

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 قرار گرفته 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 پاستوری.

۱. مقدمه

میکروبیولوژیکی نشان داده شده است.^[۱] در سال ۲۰۰۲ نیز به بررسی فعالیت آنزیم اوره در رسوب بیولوژیکی کربنات کلسیم پرداخته شده است.^[۲] اوره، یکی از مواد شیمیایی موجود در ساختار باکتری است که با آزاد شدن 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.^[۳] اثر استرانسیم به‌عنوان یک ماده‌ی خارجی می‌تواند در بهبود کیفیت کلسیت مؤثر باشد. همچنین در زمینه‌ی تأثیر رسوب کلسیت باکتریایی در پاسخ‌شن و ماسه به آزمایش برش زه‌کشی نشده نیز مطالعاتی صورت گرفته است.^[۴] 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.^[۵]

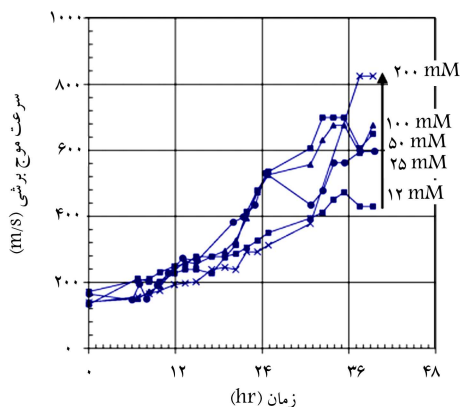
همچنین در یک پژوهش بنیادی (۲۰۰۹)، نوع خاصی از باکتری به نام باسیلوس پاستوری، که تولیدکننده‌ی کلسیم کربنات است، به منظور مقاوم‌سازی مصالح ساختمانی مبتنی بر سیمان ارائه شده است، و با رویکردی از علم میکروبیولوژی و با استفاده از علم بیوشیمی، ساختار و ویژگی‌های کربنات کلسیم حاصل از فعالیت باکتریایی بررسی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

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 پایه‌ی بر روی تثبیت خاک‌ها به روش بیولوژیکی و استفاده از رسوبات کربنات کلسیم صورت گرفته است،^[۱-۱۴] 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،^[۱۶] پرداخته‌اند. در این بخش به بررسی برخی از این نوشتارها پرداخته شده است.

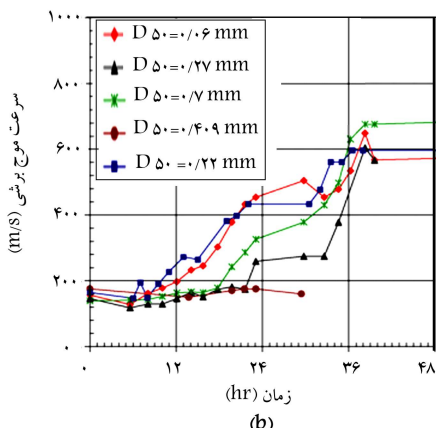
در نوشتاری در سال ۱۹۷۳ به آنالیز کریستال‌های ایجادشده توسط کلسیت باکتریایی پرداخته‌شده و مرفولوژی بلورک‌های کریستالیزه‌ی کلسیم کربنات مورد بررسی قرار گرفته است.^[۱] در نوشتار دیگری (۱۹۹۹) با عنوان رسوب میکروبیولوژیکی کربنات کلسیم، به نحوه‌ی ایجاد رسوب کربنات کلسیم توسط باکتری باسیلوس پاستوری و نیز اثر 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

* نویسنده مسئول

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



(a)



(b)

