

## بررسی تأثیر اصلاح بیولوژیک بر افزایش مقاومت خاک‌های سیلنتی قلیایی مناطق خشک و نیمه‌خشک در برابر فرسایش ناشی از آب و باد (مطالعه موردی: کویر میقان)

هما شفیعی<sup>۱</sup>، سهیل قره<sup>۲\*</sup>، سیدحمید لاجوردی<sup>۳</sup>، احسان... ضیغمی<sup>۴</sup>، محبوبه پورکلهر<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری گروه مهندسی عمران، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی

<sup>۲</sup> دانشیار گروه مهندسی عمران، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی / بخش فنی و مهندسی، دانشگاه پیام نور، تهران

<sup>۳</sup> استادیار گروه مهندسی عمران، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی

<sup>۴</sup> دانشیار معلم گروه شیمی، پژوهش‌سرای خواجه‌نصیر قم

دریافت: ۱۴۰۰/۸/۱۴، بازنگری: ۱۴۰۰/۱۱/۲۴، پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۲۶، نشر آنلاین: ۱۴۰۰/۱۲/۲۶

### چکیده

فرسایش ناشی از باد در سطح خاک، سبب ایجاد گردوغبار و تهدید سلامت انسان و محیط‌زیست می‌گردد. علی‌رغم تحقیقات متعدد انجام‌شده بر فرآیند ایجاد پوسته زیستی به‌واسطه رسوب کلسیت (Calcite) ناشی از فعالیت باکتری در خاک‌های درشت‌دانه، مطالعات کافی به‌منظور استفاده از این روش در بهسازی خاک‌های ریزدانه سیلنتی از نوع شور و قلیایی صورت نگرفته است. در مطالعه حاضر از باکتری اسپورسارسینا پاستوری (*Sporosarcina pasteurii*) جهت ایجاد پوسته زیستی بر روی خاک سیلنتی منطقه کویر میقان به‌منظور جلوگیری از پدیده گردوغبار استفاده شده است. نمونه‌های خاک با مقادیر متفاوت باکتری (از نظر غلظت و میزان باکتری بر سطح) آماده شدند. نمونه‌های آماده‌شده پس از طی روزهای عمل‌آوری متفاوت در دستگاه تونل باد ساخته‌شده در راستای این مطالعه قرار گرفتند. پس از اتمام آزمایش تونل باد میزان فرسایش سطحی نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. جهت بررسی بیشتر، آزمایش‌های ذوب و یخ، آب شستگی، نفوذ مخروط، هدایت الکتریکی، pH و آنالیزهای میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و پراش اشعه ایکس (X-Ray Diffraction (XRD)) نیز بر روی نمونه‌ها انجام شده است. جهت مقایسه تثبیت با باکتری و تثبیت‌کننده‌های متداول، نمونه‌هایی با شرایط مشابه از سیمان و آهک آماده شده و فرسایش سطحی ناشی از باد در آن‌ها اندازه‌گیری شده است. نتایج این مطالعه نشان داد که ایجاد پوسته سطحی به‌روش MICP (Microbial Induced Calcium Carbonate Precipitation)، فرآیندی مؤثر جهت کنترل گردوغبار ناشی از فرسایش بادی در منطقه می‌باشد. با استفاده از فرآیند پوسته زیستی در نمونه‌های ۲۸ روزه، ۹۵ درصد افزایش در مقاومت سطحی و ۸۹/۸ درصد کاهش در میزان فرسایش بادی مشاهده شده است.

**کلیدواژه‌ها:** پوسته زیستی، سیلنت، قلیایی، تونل باد، فرسایش سطحی، دوام، ریزساختار.

### ۱- مقدمه

چسبندگی بین ذرات خاک به‌واسطه موادی مانند سیمان، آهک، استفاده از قیر و انواع مالچ (به‌ویژه مالچ‌های نفتی که برای محیط‌زیست به‌شدت مخرب می‌باشند)، حفظ رطوبت خاک، اسپری آب و ایجاد پوسته‌های مقاوم در برابر فرسایش سطحی پیشنهاد شده‌اند (Ivanov و Stabnikov، ۲۰۱۷).

با توجه به شرایط و نیازهای موجود، فناوری‌های جدید، پایدار و مقرون‌به‌صرفه و دوست‌دار محیط‌زیست جهت بهسازی زمین، مدنظر قرار گرفته‌اند. فرآیند اصلاح خاک به‌وسیله باکتری یا اصلاح بیولوژیک به‌عنوان راه‌حل مؤثر و سازگار با محیط‌زیست جهت تثبیت سطحی خاک، کنترل فرسایش و جلوگیری از بروز

بخش وسیعی از ایران را مناطق کویری بدون پوشش گیاهی مناسب دربر گرفته است. در نتیجه مشکل فرسایش خاک در ایران بسیار بارز و چشمگیر می‌باشد. میزان فرسایش خاک در ایران چندین برابر بیش از میانگین آن در کشورهای آمریکایی و اروپایی است. در مناطق خشک و نیمه‌خشک فرسایش بادی عامل اصلی فرسایش خاک بوده و آثار نامطلوب آن به‌صورت کویر و بیابان و ایجاد پدیده گردوغبار یا ریزگرد نمود می‌یابد. در زمینه کنترل فرسایش خاک ناشی از باد، روش‌های متنوعی مانند استفاده از پوشش گیاهی، تراکم لایه خاک سطحی، افزایش اصطکاک و

\* نویسنده مسئول: شماره تماس:

آدرس ایمیل: h.shafiei92@iau-arak.ac.ir (ه. شفیعی)، ghareh\_soheil@pnu.ac.ir (س. قره)، sh-lajevardi@iau-arak.ac.ir (س.ح. لاجوردی)،

mpourkalhor@yahoo.com (م. پورکلهر)، e-zeighami@iau-arak.ac.ir (ا. ضیغمی).

در مطالعه حاضر تأثیر فرآیند ذوب و یخ و دمای محیط کم‌تر از ۵ درجه سانتی‌گراد بر فعالیت باکتری مورد بررسی قرار گرفته‌اند. از افزودن مواد مغذی باکتری و منبع کلسیم به خاک می‌توان جهت افزایش فرآیند رشد باکتری و سیمانی شدن زیستی استفاده نمود، در این خصوص استفاده از کلرید کلسیم به‌عنوان منبع کلسیم از نظر درجه تبلور و میزان کربنات کلسیم رسوبی انتخاب مناسبی می‌باشد (Enein و همکاران، ۲۰۱۲). در صورت استفاده از محیط‌های کشت صنعتی و استفاده از موادی مانند عصاره مخمر برای رشد باکتری‌ها می‌توان هزینه این روش را کاهش داد (Omorieg و همکاران، ۲۰۱۹). باکتری‌های مختلفی جهت فرآیند اصلاح بیولوژیک مورد بررسی قرار گرفته‌اند که از جمله آن‌ها می‌توان به باسیلوس پاستوری<sup>۵</sup> که با عنوان اسپورسارسینا پاستوری<sup>۶</sup> باز رده‌بندی شده است (ATCC 11859) اشاره نمود. این باکتری از نوع باکتری‌های قلیادوست (آلکالوفیل)<sup>۷</sup> بسیار فعال، غیر بیماری‌زا و بومی خاک است. از باکتری باسیلوس پاستوری در مطالعات آزمایشگاهی متعددی جهت بهسازی خاک بر مبنای رسوب کلسیت استفاده شده است (Meyer و همکاران، ۲۰۱۱؛ Kim و همکاران، ۲۰۱۴). در مطالعه حاضر نیز از این باکتری جهت ایجاد فرآیند سیمانی شدن زیستی استفاده شده است. در مطالعات گذشته تحقیقات گسترده‌ای در زمینه استفاده از این فناوری در خاک‌ها جهت جلوگیری از فرسایش سطحی، صورت گرفته و روش‌های مختلفی از جمله ایجاد پوسته زیستی مطرح شده‌اند (Bang و همکاران، ۲۰۱۱؛ DeJong و همکاران، ۲۰۱۳؛ Ivanov و Stabnikov، ۲۰۱۱).

انتخاب روش مناسب بهسازی با باکتری به عوامل متعددی از جمله نوع خاک، نوع باکتری، گستردگی سطح مورد نظر بهسازی و مسائل اقتصادی بستگی دارد. جهت انتقال باکتری به خاک می‌توان از تکنیک تزریق و یا اسپری استفاده نمود. در پروژه‌های با هدف کاهش نفوذپذیری و افزایش مقاومت از روش تزریق و در پروژه‌های با هدف کاهش فرسایش خاک ناشی از باد و آب، کنترل گردوغبار و کنترل آلاینده‌ها روش اسپری کاربرد دارد (Ivanov و Stabnikov، ۲۰۱۶). روش اسپری، روشی ساده و عملی در سطوح وسیع می‌باشد و در سطوح با منافذ کوچک نیز قابل استفاده است. در مطالعه حاضر تأثیر روش اسپری جهت ایجاد پوسته زیستی بر روی خاک سیلنتی منطقه میقان واقع در استان مرکزی مورد بررسی قرار گرفته است. استان مرکزی از استان‌های درگیر با پدیده گردوغبار است که به‌واسطه عوامل طبیعی مانند وجود کویر میقان و بادهای شدید این پدیده در آن تشدید می‌شود. معدن مهم

پدیده‌هایی مانند گردوغبار در مناطق بیابانی معرفی شده است (Mortensen و همکاران، ۲۰۱۱؛ Wang و همکاران، ۲۰۱۷؛ Duo و همکاران، ۲۰۱۸؛ Salifu و همکاران، ۲۰۱۶؛ Rong و همکاران، ۲۰۱۲؛ Jiang و همکاران، ۲۰۱۷؛ Wang و همکاران، ۲۰۱۷؛ Cuadros و همکاران، ۲۰۱۰).

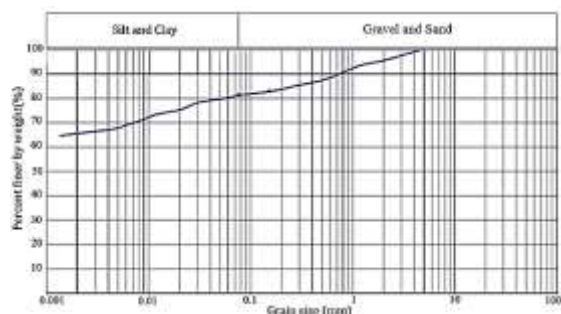
در بهسازی زیستی مبتنی بر سیمانی شدن زیستی از ماده چسباننده تولیدشده بر پایه فعالیت حیاتی باکتری در اصلاح خواص خاک استفاده می‌شود (Ivanov و همکاران، ۲۰۱۵). سیمانی شدن زیستی بر پایه رسوب کربنات کلسیم ناشی از فعالیت میکروبی (MICP)<sup>۱</sup>، شامل تولید، بارش و رسوب کربنات کلسیم به شکل‌های کلسیت، واترایت<sup>۲</sup> یا آراگونایت<sup>۳</sup> به‌واسطه فعالیت میکروارگانیسم‌ها در ماتریس خاک و اتصال ذرات خاک می‌باشد (Gao و همکاران، ۲۰۱۹؛ Ivanov و Chu، ۲۰۰۸؛ Fischer و همکاران، ۱۹۹۹؛ Ramakrishnan و همکاران، ۲۰۰۱؛ Zydlik و Zydlik، ۲۰۱۳).

در این روش باکتری‌ها به‌عنوان هسته رسوب کربنات کلسیم در خاک عمل می‌نمایند (Achal و Mukherjee، ۲۰۱۵). از مزایای استفاده از این روش می‌توان به افزایش مقاومت، کاهش نفوذپذیری، صرفه‌جویی در مصرف انرژی و عدم تولید مواد مضر برای موجودات زنده اشاره نمود (Keykha و همکاران، ۲۰۱۷). رسوب کلسیت ناشی از فعالیت باکتری به‌واسطه فرآیندهای مختلف و متعددی حاصل می‌شود (DeJong و همکاران، ۲۰۱۰) که در بین آن‌ها هیدرولیز اوره کاربرد گسترده‌ای در بهسازی خاک دارد (DeJong و همکاران، ۲۰۱۰؛ Qabany و همکاران، ۲۰۱۱؛ Weaver و همکاران، ۲۰۱۱؛ Warthmann و همکاران، ۲۰۰۰).

در فرآیند هیدرولیز اوره باکتری‌های اوره‌لیتیک<sup>۴</sup> زیرسطحی با هیدرولیز کردن اوره موجود در محیط، سبب افزایش میزان کربنات کلسیم و به‌واسطه آن افزایش pH خاک می‌شوند (Fujita و همکاران، ۲۰۰۸). فعالیت بهینه آنزیم اوره در محدوده pH، ۷ تا ۹ رخ می‌دهد (Torgal و همکاران، ۲۰۱۵). محدوده دمایی ۵-۶۰ درجه سانتی‌گراد به‌عنوان محدوده بهینه فعالیت اوره‌آز بیان شده است (Kim و همکاران، ۲۰۱۸). در نتیجه بررسی تأثیر دمای زیر ۵ درجه سانتی‌گراد بر روی نمونه‌های خاک اصلاح‌شده با باکتری جهت استفاده از باکتری در محیط طبیعی با فصول سرد الزامی می‌باشد. به دلیل تأثیرپذیر بودن فابریک سطحی خاک از پدیده یخ‌زدگی و ایجاد فروپاشی و خرابی در آن، ذوب و یخ می‌تواند بر پدیده فرسایش سطحی خاک نیز تأثیرگذار باشد (Au و Graham، ۱۹۸۵؛ Qi و همکاران، ۲۰۰۶).

