Archive of SID

نشریه حفاظت منابع آب و خاک، سال نهم، شماره دو، زمستان ۱۳۹۸

ISSN 2251-7480

ارزیابی کارآیی فرآیند رسوب میکروبی کربنات‌کلسیم در مقاومت سطحی ماسه بادی منطقه جبل‌کندی

فرزانه دوزالی جوشین[۱]، کاظم بدو*[۲] و محسن برین[۳]

۱) دانشجوی دکتری گروه مهندسی عمران-ژئوتکنیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.

۲*) استاد گروه مهندسی عمران، گرایش ژئوتکنیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.

* نویسنده مسئول مکاتبات: k.badv@urmia.ac.ir

۳) استادیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.

تاریخ دریافت: ۹۸/۰۴/۱۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۱۴

چکیده

با پیشروی به‌سمت دریاچه ارومیه، فرسایش بادی خاک به وضوح دیده می‌شود و کانون فعال ریزگرد در منطقه به شکل تل ماسه‌های روان، خودنمایی می‌کند. فرسایش بادی از عوامل اصلی تخریب خاک و محیط‌زیست است. هزینه زیاد مالچ‌های نفتی و آثار مخرب آن‌ها در محیط‌زیست، منجر به استفاده از مواد سازگار با محیط‌زیست و ارزان‌تر شده است. در این تحقیق، مهار فرسایش بادی با بررسی مقاومت برشی با استفاده از دستگاه برش پره‌ای در ماسه بادی تثبیت‌یافته با فرآیند رسوب میکروبی کربنات‌کلسیم در منطقه جبل‌کندی دریاچه ارومیه ارزیابی گردید. رسوب میکروبی کربنات‌کلسیم، با واکنش یون کربنات تولید شده در اثر هیدرولیز اوره توسط باکتری (Sporosarsina pasteurii) کشت داده شده در محیط صنعتی عصاره ذرت در حضور منبع کلسیم محلول سیمانتاسیون (کلریدکلسیم و اوره) ایجاد شد. پارامترهای مورد بررسی شامل غلظت باکتری، زمان نگهداشت، اثر تزریق مجدد محلول باکتری و سیمانتاسیون با فاصله زمانی هفت روز، تأثیر شرایط محیطی بر عملکرد باکتری و میزان مقاومت سطحی بودند. نتایج آزمایش‌ها نشان‌گر بهبود مقاومت برشی خاک نسبت به زمان بود و بیش‌ترین مقاومت برشی برابر ۰/۶۵کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع به‌دست آمد. نتایج نشان داد تزریق مجدد محلول باکتری و سیمانتاسیون تأثیر چشمگیری در افزایش مقاومت نمونه‌ها به اندازه ۶۰ درصد نسبت به حالت یکبار تزریق داشته است.

کلید واژه‌ها: فرسایش بادی؛ ماسه جبل‌کندی؛ تثبیت میکروبی؛ عصاره ذرت؛ مقاومت سطحی

مقدمه

فرسایش بادی از عوامل اصلی تخریب خاک و محیط‌زیست، انتقال ذرات معلق و رسوب‌دهی آن در شبکه‌های آبیاری است (موحدان و همکاران، ۱۳۹۰). حرکت و انتقال ذرات گرد و غبار خاک توسط نیروی باد به‌عنوان یکی از علل اصلی فرآیند بیابان‌زایی شناخته شده است که در نتیجه آن تبدیل مناطق کشاورزی به زمین‌های بایر و ایجاد پوشش شن و ماسه بر روی آن‌هاست. تپه‌های ماسه‌ای، به‌علت رطوبت ناکافی و همچنین عدم پوشش مناسب گیاهی، دارای چسبندگی کمی بوده و مستعد فرسایش بادی هستند (حسینی موغاری و همکاران، ۱۳۹۶). در طی فرآیند فرسایش بادی و در پی

www.SID.ir

Archive of SID

آن ایجاد طوفان‌های گرد و غبار، مواد مغذی و آلی خاک از بین می‌رود که این امر به نوبه‌ی خود سبب کاهش بهره‌وری کشاورزی می‌شود. آلودگی هوا و آب‌های سطحی و همچنین کاهش دید افقی ناشی از گرد و غبار از دیگر پیامدهای منفی فرسایش بادی است که می‌تواند اثرات سویی بر سلامت انسان داشته باشد (احمدی و همکاران، ۱۳۸۱). روش‌های مختلفی برای کنترل فرسایش بادی و کاهش گرد و غبار وجود دارد. این روشها غالباً به سه دسته طبقه‌بندی می‌شوند: ۱. روش‌های زراعی که در آنها از پوشش گیاهی یا باقیمانده محصولات برداشت شده به عنوان بادشکن و محافظ سطح خاک استفاده می‌شود (مطلبی، ۱۳۹۲)، ۲. روش‌های مکانیکی که در آنها با ایجاد موانع مکانیکی مانند فنسهای فلزی در مقابل جریان باد سرعت باد را کاهش می‌دهند (افیونی و همکاران، ۱۳۷۶)، ۳. ایجاد لایه مقاوم به فرسایش در سطح خاک با استفاده از تثبیت کننده‌های مختلف نظیر مالچ نفتی و مواد پلیمری (عزیزی و همکاران، ۱۳۹۵). روش زراعی اغلب بسیار دشوار است زیرا خاک ممکن است از نظر کشاورزی نامناسب باشد. علاوه بر این، باد می‌تواند باعث کندن ریشه گیاهان جوان شده و یا با بلند کردن ماسه‌ها به آنها آسیب برساند. از سوی دیگر، این روش نیازمند دوره طولانی زمان رشد و تأمین منابع آب کافی برای رشد گیاهان است که سبب دشواری اجرای آن در بسیاری از مناطق خشک و نیمه‌خشک می‌شود (Diouf *et al.*, 1990). استفاده از شبکه‌های فلزی نیز به علت تاب برداشتن و پیچش لبه‌ها ناکار آمد است. همچنین، ایجاد تلاطم در قسمت بادپناه می‌تواند حفاظت مؤثر را کاهش دهد. ایجاد لایه‌ی سطحی مقاوم نیز به دلیل هزینه پایین و مدت زمان کم اجرا، در بسیاری از عملیات کنترل فرسایش بادی استفاده می‌شود (He *et al.*, 2008). در این روش از موادی نظیر آب، مواد پلیمری و مالچ‌های نفتی به عنوان مقاوم‌کننده‌ی لایه سطحی استفاده می‌شود با این حال استفاده از این مواد مخصوصاً مالچ‌های نفتی می‌تواند پیامدهای منفی زیست‌محیطی به همراه داشته باشد (Armbrust and Dickerson, 1971). افزایش مقاومت لایه سطحی خاک در مقابل تنش برشی جریان باد، عاملی کلیدی در کنترل فرسایش بادی است. اساس بسیاری از روشهای کنترل فرسایش خاک مورد استفاده در حال حاضر، مبتنی بر تثبیت و تقویت سطح خاک است. در این رابطه، شکل‌گیری پوسته فیزیکی به شدت می‌تواند خطر فرسایش باد را کاهش دهد. در سالهای اخیر فناوری بیولوژیکی سازگار با محیط‌زیست با نام رسوب میکروبی کربنات‌کلسیم (MICP) به عنوان یک روش بهسازی خاک توسعه داده شده است (DeJong *et al.*, 2010). روش MICP که با نام‌های دیگری مانند سیمانتاسیون میکروبی و بهسازی واسطه زیستی نیز خوانده می‌شود، برای اصلاح خواص مکانیکی خاک مانند مقاومت، سختی و نفوذپذیری بکار می‌رود. در MICP با هیدرولیز اوره توسط سلولهای باکتریایی و یا آنزیم اوره‌آز خالص به عنوان کاتالیزور، مطابق رابطه (۱) یونهای کربنات و آمونیوم تولید می‌شوند که در ادامه، مطابق رابطه (۲) یونهای کربنات تولید شده به آسانی در حضور یک منبع کلسیم موجب تشکیل رسوب کربنات‌کلسیم می‌شوند. به دلیل سادگی و عدم تولید پروتون اضافی، در بسیاری از کاربردهای MICP، از باکتریهای هیدرولیزکننده اوره استفاده می‌شود و این روش تحت عنوان رسوب میکروبی کربنات‌کلسیم شناخته می‌شود (Whiffin *et al.*, 2007).

