مهندسی عمران شریف (بهار ۱۳۹۶)
دوره‌ی ۲-۳۳، شماره‌ی ۱/۲، ص. ۹۱-۹۷، (یادداشت فنی)

Research Note

ارزیابی آثار دست‌خوردگی در ساختار و تغییرات دما در مقاومت نمونه‌ی خاک سیمانته‌شده به روش بیولوژیکی

محمد آزادی* (دانشیار)
ناصر شمس کیا (استادیار)
دانشکده‌ی مهندسی عمران و نقشه‌برداری، دانشگاه آزاد اسلامی واحد قزوین
حسین کلانتری (دانشجوی کارشناسی ارشد)
گروه مهندسی عمران، دانشگاه زنجان

از جمله روش‌هایی که به تازگی جهت تثبیت خاک‌ها مورد استفاده قرارگرفته است، استفاده از رسوب میکروبیولوژیکی کربنات کلسیم است، که به‌عنوان یک روش سازگار با محیط زیست شناخته می‌شود. اما نکته‌ی قابل توجهی که تاکنون به آن توجه نشده است، بررسی اثر دست‌خوردگی در ساختار این نوع سیمانتاسیون است، که می‌تواند تأثیر به‌سزایی در اجرای این‌گونه روش‌ها داشته باشد. لذا در این نوشتار سعی شده است به ارزیابی اثر این نوع دست‌خوردگی‌ها در خاک‌هایی که به روش بیولوژیکی تثبیت شده‌اند، پرداخته شود. برای این منظور، چند نمونه‌ی تثبیت‌شده به روش بیولوژیکی ساخته شده و تحت تأثیر دست‌خوردگی در ساختار و دست‌خوردگی در اثر سیکل‌های ذوب و یخبندان قرار داده شده‌اند، تا تأثیر این عوامل در کاهش مقاومت خاک تثبیت‌شده به روش بیولوژیکی مورد بررسی قرار گیرد.

واژگان کلیدی: دست‌خوردگی، سیکل ذوب و یخبندان، سیمانتاسیون بیولوژیکی، باسیلوس پاستیوری.

azadi.mhmm@gmail.com
shamskia58@gmail.com
hossein_kalantari_ir@yahoo.com

۱. مقدمه

کربنات کلسیم همواره به عنوان یک محصول فرعی متداول در فرایندهای میکروبیولوژیکی مانند فتوسنتز و هیدرولیز اوره وجود داشته است. در دو دهه‌ی اخیر، پژوهش‌های پایه‌یی بر روی تثبیت خاک‌ها به روش بیولوژیکی و استفاده از رسوبات کربنات کلسیم صورت گرفته است،[۱-۱۶] و برخی از آن‌ها به ارزیابی بهبود خواص مهندسی خاک‌ها،[۱۷-۱۸] و برخی نیز به اثر رسوب کربنات کلسیم بر دوام سیمان و مصالح ساختمانی،[۶،۱۶] پرداخته‌اند. در این بخش به بررسی برخی از این نوشتارها پرداخته شده است.

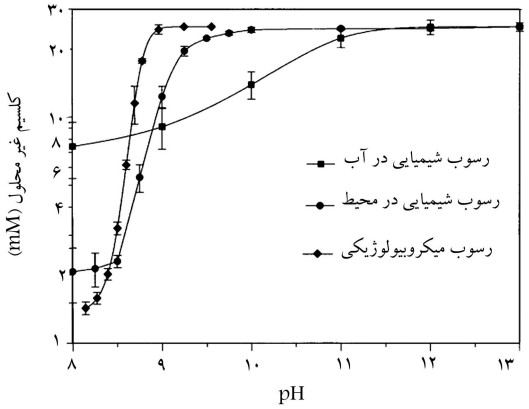
در نوشتاری در سال ۱۹۷۳ به آنالیز کریستال‌های ایجادشده توسط کلسیت باکتریایی پرداخته‌شده و مرفولوژی بلورک‌های کریستالیزه‌ی کلسیم کربنات مورد بررسی قرار گرفته است.[۱] در نوشتار دیگری (۱۹۹۹) با عنوان رسوب میکروبیولوژیکی کربنات کلسیم، به نحوه‌ی ایجاد رسوب کربنات کلسیم توسط باکتری باسیلوس پاستیوری و نیز اثر آن در خاک ماسه و مقاومت خاک در برابر موج برشی توسط اشعه‌ی ایکس پرداخته شده و از نتایج نوشتار مذکور می‌توان به شکل ۱ اشاره کرد، که در آن ارتباط بین میزان اسیدیته و حلالیت کلسیت در ۲ حالت شیمیایی و میکروبیولوژیکی نشان داده شده است.[۲] در سال ۲۰۰۲ نیز به بررسی فعالیت آنزیم اوره در رسوب بیولوژیکی کربنات کلسیم پرداخته شده است.[۳]

اوره، یکی از مواد شیمیایی موجود در ساختار باکتری است که با آزادشدن و هیدرولیز آن، امکان ایجاد رسوب کلسیت فراهم می‌شود. بررسی اثر اختلاط استرانسیم به کلسیت تولیدشده در فرایند بیولوژیکی در سال ۲۰۰۴ ارائه شده است.[۴] اثر استرانسیم به‌عنوان یک ماده‌ی خارجی می‌تواند در بهبود کیفیت کلسیت مؤثر باشد. همچنین در زمینه‌ی تأثیر رسوب کلسیت باکتریایی در پاسخ شن و ماسه به آزمایش برش زهکشی‌نشده نیز مطالعاتی صورت گرفته است.[۵] ضمن آنکه در سال ۲۰۰۸ در نوشتاری با عنوان «اثر رسوب کربنات باکتریایی بر دوام سیمان و مصالح ساخته‌شده»، به ایجاد بلورهای کلسیت و کربنات و افزایش مقاومت فشاری سیمان به‌کاررفته در تولید مصالح ساختمانی اشاره شده است.[۶]

