تأثیر پومیس در خصوصیات ژئوتکنیکی خاک لای‌دار شور سدیمی

آیلار حسنیه [۱]، روزبه دبیری [۲*]، علیرضا علیزاده مجدی [۳]، الناز صباغ [۴،۵]

۱. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران
۲. دانشیار، گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران
۳. استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران
۴. استادیار، گروه علوم خاک، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران
۵. مرکز تحقیقات مدیریت توسعه پایدار حوضه آبریز دریاچه ارومیه و رودخانه ارس، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۰۶ تاریخ **پذیرش:** ۱۴۰۱/۱۲/۲۰

چکیده

خاک‌های لای دار شور که دارای سدیم هستند یک نوع دیگر از خاک‌های مسئله‌دار می‌باشند. زمانی که این نوع خاک تحت تأثیر آب قرار بگیرد می‌تواند دچار تورم و واگرایی شده و در نتیجه آن نشست و تغییر شکل به وقوع بپیوندد. با توجه به اینکه بخش وسیعی از حوضه آبریز دریاچه ارومیه و دشت تبریز را خاک‌های ریزدانه شور سدیمی فراگرفته است. بنابراین، بررسی و تثبیت خاک مسئله‌دار شور سدیمی موجود در منطقه با کمک فرآیند ژئوپلیمریزاسیون از اهداف اصلی تحقیق حاضر می‌باشد. بدین منظور، از ماده پومیس که دارای خاصیت پوزولانی است با درصدهای وزنی ۳، ۵ و ۷ به طور جداگانه به همراه محلول هیدروکسید کلسیم به عنوان کاتالیزور با درصد ۲، ۵ و ۷ با خاک مورد مطالعه مخلوط گردیدند. سپس نمونه‌های ساخته شده به مدت یک روز عمل‌آوری شدند. جهت ارزیابی رفتار ژئوتکنیکی خاک تثبیت شده آزمون‌های آزمایشگاهی تراکم استاندارد، مقاومت فشاری تک محوری، برش مستقیم و تحکیم انجام گرفته است. نتایج بدست آمده از تحقیق حاضر نشان می‌دهد، ترکیب ۳ ٪ پومیس به همراه ۲ ٪ هیدروکسید کلسیم پس از یک روز عمل‌آوری مقاومت فشاری تک محوری را در لحظه گسیختگی نمونه تثبیت شده را به میزان ۱/۳۲ برابر افزایش داده است. همچنین ترکیب ۷ ٪ پومیس به همراه ۲ ٪ هیدروکسید کلسیم مقدار زاویه اصطکاک داخلی ۲۰ برابر بهبود داده است. در انتها، ترکیب ۷ درصد پومیس به همراه ۲ درصد هیدروکسید کلسیم مقدار تورم آزاد را به مقدار ۸۶ درصد کاسته است.

کلید واژه‌ها: خاک ریزدانه، لای، شور، سدیم، پومیس، تثبیت.

مقدمه

همچنانکه مشخص است خاک یک محیط غیر یکپارچه بوده و از سه بخش هوا، آب و ذرات جامد تشکیل شده است. در شرایط طبیعی خاک به دلیل دارا بودن ساختار سست و بالا بودن فضای خالی بین ذرات، در اثر بارهای وارده دچار شکل‌پذیری و تغییر شکل‌های گسترده می‌شود. در حوضه آبریز دریاچه ارومیه، به دلیل مدیریت ناصحیح منابع آبی و کاهش بارندگی‌ها،

* نویسنده مسئول: rouzbehdabiri@yahoo.com
DOI: http://doi.org/10.22034/JEG.2023.16.4.1014049

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.16.4.1014049]

دریاچه ارومیه و منطقه اطراف آن در معرض خشک‌شدگی قرارگرفته است. با توجه به شوری بالای آب این دریاچه، خاک بستر باقی‌مانده شور بوده و در اثر سرعت بالای بادهای منطقه در معرض فرسایش بادی شدید قرار می‌گیرد. این فرسایش باعث حرکت ذرات رسوبات و تولید ریزگردها در منطقه می‌شود. بنابراین، خاک‌های شور سدیمی به وجود آمده حاصل از این فرسایش مشکلات فراوانی را می‌توانند در پروژه‌های عمرانی به وجود آورند. بویژه نشست و تورم از جمله موضوع‌های بحرانی در این‌گونه خاک‌ها می‌باشد. با توجه به توسعه سریع شهرسازی و همچنین احداث شبکه راه‌ها و بزرگراه‌ها بین شهرها، مهندسان ناچار به ساخت پروژه‌های مهم بر روی چنین خاک‌هایی می‌گردند. این خاک‌ها زمانی که در مجاورت آب قرار می‌گیرند و یا با جریان یافتن آب در ترک‌های خاک، ذرات رس در آب معلق گشته و فرسایش می‌یابند. یون سدیم قابل تعویض عامل اصلی ایجاد واگرایی، کاهش توانایی باربری و نشست در خاک‌های ریزدانه لای‌دار است. از سوی دیگر، پومیس(پوکه معدنی) سنگی است با منشأ آتشفشانی که رنگ روشن دارد. پومیس از انفجار گدازه‌های سیال و کاهش فشار در یک فعالیت آتشفشانی که سبب انبساط سریع و خروج مواد گازی در قسمت فوقانی گدازه شیشه‌ای بالا رونده می‌گردد، حاصل می‌شوند. گدازه‌ها در این حالت به مواد کف مانند محتوی حباب‌های فراوان و ذرات جامد کوچک تبدیل می‌شوند که متشکل از ذرات زاویه‌دار شیشه‌ای فراوان و با قطعات خرد شده پومیس در دیواره حفرات است که به عنوان سنگ‌های آذرین جمع می‌شوند. از سنگ پومیس به عنوان ساینده بکار برده شده و از این مواد به مقدار زیاد در تهیه صابون و مواد پاک کننده استفاده می‌شود. از پودر بسیار دانه ریز این مواد برای صیقل و تمیز کردن سطوح فلزی و چوبی نیز می‌توان بهره برد. به دلیل خاصیت پوزولانی پومیس، از آن در تهیه بتن‌های سبک و سیمان مخصوص که به صورت مخلوطی از آهک و خاکستر آتشفشانی است و همچنین در تهیه سیمان پرتلند در ساختن سدها و ابنیه‌های مهندسی استفاده می‌شود. از طرف دیگر به علت وجود آواک‌های هوا در داخل دانه‌ها، این مواد برای ساختن دیوارهای عایق صدا نیز به کار می‌روند. ذخایر پومیس شناخته شده در ایران در سه منطقه اصلی دماوند، تفتان و سهند قرار دارند. هدف اصلی در تحقیق حاضر، امکان بررسی جلوگیری از فرسایش و امکان اصلاح و تثبیت خاک مسئله‌دار شور سدیمی موجود در منطقه دشت تبریز با استفاده از ذرات پومیس و به همراه فرآیند ژئوپلیمریزاسیون می‌باشد که در ادامه به آن اشاره شده می‌گردد. همانطورکه بیان گردید ایجاد ریزگردهای نمکی ناشی از توسعه کانون‌های تولید ریزگرد در دریاچه ارومیه و مناطق شوره‌زار مجاور آن، خطر جدی برای بشر محسوب می‌شود. اگرچه مطالعات زیادی در خصوص معرفی راهکارهایی برای بازگرداندن سطح تراز آب به این دریاچه انجام شده است، اما اطلاعاتی در خصوص مقدار ذرات ایجاد شده توسط فرسایش بادی اراضی خشک شده اطراف دریاچه وجود ندارد. همچنین، ایجاد محلی امن برای احداث سازه‌های مهندسی از اولویت‌های مهم و اصلی پروژه‌های عمرانی بوده و خواص ژئوتکنیکی خاک‌ها اعم از خاک بستر و مصالح ساخت بایستی مشخصات فنی لازم برای پروژه را برآورده سازند. در بسیاری از پروژه‌های ژئوتکنیکی امکان دستیابی به محلی که بتواند تمام نیازهای طراحی را ارضا کند وجود ندارد. افزایش مقاومت و ظرفیت باربری زمین با توجه به شرایط حاکم در محل با روش‌هایی همانند اجرای پی‌های عمیق، مسلح کننده‌ها و یا مواد افزودنی به خاک جهت تثبیت و تقویت زمین حاصل می‌شود. در نتیجه، در این موارد اصلاح خاک محل پروژه به عنوان یکی از راه‌حل‌ها جهت رفع مشکل می‌باشد. از طرف دیگر، فرسایش بادی یکی از فاکتورهای اصلی در تخریب خاک، محیط زیست و آلودگی هوا بوده و باعث حمل ذرات خاک در محیط‌های خشک و نیمه خشک می‌شود. با توجه به مخاطرات

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.22034/JEG.2023.16.4.1014049]

زیست‌محیطی، کنترل فرسایش بادی و ریزگردها و تثبیت خاک ریزدانه شور سدیمی در چنین محیط‌هایی اهمیت بسیاری دارد. در حالت کلی روش‌های تثبیت و بهسازی خصوصیات ژئوتکنیکی خاک به دو روش مکانیکی (با استفاده از غلتک و روش‌های تراکمی) و شیمیایی (بر اساس واکنش‌های شیمیایی بین ماده افزوده شده و خاک) انجام می‌گیرد. اگرچه امروز محققین در روش شیمیایی تثبیت خاک به دنبال راهکارهای دوست‌دار محیط زیست می‌باشد. یکی از این رویکردها روش پلیمریزاسیون می‌باشد که به عنوان نسل سوم روش‌های بر پایه واکنش سمنتاسیون (پوزولانی) بعد از آهک و سیمان معرفی نمود (Li et al., 2010). ژئوپلیمرها پیوندهای فعال شده بازی با کلسیم پایین و غلظت آلومینیم متوسط تا بالا می‌باشند که از واکنش بین محلول هیدروکسید و مصالح حاوی آلومینا سیلیکات تولید می‌شوند (Provis et al., 2009; Yung-Ming et al., 2016). استفاده از سیمان‌های آلومینا سیلیکاتی فعال شده بازی در دهه‌های اخیر به علت مقاومت و کارایی بالا و مقبولیت محیط زیستی، مورد توجه صنایع قرار گرفته است (Davidovits, 1991). مصالح دارای آلومینات و سیلیکات بالا همچون کائولن (بوخوالد و کاپس، ۲۰۰۲) و خاکستر بادی(Davidovits, 1999) به‌عنوان منابع تأمین کننده ترکیبات مذکور در فرایند ژئوپلیمریزاسیون می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند. اگرچه استفاده از روش مذکور در صنایع ساختمانی نظیر صنعت ساخت سرامیک و کاشی و همچنین تولید بتن در دهه‌های اخیر تا حدودی رواج یافته است ولی استفاده از این تکنیک در مهندسی ژئوتکنیک بسیار نوپا بوده و نیاز به مطالعات گسترده‌تر دارد (Phetchuay et al., 2016). جهت ایجاد فرایند ژئوپلیمریزاسیون نیاز به موادی می‌باشد که دارای مقادیر مشخصی از آلومینات‌ها و سیلیکات‌ها باشند که در تحقیقات پیشین انواع مختلفی از این مواد جهت فعال‌سازی بازی مطرح شده است و بیشترین میزان مطالعات در این خصوص مربوط به خاکستر بادی بوده است (Ambroise et al., 1985; Caldaron and Burg, 1994; Wan et al., 2004; Lee, S. K. and Stebbins, 2006; Duxson and Provis, 2008; Li et al., 2010). با این وجود استفاده از متاکائولین (سرند و همکاران، ۱۴۰۲)، سرباره کوره فولاد (Tutunchi et al., 2021)، پومیس و پرلیت نیز به عنوان منبع آلومینوسیلیکات در تحقیقات مختلف مورد بررسی واقع شده‌اند. در زمینه کاربرد روش‌های بر پایه ژئوپلیمریزاسیون برای تثبیت و بهسازی خاک‌های ریزدانه رسی و لای‌دار شور مطالعات مختصری صورت گرفته است. ضیایی مؤید و همکاران (۱۳۸۹) تحقیقی در زمینه بهبود ویژگی‌های مقاومتی خاک شور و ماسه سیلتی در امتداد جاده هشتگرد- طالقان با کاربرد آهک و ترکیبی از آهک و میکرو سیلیکا با اندازه‌های ۰ تا ۶ ٪ انجام دادند. نتایج نشان داد افزودن ۲ ٪ آهک و ۳٪ میکرو سیلیکا به طور چشمگیری عملکرد خاک شور را بهبود می‌بخشد. (Qin Yin et al., 2008) به بررسی فاکتورهای اثرگذار بر مقاومت فشاری خاک شور ساحلی تثبیت شده با آهک-خاکستر پرداختند. ایشان مشاهده نمودند نسبت آهک-خاکستر و درصد آهک فاکتور کلیدی تأثیرگذار در مقاومت فشاری خاک شور ساحلی است. بطوری که توانایی باربری خاک شور ساحلی تثبیت یافته با آهک و خاکستر با بالا رفتن مدت زمان عمل‌آوری افزایش می‌یابد چون واکنش پزولانیک یا آتشفشانی در دراز مدت کامل می‌شود. همچنین با کاهش درجه تراکم و افزایش درصد نمک مقاومت فشاری خاک شور ساحلی تثبیت شده کاهش می‌یابد. (Binici, 2013) در مطالعات خود پوزولان‌های مختلف را با سدیم هیدروکسید ترکیب نمود تا سیمان ژئوپلیمری را جهت کاربردهای مهندسی تولید نماید. او در تحقیقات خود از سرباره کوره فولاد، خاکستر بادی و پومیس استفاده نمود. تحقیقات وی نشان داد در همه پوزولان‌ها با افزایش دما مقاومت نمونه‌ها بالا می‌رود و در شرایط یکسان، سرباره کوره فولاد بیشترین مقاومت