$$CO(NH_2)_2 + 2H_2O \rightarrow 2NH_4^+ + CO_3^{2-} \quad (۱)$$

$$Ca^{2+} + CO_3^{2-} \rightarrow CaCO_3(s) \downarrow \quad (۲)$$

در سالهای اخیر کاربردهای متعددی برای فناوری MICP گزارش شده است که در طیف وسیعی از حوزه‌ها نظیرحذف آلاینده (Fujita *et al.*, 2010) بهسازی خاک (van Paassen *et al.*, 2010) خودترمیمی بتن معمولی (Wiktor and Jonkers, 2011) و حفاظت و

www.SID.ir

Archive of SID

مرمت آثار تاریخی (Tiano *et al.*, 1999) جای می‌گیرند. در کنار کاربردهای مختلف MICP در زمینه‌های مختلف، اخیرا عامل مهارکننده گرد و غبار در خاکهای سیلتی و رسی مورد بررسی قرار گرفته است (Bang *et al.*, 2011). کاظمی (۱۳۹۳) به منظور بررسی پارامترهای تأثیرگذار بر تثبیت بیولوژیکی خاک‌های ریزدانه با استفاده از ریزجلبک *(Microalgae chlorella vulgaris)* از یک دستگاه برش پره‌ای به منظور بررسی میزان اثرگذاری ریزجلبک در خاک استفاده کرد. ملکی و همکاران (۱۳۹۵) با استفاده از تلقیح میکروبی باکتری باسیلوس پاسته اوری و محلول سیمانتاسیون به بررسی کنترل فرسایش بادی در تپه‌های شنی با استفاده از دستگاه تونل بادی پرداختند. غفاری و زمردیان (۱۳۹۶) با استفاده از رسوب میکروبی کربنات‌کلسیم به بررسی مقاومت برشی انواع خاک ماسه‌ای پرداختند. Mansouri و Cheshomi (۲۰۱۸) هم مقاومت برشی ماسه کوارتزی را با استفاده از روش میکروبی بررسی کردند.

Yu و همکاران (۲۰۱۸) تاثیر دفعات تزریق سیمان کامپوزیت زیستی را روی خواص ماسه سنگ زیستی بررسی کردند. این مطالعه در واقع به عنوان بسطی بر پژوهشهای اخیر در زمینه ارزیابی پتانسیل فناوری MICP در کنترل فرآیند فرسایش بادی و جلوگیری از انتقال ماسه‌های سست تپه‌های شنی منطقه جبل‌کندی دریاچه ارومیه است. بنابراین هدف از این مطالعه بررسی آزمایشگاهی استفاده از فناوری MICP با باکتری *(Sporsarcina Pasteurii)* در کاهش تلفات خاک ناشی از فرسایش بادی به کمک دستگاه برش پره‌ای بوده و طی آن اثر MICP در افزایش مقاومت لایه سطحی خاک مورد آزمایش قرار گرفته است. در نهایت پارامترهای تأثیرگذار زمان نگهداشت، غلظت باکتری، رطوبت، نحوه تزریق و شرایط محیطی و میزان اثربخشی میکروارگانیسم در مقاوم‌سازی سطح خاک بررسی شده است.

مواد و روش‌ها

باکتری مورد استفاده

باکتری استفاده شده در این پژوهش از خانواده باسیلوس و دارای نام علمی *(Sporosarsina pasteurii)* است. سویه این باکتری از مرکز کلکسیون قارچها و باکتریهای صنعتی به شماره *(PTCC 1645DSM33)* به صورت پودر خشک و منجمد شده لیوفیلیزه تهیه شد. ابتدا سویه باکتری در محیط آزمایشگاه فعال شد. کشت اولیه باکتری در محیط استاندارد با ترکیب ۲۰ گرم بر لیتر عصاره مخمر و۱۰ گرم بر لیتر سولفات آمونیوم با اضافه کردن آب مقطر تشکیل داده شد و به منظور بهینه کردن میزان فعالیت اوره‌آز، با اضافه کردن هیدروکسید پتاسیم به محلول، pH آن در هشت تنظیم شد سپس در یک شیکر انکوباتور با۱۲۰ دور در دقیقه، تحت شرایط هوازی کشت انجام شد (Stocks *et al.*, 1999).

برای تولید حجم بیشتر محلول باکتری برای استفاده در آزمایش‌ها، از محیط کشت صنعتی عصاره خیسانده ذرت تهیه شده از شرکت شهر صنعتی البرز استفاده شد (ملکی و همکاران، ۱۳۹۵). محلول سیمانتاسیون نیز شامل کلریدکلسیم و اوره بود. دمای انجام کلیه آزمایش‌ها ۲±۲۵ درجه سانتیگراد بود. پس از اطمینان از رشد باکتری با استفاده از دستگاه اسپکتوفتومتر، در یخچال تا زمان استفاده نگهداری شد.

