سازمان حفاظت محیط زیست

فصلنامه علمی محیط زیست شماره ۵۲ / سال ۱۳۹۱

رسوب‌گذاری زیستی کربنات کلسیم در خاک‌های ماسه‌ای و تاثیر آن بر افزایش مقاومت خاک

مصطفی کاهانی

دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک خاک و پی، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوس

فرزین کلانتری

استادیار دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

رویا بزاز زاده

کارشناس ارشد میکروبیولوژی و مدرس دانشگاه محیط زیست کرج

بهروز میرزایی

دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک خاک و پی، دانشگاه گیلان

تاریخ دریافت:۹۱/۳/۳ تاریخ پذیرش:۹۱/۵/۱۰

چکیده

مقاوم‌سازی زیستی خاک یکی از روش‌های در حال توسعه برای به‌سازی خاک است که اساس این فرآیند بر پایه تولید میکروبی رسوب کربنات کلسیم می‌باشد. در این روش اوره توسط آنزیم اوره‌آز ترشح شده از باکتری، هیدرولیز شده و کربنات کلسیم در حضور یون کلسیم تشکیل می‌شود. در این مطالعه پس از بررسی باکتری‌های دارای پتانسیل به‌سازی خاک و انتخاب باکتری مناسب، تغییر میزان مقاومت قابل دستیابی و میزان مواد مصرفی مورد ارزیابی قرار گرفت. روند مقاومت‌گیری خاک نیز در طول زمان با استفاده از این روش در یک سری ستون‌های آزمایشگاهی بررسی و تأثیر دانه‌بندی خاک نیز بر روند به‌سازی به طور جداگانه مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین با استفاده از یک باکتری بومی روند سمانتاسیون آزمایش شد. نتایج بیانگر این است که حداکثر ۲۸ روز زمان برای رسیدن به مقاومت نهایی نیاز می‌باشد و دانه بندی خاک در توزیع باکتری، گیر افتادن آن و نحوه‌ی تزریق مواد تأثیر به سزایی دارد. حداکثر مقاومت به‌دست آمده در این مطالعه حدود ۸۰۰ kPa می‌باشد، این مقدار با استفاده از باکتری بومی جداسازی شده حدود ۶۰۰ kPa می‌باشد. این مطلب بیانگر این است که باکتری‌های مختلفی در خاک وجود دارند که پتانسیل به‌سازی زیستی را داشته و می‌توانند متناسب با کاربردهای مختلف مورد استفاده قرار گیرند .

واژه‌های کلیدی: سمانتاسیون زیستی، اوره، کربنات کلسیم ، دانه‌بندی خاک، باکتری بومی، مقاومت تک محوری، نفوذپذیری

مقدمه

زیست فنآوری زمینی[1] یکی از شاخه‌های جدید مهندسی ژئوتکنیک بر اساس استفاده از روش‌های زیستی در مسائل مهندسی ژئوتکنیک می‌باشد که تا به حال، محدود به کاربرد درختان یا گیاهان پوششی برای کنترل فرسایش خاک، حفاظت شیب، جلوگیری از گسیختگی شیب و کاهش تراوش آب به داخل شیب بوده است. با توجه به پتانسیل‌های میکروارگانیسم‌ها در ژئوتکنیک عمده کاربردهای آن بر انسداد زیستی[2] پاکسازی زیستی[3] و سیمانی شدن زیستی[4] تمرکز دارد. در پروژه‌هایی که نیاز به افزایش مقاومت و ظرفیت باربری زمین می‌باشد با توجه به شرایط حاکم از روش‌های مختلفی مانند اجرای پی‌های عمیق، مسلح کننده‌ها و یا مواد افزودنی و ... برای تقویت زمین استفاده می‌شود. با توجه به افزایش روزافزون پروژه-های عمرانی، نیاز به کاهش معایب و یا ایجاد روش‌های سازگارتر با محیط زیست است که بتوان با هزینه‌ی پایین و آسیب کمتر به محیط زیست حداکثر راندمان را کسب کرد. روش سیمانی شدن زیستی که تمرکز مطالعه جاری بر آن است از جمله جدیدترین روش‌هایی است که با استفاده از باکتری‌ها اقدام به ساخت بلورهای کربنات کلسیم به منظور ساخت محصولات دگرگون شده با مقاومت بالا می‌شود. این فرآیند می‌تواند خاک یا ذرات ریز دیگر (مواد متخلخل) را بدون از هم گسیختگی ساختار اولیه تثبیت کند. در این روش کاهش نفوذپذیری و هزینه-ی اجرایی پایین می‌باشد. همچنین از لحاظ سازگاری با محیط زیست نیز مناسب بوده و دامنه‌ی گسترده‌ای از مواد و میکروارگانیسم ها می‌توانند بدون پیامد های زیست محیطی مضر در این روش استفاده شوند.

