

تثبیت زیستی ماسه به روش تزریق سطحی

اکرم کریمیان، محمود حسنلوراد^{*}، غلامرضا کریمی

گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۰ تیر ۱۳۹۶
بازنگری: ۳ آذر ۱۳۹۶
پذیرش: ۴ آذر ۱۳۹۶
ارائه آنلاین: ۱۳ آذر ۱۳۹۶

کلمات کلیدی:

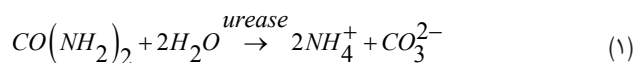
تثبیت خاک
بهسازی زیستی
میکروارگانسیم
رسوب کربنات کلسیم
تزریق سطحی

چکیده: اکثر روش‌های بهسازی خاک پرهزینه، زمان‌بر، از لحاظ اجرایی سخت و از نظر محیط زیست نیز خسارات زیادی به طبیعت وارد می‌کنند. بهسازی زیستی یکی از روش‌های نوین بهسازی خاک است که خیلی از مشکلات مذکور را ندارد. یکی از مشکلات روش‌های بهسازی عمومی خاک، تخریب محیط زیست است. در این مطالعه کارایی روش بهسازی زیستی در بهسازی ماسه سست و خشک به روش تزریق سطحی مورد بررسی قرار گرفت. برای بررسی قابلیت و موفقیت تزریق، آزمایش‌هایی مانند مقاومت تک‌محوری، کشش غیر مستقیم (برزیلی)، درصد کربنات کلسیم، سرعت موج برشی و غیره انجام گردید. نتایج بیانگر این است که بهسازی زیستی موجب سیمانی شدن ماسه و افزایش مقاومت آن شده است. بعلاوه روش تزریق سطحی، قابلیت سیمانی کردن و تثبیت ماسه سست را تا عمق مورد نظر دارد. عمق تزریق و اصلاح خاک تابع روش اجرا و تعداد تزریق و بسیاری عوامل دیگر است. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که افزایش مقاومت و نیز درصد کربنات کلسیم تشکیل شده با افزایش عمق کاهش می‌یابند. همچنین نتایج نشان می‌دهد افزایش مقاومت ناشی از بهسازی زیستی تنها به مقدار کلسیت تشکیل شده بستگی ندارد بلکه محل تشکیل رسوب و تعداد پیوندها اثر بیشتری دارند.

۱- مقدمه

گاهی مواقع خاک در حالت طبیعی برای تحمل بارهای معمول سازه‌ای مناسب نیست لذا با رشد جمعیت و گسترش ساخت‌وساز، ابداع روش‌هایی برای بهبود خواص مکانیکی خاک‌های طبیعی اجتناب‌ناپذیر است. روش‌های معمول بهسازی و تثبیت خاک عبارتند از: جایگزینی با خاک مناسب، پیش بارگذاری جهت تحکیم خاک و تثبیت یا اختلاط یا تزریق مواد شیمیایی. اکثر این روش‌ها گران، زمان‌بر و در حالت اختلاط یا تزریق ترکیبات تثبیت‌کننده، خسارات زیست‌محیطی به بار می‌آورند [۱ و ۲]. به عنوان مثال گزارشی از سمی شدن آب زیرزمینی در اثر تزریق مواد شیمیایی توسط کارول^۱ ارائه شده است [۳]. برخی کشورها همچون ایالات متحده آمریکا ممنوعیت استفاده از اکثر مصالح شیمیایی را به علت سمی بودن و نیز کاهش مصرف سیمان به عنوان یکی از عوامل اصلی انتشار دی اکسید کربن در جهان، در پروژه‌های بهسازی خاک پیشنهاد داده‌اند [۱]. از طرفی بررسی روش‌های بهسازی جایگزین علاوه بر سازگاری با محیط زیست از لحاظ اقتصادی و فنی نیز باید توجیه شود. اخیراً بهسازی زیستی به روش رسوب میکروبی کربنات کلسیم (MICP)^۲ مورد توجه بسیاری از مهندسين و زیست‌شناسان قرار گرفته و کارایی این روش توسط محققین بسیاری در مقیاس آزمایشگاهی

و اجرایی به اثبات رسیده است [۴-۶]. از این روش در بسیاری از مسائل مهندسی همچون بهسازی خاک [۵ و ۷] افزایش مقاومت روانگرایی [۸ و ۹]، کاهش فرسایش خاک [۱۰]، ترمیم ترک‌های بتن و افزایش دوام آن [۱۱-۱۴] استفاده شده است. علاوه بر کاهش خطرات زیست محیطی، در پروژه‌های کوچک هزینه روش بهسازی زیستی حدود نصف هزینه روش تزریق دوغاب سیمان تحت فشار برآورد شده است [۱۵]. در این روش یک باکتری هوازی با فعالیت اوره‌آزی به داخل خاک فرستاده می‌شود تا با تسریع هیدرولیز اوره طبق واکنش شیمیایی زیر یون‌های آمونیوم و کربنات تولید شود (رابطه‌ی ۱).



کاتیون‌های آزاد کلسیم که اغلب از محلول کلرید کلسیم تأمین می‌گردد به سلول‌های باکتری که دارای بار منفی هستند می‌چسبند، یون کربنات تولید شده با یون کلسیم طبق رابطه ۲ واکنش داده و به‌صورت کریستال‌های کربنات کلسیم (CaCO₃) رسوب می‌دهند که دانه‌های ماسه توسط این رسوب به یکدیگر متصل می‌شوند [۱۶].

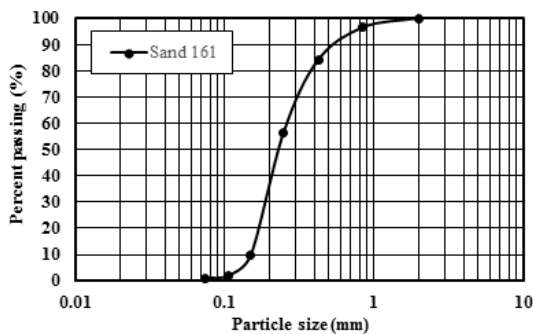
^{*}نویسنده عهده‌دار مکاتبات: hassanlou@eng.ikiu.ac.ir

1 Karol
2 Microbial Induced Carbonate Precipitation

۲- مواد مورد استفاده

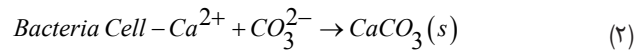
۲-۱- خاک

در بررسی حاضر، از ماسه سیلیسی فیروزکوه (با نام تجاری ماسه ۱۶۱) برای انجام آزمایش‌ها استفاده شده است. شکل ۱ منحنی دانه‌بندی این خاک را نشان می‌دهد. این خاک طبق سیستم طبقه‌بندی متحد ماسه بد دانه‌بندی شده (SP) با توزیع یکنواخت است که برای اکثر کاربردهای مهندسی خاکی مساله‌ساز است. دانه‌بندی خاک مورد استفاده باید به نحوی باشد که باکتری‌ها بتوانند به راحتی از آن عبور کرده و در حفرات جای گیرند که این موضوع می‌تواند باعث ایجاد محدودیت در تزریق پذیری این دوغاب در خاک‌های ریزدانه به شمار رود. از آنجا که قطر سلول‌های باکتری معمولاً بین ۰/۵ تا ۳ میکرومتر متغیر است [۱۹] با توجه به شکل ۱ پیش بینی می‌گردد خاک مورد استفاده قابلیت بهسازی زیستی توسط باکتری‌ها را دارا است. سایر مشخصات این خاک در جدول ۱ آورده شده است.



