بررسی تأثیر بهسازی میکروبی در کاهش فرسایش‌پذیری بادی خاک‌های منطقه بیابانی سگزی اصفهان

امیررضا مدرس‌نیا[۱]، مسعود میرمحمدصادقی[۲*] و احمد جلالیان[۳]

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۷ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۲/۲۵)

چکیده

بیابان‌زایی در سال‌های اخیر به یکی از اصلی‌ترین معضلات جوامع ساکن در مجاورت مناطق بیابانی تبدیل شده است. یکی از روش‌هایی که در سال‌های اخیر برای بهسازی خاک این مناطق مورد توجه قرار گرفته و به سرعت در حال گسترش در زمینه علوم مکانیک خاک می‌باشد، روش بهسازی میکروبی کربنات کلسیم (MICP) است. به کمک این فرآیند می توان با استفاده از میکروارگانیسم‌های موجود در خاک و استفاده از اوره و کلرید کلسیم، خاک را تثبیت نموده و پارامترهای مهندسی آن را ارتقا داد. بر این اساس به تازگی تلاش‌هایی برای استفاده از این روش صورت گرفته که در آن با ایجاد یک لایه سطحی مقاوم بر روی ماسه از بلندشدن دانه های گرد و غبار ممانعت می نماید. در مطالعه حاضر سعی شده با بررسی این روش، تأثیر شرایط محیطی موجود در بیابان‌ها از قبیل درجه دما و طوفان‌های ماسه‌ای بر روی خاک تثبیت‌شده به روش میکروبی بررسی شود. از این‌رو نمونه‌های بهسازی‌شده تحت دماهای متوسط و بیشینه منطقه قرار گرفته که بر این اساس با افزایش دما میزان مقاومت لایه سطحی بیشتر گردید. این افزایش مقاومت تا دما ۲۴ درجه با شیب زیاد ادامه داشته ولی از دمای ۲۴ درجه به بعد این شیب کاهش می یابد. همچنین، شرایط طوفان ماسه‌ای منطقه با استفاده از بارش ماسه‌ای سه سایز مختلف دانه (ریز، متوسط و درشت) در داخل تونل باد شبیه‌سازی شد. نتایج این آزمایش‌ها نشان داد که در سرعت‌های باد ۷ و ۱۱ متربرثانیه خاک تثبیت شده امکان تحمل شرایط محیطی را به خوبی داشته ولی با افزایش سرعت باد به ۱۴ متربرثانیه و همچنین افزایش سایز دانه‌ها به درشت‌دانه، لایه مقاوم سطحی دچار سایش و خرابی شده که افزایش فرسایش بادی خاک را نیز به دنبال دارد.

واژه‌های کلیدی: تثبیت خاک، بهسازی میکروبی کربنات کلسیم، فرسایش خاک، دما، بارش ماسه ای، آزمایش تونل باد

۱. گروه مهندسی عمران، دانشکده عمران، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران
۲. مجتمع عالی آموزشی و پژوهشی صنعت آب و برق اصفهان، وزارت نیرو، اصفهان، ایران
۳.گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی،اصفهان، ایران
*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: msadeghi84@yahoo.com

مقدمه

فرسایش بادی، طوفان‌های شن و ماسه و به تبع آن خیزش گرد و غبار تهدیدات اصلی موجود در بیابان‌ها بوده که همگی به شکلی جداناپذیر با یکدیگر در ارتباط می‌باشند. طوفان‌های شن خود باعث حرکت رسوبات و مسدود شدن جاده‌ها، ریل‌های راه آهن و راه خانه‌ها شده و از سوی دیگر با ایجاد فرسایش در سطح زمین باعث از بین رفتن پوسته محافظ خاک می‌شوند و در نتیجه به مرور زمان موجب بلندشدگی گرد و غبار و ریزگردها می‌شوند (۲۷ و ۲۹). بنابراین این امر باعث خسارت به منابع زیست‌محیطی، اقتصادی و به خطر انداختن سلامتی جوامع بشری ساکن در مجاورت آن مناطق می‌شود (۳۳). همچنین، فرسایش بادی به‌عنوان یکی از نیروهای اصلی ژئومورفولوژیکی در مناطق کویری بر بسیاری از عوامل محیطی از جمله کیفیت آب، غلظت آلاینده‌های خطرناک هوا در مناطق پرجمعیت مجاور منابع اصلی گرد و غبار تأثیر می‌گذارد (۱۲). براین اساس، یکی از عوامل اثرگذار در حل مشکلات ذکر شده، پوسته سطحی موجود بر روی سطح خاک بوده که می‌تواند نقش مهمی در جلوگیری از فرسایش بادی و جابه جایی دانه‌های خاک داشته باشد. بنابراین، بهسازی و تثبیت پوسته خاک یک روش مفید برای کنترل فرسایش پذیری باد به حساب می‌آید (۲۳).

به صورت معمول در هر گرم خاک مناطق بیابانی بیش از $۱۰^{۷}$ سلول باکتری با تنوع $۱۰^{٤}$ گونه وجود دارد که تعداد زیادی از آنها می‌توانند در بهسازی خاک شرکت کنند و برای تقویت پارامترهای مهندسی و فرسایشی خاک کافی هستند (۱۱). در مجموع روش‌های مختلفی برای بهسازی خاک‌های بیابانی و تقویت پوسته خاک وجود دارد (۳) ولی یکی از روش‌هایی که به تازگی در این زمینه پیشنهاد شده و مراحل بررسی و مطالعه بر روی آن در حال انجام است، بهسازی خاک با استفاده از میکروارگانیسم‌های موجود در آن می‌باشد (۳ و ۲٤). این روش جدید زیست‌فناوری سعی داشته با استفاده از این نکته و با تلقیح میکروارگانیسم‌ها سطح خاک را تثبیت کرده و با ایجاد لایه‌ای محافظ از بلند شدن ذرات خاک جلوگیری نماید (۱٤). این روش، روش ترسیب میکروبی کربنات کلسیم (MICP) نام داشته و یکی از انواع رویکردهای ژئوتکنیکی میکروبی برای تثبیت خاک بر اساس فرآیند هیدرولیز اوره است (۱۵ و ۳۰).

روش MICP یک روش دوستدار محیط زیست و برگرفته از طبیعت بوده که باعث ایجاد سیمان‌سازی درجا توسط گونه‌ای از میکروارگانیسم‌های طبیعی موجود درخاک شده و می‌تواند خواص مکانیکی خاک را اصلاح کرده (۲۸) و یا باعث تثبیت خاک شود (۱۹). از میکروارگانیسم‌های مورد استفاده در این روش می‌توان به باکتری Sporosarcina pasteurii اشاره کرد که یک باکتری اسپوردار بوده و به دلیل آنزیم اوره‌آز بسیار فعال آن، در فرآیند کاتالیز اوره و کلرید کلسیم می‌تواند بسیار فعال عمل کرده و به همین دلیل در بسیاری از مطالعات اخیر به‌عنوان میکروارگانیسم تیمار کننده مورد استفاده قرار گرفته است (۲٦).

همانطور که در واکنش (۱) دیده می‌شود، فرآیند هیدرولیز اوره همراه با کلرید کلسیم باعث تولید کلرید آمونیوم و کربنات کلسیم می‌شود (۱۵). در این حالت، بلورهای کلسیت ایجاد شده با ایجاد اتصالات پل‌مانندی دانه‌های خاک را به یکدیگر متصل کرده و به اینگونه باعث ایجاد مقاومت بیشتر در خاک مورد نظر می‌شوند (۳٤).

واکنش (۱)

$$CO(NH_2)_2 + CaCl_2 + 2H_2O \rightarrow 2NH_4Cl + CaCO_3\ (s)$$

در سال‌های اخیر، بهسازی و تثبیت خاک‌های بیابانی با استفاده از روش MICP برای ایجاد ثبات و بهبود لایه سطحی مورد توجه قرار گرفته و مطالعات زیادی در این زمینه انجام شده است (۱۷ و ۳۱). بسیاری از این مطالعات و از جمله یکی از اولین تحقیقات صورت گرفته در این زمینه توسط بنگ و همکاران (۲) در سال ۲۰۰۹ در آمریکا، با استفاده از باکتری Sporosarcina pasteurii و فرآیند هیدرولیز اوره توسط این باکتری انجام شده است. همچنین، در سایر مطالعات صورت گرفته، اثر عوامل مختلف مهم در فرآیند از قبیل زمان (۱۰)، غلظت باکتری (٦)، رطوبت (۳۲) و دما (۱ و ۲۱) با استفاده از باکتری مورد نظر برای شرایط تثبیت خاک‌های بیابانی توسط

