

بررسی تاثیر افزودن آنزیم اوره‌آز بر مقاومت تک‌محوری خاک تثبیت‌شده با سیمان و زئولیت

رضا یوسفی*^۱، مسعود عامل سخی^۲، عبدالرضا کریمی^۳

پذیرش مقاله: ۹۹/۰۶/۳۰

دریافت مقاله: ۹۹/۰۱/۰۳

چکیده

امروزه برای تثبیت خاک از روش‌های نوینی استفاده می‌شود که علاوه بر بهبود خصوصیات مهندسی خاک، سازگار با محیط زیست بوده و برای آب‌های زیرزمینی بی‌خطر هستند. یکی از این روش‌ها، تشکیل رسوب کلسیم کربنات در منافذ خاک برای افزایش مقاومت، چسبندگی، سختی و کاهش نفوذپذیری خاک است. از آنجا که بیشتر پژوهش‌های انجام‌شده در مورد تشکیل رسوب کلسیم کربنات با استفاده از هیدرولیز اوره توسط باکتری‌ها صورت گرفته است، در این پژوهش، سعی شده است با استفاده مستقیم از آنزیم اوره‌آز به این رسوب دست یافت. این روش محدودیت‌های استفاده از باکتری‌ها را ندارد و همچنین باعث عملی‌تر شدن طرح بهسازی می‌شود. این پژوهش به بررسی تاثیر افزودن آنزیم اوره‌آز به خاک ماسه‌ای تثبیت شده با سیمان و زئولیت و همچنین تاثیر مصالح ریزدانه پرداخته است. نتایج آزمایش‌های مقاومت تک‌محوری نشان داد که با جایگزینی ۱۰٪ زئولیت به جای سیمان در حالتی که از ۱۰٪ ریزدانه نیز استفاده شد، مقاومت بیشتری نسبت به نمونه‌های بدون زئولیت و با ریزدانه کمتر، مشاهده می‌شود. از طرفی با افزودن آنزیم اوره‌آز، در حالتی که از ۴٪ سیمان، ۱۰٪ ریزدانه و آنزیم اوره‌آز استفاده شده است نسبت نمونه‌های بدون آنزیم، مقاومت فشاری در زمان عمل‌آوری ۱۴ و ۲۸ روزه، ۴/۱۲ و ۳/۱ برابر شده است.

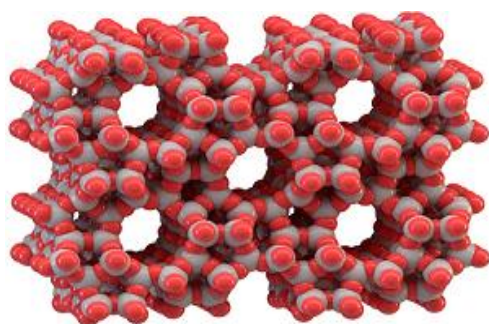
کلید واژه‌ها: آنزیم اوره‌آز، زئولیت، سیمان، ریزدانه، آزمایش مقاومت تک‌محوری.

۱. کارشناس ارشد مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی قم، قم yousefi.r@qut.ac.ir

۲. عضو هیات علمی گروه مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی قم، قم

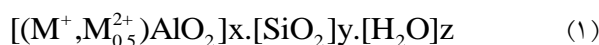
۳. عضو هیات علمی گروه مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی قم، قم

* مسئول مکاتبات



شکل ۱. واحد ساختمانی ژئولیت (Riberio et al., 1984)

ژئولیت‌ها به دو گروه طبیعی و مصنوعی تقسیم می‌شوند. یکی از نظریه‌هایی که در مورد شرایط و علت تشکیل ژئولیت‌ها در طبیعت، ارائه شده این است که ژئولیت‌ها اغلب در لایه‌های رسوبی، بعد از تشکیل و دفن رسوبات در اثر واکنش آلومینیم سیلیکات با آب حفره‌ها در درزها و شکستگی‌ها تشکیل شده اند. تمامی کانی‌های ژئولیت که تا به حال شناسایی شده اند، کانی‌های ثانویه بوده و از تخریب یا دگرسانی کانی‌های اولیه‌ای نظیر فلدسپات، رس‌ها و در نهایت از ژل‌های سیلیکاته طبیعی به وجود می‌آیند. معادله (۱) فرمول شیمیایی کلی ژئولیت‌ها را بیان می‌کند؛ که در آن M^+ کاتیون‌های فلز قلیایی و M^{2+} کاتیون‌های قلیایی خاکی است (Fertu and Gavrilesco, 2012).



امروزه سیمانی‌شدن زیستی در ژئوتکنیک اهمیت خاصی یافته است. یکی از متداول‌ترین روش‌های سیمانی‌شدن که تاکنون پژوهش‌های بسیاری بر روی آن صورت گرفته است روش رسوب کلسیم کربنات (کلسیت) می‌باشد که توان بالقوه‌ای برای افزایش خصوصیات مهندسی خاک مانند مقاومت و سختی خاک دارد. کلسیم کربنات به عنوان سیمانی جهت اتصال ذرات خاک عمل می‌کند و با ایجاد پل‌های ارتباطی بین دانه‌های خاک باعث افزایش پایداری و کاهش نفوذپذیری می‌شود (Mortensen et al., 2011 and Ozdogan, 2010).

در این روش از گونه خاصی از باکتری‌های اوره‌آز مثبت (باکتری‌هایی که توانایی هیدرولیز اوره دارند) که در خاک زندگی می‌کنند و خاصیت قلیادوستی دارند استفاده می‌شود که با انجام واکنش هیدرولیز اوره باعث ایجاد رسوب در

۱. مقدمه

گسترش مناسب زیرساخت‌های شهری برای تامین نیاز رو به رشد جامعه لازم بوده و این مسأله به طور مستقیم با دسترسی به خاک مناسب که بتوان بر روی آن ساخت‌وساز نمود مرتبط است، همزمان شرایط زیست‌محیطی نیز برای زندگی در مناطق شهری در حال تنزل بوده و این مسایل باعث شده تا همواره تقاضا برای روش‌های جدید و سازگار با محیط زیست برای بهسازی و تقویت خاک در حال افزایش باشد. یکی از این روش‌ها، استفاده از باکتری‌های موجود در خاک جهت ایجاد اتصالات و چسبندگی بین دانه‌های خاک می‌باشد (قربانی و همکاران، ۱۳۹۸).

خاک‌های دانه‌ای به دلیل خصوصیات مقاومتی همواره مشکل‌ساز بوده‌اند. از ویژگی‌های عمده خاک‌های ماسه‌ای سست و یکنواخت، مقاومت کم و عدم چسبندگی آن‌ها می‌باشد. جهت تثبیت این نوع خاک، استفاده از تکنیک افزودن سیمان به عنوان یکی از گزینه‌های پرکاربرد مورد استفاده مهندسی می‌باشد (Gunaratne, 2006).

امروزه در بسیاری از پروژه‌های عمرانی بخش قابل توجهی از منابع مالی صرف اصلاح خاک می‌گردد. همزمان شرایط زیست‌محیطی نیز برای زندگی در مناطق شهری در حال وخامت است. همچنین سمی‌بودن برخی روش‌های بهسازی از جمله استفاده از مواد شیمیایی مانند آهک و سیمان موجب بروز برخی مشکلات زیست‌محیطی نظیر آلودگی خاک‌ها و تغییر مسیر سفره‌های آب زیرزمینی می‌شود (مهدوی و اجل‌لوئیان، ۱۳۹۶).

ژئولیت‌ها آلومینوسیلیکات‌هایی کریستالی از فلزات قلیایی یا قلیایی خاکی مانند سدیم، پتاسیم، منیزیم، استرانسیم، باریم و کلسیم هستند که از ترکیب $[AlO_4]^{5-}$ و $[SiO_4]^{4-}$ به وجود می‌آیند (Fertu and Gavrilesco, 2012).

شکل (۱) واحد ساختمانی ژئولیت‌ها را نشان می‌دهد.