شکل ۱: منحنی دانه‌بندی خاک مورد استفاده (ماسه ۱۶۱)

Fig. 1. Grain size distribution curve of sand (No.) 161



در مقایسه با افزودن مصالح سنتی مانند سیمان، بهسازی زیستی با حفظ نفوذپذیری در محدوده مناسب، با تغییر مشخصات خاک منجر به افزایش مقاومت و سختی آن می‌گردد [۱۷]. به این ترتیب علاوه بر افزایش مقاومت، زهکشی سازه‌های خاکی چون روسازی‌ها و خاک‌ریزهای سیمانی شده نیز سریع‌تر شده و با محو سریع فشار آب حفره‌ای در این سازه‌ها، نیاز به سیستم زهکشی کاهش می‌یابد. از لحاظ محیط زیستی نیز عدم تغییر مسیر آب‌های زیرزمینی و امکان رشد پوشش گیاهی از دیگر مزایای این روش است. اکثر مطالعات صورت گرفته در مورد بهسازی زیستی محدود به شرایط خاک زیر سطح آب زیرزمینی است [۴ و ۱۸]. سیمانی شدن خاک‌های ماسه‌ای خشک که بالاتر از سطح آب زیرزمینی قرار دارند در مواردی چون آب‌بندهای ماسه‌ای، خاک‌ریزهای راه و راه‌آهن و تثبیت ماسه‌های روان یا خاک‌های سست که تحت اثر باد به شکل ریز گرد جابه‌جا می‌شوند، کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. فرسایش بادی یکی از دلایل اصلی تخریب خاک و محیط زیست، آلودگی هوا و آب است. فرسایش خاک منجر به بیابان‌زایی و در نتیجه کاهش بهره‌وری کشاورزی و با تولید ریز گرد سلامت انسان را نیز به خطر می‌اندازد. با توجه به قرار گرفتن ایران در منطقه خشک و نیمه‌خشک جهان، کنترل فرسایش و ریز گرد‌ها از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. هدف از مطالعه حاضر بررسی امکان تثبیت خاک‌های خشک، کارایی تزریق سطحی^۱ و بررسی تغییر مشخصات خاک از لحاظ مهندسی و ریزساختار^۲ در اثر این نوع بهسازی است.

در این مطالعه اتصال و عدم تحرک باکتری به دانه‌های خاک در حالت غیر اشباع و امکان تثبیت درجا به این روش بررسی می‌گردد. با این روش می‌توان هزینه‌های اجرایی را تا حد زیادی کاهش داد و تا عمق مناسبی از خاک را تثبیت کرد. در کارهای صورت گرفته تاکنون مقاومت به صورت کلی یا نقطه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. بررسی مقاومت به صورت مقطعی و نیز بررسی ناهمگنی هم از نظر مقاومتی و هم از نظر سیمانی شدن در این مطالعه صورت خواهد گرفت.

جدول ۱: برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده

Table 1. Some physical and chemical properties of soil

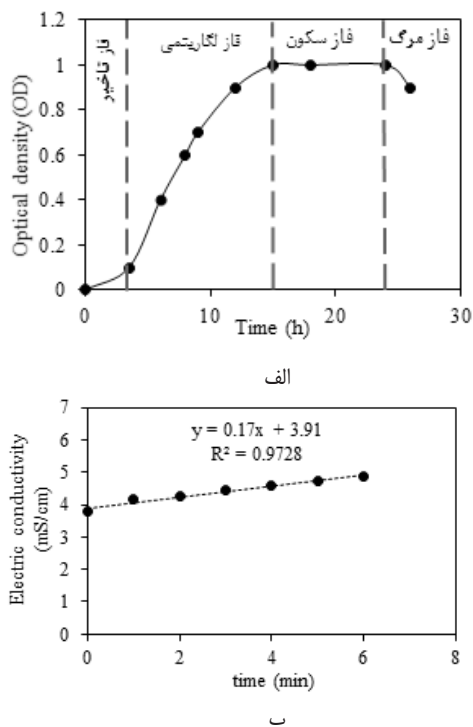
شکل دانه‌ها	کانی‌شناسی	کربنات کلسیم معادل CCE (%)	pH	هدایت الکتریکی EC ^۳ (μS/cm)	e _{min}	e _{max}	G _s	D ₁₀ (mm)	D ₅₀ (mm)	نوع خاک
تیز گوشه تا گرد گوشه	کوارتز	۱/۰۶	۵/۶	۴۵۵	۰/۵۶۵	۰/۸۶۸	۲/۶۷	۰/۱۶	۰/۲۳	ماسه یکنواخت

3 Electric Conductivity

4 Calcium Carbonate Equivalent

1 Surface Percolation

2 Microscopic characteristics



شکل ۲: الف) منحنی رشد ب) فعالیت اوره آزی باکتری اسپوروسارسینا پاستئوری (PTCC 1645)

Fig. 2. a) Growth curve b) Urease activity of *Sporosarcina pasteurii*

۲-۳- محلول سیمانی کننده

برای ساخت محلول سیمانی کننده با توجه به روابط تشکیل کربنات کلسیم رابطه ۱ و ۲، اوره و کلرید کلسیم با غلظت مولار یکسان استفاده گردید. در این بررسی این مقدار ۰/۳ مول بر لیتر انتخاب شده است.

۳- آماده سازی نمونه و تزریق

برای ساخت نمونه سست، ماسه به روش ریزش خشک با تراکم نسبی ۳۰٪ درون قالب‌های دو تکه به قطر ۵ و ارتفاع ۱۰ سانتیمتر ساخته شد. حجم فضای منفذی در این حالت حدود 100 cm^3 است. حجم فضای منفذی یا حجم حفرات با دانستن تراکم نسبی و مشخصات اولیه خاک محاسبه می‌شود و بیانگر حجم کل حفرات موجود در خاک است. روش تزریق در این مطالعه تزریق سطحی است به این ترتیب که حجم محلول مورد نظر در فضای خالی ایجاد شده در بالای نمونه خاک ریخته می‌شود تا محلول آزادانه به صورت ثقلی از خاک عبور کرده و خارج شود. زهکشی محلول از نمونه خاک تا وقتی ادامه دارد که حدود 0.5 cm محلول بالای خاک بماند در این وضعیت شیر پایین قالب بسته می‌شود تا از زهکشی بیشتر محلول از خاک جلوگیری شود. نرخ تزریق حدود ۳ لیتر در ساعت اندازه‌گیری شد. مراحل تزریق به شرح زیر انجام گردید:

۲-۲- میکروارگانیزم

باسیلوس‌ها با ترشح آنزیم اوره‌آز و شکستن اوره منجر به رسوب کربنات کلسیم در حضور یون کلسیم می‌شوند. این باکتری‌ها عموماً گرم مثبت، هوازی و میله‌ای شکل هستند [۲۰]. از این میان، باکتری اسپوروسارسینا پاستئوری‌ای^۱ (PTCC=۱۶۴۵) به علت فعالیت اوره‌آزی بالاتر و در نتیجه تشکیل سریع‌تر کربنات کلسیم، کاربرد بیشتری در مطالعات ژئوبیوتکنولوژی^۲ دارد [۲۱]. لذا این باکتری جهت ترشح آنزیم اوره‌آز در خاک که عامل واکنش به‌سازی زیستی است؛ از کلکسیون میکروارگانیزم‌های مرکز پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران خریداری گردید. ابتدا عصاره مخمر^۳ و کلرید آمونیوم^۴ (به ترتیب ۲۰ و ۱۰ گرم بر لیتر) به آب مقطر افزوده شده و پس از تنظیم مقدار pH=۹، محلول به دست آمده اتوکلاو^۵ شد. پس از کشت، محلول حاوی باکتری داخل انکوباتور شیکردار^۶ در دمای ۳۰ درجه و سرعت rpm ۱۷۰ قرار داده شد تا باکتری رشد داده شود. برای تعیین جمعیت و میزان رشد باکتری در محیط مایع از معیار چگالی نوری^۷ (OD) که توسط دستگاه اسپکتروفوتومتر^۸ در طول موج ۶۰۰ نانومتر اندازه‌گیری می‌شود، استفاده گردید. به‌طور کلی منحنی رشد باکتری‌ها که نشان‌دهنده تغییرات چگالی نوری با زمان است شامل چهار فاز تأخیری، لگاریتمی، سکون و مرگ هستند که در به‌سازی زیستی از باکتری‌ها در انتهای فاز لگاریتمی یا آغاز فاز سکون استفاده می‌گردد. شکل ۲-الف نشان‌دهنده منحنی رشد این باکتری است که پس از حدود ۱۵ ساعت، چگالی نوری به مقدار ماکزیمم خود یعنی حدود ۱ رسیده است. میزان فعالیت آنزیم اوره‌آز نیز با تغییرات هدایت الکتریکی ترکیب محلول باکتری و اوره با زمان اندازه‌گیری شد شکل ۲-ب. فعالیت باکتری مستقیماً بر نرخ رسوب‌گذاری، نوع و اندازه کریستال‌های رسوب و قدرت پیوندهای تشکیل شده اثرگذار است [۲۲]. وایفن^۹ فعالیت باکتری را ۲/۲ تا ۱۳/۳، هارکس^{۱۰} و همکاران ۵ تا ۲۰ و استاینکوو و همکاران نیز ۶/۲ تا ۸/۸ را در مطالعات خود گزارش کرده‌اند [۲۳-۲۵]. وایفن مقدار مناسب فعالیت اوره‌آزی برای دستیابی به مقاومت بالا را بین ۴/۴ تا ۹/۵ پیشنهاد کرده است [۲۳]. با توجه به شکل ۲-ب فعالیت این باکتری کمتر از mMurea/min ۲ است که نسبت به مقادیر مورد استفاده در مطالعات پیشین مقدار ناچیزی است. هرچه میزان فعالیت باکتری بالاتر باشد رسوب در مدت زمان کمتری تشکیل و امکان دستیابی به مقاومت بالاتر بیشتر خواهد شد.

- 1 *Sporosarcina pasteurii*
- 2 Geo-Biotechnology
- 3 Yeast Extract
- 4 Ammonium Chloride
- 5 Autoclave
- 6 Shaking Incubator
- 7 Optical Density
- 8 Spectrophotometer
- 9 Whiffin
- 10 Harkes

می‌تواند معیاری از وضعیت سختی کلی نمونه خاک به دست دهد. برای اندازه‌گیری مقدار سرعت موج برشی از المان‌های پندر^۳ که در سلول دستگاه سه محوری کار گذاشته شده است استفاده می‌گردد. یک موج سینوسی از پایین نمونه به داخل خاک فرستاده می‌شود که با محاسبه زمان رسیدن موج به بالای نمونه سرعت موج و تغییر آن در اثر بهسازی زیستی قابل اندازه‌گیری است.

۴-۲- آزمایش مقاومت تک‌محوری

برای بررسی میزان افزایش مقاومت حاصل از بهسازی زیستی از آزمایش تک‌محوری با نرخ بارگذاری ۱ mm/min استفاده گردید. نمونه‌های خاک به قطر ۵ سانتی‌متر و با نسبت ارتفاع به قطر ۱/۳، ۱/۶ و ۲ (جهت بررسی ناهمگنی مقاومت در عمق) مورد آزمایش قرار گرفتند. البته مقاومت تک محوری همه نمونه‌ها در برابر نسبت ارتفاع به قطر طبق رابطه ۳ اصلاح و گزارش گردید [۲۶].

$$\sigma_c = (1.15 \times \sigma_m) / (1 + 0.3 \times (D/L))$$

که D قطر و L ارتفاع نمونه، σ_m مقاومت تک محوری اندازه‌گیری شده و σ_c مقاومت تک محوری تصحیح شده می‌باشد.

۴-۳- آزمایش کشش غیر مستقیم (برزیلی)

آزمایش برزیلی روشی غیر مستقیم برای تعیین مقاومت کششی مصالح سیمانی شده است. در این آزمایش دیسکی نازک به صورت قطری تحت فشار قرار می‌گیرد که این فشار باعث ترک کششی در نمونه شده و مقاومت کششی محاسبه می‌گردد. در بررسی حاضر، نمونه‌ها در راستای طول خود بریده شده به طوری که نسبت قطر به ضخامت این نمونه‌های دیسکی بر اساس استاندارد ASTM حدود ۰/۵ تا ۰/۷۵ باشد سپس آزمایش برزیلی بر روی این نمونه‌ها انجام شده است.

۴-۴- آزمایش‌های XRD و عکس میکروسکوپی

برای اثبات تشکیل کربنات کلسیم در اثر بهسازی زیستی آزمایش XRD بر روی نمونه‌ها قبل و بعد از بهسازی صورت گرفت. برای تعیین شکل و موقعیت این رسوب و نحوه پیوند آن با دانه‌های خاک عکس‌هایی میکروسکوپی از مقطع نازک خاک سیمانی شده تهیه و حضور کربنات کلسیم در ساختار خاک مورد بررسی قرار گرفت.

۴-۵- میزان کربنات کلسیم

در این مطالعه میزان کربنات کلسیم تشکیل شده در اثر واکنش‌های بیوشیمیایی با روش اسید شویی^۴ اندازه‌گیری گردید. به این ترتیب که مقدار

۱- روز اول تزریق: محلول باکتری به اندازه حجم حفرت در قالب‌ها ریخته شد و پس از ۴ تا ۶ ساعت به محلول باکتری اجازه زهکشی داده شد این زمان جهت تثبیت و اتصال بیشتر باکتری‌ها به دانه‌های خاک است. سپس به همین مقدار محلول سیمانی کننده اضافه گردید و ۲۴ ساعت اجازه واکنش به باکتری و محلول در خاک برای تشکیل کربنات کلسیم داده شد.

