

ارزیابی کارایی روش سیمانی سازی زیستی در مقاوم سازی ماسه های روان به منظور مقابله با فرسایش بادی

حمیده غفاری^{۱*}، سید محمدعلی زمردیان^۲

۱. دانش آموخته کارشناسی ارشد سازه های آبی، دانشگاه شیراز

۲. دانشیار بخش مهندسی آب، دانشگاه شیراز

hamideh.ghaffari@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۹۹/۱۲/۲۷

تاریخ دریافت: ۹۹/۰۷/۱۶

چکیده

فرسایش بادی و به دنبال آن پدیده ریزگرد با وجود همه راهکارهای مقابله با آن، امری اجتناب ناپذیر است. بنابراین بررسی و بکارگیری روش های نوین برای مقابله با این پدیده طبیعی که بیشتر منشأ فرامنطقه ای دارد باید بیشتر مورد توجه واقع گیرد. در همین ارتباط در این پژوهش از یک روش نوین و سازگار با محیط زیست که از باکتری های موجود در خاک به منظور بهبود خواص فیزیکی خاک استفاده می کند بهره گرفته شده است. بنابراین از گونه ای خاص باکتری با نام علمی *Sporosarcina Pasteurii*، با قابلیت تولید آنزیم اوره آز که موثر در فرآیند رسوب میکروبی کربنات کلسیم است، به بررسی میزان مقاومت فشاری خاک در برابر فرسایش بادی پرداخته شد. در همین راستا، از یک دستگاه نفوذسنج جیبی به منظور کمی سازی میزان مقاومت فشاری خاک، و همچنین یک دستگاه تونل باد، به منظور شبیه سازی میزان فرسایش پذیری گونه های خاک در طیف وسیعی از سرعت باد (با دامنه 1-20m/s) استفاده شد. به منظور در نظر گرفتن شرایط فیزیکی و شیمیایی خاک بر میزان بازدهی این روش، از دو گونه خاک ماسه سیلیسی با دانه بندی متفاوت و همچنین یک گونه خاک ماسه ای با منشا کربناته استفاده شده است. پارامترهای مورد بررسی شامل زمان های نگهداشت 3، 7، 14، 20 و 28 روز، تزریق مجدد محلول باکتری و سم تاسیون با فاصله زمانی 6 روز و همچنین تأثیر شرایط محیطی بر میزان اثرگذاری باکتری در خاک است. همچنین از آزمایش SEM برای بررسی ریزساختاری خاک ها قبل و بعد از بهسازی استفاده شد. نتایج حاصل از بکارگیری دستگاه نفوذسنج نشان داد که مقاومت فشاری خاک به صورت معنادار با زمان افزایش می یابد که بیشترین مقاومت در ماسه کربناته به میزان 84 kPa حاصل شد. ماسه سیلیسی با توزیع دانه بندی ریزتر مقاومت فشاری بیشتری نسبت به گونه دیگر آن نشان داد. همچنین این نتایج نشان داد که تزریق مجدد، تأثیر افزاینده ای به صورت معنادار در مقاومت فشاری خاک به ویژه در ماسه سیلیسی به اندازه 190% در دوره 28 روزه دارد. نتایج حاصل از شبیه سازی میزان فرسایش در دستگاه تونل باد نشانگر عملکرد بسیار مناسب این روش در بهسازی خاک و ایجاد لایه مقاوم سطحی نسبت به فرسایش است به گونه ای که هیچ گونه فرسایشی در دامنه سرعت های موجود مشاهده نشد.

واژگان کلیدی: فرسایش بادی، *Sporosarcina Pasteurii*، مقاومت فشاری، نفوذسنج جیبی

1. gh.hamideh1987@gmail.com

2. mzomorod@shirau.ac.ir

۱. مقدمه

فرسایش بادی خاک و پدیده ریزگرد ناشی از آن، از بزرگ‌ترین مشکلات اجتماعی و اقتصادی در بسیاری از مناطق جهان به حساب می‌آید. این گونه فرسایش از غالب‌ترین نوع فرسایش در مناطق خشک و نیمه‌خشک به شمار می‌آید [1, 2]. تاکنون روش‌های کنترلی بسیاری توسط پژوهشگران مورد بحث و بررسی قرار گرفته است که شامل اضافه کردن انواع مالچ‌های آلی، نفتی، پلیمری، پلاستیکی، استفاده از سیمان، آهک، مواد شیمیایی، آب، نمک و غیره است. هر یک از این روش‌ها به نوعی باعث ایجاد یک سری محدودیت‌ها و اشکالات در زمینه‌های اجرایی، اقتصادی و زیست‌محیطی می‌شوند [3]. بنابراین ضروری است که از جایگزینی مناسب زیستی استفاده شود که علاوه بر رفع محدودیت‌های تثبیت‌کننده‌های موجود، از میزان اثربخشی بالایی نیز برخوردار باشد و شرایط ایجاد تعادل و پایداری در محیط‌زیست خاک را نیز فراهم نماید. مقاوم‌سازی زیستی خاک یکی از روش‌های در حال توسعه برای بهسازی خاک است که با ایجاد شرایط مناسب در خاک و زمینه‌سازی رشد و توسعه فضای زیستی، میکروارگانیسم‌های غیر بیماری‌زایی که به طور طبیعی در محیط خاک یافت می‌شوند را فعال و رشد می‌دهد که اساس آن بر پایه تولید میکروبی رسوب بلورهای کربنات کلسیم بر پایه ماده معدنی و پلی ساکاریدها بر پایه ماده آلی در خاک است که مانند چسب عمل می‌کنند و با ایجاد چسبندگی در بین دانه‌های خاک عملکرد فیزیکی و مکانیکی خاک را بهبود می‌بخشند [4]. این روش از دل طبیعت شناخته و بیرون کشیده شده است ولی با فراهم نمودن شرایط مطلوب در محیط آزمایشگاه، سرعت انجام این فرآیند بهبود بخشیده می‌شود. پرکاربردترین روش در بیوژئوتکنولوژی رسوب میکروبی کلسیت است که از باکتری‌های هیدرولیز کننده اوره استفاده می‌شود. از غالب‌ترین نوع این باکتری‌ها، باسیلوس اسفاریکوس و باسیلوس پاستوری است [5]. در واقع این باکتری‌ها با تولید آنزیمی به نام اوره‌آز، اوره موجود در محیط را تجزیه می‌کنند و به آمونیوم، کربنات‌ها و بی‌کربنات‌ها تبدیل می‌نمایند که در صورت وجود یون کلسیم در محیط، با یون‌های کربنات پیوند می‌خورد و منجر به رسوب

کلسیم کربنات در منافذ خاک می‌شود. این کریستال‌ها مانند چسب عمل کرده و با متصل کردن ذرات خاک، خواص مکانیکی خاک را تغییر می‌دهند [6, 7]. در واقع این باکتری‌ها با افزایش pH محیط، شرایط مساعدی را برای رسوب‌گذاری کلسیت ایجاد می‌کنند [8] که فرآیند آن به صورت شماتیک در شکل (۱) نشان داده شده است. تاکنون پژوهشگران بسیاری این پدیده را مورد بررسی قرار داده‌اند و روی انواع موارد کاربرد آن از جمله پدیده انسداد زیستی، سیمانی شدن زیستی و پاکسازی زیستی و غیره، مطالعات زیادی صورت گرفته است و نتایج مطلوبی نیز گزارش شده است. از جمله کاربرد در افزایش مقاومت برشی خاک [9, 10] کاهش هدایت هیدرولیکی خاک [11, 12] کاهش پتانسیل روانگرایی خاک [13]، بهبود بتن [14] و افزایش مقاومت در برابر فرسایش بادی [15, 16] را می‌توان اشاره کرد. تعدادی از پژوهشگران نیز در مطالعات خود از دستگاه نفوذسنج برای بررسی مقاومت فشاری خاک استفاده کرده‌اند. از جمله، به منظور سنجش مقاومت سطحی خاک ماسه‌ای تثبیت شده با ماده پلیمری وینیل استات [17]، خاک ماسه‌ای تثبیت شده با ماده پلی اکریلامید [18]، مقاومت فشاری محدود نشده خاک [19] و سنجش تراکم خاک [20] از این دستگاه استفاده شده است. در این پژوهش از باکتری هیدرولیز کننده اوره با نام علمی *Sporosarcina Pasteurii* یا باسیلوس پاستوری، برای ارزیابی روش سیمانی‌سازی زیستی در بهبود مقاومت فشاری خاک استفاده شده است. مطالعات زیادی در دو دهه اخیر توسط پژوهشگران روی ارزیابی خواص مقاومت خاک با بکارگیری تزریق باکتری صورت گرفته است و هرکدام به نوعی کارایی این روش را در افزایش مقاومت خاک تایید نموده‌اند از جمله، زمردیان و همکاران با مطالعه روش تزریق باکتری در ایجاد لایه مقاوم سطحی خاک، بهبود مقاومت برشی لایه سطحی خاک ماسه سیلیسی ریزدانه و همچنین ماسه کربناته را در برابر فرسایش بادی گزارش دادند [9]. شریفی اسدی و همکاران به بررسی میزان مقاومت تک محوری و مدول الاستیسیته ستون خاک با درصد‌های متفاوت سیلت، با در نظر گرفتن درجه تراکم پرداختند که نتایج آن‌ها حاکی از افزایش مقاومت تک محوری و همچنین

با استفاده از تونل باد مورد مطالعه قرار گرفته است. لازم به ذکر است با توجه به زنده و پویا بودن میکروارگانیسم، علاوه بر اینکه سوالات و ابهامات پیچیده‌تر است، شناخت فرآیند زیستی و بررسی پارامترهای مؤثر بر آن در شرایط مختلف و بررسی همه جانبه آن برای کاربری بیشتر و بومی‌سازی این علم نوین در کشور، به جای استفاده از روش‌های مرسوم و سنتی که اضافه بر هزینه‌های گزاف، برهم زدن و اختلال در محیط زیست را به دنبال دارند، ضرورت مطالعات بیشتر و بیشتر را می‌طلبد. که این پژوهش در همین راستا صورت پذیرفته است.