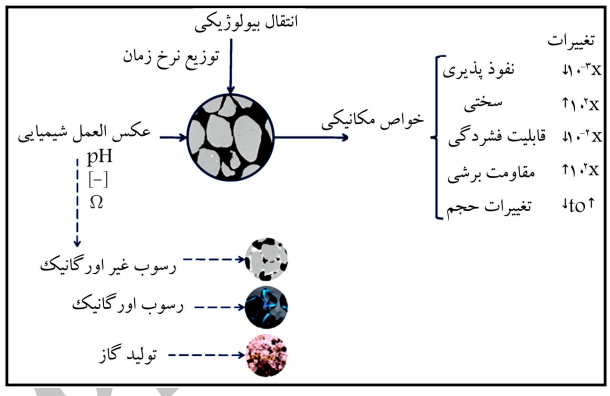
همچنین در یک پژوهش بنیادی (۲۰۰۹)، نوع خاصی از باکتری به نام باسیلوس پاستوری، که تولیدکننده‌ی کلسیم کربنات است، به منظور مقاوم‌سازی مصالح ساختمانی مبتنی بر سیمان ارائه شده است، و با رویکردی از علم میکروبیولوژی و با استفاده از علم بیوشیمی، ساختار و ویژگی‌های کربنات کلسیم حاصل از فعالیت باکتریایی بررسی و قوانین شیمیایی و فعالیت‌های آنزیمی باکتری به‌منزله‌ی عامل مؤثری در

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۳/۱۰/۱۰، اصلاحیه ۱۳۹۴/۳/۱۲، پذیرش ۱۳۹۴/۸/۱۷.

Archive of SID
www.SID.ir



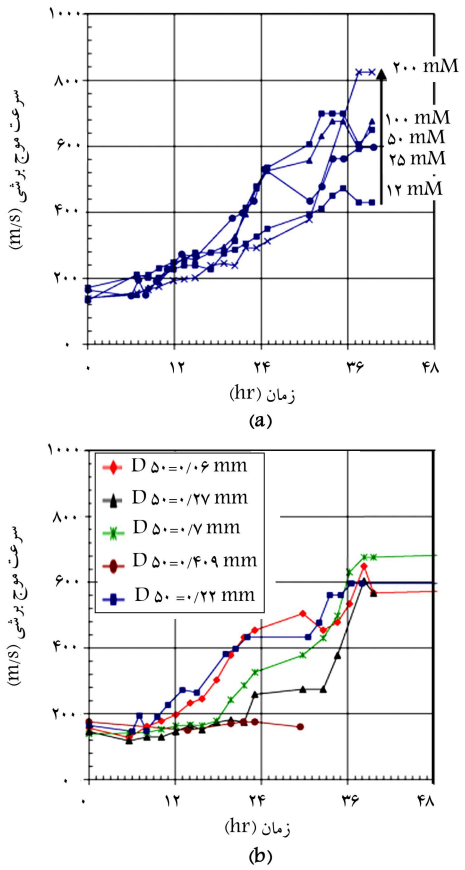
شکل ۱. ارتباط بین میزان اسیدیته‌ی حلالیت کلسیت در ۲ حالت: پیدایش به روش شیمیایی و بیولوژیکی.[۲]



شکل ۲. بهبود زیستی خاک به روش اعمال واسطه‌ی میکروبیولوژیکی.[۱۱]

کیفیت کلسیم کربنات بیان شده است.[۷] در این راستا، در سال ۲۰۱۰ نیز نوشتاری منتشر شده است که در آن اثر رسوب کربنات حاصل از فعالیت باکتریایی در مواد و مصالح ساخت و ساز مورد بررسی قرار گرفته است.[۸] در همان سال مطالعات دیگری،[۹] با رویکردی مشابه در زمینه‌ی تثبیت و توزیع فعالیت‌های باکتریایی در شن و ماسه برای تولید رسوب کربنات انجام شده و در زمینه‌ی شرایط بهینه‌ی کشت کلسیم کربنات بیولوژیکی،[۱۰] ارائه شده است. در نوشتار اخیر، استفاده از محیط‌های کشت خاص به منظور کشت باکتری و ساختارهای شیمیایی وابسته به تولیدات کلسیم کربنات باکتریایی مورد بررسی قرار گرفته است.

مطالعات و بررسی‌های پژوهشگران در زمینه‌ی ارتباط علوم بیوشیمی و میکروبیولوژی با مهندسی عمران و به‌کارگیری این علوم در بهبود کیفی مشخصات خاک یک منطقه بسیار حائز اهمیت هستند، ولی با مطالعه‌ی آنها می‌توان دریافت مطالعاتی که به‌طور خاص به بررسی روش تثبیت مذکور و بهبود مشخصات خاک پرداخته‌اند، بسیار محدود هستند. در این زمینه نوشتاری (۲۰۱۰) با عنوان «بررسی بهبود زیستی خاک توسط عوامل واسطه‌ی باکتریایی» ارائه شده است، که مروری بر شرایط میکروبیولوژیکی خاک و نحوه‌ی بهبود خواص خاک از طریق ایجاد محیط‌های مناسب رشد باکتری و وضعیت بیوشیمیایی تزریق باکتری به خاک بوده،[۱۱] و در آن به اهمیت روش نوین میکروبیولوژیکی به منظور تثبیت و بهبود خواص خاک اشاره شده است. روش مذکور به‌عنوان مقرون به صرفه‌ترین روش‌ها معرفی شده، و در حال حاضر از چندین جنبه در شرایط آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است، که از آن جمله می‌توان به شکل ۲ (سیستم بهبود زیستی خاک



شکل ۳. نمودار سرعت موج برشی مستقیم در دوره‌های زمانی متفاوت.[۱۱]

به روش اعمال واسطه‌ی میکروبیولوژیکی) و شکل ۳ (نحوه‌ی تأثیر رسوب کلسیم کربنات اضافه‌شده به خاک در بهبود وضعیت سرعت موج برشی خاک) اشاره کرد. همچنین در نوشتار مذکور نشان داده شده است که ماده‌ی واسطه به‌عنوان یک بهبوددهنده‌ی خواص فنی خاک می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد و نیز 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 سایز آن، نقش فرایندهای میکروبیولوژیکی در بهبود کیفیت خاک از جمله مباحثی بوده است که به آنها پرداخته شده و همچنین ذکر شده است که رسوب کلسیم کربنات اضافه‌شده به خاک می‌تواند مشخصات کیفی، فنی و خواص آن را بهبود بخشد.