۲- در روزهای بعد به اندازه نصف حجم حفرت، باکتری به خاک اضافه شد و پس از ۴ تا ۶ ساعت به همین اندازه محلول سیمانی کننده اضافه گردید. ۲۴ ساعت نیز زمان برای واکنش محلول‌ها در خاک در نظر گرفته شد تا تزریق بعدی پس از این زمان صورت پذیرد. در کل هفت مرحله تزریق در این مطالعه انجام گردید.

۲۴ ساعت بعد از آخرین تزریق، نمونه‌ها از قالب‌ها خارج شدند تا آزمایش‌های مورد نظر بر روی آن‌ها صورت پذیرد.

لازم به توضیح است که نحوه تزریق در تحقیقات مربوط به بهسازی زیستی مشابه هم هستند. در کار مشابه که توسط چنگ^۱ و همکاران انجام شده است حجم‌های مساوی محلول باکتری و سیمانی کننده به خاک وارد شده است به طوری که با توجه به درجه اشباع مورد نظر مجموع این حجم‌ها نسبتی با حجم حفرت خاک داشته باشد [۱۷]. در این مطالعه مجموع محلول تزریقی در هر مرحله برابر حجم حفرت است بعلاوه در تحقیقات دی یونگ^۲ و همکاران همواره زمانی برای اتصال باکتری به خاک در نظر گرفته می‌شود [۴] که در این مطالعه این زمان ۴-۶ ساعت انتخاب شده است. همچنین در تحقیقات چنگ و همکاران ۱۲ ساعت زمان نگهداری در تمامی مراحل در نظر گرفته شده است که در این مطالعه جهت اطمینان از اتمام فعالیت‌های بیوشیمیایی، این زمان ۲۴ ساعت در نظر گرفته شده است. معمولاً در کارهای مشابه پس از رسیدن سرعت موج برشی نمونه به مقدار مورد نظر و یا اتمام تعداد دفعات تزریق، نمونه برای آزمایش آماده می‌شود. افزایش مقاومت با زمان نگهداری بیشتر در آزمایشگاه مربوط به فعالیت بیوشیمیایی نیست بلکه در اثر خشک شدن و ... کسب مقاومت صورت می‌گیرد نه ادامه واکنش‌های زیستی.

۴-۴- آزمایش‌های انجام شده

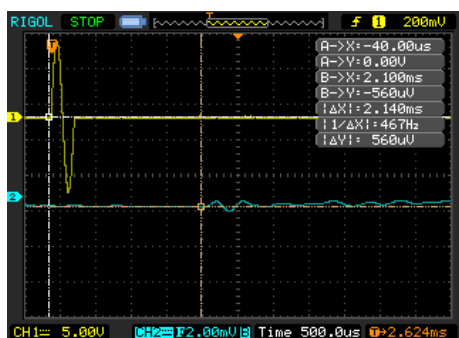
برای بررسی تاثیر تزریق و راندمان آن آزمایش‌های زیر بر روی نمونه‌ها انجام گردید:

۴-۱- آزمایش تعیین سرعت موج برشی

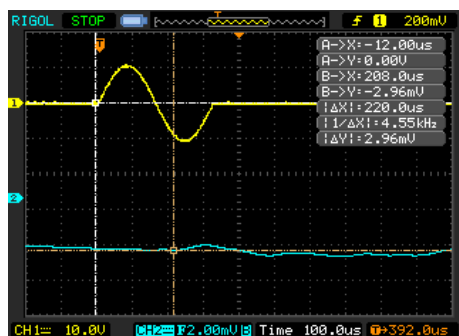
روند سیمانی شدن و پیوند دانه به دانه، خصوصیات مهندسی خاک را اصلاح و تقویت می‌کند که یکی از آزمایش‌ها برای مشاهده مقدار اصلاح، اندازه‌گیری موج برشی قبل و بعد از بهسازی قابل است. این روش غیرمخرب

3 Bender element
4 Acid washing

1 Cheng
2 DeJong



الف



ب

شکل ۳: (الف) پاسخ نمونه ماسه قبل از بهسازی و (ب) بعد از بهسازی، محور ۱ موج ورودی و محور ۲ موج پاسخ می‌باشد

Fig. 3. Measurement of shear wave velocity: (a) Sand sample before treatment and (b) Biocemented sand sample, lines 1 and 2 correspond to input and output signal, respectively

۵-۲- مقاومت تک‌محوری

نتایج آزمایش تک‌محوری با نسبت ارتفاع به قطر مختلف پس از تصحیح، در جدول ۲ آورده شده است. این آزمایش‌ها بر روی نمونه‌های مشابه تکرار شدند تا بتوان نتایج متوسطی برای افزایش مقاومت به این روش ارائه داد. همان‌طور که پیداست نمونه‌هایی که نسبت ارتفاع به قطر آنها کمتر است مقاومت قابل توجهی دارند. افزایش بیشتر مقاومت در این نمونه‌ها می‌تواند به علت واکنش بیشتر باکتری در نزدیکی محل تزریق و در نتیجه رسوب بیشتر کربنات کلسیم و پیوندهای بیشتر یا قوی‌تر در این ناحیه باشد. در واقع هر چه به سطح نمونه یا محل تزریق نزدیک‌تر می‌شویم مقاومت بیشتری دیده شود. کاهش میزان کربنات کلسیم یا ضعف پیوندها با دور شدن از نقطه تزریق می‌تواند علت اصلی کاهش مقاومت نمونه‌های تک‌محوری با افزایش نسبت ارتفاع به قطر باشد. کاهش مقدار کربنات کلسیم و مقاومت با دور شدن از نقطه تزریق در نتایج مطالعات دیگران نیز گزارش شده است [۳۰ و ۵].

نوع شکست نمونه نیز ناهمگنی سیمانی شدن در ارتفاع را تأیید می‌کند. نمونه‌های با ارتفاع بیشتر طی آزمایش تک‌محوری دچار شکست از قسمت

مشخصی از ماسه خشک بهسازی شده توسط اسیدکلریدریک ۳ نرمال و سپس توسط آب مقطر شستشو شده و در کوره قرار داده شد تا تفاوت وزن قبل و بعد از اسیدشویی مشخص گردد. این روش نیز مانند سایر روش‌های تعیین میزان کربنات کلسیم در خاک با خطا همراه است و میزان کربنات کلسیم معادل را به دست می‌دهد. برای کاهش میزان خطا نمونه‌های مختلفی از قسمت‌های مختلف خاک تهیه گردید تا بتوان میزان متوسطی را به عنوان مقدار کربنات کلسیم پیشنهاد نمود.

۵- نتایج و بحث

در ادامه نتایج آزمایش‌های مذکور در بند ۴ ارائه می‌گردد.

۵-۱- سرعت موج‌برشی

به‌عنوان اولین آزمایش بعد از اتمام تزریق‌های بیولوژیکی، سرعت موج‌برشی قبل و بعد از بهسازی مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۳-الف و ب به ترتیب پاسخ نمونه ماسه را قبل و بعد از بهسازی نشان می‌دهد. موج ورودی در نمونه ماسه سست پس از ۲/۱۴ ms و در نمونه سیمانی شده پس از ۰/۲۲ ms توسط گیرنده دریافت شده است با توجه به طول ۱۰ سانتیمتری نمونه‌های مورد نظر، سرعت موج‌برشی از ۴۶/۷۳ m/s قبل از بهسازی و به ۴۵۴/۵ m/s بعد از بهسازی تغییر یافته است.