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.22034/JEG.2023.16.4.1014049]

فشاری و خمشی را ایجاد می‌کند. (Zhang et al., 2014,) امکان استفاده از متاکائولن و ژئوپلیمر به عنوان تثبیت کننده خاک شور در اعماق سطحی را ارزیابی نمودند. نتایج بدست آمده نشان داد که ژل‌های متاکائولن و ژئوپلیمر در خاک رسی شور تشکیل یافته که به ذرات خاک برای تشکیل ریزساختارهای متراکم‌تر کمک می‌کند. مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌های خاک تثبیت شده با ژئوپلیمر خیلی بیشتر از نمونه خاک رس خالص بدست آمده است. اگرچه افزایش مقاومت با زیاد شدن زمان عمل‌آوری از ۷ تا ۲۸ روز چندان محسوس نمی‌باشد. (Cimen et al., 2015) تأثیر پومیس را بر روی خصوصیات ژئوتکنیکی خاک رس جهت کاربرد در لایه‌های روسازی راه مطالعه نمودند. نتایج بدست آمده نشان داده است کاربرد ۳۰ درصد پومیس باعث بهبود توانایی باربری خاک رس از نقطه نظر آزمون‌های آزمایشگاهی مقاومت فشاری تک محوری و نسبت باربری کالیفرنیا (CBR) شده است و همین میزان پومیس میزان تورم آزاد خاک رس را کاهش داده است. (Miao et al., 2017) رفتار خاک سیاه بسیار متورم شونده تثبیت شده با محلول‌های قلیایی هیدروکسید سدیم و هیدروکسید پتاسیم و خاکستر آتشفشانی را مطالعه نمودند. ایشان دریافتند نشانه خمیری در نمونه‌های مخلوط با محلول قلیایی و خاکستر آتشفشانی به شدت کاهش می‌یابد. همچنین اثر تثبیت‌کنندگی هیدروکسید پتاسیم نسبت به هیدروکسید کلسیم بیشتر بوده و درصد تورم در نمونه‌های مخلوط کاهش می‌یابد. (Albayrak and Gencer, 2021) قابلیت کاربرد مخلوط خاک رس و پومیس را به همراه یک ماده ژئوپلیمر به‌عنوان کاربرد لایه نفوذناپذیر در محل دفن زباله (Land fill) مورد بررسی قرار دادند. نتایج مطالعات ایشان نشان داد با افزایش میزان ماده ژئوپلیمر، خاصیت پلاستیسیته خاک رس کاهش می‌یابد. همچنین، با توجه به نتایج آزمون نفوذپذیری، دریافتند کاربرد مخلوط پومیس و رس به همراه ژئوپلیمر امکان استفاده به‌عنوان یک لایه نفوذناپذیر برای شیرابه را فراهم می‌نماید. (Cadir and Vekli, 2022) تأثیر پودر سنگ مرمر به همراه پودر پومیس رو بر روی خصوصیات ژئوتکنیکی خاک رس نرم مورد مطالعه قرار دادند. تحقیقات ایشان نشان داد افزودن ۱۵ درصد پودر پومیس به پودر سنگ مرمر توانایی برابری خاک رس نرم را افزایش می‌دهد. (سرند و همکاران، ۱۴۰۲) جهت تثبیت خاک مارن سبز شهر تبریز از روش ژئوپلیمریزاسیون با کاربرد زئولیت و متارس به عنوان فعال‌کننده استفاده نمود. ایشان دریافتند مکانیسم ژئوپلیمریزاسیون تأثیر مناسب در اصلاح مشخصات مقاومتی خاک رسی کربناته دارد. بطوری که در نمونه‌های بهینه ژئوپلیمری زئولیتی و متارسی مقاومت فشاری نمونه‌ها به ترتیب ۱۲ و ۷ برابر نمونه مارن سبز خالص می‌باشد. با مرور مطالعات صورت گرفته مشاهده می‌شود تحقیقات اندکی در خصوص خاک‌های شور سدیمی و روش‌های علاج بخشی آن‌ها (به ویژه با استفاده از روش ژئوپلیمری) انجام یافته است. نظر به اینکه خاک‌های دشت تبریز عمدتاً جزو خاک‌های شور محسوب می‌گردند و افت مقاومت و نشست در آن‌ها مشاهده شده است، لذا انجام تحقیقات لازم در این خصوص ضروری به نظر می‌رسد. همچنین وجود مواد تثبیت کننده بالقوه نظیر پومیس که منبع غنی از آلومیناسیلیکا در منطقه مورد مطالعه هستند و امکان سنجی استفاده از این مصالح ارزان قیمت و در دسترس، از جذابیت فنی و اجرایی خوبی برخوردار می‌باشد. بنابراین، همان‌طور که بیان گردید، هدف از تحقیق حاضر مقایسه تأثیر مواد معدنی پومیس بر روی خصوصیات ژئوتکنیکی خاک ریزدانه شور سدیمی منطقه دشت تبریز می‌باشد که در ادامه به شرح آن پرداخته می‌شود.

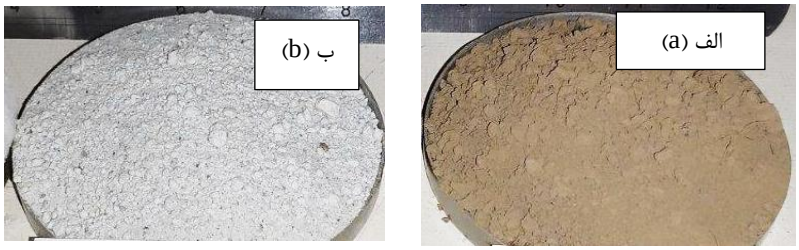
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.22034/JEG.2023.16.4.1014049]

مواد و روش‌ها

مواد و مصالح

همانطورکه در بخش گذشته به آن اشاره گردید، هدف از تحقیق حاضر بررسی امکان تثبیت خاک ریزدانه شور سدیمی منطقه دشت تبریز با استفاده از پومیس به کمک روش ژئولیمریزاسیون می‌باشد. تصاویر مصالح مورد مطالعه در شکل(۱) قابل مشاهده است. نمونه خاک شور سدیمی مورد مطالعه از منطقه مایان شهر تبریز تهیه شده است و موقعیت محل نمونه‌برداری در شکل(۲) ارائه شده است. پومیس که منشأ آتشفشانی دارد و بصورت فراوان در منطقه آذربایجان موجود بوده و نزدیکی کوه سهند یافت می‌شود بسیار سبک بوده و وزن مخصوص متوسط آن ۰/۷۵ تا ۰/۸ گرم بر سانتیمتر مکعب است. هرچه پومیس، دانه درشت‌تری داشته باشد وزن مخصوص آن کمتر است. رنگ پومیس، سفید یا خاکستری مایل به سفید یا زرد اسیدی است. پومیس آب را جذب می‌نماید اما از خود عبور نمی‌دهد، به عبارت دیگر قطعات و ذرات پومیس در عین تخلخل غیر قابل نفوذ می‌باشد. در نتیجه مدت زیادی روی آب شناور باقی می‌ماند. سختی پومیس در مقیاس موس ۵/۵-۵ است و نقطه ذوب متوسط آن ۱۳۴۳ درجه سانتی‌گراد بوده و در هنگام حرارت دادن تا ۷۶۰ درجه سانتی‌گراد هیچ‌گونه تغییری در حجم آن حاصل نمی‌شود. در این درجه حرارت فیبرهای بیرونی آن شروع به انقباض می‌نمایند. نقطه انهدام حرارت معمولاً در آتش‌سوزی‌های بزرگ بین ۴۸۰ تا ۶۵۰ درجه سانتی‌گراد انجام می‌گیرد. لذا پومیس تحت هیچ‌گونه تغییری در این آتش‌سوزی‌ها قرار نمی‌گیرد. خصوصیات شیمیایی پومیس را در جدول(۱) می‌توان مشاهده نمود. منحنی دانه‌بندی خاک مورد مطالعه و پومیس بر اساس استانداردهای ASTM D421 و ASTM D422 تعیین گردیده و در شکل(۳) ارائه شده است. مطابق با سیستم طبقه‌بندی متحد خاک‌ها، خاک مورد مطالعه از نوع لای (ML) می‌باشد. خصوصیات خمیری خاک مورد مطالعه طبق استاندارد ASTM D4318-95a و چگالی ویژه آن و پومیس با استفاده استاندارد ASTM D854 اندازه‌گیری گردید و نتایج آن در جدول(۲) ارائه شده است. میزان سدیمی و شوری خاک لای مورد مطالعه طبق شاخص (SAR=Sodium absorption ratio) اندازه‌گیری گردید و نتایج بدست آمده را جدول(۳) می‌توان مشاهده نمود. بر اساس شاخص اشاره شده خاک ریزدانه لای تهیه شده سدیمی و شور می‌باشد. همچنین آزمایش XRD بر روی مصالح مورد مطالعه انجام گرفته است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد خاک لای دارای عنصر سدیم بوده و در پومیس حضور عناصر آلومینیوم و سیلیس است و ترکیب سیلیکات آلومینیوم (Al_2SiO_5) قابل توجه است.

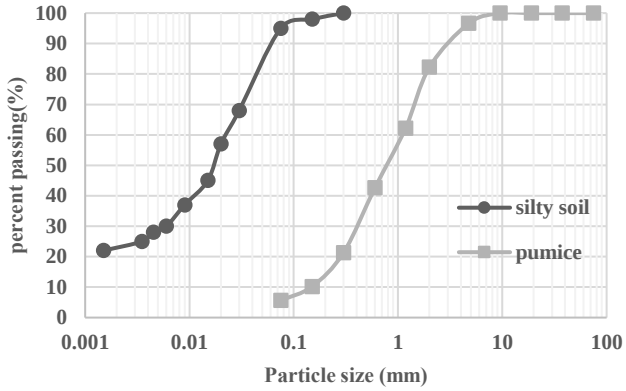


شکل ۱. تصاویر مصالح مورد استفاده در تحقیق حاضر، الف- خاک لای‌دار شور سدیمی، ب- پومیس.
Fig. 1. Pictures of materials used in present research, a-Saline sodium silty soil, b-Pumice.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.16.4.1014049]

شکل ۲. تصویر موقعیت نمونه تهیه شده خاک لای‌دار شور سدیمی.