در سال‌های اخیر به علت سازگاری زیاد این روش با محیط زیست تحقیقات زیادی در این زمینه انجام شده است. از جمله ابتدا در سال ۱۹۹۹ از این روش به منظور ترمیم بناهای قدیمی از جنس سنگ‌های آهکی استفاده شد (Tiano et al., 1999). با رویکرد تقویت خاک، مطالعاتی بر روی مقاومت فشاری تک محوری به‌دست آمده با استفاده از این روش با تزریق تک فازه تحت فشار بالا در دانشگاه مرداک انجام (Whiffin 2004) و در سال‌های بعد بر روی تقویت خاک با شرایط تزریق بهتر و با فشار کمتر مطالعاتی انجام گرفت (Al-Thawadi 2008). دراین میان پژوهش‌های دیگر نیز بر روی کاربردهای غیر از مقاوم‌سازی خاک از جمله ترمیم مقاومت بتن با استفاده از میکروارگانیسم‌ها (Ramachandran et al., 2001) و اصلاح آلودگی خاک (Ferris et al., 1992) انجام شد. مقاوم‌سازی سطحی خاک در مناطقی که در آنها خطر گسترش شن های روان و بیابانزایی وجود دارد و نیز خاک‌هایی که مستعد تولید غبار و ریزگرد ها هستند را با این روش می‌توان به گونه ای اصلاح نمود که پیامدهای زیست محیطی این وقایع را به حداقل رساند.

مواد و روش‌ها

روش انتخاب شده در این مطالعه بر اساس هیدرولیز اوره و تشکیل رسوب کربنات کلسیم در حضور یون Ca^{2+} می‌باشد (معادله ۱) (Whiffin et al., 2007).

$$(NH_2)_2+2H_2O \xrightarrow{urease} CO_3^{2-}+2NH_4^+ \quad \text{In presence of } Ca^{2+} \Rightarrow CaCO_{3(solid)} \qquad (1)$$

پس از ته‌نشینی رسوب تشکیل‌شده، پوشش و اتصالی بین ذرات خاک ایجاد می‌شود که باعث افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ها می‌شود. بنابراین علاوه بر باکتری، باید مواد واکنش دهنده یعنی اوره و یون کلسیم نیز در محیط وجود داشته باشند، که از طریق تزریق محلول های شیمیایی مورد نیاز تأمین می‌شوند. باکتری واکنش‌گر نیز در غالب خاک‌های طبیعی وجود دارد و همچنین با روش‌های مناسب می‌توان آنرا جدا سازی و کشت خالص مورد نیاز را تهیه نمود .

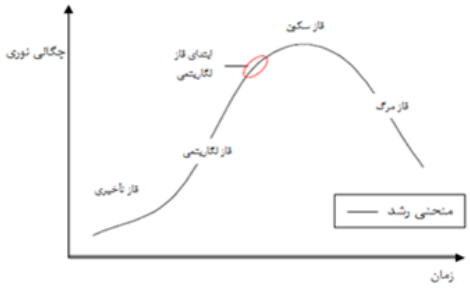
1-Biogeotechnology
2-Bio-Clogging
3-Bio-remediation
4-Bio-Cementation

