینات با درصدهای به خاک رس با شاخص خمیری بالا، اقدام به تثبیت و بررسی تغییرات نمونه‌های بهسازی شده نمودند که 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) می‌باشند. مطالعات مکانیک خاک نشان می‌دهد که این خاک‌ها دارای پتانسیل تورم بوده که تأثیر درجه حرارت بالای منطقه و بالا بودن سطح آب زیر زمینی از عوامل مؤثر در تشدید این پدیده می‌باشد.

در تحقیق حاضر تغییرات فشار تورم در حجم ثابت با شبیه‌سازی تغییرات دمای هوای استان خوزستان و خاکی با سابقه وجود کانی پالی گورسکیت<sup>۴</sup> ترکیب با پلیمر سدیم آلژینات و در شرایطی غیر اسیدی مورد بررسی قرار گرفت. در دشت خوزستان به دلیل بالا بودن تراز آب زیرزمینی (در برخی نقاط، دو متر زیر تراز زمین طبیعی) تثبیت خاک بستر، یکی از ملزومات اجرای هر پروژه عمرانی می‌باشد. از طرفی بالا بودن 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، پدیده تورم یکی از مشکلات قابل پیش‌بینی می‌باشد. این پدیده در منطقه خوزستان با ایجاد تغییرات متعدد دما در فصول پاییز و زمستان با بازه‌های دمایی بالا، موجب ایجاد تغییراتی در خصوصیات ژئوتکنیکی سازه‌های خاکی می‌گردد. این اتفاق یکی از بزرگترین مشکلات پیشرو در هنگام گودبرداری سازه‌های منطقه بوده که اغلب به دلیل بالا بودن فشار آب منفذی، با معضل

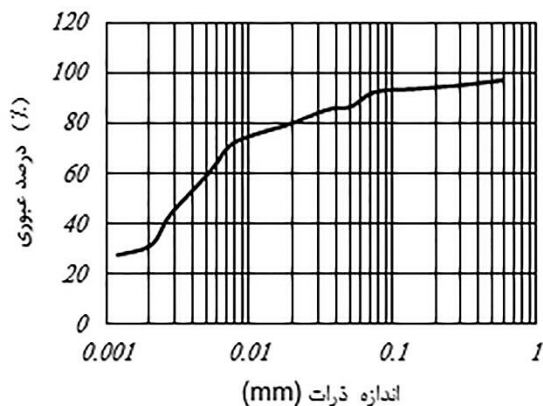
<sup>۱</sup>.loess

<sup>۴</sup>.Palygorskite

<sup>۱</sup> Chengrong Peng

<sup>۲</sup>.Yong Zhao

$M$ : مونت موریلونیت  $Q$ : کوآرتز  $C$ : کلسیت  
 خاک پایه مورد استفاده در این آزمایش، ترکیبی از خاک رس و بنتونیت به نسبت سه به یک (۷۵٪ رس + ۲۵٪ بنتونیت) با وزن مخصوص  $1.47 \text{ gr/cm}^3$  بوده که با توجه به سیستم طبقه بندی متحد، در دسته خاک‌های رسی با شاخص خمیری بالا ( $CH$ ) قرار گرفت. نتایج آزمایش دانه‌بندی (هیدرومتری) و آنالیز ساختاری این خاک در شکل ۲ و جدول ۱ ارائه شده است.



شکل ۲: نمودار دانه بندی خاک پایه

جدول ۱: درصد ترکیبات شیمیایی خاک مورد آزمایش

| ترکیب                          | درصد وزنی |
|--------------------------------|-----------|
| SiO <sub>2</sub>               | ۵۵/۰۸     |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | ۱۱/۶۱     |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | ۲/۶۳      |
| CaO                            | ۹/۵۷      |
| Na <sub>2</sub> O              | ۱/۶۸      |
| MgO                            | ۳/۶۹      |
| K <sub>2</sub> O               | ۱/۲۳      |
| TiO <sub>2</sub>               | ۰/۳۲      |
| MnO                            | ۰/۰۴      |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | ۰/۰۷      |
| L.O.I                          | ۱۴/۰۸     |
| مجموع ترکیبات                  | ۱۰۰       |

## ۲-۲- پلیمر

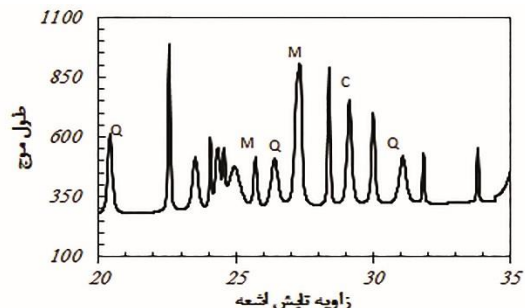
پلیمر مورد استفاده در این تحقیق، یک پودر سفید رنگ و بدون بو به نام سدیم آلزینات (آلزینیک اسید سدیم‌سالت) با فرمول شیمیایی  $(C_6H_7O_6Na)_n$  می‌باشد که یک پلی‌ساکارید است. آنالیز شیمیایی این پلیمر در جدول ۲ ارائه شده است. این ماده

جوشش در کف گود و در نهایت نشست در اطراف و یا ریزش دیواره گود همراه می‌باشد که در این حالت باید از سازه‌های نگهدارنده نظیر شمع و یا پرده آب‌بند استفاده نمود. از طرفی تزریق گل حفار (بنتونیت) برای جلوگیری از ریزش دیواره شمع در هنگام اجرا، موجب ترکیب خاک با بنتونیت شده که نتیجه آن افزایش شاخص خمیری و در نهایت افزایش فشار تورم خاک می‌باشد. از روش‌های اجرایی مرسوم برای مهار جوشش آب از کف گود، استفاده از روش تزریق پرفشار یا جت‌گروتینگ<sup>۱</sup> بوده که با تزریق دوغاب سیمان و یا آهک در عمق زمین انجام می‌شود. به دلیل آب‌شستگی مواد تزریق شده، امکان استفاده از هر ماده‌ای جهت تثبیت خاک وجود ندارد. از این رو پلیمر سدیم آلزینات به دلیل تشکیل بافت کلوئیدی به دور ذرات خاک، در مقابل آب‌شستگی مقاوم بوده که می‌توان از آن به عنوان یک ماده زیست تخریب پذیر جهت بهسازی خاک استفاده نمود.