استفاده مستقیم از آنزیم اوره‌آز به جای میکروارگانیزم‌هایی نظیر *Sprosaricina pasteurii* جهت تشکیل رسوب کلسیت می‌تواند مزایایی شامل مرتفع نمودن نیاز به تجهیزات و امکانات آزمایشگاهی، جنبه عملی و میدانی بخشیدن به طرح بهسازی و از میان بردن محدودیت‌های ابعادی میکروارگانیزم و خاک را شامل شود.

۲. مروری بر مطالعات پیشین

عباسی و همکاران (۱۳۹۴) به بررسی اثر ژئولیت بر مقاومت کششی خاک ماسه‌ای تثبیت شده با سیمان پرداختند. نتایج این بررسی نشان داد که با جایگزینی ۳۰ درصد ژئولیت طبیعی به جای سیمان، افزایش ۴۵ درصدی مقاومت کششی نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های بدون ژئولیت قابل دستیابی است.

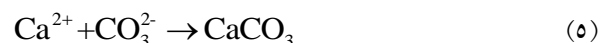
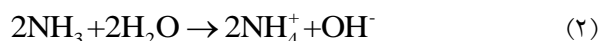
ملاعباسی و شوش‌پاشا (۱۳۹۵) به بررسی تاثیر جایگزینی ژئولیت با سیمان در نمونه‌های خاک ماسه‌ای بابل‌سرد پرداختند. آن‌ها از نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری به این نتیجه رسیدند که با جایگزینی ۳۰ درصد ژئولیت به جای سیمان نسبت به نمونه‌های بدون ژئولیت، مقاومت فشاری تک‌محوری به میزان ۲۰ تا ۷۸ درصد افزایش یافته است.

عباسی و همکاران (۱۳۹۸) در مطالعه‌ای به بررسی تاثیر جایگزینی ژئولیت در نمونه‌های خاک ماسه‌ای تثبیت شده با سیمان پرداختند. آن‌ها برای رسیدن به این هدف از آزمایش‌های برش مستقیم استفاده نمودند و نتیجه گرفتند که با جایگزینی ۵۰ درصد ژئولیت به جای سیمان، مقاومت برشی نمونه‌ها، نسبت به نمونه‌های بدون ژئولیت به میزان ۶۲ درصد همراه با افزایش کرنش گسیختگی، افزایش می‌یابد.

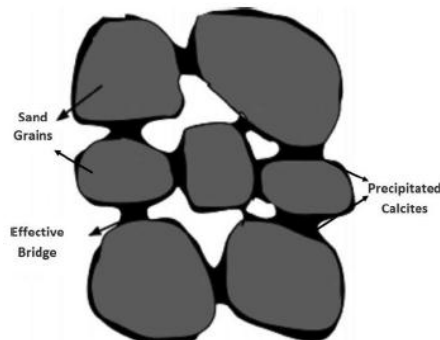
دجانگ و همکاران (DeJong et al., 2009) برای بهسازی بیولوژیکی، آزمایشی در مقیاس بزرگ انجام داده‌اند. در این آزمایش یک پی سطحی مدل‌سازی شده و توسط آزمون بارگذاری صفحه‌ای (Plate Load Test) و تکنیک سرعت موج برشی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که در صورت تثبیت خاک به‌روش بیولوژیکی نشست پی ۵ برابر کاهش یافته است.

خاک می‌شوند. این واکنش با وجود دو ماده اوره و کلسیم کلرید در خاک اتفاق افتاده و موجب بالا رفتن pH خاک شده و در نهایت رسوب تشکیل شده از این واکنش باعث ایجاد چسبندگی در بین ذرات خاک می‌شود (Wiffin, 2004).

هیدرولیز اوره عبارت است از تبدیل اوره به یون‌های کربنات و آمونیوم که در حضور آب صورت می‌گیرد. هیدرولیز اوره بدون حضور کاتالیزور یک فرآیند شیمیایی آهسته است. آنزیم اوره‌آز حاصل از میکروارگانیزم‌ها واکنش‌های هیدرولیز اوره را بیش از 10^{14} بار سریع‌تر می‌کند و در واقع فرآیندی را که به صورت طبیعی طی میلیون‌ها سال باعث تبدیل ماسه به ماسه سنگ می‌شود را در طول ۷ الی ۱۰ روز انجام می‌دهد. طرز کار این فرآیند را می‌توان طبق واکنش‌های (۱) و (۵) جمع بندی نمود به نحوی که آنزیم اوره‌آز موجود در باکتری، اوره موجود در محیط را هیدرولیز نموده و در نهایت از طریق واکنش با یون کلسیم منجر به رسوب کربنات کلسیم می‌شود (DeJong et al., 2010).



شکل (۲) تشکیل رسوب بین دانه‌های خاک و پل‌های سیمانی ایجاد شده را نشان می‌دهد.



شکل ۲. رسوب کلسیم کربنات تشکیل شده بین دانه‌های

خاک (Larsson and Axelsson, 2012)

قابل توجهی کاهش یافته است. روشن بخت و همکاران (۱۳۹۴) به بررسی فاکتورهایی شامل نوع باکتری، غلظت محلول سیمانی، دما و تراکم سلول باکتری پرداختند و به این نتیجه رسیدند که تزریق مرحله‌ای، باعث سیمانی شدن بهتر نمونه می‌شود. همچنین به کمک MICP نفوذپذیری کاهش و مقاومت افزایش می‌یابد.

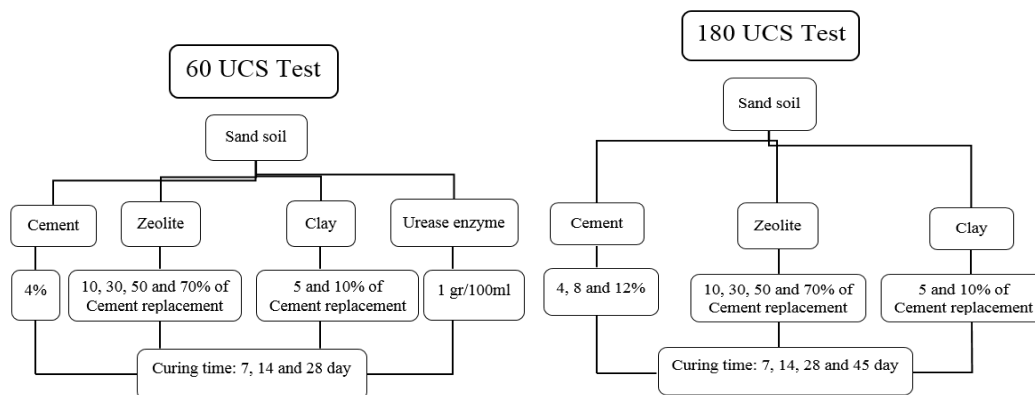
۳. مواد و روش‌ها

۳-۱. برنامه آزمایشگاهی

برای مطالعه تاثیر آنزیم اوره‌آز بر مقاومت فشاری تک‌محوری خاک ماسه‌ای با دانه‌بندی یکنواخت، پارامترهای مقدار سیمان، ژئولیت، ریزدانه و زمان عمل‌آوری مدنظر قرار گرفته است. به منظور بهسازی این خاک از مقادیر ۴ و ۸ درصد وزنی سیمان، ۱۰، ۳۰، ۵۰ و ۷۰ درصد جایگزینی ژئولیت به جای سیمان و مقادیر ۵ و ۱۰ درصد وزنی خاک پایه، ریزدانه‌ی رسی استفاده شده است. در طرحی دیگر مقادیر قبلی با آنزیم اوره‌آز به میزان ۱gr بر ۱۰۰ml محلول کلسیم کلراید و اوره به مقدار ۱ mol/L استفاده شده است. زمان عمل‌آوری برای نمونه‌های شامل سیمان، ژئولیت و ریزدانه ۷، ۱۴، ۲۸ و ۴۵ روز و برای نمونه‌های شامل سیمان، ژئولیت، ریزدانه و آنزیم اوره‌آز ۷ و ۱۴ و ۲۸ روز در نظر گرفته شده است. نمای کلی از آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری بر روی نمونه‌های شیمیایی و زیستی در شکل (۳) نشان داده شده است.

