

ارزیابی کارایی نمونه‌گیر BSNE و ظرفیت انتقال‌پذیری ذرات رسوب حاصل از فرسایش بادی با استفاده از آزمایش تونل باد

حسین خیرآبادی^۱، مجید محمودآبادی^{۲*}، وحیدرضا جلالی^۳ و هرمزد نقوی^۴

- ۱- دانشجوی دکتری گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ایران
- ۲- دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ایران
- ۳- استادیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ایران
- ۴- استادیار پژوهش، بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کرمان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرمان، ایران

تاریخچه مقاله	چکیده
دریافت: ۱۳۹۶/۰۵/۱۲ پذیرش نهایی: ۱۳۹۶/۱۱/۰۵	
کلمات کلیدی: تونل باد، نمونه‌گیر BSNE، انتقال‌پذیری رسوب، توزیع اندازه ذرات، زبری سطح، فرسایش بادی.	پژوهش حاضر با هدف بررسی کارایی نمونه‌گیر BSNE در تله‌اندازی ذرات رسوب حاصل از اعمال سرعت‌های مختلف باد بر روی خاک‌های با توزیع اندازه ذرات متفاوت و همچنین معرفی پارامتری جدید با عنوان انتقال‌پذیری ذرات رسوب در ارتفاع‌های مختلف با استفاده از آزمایش تونل باد انجام شد. سه سرعت باد، شامل ۶، ۱۰ و ۱۴ متر بر ثانیه در ارتفاع ۴۰ سانتی‌متری بر روی سطحی به طول ۷ متر از سه نمونه خاک (با حداکثر اندازه ذرات ۲، ۴/۷۵ و ۸ میلی‌متر (D_{2mm} ، $D_{4.75mm}$ و D_{8mm}) ایجاد و رسوب تولیدی با استفاده از نمونه‌گیر BSNE در ارتفاع‌های ۱۰، ۳۰، ۵۰، ۷۰ سانتی‌متر جمع‌آوری شد. نتایج نشان داد با افزایش ارتفاع، مقدار رسوب انتقال یافته به صورت نمایی کاهش می‌یابد. با افزایش سرعت باد، مقدار رسوب تولیدی افزایش و با بزرگ‌تر شدن اندازه ذرات خاکدانه، مقدار آن کاهش یافت. شدت انتقال ذرات در نزدیک بستر برای خاک‌های D_{2mm} ، $D_{4.75mm}$ و D_{8mm} به ترتیب بین ۰/۲۸ تا ۲/۱۱، ۰/۱۹ تا ۱/۰۶ و ۰/۲۳ تا ۰/۶۵ گرم بر سانتی‌مترمربع در دقیقه متغیر بود. کارایی نمونه‌گیر رسوب بسته به سرعت‌های مختلف باد و اندازه ذرات متفاوت خاک، بین ۵۳ تا ۸۲ درصد نوسان داشت. همچنین مشخص گردید که با افزایش ارتفاع از سطح، میزان انتقال‌پذیری ذرات رسوب در واحد سرعت باد، به‌طور نمایی کاهش می‌یابد. یافته‌ها بیانگر این مطلب نیز بود که در بین کلاس‌های مختلف اندازه ذرات رسوب، برای نمونه‌گیرهای منتخب در دو ارتفاع ۱۰ و ۳۰ سانتی‌متر، ذرات در دامنه اندازه ۱۲۵ تا ۵۰۰ میکرون، بیش‌ترین انتخاب‌پذیری را دارند.
* عهده دار مکاتبات Email: mahmoodabadi@uk.ac.ir	

مقدمه

فرسایش بادی تهدیدی جدی برای محیط زیست و بقای بشر به ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک است. در واقع، فرسایش بادی پدیده‌ای است که در نتیجه وزش بادهای تند و تلاطم حاصل از آن بر سطح زمین هموار و عاری از پوشش رخ می‌دهد. این پدیده در زمین‌های با خاک حساس، لخت، خشک و صاف مشهودتر است (۳). به طور معمول، روش‌های متنوعی برای مطالعه و یا اندازه‌گیری فرسایش بادی استفاده می‌شود که هر یک در شرایط متفاوتی نظیر آزمایشگاه و یا صحرا کاربرد دارند (۲۶). با توجه به محدودیت‌های اندازه‌گیری فرسایش با استفاده از تله‌های رسوبگیر در شرایط صحرائی، مطالعه فرسایش با استفاده از آزمایش تونل باد مورد توجه ویژه‌ای قرار گرفته است (۲۱). آزمایش تونل باد امکان بررسی مکانیسم‌های فرسایش بادی و اندازه‌گیری شدت آن، هم در شرایط آزمایشگاهی و هم در شرایط صحرائی را فراهم می‌سازد (۳۴). با استفاده از تونل باد می‌توان به بررسی وضعیت فرسایش‌پذیری خاک و تأثیر ویژگی‌های خاک بر شدت فرسایش، تعیین سرعت آستانه فرسایش، مطالعه تأثیر عوامل مختلف نظیر زبری سطح و پوشش گیاهی بر شدت فرسایش بادی و نیز مکانیسم‌های مختلف حمل ذرات رسوب پرداخت (۲۶، ۳۱، ۳۴).

مطالعه توزیع عمودی و انتقال افقی ذرات رسوب، در مطالعه فرسایش خاک اهمیت خاصی دارد. به طور کلی، دو روش برای تعیین مقدار کل

ذرات رسوب انتقال یافته به وسیله باد وجود دارد: روش نخست، اندازه‌گیری مستقیم با استفاده از نمونه‌گیرهایی است که قادرند مواد فرسایش یافته را جمع‌آوری کنند: روش دوم، اندازه‌گیری غیرمستقیم ذرات رسوب به وسیله تجهیزاتی نظیر Saltiphone و یا Sensit است (۲، ۲۹). اندازه‌گیری مستقیم و البته دقیق دبی ذرات انتقال یافته توسط باد برای ارزیابی معادله‌های انتقال رسوب و همچنین تعیین شدت فرسایش بادی ضروری است. در زمینه اندازه‌گیری مستقیم با استفاده از نمونه‌گیرها، درو و لیمن^۱ (۱۰) بیان نمودند که کارایی یک نمونه‌گیر، الزاماً ۱۰۰ درصد نیست و ممکن است که حتی نمونه‌گیری با کارایی پایین در شرایطی مفید باشد. به طور کلی، دو نوع نمونه‌گیر رسوب برای اندازه‌گیری مستقیم شدت فرسایش وجود دارد که شامل نمونه‌گیرهای افقی و نمونه‌گیرهای عمودی می‌باشد. نخستین بار نمونه‌گیرهای رسوب توسط بگنلود^۲ (۴) طراحی و استفاده گردید. در ابتدا این تله‌ها در یک جهت نصب می‌شد و فقط قابلیت به دام انداختن رسوب را در همان جهت دارا بود که این خود یک محدودیت برای نمونه‌گیر محسوب می‌شد. پس از آن، لیترمن^۳ (۲۰) طرح جدیدی را ارائه نمود که در آن نمونه‌بردارها به سمت باد تغییر جهت داده و رسوب را در جهات مختلف، بسته به جهت باد به دام می‌انداختند. به دلیل هزینه کم و نصب آسان

1- Drew and Lippmann

2- Bagnlod

3- Leatherman

کارایی نمونه گیر BSNE را در شرایط صحرائی و برای ذرات رسوب با اندازه‌های مختلف (میانه اندازه ذرات بین ۱۳۲ و ۲۸۷ میکرون) و سرعت-های متفاوت باد (بین ۶/۶ تا ۱۴/۴ متر بر ثانیه) بین ۸۰ تا ۱۲۰ درصد و مستقل از سرعت باد گزارش کردند. در پژوهشی شانک^۵ و همکاران (۲۷) کارایی تله‌اندازی نمونه گیر BSNE برای ذرات با اندازه ۱ و ۰/۵ میلی متر بسته به سرعت‌های مختلف باد را بین ۸۰ تا ۸۵ درصد تعیین نمودند.