پژوهشگران دیگر مورد مطالعه قرار گرفته است. در بسیاری از مطالعات ذکر شده با استفاده از دستگاه تونل باد میزان فرسایش پذیری، سرعت آستانه فرسایش و شار تلفات به‌عنوان معیارهای سنجش فرسایش پذیری بادی خاک مورد محاسبه و مقایسه قرار گرفته است (٤). با این وجود جهت استفاده از این روش نوین در مقیاس بزرگ، علاوه بر بررسی پارامترهای مؤثر در بهسازی میکروبی خاک و همچنین بهینه‌یابی مقادیر این پارامترها، شبیه‌سازی شرایط محیطی نیز بسیار مهم است که این مسئله در مطالعات قبلی به صورت مدون مورد بررسی قرار نگرفته بود. بنابراین، در مطالعه اخیر اثر شرایط محیطی از قبیل بارش ماسه‌ای و تغییرات دما که از عوامل محیطی تأثیرگذار در تثبیت ماسه‌های روان بیابانی بوده بر روی خاک تیمار شده به روش بهسازی میکروبی مورد بررسی قرار گرفته است. به همین دلیل در این آزمایش‌ها با پاشش محلول حاوی باکتری Sporosarcina pasteurii و محلول سیمانی‌کننده شامل اوره و کلرید کلسیم، یک پوسته تثبیت شده در سطح خاک ایجاد شد که این لایه قابلیت مقاومت در برابر فرسایش بادی خاک را می‌تواند داشته باشد. در ادامه با استفاده از آزمایش تونل باد، شرایط مختلف دمایی و همچنین شرایط شبیه سازی شده طوفان ماسه‌ای با اندازه‌های دانه‌های مختلف، به‌عنوان دو عامل مهم تأثیرگذار در سنجش میزان موفقیت روش‌های تثبیت خاک‌های بیابانی مورد مطالعه قرار گرفت. بر این اساس در آزمایش‌های طراحی شده در این تحقیق دو هدف اصلی دنبال شد. به‌عنوان هدف اول، میزان فعالیت فرآیند تثبیت در دماهای مختلف و تأثیر افزایش دما در بهسازی میکروبی خاک، مورد بررسی قرار گرفت. همچنین، ارزیابی اثر طوفان ماسه‌ای و تأثیر اندازه دانه‌ها در خاک تیمار شده به روش میکروبی به‌عنوان هدف دوم این تحقیق در نظر گرفته شد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

دشت سگزی واقع در۲۰ کیلومتری شرق اصفهان در محدوده شهرستان کوهپایه، یکی از ١٦ کانون بیابان‌زایی در استان اصفهان و تنها ناحیه بیابانی ساخته دست بشر در این منطقه و یکی از کانون‌های بحرانی در ایران می‌باشد (شکل ١). محدوده مورد مطالعه که بخشی از این دشت است با مساحت ۵۵۰۰۰ هکتار بین طول‌های"١٦'٥٦°٥١ و "٣٩'٢٢°٥٢ شرقی و عرض‌های "٣٦'٤٩°٣٢ و "٥٩'٣٣°٣٢ شمالی گسترده شده است. این دشت با توجه به واقع‌شدن منطقه شهری اصفهان در غرب، تأسیسات نظامی و فرودگاهی در شمال، سیستم حمل و نقل جاده‌ای و ریلی در جنوب و مرکز آن و نیز کارگاه‌ها و صنایع مختلف در دل خود از جنبه جلوگیری از فرسایش بادی و بیابان‌زدایی در اولویت مطالعاتی و اجرایی در سطح کشور قرار دارد. نامناسب بودن وضعیت شاخص‌های معیار خاک در منطقه سگزی باعث شده که دیگر شرایط نیز برای پدیده بیابان‌زایی مناسب باشد، به‌طوری که از یک سو بالا بودن شوری خاک باعث گردیده که بیش از نیمی از منطقه عاری از پوشش گیاهی باشد و در نتیجه باد بتواند به راحتی به سطح خاک برخورد کرده و منجر به تخریب در سطح زمین شود. از طرف دیگر زیادبودن میزان سدیم باعث می‌گردد که ساختمان خاک متلاشی شده و خاک به راحتی دچار فرسایش‌های آبی و بادی شود. بر اساس بررسی‌های آماری بلند مدت (٢٠١٥-١٩٧٧) در ایستگاه شرق اصفهان، میانگین سالانه دمای منطقه ١٥/٣ درجه سانتی‌گراد بوده و اختلاف دمای گرم‌ترین و سردترین ماه سال ٢٧/٥ درجه سانتی‌گراد اندازه گیری شده است. میانگین بیشینه دمای هوا ٢٤ درجه سانتی‌گراد و میانگین کمینه آن ٦ درجه سانتی‌گراد است. همچنین، مجموع بارش سالانه ایستگاه شرق اصفهان ١٠٥/٤ میلی‌متر بوده است. از سوی دیگر به‌طور متوسط ٥٩ روز از سال همراه با گرد و خاک است که بیشتر در فصل بهار (٢٥ روز) اتفاق می‌افتد. همچنین به‌طور متوسط ٤١ روز در

شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه (دشت سگزی)

طول سال دید افقی مساوی یا کمتر از دو کیلومتر است (۸). کلیه این اطلاعات نشان‌دهنده میزان اهمیت این منطقه از لحاظ مطالعاتی و تحقیقاتی برای تثبیت و بهسازی خاک است.

مواد ومصالح مورد استفاده در آزمایش

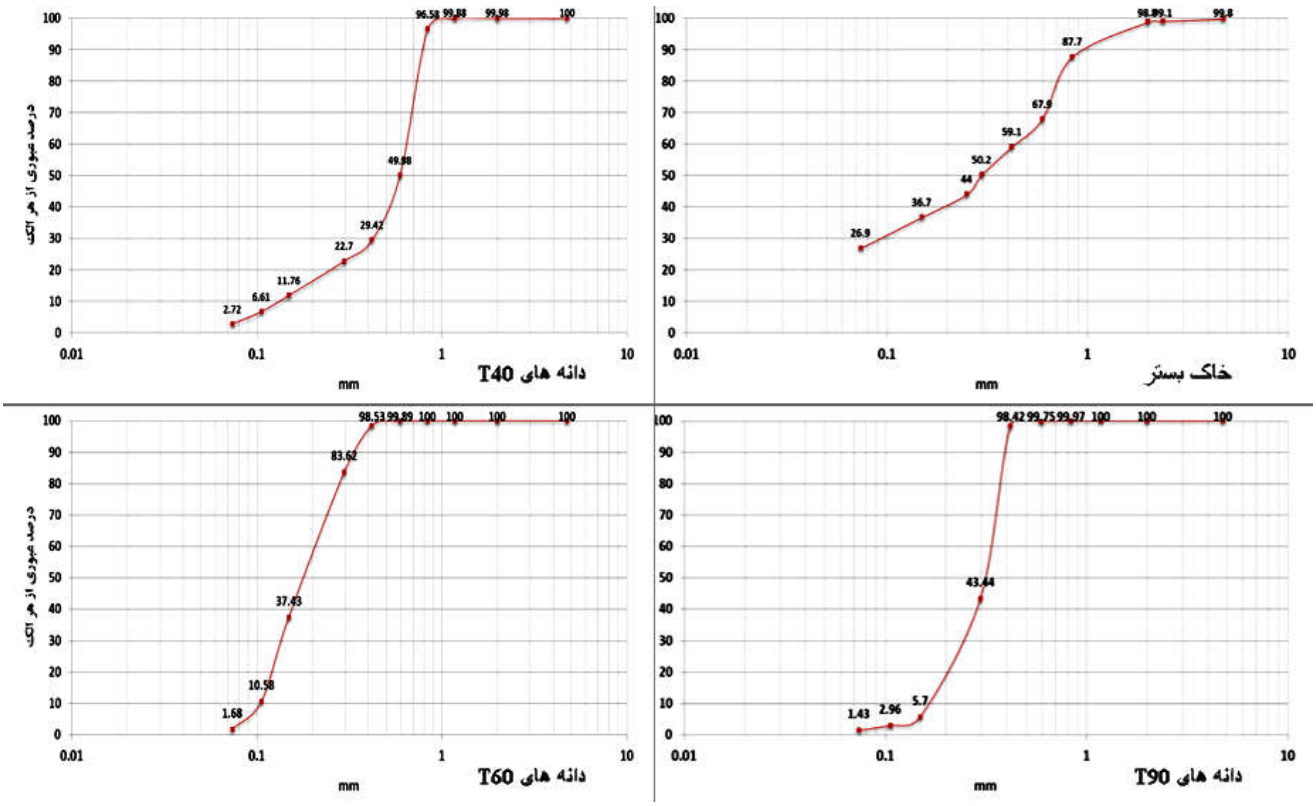
خاک مورد استفاده در پژوهش یک نمونه ماسه با دانه‌بندی یکنواخت با خصوصیات رسی است. روی این خاک آزمایش‌هایی از قبیل دانه‌بندی، اندازه‌گیری حدود اتربرگ و همچنین مقادیر جرم مخصوص و چگالی نسبی دانه‌ها صورت گرفت. بر این اساس مشخص شد که قسمت عمده ماسه کوچک‌تر از ۰/۵۹۵ میلی متر بوده و قطر متوسط ذرات (D50) ۰/۱۹میلی‌متر، ضریب یکنواختی ۲/۶۸ و ضریب انحنا ۰/۹۴ می‌باشد. همچنین، حد روانی این خاک ۲۷/۴٪ و شاخص خمیری آن ۲/۶٪ محاسبه شد. شکل ۲ منحنی دانه‌بندی این نوع خاک را نمایش می‌دهد. از سوی دیگر در این پژوهش از سه نمونه ماسه مهندسی دانه‌بندی شده جهت ایجاد بارش ماسه‌ای استفاده شد. خاک‌های T90، T60 و T40 دارای دانه‌بندی یکنواخت بوده و اختلاف این ۳ نوع ماسه تنها در اندازه دانه‌ها می‌باشد به‌طوری که T90 ماسه ریزدانه، T60 ماسه با سایز متوسط و T40 ماسه با سایز درشت است. منحنی‌های دانه‌بندی این ماسه‌ها که بر حسب استاندارد ASTM-D422 انجام گرفته در شکل (۲) نشان داده شده است.

