مهندسی عمران شریف (بهار ۱۳۹۶)
دوره‌ی ۲-۳۳، شماره‌ی ۱/۲، ص. ۷۱-۷۷، (یادداشت فنی)

Research Note

ارزیابی تغییر رفتار ماسه‌ها تحت سیمانی‌شدن بیولوژیکی

محمد آزادی* **(دانشیار)**
دانشکده‌ی مهندسی عمران و نقشه‌برداری، دانشگاه آزاد اسلامی واحد قزوین
سعیده پوری (کارشناس ارشد)
گروه میکروبیولوژی، دانشگاه شهید چمران اهواز

افزایش روزافزون جمعیت جهان حاکی از توسعه‌ی مناطق شهری و به تبع آن استفاده از روش‌های مناسب جهت تثبیت خاک در این مناطق است. یکی از نوین‌ترین روش‌های تثبیت خاک، استفاده از رسوب میکروبیولوژیکی کربنات کلسیم است، که نه فقط روشی سازگار با محیط زیست است، بلکه می‌تواند به‌عنوان روشی مناسب جهت تثبیت خاک معرفی شود. عمده‌ی پژوهش‌هایی که تاکنون انجام شده‌اند، به ارزیابی روش مذکور از نظر شرایط ساخت و تغییر پارامترهای خاک پرداخته‌اند، ولی تغییر مدل رفتاری ایجادشده در مصالح جدید چندان مورد ارزیابی قرار نگرفته است. لذا در این پژوهش به بررسی تأثیر نوعی باکتری حاوی اسپور[1] با نام باسیلوس پاستیوری و تولید رسوب بیولوژیکی کربنات کلسیم در بهبود ویژگی‌های فنی خاک ماسه‌یی و تثبیت ماسه پرداخته شده و تغییر مدل رفتاری ایجادشده در ماسه‌ی سیمانی‌شده نسبت به ماسه‌ی تمیز مورد ارزیابی قرار گرفته است.

واژگان کلیدی: رفتار ماسه، سیمانی‌شدن بیولوژیکی، باسیلوس پاستیوری، مدل رفتاری.

azadi.mhmm@gmail.com
saeedehpouri@yahoo.com

۱. مقدمه

استفاده از تکنولوژی‌های جدید جهت تثبیت خاک، که علاوه بر افزایش مقاومت خاک بتواند سازگاری مناسبی با محیط ایجاد کند، همیشه مورد توجه متخصصان بوده است. روشی نوین، که به تازگی با ادغام علومی مانند: عمران، شیمی، و میکوبیولوژی ایجاد شده است، روش تثبیت خاک از طریق رسوب بیولوژیکی کربنات کلسیم است. در دو دهه‌ی اخیر، به‌دلیل اهمیت موضوع ذکرشده، تعدادی مطالعات پایه‌یی صورت گرفته است،[۱-۶] و تعداد محدودی از آن‌ها به ارزیابی بهبود خواص مهندسی خاک‌ها پرداخته‌اند.[۷-۹] مقالات محدودی نیز درباره‌ی اثر رسوب کربنات کلسیم در دوام سیمان و مصالح ساختمانی ارائه شده است.[۱۰و۱۱]

مطالعات انجام‌شده در ارتباط با به‌کارگیری نوع خاصی از باکتری به نام باسیلوس پاستیوریی[2] نشان داده است که خواص کربنات کلسیم، یکی از مهم‌ترین مشخصات در سیمانی‌شدن خاک است.[۱۲] مطالعات دیگری با رویکرد مشابه با درنظرگرفتن رسوب کربنات برای نمایش اثر فعالیت باکتری روی خاک ماسه نیز صورت گرفته است.[۱۳و۱۴] اما شاید به جرأت بتوان گفت پس از مطالعات انجام‌شده در سال ۲۰۰۴،[۵] یکی از مهم‌ترین بررسی‌ها در سال ۲۰۱۰ صورت گرفته،[۱] و شرایط میکروبیولوژیکی خاک و نحوه‌ی بهبود خواص خاک از طریق ایجاد محیط‌های مناسب رشد باکتری و وضعیت بیوشیمیایی تزریق باکتری به خاک مورد بررسی قرار گرفته است. در مطالعات مذکور، که به‌صورت آزمایشگاهی انجام شده است، سطح کارایی سیستم باکتریایی، واکنش‌های شیمیایی در تولید و تکثیر باکتری، ماندگاری باکتری در خاک، مقیاس‌های بهبود خاک در شرایط آزمایشگاهی، سازگاری باکتری در خاک از لحاظ اندازه‌ی آن، و نقش فرایندهای میکروبیولوژیکی در بهبود کیفیت خاک مورد بررسی قرارگرفته و نتایج حاصله، به اهمیت روش نوین میکروبیولوژیکی در تثبیت و بهبود خواص خاک اشاره داشته و آن را به‌عنوان یکی از مقرون به صرفه‌ترین روش‌ها معرفی کرده و همچنین ذکر شده است که رسوب کربنات کلسیم اضافه‌شده به خاک می‌تواند مشخصات کیفی، فنی، و خواص آن را بهبود بخشد.[۱]

درخصوص رسوب میکروبیولوژیکی کربنات کلسیم، مطالعات دیگری نیز توسط پژوهشگران مختلف ارائه شده است. از آن جمله می‌توان به مطالعاتی در سال ۲۰۱۰ اشاره کرد،[۳] که در آن به بررسی رسوب میکروبیولوژیکی کربنات کلسیم و نیز اثرات تزریق و به‌کارگیری آن در مصالح ساختمانی پرداخته شده است. مطالعات دیگری در سال ۱۹۹۹،[۲] با عنوان «رسوب میکروبیولوژیکی کربنات کلسیم»، که به نحوه‌ی ایجاد رسوب کربنات کلسیم توسط باکتری باسیلوس پاستیوری و نیز اثر آن در خاک ماسه و مقاومت خاک در برابر موج برشی توسط اشعه‌ی ایکس پرداخته است، نمونه‌ی دیگری از این مطالعات است.

