

تأثیرگذاری ویژگی‌های خاک بر شدت فرسایش بادی در مناطق مختلف استان کرمان

نادر شهابی‌نژاد^۱، مجید محمودآبادی^{۲*}، احمد جلالیان^۱ و الهام چاوشی^۱

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۷/۱۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱/۲۰)

چکیده

فرسایش بادی یکی از مهم‌ترین جنبه‌های تخریب اراضی به‌خصوص در مناطق خشک و نیمه‌خشک محسوب می‌شود. ویژگی‌های خاک از طریق تأثیر بر فرسایش‌پذیری آن، در کنترل شدت فرسایش بادی نقش اساسی دارند. هدف این پژوهش بررسی ارتباط بین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و شدت فرسایش بادی و تعیین مهم‌ترین ویژگی مؤثر بود. به این منظور، شدت فرسایش بادی به‌صورت درجا و با استفاده از یک دستگاه تونل باد قابل حمل در ۶۰ نقطه از مناطق مختلف استان کرمان اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که شدت فرسایش بادی بین ۰/۰۳ تا ۳/۴۱ گرم بر متر مربع در دقیقه متغیر بود. سرعت آستانه فرسایش بادی از طریق تابع توانی باعث کاهش معنی‌دار شدت فرسایش شد ($R^2=0/81$, $P<0/001$). درصد ذرات رس و سیلت، مقاومت برشی، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها، سنگریزه سطحی، خاکدانه‌های بزرگ‌تر از ۰/۲۵ میلی‌متر، کربن آلی خاک، کربنات کلسیم معادل و همچنین کلسیم، پتاسیم و منیزیم محلول با شدت‌های فرسایش بادی روابط عکس و غیرخطی داشتند. در مقابل با افزایش درصد ذرات شن، سدیم محلول، هدایت الکتریکی و نسبت جذب سدیم، فرسایش بادی به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. بر اساس نتایج نهایی، از بین ویژگی‌های مورد مطالعه، نسبت جذب سدیم و میانگین وزنی قطر خاکدانه بیشترین اثرگذاری را بر شدت فرسایش بادی در خاک‌های استان کرمان نشان دادند. بنابراین پیشنهاد می‌شود در راستای جلوگیری از سدیمی شدن و نیز تخریب ساختمان خاک‌ها، اقدامات حفاظتی مناسب انجام شود.

واژه‌های کلیدی: توزیع اندازه ذرات، ساختمان خاک، سرعت آستانه، زبری تصادفی، فرسایش خاک

۱. گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران

۲. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: mahmoodabadi@uk.ac.ir

مقدمه

فرسایش بادی یکی از مهم‌ترین پدیده‌های طبیعی در مناطق نیمه‌خشک، خشک و فراخشک جهان است (۱۹). هر چند فرسایش بادی چالش جدیدی نیست، اما به‌تازگی به‌عنوان یکی از منبع اصلی تهدید محیط زیستی در سراسر جهان شناخته شده است (۳۶). این پدیده همچنین تهدیدی برای کشاورزی پایدار و کیفیت محیط زیست بوده و سبب کاهش حاصلخیزی خاک می‌شود. از طرفی، به‌واسطه تغییر در ویژگی‌های خاک بر فرسایش‌پذیری آن نیز اثر می‌گذارد و با برداشتن ذرات ریز حساس و البته غنی از کربن آلی خاک و عناصر غذایی موجود در سطح باعث تخریب خاک می‌شود (۴۳). مؤثرترین عامل فرساینده در طی هر رخداد فرسایش بادی سرعت باد است (۱۵ و ۲۲). هنگامی که سرعت باد بر نیروهای نگهدارنده بین ذرات خاک سطحی غلبه کند، فرسایش بادی رخ می‌دهد. در این شرایط، سرعت‌های بیشتر باد باعث تشدید هدررفت خاک و شدت‌های بیشتر فرسایش بادی می‌شود (۳۵). در این ارتباط، سرعت آستانه فرسایش بادی که حداقل سرعت لازم برای شروع جابه‌جایی ذرات خاک است، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (۳۷). زبری سطحی ناشی از وجود پوشش گیاهی و سنگریزه در سطح خاک می‌تواند سرعت آستانه فرسایش بادی را افزایش داده و از این طریق باعث کاهش فرسایش بادی شود (۴۸). ارتباط بین شدت فرسایش بادی و سرعت باد به ویژگی‌های خاک سطحی بستگی دارد (۴۰).

فرسایش بادی همچنین به‌طور مستقیم به ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک بستگی دارد (۱۷). یکی از عوامل مؤثر در کنترل فرسایش بادی و مقاومت سطح خاک در مقابل نیروی فرساینده باد، سنگریزه موجود در سطح خاک است (۳۷). چنین ذرات فرسایش‌ناپذیری از طریق افزایش سرعت آستانه فرسایش موجب کاهش شدت فرسایش می‌شود (۳۶ و ۳۸). علاوه بر این، توزیع اندازه ذرات خاک سطحی نیز یکی از عوامل مهم مرتبط با فرسایش‌پذیری خاک است که در مهار فرسایش بادی نقش اساسی دارد (۳۷ و ۴۸). در برخی بررسی‌ها، ویژگی‌های

مرتبط با وضعیت ساختمان خاک نظیر اندازه، پایداری، شکل و چگالی خاکدانه‌ها به‌عنوان مهم‌ترین ویژگی‌های خاک مؤثر بر فرسایش خاک و سرعت آستانه گزارش شده است (۱). خاکدانه‌های حساس نیاز به انرژی کمتری برای جابه‌جایی و حرکت توسط باد دارند (۲۲). اندازه و پایداری خاکدانه به عوامل هم‌اورکننده نظیر مقدار و نوع مواد آلی و معدنی خاک بستگی دارد (۳۳ و ۴۶). بافت خاک و به‌طور ویژه درصد ذرات اولیه رس، سیلت و شن از طریق تأثیر بر جرم مخصوص ظاهری، پایداری خاکدانه، تخلخل، چسبندگی، مقاومت برشی و سرعت آستانه بر فرسایش‌پذیری خاک اثر می‌گذارد (۲۸). کربن آلی از اجزای مهم خاک است که در اتصال ذرات اولیه و تشکیل خاکدانه‌های پایدار نقش اساسی دارد (۴۶). همچنین، در مناطق خشک و نیمه‌خشک، کربن غیرآلی (کربنات کلسیم معادل) نیز مقدار قابل توجهی داشته (۲۸) و از طریق تأثیر بر فرسایش‌پذیری خاک، بر کنترل شدت فرسایش بادی مؤثر است (۳۷ و ۴۸). مقادیر بیشتر کربن آلی و نیز کربن غیرآلی (کربنات کلسیم معادل) می‌تواند باعث تشکیل خاکدانه‌های پایدارتر شود و در نتیجه، شدت فرسایش بادی را کاهش دهد (۸). در این زمینه، بارلی و همکاران (۷) نشان دادند که کربن آلی و کربنات کلسیم معادل با بهبود وضعیت پایداری خاکدانه، بر فرسایش بادی اثر کاهنده دارد. هدایت الکتریکی و نسبت جذب سدیم خاک از جمله مؤثرترین ویژگی‌های شیمیایی خاک بر فرسایش-پذیری خاک شناخته شده‌اند. پایداری خاکدانه به مقادیر هدایت الکتریکی و نسبت جذب سدیم خاک بستگی دارد (۳۱). این دو ویژگی، از طریق تأثیر بر غلظت کاتیون‌های تک و دوظرفیتی بر پایداری خاکدانه و یا پراکنده شدن ذرات آن (۱۸) و در نتیجه شدت فرسایش بادی مؤثرند (۱۷).