همان‌طورکه ذکر شد، در دو دهه‌ی اخیر، مطالعات بسیاری بر روی سیمانتاسیون بیولوژیکی در خاک‌های ماسه‌یی ارائه شده است؛ اما در هیچ‌یک از آن‌ها، تأثیر قابل توجه دست‌خوردگی خاک تثبیت‌شده در پایداری مورد ارزیابی قرار نگرفته است. لذا پژوهش حاضر می‌تواند به استفاده از این نوع روش تثبیت خاک در شرایط مختلف اجرا و شرایط آب و هوایی متفاوت کمک شایانی کند.

۲. مدل‌سازی در آزمایشگاه

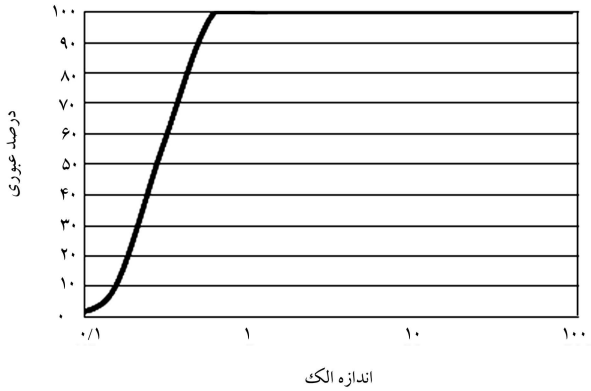
۱.۲. مصالح مورد استفاده

در این مطالعه از ماسه‌ی بد دانه‌بندی‌شده‌ی SP (دانه‌بندی یکنواخت) با نمودار دانه‌بندی شکل ۴ استفاده شده است. دانه‌بندی خاک در این پژوهش تطابق خوبی با

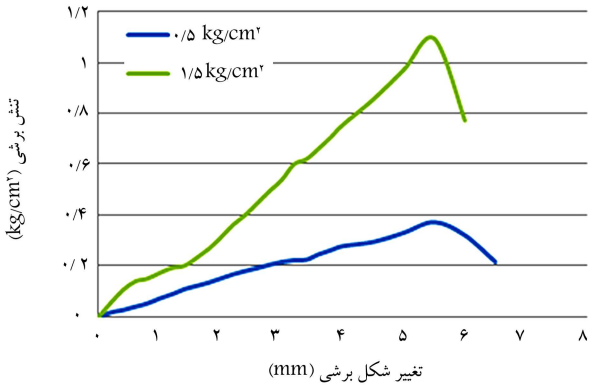
Archive of SID
www.SID.ir

جدول ۱. مشخصات ماسه‌ی مورد آزمایش.

نمونه	γ (kN/m^3)	درصد رطوبت	نسبت تخلخل	زاویه‌ی اصطکاک (درجه)	چسبندگی (kN/m^2)
ماسه‌ی بد دانه‌بندی‌شده	۱۷/۹	۲۰/۵	۰/۷۳	۳۶	۰



شکل ۴. نمودار دانه‌بندی ماسه‌ی مورد آزمایش.



شکل ۵. نمایش تغییرات تنش برشی ـ تغییرشکل برشی در آزمایش برش مستقیم روی ماسه‌ی تمیز.

دانه‌بندی مناسب برای این نوع سیمانتاسیون دارد.[۱۶] خاک ماسه‌یی مورد استفاده، وزن مخصوص ۱۷/۹ کیلونیوتن بر مترمکعب، تخلخل ۰/۷۳، زاویه‌ی اصطکاک ۳۶ درجه، و چسبندگی بسیار ناچیز دارد (جدول ۱). همچنین شکل ۵، دو نمونه از تغییرات تنش برشی و تغییرشکل برشی در آزمایش‌های برش مستقیم روی نمونه‌ی ماسه‌یی را نشان می‌دهد، که مطابق آن میزان تغییرشکل برشی بیشینه در نمونه‌های مختلف حدود ۵/۵ میلی‌متر است، که این مقدار حدود ۹٪ تغییرشکل نرمال نمونه‌ی اولیه (با عرض ۶۰ میلی‌متر) است.

جهت تکمیل تثبیت خاک، از کلریدکلسیم با درجه خلوص حدود ۹۹/۵٪ و باکتری Sprosarsina pasteurii به‌عنوان یک کاتالیزور مناسب در روش مذکور استفاده شده است. این باکتری از مرکز کلکسیون قارچ‌ها و باکتری‌های صنعتی به شماره‌ی PTCC۱۶۴۵(DSM۳۳) به‌صورت پودر لیوفیلیزه تهیه شده است.

۲.۲. ساخت نمونه‌های سیمانته‌شده

در ابتدا، باکتری در محیط مغذی براث[۱] حاوی اوره به حجم ۳۰ میلی‌لیتر کشت داده شده و در ۳۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۲۴ ساعت گرماگذاری شده است.

شکل ۶. نمونه‌ی ماسه‌یی قبل از سیمانتاسیون.

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 استوک‌های موردنیاز تهیه و در دمای ۲۰- درجه سانتی‌گراد نگه‌داری شده است. یک نمونه کشت در پلیت 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 پلیت، در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد یخچال نگه‌داری شده است.

به منظور فعال‌سازی باکتری در محیط کشت مغذی براث حاوی اوره و یا عصاره‌ی مخمر، کلریدآمونیوم یا سولفات‌آمونیوم اضافه 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 سانتریفیوژ به مدت ۱۰ دقیقه با دور ۴۰۰۰ rpm از محیط کشت جدا شده، رسوبات حاصل در نرمال سالین ۰/۹٪ رقیق شده و به وسیله‌ی یک دستگاه طیف‌سنج، غلظت باکتری در طول موج ۶۰۰ نانومتر بر روی ۱/۵ تنظیم شده است.