با بررسی مطالعات انجام‌شده می‌توان دریافت که بیشتر آن‌ها، که تاکنون انجام

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۳/۷/۵، اصلاحیه ۱۳۹۴/۵/۲۵، پذیرش ۱۳۹۴/۷/۲۸.

شده‌اند، به ارزیابی نحوه‌ی تولید رسوب کربنات و تأثیر چسبندگی ناشی از آن در اتصال بین ذرات پرداخته‌اند. اما مطالعات محدودی در رابطه با تأثیر این ترکیب در خصوصیات مهندسی خاک‌ها و تغییر رفتار ماسه پس از انجام سیمانی‌شدن بیولوژیکی انجام شده است.[۱،۸،۱۵-۱۷] لذا در پژوهش حاضر سعی شده است تا با بررسی مشخصات خاک ماسه‌یی پس از سیمانی‌شدن به روش بیولوژیکی، تغییر رفتار ماسه‌ی سیمانی‌شده نسبت به ماسه‌ی تمیز مورد ارزیابی قرار گیرد.

۲. بررسی اثر پیوند میکروبیولوژیکی کربنات کلسیم بین ذرات خاک

کربنات‌کلسیم همواره به‌عنوان یک محصول فرعی متداول در فرایندهای میکروبیولوژیکی مانند فتوسنتز و هیدرولیز اوره وجود داشته است. در همین راستا، برای استفاده از میکروارگانیسم‌های ذکرشده جهت بهسازی خاک، دو روش وجود دارد: روش اول، بر پایه‌ی تحریک میکروبیولوژیکی[۳] باکتری استوار است، که در آن مواد مغذی موردنیاز جهت رشد باکتری به خاک داده می‌شود و تمام مراحل کشت و رشد در داخل خاک صورت می‌گیرد. استفاده از روش اول به دلیل دشواربودن ایجاد محیط رشد مناسب برای باکتری در داخل خاک، بیشتر به منظور پاک‌سازی خاک‌های آلوده[۴] استفاده می‌شود و در بهسازی ویژگی مقاومتی خاک چندان کاربرد ندارد. اما روش دوم، بر پایه‌ی افزودن باکتری به خاک[۵] است و کلیه‌ی مراحل کشت و رشد در آزمایشگاه با استفاده از ظرف تخمیر فرمانتور[۶] مخصوص صورت می‌گیرد. در این روش لازم است مواد مغذی موردنیاز برای زنده‌ماندن باکتری و سایر مواد لازم جهت ایجاد واکنش شیمیایی اوره و کلرید کلسیم فراهم شود. از این طریق، رسوب کربنات کلسیم در محیط به‌وجود می‌آید و این امر سبب چسبیدن دانه‌های خاک به یکدیگر و بهبود خواص مهندسی خاک می‌شود.

باکتری‌هایی که برای ایجاد رسوب کلسیت مورد استفاده قرار می‌گیرند، باید خاصیت رسوب‌زایی داشته باشند. این‌گونه باکتری‌ها به ۲ دسته تقسیم می‌شوند: دسته‌ی اول، باکتری‌های خانواده‌ی بلسیلاس[۷] (از نوع هوازی) هستند و در فرایند هیدرولیز اوره، نقش کاتالیزور را انجام می‌دهند و رسوب کربنات کلسیم تولید می‌کنند. روش موجود نیز بر پایه‌ی استفاده از این‌گونه باکتری‌ها طراحی شده است. دسته‌ی دوم، باکتری‌های نیتروژن‌زا هستند، که در طی واکنش باکتری در خاک، گاز نیتروژن آزاد می‌کنند و برخلاف باکتری‌های روش اول، بی‌هوازی هستند و در شرایط خاک اشباع نیز قابلیت ایجاد رسوب را دارند. در پژوهش حاضر از همان روش اول و از باکتری‌های خانواده‌ی باسیلاس استفاده شده است.

۳. مصالح و مواد مصرفی در آزمایش‌ها

۱.۳. خاک مورد مطالعه

براساس مطالعات موجود، جهت انجام آزمایش‌ها، یک خاک ماسه‌یی با دانه‌بندی یکنواخت موردنیاز است، که محدوده‌ی اندازه‌ی ذرات آن بین ۸۰ میکرومتر تا ۸۰۰ میکرومتر باشد.[۱۶] لذا لازم است، مطالعات برای خاکی با مشخصات مذکور صورت پذیرد تا شرایط آزمایشگاهی مناسب (مطابق مطالعات موجود) فراهم شود و نیز باید استاندارد باشد (یکنواختی آن در تمامی نمونه‌ها حفظ شود)، تا بتوان نتایج حاصله را مورد استفاده و تجزیه و تحلیل قرار داد. برای این منظور، ابتدا آزمایش دانه‌بندی در خاک مورد مطالعه صورت پذیرفته است، تا مشخصات دقیق‌تر آن معین شود. براساس نتایج به‌دست‌آمده، خاک مورد آزمایش، دانه‌بندی نسبتاً یکنواختی داشته و از نظر طبقه‌بندی در رده‌ی ماسه‌ی بد دانه‌بندی‌شده‌ی SP (دانه‌بندی یکنواخت) قرار گرفته است. لذا تمامی شرایط لازم برای انجام آزمایش‌های موردنظر را دارد. شکل ۱، نمودار دانه‌بندی خاک مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