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

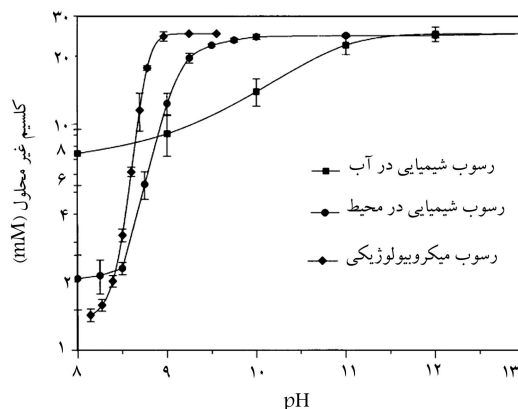
به روش اعمال واسطه‌ی میکروبیولوژیکی) و شکل ۳ (نحوه‌ی تأثیر رسوب کلسیم کربنات اضافه‌شده به خاک در بهبود وضعیت سرعت موج برشی خاک) اشاره کرد. همچنین در نوشتار مذکور نشان داده شده است که ماده‌ی واسطه به‌عنوان یک بهبوددهنده‌ی خواص فنی خاک می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد و نیز سطح کارایی سیستم باکتریایی، واکنش‌های 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 میاحشی 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.

همان‌طور که ذکر شد، در دو دهه‌ی اخیر، مطالعات بسیاری بر روی سیمان‌تاسیون بیولوژیکی در خاک‌های ماسه‌ی ارانه 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.

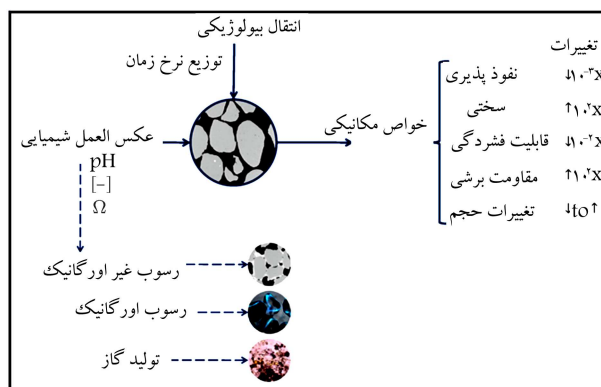
۲. مدل‌سازی در آزمایشگاه

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



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.

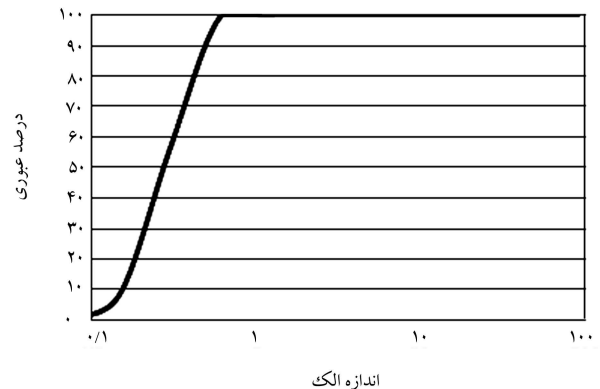
مطالعات و بررسی‌های پژوهشگران در زمینه‌ی ارتباط علوم بیوشیمی و میکروبیولوژی با مهندسی عمران و به‌کارگیری این علوم در بهبود کیفی مشخصات خاک یک منطقه بسیار حائز اهمیت هستند، ولی با مطالعه‌ی آنها می‌توان دریافت مطالعاتی که به‌طور خاص به بررسی روش تثبیت مذکور و بهبود مشخصات خاک پرداخته‌اند، بسیار محدود هستند. 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

جدول ۱. مشخصات ماسه‌ی مورد آزمایش.

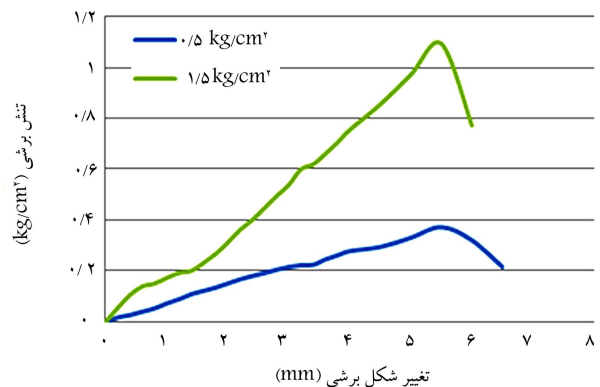
نمونه	γ (kN/m ³)	درصد رطوبت	نسبت تخلخل	زاویه‌ی اصطکاک (درجه)	چسبندگی (kN/m ²)
ماسه‌ی بد دانه‌بندی شده	۱۷/۹	۲۰/۵	۰/۷۳	۳۶	۰



شکل ۶. نمونه‌ی ماسه‌ی قبل از سیمان‌تاسیون.