شکل ۱. فرآیند رسوب میکروبی کلسیت با ساروکار هیدرولیز اوره [6]

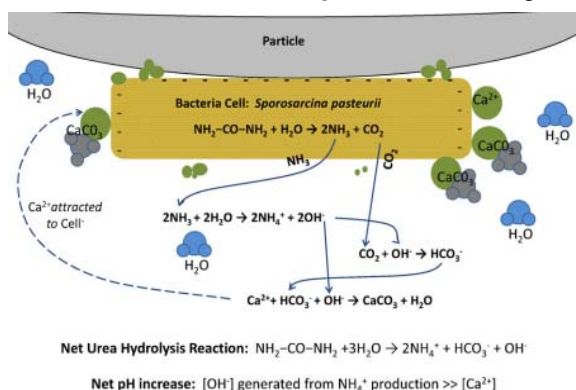


Fig. 1. Microbial-induced carbonate precipitation (MICP) process with urea hydrolysis mechanism [6]

۲. مواد و روش‌ها

۲.۱ آماده‌سازی محیط کشت باکتری

در این پژوهش از باکتری Sporosarcina Pasteurii استفاده شد. سویه این باکتری از مرکز کلکسیون قارچ ایران به صورت لیوفیلیزه تهیه شده است. به منظور بهره‌گیری از این باکتری ابتدا باید سویه آن در محیط آزمایشگاه فعال شود. بنابراین از محیط کشت مناسب به صورت مایع، حاوی ۲۰ گرم بر لیتر عصاره مخمر و ۱۰ گرم بر لیتر آمونیوم کلراید با اضافه کردن آب مقطر استفاده شده است که با اضافه کردن پتاسیم هیدروکسید به محلول و استفاده از دستگاه pH سنج، pH محلول در مقدار 8.5 تنظیم شد [24]. میزان بهینه فعالیت آنزیم اوره آز در pH=8.5 گزارش شده است [25]. پس از استریل کردن محیط کشت در دستگاه اتوکلاو به مدت ۲۰ دقیقه در دمای ۱۲۰ درجه

مدول الاستیسیته به ویژه در خاک با درصد بیشتر ریزدانه است همچنین تاثیر منفی تراکم را در رسوب کلسیت را گزارش دادند [21]. خالقی و روشن ضمیر عملکرد بهتر کشت مختلط در مقایسه با کشت منفرد میکروارگانیسم‌ها را در افزایش مقاومت تک محوری خاک و کاهش نفوذپذیری آن گزارش دادند [22]. رجبی‌اگره و همکاران کارایی بالای باکتری‌های تولید کننده آنزیم اوره‌آز به ویژه دو گونه *Bacillus infantis* و *Paenibacillus sp.* را در ایجاد لایه مقاوم سطحی و تثبیت ذرات سطح خاک در برابر فرسایش بادی را گزارش دادند [23]. بررسی پایداری، دوام و مقاومت مکانیکی پوسته سطحی خاک بهسازی شده در این گونه روش تثبیت، در برابر عوامل فرساینده و تأثیرگذار به دلیل استفاده از میکروارگانیسم‌های زنده و پویا، به جای استفاده از مالچ‌های زیست تخریب‌پذیر و موقتی، از اهمیت به سزایی برخوردار است که در مطالعات گذشته کمتر به آن پرداخته شده است. چرا که پایداری این گونه روش‌ها در برابر عوامل خارجی و دوام آن‌ها با گذشت زمان از موارد تضمین‌کننده اقتصادی و اجرایی بودن آن‌ها محسوب می‌شود که باید حداقل برابر با طول مدت پروژه باشد. در همین راستا در این پژوهش سعی شده است که به عنوان نوآوری، با مطالعه پارامترهای تأثیرگذار زمان نگهداشت متغیر (۳، ۷، ۱۴، ۲۰ و ۲۸ روز)، غلظت 0.5 مولار محلول سم‌تاسیون و تعداد خاص باکتری، استفاده از گونه‌های خاص خاک ماسه‌ای با دانه‌بندی و منشأ شکل‌گیری متفاوت، شیوه خاص تزریق محلول باکتری و سم‌تاسیون به صورت همزمان و بدون فاصله زمانی و همچنین بررسی تزریق مجدد آن‌ها، میزان اثربخشی میکروارگانیسم در مقاوم‌سازی خاک مورد بررسی قرار گیرد. موارد ذکر شده تحت شرایط کنترل شده آزمایشگاهی و با بهره‌گیری از دستگاه ژرمیناتور (دما و رطوبت ثابت، خاک استریل) و مقایسه با شرایط طبیعی (دما و رطوبت متغیر و خاک استریل نشده) انجام پذیرفته است که می‌تواند نوآوری دیگر این پژوهش باشد. در نهایت در این پژوهش با بررسی مقاومت فشاری لایه سطحی مقاوم ایجاد شده، با استفاده از دستگاه نفوذسنج جیبی، پایداری آن‌ها در برابر فرسایش بادی

هرگونه چسبندگی، مواد شیمیایی و همچنین دارای دانه بندی یکنواخت هستند که تفاوت آن ها در دانه بندی و توزیع اندازه ذرات است به گونه ای که ماسه سیلیسی t90 دارای توزیع دانه بندی ریزتری است. این خاک ها از معادن ماسه چپروک طبس تهیه شده است. ماسه کربناته دارای ۶۰٪ کربنات کلسیم و از ناحیه ای در منطقه خورموج در استان بوشهر که منطقه ای بحرانی از لحاظ فرسایش بادی است، تهیه شد. مشخصات مربوط به هر سه گونه خاک در جدول (۲) ارائه شده است و منحنی دانه بندی خاک ها در شکل (۲) مشاهده می شود. با توجه به این شکل محدوده اندازه دانه ها در ماسه t60 و t90 به ترتیب 0.125-0.5 و 0.075-0.85 میلی متر و متوسط اندازه ذرات (D50) به ترتیب 0.28 و 0.24 میلی متر است. بنابراین ماسه t60 دارای اندازه دانه درشت تری نسبت به t90 است. لازم به ذکر است که بر اساس استاندارد BS5930 [28] هر دو گونه خاک در طبقه بندی ماسه متوسط قرار دارند. ماسه کربناته دارای محدوده دانه بندی 0.001-0.85 میلی متر (۱٪ رس، ۴٪ سیلت و ۹۵٪ ماسه ریز و متوسط) و D₁₀ برابر 0.08 میلی متر است. بنابراین تقریباً در رده ماسه سیلتی طبقه بندی می شود. از دلایل استفاده از خاک کربناته بررسی بازدهی روش بیوسمنتاسیون در حضور کلسیم موجود در خاک و مقایسه با ماسه سیلیسی و همچنین امکان استفاده از این روش در بیابان زدایی منطقه است. با توجه به این که هدف پژوهش بررسی امکان تثبیت ماسه های روان موجود در مناطق بیابانی است بنابراین هر سه گونه خاک از نوع ماسه انتخاب شده است.

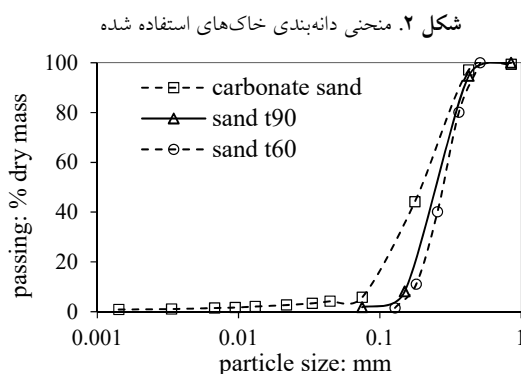


Fig. 2. Grading curves for the test sands

سانتی گراد، محلول باکتری مورد نظر ابتدا به حدود ۲۰ سانتیمتر مکعب محیط کشت اضافه و برای هوادهی و رشد مطلوب به مدت ۴۸ ساعت در دستگاه شیکرانکوباتور با سرعت ۱۵۰ دور در دقیقه در دمای 28.5 درجه سانتی گراد نگهداری شد. به منظور اطمینان از رشد باکتری از دستگاه اسپکتوفتومتر استفاده می شود. در واقع این دستگاه تعداد کل سلول های باکتری و یا مقدار دانسیته نوری (Optical Density) که عددی بی بعد است و به صورت OD₆₀₀ نشان داده می شود را در طول موج ۵۸۰ تا ۶۰۰ نانومتر گزارش می دهد. محلول باکتری رشد یافته در یخچال تا زمان استفاده نگهداری شد. به منظور استفاده از محلول باکتری در تثبیت خاک، باکتری فعال شده را به محیط کشت در ظروف بزرگ تر انتقال و رشد داده شد و بلافاصله پس از رسیدن به غلظت مورد نظر به سطح خاک اضافه شد. در این پژوهش از OD₆₀₀ برابر با 1.5 استفاده شده است. به منظور فراهم نمودن شرایط مساعد محیطی و مواد مغذی برای رشد باکتری در خاک و عمل سمونتاسیون، از اوره به همراه کلسیم کلراید، سدیم بیکربنات، آمونیوم کلراید و نوترینت براث به صورت محلول استفاده شد [24]. به این صورت که ابتدا محلول اوره با استفاده از فیلتر با قطر چشمه ۰/۲۲ میکرون استریل (اوره در دستگاه اتوکلاو تجزیه می شود) و سپس با تهیه محلول بقیه مواد ذکر شده و استریل کردن آن ها در دستگاه اتوکلاو، اوره به محلول مورد نظر اضافه و تا زمان استفاده در یخچال نگهداری شد. غلظت مواد اضافه شده در جدول (۱) ارائه شده است. روش به کار گرفته شده در این پژوهش بر اساس مطالعات ویفن و همکاران [26] است. بر اساس رابطه ارائه شده توسط [27] که در ادامه ذکر شده است، تعداد سلول های زنده باکتری در OD₆₀₀ برابر ۱/۵، برابر با 1.49×10^8 سلول در میلی لیتر است.

$$Y = 8.59 \times 10^7 \times OD_{600}^{1.3627} \quad ۱.$$

y: غلظت باکتری ($\frac{\text{cells}}{\text{ml}}$)