۱.۱.۳. بررسی مشخصات فنی ماسه‌ی مورد آزمایش

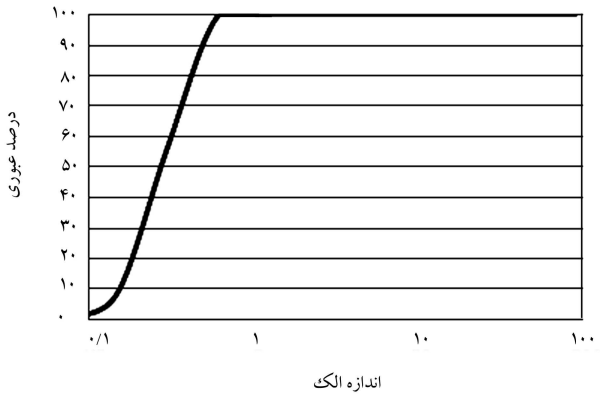
با توجه به آنکه هدف اصلی پژوهش حاضر، بررسی تأثیر سیمانی‌شدن به روش بیولوژیکی بر روی خاک ماسه‌یی تمیز است، لذا لازم است در ابتدا مشخصات خاک مورد آزمایش بررسی شود. بر این اساس خلاصه‌ی نتایج حاصل‌شده از آزمایش‌های مختلف ژئوتکنیکی در جدول ۱ ارائه شده است. براساس جدول مذکور، وزن مخصوص خاک مورد مطالعه ۱۷٫۹ کیلونیوتن بر مترمکعب و تخلخل آن ۰٫۷۳ است. ضمن آنکه نتایج آزمایش برش مستقیم، حاکی از چسبندگی بسیار ناچیز و زاویه‌ی اصطکاک ۳۶ درجه برای خاک ماسه‌یی ذکرشده است.

۲.۳. باکتری

میکروارگانیسم مورد استفاده در پژوهش حاضر از باکتری خانواده‌ی باسیلاس است و نام علمی اسپورسارینا پاستوری[۸] دارد. سویه‌ی این باکتری از مرکزکلکسیون قارچ‌ها و باکتری‌های صنعتی به شماره‌ی PTCC۱۶۴۵(DSM۳۳) به‌صورت پودر خشک و منجمدشده‌ی لیوفیلیزه[۹] تهیه شده است.

۳.۳. کلریدکلسیم

به دلیل اهمیت کلریدکلسیم در پژوهش حاضر، آنالیز مواد روی ترکیب مذکور صورت گرفته است، تا درجه‌ی خلوص آن معین شود. براساس نتایج به دست آمده، میزان درجه‌ی خلوص آن حدود ۹۹٫۵٪ است، که در محدوده‌ی کاملاً مناسب برای پژوهش حاضر است.



شکل ۱. نمودار دانه‌بندی خاک ماسه‌یی.

جدول ۱. مشخصات ماسه‌ی مورد آزمایش.

نمونه	وزن مخصوص (kN/m^3)	درصد رطوبت	نسبت تخلخل	نفوذپذیری (cm/sec)
ماسه‌ی تمیز	۱۷٫۹	۲۰٫۵	۰٫۷۳	۵×۱۰^{-۳}

۴. آماده‌سازی نمونه‌ها

۱.۴. تهیه‌ی مایه‌ی تلقیح باکتری

در ابتدا باکتری در محیط مغذی براث[10] حاوی اوره به حجم ۳۰ میلی‌لیتر کشت داده شده و در ۳۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۲۴ ساعت گرماگذاری شده است. بعد از ۲۴ ساعت پس از افزودن گلیسرول به محیط کشت مایع، محیط کشت حاوی باکتری در میکروتیوب‌های ۱٫۵ میلی‌لیتری ریخته شده و به این ترتیب نمونه‌های موردنیاز تهیه و در دمای ۲۰- درجه سانتی‌گراد نگه‌داری شده‌اند. یک نمونه کشت در ظرف آزمایش و نیز روی محیط شیب‌دار داخل لوله تهیه و در ۳۰ درجه سانتی‌گراد گرماگذاری شده است. پس از ۲۴ ساعت باکتری رشدکرده بر روی اسلنت و ظرف آزمایش در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد یخچال نگه‌داری شده است.

۲.۴. نگه‌داری بلندمدت باکتری‌های جداسازی‌شده

ابتدا باکتری در محیط پودر شیر[11] بدون چربی کشت داده شده و به مدت ۲۴ ساعت در ۳۷ درجه سانتی‌گراد گرماگذاری شده است. ۲۰۰ میکرولیتر از این محیط به شیشه‌ی نمونه‌ی مخصوص انتقال داده شده و توسط دستگاه خشک و منجمد شده است.

جهت کنترل نمونه‌ی تهیه‌شده، مورفولوژی مجموعه‌ها از لحاظ رنگ، فرم (ابری، کروی و غیره)، اندازه، حاشیه، برجستگی، قوام، و نوع اتصال به سطح آگار در محیط مغذی آگار مورد بررسی قرار گرفته است.