میکروارگانیسم مورد استفاده در این پژوهش یک باکتری از خانواده باسیلاسه با نام علمی Sporosarcina pasteurii است. سویه مورد استفاده این باکتری از مرکز بانک قارچ‌ها و باکتری‌های صنعتی ایران به شماره PTCC 1645 (DSM33) و به صورت لیوفیلیز شده تهیه شد. همچنین، از اوره و کلرید کلسیم نیز به‌عنوان محلول سیمانی‌کننده استفاده شد. برای جلوگیری از افزایش پارامترهای مورد بررسی، مقدار غلظت باکتری در تمام آزمایش‌ها در میزان O.D.600 برابر ۱/۵ ($۱/۵ \times ۱۰^{۸}$ cell ml^{-1}) ثابت درنظر گرفته شد (۱۸). همچنین، مقادیر محلول چسباننده در نسبت بهینه به‌دست آمده از مطالعات قبلی به صورت اوره به میزان ۱/۵ مولار و کلرید کلسیم ۱ مولار در تمام طول آزمایش‌ها ثابت در نظر گرفته شد (۹).

روش انجام آزمایش‌ها

روش کشت و رشد باکتری

برای تهیه سوسپانسیون باکتری جهت استفاده در آزمایش‌های خاک، مقداری باکتری از کشت جامد در شرایط استریل و زیر هود لامینار به ارلن ۱۰۰۰ میلی‌لیتری محتوی ۳۰۰ میلی‌لیتر از



شکل ۲. نمودار دانه‌بندی خاک ماسه‌ای سگزی (خاک بستر مورد مطالعه) و دانه‌های T40، T60 و T90 جهت بارش ماسه‌ای

محیط کشت وارد شد. سپس این ارلن‌ها در دمای آزمایشگاه و با سرعت لرزش ۱۷۰ دور در دقیقه در داخل دستگاه شیکر قرار گرفته و محیط حاصل پس از گذشت ۷۲ ساعت از کشت باکتری، در انتهای فاز رشد تصاعدی و ابتدای فاز سکون، از داخل دستگاه شیکر خارج شد. جهت استحصال سلول‌های باکتریایی (بیومس باکتری)، محیط کشت مورد نظر به مدت ۱۰ دقیقه و با دور ٤۰۰۰ rpm در داخل دستگاه سانتیفوژ جداسازی شد. در پایان، غلظت‌های مختلف باکتری با استفاده از دستگاه نورسنج جهت استفاده در تیمارخاک، با تغییر میزان محلول ۰/۹ درصد NaCl ساخته شد.

تهیه و عمل آوری نمونه‌ها

برای آماده‌سازی هر یک از نمونه‌ها ابتدا خاک مورد نظر به صورت کامل خشک شده و در معرض هوای آزاد و به دور از رطوبت قرار داده شد. سپس در داخل سینی‌هایی با ابعاد ۱۰۰۰ در ۳۰۰ میلی متر و با ضخامت ۵۰ میلی‌متر پهن شده و سطح آن با استفاده از خط‌کش به صورت کامل یک‌دست و یکنواخت شد. محلول اوره و کلرید کلسیم به‌عنوان محلول چسباننده همراه با توده باکتری با غلظت مورد نظر با استفاده از یک پاشنده دستی با فاصله ۲۰ سانتی‌متر از سطح، به صورت خطی به روی کل سینی پاشیده شد. میزان کل سوسپانسیون تیمار طوری محاسبه شد که در مجموع حجم آن، برابر میزان منافذ سطح خاک تا عمق ۰/۵ سانتی‌متری باشد. به عبارت دیگر مواد تیمارکننده به میزان ۵۰ میلی‌متر از سطح نمونه خاک را اشباع کنند (۵). این مقدار برای خاک مورد آزمایش ۰/۲٤ میلی‌لیتر بر سانتی‌متر درنظر گرفته شد. کلیه نمونه‌ها به صورت ۲۸ روز تیمار و با ۳ تکرار مورد آزمایش تونل باد قرار گرفته و برای بخش بعدی آزمایش از میانگین مقادیر بدست آمده استفاده شد. در این پژوهش از دستگاه تونل باد مرکز تحقیقات بیابان‌زدایی

وابسته به دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان) استفاده شد. دستگاه مورد نظر، یک تونل باد چرخه باز بوده که امکان استفاده در شرایط آزمایشگاهی و صحرایی را دارد. جهت انجام آزمایش تونل باد پس از مراحل آماده‌سازی و اسپری مواد تیمارکننده به سطح خاک، هر سینی با استفاده از ترازوی دیجیتال وزن شده و سپس با کمترین ضربه و حرکت در داخل محفظه دستگاه تونل باد قرار گرفت. سپس بر اساس طرح آزمایش سرعت باد برای نمونه بر روی دستگاه تنظیم شده و نمونه در هر مرتبه آزمایش به مدت ۵ دقیقه در معرض سرعت باد مورد نظر قرار می‌گیرد.

آزمایش تأثیر دما- در این آزمایش نمونه‌ها در دماهای مختلف به داخل انکوباتور یا آون قرار داده شدند و سپس تأثیر دماهای مختلف بر روی فرسایش‌پذیری بادی خاک به کمک آزمایش تونل باد اندازه گیری شد. در این دسته از آزمایش‌ها برای بررسی تأثیر درجه حرارت در میزان مقاومت خاک تثبیت شده در برابر فرسایش بادی در منطقه مورد مطالعه، دمای ٤ درجه سانتی‌گراد به‌عنوان حد یخ‌زدگی، دمای ۱۵ درجه سانتی‌گراد به‌عنوان متوسط سالانه درجه حرارت منطقه، دمای ٢٤ درجه سانتی‌گراد به‌عنوان دمای متوسط بیشینه منطقه و دمای ٤٤ درجه سانتی‌گراد به‌عنوان بیشترین دمای تجربه شده در منطقه مورد مطالعه در نظر گرفته شدند (۸).

آزمایش بارش ماسه‌ای (شبیه‌سازی طوفان ماسه)- جهت شبیه‌سازی طوفان‌های ماسه‌ای و بررسی تأثیر آن بر فرسایش خاک تیمارشده به روش میکروبی از روش بارش ماسه‌ای سطح استفاده شد. در این روش در هنگام انجام آزمایش تونل باد مقداری از دانه‌های ماسه‌ای به صورت متمرکز از نقطه‌ای در جلوی نمونه با شار مشخص وارد تونل شده و همراه با جریان باد به سطح نمونه برخورد کرده و باعث فرسایش سطح می‌گردند (۵ و ۲۰). میزان شار دانه‌های ماسه‌ای در مطالعات گذشته متفاوت درنظر گرفته شده به‌طوری که نیومن و همکاران (۲۲) در سال ۱۹۹٦ این مقدار را $kg/m.s^{-1}$ ۰/۰۰۷، همچنین لانگستن و همکاران (۱۳) در سال ۲۰۰۱، این آزمایش را با میزان شار $kg/m.s^{-1}$ ۰/۰۱۵ انجام دادند. براین اساس با توجه به سرعت باد در آزمایش‌های اخیر، میزان این پارامتر از حدود ۰/۰۱٤ تا ۰/۰۰۲٦ $kg/m.s^{-1}$ متغیر در نظر گرفته شد (۷).

جهت انجام آزمایش تونل باد پس از مراحل آماده‌سازی نمونه، هر سینی با استفاده از ترازوی دیجیتال وزن شده و سپس با کمترین ضربه و حرکت در داخل محفظه دستگاه قرار گرفت. سپس بر اساس طرح آزمایش، سرعت باد برای نمونه بر روی دستگاه تنظیم شده و در آزمایش‌های مربوط به بررسی تأثیر دما، نمونه‌ها به مدت ۵ دقیقه در معرض سرعت باد مورد نظر قرار گرفتند.