برای فرآیندهای خزش، جهش و تعلیق، به ترتیب دامنه اندازه ذرات بین ۰/۸ تا ۲ میلی متر، ۰/۱ تا ۰/۸ میلی متر و کوچک‌تر از ۰/۱ میلی متر توسط هاگن^۶ (۱۷) گزارش شده است. تحلیل توزیع اندازه ذرات رسوب و عوامل موثر بر آن از این جهت اهمیت دارد که اطلاعات مفیدی درباره خاستگاه ذرات رسوب و مکانیسم‌های حمل ذرات در اختیار پژوهشگران قرار می‌دهد. این اطلاعات، به‌خصوص در استفاده از مدل‌های فرسایش و رسوب کاربرد ویژه‌ای پیدا کرده است (۱۳). مکانیسم‌های حمل و توزیع اندازه ذرات رسوب با یکدیگر اثر متقابل دارند (۱). با توجه به اهمیت فرسایش بادی در مناطق خشک و نیمه‌خشک از یک طرف و لزوم بررسی کارایی نمونه‌گیرهای رسوب و مکانیسم حمل ذرات رسوب در فرسایش بادی که در کشور کم‌تر مورد توجه قرار گرفته است، پژوهش حاضر با هدف (۱) بررسی کارایی نمونه‌گیر BSNE تحت تأثیر اندازه ذرات خاک،

این نوع نمونه‌گیرها، پژوهشگران بسیاری از آن‌ها استفاده نموده‌اند (۱۵ و ۱۶).

یکی از نمونه‌گیرهای عمودی که توسط پژوهشگران در شرایط صحرائی (۱۵، ۱۶، ۱۸) و یا آزمایشگاهی (۲، ۱۱) مورد استفاده قرار گرفته، نمونه‌گیر^۱ BSNE است. این نمونه‌گیر، به دلیل سادگی و در عین حال کاربرد متعدد در دنیا مورد توجه بوده است (۱۵ و ۱۶). کارایی این نمونه‌گیر به عوامل مختلفی نظیر اندازه ذرات رسوب، ارتفاع و سرعت باد وابسته است (۱۱، ۱۸، ۲۸). در این زمینه، فرایر^۲ (۱۱) کارایی نمونه‌گیر BSNE برای تله‌اندازی ذرات بادرفتی را حداقل ۸۶ و حداکثر ۹۶ درصد گزارش کرد. هم‌چنین شاو^۳ و همکاران (۲۸) کارایی تله‌اندازی این نمونه‌گیر را برای ذرات رسوب بادی با اندازه معادل شن بین ۸۶ تا ۹۰ درصد تعیین نمودند. این پژوهشگران بیان داشتند که بازده تله‌اندازی برای ذرات کوچک‌تر از ۱۰۰ میکرون کاهش یافته طوری که کارایی آن برای ذرات با اندازه ریزتر از ۱۰ میکرون به حدود ۴۰ درصد می‌رسد. کریم‌زاده و جلالیان (۱۸) بیان کردند که کارایی تله‌اندازی نمونه‌گیر BSNE به سرعت باد، توزیع اندازه ذرات، چگالی و نوع رسوب وابسته است و میانگین کارایی آن را برای سرعت‌های مختلف باد بین ۴۴ تا ۶۸ درصد گزارش کردند. هم‌چنین گوسن^۴ و همکاران (۱۵) در مقایسه با نمونه‌گیر Isokinetic به عنوان مرجع،

1- Big Spring Number Eight (BSNE)

2- Fryrear

3- Shao

4- Goossens

5- Shannak

6- Hagen

خاک (در سه سطح)، سرعت باد (در سه سطح) و ارتفاع عبور ذرات رسوب (در چهار سطح) بودند که هر تیمار در سه تکرار اعمال گردید. در ابتدا، یک نمونه خاک سطحی (صفر تا ۲۰ سانتی‌متری) از اراضی زراعی دانشگاه شهید باهنر کرمان (موقعیت جغرافیایی ۱۴° ۳۰' شمالی و ۵۷° ۰۶' شرقی) تهیه و به آزمایشگاه منتقل شد و در معرض هوا خشک گردید. برای ایجاد نمونه‌های خاک با توزیع اندازه ذرات متفاوت، خاک مورد نظر، به‌طور جداگانه از الک‌های ۲، ۴/۷۵ و ۸ میلی‌متری عبور داده شد (۱۹). در نتیجه، سه نمونه خاک زارعی با حداکثر اندازه ذرات ۲، ۴/۷۵ و ۸ میلی‌متر (D_{2mm} ، $D_{4.75mm}$ و D_{8mm}) تهیه گردید. برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نمونه‌های خاک، طبق روش‌های استاندارد اندازه‌گیری شد. ویژگی‌های فیزیکی، شامل؛ بافت به روش هیدرومتری، توزیع اندازه ذرات با استفاده از شیکر و سری الک در حالت خشک و جرم مخصوص ظاهری به روش کلوخه تعیین گردید (۱۹، ۱۲). هم‌چنین ویژگی‌های شیمیایی، شامل قابلیت هدایت الکتریکی در عصاره اشباع خاک به وسیله دستگاه هدایت‌سنج الکتریکی، اسیدیته خاک در گل اشباع خاک توسط pH متر قرائت شد (۵). درصد کربن آلی به روش والکی و بلک (۳۲) و کربنات کلسیم معادل به روش تیتراسیون اندازه‌گیری گردید (۲۵).

سرعت باد و ارتفاع نمونه‌گیر، (۲) توزیع اندازه ذرات رسوب به دام افتاده در نمونه‌گیرها و (۳) تعیین پارامتر انتقال‌پذیری ذرات رسوب با استفاده از تونل باد و در شرایط کنترل‌شده آزمایشگاهی انجام شد.

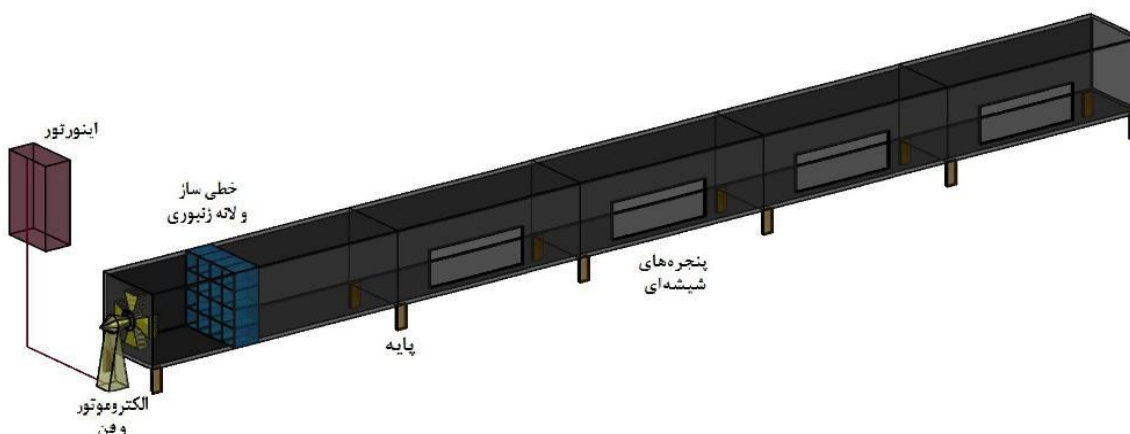
مواد و روش‌ها

۱- تونل باد مورد استفاده

این پژوهش با استفاده از دستگاه تونل باد پیشرفته از نوع سیستم مدار باز دمنده^۱ موجود در آزمایشگاه فرسایش و حفاظت خاک دانشگاه شهید باهنر کرمان انجام شد. این دستگاه از سه قسمت، شامل (۱) مولد باد، (۲) سطح مورد آزمایش خاک به طول ۷ متر و (۳) نمونه‌گیرهای رسوب تشکیل شده است. این دستگاه دارای قابلیت‌های منحصر به فرد با سطح مقطعی یکنواخت با عرض و ارتفاع هر یک ۸۰ سانتی‌متر و طول کل ۱۲ متر است که با استفاده از شاسی و بدنه فلزی ساخته شده است (شکل ۱). این شبیه‌ساز فرسایش قادر است سرعت‌های مختلف باد از ۰/۵ تا ۳۰ متر بر ثانیه در ارتفاع ۴۰ سانتی‌متر (معادل ۱۷۵ کیلومتر در ساعت در ارتفاع ۱۰ متر) را ایجاد نماید. هم‌چنین به منظور جمع‌آوری نمونه‌های رسوب در این پژوهش، در قسمت انتهایی دستگاه، نمونه‌گیر BSNE استاندارد در ارتفاع‌های مختلف نصب شد.