مروج و همکاران (Moravej et al., 2018) به بررسی تاثیر باکتری *Bacillus sphaericus* بر تثبیت و بهسازی خاک واگرا پرداختند. به منظور بررسی درجه واگرایی خاک از آزمایش پین‌هول استفاده شده است. نتایج این آزمایش نشان داد که با افزایش غلظت محلول باکتری و همچنین با گذشت زمان از میزان واگرایی خاک کم شده است. فرآیند رسوب کلسیم کربنات توسط پارک و همکاران (Park et al., 2014) روی خاک سیمانته شده ضعیف انجام شده است. در این پژوهش محیط کشت حاوی باکتری در چند مرحله تزریق وارد خاک شد. مقاومت تک‌محوری نمونه‌های یک بار تزریق ۵۰٪ نسبت به نمونه‌های تزریق نشده افزایش یافته است. در نمونه‌های با دوبار تزریق و بیشتر مقاومت نمونه‌ها به تدریج تا ۵۰٪ نمونه‌های تزریق نشده کاهش یافته است. به دلیل از بین رفتن پیوندهای موجود بین دانه‌های سیمانی‌شده خاک توسط رسوب میکروبی کلسیت و جایگزینی رسوب کلسیت با سیمان موجود در خاک، مقاومت نمونه‌ها، به‌خصوص در تعداد تزریق‌های بیشتر، کاهش یافته است.

ویفین و همکاران (Wiffin et al., 2007) در تحقیقی به بررسی بهسازی زیستی خاک با استفاده از رسوب میکروبی کلسیم کربنات از روش تثبیت باکتری در خاک استفاده نمودند. میکروارگانیسم مورد استفاده در این آزمایش باکتری *Sporosarcina pasteurii* بوده است. نتایج آزمایش سه محوری نشان‌دهنده‌ی افزایش مقاومت خاک تثبیت‌شده بوده است. همچنین تخلخل و نفوذپذیری خاک نیز به شکل



شکل ۳. نمای کلی انجام آزمایش بر روی نمونه‌های شیمیایی (سمت راست) و نمونه‌های زیستی (سمت چپ)

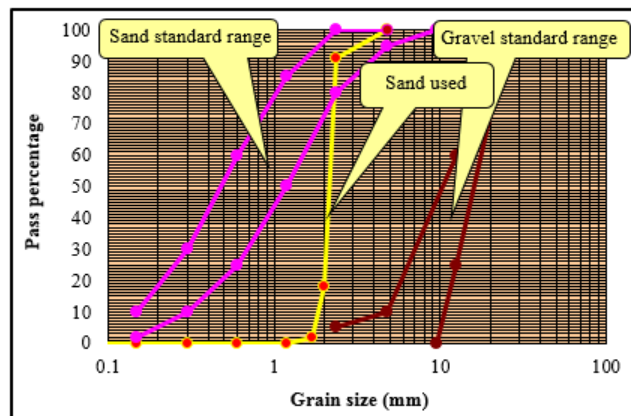
مصالح مورد استفاده در این پژوهش شامل خاک ماسه‌ای، سیمان، ژئولیت، ریزدانه و آنزیم اوره‌آز می‌باشد.

۳-۲-۱. ماسه

خاکی که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است، خاک ماسه‌ای با دانه بندی یکنواخت است. دانه بندی این خاک، ماسه تا شن درشت است. پس از انتقال به آزمایشگاه با الک کردن خاک پایه، دانه بندی عبوری از الک نمره ۸ و مانده روی الک نمره ۱۰ به عنوان خاک اصلی مورد آزمایش در نظر گرفته شد. با انجام آزمایش دانه بندی روی این خاک مشخص شد که این خاک از نوع ماسه با دانه بندی بد (SP) است. دلیل انتخاب این خاک، دانه بندی یکنواخت و عدم چسبندگی در آن است که جزء بدترین حالت ممکن در بین خاک‌ها محسوب می‌شود و در صورت تثبیت این نوع خاک، خاک‌های دیگر نیز می‌توانند قابل بهسازی باشند. نمودار دانه بندی این خاک طبق استاندارد ASTM C136 در شکل (۴) و مشخصات آن در جدول (۱) آورده شده است.

به منظور بررسی ساختاری نمونه‌های بهسازی شده از آزمایش میکروسکوپ الکترونی (SEM) استفاده شده است. میکروسکوپ الکترونی روبشی، از مناسب‌ترین وسایل در دسترس برای آزمایش و آنالیز مورفولوژی نانو ساختارها و شناسایی ترکیبات شیمیائی است. توانایی SEM برای بررسی سطح مواد بی نظیر بوده و دارای برتری‌های فراوانی نسبت به میکروسکوپ‌های نوری است. در میکروسکوپ نوری تشکیل تصویر با استفاده از نورهای منعکس شده از سطح نمونه صورت می‌گیرد، در حالی که در میکروسکوپ الکترونی، این مهم با به کارگیری الکترون‌ها میسر می‌شود. در واقع این میکروسکوپ یکی از روش‌های تولید تصاویر با روبش یک پرتو الکترونی روی سطح نمونه است. طول موج الکترون‌ها از فوتون‌های نور کوتاه تر بوده و طول موج کوتاه تر باعث ایجاد وضوح، قدرت تفکیک و حصول اطلاعات مناسب تر می‌شود.

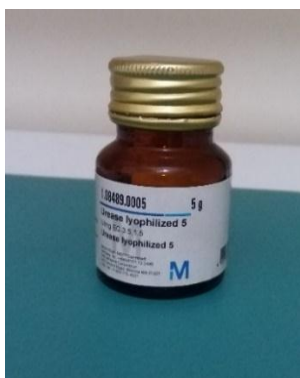
۳-۲. مصالح مورد استفاده



شکل ۴. نمودار دانه بندی ماسه

جدول ۱. مشخصات فیزیکی خاک ماسه‌ای

| Soil type (ASTM D-2487) | Grian (mm) size | W(%) | $\gamma_{d,max}$ (gr/cm ³) | $\gamma_{d,min}$ (gr/cm ³) | e_{max} | e_{min} | G_s |
|----------------------------|--------------------|------|----------------------------------------|----------------------------------------|-----------|-----------|-------|
| SP | 2-2.36 | 8.43 | 1.59 | 1.47 | 0.806 | 0.6 | 2.65 |



شکل ۵. آنزیم اوره‌آز

۳-۳. نمونه‌سازی و مراحل انجام آزمایش

از آن‌جا که نمونه‌ها برای عمل‌آوری نیاز به زمان دارند و باید درون قالب نگهداری شوند، از لوله‌ی پلیکا (PVC) به عنوان قالب استفاده شده است. اندازه ابعاد قالب‌های لوله پلیکا با قطر خارجی ۴۰ mm و قطر داخلی ۳۴ mm بوده که به ارتفاع ۷۰ mm بریده شده است. همچنین جهت سهولت در خارج کردن نمونه‌ها پس از عمل‌آوری، قالب‌ها به صورت عمودی نیز به دو قسمت مجزا تقسیم شده اند. قالب‌های PVC و نحوه برش آن‌ها در شکل (۶) نشان داده شده است.



شکل ۶. قالب‌های PVC جهت ساخت نمونه

جهت افزودن آنزیم اوره‌آز، کلسیم کلراید و اوره ابتدا با توجه به درصد آب بهینه‌ی خاک ماسه‌ای، مقدار آب لازم برای ساخت نمونه را جدا و به دو قسمت تقسیم شده است. بخشی را با اوره و کلسیم کلراید و بخش دیگر با آنزیم اوره‌آز مخلوط گردیده است (شکل ۷). ابتدا خاک ماسه‌ای را با سیمان، ژئولیت و ریزدانه به صورت خشک مخلوط شده و سپس محلول حاوی اوره و کلسیم کلراید به آن اضافه شده است؛ در انتها محلول حاوی آنزیم اوره‌آز اضافه شده و پس از مخلوط نمودن در ۳ لایه درون قالب کوبیده شده است. به

۳-۲-۲. ژئولیت

ژئولیت مورد استفاده از نوع کلینوپتیلولیت بوده که از معدن کاوان سمنان تهیه شده است. مشخصات این نوع ژئولیت در جدول (۲) نشان داده شده است.