5. *Bacillus pasteurii*  
6. *Sporosarcina pasteurii*  
7. Alkaliphile

1. Microbial Induced Calcium Carbonate Precipitation  
2. Vaterite  
3. Aragonite  
4. Ureolytic bacteria



شکل ۱- منحنی دانه‌بندی خاک

جهت تعیین pH خاک از عصاره یک‌به‌یک و pH سنج الکتریکی و برای اندازه‌گیری EC از عصاره اشباع خاک و دستگاه هدایت‌سنج الکتریکی استفاده شده است. با توجه به هدایت الکتریکی بالاتر از ۴ mS/cm و pH بالاتر از هفت (مشخصه‌های خاک‌های قلیایی و شور) و نتایج آزمایش‌های انجام‌شده بر روی خاک منطقه، خاک سیلتي مورد مطالعه در گروه خاک‌های شور و قلیایی قرار دارد. اصلاح این گروه خاک‌ها نسبت به سایر نمونه‌های خاک مشکل‌تر می‌باشد، زیرا اضافه نمودن رطوبت و مواد اصلاح‌کننده می‌تواند سبب افزایش مجدد املاح خاک گردد و بر روی خواص آن تأثیر بگذارد. غلظت بالای نمک‌های معدنی و pH بیشتر از ۸/۵ از شرایط مناسب جهت تولید سیمن زیستی به‌واسطه اوره‌آز در باکتری‌های قلیادوست می‌باشند (Mortensen و همکاران، ۲۰۱۱). به‌دلیل وجود این شرایط در خاک منطقه، می‌توان این خاک را گزینه مناسبی جهت بهبود به‌روش اصلاح زیستی دانست.

جدول ۱- خواص فیزیکی و شیمیایی خاک

مقادیر	مشخصات خاک
سیلت الاستیک	نوع خاک
۷۶	حد روانی (LL) %
۲۲/۵	هدایت الکتریکی (EC) (mS/cm)
۸/۵۵	pH
۲۱/۱	رطوبت بهینه (W <sub>opt</sub> ) %
۱/۵۲	حداکثر وزن مخصوص خشک (Y <sub>dmax</sub> ) (gr/cm <sup>3</sup> )

## ۲-۲- باکتری

باکتری مورد استفاده در این تحقیق باکتری اسپورسارسینا پاستوری<sup>۹</sup> (PTCC NO:1645, DSM33, ATC11859)، از گروه باکتری‌های باسیلوس گرم مثبت، میله‌ای شکل و هوازی اجباری یا بی‌هوازی اختیاری می‌باشد. باکتری مذکور در گروه باکتری‌های غیر بیماری‌زا و بومی خاک قرار دارد (تهیه‌شده از مرکز کلکسیون

سولفات سدیم ایران در منطقه میقان واقع شده و خاک این منطقه دارای ترکیبات شیمیایی و کانی‌شناسی خاص و منحصر به فردی می‌باشد. با توجه به ویژگی‌های بوم‌شناسی (زیستگاه پرندگان مهاجر شامل گونه‌های نادر و حمایت‌شده) و گیاه‌شناسی خاص (ذخیره‌گاه مهم گیاهان شور کشور) این منطقه، استفاده از مواد تثبیت‌کننده شیمیایی مضر برای محیط‌زیست، مناسب این منطقه نمی‌باشد. با توجه به وسعت بالای این منطقه، پارامترهای پایین بودن هزینه بهسازی و ساده و عملی بودن روش پیشنهادی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشند. با توجه به جدید بودن و دامنه گسترده کاربرد اصلاح بیولوژیک به‌روش ایجاد پوسته زیستی در خاک‌ها، این روش جهت اصلاح نمونه خاک‌های ریزدانه منطقه مورد مطالعه، مدنظر قرار گرفته است. بدین منظور از خاک سیلتي کویر میقان نمونه‌هایی تهیه شده و به‌روش اسپری باکتری‌ها به نمونه‌های خاک انتقال یافتند. با توجه به شرایط خاص خاک کویر میقان از نظر ریزدانه بودن ذرات خاک (بخش سیلتي) و وجود املاح و قلیایی بودن شدید خاک منطقه و بررسی پدیده‌های آب شستگی و ذوب و یخ در کنار بررسی‌های ریزساختاری و کانی‌شناسی خاک (SEM و XRD)، این پژوهش جنبه خاصی از فرآیند اصلاح میکروبی را به خود اختصاص داده است.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- مشخصات مواد و مصالح

استان مرکزی از استان‌های بیابانی ایران بوده و در منطقه خشک و نیمه‌خشک قرار دارد. در این استان بیش از ۴۹۰ هزار هکتار از اراضی مرتعی و تالابی به اراضی بیابانی و کانون انتشار گردوغبار تبدیل شده‌اند. منطقه مورد نظر این مطالعه کویر میقان در شمال شهرستان اراک است که در حداثی ۳۱°۵۵' تا ۳۱°۴۹' عرض ۳۴°۵۳' تا ۳۴°۳۵' طول شرقی و ۳۴°۳۰' عرض شمالی واقع گردیده است. اقلیم خشک و نیمه‌خشک، فقدان پوشش گیاهی حفاظتی مناسب برای خاک، کاهش مواد آلی و تخریب ساختمان خاک و در نهایت حضور فعال باد از عوامل اصلی پیدایش مشکل فرسایش خاک در این منطقه می‌باشند. در کویر میقان انواع مختلفی از خاک شامل رس، سیلت، مارن و تپه‌های ماسه‌ای وجود دارد. در پژوهش حاضر از خاک سیلتي منطقه که در مطالعه حاضر Mis<sup>۸</sup> نامیده می‌شود، استفاده شده است. مشخصات فیزیکی و شیمیایی این خاک در جدول (۱) و منحنی دانه‌بندی در شکل (۱) ارائه شده است. در این مطالعه آزمایش‌های شناسایی خاک بر اساس استاندارد ASTM انجام شده است.

8. Mighan Silt

۹. Sporosarcina pasteurii

میکروارگانسیم‌های صنعتی ایران). کشت باکتری در محیط‌های استاندارد نوترینت آگار<sup>۱۰</sup> و نوترینت برات<sup>۱۱</sup> (محیط کشت مایع) مطابق جدول (۲) انجام شده است.

جدول ۲- مشخصات محیط‌های کشت باکتری (DSMZ):  
Omoregie و همکاران، (۲۰۱۷)

آگار	ترکیبات
پپتون <sup>۱۲</sup> (۵ گرم)، عصاره مخمر گوشت (۳ گرم)، آگار	
نوترینت آگار	(۱۵ گرم)، آب مقطر (۱۰۰۰ میلی‌لیتر)، اوره (۲۰ گرم در لیتر)*
نوترینت برات	عصاره مخمر گوشت (۱ گرم)، پپتون (۵ گرم)، عصاره مخمر (۲ گرم)، سدیم کلراید (۵)، آب مقطر (۱۰۰۰ میلی‌لیتر)

\* قبل از اتوکلاو ۲۰ g/l اوره اضافه شده است.

جدول ۳- مشخصات نمونه‌ها

تیپ نمونه	باکتری بر سطح (Lit/m <sup>2</sup> )	وزن مخصوص	درصد باکتری (/.)
۱	۲	$Y_{dmax}$	۱۰۰
۲	۱	$Y_{dmax}$	۵۰
۳	۲	$Y_{dmax}$	۵۰
۴	۱	$Y_{dmax}$	۱۰۰
۵	۱	90% $Y_{dmax}$	۱۰۰
۶	۲	90% $Y_{dmax}$	۱۰۰
۷	۱	90% $Y_{dmax}$	۵۰
۸	۲	90% $Y_{dmax}$	۵۰
۹	۰	۰	۰
۱۰	۰	$Y_{dmax}$	۰

مبنای انتخاب میزان باکتری بر سطح، مقدار فضاهای خالی ۵ میلی‌متر از خاک سطحی (حداقل ضخامت مالچ بر طبق ضابطه شماره ۷۸۳) می‌باشد. به منظور بررسی اثر سم‌ناسیون<sup>۱۳</sup> میکروبی در کنترل فرسایش بادی در این مطالعه، دستگاه تونل باد طراحی و ساخته شد. طول تبدیل و کانال قرارگیری نمونه در این تونل به ترتیب ۱/۸ و ۲/۲۵ متر می‌باشد. کانال دارای دو دریچه برای قرارگیری بادسنج و یک دریچه جهت ورود و خروج نمونه است. ابعاد محفظه نمونه این دستگاه طوری طراحی شده که جهت نمونه‌های با ابعاد مختلف قابل استفاده باشد. با کمک بادسنج دیجیتال تعبیه شده در این سیستم، ماکزیمم سرعت باد در این تونل ۶۰ کیلومتر بر ساعت اندازه‌گیری شده است.

در هر سری از آزمایش تونل باد، نمونه‌ها به مدت ۱۰ دقیقه در معرض جریان باد قرار گرفتند (طبق توان دستگاه و آزمایش‌های اولیه بر روی نمونه‌های کنترل). با توجه به این که میانگین سالانه سرعت باد در کویر میقان معادل ۲۳ کیلومتر بر ساعت در گزارش‌های منطقه‌ای اعلام شده است، تونل باد طراحی شده جهت شبیه‌سازی شرایط منطقه مورد مطالعه مناسب می‌باشد. با کمک معادله تجربی والیکانوف<sup>۱۴</sup> و در نظر گرفتن رنج اندازه ذرات خاک و قطر معادل ذرات، حداقل و حداکثر سرعت فرسایش بادی در منطقه مورد مطالعه ۱۳ تا ۴۷ کیلومتر بر ساعت محاسبه شده است. با توجه به موارد ذکر شده دو سرعت ۳۰ و ۶۰ کیلومتر بر ساعت به عنوان سرعت باد در تونل مورد آزمایش، مدنظر قرار گرفتند. جهت بررسی تأثیر زمان عمل‌آوری بر مقاومت نمونه‌ها، نمونه‌های

پس از کشت باکتری‌ها و رسیدن به حداکثر سرعت رشد و تکثیر (پس از ۲۴ ساعت انکوباسیون<sup>۱۵</sup>) و قرار گرفتن در مرحله نهایی رشد، باکتری‌های کشت شده از انکوباتور<sup>۱۶</sup> خارج شده و تا زمان استفاده در یخچال (دمای ۴ درجه سانتی‌گراد) نگهداری شدند (غلظت تقریبی محلول باکتری نهایی:  $10^9 \times \text{cells/ml}$ ). با توجه به نتایج مطالعات سایر محققین، در مطالعه حاضر از مولار مساوی اوره (۱ mol،  $60 \text{ g mol}^{-1}$ ) و کلرید کلسیم (۱ mol،  $1 \text{ mol}$ ) به عنوان محلول سیمانی استفاده شده است (NG و همکاران، ۲۰۱۲).

### ۳-۲- آماده‌سازی نمونه‌ها و روش‌های آزمایشگاهی

به منظور بررسی تأثیر پارامترهای غلظت باکتری، میزان باکتری در سطح و وزن مخصوص، نمونه‌هایی با مشخصات جدول (۳)، در سینی‌هایی با ابعاد  $4 \times 30 \times 40$  سانتی‌متر تهیه شدند. به این منظور نمونه‌های خاک خشک با درصد مشخص آب (رطوبت بهینه) مخلوط و تا رسیدن به وزن مخصوص مورد نظر ( $Y_{dmax}$ ) در سینی‌ها به روش پروکتور<sup>۱۵</sup> متراکم شدند. به منظور انتقال باکتری و محلول سیمانی به سینی‌ها از دو اسپری مجزا استفاده شده است. محلول‌ها از ارتفاع حدوداً ۳۰ سانتی‌متر و به صورت یکنواخت به‌طور هم‌زمان بر روی سینی‌ها اسپری شدند. به منظور بررسی تأثیر غلظت باکتری از محلول ۱۰۰٪ و ۵۰٪ باکتری (۵۰٪ باکتری + ۵۰٪ آب دیونیزه<sup>۱۶</sup>) و به منظور بررسی میزان باکتری بر سطح از دو میزان باکتری بر سطح ۱ و ۲ لیتر بر مترمربع استفاده شده است.