۲- نحوه انجام آزمایش‌ها

آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی انجام شد. فاکتورها شامل نوع



شکل (۱) نمایی سه بعدی از تونل باد مورد استفاده در آزمایش‌ها

Figure (1) A 3D Schematic of the wind tunnel used in the study.

جریان هوای حاوی ذرات رسوب از دهانه نمونه-گیر با سطح مقطع ۱۰ سانتی‌متر مربع وارد محفظه نمونه‌گیر می‌شود. به محض ورود هوا، ذرات رسوب، به دلیل کاهش سرعت جریان هوا، در سینی موجود در کف به دام افتاده و هوای فاقد رسوب از خروجی نمونه‌گیر تخلیه می‌گردد. به منظور بررسی ارتفاع عبور ذرات رسوب، نمونه‌گیرهای BSNE بر روی یک محور عمودی واحد و در ارتفاع‌های مختلف، شامل ۱۰، ۳۰، ۵۰ و ۷۰ سانتی‌متر از کف تونل باد نصب شدند.

۴- کارایی نمونه‌گیرها و انتقال پذیری رسوب
کارایی کلی تله‌اندازی (η) نمونه‌گیر BSNE در ارتفاع‌های مختلف برای هر یک از نمونه‌های خاک و سرعت‌های باد، با استفاده از معادله ۱ محاسبه شد (۱۵):

$$\eta = \frac{Q}{Q_t} * 100 \quad (1)$$

که در آن، Q جرم ذرات رسوب به دام افتاده در هر سری نمونه‌گیر و Q_t جرم کل ذرات رسوب خارج شده از تونل باد برای هر آزمایش است.

به منظور انجام آزمایش‌ها، هر نمونه خاک به سینی‌هایی واقع در کف تونل باد منتقل و سطح آن با دقت تسطیح شد. در خروجی تونل باد، نمونه‌گیرهای BSNE در ارتفاع‌های مختلف، شامل ۱۰، ۳۰، ۵۰ و ۷۰ سانتی‌متر از کف تونل نصب گردید. سرعت‌های مختلف باد، شامل ۶، ۱۰ و ۱۴ متر بر ثانیه در ارتفاع ۴۰ سانتی‌متری بر روی هر خاک ایجاد شد. در پایان هر آزمایش، نمونه خاک باقی‌مانده در سینی‌های آزمایش و هم‌چنین رسوب جمع‌آوری شده در نمونه‌گیرهای BSNE با ترازوی دقیق توزین گردید. توزیع اندازه ذرات رسوب با استفاده از شیکر و سری الک استاندارد با اندازه ۰/۰۶۳، ۰/۱۲۵، ۰/۲۵، ۰/۵، ۱، ۲، ۴، ۴/۷۵، ۰/۰۶۳ میلی‌متر (به ترتیب با مش ۴، ۵، ۱۰، ۱۸، ۳۵، ۶۰، ۱۲۰ و ۲۳۰) در حالت خشک تعیین شد (۲۰).

۳- مشخصات نمونه‌گیر رسوب

نمونه‌گیر BSNE اولین بار توسط فرایر (۱۱) برای به دام انداختن ذرات رسوب در ارتفاع‌های مختلف (۰/۱۵ تا ۴ متر) طراحی و استفاده شد.

جدید با عنوان "انتقال پذیری رسوب در واحد سرعت باد" معرفی شد. با توجه به این که با افزایش ارتفاع، سرعت باد تغییر می کند و از طرفی، سرعت باد بر انتقال ذرات رسوب تأثیر دارد؛ بنابراین، انتقال پذیری رسوب در واحد سرعت، از نسبت مقدار ذرات رسوب انتقال یافته از سطح مقطع دهانه نمونه گیرها (گرم بر سانتی متر مربع در دقیقه) به سرعت باد (متر بر ثانیه) در هر ارتفاع نمونه گیر با استفاده از معادله ۶ محاسبه شد.

$$K = \frac{q}{V} \quad (۶)$$

که در آن، K انتقال پذیری رسوب در واحد سرعت باد ($g \text{ s cm}^{-2} \text{ m}^{-1} \text{ min}^{-1}$)، q مقدار رسوب به دام افتاده در واحد سطح مقطع دهانه نمونه گیر در واحد زمان ($g \text{ cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$) و V سرعت باد بر حسب متر بر ثانیه در ارتفاع نمونه گیر مورد نظر است. البته در آزمایش های مقدماتی، واسنجی دستگاه تونل باد برای دستیابی به نیم رخ سرعت باد و مقادیر سرعت باد برای ارتفاع های مختلف انجام شده بود که در این جا از مقدار سرعت در هر ارتفاع برای تعیین پارامتر انتقال پذیری رسوب در واحد سرعت باد استفاده گردید. در واقع، اثر متقابل فرساینده گی (سرعت باد) و فرسایش پذیری (انتقال پذیری) کنترل کننده شدت فرسایش و تولید رسوب است؛ به عبارتی، با استفاده از این پارامتر می توان حساسیت ذرات رسوب حاصل از فرسایش هر خاک را در برابر انتقال، صرف نظر از عامل سرعت باد، کمی نمود.

مقدار Q_t از اختلاف جرم سینی های حاوی خاک موجود در کف تونل باد قبل (W_b) و بعد (W_a) از هر آزمایش طبق رابطه زیر به دست آمد:

$$Q_t = W_a - W_b \quad (۲)$$

مقدار Q بر اساس اندازه گیری جرم ذرات رسوب انتقال یافته در ارتفاع های مختلف ($q(z)$) محاسبه شد. مقدار رسوب انتقال یافته در ارتفاع های مختلف بر حسب گرم بر سانتی متر مربع در دقیقه، $q(z)$ بر اساس معادله ویلیامز^۱ (۳۳) به دست آمد:

$$q(z) = q_0 e^{-az} \quad (۳)$$

که در آن، q_0 مقدار رسوب برون یابی شده در ارتفاع صفر ($g \text{ cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$) و a فاکتور شیب (cm^{-1}) است. جرم ذرات رسوب انتقال یافته برای کل ارتفاع تونل باد (Q_z) بر حسب گرم بر سانتی متر مربع در دقیقه با انتگرال گیری روی $q(z)$ از رابطه زیر تعیین شد:

$$Q_z = \int_0^h q(z) dz \quad (۴)$$

که در آن، h حداکثر ارتفاع انتقال ذرات بر حسب سانتی متر است. مقدار رسوب به دام افتاده (Q) بر حسب گرم با داشتن عرض سینی های حاوی نمونه خاک (L) و مدت زمان هر آزمایش (T)، طبق رابطه زیر محاسبه گردید:

$$Q = Q_z \cdot L \cdot T \quad (۵)$$

۵- انتقال پذیری رسوب در واحد سرعت

در این پژوهش، به منظور بررسی انتقال پذیری ذرات رسوب در ارتفاع های مختلف، پارامتری

نتایج و بحث

برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نمونه‌های خاک مورد مطالعه در جدول ۱ نشان داده شده است. خاک‌ها دارای بافت لوم شنی بوده و مقدار کربنات کلسیم معادل آن‌ها قابل توجه و بیش از ۱۰ درصد و مقدار کربن آلی اندک و کم‌تر از ۰/۶ درصد است.