جدول ۲. مشخصات ژئولیت کلینوپتیلولیت

| | |
|-----------------------------------------|-------|
| Water absorption (%) | 65 |
| Average particle size (μ) | 38 |
| Dry density (gr/cm^3) | 0.64 |
| Hardness (mmohs/cm) | 0.683 |

۳-۲-۳. سیمان

سیمان مصرفی مورد استفاده، سیمان پرتلند تیپ ۲ می‌باشد.

۳-۲-۴. ریزدانه

به منظور بررسی تاثیر عنصر چسبنده‌ای نظیر خاک رسی بر روی نتایج آزمایش تک‌محوری، نمونه‌ای از خاک ریزدانه‌ی رد شده از الک ۲۰۰ به مقادیر ۰، ۵ و ۱۰ درصد خاک پایه استفاده شده است.

۳-۲-۵. آنزیم اوره‌آز

آنزیم‌ها کاتالیزورهای پروتئینی هستند که توسط سلول زنده ساخته شده و عمل کاتالیز واکنش‌های بیوشیمیایی را در داخل و یا خارج سلول به عهده دارند. آنزیم‌ها سرعت واکنش‌ها (سرعت رسیدن به حالت تعادل بین سوبسترا و محصول) را تا میزان 10^{16} برابر حالتی که آنزیم وجود ندارد، افزایش می‌دهند. نرخ انجام واکنش در حضور آنزیم اوره‌آز (اوره آمیدوهیدرولاز EC 3.1.5.4) $3 \times 10^4 / \text{sec}$ و در غیاب آنزیم $3 \times 10^{-10} / \text{sec}$ و در مجموع نرخ انجام واکنش را 10^{14} برابر افزایش می‌دهد (Murray et al., 2003).

آنزیم اوره‌آز مصرفی در شکل (۵) نشان داده شده است.

۴. نتایج و بحث

۴-۱. بررسی نتایج آزمایش تک محوری

۴-۱-۱. تاثیر جایگزینی ژئولیت در تثبیت شیمیایی خاک ماسه‌ای

پس از عمل آوری، نمونه‌ها از قالب خارج و به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط نگهداری شده و سپس جهت انجام آزمایش در دستگاه تک محوری قرار گرفته است. در این بخش نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک محوری در زمان عمل آوری ۷ و ۲۸ روز آورده شده است.

در شکل‌های (۱۰) تا (۱۲) رابطه تنش- کرنش نمونه‌های سیمانی با جایگزینی ۰، ۱۰، ۳۰، ۵۰ و ۷۰ درصد ژئولیت به جای سیمان نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود بیشینه تنش تک محوری با افزایش درصد سیمان، افزایش یافته و کرنش متناظر آن کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده رفتار ترد و شکننده نمونه‌ها است. نمودارهای تنش-کرنش تقریباً یکسان بوده و تفاوت در میزان تنش محوری بیشینه و کرنش گسیختگی است. با افزایش درصد جایگزینی ژئولیت به جای سیمان، کرنش گسیختگی افزایش یافته که نشان‌دهنده کاهش رفتار ترد نمونه‌های ژئولیتی نسبت به نمونه‌های سیمانی است. از طرفی با افزایش درصد ریزدانه، کرنش نمونه‌ها بیشتر شده و حالت نرم‌تری به خود گرفته‌اند. همچنین افزایش درصد ریزدانه باعث یکپارچگی بیشتر نمونه شده، به گونه‌ای که با افزودن ۱۰٪ ریزدانه می‌توان از مقدار سیمان کاست و با جایگزینی ۱۰٪ ژئولیت به جای سیمان به مقاومتی بیشتر از نمونه‌های بدون ژئولیت دست یافت.

در زمان عمل آوری ۷ روز، با افزایش میزان ژئولیت به جای سیمان، مقاومت فشاری تک محوری به دلیل کامل نشدن واکنش‌های پوزولانی کاهش می‌یابد. از طرفی در زمان عمل آوری ۲۸ روز با افزایش درصد ژئولیت به جای سیمان، مقاومت فشاری تک محوری ابتدا افزایش و سپس کاهش

منظور ایجاد هرچه بهتر رسوب کربنات کلسیم، محلول‌های اوره، کلسیم کلراید و آنزیم اوره آز پس از گذشت ۲۴ ساعت مجدد به نمونه‌ها اسپری شده است. این مراحل در شکل (۸) نشان داده شده است. به منظور عمل آوری مناسب ژئولیت از پوشش مرطوب به همراه عایق برای جلوگیری از تبخیر استفاده گردیده که در شکل (۹) نشان داده شده است.



شکل ۷. محلول آنزیم اوره آز (سمت راست)، محلول اوره و کلسیم کلراید (سمت چپ)



شکل ۸. نحوه تزریق محلول‌های آنزیم اوره آز و کلسیم کلراید و اوره (سمت راست)، اسپری نمودن محلول‌ها پس از ۲۴ ساعت (سمت چپ)



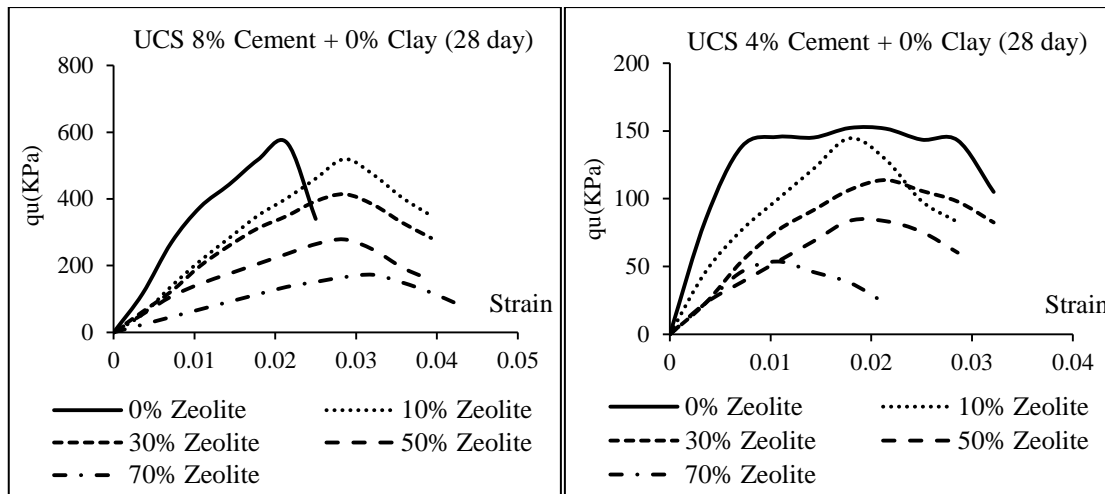
شکل ۹. شرایط عمل آوری نمونه‌ها با پوشش‌های مرطوب و عایق

نشان داده شده است. با بررسی این نتایج می توان دریافت که در طرح بدون ریزدانه، با افزایش درصد جایگزینی زئولیت به جای سیمان، مقاومت فشاری تک محوری نمونه ها کاهش یافته است و از طرفی کرنش گسیختگی نمونه ها افزایش یافته است.

می یابد که درصد بهینه زئولیت برای افزایش مقاومت ۱۰ درصد است.