15. Proctor  
16. Deionized  
17. Cementation  
18. Valikanov

10. Nutrinet agar  
11. Nutrient broth  
12. Peptone  
13. Incubation  
14. Incubator

همکاران، ۲۰۰۶). پس از طی سیکل‌های موردنظر نمونه‌ها در تونل باد قرار گرفته و میزان فرسایش آن‌ها تعیین شد. به‌منظور مطالعه رفتار خاک تثبیت‌شده با باکتری در برابر آب شستگی و فرسایش ناشی از آب، نمونه‌هایی از خاک و باکتری به‌شرح فوق آماده شده و تحت فرآیند آب شستگی قرار گرفتند. به‌واسطه بررسی‌های صورت گرفته بر میزان بارندگی در دوره‌های ترسالی و خشک‌سالی ۱۰۰ ساله ایستگاه‌های داودآباد، اراک، مشک‌آباد و ملک‌آباد، متوسط حداکثر میزان بارش سالیانه در دوره ترسالی ۶۱۴/۵ میلی‌متر و در دوره خشک‌سالی ۲۰۵/۸ میلی‌متر و میانگین بارش سالانه حدود ۲۸۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است (منتظری، ۱۳۸۹). دبی متوسط حوزه آبریز کویر میقان،  $5/780 \text{ m}^3/\text{sec}$  بیان شده است.

به‌منظور انجام آزمایش آب‌شستگی بر روی نمونه‌ها، با توجه به نتایج تحقیقات سایر محققین (Gao و همکاران، ۲۰۲۰؛ Knorr، ۲۰۱۴؛ Shi و همکاران، ۲۰۱۲؛ de Lima و همکاران، ۲۰۰۹؛ Lee و Huang، ۲۰۰۷؛ Wang و همکاران، ۲۰۰۷) دستگاهی مطابق با طرح شماتیک ارائه‌شده در شکل (۴) طراحی و ساخته شد. پارامترهای تأثیرگذار بر آب‌شستگی عبارت‌اند از: درجه، طول، شکل و جهت شیب (کد ۴۱۷). از نظر میزان شیب، منطقه را می‌توان عرصه‌ای مسطح در نظر گرفت. در منطقه طرح، ۱۰۰ درصد سطح در کلاس شیب ۰-۲ درصد قرار گرفته است؛ بنابراین مطابق با تحقیقات سایر محققین، شیب ۱۵ درجه (۲۵/۶ درصد) پاسخگوی شیب منطقه بوده و انتخاب مناسبی جهت شیب دستگاه جریان رواناب می‌باشد. از نظر طول نیز به‌دلیل فرآیند مقایسه‌ای بودن آزمایش‌ها، تغییر آن در نمونه‌ها مدنظر قرار نگرفته است. با توجه به میزان دبی رواناب و جریان‌های سطحی سالانه در منطقه کویر میقان، زمان ۵ دقیقه (با توجه به مقایسه‌ای بودن نتایج فرسایش و با توجه به مبدأ زمانی سایر مطالعات) جهت جریان رواناب بر روی سطح خاک در نظر گرفته شده است.



(الف)



عمل‌آوری شده در روزهای ۷، ۱۴، ۲۸، ۵۶ و ۱۴۰ روز در تونل باد مورد آزمایش قرار گرفتند.



شکل ۲- دستگاه تونل باد ساخته‌شده جهت آزمایش فرسایش بادی نمونه‌ها

نمونه‌ها قبل از قرارگیری در تونل باد توزین شده و پس از قرار گرفتن در معرض باد، کاهش جرم نمونه‌ها اندازه‌گیری و درصد فرسایش و مدول فرسایش بادی در نمونه‌ها تعیین شد. درصد فرسایش از اختلاف وزن نمونه‌ها قبل و بعد از تونل باد تقسیم بر وزن خاک قبل از تونل باد حاصل شده است. جهت تعیین مدول فرسایش بادی از رابطه زیر استفاده شده است (ملکی کاکلر و همکاران، ۱۳۹۵؛ اصغری کلجاهی و همکاران، ۱۳۹۷):

$$Re = (m_0 - m) / s.t \quad (1)$$

$Re$ : مدول فرسایش بادی برحسب کیلوگرم بر مترمربع در ساعت

$m_0$ : وزن نمونه قبل تونل باد

$m$ : وزن نمونه بعد از تونل باد

$s$ : مساحت نمونه

$t$ : مدت‌زمان قرار گرفتن نمونه در تونل باد

با توجه به تأثیر فرآیند ذوب و یخ بر فرسایش سطحی نمونه‌ها و با توجه به بازه تغییرات دمایی در منطقه کویر میقان، نمونه‌ها در سیکل‌های ذوب و یخبندان نیز مورد بررسی قرار گرفتند (ASTM D560). هدف از انجام این آزمایش، ارزیابی دوام نمونه‌های اصلاح‌شده با باکتری در برابر سیکل‌های یخ و ذوب می‌باشد. جهت آزمایش ذوب و یخ در این مطالعه از دستگاه تست ذوب و یخبندان شرکت آزمون، مدل CO 725 استفاده شده است (شکل ۳). طبق استاندارد حداکثر ۱۰ سیکل ذوب و یخ روی نمونه‌ها انجام شد. هر سیکل شامل ۲۴ ساعت قرار گرفتن نمونه در حالت یخبندان تا دمای منفی ۲۳ درجه سانتی‌گراد و ۲۴ ساعت در دمای ۲۲ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. طبق بررسی‌های صورت گرفته بر روی مطالعات انجام‌شده توسط سایر محققین، سیکل‌های ۱، ۳، ۵، ۷ و ۱۰ ذوب و یخ به‌عنوان سیکل‌های قرارگیری نمونه‌ها در تونل باد در نظر گرفته شدند (Wang و همکاران، ۲۰۰۷؛ Wang و همکاران، ۲۰۱۷؛ قضاوی و روستایی، ۲۰۱۰؛ Koponen

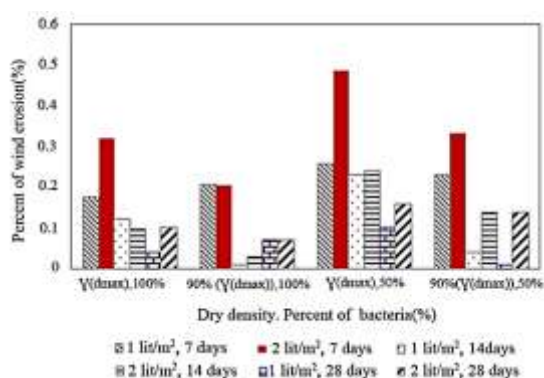
یکی از نمونه‌ها فقط محلول باکتری و روی نمونه دیگر فقط محلول سیمانی اسپری شد. هر سه نمونه در دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند و پس از عمل‌آوری سطح نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفتند. به منظور بررسی تشکیل کربنات کلسیم و بررسی کانی‌های خاک در روند بهسازی با باکتری، آنالیز XRD بر روی نمونه‌های پودری از خاک‌های بدون باکتری و پوسته سطحی خاک‌های اصلاح‌شده با باکتری (۱۰۰٪)، یک لیتر بر مترمربع و وزن مخصوص ماکزیمم) انجام شد. برای بررسی بیشتر بر ریزساختار خاک قبل و بعد از اصلاح با باکتری در این مطالعه، از تصاویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) استفاده شده است.

جهت مقایسه تثبیت سطحی خاک سیلتی منطقه میقان با استفاده از باکتری با روش‌های متداول تثبیت خاک با استفاده از آهک و سیمان، دو سینی از خاک سیلتی منطقه به روش اسپری سطحی، یکی تثبیت‌شده با سیمان و دیگری با آهک تهیه شده و پس از گذشت ۲۸ روز در تونل باد قرار گرفتند. میزان فرسایش این نمونه‌ها با نمونه اصلاح‌شده با باکتری مقایسه شدند.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- نتایج آزمایش تونل باد

پس از پایان آزمایش تونل باد برای هر نمونه درصد فرسایش و مدول فرسایش بادی محاسبه شدند. نتایج مربوط به تغییرات درصد فرسایش خاک سیلتی نسبت به تغییر میزان باکتری بر سطح در شکل (۵) ارائه شده است.

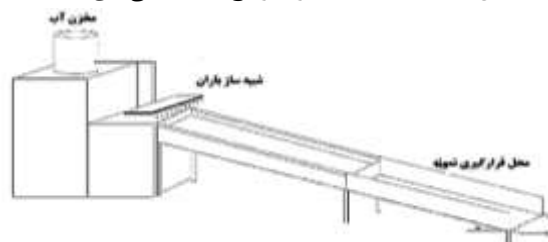


شکل ۵- تأثیر میزان باکتری بر سطح بر درصد فرسایش خاک

در این شکل مشاهده می‌شود که درصد فرسایش سطحی در نمونه‌های با میزان باکتری  $2 \text{ lit/m}^2$  نسبت به  $1 \text{ lit/m}^2$  در دوره‌های عمل‌آوری متفاوت بیشتر است (۰ تا ۵۰٪ اختلاف)، به عبارت دیگر افزایش میزان باکتری بر سطح از ۱ به ۲ لیتر بر مترمربع، از نظر افزایش مقاومت در برابر فرسایش سطحی در تونل

(ب)

شکل ۳- الف) دستگاه ذوب و یخ، ب) سینی‌های خاک



شکل ۴- طرح شماتیک دستگاه آب شستگی

بر اساس حداکثر میزان بارندگی سالیانه منطقه، نرخ جریان (دبی)  $1/2$  لیتر بر دقیقه حاصل شد که بر این اساس در مطالعه حاضر نرخ جریان  $1/5$  لیتر بر دقیقه جهت آزمایش مدنظر قرار گرفت. جهت بررسی تأثیر سرعت جریان بر میزان فرسایش، نرخ جریان ۳ لیتر بر دقیقه به عنوان سرعت دوم در نظر گرفته شده است. آب از ارتفاع نیم‌متری به وسیله لوله‌هایی که در فواصل مساوی سوراخ‌هایی بر روی آن‌ها تعبیه شده بود و کل سطح را پوشش می‌دادند بر روی سطح نمونه‌ها جریان یافت. بدین ترتیب فرسایش ناشی از برخورد قطرات باران با سطح خاک و فرسایش ناشی از رواناب هر دو شبیه‌سازی شدند.

در مطالعه حاضر به منظور بررسی مقاومت پوسته سطحی تشکیل‌شده بر سطح خاک اصلاح‌شده از آزمایش نفوذ مخروط استفاده شد. بدین منظور از وزنه مخروطی شکل  $250$  گرمی از جنس استیل با سطح قاعده  $19/31$  سانتی‌متر مربع و ارتفاع  $7/49$  سانتی‌متر و زاویه نوک  $40$  درجه استفاده شده است (Baghbanan و Razani, ۲۰۱۶). مخروط از فاصله  $50$  سانتی‌متری تحت تأثیر وزن خود بر سطح نمونه‌های  $28$  روزه آماده‌شده در سینی (مشابه سینی‌های آماده‌شده جهت آزمایش تونل باد) رها شد. بر روی هر نمونه سه آزمایش نفوذ در سه قسمت متفاوت سینی انجام شد و میانگین حاصله به عنوان میزان نفوذ مخروط ثبت شد.

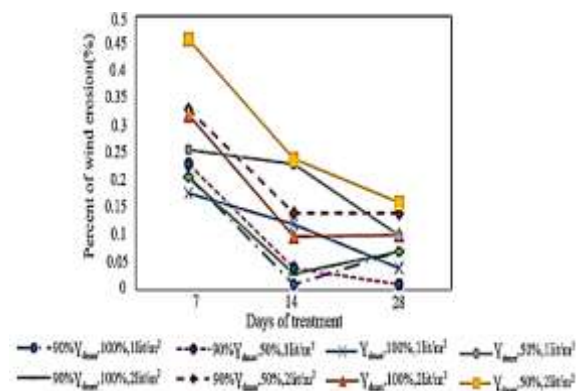
جهت بررسی بیشتر بر تأثیر باکتری بر خواص فیزیکی و شیمیایی خاک، هدایت الکتریکی و pH خاک در نمونه‌های اصلاح‌شده و اصلاح‌نشده اندازه‌گیری شدند. جهت اندازه‌گیری هدایت الکتریکی از دستگاه هدایت‌سنج قابل حمل زینت مدل  $8301$  استفاده شده است. جهت تهیه نمونه‌های EC از عصاره اشباع استفاده شده است (Richards و همکاران، ۱۹۵۴). جهت اندازه‌گیری pH از pH متر الکتریکی هانا<sup>۱۹</sup> مدل PH211 و عصاره یک‌به‌یک استفاده شده است.