به منظور استفاده در خاک، باکتری رشد یافته به محیط کشت در ظروف بزرگتر انتقال و رشد داده شد و بلافاصله پس از رسیدن به غلظت مورد نظر به سطح خاک اضافه شد. با استفاده از دستگاه اسپکتوفتومتر غلظت باکتری قرائت شد. مقدار دانسیته نوری (OD) در طول موج ۶۰۰ نانومتر قرائت می‌شد (Bang *et al.*, 2011). در این تحقیق از OD های برابر با ۱/۵، ۲ و ۲/۵ استفاده شد.

www.SID.ir

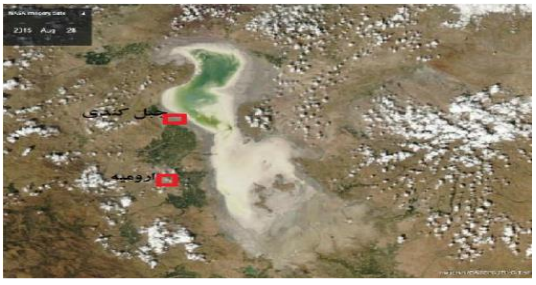
Archive of SID

توصیف منطقه

روستای جبل‌کندی در۴۰ کیلومتری شمال ارومیه، در محور ارومیه–سلماس و غرب دریاچه ارومیه است که موقعیت آن در شکل ۱ نشان داده شده است. مناطق با رنگ روشن در شکل یک شوره‌زارها و زمین‌های ماسه‌ای فاقد پوشش گیاهی و مستعد فرسایش بادی را نشان می‌دهد.

در حدود یک کیلومتری این روستا ۳۰۰ هکتار از اراضی به شن‌های روان تبدیل شده و روز به روز بر تپه‌های آن افزوده می‌شود. این تپه‌ها تهدیدی جدی بر روستاها و باغ‌های اطراف به شمار می‌روند. منطقه جبل‌کندی به عنوان یکی از کانونهای فعال ریزگرد شناخته شده است. با پیشروی به سمت دریاچه، فرسایش بادی خاک به وضوح دیده می‌شود و کانون فعال ریزگرد در منطقه به شکل تل ماسه‌های روان، خودنمایی می‌کند.

در این منطقه، علاوه بر فرسایش شدید بادی، از بین رفتن پوشش گیاهی و فعال بودن کانون ریزگرد و شوری‌زایی از عوامل تخریب محیط‌زیست است که با پسروی آب دریاچه این عوامل تشدید یافته است. وزش بادهایی با سرعت زیاد در این منطقه، طوفان‌های گرد و غبار ایجاد کرده و باعث حرکت شن‌های روان به سمت روستا می‌شود.



شکل ۱. تصویر ماهواره‌ای از موقعیت روستای جبل‌کندی

مشخصات فیزیکی و مکانیکی خاک

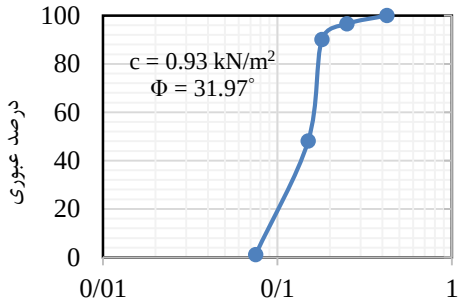
بر اساس مطالعات انجام شده بر روی نمونه‌های ماسه بادی در منطقه جبل‌کندی به روش XRF مهمترین اجزاء تشکیل دهنده آنها، شامل سیلیس SiO_2 حدود ۶۲ درصد، اکسیدکلسیم CaO حدود ۱۲ درصد، اکسیدآلومینیوم Al_2O_3 حدود ۱۲ درصد و اکسیدآهن نیز حدود ۴ درصد است. سایر اکسیدهای دیگر از جمله اکسیدهای سدیم، پتاسیم، منیزیم و منگنز نیز با درصدهای پایین در این ماسه‌ها یافت می‌شود. ماسه‌های بادی روان عمدتا ریزدانه بوده و قابل حمل به وسیله باد هستند.

ترکیب شیمیایی ماسه‌های بادی نشان داد که تقریبا ۶۲ درصد ذرات تشکیل دهنده ماسه‌های روان منطقه از سیلیس تشکیل شده و حدود ۲۲ درصد آنها نیز ترکیبی نسبتا یکسان از ذرات آلومینا و آهک هستند. دانه‌بندی به روش خشک طبق استاندارد ASTM D 422 نشان داد خاک منطقه، ماسه بد دانه‌بندی شده (SP) است. (c , Φ) به ترتیب پارامترهای زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی بین ذرات خاک است که در نمودار دانه‌بندی بیان شده است، شکل ۲).

از نظر اندازه ذرات، بخش اعظم ذرات در حد ماسه و در حد ناچیز (کمتر از یک درصد) از سیلت و رس تشکیل شده‌اند که بیش از ۹۰ درصد ذرات، قطری بین ۰/۱۵ تا ۰/۲۵ میلی‌متر دارند. بافت خاک به روش هیدرومتری بیانگر بافت شنی خاک مورد آزمایش بود. نسبت تخلخل نمونه‌های برجا برابر ۰/۵ و وزن مخصوص طبیعی ۱/۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب طبق استاندارد ASTM D 4254 بدست آمد. مطابق با استاندارد-ASTM D 854 87 چگالی ویژه ذرات جامد خاک برابر ۲/۷۹ و رطوبت برجا برابر ۲/۵ درصد طبق استاندارد ASTM D 2216 اندازه‌گیری شد.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۲. منحنی دانه‌بندی ماسه بادی در منطقه جبل‌کندی

مشخصات شیمیایی خاک

سوسپانسیون آب مقطر و خاک با نسبت ۱:۱ تهیه و با استفاده از شیکر حدود ۲۰ دقیقه تکان داده شد. مواد نامحلول ته‌نشین شده و قسمتی که بالای بشر به صورت محلول بود، از کاغذ صافی عبور داده و عصاره‌گیری شد و pH و EC خاک تعیین شد. برای تعیین pH از روش استاندارد ASTM D 4972-01 استفاده شد. میزان مواد آلی خاک نیز به روش افت حرارتی طبق استاندارد ASTM D2974-00 (2000) بدست آمد. نتایج بدست آمده در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. مشخصات شیمیایی ماسه بادی منطقه جبل‌کندی