هیدرولیز شیمیایی اوره (در غیاب کاتالیزور) یک فرآیند بسیار کند است که آنزیم اوره‌آز این واکنش را تقریباً 10^{14} برابر سریع‌ترمی نماید (Benini et al., 1999). روش به‌سازی زیستی بر اساس مدیریت واکنش‌های شیمیایی با سرعت بخشیدن به واکنش‌ها و تولید رسوب نسبتاً مقاوم می‌باشد. می‌توان گفت عوامل زیستی نقش یک واسطه برای افزایش سرعت واکنش را دارند. در این مطالعه با هدف امکان‌سنجی استفاده از این روش در تثبیت خاک‌های ماسه‌ای اقدام به به‌سازی خاک کرده و از تست تک محوری برای ارزیابی مقاومت خاک استفاده شد. اثر دانه‌بندی خاک در روند مقاوم‌سازی با در نظر گرفتن ۳ دانه‌بندی متفاوت مورد ارزیابی قرار گرفت. اثر زمان بر روی مقاومت گیری نمونه خاک به‌سازی شده نیز بررسی شد. همچنین اقدام به جداسازی باکتری از خاک گردید و سعی بر آن شد تا با باکتری بومی محلی خاک مورد به‌سازی قرار داده شود. برای ارزیابی مقاومت از تست تک محوری استفاده شد و برای شناسایی نوع رسوب و ارزیابی چگونگی رسوب گذاری از تست XRD و تصاویرمیکروسکپ الکترونی (SEM) استفاده گردید.

انتخاب میکروارگانیسم

مطالعات اولیه در خصوص شناسایی انواع باکتری‌های تولید کننده آنزیم اوره‌آز و نیز توانایی باکتری‌ها در تولید آنزیم انجام شد و باکتری Sporosarcina pasteurii (PTCC=1645) به‌عنوان عامل انجام واکنش انتخاب گردید. این باکتری از کلکسیون میکروارگانیسم‌های مرکز پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران خریداری گردید. همچنین جهت ارزیابی توانایی سوش‌های بومی، نمونه‌هایی از خاک تهیه و باکتری‌های مورد نظر جداسازی و توانایی آنها در مقاوم سازی خاک ارزیابی شد. کشت باکتری در محیط کشت مایع که شامل 15 gr/l Peptone، Casein، 5 gr/l Pepton soymeal، 5 gr/l NaCl و 20 gr/l Urea می‌باشد، و در pH=7.3 تنظیم شده است انجام شد. برای طی دوره کشت و گرماگذاری از انکیباتور شیکر دار و دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد استفاده شد. ضمن رسم منحنی رشد باکتری، در انتهای فاز لگاریتمی یا ابتدای فاز سکون در OD^{2} تقریبا ۲ از کشت‌ها جهت تزریق به ستون ها استفاده گردید. (شکل).

شکل ۱- منحنی رشد باکتری بصورت شماتیک



خاک

در آزمایش‌ها از خاک ماسه‌ی ساحل چالوس که بر اساس آزمایش دانه‌بندی، خاک بد دانه‌بندی شده می‌باشد (d_{10}=0.08 mm, d_{30}=0.09 mm and d_{60}=0.12 mm)، با زاویه اصطکاک داخلی ۳۶ درجه و ۳۶ درصد خاک سیلیس و pH =۸ استفاده شد .

هدایت الکتریکی

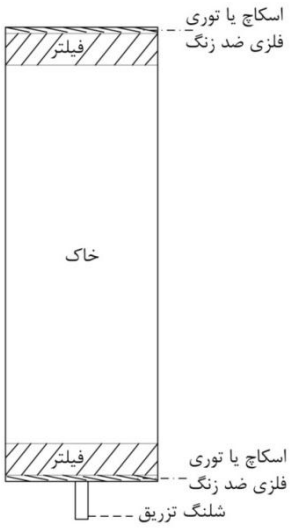
با توجه به اهمیت ترشح آنزیم اوره‌آز توسط باکتری، برای تشخیص میزان فعالیت باکتری میزان وجود و فعالیت آنزیم اوره‌آز اندازه گیری می‌شود و فعالیت آنزیم اوره‌آز نیز با اندازه‌گیری میزان هیدرولیز اوره قابل اندازه‌گیری است. هیدرولیز اوره عبارت است از تبدیل اوره به یون‌های کربنات و آمونیوم در حضور آب. به منظور اندازه‌گیری میزان فعالیت آنزیم اوره‌آز از روش اندازه‌گیری نرخ تغییر هدایت الکتریکی در زمان استفاده شد. بر اساس روش ارایه شده توسط وایفن و ون‌پاسن با هیدرولیز کامل مواد

2- Optical density

غیر یونی اوره به محصولات یونی تحت شرایط استاندارد مقدار هدایت الکتریکی به طور مشخص افزایش می‌یابد. بر این اساس ۱ میلی‌لیتر سوسپانسیون باکتری به ۹ میلی‌لیتر محلول ۱/۱۱ مولار اوره اضافه شده و تغییر هدایت الکتریکی در اوایل آزمایش با گام زمانی ۱۵ ثانیه در دمای آزمایشگاه بر حسب mS/min (میلی زیمنس بر دقیقه) اندازه‌گیری می‌شود. ۱ میلی زیمنس بر دقیقه متناسب است با هیدرولیز ۱۱ میلی مول اوره در دقیقه که بیانگر فعالیت آنزیم اوره‌آز باکتری است که معادل فعالیت باکتری در نظر گرفته می‌شود.

