

بررسی اثر استفاده از پوشش غیر فرساینده بر میزان بادبردگی ذرات ماسه تل حمید به کمک تست تونل باد

وحید سرافرازی^۱، لیلا کاشی زنوزی^۲، محمد خسروشاهی^{۳*}

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۹/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۵/۱۶

چکیده

پدیده فرسایش بادی و حرکت ماسه‌های روان از چالش‌های جدی سرزمین‌های خشک محسوب می‌شود. در پژوهش حاضر برای کنترل طوفان‌های ماسه و تثبیت گردوغبار، پوشش سنگ‌ریزه پیشنهاد شده است. برای این کار با انتقال ماسه از منطقه بیابانی بلاک ریلی منتظر قائم- تل حمید تأثیر پوشش سنگ‌ریزه با تراکم ۳۰، ۵۰ و ۷۵٪ در میزان باد بردگی ذرات شن و ماسه به کمک تست تجربی تونل باد و در سرعت‌های متفاوت مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که برای سرعت‌های باد تا ۱۰ متر بر ثانیه نیازی به پوشش‌دهی سنگ‌ریزه نیست ولی در سرعت‌های بیشتر از ۲۰ متر بر ثانیه با افزایش درصد پوشش سنگ‌ریزه میزان فرسایش بادی به صورت توانی کاهش می‌یابد در سرعت‌های باد حدود ۱۶ متر بر ثانیه کارایی پوشش ۵۰ و ۷۵٪ به هم نزدیک بوده و تقریباً نتیجه یکسانی در بر داشت. از این رو در این گونه مناطق پوشش بیشتر از ۵۰٪، فقط هزینه کار را بیشتر کرده ولی در نتیجه کار تأثیر قابل توجهی نخواهد داشت؛ بنابراین در مناطقی که امکان استفاده از سایر روش‌ها به دلایل مختلف ادافیکی یا اقلیمی وجود نداشته باشد می‌توان از پوشش‌دهی مواد غیر فرساینده مانند ریگ یا پوشش‌های سنگ‌ریزه‌ای به عنوان یک راهکار عملی برای جلوگیری از فرسایش بادی و گردوغبار استفاده کرد.

کلیدواژه‌ها: سنگ‌ریزه، تثبیت، گردوغبار، تونل باد.

۱. دانشجوی دکتری، مهندسی ماشین‌های ریلی، دانشکده مهندسی راه‌آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران
 ۲. کارشناس ارشد پژوهشی، بخش تحقیقات بیابان، مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی
 ۳. دانشیار پژوهشی، بخش تحقیقات بیابان، مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، نویسنده مسئول؛
khosro@rrff-ac.ir
- این مقاله مستخرج از طرح پژوهشی مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور است.

مقدمه

فرسایش بادی و حرکت ماسه‌های روان که به‌عنوان یکی از فرایندهای مهم تخریب سرزمین و یک چالش جدی در مناطق خشک و نیمه‌خشک به‌شمار می‌رود، بر اثر تعامل بین فرایندهای آب‌وهوایی و زمینی اتفاق می‌افتد. در فرایند فرسایش بادی و طوفان‌های گردوغبار علاوه بر شرایط هواشناسی، پوشش سطحی زمین نیز نقش مهمی ایفا می‌کند. از این‌رو در گذشته برای تثبیت سطوح وسیع ماسه‌زارها و مهار کانون‌های بحرانی فرسایش بادی اغلب از خاک‌پوش (مالچ)‌های نفتی استفاده شده است؛ روشی که البته آنچنان با محیط زیست سازگار نبوده و خود مشکلاتی را بر طبیعت تحمیل می‌کرد؛ و واقعیتی که سبب شد تا هرچه بیشتر ضرورت معرفی و کاربرد ترکیبات مناسب و سازگار با طبیعت در عین کارایی بیشتر احساس شود (سلیمانی و همکاران، ۲۰۰۱). به‌منظور مقابله با این مشکلات در مناطق بیابانی و به‌منظور تثبیت ذرات به‌طور کلی از سه دسته راهکار کلی شامل بیولوژیکی مانند کاشت درخت، تثبیت فیزیکی و مکانیکی ماسه و تثبیت شیمیایی ماسه استفاده شده است (شادود^۱ و همکاران، ۲۰۱۸؛ زانک^۲ و همکاران، ۲۰۱۸).

از جمله اقدامات حفاظتی برای مقابله با مخاطرات ذرات شن و ماسه و گردوغبار، می‌توان به تثبیت ذرات و خاکدانه‌های سطح خاک اشاره کرد که باعث افزایش آستانه فرسایش‌پذیری خاک می‌شود. امروزه تثبیت ذرات خاک با استفاده از افزودنی‌ها، پایدارکننده‌ها و اصلاح‌کننده‌های مختلف انجام می‌شود (پراتس^۳ و همکاران، ۲۰۱۴). استفاده از تثبیت‌کننده‌های شیمیایی (گودیچ و ژاکوبی^۴، ۲۰۱۲؛ هن^۵ و همکاران، ۲۰۰۷؛ فتاح و همکاران، ۲۰۱۶)، مکانیکی (زانک و همکاران، ۲۰۰۵) و زیستی (تیسدال^۶ و همکاران، ۲۰۱۲) در مطالعات مختلف گزارش شده است.

به‌رغم استفاده گسترده از تثبیت‌کننده‌ها و افزودنی‌های

حفاظتی در خاک، این مواد به‌دلیل عدم پایداری و اثبات اثرات سوء محیط زیستی، نتوانستند به‌عنوان راه‌حل کافی در مبحث مهار فرسایش و اصلاح خاک مطرح باشند (ابوزریق^۷ و همکاران، ۲۰۰۷). به‌علاوه اثرات سوء محیط زیستی و انسانی مالچ‌های نفتی و پلیمرها و ناپایداری آن‌ها در سطح خاک به اثبات رسیده است (استابنیکاو^۸ و همکاران، ۲۰۱۳؛ اپلده^۹ و همکاران، ۲۰۱۳).

اقدامات زراعی و کاشت گیاه هم یک روش معمول برای کنترل فرسایش خاک است، اما این روش نیز توسط عامل بارندگی محدود می‌شود (استابنیکاو و همکاران، ۲۰۱۳). لذا به‌منظور تثبیت فیزیکی ذرات شن و ماسه در مناطقی که امکان تثبیت آن با روش‌های بیولوژیکی فراهم نیست، یکی از راهکارها استفاده از مواد غیر فرسایشی مانند سنگ‌ریزه و یا ریگ‌پاشی می‌باشد. بحث درباره ذرات فرسایشی و غیر فرسایشی در مطالعات مختلف مورد بررسی قرار گرفته است و در همه این تحقیقات، محققان به این نتیجه رسیدند که مقدار ذراتی که در اثر فرسایش بادی در فضا پخش می‌شود، به‌شدت در حضور ذرات غیر فرسایشی ضعیف است.