## ۲- مواد و روش‌های انجام آزمایش

### ۲-۱- خاک مورد آزمایش

برای انجام این آزمایش از یک نمونه خاک رس، تهیه شده از معدنی در شهر مسجدسلیمان واقع در شمال شرقی استان خوزستان که به عنوان مناسب ترین معدن قرصه جهت تأمین ریزدانه پروژه‌های عمرانی می‌باشد استفاده شد. این خاک دارای حد روانی ۳۸، حد خمیری ۲۴ و شاخص خمیری ۱۴ بوده که به دلیل نیاز به خاک با شاخص خمیری بالا، با افزودن ۲۵٪ بنتونیت این پارامتر به ۴۲ رسید. بنتونیت مصرفی در این تحقیق به رنگ سفید روشن بوده که جزء دسته بنتونیت‌های دارای یون سدیم می‌باشد. آنالیز پراش پرتو اشعه ایکس این بنتونیت در شکل ۱ قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۱: آنالیز پراش اشعه پرتو ایکس بنتونیت با زاویه تابش  $2\theta$

<sup>۱</sup>. Jet-Grouting

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 می‌گردد.

#### ۲-۵- مراحل تهیه نمونه و آزمایش‌های انجام گرفته

برای بررسی فشار تورم خاک رس با تغییرات دما، می‌توان از دستگاه ادنومتر اصلاح شده جهت انجام آزمایش استفاده کرد. روش معمول، اندازه‌گیری تورم با حجم ثابت می‌باشد. در این تحقیق جهت بررسی اثر دما، بخشی با قابلیت تنظیم دما و ثبت داده‌ها به دستگاه اضافه شد که در ادامه به معرفی بیشتر جزئیات این دستگاه اشاره خواهد شد. در این تحقیق خاک رس با درصد‌های مشخصی از محلول پلیمر به عنوان رطوبت بهینه (مشابه روش آماده‌سازی نمونه جهت انجام تست 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 می‌باشد. لازم به ذکر است، استفاده از روش مذکور جهت ترکیب محلول پلیمر به عنوان رطوبت بهینه با خاک به دلیل ویسکوزیته بالا این ماده، منطقی‌ترین روش برای ایجاد یک نمونه همگن می‌باشد. در ادامه خاک مورد آزمایش مطابق شکل ۳ به مدت ۳۰ دقیقه تحت فشار استاتیکی متراکم شد.



شکل ۳ دستگاه تراکم استاتیکی

سپس خاک متراکم شده با استفاده از یک جک هیدرولیک و بدون وارد کردن ضربه از درون قالب تراکم خارج و مشابه شکل الف-۴ نمونه‌ها با سنین ۱ و ۱۴ روزه برداشت و در موعد مقرر مورد آزمایش قرار داده شدند. به جهت استفاده از نمونه متراکم شده برای انجام آزمایش فشار تورم، مشابه شکل ب-۴ رینگ دستگاه ادنومتر با دقت و به آرامی درون نمونه فرو رفته و با کاردک سطح آن پرداخت و آماده آزمایش گردید (پ-۴).

از جلبک‌های دریایی قهوه‌ای رنگ که در سواحل شمالی آتلانتیکا، آسیا و آمریکای شمالی رشد می‌کند بدست می‌آید که به دلیل خاصیت بیوپلیمیری و ارزان‌قیمت بودن و همچنین خاصیت تجزیه‌پذیری، بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۲۷]. این پلیمر که به صورت پودری با سایز ذرات نانو می‌باشد، بعد از ریختن درون همزن مغناطیسی و ترکیب با آب مقطر به یک محلول با ویسکوزیته بالاتر از آب تبدیل می‌شود. در این تحقیق این محلول با درصد‌های وزنی ۰/۵ و ۱ به مقدار رطوبت بهینه با خاک مخلوط شد. طبق مشاهدات به عمل آمده استفاده از این ماده به دلیل ویسکوزیته بالا در درصد‌های بیشتر از ۱، از نظر اجرایی و در احجام بالا به عنوان رطوبت بهینه، کاری بسیار دشوار بوده که نه به روش ترکیب و نه به روش تزریق قابل اجرا نمی‌باشد.

جدول ۲ درصد ترکیبات شیمیایی پلیمر سدیم آلزینات

| ترکیب         | درصد وزنی |
|---------------|-----------|
| <i>Fe2O3</i>  | ۰/۴۶      |
| <i>CaO</i>    | ۰/۷۵      |
| <i>Na2O</i>   | ۱۲/۰۷     |
| <i>K2O</i>    | ۰/۰۱      |
| <i>TiO2</i>   | ۰/۰۲      |
| <i>MnO</i>    | ۰/۰۱      |
| <i>P2O5</i>   | ۰/۰۵      |
| <i>LOI</i>    | ۸۶/۶۴     |
| مجموع ترکیبات | ۱۰۰       |

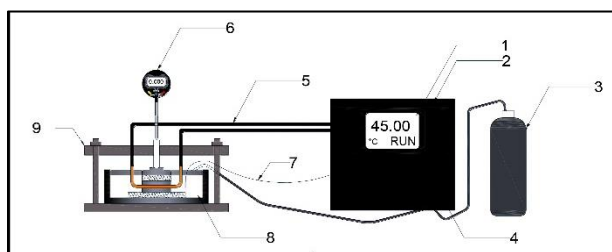
#### ۲-۳- آب

ترکیب شیمیایی آب مورد استفاده جهت انجام آزمایش، روی مقدار تغییر حجم و پتانسیل تورمی مؤثر می‌باشد. از این رو در این تحقیق جهت حذف اثرات شیمیایی آب در نمونه‌ها در کلیه اقدامات انجام گرفته از جمله تست‌های شناسایی و تهیه محلول پلیمر از آب مقطر استفاده شد.

#### ۲-۴- متد C استاندارد ASTM4546-96

آزمایش تورم با حجم ثابت (متد C استاندارد ASTM) که به نام آزمایش تعیین فشار تورم نیز موسوم است. روش کار به این گونه می‌باشد که، نمونه در دستگاه ادنومتر قرار گرفته و سربار کوچکی بر آن اعمال می‌شود. سپس نمونه را در معرض آب قرار داده می‌شود و نمونه در اثر جذب آب تمایل به متورم شدن پیدا کرده که به محض ایجاد تورم، سربار به مقداری افزایش پیدا



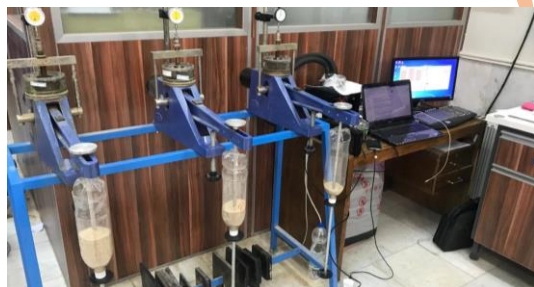


شکل ۶ سیستم اعمال دما نصب شده روی دستگاه تحکیم

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

### 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 درجه سانتیگراد شروع به تورم کرد. با شروع تورم، بارگذاری به گونه‌ای انجام شد که در تمام مدت آزمایش نمونه در حجم اولیه (ارتفاع اولیه نمونه) باقی ماند. به منظور بالا بردن دقت آزمایش و خنثی کردن فشار تورم ایجاد شده، از روش بارگذاری تدریجی مطابق شکل ۷ استفاده شد.