جهت بررسی میکروسکوپی<sup>۲۰</sup> حضور باکتری بر سطح خاک منطقه سه نمونه از خاک سیلت با شرایط رطوبت بهینه در ظروف آزمایشگاهی در شرایط یکسان و رطوبت بهینه تهیه شدند. بر روی



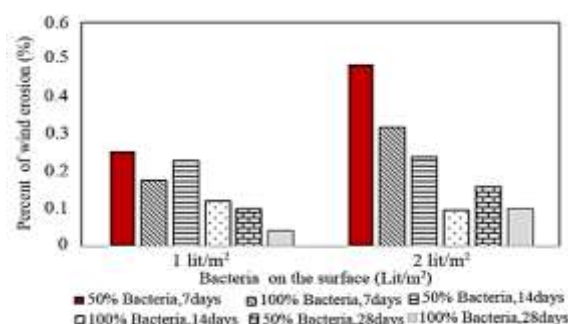
کاهش می‌یابد. در خاک سیلتی با افزایش روزه‌های عمل‌آوری از ۷ به ۲۸ روز، درصد فرسایش خاک در نمونه‌های با حداکثر وزن مخصوص خشک حداقل ۴۸ و حداکثر ۷۷ درصد کاهش یافته است. در نمونه‌های آماده‌شده با وزن مخصوص ۹۰٪ وزن مخصوص خشک ماکزیمم، حداقل ۶۰ و حداکثر ۶۹ درصد کاهش در فرسایش سطحی مشاهده شده است.

در نمونه‌های ۱۴ روزه نظم و روند مشخصی در رفتار نمونه‌ها مشاهده نمی‌شود و در برخی نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های ۷ و ۲۸ روزه کاهش و در برخی افزایش فرسایش مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده تغییرات در روند رشد و فعالیت باکتری و عدم ثبات و تعادل در فرآیند سیمانی شدن تا ۱۴ روز می‌باشد. بنابر نتایج شکل (۷) می‌توان بیان نمود با توجه به عدم ثبات رفتار فرسایشی در نمونه‌های ۱۴ روزه و با توجه به نتایج تحقیقات سایر محققین، مدت‌زمان عمل‌آوری ۲۸ روز به‌عنوان حداقل مدت‌زمان عمل‌آوری نمونه‌های تثبیت‌شده با باکتری در بازه این مطالعه انتخاب مناسبی می‌باشد. در شکل (۸) مدول فرسایش بادی برای نمونه‌های خاک در روزهای مختلف عمل‌آوری قابل مشاهده است. در نمونه‌های اصلاح‌شده با باکتری، حداکثر مقدار فرسایش خاک سیلتی در نمونه شماره ۳ در هفتمین روز عمل‌آوری (معادل ۳/۶ کیلوگرم بر مترمربع در ساعت) و حداقل آن مربوط به نمونه شماره ۷ در روز ۲۸ عمل‌آوری (معادل ۰/۱ کیلوگرم بر مترمربع در ساعت) می‌باشد. در نمونه متراکم شده بدون اصلاح با باکتری (نمونه شماره ۱۰)، در ۱۴ روز فرسایش نمونه به میزان قابل‌توجهی افزایش یافته است. به‌واسطه مقایسه مدول فرسایش بادی در نمونه شماره ۱۰ با سایر نمونه‌ها تأثیر قابل‌توجه اصلاح باکتریایی بر کاهش فرسایش قابل مشاهده است (۴۰٪ کاهش). در نمونه ۷ روزه به‌دلیل وجود رطوبت در سطح نمونه این تفاوت قابل‌ملاحظه نمی‌باشد ولی با کاهش درصد رطوبت با گذشت زمان این میزان افزایش می‌یابد.



شکل ۷- تأثیر روزه‌های عمل‌آوری بر درصد فرسایش نمونه‌ها

باد کمی ننموده است. علت این امر را می‌توان به پر شدن تمامی فضاهای خالی خاک سطحی در میزان باکتری بر سطح ۲ لیتر بر مترمربع نسبت داد (میزان باکتری بر سطح لازم برای پر شدن فضاهای خالی ۵ میلی‌متر از خاک). با پر شدن فضاهای خالی خاک توسط محلول باکتری و ایجاد پل‌های سیمانی، سبب دور شدن ذرات از یکدیگر و کاهش مقاومت در برابر فرسایش سطحی ناشی از باد شده است. در نمونه‌های با وزن مخصوص ۹۰٪ وزن مخصوص ماکزیمم، به‌دلیل افزایش فضای خالی در خاک و فضای کافی جهت فعالیت باکتری و ایجاد پل‌های سیمانی بیشتر، میزان فرسایش در نمونه‌های با میزان باکتری بر سطح ۲ لیتر بر مترمربع نسبت به نمونه‌های با وزن مخصوص ماکزیمم کاهش یافته است. افزایش میزان باکتری بر سطح بر میزان مواد مغذی در دسترس باکتری‌ها نیز تأثیرگذار خواهد بود و با افزایش باکتری بر سطح میزان مواد مغذی در دسترس باکتری‌ها کاهش خواهد یافت. در شکل (۶)، تأثیر غلظت باکتری بر درصد فرسایش خاک‌های سیلتی در وزن مخصوص خشک ماکزیمم قابل مشاهده است. رفتار فرسایشی نمونه‌های سیلتی در حضور ۵۰ و ۱۰۰ درصد باکتری کاملاً با یکدیگر متفاوت می‌باشد. درصد فرسایش در نمونه‌های تثبیت‌شده با ۵۰٪ باکتری بیشتر از ۱۰۰٪ بوده است (ماکزیمم ۳۱٪)، این امر را می‌توان به کاهش غلظت باکتری در محلول به‌واسطه رقیق نمودن محلول با آب نسبت داد (تغییر OD600 محلول باکتری از ۳/۹ به ۱/۹۵). کاهش غلظت باکتری و در نتیجه کاهش تعداد سل‌های باکتری در محیط خاک می‌تواند منجر به کاهش واکنش بین باکتری و سایر فازها شود (Dejong و همکاران، ۲۰۱۱). نتیجه کاهش واکنش‌ها، کاهش نرخ تولید آمونیوم و در نتیجه کاهش رسوب کلسیت می‌باشد (Fischer و همکاران، ۱۹۹۹).



شکل ۶- تأثیر غلظت باکتری بر درصد فرسایش خاک

می‌توان بیان نمود که در خاک سیلتی، غلظت باکتری ۱۰۰٪ از نظر مقاومت در برابر فرسایش سطحی ناشی از باد انتخاب مناسبی در بازه این مطالعه می‌باشد. در شکل (۷) درصد فرسایش نمونه‌های مختلف در روزهای مختلف عمل‌آوری قابل مشاهده است. در کلیه نمونه‌ها با افزایش روزه‌های عمل‌آوری درصد فرسایش

اصلاح‌نشده) به‌میزان ۱/۱ کیلوگرم بر مترمربع در ساعت در نمونه اصلاح‌شده (با حداکثر فرسایش) رسیده است (۸۹/۹۸ درصد کاهش در فرسایش سطحی).

با توجه به این نتایج مشاهده می‌شود که استفاده از باکتری جهت اصلاح خاک، تأثیر قابل توجهی بر کاهش فرسایش نمونه‌ها در معرض باد داشته و می‌توان این روش را برای خاک‌های سیلتی منطقه جهت ممانعت از فرسایش سطحی پیشنهاد نمود. در شکل (۱۱) نمونه خاک کویر با رطوبت طبیعی و بدون هیچ‌گونه اصلاح قبل و بعد از تونل باد قابل مشاهده است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود بعد از تونل باد با سرعت ۶۰ کیلومتر بر ساعت فرسایش قابل‌ملاحظه‌ای معادل ۸۳/۶ درصد در نمونه رخ داده است.

#### جدول ۴- فرسایش در نمونه‌های اصلاح‌شده و نشده (۲۸ روزه)

نمونه	ماکزیمم درصد فرسایش (%)	ماکزیمم مدول فرسایش بادی (kg. m <sup>-2</sup> . h <sup>-1</sup> )
نمونه کنترل	۹۰	۲۰۶
نمونه با حداکثر فرسایش	۰/۲	۱/۱

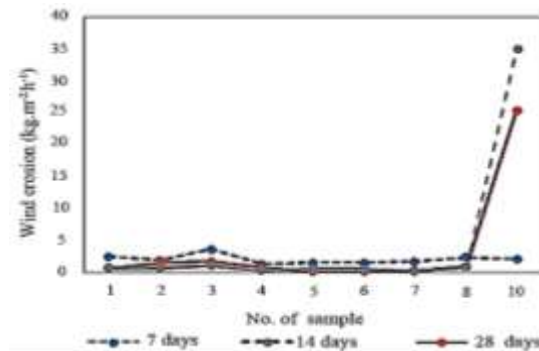
#### ۳-۳- ذوب و یخ

با توجه به این‌که حداقل درصد فرسایش بادی در نمونه‌های با ۱۰۰٪ باکتری و میزان باکتری بر سطح ۱ لیتر بر مترمربع مشاهده شده است، در بازه مطالعه حاضر این مقادیر جهت بهسازی سطحی خاک سیلتی منطقه مدنظر قرار گرفتند.

با توجه به زمان بهینه عمل‌آوری ۲۸ روزه، این نمونه‌ها پس از ۲۸ روز تحت سیکل‌های ذوب و یخ قرار گرفتند. همان‌گونه که در جدول (۵) مشاهده می‌شود پس از طی سیکل‌های ۰.۳، ۵ و ۷ ذوب و یخ، درصد فرسایش نمونه‌ها در تونل باد به صفر کاهش یافته و پس از طی ۱۰ سیکل این میزان به مقدار ۰/۰۰۵٪ افزایش یافته است. بنابر نتایج جدول (۵) می‌توان بیان نمود که سیکل‌های ذوب و یخ سبب از بین رفتن پوسته سطحی و افزایش فرسایش بادی در نمونه‌های خاک اصلاح‌شده با باکتری نمی‌شوند.

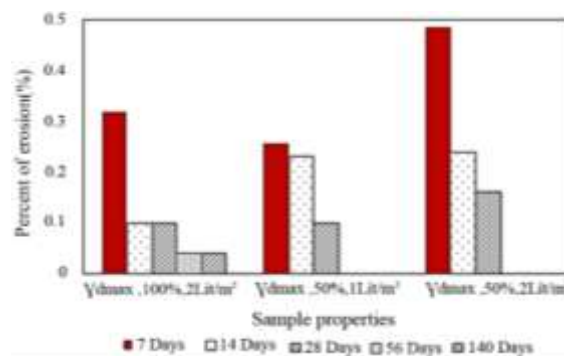
#### جدول ۵- نتایج درصد فرسایش نمونه‌های ۲۸ روزه در تونل باد

نام خاک	مشخصات نمونه				تعداد سیکل ذوب و یخ / درصد
	۳	۵	۷	فرسایش	
Mis	۰	۰	۰	۰/۰۰۵	۱۰
	۱ لیتر بر مترمربع و ۱۰۰٪ باکتری				



شکل ۸- تغییرات مدول فرسایش بادی در روزهای مختلف عمل‌آوری در نمونه‌ها

جهت بررسی بیشتر بر تأثیر افزایش روزهای عمل‌آوری بر درصد فرسایش بادی نمونه‌ها، سه نمونه از خاک (نمونه‌های ۱، ۲ و ۳) در روزهای عمل‌آوری ۵۶ و ۱۴۰ روزه در معرض تونل باد قرار گرفتند. در شکل (۹) درصد فرسایش نمونه‌ها در درصد و میزان باکتری بر سطح متفاوت در روزهای مختلف عمل‌آوری قابل مشاهده است. در نمونه‌های اصلاح‌شده با ۵۰ درصد باکتری در روزهای ۵۶ و ۱۴۰ ام، درصد فرسایش به صفر رسیده است. این نتیجه نشان‌دهنده دوام فرآیند اصلاح خاک به‌روش سیمانی شدن زیستی و دستیابی به مقاومت کامل در برابر فرسایش سطحی ناشی از باد می‌باشد. به‌واسطه بررسی تصاویر نمونه‌ها بعد از تونل باد (شکل (۱۰))، ایجاد پوسته بر سطح نمونه‌ها و عدم تغییر در سطح پس از تونل باد به‌وضوح قابل مشاهده می‌باشد که تأییدی بر نتایج عددی می‌باشد.