۳.۴. رنگ‌آمیزی گرم

برای انجام رنگ‌آمیزی گرم، ابتدا یک قطره آب مقطر بر روی یک لام تمیز ریخته شده و سپس یک لوپ از باکتری در قطره‌ی آب مقطر حل شده و لام جهت خشک‌شدن در دمای اتاق قرار داده شده است. همچنین به منظور ثابت‌کردن باکتری‌های روی لام، چند مرتبه از روی شعله عبور داده شده است. سپس رنگ‌آمیزی گرم آغاز و لام به مدت یک دقیقه با رنگ بنفش بلورین[12] آغشته و توسط آب مقطر شسته شده است. همچنین لام توسط: ۱. لوگل به مدت یک دقیقه؛ ۲. الکل ۷۰٪ به مدت ۱۰ ثانیه؛ ۳. رنگ سافرانین به مدت ۳۰ ثانیه آغشته و شسته شده است. درنهایت برای بررسی تشکیل مناسب باکتری‌ها، لام موردنظر زیر میکروسکوپ نوری مورد بررسی قرار گرفته است.

۴.۴. فعال‌سازی باکتری

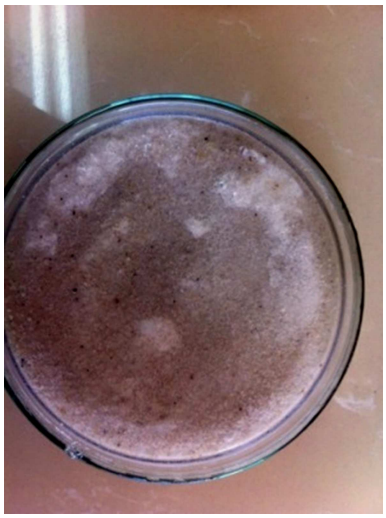
به منظور فعال‌سازی باکتری در محیط کشت مغزی، براث حاوی اوره و یا عصاره‌ی مخمر و کلرید آمونیوم یا سولفات آمونیوم اضافه شده و در دستگاه لرزاننده‌ی انکوباتور قرار گرفته و با توجه به رشد باکتری مذکور، پس از ۴۸ ساعت در زمان فاز رشد به وسیله‌ی دستگاه سانتریفوژ به مدت ۱۰ دقیقه با دور ۴۰۰۰ rpm از محیط کشت جدا شده است. رسوبات حاصل‌شده در محلول نمک ۰٫۹٪ رقیق و به وسیله‌ی یک دستگاه طیف‌سنج، غلظت باکتری در طول موج ۶۰۰ نانومتر بر روی ۱٫۵ تنظیم شده است.

۵.۴. نحوه‌ی تهیه‌ی نمونه‌های سیمانی‌شده در ابعاد متفاوت

با توجه به ابعاد متفاوت قالب‌های استفاده‌شده در این پژوهش، میزان ماسه‌ی پایه‌ی اضافه‌شده در نمونه‌های مختلف متفاوت است. لازم به ذکر است که در جهت استریل‌کردن اوره از روش فیلترشدن استفاده شده است. نمونه‌ها به مدت ۸ روز در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد به منظور رسوب‌گذاری گرماگذاری شده‌اند. سپس نمونه‌های تهیه‌شده در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴-۷ روز با توجه به حجم ماسه‌ی پایه‌ی مورد استفاده خشک شده‌اند. شکل‌های ۲ و ۳، نمونه‌های در حال ساخت در آزمایشگاه را نشان می‌دهند.

خاک مورد استفاده در این آزمایش‌ها، یک نمونه‌ی ماسه‌ی سیلیسی با دانه‌بندی کاملاً یکنواخت (۲۵۰-۳۰۰ میکرومتر) است. همان‌طورکه در شکل ۱ نیز مشاهده می‌شود، در این ماسه‌ی سیلتی هیچ‌گونه ذره‌ی رسی وجود ندارد. دلیل انتخاب این خاک، یکنواختی دانه‌ها، ریزبودن دانه‌ها، و عدم چسبندگی آنهاست، که شرایط مناسب برای آزمایش‌های موردنظر را دارد. در آزمایش‌های ذکرشده، در حقیقت باکتری نقش کاتالیزور را در واکنش اوره و کلرید کلسیم بازی می‌کند و باعث هیدرولیز اوره می‌شود و کربنات کلسیم را به‌صورت رسوب تولید می‌کند. به همین دلیل لازم است محلول اوره و کلرید کلسیم نیز به خاک اضافه شوند تا واکنش هیدرولیز اوره آغاز شود. با توجه به تعداد دفعات انجام کار، روند این پژوهش تدریجی و وابسته به زمان بوده و انجام آزمایش‌های ژئوتکنیک هم‌زمان با تکمیل فرایند در بازه‌های زمانی مشخص از ۱۰ روز تا ۳۰ روز انجام شده است. لذا براساس ابعاد خاصی که در آزمایش‌های ژئوتکنیکی موردنیاز است، در آزمایشگاه میکروبیولوژی به ساخت

شکل ۲. نمایش نمونه در حال ساخت.



شکل ۳. نمونه‌ی شاهد پس از ۸ روز.

شکل ۴. نمایش چند نمونه‌ی مکعبی برای آزمایش برش مستقیم.

نمونه‌هایی با ابعاد مناسب اقدام شده است. شکل ۴، چند نمونه‌ی نهایی آماده‌شده از ماسه‌ی سیمانی‌شده به روش بیولوژیکی را برای انجام آزمایش‌های ژئوتکنیکی نشان می‌دهد.