هر چند در پژوهش‌های گذشته، ارتباط بین شدت فرسایش بادی و ویژگی‌های خاک مورد بررسی قرار گرفته (۱۱ و ۱۷)، ولی به اندازه‌گیری فرسایش بادی روی نمونه‌های دست‌نخورده خاک در شرایط صحرائی به‌ویژه در استان کرمان کمتر پرداخته شده است. در این پژوهش با استفاده از آزمایش تونل باد قابل

مورد مطالعه روی نقشه استان کرمان در شکل (۱) نشان داده شده است. همچنین ویژگی‌های عمومی هر منطقه در جدول (۱) ارائه شده است.

مشخصات تونل باد

در این پژوهش از دستگاه تونل باد قابل حمل متعلق به آزمایشگاه فرسایش و حفاظت خاک دانشگاه شهید باهنر کرمان برای اندازه‌گیری درجای شدت فرسایش بادی و تعیین سرعت آستانه در شرایط طبیعی استفاده شد. موارد استفاده متعددی از این دستگاه در پژوهش‌های قبلی برای مطالعه فرسایش بادی گزارش شده است (۱۵، ۳۶ و ۳۸). این دستگاه از سه بخش اصلی شامل (۱) مولد باد، (۲) سطح مورد آزمایش و (۳) محفظه رسوب تشکیل شده است (شکل ۲). این شبیه‌ساز قادر است سرعت‌های مختلف باد بین ۵/۰ تا حداکثر ۱۲ متر بر ثانیه در ارتفاع ۱۵/۰ متری (معادل سرعت بین ۱۷/۲ و ۲۶/۸ متر در ثانیه در ارتفاع ۱۰ متری بر اساس وضعیت زبری سطح) ایجاد کند. سرعت‌های مختلف باد از طریق تنظیم سرعت چرخش فن متصل به دستگاه تونل باد قابل تنظیم است. سطح مورد آزمایش به ابعاد ۱۰۰ سانتی‌متر در ۳۰ سانتی‌متر است که روی نمونه‌های خاک دست‌نخورده طبیعی قرار می‌گیرد. در قسمت انتهایی دستگاه، نمونه‌گیر رسوب متشکل از یک محفظه پلاستیکی دو جداره به طول ۱۰ متر نصب شده است. از یک طرف با جریان رفت و برگشتی باد، ذرات خاک حاصل از فرسایش در آن جمع‌آوری شده و از طرف دیگر مانع افت فشار هوا می‌شود (۱۵).

آزمایش‌های تونل باد

پس از تعیین نقاط مناسب آزمایش، تونل باد در جهت باد غالب هر منطقه روی خاک دست‌نخورده قرار داده می‌شد. همه آزمایش‌های تونل باد با شرایط یکنواخت و با حداکثر سرعت ثابت ۱۲ متر بر ثانیه در ارتفاع ۱۵/۰ متری و در مدت زمان ثابت ۲۰ دقیقه انجام شد. این مدت زمان بر اساس مدت لازم

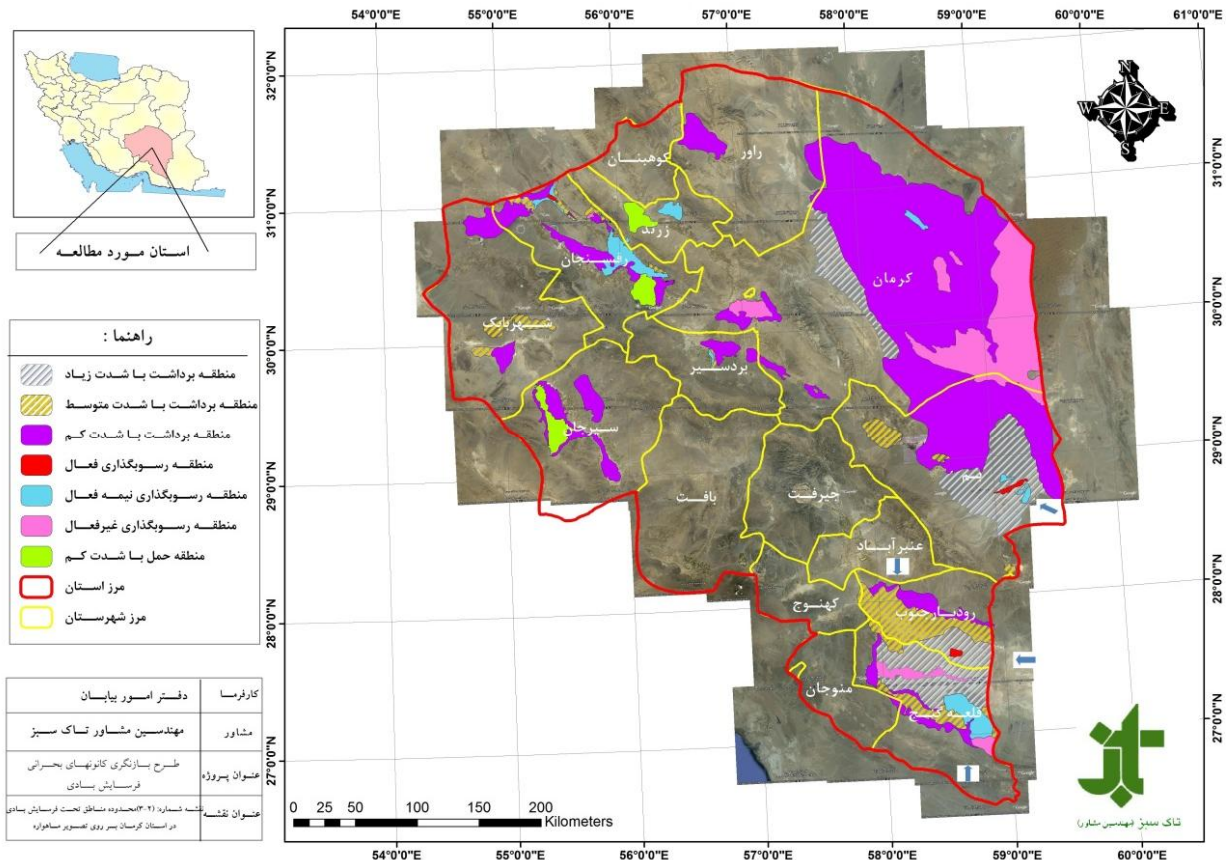
حمل، شدت فرسایش بادی و همچنین سرعت آستانه فرسایش بادی در مناطق مختلف استان کرمان اندازه‌گیری می‌شود. بنابراین پژوهش حاضر با هدف بررسی ارتباط بین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مختلف با شدت فرسایش بادی از طریق ایجاد روابط همبستگی ساده، رگرسیون تک و چندمتغیره و تعیین اثرگذارترین ویژگی‌ها در مناطق مختلف استان کرمان انجام شد. یافته‌های این پژوهش از طریق شناخت بهتر عوامل مؤثر فرسایش بادی در مناطق خشک و نیمه‌خشک در راستای مهار بهتر آن قابل استفاده است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