شکل ۴. نمودار دانه‌بندی ماسه‌ی مورد آزمایش.



شکل ۵. نمایش تغییرات تنش برشی - تغییر شکل برشی در آزمایش برش مستقیم روی ماسه‌ی تمیز.

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 مورد نیاز 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 رشد کرده بر روی اسلانت و پلیت، در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد یخچال نگهداری شده است.

به منظور فعال‌سازی باکتری در محیط کشت مغذی برات حاوی اوره و با عصاره‌ی مخمر، کلرید آمونیوم یا سولفات آمونیوم 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 ۱۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴ تا ۷ روز، با توجه به حجم ماسه‌ی پایه‌ی مورد استفاده خشک شده‌اند.

شکل‌های ۶ و ۷، نمونه‌ی خاک ماسه‌ی 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 مورد نیاز است، در آزمایشگاه میکروبیولوژی اقدام به ساخت نمونه‌هایی با ابعاد مناسب برای انجام آزمایش‌های برش مستقیم شده است.

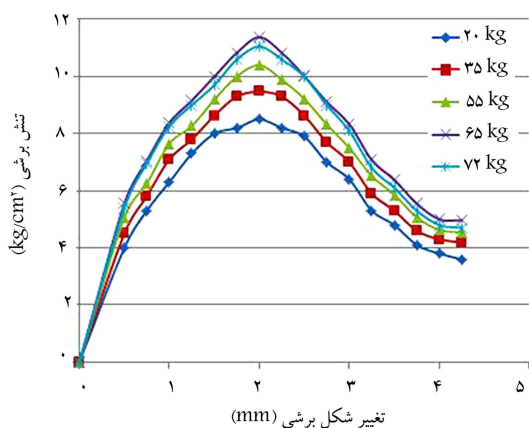
دانه‌بندی مناسب برای این نوع سیمان‌تاسیون دارد.^[۱۶] خاک ماسه‌ی مورد استفاده، وزن مخصوص ۱۷/۹ کیلو نیوتن بر متر مکعب، تخلخل ۰/۷۳، زاویه‌ی اصطکاک ۳۶ درجه، و چسبندگی بسیار ناچیز دارد (جدول ۱). همچنین شکل ۵، دو نمونه از تغییرات تنش برشی و تغییر شکل برشی در آزمایش‌های برش مستقیم روی نمونه‌ی ماسه‌ی را نشان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

جهت تکمیل تثبیت خاک، از کلرید کلسیم با درجه خلوص حدود ۹۹/۵٪ و باکتری *Sproarsina pasteurii* به عنوان یک کاتالیزور مناسب در روش مذکور استفاده شده است. این باکتری از مرکز کلکسیون قارچ‌ها و باکتری‌های صنعتی به شماره‌ی PTCC ۱۶۴۵ (DSM ۳۳) به صورت پودر لیوفیلیزه تهیه شده است.

۲.۲. ساخت نمونه‌های سیمان‌ته‌شده

۲.۲.۱. ارزیابی مدل‌های سیمان‌ته‌شده به روش بیولوژیکی
مطابق مراحل شرح داده‌شده، با تزریق مواد سیمانی بیولوژیکی، رسوب کربنات

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



شکل ۹. تغییرات تنش برشی - تغییر شکل برشی برای نمونه‌های سیمانته شده.