مطالعه بر روی یک سطح صاف از ذرات به کمک شبیه‌سازی عددی و آزمایش تونل باد نشان داد که مقدار فرسایش ذرات خارج‌شده از بستر در حضور ذرات غیر فرسایشی کاهش می‌یابد؛ به این پدیده، اثر سنگفرش^{۱۰} گویند که نشان‌دهنده اثر ذرات غیر فرسایش‌پذیر در جلوگیری از فرسایش ذرات فرسایش‌پذیر است که مانع بلند شدن ذرات فرسایش‌پذیر می‌شود. اثر سنگفرش در واقع پوشیده شدن یک سطح فرسایش‌پذیر به کمک ذرات غیر فرسایشی است.

مطالعات دیگری نیز به‌صورت تئوری و عددی به‌منظور تعیین اثرات ذرات غیرقابل فرسایش در مقیاس ذره مورد بررسی قرار گرفته است. این تحقیقات ویژگی‌های جریان سیال را در مقیاس میکروسکوپی در اطراف تعدادی از ذرات غیرقابل فرسایش به کمک شبیه‌سازی عددی مورد بررسی قرار

1. Saadoud
2. Zhang
3. Prats
4. Goodrich & Jacobi
5. Han
6. Tisdall

7. Abu-Zreig
8. Stabnikov
9. Epelde
10. Pavement effect

همکاران، ۲۰۱۳؛ لئو^۷ و همکاران، ۲۰۱۱). در تحقیق حاضر، ابتدا نمونه‌برداری، تعیین چگالی و دانه‌بندی ذرات شن و ماسه از ناحیه بیابانی شرق ایران انجام و سپس به کمک تست تجربی تونل باد سرعت آستانه خزشی ذرات شن و ماسه مذکور تعیین شده است و سپس میزان اثربخشی پوشش سنگ‌ریزه با درصد ۳۰، ۵۰ و ۷۵٪ تحت سرعت‌های مختلف باد بالاتر از سرعت آستانه فرسایش مربوط به ذرات مورد بررسی قرار گرفته است تا با استفاده از این پوشش‌های سنگ‌ریزه و یا ریگ به‌جای مالچ بتوان ذرات خاک را به‌طور قابل‌توجهی از فرسایش بادی مصون داشت.

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مورد مطالعه

به‌منظور بررسی تأثیر پوشش‌های مختلف سنگ‌ریزه بر میزان بادبردگی ذرات شن و ماسه ابتدا نمونه شن و ماسه‌بادی از منطقه تل حمید مطابق شکل (۱) در طبس واقع در ۲۰۹ کیلومتری از راه‌آهن بافق و به‌ترتیب در طول و عرض جغرافیایی ۵۵/۸۹ و ۳۲/۹۳ درجه که ارتفاع آن از سطح دریا ۶۹۰ متر و آب‌وهوای شهر گرم و خشک با میانگین سالانه ۲۱ درجه سانتی‌گراد و میانگین بارندگی سالانه ۹۱/۶ میلی‌متر است جمع‌آوری شد و با استفاده از استاندارد^۸ چگالی حقیقی ذرات شن و ماسه اندازه‌گیری شد که مقدار آن برابر ۲۷۲۴ کیلوگرم بر مترمکعب تعیین گردید.

در مراحل بعد، ابتدا دانه‌بندی خشک ذرات شن و ماسه برداشت‌شده از نقاط مختلف بلاک منتظر قائم- تل حمید استخراج شد؛ و سپس میزان بادبردگی این ذرات تحت سرعت‌های مختلف برای نمونه فاقد سنگ‌ریزه (نمونه شاخص) و نمونه با پوشش سنگ‌ریزه‌ای ۳۰، ۵۰ و ۷۵ به کمک تست تونل باد و مطابق رویه موجود در شکل (۲) اندازه‌گیری شد. همچنین سرعت متوسط باد غالب سالانه در این منطقه برابر ۴ متر بر ثانیه است (طویلی، ۱۳۹۳).

دادند و طی شبیه‌سازی عددی خود دریافتند که متوسط سرعت اصطکاکی با افزایش تعداد ذرات غیر فرسایشی کاهش می‌یابد و میزان گردوغبار انتشاریافته نیز وابسته به‌سرعت اصطکاکی است (لی و مارتز^۱، ۲۰۰۵؛ مک‌کونا^۲ و همکاران، ۱۹۹۳؛ دسیکمپ^۳ و همکاران، ۲۰۰۵).

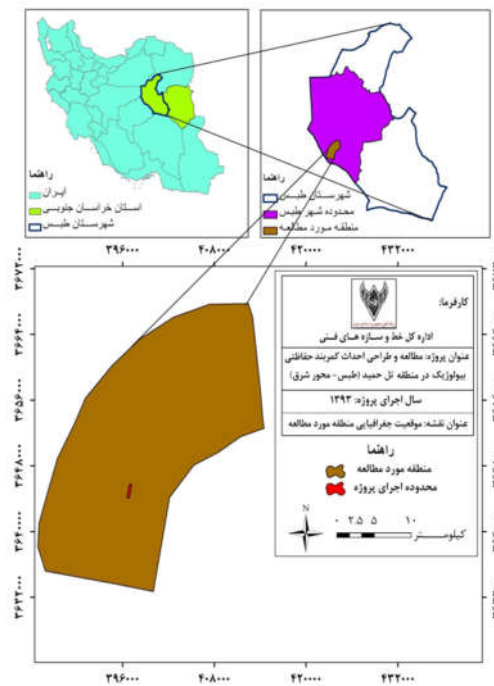
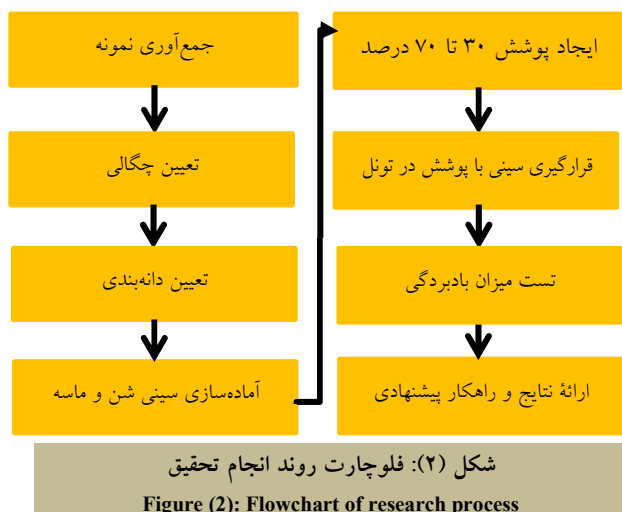
طی شبیه‌سازی عددی محققان دریافتند که متوسط سرعت اصطکاکی با افزایش تعداد ذرات غیر فرسایشی کاهش می‌یابد و میزان گردوغبار انتشاریافته نیز وابسته به‌سرعت اصطکاکی است (تورپین^۴ و همکاران، ۲۰۱۰).