۵. ارزیابی نتایج

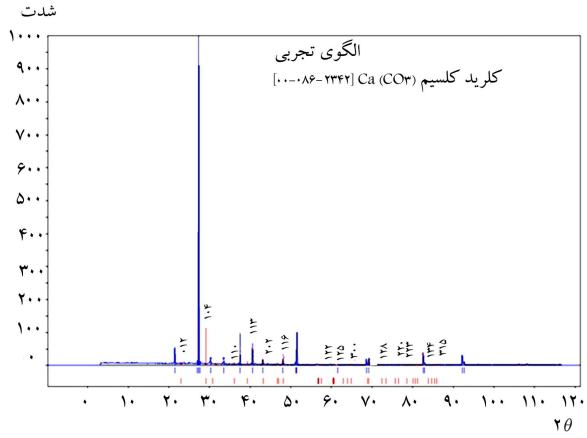
۱.۵. ارزیابی نتایج XRD

شکل ۵، نتایج آزمایش XRD روی ماسه‌ی سیمانی‌شده را نشان می‌دهد، که مطابق آن طیف به دست‌آمده از آنالیز اشعه‌ی ایکس، مربوط به سیلیس یا کوارتز (SiO_2) است. با توجه به درجه‌ی بالای بلورینگی کوارتز، ذرات ماسه‌ی مورد استفاده در آزمایش مانع از دیده‌شدن نقاط بیشینه مربوط به بی‌کربنات کلسیم شده است. در محدوده‌ی ۳۰-۴۰، زاویه‌ی 2θ ناحیه‌ی مربوط به نقاط بیشینه‌ی کربنات کلسیم است و به علت نزدیکی محدوده‌ی مذکور با نقاط بیشینه‌ی سیلیس، باعث هم‌پوشانی نقاط بیشینه‌ی ترکیب موردنظر شده است. بنابراین، چند آزمایش شیمیایی روی نمونه‌های سیمانی‌شده انجام شده است، تا درصد کربنات سدیم در محیط مشخص شود.

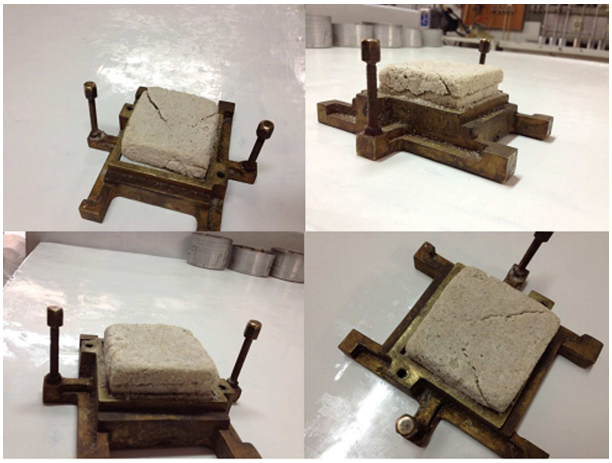
جدول ۲، نتایج حاصل از آزمایش‌های شیمیایی بر روی نمونه‌های ماسه‌ی تمیز و سیمانی‌شده را نشان می‌دهد، که مطابق آن نرخ کربنات از ۱٫۵ در ماسه‌ی تمیز به ۴٫۲۵ (حدود ۲٫۸ برابر) در ماسه‌ی سیمانی‌شده افزایش یافته است. این افزایش نه فقط حاکی از افزایش کربنات در ماسه‌ی سیمانی‌شده نسبت به ماسه‌ی تمیز است، بلکه نمایانگر کریستالی‌بودن خاک ماسه‌یی به‌کاررفته در آزمایش‌هاست. به عبارت دیگر، این امر نشان می‌دهد سیمان بیولوژیکی به خوبی شکل گرفته است. مطابق مراحل شرح داده‌شده، با تزریق مواد سیمانی بیولوژیکی، رسوب کربنات بین فضاهای خالی ماسه‌ی تمیز را پر کرده و با چسبندگی ایجادشده توسط ترکیب ذکرشده، خواص مهندسی خاک ماسه‌یی به مقدار قابل توجهی بهبود یافته است.

۲.۵. ارزیابی پارامترهای مقاومتی خاک سیمانی‌شده به روش بیولوژیکی

جدول ۳، بهبود پارامترهای مقاومتی خاک موردآزمایش را پس از تزریق سیمان بیولوژیکی نشان می‌دهد. با مقایسه‌ی جدول ۳ با جدول ۱ (مشخصات خاک ماسه‌یی تمیز)، می‌توان دریافت وزن مخصوص ماسه‌ی سیمانی‌شده به دلیل پرشدن



شکل ۵. نمایش آزمایش XRD جهت بررسی کربنات در محیط سیمانه.



شکل ۶. نمونه‌ی مکعبی با ابعاد مختلف بعد از آزمایش برش مستقیم.

فضاهای خالی بین ذرات به مراتب بیشتر از ماسه‌ی تمیز است. نتایج آزمایش برش مستقیم در این خاک نیز حاکی از افزایش چسبندگی از صفر به ۲۵۰ کیلوپاسکال است. ضمن آنکه مقدار زاویه‌ی اصطکاک نیز به مقدار قابل توجهی افزایش یافته است، که البته بسته به سطح تنش اعمالی تغییر کرده و در بخش‌های بعدی به آن اشاره شده است.

شکل ۶، برخی از نمونه‌های ماسه‌ی سیمانی‌شده بعد از آزمایش برش مستقیم و شکل ۷، تغییرات کرنش با مقاومت برشی را در آزمایش برش مستقیم برای تنش‌های قائم ۰٫۵ و ۱٫۵ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع بر روی نمونه‌ی ماسه‌ی تمیز نشان می‌دهند.