استان کرمان به‌عنوان محدوده مطالعاتی، در جنوب شرق کشور بین عرض جغرافیایی ۲۶ درجه و ۲۹ دقیقه تا ۳۱ درجه و ۵۸ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۴ درجه و ۲۱ دقیقه تا ۵۹ درجه و ۳۴ دقیقه شرقی قرار گرفته است (۳۶). این استان با مساحت ۱۸۳/۲۸۵ کیلومترمربع (۱۱/۲ درصد کل مساحت کشور) بزرگ‌ترین استان کشور است. اقلیم آن خشک تا نیمه‌خشک با متوسط بارش سالیانه ۱۴۰ میلی‌متر در سال است که حدود ۷۵ درصد بارش‌ها در دو فصل زمستان و بهار رخ می‌دهد (۲۶). همچنین میانگین درجه حرارت سالانه استان ۱۶/۵ درجه سانتی‌گراد است (۲۲). حداکثر سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری در قسمت‌های مختلف بین ۱۷ تا ۲۶ متر بر ثانیه متغیر است (۲۰). پژوهش‌های قبلی در زمینه تحلیل فصلی بادهای استان کرمان نشان از جهت‌های غالب جنوب غربی، غرب و شمال در استان کرمان دارد (۴۹). بادهای فرساینده در مناطق با پوشش گیاهی ضعیف و خاک‌های حساس باعث وقوع رخدادهای فرسایش شدید می‌شود (۱۵ و ۴۸).

پژوهش حاضر در کانون‌های بحرانی فرسایش بادی استان کرمان اجرا شد (شکل ۱). بر این اساس، ۶۰ نقطه از مناطق مختلف برداشت رسوبات بادی واقع در ۸ شهرستان استان انتخاب و مطالعه فرسایش بادی در آنها انجام شد. پراکنش نقاط



شکل ۱. نقشه کانون‌های بحرانی فرسایش بادی در استان کرمان در سه دسته مناطق برداشت، انتقال و رسوبگذاری و پراکنش ۶۰ نقطه منتخب در مناطق مختلف استان کرمان برای انجام آزمایش‌های اندازه‌گیری فرسایش بادی

جدول ۱. ویژگی‌های عمومی مناطق مورد مطالعه (۳۶)

نام منطقه	میانگین درجه حرارت سالانه (سانتی‌گراد)	میانگین بارش سالانه (میلی‌متر)	حداکثر سرعت باد (متر بر ثانیه)	پوشش گیاهی غالب
کرمان	۱۶/۳	۱۳۲/۴	۲۶/۰	گز، تاغ، درمنه و اسکنبیل
سیرجان	۱۷/۶	۱۳۵/۵	۲۰/۰	تاغ، درمنه و خارشتر
رفسنجان	۱۹/۰۰	۸۰/۳	۱۷/۰	گز، تاغ و اسکنبیل
شهر بابک	۱۵/۵	۱۴۸/۰	۲۰/۰	گز، تاغ و خارشتر
شهداد	۲۷/۳	۳۱/۱	۲۴/۰	تاغ، گز و خارشتر
بم	۲۳/۷	۵۴/۷	۲۰/۰	گز و تاغ
رودبار جنوب	۲۶/۹	۱۷۵/۷	۲۰/۰	گز و تاغ
بردسیر	۱۳/۴	۱۷۲/۸	۲۴/۰	تاغ، کهور، درمنه و اسپند



شکل ۲. تونل باد به کار برده شده در صحرا روی نمونه خاک‌های دست‌نخورده

دستگاه پره برشی جیبی اندازه‌گیری شد (۳). درصد سنگریزه سطحی (بزرگ‌تر از ۲ میلی‌متر) به‌روش فتوگرافی اندازه‌گیری شد (۲۴). توزیع اندازه ذرات اولیه (بافت خاک) به‌روش هیدرومتری تعیین شد (۱۶). روش الک خشک به‌منظور تعیین توزیع اندازه ذرات ثانویه استفاده شد (۲۱). بر اساس نتایج حاصل از توزیع اندازه ذرات خاک‌ها، پارامترهای توصیف‌کننده توزیع اندازه ذرات خاک از قبیل میانگین وزنی قطر ذرات ثانویه (MWD) (۲۱) و درصد خاکدانه‌های بزرگ‌تر از ۰/۲۵ میلی‌متر (DSA>0.25mm) (۲۵) تعیین شدند.

تجزیه و تحلیل آماری

تجزیه و تحلیل‌های آماری داده‌ها توسط نرم‌افزار SPSS انجام شد. در ابتدا همبستگی ساده بین ویژگی‌های خاک و نیز با شدت فرسایش بادی تعیین شد. همچنین، برای تعیین اثر ویژگی‌های خاک به‌عنوان متغیرهای مستقل بر شدت فرسایش بادی به‌عنوان متغیر وابسته، از طریق ایجاد رگرسیون تک‌متغیره بهترین روابط (از بین خطی و غیرخطی) مشخص شد. در نهایت برای تعیین مهم‌ترین عوامل مؤثر بر شدت فرسایش بادی، رگرسیون خطی چندمتغیره به‌روش گام به گام استفاده شد. برای ارزیابی رابطه حاصل، ضریب تعیین (R^2)، خطای استاندارد برآورد (SE)، خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) و کارایی

برای رسیدن به شرایط پایدار انتخاب شد (۴۸). پس از پایان هر آزمایش، رسوب به‌طور کامل از محفظه پلاستیکی جمع‌آوری و برای توزین به آزمایشگاه منتقل شد. با توجه به جرم رسوب اندازه‌گیری شده هر نقطه، سطح مورد آزمایش خاک و مدت‌زمان هر رخداد، شدت فرسایش بادی محاسبه شد. همچنین سرعت آستانه فرسایش بادی به روش مشاهده‌ای تعیین شد (۵).

اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک

از مجاور محل نصب تونل باد و از عمق ۵ سانتی‌متر سطحی، یک نمونه خاک تهیه شد. نمونه‌های خاک پس از هواخشک شدن، از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد و به‌منظور اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی به آزمایشگاه منتقل و سپس برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی بر اساس روش‌های استاندارد تعیین شد. واکنش خاک و میزان هدایت الکتریکی خاک به‌ترتیب در گل اشباع و عصاره گل اشباع (۳۰) و کربن آلی به‌روش والکلی و بلاک اندازه‌گیری شد (۴۱). غلظت سدیم و پتاسیم محلول با استفاده از فلیم‌فتومتر و کلسیم و منیزیم از طریق تیتراسیون اندازه‌گیری شد (۹). میزان کربنات کلسیم معادل به‌روش تیتراسیون انجام پذیرفت (۳۲). مقاومت برشی روی نمونه خاک دست‌نخورده و به‌صورت درجا با استفاده از

مدل (ME) از طریق روابط زیر محاسبه شد:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\left(\sum O_i^2\right) - \frac{\left(\sum O_i\right)^2}{n}} \quad (1)$$

$$SE = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n}} \quad (3)$$

$$ME = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O)^2} \quad (4)$$

که در آنها O_i و P_i مقادیر اندازه‌گیری و برآوردی برای جفت i ام داده، n تعداد کل نقاط و S انحراف معیار و O میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده است. مقادیر بالاتر ضریب تعیین و کمتر خطای استاندارد و خطای جذر میانگین مربعات پایین‌تر کارایی بهتر مدل را بیان می‌کند (۲۹). ضریب کارایی مدل بین $-\infty$ تا ۱ متغیر بوده و به‌طور گسترده‌ای برای ارزیابی مدل‌های فرسایش خاک استفاده می‌شود (۴۷).

نتایج و بحث

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها

آماره‌های توصیفی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی اندازه‌گیری شده خاک‌ها به‌ترتیب در جدول‌های (۲) و (۳) ارائه شده است. ذرات شن با میانگین ۸۴/۵۳ درصد بیشترین فراوانی را در بین ذرات اولیه دارد و درصد ذرات سیلت و رس بسیار کمتر و تقریباً نزدیک به هم است (به‌ترتیب، ۶/۸۹ درصد و ۸/۵۸ درصد). از طرفی، ضریب تغییرات برای ذرات شن (۱۵/۹ درصد) بسیار کمتر از ضریب تغییرات برای ذرات رس (۶۰/۷ درصد) و ذرات سیلت (۱۳۵/۰ درصد) است. علاوه بر این، ضریب تغییرات سیلت از همه ویژگی‌های دیگر اندازه‌گیری شده خاک بیشتر است. مقادیر قابل توجه شن در خاک‌های مورد مطالعه نشان از حساسیت زیاد در برابر جابه‌جایی ذرات از اثر نیروی باد دارد (۴۸). دامنه درصد سنگریزه سطحی خاک‌ها با میانگین ۱۴/۰۴ درصد بیانگر اهمیت پوشش سنگریزه سطحی در کنترل فرسایش بادی در شرایط

ضعیف پوشش گیاهی در مناطق خشک و نیمه‌خشک است (۲۴). مقادیر خاکدانه‌های بزرگ‌تر از ۰/۲۵ میلی‌متر و میانگین وزنی قطر خاکدانه به‌طور میانگین به‌ترتیب ۳۱/۴ درصد و ۰/۳۲ میلی‌متر است. خاک‌های مورد مطالعه شامل خاک‌های شور و غیرشور است که در دامنه ۱/۰۱ تا ۶۰/۳ دسی‌زیمنس بر متر با میانگین ۱۳/۶ دسی‌زیمنس بر متر تغییر می‌کند. بر اساس مقادیر نسبت جذب سدیم، تنوع گسترده‌ای از خاک‌های سدیمی و غیرسدیمی در منطقه مورد مطالعه وجود دارد. میانگین غلظت سدیم محلول (۳۸۳ میلی‌اکی‌والان بر لیتر) نسبت به میانگین غلظت سایر کاتیون‌های محلول (پتاسیم، کلسیم و منیزیم) بیشتر است. میزان کربن آلی خاک‌ها پایین و کمتر از ۱/۲ درصد است که در خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک با پوشش گیاهی ضعیف متداول است (۲۶). در خاک‌های مورد مطالعه میزان کربنات کلسیم معادل به‌طور میانگین ۱۶/۷ درصد است.

همبستگی ساده بین ویژگی‌های فیزیکی خاک‌ها و شدت

فرسایش بادی

نتایج همبستگی ساده بین ویژگی‌های فیزیکی خاک‌ها در جدول (۴) نشان داده شده است. بین شدت فرسایش بادی و سرعت آستانه فرسایش بادی رابطه‌ای منفی و معنی‌دار وجود داشت ($r = -0/68, P < 0/001$). همچنین ارتباط ویژگی‌های خاک با سرعت آستانه فرسایش بادی، عکس ارتباط آنها با شدت فرسایش بادی بود. از بین ویژگی‌های فیزیکی تنها درصد شن همبستگی مثبت و معنی‌داری با شدت فرسایش بادی داشت. در مقابل، بین درصد ذرات رس، سیلت، میانگین وزنی قطر خاکدانه، درصد خاکدانه‌های بزرگ‌تر از ۰/۲۵ میلی‌متر، مقاومت برشی، سنگریزه سطحی و سرعت آستانه با شدت فرسایش بادی همبستگی منفی و معنی‌دار برقرار بود. از طرفی، درصد رس و سیلت ارتباط مثبت و معنی‌داری با یکدیگر نشان دادند ($r = 0/70, P < 0/001$) و هر دوی این ذرات اولیه، از رفتار مشابهی در ارتباط با دیگر ویژگی‌های فیزیکی خاک برخوردار بودند. این درحالی است که افزایش درصد شن، همبستگی

جدول ۲. حداقل، حداکثر، میانگین، انحراف معیار و ضریب تغییرات ویژگی‌های فیزیکی خاک‌ها

ویژگی خاک	واحد	حداقل	حداکثر	میانگین	انحراف معیار	ضریب تغییرات (درصد)
رس	%	۳/۳۳	۲۷/۶۷	۸/۵۸	۵/۲۱	۶۰/۷
سیلت	%	۰/۴۹	۵۰/۶۷	۶/۸۹	۹/۳۰	۱۳۵/۰
شن	%	۳۲/۶۷	۹۶/۱۷	۸۴/۵۳	۱۳/۴۷	۱۵/۹۰
سنگریزه سطحی	%	۱/۱۰	۲۴/۹۰	۱۴/۰۴	۷/۲۹	۵۱/۹
مقاومت برشی	kPa	۱/۰۰	۱۴/۸۰	۷/۳۴	۳/۳۸	۴۶/۰
میانگین وزنی قطر خاکدانه (خشک)	mm	۰/۱۴	۰/۵۳	۰/۳۲	۰/۱۰	۳۱/۳
خاکدانه‌های بزرگ‌تر از ۰/۲۵ میلی‌متر	%	۹/۹	۵۴/۶	۳۱/۴	۱۱/۷	۳۷/۳
سرعت آستانه	m s ⁻¹	۱/۲۴	۱۰/۴۱	۵/۶۵	۲/۳۷	۴۱/۹

جدول ۳. حداقل، حداکثر، میانگین، انحراف معیار و ضریب تغییرات ویژگی‌های شیمیایی خاک‌ها

