[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-31]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.2.6]

[DOI: 10.52547/jeg.14.4.609]

بررسی تأثیر افزودنی‌های زئولیت و سپیولیت بر تغییرات مدول الاستیسیته و هدایت هیدرولیکی خاک‌های رس‌دار با تأکید بر ریزساختار خاک

علی محمد رجبی؛ دانشگاه تهران، گروه زمین‌شناسی مهندسی
شیما بخشی اردکانی؛ دانشگاه قم، گروه مهندسی عمران

تاریخ: دریافت ٩٦/١٢/١٩ پذیرش ٩٧/٠٧/٠٨

چکیده

تثبیت و بهسازی خاک یکی از روش‌های مؤثر در بهبود رفتار خاک در مهندسی ژئوتکنیک است. امروزه علاوه بر تثبیت‌کننده‌های متعارف سیمانی و آهکی، از مواد شیمیایی طبیعی معدنی نیز برای اصلاح خواص نامطلوب خاک استفاده می‌شود. در این پژوهش از زئولیت و سپیولیت به‌عنوان دو ماده افزودنی برای تثبیت خاک‌های ماسه رسی و رس ماسه‌دار و تأثیر آن بر مدول الاستیسیته و هدایت هیدرولیکی خاک استفاده شده است. به این منظور آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری روی خاک‌های تثبیت نشده و تثبیت شده با افزودنی‌های مذکور در درصدهای ٥، ١٠، ١٥، ٢٠ و ٢٥ و زمان‌های آنی (بلافاصله پس از اختلاط)، ٧، ١٤ و ٢٨ روز انجام شده و مدول الاستیسیته در شرایط مختلف آزمایش تعیین شده است. آزمایش نفوذپذیری نیز به‌دلیل بررسی اثر این دو افزودنی در درصدهای مختلف و زمان آنی انجام شده است. هم‌چنین به‌دلیل بررسی نحوهٔ تأثیر مواد افزودنی بر ریزساختار خاک، عکس‌برداری SEM برای خاک تثبیت نشده و تثبیت شده با هر دو افزودنی در زمان عمل آوری ٢٨ روز انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد میزان افزایش مدول الاستیسیته در تثبیت با سپیولیت نسبت به زئولیت بیش‌تر است. به‌علاوه در هر دو افزودنی بیش‌ترین میزان افزایش مدول الاستیسیته مربوط به ٢٥ درصد افزودنی و زمان ٢٨ روز است. هم‌چنین میزان نفوذپذیری با افزایش هر دو افزونی کاهش می‌یابد به‌طوری‌که این میزان کاهش در سپیولیت بیش‌تر از زئولیت است. بررسی تصاویر SEM معرف تغییر در ریزساختار خاک در نتیجه

*نویسنده مسئول amrajabi@ut.ac.ir

افزودنی‌های مذکور است. نتیجه این‌که تغییرات مدول الاستیسیته و هدایت هیدرولیکی خاک را می‌توان به‌وقوع واکنش‌های شیمیایی در کنار تغییرات فیزیکی نسبت داد.

واژه‌های کلیدی: مدول الاستیسیته، SEM، زئولیت، سپیولیت، هدایت هیدرولیکی، بهسازی **خاک**

مقدمه

بهبود مشخصات ژئوتکنیکی خاک‌ها اعم از خاک‌های سطحی یا عمیق همواره به‌عنوان یکی از چالش‌های مهندسین ژئوتکنیک محسوب می‌شود. خاک‌های موجود در بستر عملیات ساختمانی همواره از لحاظ مقاومت و سایر خصوصیات مهندسی، استانداردهای لازم در انواع کارهای اجرایی را ارضا نمی‌کنند. از این‌رو روش‌های مختلف فیزیکی و شیمیایی به‌منظور اصلاح و یا تثبیت این نوع از خاک‌ها به‌کار برده می‌شود. به‌طورکلی، هر روش فیزیکی، شیمیایی، بیولوژیکی یا ترکیبی از این روش‌ها که برای تغییر در ویژگی‌های یک توده خاک طبیعی به‌منظور رسیدن به اهداف مهندسی به‌کار گرفته شود، در شاخه "تثبیت خاک" تعریف می‌شود. در میان انواع افزودنی‌های متفاوت برای تثبیت خاک، پژوهش‌گران، استفاده از پوزولان‌ها به‌دلیل سازگاری شیمیایی با محیط زیست و تولید محصولات سیمانتاسیون ناشی از واکنش‌های شیمیایی، را بررسی کرده‌اند. در سال‌های گذشته، تحقیقات زیادی در زمینه استفاده از زئولیت‌های طبیعی یا مصنوعی به‌عنوان مواد پوزولانی برای تولید مخلوط‌های سیمانی انجام شده است [۱]، [۲]، [۳]. بررسی‌ها نشان می‌دهد زئولیت‌ها به‌دلیل سطح مخصوص بالا و وجود تخلخل در ساختارشان، در ترکیب با برخی مصالح زمین‌شناسی فعالیت پوزولانی از خود نشان می‌دهند به‌طوری‌که این مواد در مجاورت موادی نظیر آهک، سیلیکات‌های کلسیم هیدرات (CSH) و کلسیم آلومینات (CAH) تولید کرده و سخت می‌شوند [۱]. هم‌چنین بررسی‌ها نشان می‌دهد هرگونه افزودنی مواد زئولیتی به‌راحتی باعث افزایش شکل‌گیری سیلیکات‌های کلسیم هیدرات (CSH) در محصولات ناشی از واکنش‌های شیمیایی می‌شود [٤]. در اغلب موارد، استفاده از پوزولان ها در بتن باعث کاهش مقاومت در زمان‌های عمل‌آوری کم و افزایش مقاومت در زمان‌های بیش‌تر می‌شود. به‌علاوه در نسبت‌های مناسبی از افزودنی و سیمان، مقاومت نمونه افزایش می‌یابد. این نسبت‌ها همیشه با

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-31]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.2.6]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.609]

جای‌گزینی بالای پوزولان در بتن اتفاق می‌افتد [۵]، [٦]، [۷]. اغلب زئولیت‌ها نیز به‌عنوان یک نوع پوزولان این رفتار را نشان می‌دهند [۸]، [۹]، [۱۰]. در سال‌های اخیر تأثیر سپیولیت‌ها بر مخلوط‌های سیمانی نیز بحث و بررسی شده است [۱۱]، [۱۲]، [۱۳]. سپیولیت‌ها با توجه به‌خصوصیات رئولوژیکی‌شان باعث افزایش تنش تسلیم و افزایش جذب آب مخلوط‌های سیمانی می‌شوند، این مواد به‌عنوان یک پوزولان باعث افزایش میزان سرعت واکنش‌های پوزولانی و کاهش تراکم نسبی محصولات سیمانی می‌شوند [۱۳]. هر چند بررسی‌های زیادی به‌منظور بررسی تأثیر افزودن زئولیت و سپیولیت بر مقاومت محصولات سیمانی مانند بتن انجام شده است، اما تاکنون استفاده از این افزودنی‌ها (به‌ویژه در مورد سپیولیت) به‌منظور بهسازی خاک‌ها کم‌تر مورد توجه بوده است. فنگ[1] و همکاران (۱۹۹۱) برای اولین بار از زئولیت برای بهسازی سیمان استفاده کردند. بررسی‌ها نشان می‌دهد که واکنش پوزولانی در زئولیت‌های طبیعی بیش‌تر از خاکسترهای بادی و کم‌تر از سیلیس است [١٤]. عباسلو[2] و همکاران (۲۰۱٦) در برنامه‌ای آزمایشی، ٤ نوع ترکیب متنوع از بنتونیت، سپیولیت و سیمان را برای تخمین ترکیب مناسبی از بتن بررسی کردند. در نهایت با افزودن۲۰ درصد سپیولیت (۲۰ درصد وزن بتن)، بتنی بهبود یافته با مقاومت نفوذپذیری زیاد و قابلیت جذب فلزات سنگین به‌دست آمد. به‌علاوه سپیولیت باعث کاهش ترک در بتن نیز می‌شود [۱۵]. مرکیو[3] و همکاران (۲۰۱٦) به بررسی خواص مکانیکی و دوام بتن‌های حاوی زئولیت پرداختند. نتایج نشان داد بتن‌های با ۱۰ درصد زئولیت طبیعی در مقایسه با بتن‌های بدون زئولیت دارای مقاومت فشاری ۹۰ روزه کم‌تری هستند. این نتایج هم‌چنین نشان داد استفاده از یک روان‌ساز در زئولیت به‌طور چشم‌گیری اثر بخش بوده است و باعث ایجاد بتن‌های مقاوم در برابر نفوذ آب، خزش و یخ زدگی می‌شود [١٦]. کمالی برنارد[4] و همکاران (۲۰۱۷) اثر دو پوزولان زئولیت و پومیس را بر مقاومت فشاری بتن، خاصیت تبادلی و مقاومت در برابر نفوذ کلر در شرایط غوطه‌وری بررسی کردند. آنها در بررسی خود به‌ترتیب از ۱۰ و ۱۵ درصد پومیس و زئولیت به‌عنوان جای‌گزین سیمان پرتلند در بتن استفاده کردند.

1. Feng
2. Abbaslou
3. Markive
4. Kamali-Bernard

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-31]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.2.6]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.609]

نتایج نشان داد که زئولیت بررسی شده واکنش پوزولانی بیش‌تری در مقایسه با پومیس دارد [۱۷].