نحوه‌ی جانمایی خاک در ستون‌ها

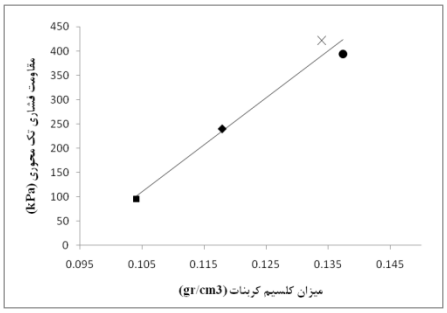
برای ارزیابی میزان مقاومت قابل دست‌یابی با استفاده از این روش از معیار مقاومت فشاری تک محوری استفاده شد. با توجه به در نظر گرفتن آزمایش تک محوری به عنوان معیار ارزیابی مقاومت خاک، ستون با مشخصات هندسی مشابه آزمایش تک محوری، به عنوان پایلوت آزمایشگاهی مورد استفاده قرار گرفت. لذا بر اساس قطر آزمایش تک محوری استاندارد، قطر نمونه مورد ارزیابی حدود ۳۷ میلی‌متر درنظر گرفته شد. برای این منظور از استوانه‌های مدرج پلاستیکی ۲۵۰ سی سی که دارای قطر ۳۷ میلی‌متر می‌باشد به عنوان قالب ستون خاک به ترتیب زیر استفاده شد. در ستون مورد نظر از پایین ابتدا یک لایه اسکاچ یا توری ضد زنگدر کف ستون قرار داده شد و سپس حدود یک سانتی‌متر فیلتر متناسب با دانه‌بندی خاک اصلی روی لایه‌ی اسکاچ جا سازی شد و در آخر استوانه از خاک اصلی پر شده و بالای آن نیز به طور مشابه یک سانتی‌متر فیلتر و یک لایه اسکاچ قرار داده شد و برای جلوگیری از به هم خوردگی ماسه حین تزریق، واشر لاستیکی با یک سوراخ در مرکز آن روی فیلتر قرار داده شد. میانگین دانسیته خشک خاک پس از آماده-سازی ستون‌ها حدود ۱/۵۵ گرم بر سانتی متر مکعب بود (شکل).



شکل ۲- شکل شماتیک نحوه آماده سازی ستون خاک

نتایج

آزمایش فعالیت‌سنجی باکتری که به منظور سنجش قابلیت باکتری در ترشح آنزیم با استفاده از روش هدایت سنجی الکتریکی انجام شد، فعالیت باکتری را ۴۲/۶ میلی مول اوره بر دقیقه نشان داد. هرچه مقدار فعالیت باکتری بالاتر باشد رسوب در زمان کمتری تشکیل شده و به عبارتی به محض ترکیب مواد واکنش دهنده عمل رسوب‌گذاری آغاز می‌شود همچنین برای سنجش میزان مقاوم شدن خاک از آزمون تک محوری استفاده شد که شکل میزان مقاومت تک محوری به‌دست آمده را نشان می‌دهد. مقدار حداکثر مقاومت قابل دستیابی متناسب با مقاومت مورد نیاز قابل افزایش است. ولی در آزمایش‌های جاری میزان مقاومت تک محوری ۴۲۵ کیلو پاسکال اندازه‌گیری شد.



شکل ۳- مقاومت فشاری نمونه‌ها در مقابل میزان کربنات کلسیم رسوب شده

جدول ۱- مشخصات اولیه ستون‌های خاک

	چگالی اولیه (gr/cm^3)	مقاومت فشاری تک محوری (kPa)
▪	۱/۵۶	۹۵
♦	۱/۵۶	۲۴۰
●	۱/۵۷	۳۹۴
X	۱/۵۵	۴۲۲

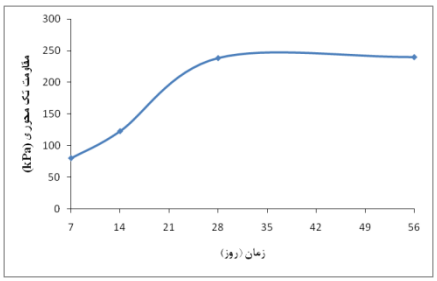
به منظور بررسی تأثیر دانه‌بندی بر مقاوم شدن خاک ۳ نمونه خاک با مشخصات ذکر شده در
جدول ۲ مورد ارزیابی قرار گرفت.
جدول ۲ مشخصات خاک مورد مطالعه و مقاومت تک محوری نمونه‌ها و جدول ۱ مشخصات اولیه ستون‌های خاک را نشان می دهد .