با توجه به ابعاد متفاوت قالب‌های استفاده‌شده در این پژوهش، میزان ماسه‌ی پایه‌ی اضافه‌شده در نمونه‌های مختلف، متفاوت است. این تذکر لازم است که 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 تا ۷ روز، با توجه به حجم ماسه‌ی پایه‌ی مورد استفاده خشک شده‌اند.

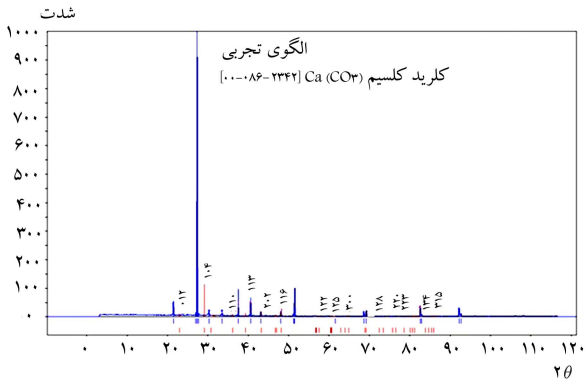
شکل‌های ۶ و ۷، نمونه‌ی خاک ماسه‌یی قبل و بعد از تثبیت را نشان می‌دهند. تکمیل فرایند در بازه‌های زمانی مشخص از ۱۰ تا ۳۰ روز انجام شده است. با توجه به ابعاد خاصی که در آزمایش‌های ژئوتکنیکی موردنیاز است، در آزمایشگاه میکروبیولوژی اقدام به ساخت نمونه‌هایی با ابعاد مناسب برای انجام آزمایش‌های برش مستقیم شده است.

۳.۲. ارزیابی مدل‌های سیمانته‌شده به روش بیولوژیکی

مطابق مراحل شرح داده‌شده، با تزریق مواد سیمانی بیولوژیکی، رسوب کربنات

Archive of SID
www.SID.ir

شکل ۷. نمونه‌ی ماسه‌یی بعد از سیمانتاسیون بیولوژیکی.



شکل ۸. نمایش نتایج آزمایش XRD.

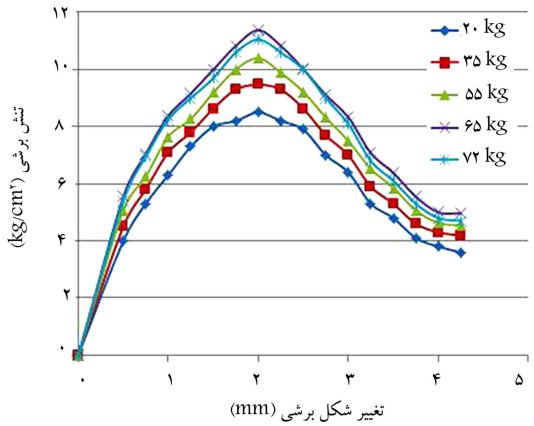
بین فضاهای خالی ماسه‌ی تمیز را پُر کرده و با چسبندگی ایجادشده توسط ترکیب مذکور، خواص مهندسی خاک ماسه‌یی به مقدار قابل توجهی بهبود یافته است. در بخش‌های بعد، به ارزیابی تغییرات ایجادشده پرداخته شده است.

۱.۳.۲. ارزیابی نتایج XRD

با به‌کاربردن سیمانتاسیون شیمیایی، خواص مهندسی خاک ماسه‌یی مانند وزن مخصوص، نفوذپذیری و... تغییر می‌کند.[۱۷] شکل ۸، نتایج آزمایش XRD روی ماسه‌ی سیمانته‌شده را نشان می‌دهد، که مطابق آن طیف به دست‌آمده از آنالیز اشعه‌ی ایکس، مربوط به اکسید سیلیسیم یا کوارتز (SiO_2) است. با توجه به درجه بالای بلورینگی کوارتز، ذرات ماسه‌ی مورد استفاده در آزمایش مانع از دیده‌شدن پیک مربوط به بی‌کربنات‌کلسیم شده است. در محدوده‌ی ۳۰ تا ۴۰ درجه، زاویه‌ی 2θ در ناحیه‌ی مربوط به پیک کربنات کلسیم است و به علت نزدیکی این محدوده با پیک اکسید سیلیسیم، باعث همپوشانی پیک ترکیب موردنظر شده است. بنابراین، چندین آزمایش شیمیایی روی نمونه‌های سیمانته‌شده انجام شده است، تا درصد کربنات سدیم در محیط مشخص شود. براساس نتایج حاصل‌شده، نرخ کربنات حدود ۲٫۸ برابر در ماسه‌ی سیمانته‌شده نسبت به ماسه‌ی تمیز افزایش یافته است. این افزایش نه فقط حاکی از افزایش کربنات در ماسه‌ی سیمانته‌شده نسبت به ماسه‌ی تمیز است، بلکه نمایانگر کریستالی‌بودن خاک ماسه‌یی به‌کاررفته در آزمایش‌هاست.

۲.۳.۲. ارزیابی پارامترهای مقاومتی خاک سیمانته‌شده به روش بیولوژیکی

با مقایسه‌ی نتایج خاک ماسه‌یی سیمانته‌شده با خاک ماسه‌یی تمیز می‌توان دریافت تخلخل از ۰٫۷۳ به ۰٫۵۵ کاهش یافته است، لذا میزان وزن مخصوص ماسه‌ی سیمانه‌شده به ۲۰ کیلونیوتن بر مترمکعب رسیده است، که این امر به دلیل پُرشدن فضاهای خالی بین ذرات است. ضمن آنکه نتایج آزمایش برش مستقیم در این



شکل ۹. تغییرات تنش برشی ـ تغییرشکل برشی برای نمونه‌های سیمانته‌شده.