۴-۱-۲. نتایج طرح بدون ریزدانه

شکل (۱۰) نتایج آزمایش تک محوری در نمونه های با مقادیر ۴ و ۸ درصد سیمان با جایگزینی زئولیت به جای سیمان و همچنین بدون افزودن ریزدانه در زمان عمل آوری ۲۸ روز

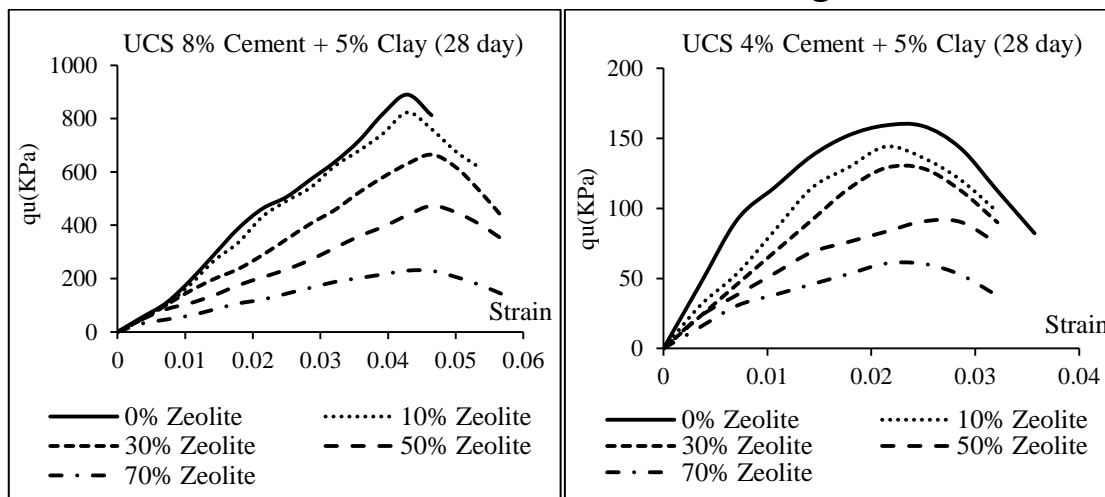


شکل ۱۰. نتایج آزمایش تک محوری در نمونه های بدون ریزدانه

در این طرح هم مانند طرح بدون ریزدانه، با افزایش درصد جایگزینی زئولیت به جای سیمان، مقاومت فشاری تک محوری نمونه ها کاهش یافته است و از طرفی کرنش گسیختگی نمونه ها افزایش یافته است.

۴-۱-۳. نتایج طرح ۵٪ ریزدانه

شکل (۱۱) نتایج آزمایش تک محوری در نمونه های با مقادیر ۴ و ۸ درصد سیمان با جایگزینی زئولیت به جای سیمان و همچنین با افزودن ۵٪ ریزدانه در زمان عمل آوری ۲۸ روز نشان داده شده است. با بررسی این نتایج می توان دریافت که

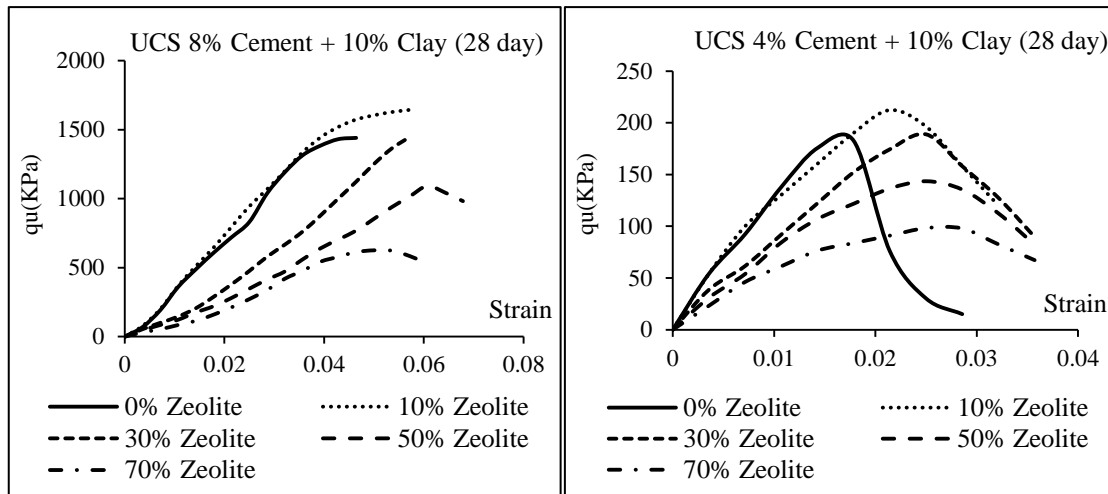


شکل ۱۱. نتایج آزمایش تک محوری در نمونه های با ۵٪ ریزدانه

۴-۱. نتایج طرح ۱۰٪ ریزدانه

زئولیت به جای سیمان بیشترین مقاومت فشاری تک محوری را نشان داده‌اند و همچنین کرنش گسیختگی نمونه‌ها با افزایش درصد جایگزینی زئولیت، افزایش یافته است. از طرفی در زمان عمل‌آوری ۷ روز به دلیل کامل‌نشدن واکنش‌های هیدراسیون سیمان و زئولیت، افزایش مقاومتی مشاهده نشده است.

شکل (۱۲) نتایج آزمایش تک محوری در نمونه‌های با مقادیر ۴ و ۸ درصد سیمان با جایگزینی زئولیت به جای سیمان و همچنین با افزودن ۱۰٪ ریزدانه در زمان عمل‌آوری ۲۸ روز نشان داده شده است. با بررسی این نتایج می‌توان دریافت که در عمل‌آوری ۲۸ روز، نمونه‌های با مقدار ۱۰٪ جایگزینی



شکل ۱۲. نتایج آزمایش تک محوری در نمونه‌های با ۱۰٪ ریزدانه

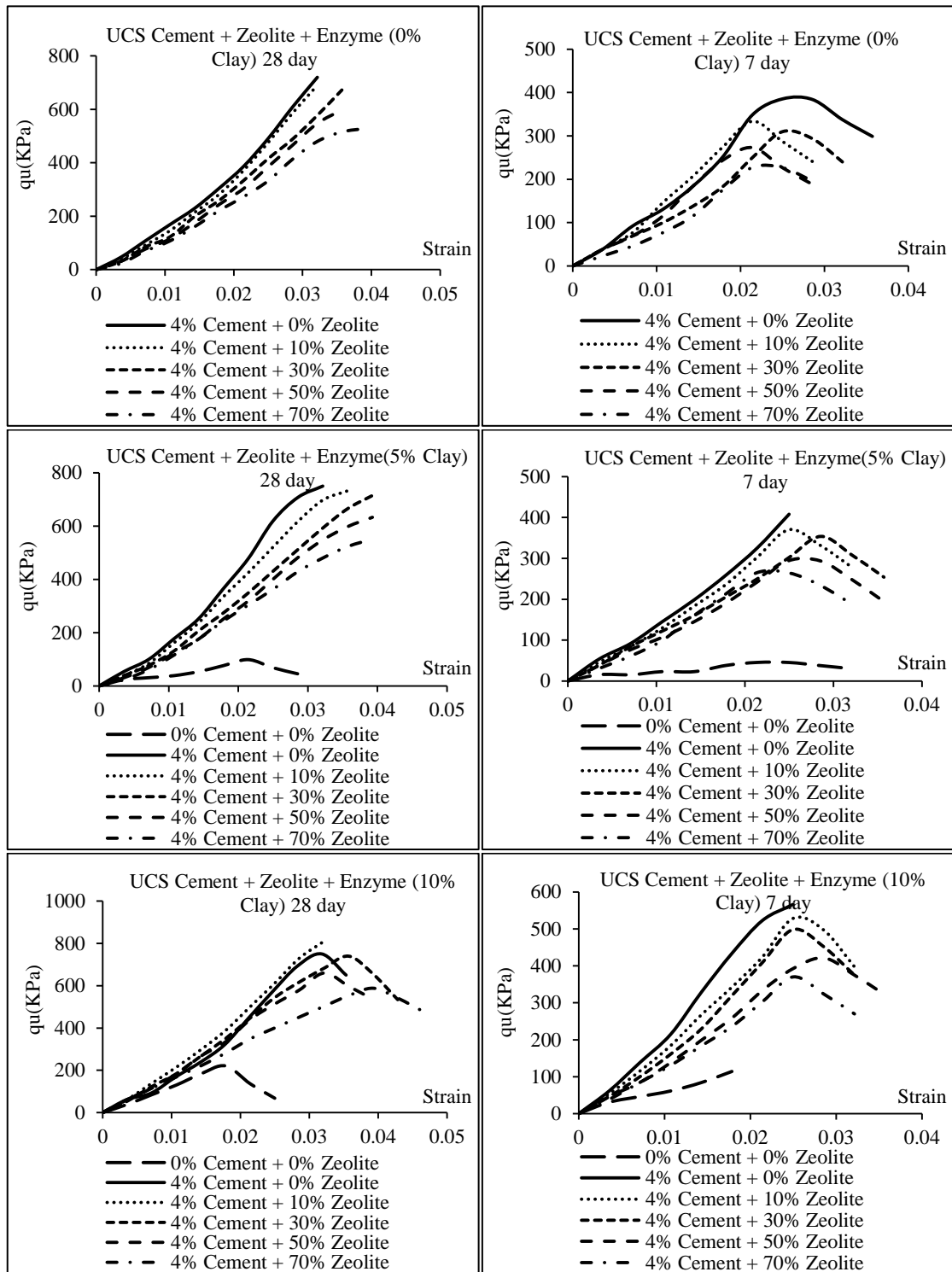
۴-۲. تاثیر جایگزینی زئولیت در تثبیت زیستی خاک ماسه‌ای