Fig. 2. Picture of the location of the prepared sodium salt silty soil sample.



شکل ۳. منحنی دانه‌بندی مصالح مورد استفاده در تحقیق حاضر.

Fig. 3. Particle size distribution curves of materials in present research.

جدول ۱. خصوصیات شیمیایی پومیس.

Table 1. Chemical properties of pumice.

Combination percent								Material
K_2O	P_2O_5	Na_2O	MgO	CaO	Fe_2O_3	Al_2O_3	SiO_2	
3.27	1.79	4.63	9.58	8.43	8.07	12/49	48.37	Pumice

جدول ۲. ویژگی‌های ژئوتکنیکی مصالح مورد مطالعه.

Table 2. Geotechnical properties of materials.

Materials	**PI**	**Gs**
Silt	7	2.71
Pumice	-	2.02

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.22034/JEG.2023.16.4.1014049]

جدول ۳. نتایج شاخص SAR برای خاک لای‌دار شور مورد مطالعه در تحقیق حاضر.
Table 3. Results of SAR test on saline silty soil in present research.

Soil type	Electrical conductivity (Ec.10^3) Dsm/m	Saturated mud reaction (PH)	Sodium absorption ratio(SAR)	Soluble cations (meg/l)		
				Mg^{++}	Ca^{++}	Na^{+}
silt	6.7	8.06	21.38	5	8	54.5

مطالعات آزمایشگاهی

طبق استاندارد ASTM C618 هنگامی‌که میزان مجموع مخلوط عناصر $SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$ نزدیک به ۷۰ درصد باشد رفتار پوزولانی یا سمنتاسیون مشاهده می‌شود. طبق جدول(۱) می‌توان دریافت پومیس تا حدود زیاد دارای این خاصیت است. از سوی دیگر، به منظور اینکه بتوان روند واکنش شیمیایی بین پومیس و خاک مورد مطالعه را تسریع نمود و ژئوپلیمریزاسیون را بصورت مناسب انجام داد با در نظر گرفتن خصوصیات شیمیایی آن، از محلول هیدروکسید کلسیم $Ca(OH)_2$ که به مقدار ۷۴ گرم در هر یک لیتر آب مخلوط می‌گردد به عنوان کاتالیزور استفاده شده است. مقدار محلول کاتالیزور بر اساس سعی و خطا برآورد گردیده و به میزان ۲، ۵ و ۷ درصد وزنی برای نمونه‌های مورد مطالعه در نظر گرفته شده است. با مرور مطالعات گذشته مشاهده شده در راستای تثبیت و بهسازی خصوصیات ژئوتکنیکی خاک لای‌دار شور سدیمی دشت تبریز از پومیس با روش ژئوپلیمریزاسیون استفاده نشده است بنابراین پومیس به میزان ۳، ۵ و ۷ درصد وزنی انتخاب شده و با خاک مورد مطالعه مخلوط شده است. به‌منظور آماده‌سازی نمونه‌های مخلوط یکنواخت و همگن جهت ارزیابی پارامترهای ژئوتکنیکی از استاندارد ASTM C305-14 استفاده شد. بطوری که، ابتدا هیدروکسید کلسیم به همراه آب (با توجه به رطوبت بهینه) به خاک مورد مطالعه اضافه گردید. سپس در داخل میکسر (مخلوط کن) مخلوط شدند تا چسبندگی مناسب بین مصالح افزوده شده و خاک به وجود آید. طبق استاندارد ۳۰ ثانیه عملیات مخلوط متوقف شده تا مصالح رطوبت را به همراه هیدروکسید کلسیم جذب نمایند. در ادامه، پومیس به آرامی به نمونه مخلوط اضافه شد. عملیات مخلوط کردن نمونه‌ها به مدت ۳۰ ثانیه با دور کند، ۱۵ ثانیه تمیزکاری و ۶۰ ثانیه با دور متوسط انجام گرفت. با توجه به اینکه در ساخت نمونه‌ها از محلول هیدروکسید کلسیم به عنوان تسریع کننده واکنش استفاده شد، پس از اتمام عملیات اختلاط، نمونه‌ها به مدت یک روز در ظرف پلاستیکی سر بسته در شرایط دمای محیطی نگهداری کرده تا فرایند عمل‌آوری انجام پذیرد. برای نیل به اهداف تحقیق، ابتدا آزمون تراکم آزمایشگاهی طبق استاندارد ASTM D698 انجام گرفت. سپس به‌منظور تعیین خصوصیات ژئوتکنیکی خاک لای‌دار شور سدیمی، آزمون مقاومت فشاری تک محوری طبق استاندارد ASTM D2166-16، آزمایش برش مستقیم طبق استاندارد ASTM D3080-11 برای نمونه‌های با ابعاد ۱۰×۱۰ سانتیمتر مربع بصورت کنترل کرنش تحت اثر بارهای قائم ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلو پاسکال با سرعت بارگذاری ۰/۰۵ میلیمتر بر دقیقه صورت پذیرفت. در انتها، به‌منظور بررسی تأثیر مواد افزوده شده بر روی میزان نشست تحکیمی و پتانسیل تورمی خاک لای‌دار شور بهسازی شده آزمون تحکیم طبق استاندارد ASTM

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.16.4.1014049]

D2435 صورت پذیرفت. برنامه آزمایشگاهی صورت گرفته بر روی نمونه‌های مورد مطالعه طبق جدول(۴) قابل مشاهده می‌باشد.

جدول ۴. برنامه آزمون‌های صورت گرفته بر روی نمونه‌های مورد مطالعه در تحقیق حاضر.
Table 4. The program of tests performed on the samples studied in present research.

Tests				Geopolymer (%)	Material	Program		
Consolidation	Direct shear	Uniaxial compressive strength	Compaction	2, 5, 7	Pumice (%)	Soil matrix	Sample Name	No
*	*	*	*	*	۰	Saline soil	S-0PU	1
*	*	*	*	*	3	Saline soil	S-3PU	2
*	*	*	*	*	5	Saline soil	S-5PU	3
*	*	*	*	*	7	Saline soil	S-7PU	4

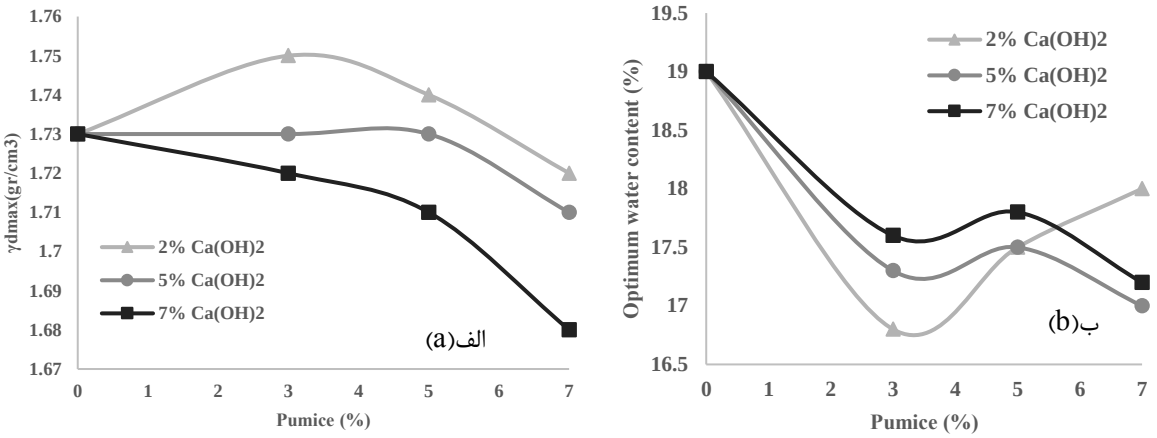
نتایج و بحث

آزمایش تراکم

نتایج حاصل از آزمون تراکم بر روی نمونه‌های مورد مطالعه در شکل(۴-الف و ب) ارائه شده است. همان‌گونه که در شکل(۴-الف) می‌توان مشاهده نمود، زمانی که ۳ ٪ وزنی پومیس به همراه ۲ ٪ هیدروکسید کلسیم به خاک لای‌دار شور مخلوط می‌شود و جهت عمل آوری به مدت یک روز نگهداری می‌شود، وزن مخصوص خشک حداکثر(γ_{dmax}) به مقدار ۱/۱۵ درصد نسبت به حالت تثبیت نشده افزایش می‌یابد. همچنین، طبق نمودارهای شکل(۴-ب) دیده می‌شود افزودن همان ترکیب ذکر شده و پس از عمل آوری سبب شده تا مقدار رطوبت بهینه خاک لای‌دار شور تثبیت شده به مقدار ۱۱/۶ ٪ نسبت به حالت خاک خالص کاسته شود. اگرچه، با افزایش میزان درصد پومیس و هیدروکسید کلسیم به عنوان کاتالیزور دیده شد تأثیر مناسبی بر رفتار خاک لای‌دار شور سدیمی نداشته و سبب کاهش وزن مخصوص خشک حداکثر و افزایش میزان جذب رطوبت گردیده است. این رفتار می‌تواند ناشی از کم بودن مدت زمان عمل آوری باشد و آنطورکه بنظر می‌آید ذرات پومیس نیاز به مدت زمان بیشتری جهت تکمیل واکنش سمنتاسیون(پوزولان) جهت به وجود آوردن ساختار و ساختمان اسکلتی جدید و تغییر در بافت خاک لای‌دار شور سدیمی دارند. در شکل(۵) نمودار مقایسه‌ای تأثیر ترکیب شیمیایی بهینه بر روی نمونه خاک مورد مطالعه حاصل از نتایج آزمون تراکم ارائه شده است. با توجه به مجموع مواد آلومین‌دار و سیلیس‌دار در پومیس و اختلاط آن با هیدروکسید کلسیم و افزودن ترکیب حاضر به خاک لای‌دار شور، پس از یک روز عمل آوری مشاهده می‌شود واکنش سمنتاسیون تشکیل شده و مواد سمنته ناشی از کربنات کلسیم($CaCO_3$) و سیلیکات سدیم به دلیل وجود عنصر سدیم در خاک لای‌دار به وجود آمده است. در نتیجه پومیس یک استخوان‌بندی قوی را بین ذرات تازه تشکیل یافته به وجود آورده و فضای خالی بین آن‌ها را بخاطر مواد سمنته کاهش داده و وزن مخصوص خشک حداکثر روند صعودی طی نموده است. همچنین با توجه به تغییر ماهیت بافت و ساختار خاک تثبیت شده، میزان جذب آب نیز کاسته شده است که

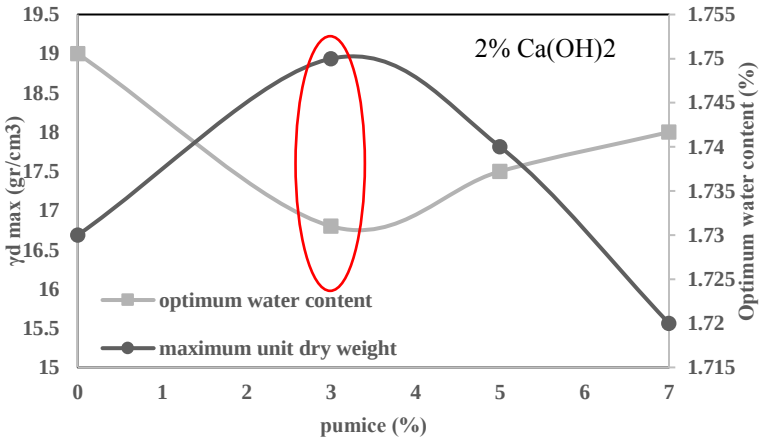
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.16.4.1014049]

این روند در نمودار شکل(۵) قابل مشاهده است. بدیهی است بالا رفتن مدت زمان عمل آوری نمونه‌ها، می‌تواند بر افزایش نرخ رشد γ_{dmax} و کاهش میزان جذب آب تأثیرگذار باشد.