محققان دیگری نیز بیان کردند که ذرات غیرقابل فرسایش تأثیر قوی در پدیده فرسایش بادی دارند. از یک مدل مستطیلی گوه‌ای شکل از ذرات شن و ماسه برای انجام آزمایش در تونل باد استفاده کردند، درحالی‌که دیگر کارهای مشابه تحقیقات تجربی بر روی یک سطح صاف از ذرات شن را انجام داده‌اند. شرایط مورد آزمایش شامل دو مقدار متفاوت از ذرات غیر فرسایشی ۱۰ و ۲۰٪ و در سه سرعت باد ۶، ۷ و ۸ متر بر ثانیه برای توزیع ذرات با قطر متوسط ۱۲۵ میکرومتر و ۸۵۰ میکرومتر بود که نتایج نشان داد بیشترین مقدار فرسایش مربوط به بالاترین سرعت باد و کمترین نرخ پوشش از ذرات غیر فرسایشی است. کاهش میزان فرسایش برحسب زمان برای ذرات خارج‌شده از بستر برای حالتی است که ذرات غیر فرسایشی زیاد و سرعت باد بالاست بیشتر است (فیوری^۵ و همکاران، ۲۰۱۳).

به‌عنوان جمع‌بندی می‌توان گفت کارهای متعددی در حال حاضر به کمک آزمایش تونل باد برای یک سطح مسطح، سینوسی یا مخروطی برای بررسی تأثیر حضور ذرات غیر فرسایشی بر روی انتشار ذرات فرسایشی در فضا انجام شده است و در پاره‌ای از موارد نیز به موضوع پوشش‌های سنگ‌ریزه‌ای و میزان اثربخشی آن پرداخته شده است (تان^۶ و

1. Li and Martz
2. McKenna
3. Descamps
4. Turpin
5. Furieri
6. Tan

7. Liu
8. ASTM D854-02



شکل (۳): نمای از دستگاه تونل باد محیط‌زیست و تجهیزات اندازه‌گیری مورد استفاده در آن

Figure (3): an overview of the environmental wind tunnel apparatus and measuring equipment used

ثانیه مطابق (شکل ۳- الف) استفاده شد و به منظور ثبت داده‌ها در کامپیوتر دیتالاگر آنالوگ به دیجیتال^۱ مطابق (شکل ۳- ب) برای انتقال اطلاعات به کامپیوتر و نرم‌افزار Flow Rake جهت نمایش سرعت ثبت‌شده فشارسنج الکترونیکی مورد استفاده قرار گرفت. همچنین به منظور ایجاد زبری سطح در داخل تونل باد و ایجاد پروفیل لگاریتمی جریان باد ورودی مشابه با شرایط عرصه نیز المان‌های هرمی و

الف. تونل باد و تجهیزات مورد استفاده

به منظور تعیین میزان بادبردگی ذرات شن و ماسه از تونل باد موجود در مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور با ۸ اتاق آزمون هریک به طول ۲ متر و ابعاد مقطع ۸۰×۸۰ سانتی‌متر دارای چهار موتور الکتریکی هرکدام با قدرت ۱۶ کیلووات و دارای یک عدد پیتوت و یک عدد فشارسنج الکترونیکی و دستگاه کنترل سرعت با استفاده از کنترل دور موتور به منظور تنظیم سرعت باد از حداقل ۰/۵ تا ۴۰ متر بر

1. Data logger (A/D)

طبق استاندارد حتماً الک شماره ۰۰۴# و شماره ۲۰۰# جهت آزمایش در بین الک‌ها می‌بایست موجود باشد، نمونه الک‌های موجود در آزمایشگاه مطابق (شکل ۵-الف) است، دستگاه لرزاننده برای تکان دادن الک‌ها به منظور تفکیک قطرهای مختلف ذرات مطابق (شکل ۵-ت) به مدت حداقل ۱۵ دقیقه می‌بایست مورد استفاده قرار گیرد. همچنین ترازو با دقت حداقلی ۰/۱ گرم مطابق (شکل ۵-ب) نیز برای توزین ذرات با قطرهای مختلف مورد نیاز است. با توجه به استاندارد آشتو برای ذرات ریزدانه مانند شن و ماسه حداقل مقدار نمونه برای الک کردن ۳۰۰ گرم ذکر شده است و نمونه مذکور قبل از شروع آزمایش می‌بایست در دمای 110 ± 5 درجه سانتی‌گراد در داخل گرمخانه مطابق (شکل ۵-پ) طی سه مرحله خشک گردد. مقادیر وزن نمونه‌ها در هر مرحله خشک کردن مطابق (شکل ۶-الف) ثبت شود تا زمانی که نمونه دیگر تغییر وزن نداشته باشد که در این مرحله نمونه خشک حاصل شده است. سپس از الک‌های شماره ۴، ۱۶، ۱۸، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵، ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۱۰۰، ۱۷۰، ۲۰۰، ۲۳۰ و ۳۲۵ به همراه پن زیر الکی جهت الک کردن نمونه به کمک لرزاننده مطابق (شکل ۵-ت) استفاده شده است.



الف) صفحه آماده‌شده هرمی‌ها و المان‌های زبری
A) Prepared plate of pyramids and rough elements



ب) نمایی از المان‌های زبری نصب‌شده داخل تونل باد
B) A view of the rough elements mounted in the wind tunnel

شکل (۴): المان‌های زبری و هرمی‌های مورد استفاده داخل تونل باد

محیط زیست

Figure (4): Roughness elements and pyramids used in the wind environment tunnel

مکعب‌های زبری مطابق (شکل ۴) و با توجه به نتایج (ایروین^۱، ۱۹۸۱) در ابتدای تونل باد قرار داده شد.

ب. دانه‌بندی

به منظور نمونه‌برداری یکی از بحرانی‌ترین مناطق ماسه‌گیر شرق ایران یعنی بلاک ریلی منتظر قائم- تل حمید به طول ۱۶ کیلومتر در فاصله‌های ۲۰۹، ۲۱۳، ۲۱۷، ۲۲۲ و ۲۲۳/۷ کیلومتری از ایستگاه راه‌آهن بافق برای نمونه‌برداری انتخاب شد. با توجه به استاندارد آشتو ۲۷^۲ برای نمونه‌برداری به صورت تصادفی در مورد ذرات ریزدانه می‌بایست حداقل ۵۰۰ گرم نمونه برای دانه‌بندی از هر محل جمع‌آوری گردد که در تحقیق پیش رو ۴ نمونه از فاصله‌های ۲۰۹، ۲۱۳، ۲۱۷، ۲۲۲ و ۲۲۳/۷ کیلومتری در ناحیه طبس جمع‌آوری شده است. ذرات شن و ماسه که ذراتی جامد هستند، می‌بایست برای تفکیک شدن و تعیین مقادیر جرم ذرات با قطرهای مختلف بر طبق استانداردهای موجود الک شوند که با توجه به اهمیت این موضوع استاندارد آمریکایی آشتو ۲۷ به منظور دانه‌بندی ذرات خاک تدوین شده است که در ایران نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. استاندارد آشتو ۲۷ در مورد دانه‌بندی ذرات ریزدانه و درشت دانه خاک مورد استفاده قرار می‌گیرد و با توجه به اینکه ذرات شن و ماسه دارای ابعاد میکرومتری هستند، می‌بایست با توجه به موارد مطرح‌شده برای ذرات ریزدانه در این استاندارد الک شوند. به منظور دانه‌بندی در ابتدا نمونه جمع‌آوری‌شده در آزمایشگاه خاک دانشکده راه‌آهن دانشگاه علم و صنعت ایران شماره‌گذاری گردید و تجهیزات مختلف طبق استاندارد مانند الک‌هایی با اندازه استاندارد که به صورت شماره‌گذاری‌شده در ابعاد چشمه‌های الک مختلف موجود است آماده شد، به عنوان نمونه ذرات بزرگ‌تر از ۴۷۶۰ میکرومتر بر روی الک شماره ۰۰۴# (# مشخص‌کننده آن است که عدد بعد آن شماره الک است نه اندازه سوراخ‌های الک) باقی می‌مانند و ذراتی که از ۴۷۶۰ میکرومتر کوچک‌تر هستند از الک شماره ۰۰۴# عبور کرده و بر روی الک‌های کوچک‌تر با شماره ۰۰۵# به بعد انباشت خواهند شد. همچنین