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

جهت ارزیابی تأثیر سیمان‌تاسیون در رفتار ماسه‌ی سیمانته شده نسبت به ماسه‌ی تمیز، تغییرات تغییر شکل برشی بر حسب تنش برشی برای بارهای قائم مختلف (۲۰، ۳۵، ۵۵، ۶۵ و ۷۲ کیلوگرم) در ماسه‌ی سیمانته شده بررسی شده است (شکل ۹). در مقایسه‌ی شکل‌های ۵ و ۹ مشخص شده است که میزان تغییر شکل برشی بیشینه در ماسه‌ی تمیز از ۵/۷ میلی‌متر (معادل تغییر شکل نرمال ۹٪)، به حدود ۲ میلی‌متر (معادل تغییر شکل نرمال ۳٪) در ماسه‌ی سیمانته شده رسیده است، که این امر حاکی از کاهش تغییر شکل ماسه‌ی سیمانته شده نسبت به ماسه‌ی تمیز به علت 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 سیمانته شده 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 سانتی‌متر مربع (معادل بار قائم ۶۵ کیلوگرم که در مقطع ۶ × ۶ سانتی‌متر مربع اعمال شده است) این روند افزایشی ادامه دارد، اما پس از این مقدار در تنش قائم ۲ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع (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 چسبیده نزدیک و اُفت مقاومتی در این سطح تنش ملاحظه شده است. این روند کاهش تنش‌های قائم بالاتر نیز ادامه یافته است، که در مطالعات آتی به آن پرداخته خواهد شد.

۳. بررسی اثر دست‌خوردگی نمونه‌های خاک سیمانته شده

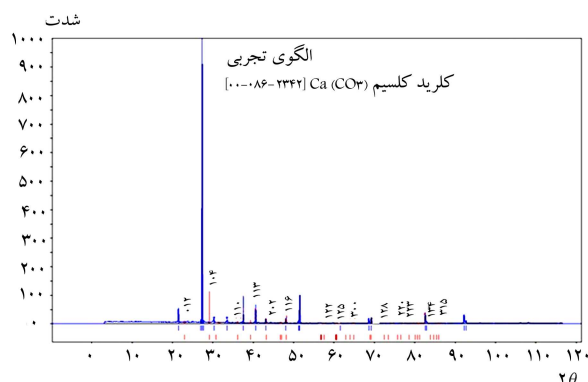
به روش بیولوژیکی

۱.۳. اثر دست‌خوردگی ساختار خاک سیمانته شده

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



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 ایجاد شده توسط ترکیب مذکور، خواص مهندسی خاک ماسه‌یی به مقدار قابل توجهی بهبود یافته است. در بخش‌های بعد، به ارزیابی تغییرات ایجاد شده پرداخته شده است.

۱.۳.۲. ارزیابی نتایج XRD

با به‌کار بردن سیمان‌تاسیون شیمیایی، خواص مهندسی خاک ماسه‌یی مانند وزن مخصوص، نفوذپذیری و... تغییر می‌کند. [۱۷] شکل ۸، نتایج آزمایش XRD روی ماسه‌ی سیمانته شده 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 دیده شدن پیک مربوط به بی‌کربنات کلسیم شده است. در محدوده‌ی ۳۰ تا ۴۰ درجه، زاویه‌ی ۲θ در ناحیه‌ی مربوط به پیک کربنات کلسیم است و به علت نزدیکی این محدوده با پیک اکسید سیلیسیم، باعث همپوشانی پیک ترکیب مورد نظر شده است. بنابراین، چندین آزمایش شیمیایی روی نمونه‌های سیمانته شده انجام شده است، تا درصد کربنات سدیم در محیط مشخص شود. براساس نتایج حاصل شده، نرخ کربنات حدود ۲/۸ برابر در ماسه‌ی سیمانته شده نسبت به ماسه‌ی تمیز افزایش یافته است. این افزایش نه فقط حاکی از افزایش کربنات در ماسه‌ی سیمانته شده نسبت به ماسه‌ی تمیز است، بلکه نمایان‌گر کریستالی بودن خاک ماسه‌یی به‌کاررفته در آزمایش هاست.