شکل ۴. تأثیر ترکیب پومیس و هیدروکسید کلسیم بر روی نتایج آزمایش تراکم نمونه‌های مورد مطالعه، الف- وزن مخصوص خشک حداکثر، ب- رطوبت بهینه.

Fig. 4. The effect of the combination of pumice and $Ca(OH)_2$ on the results of the compaction test, a-maximum dry density, b-optimum water content.



شکل ۵. تأثیر ترکیب شیمیایی ۳ ٪ پومیس به همراه ۲ ٪ هیدروکسید کلسیم بر روی نتایج حاصل آزمایش تراکم خاک لای‌دار شور سدیمی.

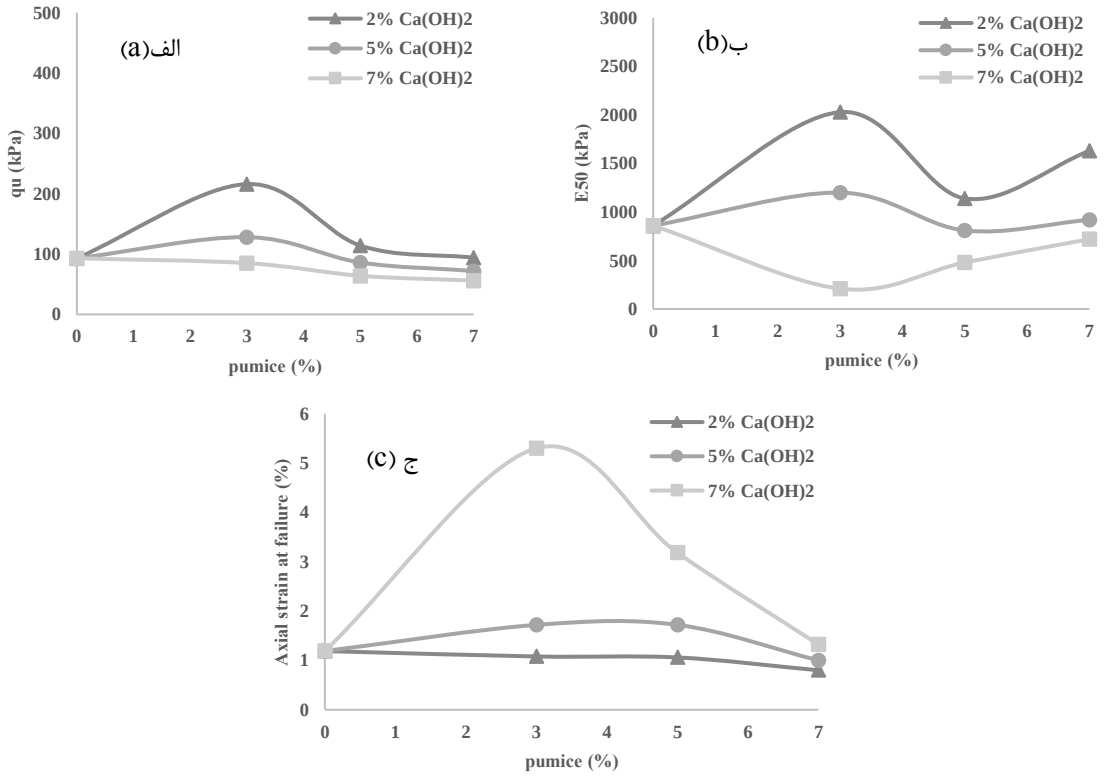
Fig. 5. The effect of the chemical combination of 3% pumice with 2% $Ca(OH)_2$ on the results of the compaction test on saline silty soil.

نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری تک محوری

نتایج حاصل از آزمون مقاومت فشاری تک محوری بر روی نمونه‌های خاک لای‌دار شور سدیمی مخلوط شده با ترکیب ذرات پومیس و محلول هیدروکسید کلسیم پس از یک روز عمل آوری در این بخش ارائه شده است. همان‌گونه که در شکل(۶-الف) مشاهده می‌شود، ترکیب ۳ ٪ پومیس به همراه ۲ ٪ هیدروکسید کلسیم پس از یک روز عمل آوری مقاومت فشاری تک

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.16.4.1014049]

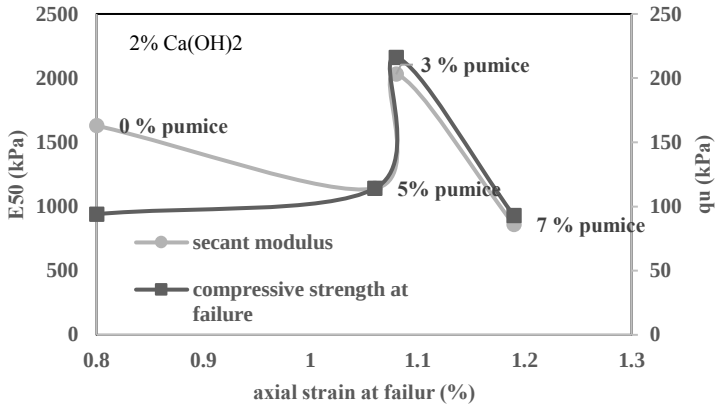
محوری را در لحظه گسیختگی نمونه تثبیت شده را به میزان ۱/۳۲ برابر افزایش داده است. اگرچه با افزایش مقادیر پومیس و هیدروکسید کلسیم در نمونه‌ها عموماً توانایی باربری نسبت به حالت تثبیت نشده کاهش یافته است. همچنین در شکل(۶-ب) دیده می‌شود ترکیب اشاره شده مقدار مدول سکانت را ۱/۳۶ برابر نسبت به حالت خاک خالص بهبود داده است. به عبارتی خاصیت ارتجاعی خاک لای شور تثبیت شده افزایش یافته است. از سوی دیگر، طبق نمودارهای شکل(۶-ج) می‌توان دریافت همان ترکیب شیمیایی میزان کرنش محوری در لحظه گسیختگی نمونه تثبیت شده را ۹/۲۴ درصد کاسته است. به بیان دیگر، رفتار خاک تثبیت شده بصورت ترد و شکننده می‌باشد. همچنین، به منظور بیان رفتار نمونه خاک تثبیت شده در شکل(۷)، تأثیر ترکیب بهینه ۳ ٪ پومیس به همراه ۲ ٪ هیدروکسید بر روی نتایج حاصل از آزمون مقاومت فشاری تک محوری ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مخلوط مذکور باعث بهبود خصوصیات باربری خاک لای‌دار شور سدیمی است بگونه‌ای که علاوه بر بالا بردن توانایی باربری، رفتار ارتجاعی خاک تثبیت شده را بهبود تا داده و با توجه به مقدار کرنش محوری در لحظه گسیختگی تا حدودی رفتار انعطاف‌پذیر شده است.



شکل ۶. تأثیر ترکیب پومیس و هیدروکسید کلسیم بر روی نتایج آزمون مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌های مورد مطالعه، الف- مقاومت فشاری تک محوری، ب- مدول سکانت، ج- کرنش محوری در لحظه گسیختگی.

Fig. 6. The effect of the combination of pumice and $Ca(OH)_2$ on the uniaxial compressive strength test results of the studied specimens, a- uniaxial compressive strength, b-secant modulus, c-axial strain at failure.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.16.4.1014049]



شکل ۷: تأثیر ترکیب شیمیایی ۳ ٪ پومیس به همراه ۲ ٪ هیدروکسید کلسیم بر روی نتایج حاصل آزمایش مقاومت فشاری تک محوری خاک لای‌دار شور سدیمی.

Fig. 7. The effect of the chemical combination of 3% pumice with 2% calcium hydroxide on the results of the uniaxial compressive strength test on saline silty soil.

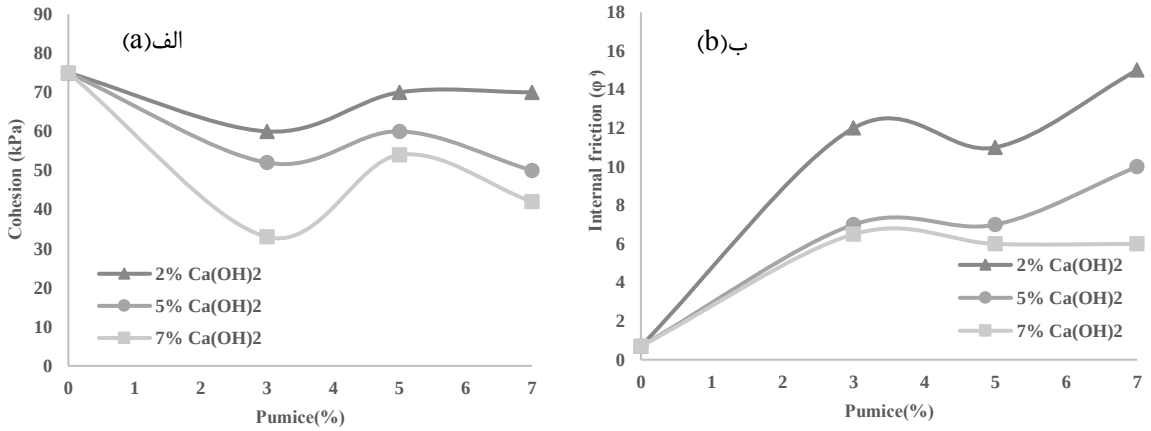
بنابراین می‌توان بیان کرد بالا بودن درصد مواد آلومین‌دار و سیلیس‌دار پومیس باعث شده است پس از یک روز عمل آوری واکنش سمنتاسیون (پوزولانی) مناسبی را به وجود آورد. همچنین افزودن ۲ درصد هیدروکسید کلسیم به خاک تثبیت شده سبب تسریع در واکنش سمنتاسیون شده است. بطوری که تشکیل سیلیکات سدیم به دلیل حضور سدیم در خاک بهسازی شده به همراه کربنات کلسیم استخوان‌بندی جدید و قوی را به وجود آورده است که خروجی آن افزایش قابل توجه توانایی باربری است. همچنین با توجه به مقادیر مدول سکانت و کرنش محوری در لحظه گسیختگی بافت جدید، شکل‌پذیری مناسبی را در خاک تثبیت شده ارائه نموده است. همچنین در صورتی که ترکیب شیمیایی حاضر جهت تثبیت مصالح و احداث لایه‌های روسازی راه استفاده شود بدنه راه را جهت بارگذاری سریع می‌تواند آماده نماید که از نقطه نظر اقتصادی و توسعه پایدار برای منطقه حائز اهمیت است. البته با افزایش مدت زمان عمل آوری برای تأثیرگذاری بیشتر ذرات پومیس در خاک لای‌دار شور سدیمی نتایج بهتری بدست خواهد آمد.