1. Irwin
2. ASHTO T27

پس از اتمام مراحل الک شدن نمونه های باقی مانده بر روی هر الک توسط ترازو وزن گردیده و برای جلوگیری از نفوذ رطوبت به داخل نمونه، هریک از نمونه ها در کیسه های پلاستیکی شماره گذاری شده مطابق (شکل ۶-ب) برای هر آزمایش ریخته شده است که الک شماره ۰۰۴# خالی و همه ذرات عبوری بوده اند. در انتها گراف دانه بندی برای نمونه شماره ۱ تا ۴ که جرم کل نمونه ها به ترتیب برابر ۰۲/۱۷۴، ۰۳/۵۴، ۰۳۴/۳۹، ۰۳/۵۴ گرم است، مطابق (شکل ۷-الف) می باشد. همان طور که در (شکل ۷-الف) مشاهده می شود، بیشترین درصد جرمی مربوط به الک شماره ۱۰۰ است که نشان می دهد بیشترین قطر ذرات در بازه عددی ۱۴۹ تا ۲۵۰ میکرومتر قرار دارند و پس از آن بیشترین درصد جرمی ذرات مربوط به الک شماره ۱۷۰ است که شامل ذرات

با قطر ۸۸ تا ۱۴۹ میکرومتر می شود (سرافرازی و طلائی، ۲۰۱۹) با توجه به اینکه در تمامی ۴ نقطه نمونه برداری در منطقه ریلی ناحیه شرق بلاک ریلی منتظر قائم- تل حمید مطابق نمودارهای حاصل از دانه بندی درصد وزنی ذرات باقی مانده بر روی هریک از الک های استفاده شده مقادیری مشابه دارند، با استفاده از روش میانگین گیری و مطابق (شکل ۷-ب) یک نمودار واحد برای درصد وزنی ذرات ناحیه ریلی شرق ارائه شده است که داده های حاصل نشان می دهد که متوسط قطر ذرات شن و ماسه در منطقه مذکور برابر ۲۸۸ میکرومتر می باشد و در ادامه نتایج مربوط به میزان بادبردگی برای ذرات شن و ماسه با متوسط قطر مذکور مورد ارزیابی قرار گرفته است.



ب) ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۱ گرم برای توزین ذرات
B) weighing scale with accuracy of 0/01 g for weighing particles



الف) الک های استاندارد مورد استفاده در آزمایشگاه برای عملیات دانه بندی
A) standard sieve used in the laboratory for sieving operations



د) دستگاه لرزاندنده مورد استفاده برای عملیات الک کردن ذرات
D) the vibrating device used for particle sieving operations



پ) گرمخانه مورد استفاده برای رطوبت زدایی از نمونه مورد آزمایش
C) oven used for dehumidification of the test sample

شکل (۵): تجهیزات آزمایشگاهی مورد استفاده برای دانه بندی نمونه

Figure (5): Laboratory Equipment Used for Sample grading



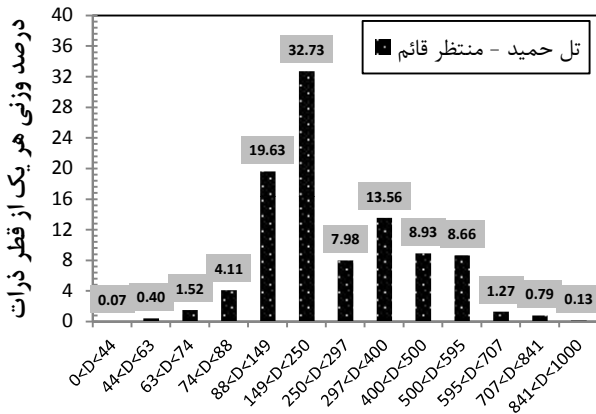
ب) نمونه های الک شده ۱ از ذرات در داخل کیسه پلاستیکی
B) graded sample of particles in a plastic bag



الف) نمونه خشک شده داخل گرم کن در حال توزین بر روی ترازوی دیجیتال
A) dried sample inside the oven weighing on digital scale

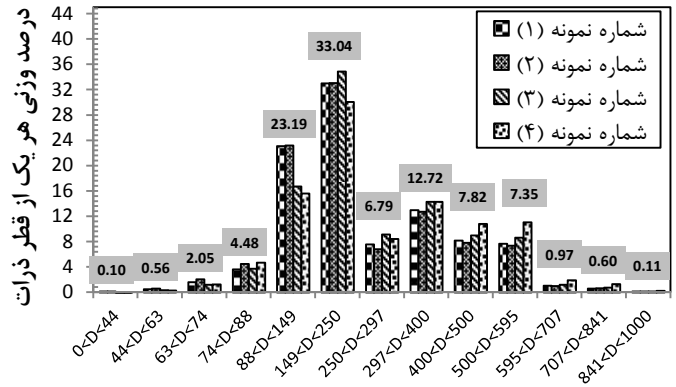
شکل (۶): فرایند خشک کردن و دسته بندی آزمایشگاهی برای نگهداری نمونه

Figure (6): Drying process and laboratory classification for sample storage



ب) درصد جرمی قطر ذرات مختلف شن و ماسه منطقه تل حمید (طیس)

B) mass percentage of different sand particles in Tale Hamid area (Tabas)



الف) درصد جرمی قطر ذرات در نمونه‌های برداشت‌شده مختلف

A) mass percentage of the particle diameter in various samples collected

شکل (۷): درصد جرمی قطر ذرات مختلف شن و ماسه در ناحیه کویری شرق ایران (سرافرازی و طلائی، ۲۰۱۹)

Figure (7): Mass percent of different diameter of sand particles in the Iran Eastern Desert (sarafrazi and Talaei, 2019)

ج. بادبردگی

۹- الف) پر شد و تحت سرعت‌های مختلف ۹/۹، ۱۲/۴، ۱۷/۲ و ۲۲ متر بر ثانیه میزان بادبردگی ذرات شن و ماسه ۳ مرتبه اندازه‌گیری شد. سپس سینی‌های شن و ماسه با پوشش سنگریزه‌ای ۳۰-۵۰٪ مطابق شکل (۹-ب) تا شکل (۹-ت) آماده شد و در سرعت‌های باد ۱۰/۵، ۱۵/۷ و ۲۲/۹ متر بر ثانیه میزان باد بردگی ذرات شن و ماسه مجدداً اندازه‌گیری گردید تا میزان تأثیر حضور پوشش سنگریزه بر باد بردگی شن و ماسه مشخص گردد.