عموماً خاک‌های سست دارای موج‌برشی ۱۰۰-۱۵۰ m/s می‌باشند که این مقدار کاملاً به سطح تنش وابسته است [۲۷]. در آزمایش حاضر به علت تزریق سطحی، نمونه‌ها بدون تنش همه‌جانبه مورد بررسی قرار گرفتند تا شرایط نزدیک به سطح زمین واقعی‌سازی گردد. لذا سرعت موج برشی کمتر در ماسه سست نسبت به مقدار پیشنهادی، طبیعی به نظر می‌رسد. در اثر بهسازی زیستی این مقدار حدوداً ده برابر شده است که مطابق استاندارد NEHRP این خاک پس از بهسازی در زمره خاک‌های خیلی متراکم یا سنگ‌های نرم قرار می‌گیرد. بر اساس مقادیر سرعت موج برشی مونتویا و ون^۲ پاسن (۲۰۱۵) که یک طبقه‌بندی کیفی از میزان سیمانی شدن زیستی ارائه کردند، نمونه بهسازی شده در این مطالعه در محدوده ضعیف تا متوسط قرار می‌گیرد [۲۸]. البته به علت طبیعت ناهمگن واکنش‌های رخ داده در نمونه خاک و در نتیجه ناهمگنی توزیع کربنات کلسیم و ناهمگنی پیوندها در نمونه، مقدار سرعت موج برشی می‌تواند در نمونه‌های مختلف مقادیر متفاوتی داشته باشد اما به‌طور کلی افزایش سرعت موج برشی مؤید افزایش مقاومت خاک است [۸ و ۲۹].

به‌طور کلی با افزایش سرعت موج برشی مقاومت برشی نیز افزایش می‌یابد. یکی از روابط ارائه شده برای ارتباط میان مقاومت فشاری تک‌محوری و سرعت موج برشی عبارتست از:

$$UCS(kPa) = 8.32 * e^{-10} * V_s^{4.2}$$

1 National Earthquake Hazard Reduction Program
2 Montoya and DeJong

که با تزریق سطحی می‌توان تا عمق مناسبی دانه‌های ماسه را به هم چسباند و به صورت یکپارچه درآورد. این افزایش مقاومت نه تنها از نقطه نظر مهندسی مناسب است بلکه این روش زیستی توانسته است ماسه را از حالت روان به حالت تثبیت شده درآورد. یکی از روش‌های تثبیت سطحی ماسه استفاده از مالچ نفتی یا پلیمری برای تشکیل پوسته‌ای مقاوم در سطح زمین است که گران و غیر زیست‌محیطی است. لذا با توجه به عمق مناسب تثبیت در این مطالعه، این روش را می‌توان به عنوان روشی کارآمد برای پیشگیری از فرسایش خاک پیشنهاد کرد. از آنجا که با این روش تزریق، عمقی از خاک سخت شده و در آزمایش تک محوری نیز مقاومت مناسبی در همان عمق مشاهده شده است لذا کاهش فرسایش خاک و کاهش گرد و غبار و ... نیز با این روش قابل استنباط است.

انتهایی نمونه شده‌اند و سطح گسیختگی در این نمونه‌ها مشخص نیست. این بدان معناست که نمونه به سازی شده در قسمت انتهایی خود مقاومت کمتری دارد. اما نمونه‌های با ارتفاع کم دچار ترک کششی قائم در ارتفاع خود شده‌اند و سطح گسیختگی کاملاً در این نمونه‌ها واضح است. تفاوت نوع شکست در نمونه‌های سیمانی شده ضعیف و قوی که با این روش به سازی شده‌اند قبلاً توسط محققین دیگر نیز گزارش شده است [۱۷ و ۳۱]. به عنوان مثال شکل ۴-الف منحنی تنش- کرنش یک نمونه با نسبت ارتفاع به قطر $1/3$ و شکل ۴-ب نمونه مورد نظر را پس از شکست نشان می‌دهد.

در واقع نتایج نشان می‌دهد که به سازی زیستی به روش تزریق سطحی توانسته است یک ستون ماسه‌ای به عمق ۱۰ سانتیمتر ایجاد کند که حدود $6/5$ سانتیمتر آن دارای مقاومت بسیار خوبی می‌باشد. این امر مبین آن است

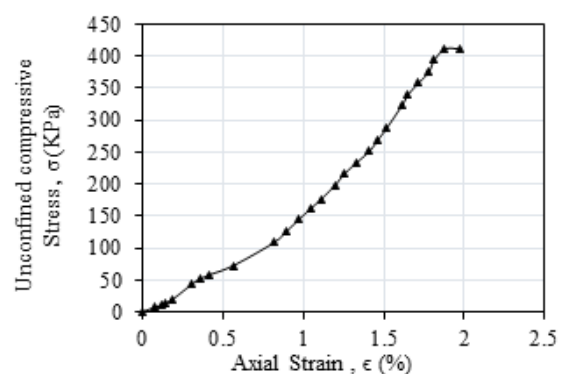
جدول ۲: مقاومت تک محوری متوسط کرنش ماکزیمم و نوع گسیختگی ماسه به سازی شده به روش زیستی برای نسبت ارتفاع به قطر متغیر

Table 2. Unconfined compressive strength, average maximum strain and type of shear failure of biocemented sand for various height to diameter ratio

نسبت ارتفاع به قطر (kPa)	سری اول (kPa)	سری دوم (kPa)	مقدار متوسط مقاومت	متوسط کرنش ماکزیمم	نوع گسیختگی
۱/۳	۳۸۵/۰۶	۲۶۳/۸۷	۳۲۴/۴۷	۱/۷۷	ترک قائم
۱/۶	۱۰۸/۸۵	۵۴/۲۳	۸۱/۵۴	۱/۱	ترک در انتهایی نمونه
۲	۲۶	۱۰	۱۸	۰/۴	ترک در انتهایی نمونه



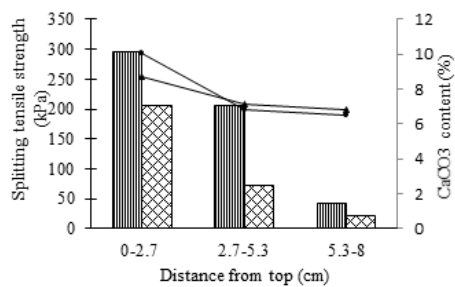
ب



الف

شکل ۴: الف) نتیجه آزمایش مقاومت تک محوری نمونه سیمانی شده با نسبت ارتفاع به قطر $1/3$ ، ب) نمونه مورد نظر پس از شکست

Fig. 4. Unconfined compressive strength of biocemented sample with height to diameter ratio of 1/3 b) the same sample after failure



الف



ب

شکل ۵: الف) نتایج آزمایش کشش برزیلی در مقابل فاصله از سطح نمونه؛ (▲) و (●) به ترتیب درصد کربنات کلسیم نمونه اول (■) و نمونه دوم (⊞)، (دو نمونه در این آزمایش به قطعات تقسیم شدند تا آزمایش برزیلی انجام شود منظور از سری یعنی دو نمونه که بریده شده است) ب) شکست نمونه ماسه سیمانی شده تحت آزمایش برزیلی