۲-۲ خاک های استفاده شده

در این پژوهش از دو گونه خاک ماسه با منشأ سیلیسی و همچنین گونه ای دیگر با منشأ کربناته استفاده شده است. دو ماسه سیلیسی t60 و t90 (نامگذاری مطابق با استاندارد کارخانه است) بدون

جدول ۱. غلظت مواد شیمیایی موجود در محلول سمیتاسیون و محیط کشت باکتری

Concentration (g/l)	cementation	Culture medium
20		yeast extract
10	Ammonium chloride	Ammonium chloride
20	Urea	
45.5	calcium chloride	
3	nutrient broth	
2.12	sodium bicarbonate	

Table.1. Culture medium and cementation concentration

جدول ۲. مشخصات خاک‌های مورد استفاده

Property	SandT60	SandT90	Carbonate Sand
D_{50} (mm)	0.28	0.25	0.2
$\rho_{d max}$ ($\frac{kg}{m^3}$)	1661	1632	1685
$\rho_{d min}$ ($\frac{kg}{m^3}$)	1401	1432	1463
G_s	2.65	2.64	2.67
C_u	1.7	1.75	2.96
C_c	0.98	0.81	1.01

Table.2. Some physical properties of the tested sands

شده بر سطح مقطع نفوذ، مقاومت فشاری به صورت مستقیم بر حسب kg/cm^2 حاصل می‌شود. در پایان با استفاده از عمل میانگین‌گیری مقاومت فشاری محدود نشده خاک تخمین زده شد. برای سنجش مقاومت خاک دانه‌ای غیر چسبنده از یک Adapter foot به قطر ۲۵ میلی‌متر (۱ اینچ) که به نوک دستگاه متصل می‌شود استفاده می‌شود. از مزایای این دستگاه سبک بودن، قابل حمل بودن و قابلیت استفاده در محل است. به منظور مقایسه نتایج از آزمون دانکن در سطح یک درصد استفاده شده است.

شکل ۳. نفوذسنج و Adapter foot مورد استفاده جهت سنجش مقاومت فشاری خاک



Fig. 3. Pocket Penetrometer and Adapter foot for compressive strength assessment of crustal sand layer

۲.۴ تونل باد مورد استفاده

به منظور بررسی پتانسیل تولید ریزگرد در تیمارهای مورد بررسی از دستگاه تونل باد واقع در آزمایشگاه فرسایش بادی بخش مهندسی منابع طبیعی و محیط زیست دانشگاه شیراز استفاده شده است که در شکل (۴) نشان داده شده است. این تونل باد در مطالعه صورت گرفته توسط کوپایی‌نیا و افضلی [29] گزارش شده است. با توجه به شکل (۴) این تونل باد دارای مشخصاتی به طول ۲/۶۵ متر (فاصله از موتور دمنده تا ابتدای هرم ناقص خروجی)، طول مؤثر ۲ متر، عرض داخلی ۰/۳ متر و ارتفاع بازشدگی ۰/۴ متر است. این تونل باد دارای پتانسیل تولید باد با ماکزیمم سرعت 20 متر بر ثانیه است که با استفاده از یک دستگاه بادسنج^۲ (مدل Lambrecht GmbH) در امتداد محور عمودی مرکزی تونل در موقعیت ارتفاعی 20 cm در بالای سینی‌های خاک، اندازه گرفته شده است. همچنین سرعت باد با استفاده از یک کنترل‌کننده TECO تنظیم می‌شود. به منظور ایجاد توزیع مناسب و لگاریتمی سرعت از دو پخش‌کننده به صورت قائم و با فاصله 0.2 m از هم، در ناحیه بین خروجی موتور دمنده و

۲.۳ اندازه‌گیری مقاومت فشاری خاک

با توجه به اینکه هدف پژوهش تثبیت سطح خاک و مقاوم‌سازی آن در برابر پدیده فرسایش است بنابراین برای بررسی میزان اثرگذاری باکتری در خاک از مقاومت در برابر نفوذ خاک یا مقاومت فشاری استفاده شده است که با استفاده از یک دستگاه نفوذسنج جیبی (Humboldt - H-4195) و مطابق با استاندارد ASTM WK27337 اندازه‌گیری شد (شکل ۳). این دستگاه به صورت یک میله مدرج با یک حلقه نشانگر روی آن است که به شکل مستقیم در خاک فرو برده می‌شود. هنگام استفاده از آن، ابتدا باید حلقه نشانگر را به بالاترین ارتفاع موجود جابه‌جا کرد سپس با انتقال فشار روی پیستون تا جایی که نشانگر موجود روی نوک آن، هم‌سطح خاک شود نیروی لازم برای فرورانش در خاک قرائت می‌شود. نیروی وارد بر واحد سطح مقطع نفوذ، به عنوان مقاومت فشاری محدود نشده خاک ثبت می‌شود. در این پژوهش به اندازه تقریبی 0.6 سانتیمتر (1/4") و در پنج نقطه از سطح هر نمونه، به صورت قائم، نفوذسنج به داخل خاک رانده شده و نیروی وارد شده قرائت شده است. با تقسیم نیروی وارد

بر میزان مقاومت فشاری سه گونه خاک ماسه سیلیسی t60، ماسه سیلیسی t90 و ماسه کربناته مورد بررسی قرار گرفته است. مرحله دوم آزمایش‌ها، بررسی تأثیر تزریق مجدد محلول باکتری و محلول سم‌تاسیون با فاصله زمانی ۶ روز بر مقاومت نفوذ دو خاک ماسه سیلیسی t60 و ماسه کربناته نسبت به زمان است. مرحله سوم بررسی تأثیر شرایط محیطی بر پایداری نمونه‌ها و همچنین بررسی میزان فرسایش‌پذیری خاک‌ها با استفاده از تونل باد است. در نهایت برای بررسی توزیع رسوبات کربنات کلسیم و ایجاد آن در حفرات خاک از آزمایش میکروسکوپ الکترونی (SEM) استفاده شد. طرح آزمایش‌ها در جدول (۳) ارائه شده است. تجزیه آماری داده‌ها با استفاده از نرم افزار SPSS انجام پذیرفت. یک نمونه دست‌خورده از لایه سطحی مقاوم ایجاد شده در سطح خاک، در شکل (۵) مشاهده می‌شود.

شکل ۴. نمایی از تونل باد استفاده شده، الف: مقطع طولی شامل (۱) هرم ناقص و (۲) بخش آزمایش تونل باد. ب: موتور دمنده باد و دو عدد پخش کننده با نوارهای تیغه‌ای شکل

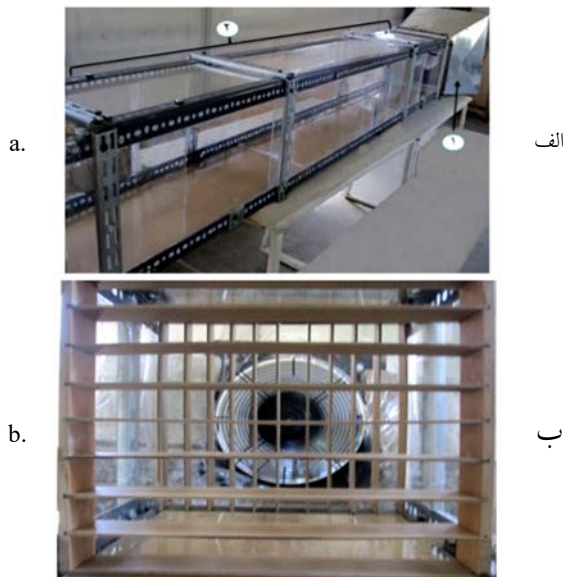


Fig. 4. Experimental setup of wind tunnel used in the present investigation; (a) schematic diagram of the apparatus; 1. Half pyramid output- 2. Working section (b) photograph of its two diffusers (foreground) and wind blower outlet (background)

بخش مؤثر تونل باد، استفاده شده است شکل (۴-ب) که بر اساس مطالعه کوپایی‌نیا و افصلی [29] در فاصله 1.125 m از سیستم پخش کننده باد، قانون لگاریتمی سرعت به خوبی برقرار است. بنابراین در آزمایش‌های این پژوهش، سینی‌های خاک (طول 0.5m، عرض 0.3m و عمق 0.02m) در این موقعیت مکانی و در کف تونل باد، در برابر موتور دمنده واقع و مورد بررسی قرار گرفتند. همه نمونه خاک‌های تیمار شده با MICP^۴ و همچنین نمونه خاک‌های تیمار شده با آب معمولی به عنوان شاهد، به مدت ۵ دقیقه در برابر جریان باد با سرعت‌های مختلف، مورد بررسی قرار گرفتند و فرسایش صورت گرفته به صورت مشاهده چشمی و با بررسی میزان از دست رفتن جرم ماسه‌ها اندازه‌گیری شده است.