خاک نیز حاکی از افزایش چسبندگی از صفر به ۲۵۰ کیلوپاسکال بوده و مقدار زاویه‌ی اصطکاک نیز به مقدار قابل توجهی افزایش یافته است. البته این افزایش زاویه‌ی اصطکاک بسته به سطح تنش اعمالی تغییر می‌کند، که این مسئله در نوشتار دیگری، بررسی شده است.

جهت ارزیابی تأثیر سیمانتاسیون در رفتار ماسه‌ی سیمانته‌شده نسبت به ماسه‌ی تمیز، تغییرات تغییرشکل برشی بر حسب تنش برشی برای بارهای قائم مختلف (۲۰، ۳۵، ۵۵، ۶۵ و ۷۲ کیلوگرم) در ماسه‌ی سیمانته‌شده بررسی شده است (شکل ۹). در مقایسه‌ی شکل‌های ۵ و ۹ مشخص شده است که میزان تغییرشکل برشی بیشینه در ماسه‌ی تمیز از ۵٫۵ میلی‌متر (معادل تغییرشکل نرمال ۹٪)، به حدود ۲ میلی‌متر (معادل تغییرشکل نرمال ۳٫۳٪) در ماسه‌ی سیمانته‌شده رسیده است، که این امر حاکی از کاهش تغییرشکل ماسه‌ی سیمانته‌شده نسبت به ماسه‌ی تمیز به‌علت سخت‌شدگی قابل توجه آن است. ضمن آنکه میزان مقاومت برشی خاک حدود ۱۰ برابر افزایش را نشان می‌دهد، که خود نشان‌گر تأثیر چشم‌گیر اثر سیمانتاسیون بیولوژیکی روی خاک‌های ماسه‌یی و تغییر رفتار انقباضی ماسه‌ی تمیز نسبت به رفتار اتساعی ماسه‌ی سیمانته‌شده است.

نکته‌ی قابل توجه دیگر در شکل ۹ این است که افزایش تنش برشی با افزایش تنش قائم در خاک همراه است. براساس شکل مذکور تا تنش قائم حدود ۱٫۸ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع (معادل بار قائم ۶۵ کیلوگرم که در مقطع ۶ × ۶ سانتی‌مترمربع اعمال شده است) این روند افزایشی ادامه دارد، اما پس از این مقدار در تنش قائم ۲ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع (معادل بار قائم ۷۲ کیلوگرم)، مقاومت برشی خاک کاهش یافته است، که این امر نمایانگر شکست سیمانی‌شدگی در مصالح است. لذا به نظر می‌رسد رفتار مصالح از حالت دانه‌یی اتساعی به رفتار مصالح نرم چسبنده نزدیک و اُفت مقاومتی در این سطح تنش ملاحظه شده است. این روند کاهشی در تنش‌های قائم بالاتر نیز ادامه یافته است، که در مطالعات آتی به آن پرداخته خواهد شد.

۳. بررسی اثر دست‌خوردگی نمونه‌های خاک سیمانته‌شده به روش بیولوژیکی

۱.۳. اثر دست‌خوردگی ساختار خاک سیمانته‌شده

جهت بررسی اثر دست‌خوردگی، ۱۲ نمونه‌ی خاک سیمانته‌شده به روش بیولوژیکی مورد آزمایش برش مستقیم قرار گرفته و مقاومت برشی آنها تحت ۱۰ بار قائم

Archive of SID
www.SID.ir

جدول ۲. مقاومت برشی نمونه‌های سیمانته‌شده به روش بیولوژیکی، تحت دست‌خورده‌های اولیه و مجدد.

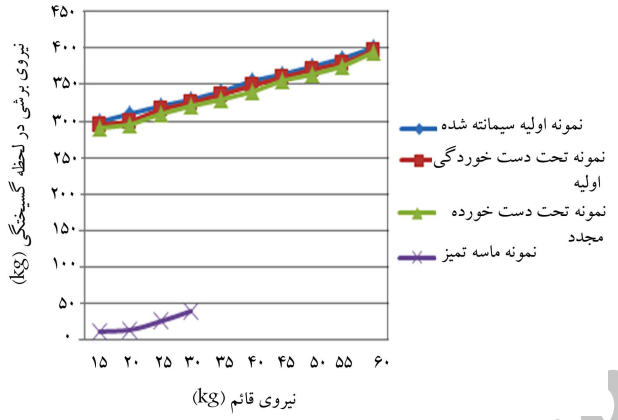
بار قائم (kg)	نیروی برشی (kg)		
	نمونه‌ی اولیه	نمونه‌ی تحت دست‌خورده	
		اولیه	مجدد
۱۵	۳۰۰	۲۹۵	۲۹۰
۲۰	۳۱۰	۳۰۰	۲۹۵
۲۵	۳۲۰	۳۱۵/۵	۳۱۰
۳۰	۳۳۰	۳۲۵	۳۲۰
۳۵	۳۴۰	۳۳۶	۳۳۰
۴۰	۳۵۵	۳۴۹	۳۴۱
۴۵	۳۶۵	۳۶۰	۳۵۵
۵۰	۳۷۵	۳۷۰	۳۶۴
۵۵	۳۸۵	۳۷۹	۳۷۵
۶۰	۴۰۱	۳۹۷	۳۹۴