EC (dS/m)	pH	میزان مواد آلی خاک
۰/۹۲	۷/۹۵	۰/۹۵ درصد
غیرشور	قلیایی ضعیف	_

تهیه نمونه‌های آزمایش

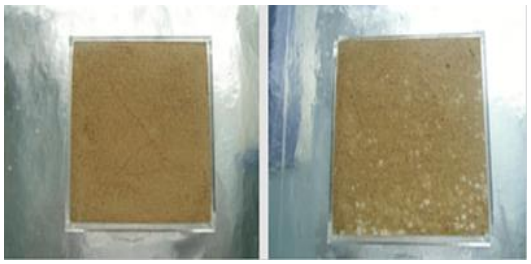
آزمایش‌ها با سه تکرار انجام گرفت. برای انجام آزمایش از سینی‌هایی به ابعاد ۲×۲۵×۴۰ سانتی‌متر استفاده شد و نمونه خاک پس از استریل شدن در دستگاه اتوکلاو به درون سینی‌ها انتقال داده شده و سطح آن صاف شد. سپس به اندازه تقریبی برابر تخلخل سه میلی‌متر ضخامت خاک سطحی که پره دستگاه برش پره‌ای نفوذ می‌کرد به صورت حجمی از مخلوط محلول باکتری و محلول سیمانتاسیون به نسبت ۱:۱ و در OD های ۱/۵، ۲ و ۲/۵ به خاک اضافه می‌شد. روش اضافه کردن به صورت پاشش و از طریق یک ظرف اسپری کننده به صورت یکنواخت بر سطح خاک بود. سپس نمونه‌ها در دستگاه ژرمیناتور در دمای ۲۷ درجه سانتیگراد در دوره‌های زمانی ۳، ۷، ۱۴،۲۱ و ۲۸ روز نگهداری می‌شد. لازم به ذکر است که دما و رطوبت نمونه‌ها در دستگاه ژرمیناتور ثابت و طبق دوره‌های زمانی نگهداری شده عمل سیمانتاسیون نیز زمان‌بر بود.

جهت بررسی میزان اثرگذاری باکتری در خاک از مقاومت برشی سطح خاک استفاده شد که با استفاده از دستگاه برش پره‌ای و با سه تکرار اندازه‌گیری شد. با توجه به اینکه در این پژوهش مقاومت برشی سطح خاک به منظور مقابله با فرسایش بادی بررسی شده است و همچنین محلول باکتری به سطح خاک اسپری شده است بنابراین از دستگاه برش پره‌ای جیبی یا توروین و از استاندارد ASTM D 46 48 استفاده شده است. این آزمایش برای خاک‌های سست تا نسبتا سفت قابل استفاده است. در مرحله اول تأثیر زمان نگهداشت بر میزان مقاومت برشی نمونه خاک ماسه بادی منطقه جبل‌کندی مورد بررسی قرار گرفت و تأثیرOD های ۱/۵، ۲ و ۲/۵ بر میزان مقاومت برشی خاک بررسی شد و پس از به دست آوردن غلظت بهینه محلول باکتری، مقاومت برشی ماسه بادی در غلظت بهینه محلول باکتری نسبت به زمان بررسی شد. مرحله دوم آزمایش‌ها بررسی تأثیر تزریق مجدد محلول باکتری و محلول سیمانتاسیون با فاصله زمانی هفت روز بر مقاومت برشی خاک ماسه بادی در غلظت بهینه محلول باکتری نسبت به زمان است. مرحله سوم بررسی تأثیر اضافه کردن رطوبت به خاک بر میزان مقاومت برشی است. همچنین اثر شرایط محیطی بر روی نمونه خاک بررسی شد. سرانجام توسط دستگاه تونل باد مقدار فرسایش نمونه‌های خاک تثبیت نیافته و تثبیت یافته با فناوری MICP تعیین شد (غفاری و زمردیان، ۱۳۹۶).

www.SID.ir

Archive of SID

نمونه‌ای از خاک تثبیت شده در سمت راست و تثبیت نشده در سمت چپ شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳. تصویر راست- نمونه تثبیت شده با فرآیند MICP و تصویر چپ- نمونه تثبیت نشده

نتایج و بحث

بررسی تأثیر زمان نگهداشت و غلظت باکتری بر مقاومت برشی ماسه بادی منطقه جبل‌کندی

تأثیر زمان نگهداشت و غلظت محلول باکتری بر مقاومت برشی، در خاک ماسه بادی منطقه جبل‌کندی در سطح ۱ درصد معنی‌دار بود و همچنین اثرات متقابل زمان و غلظت نیز در سطح ۱ درصد معنی‌دار گردید. بر اساس نتایج شکل ۴، با گذشت زمان از ۳ روز به ۲۸ روز، میزان مقاومت برشی افزایش پیدا کرد که این افزایش در کلیه OD ها مشاهده شد که نشان‌دهنده فعالیت باکتری و عمل سیمانتاسیون در این دوره زمانی است که متوقف نشده و تا زمانیکه شرایط محیطی مساعد بوده و ماده مغذی در اختیار باکتری‌ها بوده این فعالیت ادامه پیدا کرده است به گونه‌ای که مقاومت برشی پس از ۲۸ روز در OD های ۱/۵، ۲ و ۲/۵ به ترتیب برابر ۰/۳۹۸، ۰/۲۵ و ۰/۳۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع بود و این در حالی است که خاک تیمارشده با آب مقطر و همچنین تیمار شده با محلول سیمانتاسیون، هیچ گونه مقاومتی نشان نداده است؛ وجود فضای کافی در خاک و تماس مناسب ذرات خاک با یکدیگر، در تثبیت خاک با استفاده از باکتری بسیار مؤثر است. توزیع ذرات خاک باید به گونه‌ای باشد تا باکتری با اندازه ۰/۵ تا سه میکرومتر، به راحتی در خاک حرکت کند (Mitchell and Santamarina, 2005). بهترین محدوده دانه‌بندی خاک برای رشد و فعالیت باکتری، بین ۵۰ تا ۴۰۰ میکرومتر گزارش شده است (Rebata, 2007). فضای حرکتی همچنین به باکتری این امکان را خواهد داد که بتواند در محیط خاک به طور یکنواخت گسترش یابد در حین اینکه در فضای بین حفره‌ای گیر افتد؛ بنابراین مقایسه بین خصوصیات دانه‌بندی خاک و اندازه باکتری یک فاکتور بسیار مهم در فرآیند رسوب میکروبی کربنات‌کلسیم است.

نتایج نشان داد که در OD برابر ۱/۵ بیشترین مقاومت برشی حاصل شده است؛ بنابراین غلظت بهینه باکتری در شرایط این پژوهش در OD برابر ۱/۵ به دست آمد. غلظت زیاد محلول باکتری به معنای بیشتر بودن تعداد سلول‌های باکتری در محلول است و با افزایش تعداد سلول‌های باکتری آنزیم اوره‌آز بیشتری ایجاد می‌شود و بنابراین اوره موجود در محیط به مقدار بیشتری تجزیه می‌شود که منجر به رسوب بیشتر کربنات‌کلسیم می‌شود؛ اما در صورتیکه شرایط محیطی و مواد مغذی محدود و ثابت باشد افزایش غلظت باکتری، رسوب بیشتر کربنات‌کلسیم را تضمین نمی‌کند چرا که باکتری برای انجام فعالیت متابولیک نیاز به شرایط مساعد محیطی و ماده مغذی بیشتری دارد. نتایج حاصل از مقایسه میانگین در خاک ماسه بادی نشانگر تفاوت معنی‌دار در OD برابر ۱/۵ نسبت به بقیه OD ها و زمان ۲۸ روز نسبت به بقیه زمان‌ها است (جدول ۲).