۲.۳.۲. ارزیابی پارامترهای مقاومتی خاک سیمانته شده به روش بیولوژیکی

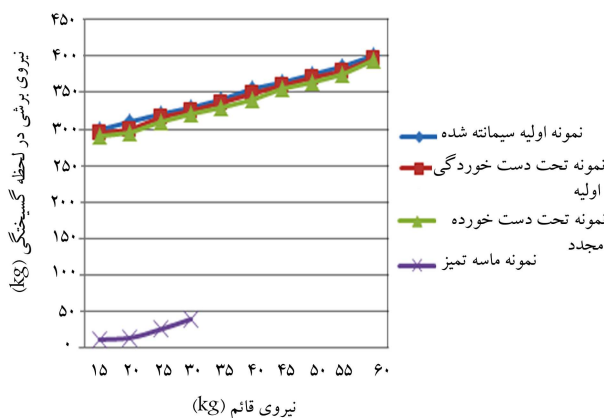
با مقایسه‌ی نتایج خاک ماسه‌یی سیمانته شده با خاک ماسه‌یی تمیز می‌توان دریافت تخلخل از ۷۳٪ به ۵۵٪ کاهش یافته است، لذا میزان وزن مخصوص ماسه‌ی سیمانته شده به ۲۰ کیلو نیوتن بر مترمکعب رسیده است، که این امر به دلیل پُر شدن فضاهای خالی بین ذرات است. ضمن آنکه نتایج آزمایش برش مستقیم در این

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

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

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

درصد کاهش مقاومت برشی نمونه‌ی تحت دست‌خوردگی	بار قائم (kg)	
	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 سیمانته شده 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 نمونه‌های خاک، شکل ۱۰ ارائه شده است، که در آن از نتایج جدول ۲ در ترسیم مقاومت برشی نمونه نسبت به بار قائم وارده در هر نمونه در هر آزمایش برش مستقیم استفاده شده است. همان‌طور که قبلاً نیز اشاره است، مطابق شکل ۱۰، تأثیر دست‌خوردگی در نمونه‌ی سیمانته شده بسیار ناچیز بوده، و اثر سیمان‌تاسیون بیولوژیکی تأثیر قابل توجهی در افزایش مقاومت ماسه‌ی سیمانته شده نسبت به ماسه‌ی تمیز داشته است.

۲.۳. اثر سیکل‌های ذوب - انجماد در ساختار خاک سیمانته شده

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 به‌عنوان 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 سیمانته شده به روش بیولوژیکی ساخته شده و مطابق جدول ۴ تحت یک سیکل ذوب - یخبندان قرار گرفته‌اند.

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 همگن بودن ساختار سیمانته شده و پاسخ مثبت این نوع سیمان‌تاسیون به افزایش مقاومت برشی خاک دارد. به منظور بررسی اثر دست‌خوردگی در مقاومت برشی خاک سیمانته شده، نمونه‌های دیگری از تخریب نمونه‌های اولیه ساخته شده است. این نمونه‌های دست‌خورده در شرایط بارگذاری مشابه نمونه‌های اولیه، تحت آزمایش برش مستقیم قرار گرفته 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 قرار گرفته است. براساس نتایج حاصل شده، اثر دست‌خوردگی و کاهش مقاومت برشی نسبت به نمونه‌های اولیه و نمونه‌هایی که یک بار دچار دست‌خوردگی قرار گرفته بودند، به ترتیب حدود ۲ و ۴ درصد هستند. مقایسه‌ی درصد کاهش مقاومت بقیه‌ی نمونه‌های ساخته شده 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 نمونه‌ی 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. به عبارت دیگر، نمونه‌ی خاک ماسه‌یی، که در ابتدا مقاومت برشی ناچیز دارد، پس از تریبی 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 ۴. مشخصات سیکل‌های ذوب - یخبندان اعمال شده بر نمونه‌ها.

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

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

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

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

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

کاهش مقاومت خاک‌های ماسه‌یی، که به روش بیولوژیکی سیمانته شده‌اند، ندارد، خصوصاً زمانی که دمای یخبندان زیر 10° - درجه سانتی‌گراد است. در آزمایش‌های بعدی اثر تعداد سیکل‌های ذوب - 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.