جدول ۲- مشخصات خاک‌های مورد استفاده و مقاومت بدست آمده مربوط به هرکدام

مقاومت تک‌محوری(kPa)	$D_{۶۰}$(mm)	$D_{۳۰}$(mm)	$D_{۱۰}$(mm)	C_c	C	شماره خاک
۳۹۰	۰,۱۱۶	۰,۰۹۲	۰,۰۸	۰,۹	۱,۴	۱
۴۵۰	۰,۲۵	۰,۱۸	۰,۱۳	۰,۹۸	۱,۸۸	۲
۸۰۰	۰,۱۱۳	۰,۰۸۹	۰,۰۷۹	۰,۹	۱,۴۴	۳

هرچه اندازه دانه‌ها بزرگ‌تر و به عبارتی حفره‌ها بزرگ‌تر باشد، گیر افتادن باکتری در بین ذرات خاک کمتر خواهد بود و در هنگام تزریق مواد در تزریق چند فازه باکتری شسته می‌شود. در این مورد بهتر است از تزریق تک فازه استفاده شود و یا برای تثبیت باکتری در بین ذرات روندی مشابه (Harkes2009) استفاده شود. در نمونه‌های ۱ و ۲ از تزریق تک فازه به صورت ترکیب باکتری و مواد واکنش‌دهنده استفاده شد. در ترکیب خاک نمونه‌ی شماره‌ی ۳ از ۳ درصد کائولینیت استفاده شده است. اضافه کردن کائولینیت که دارای قابلیت جذب باکتری است، امکان به‌سازی خاک با تزریق دو فازه بدون شسته شدن باکتری از خاک را فراهم می‌کند. در حالت کلی باکتری‌ها ترجیح می‌دهند از سطوح خارجی ذرات فاصله بگیرند و تمایل دارند در سطوح کوچک مانند نقاط تماس ذرات با یکدیگر خود را جای دهند که علت آن کاهش نیروی برشی و وجود مواد غذایی بیشتر در سطح تماس دانه‌های خاک می‌باشد. بنابراین وقتی از خاک‌های ریزدانه‌تر مانند نمونه‌ی شماره ۳ استفاده می‌شود، تعداد نقاط تماس ذرات خاک در حجم مشخص افزایش می‌یابد و باکتری در تعداد نقاط بیشتری در خاک توزیع می‌شود و پس از تزریق مواد واکنش دهنده نقاط به‌سازی شده با مقدار یکسان مواد تزریقی نیز افزایش می‌یابد. این در حالی است که در خاک‌های درشت‌دانه‌تر نقاط تماس کمتر است و در نتیجه باکتری در نقاط کمتری قرار می‌گیرد. به تبع آن پس از تزریق مواد واکنش دهنده، محل‌های به‌سازی شده نیز به ازای مقدار یکسان مواد تزریقی کمتر می‌باشد. از جهت دیگر ریز بودن ذرات نیز نباید تا حدی باشد که باعث فیلتر شدن کل باکتری شود. حداقل اندازه‌ی ممکن ذرات خاک برای به‌سازی زیستی متناسب با سایز باکتری تعیین می‌شود. گاهی اندازه‌ی ذرات به گونه‌ای است که باعث فیلتر شدن باکتری در خاک اطراف نقطه‌ی تزریق محلول می‌شود. در این موارد می‌توان از محلول‌های با درجه شوری پایین جهت جدا کردن باکتری از ذرات خاک و بهبود توزیع باکتری استفاده کرد (Harkes et al., 2009).