با مقایسه نتایج بدست آمده (شکل ۱۴)، مشاهده شده است که نمونه‌های زیستی با ۴٪ سیمان و آنزیم اوره آز نسبت به نمونه‌های با ۴٪ سیمان و بدون آنزیم، مقاومتی در حدود ۵ برابر بیشتر نشان داده‌اند. اما نمونه‌های با ۴٪ سیمان و آنزیم اوره آز نسبت به نمونه‌های با ۸٪ سیمان و بدون آنزیم در زمان عمل‌آوری ۷ روز مقاومت بیشتری نشان داده است و به مرور از میزان رشد مقاومت نمونه‌های زیستی کاسته شده است. به طوری که در عمل‌آوری ۲۸ روز، نمونه‌های شیمیایی مقاومت بیشتری داشته‌اند. این کاهش رشد مقاومت فشاری در نمونه‌های زیستی می‌تواند به دلیل این باشد که عمده واکنش‌های بیوشیمیایی جهت رسوب کلسیت در روزهای ابتدایی عمل‌آوری شکل گرفته است.

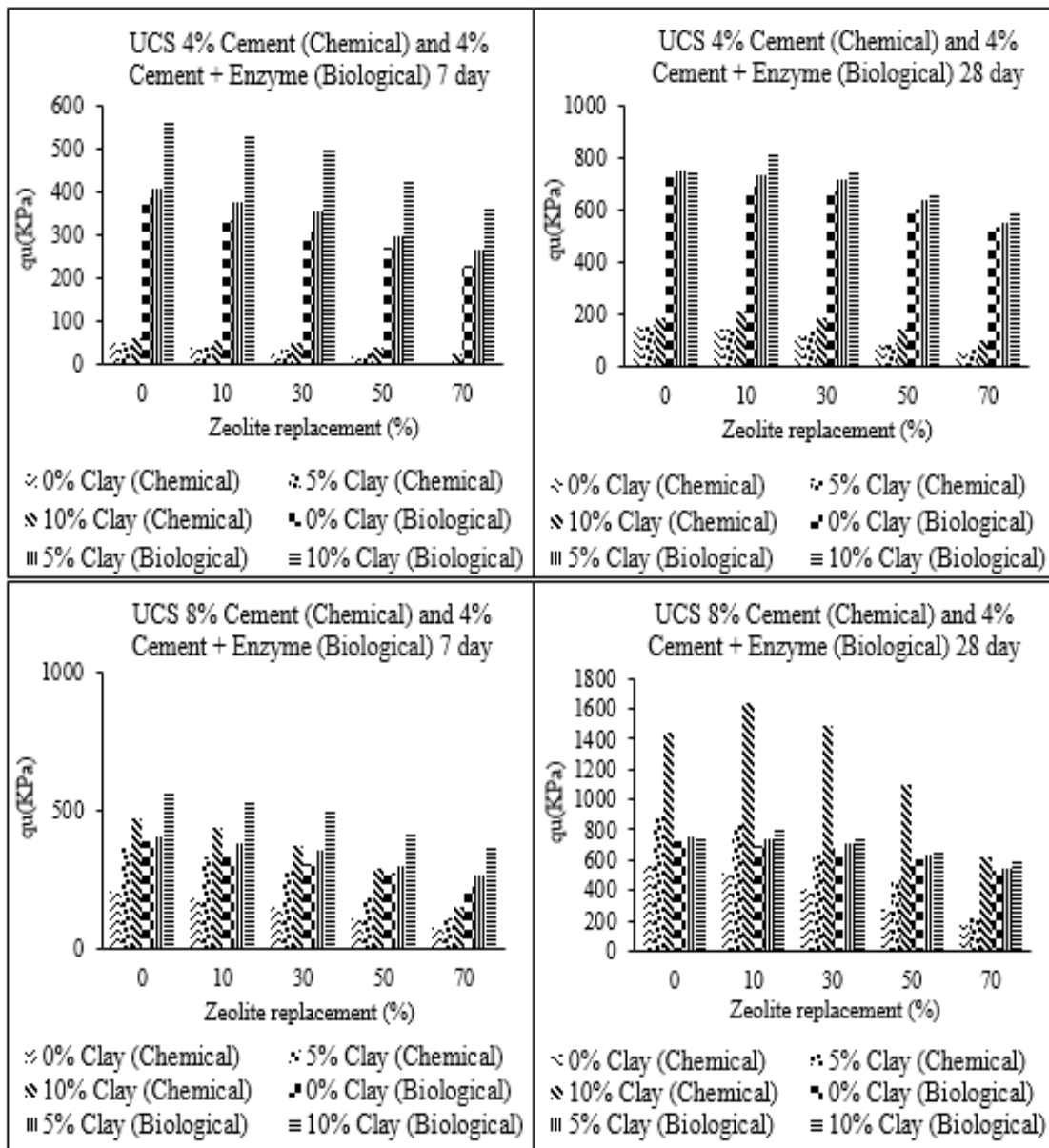
نمونه‌های زیستی شامل ۰، ۵ و ۱۰ درصد ریزدانه، آنزیم اوره آز و صرفاً ۴٪ سیمان جهت اثرپذیری بیشتر آنزیم به دلیل درشت‌دانه بودن خاک می‌باشد. نتایج آزمایش‌ها نشان داده است که به دلیل تشکیل کریستال‌های کلسیت بین دانه‌های خاک، مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌ها افزایش یافته اما از طرفی از مقدار کرنش کاسته شده و حالتی ترد و شکننده به خود گرفته‌اند. شکل (۱۳) نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک محوری در نمونه‌های زیستی با افزودن آنزیم اوره آز را نشان داده است.

۴-۳. مقایسه بین نتایج طرح تثبیت شیمیایی و زیستی خاک

ماسه‌ای بر اساس درصد ریزدانه



شکل ۱۳. نتایج آزمایش تک محوری در نمونه‌ها با افزودن آنزیم اوره‌آز



شکل ۱۴. مقایسه نتایج آزمایش تک محوری در نمونه های شیمیایی و زیستی با مقادیر مختلف ریزدانه

۴-۴. مقایسه نتایج آزمایش تک محوری در حالت های بهینه

نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک محوری در حالت های بهینه و در زمان عمل آوری ۱۴ و ۲۸ روزه در جدول (۳) نشان داده است.