شکل ۷ بارگذاری تدریجی با ماسه

در این روش به محض جذب آب و ایجاد تورم در نمونه با اضافه کردن مقدار اندکی ماسه به عنوان وزنه، تغییر حجم ایجاد شده خنثی شد. این فرایند تا ۲۴ ساعت ادامه پیدا کرده و سپس دستگاه وارد گام دمایی جدید (۴۵ درجه) شده که جهت شبیه سازی هرچه بیشتر تغییرات دما، این اتفاق در بازه زمانی ۱۸۰ دقیقه اعمال گردیده و کلیه مراحل خنثی کردن فشار تورم همانند گام قبل انجام گرفت. دلیل انتخاب گام‌های ۲۴ ساعته، رساندن نمونه به حالت تعادل در هر گام می‌باشد. منظور از حالت تعادل رسیدن به شرایطی است که نمونه از تمام پتانسیل موجود



۴-الف ۴-ب ۴-پ

شکل ۴ نمونه متراکم شده خارج شده از دستگاه تراکم استاتیکی در این آزمایش به دلیل اهمیت بالای میزان رطوبت اولیه نمونه در لحظه شروع آزمایش تورم، و به منظور بالا بردن هرچه بیشتر دقت و جلوگیری از تبخیر آب، نمونه‌های ۱۴ روزه بعد از تراکم درون سه لایه پلاستیک کاملاً عایق شده و مطابق شکل ۵ درون یک ظرف دربسته غوطه‌ور در آب قرار داده شدند.



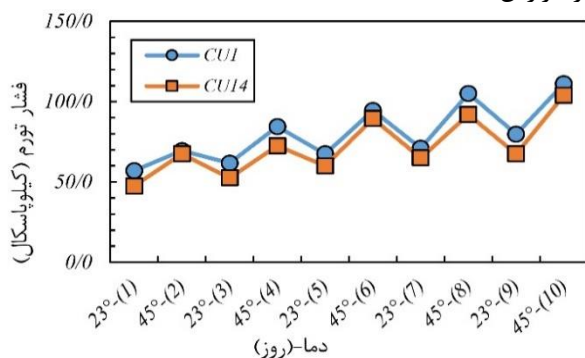
شکل ۵ شرایط نگهداری نمونه ۱۴ روزه

### ۶-۲- دستگاه ادئومتر اصلاح شده

این دستگاه از نوع دستگاه تحکیم مرسوم (بارگذاری از جلو) است که قابلیت اعمال تغییرات دما را دارد. کلیه اجزای دیگر این دستگاه مطابق با استانداردهای جهانی می‌باشد. شکل ۶ نمایی از سیستم اعمال دمای نصب شده روی دستگاه تحکیم را نشان می‌دهد. دستگاه استفاده شده در این آزمایش به صورت خودکار عمل کرده و بعد از پایان هر گام طبق برنامه از پیش تعریف شده، وارد مرحله بعد می‌شود. در هنگام تعریف گام‌ها، کاربر دمای هدف و مدت زمانی که می‌بایست دستگاه خود را به آن دما برساند را برای نرم‌افزار تعریف می‌کند. سپس مدت زمان تست مشخص شده که بسته به نوع تست 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 مورد نظر، فرمان تنظیم مجدد دما توسط نرم‌افزار صادر می‌شود. به منظور جلوگیری از کاهش آب در اثر تبخیر در طول مدت آزمایش، پمپ تعبیه شده درون دستگاه طبق زمان‌بندی تعریف شده مقدار مشخصی آب را درون سلول تزریق می‌کند. در زمان انجام آزمایش، کلیه تغییرات ارتفاع نمونه از قبیل افزایش و یا کاهش حجم به وسیله یک ساعت اندیکاتور دیجیتال با دقت ۰/۰۰۱ میلیمتر ثبت و ذخیره می‌گردد.

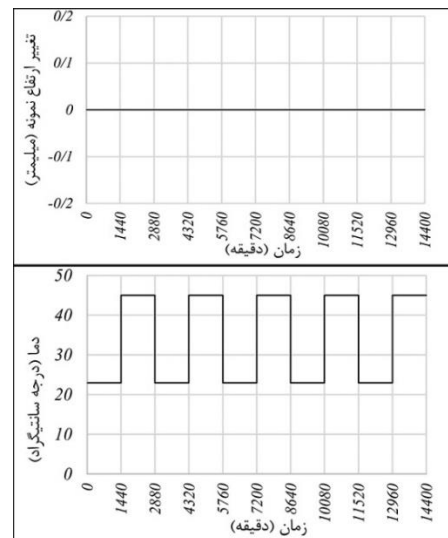
### ۳- نتایج آزمایش‌های انجام گرفته

نتایج حاصل از بررسی فشار تورم نمونه‌های با سنین عمل‌آوری ۱ و ۱۴ روزه، در شکل ۹ تا ۱۱ نشان داده شده است. در این تحقیق حرف P نماد پلیمر و CU<sup>۱</sup> نماد زمان عمل‌آوری می‌باشد. همانطور که در شکل ۹ قابل مشاهده است فشار تورم نمونه ۱۴ روزه در تمامی گام‌های آزمایش به طور میانگین ۱۱٪ پایین‌تر از نمودار نمونه یک روزه می‌باشد. این اتفاق بیانگر کاهش پتانسیل تورم خاک‌های دارای سدیم در گذر زمان بوده که طبق مطالعات به عمل آمده، در تحقیقات سایر محققین در این زمینه نیز گزارش شده است [۲۸].



شکل ۹ تغییرات فشار تورم خاک پایه در زمان‌های عمل‌آوری ۱ و ۱۴ روزه طبق پیش‌بینی و مشاهده نمودار فشار تورم خاک پایه، نمونه با زمان عمل‌آوری ۱۴ روزه ترکیب شده با محلول ۵٪ از پلیمر سدیم آلژینات، فشار تورم کمتری در حدود ۱۸٪ را نسبت به نمونه ۱ روزه در گام اول از خود نشان داد (شکل ۱۰). این در حالی می‌باشد که در گام بعدی با بالا رفتن دما، پتانسیل تورم به گونه‌ای افزایش یافته که نمودار فشار تورم تا پایان مدت آزمایش به طور میانگین ۲۵٪ بالاتر از نمونه ۱ روزه بوده است.