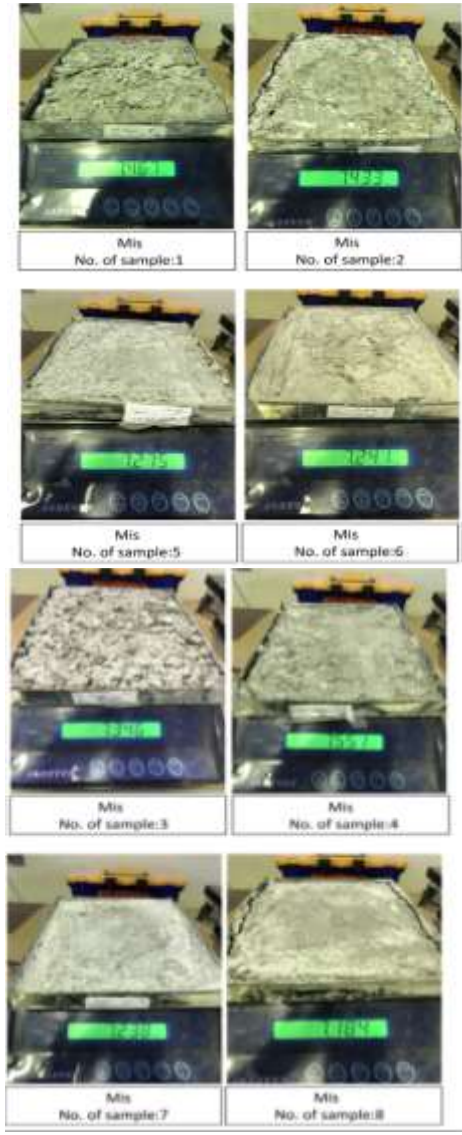


شکل ۹- درصد فرسایش نمونه‌ها در روزهای عمل‌آوری مختلف

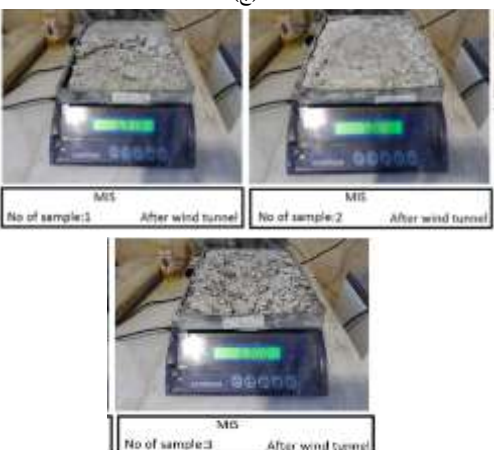
#### ۳-۲- مقایسه نمونه‌های اصلاح‌شده و اصلاح‌نشده

به‌منظور بررسی بیشتر بر تأثیر اصلاح میکروبی بر مقدار فرسایش بادی در نمونه‌ها، مقایسه‌ای بر روی نمونه‌های ۲۸ روزه با و بدون اصلاح با باکتری انجام شد. نتایج این مطالعه در جدول (۴) ارائه شده است. در خاک سیلتی پس از اصلاح، مدول فرسایش بادی خاک از ۲۰۶ کیلوگرم بر مترمربع در ساعت (برای نمونه

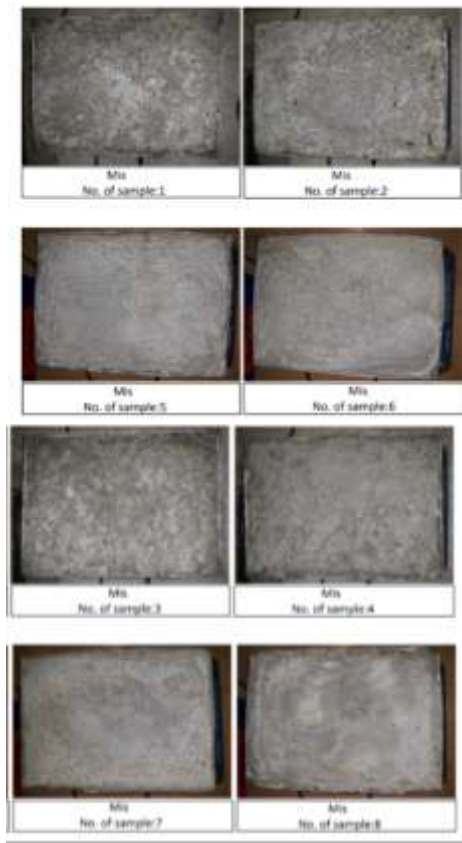




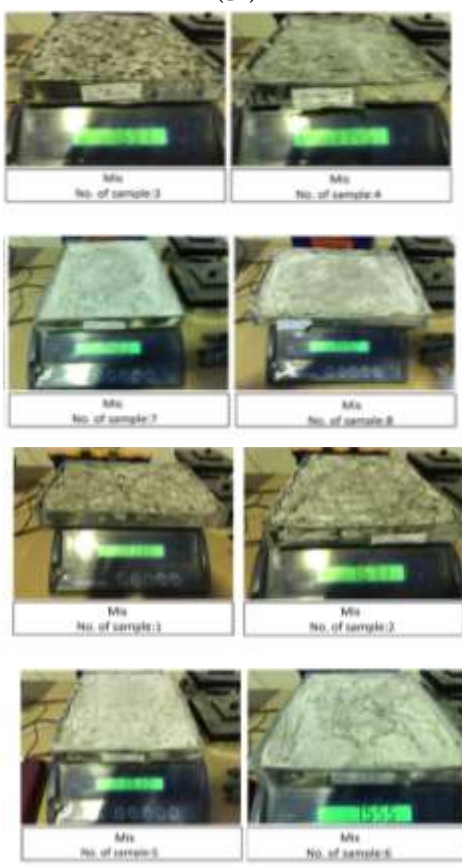
(ج)



(ه)



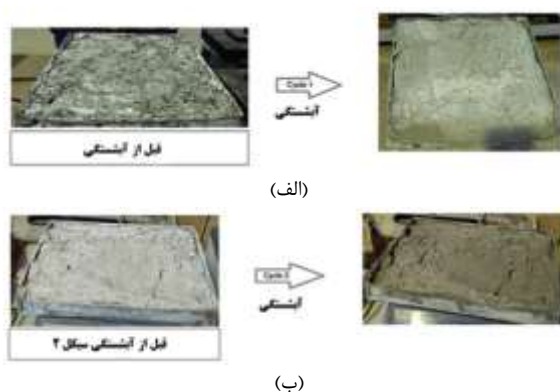
(الف)



(ب)

شکل ۱۰- سطح نمونه‌ها بعد از تونل باد: الف) نمونه‌های سیلتی ۷ روزه بعد از تونل باد، ب) نمونه‌های سیلتی ۱۴ روزه بعد از تونل باد، ج) نمونه‌های سیلتی ۲۸ روزه بعد از تونل باد، د) نمونه‌های سیلتی ۱۴۰ روزه بعد از تونل باد

درصد کم‌تر از نمونه اصلاح‌نشده بدون تراکم و ۸۵ درصد کم‌تر از نمونه خاک متراکم بدون باکتری است. اختلاف میان این اعداد نشان‌دهنده تأثیر قابل توجه اصلاح با باکتری بر مقاومت سطحی نمونه‌ها و تشکیل پوسته‌ای مقاوم در سطح خاک به‌واسطه فعالیت باکتری است. در شکل (۱۳) نمونه‌هایی از آزمایش نفوذ مخروط بر روی سینی‌ها قابل مشاهده است که نشان‌دهنده تأثیر پوسته باکتریایی تشکیل‌شده، بر افزایش مقاومت سطحی نمونه‌ها در برابر نفوذ مخروط می‌باشد.



شکل ۱۲- الف) نمونه سیلنتی در سیکل اول آب شستگی،  
ب) نمونه سیلنتی در سیکل دوم آب شستگی

جدول ۷- نتایج آزمایش نفوذ مخروط

میانگین نفوذ مخروط (mm)	رطوبت (%)	میزان باکتری بر سطح (lit/m <sup>2</sup> )	باکتری (%)
۲۰	۲۱/۱	۰	۰
۳	۲۱/۱	۱	۱۰۰
۴۰	۰	۰	۰



شکل ۱۳- آزمایش نفوذ مخروط



شکل ۱۱- نمونه خاک کویر بدون اصلاح و تراکم قبل و پس از تونل باد: الف) بعد از تونل باد (۶۰ کیلومتر بر ساعت)، ب) بعد از تونل باد (۳۰ کیلومتر بر ساعت)، ج) قبل از تونل باد

### ۳-۴- آب شستگی

به‌منظور بررسی تأثیر آب شستگی بر روند اصلاح با باکتری، یک نمونه از خاک اصلاح‌نشده (بدون باکتری و تراکم) و یک نمونه خاک اصلاح‌شده با شرایط جدول (۶) و مدت‌زمان عمل‌آوری ۲۸ روزه تحت آزمایش آب شستگی قرار گرفتند.

جدول ۶- نتایج آب شستگی نمونه سیلنتی

باکتری	درصد فرسایش در سیکل ۱ (%)	درصد فرسایش در سیکل ۲ (%)
۱ لیتر بر مترمربع و ۱۰۰٪ باکتری	۰/۹۳	۱/۶۵

به‌منظور بررسی دوام پوسته تشکیل‌شده در برابر بارندگی‌های بی‌دری، دو سیکل آب شستگی روی نمونه‌ها با فاصله زمانی یک روز اعمال شد. درصد فرسایش در هر سیکل آب شستگی از میزان خاک خشک شسته و جمع‌آوری‌شده در ظرف جمع‌آوری رواناب، تقسیم بر وزن کل خاک خشک اولیه محاسبه شده است. میزان فرسایش آبی در نمونه اصلاح‌نشده ۶۶/۳ درصد اندازه‌گیری شده است. ایجاد پوسته بیولوژیک در یک سیکل آب شستگی سبب کاهش آب شستگی به میزان ۹۸/۵۹ درصد شده است. همان‌گونه که در شکل (۱۲) مشاهده می‌شود پس از آب شستگی نمونه اصلاح‌شده، سطح نمونه تغییر خاصی ننموده و خرابی در سطح ایجاد نشده است.

### ۳-۵- مقاومت نفوذ مخروط

از مقاومت نفوذ مخروط می‌توان به‌عنوان شاخصی جهت برآورد مقاومت پوسته سطحی تشکیل‌شده به‌واسطه فرآیند اصلاح زیستی، استفاده نمود. آزمایش نفوذ مخروط بر سطح نمونه اصلاح‌شده با حداقل درصد فرسایش و نمونه اصلاح‌نشده انجام شده است. نتایج در جدول (۷) ارائه شده است.

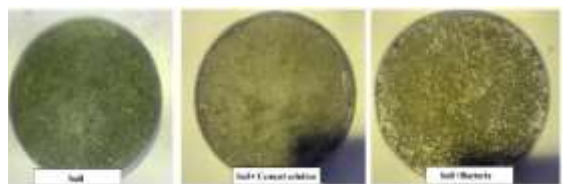
کم‌ترین میزان نفوذ مخروط در خاک اصلاح‌شده با باکتری مشاهده شده است. میزان نفوذ مخروط در نمونه اصلاح‌شده ۹۲/۵

### ۳-۷- بررسی ماکروسکوپی حضور باکتری بر سطح

پس از تهیه نمونه‌های موردنظر و گذشت روزهای عمل‌آوری مدنظر از سطح نمونه‌ها تصویر تهیه شد. تصویر نمونه‌ها در شکل (۱۵) ارائه شده است. همان‌گونه که در شکل (۱۵-ب) مشاهده می‌شود در سطح نمونه خاک که باکتری به تنهایی اسپری شده، ذرات سفید رنگی مشاهده می‌شوند که در سطح خاک بدون اصلاح و خاک فقط با محلول سیمانی مشاهده نمی‌شوند. علت این امر رسوب‌گذاری میکروبی کربنات کلسیم در سطح خاک و بر روی ذرات خاک است. نتیجه واکنش باکتری و کلسیم، رسوب‌گذاری کربنات کلسیم (کلسیت) در سطح ذرات خاک می‌باشد که سبب سفید شدن سطح خاک بعد از افزودن باکتری می‌شود.



(الف)



خاک + باکتری  
خاک + محلول سیمانی  
خاک

### شکل ۱۵- بررسی ماکروسکوپی نمونه‌ها بعد از اسپری باکتری و

محلول سیمانی: (الف) نمونه‌ها بلافاصله بعد از آماده‌سازی،

(ب) نمونه‌های بعد از عمل‌آوری

### ۳-۸- آنالیز ریزساختاری

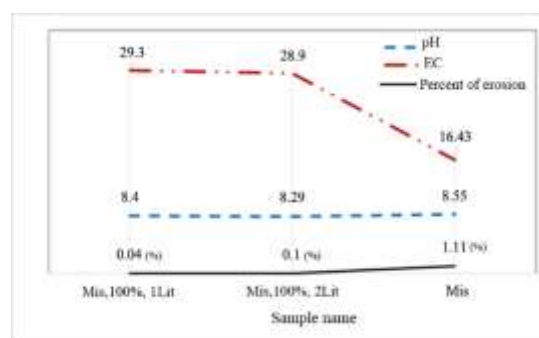
پس از آماده‌سازی نمونه‌ها جهت تهیه تصاویر SEM، از نمونه‌ها در بزرگ‌نمایی‌های متفاوت تصویر تهیه شد. در شکل (۱۶) تصاویر SEM نمونه‌های سیلتی قبل از فرآیند اصلاح با باکتری قابل مشاهده می‌باشند.

در شکل (۱۷) تصاویر SEM نمونه خاک سیلتی پس از اصلاح با باکتری در بزرگ‌نمایی‌های متفاوت ارائه شده است. از مقایسه تصاویر قبل و پس از اصلاح خاک با باکتری، شکل‌گیری لایه سطحی ناشی از فعالیت باکتری و پر شدن فضای خالی بین ذرات به واسطه رسوب مواد ناشی از فعالیت باکتری قابل مشاهده می‌باشد. پس از فعالیت باکتری سطح نمونه‌ها از حالت متخلخل و دانه‌ای تبدیل به سطحی تقریباً یکنواخت شده و پوسته سطحی (پوسته زیستی) بر روی نمونه‌ها تشکیل شده است.