در حال حاضر پژوهش‌های محدودی روی مدول الاستیسیته خاک‌های بهسازی شده با مواد افزودنی انجام شده است. از محدود پژوهش‌های مرتبط با این حوزه می‌توان به فرانوس[1] و وسوک[2] (۲۱۰۶)، اوسینوبی[3] و همکاران (۲۰۰۶) و زهو[4] و لینو[5] (۲۰۰۸) اشاره کرد. فرانوس و وسوک (۲۱۰۶)، در پژوهشی، زئولیت طبیعی و نوع سنتز شده آن (شامل خاکستر بادی) را به آسفالت گرم افزودند و مدول سختی آسفالت را اندازه‌گیری کردند. نتایج نشان داد مدول آسفالت در تراکم با دماهای بالا افزایش می‌یابد [۱۸]. اوسینوبی و همکاران پژوهش‌هایی دربارهٔ تأثیر افزودن آهک روی خصوصیات تراکم پذیری و مقاومت فشاری تک محوری خاک رس انجام دادند. نتایج نشان داد بیش‌ترین مقاومت فشاری تک‌محوری زمانی حاصل می‌شود که عمل تراکم بلافاصله بعد از مخلوط شدن خاک رس و آهک انجام شود. هم‌چنین نمونه تهیه شده با نسبت اختلاط ۵ درصد آهک و زمان عمل‌آوری ۲۸ روز، بیش‌ترین مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول الاستیسیته را نشان داده است [۱۹]. زهو و لینو (۲۰۰۸) به‌منظور اصلاح رفتار مکانیکی نوعی خاک سیلتی، اثر ترکیباتی از سیمان، خاکستر بادی و آهک هیدراته را بررسی کردند. نتیجه نشان داد افزودن این مواد به خاک مقاومت آن را افزایش و کرنش انقباضی را کاهش می‌دهد. به‌علاوه این‌که، از نقطه نظر مکانیکی و کاربردی در پروژه‌های راه، افزودن ٤ درصد از این ماده، روشی اقتصادی برای تثبیت این نوع خاک‌ها است [۲۰]. چنان‌که پیش‌تر ذکر شد، دربارهٔ اثر افزودنی‌های مختلف روی مدول الاستیسیته خاک بررسی‌های کم‌تری انجام شده است. مرور پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد هر چند اثر افزودنی‌های متفاوت روی رفتار مقاومتی خاک‌های متفاوت بررسی شده است، اما بررسی تأثیر افزودنی‌های زئولیت و سپیولیت روی تغییرات مدول الاستیسیته و هدایت هیدرولیکی خاک‌های رس‌دار تاکنون بررسی نشده است. از طرفی به‌دلیل سازگاری زئولیت و سپیولیت با محیط‌زیست و ویژگی‌های منحصر به‌فرد فیزیکی و شیمیایی آن‌ها،

1. Franus
2. Woszuk
3. Osinubi
4. Zhu
5. Liu

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-31]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.2.6]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.609]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-31]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.2.6]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.609]

لزوم توجه به این نوع افزودنی‌ها به‌منظور بهسازی خاک ضروری است. از نقطه نظر اقتصادی و محیط زیستی، امروزه به استفاده از افزودنی‌های معدنی به‌ویژه زئولیت‌ها توجه شده است. بنابراین در این تحقیق تأثیر دو ماده زئولیت و سپیولیت با درصدهای متفاوت در زمان‌های عمل‌آوری مختلف روی مدول الاستیسیته و هدایت هیدرولیکی با تمرکز بر رفتار ریزساختار خاک بررسی شده است.

مواد و روش‌ها

۱. خصوصیات خاک‌ها و مواد افزودنی بررسی شده

در این تحقیق دو نوع خاک، یکی ماسه‌رسی با ۲۰ درصد رس و دیگری رس ماسه‌دار با ۵۲ درصد رس که به‌صورت مصنوعی در آزمایشگاه تهیه شده است، بررسی شدند. برای شناسایی اولیه خاک آزمایش‌های دانه‌بندی و حدوداتربرگ به‌ترتیب مطابق با استانداردهای ASTM D422-63 و ASTM D4318-93 انجام شد که نتایج آن در جدول ۱ نشان داده شده است. هم‌چنین شکل ۱ نمودار دانه‌بندی خاک‌های ماسه رسی و رس ماسه‌دار را نشان می‌دهد.

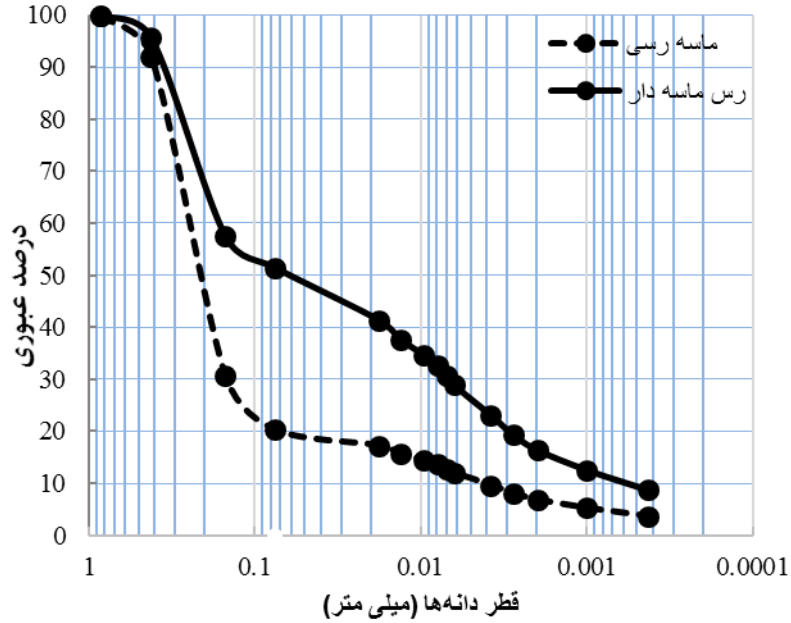
جدول ۱. مشخصات اولیه خاک‌های ماسه رسی و رس ماسه‌دار

نام خاک	درصد ماسه (٪)	درصد رس (٪)	حد روانی (٪)	نشانهٔ خمیری (٪)	نام‌گذاری طبق ASTM
ماسه رسی	۸۰	۲۰	فاقد حد روانی	فاقد نشانه خمیری	SC
رس ماسه‌دار	٤٨	۵۲	۲۰/۵	٦/١٨	CL-ML

خاک‌های بررسی شده ترکیبی از رس و ماسه ۱٦۱فیروزکوه است. ماسه استفاده شده در این پژوهش دارای دانسیته ۲/٦٨ کیلوگرم بر سانتی‌متر مکعب و ضریب گوشه‌داری کم‌تر از ۱/۳ است و درصد عبوری این ماسه از الک ۲۰۰ کم‌تر از ۱ است. مواد افزودنی استفاده شده زئولیت و سپیولیت است که به‌ترتیب از معادن سمنان و فریمان تهیه شده‌اند. خصوصیات فیزیکوشیمیایی ماسه و مواد افزودنی در جدول ۲ آورده شده است.

برای تهیهٔ نمونه‌ها، ابتدا رس و ماسه مورد نظر به‌مدت ٢٤ ساعت در گرم‌خانه خشک شده و سپس رس با ماسه فیروزکوه مخلوط و مواد افزودنی به نسبت وزن خشک خاک در درصدهای مختلف اضافه و مخلوط شدند. به‌منظور اعمال زمان عمل‌آوری، مخلوط نمونه‌ها

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-31]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.2.6]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.609]



شکل ۱. نمودار دانه‌بندی خاک‌های ماسه رسی و رس ماسه‌دار استفاده شده در این تحقیق

جدول ۲. تجزیه عنصری ماسه، زئولیت و سپیولیت

عناصر موجود	درصد عناصر ماسه فیروزکوه (٪)	درصد عناصر زئولیت (٪)	درصد عناصر سپیولیت (٪)
SiO_2	۹۷/۵	٦۹/۷٤	۵۵/۳۲
Al_2O_3	۰/۹۵	۱۳/۵٤	۰/۳
Fe_2O_3	۰/۸۵	۱/۲٦	۰/٦۱
CaO	۰/۲۷	۲/٤۵	۰/۰۱
MgO	۰/۲٤	۰/۸۷	۱۵/۷۳
K_2O	۰/۱۹	-	۰/۰۱
Na_2O	-	۰/۱۳	۰/۰۲
LOI	۰	۱۱/۹٤	۲۵/۱۱

در وزن مخصوص خشک حداکثر و رطوبت بهینه آماده و تا زمان انجام آزمایش در ظروف در بسته نگه‌داری شدند. از آن‌جاکه خاک ماسه رسی بررسی شده (به‌دلیل جز رسی اندک)، در شرایطی با وزن مخصوص کم‌تر از وزن مخصوص حداکثر، قابلیت تحمل فشار دستگاه

تک‌محوری را نداشته و نمونه قبل از تحمل هر گونه وزنی از سوی دستگاه تک‌محوری فرو می‌ریخت. بنابراین تصمیم بر آن شد نمونه‌ها در شرایط وزن مخصوص خشک حداکثر و رطوبت بهینه آماده شدند.