ویژگی خاک	واحد	حداقل	حداکثر	میانگین	انحراف معیار	ضریب تغییرات (درصد)
هدایت الکتریکی خاک	ds m ⁻¹	۱/۰۱	۶۰/۳۰	۱۳/۶	۱۴/۲۰	۱۰۴/۴۰
واکنش خاک	-	۶/۸۲	۸/۷۰	۷/۹۰	۰/۴۰	۵/۱۰
سدیم محلول	meq l ⁻¹	۵/۴۳	۱۳۶/۰	۳۸/۳۰	۳۵/۸۰	۹۳/۵۰
کلسیم محلول	meq l ⁻¹	۳/۲۰	۵۹/۳۰	۲۰/۰	۱۲/۶۰	۶۳/۰
منیزیم محلول	meq l ⁻¹	۰/۶۰	۱۰/۶۰	۴/۹۰	۲/۳۰	۴۶/۹۰
پتاسیم محلول	meq l ⁻¹	۰/۸۱	۱۵/۳۰	۷/۵۰	۳/۷۰	۴۹/۳۰
نسبت جذب سدیم	-	۰/۹۹	۹۲/۷۰	۱۳/۹۰	۱۶/۸۰	۱۲۰/۹۰
کربن آلی	%	۰/۲۸	۱/۲۰	۰/۷۰	۰/۳۰	۴۲/۹۰
کربنات کلسیم معادل	%	۹/۳۰	۲۴/۷۰	۱۶/۷۰	۳/۸۰	۲۲/۸۰

جدول ۴. نتایج همبستگی ساده بین ویژگی‌های فیزیکی خاک‌ها و شدت فرسایش بادی

ویژگی خاک	رس	سیلت	شن	میانگین وزنی قطر ذرات ثانویه	خاکدانه‌های بزرگ‌تر از ۰/۲۵ میلی‌متر	مقاومت برشی	سنگریزه سطحی	شدت فرسایش بادی	سرعت آستانه
رس	۱								
سیلت	۰/۷۰**	۱							
شن	-۰/۸۷**	-۰/۹۶**	۱						
میانگین وزنی قطر خاکدانه	۰/۵۸**	۰/۳۳**	-۰/۴۵**	۱					
خاکدانه‌های بزرگ‌تر از ۰/۲۵ میلی‌متر	۰/۵۸**	۰/۴۰**	-۰/۵۰**	۰/۹۷**	۱				
مقاومت برشی	۰/۴۸**	۰/۳۷**	-۰/۴۴**	۰/۶۲**	۰/۶۲**	۱			
سنگریزه سطحی	۰/۵۸**	۰/۴۰**	-۰/۵۰**	۰/۵۴**	۰/۵۳**	۰/۴۶**	۱		
سرعت آستانه	۰/۷۱**	۰/۴۷**	-۰/۶۰**	۰/۷۵**	۰/۷۵**	۰/۵۱**	۰/۷۲**	۱	-۰/۶۸**
شدت فرسایش بادی	-۰/۴۵**	-۰/۳۱**	۰/۳۹**	-۰/۵۵**	-۰/۵۲**	-۰/۴۶**	-۰/۶۲**	-۰/۶۸**	۱

** معنی‌داری در سطح یک درصد

جدول ۵. نتایج همبستگی ساده بین ویژگی‌های شیمیایی خاک‌ها و شدت فرسایش بادی

ویژگی خاک	هدایت الکتریکی	نسبت جذب سدیم	سدیم محلول	پتاسیم محلول	کلسیم محلول	منیزیم محلول	کربن آلی	کربنات کلسیم معادل	شدت فرسایش بادی
هدایت الکتریکی	۱								
نسبت جذب سدیم	۰/۵۶**	۱							
سدیم محلول	۰/۴۵**	-۰/۹۱**	۱						
پتاسیم محلول	-۰/۱۸۴	-۰/۲۸*	-۰/۴۰**	۱					
کلسیم محلول	-۰/۴۷**	-۰/۴۸**	-۰/۳۸**	۰/۳۳**	۱				
منیزیم محلول	-۰/۲۱	-۰/۳۶*	-۰/۲۱	۰/۰۸	۰/۳۱*	۱			
کربن آلی	-۰/۳۹**	-۰/۵۰**	-۰/۵۲**	۰/۱۷	۰/۴۱**	۰/۱۹	۱		
کربنات کلسیم معادل	-۰/۲۹*	-۰/۴۲**	-۰/۳۸**	۰/۱۹	۰/۴۱**	۰/۱۹	۰/۱۹	۱	
شدت فرسایش بادی	۰/۵۶**	۰/۸۲**	۰/۶۵**	-۰/۲۰*	-۰/۴۴**	-۰/۳۳*	-۰/۴۱**	-۰/۴۸**	۱

*: معنی داری در سطح یک درصد
*: معنی داری در سطح پنج درصد

به‌طور مشابهی، لی و همکاران (۲۲) نیز دریافتند که فرسایش بادی در مقادیر بالاتر سرعت آستانه به‌علت افزایش مقاومت خاک در مقابل نیروی باد کاهش می‌یابد. در واقع، با افزایش سرعت آستانه به سرعت‌های بیشتری از باد برای جداسازی و انتقال ذرات خاک نیاز است که این با مفهوم مقاومت خاک مرتبط است (۱۷).

اثر ویژگی‌های فیزیکی خاک

لازم به ذکر است که بین میزان رطوبت اولیه خاک و شدت فرسایش بادی رابطه معنی داری مشاهده نشد. ذرات رس، سیلت و شن اثرات معنی داری بر شدت فرسایش نشان دادند (جدول ۶). با افزایش درصد رس و سیلت، شدت فرسایش بادی به‌طور معنی داری و به صورت توانی کاهش یافت ($P < 0/001$, $R^2 = 0/61$). از طرفی، رابطه‌ی مثبت بین میزان شن و شدت فرسایش بادی وجود داشت ($P < 0/001$, $R^2 = 0/28$). از آنجا که خاک‌های ماسه‌ای، مقدار رس و سیلت کمتری برای تشکیل خاکدانه دارند، به‌طور اساسی فرسایش‌پذیرتر از خاک‌های ریز بافت محسوب می‌شوند (۱۲ و ۱۴). در مقایسه با ذرات درشت شن، ذرات ریزتر به‌ویژه جز رس باعث ایجاد نیروهای پیوندی قوی‌تری بین ذرات اولیه می‌شود و به تشکیل خاکدانه‌های پایدارتر کمک می‌کند (۱۳). مطالعات قبلی نشان داده که خاک‌های با مقادیر

منفی و معنی داری با سایر ویژگی‌های فیزیکی داشت. همه ویژگی‌های شیمیایی مورد مطالعه همبستگی معنی داری با شدت فرسایش بادی داشتند. از بین ویژگی‌های شیمیایی، همبستگی مثبت و معنی داری بین هدایت الکتریکی و نسبت جذب سدیم مشاهده شد (جدول ۵). علاوه بر این، خاک‌های دارای مقادیر بیشتر نسبت جذب سدیم، مقادیر بالاتری از سدیم و نیز مقادیر پایین‌تری از پتاسیم، کلسیم و منیزیم نشان دادند که بیان‌کننده سهم بالاتر سدیم در شوری خاک‌ها است. به‌علاوه، کربن آلی و کربنات کلسیم معادل دارای همبستگی منفی و معنی داری با هدایت الکتریکی و نسبت جذب سدیم بودند.