با توجه به موارد ذکر شده، می‌توان از آزمایش نفوذ مخروط به‌عنوان آزمایش در جا جهت ارزیابی میزان کسب مقاومت سطحی پس از اصلاح خاک با باکتری استفاده نمود.

### ۳-۶- pH و EC

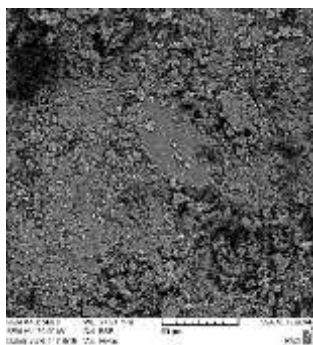
پس از تهیه عصاره‌های موردنظر از خاک‌های اصلاح‌شده با باکتری و خاک اصلاح‌نشده، مقادیر pH و EC نمونه‌ها اندازه‌گیری شدند. در نمونه‌های سیلتی منطقه میقان با افزایش میزان باکتری بر سطح pH خاک و قلیایی‌ات محیط کاهش می‌یابند (شکل (۱۴)).



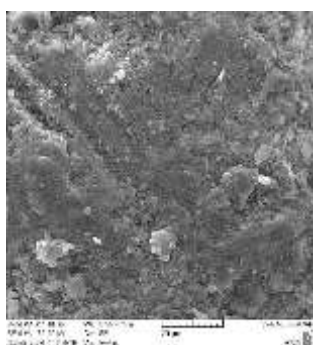
شکل ۱۴- تغییرات pH و EC در نمونه‌های خاک

از مقایسه نتایج pH با نتایج فرسایش در تونل باد می‌توان بیان نمود که نمونه اصلاح‌شده با pH کم‌تر، درصد فرسایش بیشتری از خود نشان داده است. در شکل (۱۴) تغییرات EC در نمونه‌های سیلتی قابل مشاهده است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود در نمونه‌های اصلاح‌شده افزایش EC رخ داده است که می‌تواند تأییدی بر رخ دادن واکنش سیمانی شدن زیستی در این نمونه‌ها باشد و با نتایج سایر محققین مطابقت دارد. از مقایسه نتایج هدایت الکتریکی در نمونه‌های سیلتی با نتایج درصد فرسایش مشاهده می‌شود که در این نمونه‌ها با افزایش مقدار EC میزان فرسایش کاهش یافته است که دلیل آن رابطه مستقیم میان EC و واکنش سیمانی شدن به واسطه فعالیت باکتری می‌باشد. با توجه به نتایج می‌توان این پیشنهاد را ارائه نمود که با بررسی بیشتر بر این مقوله می‌توان در عوض ساخت نمونه‌های متعدد در مقیاس بزرگ و آزمایش تونل باد، نخست با بررسی پارامتر EC در نمونه‌ها درصد و میزان مناسب باکتری بر سطح را در نمونه‌های سیلتی انتخاب نمود و سپس نمونه‌های در ابعاد بزرگ را در تونل باد مورد بررسی قرارداد. به این واسطه امکان صرفه‌جویی در زمان و هزینه وجود دارد. با توجه به اختلاف بسیار کم فی‌مابین مقادیر pH در نمونه‌های مختلف از این پارامتر نمی‌توان به‌عنوان معیار تشخیصی جهت تأثیر اصلاح با باکتری بر خاک استفاده نمود.

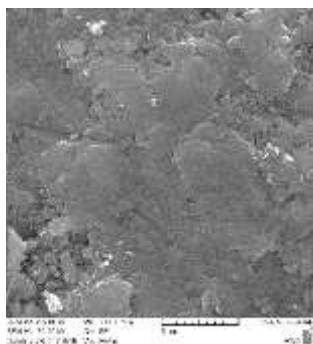




(الف)



(ب)

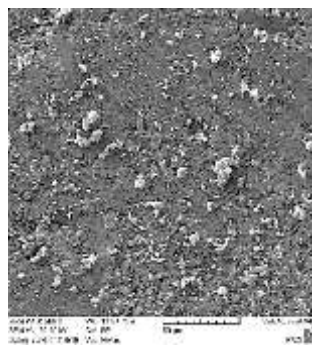


(ج)

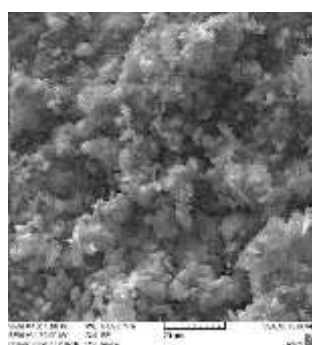


(د)

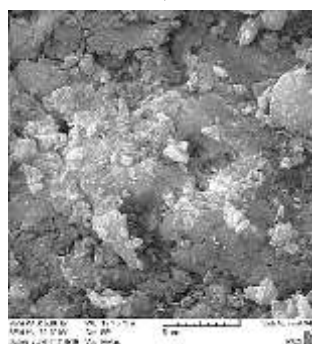
شکل ۱۷- تصاویر SEM نمونه خاک سیلتی پس از اصلاح با باکتری در بزرگ‌نمایی‌های متفاوت: (الف) بزرگ‌نمایی 500X، (ب) بزرگ‌نمایی 1000X، (ج) بزرگ‌نمایی 5000X، (د) بزرگ‌نمایی 10000X



(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل ۱۶- تصاویر SEM نمونه خاک سیلتی بدون اصلاح باکتری در بزرگ‌نمایی‌های متفاوت: (الف) بزرگ‌نمایی 500X، (ب) بزرگ‌نمایی 1000X، (ج) بزرگ‌نمایی 5000X، (د) بزرگ‌نمایی 10000X

با باکتری)، مقدار کلسیم، کربن و اکسیژن در محیط افزایش یافته است.

جدول ۸- نتایج آنالیز EDS خاک قبل و بعد از اصلاح

Element	Series	Unn. C (wt. %)	norm. C (wt. %)	Atom. C (at. %)
Carbon	K sreies	۲/۶۲	۲/۴۸	۵/۰۰
Oxygen	K sreies	۳۹/۲۶	۳۷/۰۶	۵۶/۲۱
Sodium	K sreies	۲/۵۵	۲/۴۱	۲/۵۴
Magnesium	K sreies	۵/۶۹	۵/۳۷	۵/۳۶
Aluminum	K sreies	۴/۹۱	۴/۶۳	۴/۱۷
Silicon	K sreies	۱۴/۹۱	۱۴/۰۸	۱۲/۱۶
Sulfur	K sreies	۱/۱۲	۱/۰۶	۰/۸۰
Chlorine	K sreies	۳/۵۴	۳/۳۴	۲/۲۹
Potassium	K sreies	۱/۹۲	۱/۸۲	۱/۱۳
Calcium	K sreies	۱۳/۰۱	۱۲/۲۸	۷/۴۴
Titanium	K sreies	۰/۲۵	۰/۲۴	۰/۱۲
Iron	K sreies	۳/۱۰	۲/۹۳	۱/۲۷
Gold	L sreies	۱۳/۰۶	۱۲/۳۲	۱/۵۲
Total: % ۱۰۶/۰				

Mis (الف)

Element	Series	Unn. C (wt. %)	norm. C (wt. %)	Atom. C (at. %)
Carbon	K sreies	۳/۲۱	۳/۰۴	۵/۵۶
Oxygen	K sreies	۴۷/۶۶	۴۵/۲۲	۶۲/۰۰
Sodium	K sreies	۱/۰۵	۱/۰۰	۰/۹۵
Magnesium	K sreies	۴/۶۰	۴/۳۶	۳/۹۴
Aluminum	K sreies	۴/۷۰	۴/۴۶	۳/۶۲
Silicon	K sreies	۱۸/۲۰	۱۷/۲۷	۱۳/۴۹
Sulfur	K sreies	۰/۷۹	۰/۷۵	۰/۵۱
Chlorine	K sreies	۰/۳۹	۰/۳۷	۰/۲۳
Potassium	K sreies	۱/۸۵	۱/۷۶	۰/۹۹
Calcium	K sreies	۱۳/۳۶	۱۲/۶۸	۶/۹۴
Titanium	K sreies	۰/۳۰	۰/۲۹	۰/۱۳
Iron	K sreies	۲/۵۰	۲/۳۷	۰/۹۳
Gold	L sreies	۶/۷۹	۶/۴۴	۰/۷۲
Total: % ۱۰۵/۴				

Mis+Bacteria (ب)

تثبیت کننده	درصد فرسایش (%)
سیمان	۳۰٪
آهک	۲۵/۴

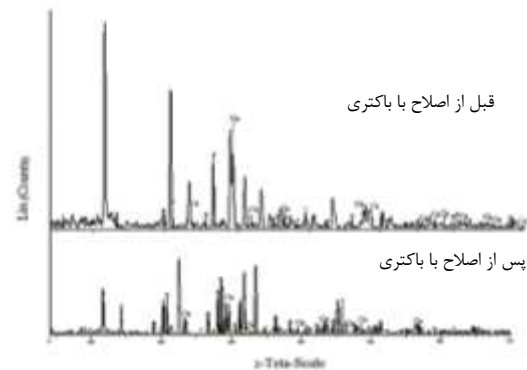
### ۳-۹- مقایسه نتایج نمونه‌های سیلنتی تثبیت‌شده با

#### باکتری، سیمان و آهک در تونل باد

نتایج فرسایش بادی نمونه‌های سیلنتی تثبیت‌شده با آهک و سیمان در جدول (۹) ارائه شده‌اند. در بخش (۳-۲) مشاهده شد که مقدار حداکثر درصد فرسایش در نمونه‌های ۲۸ روزه اصلاح‌شده با باکتری، ۰/۲ درصد ثبت شده است.

پس از تونل باد حداقل درصد فرسایش در نمونه‌های سیمانی ۲۵/۴ درصد و در نمونه‌های آهکی ۱۳/۶۳ درصد به‌دست آمده

تشکیل پوسته زیستی ناشی از فعالیت باکتری دلیل افزایش مقاومت سطحی در برابر فرسایش بادی، آب شستگی و نفوذ مخروط می‌باشد. در شکل (۱۸) گراف XRD نمونه خاک سیلنتی قبل و پس از اصلاح با باکتری ارائه شده است. با بررسی طیف‌های XRD مشاهده می‌شود که اصلاح میکروبی سبب تغییر در ساختار و آنالیز XRD خاک شده است.



شکل ۱۸- گراف XRD خاک قبل و بعد از اصلاح با باکتری

همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود عناصر موجود در خاک قبل و بعد از فرآیند اصلاح تغییری ننموده‌اند ولی درصد آن‌ها در خاک تغییر نموده است. در نتایج آنالیز XRD در نمونه خاک قبل و بعد از اصلاح میکروبی، کلسیت (نماد Ca) به چشم می‌خورد ولی نکته قابل توجه تغییر در پیک‌های کلسیت قبل و بعد از اصلاح با باکتری می‌باشد. این مطلب بیانگر این نکته می‌باشد که حضور صرف کانی کلسیت در خاک سبب افزایش مقاومت سطحی نمی‌گردد بلکه تأثیر رسوب کلسیت در حضور باکتری‌های متصل شده به ذرات خاک و ایجاد پل‌های سیمانی و پوسته حاصل از آن‌ها بر روی سطح خاک است که سبب افزایش مقاومت می‌گردد.

در جدول (۸) نتایج آنالیز EDS خاک سیلنتی (درصد عناصر) قبل و بعد از اصلاح با باکتری قابل مشاهده است. نوع عناصر قبل و پس از اصلاح با باکتری یکسان بوده ولی درصد عناصر موجود در خاک در اثر فرآیندهای حاصل از فعالیت باکتری تغییر نموده‌اند. تغییر درصد عناصر بیانگر تأثیر باکتری بر میزان عناصر موجود در خاک به‌واسطه فعالیت‌های زیستی ناشی از حضور باکتری می‌باشد. با توجه به جدول (۸) در خصوص تغییر مقادیر مربوط به عناصر کلسیم، اکسیژن و کربن که با حضور کلسیت مرتبط می‌باشند، می‌توان بیان نمود که در نمونه‌های اصلاح‌شده با باکتری مقادیر هر سه عنصر افزایش یافته است. به‌واسطه رسوب کربنات کلسیم و حضور کلرید کلسیم (افزوده‌شده در فرآیند اصلاح

در معرض باد نشان داده و می‌توان از این روش در خاک‌های ریزدانه منطقه میقان و خاک‌های با شرایط مشابه، جهت ممانعت از فرسایش سطحی استفاده نمود.

