نشریه مهندسی عمران امیرکبیر

نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۵۵، شماره ۸، سال ۱۴۰۲، صفحات ۱۶۴۵ تا ۱۶۶۰
DOI: 10.22060/ceej.2023.22162.7916

تاثیر افزودنی‌های زئولیت و سیمان بر رفتار مکانیکی و شاخص واگرایی خاک رسی

سعید غفارپور جهرمی[۱*]، مقداد پایان[۲]، زینب امرایی[۱]

۱-دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران ، ایران
۲-گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

خلاصه: خاک‌های واگرا عموما دارای پتانسیل بالای انقباض و تورم، نفوذپذیری کم و مقاومت اندک در برابر فرسایش بوده و لذا از نوع خاکهای مسئله دار شناخته می شوند. در این تحقیق تغییر در پتانسیل واگرایی به روش تثبیت شیمیایی با سیمان و جایگزینی بخشی از سیمان با زئولیت (به عنوان یک افزودنی دوستدار محیطزیست) در تثبیت نوعی خاک رس مورد ارزیابی قرار گرفته است چرا که استفاده از سیمان مشکلات زیست محیطی متعددی دارد. نتایج این بررسی نشان داد با جایگزینی بخشی از سیمان با زئولیت، حداکثر وزن مخصوص خشک افزایش و رطوبت بهینه کاهش می‌یابد که روند متفاوتی در مقایسه با تثبیت سیمانی است. همچنین رفتار نمونه در آزمایش تک محوری تحت تاثیر درصد جایگزینی سیمان با زئولیت است. نتایج آزمایش هیدرومتری مضاعف نیز نشان داد ترکیب ۵ ٪ سیمان و جایگزینی ۳۰ ٪ زئولیت پتانسیل واگرایی خاک را کاهش می‌دهد. همچنین در آزمایش‌های ته‌نشینی مشاهده شد با افزایش نسبت جایگزینی زئولیت، میزان ته‌نشینی افزایش می‌یابد که با کاهش ضخامت لایه دوگانه رس قابل توجیه است و کاهش پتانسیل واگرایی را تایید می‌نماید. آنالیزهای ریزساختاری SEM نیز بیانگر تشکیل ژل کلسیم سیلیکات هیدراته در مخلوط بوده که باعث بهبود مشخصات مکانیکی و مقاومتی و کاهش پتانسیل واگرایی خاک رس متورم‌شونده شده است.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۰۵
بازنگری: ۱۴۰۲/۰۲/۱۳
پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۲۷
ارائه آنلاین: ۱۴۰۲/۰۵/۱۷

کلمات کلیدی:
تثبیت شیمیایی
واگرایی
سیمان
زئولیت
رس

۱- مقدمه

خاک‌هایی که در معرض آب کم نمک به سهولت و به سرعت جدا و پراکنده شوند، به عنوان خاک واگرا معرفی می‌شوند. این خاک‌ها معمولا همراه با کاتیون سدیم و دارای ضریب جذب سطحی بالا هستند. خاک‌های واگرا عموما دارای پتانسیل بالای انقباض و تورم، نفوذپذیری کم و مقاومت اندک در برابر فرسایش هستند. وجود برخی ترکیبات شیمیایی و املاح در خاک‌های ریزدانه رسی می‌تواند موجب پدیده واگرایی و خسارات و خرابی‌های مختلف شود؛ زیرا ذرات خاک تحت شرایط خاص متفرق و به سرعت با جریان آب شسته می‌شوند. در بسیاری از پروژه‌های عمرانی وجود خاک رس به عنوان یک مشکل دیده می‌شود؛ چرا که جذب رطوبت بالا، تورم و تغییرات حجم، واگرایی، عدم زهکشی مناسب، مشکلات یخزدگی در سرما و غیره شرایط طراحی و بهره برداری را تحت تاثیر قرار می‌دهد. در این راستا، مهندسین با استفاده از تکنیک‌های مختلف به دنبال بهبود خصوصیات رفتاری خاک بوده که در این میان تثبیت شیمیایی از روش‌های رایج، اقتصادی و مورد استقبال در اغلب پروژه‌ها می‌باشد. از جمله مواد شیمیایی مورد استفاده سیمان و آهک هستند که با واکنش شیمیایی مناسب باعث بهبود چشم‌گیری در کارایی، مشخصات فنی و مقاومت برشی خاک‌های رسی می‌شوند. افزودن این مواد به خاک منجر به کاهش خصوصیات خمیری، کاهش تورم و انقباض، تغییر بافت سطحی و افزایش مقاومت برشی و همچنین دوام خاک می‌گردد [۱]. ترکیبات اصلی سیمان شامل کلسیم اکسید (CaO)، سیلیسیوم اکسید (SiO_2)، آهن اکسید (Fe_2O_3) و آلومینیوم اکسید(Al_2O_3) هستند و با وجود این ترکیبات در شرایط عمل‌آوری مناسب، پدیده سیمانی شدن و کسب مقاومت اتفاق می افتد[۲]. واکنش‌های شیمیایی بین ترکیبات سیمان و آب که هیدراتاسیون نامیده می‌شود با تولید ژل کلسیم سیلیکات هیدرات (C–S–H) ویژگی‌های مورد نظر مخلوط را منجر می شود[۳]. از طرف دیگر، زئولیت ماده‌ای است عمدتا دارای آلومینیوم، سیلیسیم و اکسیژن بوده و با حرارت، آب خود را از دست می‌دهد و با آنالیز ساختاری می‌توان پیش‌بینی کرد که ترکیبات قلیایی خاک بتوانند واکنش و جایگزینی مناسبی با زئولیت و سیمان داشته باشند[۴].

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: saeed_ghf@sru.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

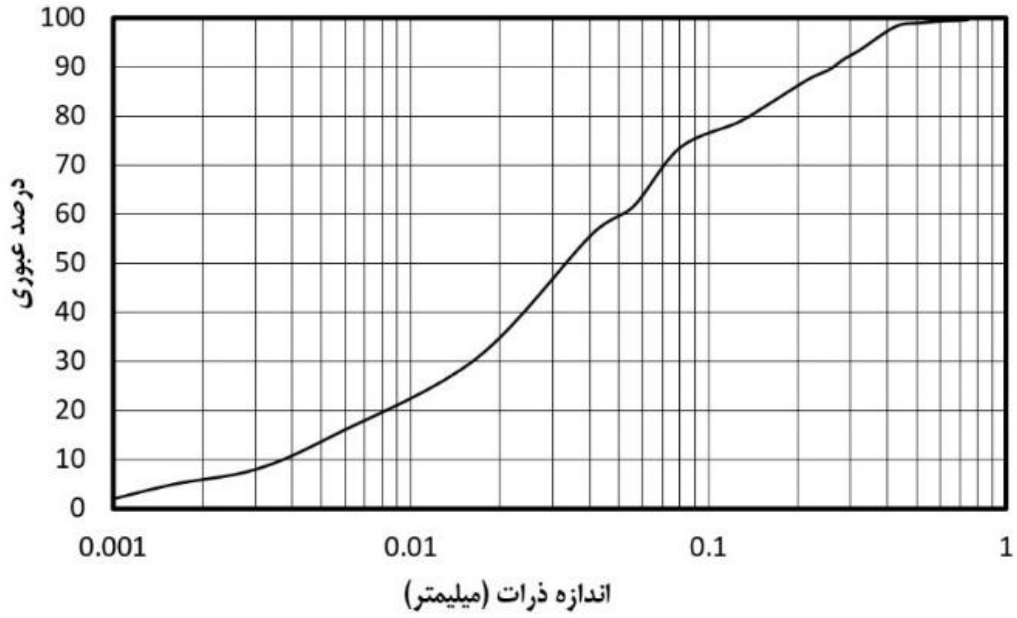
کوردنائیجی و همکارانش در تحقیقی اظهار داشتند که تعادل و موازنه ترکیبات SiO_2 و Al_2O_3 با CaO در مخلوط سیمان-زئولیت، باعث افزایش مقاومت تک‌محوری نمونه ها شده است[۵]. جعفرپور و همکارانش اثر زئولیت بر ماسه سیمانی را مورد بررسی قرار دادند که نتایج انها نشان داد جایگزینی سیمان با زئولیت تا ۵۰ ٪ باعث بهبود رفتار نمونه در آزمایش سه محوری می‌گردد[۶]. ملاعباسی و همکارانش نشان دادند در مخلوط شن و ماسه با دانسیته پایین، زئولیت با مقدار سیمان بالا تأثیر محسوسی بر مقاومت دارد[۷]. همچنین در تحقیق دیگری، ملاعباسی و همکارانش نشان دادند با کاهش تخلخل خاک، افزایش قابل توجهی در استحکام و مقاومت مخلوط خاک و سیمان و زئولیت ایجاد خواهد شد؛ با این حال جایگزینی بیش از حد زئولیت با سیمان در مخلوط چنین روندی را کاهش می‌دهد[۸].