به منظور بررسی اثر زمان بر مقاومت نمونه‌ها، نمونه‌هایی با روند یکسان آماده و به صورت مشابه تزریق شد. فاصله-ی زمانی باز کردن ستون‌ها ۷، ۱۴، ۲۸ و ۵۶ روز انتخاب گردید (شکل)



شکل۴- افزایش مقاومت فشاری با گذشت زمان

همانطور که مشاهده می‌شود که با گذشت زمان از شروع تزریق میزان مقاومت افزایش می‌یابد، ولی مقاومت نمونه ۲۸ روزه و نمونه ۵۶ روزه تفاوتی با هم ندارند و می‌توان گفت بعد از ۲۸ روز نمونه‌ها به حداکثر مقاومت خود رسیده‌اند.

به علت اینکه بر اساس نتایج در مدت زمان حدود یک روز تقریباً تمام مواد واکنش می‌دهند و تقریباً تمام رسوب مورد انتظار تشکیل می‌شود، لذا این امکان وجود دارد که در این فاصله‌ی زمانی ساختار رسوب و اتصال بین ذرات رسوب و خاک تقویت شود. آزمایش‌های اندازه‌گیری رسوب خارج از خاک انجام شده و روند رسوب‌گذاری درون خاک به طور مجزا بررسی نشد و احتمال این که روند رسوب‌گذاری درون خاک متفاوت باشد وجود دارد، لذا بررسی جداگانه روند رسوب‌گذاری درون خاک به منظور درک بهتر اثر زمان امری ضروری است که در آینده می‌تواند مورد مطالعه قرار گیرد.

در قسمتی از این پژوهش از یک باکتری جداسازی شده از خاک‌های رشته کوه‌های منطقه اشتهارد استان البرز برای مقاوم‌سازی خاک استفاده شد. باکتری جداشده یک باکتری گرم مثبت و هوازی می‌باشد. جدول ۳ مشخصات باکتری و خاک مقاوم شده با استفاده از این روش را نشان می‌دهد.

جدول۳- مشخصات باکتری جداسازی شده و نمونه بهسازی شده با استفاده از باکتری بومی

فعالیت باکتری (mM urea/min)	*میزان کلسیم کربنات (gr/cm^3)*	*مقاومت تک محوری (kPa)*	*خانواده باکتری*
0.5	0.11	600	Micrococcaceae

مقاومت به‌دست‌آمده با استفاده از باکتری جداسازی شده، بیانگر این مطلب است که میکروارگانیسم‌های ناشناخته بسیاری وجود دارند که می‌توانند سمانته شدن زیستی به واسطه رسوب میکروبی کربنات کلسیم را هرچه بهتر و مقاوم‌تر انجام دهند. استفاده از باکتری جداسازی شده از محل برای تثبیت خاک، از دیدگاه زیست محیطی نیز حایز اهمیت بوده و استفاده از سویه‌های بومی و بهینه‌سازی آنها از دیدگاه زیست محیطی نسبت به گونه های دیگر ارجحیت دارد.

نتایج آزمایش‌های انجام شده در فاز شناسایی نوع رسوب بیان‌گر آن است که فاز اصلی رسوب تشکیل شده کلسیت می‌باشد جدول ۴ فازهای تشکیل شده در این فرآیند را نشان می‌دهد.

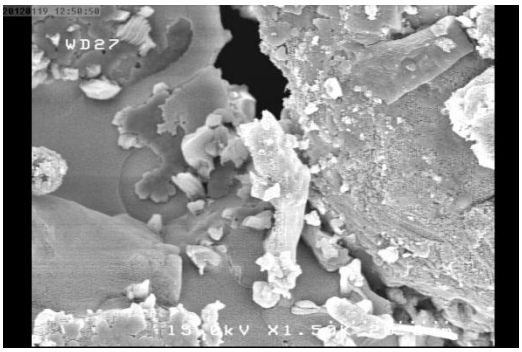
جدول ۴- فازهای رسوب تشکیل شده

نام کریستال (Polymorph Type)	**نوع ماده**	**فاز**
کلسیت (Calcite)	کلسیم کربنات	**اصلی**
وتریت (Vaterite)	کلسیم کربنات	**فرعی**
سدیم کلراید	NaCl	**فرعی**

رسوب کلسیم کربنات دارای چند Polymorph یا ریخت متفاوت است که عبارتند از: ۱) کلسیت ۲) آراگونیت و ۳) وتریت. در طبقه‌بندی این پلی‌مرف‌ها بر اساس مقاومت، به ترتیب کلسیت دارای بیشترین مقاومت و بعد از

آن وتریت و در آخر آراگونیت قرار دارد. از نظر ظاهری نیز کلسیت به شکل لوزی شکل و مربعی شکل است، وتریت به شکل‌های کروی و صفحه‌ای تشکیل می‌شود و آراگونیت نیز به صورت سوزن شکل می‌باشد (MacGill 2005). جدول ۴ ترتیب فازهای اصلی و فرعی موجود در نمونه مورد آزمایش را نشان می‌دهد.