شکل ۲ نیم‌رخ مقدار رسوب انتقال یافته در ارتفاع‌ها و سرعت‌های مختلف باد را برای نمونه‌های خاک D_{2mm} ، $D_{4.75mm}$ و D_{8mm} نشان می‌دهد. با افزایش ارتفاع، مقدار رسوب انتقال یافته به صورت غیرخطی کاهش یافته است. در پژوهش‌های متعددی در شرایط آزمایشگاهی و صحرایی گزارش شده است که مقدار انتقال ذرات رسوب با افزایش ارتفاع به صورت غیرخطی کاهش می‌یابد (۲۸، ۱۸). از طرفی، با افزایش سرعت باد مقدار رسوب انتقال یافته در همه ارتفاع‌ها افزایش می‌یابد؛ ولی با بزرگتر شدن اندازه خاکدانه سطحی، مقدار رسوب عبور کرده از همه ارتفاع‌ها کاهش نشان می‌دهد. در این زمینه، زمانی و محمودآبادی (۳۴) بیان داشتند که با افزایش سرعت باد، به دلیل افزایش فرساینده‌گی ناشی از تقویت انرژی جنبشی باد، شدت تولید رسوب ناشی از فرسایش بادی افزایش می‌یابد؛ در حالی که با افزایش زبری سطحی ناشی از اندازه خاکدانه‌ها، به دلیل کاهش سرعت باد در سطح تماس جریان باد و خاک، فرسایش بادی کاهش پیدا می‌کند (۷ و ۲۱).

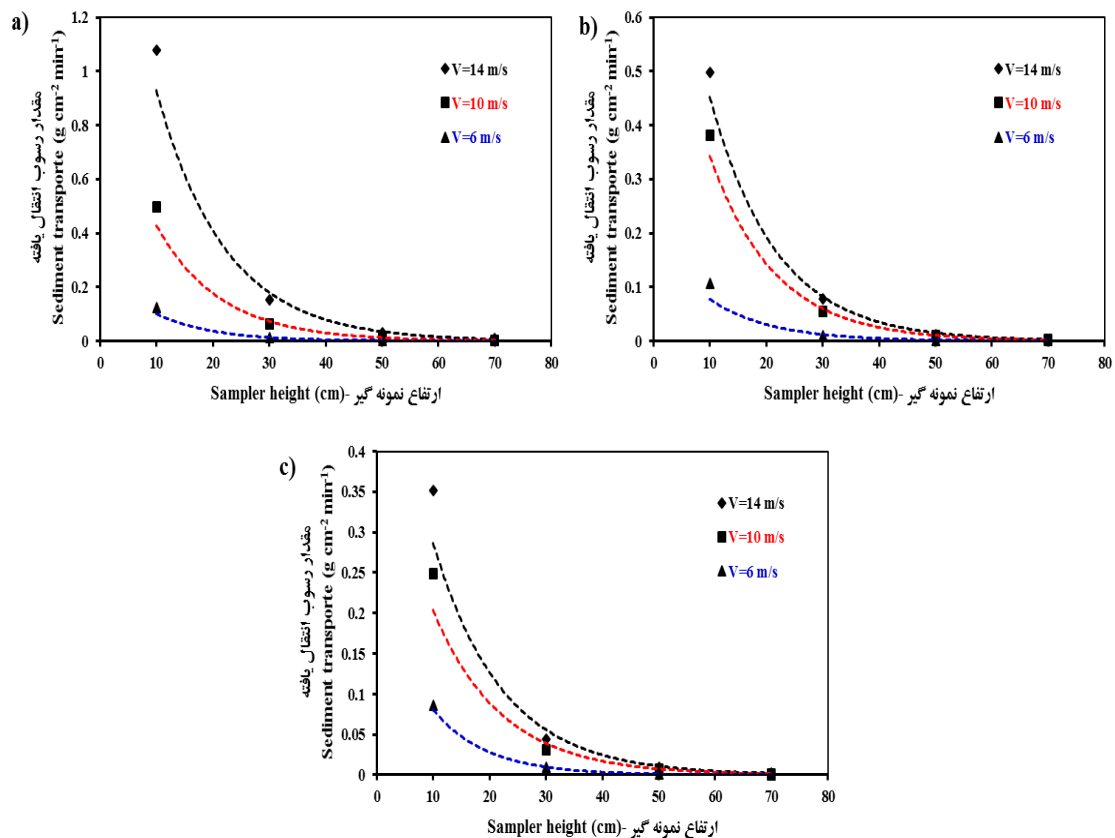
هم‌چنین مطابق شکل ۲ مشاهده می‌شود که روند تغییرات را می‌توان به صورت تابع نمایی $q(z)=q_0e^{-az}$ توصیف کرد که همان معادله پیشنهادی ویلیامز (۳۳) است. وی بر اساس آزمایش تونل باد دریافت که مقدار رسوب انتقال یافته با ارتفاع به صورت تابع نمایی کاهش می‌یابد. در جدول ۲ ضرائب معادله نمایی برازش داده شده برای سرعت‌های مختلف باد و خاک‌های مورد مطالعه ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش سرعت باد، مقدار پارامتر q_0 افزایش و مقدار پارامتر a در حالت کلی کاهش می‌یابد. این نتایج با یافته‌های دونگ^۱ و همکاران (۸) هم‌خوانی دارد که دریافتند در مطالعه فرسایش بادی با استفاده از تونل باد، با افزایش سرعت باد، مقدار پارامتر a کاهش و مقدار q_0 افزایش می‌یابد. در واقع، q_0 بیانگر مقدار انتقال ذرات رسوب در نزدیک سطح خاک (مقدار Z تقریباً برابر با صفر) است. بر این اساس، شدت انتقال ذرات در نزدیک سطح خاک برای نمونه‌های خاک D_{2mm} ، $D_{4.75mm}$ و D_{8mm} به-ترتیب بین ۰/۲۸ تا ۲/۱۱، ۰/۱۹ تا ۱/۰۶ و ۰/۲۳ تا ۰/۶۵ گرم بر سانتی‌متر مربع در دقیقه متغیر است.

خیرآبادی و همکاران: ارزیابی کارایی نمونه‌گیر BSNE و ظرفیت...

جدول (۱) برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه

Table (1) Some physical and chemical properties of the soils

D_{8mm}	$D_{4.75mm}$	D_{2mm}	واحد Unit	ویژگی Property
7.68	7.83	7.69	-	pH
3.75	3.70	3.35	$dS m^{-1}$	EC
1.41	1.5	1.47	$g m^{-3}$	جرم مخصوص ظاهری (Bulk Density)
13.5	13.5	14	%	کربنات کلسیم معادل (Eq. Calcium Carbonate)
0.39	0.585	0.195	%	کربن آلی (Organic Carbon)
85	75	78	%	شن (Sand)
15	20	13	%	سیلت (Silt)
5	5	9	%	رس (Clay)



شکل (۲) تغییرات مقدار رسوب انتقال یافته برای ارتفاع و سرعت‌های مختلف باد در سه نمونه خاک مورد مطالعه شامل: (a) خاک با حداکثر اندازه ذرات ۲ میلی‌متر (D_{2mm}), (b) خاک با حداکثر اندازه ذرات ۴/۷۵ میلی‌متر ($D_{4.75mm}$) و (c) خاک با حداکثر اندازه ذرات ۸ میلی‌متر (D_{8mm}).