برای بدست‌آوردن فرسایش‌پذیری بادی خاک در آزمایش‌ها، وزن هر نمونه توسط یک ترازو با دقت ۰/۰۱ گرم در شروع و انتهای هر آزمایش اندازه‌گیری شد. اختلاف حاصل برحسب درصد نشان‌دهنده فرسایش بادی خاک است. همچنین در آزمایش‌های بارش ماسه‌ای که مدت زمان انجام آزمایش تونل باد در آن متغیر است، جهت حذف عامل زمان و امکان مقایسه نتایج، از شار تلفات استفاده شد. جرمی از خاک که در واحد زمان از واحد سطح نمونه به واسطه جریان باد منتقل می‌شود را شار تلفات گویند (۲۵). این مقدار به روش زیر محاسبه می‌شود (معادله ۱).

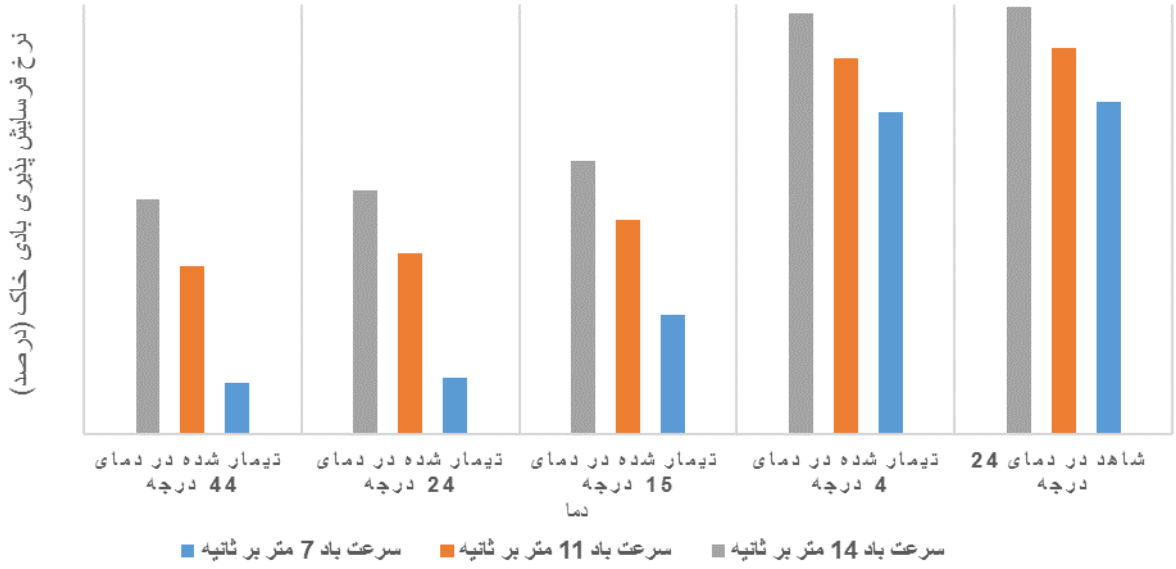
$$q_s = \frac{m_b - m_a}{A \cdot t} \qquad (۱)$$

که در آن m_b جرم اولیه نمونه قبل از آزمایش و m_a جرم نمونه بعد از آزمایش تونل باد بر حسب کیلوگرم و A سطح مقطع سینی بر حسب مترمربع و t مدت زمان بر حسب ساعت و q_s میزان شار تلفات برحسب $Kg/m^2.h$ است.

نتایج و بحث

تأثیر دما در میزان فرسایش بادی خاک بهسازی‌شده به روش میکروبی

بر اساس آنچه در شکل ۳ دیده می‌شود میزان کاهش فرسایش بادی خاک در دمای ٤ درجه سانتی‌گراد در مقایسه با نمونه شاهد ناچیز بوده به‌طوری که این کاهش در سرعت ۷ برابر ۲۳



شکل ۳. مقایسه نتایج حاصل از تغییرات دما و سرعت باد در میزان نرخ فرسایش بادی خاک به صورت تابع نمایی (رنگی در نسخه الکترونیکی)

درصد و برای سرعت‌های ۱۱ و ١٤ متر بر ثانیه حدود ۲۳ و١٤ درصد بوده ولی با افزایش دما از ٤ درجه سانتی‌گراد به ۱۵ درجه سانتی‌گراد (دمای متوسط منطقه) به‌طور چشمگیری با افزایش مقاومت در برابر فرسایش روبرو بوده به‌طوری که این افزایش مقاومت در سرعت‌های ۷، ۱۱ و ١٤ متر بر ثانیه به‌ترتیب ۷۷، ۳۱ و ۲۳ برابر شده که خود مؤید شروع فعالیت باکتریایی و ایجاد رسوب در بین ذرات خاک است. با افزایش دما از ۱۵ به ٢٤ درجه نیز این روند کماکان با شیب کمتر ادامه پیدا کرده و درنهایت در دمای ٤٤ درجه سانتی‌گراد که بیشینه دمای منطقه بوده کمترین میزان فرسایش بادی دیده می‌شود. بر این اساس می‌توان گفت افزایش دما باعث کاهش فرسایش بادی خاک شده که این نرخ در دماهای پایین با شیب بیشتر بوده و با افزایش دما شیب کاهش نرخ فرسایش نیز کاسته می‌شود.

نتایج بدست‌آمده از آزمایش‌های اثر دما بر بهسازی میکروبی خاک نشان می‌دهد، میزان راندمان فرآیند رسوب میکروبی کربنات کلسیم در دمای پایین کمتر بوده به‌طوری که در دماهای نزدیک به یخزدگی بسیار ناچیز است ولی با افزایش دما میزان فرسایش پذیری بادی خاک به‌طور چشمگیری کاهش یافته و این کاهش فرسایش پذیری با افزایش هر چه بیشتر دما کماکان ادامه دارد. این مسئله با توجه به اینکه قسمتی از فرآیند تیمار به کمک یک میکروارگانیسم زنده صورت می‌گیرد دور از ذهن نیست. بنابراین، در دماهای پایین باکتری‌های مورد نظر به دلیل اسپوردار بودن غیرفعال شده و با افزایش دما این باکتری‌ها شروع به فعالیت کرده و رسوب بیشتری تولید کرده که منجر به ایجاد لایه سطحی مقاوم تر و فرسایش بادی کمتر می‌شود. البته لازم به ذکر است که با بالارفتن دما از ٢٤ درجه سانتی‌گراد، میزان شیب کاهش فرسایش‌پذیری کم شده به‌طوری که تغییرات نرخ فرسایش بادی در دمای ٢٤ درجه سانتی‌گراد نسبت به ٤٤ درجه سانتی‌گراد با وجود اندکی کاهش نزدیک به هم می‌باشد. بنابراین، در مجموع می‌توان گفت با توجه به اینکه عملکرد فرآیند بهسازی میکروبی کربنات کلسیم بر اساس بررسی‌های صورت گرفته یک فرآیند گرمادوست می‌باشد، این

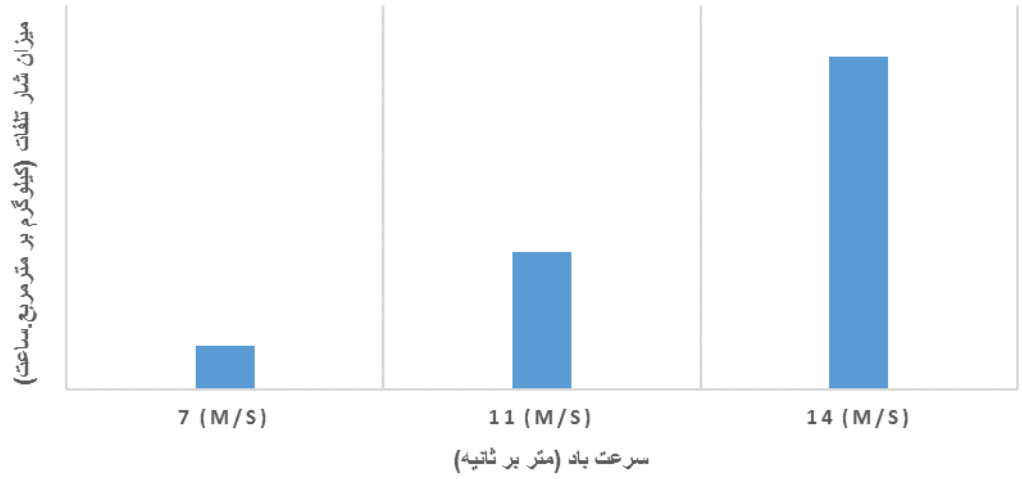
روش برای استفاده در شرایط گرم و خشک از جمله کویرها و بیابان‌ها گزینه مناسبی بوده و می‌تواند به‌عنوان یک روش جایگزین مناسب مورد استفاده قرار گیرد.