تورکوز و همکارانش با اضافه کردن ترکیبی از زئولیت و سیمان به خاک رس متورم شونده دریافتند که با افزودن ۳٪ سیمان و زئولیت بین ۶ تا ۱۰٪ وزن خشک خاک، پتانسیل تورمی و همچنین واگرایی خاک کاهش چشمگیری یافته و مقاومت فشاری تک محوری افزایش می‌یابد[۹]. ایسواریا و همکارانش نشان دادند که زئولیت به دلیل تخلخل زیاد باعث کاهش چگالی مخلوط و افزایش زمان گیرش خمیر سیمان می‌شود[۱۰]. کریپتاویکوس و همکارانش در تحقیقی نشان دادند زئولیت در کنترل انبساط و تورم مخرب ناشی از واکنش سیلیکاتی قلیایی سنگدانه‌ها موثر است[۱۱]. واگرایی خاک یک فرآیند فیزیکی- شیمیایی است که عمدتا تحت تاثیر مواد معدنی و خصوصیات شیمیایی آب حفره‌ای خاک قرار دارد[۱۲]. ساواس تاثیر دو درصد آهک با درصد های مختلف جایگزینی زئولیت طبیعی را بر تحکیم، تورم و پتانسیل واگرایی خاک رسی مورد بررسی قرار داد. نتایج این تحقیق نشان داد که با اضافه کردن این افزودنی ها بهبود قابل توجهی در پتانسیل تورم و واگرایی نمونه‌های تثبیت شده حاصل شد[۱۳]. نتایج یک بررسی نشان می‌دهد که کاتیون‌های سدیم عامل اصلی فرآیند واگرایی هستند. کاتیون‌های سدیم با بار منفی بر روی ذرات خاک رس در تعادل هستند و ذرات خاک رس، توسط این کاتیون‌های سدیم احاطه شده‌اند و ضخامت لایه‌های دوگانه را افزایش می‌دهند. بنابراین نیروهای دافعه بین ذرات خاک رس از نیروهای جاذبه تجاوز می‌کنند و این موضوع باعث واگرایی خاک می‌گردد[۱۴]. تحقیقات دیگری نشان می‌دهد واکنش‌های پوزولانی بین آهک و ذرات رس باعث افزایش مقاومت خاک و کاهش واگرایی خاک می‌شود[۱۵]. تحقیقات موهنتی و همکارانش نشان دادند که می‌توان خصوصیات واگرایی خاک را با افزودن ۱۵ ٪ خاکستر بادی و ۲ ٪ آهک بهبود داد[۱۶]. ژو و همکارانش نشان دادند ترکیبات کانی شناسی خاک و محیط قلیایی بر کاتین های قابل تبدیل جهت تثبیت شیمیایی خاکهای واگرا حائز اهمیت است[۱۷].

نتایج مطالعات فوق نشان می‌دهد تحقیقات بسیاری در حوزه تثبیت شیمیایی خاک رس با هدف بهبود خصوصیات تورمی، واگرایی و مقاومتی انجام شده است؛ با این حال، موضوع استفاده از پوزولان و جایگزینی مواد دوستدار محیط زیست کمتر مورد تحقیق قرار گرفته است. تولید سیمان به دلیل گازهای گلخانه ای مشکلات زیست محیطی متعددی دارد و لذا امروز استفاده از سیمانهای پوزولانی یا جایگزین سازی در ساخت و سازهای عمرانی جهت توسعه پایدار مورد تحقیق محققان بسیاری در کشورهای مختلف قرار گرفته است. جایگزینی زئولیت با بخشی از سیمان در افزایش مقاومت و کاهش پتانسل واگرایی در این مقاله مورد تحقیق قرار گرفته است. لذا در این پژوهش موضوع جایگزینی بخش از سیمان مصرفی با ژئولیت به عنوان نوعی پوزولان طبیعی جهت تثبیت شیمیایی خاک رس و با هدف کاهش اثرات زیست محیطی مورد بررسی آزمایشگاهی قرار گرفته است.

۲- مواد و مصالح

خاک مورد تحقیق در این مطالعه در رده CL بر اساس سیستم طبقه‌بندی متحد بوده که از معدنی در منطقه شهریار تهران نمونه‌برداری شده است. این خاک دارای پلاستیسیته پایین بوده که نمودار دانه‌بندی آن در شکل ۱ و مشخصات فیزیکی و مکانیکی آن در جدول ۱ گزارش شده است. همچنین نمودار پراش پرتو X نمونه خاک نیز در شکل ۲ آمده است. ترکیب شیمیایی خاک با استفاده از آنالیز طیف سنجی فلوئورسانس پرتو X (XRF) در جدول ۲ نشان داده شده است. سیمان مورد استفاده در این تحقیق، سیمان نوع ۲ کارخانه سیمان تهران بوده که مشخصات شیمیایی آن با استفاده از آنالیز XRF در جدول ۲ آمده است. همچنین زئولیت مورد تحقیق از نوع زئولیت کلینوپتیلولیت با خلوص ۹۸ ٪ از معدنی در شهر سمنان نمونه‌برداری و استخراج شده که مشخصات شیمیایی آن بر اساس آنالیز XRF در جدول ۲ گزارش شده است.



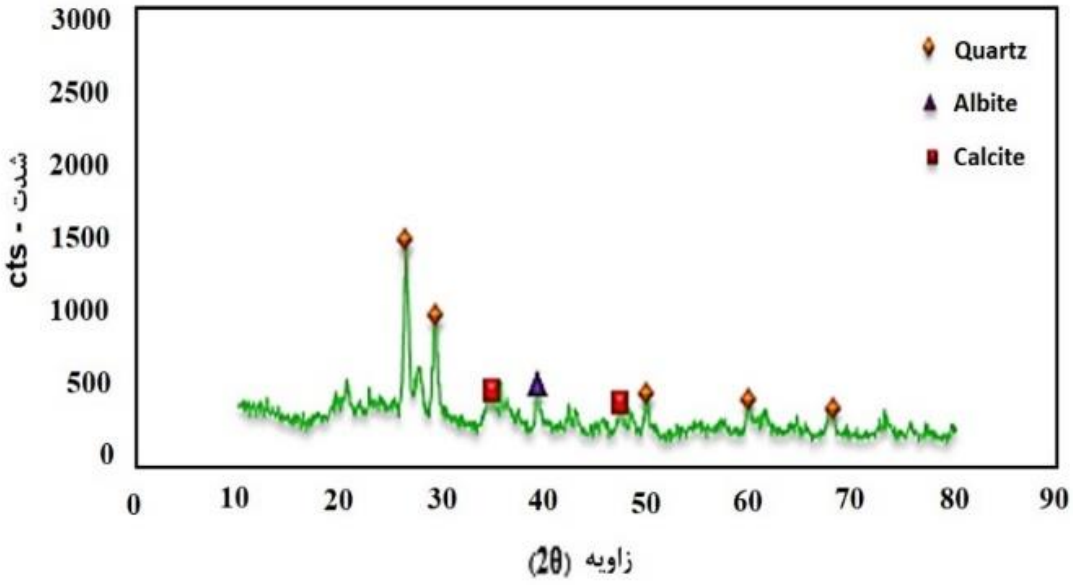
شکل ۱. منحنی دانه بندی خاک پایه بر اساس آزمایش‌های دانه بندی و هیدرومتری

Fig. 1. Soil grain size distribution curve based on sieve analysis and hydrometric test

جدول ۱. مشخصات فیزیکی و پلاستیسیته خاک مورد استفاده

Table 1. Physical characteristics and plasticity of clay

مشخصه	مقدار	استاندارد
چگالی دانه های جامد G_s	۲/۷۱	ASTM D854
حد روانی	۲۹٪/۱	ASTM D4318
حد خمیری	۲۱٪/۲	ASTM D4318
دامنه خمیری	۷٪/۹	ASTM D4318
وزن مخصوص خشک حداکثر	۱۷/۱ kN/m^3	ASTM D698
رطوبت بهینه	۲۰٪/۳۴	ASTM D698
نوع خاک در طبقه‌بندی یونیفاید	CL	ASTM D2487
عبوری از الک ۲۰۰- ریزدانه	۷۲٪	ASTM D2487