جدول ۲. نتایج مقایسه میانگین تاثیر غلظت و زمان بر مقاومت برشی ماسه بادی منطقه جبل‌کندی

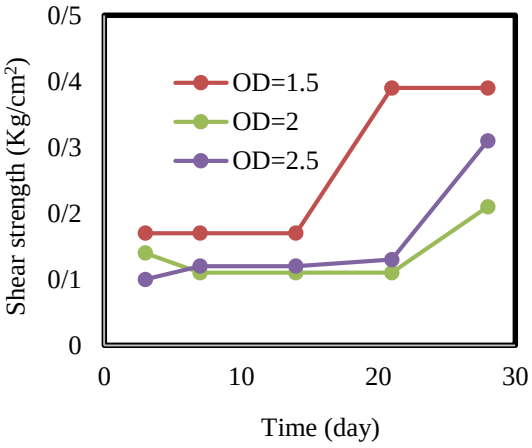
غلظت	۲/۵	۲	۱/۵	–	–
میانگین	۰/۱۵۴۲^{b}	۰/۱۳۸۲^{c}	۰/۲۵۴۳^{a}	–	–
زمان	۲۸	۲۱	۱۴	۷	۳
میانگین	۰/۲۶۹۹^{a}	۰/۱۹۶۷^{b}	۰/۱۳۱۸^{c}	۰/۱۳۱۸^{c}	۰/۱۲۷۲^{c}

میانگین‌هایی که دارای یک حرف لاتین مشترک هستند فاقد تفاوت معنی‌دار به روش دانکن می‌باشند.

www.SID.ir

Archive of SID

Shahrokhi و همکاران (۲۰۱۴) با بررسی تأثیر روش رسوب میکروبی کربنات‌کلسیم بر مقاومت فشاری و هدایت هیدرولیکی دو نوع ماسه با دو دانه‌بندی متفاوت، افزایش ۳/۵ تا ۵ برابری مقاومت خاک و کاهش نفوذپذیری با ضریب 10^{-2} نسبت به نمونه شاهد را مشاهده کردند و به این نتیجه رسیدند که این روش در خاک با دانه‌بندی ریزتر مؤثرتر بوده است و غلظت بهینه باکتری در OD برابر ۱ را مشاهده کردند. Stocks و همکاران (۱۹۹۹) مشاهده کردند که افزایش غلظت باکتری به بیش از 10^{-8}سلول در میلی‌لیتر، باعث کاهش نرخ رسوب کربنات‌کلسیم شده است.



شکل ۴. تغییرات مقاومت برشی ماسه بادی در غلظت‌های مختلف نسبت به زمان، (با گذشت زمان از ۳ روز به ۲۸ روز، میزان مقاومت برشی در کلیه ODها افزایش یافته است)

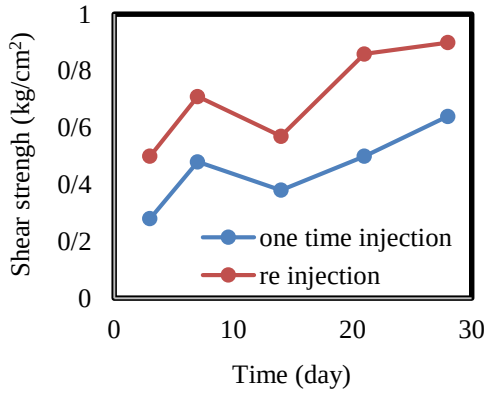
در این حالت محلول باکتری و سیمانتاسیون در OD بهینه و در دو مرحله با فاصله زمانی هفت روز از تزریق اول به خاک ماسه بادی اضافه شد. تأثیر زمان بر مقاومت برشی در سطح ۱ درصد معنی‌دار شد. مقایسه میانگین در خاک ماسه بادی نشان داد که با گذشت زمان مقاومت برشی افزایش پیدا کرده که در کلیه زمانها تفاوت معنی‌دار است (جدول۳). همان‌گونه که در شکل ۵ نشان داده شده تزریق مجدد محلول باکتری و سیمانتاسیون باعث افزایش مقاومت برشی نسبت به حالت یکبار تزریق شده به گونه‌ای که افزایش۶۰ درصد مقاومت برشی در حالت دوبار تزریق نسبت به حالت یکبار تزریق در ۲۸ روز نشان داده شده است.

امین (۱۳۹۴) با بررسی تأثیر روش زیستی رسوب میکروبی کربنات‌کلسیم در فرسایش‌پذیری خاک ماسه‌ای با دستگاه تابع فرسایش، به این نتیجه رسید که تزریق مجدد محلول باکتری و سیمانتاسیون در فاصله زمانی شش روز از تزریق اول باعث عملکرد بهتر تزریق باکتری در کاهش فرسایش‌پذیری ماسه می‌شود؛ بنابراین نحوه توزیع و تزریق باکتری به خاک از فاکتورهای مهم در فرآیند رسوب میکروبی کربنات‌کلسیم است که دو مرحله‌ای بودن تزریق محلول باکتری و سیمانتاسیون در صورتیکه با فاصله زمانی بهینه‌ای به خاک اضافه شود باعث افزایش بازدهی تثبیت بیولوژیکی خاک می‌شود که در این پژوهش نیز مشاهده شد.

جدول ۳. نتایج مقایسه میانگین تاثیر زمان (روز) بر مقاومت برشی ماسه بادی منطقه جبل‌کندی در حالت دوبار تزریق

زمان	۲۸	۲۱	۱۴	۷	۳
میانگین	۰/۶۶^{a}	۰/۵۹۵^{b}	۰/۴۱۹^{c}	۰/۳۸۴^{dc}	۰/۳۵۴۵^{d}

میانگین‌هایی که دارای یک حرف لاتین مشترک هستند فاقد تفاوت معنی‌دار به روش دانکن می‌باشند.



شکل ۵. مقاومت برشی ماسه بادی در حالت تزریق مجدد، (مقاومت برشی در حالت دوبار تزریق نسبت به حالت یکبار تزریق در ۲۸ روز ۶۰ درصد افزایش یافته است)

www.SID.ir

Archive of SID

بررسی تأثیر اضافه کردن رطوبت بر مقاومت برشی ماسه بادی منطقه جبل‌کندی

برای بررسی تأثیر رطوبت اضافه بر میزان فعالیت باکتری، به میزان نصف رطوبت اولیه در محلول باکتری و سیمانتاسیون، به خاک رطوبت اضافه شد. نتایج حاصل از تجزیه واریانس نشان داد که تأثیر زمان نگهداشت و غلظت بر مقاومت برشی در حالت اضافه‌شدن رطوبت به خاک، در سطح ۱ درصد معنی‌دار است و همچنین اثرات متقابل زمان و غلظت در سطح ۱ درصد معنی‌دار شد (جدول۴).نتایج نشانگر افزایش بیشتر فعالیت باکتری و مقاومت برشی در حالت اضافه شدن رطوبت نسبت به شرایطی که رطوبت به خاک اضافه نشده، می‌باشد که در شکل ۶ نشان داده شده است.