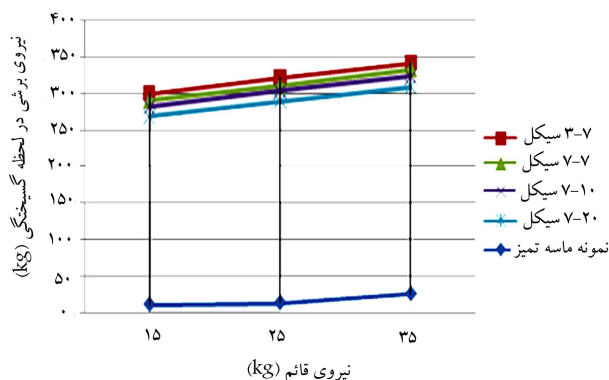
۴. نتیجه‌گیری

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 قرار گرفته‌اند 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 پر شدن فضاهای خالی بین ذرات در اثر تزریق مواد بیولوژیکی است. ضمن آنکه نتایج آزمایش‌ها، حاکی از تغییر چسبندگی از صفر به 25° 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 20° - درجه سانتی‌گراد حاصل شده است، که مقدار آن حدود ۱۰٪ است. با افزایش



شکل ۱۱. نمودار نیروی برشی نسبت به بار قائم در لحظه‌ی گسیختگی نمونه‌ها تحت سیکل‌های ذوب - 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 گرفته است. 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 3° تا 7° تغییرات مقاومت برشی حدود 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 - یخبندان در جدول ۶ نمایش داده شده است. با توجه به جدول مذکور، بیشینه‌ی کاهش مقاومت در بار قائم ۱۵ کیلوگرم و در دمای 20° - 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 10° - درجه سانتی‌گراد، کمتر از ۲٪ است، که قابل صرف‌نظر کردن است. لذا می‌توان دریافت که اثر سیکل ذوب - یخبندان عموماً تأثیر چندانی در

حدود ۵/۵٪ است، که مقدار کاملاً نامحسوسی است. لذا می‌توان دریافت که اثر سیکل ذوب - 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.

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 صرف‌نظر کردن است. ضمن آنکه برای برخی از دماها (مانند تغییرات دمای ۳- تا ۷+) تغییرات مقاومت برشی

پانویس

1. Broth

منابع (References)

- Boquet, E., Boronat, A. and Ramos-Cormenzana, A. "Production of calcite (calcium carbonate) crystals by soil bacteria is a general phenomenon", *Nature*, **246**(5434), pp. 527-529 (1973).
- Stocks-Fischer, S. "Microbiological precipitation of CaCO₃", *Soil Biology and Biochemistry*, **31**(11), pp. 1563-1571 (1999).
- 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).
- 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).
- 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).
- 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).
- Chunxiang, Q., Jianyun, W., Ruixing, W. and Liang, C. "Corrosion protection of cement-based building materials by surface deposition of CaCO₃ by *Bacillus pasteurii*", *Mater. Sci. Eng.*, **29**(4), pp. 1273-1280 (2009).
- De Muynck, W., De Belie, N. and Verstraete, W. "Microbial carbonate precipitation in construction materials", *Ecological Engineering*, **36**(2), pp. 118-136 (2010).
- 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).
- Okawadha, G. and Li, J. "Optimum condition for microbial carbonate precipitation", *Chemosphere*, **81**, pp. 1143-1148 (2010).
- 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).
- Bazylnski, D.A., Frankel, R.B. and Konhauser, K.O. "Modes of biomineralization of magnetite by microbes", *Geomicrobiol. J.*, **24**(6), pp. 465-475 (2007).
- Hui, R. and Xiang, Ch. "Characterization of microbe cementitious materials", *Chinese science Bulletin*, **57**(11), pp. 1333-1338 (2012).
- Passen, V. and Leon, A. "Potential soil reinforcement by biological denitrification", *Ecological Engineering*, **36**(2), pp. 168-175 (2010).
- 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).
- Varenyam, A. "Microbial remediation of defect in building material and structures", Ph.D. Thesis, Thapar university India (2010).
- 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).
- 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).