شکل ۲. گراف پراش پرتو X خاک رس

Fig. 2. X-ray diffraction graph of clay

جدول ۲. ترکیبات شیمیایی رس، سیمان و زئولیت

Table 2. Chemical compositions of clay, cement and zeolite

ترکیب شیمیایی	رس	سیمان	زئولیت
LOI	12.11	24	6.89
P_2O_5	0.239	0.329	0.052
TiO_2	0.664	0.162	0.015
MnO	0.114	0.086	0.188
MgO	3.8	2.437	0.56
K_2O	2.569	0.989	2.68
Na_2O	1.805	0.783	1.89
CaO	12.371	45.654	1.53
Fe_2O_3	5.387	1.918	1.29
Al_2O_3	11.803	3.646	11.63
SiO_2	49.062	19.031	72.98

جدول ۳. طرح اختلاط و نسبت وزنی مواد و مصالح (درصد وزنی)

Table 3. Mixing plan and weight ratios of materials

مقدار خاک	سیمان	نسبت جایگزینی زئولیت با سیمان
٪ ۱۰۰	۰	۰
٪ ۹۷/۵	٪ ۲/۵	۰، ٪ ۱۵ ، ٪ ۳۰ ، ٪ ۶۰
٪ ۹۵	٪ ۵	۰، ٪ ۱۵ ، ٪ ۳۰ ، ٪ ۶۰

۳- نحوه نمونه‌سازی و برنامه آزمایش‌ها

در این تحقیق ابتدا با انجام آزمایشهای مقدماتی، رطوبت بهینه خاک به روش خشک تعیین شد. از آنجا که تثبیت شیمیایی با سیمان نیازمند رطوبت است، مقدار رطوبت موردنیاز در مخلوط خاک–سیمان و خاک–سیمان–زئولیت، متناسب با درصد وزنی سیمان با نسبت ۵۰ ٪ (W/C=۰/۵)، به رطوبت بهینه اضافه گردید. افزودن سیمان باعث افزایش رطوبت بهینه و گاها کاهش دانسیته حداکثر می شود. در آزمایش تراکم به دلیل وجود اثر گیرش کاذب، اولیه و نهایی سیمان در فرآیند تراکم خاک در طول مدت زمان آزمایش تراکم، این موضوع همواره ایجاد خطا می کند. ضمن اینکه بخشی از رطوبت درگیر واکنش شیمیایی سیمان می شود (حدود ۲۵ درصد وزن سیمان). لذا در این تحقیق درصد رطوبت بهینه به میزان نصف وزن سیمان افزایش داده شد (نسبت آب به سیمان حدود ۵۰ درصد). تثبیت و اختلاط مصالح به روش خشک بوده که طرح نسبت های وزنی در آماده سازی مخلوط و نمونه سازی شامل درصد وزنی خاک رس، درصد سیمان و درصد زئولیت در جدول ۳ گزارش شده است. لازم به توضیح است نسبت‌های جدول با استناد به برخی تحقیقات قبلی برای سیمان و زئولیت انتخاب شده‌اند.

آزمایش‌های انجام‌شده در این تحقیق شامل مقاومت تک محوری (برای ارزیابی مشخصات مکانیکی)، تراکم استاندارد (تعیین رطوبت بهینه و دانسیته حداکثر)، هیدرومتری مضاعف و ته نشینی (جهت ارزیابی واگرایی) بوده است که در ادامه با تفسیر عکس‌های میکروسکوپ الکترونی (SEM)، ساختار تشکیل ژل و پیوندهای شیمیایی نیز مورد تحقیق قرار گرفت.

در ابتدای نمونه سازی و قبل از اختلاط، مواد و مصالح شامل خاک، سیمان و زئولیت پس از خشک کردن از الک نمره ۲۰۰ عبور داده شده تا نخاله و ناخالصی‌های درشت و احتمالی آن تفکیک شوند. آزمایش تراکم مبنای آزمایش پراکتور استاندارد مطابق استاندارد ASTM D698 از نوع استانداردB و آزمایش تک محوری به روش استاندارد ASTM D 2166 با نرخ کرنش ثابت یک میلیمتر بر دقیقه انجام شده است.

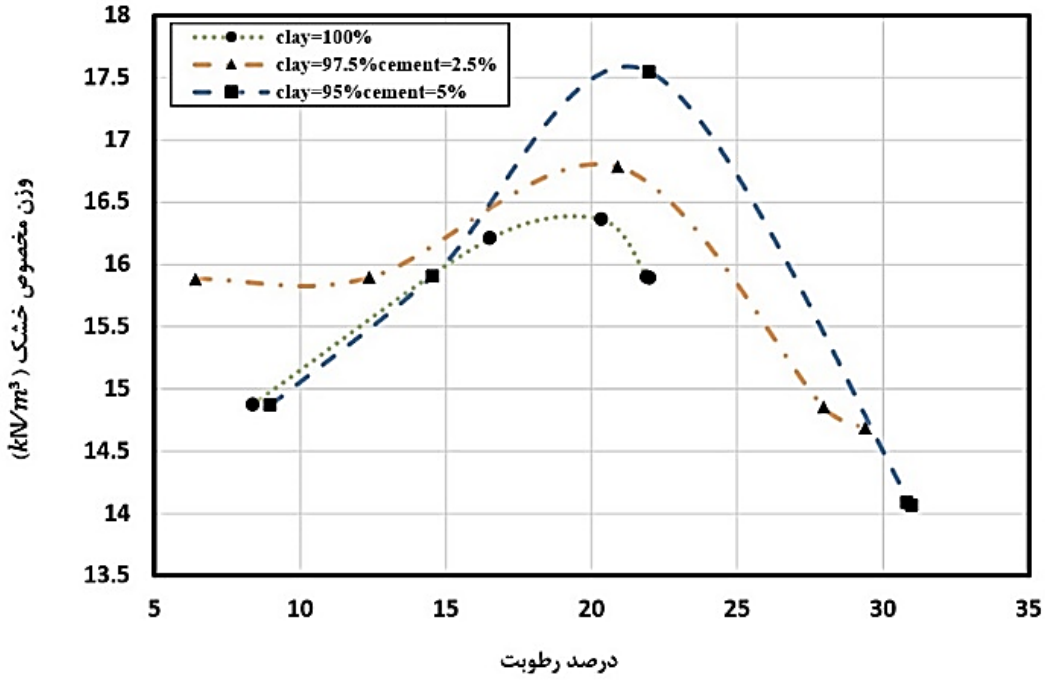
برای ارزیابی واگرایی خاک، روش‌های فیزیکی و شیمیایی متفاوتی وجود دارد که رایج‌ترین آن‌ها آزمایش پین‌هول، کرامب و هیدرومتری مضاعف است. از آن‌جا که روش پین هول و کرامب نوعی ارزیابی‌های کیفی هستند، برای بررسی تاثیر کمی افزودنی بر واگرایی دارای محدودیت می‌باشند. لذا در این پژوهش از روش هیدرومتری مضاعف بر اساس استاندارد ASTM D4221 استفاده گردید.

لازم به توضیح است که یکی از اهداف اصلی این تحقیق ارزیابی تاثیر افزودنی شیمیایی بر تغییر شاخص واگرایی خاک مورد پژوهش در شرایط تثبیت شده و تثبیت نشده است. تفاوت بارز آزمایش هیدرومتری با هیدرومتری مضاعف در عدم استفاده از ماده پراکنش‌ساز (هگزا متافسفات سدیم) و همزن مکانیکی است.

همچنین برای درک بهتر نحوه جابجایی یون‌های تبادلی با کاتیون‌های موجود در مواد افزودنی، می‌توان از آزمایش ته‌نشینی بهره گرفت. به عبارتی تغییر در رفتار ته‌نشینی خاک رس می‌تواند ناشی از تغییرات در آرایش ذرات خاک رس باشد[۱۷]. لذا در این تحقیق از این روش نیز برای ارزیابی تاثیر افزودنی بر تغییر شاخص پتانسیل واگرایی استفاده گردید. برای این هدف مخلوط ناهمگن رس، رس– سیمان و رس– سیمان– زئولیت به نسبت ۱ به ۱۰ (خاک به آب) درون ظرف مدرج روی یک لرزاننده[1] افقی تا رسیدن به تعادل قرار گرفتند. پس از آن محلول به استوانه شیشه‌ای مدرج منتقل و برای آزمایش هیدرومتری استفاده شدند. با قرائت سطح مخلوط ناهمگن خاک در هر محلول در فواصل زمانی مختلف، درصد ته‌نشینی مطابق رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$SP = \frac{h_1 - h_2}{h_2} \qquad (۱)$$

1 Shaker



شکل ۳. منحنی تراکم خاک تثبیت شده با درصدهای مختلف وزنی سیمان

Fig. 3. Compaction curve of stabilized soil with different weight percentages of cement

در این رابطه h_1 ارتفاع اولیه مخلوط ناهمگن و h_2 ارتفاع نهایی مخلوط ناهمگن می‌باشند.