در این مرحله، نمونه‌های جمع‌آوری شده از بلاک ریلی منتظر قائم- تل حمید در داخل سینی‌های فلزی برای قرارگیری در داخل تونل باد آماده‌سازی شدند. در ابتدا قبل از انجام آزمایش دما و رطوبت ذرات شن و ماسه موجود در سینی به ترتیب مطابق شکل (۸-الف) و (شکل ۸-ب) برابر با ۹/۶ درجه سانتی‌گراد و ۱/۱۶٪ اندازه‌گیری شد. سپس به منظور تعیین سرعت آستانه خزشی ذرات شن و ماسه ابتدا یک سینی به عنوان شاخص از ذرات شن و ماسه به صورت (شکل



ب) اندازه‌گیری رطوبت سینی نمونه ذرات شن و ماسه با رطوبت‌سنج

B) measuring moisture of sand particles with using a moisture meter



الف) اندازه‌گیری دمای سینی نمونه ذرات شن و ماسه به کمک دماسنج

A) measuring temperature of sand particles with using a thermometer

شکل (۸): اندازه‌گیری دما و رطوبت سینی‌های پر شده از ذرات شن و ماسه و پوشش سنگریزه‌ای

Figure (8): temperature and humidity measurement of sand particles with gravel cover



ب) سینی نمونه با پوشش سنگریزه ۳۰٪

B) the sample tray with gravel cover 30%



الف) سینی نمونه شاخص (بدون پوشش سنگریزه)

A) the sample tray (uncovered gravel)



ت) سینی نمونه با پوشش سنگریزه ۷۵٪
D) the sample tray with gravel cover 75%



پ) سینی نمونه با پوشش سنگریزه ۵۰٪
C) the sample tray with gravel cover 50%

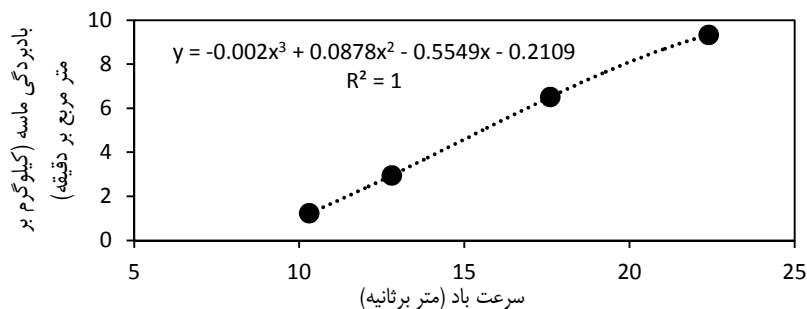
شکل (۹): سینی نمونه‌های آزمایشگاهی مورد استفاده با درصد‌های مختلف پوشش سنگریزه‌ای
Figure (9): laboratory tray samples prepared with different percentages of gravel cover

می‌کند. در سرعت‌های بالای باد و بیشتر از ۲۰ متر بر ثانیه با افزایش درصد پوشش سنگریزه میزان فرسایش بادی به صورت توانی کاهش نشان داد و بیشترین تأثیر در کاهش فرسایش بادی مربوط به پوشش ۷۵٪ سنگریزه بود (شکل ۱۱)؛ به طوری که بیشترین تأثیر در کاهش مقدار فرسایش بادی در سرعت ۲۲/۹ متر بر ثانیه مربوط به پوشش ۷۵٪ سنگریزه و برابر ۶۷/۵٪ کاهش در میزان بادبردگی بود. این موضوع برای داده‌های با سرعت حدود ۱۶ متر بر ثانیه نتیجه متفاوتی نشان داد. در این شرایط کارایی پوشش ۵۰ و ۷۵٪ به هم نزدیک بوده و تقریباً نتیجه یکسانی در بر داشت. از این رو در این گونه مناطق با توجه به هدف مورد نظر پوشش بیشتر از ۵۰٪، فقط هزینه کار را بیشتر کرده ولی در نتیجه کار تأثیر قابل توجهی نخواهد داشت. نتایج تجزیه واریانس و مقایسه میانگین‌ها به روش دانکن برای داده‌های مورد بررسی نیز نشان داد که بین تیمار پوشش ۵۰ و ۷۵٪ اختلاف معنی‌داری وجود ندارد اما این اختلاف بین پوشش ۳۰٪ با بقیه تیمارها معنی‌دار است (جدول ۱ و ۲). البته در عملیات مقابله با فرسایش بادی، هدف و میزان کاهش فرسایش قابل قبول و مورد انتظار، از شروط اساسی کار است که ممکن است نتایج را تحت تأثیر قرار دهد.

نتایج

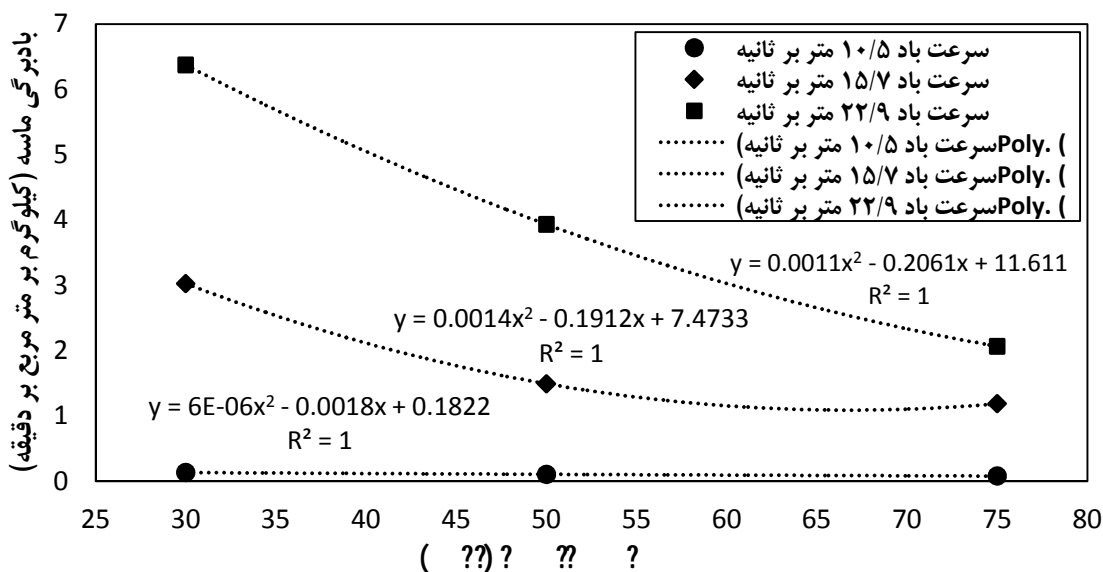
بررسی سرعت آستانه فرسایش بادی برای نمونه‌های ماسه‌بادی منطقه مورد مطالعه در تونل باد نشان داد که باد بردگی ذرات به صورت خزشی از سرعت ۶/۹ متر بر ثانیه برای ذرات بسیار ریز آغاز و در سرعت‌های بیشتر از ۱۰ متر بر ثانیه جابه‌جایی ذرات درشت‌تر نیز صورت می‌گیرد؛ بنابراین سرعت خزشی آستانه ذرات شن و ماسه ترکیب مذکور برابر ۶/۹ متر بر ثانیه تعیین شد. همچنین بررسی سینی شاخص تحت سرعت‌های مختلف ۹/۹، ۱۲/۴، ۱۷/۲ و ۲۲ متر بر ثانیه در داخل تونل باد و در مدت ۵ دقیقه نشان داد (شکل ۱۰) میزان بادبردگی با افزایش سرعت باد به صورت توانی افزایش می‌یابد.