همان‌طور که مشخص است در مدت زمان ۱۴ روز پس از اضافه شدن رطوبت، مقاومت خاک روند افزایشی دارد که به دلیل دسترسی بیشتر باکتری به مواد مغذی و انجام فعالیت متابولیک بیشتر است؛ اما پس از ۱۴ روز مقاومت خاک به شدت کاهش پیدا کرده که به دلیل شسته شدن املاح و مواد غذایی و باکتری به اعماق پایین‌تر خاک است که باعث ایجاد پدیده سیمانتاسیون در اعماق پایین‌ترخاک و کف ظرف می‌شود. مقایسه میانگین در ماسه بادی نشان داد که در زمان‌های موجود و در OD های استفاده شده، تفاوت آماری موجود در میزان مقاومت، معنی‌داراست و بیشترین مقاومت ایجاد شده در OD برابر ۱/۵ به دست آمده که از لحاظ آماری دارای تفاوت معنی‌دار نسبت به بقیه OD ها است. بنابراین وجود رطوبت درخاک باعث فعالیت بیشتر باکتری و افزایش رسوب کربنات‌کلسیم است.

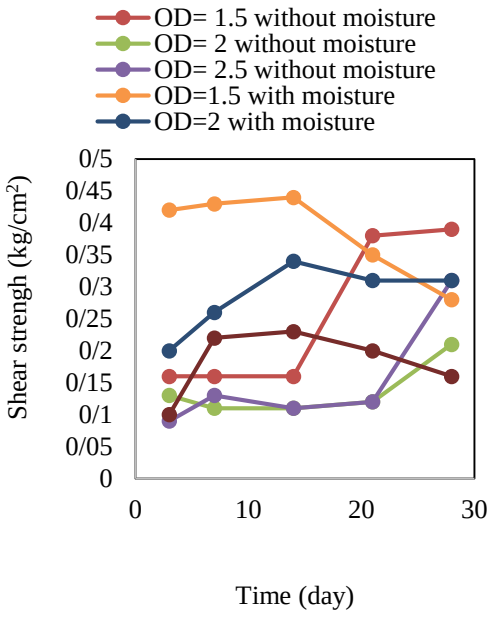
بررسی تأثیر شرایط محیطی بر فعالیت باکتری

برای بررسی میزان فعالیت باکتری و عمل سیمانتاسیون در شرایط واقعی بیرون از آزمایشگاه، محلول باکتری و سیمانتاسیون در OD بهینه برابر ۱/۵ روی خاک ماسه بادی استریل نشده اسپری شد و در محیط بیرون آزمایشگاه و در سایه، تحت شرایط دما و رطوبت متغیر، با شروع زمان نگهداشت در آذرماه، به مدت ۱۱۰ روز نگهداری شد.

جدول۴. نتایج مقایسه میانگین تاثیر غلظت و زمان بر مقاومت برشی ماسه بادی منطقه جبل‌کندی در حالت اضافه شدن رطوبت

غلظت	۱/۵	۲	۲/۵	۱	–
میانگین	۰/۳۸۷۱^{a}	۰/۲۸۶۵^{b}	۰/۱۸۲۸^{c}	۰/۱۶۵۱^{d}	–
زمان	۱۴	۷	۲۱	۳	۲۸
میانگین	۰/۳۰۵^{a}	۰/۲۸۰۳^{b}	۰/۲۴۹۸^{c}	۰/۲۲۳۵^{d}	۰/۲۱۸۵^{d}

میانگین‌هایی که دارای یک حرف لاتین مشترک هستند فاقد تفاوت معنی‌دار به روش دانکن می‌باشند.



شکل۶. تاثیر اضافه شدن رطوبت بر مقاومت برشی ماسه بادی، (افزایش فعالیت باکتری و مقاومت برشی در حالت اضافه شدن رطوبت تا ۱۴ روز در تمامی ODها و بیشترین افزایش در OD برابر ۱/۵)

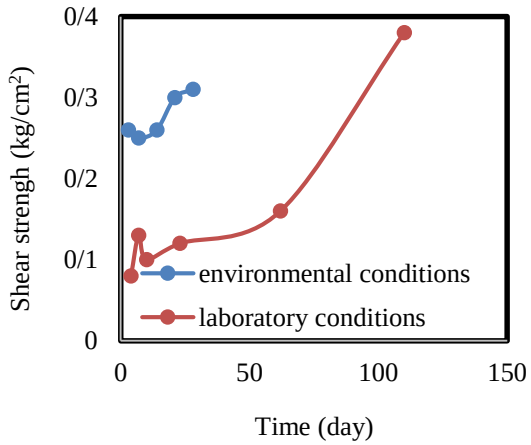
www.SID.ir

Archive of SID

تحلیل آماری نشان داد که تأثیر زمان بر مقاومت برشی در سطح ۱ درصد معنی‌دار است. همان‌گونه که در شکل ۷ نشان داده شده در فصل سرد سال به علت پایین بودن دما، مقاومت برشی با نرخ نسبتاً پایینی در حال افزایش است اما با مساعد شدن دما، مقاومت خاک با نرخ بیشتری افزایش پیدا کرده که در مقایسه با مقاومت برشی ۲۸ روزه در شرایط آزمایشگاهی میزان کمتری به دست آمده است. تشکیل قطرات شبنم در این شرایط نقطه مثبتی در جهت فعالیت بیشتر باکتری به جهت تأمین رطوبت است؛ بنابراین نتایج نشانگر عملکرد خوب پدیده بیوسیمانتاسیون در شرایط واقعی است به گونه‌ای که پس از ۱۱۰ روز مقاومت خاک به ۰/۴ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع رسیده است. مقایسه میانگین نشان داد که میزان مقاومت حاصل پس از مدت زمان ۱۱۰ روز، نسبت به بقیه زمان‌ها از لحاظ آماری دارای تفاوت معنی‌دار است اما در غالب زمانها تفاوت معنی‌دار مشاهده نشد که می‌تواند ناشی از خطاهای موجود در آزمایش و نوسانات دمایی در این دوره زمانی باشد که در جدول ۵ مشاهده شد. نمونه خاک‌ها در تونل باد با محدودیت ماکزیمم سرعت باد ۱۵ متر بر ثانیه مورد مطالعه قرار گرفت که سرعت آستانه فرسایش نمونه شاهد بدون باکتری، ۶/۷ متر بر ثانیه به دست آمد و نمونه‌های تثبیت‌یافته با باکتری در سرعت ماکزیمم تونل باد استفاده شده دچار فرسایش نشدند. در صورتیکه سرعت باد در بیابان از مقدار هشت متر بر ثانیه بیشتر شود بسته به زبری سطح، رطوبت، پوشش گیاهی، بافت خاک و غیره، فرسایش صورت می‌گیرد و منجر به تولید گرد و غبار می‌شود (Xuan *et al.*, 2004). بنابراین با توجه به اینکه سرعت معیار باد، هشت متر بر ثانیه ذکر شده است، بنابراین تثبیت بیولوژیکی خاک از طریق فرآیند رسوب میکروبی کربنات‌کلسیم با استفاده از باکتری، گزینه‌ای مناسب برای مقابله با بیابان‌زدایی و حرکت شن‌های روان پیشنهاد می‌شود و می‌تواند جایگزینی مناسب برای انواع مالچ‌ها و دیگر روش‌های تثبیت باشد که از لحاظ زیست‌محیطی، اجرایی و اقتصادی دارای یکسری محدودیتها و مشکلات هستند. بررسی میزان فرسایش‌پذیری خاک تثبیت یافته با اینگونه روش بیوسیمانتاسیون در مقاومت‌های مختلف در تونل باد با سرعت بیشتر و ارتباط بین میزان مقاومت و فرسایش‌پذیری توصیه می‌شود. همچنین مطالعات میدانی جهت شناخت و بررسی بیشتر این روش و شبیه‌سازی دمای بیابان که حداکثر ۶۰ درجه سانتیگراد گزارش شده است در میزان فعالیت باکتری و مقاومت خاک، توصیه می‌شود (Al Qabany, 2011).