همچنین به منظور بررسی ریزساختاری تثبیت و تشکل ژل سیمانی، عکس‌برداری از برخی نمونه‌ها شامل خاک تثبیت نشده، خاک تثبیت شده با سیمان و خاک تثبیت شده با سیمان و زئولیت پس از ۲۸ روز عمل‌آوری در شرایط آزمایشگاهی با استفاده از دستگاه SEM با بزرگ نمایی ۳۰۰۰ و ۵۰۰۰ انجام شدند.

۴- بحث و تفسیر نتایج

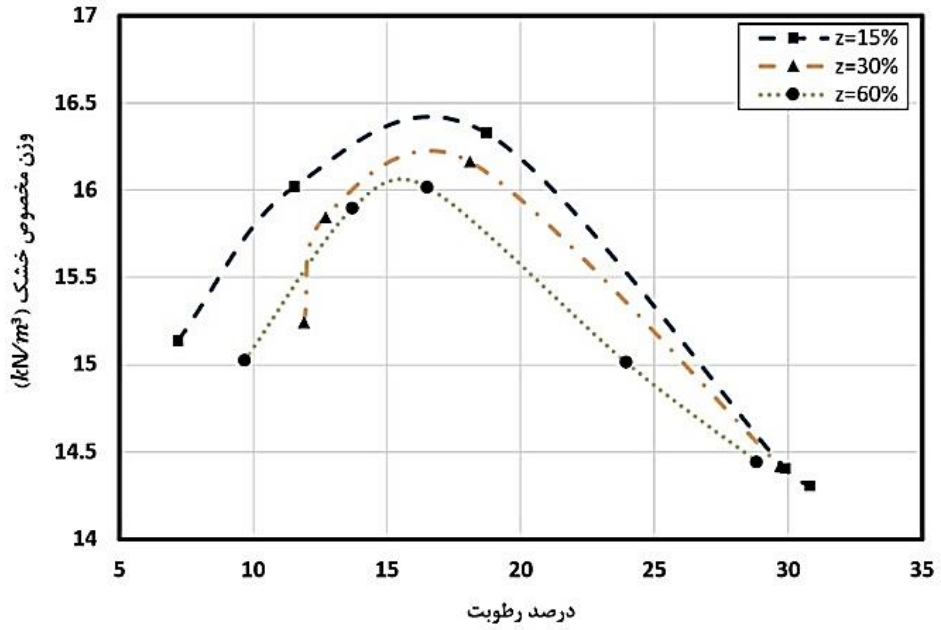
۴- ۱- آزمایش تراکم استاندارد

نتایج این تحقیق در شکل ۳ نشان می‌دهد به طورکلی افزودن سیمان به خاک باعث افزایش وزن مخصوص خشک و افزایش رطوبت بهینه خواهد شد. این رفتار با در نظر گرفتن فرآیند سیمانی شدن و تجمیع مخلوط همراه با تأثیر وزن مخصوص بالاتر سیمان نسبت به خاک پایه قابل توجیه است. افزایش رطوبت بهینه نیز ناشی از نیاز سیمان به جذب آب بیش‌تر به منظور واکنش‌های هیدراتاسیون و ساختار همگن مخلوط خاک و سیمان می‌باشد. گرمای واکنش هیدراتاسیون در این فرآیند تأثیرگذار است.

همچنین در شکل ۴ و ۵ مشاهده می‌شود که جایگزینی زئولیت با سیمان باعث کاهش تدریجی در مقادیر حداکثر وزن مخصوص خشک و رطوبت بهینه مخلوط رس- سیمان- زئولیت می‌شود؛ به طوریکه این تاثیر با افزایش درصد زئولیت محسوس‌تر است. کاهش وزن مخصوص خشک می‌تواند ناشی از چگالی پایین زئولیت در مقایسه با سیمان باشد. کاهش رطوبت بهینه با افزایش جایگزینی زئولیت نیز با کاهش مقدار سیمان به عنوان عامل افزایش رطوبت بهینه ارتباط دارد. علاوه بر این، افزایش جایگزینی زئولیت منجر به افزایش توزیع اندازه ذرات در مخلوط شده که این امر می‌تواند در کاهش رطوبت بهینه نیز موثر باشد.

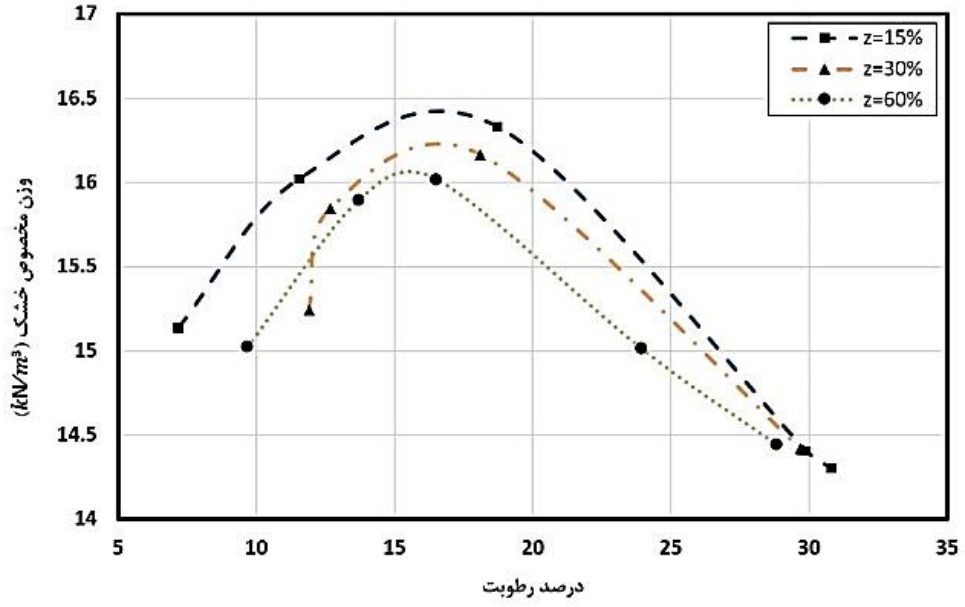
۴- ۲- آزمایش مقاومت تک محوری محصور نشده

نتایج آزمایش تک محوری روی نمونه‌های تثبیت‌شده و تثبیت‌نشده در شکل ۶ آورده شده است. این نتایج نشان می‌دهند ترکیب سیمان و زئولیت باعث افزایش مقاومت نمونه می‌شود و مناسب‌ترین نتیجه در ۵ ٪ سیمان با جایگزینی ۳۰ ٪ زئولیت حاصل می‌شود. وجود ترکیب $Ca(OH)_2$، موجب واکنش با سیلیس و آلومینای موجود در زئولیت به صورت یک واکنش پوزولانی شده و به تولید ژل C-S-H و ژل C-A-H کمک می‌کند و در



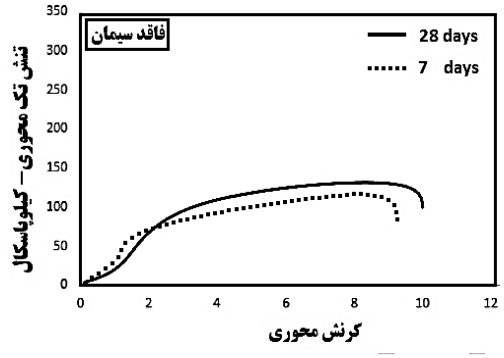
شکل ۴. منحنی تراکم خاک تثبیت شده با ۲/۵ ٪ سیمان و نسبت‌های جایگزینی مختلف زئولیت

Fig. 4. Compaction curve of soil stabilized with 2.5% cement and different replacement ratios of zeolite

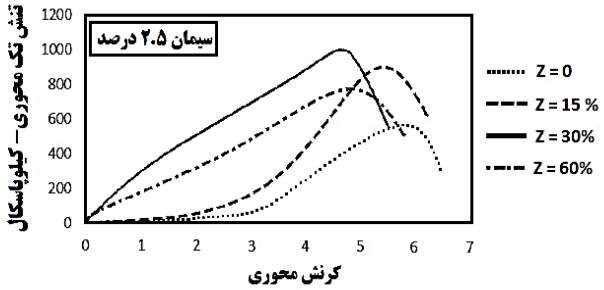


شکل ۵. منحنی تراکم خاک تثبیت شده با ۵ ٪ سیمان و نسبت‌های جایگزینی مختلف زئولیت

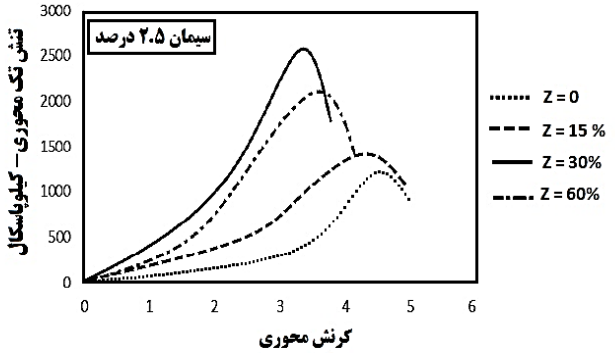
Fig. 5. Compaction curve of soil stabilized with 5% cement and different replacement ratios of zeolite