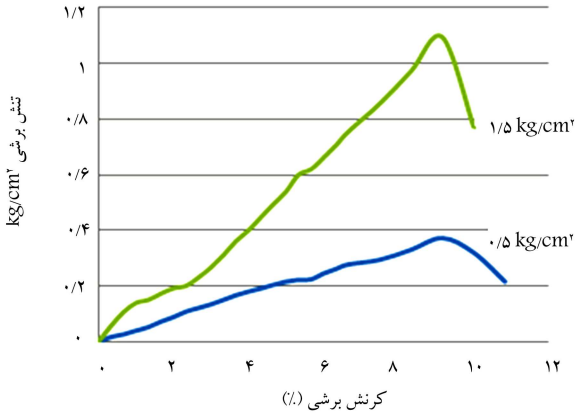
جهت ارزیابی تأثیر سیمانی‌شدن در رفتار ماسه‌ی تمیز، تغییرات کرنش برشی برحسب تنش برشی در ماسه‌ی سیمانی‌شده برای تنش‌های ۰٫۵، ۱، ۱٫۵، ۱٫۸ و ۲ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع در شکل ۸ ارائه شده است. مقایسه‌ی شکل ۸ با شکل ۷ (که این تغییرات را برای ماسه‌ی تمیز نشان می‌دهد)، نمایانگر آن است که میزان کرنش برشی بیشینه در ماسه‌ی تمیز از ۹٪ به حدود ۳٫۵٪ در ماسه‌ی سیمانی‌شده رسیده است. این امر حاکی از کاهش تغییرشکل ماسه‌ی سیمانی‌شده نسبت به ماسه‌ی تمیز به علت سخت‌شدگی قابل توجه آن است. ضمن آنکه میزان مقاومت برشی خاک بیش از ۳ برابر افزایش را نشان می‌دهد، که خود نشانگر تأثیر چشم‌گیر اثر سیمانی‌شدن بیولوژیکی روی خاک‌های ماسه‌یی و تغییر رفتار انقباضی ماسه‌ی تمیز نسبت به رفتار اتساعی ماسه‌ی‌سیمانی‌شده

جدول ۲. مشخصات ماسه‌ی سیمانی‌شده به روش بیولوژیکی.

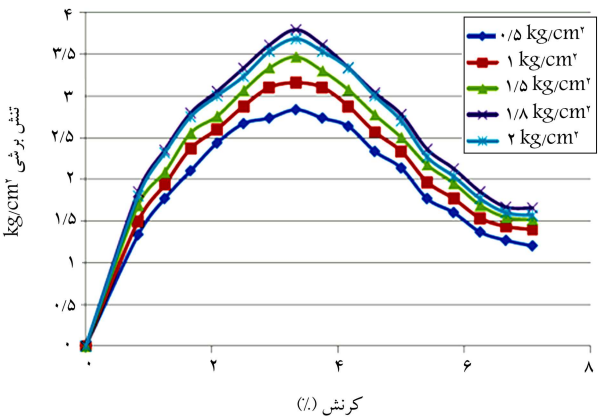
نمونه	وزن مخصوص (kN/m^3)	درصد رطوبت	نسبت تخلخل	نفوذپذیری (cm/sec)	مقاومت فشاری تک‌محوری (kN/m^2)
ماسه‌ی سیمانی‌شده	۲۰	۲۵	۰٫۵۵	$۱٫۸ \times ۱۰^{-۵}$	۶۲۵

جدول ۳. نتایج آزمایش شیمیایی.

نمونه (٪)	ماسه‌ی تمیز	ماسه‌ی سیمانه‌شده
Co_3	۱٫۵	۴٫۲۵
Cl	۰٫۰۱۳	۳٫۷۷

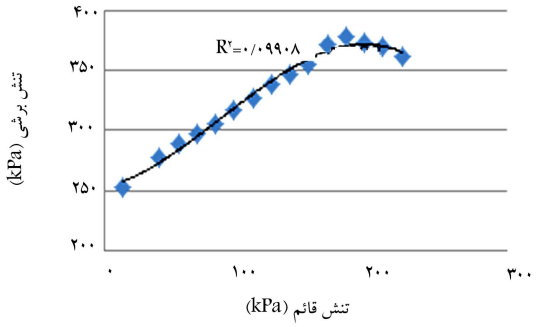


شکل ۷. نمایش تغییرات کرنش با مقاومت برشی در آزمایش برش مستقیم برای ماسه‌ی تمیز (تنش‌های قائم ۰٫۵ و ۱٫۵ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع).



شکل ۸. نمایش تغییرات کرنش با مقاومت برشی در آزمایش برش مستقیم برای سیمانی‌شده (برای تنش‌های ۰٫۵، ۱، ۱٫۵، ۱٫۸ و ۲ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع).

است. نکته‌ی قابل توجه دیگری که از شکل ۸ می‌توان دریافت، افزایش تنش برشی با افزایش تنش قائم در خاک است. براساس شکل ۸، این روند افزایشی تا تنش قائم ۱٫۸ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع ادامه دارد، اما پس از آن در تنش قائم ۲ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع، میزان مقاومت کاهش یافته است؛ که این امر نشان‌گر شکست سیمانی‌شدگی در مصالح است. این روند کاهشی در تنش‌های قائم بالاتر نیز ادامه یافته است، که در مطالعات آتی به آن پرداخته خواهد شد.



شکل ۹. تغییرات تنش قائم و تنش برشی در خاک ماسه‌یی سیمانی‌شده به روش بیولوژیکی.