ارتباط شدت فرسایش بادی و سرعت آستانه

شدت‌های فرسایش بادی اندازه‌گیری شده خاک‌ها در دامنه ۰/۰۳ گرم بر متر مربع در دقیقه تا ۳/۴۹ گرم بر متر مربع در دقیقه بود. دامنه گسترده شدت‌های فرسایش بادی بیانگر تنوع فرسایش بادی در خاک‌های مورد مطالعه و فرسایش‌پذیری متفاوت آنها است. دامنه وسیعی از سرعت‌های آستانه فرسایش بادی بین ۱/۲۴ متر بر ثانیه تا ۱۰/۴۱ متر بر ثانیه (در ارتفاع ۰/۱۵ متر) به‌دست آمد ($CV = 41/9\%$). افزایش سرعت آستانه باعث کاهش غیرخطی (تابع توانی) فرسایش بادی ($P < 0/001$, $R^2 = 0/81$) شد (جدول ۶).

جدول ۶. نتایج رگرسیون تک‌متغیره بیانگر اثر ویژگی‌های فیزیکی خاک بر شدت فرسایش بادی در خاک‌های مورد مطالعه

ویژگی خاک	تابع	ضریب تعیین (R^2)	سطح معنی‌داری
رس	$y = 3.71 x^{-1.31}$	۰/۶۱	$P < ۰/۰۰۱$
سیلت	$y = 0.47 x^{-0.46}$	۰/۴۰	$P < ۰/۰۰۱$
شن	$y = 0.01 e^{0.04x}$	۰/۲۸	$P < ۰/۰۰۱$
سنگریزه سطحی	$y = 2.37 x^{-0.90}$	۰/۶۱	$P < ۰/۰۰۱$
مقاومت برشی	$y = 0.62 \ln(x) + 1.6$	۰/۳۵	$P < ۰/۰۰۱$
میانگین وزنی قطر خاکدانه	$y = 0.02 x^{-2.36}$	۰/۶۳	$P < ۰/۰۰۱$
خاکدانه‌های بزرگ‌تر از ۰/۲۵ میلی‌متر	$y = 153.1 x^{-1.87}$	۰/۶۱	$P < ۰/۰۰۱$
سرعت آستانه	$y = 4.02 x^{-1.66}$	۰/۸۱	$P < ۰/۰۰۱$

بیشتر رس به دلیل چسبندگی بیشتر، شدت‌های فرسایش کمتری را تجربه می‌کنند (۴۲). در واقع ذرات رس و تا حدی ذرات سیلت با افزایش خاکدانه‌سازی و افزایش چسبندگی بین خاکدانه‌ای می‌توانند شدت فرسایش و فرسایش‌پذیری خاک را کاهش دهند (۱۳ و ۴۸). از منظر دیگر، روابط غیرخطی بهتر از روابط خطی اثر ذرات اولیه خاک را بر شدت فرسایش بادی نشان می‌دهند.

علاوه بر ذرات اولیه خاک، توزیع اندازه خاکدانه نیز اثر معنی‌داری بر شدت فرسایش بادی داشت. میانگین وزنی قطر خاکدانه به‌عنوان شاخصی از توزیع اندازه خاکدانه از طریق رابطه ای توانی باعث کاهش شدت فرسایش بادی شد ($P < ۰/۰۰۱$ ، $R^2 = ۰/۶۳$). نتایج رضایی ارشد و همکاران (۳۵) مؤید این مطلب بودند که اندازه خاکدانه نقش مهمی در کاهش شدت فرسایش خاک ایفا می‌کند. همچنین درصد خاکدانه‌های بزرگ‌تر از ۰/۲۵ میلی‌متر باعث کاهش معنی‌دار شدت فرسایش بادی از طریق تابع توانی ($P < ۰/۰۰۱$ ، $R^2 = ۰/۶۱$) شد. در برخی پژوهش‌ها (۳۴، ۳۹ و ۴۸) اندازه خاکدانه ۰/۲۵ میلی‌متر به‌عنوان مرز خاکدانه‌های ریز و درشت گزارش شده است.

پوشش سنگریزه سطحی باعث کاهش معنی‌دار شدت فرسایش بادی از طریق رابطه توانی شد ($P < ۰/۰۰۱$ ، $R^2 = ۰/۶۱$). حضور سنگریزه در سطح خاک باعث ایجاد زیری تصادفی و کاهش سرعت فرساینده باد می‌شود (۱۰). همچنین باعث محافظت ذرات فرسایش‌پذیر خاک زیرین خود شده و لذا شدت فرسایش بادی را کاهش می‌دهد. علاوه بر این، وجود سنگریزه سطحی می‌تواند ذرات در حال حمل توسط باد را به‌دام بیندازد (۱۷).

اثر ویژگی‌های شیمیایی خاک‌ها

ویژگی‌های شیمیایی اثر معنی‌داری روی شدت فرسایش بادی

در خاک‌های مورد مطالعه، با افزایش مقاومت برشی شدت‌های کمتر فرسایش بادی (تابع غیرخطی لگاریتمی) مشاهده شد

جدول ۷. نتایج رگرسیون تک‌متغیره بیانگر اثر ویژگی‌های شیمیایی خاک بر شدت فرسایش بادی در خاک‌های مورد مطالعه

ویژگی خاک	تابع	ضریب تعیین (R^2)	سطح معنی‌داری
هدایت الکتریکی	$y = 0.12 x^{0.44}$	۰/۳۴	$P < 0/001$
نسبت جذب سدیم	$y = 0.03 x + 0.05$	۰/۶۸	$P < 0/001$
سدیم محلول	$y = 0.01 x + 0.05$	۰/۴۲	$P < 0/001$
کلسیم محلول	$y = 3.38 x^{-0.90}$	۰/۴۴	$P < 0/001$
پتاسیم محلول	$y = 0.65 e^{-0.11x}$	۰/۲۰	$P < 0/005$
منیزیم محلول	$y = 0.96 x^{-0.84}$	۰/۲۰	$P < 0/005$
کربن آلی	$y = 0.17 x^{-1.26}$	۰/۲۵	$P < 0/001$
کربنات کلسیم معادل	$y = 112.4 x^{-2.16}$	۰/۲۸	$P < 0/001$

و پتاسیم کاهش معنی‌دار فرسایش را در پی داشت. کلسیم با ضریب تعیین برابر با ۰/۴۴ اثر بیشتری نسبت به پتاسیم و منیزیم در کنترل شدت فرسایش نشان داد. نتایج نشان داد که از بین کاتیون‌های مورد مطالعه، سدیم به‌عنوان کاتیون مخرب و کلسیم به‌عنوان مؤثرترین کاتیون (۴۴) در کنترل شدت فرسایش بادی شناخته شد. واضح است که غلظت بالای سدیم پایداری ساختمان خاک را از طریق پراکنده کردن ذرات کاهش می‌دهد (۲۷). در مقابل، کلسیم در هم‌آوری ذرات و تشکیل خاکدانه‌های درشت و پایدار مشارکت دارد (۲۷).