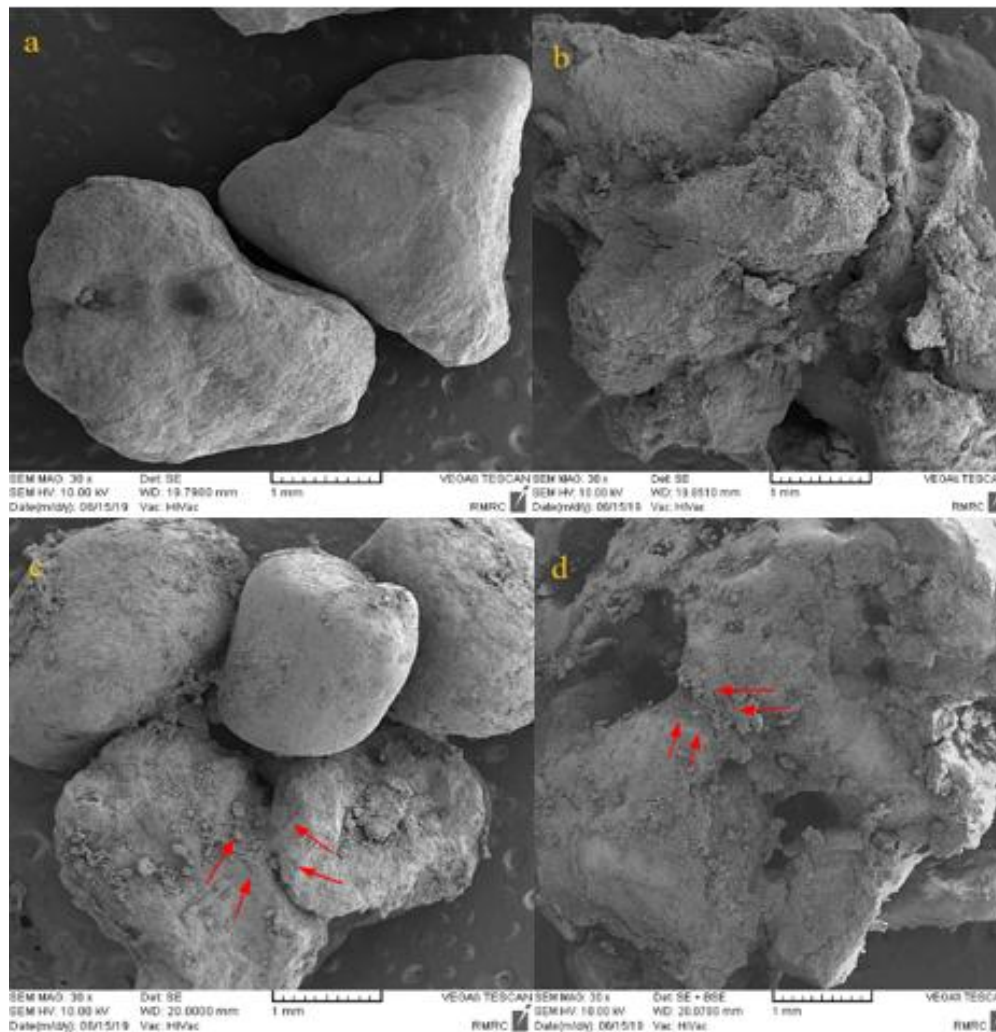
جدول ۳. نتایج آزمایش تک محوری در حالت های بهینه

| Sample mixing (%) | UCS (KPa) 14-day | UCS (KPa) 28-day |
|----------------------------------------------------|---------------------|---------------------|
| 10% Caly | 15.38 | 22.99 |
| Urease enzyme + 10% Clay | 137.48 | 220.69 |
| 4% Cement + 10% Clay | 136.98 | 182.64 |
| 8% Cement + 10% Clay | 817.098 | 1440.98 |
| 4% Cement + Urease enzyme + 10% Clay | 702.36 | 750.28 |
| 4% Cement + 10% Zeolite + 10% Clay | 159.81 | 212.31 |
| 8% Cement + 10% Zeolite + 10% Clay | 919.69 | 1643.82 |
| 4% Cement + 10% Zeolite + Urease enzyme + 10% Clay | 754.66 | 809.95 |

رسوبات تشکیل شده در طرح های اختلاط انجام شده در این پژوهش در شکل (۱۵) نشان داده شده است. در شکل (a-15) فاصله بین دانه های خاک ماسه ای در حالت بهسازی نشده به خوبی قابل مشاهده است. شکل (b-15) تصویری از خاک ماسه ای بهسازی شده با ۱۰٪ ریزدانه رسی را نشان می دهد. اگرچه خاک ریزدانه توانسته است فاصله بین دانه های ماسه را پوشش دهد، ولی مقاومت تک محوری مطلوبی به دست نیامده است. شکل (c-15) رسوبات کلسیم کربنات حاصل از هیدرولیز اوره در حضور آنزیم اوره آز به نشان می دهد. این شکل تاثیر استفاده از آنزیم اوره آز که منجر به افزایش چسبندگی و مقاومت تک محوری خاک ماسه ای شده است را به خوبی نشان می دهد. شکل (d-15) نیز تصویری از بهسازی خاک ماسه ای با استفاده از ۱۰٪ ریزدانه رسی، ۴٪ سیمان و همچنین آنزیم اوره آز به میزان ۱ gr بر ۱۰۰ ml محلول کلسیم کلراید و اوره به مقدار ۱ mol/L را نشان می دهد. همان طور که از این شکل قابل مشاهده است چسبندگی و پیوستگی بین دانه های خاک نسبت به حالت های قبل بیشتر شده است و در نهایت سبب افزایش مقاومت تک محوری خاک ماسه ای با دانه بندی یکنواخت شده است

با توجه به نتایج آزمایش تک محوری، افزودن آنزیم اوره آز به میزان ۱gr بر ۱۰۰ml از محلول کلسیم کلراید و اوره به نمونه های با ۱۰٪ ریزدانه، مقاومت فشاری تک محوری در زمان عمل آوری ۱۴ و ۲۸ روزه را به ترتیب ۸/۹۳ و ۹/۵۹ برابر افزایش داده است که نشان از افزایش قابل توجه در مقاومت نمونه ها به دلیل تشکیل رسوبات کلسیم کربنات در دانه های خاک و ایجاد پل های ارتباطی بین آنها است. از طرفی تغییرات مقاومت تک محوری نمونه های تثبیت شده با ۴٪ سیمان، ۱۰٪ ریزدانه و آنزیم اوره آز نسبت به نمونه های بدون آنزیم، در زمان عمل آوری ۱۴ و ۲۸ روزه به ترتیب ۴/۱۲ و ۳/۱ برابر و نسبت به نمونه های تثبیت شده با ۴٪ سیمان، ۱۰٪ ریزدانه و جایگزینی ۱۰٪ زئولیت به جای سیمان ۳/۳۹ و ۲/۵۳ برابر شده است. همچنین مقاومت تک محوری نمونه های تثبیت شده با ۴٪ سیمان، ۱۰٪ ریزدانه، ۱۰٪ جایگزینی زئولیت و آنزیم اوره آز نسبت به نمونه های بدون آنزیم در زمان عمل آوری ۱۴ و ۲۸ روزه به ترتیب ۳/۷۲ و ۲/۸۱ برابر شده است.

۴-۵. نتایج میکروسکوپ الکترونی (SEM)



شکل ۱۵. تصاویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) با بزرگنمایی ۳۰ برابر: خاک پایه (a) - خاک و ریزدانه (b) - خاک و آنزیم اوره آز (c) - خاک، سیمان، آنزیم اوره آز و ریزدانه (d)

۴. نتیجه گیری

بیولوژیکی خواهند داشت. از آنجا که این باکتری‌ها موجودات زنده هستند نیاز به تجهیزات آزمایشگاهی به منظور استریل نمودن محیط کشت و رشد کلنی‌های خود خواهند داشت. تجهیزات آزمایشگاهی مانند اتوکلاو، انکوباتور و اسپکتروفوتومتر از جمله این وسایل هستند. در نتیجه استفاده مستقیم از آنزیم اوره آز علاوه بر عدم نیاز به تجهیزات آزمایشگاهی، طرح بهسازی را عملی‌تر و میدانی‌تر می‌کند که نیاز روز طرح‌های پژوهشی در مهندسی عمران است. از آنجایی که در اکثر طرح‌های بهسازی خاک‌های ریزدانه، رسوب کلسیم کربنات به صورت ناهمگن و در ابتدا و انتهای نمونه‌ها تشکیل شده اند، استفاده مستقیم از آنزیم اوره آز،