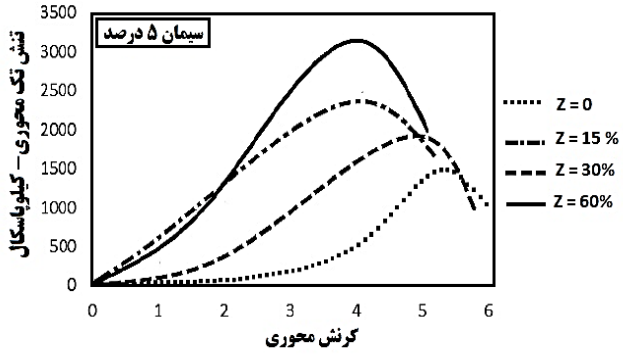
الف: رس تثبیت نشده تحت عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روزه



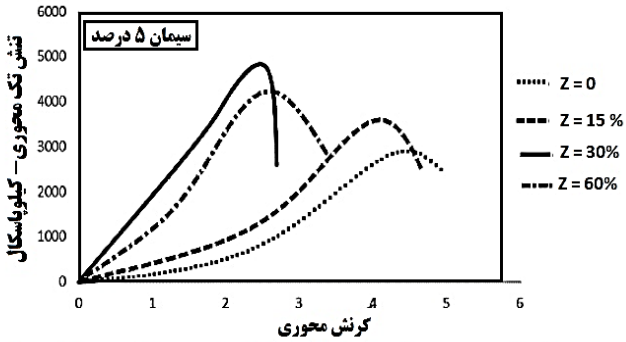
ب: مخلوط رس- سیمان- زئولیت (۲/۵ درصد- عمل‌آوری ۷ روزه)



ج: مخلوط رس- سیمان- زئولیت (۲/۵ درصد - عمل‌آوری ۲۸ روزه)



د: مخلوط رس- سیمان- زئولیت (۵ درصد - عمل‌آوری ۷ روزه)



و: مخلوط رس- سیمان- زئولیت (۵ درصد - عمل‌آوری ۲۸ روزه)

شکل ۶. نمودار رفتار تنش-کرنش نمونه‌ها در آزمایش بارگذاری تک محوری

Fig. 6. Stress-strain behavior of samples in uniaxial loading test

نتیجه مقاومت نمونه افزایش می‌یابد. با افزایش جایگزینی زئولیت بیش از ۳۰ ٪ مقاومت کاهش می‌یابد؛ زیرا مقدار $Ca(OH)_2$ کافی برای واکنش پوزولانی در دسترس نیست؛ لذا بخشی از مواد پوزولانی بدون واکنش و بی‌تأثیر باقی می‌مانند که این مساله توسط برخی محققین نیز گزارش شده است [۱۸].

همچنین نتایج این تحقیق نشان می دهد که در تثبیت شیمیایی با سیمان، رفتار نمونه ترد و شکننده و کرنش شکست کوچک است؛ اما با جایگزین شدن زئولیت (۳۰ ٪)، کرنش شکست افزایش یافته و رفتار نمونه از حالت شکست ترد دور می شود. از طرف دیگر، در نمونه های تثبیت

جدول ۴. تعیین پتانسیل واگرایی در آزمایش هیدرومتری مضاعف بر اساس معیار شرارد[۱۹]

Table 4. Dispersion potential in the double hydrometer test based on Sherrard criterion [19]

پتانسیل واگرایی خاک	واگرایی
غیر واگرا	٪۱۵ ≥
متوسط	٪ ۱۵ - ٪ ۳۵
واگرا	٪۳۵ ≤

جدول ۵. تعیین پتانسیل واگرایی در آزمایش هیدرومتری مضاعف بر اساس معیار بل[۲۰]

Table 5. Dispersion potential in the double hydrometer test based on the Bell criterion [20]

پتانسیل واگرایی خاک	واگرایی
غیر واگرا	٪۱۵ ≥
واگرایی ناچیز	٪۱۵ - ٪۳۰
واگرایی ملایم	٪ ۳۰ - ٪ ۵۰
واگرایی شدید	٪۵۰ ≤

جدول ۶. نتایج حاصل از آزمایش هیدرومتری مضاعف

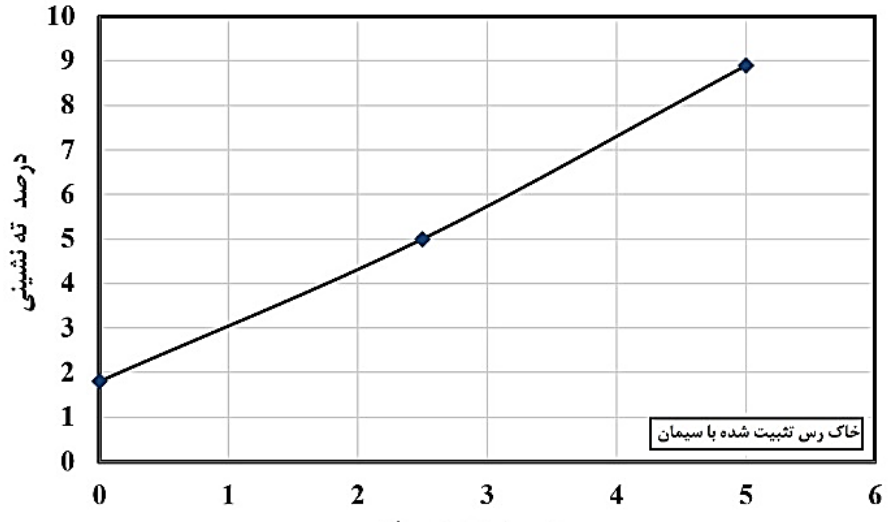
Table 6. Results of the double hydrometer tests

نسبت وزنی خاک	نسبت وزنی سیمان	نسبت جایگزینی زئولیت با سیمان	پتانسیل واگرایی	واگرایی(٪)
۱۰۰	۰	۰	شدید	۸۹
۹۷/۵	۲/۵	۰	متوسط	۳۵
۹۷/۵	۲/۵	۳۰	غیر واگرا	۱۴/۶
۹۵	۵	۰	ناچیز	۲۹
۹۵	۵	۳۰	غیر واگرا	۸/۴

شده با سیمان و زئولیت تا ۳۰ ٪، مکانیزم تغییرشکل‌های جانبی نمونه در شرایط گسیختگی و شکست (بشکه‌ای شدن) مشاهده شد؛ در حالیکه با افزایش میزان زئولیت بیش از ۳۰ ٪ ظهور چندین ترک عمودی گسترده با کاهش انبساط جانبی مشاهده گردید. این تغییر در حالت خرابی، روند نزولی شکنندگی و کاهش کرنش شکست نمونه با افزایش درصد جایگزینی زئولیت را تأیید می‌نماید.

۴- ۳- آزمایش هیدرومتری مضاعف

ارزیابی پتانسیل واگرایی بر اساس نتایج آزمایش هیدرومتری مضاعف بر طبق معیار «شرارد» در جدول ۴ و بر طبق معیار «بل» در جدول ۵ آمده است[۱۹ و۲۰]. همچنین نتایج آزمایش هیدرومتری مضاعف روی خاک پایه و ترکیب خاک- سیمان- زئولیت در جدول ۶ ارائه شده است.