افزایش کربن آلی باعث کاهش معنی‌دار شدت فرسایش بادی از طریق تابع توانی شد ($R^2 = 0/25$, $P < 0/001$). کربن آلی خاک یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های خاک است که به‌عنوان هسته و یک عامل اتصال‌دهنده ذرات در تشکیل خاکدانه عمل می‌کند (۴، ۸ و ۲۶). در واقع، حفظ و یا افزایش کربن آلی خاک می‌تواند پایداری و تشکیل خاکدانه‌ها را بهبود بخشد و در نتیجه فرسایش‌پذیری خاک را کاهش دهد (۲۵). این موضوع لزوم حفظ پوشش گیاهی در مراتع و نیز جلوگیری از خروج کربن آلی از خاک به اتمسفر به‌صورت دی‌اکسید کربن در پی مدیریت ناصحیح خاک را نشان می‌دهد.

با توجه به جدول (۷)، کربنات کلسیم معادل از طریق تابع توانی باعث کاهش معنی‌دار شدت فرسایش بادی شد ($R^2 = 0/28$, $P < 0/001$). اگرچه میزان کربن آلی خاک در مناطق

نشان دادند نتایج نشان داد که با افزایش هدایت الکتریکی ($R^2 = 0/34$, $P < 0/001$) و نسبت جذب سدیم ($P < 0/001$)، شدت فرسایش بادی به‌ترتیب از طریق روابط توانی و خطی افزایش یافت (جدول ۷). خاک‌های مورد مطالعه، دامنه وسیعی از مقادیر هدایت الکتریکی و نسبت جذب سدیم دارند که این مطلب، گویای اهمیت شوری و سدیمی بودن (شدن)، به‌عنوان تهدید جدی در تشدید فرسایش بادی خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک استان است (۱۵). در این زمینه یان و همکاران (۴۴) دریافتند که در نتیجه اثرات مخرب شوری و سدیمی خاک، پایداری خاکدانه کاهش می‌یابد. مقادیر بالای نسبت جذب سدیم از طریق نقش پراکنده‌ساز سدیم باعث ناپایداری خاکدانه می‌شود. پانایوتوپولوس و همکاران (۳۱) از نسبت جذب سطحی سدیم به‌عنوان مهم‌ترین پارامتر مؤثر بر افزایش پراکنش ذرات رس نام بردند. هر چند افزایش هدایت الکتریکی خاک ممکن است با بهبود وضعیت خاکدانه‌سازی و پایداری ساختمان خاک توأم باشد (۴۵)، ولی این ارتباط به نسبت غلظت کاتیون مخرب سدیم در برابر غلظت سایر کاتیون‌های پتاسیم، کلسیم و منیزیم بستگی دارد. نتایج نشان داد که از بین کاتیون‌های محلول، فقط سدیم اثر متفاوتی روی شدت فرسایش بادی داشت به‌طوری که با افزایش غلظت سدیم شدت فرسایش بادی به‌طور معنی‌داری افزایش یافت ($R^2 = 0/42$, $P < 0/001$). در مقابل، افزایش غلظت کلسیم، منیزیم

نتیجه‌گیری

یافته‌های پژوهش حاضر که به مطالعه تأثیر ویژگی‌های خاک بر شدت فرسایش بادی در مناطق مختلف استان کرمان پرداخت نشان داد که بسته به خاک‌های استان کرمان، دامنه وسیعی از شدت فرسایش بادی وجود دارد. صرف‌نظر از نقش باد به‌عنوان عامل فرساینده در کنترل فرسایش بادی، ویژگی‌های خاک نیز از طریق تأثیر بر فرسایش‌پذیری در مهار فرسایش بادی اهمیت دارند. در خاک‌های مستعد فرسایش بادی که مقادیر قابل توجهی شن دارند، حساسیت در برابر فرسایش بادی بیشتر است. برای مهار فرسایش بادی در این مناطق، حفظ و یا افزایش کربن آلی در راستای بهبود وضعیت ساختمان خاک و افزایش مقاومت برشی پیشنهاد می‌شود. همچنین وجود سنگریزه سطحی به‌عنوان زبری تصادفی در اراضی فاقد پوشش گیاهی در شرایطی که خاک سطحی دست‌نخورده باقی بماند، می‌تواند کاهش فرسایش را در پی داشته باشد. سایر جنبه‌های تخریب اراضی نظیر شور و سدیمی شدن نیز بر تشدید فرسایش بادی مؤثرند. البته اثر هدایت الکتریکی روی فرسایش بادی بستگی به نوع و غلظت کاتیون‌های محلول اصلی خاک دارد. به‌دلیل مقدار اندک کربن آلی در خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک، وجود کربنات کلسیم معادل به‌عنوان منبع کربن غیرآلی اهمیت زیادی در کنترل شدت فرسایش بادی دارد. در مجموع، یافته‌های این پژوهش نشان داد که در مناطق با ویژگی‌های اقلیمی و خاکشناسی مشابه، اصلاح وضعیت ساختمان خاک و نیز جلوگیری از شور و سدیمی شدن اراضی بر پایه مدیریت صحیح، اصولی و پایدار منابع خاک می‌تواند تا حد زیادی باعث مهار فرسایش بادی در مناطق مشابه شود.

خشک و نیمه‌خشک کم است، کربنات کلسیم معادل به‌عنوان منبع کربن غیرآلی در خاک‌های آهکی مطرح است (۴۶). کربنات کلسیم معادل همچنین یکی از عوامل کنترل‌کننده پایداری ساختمان خاک است (۳۸) که می‌تواند باعث هم‌آوری ذرات اولیه شود (۲). در خاک‌های درشت دانه با مقادیر کم رس و سیلت، کربنات کلسیم معادل از طریق ایجاد پیوند بین ذرات شن و تشکیل خاکدانه‌ها می‌تواند فرسایش خاک را کاهش دهد. چپیل (۱۲) نشان داد که اثر کربنات کلسیم معادل بر فرسایش به بافت خاک بستگی دارد و لذا کربنات کلسیم معادل خاکدانه‌سازی را فقط در خاک‌های شنی و شنی لومی بهبود بخشید. مقایسه نتایج همبستگی ساده و روابط رگرسیون تک‌متغیره، بیانگر غالبیت روابط غیرخطی نسبت به روابط خطی در توصیف بهتر ارتباط ویژگی‌های خاک با شدت فرسایش بادی است.

مؤثرترین ویژگی‌های خاک

به منظور تعیین مهم‌ترین ویژگی‌های خاک که قادر به کنترل بهتر شدت فرسایش بادی در خاک‌های مورد مطالعه باشد، از رگرسیون خطی چندمتغیره به‌روش گام به گام استفاده شد. نتایج نشان داد که از بین ویژگی‌های مورد مطالعه در این پژوهش، نسبت جذب سدیم (SAR) و میانگین وزنی قطر خاکدانه (MWD) مهم‌ترین ویژگی‌های مؤثر بر شدت فرسایش بادی (WE) هستند، $WE = 0.47 + 0.0255SAR - 1.144MWD$ ، در این رابطه که در سطح یک درصد معنی‌دار بود، مقادیر ضریب تعیین (R^2)، خطای استاندارد برآورد (SE)، خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) و کارایی مدل (ME) به‌ترتیب برابر با ۰/۷۱، ۰/۳۱، ۰/۳۱ و ۰/۵۹ تعیین شد.