متفاوت مطابق جدول ۲ اندازه‌گیری شده است. نتایج خروجی از آزمون برش مستقیم نشان‌دهنده‌ی آن است که با افزایش بار قائم، میزان نیروی برشی در لحظه‌ی گسیختگی افزایش یافته است، که این امر دلالت بر یکنواختی و همگن‌بودن ساختار سیمانته‌شده و پاسخ مثبت این نوع سیمانتاسیون به افزایش مقاومت برشی خاک دارد. به منظور بررسی اثر دست‌خوردگی در مقاومت برشی خاک سیمانته‌شده، نمونه‌های دیگری از تخریب نمونه‌های اولیه ساخته شده است. این نمونه‌های دست‌خورده در شرایط بارگذاری مشابه نمونه‌های اولیه، تحت آزمایش برش مستقیم قرارگرفته و نتایج حاصل از آزمایش‌های مذکور در جدول ۲ ارائه شده‌اند. مانند نمونه‌ی اولیه، بیشینه‌ی مقاومت برشی نیز در بیشینه‌ی بار قائم برداشت شده است. بر همین اساس، میزان نیروی برشی در لحظه‌ی گسیختگی حدود ۳۹۷ کیلوگرم است، که در بار قائم ۶۰ کیلوگرم حاصل شده است. با توجه به مقایسه‌ی منطقی بین مقاومت‌های برشی نمونه‌ی اولیه و نمونه‌ی دست‌خورده می‌توان دریافت که میزان متوسط کاهش مقاومت در اثر دست‌خوردگی حدود ۲٪ است، که مقدار ناچیزی به نظر می‌رسد. به منظور مقایسه‌ی بهتر و بررسی دقیق اثر دست‌خوردگی مجدد نمونه‌ها، نمونه‌های سومی از تخریب نمونه‌های دوم ساخته شده است. با شرایط بارگذاری مشابه و اندازه‌گیری مقاومت برشی در آزمون برش مستقیم، نتایج دوباره مورد بررسی قرارگرفته است. براساس نتایج حاصل‌شده، اثر دست‌خوردگی و کاهش مقاومت برشی نسبت به نمونه‌های اولیه و نمونه‌هایی که یک بار دچار دست‌خوردگی قرارگرفته بودند، به ترتیب حدود ۲ و ۴ درصد هستند. مقایسه‌ی درصد کاهش مقاومت بقیه‌ی نمونه‌های ساخته‌شده در مرحله‌های اول و دوم دست‌خوردگی با نمونه‌های اولیه در جدول ۳ ارائه شده است، که مطابق آن تغییرات مقاومت برشی در هر مرحله نسبت به نمونه‌های اولیه بسیار ناچیز است.

بیشترین تغییرات مربوط به نمونه‌یی است که تحت بار قائم ۲۰ کیلوگرم قرار گرفته است. در این حالت نیز تغییرات کاهش مقاومت برشی حدود ۴/۸٪ نسبت به مقاومت نمونه‌های اولیه است، که چندان زیاد نیست. این امر نمایانگر تأثیر ناچیز دست‌خوردگی در نمونه‌هایی است که به روش بیولوژیکی سیمانته می‌شوند. به‌عبارت دیگر، نمونه‌ی خاک ماسه‌یی، که در ابتدا مقاومت برشی ناچیز دارد، پس از تزریق سیمانتاسیون بیولوژیکی تبدیل به یک نمونه خاک سخت با مقاومت بالا می‌شود، که تحت اثر دست‌خوردگی قادر است ساختار پیشین خود را بازسازی کند و تقریباً

جدول ۳. درصد کاهش مقاومت برشی خاک تحت دست‌خوردگی‌های اولیه و مجدد.

بار قائم (kg)	درصد کاهش مقاومت برشی نمونه‌ی تحت دست‌خوردگی	
	اولیه	مجدد
۱۵	۱/۶۶	۳/۳
۲۰	۳	۴/۸
۲۵	۱/۴	۳/۱۲
۳۰	۱/۵۶	۳
۳۵	۱/۱۷	۲/۹۴
۴۰	۱/۶۹	۲/۸
۴۵	۱/۳۷	۲/۷۳
۵۰	۱/۳۳	۲/۶۷
۵۵	۱/۳	۲/۵۹
۶۰	۱/۰۵	۱/۷۴



شکل ۱۰. تغییرات نیروی برشی در لحظه‌ی گسیختگی با بار قائم برای نمونه‌های سیمانته‌شده به روش بیولوژیکی، تحت دست‌خورده‌های اولیه و مجدد.

خاصیتی همچون تیکسوتروپی خاک‌های ریزدانه به خود بگیرد، که این امر می‌تواند در استفاده‌های کاربردی از این نوع سیمانتاسیون، بسیار مؤثر باشد.

به منظور مقایسه‌ی بهتر تأثیر دست‌خوردگی در مقاومت برشی نمونه‌ها ی خاک، شکل ۱۰ ارائه شده است، که در آن از نتایج جدول ۲ در ترسیم مقاومت برشی نمونه نسبت به بار قائم وارده بر هر نمونه در هر آزمایش برش مستقیم استفاده شده است. همان‌طور که قبلاً نیز اشاره است، مطابق شکل ۱۰، تأثیر دست‌خوردگی در نمونه‌ی سیمانته‌شده بسیار ناچیز بوده، و اثر سیمانتاسیون بیولوژیکی تأثیر قابل توجهی در افزایش مقاومت ماسه‌ی سیمانته‌شده نسبت به ماسه‌ی تمیز داشته است.

۲.۳. اثر سیکل‌های ذوب ـ انجماد در ساختار خاک سیمانته‌شده

تغییرات درجه حرارت و نیز اعمال سیکل‌های ذوب و یخبندان، همواره به‌عنوان یک عامل دست‌خوردگی نمونه‌های خاک به شمار می‌رود. این عامل در کاهش مقاومت برشی خاک تأثیر به‌سزایی دارد و همواره به عنوان یک عامل تأثیرگذار در کاهش مقاومت خاک‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. به منظور بررسی اثر سیکل‌های ذوب و یخبندان به‌عنوان یک عامل دست‌خوردگی در مناطق شهری، ۱۲ نمونه خاک سیمانته‌شده به روش بیولوژیکی ساخته شده و مطابق جدول ۴ تحت یک سیکل ذوب ـ یخبندان قرارگرفته‌اند.