۲.۵ روش انجام آزمایش‌ها

آزمایش‌ها به صورت فاکتوریل و در قالب طرح آماری کاملاً تصادفی با ۳ تکرار انجام گرفت. به منظور اطمینان از نبود هر گونه آلودگی در خاک‌های استفاده شده، نمونه خاک‌ها درون ظروف سر بسته قرار و در دستگاه اتوکلاو به مدت ۲۰ دقیقه مورد استریل واقع شدند. سپس خاک‌ها به آرامی درون سینی‌هایی به ابعاد ۵۰ × ۳۰ × ۲ سانتی‌متر ریخته شدند و پس از هموار کردن سطح آن، به اندازه تقریبی 1.5 برابر تخلخل ۳ میلی‌متر ضخامت خاک سطحی، به صورت حجمی از مخلوط محلول باکتری و محلول سم‌تاسیون به صورت نسبت ۱ به ۱ و در OD₆₀₀ برابر با 1.5 به خاک اسپری شد [3]. مخلوط محلول باکتری و سم‌تاسیون با استفاده از یک ظرف اسپری کننده به صورت یکنواخت روی سطح خاک‌ها تزریق و سپس در دستگاه ژرمیناتور در دمای 28.5 درجه سانتی‌گراد در دوره‌های زمانی ۳، ۷، ۱۴، ۲۰ و ۲۸ روز نگهداری شدند. لازم به ذکر است که هر تیمار حداقل سه بار تکرار شد. در پایان هر دوره زمانی، نمونه خاک‌ها از دستگاه ژرمیناتور خارج و تحت آزمایش مقاومت فشاری واقع شدند و نمونه‌ای دست نخورده از هر تیمار تحت آزمایش فرسایش بادی واقع شد. مراحل انجام آزمایش‌ها به این صورت است که ابتدا تأثیر زمان نگهداشت و OD₆₀₀ برابر با 1.5

شکل ۵. لایه مقاوم سطحی ایجاد شده (بعد از انجام تست) در خاک با استفاده از MICP



Fig. 5. Photographic of crustal sand layer with MICP

جدول ۳. تیمارهای اعمال شده

wind erosion test	compressive strength test	ambient outdoor condition	double spray		single spray			Treatment /day
		sand t60	carbonate sand	sand t60	carbonate sand	sand t90	sand t60	
		spraying one-to-one mixtures of the bacterial cell and cementation solutions	spraying one-to-one mixtures of the bacterial cell and cementation solutions		spraying one-to-one mixtures of the bacterial cell and cementation solutions			1
×	×				*			3
×	×	*						4
			spraying one-to-one mixtures of the bacterial cell and cementation solutions					6
×	×	*			*			7
×	×		*					9
×	×	*						10
×	×		*					13
×	×	*			*			14
×	×		*		*			20
×	×	*						23
×	×		*					26
×	×				*			28
×	×		*					34
×	×	*						62
×	×	*						110

Table 3. Different MICP treatment strategies investigated

۳. بحث و نتایج

۳.۱ بررسی تأثیر زمان نگهداشت بر مقاومت فشاری خاک

در این پژوهش محلول باکتری در غلظت $OD_{600}=1.5$ به ۲ خاک ماسه سیلیسی و ماسه کربناته اضافه شده است و با دستگاه نفوذسنج جیبی، مقاومت فشاری آن مورد مطالعه قرار گرفته است. با توجه به اینکه غلظت بهینه باکتری در افزایش مقاومت برشی خاک در $OD_{600}=1.5$ گزارش شده است [9] بنابراین در این پژوهش نیز این میزان غلظت باکتری در افزایش مقاومت فشاری

خاک بررسی شد. در شکل (۶) میزان مقاومت فشاری اندازه‌گیری شده با دستگاه نفوذسنج در هر سه گونه خاک نسبت به زمان نگهداشت خاک نشان داده شده است و این در حالی است که نمونه خاک‌های شاهد هیچ‌گونه مقاومت فشاری از خود نشان ندادند. تحلیل آماری با استفاده از تجزیه واریانس نشان می‌دهد که تأثیر زمان بر مقاومت فشاری در هر سه خاک ماسه سیلیسی t60، ماسه سیلیسی t90 و ماسه کربناته، در سطح 1 درصد معنی‌دار شده است که بیشترین عملکرد در افزایش مقاومت لایه سطحی در خاک ماسه کربناته قابل مشاهده است (جدول ۴).

دارای توزیع دانه‌بندی ریزتری است نسبت به ماسه t60 افزایش بیشتری در مقاومت فشاری نشان داده است که به دلیل ریزدانه بودن هر دو نوع خاک می‌تواند ناشی از ارتباط مناسب ذرات خاک ماسه t90 با یکدیگر و بنابراین پخشیدگی بهتر رسوب کلسیت در این گونه خاک نسبت به ماسه t60 باشد. در پژوهشی که توسط [30] روی دو خاک ماسه‌ای با دانه‌بندی متفاوت انجام شده است به نتایج مشابهی دست پیدا کرده‌اند و کارایی بیشتر روش MICP را در خاک با دانه‌بندی ریزتر از نظر مقاومت و نفوذپذیری گزارش شده است. همچنین مطالعه [3] نیز حاکی از اثرگذاری بیشتر این روش در ماسه با دانه‌بندی ریزتر از لحاظ مقاومت برشی است. وجود فضای کافی در خاک و تماس مناسب ذرات با یکدیگر، در تثبیت خاک با استفاده از باکتری بسیار مؤثر است [31]. فضای حرکتی 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 چرا که عدم توزیع یکنواخت باکتری در خاک و به دنبال آن رسوب غیر یکنواخت کلسیت در خاک یکی از مهمترین مشکلات و کارایی این روش را کاهش می‌دهد [24] بنابراین مقایسه بین ویژگی‌های دانه‌بندی خاک و اندازه باکتری یک فاکتور بسیار مهم در فرآیند رسوب میکروبی کلسیت است. نتایج حاصل شده سازگاری مناسبی با نتایج پژوهش [32] نشان می‌دهد که افزایش ۳ برابری مقاومت فشاری در لایه سطحی خاک شنی با استفاده از فرآیند MICP را گزارش داده‌اند. همچنین نتایج بدست آمده تایید کننده نتایج حاصل از پژوهش [23] روی ۲ خاک شنی و سیلتی است که افزایش معنی‌دار مقاومت فشاری با استفاده از MICP و کاهش فرسایش بادی را مشاهده نمودند. همچنین نتایج حاصل از پژوهش [22] نشانگر عملکرد مناسب این روش در افزایش مقاومت تک محوری و کاهش نفوذپذیری خاک ماسه‌ای است.

تحلیل آماری و مقایسه میانگین نشان می‌دهد که در ماسه کربناته میزان مقاومت فشاری بدست آمده در کلیه زمان‌ها دارای تفاوت معنی‌دار است. در ماسه سیلیسی t60 نتایج حاصل شده در سه زمان نگهداشت ۳، ۷ و ۱۴ روزه نسبت به هم و همچنین

شکل ۶. مقاومت فشاری خاک‌های استفاده شده

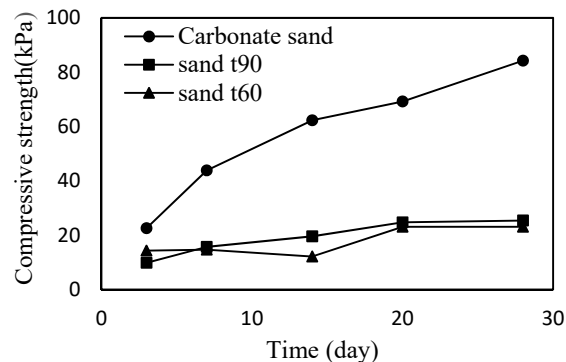


Fig. 6. Compressive strength development for MICP treatment of soils

همان‌گونه که در شکل (۶) مشخص است مقاومت فشاری خاک با گذشت زمان در هر سه گونه خاک افزایش پیدا کرده است که نشانگر این است که تزریق باکتری به خاک کماکان در همه خاک‌های ماسه‌ای دارای پتانسیل مثبت است و باعث بهبود ویژگی‌های فیزیکی و مقاومتی خاک می‌شود. به نظر می‌رسد که این موضوع، امری بدیهی باشد چرا که این روش از طبیعت الگوبرداری شده است و باعث شکل‌گیری ماسه سنگ‌ها و کوه‌های آهکی می‌شود.

با توجه به شکل (۶)، میزان افزایش مقاومت در ماسه کربناته بیشتر از دو گونه دیگر خاک بدست آمده است و همچنین در ماسه سیلیسی t90 میزان مقاومت بیشتری نسبت به ماسه سیلیسی t60، حاصل شده است. در ماسه کربناته به دلیل توزیع بهتر و گسترده‌تر دانه‌بندی خاک و همچنین وجود یون‌های کلسیم در خاک، پدیده سم‌تاسیون بیشتری اتفاق افتاده است و بنابراین مقاومت فشاری بیشتری نسبت به دو گونه دیگر خاک حاصل شده است به گونه‌ای که در مدت زمان ۲۸ روز مقاومت فشاری به ۸۴ کیلوپاسکال رسیده است که نسبت به شرایط مشابه ۷۰٪ بیشتر از ماسه سیلیسی t90 و ۷۳٪ بیشتر از ماسه سیلیسی t60 بدست آمده است. بنابراین شیب تند منحنی مقاومت مربوط به ماسه کربناته نسبت به دو منحنی دیگر به ویژه بعد از مدت زمان ۲۰ روز نشانگر مساعد بودن شرایط محیط خاک از لحاظ املاح موجود به خصوص وجود یون کلسیم و مدت زمان کافی برای رشد و فعالیت زیستی باکتری در خاک است. ماسه t90 که

موضوع در مورد ماسه t90 باعث شده است که تفاوت بین دو زمان ۲۰ و ۲۸ روز از لحاظ آماری معنی دار نشود (جدول ۵). در هر حال استفاده از میکروارگانیزم‌های زنده در پژوهش، دارای پیچیدگی‌های خاص خود و از حساسیت بالایی برخوردار است که دقت بالای دستگاه کمی‌ساز و همچنین دقت بالای انسانی در پروسه انجام آزمایش‌ها را می‌طلبد که این نکته می‌تواند یکی از محدودیت‌های پژوهش در مورد روش بیوسمنتاسیون باشد.