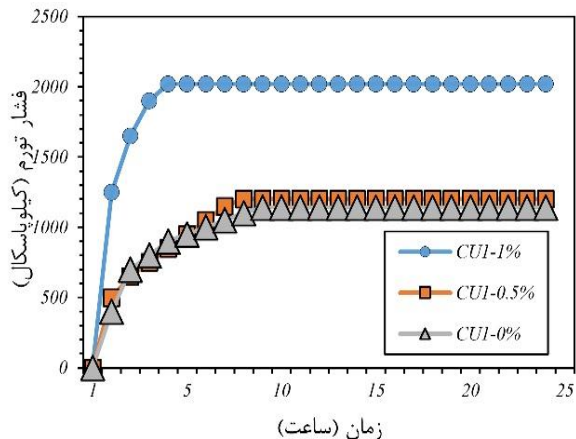
برای ایجاد تغییرات در خود استفاده کرده باشد. در این آزمایش به سربار نهایی وارد شده به نمونه در هر گام، فشار تورم اطلاق می‌شود. این تغییرات دما با زمان‌های ۲۴ ساعت به مدت ۱۰ روز و در حجم ثابت مورد بررسی قرار گرفت. بنابراین تمام نمونه‌ها در این شرایط تهیه و تغییرات فشار تورم آنها در طول مدت آزمایش بررسی شد. در این تحقیق برای رسیدن به فشار تورم نهایی دقیق پس از نصب محفظه بارگذاری، دستگاه به گونه‌ای کالیبراسون شد که قبل از اعمال بار با افزودن ماسه، هیچ گونه فشاری از جانب محفظه به نمونه وارد نشود. روند تعریف شده نرم‌افزار جهت تغییرات دما و تغییر ارتفاع نمونه در شکل ۸ نشان داده شده است. لازم به ذکر است در زمان بررسی فشار تورم در حجم ثابت، می‌بایست دقت زیادی در خصوص اعمال بار به نمونه شود. از این رو طبق مشاهدات به عمل آمده در زمان انجام آزمایش، در صورت ایجاد تورم در خاک و خروج از حالت حجم اولیه، می‌بایست فشاری چند برابر فشار واقعی جهت خنثی نمودن تورم ایجاد شده به نمونه وارد نمود و در غیر این صورت زمانی طولانی جهت بازگشت به حجم اولیه نیاز می‌باشد. در واقع می‌توان تورم را نقطه مقابل تحکیم دانست که طبق تعریف فرایندی زمانبر می‌باشد.



شکل ۸ روند تغییرات دما و گنج تغییر شکل

۱.curing

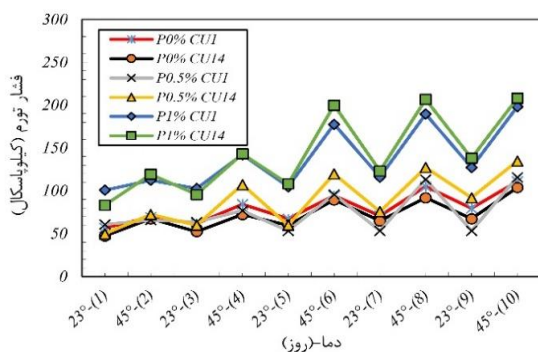




شکل ۱۲ مقایسه نمودار سرعت ایجاد تورم نمونه‌ها یک روزه

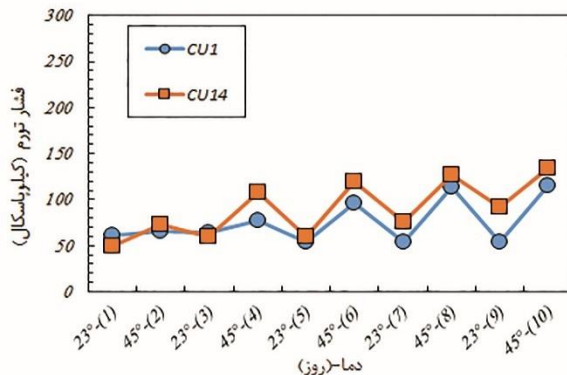
### ۳-۱- خلاصه نتایج فشار تورم

در شکل ۱۳ نتایج کلیه آزمایش‌های انجام‌گرفته به‌صورت خلاصه‌شده جمع‌آوری شده است. طبق مشاهدات انجام‌گرفته مقدار فشار تورم خاک پایه بعد از ترکیب با محلول پلیمر به عنوان رطوبت بهینه دچار تغییرات قابل ملاحظه‌ای شده است.

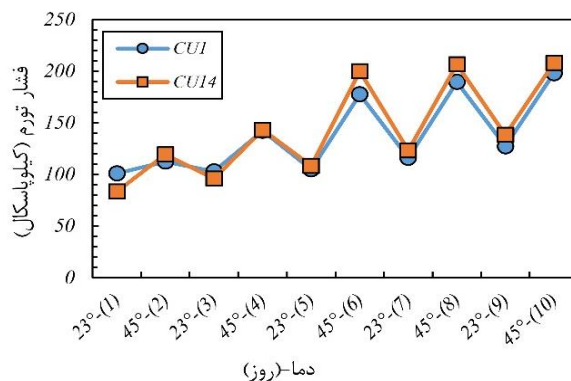


شکل ۱۳ مقایسه نمودار فشار تورم نمونه‌ها

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 به عمل آمده قابل رویت است، آزمایش‌های انجام‌گرفته بر روی خاک پایه، نمونه ۱۴ روزه، فشار تورم کمتری به نسبت نمونه یک روزه داشته است. این اتفاق در غلظت ۰/۵٪ موجب افزایش بازه‌های تورم با تغییرات دما در نمونه ۱۴ روزه به نسبت نمونه یک روزه شده است. در واقع می‌توان ادعا کرد که افزودن پلیمر سدیم آلژینات با غلظت ۰/۵٪ تغییر چشمگیری در پتانسیل تورم خاک و وزن مخصوص آن به نسبت نمونه شاهد ایجاد نکرده است (شکل ۱۴).



شکل ۱۰ تغییرات فشار تورم ترکیب ۰/۵٪ در زمان‌های عمل‌آوری ۱ و ۱۴ روز بر اساس نتایج ارائه شده نمودار فشار تورم خاک ترکیب شده با پلیمر ۱٪ در شکل ۱۱ همانند غلظت ۰/۵٪، فشار تورم نمونه ۱۴ روزه در روز اول تقریباً ۰/۱۷٪ کمتر از فشار تورم ایجاد شده در نمونه ۱ روزه بوده است. همچنین با افزایش دما، نمونه ۱٪ رفتاری مشابه نمونه ۰/۵٪ از خود نشان داده و موجب بالا رفتن ۵٪ پتانسیل تورم با زمان عمل‌آوری ۱۴ روزه شده است. طبق مشاهدات انجام‌گرفته سرعت بالا رفتن فشار تورم در نمونه خاک ترکیب شده 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 ساعات اولیه شروع آزمایش شد.