Fig. 5. Splitting tensile strength and calcium carbonate content at the different depth from the sand surface, (▲) and (●) correspond to calcium carbonate content of sample (■) and sample (⊞), respectively. Failure mode of biocemented sand

مقاومت خاک بهسازی شده به این روش کاملاً به نحوه توزیع کلسیت در خاک یا همگنی آن و نیز به پیوندهای ایجاد شده توسط کلسیت بین دانه‌های ماسه بستگی دارد. رسوب کلسیت می‌تواند به سه شکل در ساختار خاک وجود داشته باشد: ۱- فقط حفرات را پر کند ۲- به صورت پوششی دور دانه‌ها را فراگیرد ۳- در نقاط تماس دانه‌ها تجمع کرده و موجب اتصال دانه‌ها به یکدیگر شود. در حالت کلی رسوب کلسیت به صورت ترکیبی از این سه حالت در خاک تشکیل می‌شود اما از نقطه نظر مهندسی حالت ایده آل، تشکیل پیوند بین دانه‌ها است که موجب افزایش مقاومت می‌گردد [۱]. با تهیه مقطع نازک از ماسه سیمانی شده و تهیه عکس میکروسکوپی، قسمت عمده رسوب تشکیل شده در این مطالعه به صورت پوششی دور دانه‌ها و در داخل حفرات است و نتوانسته است اتصال چندانی بین دانه‌های ماسه ایجاد کند به این ترتیب دلیل مقاومت کمتر خاک سیمانی شده در این مطالعه نسبت به مطالعات پیشین، عدم ایجاد اتصال کافی بین دانه‌های ماسه است. به عنوان مثال ون پاسن و همکاران (۲۰۰۹) افزایش مقاومت تک‌محوری تا ۱۲ مگا پاسکال را در مطالعات خود گزارش کرده‌اند [۳۱]. لازم به ذکر است

۵-۳- مقاومت کششی (برزیلی)

علاوه بر نتایج آزمایش تک‌محوری، آزمایش برزیلی که بر روی نمونه‌های دیسکی حاصل از بریدن نمونه تزریق شده اصلی نیز روند کاهش مقاومت با دور شدن از نقطه تزریق را تأیید می‌کند. شکل ۵-الف نتایج آزمایش برزیلی را در مقابل فاصله از بالای نمونه و نیز میزان متوسط کربنات کلسیم هر نمونه دیسکی را برای دو سری آزمایش نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۵ در هر دو نمونه با فاصله گرفتن از نقطه تزریق همراه با کاهش میزان کلسیت، مقاومت کششی نیز کاهش یافته است. با مقایسه بخش اول هر دو نمونه می‌توان مشاهده کرد که با وجود تشکیل کربنات کلسیم بیشتر در نمونه دوم میزان مقاومت کششی در این نمونه کمتر است. در قسمت دوم نمونه‌ها نیز با وجود نزدیک بودن میزان کربنات کلسیم رسوب یافته، تفاوت زیادی در مقاومت مشاهده می‌شود. بنابراین میزان کربنات کلسیم تشکیل شده به‌تنهایی نمی‌تواند معیاری برای تعیین میزان مقاومت باشد بلکه محل تشکیل رسوب و میزان پیوندهای برقرار شده نیز بر مقاومت حاصل از تثبیت زیستی اثرگذار است. شکل ۵-ب یکی از نمونه‌های دیسکی را پس از شکست تحت کشش نشان می‌دهد. ون پاسن^۱ و همکاران (۲۰۰۹) و چنگ و همکاران (۲۰۱۴) نیز در مطالعات خود دریافتند که مقدار رسوب کربنات کلسیم به‌تنهایی نشان‌دهنده افزایش مقاومت نیست بلکه تراکم اولیه و شرایط محیطی چون دما و pH نیز بر میزان مقاومت اثرگذار هستند [۱۸ و ۳۲].

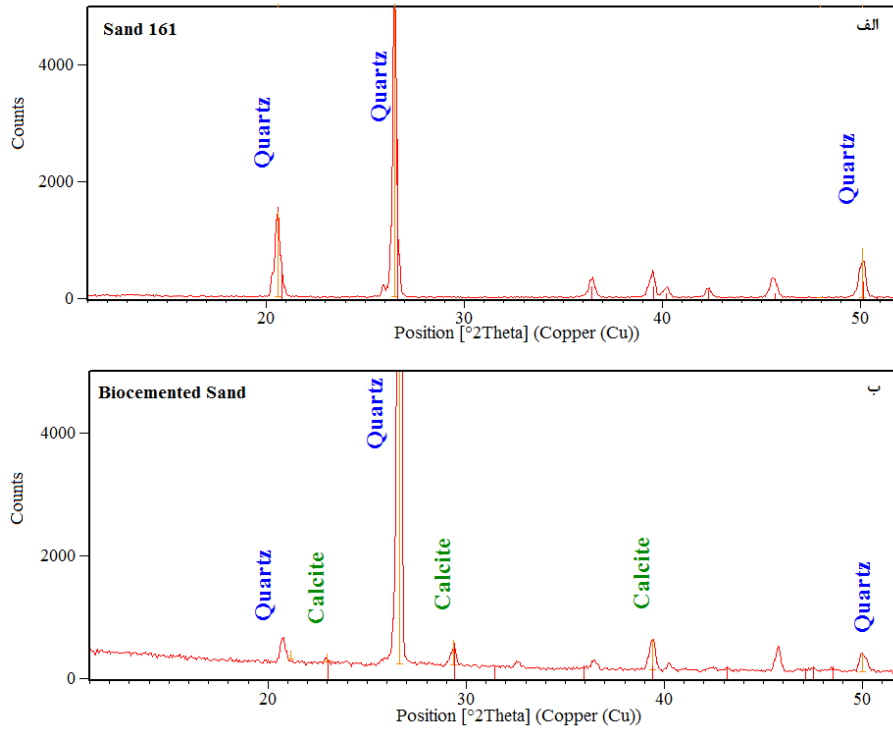
۵-۴- آزمایش‌های XRD و عکس میکروسکوپی

نتایج آزمایش XRD مربوط به ماسه قبل و بعد از بهسازی در شکل ۶ نمایش داده شده است. پس از شکست نمونه در آزمایش مقاومتی، قطعه کوچکی از نمونه بهسازی شده جدا شد و داخل پلاستیک قرار گرفت تا بدون تغییر در درجه رطوبت و در نتیجه بدون تغییرات بیوشیمیایی تحت آزمایش XRD قرار گیرد. در مورد ماسه تمیز نیز از نمونه خشک اولیه در این آزمایش استفاده شده است. ماسه سیلیسی از لحاظ کانی‌شناسی حاوی مقادیر بالایی از کوارتز یا سیلیس می‌باشد که این امر در شکل ۶-الف تأیید شده است. رسوب کربنات کلسیم دارای چند پلی‌مورف^۲ یا ریخت متفاوت به نام‌های کلسیت^۳، وتریت^۴ و آراگونیت^۵ می‌باشد که از این میان کلسیت، پلیمرف پایدارتر و مقاوم‌تری است. با توجه به شکل ۶ پس از بهسازی در کنار حضور کوارتز در ماسه، پلی‌مورف کلسیت نیز در نمونه شناسایی شده است. به این ترتیب فاز اصلی رسوب تشکیل شده کلسیت می‌باشد که تشکیل کربنات کلسیم به شکل کلسیت توسط سایر محققین نیز تأیید شده است [۳۳-۳۵].