مقالات و مطالعات دیگری نیز به بررسی تأثیر تغییرات دما در بهسازی میکروبی خاک پرداخته‌اند که از آن جمله می‌توان به پژوهش‌های صورت گرفته توسط بهمنی و همکاران (۱) در سال ۲۰۱۷ اشاره کرد. در این پژوهش با بررسی اثر تغییرات دما بر میزان مقاومت فشاری خاک بهسازی شده به روش میکروبی پرداخته شده و نتایج حاصل نشان می‌دهد میزان مقاومت فشاری خاک بهسازی شده در نمونه خاک این آزمایش نیز، با افزایش دما از ۱۰ درجه به ۳۵ درجه سانتی‌گراد، از ۲۵۰ کیلو پاسکال به حدود ۳۰۰ کیلوپاسکال افزایش پیدا می‌کند. همچنین در مطالعه‌ای دیگر توسط میر و همکاران (۱۶) در سال ۲۰۱۱ میلادی، تأثیر تغییرات دمای محیط بر میزان فرسایش بادی خاک بهسازی شده مورد ارزیابی و بررسی قرار گرفت که در این حالت میزان درصد فرسایش بادی با افزایش دما از ۲۰ به ۳۵ درجه کاهش چشمگیری داشته و از مقدار حدود ۱/۵ درصد به حدود ۰/۵ درصد کاهش را نشان می‌دهد ولی با افزایش بیشتر دما از ۳۵ درجه به ٤٥ درجه سانتی‌گراد با وجود کاهش میزان فرسایش‌پذیری بادی خاک، این میزان بسیار ناچیز بوده به‌طوری که مقدار نرخ فرسایش از حدود ۰/۵ درصد به ۰/۳ درصد کاهش می‌یابد. بر اساس آنچه گفته شد روند حاصل در هر دو پژوهش با روند بدست آمده در آزمایش‌های صورت گرفته همخوانی داشته و تفاوت مقادیر بدست آمده را نیز می‌توان به دلیل متفاوت بودن سایر شرایط آزمایشی از قبیل میزان و مقدار غلظت باکتری، سرعت باد، مدت زمان تیمار و میزان محلول سیمانی دانست.

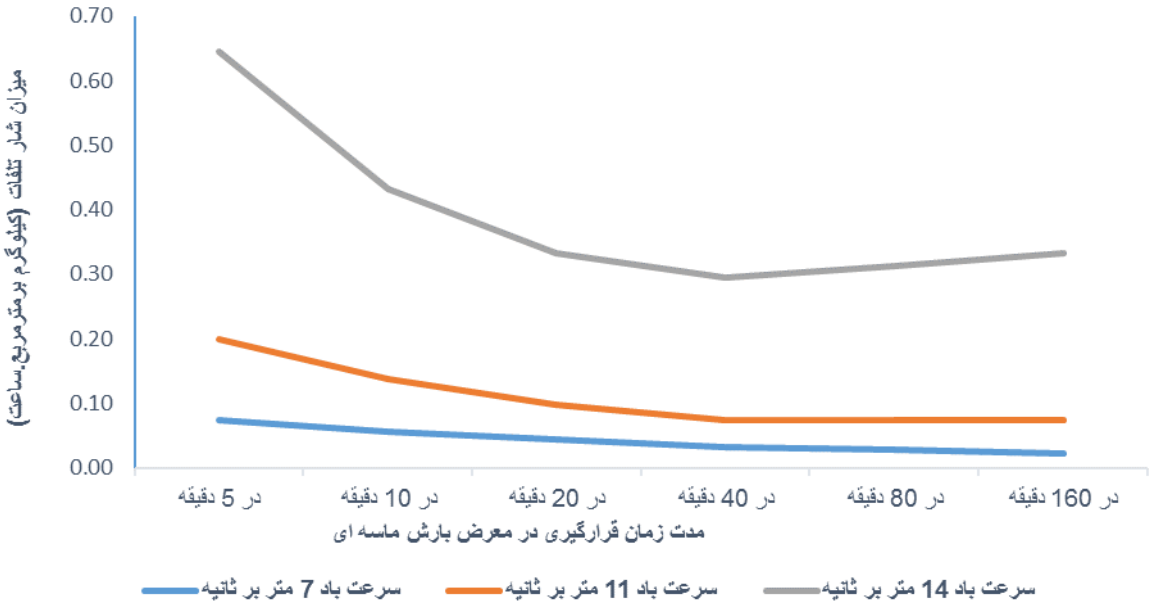
تأثیر بارش ماسه‌ای در میزان فرسایش بادی خاک تیمارشده به روش میکروبی

در این مرحله از آزمایش‌ها قصد بر آن بود که با تمرکز بیشتر بر پارامتر زمان، تأثیر تیمار باکتریایی را در بلندمدت مورد بررسی قرار داده و همچنین با ایجاد بارش ماسه‌ای و شبیه‌سازی طوفان ماسه، تأثیرات این پدیده در نمونه‌های بهسازی شده ارزیابی شود. به‌همین جهت فرسایش بادی خاک در سرعت‌های مختلف باد در دوره‌های زمانی (۵، ۱۰، ۲۰، ٤٠، ۸۰ و ۱٦۰ دقیقه) برای هر سینی اندازه‌گیری شد. برای بارش نیز از سه نوع ماسه با دانه‌بندی هم اندازه و در سه اندازه مختلف استفاده شد تا بتوان بدین صورت تأثیر اندازه دانه‌های ماسه بارش یافته را نیز ارزیابی کرد. به دلیل یکسان نبودن بازه‌های زمانی در هر گام آزمایش، از شارتلفات به جای نرخ فرسایش‌پذیری بادی خاک استفاده شد. زیرا متغیر زمان در داخل این پارامتر پنهان بوده و تأثیر تغییرات زمان در هر گام را خنثی می‌نماید. در شکل ٤ مقادیر شار تلفات برای نمونه‌های شاهد نشان داده شده است.

شکل ۵ میزان شار تلفات نمونه‌های تیمار شده تحت بارش ماسه T90 در سرعت‌های مختلف را نشان می‌دهد. به دلیل ریز دانه بودن دانه‌های ماسه T90، رفتار خاک تیمار در برابر بارش T90 چندان چشمگیر نبوده به‌طوری که در سرعت‌های ۷ و ۱۱ میزان شار تلفات بعد از گذشت دقایق اولیه و بلندشدن دانه‌ها با اتصالات ضعیف شرایط پایدار پیدا کرده و در حد ناچیز باقی می‌ماند. با افزایش سرعت باد به ١٤ متر بر ثانیه، به دلیل سبک بودن وزن دانه‌های T90، این دانه‌ها با جریان باد بلند شده و کمتر به سطح خاک برخورد کرده ولی به دلیل بالا بودن سرعت باد میزان شار تلفات بیشتر از حالات قبلی بوده که این مسئله نه به دلیل بارش ماسه‌ای بلکه به دلیل شروع تخریب لایه محافظ سطحی و از بین رفتن اتصالات قوی‌تر است. در این حالت نیز در ابتدای آزمایش میزان شار تلفات به نسبت بالا بوده که نشان‌دهنده بلندشدگی دانه‌ها با اتصالات ضعیف است ولی به مرور زمان این میزان تاحدودی کاهش یافته و تا مدت زمان ٤٠ نیز شیب شار تلفات نزولی است ولی با طولانی‌تر شدن مدت زمان قرارگیری نمونه در برابر جریان باد، آرام آرام لایه سطحی مقاوم ضعیف شده و به همین خاطر میزان شار تلفات نمونه نیز با شیب صعودی شروع به افزایش می‌نماید.