شکل ۱۱ تغییرات فشار تورم ترکیب ۱٪ در زمان‌های عمل‌آوری ۱ و ۱۴ روزه

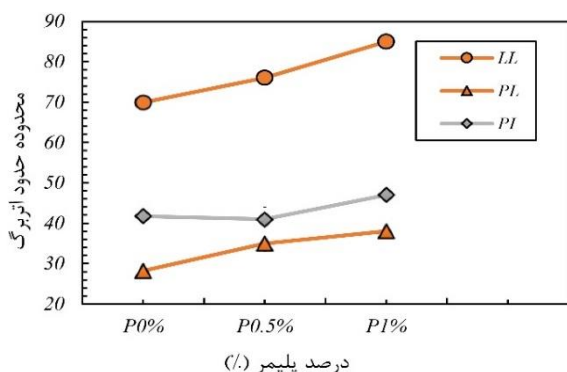
ولی همانطور که مشاهده می‌شود، بالا رفتن فشار تورم با افزودن پلیمر با غلظت ۱٪ در هر دو سن به گونه‌ای چشمگیر بوده که به طور میانگین موجب بالا رفتن ۸۳٪ فشار تورم نسبت به نمونه خاک پایه شده است. دلیل این پدیده را می‌توان افزایش قابل توجه یون سدیم در محیط دانست که با افزایش دما موجب بالا رفتن فشار آب منفذی، فشار هیدراتاسیون، فشار اسمزی [۲۹]، افزایش انرژی حرارتی و انتشار یونها و همچنین افزایش ضخامت آب دولایه شده، که در نهایت پتانسیل تورم را افزایش داده است [۱۶]. این در حالی است که افزودن سدیم آلژینات با غلظت ۱٪ موجب کاهش وزن مخصوص و افزایش رطوبت بهینه خاک شده است که نتایج آن در جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول ۳ تغییرات وزن مخصوص خشک و رطوبت بهینه

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

جدول ۶ تغییرات حدود اتربرگ نمونه‌ها

| نمونه      | حد خمیری<br>(PL) | حد روانی<br>(LL) | نشانه خمیری<br>(PI) |
|------------|------------------|------------------|---------------------|
| خاک پایه   | ۲۸               | ۷۰               | ۴۲                  |
| ترکیب ۰/۵٪ | ۳۵               | ۷۷               | ۴۲                  |
| ترکیب ۱٪   | ۳۸               | ۸۵               | ۴۷                  |

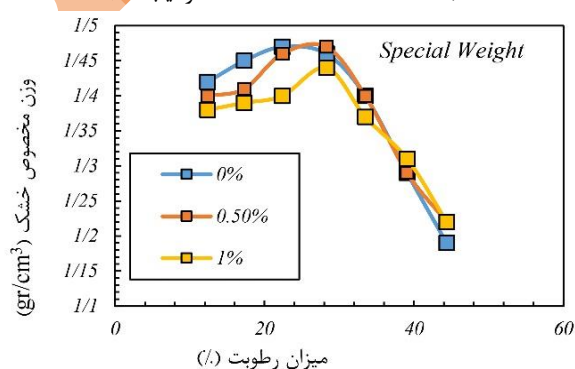


شکل ۱۵ نمودار تغییرات حدود اتربرگ

از طرفی محیط‌هایی غیر اسیدی با سابقه وجود کانی پالی گورسکیت به دلیل عدم انحلال منیزیم و سیلیس موجود در خاک، مستعد تشکیل و پدیدار شدن مجدد این کانی با فرمول شیمیایی  $(MgAl)_2[OH-Si_4O_{10}].2H_2O + 2H_2O$  هستند. در واقع رابطه مستقیمی بین PH و تشکیل پالی گورسکیت وجود دارد [۳۱]. نتایج حاصل از تست اسیدیته خاک که به روش عصاره گیری انجام شد در جدول ۷ قابل مشاهده می‌باشد.

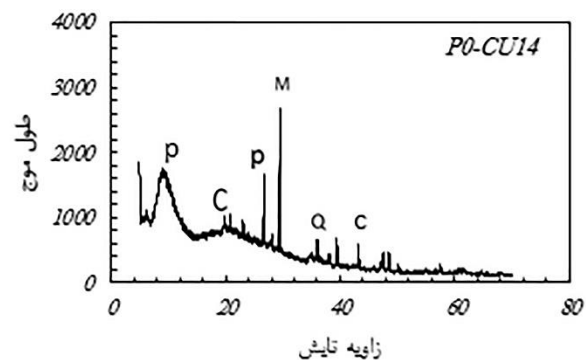
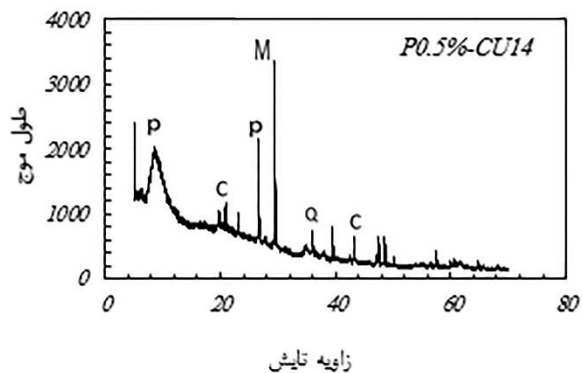
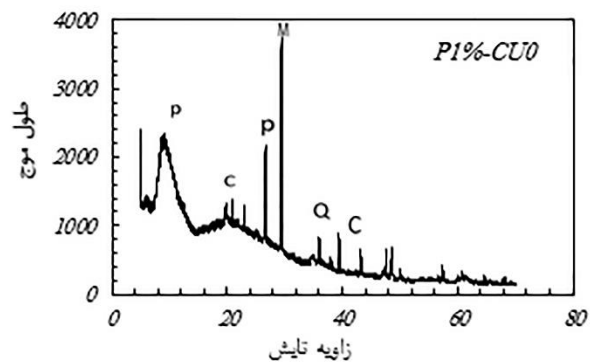
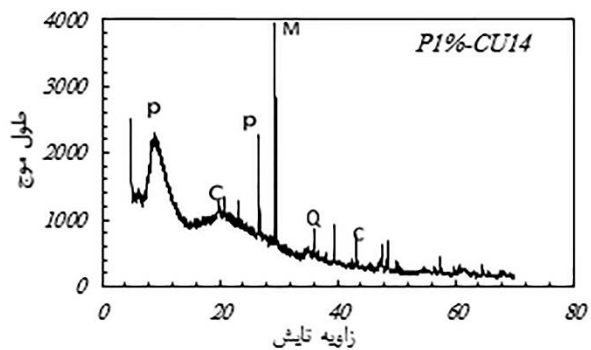
جدول ۷ اسیدیته مصالح مورد استفاده

| خاک پایه | ترکیب ۱٪ | ترکیب ۰/۵٪ | آب مقطر |
|----------|----------|------------|---------|
| ۱۰       | ۸        | ۹          | ۷       |