پژوهش حاضر حاصل آزمایش‌های انجام شده در زمینه ژئوتکنیک زیست محیطی است. موضوع پژوهش، استفاده از آنزیم اوره آز در بهبود ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک‌های سست می‌باشد که به اختصار EMCP نامیده می‌شود. از جمله مزایای این طرح می‌توان به استفاده مستقیم از آنزیم اوره آز به منظور هیدرولیز اوره اشاره نمود. بیشتر تحقیقات انجام شده در زمینه رسوب بیولوژیکی مربوط به استفاده از باکتری‌های اوره آز مثبتی نظیر اسپوروسارینا (باسیلوس) بوده است. در نتیجه نکته حائز اهمیت در این طرح برطرف نمودن پیچیدگی‌هایی است که استفاده از باکتری‌ها در رسوب

۴/۱۲ و ۳/۱ برابر شده است. همچنین مشاهده شد که با افزودن آنزیم اوره‌آز، به دلیل واکنش‌های بیوشیمیایی که منجر به تشکیل کریستال‌های کلسیم کربنات در بین دانه‌های خاک شده است، از کرنش گسیختگی نمونه‌ها کاسته شده است. به عنوان پیشنهادی برای پژوهش‌های آتی، می‌توان به این نکته اشاره نمود که استفاده از روش بهسازی زیستی به صورت میدانی، تنها در چند طرح پژوهشی محدود مورد آزمایش قرار گرفته است که لزوم بررسی‌های بیشتر در مقیاس واقعی را بیان می‌کند. همچنین استفاده از خاک با دانه‌بندی خوب و جایگزینی موادی نظیر زئولیت، خاکستر پوسته برنج و یا خاکستر خاکاره به جای سیمان می‌تواند مورد توجه قرار گیرد. از طرف دیگر انجام آزمایش‌های سه‌محوری، برش مستقیم، CBR، کشش برزیلی و نفوذپذیری بر روی طرحی که انجام گرفته است. همچنین می‌توان به بررسی امکان رشد گیاه در خاک بهسازی شده با آنزیم اوره‌آز و یا مدل‌سازی نرم‌افزاری طرح بهسازی شده و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی پرداخت.

محدودیت بهسازی در خاک‌های ریزدانه را نیز برطرف می‌نماید. نکته دیگر استفاده از زئولیت به منظور جایگزینی سیمان است که با رسوب تشکیل شده از آنزیم اوره‌آز جنبه زیست محیطی طرح را دوچندان نموده است. این پژوهش به بررسی جایگزینی زئولیت به جای سیمان در ماسه با دانه‌بندی بد و همچنین افزودن آنزیم اوره‌آز در طرح قبلی و مقایسه نتایج پرداخته شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که با جایگزینی ۱۰٪ زئولیت به جای سیمان در حالتی که از ۱۰٪ ریزدانه نیز استفاده شد، مقاومت بیشتری نسبت به نمونه‌های بدون زئولیت و با مقادیر ۰ و ۵ درصد ریزدانه مشاهده شده است. علت این افزایش مقاومت می‌تواند ناشی از کاهش سرعت هیدراسیون توسط زئولیت و همچنین پیوستگی و یکپارچگی بیشتر نمونه‌ها در مقدار ۱۰٪ ریزدانه باشد. همچنین با افزایش میزان جایگزینی زئولیت از مقاومت‌ها کاسته شده و کرنش گسیختگی نمونه‌ها افزایش یافته است. از طرفی با افزودن آنزیم اوره‌آز به طرح یاد شده، در حالتی که از ۴٪ سیمان، ۱۰٪ ریزدانه و آنزیم اوره‌آز استفاده شده است نسبت نمونه‌های بدون آنزیم، مقاومت فشاری ۱۴ و ۲۸ روزه،

منابع

- قربانی، ا.، رابطی مقدم، م.، پرویزی، م.، نقی‌ها، ر.، ۱۳۹۸. بررسی اثر باکتری اسپورسارسینا پاستوری بر رسوب میکروبی کربنات کلسیم (MICP) و مقاومت فشاری تک‌محوره ماسه‌های کربناتی: مجله علمی - پژوهشی انجمن زمین شناسی مهندسی ایران، جلد دوازدهم، شماره دو.
- روشن‌بخت، ک.، خامه‌چیان، م.، ساجدی، ر.، نیکودل، م.، ۱۳۹۴. بهسازی خاک‌های ماسه‌ای با رسوب زیستی کربنات کلسیم و فاکتورهای موثر بر آن: مجله علمی پژوهشی انجمن زمین شناسی مهندسی ایران، جلد هشتم، شماره ۱ و ۲.
- عباسی، م.، شوش پاشا، ع.، ملاعباسی، ح.، ۱۳۹۴. بررسی اثر زئولیت بر مقاومت کششی خاک ماسه‌ای بابلسر تثبیت شده با سیمان: نشریه مهندسی عمران، دانشگاه شریف، جلد سی و سوم، شماره یک.
- عباسی، م.، شوش پاشا، ع.، ملاعباسی، ح.، ۱۳۹۸. بررسی اثر زئولیت بر مقاومت برشی خاک ماسه‌ای بابلسر، تثبیت شده با سیمان: نشریه مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تبریز، جلد چهل و نهم، شماره یک.
- ملاعباسی، ح.، شوش پاشا، ع.، ۱۳۹۸. بررسی اثر زئولیت بر مقاومت خاک ماسه‌ای بابلسر، تثبیت شده با سیمان با استفاده از آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری: مجله مهندسی عمران، دانشگاه تربیت مدرس، جلد شانزدهم، شماره چهار.
- مهدوی، ر.، اجل‌لوئیان، ر.، ۱۳۹۶. مقایسه بیولوژیکی نمونه‌های خاک‌های ماسه‌ای و نمونه‌های بهسازی شده: کنفرانس بین‌المللی پیشرفت‌های نوین در مهندسی عمران، دانشگاه شمال، آمل.

DeJong, J. T., Martinez, B. C., Mortensen, B. M., Nelson, D. C., Waller, J. T., Weil, M. H., Ginn, T. R., Weathers, T., Barkouki, T., Fujita, Y., Redden, G., Hunt, C., Major, D., and Tanyu, B., 2009. Upscaling of bio-mediated soil improvement mechanics and geotechnical engineering: 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering.

- DeJong, J., Mortensen, B., Martinez, B., Nelson, D., 2010. Bio-mediated soil improvement: *Ecological Engineering*, 36(2): 197–210.
- Fertu, T., Gavrilescu, M., 2012. Application of natural zeolites as sorbents in the clean-up of aqueous streams: *Environmental Engineering and Management Journal*, 11(1): 867-878.
- Gunaratne, M., 2006. *The foundation engineering handbook*: Taylor & Francis Group, CRC Press.
- Larsson, S., Axelsson, M., 2012. Stabilization of frictional soil through injection using CIPS: Master of Science Thesis, Division of Soil and Rock Mechanics, KTH Royal Institute of Technology Stockholm.
- Mortensen, B. M., Haber, M. J., Dejong, J. T., Caslake, L. F., Nelson, D. C., 2011. Effects of environmental factors on microbial induced calcium carbonate precipitation: *Journal of Applied Microbiology*, 111: 338–49.
- Moravej, S., Habibagahi, Gh., Nikooee, E., Niazi, A., 2018. Stabilization of dispersive soils by means of biological calcite precipitation: *Geoderma*, 315: 130–137.
- Murray, R., Granner, D., Mayes, P., Rodwell, V., 2003. *Harper's illustrated biochemistry*, McGraw-Hil Co. Inc., US, pp. 60-71.
- Ozdogan, A., 2010. A study on the triaxial shear behavior and microstructure of biologically treated sand specimens: University of Delaware.
- Park, S. S., Choi, S. G., Nam, I. H., 2014. Effect of plant-induced calcite precipitation on the strength of sand: *J. Mater. Civ. Eng.* 26: 601-612.
- Riberio, F., Radrigues, L., Claude, N., 1984. *Zeolites science and technology*: Boston, Martinus Nijhoff Publishers.
- Whiffin, V., 2004. Microbial CaCO₃ precipitation for the production of biocement: School of Biological Sciences and Biotechnology, Murdoch University, Australia, 154-163.
- Whiffin, V., Van Paassen, L., Harkes, M., 2007. Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique: *Geomicrobiology Journal*, 24(5): 417-423.