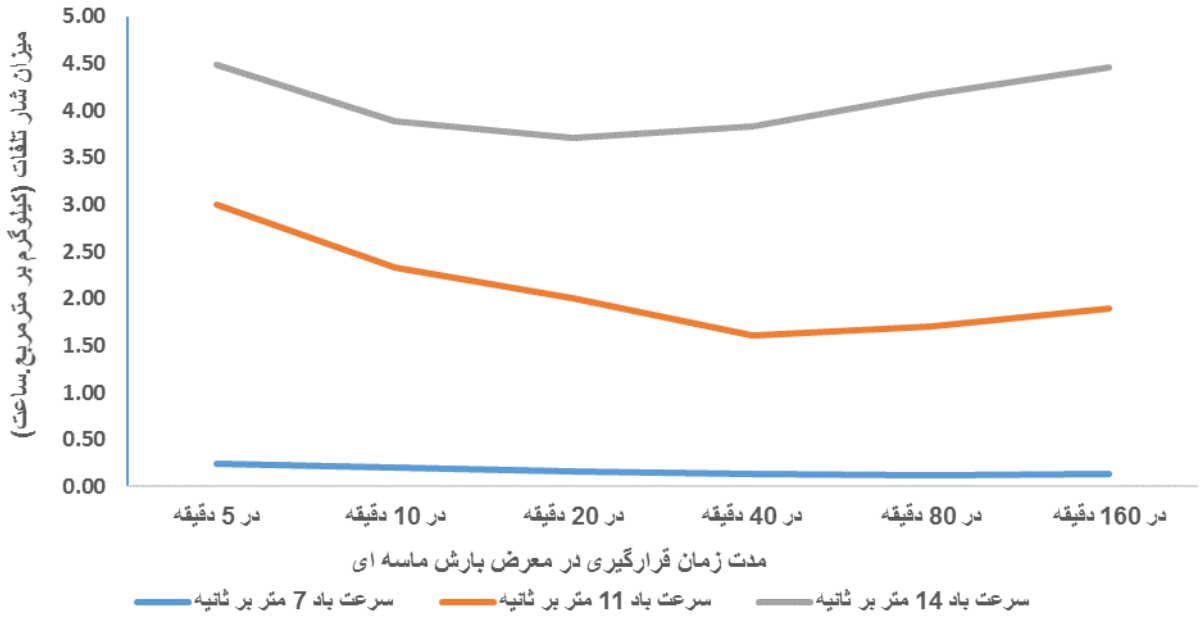


شکل ٤. مقادیر شار تلفات برای نمونه‌های شاهد در سرعت‌های مختلف باد



شکل۵. شار تلفات نمونه‌های تیمار شده تحت بارش ماسه T90 در سرعت‌های مختلف (رنگی در نسخه الکترونیکی)

همانطور که در شکل ٦ دیده می‌شود میزان تغییرات شار فرسایش در شرایط بارش با ماسه T60 و سرعت ۷ متر بر ثانیه تقریباً ثابت بوده که خود نشان‌دهنده مقاومت لایه سطحی تیمار شده در برابر جریان باد با این سرعت است. با افزایش سرعت باد از ۷ به ۱۱ متر بر ثانیه به صورت چشمگیری میزان شار تلفات خاک افزایش می‌یابد. همچنین، در سرعت ۱۱ متر بر ثانیه با گذشت دقایق ابتدایی به دلیل بلندشدن دانه‌های سست و حذف اتصالات ضعیف میزان شار کاهش می‌یابد و به مرور این مقدار ثابت شده و مجدد به دلیل سایش لایه تیمارشده سطحی با دانه‌های پاشیده شده T60 حالت افزایشی به خود می‌گیرد. در سرعت ١٤ متر بر ثانیه به دلیل سرعت بالای باد و برخورد با شدت دانه‌های بمباران بر سطح خاک، روند



شکل ٦. شار تلفات نمونه‌های تیمار شده تحت بارش ماسه T60 در سرعت‌های مختلف (رنگی در نسخه الکترونیکی)

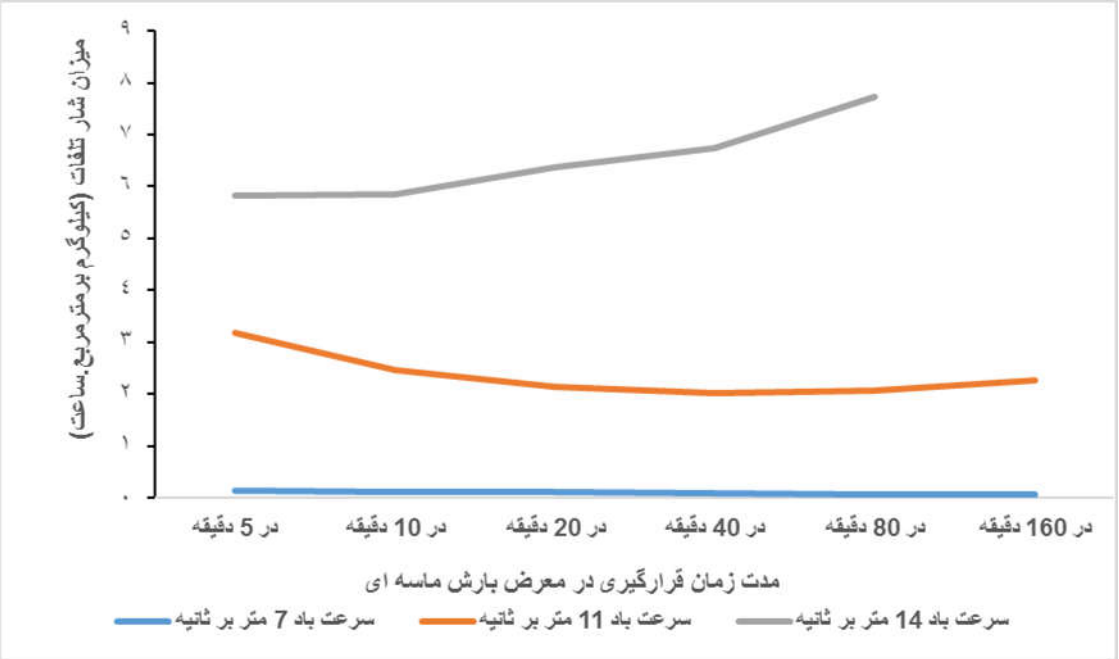
ذکرشده شدت گرفته و در زمان ۲۰ به حداقل خود رسیده ولی بعد ازآن دوباره با شیب تند شروع به افزایش می‌کند که این امر نشان‌دهنده عدم توانایی بیشتر لایه تیمار به مقاومت در برابر فرسایش است.

شکل ۷ شار فرسایش خاک تیمارشده تحت بارش ماسه‌ای T40 در سرعت‌های مختلف را نشان می‌دهد. بر اساس این نمودار ماسه T40 به دلیل اندازه بزرگ دانه‌ها نسبت به دو مدل دیگر در سرعت باد پایین (۷ متر بر ثانیه) چندان امکان حرکت بر روی سطح تیمار شده و سایش آن را نداشته و حرکت دانه‌ها بیشتر در این حالت به صورت خزش می‌باشد. بنابراین، روند فرسایش خاک در این حالت تا حدودی شبیه خاک با بارش ماسه‌ای ریزدانه بوده با این تفاوت که میزان شار فرسایش در این حالت خیلی بیشتر است.

با افزایش سرعت باد از ۷ به ۱۱ متر بر ثانیه جریان باد قدرت به حرکت در آوردن دانه‌های درشت T40 را تا حدودی پیدا کرده بنابراین، میزان فرسایش در این حالت بیشتر شده و همچنین به مرور زمان شار تلفات یک روند ثابت را به خود می‌گیرد. ولی با بالاتر بردن سرعت باد از ۱۱ به ۱٤ متر بر ثانیه، روند رفتاری خاک تیمارشده به کلی تغییر کرده و به دلیل شدت بالای جریان باد و سایش ایجاد شده توسط بمباران ماسه‌های درشت T40، شار فرسایش بعد از چند دقیقه ثابت ماندن شروع به افزایش کرده که نشان‌دهنده عدم توانایی لایه تیمار در تحمل سایش و فرسایش بوده به‌طوری که خاک سینی در زمان ۸۰ دقیقه تقریباً به صورت کامل تخلیه شده و امکان ادامه آزمایش برای مرحله پایانی وجود نداشت.

بررسی همزمان نمودارهای شار فرسایش برای حالت‌های مختلف باد در سرعت ثابت ۷ متر بر ثانیه نشان می‌دهد که در سرعت‌های پایین بمباران ماسه‌ای توسط دانه‌های ریز به دلیل کوچک و سبک بودن سایز دانه‌های بمباران، میزان فرسایش پذیری بسیار ناچیز بوده، همچنین برای بارش ماسه‌ای با سایز بالا نیز به دلیل سنگین بودن دانه‌ها، جریان باد با سرعت پایین امکان حرکت دادن زیاد ذرات را نداشته و فقط حرکت دانه‌ها به صورت خزش است. بنابراین، بیشترین میزان شار فرسایش در این حالت توسط دانه‌های متوسط صورت می‌گیرد.

با مقایسه شار تلفات حالات مختلف در سرعت ثابت ۱۱ متر بر ثانیه می‌توان دید که با افزایش سرعت باد نمودار بارش



شکل ۷. شار تلفات نمونه‌های تیمارشده تحت بارش ماسه T40 در سرعت‌های مختلف (رنگی در نسخه الکترونیکی)

ماسه‌ای با T90 به دلیل اندازه کوچک دانه‌ها باز هم امکان ایجاد فرسایش چشمگیری را نداشته و از سوی دیگر با افزایش سرعت باد در این حالت به دلیل سبک‌بودن دانه‌های خاک، این ذرات دچار بلندشدگی شده و میزان برخورد مؤثر آنها با سطح تیمار کاهش می‌یابد. از سوی دیگر، میزان شار فرسایش دو حالت بارش با ماسه‌های T60 و T40 نیز در این حالت بسیار به هم نزدیک شده و تا حدودی میزان شار ناشی از بارش ماسه‌ای با دانه‌های T40 از شار تلفات بارش با T60 بیشتر شده که خود نشان‌دهنده آن است که سرعت باد به حدی رسیده که بتواند دانه‌های درشت‌تر را بلند کرده و به سطح نمونه تیمار برساند و باعث سایش سطح نمونه شود.