۲. آزمایش‌ها

۲-۱. آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری

آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری مطابق دستورالعمل ASTM D2166-87 انجام شده است. آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری با ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درصد افزودنی زئولیت و سپیولیت روی هر دو خاک در زمان‌های عمل‌آوری آنی، ۷، ۱٤ و ۲۸ روز انجام شده است. برای ساخت نمونه، از قالب با قطر و ارتفاع به‌ترتیب ۳/۸ و ۷/٦ سانتی‌متر استفاده شده است. مطابق دستورالعمل ASTM D2166-87 قطر نمونه‌ها نباید از ۳۰ میلی‌متر (۱/۳ اینچ) کم‌تر باشد. در این شرایط اندازه بزرگ‌ترین دانه موجود در نمونه باید از یک‌دهم قطر نمونه کوچک‌تر باشد. نمونه‌های خاک متراکم تثبیت‌نشده و تثبیت‌شده، با مخلوط‌کردن دستی خاک خشک، مواد افزودنی و آب آماده شدند در فرایند آماده‌سازی نمونه ها، نمونه‌هایی که در همهٔ لایه‌ها با تعداد ضربات یک‌سان متراکم می‌شدند، در آزمایش‌های مقاومت تراکم تک‌محوری سطح شکست، تنها در لایه بالایی اتفاق می‌افتاد (به‌دلیل تراکم ضعیف در لایهٔ بالایی). از این‌رو، به‌منظور فایق آمدن بر این مشکل، عملیات تراکم خاک برای ساخت نمونه‌های تک‌محوری به‌ازای ۳۰، ٤۰، ۵۰، ٦۰ و ۷۰ ضربه به‌ترتیب برای لایه‌های اول تا پنجم در نظر گرفته شده است [۲۱]. به‌منظور انجام این آزمایش، بارگذاری با سرعت ثابت ۰/۱ میلی‌متر بر دقیقه اعمال شد و تا کرنش ۰/۳ میلی‌متر بعد از رسیدن به مقاومت نهایی نمونه‌ها، ادامه داده شد.

۲-۲. آزمایش نفوذپذیری

در این پژوهش به‌منظور بررسی اثر افزودنی‌ها بر هدایت هیدرولیکی خاک از آزمایش نفوذپذیری استفاده شده است. خاک ماسه رسی بررسی شده با ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درصد زئولیت و سپیولیت مخلوط شده و با وزن مخصوص خشک کمینه (۱/٤۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب) درون قالب نفوذپذیری استوانه‌ای شکل (با ارتفاع ۸/٦۵ و قطر ۵ سانتی‌متر) قرا داه شد.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-31]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.2.6]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.609]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-31]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.2.6]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.609]

و به‌روش هد افتان تحت آزمایش نفوذپذیری قرار گرفت. آزمایش نفوذپذیری برای نمونه‌های تثبیت شده بلافاصله پس از اشباع کامل خاک مطابق با استاندارد ASTM D5084-16a انجام شده است.

۲-۳. آزمایش میکروسکوپ الکترونی (SEM)

میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، امکان بررسی وتجزیهٔ شیمیایی، ترکیب، سطح و ریزساختار داخلی را در ابعاد میکرونی و نانومتری فراهم آورده است. نمونه‌هایی که داخل دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی قرار می‌گیرند باید کاملاً خشک، عاری از هرگونه خواص مغناطیسی، دارای رسانایی بالایی در ابعاد مناسب باشند تا هم به نتیجهٔ موردنظر دست یافت و هم دستگاه از هرگونه آسیبی حفظ شود. در این پژوهش نمونه‌های خاک تثبیت‌نشده و تثبیت‌شده با ۱۵ درصد از مواد افزودنی با رطوبت بهینه (به‌دست آمده از آزمایش تراکم اصلاح شده) تهیه شده و بعد از ۲۸ روز خشک و سپس آزمایش شدند.

بحث و نتایج

۱. مدول الاستیسیته

مدول الاستیسیته، شیب خط تنش- کرنش در بخش الاستیک منحنی رفتار خاک است و به‌طور عمومی با علامت E نمایش داده می‌شود. از آن‌جاکه منحنی تنش- کرنش به‌دست آمده از آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری خطی نیست از مدول الاستیسیته مماسی وتری (E50) استفاده می‌شود. برای محاسبه مدول وتری در ۵۰ ٪ مقاومت (E50)، خطی از مبدأ مختصات به نقطهٔ ۵۰٪ مقاومت نهایی رسم شده و شیب این خط به‌عنوان مدول الاستیسیته وتری در نظر گرفته می‌شود. آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری به‌دلیل نبود اعمال فشار همه جانبه بر نمونه، مقادیر کم‌تری نسبت به سایر آزمایش‌ها برای مدول الاستیسیته به‌دست می‌دهد. مدول الاستیسیته برجای خاک، به‌طور معمول بین ٤ تا ۱۳ برابر مدول الاستیسیته حاصل از آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری است و نبود وجود فشار همه جانبه در حین آزمایش، دلیل دست‌یابی به مقادیر بسیار محافظه کارانه برای مدول الاستیسیته خاک از نتایج این آزمایش است [۲۲].

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-31]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.2.6]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.609]

۱-۱. تأثیر زئولیت بر مدول الاستیسیته خاک‌های ماسه رسی و رس ماسه‌دار

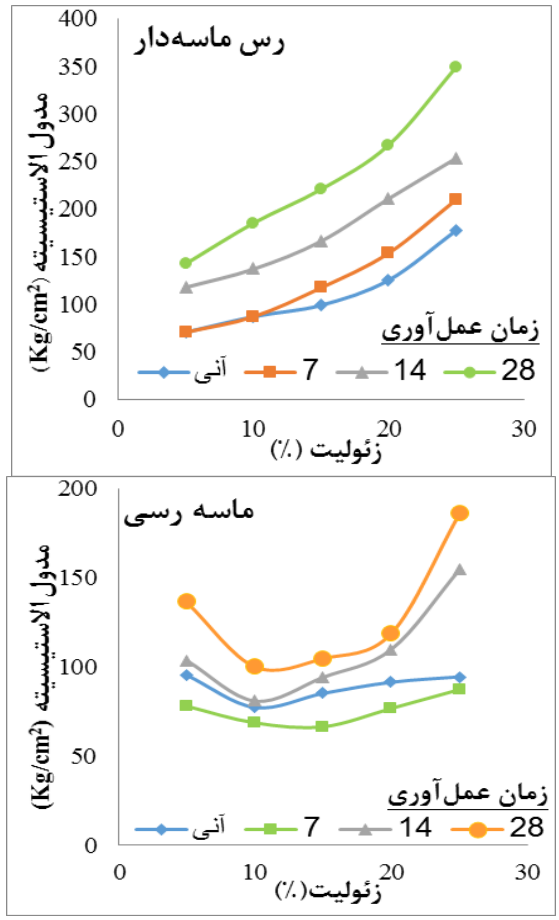
چنان‌که پیش‌تر بیان شد در این پژوهش بعد از تثبیت خاک‌های ماسه رسی و رس ماسه‌دار و انجام آزمایش تک‌محوری در درصدها و زمان‌های مختلف عمل‌آوری، نمودارهای تنش-کرنش رسم و سپس مدول الاستیسیته محاسبه شد. تغییرات مدول الاستیسیته خاک‌های ماسه رسی و رس ماسه‌دار تثبیت شده با زئولیت در زمان‌های عمل‌آوری متفاوت در جدول ۳ آمده است. نتایج نشان می‌دهد با افزایش میزان افزودنی، سختی خاک افزایش یافته و با گذشت زمان عمل‌آوری به جز کاهش اندکی بعد از ۷ روز، مدول الاستیسیته افزایش می‌یابد. مروری بر پژوهش‌ها نشان می‌دهد زئولیت‌ها به‌دلیل سطح مخصوص بالا و وجود تخلخل در ساختارشان، فعالیت پوزولانی چشم‌گیری نشان می‌دهند به‌طوری‌که سیلیکات‌های کلسیم هیدرات (CSH) و کلسیم آلومینات (CAH) تولید کرده و سخت می‌شوند [٤]. بر این اساس در این پژوهش نیز سختی خاک بعد از ۲۸ روز به‌خوبی افزایش یافته است.

جدول ۳. تغییرات مدول الاستیسیته خاک ماسی رسی و رس ماسه‌دار تثبیت شده با زئولیت در زمان‌های عمل‌آوری متفاوت

	مدول الاستیسیته خاک ماسه رسی				مدول الاستیسیته خاک رس ماسه‌دار			
زمان / درصد	آنی	۷	١٤	۲۸	آنی	۷	١٤	۲۸
۰	۷٤/۳	۷۷/۱	۷۵/۸	۷۹/٦	٥٤/۳	٦١/۰	٧١/٢	۸۷/۹
۵	۹۵/۳	۷۸/۰	۱۰۳/٦	۱۳٦/٦	۷۰/٦	۷۰/٦	۱۱۸/۳	۱٤۲/۵
۱۰	۷۷/٦	٦۸/٦	۸۱/۰	۱۰۰/۳	۸٦/۹	۸٦/۹	۱۳۷/٤	۱۸۵/۲
۱۵	۸۵/٤	٦٦/٤	۹٤/۳	۱۰۵/۰	۹۸/۸	۱۱۷/٤	١٦٦/٦	۲۲۰/٦
۲۰	۹۱/۵	۷٦/۸	۱۰۹/۹	۱۱۹/۲	۱۲۵/۰	۱۵۳/۸	۲۱۱/۲	۲٦۷/۱
۲۵	۹٤/٤	۸۷/٤	۱۵٤/٦	۱۸٦/۷	۱۷۷/۰	۲۱۰/۰	۲۵۳/۵	۳٤۹/۰