نتایج حاصل از آزمایش برش مستقیم

به‌منظور برآورد پارامترهای مقاومت برشی خاک لای‌دار شور سدیمی مورد مطالعه در مقابل تغییر شکل‌های برشی و نشست‌های ناشی از تنش برشی، آزمایش برش مستقیم بر روی نمونه‌های تثبیت شده با مخلوط پومیس و هیدروکسید کلسیم تحت اثر تنش‌های قائم ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلوپاسکال انجام گرفت. میزان تغییرات چسبندگی نمونه‌های تثبیت شده را بعد از یک روز عمل آوری می‌توان طبق نمودارهای شکل(۸-الف) مشاهده نمود. در حالت کلی ترکیب ذرات پومیس و هیدروکسید کلسیم تأثیر مناسبی بر روی میزان چسبندگی خاک تثبیت شده نداشته و به‌طور متناوب یک روند افزایشی(کمتر از میزان چسبندگی خاک اصلی) و کاهشی را ارائه نموده است. اگرچه ترکیب ذرات پومیس به همراه ۲ ٪ هیدروکسید کلسیم میزان چسبندگی در خاک تثبیت شده را تا حد زیادی نزدیک به خاک خالص رسانده است. در شکل(۸-ب) تغییرات زاویه اصطکاک داخلی نمونه‌های خاکی تثبیت شده ارائه شده است. بر خلاف چسبندگی، ترکیب ذرات پومیس به همراه هیدروکسید کلسیم اثر قابل توجه بر روی زاویه اصطکاک داخلی دیده می‌شود. خاک لای‌دار شور سدیمی به دلیل کانی‌های میکا و شکل ورقه‌ای

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.16.4.1014049]

ذرات در حالت تثبیت نشده دارای زاویه اصطکاک داخلی بسیار پایینی است. ولی زمانی که ترکیب ۷ ٪ پومیس به همراه ۲ ٪ هیدروکسید کلسیم به خاک مورد مطالعه اضافه می‌شود بعد از یک روز عمل آوری، مقدار زاویه اصطکاک داخلی ۲۰ برابر افزایش می‌یابد. با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان بیان نمود، خاک لای‌دار شور سدیمی به دلیل آنکه طبق جدول(۲) دارای شاخص خمیری پایینی می‌باشد. بنابراین از نقطه نظر ذات خاک دارای میزان چسبندگی پایینی است. همچنین، پایین بودن مدت زمان عمل آوری سبب شده است واکنش‌های شیمیایی اولیه مربوط به سمنتاسیون در خصوصیات ذاتی مربوط به چسبندگی خاک مورد مطالعه تغییر قابل ملاحظه‌ای را به وجود نیاورد. از سوی دیگر، به دلیل واکنش سمنتاسیون ناشی مواد آلومین‌دار و سیلیس‌دار موجود در پومیس باعث شده تا مواد سمنته ناشی از سیلیکات سدیم و کربنات کلسیم استخوان‌بندی قوی را تشکیل دهند و زاویه اصطکاک داخلی نمونه‌های تثبیت شده را افزایش دهند. البته افزایش مدت زمان عمل آوری می‌تواند اثر بهتری بر روی بالا رفتن مقدار زاویه اصطکاک داخلی داشته باشد.



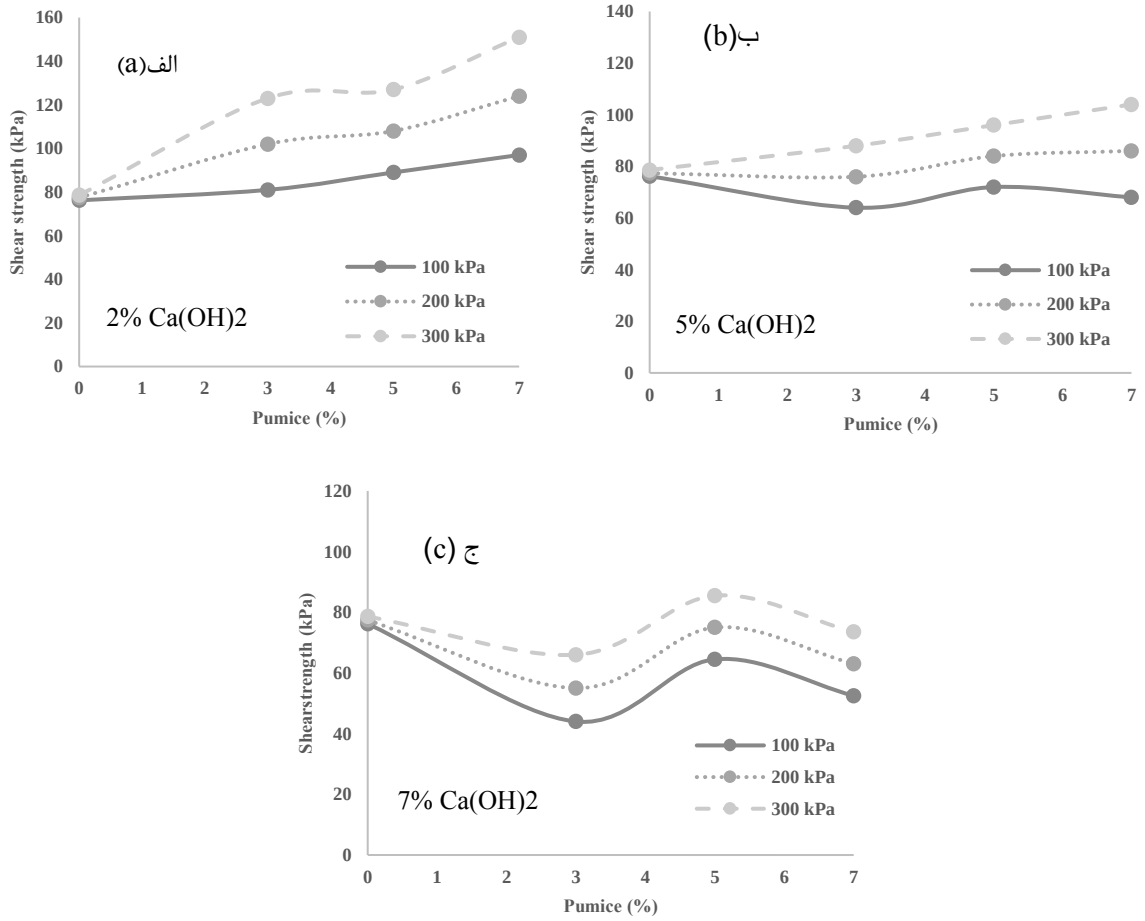
شکل ۸. تأثیر ترکیب پومیس و هیدروکسید کلسیم بر روی نتایج آزمون برش مستقیم نمونه‌های مورد مطالعه، الف- چسبندگی، ب- زاویه اصطکاک داخلی.

Fig. 8. The effect of the combination of pumice and $Ca(OH)_2$ on the direct shear test results of the studied specimens, a- cohesion, b- internal friction.

در ادامه، تأثیر ترکیب پومیس به همراه هیدروکسید کلسیم بر روی مقاومت برشی در لحظه گسیختگی خاک لای‌دار شور سدیمی مورد ارزیابی قرار گرفته است. در شکل(۹-الف) اثر مخلوط نمودن ۲ درصد هیدروکسید کلسیم با پومیس و افزودن آن به نمونه‌های مورد مطالعه نشان داده شده است. با توجه به نمودارها می‌توان دریافت هنگامی‌که ۷ درصد پومیس با نمونه خاک مخلوط می‌شود مقاومت برشی در تمامی بارگذاری‌ها به‌طور میانگین ۵۸ درصد رشد کرده است. همچنین، زمانی که ۵ درصد هیدروکسید کلسیم به همراه پومیس به نمونه‌ها افزوده می‌شود طبق شکل(۹-ب) می‌توان مشاهده نمود با مخلوط کردن ۷ درصد پومیس می‌تواند در تمامی بارها به‌طور میانگین ۹/۴ درصد اثر مثبت بر مقاومت برشی داشته باشد. در انتها، در شکل(۹-ج) تغییرات مقاومت برشی در لحظه گسیختگی نمونه‌های مورد مطالعه هنگامی‌که ۷ درصد هیدروکسید کلسیم به همراه پومیس به خاک اضافه شده نشان داده شده است. در این حالت ترکیب، رفتار متفاوتی از ترکیب‌های اشاره شده در خاک لای‌دار شور سدیمی مشاهده می‌شود. بطوریکه بالا رفتن مقدار هیدروکسید کلسیم تأثیر مناسبی بر روی مقاومت برشی

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.16.4.1014049]

خاک بهسازی شده با پومیس نشان نداده و تقریباً آن را در تمامی بارها به‌طور میانگین کاهش یافته است. فقط در زمانی که میزان بار برابر ۳۰۰ کیلوپاسکال بوده و ۵ درصد پومیس به خاک لای دار شور سدیمی افزوده شده و باعث گردیده تا مقاومت برشی در لحظه گسیختگی ۸/۸ درصد افزایش یابد.



شکل ۹. تأثیر ترکیب پومیس و هیدروکسید کلسیم بر روی مقاومت برشی نمونه‌های مورد مطالعه، الف- ۲ ٪ هیدروکسید کلسیم، ب- ۵ ٪ هیدروکسید کلسیم، ج- ۷ ٪ هیدروکسید کلسیم.

Fig. 9. The effect of the combination of pumice and $Ca(OH)_2$ on the shear strength of the studied specimens, a- 2% $Ca(OH)_2$, b-5% $Ca(OH)_2$, c-7% $Ca(OH)_2$.

با مشاهده نتایج کلی بدست آمده از آزمون برش مستقیم بنظر می‌رسد افزودن پومیس به خاک لای‌دار شور سدیمی تأثیرگذاری مناسبی به نمایش گذاشته است و در حالت کلی می‌توان بیان نمود، ساختار و بافت جدید تشکیل یافته ناشی از مخلوط پومیس و هیدروکسید کلسیم و تولید و ساخت مواد سمنته سیلیکات سدیم و کربنات کلسیم ناشی واکنش پوزولانی پس از یک روز عمل آوری استخوان‌بندی جدیدی را ایجاد نموده‌اند. این ساختار جدید باعث می‌شود تا تماس و اصطکاک بین ذرات، چسبندگی تا حدودی و مقاومت برشی در لحظه گسیختگی افزایش یابد. همچنین، نتایج بدست آمده این امکان را می‌دهد تا از ترکیب شیمیایی مذکور در خاک لای‌دار شور سدیمی جهت مصرف و کاربرد در ساخت لایه‌های روسازی راه

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.16.4.1014049]

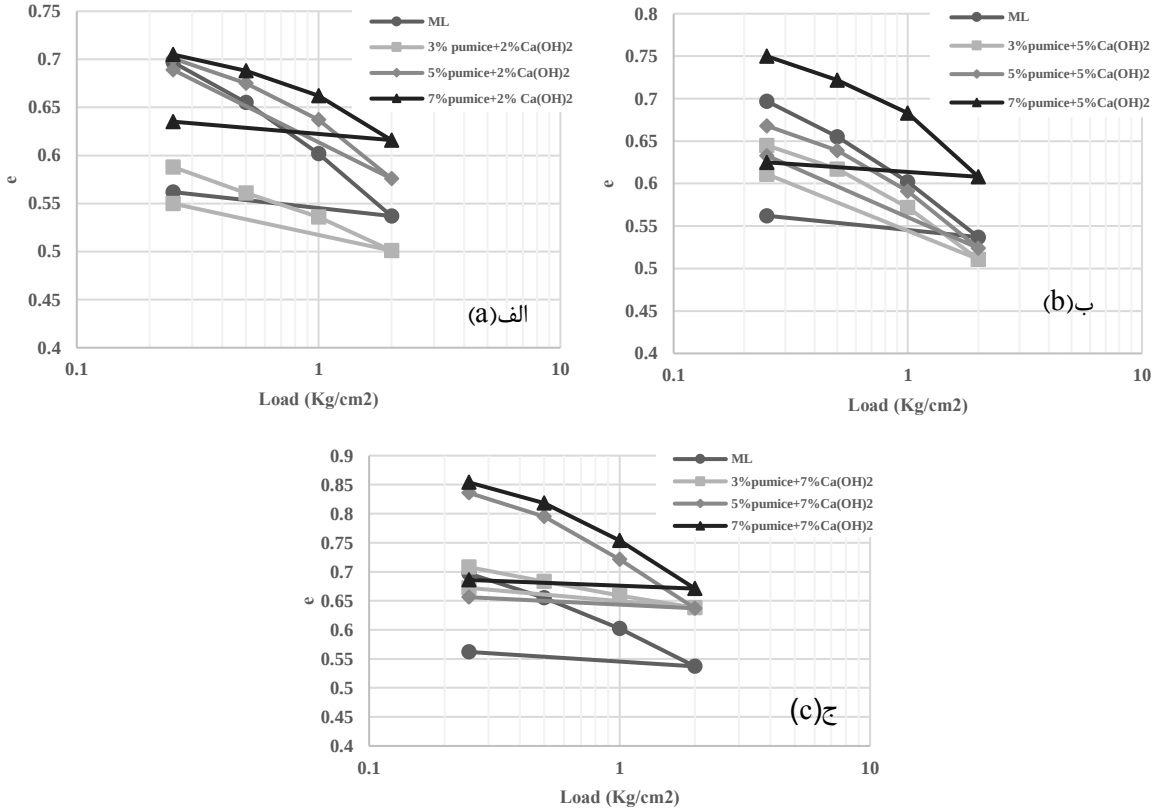
و تثبیت خاک زیر پی‌ها استفاده نمود. زیرا مقاومت برشی خاک بهسازی شده افزایش یافته و مانع از وقوع تغییر شکل‌های برشی به دلیل بارهای قائم حاصل از وسایل نقلیه و ساختمان‌ها می‌گردد. اگرچه، افزایش مدت زمان عمل آوری بیشتری تأثیر بهتری در افزایش مقاومت و توانایی برابری خاک اصلاح شده داشته باشد.