در مرحله بعد، سینی‌های شن و ماسه به ترتیب با پوشش سنگریزه‌ای ۳۰، ۵۰ و ۷۵ درصد در سرعت‌های باد ۱۰/۵، ۱۵/۷ و ۲۲/۹ متر بر ثانیه نیز به مدت ۵ دقیقه در داخل تونل باد قرار داده شد و میزان باد بردگی آن‌ها تعیین گردید (شکل ۱۱). نتایج نشان داد که در نمونه‌های مورد مطالعه برای سرعت‌های باد تا ۱۰ متر بر ثانیه تفاوتی بین پوشش‌های مورد نظر از جنبه میزان فرسایش وجود ندارد. بنابراین در صورت ضرورت به پوشش‌دهی سنگریزه، تراکم ۳۰ درصدی برای این کار کفایت



شکل (۱۰): نمودار بادبردگی سینی شن و ماسه شاخص در سرعت‌های مختلف تونل باد محیط زیست

Figure (10): sand transport of sample at different wind speeds



شکل (۱۱): نمودار بادبردگی سینی شن و ماسه با پوشش سطحی سنگریزه مختلف

Figure (11): sand transport with different gravel cover

هرچه بیشتر ضرورت معرفی و کاربست ترکیبات مناسب و سازگار با طبیعت در عین کارایی بیشتر احساس شود. از سوی دیگر روش های دیگری نظیر استفاده از سازه های فیزیکی مثل ایجاد دیوارهای حائل (سرافرازی و طلائی، ۲۰۲۰) از مواد ساختمانی و سرشاخه ها و همچنین استفاده از مواد مصنوعی نیز در برخی از پروژه ها مورد استفاده قرار گرفته است ولی محدودیت منابع تولید این مواد و هزینه بالای آن ها نیز یکی از مشکلات اساسی اجرای این نوع طرح ها بوده است. به همین دلیل، تثبیت ماسه های روان و جلوگیری از حرکت آن ها با روش های زیست سازگار و کم هزینه در کشور ما اهمیت فوق العاده ای دارد تا از این طریق شرایط تثبیت دائمی آن ها برای مناطقی که امکان استفاده از سایر روش ها فیزیکی و بیولوژیکی وجود ندارد، فراهم شود.

یکی از روش هایی که بیشترین قرابت و سازگاری با طبیعت را دارد، ریگ پاشی کانون های فرسایش بادی به ویژه اراضی رسی نمکی حساس به فرسایش بادی است. حساسیت نسبتاً زیاد این کانون ها به دلایل مختلف ادا فیکسی و اقلیمی و همچنین عدم امکان تثبیت و کنترل آن ها به روش های معمول کشت گونه های گیاهی به دلیل محدودیت های فیزیکی و شیمیایی خاک میسر نیست. در این تحقیق، بررسی میزان تراکم و تأثیر نمونه ای از پوشش غیر فرساینده یا به عبارت دیگر سنگریزه ای بر روی

جدول (۱): نتایج تجزیه واریانس برای سه پوشش مورد بررسی

Table (1): Analysis of variance results for the three coatings

منبع	DF	SS	MS	F
رفتار	۲	۴۶۳۶/۱	۲۳۱۸	۱۱/۹۵
خطا	۲۴	۴۶۵۳/۹	۱۹۳/۹	--
مجموع	۲۶	۹۲۹۰	--	--

جدول (۲): مقایسه میانگین ها به روش دانکن

Table (2): Comparison of averages by Duncan method

تیمارهای پوشش دهی (%)	اثر کاهشی پوشش سنگریزه
۳۰	۳۱/۳۴b
۵۰	۵۶/۳۸a
۷۵	۶۱/۲۵a

b = اختلاف معنی دار در سطح ۱٪، a = نبود اختلاف معنی دار

بحث و نتیجه گیری

اکثر مطالعات و فعالیت های اجرایی مقابله با فرسایش بادی و تثبیت ماسه های روان در ایران و جهان مبتنی بر تثبیت موقت آن ها به منظور استقرار گیاه بوده است. در گذشته برای تثبیت سطوح وسیع ماسه زارها و مهار کانون های بحرانی فرسایش بادی اغلب از خاک پوش (مالچ) های نفتی استفاده شده است؛ روشی که البته آنچنان با محیط زیست سازگار نبوده و خود مشکلاتی را بر طبیعت تحمیل می کرد؛ واقعیتی که سبب شد تا

میزان باد بردگی و فرسایش بادی ذرات شن و ماسه در سرعت‌های مختلف باد به کمک تست تجربی تونل باد بررسی شد. از آنجا که میزان کاهش فرسایش بادی به دو عامل درصد تراکم و سرعت باد بستگی دارد؛ به عبارت دیگر سرعت و قدرت باد نقش بسزایی در تعیین تراکم و درصد پوشش سنگ‌ریزه‌ای دارد، از این رو تراکم پوشش سنگ‌ریزه‌ای در سه سرعت فرساینده باد کم، متوسط و زیاد آزمون شد. نتایج این تحقیق نشان داد که نمونه‌های دارای پوشش سنگ‌ریزه‌ای توانستند سبب کاهش فرسایش بادی ذرات شن و ماسه گردند. بررسی سه پوشش مورد نظر در سه سرعت تعیین شده نشان داد که برای سرعت‌های باد تا ۱۰ متر بر ثانیه تفاوتی بین پوشش‌های مورد نظر از جنبه میزان فرسایش وجود ندارد. حتی با پذیرش میزان فرسایش در دامنه‌ای قابل قبول و در صورت تداوم کمتر چنین بادهایی نیازی به عملیات مقابله با فرسایش در سرعت‌های کمتر از ۱۰ متر بر ثانیه نیست. چنانچه تداوم بادهایی با چنین سرعتی در منطقه مذکور زیاد باشد، پوشش‌دهی سنگ‌ریزه با تراکم ۳۰ درصد برای این کار کفایت می‌کند و نیازی به تراکم‌های بیشتر نیست؛ زیرا پوشش بیشتر از ۳۰٪، فقط هزینه کار را بیشتر می‌کند. در سرعت‌های بالای باد و بیشتر از ۲۰ متر بر ثانیه با افزایش درصد پوشش سنگ‌ریزه میزان فرسایش بادی به صورت توانی کاهش نشان داد و بیشترین تأثیر در کاهش فرسایش بادی مربوط به پوشش ۷۵٪ سنگ‌ریزه بود؛ بنابراین در چنین سرعت‌هایی از بادهای منطقه لزوماً از پوشش‌های ۷۵٪ و بیشتر باید استفاده شود.