شکل ۵ تصویر SEM از رسوب تشکیل شده بین دو ذره خاک را نشان می‌دهد. فرآیند رسوب‌گذاری به صورتی است که ابتدا یک لایه نازکی از رسوب دور ذرت را می-پوشاند، سپس در محل اتصال ذرات پلی تشکیل می‌شود که علت اصلی تقویت خاک است. لذا کاهش تخلخل اولیه کم می‌باشد و در نتیجه هدایت هیدرولیکی خاک به‌سازی شده کاهش چشم‌گیری نخواهد داشت. اساساً مکانیزم حرکت باکتری در خاک به صورتی است که از سطوح بزرگ فاصله می‌گیرد و تمایل دارد که در نقاط اتصال ذرات خاک که مواد غذایی بیشتری در این مناطق وجود دارد و میزان نیروی برشی بیشترین مقدار است قرار بگیرد و به همین دلیل کاهش میزان نفوذپذیری کم می‌باشد. بررسی‌های انجام شده بر روی هدایت هیدرولیکی خاک به‌سازی شده بیانگر نصف‌شدن میزان نفوذپذیری خاک می‌باشد که در مقایسه با روش تزریق سیمان کاهش بسیار کمی دارد.



شکل ۵ – تصویر SEM از سطح رسوب

بحث

با توجه به فعالیت مناسب باکتری مورد استفاده و تشکیل سریع رسوب، این روش پتانسیل بالایی برای تثبیت سطحی به‌ویژه تثبیت خاک بیابان برای جلوگیری از فرسایش بادی دارد. برآوردهای مالی انجام شده بیانگر این مطلب است که برای تثبیت سطحی ۱ متر مربع از خاک بیابان حدود ۰/۵ دلار صرف هزینه مواد واکنش دهنده می‌شود. به منظور ارزیابی پتانسیل کاربرد این روش در تثبیت خاک‌های بیابان انجام آزمایش‌های دقیق‌تر امری ضروری است که نیازمند همکاری محققان رشته‌های میکروبیولوژی و خاک است. به‌منظور تقویت خاک با دانه-بندی‌های مختلف در نظر گرفتن مشکلاتی تزریق از اهمیت بالایی برخوردار است. با توجه به اندازه باکتری و مطالعات انجام شده در مورد حرکت باکتری در خاک‌های درشت‌دانه بحث توزیع باکتری در خاک مهم‌ترین مسئله می‌باشد. خاک‌های درشت‌دانه توانایی پایینی برای جذب باکتری دارند و در صورت تزریق باکتری به خاک درصدی زیادی از آن، از خاک عبور می‌کند و نیازمند استفاده از یک روش خاص برای جذب باکتری به خاک مشابه روش مورد استفاده توسط Harkes می‌باشد. راه دیگر برای جبران این مسئله استفاده از تزریق تک فازه با سرعت مناسب با سرعت رسوب‌گذاری است.در مورد خاک‌های با دانه‌بندی ریزتر این مشکل وجود ندارد و توزیع باکتری در خاک به علت قابلیت جذب مناسب باکتری توسط خاک بهتر است و امکان تزریق ۲ فازه را ایجاد می‌کند اما اندازه‌ی دانه‌ها نباید به قدری ریز باشد که باعث فیلتر کردن کامل باکتری در لحظه‌ی ورود به خاک باشد.