نتایج حاصل از آزمایش تحکیم

از رفتارهای مهم در خاک‌های ریزدانه نشست تحکیم و تورم احتمالی ناشی از جذب آب و رطوبت می‌باشد که می‌تواند به سازه‌های سطحی و ابنیه‌های ژئوتکنیکی آسیب برساند. در تحقیق حاضر، با انجام آزمایش تحکیم، تأثیر ترکیب پومیس و هیدروکسید کلیسم بر روی مقدار نشست و تورم خاک لای‌دار شور سدیمی بعد از یک روز عمل آوری ارزیابی شده است. تغییرات میزان نسبت تخلخل در نمونه‌های تثبیت شده در شکل(۱۰-الف، ب و ج) ارائه شده است. همانطورکه نمایان است، با مقایسه نمودارها می‌توان دریافت ترکیب ۳ ٪ پومیس به همراه ۲ ٪ هیدروکسید کلسیم بیشترین میزان کاهش را در نسبت تخلخل ایجاد نموده است و به عبارت دیگر این ترکیب شیمیایی مانع از وقوع نشست‌های گسترده تحکیمی در خاک مورد مطالعه شده است. همچنین در شکل(۱۱- الف) تأثیر مواد افزودنی ذکر شده بر روی تغییرات تورم آزاد نمونه‌های مورد مطالعه نشان داده شده است. با توجه به نمودارهای شکل(۱۱-الف) می‌توان دریافت هنگامی‌که پومیس به خاک لای‌دار شور سدیمی اضافه می‌شود سبب گردیده است تا حدی مقدار تورم آزاد در تمامی مقادیر هیدروکسید کلسیم کاسته شود. بیشترین کاهش مربوط به ترکیب ۷ درصد پومیس به همراه ۲ درصد هیدروکسید کلسیم است و مقدار تورم آزاد را به مقدار ۸۶ درصد کاسته است. اگرچه خاصیت خمیری خاک لای دار شور سدیمی مورد مطالعه پایین است ولی ترکیب ذکر شده سبب شده به دلیل واکنش سمنتاسیون و پوزولان و تغییر در ساختار و بافت خاک خاصیت جذب آب کاهش یافته و در نتیجه آن میزان تورم آزاد تا حد زیادی کاهش یافته است. همچنین، نمودارهای شکل(۱۱- ب) تغییرات شاخص فشردگی نشست تحکیم(Cc) نمونه‌های تثبیت شده توسط پومیس به همراه هیدروکسید کلسیم را نشان می‌دهد. مخلوط کردن ترکیب ۳ درصد پومیس به همراه ۷ درصد هیدروکسید کلسیم باعث شده تا مقدار شاخص فشردگی مربوط به نشست تحکیم ۶۸ درصد کاهش یابد. در ادامه، تأثیر پومیس بر روی ضریب تغییر حجم(mv) نمونه‌های مورد مطالعه بر اساس شکل(۱۱-ج) ارائه شده است. با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان دریافت ترکیب ۳ درصد پومیس به همراه ۲ درصد هیدروکسید کلسیم مقدار mv را ۶۹ درصد بکاهد.

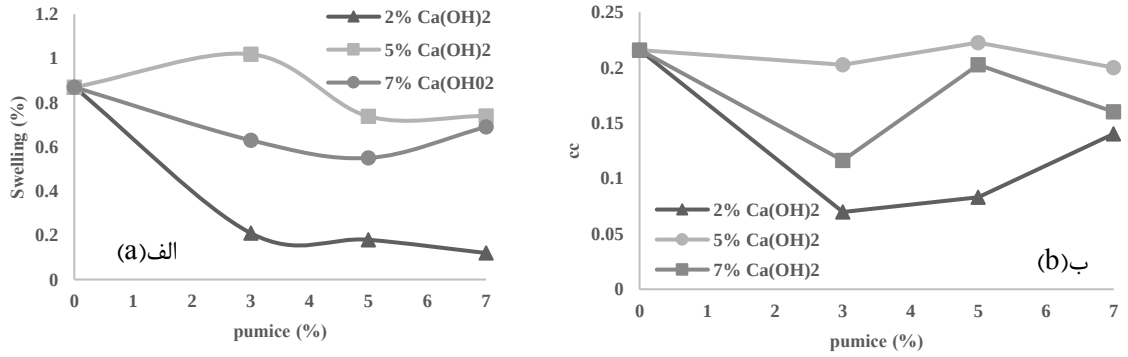
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.22034/JEG.2023.16.4.1014049]



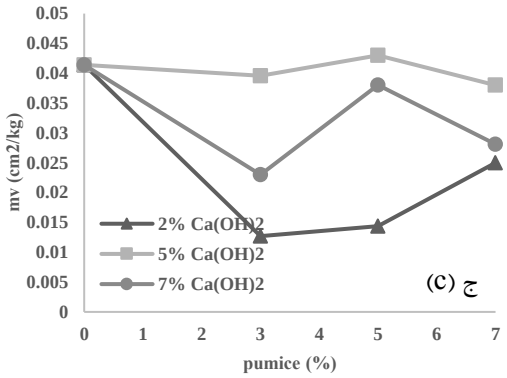
شکل ۱۰. تأثیر ترکیب پومیس و هیدروکسید کلسیم بر روی نسبت تخلخل خاک مورد مطالعه، الف- ۲ ٪ هیدروکسید کلسیم، ب- ۵ ٪ هیدروکسید کلسیم، ج- ۷ ٪ هیدروکسید کلسیم.

Fig. 10. The effect of the combination of pumice and $Ca(OH)_2$ on the void ratios of the studied specimens, a-2% $Ca(OH)_2$, b-5% $Ca(OH)_2$, c-7% $Ca(OH)_2$.



[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.22034/JEG.2023.16.4.1014049]



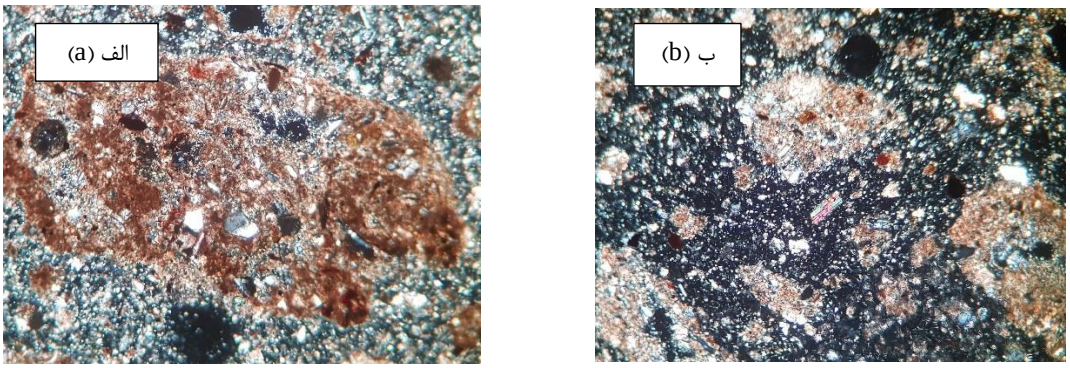
شکل ۱۱. تأثیر پومیس بر نتایج حاصل از آزمایش تحکیم نمونه‌های مورد مطالعه، الف- تورم آزاد، ب-شاخص فشردگی تحکیم، ج- ضریب تغییر حجم.

Fig. 11. The effect of pumice on the consolidation test results of the studied specimens, a- free swelling, b- compression index, c- coefficient of volume variation.

با مشاهده تمامی نتایج حاصل از آزمون تحکیم می‌توان ذکر نمود افزودن پومیس به خاک لای‌دار شور سدیمی با درصدهای مختلف به همراه هیدروکسید کلسیم پس از یک روز عمل آوری در حالت کلی سبب کاهش میزان تورم و جذب آب شده‌اند. البته تحلیل داده‌ها نشان می‌دهد پومیس به مدت زمان بیشتری برای تکمیل واکنش پوزولانی خود در هنگام ترکیب با این نوع خاک دارد.

در انتها، با مشاهده تمامی نتایج بدست آمده از آزمون‌های انجام یافته مختلف بر روی نمونه‌های تثبیت شده می‌توان دریافت ترکیب مشخصی از ذرات پومیس و هیدروکسید کلسیم توانسته است رفتار ژئوتکنیکی خاک لای‌دار شور سدیمی را بهبود ببخشد. طبق تصاویری پتروگرافی نمونه‌های خاکی تثبیت شده با پومیس که در شکل(۱۲-الف و ب) ارائه شده می‌توان دید اگرچه مدت زمان عمل آوری نمونه‌ها کوتاه بوده ولی واکنش سمنتاسیون(پوزولان) به دلیل حضور هیدکروسید کلسیم به عنوان کاتالیزور در کنار پومیس خیلی سریع تشکیل شده است. همچنین، وجود سدیم در خاک مورد مطالعه سبب شده است هنگامی‌که پومیس با آن مخلوط می‌شود سیلیکات سدیم به همراه کربنات کلسیم تشکیل شوند که باعث به وجود آوردن مواد سمنته شود که می‌تواند یک استخوان‌بندی قوی را در بافت جدید تازه تشکیل یافته به وجود آورد. البته با توجه به استفاده‌هایی که از خاک تثبیت شده مورد مطالعه می‌توان انتظار داشت درصدهای مختلفی از پومیس جوابگو باشد. بطوریکه ترکیب ۳ درصد پومیس به همراه ۲ درصد هیدروکسید کلسیم بالاترین مقاومت فشاری تک محوری را نشان می‌دهد و به دلیل تغییر ساختار و بافت خاک تثبیت شده ترکیب اشاره شده سبب کاهش تورم و نشست تحکیمی در خاک لای‌دار شور سدیمی و مناسب‌ترین مقاومت برشی را در مقادیر بارگذاری‌های پایین تا متوسط ارائه نماید.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.16.4.1014049]