همچنین نتایج بررسی بادهای با سرعت حدود ۱۶ متر بر ثانیه نشان داد که کارایی پوشش ۵۰ و ۷۵٪ تقریباً نتیجه یکسانی در بر دارد؛ به طوری که میزان فرسایش نسبت به شاهد و در دو پوشش فوق به ترتیب ۷۱٪ و ۷۷٪ کاهش یافت این در حالی است که میزان کاهش فرسایش در پوشش ۲۵ درصد نسبت به شاهد ۴۲٪ بوده است؛ بنابراین با توجه به تفاوت اندک دو پوشش سنگ‌ریزه‌ای مورد نظر و جلوگیری از هزینه‌های بیشتر، پوشش ۵۰٪ هدف مورد نظر را تأمین می‌کند. پوشش بیشتر فقط هزینه کار را بیشتر کرده ولی در نتیجه کار تأثیر قابل توجهی نخواهد داشت. لئو و همکاران (۲۰۱۱) نیز

اثر پوشش‌های سنگ‌ریزه‌ای را در بیابان گبی (شمال غرب چین) به وسیله تونل باد و در عرصه بررسی کردند. بر اساس نتایج آن‌ها مقدار ۳۰٪ پوشش سنگ‌ریزه‌ای برای فرسایش بادی در منطقه مذکور پیشنهاد شده است. این در حالی است که مطالعات زانک و همکاران (۲۰۱۵) نشان داد پوشش ۴۰٪ سنگ‌ریزه توانست فرسایش ماسه‌های روان را تا ۶۲٪ کاهش دهد. بر اساس تحقیقات انجام‌شده در بیابان‌های چین، پوشش سنگ‌ریزه‌ای از طریق به دام انداختن ذرات ماسه و همچنین کاهش سرعت باد در سطح ماسه‌ها به خوبی می‌تواند سطوح فرسایشی ماسه را در مقابل باد حفاظت کند. تحقیق حاضر نیز نشان داد که در سرعت ۲۲/۹ متر بر ثانیه با پوشش ۷۵٪ سنگ‌ریزه میزان باد بردگی ۶۷/۵٪ کاهش یافته است. از این رو استفاده از پوشش‌های غیر فرساینده در دسترس مانند ریگ‌پاشی در سطح وسیع در بیابان‌های غیرقابل احیا و مناطق کویری می‌تواند یکی از روش‌های کاربردی برای جلوگیری از حرکت ماسه‌های روان و گردوغبار باشد و از مخاطرات پخش شدن ذرات شن و ماسه در طوفان‌های شن و گردوغبار و تحت‌تأثیر قراردادن زندگی روزمره انسان‌ها، تخریب محیط‌زیست، پر شدن مسیرهای حمل‌ونقل جاده‌ای و ریلی و تصادفات و هزینه‌های گزاف تعمیر و نگهداری مربوط به آن جلوگیری مؤثری نماید؛ بنابراین برای کاهش اثرات طوفان‌های ماسه‌ای در ایران و تثبیت گردوغبار ناشی از آن‌ها، می‌توان پاشیدن مواد غیر فرسایشی مانند پوشش‌های سنگ‌ریزه و یا ریگ را به جای مالچ پیشنهاد کرد این کار می‌تواند مانند ریگزارهای طبیعی بیابان‌ها (Reg) ذرات خاک را به‌طور قابل توجهی از فرسایش بادی مصون دارد. گذشته از آن در مناطق ریگ‌پاشی، چون نیازی به عملیات بیولوژیکی نیست، آبی مصرف نمی‌شود و نیاز به حفاظت و قرق نیز ندارد. برای مثال از یزد تا بافق و از نائین تا انارک، دشت‌ها ریگی هستند و شدیدترین باد و باران نمی‌تواند در آن فرسایشی ایجاد کند. از مزایای دیگر ریگ آن است که ارزان به دست آمده و در اکثر مناطق بیابانی وجود دارد و اثر سوئی هم برای محیط‌زیست ندارد.

1. Abu-Zreig, M., Al-Sharif, M. and Amayreh, J., 2007. Erosion control of arid land in Jordan with two anionic polyacrylamides. *Arid land research management*. 21: 315-328.
2. Asl-Soleimani, E., Farhangi, S., and Zabihi, M., "The Effect of Tilt Angle, air Pollution on Performance of Photovoltaic Systems in Tehran", *Renewable Energy*, Vol. 24, pp.459-68, 2001.
3. Descamps, I., Harion, J.-L. and Baudoin, B., 2005. Taking-off model of particles with a wide size distribution. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, vol. 44, pp159-166.
4. Epelde, L., Burges, A., Mijangos, I. and Garbisu, C., 2013. Microbial properties and attributes of ecological relevance for soil quality monitoring during a chemical stabilization field study. *Applied Soil Ecology*. 75: 1-12.
5. Fattah, M.Y., Joni, H.H. and Al-Dulaimy, A., 2016. Strength characteristics of dune sand stabilized with lime-silica fume mix. *International Journal of Pavement Engineering*, doi:10.1080/10298436.2016.1215687.
6. Furieri, B., Russeil, S., Santos, J. and Harion, J., 2013. Effects of non-erodible particles on aeolian erosion: Wind-tunnel simulations of a sand oblong storage pile. *Atmospheric environment*, vol. 79, pp. 672-680.
7. Goodrich, B.A. and Jacobi, W.R., 2012. Foliar Damage, Ion Content, and Mortality Rate of Five Common Roadside Tree Species Treated with Soil Applications of Magnesium Chloride. *Water Air Soil Pollutant*. 223:847-862.
8. Han, Z., Wang, T., Dong, Y., Hu, Z. and Yao, Z., 2007. Chemical stabilization of mobile dune fields along a highway in the Taklimakan Desert of China. *Journal of Arid Environments*. 68: 260-270.
9. Irwin, H.P.A.H., (1981). "The design of spires for wind stimulation". *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn*. 7, 361-366.
10. Liu, B., Zhang, W., Qu, J., Zhang, K. and Han, Q., 2011. Controlling windblown sand problems by an artificial gravel surface: a case study over the gobi surface of the Mogao Grottoes. *Geomorphology*, 134(3-4), 461-469.
11. Li, L. and Martz, L.W., 1995. Aerodynamic dislodgement of multiple-size sand grains over time. *Sedimentology*, vol. 42, pp. 683-694.
12. McKenna Neuman, C., "A review of aeolian transport processes in cold environments," *Progress in physical Geography*, vol. 17, pp. 137-155, 1993.
13. Prats, S.A., Martins, M.A.D.S., Malvar, M. C., Ben, M. and Keizer, J.J., 2014. Polyacrylamide application versus forest residue mulching for reducing post-fire runoff and soil erosion. *Science of the total environment*. 468-469: 464-474.
14. Tavili, A., 2012. Study design and construction of biological protection belt for stabilization of sand transport in Tale-Hamid region (Tabas), Proposal report, in Persian.
15. Saadoud, D., Hassani, M., Martin Peinado, F.J. and Guettouche, M.S., 2018. Application of fuzzy logic approach for wind erosion hazard mapping in Laghouat region (Algeria) using remote sensing and GIS. *Aeolian Research*, 32: 24-34.
16. Sarafrazi, V. and Talaei, M.R., 2019. Numerical simulation of sand transfer in wind storm using the Eulerian-Lagrangian two-phase flow model. *The European Physical Journal E*, 42(4), p.45.
17. Sarafrazi, V. and Talaei, M.R., 2020. Simulation of wall barrier properties along a railway track during a sandstorm. *Aeolian Research*, 46, p.100626.
18. Stabnikov, V., Chu, J., Naing Myo, A. and Ivanov, V., 2013. Immobilization of sand dust and associated pollutants using bio aggregation. *Water Air Soil Pollutant*. 224:1631-1639.
19. Standard, A., 2005. T27: Standard Method of Test for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. *Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing*.
20. Tan, L., Zhang, W., Liu, B., An, Z. and Li, J., 2013. Simulation of wind velocity reduction effect of gravel beds in a mobile wind tunnel atop the Mogao Grottoes of Dunhuang, China. *Engineering geology*, 159, 67-75.
21. Tisdall, J.M., Nelson, S.M., Wilkinson, K. G., Smith, S.E. and McKenzie, B.M., 2012. Stabilization of soil against wind erosion by six saprotrophic fungi. *Soil Biology & Biochemistry*. 50:134-141.
22. Turpin, C., Badr, T. and Harion, J.L., 2010. Numerical modelling of aeolian erosion over