حداکثر زمان لازم برای رسیدن به حداکثر مقاومت نمونه خاک به‌سازی شده، بر اساس نتایج مقاومتی ۲۸ روز می-باشد. روند مقاومت‌گیری نمونه به گونه‌ای است که در طول ۱۴ روز ۵۰٪ مقاومت نهایی نمونه کسب می-شود.بیشتر مطالعات و پژوهش‌های پیشین در سال‌های اخیر بر روی باکتری اسپوروسارسینا پاستوری بوده است. اما در این پژوهش از باکتری جدیدی که از خاک‌های بومی ایران استخراج گردید، که مقاومت‌های مشابه‌ی در

شرایط تزریق مشابه باکتری *Sporosarcina Pasteurii* را نتیجه می‌دهد. استفاده از باکتری جدا شده از محیط مشکل وفق‌پذیری باکتری با محیط را برطرف می‌کند و تنها حجم باکتری برای یک دوره زمانی کوتاه در خاک افزیش داده می‌شود، و پس از پایان واکنش‌های بیوشیمیایی جمعیت باکتری تزریق شده به خاک در تعادل با دیگر باکتری‌های موجود در خاک باقی می‌ماند. این مسئله خود دلیلی بر وجود باکتری‌های مختلف که توانایی استفاده در این روش را دارند، می‌باشد که می‌تواند متناسب با کاربرد مورد نظر باکتری با شرایط سازگارتر با آن کاربرد ویژه را انتخاب کرد.

منابع

1- Al-Thawadi, S. M.,2008. "High strength in-situ biocementation of soil by calcite precipitating locally isolated ureolytic bacteria". Ph.D thesis. Murdoch University, Perth, Western Australia. p. 272.

2- Benini, S., Rypniewski, W. R., Wilson, K. S., Miletti, S., Ciurli, S., Mangani, S.,1999. "A new proposal for urease mechanism based on the crystal structures of the native and inhibited enzyme from *Bacillus pasteurii*: why urea hydrolysis costs two nickels". Journal of Structure, p.12,

3- DeJong, J. T., Fritzges, M. B., Nusslein, K. 2006."Microbially induced cementation to control sand response to undrained shear". Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, P. 12,

4- DeJong, J. T., Mortensen, B. M., Martinez, B. C., Nelson, D. C.2008. "Bio-mediated soil improvement", Journal of Ecological Engineering, p. 197-210,

5- Harkes, M. P., van Paassen, L. A., Booster, J. L., Whiffin, V. S. & van Loosdrecht, M. C. M. 2009."Fixation and distribution of bacterial activity in sand to induce carbonate precipitation for ground reinforcement". Journal of Ecological Engineering, p. 6.

6- Ivanov, V., Chu, J.2008. "Application of microorganisms to geotechnical engineering for bioclogging and biocementation of soil in situ". Journal of Environmental Science Biotechnology, p. 15.

7- Karol, R. H.2003. (Chemical grouting and soil stabilization). 3 ed. New Jersey: Marcel Dekker. 536.

8- McGill, K. N., "Calcium Carbonate Scaling of Polymers in Isothermal, Stagnant Water.2005." M.Sc thesis. Minnesota university. . p. 162.

9- Okwadha, G. D. O., Li, J. 2010."Optimum conditions for microbial carbonate precipitation". Journal of Chemosphere, 81: p. 5

10- Ramachandran, S. K., Ramakrishnan, V., Bang, S. S. 2001. "Remediation of Concrete Using Micro-Organisms." ACI Materials Journal, 98: p. 7.

11- Sarda, D., Choonia, H. S., Sarode, D. D., Lele, S. S.2009." Biocalcification by Bacillus pasteurii urease: a novel

application". Journal of Industrial Microbiology, P. 5

12- Tiano, P., Biagiotti, L., Mastromei, G. 1999. "Bacterial bio-mediated calcite precipitation for monumental stones conservation: methods of evaluation". Journal of Microbiological Methods, 36(1–2): p. 139-145.

13- van Paassen, L. A., Harkes, M. P., Van Zwieten, G. A., Van der Zon, W. H., Van der Star, W. R. L. & Van Loosdrecht, M. C. M. 2009."Scale up of Biogrout: a biological ground reinforcement method". 17th international conference on soil mechanics and geotechnical engineering. Alexandria, Egypt.

14- van Paassen, L. A., Pieron, M., Mulder, A., Van der Linden T. J. M., van Loosdrecht, M. C. M., Ngan-Tillard, D. J. M., 2009b."Strength and deformation of biologically cemented sandstone". Rock engineering in difficult ground conditions. Dubrovnik, Croatia.

15- Whiffin, V.S.,2004. "Microbial $CaCO_3$ precipitation for the production of biocement". Ph.D thesis. Murdoch University, Perth,Western Australia, p. 154.

16- Whiffin, V. S., van Paassen, L. A., Harkes, M. P.2007. "Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique". Jounrnal of Geomicrobiology, p. 6