مدول الاستیسته خاک‌های ماسه رسی و رس ماسه‌دار تثبیت شده با زئولیت در درصدهای متفاومت و زمان‌های عمل‌آوری مختلف در شکل ۱ نشان داده شده است. به‌صورت کلی سختی در هر دو خاک در درصدهای زیاد زئولیت افزایش چشم‌گیری دارد و شیب نمودار در همه زمان‌ها در درصدهای بالا افزایش دارد. در زمان عمل‌آوری اولیه (۷ روز) سختی خاک ماسه

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-31]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.2.6]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.609]



شکل ۱. تغییرات مدول الاستیسیته خاک‌های، الف) ماسه رسی، ب) رس ماسه‌دار تثبیت شده با زئولیت در درصدها و زمان‌های عمل‌آوری متفاوت

رسی کاهش و سپس با افزایش زمان افزایش یافته است. در موارد مختلف گزارش شده است، استفاده از پوزولان در بتن باعث کاهش مقاومت در زمان‌های کم‌تر و افزایش آن در زمان‌های بالا و نسبت‌های مطلوب می‌شود (نسبت‌های مطلوب همیشه با جای‌گزینی بالای پوزولان در بتن اتفاق می‌افتد)، اغلب زئولیت نیز به‌عنوان یک نوع پوزولان این رفتار را نشان می‌دهد [۵]– [۱۰]. در این پژوهش نیز در درصدهای پایین زئولیت و در زمان ۷ روز، سختی

خاک ماسه رسی تثبیت شده کاهش یافته است و بعد از آن افزایش سختی به‌صورت محسوسی مشاهده می‌شود.

چنان‌که پیش‌تر گفته شد برای محاسبه مدول وتری، در ۵۰٪ مقاومت (E50)، خطی از مبدا مختصات به نقطه ۵۰٪ مقاومت نهایی رسم شده و شیب آن تعیین می‌شود. خطوط نشان داده شده در شکل ۲ متناظر با نقاط ۰ و ۵۰ درصد از مقاومت نهایی تک‌محوری است که در زمان‌های مختلف در تثبیت با ۵ درصد زئولیت رسم شده‌اند. به‌طورکلی در نمودارهای تنش-کرنش با افزایش زمان عمل‌آوری (به‌طور مشخص ۱۴ و ۲۸ روز) کرنش کم‌تر شده است. این موضوع نشان‌دهندهٔ افزایش تردی در زمان‌های بیش‌تر است که می‌توان آن را به جذب آب بیش‌تر به‌وسیلهٔ افزودنی در طول زمان نسبت داد.

۱-۲. تأثیر سپیولیت بر مدول الاستیسیته خاک‌های ماسه رسی و رس ماسه‌دار

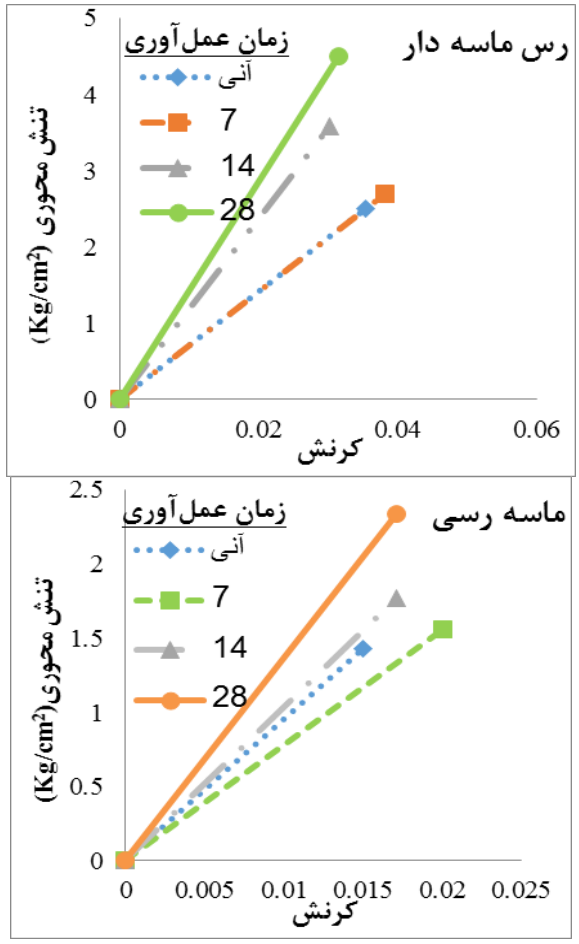
چنان‌که بیان شد علاوه بر سپیولیت از زئولیت نیز به‌عنوان تثبیت‌کنندهٔ خاک استفاده شده است. نتایج به‌دست آمده از مدول الاستیسیته خاک ماسه رسی و رس ماسه‌دار در تثبیت با افزودنی سپیولیت در زمان‌های عمل‌آوری مختلف در جدول ٤ آمده است. نتایج نشان می‌دهد، با افزایش میزان افزودنی و افزایش زمان عمل‌آوری مدول الاستیسیته خاک افزایش یافته است. این میزان افزایش در تثبیت هر دو خاک ماسه رسی و رس ماسه‌دار تقریباً یکسان است. علل افزایش سختی خاک در طول زمان عمل‌آوری می‌تواند وقوع واکنش‌های شیمیایی

جدول ٤. تغییرات مدول الاستیسیته خاک ماسه رسی و رس ماسه‌دار تثبیت شده با سپیولیت در زمان‌های عمل‌آوری متفاوت

	مدول الاستیسیته خاک ماسه رسی				مدول الاستیسیته خاک رس ماسه دار			
زمان / درصد	آنی	۷	۱٤	۲۸	آنی	۷	۱٤	۲۸
۰	۷٤/۳	۷۷/۱	۷۵/۸	۷۹/٦	۵٤/۳	٦۱/۰	۷۱/۲	۸۷/۹
۵	٦٦/۳	۷۲/٦	۸۰/۸	۱٦۲/٦	۵٤/٤	۷٦/۲	۱۰۵/۳	۱۲٤/۳
۱۰	۹۰/۷	۸۷/۱	۸۸/۱	۱۷۰/۵	۷۱/۰	۸٤/۹	۱۱٦/۲	۱٤۱/۵
۱۵	۹۹/٦	۱۰۳/۹	۹۱/۲	۲۰۰/۹	۸٦/۸	۱۱۱/۳	۱۳۵/٤	۱۷۲/۰
۲۰	۱۱۳/۵	۱۹۸/٦	۱۷۷/۲	۲٤٤/۸	۹۷/۲	۱۳۷/۷	۱۵٦/٦	۱۷۰
۲۵	۱۳٤/۵	۲۲۰/۲	۱۹۲/۹	۳۳۷/۸	۱۰۷/۹	۱٤٤/٦	۲۰۹/۰	۲۵۲/۷

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-31]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.2.6]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.609]

و ایجاد محصولات سیمانی بین خاک و پوزولان مورد نظر باشد که در نتیجه موجب سخت شدن خاک و افزایش مدول الاستیسیته آن شده است. هم‌چنین اثر عوامل فیزیکی ناشی از افزودن سپیولیت نیز کاملا تأثیرگذار بوده است، که در نهایت تأثیر عوامل فیزیکی و شیمیایی در کنار یک‌دیگر منجر به افزایش قابل توجه مدول الاستیسیته خاک شده است.

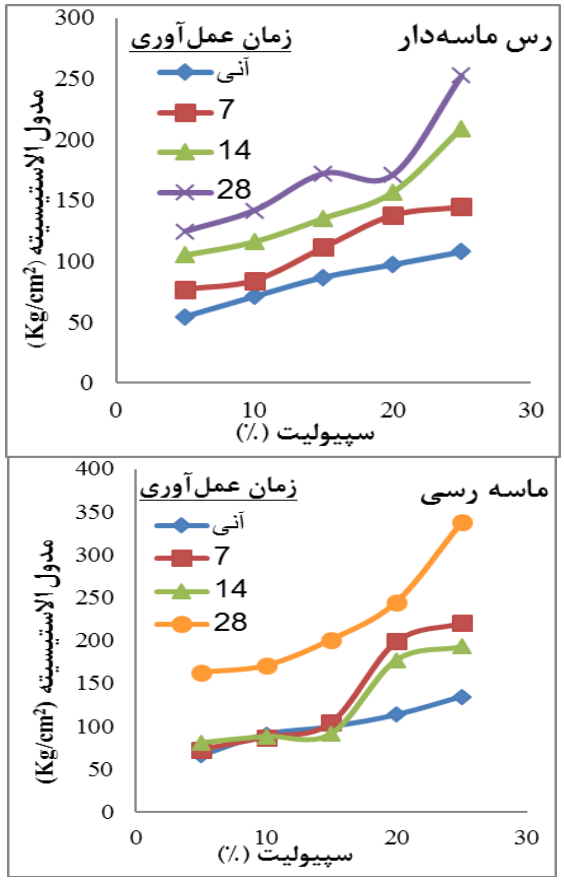


شکل ۲. خطوط رسم شده در ۵۰ درصد مقاومت نهایی بر نمودار تنش- کرنش حاصل از آزمایش تک‌محوری خاک‌های الف) ماسه رسی، ب) رس ماسه‌دار تثبیت شده با ۵ درصد زئولیت

مدول الاستیسته خاک‌های ماسه رسی و رس ماسه‌دار تثبیت شده با سپیولیت در درصدهای متفاوت و زمان‌های عمل‌آوری مختلف در شکل ۳ نشان داده شده است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-31]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.2.6]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.609]

به‌صورت‌کلی سختی خاک با افزایش میزان افزودنی افزایش یافته که این میزان افزایش در درصدهای بیش‌تر واضح تر است و شیب نمودار در اکثر زمان‌ها در درصدهای بالاتر بیش‌تر است. علت این موضوع را می‌توان به ماهیت فیزیکی (افزایش ذرات ریز خاک و الیافی شکل بودن ماده) سپیولیت به‌ویژه ساختار الیافی آن نسبت داد، که در کنار واکنش‌های شیمیایی باعث افزایش مدول الاستیسیته خاک شده و در درصدهای بالاتر اثر خود را بیش‌تر نشان می‌دهد.