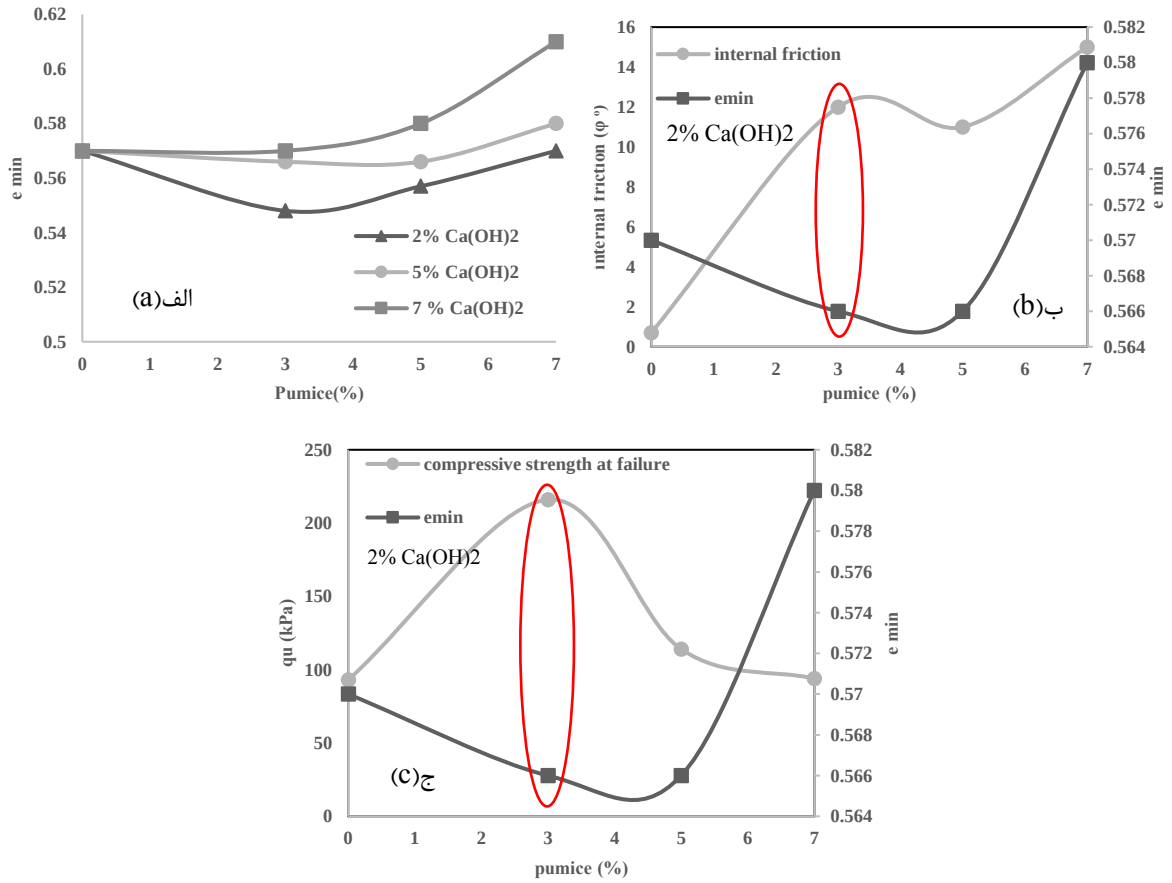
شکل ۱۲. تصاویر پتروگرافی تأثیر پومیس بر روی خاک شور لای‌دار سدیمی مورد مطالعه، الف: خاک مورد مطالعه، ب- خاک مورد مطالعه به همراه ۳ درصد پومیس و ۲ درصد هیدروکسید کلسیم.

Fig. 12. Petrographic images of the effect of pumice with $Ca(OH)_2$ on the studied saline sodium silty soil, a- unimproved soil, b- improved soil with 3% pumice and 2% $Ca(OH)_2$.

در انتها، با توجه به نمودارهای مقایسه‌ای ارائه شده در شکل(۱۳-الف، ب و ج) می‌توان مشاهده نمود که ترکیب ۳٪ پومیس به همراه ۲٪ هیدروکسید کلسیم نتیجه مناسبی را از نقطه نظر پارامترهای ژئوتکنیکی در اصلاح و تثبیت خاک لای‌دار شور سدیمی پس از یک روز عمل آوری ارائه نموده است. در شکل(۱۳- الف) می‌توان دریافت میزان بیشترین کاهش فضای خالی بین ذرات تازه تشکیل یافته حاصل از ترکیب ۳ درصد پومیس با ۲ درصد هیدروکسید کلسیم است که در مقایسه با حالت بهسازی نشده نسبت تخلخل حداقل را ۳/۸ درصد کاسته است. این شرایط بیان کننده آن است با کاهش فضای خالی بین ذرات تازه تشکیل یافته ناشی از ترکیب پومیس با خاک شور سدیمی و بالا رفتن تماس سطحی بین آن‌ها و به دلیل وجود مواد آلومین‌دار و سیلیس‌دار در پومیس و تشکیل واکنش‌های شیمیایی و به وجود آمدن سیلیکات سدیم به همراه کربنات کلسیم یک بافت جدید به وجود آمده است. همانطورکه در شکل(۱۳-ب) قابل‌رؤیت است همین بافت جدید تشکیل شده ناشی از ترکیب اشاره شده زاویه اصطکاک مناسبی را به وجود آورده و طبق نمودارهای شکل(۱۳-ج) نیز می‌توان دریافت همین ساختار و ترکیب بهینه مناسب‌ترین توانایی باربری را ارائه نموده است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.22034/JEG.2023.16.4.1014049]



شکل ۱۳. تأثیر ترکیب بهینه ۳ ٪ پومیس+ ۲ ٪ هیدروکسید کلسیم بر ساختار و بافت خاک شور لای‌دار سدیمی الف: نسبت تخلخل حداقل، ب- زاویه اصطکاک داخلی، ج- مقاومت فشاری تک محوری.

Fig.13. The effect of the optimum mixture of 3% pumice and 2% calcium hydroxide on the fabric and skeleton of saline sodium silty soil, a-minimum void ratio, b- internal friction angle, uniaxial compressive strength.

نتیجه‌گیری

یکی از موضوعات مهمی که می‌تواند در مناطقی که به دلیل عدم مدیریت منابع آب زیرزمینی دچار پدیده خشکسالی گردد ایجاد ریزگردها و بوجود آمدن خاک‌های ریزدانه شور سدیمی در اثر فرسایش می‌باشد. خاک‌های ریزدانه شور سدیمی نوعی از خاک‌های مسئله‌دار می‌باشند. زمانی که تحت تأثیر آب قرار می‌گیرند در آن‌ها می‌تواند پدیده تورم یا واگرایی به وقوع به پیوندد که سبب بروز آسیب‌های جدی در سازه‌های سطحی و ابنیه‌های ژئوتکنیکی گردد. در تحقیق حاضر سعی شده است از ماده بومی معدنی پومیس که در منطقه آذربایجان بصورت فراوان یافت می‌شود جهت تثبیت و بهسازی خصوصیات ژئوتکنیکی خاک لای‌دار شور سدیمی منطقه دشت تبریز در حوضه آبریز دریاچه ارومیه استفاده شده است. خلاصه نتایج مهم بدست آمده از تحقیق حاضر راه می‌توان بصورت زیر بیان نمود:

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.16.4.1014049]

۱- زمانی که ۳ ٪ وزنی پومیس به همراه ۲ ٪ هیدروکسید کلسیم با خاک لای‌دار شور مخلوط می‌گردد و جهت عمل آوری به مدت یک روز نگهداری می‌شود، وزن مخصوص خشک حداکثر(γ_{dmax}) به مقدار ۱/۱۵ درصد نسبت به حالت تثبیت نشده افزایش می‌یابد. همچنین، افزودن همان ترکیب ذکر شده پس از یک روز عمل آوری سبب شده تا مقدار رطوبت بهینه خاک تثبیت شده به مقدار ۱۱/۶ ٪ کاهش یابد.

۲- ترکیب ۳ ٪ پومیس به همراه ۲ ٪ هیدروکسید کلسیم پس از یک روز عمل آوری مقاومت فشاری تک محوری را در لحظه گسیختگی نمونه تثبیت شده را به میزان ۱/۳۲ برابر افزایش داده است. همچنین ترکیب اشاره شده مقدار مدول سکانت را ۱/۳۶ برابر نسبت به حالت خاک خالص بهبود داده است. در ادامه، همان ترکیب شیمیایی میزان کرنش محوری در لحظه گسیختگی نمونه تثبیت شده را ۹/۲۴ درصد کاسته است.

۳- در حالت کلی ترکیب ذرات پومیس و هیدروکسید کلسیم تأثیر مناسبی بر روی میزان چسبندگی خاک تثبیت شده نداشته و به‌طور متناوب یک روند افزایشی(کمتر از میزان چسبندگی خاک اصلی) و کاهشی را ارائه نموده است. اگرچه ترکیب ذرات پومیس به همراه ۲ ٪ هیدروکسید کلسیم میزان چسبندگی در خاک تثبیت شده را تا حد زیادی نزدیک به خاک خالص رسانده است. اگرچه، ترکیب ذرات پومیس به همراه هیدروکسید کلسیم اثر قابل توجهی را بر روی زاویه اصطکاک داخلی نشان داده است. زمانی که ترکیب ۷ ٪ پومیس به همراه ۲ ٪ هیدروکسید کلسیم به خاک مورد مطالعه اضافه می‌شود بعد از یک روز عمل آوری، مقدار زاویه اصطکاک داخلی ۲۰ برابر افزایش می‌یابد.

۴- هنگامی‌که پومیس به خاک لای‌دار شور سدیمی اضافه می‌شود سبب گردیده است تا حدی مقدار تورم آزاد در تمامی مقادیر هیدروکسید کلسیم کاسته شود. بیشترین کاهش مربوط به ترکیب ۷ درصد پومیس به همراه ۲ درصد هیدروکسید کلسیم است و مقدار تورم آزاد را به مقدار ۸۶ درصد کاسته است. همچنین، مخلوط کردن ترکیب ۳ درصد پومیس به همراه ۷ درصد هیدروکسید کلسیم باعث شده تا مقدار شاخص فشردگی مربوط به نشست تحکیم ۶۸ درصد کاهش یابد و ترکیب ۳ درصد پومیس به همراه ۲ درصد هیدروکسید کلسیم مقدار mv را ۶۹ درصد بکاهد.

بنابراین، با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان اشاره نمود ترکیب پومیس به همراه هیدروکسید کلسیم به‌عنوان کاتالیزور بعد از یک روز عمل آوری می‌تواند تأثیر بسزایی بر روی رفتار ژئوتکنیکی خاک لای‌دار شور سدیمی بگذارد. در صورتیکه در هنگام تثبیت خاک مذکور توانایی باربری مدنظر باشد ترکیب بهینه ۳ درصد پومیس به همراه ۲ درصد هیدروکسید کلسیم بوده و این ترکیب بر اصلاح میزان مقاومت برشی و زاویه اصطکاک داخلی مؤثر است. البته برای موضوعات مربوط به کاهش میزان نشست تحکیم مقدار بهینه مخلوط ۷ درصد پومیس به همراه ۲ درصد هیدروکسید کلسیم مشاهده شده است. البته لازم بذکر است مدت زمان عمل آوری، مقدار Ph محیط و شرایط آب و هوایی همچون سیکل‌های ذوب و یخبندان می‌تواند بر نتایج برآورد شده تأثیرگذار باشد که بایستی در تحقیقات آینده به آن رسیدگی شود.

منابع

بهروز سرند، ف، دیبامهر، افشین و وفایی پور، ر.، ۱۴۰۲. تثبیت خاک مارن سبز تبریز با استفاده زئولیت فعال قلیایی و متا رس. نشریه مهندسی عمران و محیط زیست، در مرحله چاپ نهایی.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.22034/JEG.2023.16.4.1014049]

ضیایی مؤید، ر. و هراتیان، م.، ۱۳۸۹، تأثیر تثبیت با آهک و پلیمر و تسلیح با الیاف پلیمری بر رفتار تغییر حجمی خاک‌های رسی شور. نشریه زمین‌شناسی مهندسی دانشگاه خوارزمی، ۴(۱): ۸۵۴-۸۲۷.