شکل ۱۴ تغییرات وزن مخصوص

طبق مشاهدات و نتایج حاصل شده، 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 هم دمای قبلی بوده است. در واقع نمونه‌ها از کلیه پتانسیل موجود جهت ایجاد جذب آب استفاده نموده‌اند و دیگر عامل تحریک کننده‌ای برای تورم بیشتر وجود نداشته است. به طور کلی گفته می‌شود که اثر دما بر فشار تورم خاک‌های رسی به خاطر حضور کاتیون‌های قابل تعویض در مجتمع‌های تبادلی بین کانی‌ها می‌باشد. از این رو خاک‌های دارای سدیم با بالا رفتن دما دچار افزایش فشار تورم می‌شوند. همان‌طور که در آنالیز ساختاری نمونه‌ها قابل مشاهده است، در این تحقیق اضافه کردن



شکل ۱۶ آنالیز پراش اشعه پرتو ایکس با زاویه تابش  $2\theta$

$P$ : پالی گورسکیت  $M$ : مونت موریلونیت  $Q$ : کوارتز  $C$ : کلسیت

کانی پالی گورسکیت دارای ظاهری میکروفیبری می باشد 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 کانی های رسی می شود. این کانی با استفاده از آنالیز پراش اشعه پرتو ایکس (شکل ۱۶) در تمامی نمونه ها شناسایی شده است که با استفاده از عکس میکروسکوپ الکترونی روبشی در شکل ۱۷ مشاهده می شود، اما به دلیل حالت فیزیکی پلیمر و ایجاد یک بافت کلوئیدی به دور ذرات رس، فقط در نمونه خاک پایه قابل رؤیت است. تصاویر میکروسکوپی از نمونه های رسی بعد از ترکیب با پلیمر سدیم آلژینات، نشان می دهد که این افزودنی با پوشاندن کانی های رسی و افزایش ظرفیت جذب نمونه ها، امکان افزایش پتانسیل تورم را فراهم می آورد.

در این تحقیق مشاهدات آنالیز ساختاری موجود در جدول ۸ بیانگر ایجاد تغییرات در ترکیبات شیمیایی و تحریک واکنش‌های تبدیلی در نمونه‌ها می‌باشد. واکنش‌های تبدیلی معمولاً باعث تغییرات مهمی در مشخصات فیزیکی و شیمیایی رس می‌گردند [۱۷]. در این واکنش تبدیلی یون‌های بین لایه‌ای رس مانند سدیم با یون کلسیم خاک جایگزین و باعث افزایش تمایل ذرات خاک به جذب آب شده و در نهایت باعث افزایش ضخامت آب دولایه می‌شود.

جدول ۸ آنالیز ساختاری و ترکیبات شیمیایی نمونه‌ها

| Sample  | Base soil | P0.5% CU14 | P1% CU0 | P1% CU14 |
|---------|-----------|------------|---------|----------|
| Na2O    | ۲۰/۴      | ۲۲/۵۵      | ۲۷/۵۵   | ۲۷/۴۴    |
| SO3     | <۰/۰۱     | <۰/۰۱      | <۰/۰۱   | <۰/۰۱    |
| Fe 2O3  | 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      |
| Al2O3   | ۸         | ۸/۵        | ۸/۵     | ۸/۵      |
| K2O     | ۲/۲       | ۲/۲        | ۲/۳     | ۲/۲      |
| LOI     | ۱۲/۴      | ۱۰/۴       | ۵/۱     | ۵/۲      |
| SiO2    | ۳۵/۲      | ۳۴/۹       | ۳۴/۲    | ۳۴/۷     |
| CaO     | ۱۴/۰۶     | ۱۳/۹       | ۱۴/۹    | ۱۴/۵     |
| La & Lu | <۰/۰۱     | <۰/۰۱      | <۰/۰۱   | <۰/۰۱    |
| P2O5    | <۰/۰۱     | <۰/۰۱      | <۰/۰۱   | <۰/۰۱    |

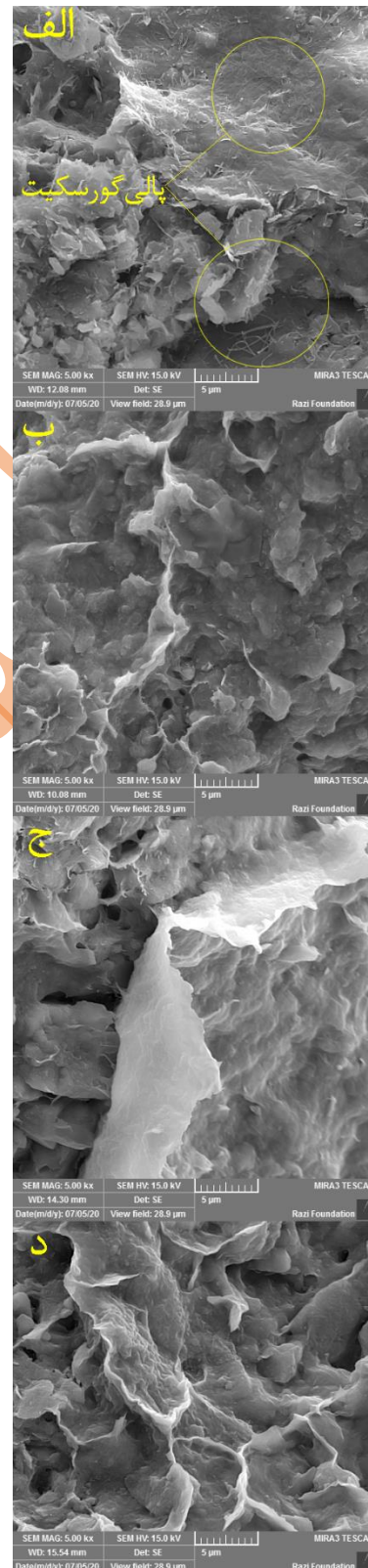
#### ۴- نتیجه گیری

۱- افزودن پلیمر سدیم آلژینات، به خاک رس باعث افزایش محصولات معلق بر روی سطح ذرات رس می‌شود که موجب بالا رفتن حدروانی و نشانه خمیری خاک گردید. این اتفاق در نهایت باعث تحریک و تقویت پتانسل تورم خاک‌های رسی تا ۸۳٪ شد.

۲- طبق مشاهدات به عمل آمده خاک‌های متورم شونده دارای یون غالب سدیم در گذر زمان و به شرط نبود عامل تحریک کننده دچار روند یکنواختی در فشار تورم می‌شوند.