شکل ۷. تاثیر درصد وزنی سیمان در آزمایش ته‌نشینی خاک رس

Fig. 7. Effect of weight percentage of cement on the result of clay sedimentation test

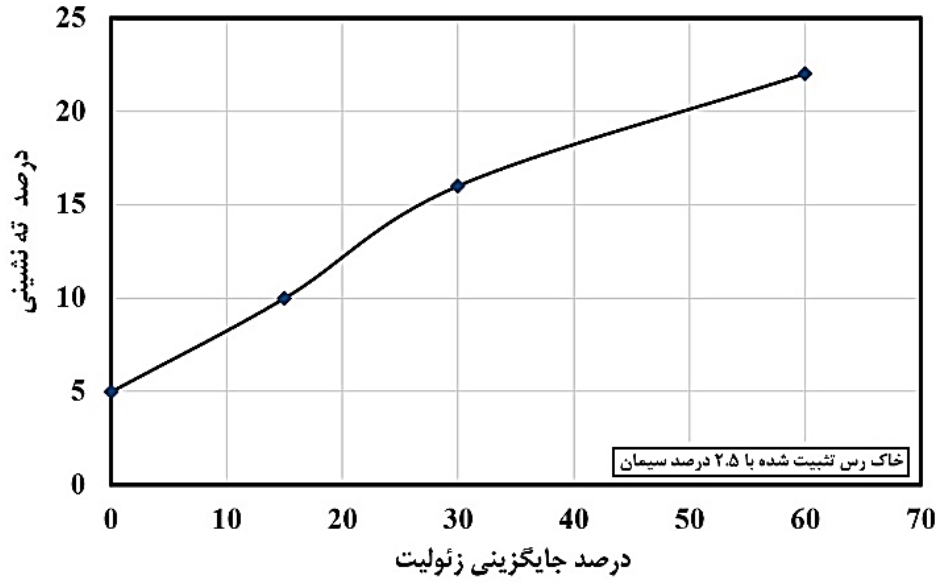
نتایج این بررسی نشان می‌دهد با افزودن ۲/۵ درصد سیمان به خاک پایه، پتانسیل واگرایی خاک کاهش می‌یابد. با وجود اینکه این مخلوط نتواسته معیار «شرارد» را برای غیرواگرا شدن تامین نماید، اما کاهش درصد واگرایی قابل‌توجه است. شایان ذکر است بر اساس معیار «بل» این خاک دارای واگرایی متوسط است. همچنین نتایج این بررسی نشان می‌دهد جایگزینی ۳۰ ٪ زئولیت به جای سیمان در مخلوط سبب کاهش واگرایی خاک شده که بر اساس هر دو معیار «شرارد» و «بل» در زمره خاک‌های غیرواگرا قرار می‌گیرد.

با افزایش سیمان از ۲/۵ ٪ به ۵ ٪، کاهش نسبی ۶ درصدی در واگرایی مشاهده می‌شود؛ اما با جایگزینی زئولیت تا ۳۰ ٪ سیمان، بیش‌ترین کاهش در پتانسیل واگرایی اتفاق می‌افتد. درصد واگرایی در این حالت ۸/۴ ٪ اندازه‌گیری شد که مطابق با معیار «شرارد» و «بل»، این خاک در زمره خاک‌های غیرواگرا قرار می‌گیرد.

افزودن سیمان با واکنش شیمیایی موجب تشکیل ژل سیمان بین دانه‌های خاک شده و بافت پیوسته‌ای بین ذرات به وجود می‌آورد. این واکنش با ایجاد پیوستگی مناسب بین ذرات، منجر به کاهش خصوصیات خمیری و افزایش مقاومت برشی می‌شود؛ چرا که جایگزینی یون‌های کلسیم حاصل از هیدراتاسیون سیمان و واکنش با سدیم موجود در خاک واگرا اتفاق افتاده است. از سوی دیگر، زئولیت از واکنش با بخشی از کانی‌های رسی، آن‌ها را از حالت ورقه‌ای خارج ساخته و سبب کلوخه‌ای شدن ذرات رس می‌گردد؛ زیرا با وجود سیمان واکنش پوزولانی در نمونه رخ داده است. در این شرایط در خاک‌های واگرا بخشی از یون‌های کلسیم حاصل از واکنش‌های پوزولانی جایگزین یون‌های سدیم موجود در خاک واگرا می‌گردند. با کاهش سطح ویژه ایجاد شده در ذرات، جذب آب ذرات رس نیز کاهش یافته و کاهش خصوصیات خمیری و افزایش سختی نمونه را به همراه خواهد داشت که این امر منجر به کاهش پتانسیل واگرایی شده است.

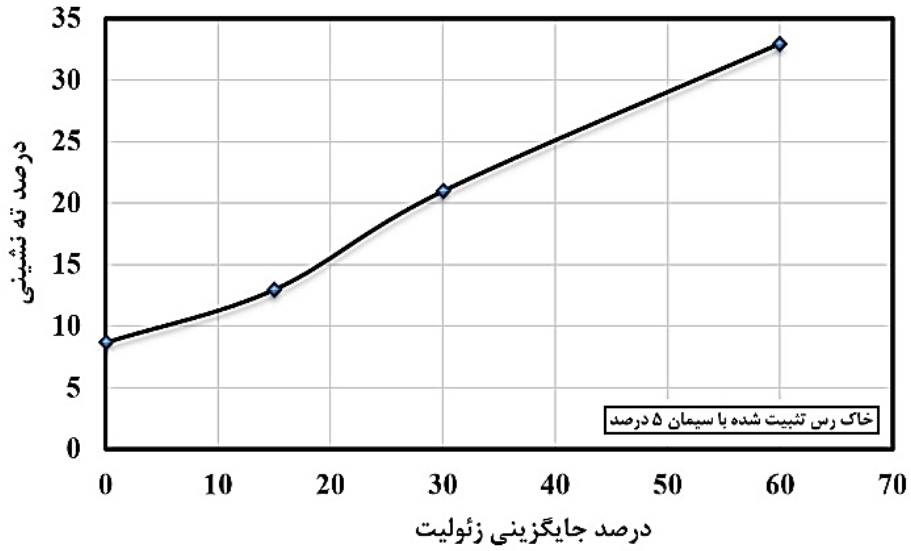
۴- ۴- آزمایش ته‌نشینی

تحقیقات بسیاری نشان می‌دهد که تغییر در رفتار ته‌نشینی خاک رس را می‌توان به تغییرات در آرایش ذرات آن نسبت داد[۱۷]. لذا می‌توان با انجام آزمایش ته نشینی نیز پتانسیل واگرایی خاکها را ارزیابی کرد. شکل ۷ بیانگر درصد ته‌نشینی خاک مورد مطالعه در مقادیر متفاوت سیمان است که نشان می‌دهد افزودن سیمان باعث افزایش درصد ته نشینی می‌شود. همچنین شکل‌های ۸ و ۹ بیانگر جایگزینی بخشی از سیمان با زئولیت هستند که نشان می دهند این جایگزینی موجب افزایش بیشتر ته‌نشینی می‌گردد. این رفتار را می‌توان به کاهش ضخامت لایه مضاعف رس نسبت داد که شرایط واکنش‌پذیری بیشتری را فراهم می‌کند. تثبیت شیمیایی موجب می‌شود ذرات رس به یکدیگر نزدیک شده و از حالت پراکنده به حالت تجمعی تغییر ماهیت ساختاری پیدا کنند. همین موضوع کاهش پتانسیل واگرایی را به دنبال خواهد داشت. در حضور مقدار کمی یون سدیم، ذرات خاک آب‌دار



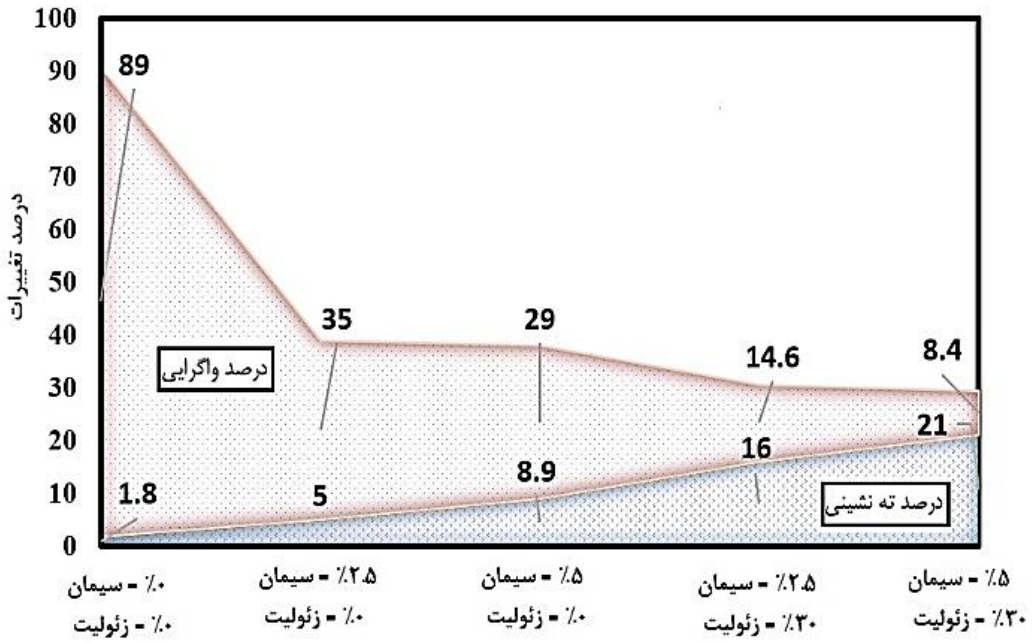
شکل ۸. تاثیر درصد جایگزینی زئولیت با سیمان در آزمایش ته‌نشینی خاک رس تثبیت شده با ۲/۵ ٪ سیمان