Figure (2) Sediment flux profile at different heights and wind velocities for three soil samples including: a) the soil with maximum particle size of 2 mm (D_{2mm}), b) the soil with maximum particle size of 4.75 mm ($D_{4.75mm}$), and c) the soil with maximum particle size of 8 mm (D_{8mm}).

کوچکتر از ۱۰ میکرون تنها ۴۰ درصد است. مندر^۲ و همکاران (۲۳) نیز، بیان کردند که کارایی نمونه گیر BSNE برای ذرات با قطر ۱۰ میکرون (PM_{10}) بین ۱۲ تا ۳۲ درصد، برای ذرات با قطر ۲/۵ میکرون ($PM_{2.5}$) بین صفر تا ۱۹ و برای ذرات با قطر یک میکرون (PM_1) از صفر تا ۱۲ درصد متغیر است.

کارایی نمونه گیر BSNE، تنها در مورد خاک $D_{4.75mm}$ روند افزایشی با افزایش سرعت باد را نشان می‌دهد و در دو خاک دیگر این روند چندان واضح نیست (شکل ۲). هم‌چنین با افزایش اندازه ذرات خاک، کارایی نمونه‌گیرها به‌طور کلی افزایش یافت. چنین نتایجی در پژوهش‌های قبلی نیز، گزارش شده است؛ برای نمونه، شانک و همکاران (۲۷) و هم‌چنین گوسن و همکاران (۱۵) گزارش کردند که کارایی نمونه گیر BSNE با افزایش سرعت، باد افزایش می‌یابد. درحالی‌که آزمایش‌های فرایر (۱۱) و گوسن و افر (۱۶) نشان داد که با افزایش سرعت باد، کارایی این نمونه‌گیر کاهش پیدا می‌کند.

شکل ۴ مقادیر پارامتر انتقال‌پذیری رسوب در واحد سرعت باد در ارتفاع‌های مختلف و سرعت‌های مختلف را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش ارتفاع از سطح خاک، انتقال‌پذیری ذرات رسوب به صورت غیرخطی کاهش یافته است. هم‌چنین با افزایش سرعت باد، مقدار این پارامتر به‌طور کلی در همه ارتفاع‌ها، افزایش نشان می‌دهد.

نتایج نشان داد که افزایش سرعت باد و اندازه ذرات، به‌ترتیب موجب افزایش و کاهش بادبردگی ذرات در ارتفاع نزدیک سطح می‌شود.

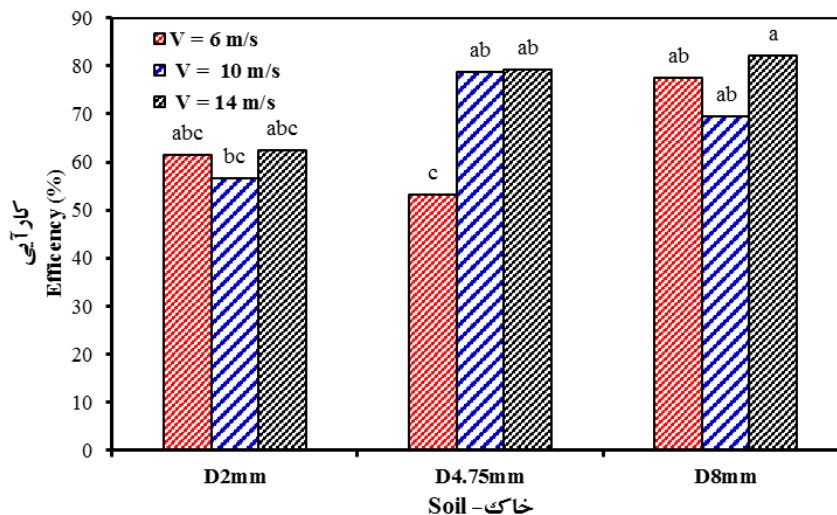
شکل ۳ کارایی نمونه گیر BSNE را در سرعت‌های ۶، ۱۰ و ۱۴ متر بر ثانیه برای سه خاک با توزیع اندازه ذرات متفاوت نشان می‌دهد. در مجموع، کارایی نمونه گیر BSNE بسته به سرعت باد و اندازه ذرات، در دامنه ۵۳/۲ تا ۸۲/۱ درصد با میانگین برابر با ۶۵ درصد تعیین شد. کارایی نمونه گیر برای خاک‌های D_{2mm} ، $D_{4.75mm}$ و D_{8mm} در سرعت ۶ متر بر ثانیه، به‌ترتیب ۶۱/۴، ۵۳/۲ و ۷۷/۵ درصد، در سرعت ۱۰ متر بر ثانیه، به ترتیب ۵۶/۵، ۷۸/۷ و ۶۹/۵ درصد و برای سرعت ۱۴ متر بر ثانیه به‌ترتیب برابر با ۶۲/۴، ۷۹/۱ و ۸۲/۱ درصد به‌دست آمد. پژوهشگران مقادیر متنوعی از کارایی این نمونه گیر را بسته به سرعت باد و اندازه ذرات گزارش کرده‌اند (۱۱، ۱۵، ۱۸). نمونه‌گیر BSNE پیش از این توسط فرایر (۱۱) و سپس توسط استوت و فرایر (۳۰)، شاو و همکاران (۲۸)، گوسن و بویک^۱ (۱۴)، شانک و همکاران (۲۷) و در ایران توسط کریم زاده و همکاران (۱۸) استفاده شد که برای ذرات شن، کارایی تله‌اندازی آن بین ۸۶ تا ۹۶ درصد متغیر بود.

برای ذرات ریز (کوچکتر از ۷۰ میکرون)، گوسن و بویک (۱۴) بازده تله‌اندازی این نمونه‌گیر را بین ۱۸ تا ۷۰ درصد گزارش کردند؛ اما شاو و همکاران (۲۸) در مقایسه با نمونه‌گیر Isokinetic به‌عنوان مرجع، دریافتند بازده تله‌اندازی برای ذرات

جدول (۲) پارامترهای برازش تابع نمایی بر توزیع عمودی ذرات رسوب انتقال یافته برای سرعت‌های مختلف باد و نمونه‌های خاک مورد مطالعه

Table (2) Fitted parameters of the exponential function on the vertical distribution of sediment flux for different wind velocities and soil samples.

R ²	a	q ₀	سرعت باد (ms ⁻¹)
			Wind velocity (ms ⁻¹)
D _{2mm}			
0.9918	0.101	0.2775	6
0.9950	0.088	1.0351	10
0.9937	0.082	2.1064	14
D _{4.75mm}			
0.9678	0.093	0.1955	6
0.9971	0.087	0.8211	10
0.9951	0.085	1.061	14
D _{8mm}			
0.9994	0.105	0.2294	6
0.9901	0.082	0.4639	10
0.9891	0.082	0.6496	14



شکل (۳) مقایسه کارایی نمونه‌گیر BSNE برای سه خاک مورد مطالعه و سرعت‌های مختلف باد (مقایسه میانگین در سطح احتمال پنج درصد و با استفاده از آزمون دانکن انجام شده است).

Figure (3) Trapping efficiency comparison of the BSNE sampler for three soil samples at different wind velocities (mean comparison was done using the Duncan's test).

می‌توان به خطوط مستقیم تبدیل کرد؛ بنابراین،

شیب خط مستقیم از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$S = (\ln K_2 - \ln K_1) / (z_2 - z_1) = -1/b \quad (۸)$$

که در آن، S شیب خط مستقیم، K₁ و K₂، به ترتیب انتقال پذیری در ارتفاع‌های z₁ و z₂ است.