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

۴- کانی پالی‌گورسکیت دارای ماهیتی سمناسیون مانند



شکل ۱۷ نمای میکروسکوپی FESEM نمونه‌های مورد آزمایش  
الف: خاک پایه ب: ترکیب  $CU 14-1\%$  ج: ترکیب  $CU 14-1\%$  د:  
ترکیب  $CU 14-1\%$



of California at Berkeley UCB-NE-4220.  
<https://skb.com/publication/۲۴۹۲۶۲۵>

- [۶] Bradbury, M.H. and Baeyens, B., ۲۰۰۳. Porewater chemistry in compacted re-saturated MX-۸۰ bentonite. *Journal of Contaminant Hydrology*, 61(۱-۴), pp.۳۲۹-۳۳۸.  
[https://doi.org/۱۰.۱۰۱۶/S۰۱۶۹۷۷۲۲\(۰۲\)۰۰۱۲۵-۰](https://doi.org/۱۰.۱۰۱۶/S۰۱۶۹۷۷۲۲(۰۲)۰۰۱۲۵-۰)
- [۷] Krupskaya, V.V., Zakusin, S.V., Tyupina, E.A., Dorzhieva, O.V., Zhukhlistov, A.P., Belousov, P.E. and Timofeeva, M.N., ۲۰۱۷. Experimental study of montmorillonite structure and transformation of its properties under treatment with inorganic acid solutions. *Minerals*, 7(۴), p.۴۹.  
<https://doi.org/۱۰.۳۳۹۰/min۷۰۴۰۰۴۹>
- [۸] Leroy, P. and Revil, A., ۲۰۰۴. A triple-layer model of the surface electrochemical properties of clay minerals. *Journal of Colloid and interface Science*, 270(۲), pp.۳۷۱-۳۸۰.  
<https://doi.org/۱۰.۱۰۱۶/j.jcis.۲۰۰۳.۰۸.۰۰۷>
- [۹] Nalbantoğlu, Z., ۲۰۰۴. Effectiveness of class C fly ash as an expansive soil stabilizer. *Construction and Building Materials*, 18(۶), pp.۳۷۷-۳۸۱.  
<https://doi.org/۱۰.۱۰۱۶/j.conbuildmat.۲۰۰۴.۰۳.۰۱۱>
- [۱۰] Dang, L.C., Fatahi, B. and Khabbaz, H., ۲۰۱۶. Behaviour of expansive soils stabilized with hydrated lime and bagasse fibres. *Procedia engineering*, 143, pp.۶۵۸-۶۶۵.  
<https://doi.org/۱۰.۱۰۱۶/j.proeng.۲۰۱۶.۰۶.۰۹۳>
- [۱۱] Soltani, A., Taheri, A., Khatibi, M. and Estabragh, A.R., ۲۰۱۷. Swelling potential of a stabilized expansive soil: a comparative experimental study. *Geotechnical and Geological Engineering*, 35, pp.۱۷۱۷-۱۷۴۴.  
<https://doi.org/۱۰.۱۰۰۷/s۱۰۷۰۶-۰۱۷-۰۲۰۴-۱>
- [۱۲] Villar, M.V. and Lloret, A.J.A.C.S., ۲۰۰۴. Influence of temperature on the hydro-mechanical behaviour of a compacted bentonite. *Applied clay science*, 26(۱-۴), pp.۳۳۷-۳۵۰.  
<https://doi.org/۱۰.۱۰۱۶/j.clay.۲۰۰۳.۱۲.۰۲۶>
- [۱۳] Tripathy, S., Bag, R. and Thomas, H.R., ۲۰۱۵. Enhanced isothermal effect on swelling pressure of compacted MX-۸۰ bentonite. In *Engineering Geology for Society and Territory-Volume 6: Applied Geology for Major Engineering Projects* (pp. ۵۳۷-۵۳۹). Springer International Publishing.  
[https://doi.org/۱۰.۱۰۰۷/۹۷۸-۳-۳۱۹-۰۹۰۶۰-۳\\_۹۶](https://doi.org/۱۰.۱۰۰۷/۹۷۸-۳-۳۱۹-۰۹۰۶۰-۳_۹۶)
- [۱۴] Bag, R. and Rabbani, A., ۲۰۱۷. Effect of temperature on swelling pressure and compressibility characteristics of soil. *Applied Clay Science*, 136, pp.۱-۷. <https://doi.org/۱۰.۱۰۱۶/j.clay.۲۰۱۶.۱۰.۰۴۳>

می‌باشد که در صورت فراهم بودن شرایط و غیر اسیدی بودن محیط، قابلیت تشکیل مجدد را دارد. این کانی با افزایش بار سطحی ذرات رس، موجب بالا رفتن قدرت جذب کانی‌های رسی می‌شود.

۵- خاک‌های متورم شونده با قرار گیری در معرض رطوبت، بسته به میزان پتانسیل و عوامل تحریک کننده، از خود افزایش حجم نشان می‌دهند. به زبان ساده می‌توان گفت که هر خاکی قادر به ایجاد میزان مشخصی فشار تورم می‌باشد و بعد از رسیدن به فشار تورم نهایی در صورت نبود عامل تحریک کننده، دیگر قادر به افزایش حجم نمی‌باشد.

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 منطقه مورد نظر، باید انتظار ایجاد پدیده تورم در خاک را داشته و از روش‌های لازم جهت جلوگیری از ایجاد خسارت و یا تخریب سازه استفاده نمود و یا انجام این فعالیت را به فصول سرد سال موکول کرد.

بدیهی است زمان تحکیم بسترهایی که تورم آنها به پایان رسیده طولانی تر بوده و باید در آنها انتظار نشستگی بیش از حالت عادی را داشت.