- پس از طی سیکل‌های ۳، ۵ و ۷ ذوب و یخ در نمونه‌های ۲۸ روزه، درصد فرسایش نمونه‌ها پس از تونل باد به صفر کاهش یافته است و پس از طی ۱۰ سیکل این میزان به مقدار بسیار کم ۰/۰۵٪ افزایش یافته است. می‌توان نتیجه گرفت که اصلاح خاک با باکتری در سیکل‌های ذوب و یخ نیز پایدار بوده و از دوام لازم جهت استفاده در منطقه کویری مورد مطالعه برخوردار می‌باشد.
- با مقایسه درصد فرسایش ناشی از آب شستگی در نمونه‌های اصلاح شده و اصلاح نشده مشاهده می‌شود که ایجاد پوسته بیولوژیک سبب کاهش آب شستگی سطحی در یک سیکل آب شستگی، به میزان ۹۸/۵۹ درصد شده است. این امر می‌تواند نشان‌دهنده پایداری پوسته بیولوژیک، در برابر فرسایش ناشی از آب در منطقه مورد مطالعه باشد. در این خصوص نیاز به مطالعات تکمیلی با در نظر گرفتن قوانین هیدرولیک می‌باشد.
- اختلاف میان نتایج نفوذ مخروط در نمونه‌های اصلاح شده و نشده، نشان‌دهنده تأثیر قابل توجه اصلاح با باکتری بر مقاومت سطحی نمونه‌ها و تشکیل پوسته‌ای مقاوم (پوسته زیستی) در سطح خاک است. می‌توان از آزمایش نفوذ مخروط به‌عنوان آزمایشی در محل، جهت ارزیابی کسب مقاومت سطحی خاک پس از اصلاح با باکتری استفاده نمود.
- از مقایسه نتایج اندازه‌گیری هدایت الکتریکی در نمونه‌های سیلتی با نتایج درصد فرسایش در تونل باد، مشاهده می‌شود که در نمونه‌های سیلتی با افزایش مقدار EC میزان فرسایش کاهش یافته است. با بررسی بیشتر بر این مقوله می‌توان به‌جای ساخت نمونه‌های متعدد در مقیاس بزرگ و آزمایش تونل باد نخست با بررسی پارامتر EC (در خصوص pH این همبستگی مشاهده نشد) در نمونه‌ها درصد و میزان مناسب باکتری بر سطح را در نمونه‌های سیلتی انتخاب نمود و سپس نمونه‌های در ابعاد بزرگ را در تونل باد مورد بررسی قرار داد. به این واسطه در زمان و هزینه امکان صرفه‌جویی وجود دارد.
- در تصاویر SEM، شکل‌گیری لایه سطحی ناشی از فعالیت باکتری و پر شدن فضای خالی بین ذرات به‌واسطه رسوب مواد ناشی از فعالیت باکتری به‌وضوح قابل مشاهده می‌باشد. پوسته زیستی قابل مشاهده در این تصاویر که ناشی از فعالیت باکتری می‌باشد دلیل افزایش مقاومت سطحی در برابر فرسایش سطحی و نفوذ مخروط می‌باشد.
- بررسی نتایج آنالیز XRD خاک سیلتی نشان‌دهنده حضور کلسیت در آنالیز کانی‌شناسی خاک، قبل و پس از اصلاح با

است. در تثبیت با باکتری، محلول باکتری و سیمانی در داخل خاک نفوذ نموده و به‌واسطه ایجاد پیوند بین ذرات خاک پوسته‌ای مقاوم در سطح خاک ایجاد نموده‌اند. در تثبیت با سیمان، یک لایه دوغاب سیمان با مقاومت کم و مجزا از خاک زیرین روی سطح خاک ایجاد شده است. در تثبیت با آهک تنها پودر آهک روی سطح باقی‌مانده است و هیچ تأثیری روی خاک از نظر مقاومت سطحی و مقاومت در برابر گردوغبار ایجاد نشده است.

بنابر نتایج فوق و در حوزه این مطالعه، سیمان و آهک به‌هیچ عنوان جهت تثبیت سطحی خاک سیلتی منطقه مورد مطالعه به-روش اسپری سطحی توصیه نمی‌شوند و تثبیت با باکتری، هم از نظر کاهش میزان فرسایش و هم از نظر کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی ناشی از تولید این محصولات (Torgal و همکاران، ۲۰۱۵) و آلاینده‌گی غبار حاصل از این دو تثبیت‌کننده بر روی سلامت پرندگان مهاجر این منطقه، مناسب‌تر از دو تثبیت‌کننده متداول سیمان و آهک می‌باشد.

#### جدول ۹- درصد فرسایش خاک سیلت کویر میقان تثبیت شده

با آهک و سیمان		
درصد فرسایش (%)		تثبیت‌کننده
۳۰٪	۵۰٪	
۲۵/۴	۲۷/۴	سیمان
۱۳/۶۳	۳۹/۶۷	آهک

#### ۴- نتیجه‌گیری

از مطالعه حاضر نتایج ذیل قابل استنتاج می‌باشند:

- رفتار نمونه‌های سیلتی منطقه مورد مطالعه در حضور درصد و غلظت‌های متفاوت باکتری کاملاً با یکدیگر متفاوت می‌باشد. در خاک سیلتی غلظت باکتری ۱۰۰٪ و میزان باکتری بر سطح برابر با ۱ لیتر بر مترمربع بهترین نتیجه را از نظر مقاومت در برابر فرسایش سطحی در تونل باد را از خود نشان داده است. در خاک سیلتی منطقه پس از اصلاح، حدود ۹۰٪ کاهش در درصد فرسایش سطحی مشاهده شده است.
- در کلیه نمونه‌های اصلاح شده با افزایش روزهای عمل‌آوری درصد فرسایش کاهش می‌یابد. با افزایش روزهای عمل‌آوری از ۷ به ۲۸ روز، درصد فرسایش خاک در نمونه‌های با حداکثر وزن مخصوص خشک تا ۷۷ درصد کاهش یافته است. پس از ۵۶ و ۱۴۰ روز عمل‌آوری نمونه‌ها، درصد فرسایش ناشی از باد به صفر کاهش یافته است که نشان‌دهنده دوام فرآیند اصلاح خاک به‌روش سیمانی شدن زیستی می‌باشد.
- استفاده از باکتری جهت اصلاح خاک و ایجاد پوسته زیستی به‌واسطه اسپری، تأثیر قابل توجهی بر میزان فرسایش نمونه‌ها



- 1224-1235.
- Bang S, Min SH, Bang SS, "Application of Microbiologically Induced Soil Stabilization Technique for Dust Suppression", *International Journal of Geo-Engineering*, 2011, 3, 27-37.
- Chen X, Hu S, Shen C, Dou C, Shi J, Chen Y, "Interaction of *Pseudomonas putida* CZ1 with clays and ability of the composite to immobilize copper and zinc from solution", *Bioresour Technol*, 2009, 100, 330-337.  
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.04.051>
- Cuadros J, Spiro B, Dubbin W, Jadubansa P, "Rapid microbial stabilization of unconsolidated sediment against wind erosion and dust generation", *Journal of Soils Sediments*, 2010, 10, 1415-1426. <https://doi.org/10.1007/s11368-010-0273-8>
- De Lima JLMP, Tavares P, Singh VP, De Lima MIP, "Investigating the nonlinear response of soil loss to storm direction using a circular soil flume", *Geoderma*, 2009, 152, 9-15.
- De Munnck W, De Belie N, Verstraete W, "Microbial carbonate precipitation in construction materials: A review", *Ecological Engineering*, 2010, 36, 118-136.  
<https://doi.org/10.1016/j.ecoeng.2009.02.006>
- Dejong JT, Mortensen BM, Martinez BC, Nelson DC, "Bio-mediated soil improvement", *Ecol Engineering*, 2010, 36, 197-210.  
<https://doi.org/10.1016/j.ecoeng.2008.12.029>
- Dejong JT, Soga K, Banwart SA, Whalley WR, Ginn TR, Nelson DC, Mortensen BM, Martinez BC, Barkouki T, "Soil engineering in vivo: harnessing natural biogeochemical systems for sustainable, multi-functional engineering solutions", *Journal of Roy. Soc. Inter*, 2011, 8, 1-15.
- Dejong JT, Soga K, Kavazanjian E, Burns S, Van Paassen LA, Al Qabany A, Aydilek A, Bang SS, Burbank M, Caslake LF, Chen CY, "Biogeochemical processes and geotechnical applications: Progress, opportunities and challenges. In: Bio-and Chemo-Mechanical Processes in Geotechnical Engineering-Geotechnique Symposium in Print 2013", ICE Publishing, 2013, 143-157.
- DSMZ, "German Collection of Microorganisms and Cell Cultures GmbH. In: *Labrys portucalensis*", 2019.
- Duo L, Kan-liang T, Hui-li Z, Yu-yao, W, Kang-yi N, Shican Z, "Experimental investigation of solidifying desert aeolian sand using microbially induced calcite precipitation", *Constr Build Mater*, 2018, 172, 251-262.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.255>
- Stocks-Fischer SJK, Galinat SS, Bang "Microbiological precipitation of CaCO<sub>3</sub>", *Soil Biology and Biochemistry*, 1999, 31, 1563-1571.
- Fujita Y, Taylor JL, Gresham TL, Delwiche ME, Colwell FS, McLing TL, Petzke LM, Smith RW, "Stimulation of microbial urea hydrolysis in groundwater to enhance calcite precipitation", *Environmental Science and Technology*, 2008, 42, 3025-3032.  
<https://doi.org/10.1021/es702643g>
- Gao L, Sun H, Xu M, Zhao Y, "Biocrusts resist runoff erosion through direct physical protection and باکتری می‌باشد. می‌توان این‌گونه بیان نمود که تنها حضور کانی کلسیت در خاک سبب افزایش مقاومت سطحی نمی‌شود بلکه رسوب کلسیت حاصل از فعالیت باکتری‌های متصل به ذرات خاک و ایجاد پل‌های سیمانی و پوسته حاصل از آن‌ها بر روی ذرات خاک سبب افزایش مقاومت سطحی می‌گردد. نتایج آنالیز EDS نشان می‌دهند که نوع عناصر قبل و پس از اصلاح با باکتری یکسان بوده ولی درصد عناصر موجود در خاک در اثر فرآیندهای حاصل از حضور و فعالیت باکتری تغییر نموده‌اند.
- حداکثر درصد فرسایش در نمونه‌های سیلتی ۲۸ روزه اصلاح‌شده با باکتری ۰/۲ درصد بوده است درحالی‌که حداقل درصد فرسایش در نمونه‌های سیمانی ۲۵/۴ درصد و در نمونه‌های آهکی ۱۳/۶۳ درصد بوده است. بنابر نتایج فوق، سیمان و آهک به‌هیچ‌عنوان جهت تثبیت سطحی خاک منطقه به‌روش اسپری توصیه نمی‌شوند. تثبیت با باکتری هم از نظر کاهش میزان فرسایش و هم از نظر کاهش در میزان آلاینده‌گی مناسب‌تر از دو تثبیت‌کننده متداول سیمان و آهک می‌باشد.
- ### ۵- مراجع
- اصغری کلجاهی، حسین‌پور اصل کلپیر س، ندیری ع، "بررسی امکان ایجاد ریزگردهای نمکی در پهنه شمال شرقی دریاچه ارومیه"، پژوهش‌های فرسایش محیطی، ۱۳۹۷، ۸ (۲)، ۴۲-۶۱.
- صالحی م ح، اسفندیارپور بروجنی ع، باقری بداغ‌آبادی م، مهاجر ر، "حفاظت آب و خاک تکمیلی"، دانشگاه پیام نور، ۱۳۹۴.
- دستورالعمل فنی، "ارزیابی کارایی تثبیت‌کننده‌های خاک (مالچ)- ضابطه شماره ۷۸۳"، ۱۳۹۸.
- ملکی کاکلر م، ابراهیمی س، اسدزاده ف، امامی تبریزی م، "ارزیابی کارایی رسوب میکروبی کربنات برای تثبیت شن‌های روان"، تحقیقات آب و خاک ایران (علوم کشاورزی ایران)، ۱۳۹۵، ۴۷ (۲)، ۴۰۷-۴۱۵.
- منتظری م، "شناسایی روند تغییرات بارش در حوضه کویر میقان"، مجموعه مقالات اولین همایش ملی مقابله با بیابان‌زایی و توسعه پایدار تالاب‌های کویری ایران، اراک، ۲۶ خرداد، ۱۳۸۹.
- Abo-El-Enein SA, Ali AH, Talkhan FN, Abdel-Gawwad HA, "Utilization of microbial induced calcite precipitation for sand consolidation and mortar crack remediation", *HBRC Journal*, 2012, 8, 185-192.  
<https://doi.org/10.1016/j.hbrj.2013.02.001>
- Achal V, Mukherjee A, "A review of microbial precipitation for sustainable construction", *Construction and Building Materials*, 2015, 93,