دو زمان ۲۰ و ۲۸ روزه نسبت به هم دارای تفاوت معنی‌دار از لحاظ آماری نیستند. علت این موضوع به زمان بر بودن پدیده بیوسمنتاسیون در خاک است که در عمل به کندی صورت می‌گیرد. بنابراین باید بازه‌های زمانی کافی در نظر گرفته شود تا این روند افزایشی مقاومت که در شکل (۶) مشاهده می‌شود به صورت ملموس‌تری در بازه‌های زمانی قابل مشاهده شود و تفاوت‌های معنی‌دار از لحاظ آماری حاصل شود. همچنین این

جدول ۴. نتایج تجزیه واریانس تأثیر زمان نگهداشت بر مقاومت فشاری ماسه سیلیسی t90، t60 و ماسه کربناته

SandT90			SandT60			Carbonate Sand		
SS	df	Source	SS	df	Source	SS	df	Source
84.709**	4	Time	54.74**	4	Time	1138.68**	4	Time
2	5	Error	2	5	Error	2	5	Error

** Significant at the 1% level

Table.4. Analysis of variance (ANOVA) for sands

جدول ۵. نتایج مقایسه میانگین تأثیر زمان نگهداشت بر مقاومت فشاری خاک‌های استفاده شده

SandT90		SandT60		Carbonate Sand	
Mean	Time	Mean	Time	Mean	Time
25.38 ^a	28	23.08 ^a	28	84.23 ^a	28
24.74 ^a	20	23.08 ^a	20	69.23 ^b	20
19.54 ^b	14	12.12 ^b	7	62.31 ^c	14
15.7 ^c	7	14.65 ^b	3	43.85 ^d	7
9.8 ^d	3	14.31 ^b	14	22.55 ^e	3

The means that have a same Latin word are not significantly different

Table.5. Analysis of mean comparison with Duncan's multiple range test for sands

فاصله زمانی ۶ روز از تزریق اول باعث عملکرد بهتر این روش در کاهش فرسایش‌پذیری خاک ماسه‌ای دارد. علت این موضوع توزیع یکنواخت‌تر رسوب کلسیت در حفره‌های خاک ذکر نموده‌اند. در این پژوهش نیز همان‌گونه که در شکل (۷) نشان داده شده است تزریق مجدد باعث افزایش مقاومت فشاری در هر دو خاک ماسه سیلیسی t60 و ماسه کربناته نسبت به حالت یک بار تزریق شده است به‌گونه‌ای که در ماسه کربناته باعث افزایش ۷٪ در مقاومت فشاری در مدت زمان ۲۸ روز شده است که این در ماسه سیلیسی t60، ۱۹۰٪ افزایش نسبت به حالت یک بار تزریق در ۲۸ روز بوده است. بنابراین تزریق مجدد محلول باکتری و سم‌تاسیون به خاک در صورتی که با فاصله زمانی بهینه ۶ روز به خاک اضافه شود باعث افزایش بازدهی تثبیت بیولوژیکی خاک می‌شود [24] که در این پژوهش نیز تأثیر آن با

۳.۲ بررسی تأثیر تزریق مجدد محلول باکتری و سم‌تاسیون بر مقاومت فشاری خاک

تزریق مرحله‌ای محلول باکتری و سم‌تاسیون به خاک به عنوان یک راه‌حل به منظور توزیع و رسوب یکنواخت کلسیت در حفره‌های خاک گزارش شده است [24, 33] که هرچه این توزیع رسوب کلسیت در کل طول سطح خاک یکنواخت‌تر باشد این روش عملکرد بالاتری در بهبود خواص مقاومتی خاک دارد. بر همین اساس در این مرحله از این پژوهش، محلول باکتری و سم‌تاسیون در دو مرحله و با فاصله زمانی ۶ روز از تزریق اول به ماسه سیلیسی t60 و ماسه کربناته اضافه شد. امین و زمردیان [24] با بررسی تأثیر روش زیستی رسوب میکروبی کلسیت بر فرسایش‌پذیری خاک ماسه‌ای با دستگاه تابع فرسایش، به این نتیجه رسیدند که تزریق مجدد باکتری و محلول سم‌تاسیون در

شکل ۷. مقاومت فشاری در حالت دو بار تزریق

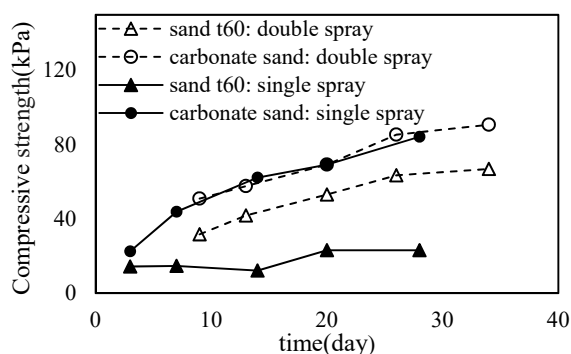


Fig. 7. Compressive strength development for double-MICP spray treatment of soils

جدول ۶. نتایج تجزیه واریانس تأثیر زمان نگهداشت بر مقاومت فشاری ماسه

سیلیسی t60 و ماسه کربناته در حالت دوبار تزریق

SandT60			Carbonate Sand		
SS	df	Source	SS	df	Source
434.293**	4	Time	590.887**	4	Time
2	5	Error	2	5	Error

** Significant at the 1% level

Table 6. Analysis of variance (ANOVA) for double-MICP spray treatment of soils

جدول ۷. نتایج مقایسه میانگین تأثیر زمان بر مقاومت فشاری ماسه کربناته و

ماسه سیلیسی t60 در حالت دوبار تزریق

SandT60		Carbonate Sand	
mean	Time	mean	Time
66.92 ^a	28	90.8 ^a	28
63.51 ^a	20	85.4 ^b	20
53.08 ^b	14	69.2 ^c	14
41.85 ^c	7	57.7 ^d	7
31.73 ^d	3	50.9 ^e	3

The means that have a same Latin word are not significantly different

Table 7. Analysis of mean comparison with Duncan's multiple range test for double-MICP spray treatment of soils

۳.۳ بررسی تأثیر شرایط محیطی بر تثبیت نمونه‌ها

برای بررسی میزان فعالیت باکتری و عمل سم‌تاسیون در شرایط واقعی بیرون از آزمایشگاه، محلول باکتری و سم‌تاسیون در OD₆₀₀ بهینه برابر 1.5، روی خاک ماسه سیلیسی t60 استریل نشده اسپری شد و در محیط بیرون آزمایشگاه و در سایه، تحت

بررسی مقاومت فشاری خاک بررسی و مورد تأیید قرار گرفته است. میزان افزایش مقاومت فشاری خاک با تزریق مجدد در مقایسه با یک بار تزریق در خاک ماسه سیلیسی t60 نسبت به خاک با منشأ کربناته به میزان بیشتری بدست آمده است که به این دلیل است که میکروارگانیسم برای انجام فعالیت متابولیک خود نیاز به آزادی حرکت و دسترسی به مواد غذایی دارد [25] در ماسه کربناته در تزریق اول به دلیل وجود شرایط مساعد محیطی و تشکیل رسوب بیشتر کلسیت در فضای خالی بین ذرات، بنابراین با تزریق مجدد، باکتری آزادانه حرکت نمی‌کند و میزان افزایش مقاومت به دست آمده نسبت به ماسه سیلیسی کمتر است اما میزان مقاومت نهایی در ماسه کربناته بیشتر است. بنابراین روش تزریق مجدد در ماسه سیلیسی شرایط بهتری را از لحاظ مواد مغذی برای رشد و فعالیت باکتری ایجاد می‌کند که به علت دسترسی بهتر و بیشتر باکتری به مواد غذایی و توزیع یکنواخت تر رسوب کلسیت در خاک نسبت به روش یک بار تزریق است. این نتیجه همچنین با نتیجه مطالعات [34] هماهنگی دارد که گسترش بهتر سم‌تاسیون و رسوب کلسیت در محل تماس ذرات خاک با یکدیگر را در تزریق مرحله‌ای گزارش دادند. با توجه به اینکه هر چه دانه‌بندی خاک یا اندازه حفرات خاک درشت‌تر باشد در مقایسه با خاک با دانه‌بندی ریزتر، میزان مواد مغذی بیشتری برای سم‌تاسیون خاک لازم است [35] بنابراین در این پژوهش نیز تزریق مجدد محلول باکتری و سم‌تاسیون نقش موثری را در بهبود مقاومت ماسه سیلیسی نسبت به ماسه کربناته و همچنین نسبت به یک بار تزریق نشان داده است. تحلیل آماری با استفاده از آنالیز تجزیه واریانس در حالت دو بار تزریق نشان می‌دهد که تأثیر زمان بر مقاومت نفوذ در هر دو خاک ماسه سیلیسی t60 و ماسه کربناته، در سطح ۱ درصد معنی‌دار شده است (جدول ۶). همچنین مقایسه میانگین نشان می‌دهد که نتایج بدست آمده در ماسه کربناته، از لحاظ آماری دارای تفاوت معنی‌دار در کلیه زمان‌های نگهداشت است. همچنین مقایسه میانگین در ماسه سیلیسی t60 نشان می‌دهد که به جز در دو زمان ۲۰ و ۲۸ روز، نتایج بدست آمده از لحاظ آماری دارای تفاوت معنی‌دار است (جدول ۷).

کمی در مورد شرایط محیطی مطلوب مورد نیاز این موجود زنده، سخن گفت به گونه‌ای که در این مقدار، بیشترین فعالیت زیستی را از خود نشان دهد. بنابراین بدیهی است که از فرد به فرد میکروارگانیسم می‌تواند متفاوت باشد. بنابراین وجود یک بازه یا دامنه مطلوب، برای پارامترهای اثرگذار می‌تواند بازدهی این روش را بهبود بخشد. تنها تاثیر منفی که این موضوع می‌تواند داشته باشد در سرعت انجام فرآیند زیستی میکروارگانیسم در تشکیل رسوب میکروبی کلسیت است که در صورت مطلوب نبودن شرایط محیطی مورد نیاز، می‌تواند کند شود نه اینکه متوقف شود. در محیط آزمایشگاه نمونه خاک‌ها در دستگاه ژرمیناتور تحت یک دمای ثابت 28.5 درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند که این در شرایط محیطی به صورت متغیر است و به نظر می‌رسد که این نقطه مثبتی در بازدهی بیشتر این روش در شرایط دمایی محیط نسبت به آزمایشگاه است. همچنان که فعالیت زیستی باکتری از دمای ۱۰ درجه سانتی‌گراد شروع می‌شود و در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد به اوج خود می‌رسد و در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد متوقف می‌شود [38]. بنابراین نتایج نشانگر پایداری و دوام نسبتاً خوب روش تثبیت بیولوژیکی خاک است. با این حال، مطالعات میدانی برای شناخت و بررسی بیشتر این روش و شبیه‌سازی دمای بیابان که ماکزیمم 60 درجه سانتی‌گراد گزارش شده است [39] در میزان فعالیت باکتری و مقاومت خاک، توصیه می‌شود.