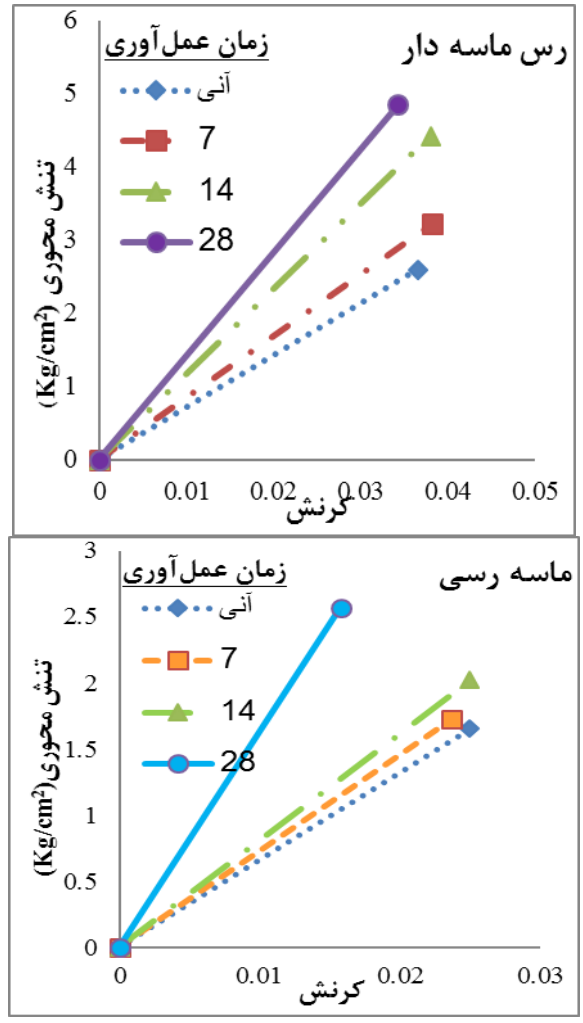


شکل ۳. تغییرات مدول الاستیسیته خاک‌های الف) ماسه رسی، ب) رس ماسه‌دار تثبیت شده با سپیولیت در درصدها و زمان‌های عمل‌آوری متفاوت

شکل ٤ خطوط متناظر با نمودار تنش-کرنش را تا رسیدن به ۵۰ درصد از مقاومت نهایی تک‌محوری خاک تثبیت شده با ۱۰ درصد سپیولیت در زمان‌های مختلف نشان می‌دهد.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-31]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.2.6]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.609]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-31]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.2.6]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.609]



شکل ٤. خطوط رسم شده در ۵۰ درصد مقاومت نهایی بر نمودار تنش- کرنش حاصل از آزمایش تک محوری خاک‌های الف) ماسه رسی، ب) رس ماسه‌دار تثبیت شده با ۱۰ درصد سپیولیت

به‌طورکلی در نمودارهای تنش-کرنش با افزایش زمان عمل‌آوری (به‌ویژه در ۲۸روز) کرنش کم‌تر شده است. این موضوع نشان می‌دهد نمونه‌ها در زمان‌های بیش‌تر رفتار الاستیک‌تری (یا به‌عبارتی تردتری) نشان می‌دهند که این خود باعث افزایش مدول الاستیسیته می‌شود. به‌علاوه سپیولیت دارای خاصیت جذب آب است و به‌نظر می‌رسد این موضوع باعث افزایش

تردی نمونه‌ها می‌شود. موارد ذکر شده در درصدهای دیگر نیز صادق است که به‌عنوان نمونه نمودارهای ۱۰ درصد در این مقاله آمده است.

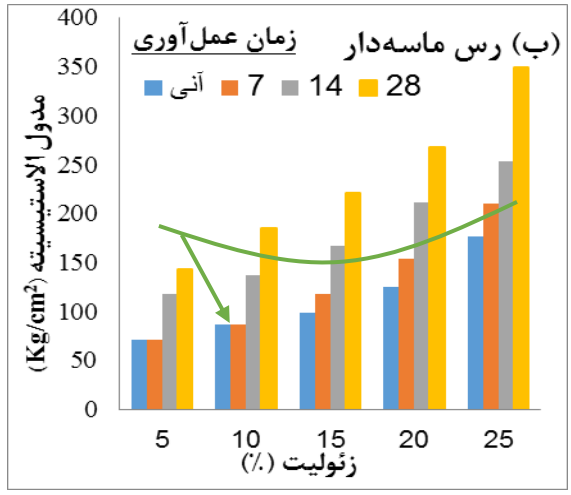
۱-۳. مقایسه اثر افزودنی‌های زئولیت و سپیولیت بر مدول الاستیسیته خاک‌های ماسه رسی و رس ماسه‌دار

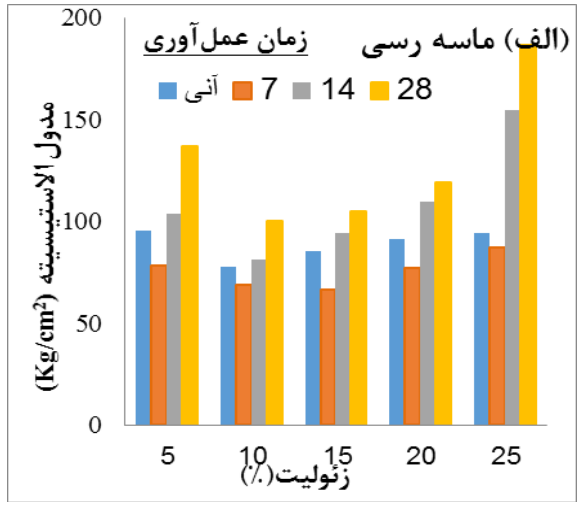
شکل ۵ تغییرات مدول الاستیسیته خاک‌های ماسه رسی و رس ماسه‌دار تثبیت شده با افزودنی‌های زئولیت و سپیولیت در درصدهای ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ و زمان‌های عمل‌آوری آنی، ۷، ۱٤ و ۲۸ روز را نشان می‌دهد.

مقایسهٔ دو قسمت الف و ج در شکل ۵ نشان می‌دهد میزان افزایش مدول الاستیسیته خاک ماسه رسی تثبیت شده با سپیولیت نسبت به زئولیت قابل ملاحظه‌تر است. هم‌چنین قسمت‌های الف تا د نشان می‌دهند در تثبیت با سپیولیت و زئولیت بیش‌ترین میزان افزایش مدول الاستیسیته در هر دو خاک ماسه رسی و رس ماسه‌دار مربوط به ۲۵ درصد افزودنی و زمان ۲۸ روز است. به‌علاوه در تثبیت با سپیولیت مدول الاستیسیته خاک ماسه رسی و رس ماسه‌دار به‌صورت تقریباً برابر، به ۵ برابر مقدار اولیه خود رسیده است. این در حالی است که در زئولیت مدول الاستیسیته در خاک ماسه رسی تقریباً ۲ برابر و رس ماسه‌دار نزدیک به ۵ برابر افزایش داشته است. به‌طورکلی در خاک ماسه رسی افزایش درصد افزودنی و زمان عمل‌آوری در سپیولیت باعث افزایش سختی خاک می‌شود و نمودار سختی (شکل ۵ ج) روندی صعودی دارد ولی در زئولیت در زمان‌های کم‌تر (۷ روز) و درصدهای پایین‌تر کاهش سختی خاک نیز مشاهده می‌شود و نمودار (شکل ۵ الف) به‌صورت نزولی و سپس صعودی است. به‌عبارت دیگر سختی نمونه پس از این‌که کاهش اولیه ای را تجربه می‌کند، افزایش می‌یابد. افزایش مقاومت در تثبیت با زئولیت و سپیولیت به‌دلیل واکنش‌های شیمیایی اعم از پوزولانی (به‌دلیل ماهیت پوزولانی مواد) و فولکولاسیون و تبادل یونی است. هم‌چنین تأثیر فیزیکی افزودنی‌های بررسی شده روی خاک، اعم از افزایش میزان ریزدانه و جذب آب، و از طرف دیگر الیافی شکل بودن سپیولیت باعث تغییر مدول الاستیسته خاک می‌شود. در نتیجه مجموع عوامل ذکر شده باعث افزایش مقاومت به‌ویژه در تثبیت با سپیولیت شده است.