جدول۵. نتایج مقایسه میانگین تاثیر زمان (روز) بر مقاومت برشی ماسه بادی منطقه جبل‌کندی در شرایط محیطی

زمان	۱۱۰	۶۳	۷	۱۴	۱۰	۴
میانگین	۰/۳۷۹^{a}	۰/۱۵۹۲^{b}	۰/۱۳۵^{bc}	۰/۱۲۸۴^{bc}	۰/۱۰۸۳^{cd}	۰/۰۸۸^{d}



شکل ۷. مقایسه مقاومت برشی ماسه بادی تثبیت یافته در شرایط آزمایشگاه و شرایط محیطی، (شروع آزمایش در آذر ماه و به مدت ۱۱۰ روز بود که در فصل سرد به علت پایین بودن دما، مقاومت برشی با نرخ نسبتاً پایینی افزایش یافته اما با مساعد شدن دما، نرخ افزایش بیشتر شده است)

نتیجه‌گیری

کاربرد بیوسیمانتاسیون باعث افزایش مقاومت برشی وابسته به زمان در ماسه بادی نسبت به نمونه شاهد شد و

www.SID.ir

Archive of SID

در این تحقیق، مهار فرسایش بادی با بررسی مقاومت سطحی ماسه بادی تثبیت‌یافته با فرآیند رسوب میکروبی کربنات‌کلسیم در منطقه جبل‌کندی دریاچه ارومیه ارزیابی شد. باکتری تولیدکننده آنزیم اوره‌آز، باسیلوس پاسته اوری با قابلیت رسوب‌زایی در منافذ خاک بود و محیط صنعتی عصاره ذرت برای کشت این باکتری استفاده شد. برای بررسی میزان اثرگذاری باکتری، از مقاومت برشی خاک با دستگاه برش پره‌ای استفاده شد. پارامترهای مورد بررسی شامل غلظت باکتری، زمان نگهداشت، اثر تزریق مجدد با فاصله زمانی هفت روز، تأثیرشرایط محیطی بر عملکرد باکتری و میزان مقاومت سطحی بودند.

بیش‌ترین تأثیر غلظت محلول باکتری بر مقاومت برشی در OD برابر ۱/۵ به دست آمد. در حالت دو بار تزریق با فاصله زمانی هفت روز مقاومت افزایش بیشتری نسبت به حالت یکبار تزریق، داشت به گونه‌ای که در OD بهینه در مدت زمان ۲۸ روز، در ماسه بادی مقاومت به اندازه ۶۰ درصد نسبت به حالت یکبار تزریق افزایش داشت. در حالت یکبار تزریق و همچنین تزریق مجدد، در مدت زمان بیشتر از ۲۱ روز نرخ افزایش مقاومت در خاک کاهش پیدا کرد که می‌تواند به دلیل نداشتن آزادی حرکت میکروارگانیسم به جهت تشکیل کریستالهای کربنات‌کلسیم و در دسترس نبودن مواد مغذی جهت فعالیت باشد؛ بنابراین مدت زمان بهینه ۲۱ روز پیشنهاد می‌شود. با اضافه شدن رطوبت، مقادیر مقاومت برشی افزایش می‌یابد که به دلیل در دسترس قرار گرفتن مواد مغذی توسط باکتری و انجام فعالیت بیشتر است؛ اما در مدت زمان بیشتر از ۱۴ روز از اضافه کردن رطوبت مقاومت در برابر برش به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد که می‌تواند به دلیل شسته شدن املاح و مواد غذایی و باکتری به اعماق پایین‌تر خاک باشد. تثبیت بیولوژیکی خاک می‌تواند به عنوان روشی مناسب در جهت کاهش فرسایش بادی و کنترل ریزگرد به کار گرفته شود. البته مطالعات گسترده و همه جانبه در مقیاس بزرگ‌تر به منظور بررسی چالش‌ها در اجرا پیشنهاد می‌شود.

منابع مورد استفاده

افیونی، م.، مجتبی پور، ر. و نوربخش، ف. ۱۳۷۶. خاک‌های شور و سدیمی. انتشارات ارکان، دانشگاه تهران، ۳۲۰ ص.

احمدی، ح.، اختصاصی، م.ر.، فیض نیا، س. و قانعی بافقی، م.ج. ۱۳۸۱. بررسی روش‌های کنترل فرسایش بادی برای حفاظت راه آهن مطالعه موردی: منطقه بافق. مجله منابع طبیعی ایران، ۵۵ (۳): ۳۴۲-۳۲۷.

امین، م. ۱۳۹۴. تاثیر دوغاب در کنترل نرخ فرسایش ماسه‌ها. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران.

عزیزی، غ.، صفرزاده، ت.، محمدی، ح. و فرجی سبکبار، ح. ۱۳۹۵. ارزیابی و مقایسه پردازش مجدد داده‌های نفوذ در ایران. مجله تحقیقات ژئوگرافی فیزیکی، ۴۸ (۱): ۴۹-۳۳.

غفاری، ح. و زمردیان، م. ۱۳۹۶. بررسی مقاومت برشی خاک تثبیت یافته با روش میکروبیولوژی. مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۴۸ (۴): ۷۴۸-۷۳۷.