جدول ۸ نتایج تجزیه واریانس تأثیر زمان بر مقاومت فشاری ماسه t60 در شرایط محیطی

Source	df	SS
time	6	167.135**
error	7	2

** Significant at the 1% level

Table.8. Analysis of variance (ANOVA) for outdoor experiments of sand t60

شرایط دما و رطوبت متغیر با شروع در ماه آذر به مدت 110 روز نگهداری شد. تحلیل آماری نشان داده است که تأثیر زمان بر مقاومت نفوذ در ماسه سیلیسی t60 در سطح 1 درصد معنی‌دار است (جدول ۸). همان‌گونه که در شکل (۸) نشان داده شده است در فصل سرد سال به علت پایین بودن دما، مقاومت فشاری با نرخ نسبتاً پایینی در حال افزایش است که نتایج حاصل از مقایسه میانگین نشان می‌دهد که تفاوت موجود از لحاظ آماری معنی‌دار نیست که این می‌تواند ناشی از نوسانات دمایی و نیاز به بازه زمانی بیشتر است. با مساعد شدن دما، مقاومت خاک با نرخ بیشتری افزایش پیدا کرده است که در دو زمان نگهداشت 62 و 110 روز، نتایج حاصل دارای تفاوت معنادار از لحاظ آماری است (جدول ۹). با مقایسه نتایج در شرایط محیط و آزمایشگاه در مدت زمان 28 روز، مقاومت نفوذ در شرایط محیطی به میزان بیشتری مشاهده شده است. تشکیل قطرات شبنم در شرایط محیط، نقطه مثبتی برای فعالیت بیشتر باکتری به منظور تأمین رطوبت است. محیط مرطوب باعث دسترسی بهتر میکروارگانیسم به مواد مغذی جهت رشد و فعالیت زیستی می‌شود اما این رطوبت نبایست به میزانی باشد که خاک شسته شود و یا مواد مغذی از دسترس میکروارگانیسم خارج شود [3]. نقش مثبت رطوبت در این فرآیند زیستی به خوبی در شکل (۱) مشاهده می‌شود. بنابراین نتایج نشانگر عملکرد خوب پدیده بیوسمنتاسیون در شرایط محیط است به گونه‌ای که پس از 110 روز مقاومت نفوذ خاک تقریباً به 50 کیلوپاسکال رسیده است. به نظر می‌رسد که نوسانات دمایی و رطوبتی نقطه مثبتی در فرآیند زیستی این نوع میکروارگانیسم خاص و به دنبال آن رسوب میکروبی کلسیت داشته باشد زیرا باکتری *Sporosarcina Pasteurii* گونه‌ای مقاوم و از نوع اسپوردار است بدین معنا که در شرایط نامساعد زیستی به گونه‌ای خاص خود را سازگار می‌دهد و برخلاف تصور زنده می‌ماند منتهی فعالیت زیستی آن محدود می‌شود و دوباره به محض مساعد شدن شرایط محیط به فعالیت خود ادامه می‌دهد [36, 37]، این شرایط مساعد شامل وجود مواد مغذی کافی و در دسترس، رطوبت، دمای محیط، pH و غیره است. پس با توجه به اینکه ما با یک موجود زنده و پویا سروکار داریم نمی‌توان با قطعیت کامل در مورد یک مقدار

بالای این روش برای مقابله با بیابان زدایی در مطالعات [15, 41] گزارش شده است. به دلیل دوام و پایداری خوب این گونه روش تثبیت، در مقایسه با دیگر روش های تثبیت خاک از جمله انواع مالچ ها که دارای طول عمر کمتری هستند و از لحاظ زیست محیطی، اجرایی و اقتصادی یک سری محدودیت ها و مشکلات دارند، بنابراین این روش می تواند جایگزینی مناسب باشد. در پژوهشی که توسط [3] صورت پذیرفته است این موضوع مورد بررسی قرار گرفته است و به طور مفصل به ذکر مبحث اقتصادی - اجرایی بودن این روش و همچنین مقایسه با سایر روش های سنتی و مرسوم موجود پرداخته شده است که به منظور شناخت بیشتر به آن ارجاع داده می شود. بررسی میزان فرسایش پذیری خاک تثبیت یافته با این گونه روش تثبیت، در تونل باد با پتانسیل تولید باد با سرعت های بیشتر و همچنین بررسی ارتباط بین میزان مقاومت فشاری و میزان فرسایش پذیری توصیه می شود.

۳. ۵ آنالیز تصویربرداری الکترونی (SEM)

به منظور بررسی ریزساختاری و اطمینان از شکل گیری رسوبات کربنات کلسیم در حفرات خاک از تصویربرداری الکترونی در دو خاک ماسه سیلیسی t60 و ماسه کربناته استفاده شد. چگونگی توزیع رسوب کربنات کلسیم در بین حفرات خاک نقش مهمی در میزان عملکرد باکتری در بهبود خواص فیزیکی و مقاومتی خاک دارد به گونه ای که هر چه این رسوبات در نقطه تماس بین ذرات خاک ایجاد شوند، مانند یک پل ذرات خاک را به هم می چسباند و خواص خاک را بهبود می دهند. این در حالی است که باکتری به دلیل کاهش تنش برشی و دسترسی بیشتر به مواد غذایی ترجیح می دهد که از سطوح در معرض دید و رویت، فاصله بگیرد و در مشخصه های سطحی کوچک مانند نقاط تماس بین ذرات قرار بگیرد که در این حالت است که رسوب میکروبی کربنات کلسیم افزایش می یابد [31]. نمونه خاک شاهد ماسه سیلیسی t60 و ماسه کربناته به ترتیب در شکل های (9A) و (9B) نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می شود هیچ ارتباط و چسبندگی بین دانه های خاک وجود ندارد. شکل های (9D و 9F) به ترتیب چگونگی توزیع رسوب کربنات کلسیم را

جدول ۹. نتایج مقایسه میانگین تأثیر زمان بر مقاومت فشاری ماسه t60 در

شرایط محیطی

mean	time
29.66 ^a	110
17.85 ^b	62
9.42 ^c	23
8.96 ^c	14
7.31 ^c	10
6.54 ^c	7
2.62 ^d	4

The means that have a same Latin word are not significantly different

Table.9. Analysis of mean comparison with Duncan's multiple range test for outdoor experiments of sand t60

شکل ۸- میزان مقاومت فشاری ماسه سیلیسی t60 در شرایط محیطی

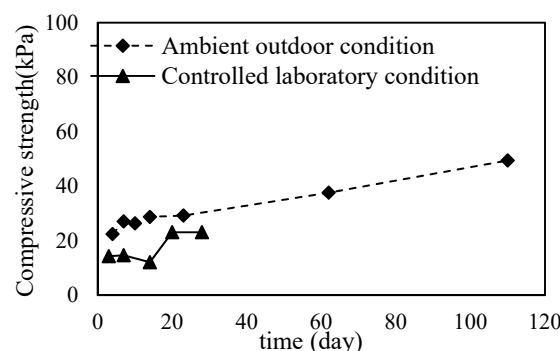


Fig. 8. Outdoor and laboratory experiments involving single MICP spray treatment of sand t60

۳. ۴ بررسی میزان فرسایش با استفاده از تونل باد

تونل باد مورد استفاده دارای پتانسیل تولید باد با بیشینه سرعت 20 ms^{-1} است. سرعت آستانه حرکت خاک شاهد بدون تیمار 3.5 ms^{-1} بدست آمد و این در حالی است که در خاک های تیمار شده در تمام زمان های نگهداشت مورد استفاده در بیشینه سرعت 20 ms^{-1} هیچ گونه فرسایش مشاهده نشده است. با توجه به اینکه اگر سرعت باد در مناطق بیابانی از مقدار 8 ms^{-1} بیشتر شود بسته به میزان زبری سطح، رطوبت، پوشش گیاهی، بافت خاک و غیره، باعث ایجاد فرسایش و ایجاد گردوغبار می شود [40] بنابراین با توجه به اینکه سرعت معیار باد، 8 ms^{-1} گزارش شده است، بنابراین تثبیت خاک از طریق فرآیند رسوب میکروبی کلسیت، گزینه ای مناسب و دارای پتانسیل بالا در مقاومت سازی خاک برای مقابله با بیابان زدایی و پدیده ریزگرد می باشد. پتانسیل

محلول باکتری و سم‌تاسیون مشابه پژوهش حاضر استفاده نموده‌اند کریستال‌های تشکیل شده در خاک ماسه سیلیسی t60 از نوع کلسیت است که این در ماسه کربناته با توجه به شکل کریستال‌های موجود، به نظر می‌رسد که کریستال‌های ایجاد شده هم از نوع کلسیت و هم از نوع واتریت هستند که البته مطالعه بیشتر توصیه می‌شود

در خاک ماسه سیلیسی t60 در دو مقیاس 1kx و 1.5kx نشان می‌دهد. همچنین چگونگی توزیع رسوب کربنات کلسیم در خاک ماسه کربناته در دو مقیاس 5kx و 20kx به ترتیب در دو شکل (9C و 9E) ارائه شده است که به صورت بلورهای سفید رنگ با شکل و اندازه‌های مختلف قابل رویت هستند. با توجه به آزمایش XRD انجام شده در پژوهش [24, 30] که از خاک و

شکل ۹. آنالیز تست SEM ماسه سیلیسی t60 و ماسه کربناته. A: ماسه t60 بهسازی نشده. B: ماسه کربناته بهسازی نشده. D و F: ماسه سیلیسی t60 بهسازی شده. C و E: ماسه کربناته بهسازی شده