## منابع

- [۱] Al-Rawas, A.A., Hago, A.W. and Al-Sarmi, H., ۲۰۰۵. Effect of lime, cement and Sarooj (artificial pozzolan) on the swelling potential of an expansive soil from Oman. *Building and environment*, 40(۵), pp.۶۸۱-۶۸۷.  
<https://doi.org/۱۰.۱۰۱۶/j.buildenv.۲۰۰۴.۰۸.۰۲۸>
- [۲] Norrish, K., ۱۹۵۴. The swelling of montmorillonite. *Discussions of the Faraday society*, 18, pp.۱۲۰-۱۳۴.  
<https://doi.org/۱۰.۱۰۳۹/DF۹۵۴۱۸۰۰۱۲۰>
- [۳] Standard, A.S.T.M., ۲۰۰۶. C۱۳۶, ۲۰۰۶, "Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates," *ASTM International*, West Conshohocken, PA.  
<https://www.astm.org/d۴۵۴۶-۲۱.html>
- [۴] Bowles, J.E., ۱۹۸۸. *Foundation analysis and design*. <http://worldcat.org/isbn/۰۰۷۰۰۶۷۷۶۷>
- [۵] Verbeke, J., Ahn, J. and Chambré, P.L., ۱۹۹۷. Long-term behavior of buffer materials in geologic repositories for high-level wastes. *Report University*



- [۲۴] Zhao, Y., Zhuang, J., Wang, Y., Jia, Y., Niu, P. and Jia, K., ۲۰۲۰. Improvement of loess characteristics using sodium alginate. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 79, pp.۱۸۷۹-۱۸۹۱. <https://doi.org/10.1007/s10664-019-01675-z>
- [۲۵] Torfi, S., Khayat, N. and Horpibulsuk, S., ۲۰۲۱. Sustainable stabilization of compacted clay using sodium alginate for subgrade application. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 7, pp.۱-۱۵. <https://doi.org/10.1007/s40891-021-00322-z>
- [۲۶] Bakhshizadeh, A., Khayat, N. and Horpibulsuk, S., ۲۰۲۲. Surface stabilization of clay using sodium alginate. *Case Studies in Construction Materials*, 16, p.e۰۱۰۰۶. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e۰۱۰۰۶>
- [۲۷] Bakhshi, M. and Sadeghi, D., ۲۰۱۹. Alginate, a Polymer Purified from Seaweed and Its Applications in Pharmaceutical Nano-biotechnology-A Narrative Review. *Journal of Marine Medicine*, 1(۳), pp.۱۲۱-۱۲۸. <https://doi.org/10.3۰۴۹۱/۱,۳,۱>
- [۲۸] Estabragh, A.R., Amini, M. and Soltanian, M.R., ۲۰۲۰. Aging effects on the swelling behavior of compacted bentonite. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 79, pp.۲۳۴۱-۲۳۵۲. <https://doi.org/10.1007/s10664-019-017۰۸-۷>
- [۲۹] Cho, W.J., Lee, J.O. and Kang, C.H., ۲۰۰۰. 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(۱۴), pp.۱۲۷۱-۱۲۸۴. [https://doi.org/10.1016/S۰۳۰۶-۴۵۴۹\(۹۹\)۰۱۲۴-۳](https://doi.org/10.1016/S۰۳۰۶-۴۵۴۹(۹۹)۰۱۲۴-۳)
- [۳۰] Abdi, M.R. and Wild, S., ۱۹۹۳. Sulphate expansion of lime-stabilized kaolinite: I. Physical characteristics. *Clay Minerals*, 28(۴), pp.۵۵۵-۵۶۷. <https://doi.org/10.11۸۰/claymin.1۹۹۳.۰۲۸,۴,۰۶>
- [۳۱] Khademi, H., Hojati, S. (۲۰۱۰). Distribution and formation of phyllosilicates in some of the Central Iran's Tertiary sediments. *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy (In Persian)* (۲۰۱۰). <http://ijcm.ir/article-۱-۵۴۳-fa.html>
- [۳۲] Neaman, A. and Singer, A., ۲۰۰۴. The effects of palygorskite on chemical and physico-chemical properties of soils: a review. *Geoderma*, 123(۳-۴), pp.۲۹۷-۳۰۳. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.02.0۱۳>
- [۱۵] Ye, W.M., Wan, M., Chen, B., Chen, Y.G., Cui, Y.J. and Wang, J., ۲۰۱۳. Temperature effects on the swelling pressure and saturated hydraulic conductivity of the compacted GMZ۰۱ bentonite. *Environmental earth sciences*, 68, pp.۲۸۱-۲۸۸. <https://doi.org/10.1007/s12665-012-۱۷۳۸-۴>
- [۱۶] Chen, Y.G., Dong, X.X., Zhang, X.D., Ye, W.M. and Cui, Y.J., ۲۰۱۸. Combined thermal and saline effects on the swelling pressure of densely compacted GMZ bentonite. *Applied Clay Science*, ۱۶۶, pp.۳۱۸-۳۲۶. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2018.10.0۰۱>
- [۱۷] Rajasekaran, G., ۲۰۰۵. Sulphate attack and ettringite formation in the lime and cement stabilized marine clays. *Ocean engineering*, 32(۸-۹), pp.۱۱۳۳-۱۱۵۹. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2004.08.0۱۲>
- [۱۸] Latifi, N., Horpibulsuk, S., Meehan, C.L., Abd Majid, M.Z., Tahir, M.M. and Mohamad, E.T., ۲۰۱۷. Improvement of problematic soils with biopolymer— an environmentally friendly soil stabilizer. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(۲), p.۰۴۰۶۲۰۴. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-۵۵۳۳.۰۰۱۷.۰۶](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-۵۵۳۳.۰۰۱۷.۰۶)
- [۱۹] Thangaraj, R. and Thenmozhi, R., ۲۰۱۳. Sustainable concrete using high volume fly ash from thermal power plants. *Ecol. Environ. Conserv*, 19(۲), pp.۴۶۱-۴۶۶.
- [۲۰] Heidari, E.A., Alidadi, H., Sarkhosh, M. and Sadeghian, S., ۲۰۱۷. Zaveh cement plant environmental impact assessment using Iranian Leopold Matrix. *Journal of Research in Environmental Health*, ۳(۱), pp.۸۴-۹۳. <https://doi.org/10.2۲۰۳۸/jreh.2017.23.0۰۲,11۴۴>
- [۲۱] Naeini, S.A. and Ghorbanali, M., ۲۰۱۰. Effect of wet and dry conditions on strength of silty sand soils stabilized with epoxy resin polymer. *Journal of Applied Sciences*, 10(۲۲), pp.۲۸۳۹-۲۸۴۶. <https://doi.org/10.3۹۲۳/jas.2۰۱۰.۲۸۳۹,۲۸۴۶>
- [۲۲] Buritatum, A., Horpibulsuk, S., Udomchai, A., Suddepong, A., Takaikaew, T., Vichitcholchai, N., Horpibulsuk, J. and Arulrajah, A., ۲۰۲۱. Durability improvement of cement stabilized pavement base using natural rubber latex. *Transportation Geotechnics*, 28, p.۱۰۰۵۱۸. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2021.10۰۵۱۸>
- [۲۳] Peng, C., Zheng, J., Huang, S., Li, S., Li, D., Cheng, M. and Liu, Y., ۲۰۱۷. Application of sodium alginate in induced biological soil crusts: enhancing the sand stabilization in the early stage. *Journal of Applied Phycology*, 29, pp.۱۴۲۱-۱۴۲۸. <https://doi.org/10.1007/s10811-017-۱۰۶۱-۲>

# فهرستهای نشانه