- Arizona State University, 2014.
- Koponen HT, Jaakkola T, Keinänen-Toivola MM, Kaipainen S, Tuomainen J, Servomaa K, Martikainen PJ, "Microbial communities, biomass, and activities in soils as affected by freeze thaw cycles", *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38 (7), 1861-1871. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2005.12.010>
- Lee KT, Huang JK, "Effect of moving storms on attainment of equilibrium discharge", *Hydrol. Process*, 2007, 21, 3357-3366.
- Meyer FD, Bang S, Min S, Stetler LD, Bang SS, "Microbiologically-induced soil stabilization: Application of *Sporosarcina pasteurii* for fugitive dust control", *Geo-frontiers 2011: Advances in Geotechnical Engineering*, 2011, 4002-4011. [https://doi.org/10.1061/41165\(397\)409](https://doi.org/10.1061/41165(397)409)
- Mortensen BM, Haber MJ, DeJong JT, Caslake LF, Nelson DC, "Effects of environmental factors on microbial induced calcium carbonate precipitation", *Journal of Applied Microbiology*, 2011, 111, 338-349. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2011.05065.x>
- Omoriegbe AI, Ngu LH, Ong DEL, Nissom PM, "Low-cost cultivation of *Sporosarcina pasteurii* strain in food-grade yeast extract medium for microbially induced carbonate precipitation (MICP) application", *Biocatal Agric Biotechnol*, 2019, 17, 247-255. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2018.11.030>
- Omoriegbe AI, Khoshdelnezamiha G, Senian N, Ong DEL, Nissom PM, "Experimental optimisation of various cultural conditions on urease activity for isolated *Sporosarcina pasteurii* strains and evaluation of their biocement potentials", *Ecological Engineering*, 2017, 109, 65-75. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.09.012>
- Pacheco-Torgal F, Labrincha JA, Diamanti MV, Yu CP, Lee HK, "Biotechnologies and biomimetics for civil engineering", *Biotechnol Biomimetics Civil Engineering*, 2015, 1-437. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-09287-4>
- Qabany AA, Mortensen B, Martinez B, Soga K, DeJong J, "Microbial carbonate precipitation: Correlation of S-wave velocity with calcite precipitation", In: *Geotechnical Special Publication*, 2011, 3993-4001.
- Qi J, Ma W, Song C, "Influence of freeze-thaw on engineering properties of a silty soil", *Cold Regions Science and Technology*, 2008, 53, 397-404. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2007.05.010>
- Ramakrishnan V, Ramesh KP, Bang SS, "Bacterial concrete", In: *Smart Materials*. SPIE, 2001, 168-176.
- Rong H, Qian CX, Li LZ, "Study on microstructure and properties of sandstone cemented by microbe cement", *Constr Build Mater*, 2012, 36, 687-694. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.063>
- Shi ZH, Fang NF, Wu FZ, Wang L, Yue BJ, Wu GL, "Soil erosion processes and sediment sorting associated with transport mechanisms on steep indirect modification of soil properties", *Journal of Soils Sediments*, 2020, 20, 133-142.
- Gao Y, Hang L, He J, Chu J, "Mechanical behaviour of biocemented sands at various treatment levels and relative densities", *Acta Geotech*, 2019, 14, 697-707. <https://doi.org/10.1007/s11440-018-0729-3>
- Ghazavi M, Roustaie M, "The influence of freeze-thaw cycles on the unconfined compressive strength of fiber-reinforced clay", *Cold Regions Science and Technology*, 2010, 61, 125-131. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2009.12.005>
- Graham J, Au VCS, "Effects of freeze-thaw and softening on a natural clay at low stresses", *Canadian Geotechnical Journal*, 1985, 22, 69-78. <https://doi.org/10.1139/t85-007>
- He J, Chu J, Liu HL, Gao YF, "Microbial soil desaturation for the mitigation of earthquake liquefaction", *15<sup>th</sup> Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 2015 New Innov Sustain*, 784-787. <https://doi.org/10.3208/jgssp.SEA-05>
- Ivanov V, Chu J, "Applications of microorganisms to geotechnical engineering for bioclogging and biocementation of soil in situ. Rev", *Environmental Science and Bio-Technology*, 2008, 7, 139-153.
- Ivanov V, Chu J, Stabnikov V, Li B, "Strengthening of Soft Marine Clay Using Bioencapsulation", *Mar Georesources Geotechnol*, 2015, 33, 325-329. <https://doi.org/10.1080/1064119X.2013.877107>
- Ivanov V, Stabnikov V, "Construction biotechnology: biogeochemistry, microbiology and biotechnology of construction materials and processes", Springer, 2016.
- Ivanov V, Stabnikov V, "Construction Biotechnology Biogeochemistry, Microbiology and Biotechnology of Construction Materials and Processes Preface", Springer, 2017.
- Jiang NJ, Soga K, Kuo M, "Microbially induced carbonate precipitation for seepage-induced internal erosion control in sand-clay mixtures", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2017, 143. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001559](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001559)
- Keykha HA, Asadi A, Zareian M, "Environmental Factors Affecting the Compressive Strength of Microbiologically Induced Calcite Precipitation-Treated Soil", *Geomicrobiol J*, 2017, 34, 889-894. <https://doi.org/10.1080/01490451.2017.1291772>
- Kim D, Park K, Kim D, "Effects of ground conditions on microbial cementation in soils", *Materials (Basel)*, 2014, 7, 143-156. <https://doi.org/10.3390/ma7010143>
- Kim G, Kim J, Youn H, "Effect of Temperature, pH, and Reaction Duration on Microbially Induced Calcite Precipitation", *mdpi.com*, 2018, 8. <https://doi.org/10.3390/app8081277>
- Knorr B, "Enzyme-induced carbonate precipitation for the mitigation of fugitive dust", *MastersThesis*,

<https://doi.org/10.13080/z-a.2013.100.003>

- slopes”, *Journal of Hydrology*, 2012, 454, 123-130.
- Salifu E, MacLachlan E, Iyer KR, Knapp CW, Tarantino A, “Application of microbially induced calcite precipitation in erosion mitigation and stabilisation of sandy soil foreshore slopes: A preliminary investigation”, *Engineering Geology*, 2016, 201, 96-105. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.12.027>
- Shahrokhi-Shahraki R, Zomorodian SMA, Niazi A, Okelly BC, “Improving sand with microbial-induced carbonate precipitation”, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement*, 2015, 168, 217-230. <https://doi.org/10.1680/grim.14.00001>
- Stabnikov V, Naeimi M, Ivanov V, Chu J, “Formation of water-impermeable crust on sand surface using biocement”, *Cement and Concrete Research*, 2011, 41, 1143-1149. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.06.017>
- Stocks-Fischer S, Galinat JK, Bang SS, “Microbiological precipitation of CaCO<sub>3</sub>”, *Soil Biol Biochem*, 1999, 31, 1563-1571. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(99\)00082-6](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(99)00082-6)
- Van Paassen LA, Daza CM, Staal M, Sorokin DY, Van Der Zon W, Van Loosdrecht MC, “Potential soil reinforcement by biological denitrification”, *Ecological Engineering*, 2010, 36, 168-175. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.03.026>
- Wang DY, Ma W, Niu YH, Chang XX, Wen Z, “Effects of cyclic freezing and thawing on mechanical properties of Qinghai-Tibet clay”, *Cold Regions Science and Technology*, 2007, 48, 34-43.
- Wang T, Li P, Ren Z, Xu G, Li Z, Yang Y, Tang S, Yao J, “Effects of freeze-thaw on soil erosion processes and sediment selectivity under simulated rainfall”, *Journal of Arid Land*, 2017, 9, 234-243. <https://doi.org/10.1007/s40333-017-0009-3>
- Wang Z, Zhang N, Ding J, Lu C, Jin Y, “Experimental Study on Wind Erosion Resistance and Strength of Sands Treated with Microbial-Induced Calcium Carbonate Precipitation”, *hindawi.com*, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/3463298>
- Warthmann R, Marie Karpoff A, “Bacterially induced dolomite precipitation in anoxic culture experiments Margin Tectonics View project Microbial pre-treatment of fibrous material to enhance biogas production View project”, *Geology*, 2000. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2000\)28<1091:BDPIA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2000)28<1091:BDPIA>2.0.CO;2)
- Weaver TJ, Burbank M, Lewis A, Lewis R, Crawford R, Williams B, “Bio-induced calcite, iron, and manganese precipitation for geotechnical engineering applications”, In: *Geotechnical Special Publication*, 2011, 3975-3983
- Yao X, Qi J, Ma W, “Influence of freeze-thaw on the stored free energy in soils”, *Cold Regions Science and Technology*, 2009, 56, 115-119. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2008.11.001>
- Zydlik Z, Zydlik P, “The effect of microbiological products on soil properties in the conditions of replant disease”, *Zemdirbyste*, 2013, 100, 19-24.

## EXTENDED ABSTRACT

# Investigation of the Effect of Biological Modification on Increasing the Resistance of Alkaline Silty Soils in Arid and Semi-Arid Regions Against Water and Wind Erosion (Case study: Miqan Desert)

Homa Shafiei<sup>a</sup>, Soheil Ghareh<sup>a,b\*</sup>, Seyed Hamid Lajevardi<sup>a</sup>, Ehsanollah Zeighami<sup>a</sup>, Mahboubeh Poor Kalhor<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Department of Civil Engineering, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran

<sup>b</sup> Department of Civil Engineering, Payame Noor University, P.O. Box 19395-4697, Tehran, Iran

<sup>c</sup> Department of Chemistry, Faculty of Science, Farhangian University, Qom, Iran

**Received:** 05 November 2021; **Review:** 13 February 2022; **Accepted:** 17 March 2022

---

### Keywords:

Biocrust, Silt, Alkali, Wind tunnel, Surface erosion, Durability, Microstructure.

---

## 1. Introduction

In the present paper, results of a study on the use of *Bacillus pasteurii* to reduce wind and water erosion in alkaline silty soils are presented (Kim et al., 2014). The treated soil specimens were prepared in different periods and different concentrations and amounts of bacteria on different surfaces and were exposed to a wind tunnel constructed and calibrated for the present study and their surface erosion was measured. For further analysis of the samples, melting and freezing tests, cone penetration, electrical conductivity, pH and SEM, XRD, and EDS analyzes were also performed on the treated and untreated specimens. The results of this study showed that the use of MICP as a surface crust is an effective and environmentally friendly process to control dust caused by wind erosion in the Meighan Wetland.

## 2. Methodology

### 2.1. Experimental study

The treated soil specimens were prepared in different periods and different concentrations and amounts of bacteria on different surfaces and were exposed to a wind tunnel constructed and calibrated for the present study and their surface erosion was measured. For further analysis of the samples, water erosion test (Gao et al., 2020), freeze and thawing test (Qi et al., 2006), cone penetration, electrical conductivity, pH and SEM, XRD, and EDS analyzes were also performed on the treated and untreated specimens. To compare the stabilization method with bacteria and conventional stabilizers, surface stabilized samples were prepared by spray method (Ivanov & Stabnikov, 2016) of cement and lime and exposed to wind tunnels and surface erosion was measured.

---

\* Corresponding Author

E-mail addresses: h.shafiei92@iau-arak.ac.ir (Homa Shafiei), ghareh\_soheil@pnu.ac.ir (Soheil Ghareh), sh-lajevardi@iau-arak.ac.ir (Seyed Hamid Lajevardi), e-zeighami@iau-arak.ac.ir (Ehsanollah Zeighami), mpourkalhor@yahoo.com (Mahboubeh Poor Kalhor).

### 3. Results and discussion

#### 3.1. Effect of bacteria on reducing wind erosion

The results of this study showed that the use of MICP as a surface crust is an effective and environmentally friendly process to control dust caused by wind erosion in the Meighan Wetland. With this method, the surface resistance of 28-day-old samples can be increased up to 95% and the rate of wind erosion can be reduced to 89.8%.

#### 3.2. Effect of bacteria on water erosion

The formation of biological crust in a scouring cycle by 98.59% has reduced the surface scouring, which can indicate the stability of this crust against water erosion in the study area.

#### 3.3. Effect of bacteria on freeze and thawing cycles

Freeze and thawing cycles do not cause surface crust loss and increase wind erosion in bacterial-modified soil samples.

### 4. Conclusions

The use of bacteria to improve the soil and create a biological crust by spraying has shown a significant effect on the rate of erosion of samples exposed to wind and this method can be used in fine-grained soils of Meighan area and soils with similar conditions to prevent surface erosion. This method increases the surface resistance of the soil against melting and freezing, scouring, and penetration of the cone. Soil bacterial stabilization in the study area is more suitable than cement and lime stabilizers in terms of reducing erosion and reducing pollution.

### 5. References

- Kim D, Park K, Kim D, "Effects of ground conditions on microbial cementation in soils", *Materials (Basel)*, 2014, 7, 143-156. <https://doi.org/10.3390/ma7010143>
- Ivanov V, Stabnikov V, "Construction biotechnology: biogeochemistry, microbiology and biotechnology of construction materials and processes", Springer, 2016.
- Qi J, Ma W, Song C, "Influence of freeze-thaw on engineering properties of a silty soil", *Cold Regions Science and Technology*, 2008, 53, 397-404. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2007.05.010>.
- Gao L, Sun H, Xu M, Zhao Y, "Biocrusts resist runoff erosion through direct physical protection and indirect modification of soil properties", *Journal of Soils Sediments*, 2020, 20, 133-142.