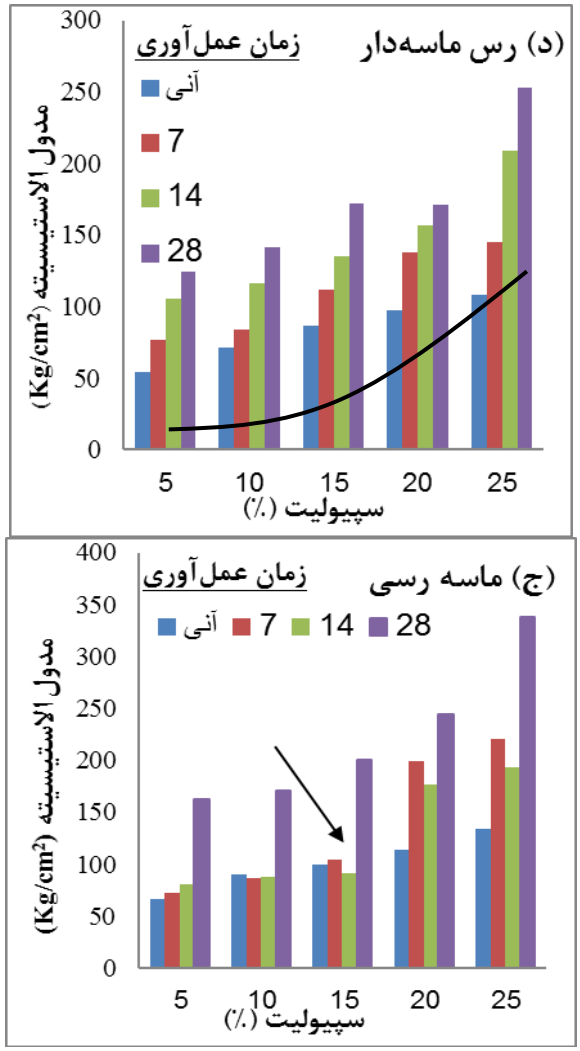
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-31]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.2.6]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.609]

بنابراین استفاده از سپیولیت نسبت به زئولیت در خاک ماسه رسی به‌علت افزایش بیش از پیش مدول الاستیسیته توصیه می‌شود. هم‌چنین در خاک رس ماسه‌دار عملکرد هر دو افزودنی قابل قبول و در یک سطح است ولی با توجه به گستردگی منابع زئولیت در داخل کشور، دسترسی سریع و آسان و ارزانی این ماده نسبت به سپیولیت استفاده از زئولیت در خاک رس ماسه‌دار توصیه می‌شود.





[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-31]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.2.6]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.609]



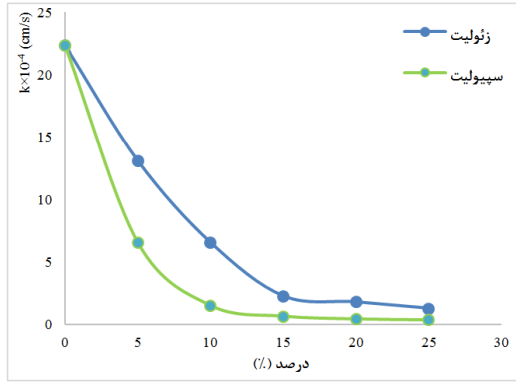
شکل ۵. تغییرات مدول الاستیسیته خاک‌های ماسه رسی (الف و ج) و رس ماسه‌دار (ب و د) تثبیت شده با افزودنی‌های زئولیت (الف و ب) و سپیولیت (ج و د) در درصد و زمان‌های متفاوت عمل‌آوری

۲. نفوذپذیری

چنان‌که پیش‌تر ذکر شد آزمایش تعیین ضریب نفوذپذیری روی نمونه‌های تثبیت شده با زئولیت و سپیولیت در درصدهای مختلف (۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درصد) و با وزن مخصوص خشک حداقل و پس از اشباع کامل نمونه‌ها انجام شده است. جدول ۵ تغییرات ضریب

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-31]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.2.6]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.609]

نفوذپذیری در درصدهای مختلف زئولیت را نشان می‌دهد. به‌طورکلی با افزایش میزان افزودنی نفوذپذیری کاهش می‌یابد. مطابق جدول ۵ ضریب نفوذپذیری خاک ماسه رسی بدون افزودنی، $۲۲/۳۷\times۱۰^{-۴}$ سانتی‌متر بر ثانیه است که این مقدار، با افزودن ۱۵ درصد زئولیت به $۲/۲\times۱۰^{-۴}$ سانتی‌متر بر ثانیه کاهش می‌یابد. به‌عبارتی، درصد بهینه افزودنی زئولیت برای کاهش ضریب نفوذپذیری ۱۵ درصد است. پس از این درصد نیز افزایش زئولیت باعث ادامه روند کاهش ضریب نفوذپذیری شده است، ولی روند مقدار کاهش به اندازه ۱۵ درصد افزودنی چشم‌گیر نیست، این موضوع به‌خوبی در شکل ٦ نشان داده شده است.



شکل ٦. نمودار تغییرات نفوذپذیری در درصدهای متفاوت زئولیت و سپیولیت

جدول ۵. تغییرات ضریب نفوذپذیری ($K\times10^{-4}\,cm/s$) در درصدهای متفاوت زئولیت و سپیولیت

درصد افزودنی / ماده افزودنی	۰	۵	۱۰	۱۵	۲۰	۲۵
زئولیت	۲۲/۳	۱۳	٦/٥	۲/۲	۱/۷۹	۱/۲۸
سپیولیت	۲۲/۳	٦/٥	۱/٤۹	۰/٦٤	۰/٤۲	۰/۳٥

جدول ۵ هم‌چنین تغییرات ضریب نفوذپذیری در درصدهای مختلف سپیولیت را نیز نشان می‌دهد. مطابق این جدول افزایش سپیولیت موجب کاهش بالای نفوذپذیری می‌شود به‌طوری‌که ضریب نفوذپذیری با افزودن ۵ درصد سپیولیت به $٦/٥\times۱۰^{-٤}$ سانتی‌متر بر ثانیه کاهش یافته است. این کاهش نفوذپذیری تا جایی ادامه می‌یابد که با افزودن ۲۵ درصد

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-31]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.2.6]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.609]

سپیولیت، ضریب نفوذپذیری ۶۳/۷ برابر نسبت به ماسه رسی بدون افزودنی کاهش می‌یابد.

شکل ٦ تغییرات ضریب نفوذپذیری در درصدهای مختلف زئولیت و سپیولیت را نشان می‌دهد. کاهش نفوذپذیری می‌تواند تحت اثر دو عامل فیزیکی و شیمیایی به وقوع بپیوندد ولی با توجه به این‌که هر دو افزودنی نمونه‌ها در زمان کوتاهی اشباع شدند و بلافاصله آزمایش نفوذپذیری انجام شد، تغییرات ضریب نفوذپذیری بیش‌تر تحت تأثیر عوامل فیزیکی می‌باشد و واکنش‌های شیمیایی تأثیر چندانی بر این تغییرات نخواهند داشت. به‌طورکلی با توجه به ریزدانه بودن هر دو نوع افزودنی، با افزایش تثبیت کننده‌ها هدایت هیدرولیکی کاهش می‌یابد. میزان کاهش هدایت هیدرولیکی در تثبیت با سپیولیت به مراتب بیش‌تر از زئولیت است که این موضوع به‌دلیل ساختار الیافی شکل سپیولیت در مقایسه با زئولیت است. ساختار الیافی شکل این ماده در تصاویر SEM به‌خوبی دیده می‌شود.

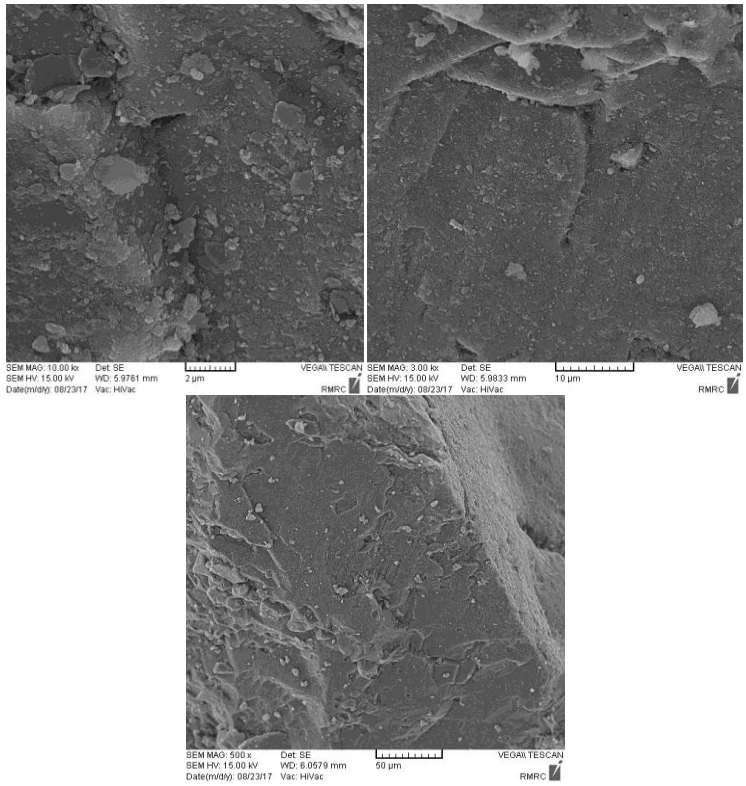
۳. تصویربرداری SEM

در این پژوهش سعی شده است با تصویربرداری SEM، علل نتایج به‌دست آمده در این پژوهش دقیق‌تر مورد بحث و بررسی قرار گیرد. به این منظور تصویربرداری میکروسکوپ الکترونی برای بررسی ریزساختار خاک و بررسی علت تغییر پارامترهای مقاومتی و در راستای تکمیل نتایج به‌دست آمده انجام شده است. شکل ۷ تصویر SEM خاک ماسه‌رسی تثبیت نشده در بزرگ‌نمایی‌های ۱۰۰۰۰ (الف)، ۳۰۰۰ (ب) و ۵۰۰ (ج) را نشان می‌دهد. چنان‌که در شکل مشاهده می‌شود ساختار خاک به‌صورت لایه‌ای و پولک‌های رس به‌صورت ورقه‌ای شکل مشخص هستند. در این نوع ساختار، خاک به‌صورت منسجم عمل نمی‌کند و مقاومت زیادی را از خود نشان نمی‌دهد.