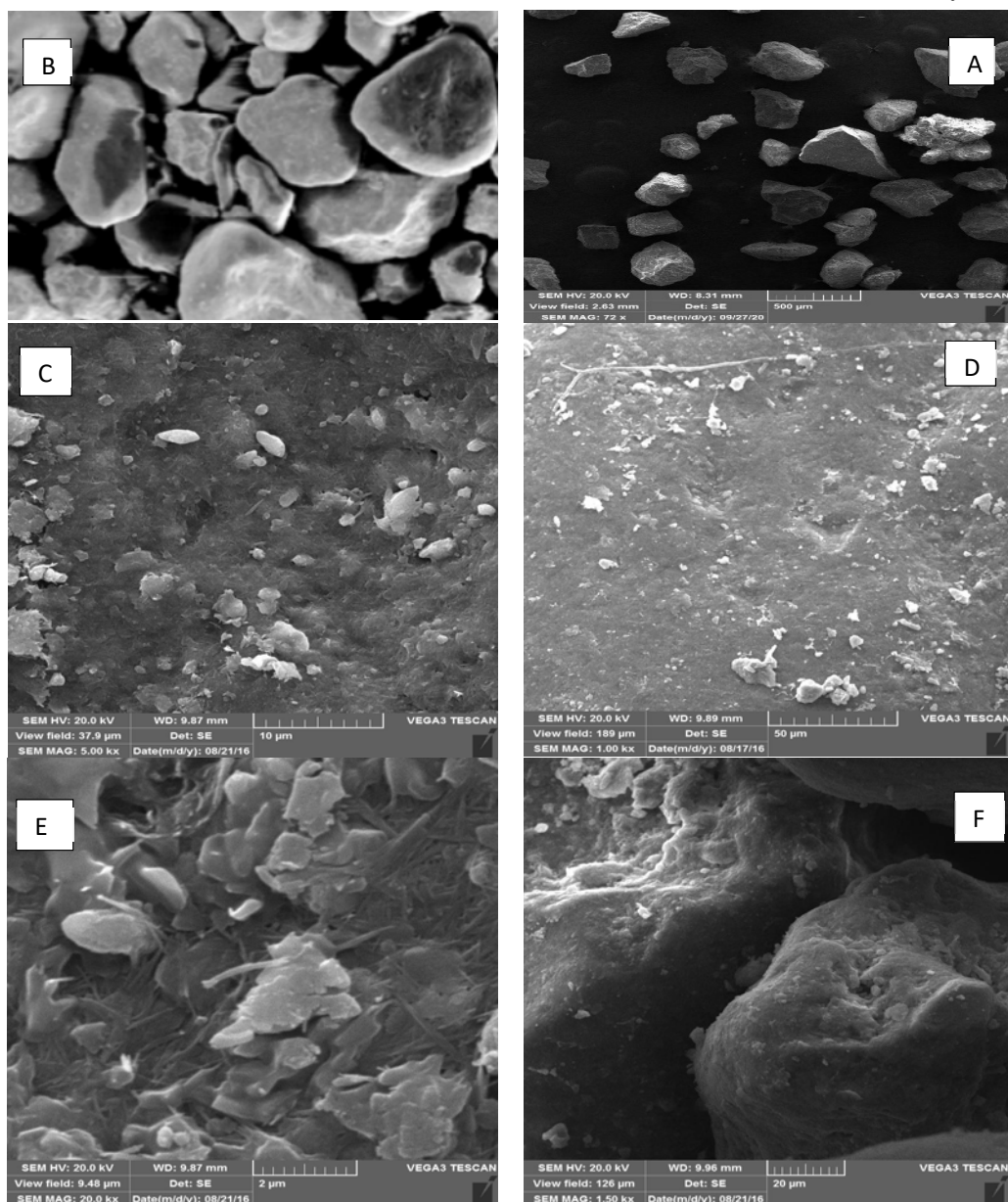


Fig. 9. SEM result for sand t60 and carbonate sand; A: SEM image of untreated sand t60. B: SEM image of untreated carbonate sand. C, F: sand t60 after treatment. D, E: carbonate sand after treatment

۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش کارایی روش MICP را در بهبود مقاومت فشاری خاک در برابر فرسایش مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر حاصل شده است:

۱- کاربرد بیوسمنتاسیون باعث افزایش وابسته به زمان مقاومت فشاری در هر سه نوع خاک، ماسه سیلیسی t60، ماسه سیلیسی t90 و ماسه کربناته شده است، بنابراین این روش خواص مقاومتی همه خاک‌ها را بهبود می‌دهد پس قابلیت استفاده در همه خاک‌ها را دارد.

۲- نوع و املاح موجود در خاک و همچنین توزیع دانه‌بندی خاک تأثیر قابل توجهی در فرایند رسوب میکروبی کلسیت و مقاومت فشاری حاصل از آن دارد به گونه‌ای که در ماسه با منشأ کربناته به دلیل وجود کلسیم بیشتر در محیط خاک، مقاومت فشاری نسبت به دو گونه دیگر خاک که از نوع سیلیسی هستند به میزان بیشتری حاصل شده است.

۳- ماسه سیلیسی با توزیع دانه‌بندی ریزتر مقاومت فشاری بیشتری نشان داده است به گونه‌ای که در حالت یک بار تزریق، میزان افزایش مقاومت در بازه زمانی ۲۸ روز و غلظت بهینه، در ماسه کربناته، ۶۱٪ افزایش نسبت ماسه t90 و ۷۰٪ افزایش نسبت به ماسه t60 حاصل شده است.

۴- در حالت دو بار تزریق با فاصله زمانی ۶ روز مقاومت فشاری افزایش بیشتری نسبت به حالت یک بار تزریق نشان داده است به گونه‌ای که ماسه t60 مقدار افزایش ۱۹۰ درصدی نشان داده است که این در مورد ماسه کربناته در همین مدت زمان، حدود ۷ درصد افزایش در مقاومت فشاری دارد.

۵- در حالت یک بار تزریق و همچنین تزریق مجدد، در مدت زمان بیشتر از ۲۰ روز نرخ افزایش مقاومت در هر سه نوع خاک کاهش پیدا کرده است که می‌تواند به دلیل نداشتن آزادی حرکت توسط میکروارگانیسم برای تشکیل کریستال‌های کلسیت و محدود و در دسترس نبودن مواد مغذی برای فعالیت باشد. بنابراین مدت‌زمان بهینه برای فعالیت میکروارگانیسم ۲۰ روز پیشنهاد می‌شود.

۶- در مورد خاک‌های مختلف میزان تزریق محلول باکتری و سم‌تاسیون و همچنین روش تزریق در عملکرد بهینه سم‌تاسیون خاک متفاوت است.

۷- با توجه به اینکه پدیده بیوسمنتاسیون در خاک پدیده‌ای زمان‌بر است بنابراین در نظر گرفتن بازه زمانی کافی برای بهبود و مشاهده عملکرد بهینه باکتری در خاک لازم است.

۸- انتظار می‌رود که کاربرد روش سیمانی‌سازی زیستی در خاک از پایداری و دوام نسبتاً بالایی به منظور مقابله با فرسایش بادی برخوردار باشد بنابراین مطالعات بیشتر در این زمینه با در نظر گرفتن بازه‌های زمانی خیلی بیشتر حائز اهمیت است. دانش ترسیب کربنات کلسیم به صورت زیستی و بهره‌گیری و ادغام آن در علم ژئوتکنیک دانشی نوین است و لازم است همسو با بسیاری از کشورها که این علم را به مرحله اجرا رسانده‌اند گام برداریم و با مطالعات بیشتر در این زمینه، جنبه‌های ناشناخته و چالش‌های پیش رو به ویژه محدودیت‌های اجرایی و اقتصادی آن را با شناسایی و جایگزینی مواد آلی و مغذی مورد نیاز برای رشد و فعالیت زیستی باکتری، برطرف نماییم. این روش زمان‌بر است بنابراین شاید بتوان عملکرد این روش را به صورت ترکیب با روش اضافه کردن مالچ‌های آلی بهبود و تسریع بخشید که لازمه بررسی بیشتر می‌باشد. مطلوب‌ترین مزیت این روش این است که سازگار با محیط زیست است و محصول فرعی مضر ندارد. بنابراین در مقایسه با روش‌های مرسوم موجود که خطر آلودگی محیط زیست، هزینه زیاد، عمر کم، پتانسیل آتش سوزی و همچنین اختلال در محیط زیست را به دنبال داشته‌اند [3] نیازمند توجه و بررسی بیشتر است.

۵. منابع

- [1] Zhang, C., Wang, X., Zou, X., Tian, J., Liu, B., Li, J., Kang, L., Chen, H. & Wu, Y. 2018. Estimation of surface shear strength of undisturbed soils in the eastern part of northern China's wind erosion area. *Journal of Soil and Tillage Research*, 178, 1–10.
- [2] Saadoud, D., Hassani, M., Martin Peinado, F. J. & Guettouche, M. S. 2018. Application of fuzzy logic approach for wind erosion hazard mapping