- 1 Van Paassen
- 2 Polymorph
- 3 Calcite
- 4 Vaterite
- 5 Aragonite

بندی یکنواخت بوده و نمونه کاملا در حالت سست ساخته شده است. شکل ۷-الف جانمایی کلی رسوب در روند بهسازی زیستی در ماسه و شکل ۷-ب عکس از مقطع نازک خاک بهسازی شده را نشان می‌دهد.

که نحوه توزیع اندازه دانه‌ها (منحنی دانه‌بندی) و تراکم اولیه نمونه از عوامل اصلی مقاومت خاک تزریق شده و تعیین کننده حالات سه گانه مذکور رسوب کلسیت در خاک می‌باشد و خاک تزریق شده در این تحقیق دارای یک دانه



شکل ۶: نتایج آزمایش XRD ماسه ۱۶۱، الف) قبل از بهسازی ب) بعد از بهسازی زیستی

Fig. 6. The XRD graphs for a) untreated sand (No. 161), b) biotreated sand

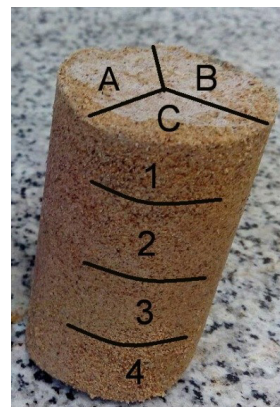


شکل ۷: الف) جانمایی کلی رسوب کلسیت در بهسازی زیستی، ب) عکس میکروسکوپی مقطع نازک خاک بهسازی شده

Fig. 7. a) Distribution types of calcium carbonate content within pore space in biotreatment method, b) Thin section of biocemented sand examined by light microscope

۵-۵- میزان کربنات کلسیم

به منظور بررسی نحوه پراکندگی کلسیت در نمونه با نمونه‌گیری از خاک سیمانی شده در راستای افق و ارتفاع میزان کلسیت نمونه‌ها تعیین گردید. جدول ۴ متوسط مقادیر کربنات کلسیم را در قسمت‌های مختلف یک نمونه شکل ۸ را نشان می‌دهد. با توجه به جدول پراکندگی مقادیر در راستای ارتفاع بسیار قابل توجه است اما می‌توان نمونه‌ها را در راستای افق تقریباً همگن در نظر گرفت. میزان کربنات کلسیم به روش اسیدشویی برای نمونه‌ها پراکندگی نشان می‌دهد که این پراکندگی علاوه بر خطاهای موجود در آزمایش به ساختار خاص این روش نیز باز می‌گردد. در واقع دستیابی به توزیع همگن کربنات کلسیم و در نتیجه همگنی نمونه در این روش به‌سازی مشکل است. گین^۱ و همکاران (۲۰۰۲) فیلتر شدن باکتری توسط دانه‌های ماسه و در نتیجه کاهش غلظت آن با فاصله گرفتن از نقطه تزریق را علت این مساله بیان کرده‌اند [۳۶]. اتصال باکتری به ماسه به عوامل مختلف فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی بستگی دارد. در روش بهسازی زیستی پراکندگی در مقادیر کربنات کلسیم هم در راستای ارتفاع و هم در راستای افق وجود دارد.



شکل ۸: ناحیه بندی نمونه سیمانی شده جهت تعیین پراکندگی مقدار کربنات کلسیم

Fig. 8. Sections which samples are taken from to evaluate heterogeneity of calcium carbonate content of all samples

جدول ۳: متوسط مقادیر کربنات کلسیم در نمونه شکل ۸

Table 3. Average calcium carbonate content in sections of fig. 8

	(%) A	(%) B	(%) C
۱	۱۲/۶	۱۰/۸	۱۰/۶
۲	۸/۳	۷/۳	۷/۴
۳	۶/۸	۵/۸	۵/۹
۴	۴/۴	۳/۲	۳

1 Ginn

نتیجه‌گیری

بررسی‌های آزمایشگاهی صورت گرفته در این مطالعه نشان داد که به‌سازی زیستی ماسه به روش تزریق سطحی امکان‌پذیر است. در مصالح متخلخل با نفوذپذیری مناسب، این روش بدون تشکیل لایه نفوذناپذیر در سطح می‌تواند منجر به تثبیت خاک تا عمق مناسبی گردد. نتایج آزمایش نشان می‌دهد که:

۱. افزایش سرعت موج برشی بعد از بهسازی مؤید افزایش متوسط سختی در نمونه در اثر واکنش‌های زیستی است.
۲. آزمایش‌های تک‌محوری و برزبلی افزایش مقاومت در ماسه را نشان داد که این افزایش با فاصله گرفتن از نقطه تزریق کاهش می‌یابد.
۳. تشکیل مقادیر بالای کربنات کلسیم لزوماً منجر به مقاومت بالاتر نمی‌گردد بلکه عوامل دیگری چون محل تشکیل رسوب و کیفیت پیوندهای ایجادشده بین دانه‌های ماسه از اهمیت به‌سزایی برخوردار است.
۴. یکی از معضلات اصلی در کاربرد این روش عدم دستیابی به همگنی کربنات کلسیم و مقاومت در نمونه است که در این مطالعه این ناهمگنی در نمونه‌ها مشاهده گردید. ناهمگنی توزیع رسوب در راستای ارتفاع نمونه از راستای افق بیشتر است.
۵. نتایج آزمایش XRD وجود کلسیت در نمونه‌ها را تأیید و عکس مقطع نازک نیز تشکیل قسمت عمده رسوب به‌صورت پوششی دور نمونه‌ها را نشان داد و مقاومت نسبتاً پایین نمونه‌ها با وجود میزان کلسیت بالا، به تعداد پیوند پایین و یکنواختی دانه بندی خاک و سست بودن نمونه نسبت داده می‌شود.

مراجع

- [1] J.T. DeJong, B.M. Mortensen, B.C. Martinez, D.C. Nelson, Bio-mediated soil improvement, *Ecological Engineering*, 36(2) (2010) 197-210.
- [2] N.W. Soon, L.M. Lee, T.C. Khun, H.S. Ling, Factors affecting improvement in engineering properties of residual soil through microbial-induced calcite precipitation, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 140(5) (2014) 04014006.
- [3] R.H. Karol, *Chemical grouting and soil stabilization*, revised and expanded, Crc Press, 2003.
- [4] J.T. DeJong, M.B. Fritzges, K. Nüsslein, Microbially induced cementation to control sand response to undrained shear, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132(11) (2006) 1381-1392.
- [5] V.S. Whiffin, L.A. van Paassen, M.P. Harkes, Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique, *Geomicrobiology Journal*, 24(5) (2007) 417-423.