۳.۵. ارزیابی تغییر رفتار ماسه‌ی سیمانی‌شده به روش بیولوژیکی نسبت به ماسه‌ی تمیز

یکی از نکات بسیار مهمی که از نتایج این پژوهش حاصل شده است، بررسی تغییر رفتار خاک ماسه‌یی با تزریق مواد سیمانی بیولوژیکی است. آزمایش‌های موجود نشان داده است که رفتار خاک ماسه‌یی سیمانی‌شده نسبت به ماسه‌ی تمیز به میزان قابل توجهی تغییر یافته است. با توجه به پژوهش‌های پیشین، رابطه‌ی پوش گسیختگی تنش قائم و تنش برشی در آزمایش برش مستقیم برای خاک ماسه‌یی تمیز به‌کار گرفته‌شده در این پژوهش، مطابق رابطه‌ی موهر ـ کولمب است (رابطه‌ی ۱):

$$\tau = c + \sigma \tan\varphi \qquad (۱)$$

که در آن، ارتباط بین تنش‌های قائم و برشی با دو پارامتر چسبندگی و زاویه‌ی اصطکاک بیان می‌شود. اما رابطه‌ی موهر ـ کولمب، که به‌صورت خطی در نظرگرفته می‌شود، نمی‌تواند رابطه‌ی مناسبی برای خاک‌های سیمانی‌شده به روش بیولوژیکی باشد. به‌عبارت دیگر، رفتار ماسه‌ی تثبیت‌شده به این روش، تا حدودی مشابه رفتار سنگ‌هاست و دیگر رابطه‌ی خطی بین تنش‌ها برقرار نیست. جهت بررسی این موضوع، نمونه‌های ساخته‌شده تحت بارگذاری برش مستقیم قرار گرفتند. درنهایت، نتایج حاصل‌شده بر روی نموداری ترسیم و مناسب‌ترین منحنی جهت تعریف رابطه‌ی بین تنش‌ها معرفی شده است.

شکل ۹، رابطه‌ی بین تغییرات تنش قائم و تنش برشی در خاک ماسه‌یی سیمانی‌شده به روش بیولوژیکی را نشان می‌دهد، که مطابق آن مقاومت خاک نسبت به ماسه‌ی تمیز افزایش قابل توجهی داشته است. براساس شکل مذکور، تا سطح تنش ۱۸۰ کیلوپاسکال معیار موهر ـ کولمب می‌تواند صادق باشد. این در حالی است که پس از سطح تنش ۱۸۰ کیلوپاسکال به نظر می‌رسد به واسطه‌ی شکست سیمان‌شدگی نمونه‌ها، رفتار مصالح از حالت دانه‌یی اتساعی به رفتار مصالح نرم چسبنده نزدیک شده و افت مقاومتی در سطح مذکور تنش ملاحظه شده است.

نکته‌ی قابل توجه دیگر، رابطه‌ی بین تنش‌هاست که به‌صورت کاملاً خطی نیست. لذا میزان زاویه‌ی اصطکاک خاک براساس سطح تنش‌های موردنظر محاسبه شده است. مثلاً برای سطح تنش قائم ۱۵ کیلوپاسکال (ابتدای منحنی)، میزان زاویه‌ی

اصطکاک، که شیب منحنی در این بخش است، حدود ۴۱ درجه است. این در حالی است که برای سطح تنش ۸۰ کیلوپاسکال، زاویه‌ی اصطکاک به ۳۹ درجه رسیده است. کمترین مقدار زاویه‌ی اصطکاک در سطوح مختلف تنش، قبل از آنکه دچار تغییر انحنا در انتهای منحنی شود، به حدود ۲۸ درجه رسیده است. این در حالی است که میزان چسبندگی اولیه (برای سطح تنش قائم صفر)، حدود ۲۵۰٫۱ کیلوپاسکال است، که به مقدار قابل توجهی بیشتر از مقدار چسبندگی اولیه‌ی خاک ماسه‌یی تمیز است، که حدود صفر بود. در هر صورت افزایش مقاومت خاک در این نوع روش تثبیت، امری روشن و غیرقابل انکار خواهد بود. در سطوح تنشی کمتر، این افزایش مقاومت نسبت به خاک ماسه‌یی تمیز بسیار بیشتر است، ولی با افزایش سطح تنش، مقدار زاویه‌ی اصطکاک خاک تا حدودی کاسته شده است.

جهت کنترل دقت محاسبات، ضریب رگرسیون برای تغییرات تنش قائم به تنش برشی نمونه‌ی خاک ماسه‌یی با سیمانی‌شدن بیولوژیکی در شکل ۹ نمایش داده شده است. مقدار این ضریب ۰٫۹۹ است، که نمایانگر ارتباط خوب رابطه‌ی ارائه‌شده بین تنش قائم به تنش برشی در خاک ماسه‌یی سیمانی‌شده به روش بیولوژیکی است.

۶. نتیجه‌گیری

با اضافه‌کردن کلرید کلسیم به ماسه‌ی تمیز در شرایط خاص می‌توان خواص مهندسی خاک را بهبود بخشید. یکی از بهترین روش‌ها، تزریق کلرید کلسیم در محیطی با کاتالیزور باکتری باسیلوس پاستیوریی است، که در پژوهش حاضر به آن پرداخته شده و تأثیر روش سیمانی‌شدن بیولوژیکی ذکرشده در رفتار خاک‌های ماسه‌یی تمیز مورد ارزیابی قرارگرفته و این نتایج حاصل شده است:

۱. با تزریق سیمان بیولوژیکی به یک خاک ماسه‌یی تمیز، که فاقد چسبندگی است، میزان پارامتر چسبندگی خاک به حدود ۲۵۰ کیلوپاسکال می‌رسد، که افزایش قابل توجهی است. این افزایش نمایانگر تغییر رفتار خاک ماسه‌یی پس از تزریق مواد سیمانی بیولوژیکی است.