با افزایش سرعت باد از ۱۱ به ١٤ متربرثانیه کماکان شاهد کاهش تأثیر بارش ماسه‌ای توسط دانه‌های T90 بوده زیرا افزایش سرعت باد باعث پرتاب‌کردن دانه‌ها و معلق‌کردن آنها در محیط شده و تأثیر چندانی در فرسایش لایه سطحی خاک ندارد. همچنین، در این شرایط بیشترین تأثیر را دانه‌های درشت T40 داشته که با افزایش سرعت باد امکان سایش سطح تیمار را به کمک وزن بالای خود بیشتر پیدا کرده‌اند و از این‌رو از همان ابتدا با سایش و از بین‌بردن لایه تیمار سطحی، شار فرسایش بالایی را ایجاد می‌نمایند.

تأثیر مدت زمان وزش باد در میزان فرسایش بادی خاک تیمارشده به روش میکروبی

جهت بررسی دوام روش بهسازی میکروبی کربنات کلسیم، تأثیر تیمار باکتری در دوره‌های زمانی مختلف برای نمونه‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت. در شکل‌های ٤،٥ و ٦ هر سه نمودار تقریباً یک الگوریتم ثابت را در طول آزمایش نشان داده به‌طوری که با دنبال کردن آن می‌توان به روند کلی دوام در خاک بهسازی شده به روش میکروبی همراه با بارش ماسه‌ای دست یافت.

بر این اساس در سرعت باد ۷ متر بر ثانیه، با طولانی‌شدن دوره زمانی وزش باد، شار فرسایش کاهش می‌یابد که این مسئله به دلیل بلندشدن دانه‌های آزاد خاک در دقایق اولیه و سپس گسیخته شدن اتصالات ضعیف بین دانه‌ای در دقایق

بعدی بوده ولی با گذشت زمان، تنها اتصالات قوی باقی مانده و لایه سطحی تیمار شده توانایی حفظ دانه‌ها را دارد. با افزایش سرعت باد از ۷ به ۱۱ متر بر ثانیه، روند پیشرفت آزمایش در دقایق آغازین شبیه رفتار خاک در سرعت ۷ متر بر ثانیه بوده ولی در ادامه، از زمان ۲۰ به بعد، شیب نمودار تقریباً صفر شده و میزان شار فرسایش خاک بین ۰/۰۶ الی ۰/۰۸ ($Kg\ m^{-2}h^{-1}$) ثابت شده است که این نشان‌دهنده شروع خوردگی و فرسایش لایه سطحی مقاوم بوده و در این سرعت باد علاوه بر اتصالات ضعیف، اتصالات قوی‌تر رسوب کربنات کلسیم حاصل از تیمار نیز به مرور شروع به فرسایش می‌کنند ولی با این وجود کماکان سطح تیمارشده توانایی مقاومت در برابر جریان باد را دارد. در سرعت باد ۱۴ متر بر ثانیه نیز همانند رفتار خاک در دو سرعت دیگر در دقایق اولیه شار فرسایش بالا بوده که به مرور با حذف اتصالات ضعیف، مقدار شار کاهش می‌یابد ولی به مرور زمان از دقیقه ۴۰ به بعد این شار روند افزایشی به خود گرفته که نشان‌دهنده از بین‌رفتن اتصالات لایه تیمار سطحی می‌باشد. در این حالت به دلیل بالا بودن سرعت باد در دانه‌های T40 و تا حدود کمتری نیز T60 روند فرسایش بادی با شیب تندی افزایش یافته به‌طوری که این فرسایش تا جایی پیش می‌رود که کل لایه مقاوم از بین رفته و خاک داخل سینی به‌طور کامل تخلیه شود.

تاکنون مطالعات منسجمی در زمینه بررسی تأثیر اندازه دانه‌ها در بارش ماسه‌ای صورت نگرفته ولی در سال ۲۰۱۹ محبی و همکاران (۲۰) و در سال ۲۰۲۰ فتاحی و همکاران (۴) در پژوهش‌هایی مجزا که به تیمار خاک ماسه‌ای با روش میکروبی مربوط بود، میزان فرسایش بادی خاک را در حالت با بارش ماسه‌ای و بدون بارش ماسه‌ای مورد بررسی قرار دادند که در این مطالعات وجود بارش ماسه‌ای باعث افزایش چند برابری فرسایش بادی خاک شد. همچنین در این بررسی‌ها مشخص شد مدل بارش ماسه ای، مدت زمان بارش و سرعت باد از عوامل دیگری هستند که در میزان فرسایش ایجاد شده به وسیله بمباران ماسه‌ای تأثیرگذار هستند.

نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج بدست آمده می‌توان گفت که افزایش دما باعث کاهش فرسایش بادی خاک شده که این نرخ در دماهای پایین با شیب بیشتری بوده و با افزایش دما شیب کاهش نرخ فرسایش نیز کاسته می‌شود. که این مسئله می‌تواند جهت استفاده روش بهسازی میکروبی در بیابان‌ها یک نکته بسیار مفید به حساب آید. همچنین، با شبیه‌سازی طوفان ماسه‌ای و بررسی اندازه‌های مختلف دانه‌های پاشیده شده بر سطح، دیده شد که تأثیر بارش ماسه‌ای ریزدانه، با افزایش سرعت باد کاهش یافته زیرا این دانه‌ها سبک بوده و با افزایش سرعت باد دچار بلندشدگی شده و میزان برخورد مؤثر آنها با سطح تیمار کاهش می‌یابد. برای بارش ماسه‌ای با قطر دانه‌های بزرگتر نیز به دلیل سنگین بودن دانه‌ها، جریان باد با سرعت پایین امکان حرکت‌دادن ذرات و ایجاد سایش را ندارد. بنابراین، بیشترین میزان شار فرسایش در حالت بارش ماسه‌ای با در نظرگرفتن همه سرعت‌های باد، توسط دانه‌های متوسط صورت می‌گیرد. با تغییرات سرعت باد میزان تأثیر اندازه دانه‌های مؤثر در بارش ماسه‌ای نیز تغییر می‌نماید. به گونه‌ای که به‌طور مثال با افزایش سرعت باد، تأثیر دانه‌های درشت‌تر در ایجاد فرسایش در خاک بیشتر شده و بر عکس با کاهش سرعت باد، دانه‌های کوچک‌تر تأثیر بیشتری در ایجاد فرسایش خواهند داشت. با وجود این می‌توان گفت، بارش ماسه‌ای در صورت تداوم و وجود شرایط مطلوب سرعت باد، امکان از بین‌بردن لایه محافظ تیمارشده را داشته که این مسئله می‌تواند با تمدید بهسازی در فاصله‌های زمانی مشخص مرتفع شود. بر این اساس می‌توان گفت در صورت استفاده از شرایط بهینه مد نظر، روش بهسازی میکروبی خاک می‌تواند

در تثبیت خاک‌های مناطق بیابانی از جمله خاک منطقه سگزی اصفهان کارایی داشته باشد که لازمه این امر بررسی سایر ابعاد مسئله نیز است.

سپاسگزاری

کلیه آزمایش‌های صورت گرفته در این مطالعه در مرکز تحقیقات بیابان‌زدایی وابسته به دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان) انجام شده که بدین وسیله نویسندگان مراتب تشکر و قدردانی خود را بابت همکاری صورت گرفته اعلام می‌نمایند.