شکل ۸ تصاویر SEM خاک ماسه رسی تثبیت شده با ۱۵ درصد زئولیت در زمان عمل‌آوری ۲۸ روز را نشان می‌دهد. مطابق شکل، نمونه در اثر تثبیت با زئولیت طی زمان عمل‌آوری از ساختار لایه‌ای خارج شده و طی واکنش تجمع-تراکم به ساختار مجتمع تغییر وضعیت داده است. هم‌چنین علت دیگر ایجاد ساختار مجتمع می‌تواند وقوع دیگر واکنش‌های شیمیایی اعم از تبادل یونی و پوزولانی در اثر افزودن زئولیت باشد. چنان‌که پیش‌تر ذکر شد هرگونه افزودنی زئولیتی در ترکیب با مصالح زمین‌شناسی به‌دلیل وقوع

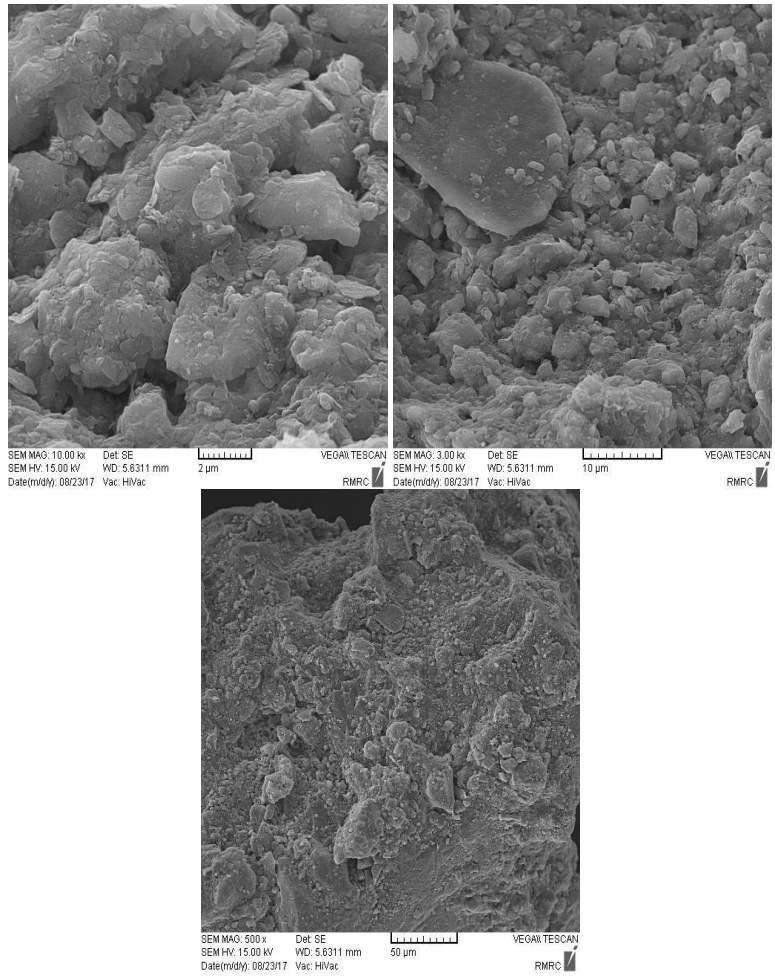
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-31]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.2.6]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.609]

واکنش‌های پوزولانی به‌راحتی باعث افزایش شکل‌گیری محصولات سیمانی می‌شود. زئولیت‌ها به‌دلیل سطح مخصوص بالا و وجود تخلخل در ساختارشان، فعالیت پوزولانی قابل توجهی نشان می‌دهند به‌طوری‌که سیلیکات‌های کلسیم هیدرات (CSH) و کلسیم آلومینات (CAH) تولید کرده و سخت می‌شوند. این واکنش‌ها باعث کاهش ضخامت لایه مضاعف و تبدیل ساختار خاک به‌حالت مجتمع می‌شود. به‌علاوه زئولیت‌ها جاذب آب هستند و این موضوع نیز باعث ایجاد حالت مجتمع در خاک می‌شود. نتیجه این‌که ایجاد حالت مجتمع در خاک باعث افزایش مقاومت تک‌محوری و در نتیجه افزایش سختی خاک شده است.



شکل ۷. تصاویر *SEM* خاک ماسه‌رسی تثبیت نشده الف) در بزرگ‌نمایی‌های ۱۰۰۰۰ برابر، ب) ۳۰۰۰ برابر، ۵۰۰ برابر ج)

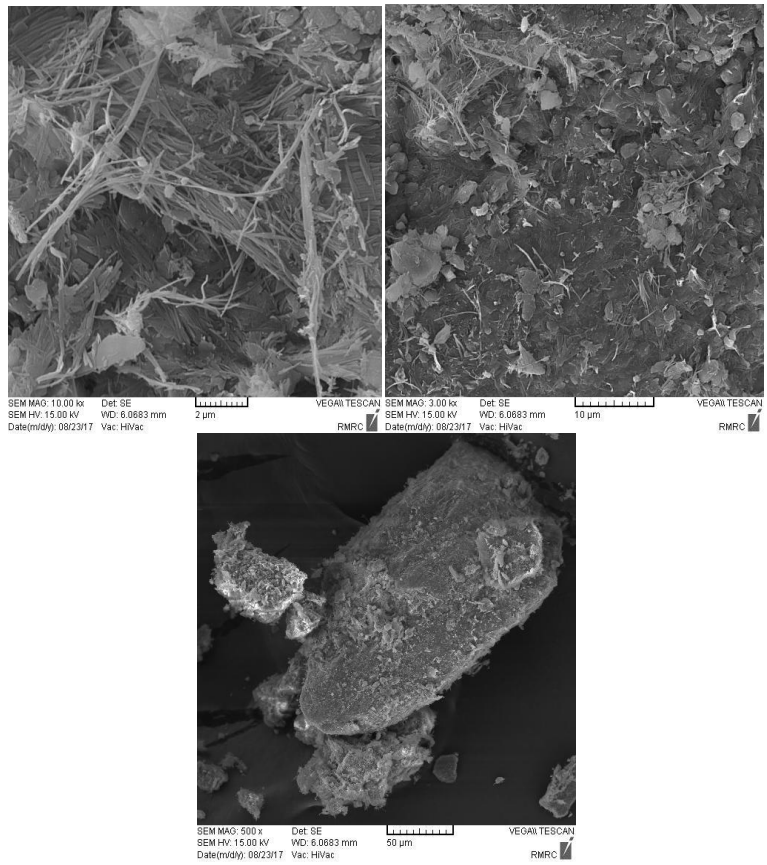
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-31]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.2.6]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.609]



شکل ۸-. تصاویر SEM خاک تثبیت شده با ۱۵ درصد زئولیت در زمان عمل‌آوری ۲۸ روز در الف) بزرگ‌نمایی‌های ۱۰۰۰۰ برابر، ب) ۳۰۰۰ برابر و ج) ۵۰۰ برابر

شکل ۹ تصاویر SEM خاک ماسه‌رسی تثبیت شده با ۱۵ درصد سپیولیت در زمان عمل‌آوری ۲۸ روز را نشان می‌دهد. چنان‌که در شکل مشخص است ساختار سپیولیت، الیافی شکل و به‌صورت رشته‌های طویل و در در هم تابیده است. هم‌چنین در اثر گذشت زمان ساختارهای مجتمعی نیز پدیدار شده‌اند که این موضوع می‌تواند ناشی از وقوع واکنش‌های شیمیایی باشد. بنابراین در این ماده افزودنی علاوه بر واکنش‌های شیمیایی، ساختار فیزیکی خاک در نتیجه افزودن سپیولیت نیز سهم عمده‌ای در افزایش مقاومت خاک داشته‌اند.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-31]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.2.6]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.609]



شکل ۹. تصاویر *SEM* خاک تثبیت شده با ۱۵ درصد سیپولیت در زمان عمل‌آوری ۲۸ روز در بزرگنمایی‌های در بزرگ‌نمایی الف) ۱۰۰۰۰ برابر، ب) ۳۰۰۰ برابر و ج) ۵۰۰ برابر

زئولیت و سپیولیت هر دو پوزولان‌هایی هستند که با گذشت زمان و وقوع واکنش‌های شیمیایی از جمله واکنش پوزولانی باعث ایجاد محصولات سیمانی و ساختار مجتمع در خاک می‌شوند. تصاویر SEM نشان می‌دهد، یکی از علل تغییرات در نتایج حاصل از دو نوع افزودنی، می‌تواند تفاوت ساختار فیزیکی مواد افزودنی باشد. سپیولیت‌ها علاوه بر فعالیت پوزولانی، دارای ساختار الیافی شکل نیز هستند که این ساختار باعث ایجاد انسجام و یک‌پارچگی در خاک می‌شود و در نتیجه مقاومت خاک تثبیت شده با این ماده افزایش می‌یابد.