Albayrak, Z. N. K., and Gencer, G., 2021, The Usability of Clay/Pumice Mixtures Modified with Biopolymer as an Impermeable Liner. KSCE Journal of Civil Engineering, 25, 28-36.

Ambroise, J., Murat, M. and Pera, J 1985. Hydration reaction and hardening of calcined clays and related minerals: V. Extension of the research and general conclusions. Cement and Concrete Research, 15, 261–268.

ASTM D421, 1985. Dry Preparation of Soil Samples for Particle-Size Analysis and Determination of Soil Constants. Annual book of ASTM standards.

ASTM D422, 1963. Standard Test Method for article-Size Analysis of Soils. Annual book of ASTM standards.

ASTM D4318, 1995. Standard test method for liquid limit, plastic limit and plasticity index for soils. Annual book of ASTM standards.

ASTM D854, 2002. Standard test method for specific gravity of soil solids by water pycnometer. Annual book of ASTM standards.

ASTM C618, 2001. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolana for Use as Mineral Admixture. Annual book of ASTM standards.

ASTM C305, 2016. Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency. Annual book of ASTM standards.

ASTM D698, 2000. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12,400 ft-lbf/ft3 (600 kN-m/m3)). Annual book of ASTM standards.

ASTM D2166, 2016. Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil. Annual book of ASTM standards.

ASTM-D 3080, 1998. Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained condition, Annual book of ASTM standards.

ASTM D2435, 2011. Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading. Annual book of ASTM standards

Binici, H., 2013. Engineering properties of geopolymer incorporating slag, fly ash, silica sand and pumice. ACEE, 1(3), 108-123.

Cadir Cuma, C., and Vekli, M., 2022, Usage of waste marble powder and pumice powder to improve the engineering properties of soft clays. International Journal of Environmental Science and Technology. 19, 6481-6490.

Caldaron, A. A. and Burg, R. G., 1994. High-reactivity metakaolin: a new generation mineral. Concrete International journal. 16(11), 37–40.

Cimen, O., Saltan, M., and Keskin, N., 2015, Stabilization of clayey subgrade with waste pumice for road infrastructure. ournal Science and Engineering of Composite Materials, 22(5), 583-590.

Davidovits, J., 1991. Geopolymers, Inorganic polymeric new materials. Journal of Thermal Analysis, 37(8), 1633-1656.

Davidovits, J., 1999. Chemistry of geopolymeric systems, terminology. Proceeding of Geopolymer, International Conference on Geopolymer, Paris, France, 9–40.

Duxson, P., and Provis, J. L., 2008. Designing precursors for geopolymer cements. Journal of American Ceramic Society, 91(12), 3864–3869.

Li, C., Sun, H. and Li, L 2010. A review: The comparison between alkali-activated slag (Si+Ca) and metakaolin (Si+Al) cements. Cement and Concrete Research, 40, 1341–1349.

Lee, S. K. and Stebbins, J. F., 2006. Disorder and the extent of polymerization in calcium silicate and aluminosilicate glasses: O-17 NMR results and quantum chemical molecular orbital calculations. Geochimica Cosmochimica Acta, 70, 4275–4286.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.22034/JEG.2023.16.4.1014049]

Miao, Sh., Shen, Z., Wang, X., Luo, F., Huang, X., and Wei, C., 2017. Stabilization of Highly Expansive Black Cotton Soils by Means of Geopolymerization. Journal of material in civil engineering, 29(10), 04017170.

Phetchuay, C., Horpibulsuk, S., Arulrajah, A., Suksiripattanapong, C. and Udomchai, A., 2016. Strength development in soft marine clay stabilized by fly ash and calcium carbide residue based geopolymer. Applied Clay Science, 134–142.

Provis, J. L., Deventer, J. S. J., and Van, D., 2009. Geopolymers: structures, processing, properties and industrial applications. 1st edition, Elsevier publication.

Qin Yin, H., Liu Fu, H., and Zhou, Q., 2008. Influencing factors of compressive strength of solidified inshore saline soil using SH lime-ash. Journal of Central South University and Technology, 15(s1), 386−390.

Tutunchi, S., Dabiri, R. and Dilmeghani, S., 2021. Experimental Studies in Ultrasonic Pulse Velocity of Roller Compacted Concrete Containing Ground Granulated Blast Furnace Slag in Cold Region, International journal of civil engineering, 19(8): DOI:10.1007/s40999-021-00637-5.

Wan, H., Shui, Z. and Lin, Z., 2004. Analysis of geometric characteristics of GGBS particles and their influences on cement properties. Cement and Concrete Research, 34, 133–137.

Yung-Ming, L., Cheng-Yong, H., Al Bakri, M., and Hussin, K., 2016. Structure and properties of clay-based geopolymer cements: a review. Progress in Materials Science, 83, 595–629.

Zhang Z, Wang H, Zhu Y, Reid A, Provis J L, and Bullen, F., 2014. Using fly ash to partially substitute metakaolin in geopolymer synthesis. Applied Clay Science, 88: 194-201.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.22034/JEG.2023.16.4.1014049]

The effect of pumice on the geotechnical properties of sodium salty silty soil

Aylar Hosniyeh [1], Rouzbeh Dabiri [2*], Alireza Alizadeh Majdi [3], Elnaz Sebbagh [4, 5]

1. Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran
2. Associate Professor, Department of Civil Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran
3. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran
4. Assistant Professor, Department of Soil Science, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran
5. Sustainable Development Management Research Center of Urmia Lake Basin and Aras River, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

Received: 26 Jan 2023 Accepted: 11 Mar 2023

Abstract

Silty soils containing sodium content, known as salty silty soils, are classified as another type of problematic soil. When this type of soil comes into contact with water, it can swell and diverge, leading to settlement and deformation. Considering that a significant part of the Urmia Lake basin and the Tabriz plain consists of sodium-rich fine soils, the aim of the project is to improve the quality of the soils. Therefore, one of the main objectives of this study is to assess the sediments within the lake bed in order to reduce erosion and to evaluate the possibility of improving and stabilizing the sodium saline silty soils in the area using the geopolymerization technique. To achieve this, pumice material with pozzolanic properties was separately mixed with the soil under investigation at weight percentages of 3%, 5% and 7%, together with a calcium hydroxide solution as a catalyst at concentrations of 2%, 5% and 7%. The samples were then cured for one day. Laboratory tests, including compaction, uniaxial compressive strength, direct shear, and consolidation, were carried out to evaluate the geotechnical behavior of the improved soil. The results obtained indicate that the combination of 3% pumice with 2% calcium hydroxide increased the uniaxial compressive strength of the stabilized sample by 1.32 times after one day of curing. In addition, the mixture of 7% pumice with 2% calcium hydroxide significantly improved the internal friction angle by 20 times. Finally, the combination of 7% pumice with 2% calcium hydroxide reduced the value of free swelling potential by up to 86%.

Keywords: Fine soil, Silt, Saline, Sodium, Pumice, Improvement.

Introduction

Over the past two decades, due to mismanagement of water resources and a decrease in rainfall, Lake Urmia in northwestern Iran has been at risk of drying up, with reports suggesting that only 20% of the lake's total volume contains water and much of the lake's surface area (nearly 85% and about 5000 square kilometres) has dried up. Due to the high salinity of the water in this lake, the remaining soil is salty and subject to severe wind erosion due to the high wind speeds in the area. This erosion causes the movement of sediment particles and the production of fine dust in the region, leading to the loss of vegetation in the area and desertification, and has affected the economy of the inhabitants of the region On the other hand, the saline soils resulting from this erosion can cause many problems for

*Corresponding author: rouzbehdabiri@yahoo.com
DOI: http://doi.org/10.22034/JEG.2023.16.4.1014049

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.16.4.1014049]

construction projects. Settlement and swelling are among the critical issues in such soils. Due to the rapid development of cities and the construction of a network of roads and highways between cities, engineers are forced to build important projects on such soils. When these soils are placed in the vicinity of water or when water flows through the cracks in the soil, the clay particles become suspended in the water and erode. The exchangeable sodium ion is the main cause of dispersiveness in fine silty or clayey soils. In other words, divergence is a physico-chemical phenomenon whereby fine clay particles in the vicinity of water lose their cohesion and repel each other in the presence of water. Considering that saline clay soils cover a large part of Iran and the Lake Urmia basin, the present study aimed to evaluate the sediments of the lake bed to prevent their erosion and the possibility of improving sodium saline fine soil in the area of Tabriz Plain and the mentioned basin by applying pumice in the geopolymerization process.

Materials and Methods

As mentioned in the previous section, the aim of the current research is to evaluate the possibility of improving the sodium saline fine soil of the Tabriz plain by the use of pumice materials and the application of the depolymerization method. Sodic fine soil was prepared from the Mayan region of Tabriz. Pumice, which is of volcanic origin and abundant in the Azerbaijan region, was obtained from mines near Tabriz. The particle size distribution of the materials was determined according to ASTM D421 and ASTM D422. Based on the Unified Soil Classification System, the sodium saline fine soil is ML. ASTM D4318-95a and ASTM D854 were used to determine the plasticity index (PI) and specific gravity (Gs) of the materials. On the other hand, calcium hydroxide solution $Ca(OH)_2$, mixed at 74 grams per liter of water, is used as a catalyst to accelerate the chemical reaction between the added materials and the studied silty soil, taking into account its chemical properties. The amount of catalyst solution was estimated by trial and error, and 2%, 5% and 7% by weight were considered for the samples studied. As mentioned in the previous sections, it has been observed that pumice has not yet been used with the depolymerization method to improve the geotechnical properties of the sodium-saline silty soils of the Tabriz Plain. Therefore, in order to make a proper comparison between the results that will be obtained from the tests, the amounts of pumice have been mixed with the studied soil at the rate of 3%, 5% and 7% by weight, respectively. The ASTM C305 standard was used to prepare uniform and homogeneous mixture samples for the evaluation of geotechnical parameters. For this purpose, calcium hydroxide was first added to the studied soil together with water (according to the optimum water content). The materials were then mixed in a mixer to ensure proper cohesion between the added materials and the soil. According to the standard, mixing is stopped for 30 seconds to allow the materials to absorb moisture together with the calcium hydroxide. Pumice stone was then slowly added to the mixed sample. The samples were mixed for 30 seconds at low speed, 15 seconds at high speed and 60 seconds at medium speed. As the calcium hydroxide solution was used as a reaction accelerator in the preparation of the samples, after mixing the samples were stored in a closed plastic container at ambient temperature for one day until the curing process was complete. The compaction test according to ASTM D698 was first carried out to achieve the research objectives. Next, some tests, such as the UCS test according to ASTM D2166 and the direct shear test according to ASTM D3080, were carried out to determine the geotechnical properties of the improved sodium-saline silty soil. Finally, the consolidation test according to ASTM D2435 was

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.16.4.1014049]

carried out to evaluate the effect of the effect of added materials on the amount of consolidation settlement and the swelling potential of the improved sodium saline silty soil.

Results and Discussion

The main results of the study can be summarized as follows:

1- The UCS of the stabilized soil with the composition of 3% pumice in the sample studied, together with 2% Ca $(OH)_2$, was 1.32 times.

2- The addition of the combination of 7% pumice with 2% Ca $(OH)_2$ increased the angle of internal friction by 20 times.

3- The swelling in the stabilized soil with the combination of 7% pumice and 7% Ca $(OH)_2$ in the sample reduced the swelling by 86%.

Conclusions

Therefore, the geotechnical properties of the stabilized soil after one day of curing were improved by the addition of pumice to the sodium saline silty soil together with Ca (Ca $(OH)_2$). However, various factors such as longer curing times, disturbance of the soil during the preparation of the samples in the laboratory and sampling in the field, the pH level of the saline soil, and the thawing and freezing conditions may affect the results obtained in the present research. These factors will be investigated in the future.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.22034/JEG.2023.16.4.1014049]