منابع مورد استفاده

1. Bahmani, M., A. Noorzad, J. Hamedi and F. Sali. 2017. The role of bacillus pasteurii on the change of parameters of sands according to temperature compresion and wind erosion resistance. *Journal Clean WAS* 1(2): 1-5.
2. Bang, S.S., C. Leibrock, B. Smith, R.J. Pinkelman, S. Frutiger, L. M. Nehl, B. L. Comes, D. Coleman and S. Bang. 2009. Geotechnical values of microbial calcite in dust suppression. *In:* Proceeding of NSF Engineering Research and Innovation Conference, Honolulu, HI.
3. Choi, S.G., I. Chang, M. Lee, J.H. Lee, J.T. Han and T. H. Kwon. 2020. Review on geotechnical engineering properties of sands treated by microbially induced calcium carbonate precipitation (MICP) and biopolymers. *Construction and Building Materials* 246: 118415.
4. Fattahi, S. M., A. Soroush and N. Huang. 2020. Biocementation control of sand against wind erosion. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 146(6): 04020045.
5. Fattahi, S. M., A. Soroush and N. Huang. 2020. Wind erosion control using inoculation of aeolian sand with cyanobacteria. *Land Degradation and Development* 31(15): 2104-2116.
6. Gu, J., M. T. Suleiman, H. Bastola, D. G. Brown and N. Zouari. 2018. Treatment of sand using microbial-induced carbonate precipitation (MICP) for wind erosion application. *In:* IFCEE Recent Developments in Geotechnical Engineering Practice, Orlando, Florida.
7. Houser, C.A. and W.G. Nickling, 2001. The factors influencing the abrasion efficiency of saltating grains on a clay-crusted playa. Earth Surface Processes and Landforms. *The Journal of the British Geomorphological Research Group* 26(5): 491-505.
8. Isfahan Meteorological Department. 2018. Climate Index of East Isfahan.
9. Ivanov, V. and V. Stabnikov. 2017. Bioremediation and biodesaturation of soil. P. 223-234. *In:* V. Ivanov and V. Stabnikov (Eds.). Construction Biotechnology. Springer, Singapore.
10. Jiang, N. J., C. S. Tang, L. Y. Yin, Y. H. Xie and B. Shi. 2019. Applicability of microbial calcification method for sandy-slope surface erosion control. *Journal of Materials in Civil Engineering* 31(11): 04019250.
11. Johnston, P. M. and B. C. O'Kelly. 2014. Importance of environmental geotechnics. *Environmental Geotechnics* 3(6): 356-358.
12. Lal, R. 2017. Soil erosion by wind and water: problems and prospects. P. 1–10. *In:* Soil Erosion Research Methods. Routledge, London, UK.
13. Langston, G. and C. M. Neuman. 2005. An experimental study on the susceptibility of crusted surfaces to wind erosion: a comparison of the strength properties of biotic and salt crusts. *Geomorphology* 72(1-4): 40-53.
14. Liu, S., R. Wang, J. Yu, X. Peng, Y. Cai and B. Tu. 2020. Effectiveness of the anti-erosion of an MICP coating on the surfaces of ancient clay roof tiles. *Construction and Building Materials* 243: 118202.
15. Liu, S., K. Wen, C. Armwood, C. Bu, C. Li, F. Amini and L. Li. 2019. Enhancement of MICP-treated sandy soils against environmental deterioration. *Journal of Materials in Civil Engineering* 31(12): 04019294.
16. Meyer, F. D., S. Bang, S. Min, L. D. Stetler and S. S. Bang. 2011. Microbiologically-induced soil stabilization: application of Sporosarcina pasteurii for fugitive dust control. *In:* Geo-frontiers: Advances in Geotechnical Engineering, Dallas, United States.
17. Mirmohammad Sadeghi, M. 2016. Evaluation of factors affecting the shear strength of the biologically treated sandy soil using Taguchi method. *Modares Civil Engineering Journal* 16(3): 191-202.
18. Mirmohammad sadeghi, M., A. R. Modarresnia and F. Shafiei. 2015. Parameters effects evaluation of microbial strengthening of sandy soils in mixing experiments using taguchi methodology. *Geomicrobiology Journal* 32(5): 453-465.

19. Modaresnia, A., M. Ghazavi and E. Masoumi, 2013. Performance evaluation of microbial carbonate precipitation method compared with resin and fiber stabilization on the strength of compacted sandy soils. *In:* 7th International Symposium on Advances in Science and Technology. Hormozgan, Iran.
20. Mohebbi, M. M., G. Habibagahi, A. Niazi and A. Ghahramani. 2019. A laboratory investigation of suppression of dust from wind erosion using biocementation with Bacillus amyloliquefaciens. *Scientia Iranica* 26(5): 2665-2677.
21. Naeimi, M. and J. Chu. 2017. Comparison of conventional and bio-treated methods as dust suppressants. *Environmental Science and Pollution Research* 24(29): 23341-23350.
22 Neuman, C. M., C. D. Maxwell and J. W. Boulton. 1996. Wind transport of sand surfaces crusted with photoautotrophic microorganisms. *Catena* 27(3-4): 229-247.
23. O'Brien, P. and C. M. Neuman. 2012. A wind tunnel study of particle kinematics during crust rupture and erosion. *Geomorphology* 173: 149-160.
24. Osinubi, K. J., A. O. Eberemu, T. S. Ijimdiya, S. E. Yakubu, E. W. Gadzama, J. E. Sani and P. Yohanna. 2020. Review of the use of microorganisms in geotechnical engineering applications. *SN Applied Sciences* 2(2): 1-19.
25. Rajabi Agereh, S., F. Kiani, K. Khavazi, H. Rouhipour and F. Khormali 2019. An environmentally friendly soil improvement technology for sand and dust storms control. *Environmental Health Engineering and Management Journal* 6(1): 63-71.
26. Shafiei, F., A. R. Modarresnia and M. M. Sadeghi. 2013. Estimation of the Interactions between the Factors Affecting Microbial Soil Strengthening by Ureolytic Sporosarcina pasteurii. *In:* 1st Tabriz International Life Science Conference and 12th Iran Biophysical Chemistry Conference, Tabriz university of medical sciences, Tabriz, Iran.
27. Shepherd, G., E. Terradellas, A. Baklanov, U. Kang, W. Sprigg, S. Nickovic, A.D. Boloorani, A. Al- Dousari, S. Basart, A. Benedetti and A. Sealy. 2016. Global assessment of sand and dust storms. UNEP, WMO, UNCCD; United Nations Environment Programme.
28. Sotoudehfar, A. R., M. Mirmohammad sadeghi, E. Mokhtari and F. Shafiei. 2016. Assessment of the parameters influencing microbial calcite precipitation in injection experiments using Taguchi methodology. *Geomicrobiology Journal* 33(2): 163-172.
29. Webb, N. P., J. E. Herrick, J. W. Van Zee, C. H. Hugenholtz, T. M. Zobeck and G. S. Okin. 2015. Standard Methods for Wind Erosion Research and Model Development. USDA-ARS Jornada Experimental Range. Las Cruces, New Mexico, USA.
30. Wen, K., Y. Li, S. Liu, C. Bu and L. Li. 2019. Evaluation of MICP treatment through EC and pH tests in urea hydrolysis process. *Environmental Geotechnics* 40(1): 1-8.
31. Xie, S., J. Qu, X. Xu and Y. Pang. 2017. Interactions between freeze-thaw actions, wind erosion desertification, and permafrost in the Qinghai-Tibet Plateau. *Natural Hazards* 85(2): 829-850.
32. Zhan, Q., C. Qian and H. Yi. 2016. Microbial-induced mineralization and cementation of fugitive dust and engineering application. *Construction and Building Materials* 121: 437-444.
33. Zobeck, T. M., M. Baddock, R. S. Van Pelt, J. Tatarko and V. Acosta-Martinez. 2013. Soil property effects on wind erosion of organic soils. *Aeolian Research* 10: 43-51.
34. Zomorodian, S. M. A., A. Soleymani and B.C. O'Kelly. 2019. Briefing: Improving erosion resistance of sand using nano-silica additive. *In:* Proceedings of the Institution of Civil Engineers. *Ground Improvement*, 172(1): 3-11.

Journal of Water and Soil Science
Vol. 25, No. 4, Winter 2022, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

Investigating the Effect of Microbial Induced Carbonate Precipitation on Reducing Wind Erodibility of Soils in Segzi Desert Area, Isfahan

A. R. Modarresnia[1], M. Mirmohammad Sadeghi[2*] and A. Jalalian[3]

(Received: January 26-2021; Accepted: May 15-2021)

Abstract

Desertification has become one of the main problems of human societies living in the vicinity of desert areas in recent years. One of the methods that have been considered in recent years and are rapidly expanding in the field of soil mechanics is the Microbial Induced Carbonate Precipitation (MICP). In this method, urea-positive organisms that are naturally present in the soil can stabilize the soil and improve its engineering parameters by using urea and calcium chloride. Recently, attempts have been made to use this method to create a crustal layer on the soil to prevent wind erosion. In the present study, the effect of environmental conditions in deserts such as temperature and sand bombardment on microbial soil treatment has been investigated using this new method. The soil of the Segzi region as one of the main centers of dust in the Isfahan region was studied in this research. Therefore, the improved samples are subjected to regional temperatures which increased the surface layer resistance with increasing temperature. Also, the sandstorm conditions of the region were simulated using three different grain sizes of sand inside the wind tunnel. The results of these experiments showed that stabilized soil could withstand the conditions at wind speeds of 7 and 11 m/s. However, by increasing the wind speed to 14 m/s and the grain size, the crustal layer destroys and increases the wind erosion of the soil. Also, the resistance of the surface layer increased by increasing temperature in the tested samples. This increase in resistance continued up to 24 degrees with a high slope, but from 24 degrees onwards, this slope decreases. Based on the results of this research, it can be said that the microbial improvement method can be used as an alternative method in the future to stabilize desert soils.

Keywords: Soil stabilization, Microbial induced carbonate precipitation, Wind erosion, Temperature, Sand bombardment, Wind tunnel test

1. Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran.
2. Isfahan Higher Education and Research Institute for Water and Power (IHEARI), Ministry of Energy, Isfahan, Iran.
3. Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran.
*: Corresponding author, Email: msadeghi84@yahoo.com