در این پژوهش تلاش شد تا با بررسی تأثیر افزودن پوزولان‌های طبیعی زئولیت و سپیولیت از مصالح بومی سازگار با محیط زیست با هزینه اندک استفاده شود. زئولیت و

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-31]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.2.6]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.609]

سپیولیت معادن وسیعی در سطح کشور دارند. استفاده از این افزودنی‌ها با توجه به‌وجود معادن در نقاط مختلف کشور، سازگاری زیاد با محیط‌زیست و تأثیرات مثبت‌شان بر انواع خاک‌ها توجیه فنی و اقتصادی دارد. اصلاح خاک با مواد افزودنی در موارد مختلفی از جمله در مهندسی عمران، محیط‌زیست و کشاورزی کاربرد دارد. از جمله کاربردهای این تحقیق می‌توان به تثبیت روسازی راه‌ها، بهبود مصالح ساختمانی و محوطه‌سازی، به‌دلیل افزایش پایداری خاک‌ها، پایداری شیب‌ها و ترانشه‌ها اشاره کرد.

نتیجه‌گیری

بهبود پارامترهای مهندسی خاک به‌روش‌های مختلف از جمله تثبیت شیمیایی، یکی از چالش‌های پژوهش‌گران در مهندسی ژئوتکنیک است. بنابراین در این پژوهش از دو ماده افزودنی با ویژگی‌های منحصر به‌فرد که سازگار با محیط زیست نیز هستند، استفاده شده است. در این پژوهش آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری در درصدهای ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ و زمان‌های آنی، ۷، ۱٤ و ۲۸ روز در هر دو خاک انجام و مدول الاستیسیته محاسبه شد. به‌علاوه به‌منظور بررسی اثر این دو افزودنی بر هدایت هیدرولیکی، آزمایش نفوذپذیری در درصدهای متفاوت انجام شد. هم‌چنین به‌منظور بررسی تأثیرات این مواد بر ریزساختار خاک، تصویربرداری SEM نیز برای خاک تثبیت نشده و تثبیت شده با هر دو افزودنی در زمان ۲۸ روز انجام شد.

نتایج نشان می‌دهد هر دو افزودنی باعث افزایش مدول الاستیسیته خاک‌های ماسه رسی و رس ماسه‌دار می‌شوند. در تثبیت با سپیولیت و زئولیت بیش‌ترین میزان افزایش مدول الاستیسیته در هر دو خاک ماسه رسی و رس ماسه‌دار مربوط به ۲۵ درصد افزودنی و زمان ۲۸ روز است. هم‌چنین نتایج بیان‌گر افزایش یک‌نواخت و همواره صعودی سختی خاک بهسازی شده با سپیولیت در طول زمان عمل‌آوری است. این در حالی است که در زئولیت در زمان‌های کم‌تر و درصدهای کم‌تر کاهش سختی خاک مشاهده می‌شود. به‌طورکلی مدول الاستیسیته در خاک‌های ماسه رسی و رس ماسه‌دار تثبیت شده با سپیولیت تا ۵ برابر مقدار اولیه خود افزایش داشته است، در حالی‌که در تثبیت با زئولیت در خاک ماسه رسی افزایشی ۲ برابری و در رس ماسه دار تا نزدیک به ۵ برابر افزایش مشاهده می‌شود. به‌طورکلی با

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-31]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.2.6]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.609]

افزایش هر دو افزودنی نفوذپذیری خاک کاهش می‌یابد که این موضوع به‌دلیل تأثیر فیزیکی و ریزدانه بودن افزودنی‌هاست. به‌علاوه میزان کاهش نفوذپذیری در سپیولیت بیش‌تر از زئولیت است که به‌دلیل ساختار الیافی شکل سپیولیت در مقایسه با زئولیت است. نتایج حاصل از تصویر برداری SEM تغییرات فیزیکی در کنار تغییرات شیمیایی در خاک تثبیت شده با سپیولیت نشان می‌دهد. هرچند تغییرات فیزیکی در هر نمونه‌های تثبیت شده با هر دو نوع افزودنی وجود دارد اما ساختار الیافی شکل سپیولیت این تغییر را در نمونه‌های تثبیت شده با سپیولیت کاملاً محسوس کرده است. تصاویر SEM هم‌چنین نشان می‌دهند وقوع واکنش‌های شیمیایی در خاک باعث ایجاد ساختار مجتمع شده است که در نهایت موجب افزایش مقاومت تک‌محوری و مدول الاستیسیته می‌شود.

تقدیر و تشکر

از پرسنل محترم شرکت ایران خاک به‌ویژه آقای مهندس بصیر مدیر عامل محترم شرکت به‌دلیل در اختیار قرار دادن تجهیزات آزمایشگاهی و هم‌چنین مهندس ثوابی و شرکت درکاو به‌دلیل در اختیار قرار دادن ماده سپیولیت، تقدیر و تشکر می‌کنیم.

منابع

1. Colella C., "Natural zeolites for environmentally friendly processes and applications", In: Kiricsi I, Pl-Borbély G, Nagy JB, Karge HG, editors. Porous materials in environmental friendly processes (studies in surface science and catalysis 125). Amsterdam: Elsevier (1999) 641-55.
2. Caputo D., Liguori B., Colella C., "Some advances in understanding the pozzolanic activity of zeolites: the effect of zeolite structure", Cem Con Comp 30 (2008) 455-62.
3. Liguori B., Iucolano F., Caputo D., Colella C., "LTA zeolite as pozzolanic addition for hydraulic mortars: an effective, promising use", Adv Porous Mater, 1 (2013) 129-35.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-31]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.2.6]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.609]

4. Liguori B., Caputo D., Iucolano F., "Fiber-reinforced lime-based mortars: Effect of zeolite addition", Construction and Building Materials (2014) 455-460.

5. Vagelis G. P., "Effect of fly ash on Portland cement systems part II", High-calcium fly ash. Cem Concr Res, 30 (2000) 1647-54.

6. Targana S., Olgunb A., Erdoganb Y., Sevinc V., "Effects of supplementary cementing materials on the properties of cement and concrete", Cem Concr Res, 32 (2002) 1551-8.

7. Toutanji H., Delatte N., Aggoun S., Duval R., Danson A., "Effect of supplementary cementatious materials on the compressive strength and durability of shortterm cured concrete", Cem Concr Res, 34 (2004) 311-9.

8. Poon C. S., Lam L., Kou S. C., Lin Z. S., "A study on the hydration rate of natural zeolite blended cement pastes", Constr Build Mater, 13 (1999) 427-32.

9. Canpolat F., Yilmaz K., Mkose M., Sumer M., Yurdusev M. A., "Use of zeolite, coal bottom ash and fly ash as replacement materials in cement production", Cem Concr Res, 34 (2004) 731-5.

10. Quanlin N., Naiqian F., "Effect of modified zeolite on the expansion of alkaline silica reaction", Cem Concr Res, 37 (2005) 1784-8.

11. Martinez-Ramrez S., Puertas F., Blanco Varela M. T., "Carbonation process and properties of a new lime mortar with added sepiolite", Cem Concr Res, 25 (1995) 39-50.

12. Sepulcre Aguilar A., Pinilla Melo J., Hernandez Olivares F., "Microstructural analysis of aerated cement pastes with fly ash, metakaolin and sepiolite additions", Constr Build Mater, 47 (2013) 282-92.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-31]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.2.6]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.609]

13. Melo J., Aguilar A., Olivares F., "Rheological properties of aerated cement pastes with fly ash, metakaolin and sepiolite additions", Constr Build Mater, 65 (2014) 566-73.

14. Feng N., Li G., Zang X., "High strength and flowing concrete with a zeolite mineral admixture", Cement, Concrete and Aggregate (1991).

15. Abbaslou H., Ghanizadeh A. R., Amlashi A. T., "The compatibility of bentonite/sepiolite plastic concrete cut-off wall material", Construction and Building Materials, Vol. 124, (2016) 1165-1173.

16. Markiv T., Sobol K., Franus M., Franus W., "Mechanical and durability properties of concretes incorporating natural zeolite", Archives of Civil and Mechanical Engineering, vol, 16, Issue, 4 (2016) 554-562.

17. Samimi K., Kamali-Bernard S., Akbar Maghsoudi A., Maghsoudi M., Siad H., "Influence of pumice and zeolite on compressive strength, transport properties and resistance to chloride penetration of high strength self-compacting concretes", Construction and Building Materials, Vol.151 (2017) 292-311.

18. Woszuk A., Franus W., "Properties of the Warm Mix Asphalt involving clinoptilolite and Na-P1 zeolite additives", Construction and Building Materials, Vol.114 (2016) 556-563.

19. Osinubi K. J., Nwaiwu C. M., "Compaction Delay Effects of properties of Lime-Treated Soil", Journal of Materials in Civil Engineering, 18 (2) (2006) 250-258.

20. Zhu Z. D., Liu S.Y., "Utilization of a new Soil Stabilization for Silt Subgrade", Engineering Geology, 97 (2008) 192-198.

۲۱. بارزی ش.، "تثبیت خاک ماسه بادی با پلیمرهای مایع"، پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکدهٔ مهندسی عمران، اصفهان (۱۳۸۹).

۲۲. قنبری ع.، "مطالعه مدول الاستیسیته خاک در آبرفت جنوب تهران"، نشریهٔ علوم زمین. بهار، سال هجدهم، شمارهٔ ۷۱، (۱۳۸۸) ۸-۳.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-31]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.4.2.6]
[DOI: 10.52547/jeg.14.4.609]