- [18] L. Van Paassen, M. Harkes, G. Van Zwieten, W. Van der Zon, W. Van der Star, M. Van Loosdrecht, Scale up of BioGrout: a biological ground reinforcement method, in: Proceedings of the 17th international conference on soil mechanics and geotechnical engineering, Lansdale IOS Press, 2009, pp. 2328-2333.
- [19] J.K. Mitchell, J.C. Santamarina, Biological considerations in geotechnical engineering, *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 131(10) (2005) 1222-1233.
- [20] T. Zhu, M. Dittrich, Carbonate precipitation through microbial activities in natural environment, and their potential in biotechnology: a review, *Frontiers in bioengineering and biotechnology*, 4 (2016).
- [21] B. Mortensen, M. Haber, J. DeJong, L. Caslake, D. Nelson, Effects of environmental factors on microbial induced calcium carbonate precipitation, *Journal of applied microbiology*, 111(2) (2011) 338-349.
- [22] M. Ismail, H. Joer, M. Randolph, A. Meritt, Cementation of porous materials using calcite, *Geotechnique*, 52(5) (2002) 313-324.
- [23] V.S. Whiffin, *Microbial CaCO₃ precipitation for the production of biocement*, Murdoch University, 2004.
- [24] M.P. Harkes, L.A. Van Paassen, J.L. Booster, V.S. Whiffin, M.C. van Loosdrecht, Fixation and distribution of bacterial activity in sand to induce carbonate precipitation for ground reinforcement, *Ecological Engineering*, 36(2) (2010) 112-117.
- [25] V. Stabnikov, C. Jian, V. Ivanov, Y. Li, Halotolerant, alkaliphilic urease-producing bacteria from different climate zones and their application for biocementation of sand, *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 29(8) (2013) 1453-1460.
- [26] N. Turk, W. Dearman, A correction equation on the influence of length-to diameter ratio on the uniaxial compressive strength of rocks, *Engineering geology*, 22(3) (1986) 293-300.
- [27] Y. Duraisamy, *Strength And Stiffness Improvement Of Bio-Cemented Sydney Sand*, (2016).
- [28] B. Montoya, J. DeJong, Stress-strain behavior of sands cemented by microbially induced calcite precipitation, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 141(6) (2015) 04015019.
- [29] A.A. Qabany, B. Mortensen, B. Martinez, K. Soga, J. DeJong, Microbial carbonate precipitation: correlation of S-wave velocity with calcite precipitation, in: *Geo-Frontiers 2011: Advances in Geotechnical Engineering*, 2011, pp. 3993-4001.
- [6] L.A. van Paassen, R. Ghose, T.J. van der Linden, W.R. van der Star, M.C. van Loosdrecht, Quantifying biomediated ground improvement by ureolysis: large-scale biogrout experiment, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 136(12) (2010) 1721-1728.
- [7] V. Ivanov, J. Chu, Applications of microorganisms to geotechnical engineering for bioclogging and biocementation of soil in situ, *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 7(2) (2008) 139-153.
- [8] Y. Inagaki, M. Tsukamoto, H. Mori, S. Nakajiman, T. Sasaki, S. Kawasaki, A centrifugal model test of microbial carbonate precipitation as liquefaction countermeasure, *Jiban Kogaku Janaru*, 6(2) (2011) 157-167.
- [9] B. Montoya, J. DeJong, R. Boulanger, Dynamic response of liquefiable sand improved by microbial-induced calcite precipitation, *Géotechnique*, 63(4) (2013) 302.
- [10] S.C. Bang, S.S. Bang, KGS Awards Lectures: application of microbiologically induced soil stabilization technique for dust suppression, *International Journal of Geo-Engineering*, 3(2) (2011) 27-37.
- [11] S.K. Ramachandran, V. Ramakrishnan, S.S. Bang, Remediation of concrete using micro-organisms, *ACI Materials Journal-American Concrete Institute*, 98(1) (2001) 3-9.
- [12] S. Bang, J. Lippert, U. Yerra, S. Mulukutla, V. Ramakrishnan, Microbial calcite, a bio-based smart nanomaterial in concrete remediation, *International Journal of Smart and Nano Materials*, 1(1) (2010) 28-39.
- [13] V. Achal, X. Pan, N. Özyurt, Improved strength and durability of fly ash-amended concrete by microbial calcite precipitation, *Ecological Engineering*, 37(4) (2011) 554-559.
- [14] W. De Muynck, D. Debrouwer, N. De Belie, W. Verstraete, Bacterial carbonate precipitation improves the durability of cementitious materials, *Cement and concrete Research*, 38(7) (2008) 1005-1014.
- [15] P. Suer, N. Hallberg, C. Carlsson, D. Bendz, G. Holm, Biogrouting compared to jet grouting: environmental (LCA) and economical assessment, *Journal of Environmental Science and Health Part A*, 44(4) (2009) 346-353.
- [16] S. Stocks-Fischer, J.K. Galinat, S.S. Bang, Microbiological precipitation of CaCO₃, *Soil Biology and Biochemistry*, 31(11) (1999) 1563-1571.
- [17] L. Cheng, R. Cord-Ruwisch, M.A. Shahin, Cementation of sand soil by microbially induced calcite precipitation at various degrees of saturation, *Canadian Geotechnical Journal*, 50(1) (2013) 81-90.

- [33] S.M. Al-Thawadi, Consolidation of sand particles by aggregates of calcite nanoparticles synthesized by ureolytic bacteria under non-sterile conditions, *J Chem Sci Technol*, 2(3) (2013) 141-146.
- [34] E. Boquet, A. Boronat, A. Ramos-Cormenzana, Production of calcite (calcium carbonate) crystals by soil bacteria is a general phenomenon, *Nature*, 246(5434) (1973) 527-529.
- [35] H. Yasuhara, D. Neupane, K. Hayashi, M. Okamura, Experiments and predictions of physical properties of sand cemented by enzymatically-induced carbonate precipitation, *Soils and Foundations*, 52(3) (2012) 539-549.
- [36] T.R. Ginn, B.D. Wood, K.E. Nelson, T.D. Scheibe, E.M. Murphy, T.P. Clement, Processes in microbial transport in the natural subsurface, *Advances in Water Resources*, 25(8) (2002) 1017-1042.
- [30] T. Barkouki, B. Martinez, B. Mortensen, T. Weathers, J. De Jong, T. Ginn, N. Spycher, R. Smith, Y. Fujita, Forward and inverse bio-geochemical modeling of microbially induced calcite precipitation in half-meter column experiments, *Transport in Porous Media*, 90(1) (2011) 23-39.
- [31] L.A. van Paassen, M. van Loosdrecht, M. Pieron, A. Mulder, D. Ngan-Tillard, T. Van der Linden, Strength and deformation of biologically cemented sandstone, in: *ISRM Regional Symposium-EUROCK 2009*, International Society for Rock Mechanics, 2009.
- [32] L. Cheng, M. Shahin, R. Cord-Ruwisch, M. Addis, T. Hartanto, C. Elms, Soil stabilisation by Microbial-Induced Calcite Precipitation (MICP): Investigation into some physical and environmental aspects, in: *7th International Congress on Environmental Geotechnics: iceg2014*, Engineers Australia, 2014, pp. 1105.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

A. Karimian, M. Hassanlourad, Gh. Karimi, Bio-stabilization of Sand by surface percolation, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 50(4) (2018) 735-746.

DOI: 10.22060/ceej.2017.13078.5324