در جدول ۳ مقدار ضرایب a و b نشان داده

شده است که هر دو تابعی از سرعت باد هستند. با

روند تغییرات طبق تابع نمایی زیر قابل برازش

است:

$$K = ae^{-z/b} \quad (۷)$$

که در آن، K پارامتر انتقال پذیری رسوب در ارتفاع z (g s cm⁻² m⁻¹ min⁻¹) و a و b ضرایب معادله‌اند. اگر مقدار K در مقیاس

لگاریتمی تعیین شود، منحنی‌های شکل ۴ را

در این پژوهش، توزیع اندازه ذرات حاصل از فرسایش بادی در سرعت‌های مختلف باد برای نمونه رسوب جمع‌شده در نمونه‌گیر BSNE اندازه‌گیری شد. توزیع اندازه ذرات رسوب حاصل از فرسایش بادی در دو ارتفاع ۱۰ و ۳۰ سانتی‌متر از سطح تونل باد برای سرعت‌های مختلف باد، در شکل ۵ نشان داده شده است. با توجه به مقدار کم ذرات رسوب جمع‌شده در نمونه‌گیرهای واقع در ارتفاع‌های بالاتر (۵۰ و ۷۰ سانتی‌متر)، توزیع اندازه ذرات رسوب برای آن‌ها قابل اندازه‌گیری نبود. همان‌طور که در شکل ۵ (a) مشاهده می‌شود، در ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر، ذرات رسوب در دامنه اندازه بین ۰/۱۲۵ تا ۰/۲۵ میلی‌متر بیش‌ترین درصد فراوانی را نشان می‌دهد. هم‌چنین برای ذرات رسوب جمع‌شده در ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر، فراوانی ذرات در دامنه اندازه ۰/۱۲۵ تا ۰/۵ میلی‌متر دارای بیش‌ترین فراوانی است (شکل ۵ (b)). فراوانی بیش‌تر ذرات رسوب در دامنه اندازه ۰/۱۲۵ تا ۰/۵ میلی‌متر در هر دو نمونه‌گیر رسوب بیانگر وضعیت انتخاب‌پذیری در انتقال ذرات رسوب و البته حساسیت بیش‌تر این ذرات در برابر جداشدن به وسیله عامل فرساینده باد است. در پژوهش‌های قبلی نیز، دامنه مشابهی از اندازه ذرات به عنوان حساس‌ترین ذرات، در برابر فرسایش بادی گزارش شده است (۱۷ و ۳۴).

افزایش سرعت باد، هر دو ضریب a و b افزایش یافته است. ضریب a نشان دهنده پارامتر انتقال‌پذیری در سطح خاک (مقدار Z تقریباً برابر با صفر) است. مقدار S در معادله γ نشان‌دهنده مقدار کاهش نسبی^۱ انتقال‌پذیری ذرات رسوب با افزایش ارتفاع است (۸ و ۹). همان‌طور که در جدول ۳ مشخص است، مقدار S با افزایش سرعت باد کاهش می‌یابد که بیانگر این مطلب است که با افزایش سرعت باد، مقدار کاهش نسبی در انتقال‌پذیری ذرات رسوب، کم‌تر می‌شود. این نتایج به‌نحوی با یافته‌های پژوهش‌های پیشین نیز هم‌خوانی دارد که مطرح شده است که با افزایش سرعت باد، مقدار انتقال ذرات رسوب افزایش می‌یابد (۲۱، ۳۵).

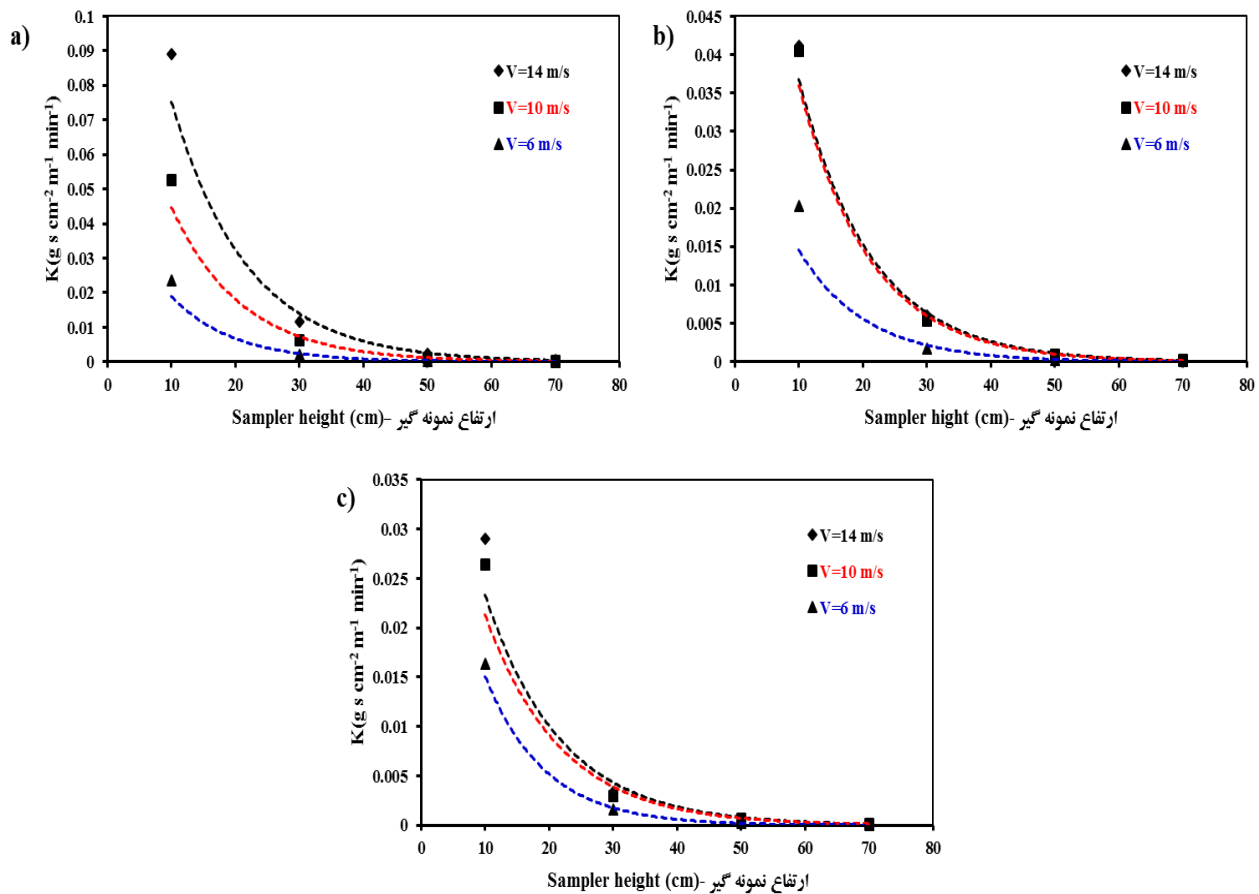
پانیانکو^۲ و همکاران (۲۴) و زو^۳ و همکاران (۳۵) بیان کردند که قسمت عمده خاک حمل شده به وسیله باد، در نزدیکی سطح زمین و از طریق عمل جهش صورت می‌گیرد که با افزایش ارتفاع، مقدار رسوب تولیدی کاهش می‌یابد. ذرات در اندازه بزرگ‌تر به دلیل جرم زیادتر، تا ارتفاع مشخصی از سطح زمین به وسیله باد پرتاب می‌شوند و در نتیجه، با افزایش ارتفاع درصد نسبی آن‌ها کاهش می‌یابد. هم‌چنین چپیل^۴ (۶) بیان کرد که مقدار خاک حمل شده در نزدیک سطح زمین بین ۶۲ تا ۹۷ درصد از مقدار کل آن را به خود اختصاص می‌دهد.