Fig. 8. Effect of replacing zeolite with cement on the result of sedimentation test on clay stabilized with 2.5% cement



شکل ۹. تاثیر درصد جایگزینی زئولیت با سیمان در آزمون ته‌نشینی خاک رس تثبیت شده با ۵ ٪ سیمان

Fig. 9. Effect of replacing zeolite with cement on the result of sedimentation test on clay stabilized with 5% cement



شکل ۱۰. مقایسه تاثیر درصد ته‌نشینی بر کاهش پتانسیل واگرایی

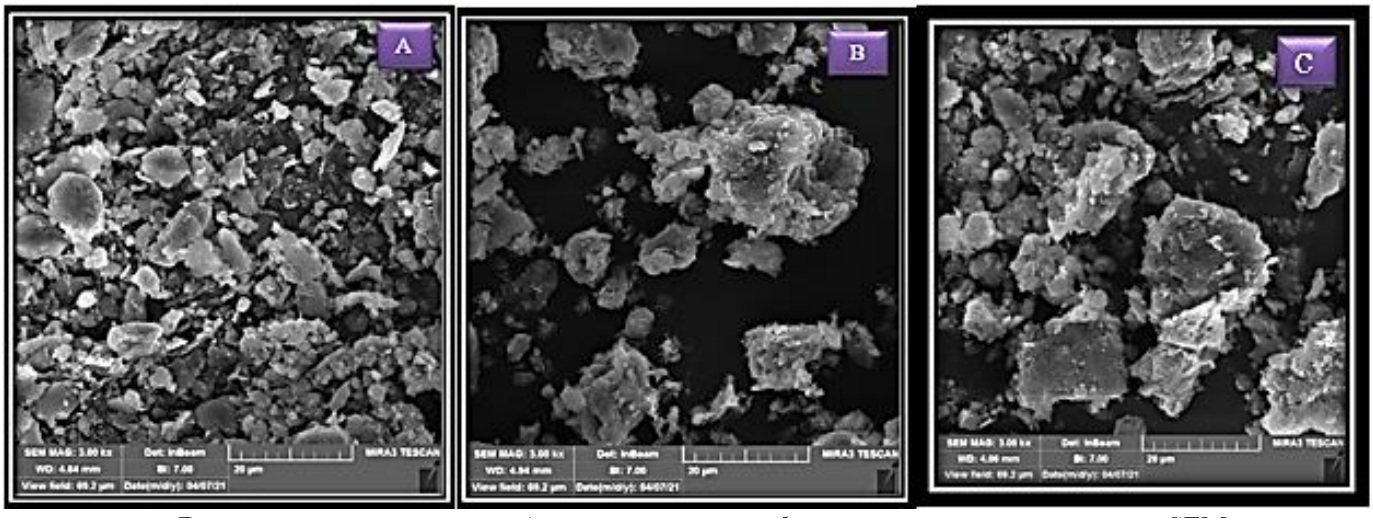
Fig. 10. Effect of sedimentation percentage on the reduction of dispersion potential

شده و در نتیجه پتانسیل واگرایی افزایش می‌یابد؛ در حالی که وجود سیمان و زئولیت با جایگزینی بخشی از یون‌های سدیم در واکنش پوزولانی باعث کاهش ضخامت لایه مضاعف شده و در نتیجه فاصله بین ذرات خاک رس را کاهش می‌دهند.

نتایج شکل ۱۰ نشان می‌دهند که با افزایش درصد ته‌نشینی ناشی از افزودن سیمان و زئولیت، پتانسیل واگرایی خاک کاهش می‌یابد. سیمان پیوستگی مناسبی بین ذرات رس ایجاد می‌کند و زئولیت موجب تجمیع بافتی و کاهش سطح ویژه می‌گردد. این فرآیند ضمن افزایش سختی و کاهش خصوصیات خمیری، با جایگزینی یون کلسیم و آلومینیوم با یون سدیم و پتاسیم موجود در خاک، کاهش یا حذف پتانسیل واگرایی را موجب می‌شوند.

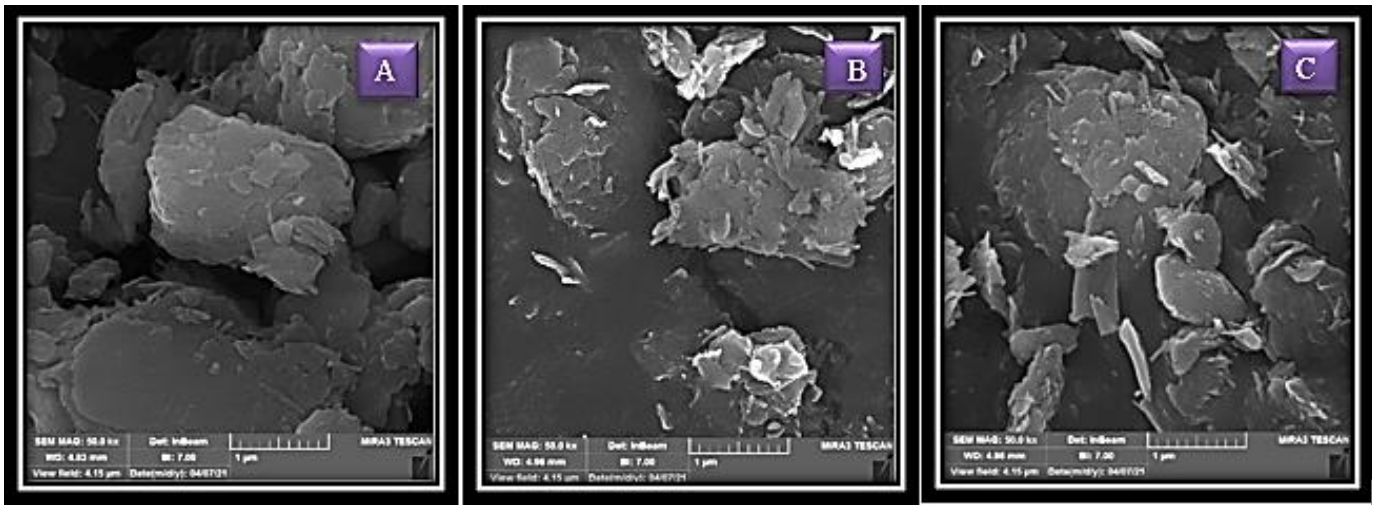
۴- ۵- آزمایش‌های ریزساختاری (SEM)

در این پژوهش، به منظور بررسی واکنش‌های پوزولانی در تثبیت شیمیایی و توجیه نتایج حاصل، از تفسیر عکس میکروسکوپ الکترنی (SEM) استفاده شده است. این تصاویر با بزرگنمایی ۳۰۰۰ برابر در شکل ۱۱ و با بزرگنمایی ۵۰۰۰۰ برابر در شکل ۱۲ به تفکیک برای نمونه تثبیت نشده، تثبیت‌شده با ۵ ٪ سیمان و تثبیت‌شده با ۵ ٪ سیمان- جایگزینی ۳۰ ٪ زئولیت نشان داده شده است. همان‌طور که این شکل‌ها نشان می‌دهند، ساختار خاک نمونه تثبیت نشده، پیوسته و منسجم مشاهده نمی‌شود. در خاک تثبیت‌شده با سیمان، ذرات خاک منسجم و در نمونه تثبیت‌شده با سیمان- زئولیت، ساختاری یکپارچه نسبت به حالات قبلی مشاهده می‌شود. این موضوع ناشی از واکنش‌های شیمیایی پوزولانی و تبادل یونی در واکنش سیمان - زئولیت و تولید ژل‌های کلسیم سیلیکات هیدراته می‌باشد. این واکنش‌ها باعث کاهش ضخامت لایه دوگانه و تبدیل ساختار خاک به یک وضعیت یکپارچه و پیوسته می‌شوند. اضافه شدن زئولیت منجر به کاهش تخلخل و بهبود خواص سطحی میکرو ذرات شده است. این موضوع با نتایج تحقیقات قبلی تطابق دارد؛ یعنی افزودن زئولیت با تغییر ساختار ناشی از واکنش پوزولانی، حجم حفرات را کاهش می‌دهد که این امر با عمل‌آوری مناسب پیشرفت دارد[۲۱]. سیمان با ایجاد پیوستگی مناسب ناشی از ژل سیمانی بین ذرات رس و زئولیت و تجمیع بافتی به کاهش سطح ویژه و افزایش سختی و کاهش خصوصیات خمیری خاک منجر می‌شود؛ زیرا با جایگزینی یون کلسیم و آلومینیوم سیمان با یون سدیم و پتاسیم خاک، کاهش یا حذف پتانسیل واگرایی را نتیجه داده است. لذا این عملکرد با کاهش تخلخل و نفوذپذیری نمونه‌های تثبیت شده و همچنین تولید ترکیبات شیمیایی نظیر C-S-H که منجر به افزایش مقاومت فشاری تک محوری محصور نشده و کاهش پتانسیل واگرایی خاک شده، قابل توجیه است.