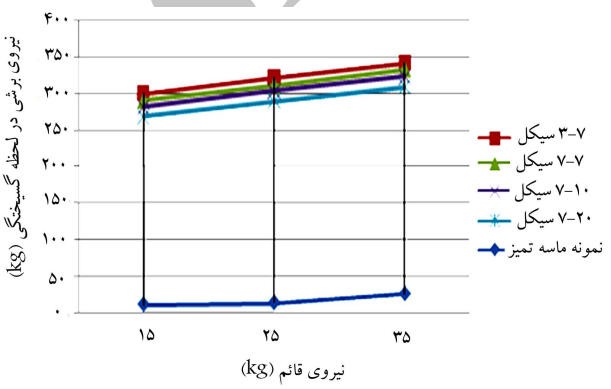
Archive of SID
www.SID.ir

جدول ۴. مشخصات سیکل‌های ذوب ـ یخبندان اعمال‌شده بر نمونه‌ها.

زمان قرارگیری در سیکل (ساعت)		تعداد نمونه‌ها	دما	
یخبندان	ذوب		ذوب	یخبندان
۱۲	۱۲	۳	+۷	−۳
۱۲	۱۲	۳	+۷	−۷
۱۲	۱۲	۳	+۷	−۱۰
۱۲	۱۲	۳	+۷	−۲۰

جدول ۵. نتایج نیروی برشی در لحظه‌ی گسیختگی برای نمونه‌های سیمانته‌شده تحت سیکل‌های ذوب ـ یخبندان.

نیروی برشی در لحظه‌ی گسیختگی برای بار قائم (کیلوگرم)			دما	
۳۵	۲۵	۱۵	ذوب	یخبندان
۳۴۰٫۶	۳۲۱٫۵	۲۹۹٫۴	+۷	−۳
۳۳۲٫۶	۳۱۰٫۷	۲۹۰٫۱	+۷	−۷
۳۲۲٫۵	۳۰۲٫۳	۲۸۱٫۳	+۷	−۱۰
۳۰۸٫۴	۲۸۸٫۹	۲۶۸٫۱	+۷	−۲۰



شکل ۱۱. نمودار نیروی برشی نسبت به بار قائم در لحظه‌ی گسیختگی نمونه‌ها تحت سیکل‌های ذوب ـ یخبندان مختلف.

در هر سیکل، ۳ نمونه قرار داده شده و پس از اتمام سیکل‌ها، مقاومت برشی آنها در آزمایش برش مستقیم مورد ارزیابی قرار گرفته‌است. از میان بارهای قائم اعمال‌شده در نمونه‌های اولیه و دست‌خورده، به ترتیب ۳ بار ۱۵، ۲۵ و ۳۵ کیلوگرم انتخاب و نمونه‌ها تحت بارهای ذکرشده سنجیده شده‌اند. با توجه به نتایج حاصل از آزمایش‌های مذکور، جدول ۵ و شکل ۱۱ ارائه شده‌اند. مطابق نتایج حاصله، در دمای ۳- تا ۷+، تغییرات مقاومت برشی حدود ۰٫۵٪ است، که این مقدار کاملاً نامحسوس است. با توجه به مقادیر حاصل‌شده از آزمایش‌ها، که در جدول ۵ ارائه شده‌اند، درصد کاهش مقاومت نمونه‌های تحت سیکل ذوب ـ یخبندان در جدول ۶ نمایش داده شده است. با توجه به جدول مذکور، بیشینه‌ی کاهش مقاومت در بار قائم ۱۵ کیلوگرم و در دمای ۲۰- درجه سانتی‌گراد حاصل شده است، که مقدار آن حدود ۱۰٪ است. با افزایش مقدار بار قائم، میزان این درصد کاهش مقاومت برشی کاهش یافته است. همچنین می‌توان مشاهده کرد که کاهش مقاومت برای دماهای یخبندان بالاتر از ۱۰- درجه سانتی‌گراد، کمتر از ۲٪ است، که قابل صرف‌نظرکردن است. لذا می‌توان دریافت که اثر سیکل ذوب ـ یخبندان عموماً تأثیر چندانی در

جدول ۶. نتایج درصد کاهش مقاومت نمونه‌های سیمانته‌شده نسبت به نمونه‌های اولیه تحت سیکل‌های ذوب ـ یخبندان.

درصد کاهش مقاومت در بار قائم (کیلوگرم)			دما	
۳۵	۲۵	۱۵	ذوب	یخبندان
۰٫۲	۰٫۲	۰٫۵	+۷	−۳
۱	۱٫۴	۲	+۷	−۷
۶	۶٫۲	۷	+۷	−۱۰
۸٫۲	۹	۱۰	+۷	−۲۰

کاهش مقاومت خاک‌های ماسه‌یی، که به روش بیولوژیکی سیمانته شده‌اند، ندارد، خصوصاً زمانی که دمای یخبندان زیر ۱۰- درجه سانتی‌گراد است. در آزمایش‌های بعدی اثر تعداد سیکل‌های ذوب ـ یخبندان مورد ارزیابی قرار گرفته است، که در نوشتاری دیگر به بررسی آن موضوع پرداخته خواهد شد. نکته‌ی قابل توجه دیگر آن است که مطابق شکل ۱۱، سیمانتاسیون بیولوژیکی تأثیر قابل توجهی در افزایش مقاومت ماسه‌ی سیمانته‌شده نسبت به ماسه‌ی تمیز داشته و با تغییرات دما، تغییر چندانی نکرده است.

۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی آثار دست‌خوردگی در ساختار و تغییرات دما در مقاومت نمونه‌ی خاک سیمانته‌شده به روش بیولوژیکی پرداخته شده است. برای این منظور، ابتدا یک نمونه‌ی ماسه‌یی سُست با دانه‌بندی یکنواخت مورد بررسی قرار گرفته و پس از تزریق سیمانتاسیون به روش بیولوژیکی، به ارزیابی مقاومت آن پرداخته شده است. سپس نمونه‌های حاصل‌شده تحت دست‌خوردگی در ساختار و تغییرات دما قرارگرفته‌اند و تأثیر عوامل مذکور در کاهش مقاومت خاک تثبیت‌شده بررسی شده است. براساس مطالعات انجام‌شده، این نتایج حاصل شده است:

۱. استفاده از روش سیمانتاسیون بیولوژیکی می‌تواند مقاومت خاک ماسه‌یی تمیز را به مقدار قابل توجهی افزایش دهد. براساس نتایج حاصله وزن مخصوص خاک تا حدود ۱۱٪ افزایش پیدا کرده است، که این افزایش ناشی از پُرشدن فضاهای خالی بین ذرات در اثر تزریق مواد بیولوژیکی است. ضمن آنکه نتایج آزمایش‌ها، حاکی از تغییر چسبندگی از صفر به ۲۵۰ کیلوپاسکال و افزایش زاویه‌ی اصطکاک تا حدود ۱۴٪ است. این امر نمایانگر افزایش مقاومت خاک با تزریق از روش بیولوژیکی است.

۲. نتایج حاصل‌شده بر روی نمونه‌هایی که ۲ بار تحت دست‌خوردگی در ساختار قرار گرفته‌اند، نشان می‌دهد که میزان کاهش مقاومت برشی در خاک‌های تثبیت‌شده به روش بیولوژیکی که تحت ۱ بار و ۲ بار دست‌خوردگی قرار گرفته‌اند، نسبت به نمونه‌های اولیه‌ی تثبیت‌شده، به ترتیب حدود ۲ و ۴٫۸ درصد هستند. لذا می‌توان دریافت که دست‌خوردگی تأثیر چندانی در نمونه‌های خاک نداشته است.

۳. اثر تغییرات درجه حرارت می‌تواند تأثیر به مراتب بیشتری نسبت به دست‌خوردگی در ساختار خاک، در کاهش مقاومت خاک تثبیت‌شده داشته باشد. براساس نتایج حاصله، بیشینه‌ی کاهش مقاومت در بار قائم ۱۵ کیلوگرم و در دمای ۲۰- درجه سانتی‌گراد حاصل شده است، که مقدار آن حدود ۱۰٪ است. با افزایش

Archive of SID
www.SID.ir

مقدار بار قائم، میزان درصد ذکرشده‌ی کاهش مقاومت برشی، کاهش می‌یابد. همچنین می‌توان مشاهده کرد که کاهش مقاومت برای دماهای یخبندان بالاتر از ۱۰- درجه سانتی‌گراد، کمتر از ۲٪ است که قابل صرف‌نظرکردن است. ضمن آنکه برای برخی از دماها (مانند تغییرات دمای ۳- تا ۷+) تغییرات مقاومت برشی حدود ۰٫۵٪ است، که مقدار کاملاً نامحسوسی است. لذا می‌توان دریافت که اثر سیکل ذوب ـ یخبندان، خصوصاً برای دمای یخبندان زیر ۱۰- درجه سانتی‌گراد، قابل چشم‌پوشی است. اما برای دماهای کمتر از این مقدار لازم است تأثیرات آن در کاهش مقاومت برشی خاک مشاهده شود.

پانوشت

1. Broth

منابع (References)

1. Boquet, E., Boronat, A. and Ramos-Cormenzana, A. "Production of calcite (calciumcarbonate) crystals by soil bacteria is a general phenomenon", *Nature,* **246**(5434), pp. 527-529 (1973).
2. Stocks-Fischer, S. "Microbiological precipitation of $CaCO_3$", *Soil Biology and Biochemistry,* **31**(11), pp. 1563-1571 (1999).
3. Bachmeier, K.L., Williams, A.E., Warmington, J.R. and, Bang, S.S. "Urease activity in microbiologically-induced calcite precipitation", *J. Biotechnol,* **93**(2), pp. 171-181 (2002).
4. Fujita, Y., Redden, G.D., Ingram, J.C., Cortez, M.M., Ferris, F.G. and Smith, R.W. "Strontium incorporation into calcite generated by bacterial ureolysis", *Geochim. et Cosmochim Acta,* **68**(15), pp. 3261-3270 (2004).
5. 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).
6. De 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).
7. 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).
8. De Muyncka, W., De Belie, N. and Verstraete, W. "Microbial carbonate precipitation in construction materials", *Ecological Engineering*, **36**(2), pp. 118-136 (2010).
9. Harkes, M., Passen, V. and Leon, A. "Fixation and distribution of bacterial activity in sand to induce carbonate precipitation for ground improvement", *Ecological Engineering*, **36**(2), pp. 112-117 (2010).
10. Okawadha, G. and Li, J. "Optimum condition for microbial carbonate precipitation", *Chemospher,* **81**, pp. 1143-1148 (2010).
11. Dejong, J.T., Mortensen, B.M., Martinez, B.C. and Nelson, D.C. "Bio-mediate soil improvement", *Ecological Engineering,* **36**(2), pp. 197-210 (2010).
12. Bazylinski, D.A., Frankel, R.B. and Konhauser, K.O. "Modes of biomineralization of magnetite by microbes", *Geomicrobiol J.*, **24**(6), pp. 465-475 (2007).
13. Hui, R. and Xiang, Ch. "Characterization of microbe cementitious materials", *Chinese sience Bulletin,* **57**(11), pp. 1333-1338 (2012).
14. Passen, V. and Leon, A. "Potential soil reinforcement by biological denitrification", *Ecological Engineering*, **36**(2), pp. 168-175 (2010).
15. 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 CaCO3 vs. strength", In: *1st International Conference on Bio-Geo-Civil Engineering,* Netherlands, pp. 37-44 (2008).
16. Varenyam, A. "Microbial remediation of defect in building material and structures", Ph.D. Thesis, Thapar university India (2010).
17. Whiffin, V.S., Van Paassen, L. and Harkes, M.P. "Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique", *Geomicrobiol J.*, **24**, pp. 417-423 (2007).
18. Nemati, M. and Voordouw, G. "Modification of porous media permeability, using calcium carbonate produced enzymatically in situ", *Enzyme Microb. Technol.,* **33**(5), pp. 635-642 (2003).

Archive of SID

www.SID.ir