1- Relative Decay Rate

2- Panebianco

3- Zhou *et al.*

4- Chepil



شکل (۴) تغییرات پارامتر انتقال پذیری رسوب در واحد سرعت باد (K) برای ارتفاع‌های مختلف باد در سه نمونه خاک مورد مطالعه شامل: (a) خاک با حداکثر اندازه ذرات ۲ میلی‌متر ($D_{2\text{mm}}$), (b) خاک با حداکثر اندازه ذرات ۴/۷۵ میلی‌متر ($D_{4.75\text{mm}}$) و (c) خاک با حداکثر اندازه ذرات ۸ میلی‌متر ($D_{8\text{mm}}$).

Figure (4) Sediment transportability parameter (K) at different heights and wind velocities for three soil samples including: a) the soil with maximum particle size of 2 mm ($D_{2\text{mm}}$), b) the soil with maximum particle size of 4.75 mm ($D_{4.75\text{mm}}$), and c) the soil with maximum particle size of 8 mm ($D_{8\text{mm}}$).

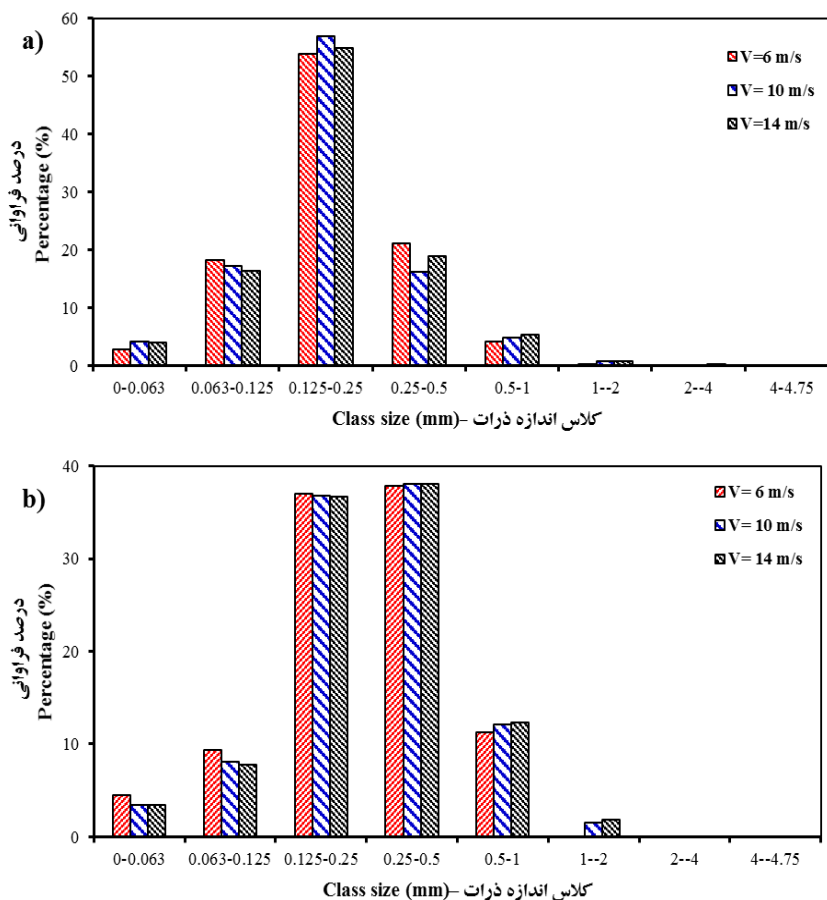
وجود دارد که ذرات بزرگ رسوب در اثر برخورد با دیواره‌های داخلی نمونه‌گیر خرد شوند که در نتیجه، فراوانی ذرات درشت کاهش می‌یابد. همچنین این احتمال نیز وجود دارد که ذرات ریزتر به دلیل قطر کم، پس از ورود به نمونه‌گیر از خروجی آن همراه با جریان خروجی هوا خارج شوند (۱۸).

دامنه یادشده از اندازه ذرات، به‌طور معمول از طریق مکانیسم جهش حمل می‌شوند که از این نظر نیز این یافته با نتایج گذشته هم‌خوانی دارد (۱۷، ۲۲). لازم به ذکر است که ذرات بزرگتر به دلیل اندازه و چگالی بیشتر، ممکن است قبل از ورود به دهانه نمونه‌گیر در اثر نیروی وزن سقوط کنند. از طرف دیگر، این احتمال

جدول (۳) مقادیر پارامترهای برازش تابع نمایی بر توزیع عمودی انتقال پذیری رسوب در واحد سرعت باد برای سرعت‌های مختلف باد و نمونه‌های خاک مورد مطالعه

Table (3) Fitted parameters of the exponential function on the vertical distribution of sediment transportability (K) for different wind velocities and soil samples.

ضریب تبیین (R ²)	شیب S	b	a	سرعت باد Wind Velocity (ms ⁻¹)
				D _{2mm}
0.9909	0.103	9.70	0.0533	6
0.9942	0.091	10.98	0.1107	10
0.9928	0.084	11.90	0.1747	14
				D _{4.75mm}
0.9671	0.095	10.52	0.0375	6
0.9964	0.089	11.23	0.0878	10
0.9945	0.087	11.49	0.088	14
				D _{8mm}
0.999	0.107	9.34	0.044	6
0.989	0.085	11.76	0.0496	10
0.988	0.084	11.90	0.0539	14



شکل (۵) توزیع اندازه ذرات رسوب حاصل در سرعت‌های مختلف باد در دو ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر (a) و ۳۰ سانتی‌متر (b) از سطح خاک
Figure (5) Particle size distribution of sediment at different wind velocities, collected from two heights of 10 cm (a) and 30 cm (b) from soil surface

هم‌چنین نتایج شکل ۵ نشان می‌دهد که در هر دو ارتفاع ۱۰ و ۳۰ سانتی‌متر از سطح خاک، با افزایش سرعت باد فراوانی ذرات ریز ($0/063$ تا $0/125$ میلی‌متر) کاهش و فراوانی ذرات درشت ($0/5$ تا 1 میلی‌متر) افزایش یافته است. این یافته موید این مطلب است که در جداشدن و انتقال ذرات از سطح خاک، یک حالت انتخاب‌پذیری وجود دارد؛ به نحوی که این گزینش در سرعت‌های کم باد برای ذرات ریزتر بیشتر است. محمودآبادی و زمانی (۲۲) نیز یکی از دلایل تغییر در توزیع اندازه ذرات رسوب را به انتخابی بودن فرآیند و قرارگرفتن ذرات رسوب در کلاس‌های اندازه ریزتر در سرعت‌های کم باد نسبت دادند.

نتیجه‌گیری

از یافته‌های این پژوهش مشخص گردید که با افزایش ارتفاع، میزان انتقال رسوب به صورت نمایی کاهش می‌یابد. از طرفی، با افزایش سرعت باد و افزایش زبری سطح خاک، مقدار انتقال رسوب در همه ارتفاع‌ها، به ترتیب افزایش و کاهش می‌یابد. این موضوع به آن مفهوم است که مهار فرسایش بادی از طریق کاهش عامل فرساینده سرعت باد و کاهش فرسایش‌پذیری

خاک از طریق ایجاد زبری در سطح، قابل دستیابی است. یافته‌ها هم‌چنین روشن ساخت که با افزایش ارتفاع، انتقال‌پذیری ذرات رسوب در واحد سرعت، به صورت نمایی کاهش می‌یابد؛ به عبارتی، مشخص گردید که بیش‌تر رسوب تولیدی در ارتفاع نزدیک به سطح خاک منتقل می‌شود که در صورت اجرای عملیات حفاظتی مناسب، نظیر ایجاد زبری در سطح، حتی تا ارتفاع کم نیز می‌توان فرسایش بادی را تا حد زیادی مهار کرد. توزیع اندازه ذرات رسوب به دام افتاده در نمونه‌گیرها نشان داد که در جدا شدن و انتقال ذرات از سطح خاک‌های مورد مطالعه، یک حالت انتخاب‌پذیری وجود دارد؛ به نحوی که این گزینش در مورد ذرات ریزتر، بیش‌تر است. این موضوع از نظر تولید ذرات ریز و گرد و غبار اهمیت دارد. با توجه به کارایی نمونه‌گیر مورد مطالعه و هم‌چنین سهولت استفاده از آن، پیشنهاد می‌شود که کارایی آن در شرایط صحرائی و در سرعت‌های مختلف باد و هم‌چنین اندازه متفاوت ذرات خاک بررسی شود. علاوه بر این، توجه بیش‌تر به محدودیت‌های نمونه‌گیرها و استفاده از روش‌های استاندارد برای واسنجی آن‌ها نیز، ضروری به نظر می‌رسد.