حسینی موغاری، م.، عراقی نژاد، ش. و ابراهیمی، ک. ۱۳۹۶. بررسی دقت اطلاعات بارش شبکه‌بندی شده جهانی در حوضه دریاچه ارومیه. مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۴۸ (۳): ۵۹۸-۵۸۷.

www.SID.ir

Archive of SID

کاظمی، م. ۱۳۹۳. بررسی پارامترهای تأثیرگذار بر تثبیت بیولوژیکی خاک‌های ریزدانه با استفاده از ریزجلبک (Microalgae chlorella vulgaris). پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران.

ملکی کاکلر، م.، ابراهیمی، س.، اسدزاده، ف. و امامی تبریزی، م. ۱۳۹۵. ارزیابی کارایی رسوب میکروبی کربنات برای تثبیت شن‌های روان. مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۴۷ (۲): ۴۰۷-۴۱۵.

مطلبی، آ. ۱۳۹۲. دلایل تجمع نمک در خاکها و ضرورت پاکسازی خاک‌ها در ایران. مجله نمک، ۱ (۲): ۸۶-۷۵.

موحدان، م.، عباسی، م. و کرامتی، م. ۱۳۹۰. بررسی آزمایشگاهی تأثیر پلیمر پلی وینیل استات بر کنترل فرسایش بادی خاک‌ها. نشریه آب وخاک، ۲۵ (۳): ۶۰۶-۶۱۶.

Al Qabany, A. 2011. Microbial Carbonate Precipitation in Soils. Ph.D. Dissertation, University of Cambridge, UK.

Armbrust, D., and Dickerson, J. 1971. Temporary wind erosion control: cost and effectiveness of 34 commercial materials. Soil and Water Conservation Journal, 26: 154-157.

Bang, S., Min, S.H., and Bang, S.S. 2011. Application of Microbiologically Induced Soil Stabilization Technique for Dust Suppression. Geo-Engineering Journal, 3: 27-37.

Cheshomi, A., and Mansouri, S. 2018. Improving the Shear Strength of Quartz Sand using the Microbial Method.Geomicrobiology Journal, 35: 6123-6131.

DeJong, J.T. 2010. Bio-mediate soil improvement. Ecological Engineering Journal, 36: 197-210.

Diouf, B., Skidmore, E., Layton, J., and Hagen, L. 1990. Stabilizing fine sand by adding clay:laboratory wind tunnel study. Soil Technology Journal, 3: 21-31.

Fujita, Y., Taylor, J. L., Wendt, L. M., Reed, D. W., and Smith, R. W. 2010. Evaluating the potential of native ureolytic microbes to remediate a 90Sr contaminated environment. Environmental Science &Technology Journal, 44: 7652-7658.

He J.J., Cai, Q.G., and Tang, Z.J. 2008. Wind tunnel experimental study on the effect ofPAM on soil wind erosion control.Environmental Monitoring and Assessment Journal, 145: 185-193.

Mitchell, J.K., and Santamarina, J.C. 2005. Biological considerations in geotechnical engineering. Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Journal, 131: 1222–1233.

Rebata, V. 2007. Microbial Activity in Sediments:Effects on Soil Behavior. Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA, USA, 252 pp.

Shahrokhi, R., Zomorodian, S.M.A., Niazi, A., and O'Kelly, B.C. 2014. Improving sand with Microbial-Induced Carbonate Precipitation. Proceedings of the Institution of Civil Engineers Journal, 168: 217- 230.

Stocks, S., Galinat, J.K., and Bang, S.S. 1999. Microbiological Precipitation of CaCO3. Soil Biology and Biochemistry Journal, 31: 1563-1571.

Tiano, P., Biagiotti, L., and Mastromei, G. 1999. Bacterial bio-mediated calcite precipitation for monumental stones conservation: methods of evaluation. Microbiological Methods Journal, 36: 139-145.

van Paassen, L. A., Ghose, R., van der Linden, T. J., van der Star, W. R., and van Loosdrecht, M. C. 2010. Quantifying biomediated ground improvement by ureolysis: large-scale biogrout experiment. Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Journal, 136: 1721-1728.

Whiffin, V.S., van Paassen, L.A., and Harkes, M.P. 2007. Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique. Geomicrobiology Journal, 24: 417-423.

Wiktor, V., and Jonkers, H. M. 2011. Quantification of crack-healing in novel bacteria-based self-healing concrete. Cement and Concrete Composites Journal, 33: 763-770.

Xuan, J., Sokolik, I., Hao, J. and Guo, F. 2004. Identification and characterization of source of atmospheric mineral dust in East Asia. Atmospheric Enviromental Journal, 38: 6239-6252.

www.SID.ir

Archive of SID

Yu, X., Qian, C., and Sun, L. 2018. The influence of the number of injections of bio-composite cement on the properties of bio-sandstone cemented by bio-composite cement. Construction and Building Materials Journal, 37: 6229-6233.

www.SID.ir

Archive of SID

ISSN 2251-7480

Evaluation of Efficiency of Microbial-Induced Carbonate Precipitation on Surface Strength of Jabalkandi Dune Sand

Farzaneh Douzali Joushin[1], Kazem Badv[2*], and Mohsen Barin[3]

1) Ph.D. Student of Geotechnical Engineering, Department of Civil Engineering, Urmia University, Urmia, Iran.
2[*]) Professor of Geotechnical Engineering, Department of Civil Engineering, Urmia University, Urmia, Iran.
[*]Corresponding author email: k.badv@urmia.ac.ir
3) Assistant Professor of Soil Science, Department of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran.

Received: 02-07-2019 Accepted: 03-02-2020

Abstract

By approaching towards Urmia Lake, the potential source of sand dust originating from the sand dunes can be clearly observed. Wind erosion causes soil and environmental degradation. The high cost of petroleum mulches and their destructive effects on the environment have led to the use of environmentally friendly and cheaper materials. In this study, the control of surface erosion of sand dust in the Jabalkandi region has been investigated by enhancing its surface strength by microbial-induced carbonate precipitation. An aerobic sporosarcinapasteurii bacteria, which exists pervasively in natural soil deposits was utilized to control soil erosion. The industrial corn extract has been used to cultivate this bacterium. To evaluate the effect of bacteria, the undrained shear strength of the soil was measured using insitu vane shear apparatus. The evaluated parameters included the bacteria concentration, retention time, effect of double injection with 7 days delay period, effect of environmental conditions on the bacteria functionality and the rate of gain of surface strength. The results showed improvement of the soil shear strength with time. The resulted maximum soil shear strength was 0.65 kg/cm2. The results indicated that the reinjection of the bacteria solution and cementation resulted in 60 percent extra surface strength gain of the soil compared to one time injection.

Keywords: Wind erosion, Jabalkandi sand, Microbial stabilization, Corn extract, Surface strength

www.SID.ir