- Stabilization Technique for Dust Suppression. *International Journal of Geo-Engineering*, 3(2), 27-37.
- [16] Maleki, M., Ebrahimi, S., Asadzadeh, F. & Emami Tabrizi, M. 2015. Performance of microbial-induced carbonate precipitation on wind erosion control of sandy soil, *Int. J. Environ. Sci. Techno*, 13, 937-944.
- [17] Liu, J., Shi, B., Lu, Y., Jiang, H., Huang, H., Wang, G. & Kamai, T. 2012. Effectiveness of a new organic polymer sand-fixing agent on sand fixation. *Journal of Environmental Earth Sciences*, 65, 589-595.
- [18] Genis, A., Vulfson, L. & Ben-Asher, J. 2012. Combating wind erosion of sandy soils and crop damage in the coastal deserts: Wind tunnel experiments. *Journal of Aeolian Research*, 9, 69-73.
- [19] Yasun, A.S. 2018. Capability of Pocket Penetrometer to Evaluate Unconfined Compressive Strength of Baghdad Clayey Soil. *Al-Nahrain Journal for Engineering Sciences (NJES)*, 21(1), 66-73.
- [20] Graesch, A.P., Shankel, S.E. & Schaepe, D.M. 2015. The Pocket Penetrometer an Onsite Method for Discerning the Presence of Earthen House Floors and Other Trampled Surfaces, *Advances in Archaeological Practice*, 3(2), 93-106.
- [21] Sharifi Asadi, D., Ardakani, A. & Garoosi, G. 2018. Investigating effective factors of biocementation soil improvement on sandy soil with different Fine-content, *Modares Civil Engineering Journal (M.C.E.J)*, 18 (2), 127-138, (In Persian).
- [22] Khaleghi, M. & Rowshanzamir, M. A. 2018. Improving strength and physical properties of sand by biological method. *Modares Civil Engineering Journal (M.C.E.J)*, 18 (1), 101-111, (In Persian).
- [23] Rajabi Agereh, S., Kiani, F., Khavazi, K., Rouhipour, H. & Khormali, F. 2019. Evaluation of the efficiency of biological reformer in controlling wind erosion. *Iranian Journal of Range and Desert Research*, 26 (4), 824-837, (In Persian).
- [24] Amin, M., Zomorodian, S.M.A. & O'Kelly, B.C. 2017. Reducing the hydraulic erosion of sand using microbial induced carbonate precipitation, *Ground Improvement*, 170(GI2), 112-122.
- [25] Stocks-Fischer, S., Galinat, J.K. & Bang, S.S. 1999. Microbiological precipitation of CaCO_3 . *Soil Biology and Biochemistry*, 31(11), 1563-1571.
- in Laghouat region (Algeria) using remote sensing and GIS. *Journal of Aeolian Research*, 32, 24-34.
- [3] Ghaffari, H. & Zomorrodian, M. 2017. Evaluation of shear strength of soil stabilized by microbiology. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 48(4), 737-748, (In Persian).
- [4] Chen, L. Z., Xie, Z. M., Hu, C. X., Li, D. H., Wang, G. H. & Liu, Y. D. 2006. Man-made desert algal crusts as affected by environmental factors in Inner Mongolia, China. *Journal of Arid Environments*, 67, 521-527.
- [5] Okyay T. O. & Rodrigues D.F. 2014 Optimized carbonate micro-particle production by *Sporosarcina pasteurii* using response surface methodology. *Ecological Engineering*, 62, 168-174.
- [6] DeJong, J.T. 2010. Bio-mediate soil improvement. *Ecological Engineering*, (36), 197-210.
- [7] Tobler, D.J., Maclachlan, E. & Phoenix, V.R. 2012. Microbially mediated plugging of porous media and the impact of differing injection strategies. *Ecological Engineering* 42, 270-278.
- [8] Ivanov, V. 2015. Environmental microbiology for engineers. *CRC Press*.
- [9] Zomorodian, S.M.A., Ghaffari, H. & O'Kelly, B.C. 2019. Stabilisation of crustal sand layer using biocementation technique for wind erosion control, *Aeolian Research*, 40 (2019), 34-41.
- [10] Chou, C.W. Seagren, E.A. Aydilek, A.H. & Lai, M. 2011. Biocalcification of Sand through Urelysis. *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127(12), 1179-1189.
- [11] Al Qabany, A. 2011. *Microbial Carbonate Precipitation in Soils*. Doctoral Dissertation. University of Cambridge. UK.
- [12] Martinez, B.C., Barkouki, T.H., DeJung, J.T. & Ginn, T.R. 2011. Upscaling of Microbial Induced Calcite Precipitation in 0.5m Columns: Experimental and Modeling Results. *ASCE Geofrontiers 2011: Advances in Geotechnical Engineering, Geotechnical Special Publication*, 4049-4059.
- [13] Montoya, B. M., DeJong, J. T. & Boulanger, R. W. 2013. Dynamic response of liquefiable sand improved by microbial-induced calcite precipitation. *Geotechnique*, 63(4), 302-312.
- [14] Achal, V. and Mukherjee, A. & Reddy, M. S. 2010. Microbial concrete: A way to enhance the durability of building structures. *J. Mater. Civil Eng.* 1943-5533.
- [15] Bang, S. and Min, S.H. & Bang, S.S. 2011. Application of Microbiologically Induced Soil

- Mossallamy Y (eds)). IOS Press, Amsterdam, The Netherlands, 3, 2328–2333.
- [34] Rowshanbakht, K., Khamsehchiyan, M., Sajedi, R. H. & Nikudel, M. R. 2016. Effect of injected bacterial suspension volume and relative density on carbonate precipitation resulting from microbial treatment. *Ecol. Eng.*, 89, 49–55.
- [35] Rebata-Landa, V. 2007. *Microbial Activity in Sediments: Effects on Soil Behaviour*, Doctoral dissertation, Georgia Institute of Technology.
- [36] Todar, K. 2007. The Genus *Bacillus*. www.textbookofbacteriology.net/Bacillus.html.
- [37] Stabnikov, V., Chu, J., Naing Myo, A. & Ivanov, V. 2013. Immobilization of sand dust and associated pollutants using bio aggregation. *Journal of Water Air Soil Pollutant*, 224, 1631–1639.
- [38] Sahrawat, K. 1984. Effects of temperature and moisture on urease activity in semi-arid tropical soils". *Plant and Soil*, 78(3), 401–408.
- [39] Laity, J. 2008. *Deserts and desert environments*. (1th ed). *Wiley-Blackwell*.
- [40] Xuan, J., Sokolik, I., Hao, J. & Guo, F. 2004. Identification and characterization of source of atmospheric mineral dust in East Asia. *Journal of Atmospheric Environmental*, 38(36), 6239–6252.
- [41] Bang, S.S., Leibrock, C., Smith, B., Pinkelman, R.J., Frutiger, S., Nehl, L.M., Comes, B.L., Coleman, D. & Bang, S. 2009. Geotechnical values of microbial calcite in dust suppression. *Proc. of NSF Engineering Research and Innovation Conference (CD-ROM)*, Honolulu, HI.
- [42] Soil penetrometer, pocket style, (2016), Humboldt product manual.
- [26] Whiffin, V.S., van Paassen, L.A. & Harkes, M.P. 2007. Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique. *Geomicrobiology Journal*, 24(5), 417–423.
- [27] Ramachandran, S.K., Ramakrishnan, V. & Bang, S.S. 2001. Remediation of concrete using micro-organisms. *ACI Materials Journal*, 98(1), 3–9.
- [28] BSI, 2015. BS5930: *Code of Practice for Ground Investigations*. BSI, London, United Kingdom.
- [29] Koopaenia, M.A. & Afzali, S.F. 2015. Examining some desert conditions on some non-alive waste industrial mulches for controlling wind erosion. *Ecol. Environ. Conserv*, 21 (1), 15–23.
- [30] Shahrokhi-Shahraki, R., Zomorodian, S.M.A., Niazi, A. & O'Kelly, B.C. 2014. Improving sand with microbial-induced carbonate precipitation. *Journal of Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Ground Improvement*, 168(3), 217–230.
- [31] DeJong, J.T., Mortensen, B.M., Martinez, B.C. & Nelson, D.C. 2010. Bio-mediated soil improvement. *Journal of Ecological Engineering*, 197–210.
- [32] Maleki Kakelar, M., Ebrahimi, S., Asadzadeh, F. & Emami Tabrizi, M. 2016. Evaluation of the Efficiency of Microbial Induced Carbonate Precipitation for Loose Sand Dunes Fixation. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 47(2), 407–415, (In Persian).
- [33] Van Paassen, L.A., Harkes, M.P. Van Zwieten, G.A. et al. 2009. Scale up of BioGrout: a biological ground reinforcement method. In *Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Alexandria, Egypt (Hamza M, Shahien M and El-

Investigating Performance of Biocementation Method in Stabilization Sand Dunes for Dealing with Wind Erosion

H. Ghaffari^{1*}, S. M. A. Zomorodian²

1- M.Sc. Student Hydraulic Structure, Water Engineering Department, Shiraz University, Iran

2- Associate Professor of water engineering, Shiraz University, Iran

*hamideh.ghaffari@modares.ac.ir

Abstract

Wind erosion and the phenomenon of Dust with all of its controlling methods is serious problem. This phenomenon lead environment degradation and fugitive dust storms. So, Study and use of the new methods to control this natural phenomenon is essential. In this study, the novel and environmental friendly method of soil biological stabilization was investigated with using an abundant bacterial species founding in nature and soil deposits. The scientific name of this bacterium is *Sporosarcina Pasturii* (PTCC 1645) and uses as the urease-positive bacterium. This bacterium produce urease enzyme which converts urea to ammonium and carbonate, resulting in the precipitation of calcite crystals that bridge the soil particles. In this study a mixture of cementation and bacterial-cell solutions uniformly sprayed onto the exposed top surfaces of the soils. The concentration of bacterial-cell solution was quantified in terms of its optical density at 600nm wavelength (OD_{600}) which equal 1.5 (that is, approximately 1.5×10^8 bacterial cells $\cdot ml^{-1}$). The prepared equimolar urea-calcium chloride cementation solution included nutrient broth ($3g \cdot l^{-1}$), ammonium chloride ($10g \cdot l^{-1}$) and sodium bicarbonate ($2.12g \cdot l^{-1}$) prepared at 0.5M concentration. The mixture volume sprayed onto each specimen was equal to 1.5Vv (where Vv is the pore voids volume of the topmost 3-mm thick layer of the 20-mm deep loose sand tray-specimens). The bench scale experimental programme presented investigates the proposed technique's effectiveness for stabilisation of two clean, angular to sub-angular medium silica sands and carbonate silty sands with different gradations (sand t60 and sand t90 with size ranges of 0.125–0.50 and 0.075–0.85mm, respectively and carbonate sand with size ranges of 0.001–0.85mm, and mean particle size (D_{50}) values of 0.28, 0.24 and 0.20 mm, respectively), the time-dependent (retention time 3, 7, 14, 20 and 28 days) compressive strength development for the crustal sand layer following single- and double-MICP (with interval of 6 days) spray treatments, as well as wind tunnel experiments under the condition of wind velocity of $20 ms^{-1}$. The effect of dew formation on crustal compressive strength development with curing period and the efficiency of the MICP treatment for the outdoor environment compared to laboratory-controlled test conditions. A pocket penetrometer was used to determine the compressive strength of soils. Significant improvements in the Compressive strength of the treated soil samples were observed. The results show improving compressive strength with time. The highest compressive strength in the carbonate sand was obtained equals to 84 kPa. Silica sand with finer size distribution has shown more compressive strength than two other soils. Also the results showed that double-MICP spray treatments of the bacteria solution and cementation was more effective than single- MICP spray treatments in the compressive strength of soils, especially in the silica sand equals to 190% in a curing period of 28 days. Also, the cured MICP-treated crustal sand layer was stable to $20 m \cdot s^{-1}$ winds that demonstrating the potential of biological stabilisation via the MICP process as an appropriate option for dealing with desertification and motion of sandy soil deposits.

Key word: Wind Erosion, *Sporosarcina Pasteurii*, Compressive Strength, Pocket Penetrometer.