شکل ۱۱. تصاویر SEM با بزرگ‌نمایی ۳۰۰۰ برابر پس از ۲۸ روز عمل آوری، رس تثبیت نشده (نمونه A)، رس تثبیت شده با ۵ ٪ سیمان (نمونه B) و رس تثبت شده با ۵ ٪ سیمان با ۳۰ ٪ جایگزینی زئولیت (نمونه C).

Fig. 11. SEM images with 3000 magnification after 28 days of curing: unstabilized clay (A), clay stabilized with 5% cement (B) and clay stabilized with 5% cement and 30% zeolite replacement (C)



شکل ۱۲. تصاویر SEM با بزرگ‌نمایی ۵۰۰۰۰ برابر پس از ۲۸ روز عمل آوری، رس تثبیت نشده (نمونه A)، رس تثبیت شده با ۵ ٪ سیمان (نمونه B) و رس تثبت شده با ۵ ٪ سیمان با ۳۰ ٪ جایگزینی زئولیت (نمونه C)

Fig. 12. SEM images with a magnification of 50,000 after 28 days of curing: unstabilized clay (A), clay stabilized with 5% cement (B) and clay stabilized with 5% cement and 30% replacement of zeolite (C)

۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

هدف از این مطالعه، ارزیابی جایگزینی بخشی از سیمان با زئولیت در راستای تثبیت شیمیایی به منظور کاهش یا حذف پتانسیل واگرایی نوعی خاک رس می‌باشد. در تثبیت شیمیایی خاک رس، درصدهای مختلف از سیمان با نسبت‌های مختلف زئولیت جایگزین و با ارزیابی آزمایشگاهی، تغییر در مقاومت و پتانسیل واگرایی مورد تحقیق قرار گرفت. خلاصه نتایج این تحقیق را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد.

به طور کلی تثبیت شیمیایی خاک رس با سیمان و ترکیب سیمان- زئولیت، باعث افزایش چگالی و کاهش رطوبت بهینه می‌شود که علت آن چگالی بالای افزودنی در مقایسه با خاک و همچنین نیاز آب جهت واکنش‌های شیمیایی است.

تثبیت شیمیایی توسط سیمان یا ترکیب سیمان- زئولیت باعث افزایش مقاومت تک محوری، کاهش کرنش شکست و تغییر رفتار نمونه به حالت ترد خواهد شد. افزودن درصد کمی سیمان یا ترکیب سیمان- زئولیت به نمونه، منجر به کاهش پتانسیل واگرایی خاک در آزمایش هیدرومتری مضاعف می‌گردد.

با افزایش مقدار سیمان و زئولیت جهت تثبیت شیمیایی، درصد ته‌نشینی مخلوط افزایش و به دنبال آن پتانسیل واگرایی را تا ۹۰ درصد کاهش می‌یابد.

نتایج این تحقیق نشان داد که در تثبیت شیمیایی ۵ ٪ وزنی خاک با سیمان، جایگزین کردن زئولیت به میزان ۳۰ ٪، می‌تواند خاک را غیرواگرا نماید. شاخص واگرایی بر اساس معیارهای استاندارد تا ۹۰ درصد کاهش یافت.

تثبیت شیمیایی سیمان- زئولیت با تشکیل ژل C–S–H موجب کاهش حجم منافذ و حفرات شده و ذرات خاک حالت یکپارچه به خود می‌گیرند که نتیجه آن بهبود مشخصات مکانیکی و همچنین کاهش یا حذف پتانسیل واگرایی خواهد بود.

جایگزینی ۳۰ ٪ زئولیت موجب می‌شود ترکیب Ca(OH)۲ یک واکنش پوزولانی با سیلیس و آلومینای موجود در زئولیت شکل -گیرد و این ترکیبات برای تولید ژل‌های C–S–H و C–A–H مصرف می‌شوند و در نتیجه آن بهبود خواص مکانیکی ایجاد می‌شود.

منابع

[1] Bakaiyang, L., Madjadoumbaye, J., Boussafir, Y., Szymkiewicz, F., & Duc, M. (2021). Re-use in road construction of a Karal-type clay-rich soil from North Cameroon after a lime/cement mixed treatment using two different limes. Case Studies in Construction Materials, 15, e00626.

[2] Chiu, A. (2016). Hydration of tricalcium silicate. Project No. PHASM201, University College London, London.

[3] Mamlouk, M. S., & Zaniewski, J. P. (2006). Materials for civil and construction engineers. Upper Saddle River, NJ, USA:: Pearson Prentice Hall.

[4] Kocak, Y., Tascı, E., & Kaya, U. (2013). The effect of using natural zeolite on the properties and hydration characteristics of blended cements. Construction and Building Materials, 47, 720-727.

[5] Kordnaeij, A., Moayed, R. Z., & Soleimani, M. (2019). Unconfined compressive strength of loose sandy soils grouted with zeolite and cement. Soils and Foundations, 59(4), 905-919.

[6] Jafarpour, P., Moayed, R. Z., & Kordnaeij, A. (2020). Behavior of zeolite-cement grouted sand under triaxial compression test. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 12(1), 149-159.

[7] Mola-Abasi, H., Kordtabar, B., & Kordnaeij, A. (2016). Effect of natural zeolite and cement additive on the strength of sand. Geotechnical and Geological Engineering, 34(5), 1539-1551.

[8] Mola-Abasi, H., & Shooshpasha, I. (2016). Influence of zeolite and cement additions on mechanical behavior of sandy soil. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 8(5), 746-752.

[9] Turkoz, M., & Vural, P. (2013). The effects of cement and natural zeolite additives on problematic clay soils. Science and Engineering of Composite Materials, 20(4), 395-405.

[10] Iswarya, G., & Beulah, M. (2021). Use of zeolite and industrial waste materials in high strength concrete–A review. Materials Today: Proceedings, 46, 116-123.

[11] Kriptavičius, D., Girskas, G., & Skripkiūnas, G. (2022). Use of Natural Zeolite and Glass Powder Mixture as Partial Replacement of Portland Cement: The Effect on Hydration, Properties and Porosity. Materials, 15(12), 4219.

[12] Shoaib, M., Cruz, N., & Bobicki, E. R. (2022). Effect of pH-modifiers on the rheological behaviour of clay slurries: Difference between a swelling and non-swelling clay. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 643, 128699.

[13] Savaş, H. (2016). Consolidation and swell characteristics of dispersive soils stabilized with lime and natural zeolite. Science and Engineering of Composite Materials, 23(6), 589-598.

[14] Wang, L., & Song, X. (2022). Engineering geological characteristics and failures of dispersive clays in Northeast China. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 81(3), 1-18.

[15] Mola-Abasi, H., Khajeh, A., & Naderi Semsani, S. (2018). Effect of the ratio between porosity and SiO 2 and Al 2 O 3 on tensile strength of zeolite-cemented sands. Journal of Materials in Civil Engineering, 30(4), 04018028.

[16] Mohanty, S., Roy, N., Singh, S. P., & Sihag, P. (2021). Strength and durability of flyash, GGBS and cement clinker stabilized dispersive soil. Cold Regions Science and Technology, 191, 103358.

[17] Zhu, Y., Ali, A., Dang, A., Wandel, A. P., & Bennett, J. M. (2019). Re-examining the flocculating power of sodium, potassium, magnesium and calcium for a broad range of soils. Geoderma, 352, 422-428.

[18] Salimi, M., Dordsheykhtorkamani, A., Afrasiabian, A., & Khajeh, A. (2021). Incorporation of volcanic ash for enhanced treatment of a cement-stabilized clayey soil. Journal of Materials in Civil Engineering, 33(2), 04020465.

[19] Sherard, J. L., Dunnigan, L. P., & Decker, R. S. (1976). Identification and nature of dispersive soils. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 102(4), 287-301.

[20] Bell, F. G., & Maud, R. R. (1994). Dispersive soils: a review from a South African perspective. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 27(3), 195-210.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

S. Ghaffarpour Jahormi, M. Payan , Z. Amraee ,Effect of zeolite and cement additives on the mechanical behavior and dispersion characteristics of clay soil, Amirkabir J. Civil Eng., 55(8) (2023) 1645-1660.

DOI: 10.22060/ceej.2023.22162.7916

این صفحه عمداً خالی است