منابع

1. Abuodha, J. 2003. Grain size distribution and composition of modern dune and beach sediments, Malindi Bay coast, Kenya. *Journal of African Earth Sciences*, 36(1): 41-54.
2. Avecilla, F., Panebianco, J. and Buschiazzo, D. 2015. Variable effects of saltation and soil properties on wind erosion of different textured soils. *Aeolian Research*, 18: 145-153.
3. Azimzadeh, H., Ekhtesasi, M., Refahi, H.G., Rohipour, H. and Gorji, M. 2008. Wind erosion measurement on fallow lands of Yazd-Ardakan plain, Iran. *Desert*, 13(2): 167-174.
4. Bagnold, R.A. 2005. *The Physics of blown sand and desert dunes*. dover earth Science Series. Dover Publications, 336p.
5. Black, C.A., Evans, D., White, J., Ensminger, L., and Clark, F. 1965. *Methods of soil analysis*. American Society of Agronomy. Madison, Wisconsin, U. S. A.
6. Chepil, W. 1957. Erosion of soil by wind. *Yearbook of Agriculture*, 308-314.
7. De Oro, L.A., Colazo, J.C. and Buschiazzo, D.E. 2016. RWEQ- Wind erosion predictions for variable soil roughness conditions. *Aeolian Research*, 20: 139-146.
8. Dong, Z., Sun, H. and Zhao, A. 2004. WITSEG sampler: a segmented sand sampler for wind tunnel test. *Geomorphology*, 59(1): 119-129.
9. Dong, Z., Wang, H., Liu, X. and Wang, X. 2004. The blown sand flux over a sandy surface: a wind tunnel investigation on the fetch effect. *Geomorphology*, 57(1): 117-127.
10. Drew, R. and Lippmann, M. 1978. Calibration of air sampling instruments. *Air sampling instruments for evaluation of atmospheric contaminants*, 5th edn. American Conference of Governmental Industrial Hygienists, Cincinnati, OH, Section I, pp:1-32.
11. Fryrear, D. 1986. A field dust sampler. *Journal of Soil and Water Conservation*, 41(2): 117-120.
12. Gee, G.W. and Or, D. 2002. Particle Size Analysis. In Dane, J.H. and Topp, G.C. (Eds.), *Methods of soil analysis, part 4, Physical Methods*, Soils Science Society of America, Book Series No. 5, Madison, pp. 255-293.
13. Goossens, D. 2007. Bias in grain size distribution of deposited atmospheric dust due to the collection of particles in sediment catchers. *Catena*, 70(1): 16-24.
14. Goossens, D. and Buck, B.J. 2012. Can BSNE (Big Spring Number Eight) samplers be used to measure PM₁₀, respirable dust, PM_{2.5} and PM_{1.0}? *Aeolian Research*, 5: 43-49.

15. Goossens, D., Offer, Z. and London, G. 2000. Wind tunnel and field calibration of five aeolian sand traps. *Geomorphology*, 35(3): 233-252.
16. Goossens, D. and Offer, Z.Y. 2000. Wind tunnel and field calibration of six aeolian dust samplers. *Atmospheric Environment*, 34(7): 1043-1057.
17. Hagen, L.J. 2010. Erosion by Wind: Modeling. In: Lal, R. (Ed.), *Encyclopedia of Soil Science: Second Edition*. London: Taylor and Francis publishers. pp. 1-4.
18. Karimzadeh, H.R. and Jalalian, A. 2002. Application of BSNE sampler to evaluate vertical distribution of wind eroded sediment in eastern Isfahan. *Journal of Water and Soil Science*, 6(3): 121-139. (in Persian).
19. Kemper, W.D. and Rosenau, R.C. 1986. Aggregate Stability and Size Distribution. In Klute A. (Ed.), *Methods of soil analysis. part 1. 2nd Ed. Agron. Monogr. 9. ASA, Madison, WI. pp. 425-442.*
20. Leatherman, S. 1978. A new aeolian sand trap design. *Sedimentology*, 25(2): 303-306.
21. Mahmoodabadi, M., Dehghani, F. and Azimzadeh, H.R. 2011. Effect of soil particle size distribution on wind erosion rate. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 1(1): 81-98. (in Persian).
22. Mahmoodabadi, M. and Zamani, S. 2012. Effect of wind speed and soil particle size distribution on sediment transport mechanisms due to wind erosion. *Journal of Watershed Engineering and Management*, 4(3): 141-151.
23. Mendez, M.J., Funk, R. and Buschiazzo, D.E. 2016. Efficiency of Big Spring Number Eight (BSNE) and Modified Wilson and Cook (MWAC) samplers to collect PM₁₀, PM_{2.5} and PM₁. *Aeolian Research*, 21: 37-44.
24. Panebianco, J.E., Buschiazzo, D.E. and Zobeck, T.M. 2010. Comparison of different mass transport calculation methods for wind erosion quantification purposes. *Earth Surface Processes and Landforms*, 35(13): 1548-1555.
25. Pansu, M. and Gautheyrou, J. 2007. *Handbook of soil analysis: Mineralogical, Organic and Inorganic Methods*. Springer Science and Business Media. 993 p.
26. Ravi, S., D'Odorico, P., Breshears, D.D., Field, J.P., Goudie, A.S., Huxman, T.E., Li, J., Okin, G.S., Swap, R.J., Thomas, A.D., Van Pelt, S., Whicker, J.J. and Zobeck, T.M. 2011. Aeolian processes and the biosphere. *Reviews of Geophysics*, 49(3): 1-45.
27. Shannak, B., Corsmeier, U., Kottmeier, C. and Al-Azab, T. 2014. Wind tunnel study of twelve dust samples by large particle size. *Atmospheric Environment*, 98: 442-453.
28. Shao, Y., McTainsh, G., Leys, J. and Raupach, M. 1993. Efficiencies of sediment samplers for wind erosion measurement. *Soil Research*, 31(4): 519-532.

29. Sterk, G. and Raats, P. 1996. Comparison of models describing the vertical distribution of wind-eroded sediment. *Soil Science Society of America Journal*, 60(6): 1914-1919.
30. Stout, J.E. and Fryrear, D.W. 1989. Performance of a windblown particle sampler. *Transactions of the ASAE.*, 32(6): 2041-2045.
31. Suter-Burri ,K., Gromke, C., Leonard, K.C. and Graf, F. 2013. Spatial patterns of aeolian sediment deposition in vegetation canopies: Observations from wind tunnel experiments using colored sand. *Aeolian Research*, 8: 65-73.
32. Walkley, A. and Black, I.A. 1934. An examination of the degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37(1): 29-38.
33. Williams, G. 1964. Some aspects of the eolian saltation load. *Sedimentology*, 3(4):287-257.
34. Zamani, S. and Mahmoodabadi, M. 2013. Effect of particle-size distribution on wind erosion rate and soil erodibility. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 59(12): 1743-1753.
35. Zhou, J., Lei, J., Li, S., Wang, H., Sun, N. and Ma, X. 2016. A wind tunnel study of sand-cemented bodies on wind erosion intensity and sand transport. *Natural Hazards*, 82(1): 25-38.