- rough surfaces, *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 35, pp.1418-1429.
23. Zhang, Y.M., Wang, H.L., Wang, X.Q., Yang, W.K. and Zhang, D.Y., 2005. The microstructure of micro biotic crust and its influence on wind erosion for a sandy soil surface in the Gurbantunggut Desert of Northwestern China, *Geoderma* 132: 441–449.
24. Zhang, K., Zhang, W., Tan, L., An, Z. and Zhang, H. (2015), Effects of gravel mulch on aeolian transport: a field wind tunnel simulation, *Journal of Arid Land*, 7(3), 296-303.
25. Zhang, C., Wang, X., Zou, X., Tian, J., Liu, B., Li, J., Kang, L., Chen, H. and Wu, Y., 2018. Estimation of surface shear strength of undisturbed soils in the eastern part of northern China's wind erosion area. *Soil & Tillage Research*. 178: 1–10.

Wind Tunnel Experimental Investigation of the Effect of Using Non-Erodible Coatings on Sand Transport Rate of Talle-Hamid Desert Area

Vahid Sarafrazi¹, Leila Kashi Zenouzi², Mohammad Khosroshahi^{3*}

Received: 09/12/2019

Accepted: 06/08/2020

Expanded abstracts

Introduction: Due to the detrimental consequences of the application of stabilizers such as mulch and other protectives on the soil surface, including the wafting of bad smell, blackening of the ground, increasing thermal coefficient, warming of the whole area, and even destruction of plants and their unsustainability in nature, wide use of such stabilizers could not be considered as a useful solution to control wind erosion. Therefore, to solve the problem of sandstorms in Iran and get the deserts' soil stabilized, this study proposes that deserts be coated with non-erodible materials (e.g., gravel, sandblasting, etc.)

Materials & Methods: Based on the purpose of this study, the effect of gravel cover with 30%, 50%, and 75% coverage on the sandblasting rate of MontazerQaem -TaleHamid desert was investigated using the wind tunnel. To investigate the effect of different gravel coatings on the sand particle transport rate, first, a sand sample was gathered from the Talle-Hamid area in Tabas, located 209 km off the Bafgh Railway, at 55/89 latitude and 32/93 longitude degrees, respectively, and the particle density of sand particles size was measured using standard ASTM D854-02. Its amount was found to be 2724 kg/m³. In the next stages, dry aggregation of sand particle size was first extracted from different parts of the MontazerQaem-Talle-Hamid track. According to the ASHTO T27 standard, at least 500 gr random fine sample particles should be collected from each site to sieve. Four samples were collected from sites that were 209, 213, 217, 222, and 222.7 km off Tabas. Having enumerated Standard-sized sieved particles, we used a vibrating machine to shake different particle diameters for at least 15 minutes. Furthermore, scales with a minimum accuracy of 0.01gr were used to weigh particles of different diameters. According to the standard of reconstitution for fine particles such as sand, the minimum sample size for sieving is 300gr, and the sample should be dried at 110 ° C in a three-stage oven. Then, these particles' transportation rate was measured at different wind speeds for uncovered gravel samples.

Results & Discussion: Initially, by increasing the wind speed from 1 m/s to 8 m/s, it was found that the particle's creeping movement started at 6.9 m/s and its creeping speed was 6.9 m/s. The index sample was then placed in the wind tunnel for 5 minutes at different speeds of 9.9, 12.4, 17.2, and 22 m/s, and sand particle transportation was determined. It was also found that wind erosion increased by increasing wind speed polynomials. Subsequently, sands with 30-50% and 75% gravel cover were inserted into the wind tunnel for 5 minutes at wind speeds of 10.5, 15.7, and 22.9 m/s. Having determined the rate of wind erosion, we observed that the wind erosion rate decreased with an increasing percentage of gravel cover at a certain speed. We also found that the greatest effect on decreasing wind erosion rate occurred at wind speed 22.9 m/s, with the

1. PhD Candidate, School of Railway Engineering, Iran University of Science & Technology

2. Research Expert, Desert Research Division, Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO)

3. Associate Professor, Desert Research Division, Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Corresponding author; khosro@rrfi-ac.ir

DOI: 10.22052/deej.2020.9.28.31

reduction percentage of erosion being 67.5%. The study results showed that the wind erosion rate decreased with an increasing rate of gravel cover at a certain speed, and the highest effect of gravel on reducing wind erosion was reported for gravel cover of 75%. Therefore, covering the surface of a sandy desert with non-corrosive materials such as sand or gravel could be a practical solution for preventing wind erosion.

Conclusion: The effects of non-erodible coating or gravel on the rate of sand particle erosion were investigated via the wind tunnel, the results of which showed that the samples with gravel cover were effective in reducing wind erosion of sand particles. The greatest reduction in wind erosion rate was reported for the sites covered by 75% gravel. According to research conducted in the Chinese deserts, gravel cover with eroding sand particles and reducing wind velocity at the sand surface could well improve erosive sand levels. The present study also showed that at 22.9 m/s wind speed and 75% gravel cover, the erosion rate decreased by 67.5%. Therefore, to reduce the effects of sandstorms in Iran and stabilize the sandy desert area, non-erodible coating such as gravel would be recommended instead of mulch.

Keywords: non-erodible materials, stabilization, dust, wind tunnel.