۲. میزان زاویه‌ی اصطکاک خاک ماسه‌یی سیمانی‌شده در سطح تنش اولیه حدود ۴۱ درجه است، که در مقایسه با ماسه‌ی تمیز، حدود ۱۴٪ افزایش یافته است. این پارامتر با افزایش سطح تنش‌ها تا حدودی کاسته شده است، که این ثابت‌نبودن زاویه‌ی اصطکاک در سطوح تنش مختلف نیز نمایانگر تغییر رفتار خاک ماسه‌یی پس از تزریق مواد سیمانی بیولوژیکی است.

۳. رفتار خاک ماسه‌یی از طریق سیمانی‌شدن بیولوژیکی نسبت به خاک ماسه‌ی تمیز تغییر قابل توجهی داشته است. براساس مطالعات انجام‌شده تا سطح تنش ۱۸۰ کیلوپاسکال، معیار موهر ـ کولمب برای نمونه‌های سیمانی‌شده می‌تواند صادق باشد. این در حالی است که پس از سطح تنش ۱۸۰ کیلوپاسکال به نظر می‌رسد به واسطه‌ی شکست سیمانی‌شدگی بین ذرات، رفتار مصالح از حالت دانه‌یی اتساعی به رفتار مصالح نرم چسبنده نزدیک شده و افت مقاومتی در این سطح تنش ملاحظه شده است.

پانوشت‌ها

1. Spore
2. Bacillus Pasteurii
3. bio-stimulation
4. bio- remediation
5. bio- augmentation
6. Fermenter
7. family Bacillaceae
8. Sprosarsina Pasteurii
9. Lyophilized
10. Broth
11. skim milk
12. crystal violet

منابع (References)

1. DeJong, J.T., Mortensen, B.M., Martinez, B.C. and Nelson, D.C. "Bio-mediated soil improvement", *Ecological Engineering*, **36**(2), pp. 197-210 (2010).
2. Stocks-Fischer, S., Galinat, J.K. and Bang, S.S. "Microbiological precipitation of $CaCO_3$", *Soil Biology and Biochemistry*, **31**(11), pp. 1563-1571 (1999).
3. De Muyncka, W., De Belie, N. and Verstraete, W. "Microbial carbonate precipitation in construction materials: A review", *Ecology Engineering*, **36**(2), pp. 118-136 (2010).
4. Chahal, N., Rajor, A. and Siddique, R. "Calcium carbonate precipitation by different bacterial strains", *African Journal of Biotechnology*, **10**(42), pp. 8359-8372 (2011).
5. Whiffin, V. "Microbial $CaCO_3$ precipitation for the production of biocement", Thesis of Ph.D., Murdoch University (2004).
6. Okawadha, G.D.O. and Li, J. "Optimum condition for microbial carbonate precipitation", *Chemospher*, **81**(9), pp. 1143-1148 (2010).
7. Van Passen, L.A., Daza, C.A., Staal, M., Sorokin, D.Y., Van der Zon, W. and Van Loosdrecht, M.C.M. "Potential soil reinforcement by biological denitrification", *Ecology Engineering*, **36**(2), pp. 168-175 (2010).
8. Sharma, S.S. and Fahey, M. "Degradation of stiffness of cemented calcareous soil in cyclic triaxial tests", *ASCE, J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, **129**(7), pp. 619-629 (2003).
9. Harkes, M.P., Booster, J.L., Van Paassen, L.A. and Van Loosdrecht, M.C.M. "Microbial induced carbonate precipitation as ground improvement method– bacterial fixation and empirical correlation $CaCO_3$ vs. strength", In: *1st International Conference on Bio-Geo-Civil Engineering*, Netherlands, pp. 37-44 (2008).
10. Muynck, W., Debrouwer, D., De Belie, N. and Verstraete, W. "Bacterial carbonate precipitation improves

the durability of cementitious materials", *Cem. Concr. Res.*, **38**(7), pp. 1005-1014 (2008b).

11. DeJong, J.T., Fritzges, M.B. and Nusslein, K. "Microbially induced cementation to control sand response to undrained shear", *J. Geotech. Geoenviron.*, **132**(11), pp. 1381-1392 (2006).
12. Chunxiang, Q., Jianyun, W., Ruixing, W. and Liang, C. "Corrosion protection of cement-based building materials by surface deposition of $CaCO_3$ by Bacillus pasteurii", *Mater. Sci. Eng.*, **29**(4), pp. 1273-1280 (2009).
13. Harkes, M.P., Van Passen, L.A., Booster, J.L., Whiffin, V.S. and Van Loosdrecht, M.C.M. "Fixation and distribution of bacterial activity in sand to induce carbonate precipitation for ground improvement", *Ecological Engineering*, **36**, pp. 112-117 (2010).
14. Hui, R. and Xiang, Ch. "Characterization of microbe cementitious materials", *Chinese Science Bulletin*, **57**(11), pp. 1333-1338 (2012).
15. Whiffin, V.S., Van Paassen, L.A. and Harkes, M.P. "Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique", *Geomicrobiol. J.*, **24**(5), pp. 417-423 (2007).
16. Achal, V. "Microbial remediation of defect in building material and structures", Ph.D. Thesis, Thapar University India (2010).
17. Montoya, B.M. "Bio-mediated soil improvement and the effect of cementation on the behavior, improvement and performance of sand", Ph.D. Thesis, University of California, Davis (2012).