منابع مورد استفاده

1. Arjmand Sajjadi, S. and M. Mahmoodabadi. 2015. Sediment concentration and hydraulic characteristics of rain-induced overland flows in arid land soils. *Journal of Soils and Sediments* 15: 710-721.
2. Asensio, C., F. J. Lozano, E. Ortega and Z. Kikvidze. 2015. Study on the effectiveness of an agricultural technique based on Aeolian deposition, in a semiarid environment. *Environmental Engineering and Management* 14: 1143-1150.

3. Bachman, J., K. Contreras, K. H. Hartage and R. MacDonald. 2006. Comparison of soil strength data obtained in situ with penetrometer and with vane shear test. *Soil and Tillage Research* 87: 112-118.
4. Barton, L., F. Hoyle, K. Stefanova and D. Murphy. 2016. Incorporating organic matter alters soil greenhouse gas emissions and increases grain yield in a semiarid climate. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 231: 320-330.
5. Belnap, J., S. L. Philips, J. E. Herrick and J. R. Johansen. 2007. Wind erodibility of soils at Fort Irwin, California (Mojave Desert), USA, before and after trampling disturbance: implications for land management. *Earth Surface Processes and Landforms* 32: 75-84.
6. Blanco-Canqui, H. and S. J. Ruis. 2018. No-tillage and soil physical environment. *Geoderma* 326: 164-200.
7. Borrelli, P., E. Lugato, L. Montanarella and P. Panagos. 2016. A new assessment of soil loss due to wind erosion in European agricultural soils using a quantitative spatially distributed modeling approach. *Land Degradation and Development* 28: 335-344.
8. Bronick, C. J. and R. Lal. 2005. Manuring and rotation effects on soil organic carbon concentration for different aggregate size fractions on two soils in northeastern Ohio, USA. *Soil and Tillage Research* 81: 239-252.
9. Chapman, H. D. 1965. Cation exchange capacity. In: Black, C. A. (Eds.), *Methods of Soil Analysis- Chemical and microbiological properties*. *Agronomy* 9: 891-901.
10. Chappell, A., N. P. Webb, J. P. Guerschman, D. T. Thomas, G. Mata, R. N. Handcock, J. F. Leys and H. J. Butler. 2018. Improving ground cover monitoring for wind erosion assessment using MODIS BRDF parameters. *Remote Sensing of Environment* 204: 756-768.
11. Cheng, H., C. Liu, J. Li, X. Zou, B. Liu, L. Kang and Y. Fang. 2017. Wind erosion mass variability with sand bed in a wind tunnel. *Soil and Tillage Research* 165: 181-189.
12. Chepil, W. S. 1953. Factors that influence clod structure and erodibility of soil by wind: Water-stable structure. *Soil Science* 76: 389-400.
13. Ciric, V., M. Manojlovic, L. J. Nestic and M. Belic. 2012. Soil dry aggregate size distribution: effects of soil type and land use. *Soil Science and Plant Nutrition* 12(4): 689-703.
14. Colazo, J. C. and D. E. Buschiazzo. 2010. Soil dry aggregate stability and wind erodible fraction in a semiarid environment of Argentina. *Geoderma* 159: 228-236.
15. Gee, G. W. and J. W. Bauder. 1986. Particle-size analysis, hydrometer method. PP. 404-408. In: A. Klute (Eds.), *Methods of Soil Analysis, Part I*, 3rd Ed., American Society Agronomy, Madison, WI.
16. Gillies, J. A., W. G. Nickling, G. Nickolich and V. A. Etyemezian. 2017. Wind tunnel study of the aerodynamic and sand trapping properties of porous mesh 3-dimensional roughness elements. *Aeolian Research* 25: 23-35.
17. Giuffrida, F., C. Carla, M. Angelo and L. Cherubino. 2016. Effects of salt stress imposed during two growth phases on cauliflower production and quality. *The Science of Food and Agriculture* 97: 1552-1560.
18. Hagen, L. J., R. S. van Pelt and B. Sharratt. 2010. Estimating the saltation and suspension components from field wind erosion. *Aeolian Research* 1: 147-153.
19. Iran Meteorological Organization. 2017. Meteorological Report of Kerman Province.
20. Kemper, W. D. and R. C. Rosenau. 1986. Aggregate stability and size distribution. PP. 425-442. In A. Klute, (Eds.), *Methods of Soil Analysis. Part I*. 2nd Ed. Agron. Monogr. 9. ASA. Madison, WI.
21. Kheirabadi, H., M. Mahmoodabadi, V. R. Jalali and H. Naghavi. 2018. Sediment flux, I wind erosion and net erosion influenced by soil bed length, wind velocity and aggregate size distribution. *Geoderma* 323: 22-30.
22. Li, X. L., L. Y. Liu and J. H. Wang. 2004. Wind tunnel simulation of Aeolian sandy soil erodibility under human disturbance. *Geomorphology* 59: 3-11.
23. Mahmoodabadi M. and A. Cerdà. 2013. WEPP calibration for improved predictions of interrill erosion in semi-arid to arid environments. *Geoderma* 204-205: 75-83.
24. Mahmoodabadi M. and B. Ahmadbeigi. 2013. Dry and water-stable aggregates in different cultivation systems of arid region soils. *Arabian Journal of Geosciences* 6: 2997-3002.
25. Mahmoodabadi M. and E. Heydarpour. 2014. Sequestration of organic carbon influenced by the application of straw residue and farmyard manure in two different soils. *International Agrophysics* 28(2): 169-176.
26. Mahmoodabadi, M. and R. Rezaei Arshad. 2018. Long-term evaluation of water quality parameters of the Karoun River using a regression approach and the adaptive neuro-fuzzy inference system. *Marine Pollution Bulletin* 126: 372-380.
27. Mahmoodabadi, M., N. Yazdanpanah, L. R. Sinobas, E. Pazira and A. Neshat. 2013. Reclamation of calcareous saline sodic soil with different amendments: impact of nitrogen, phosphorous and potassium Redistribution and on microbial respiration. *Agricultural Water Management* 120: 39-45.
28. Mazaheri, M. R. and M. Mahmoodabadi. 2012. Study on infiltration rate based on primary particle size distribution data in arid and semiarid region soils. *Arabian Journal of Geosciences* 5(5): 1039-1046.
29. Nash, J. E. and J. V. Sutcliffe. 1970. River flow forecasting through conceptual models. Part 1. A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10: 282-290.

30. Page, A. L., R. H. Miller and D. R. Jeeney. 1992. *Methods of Soil Analysis, Part 2. Chemical and Mineralogical Properties*. SSSA, USA.
31. Panayiotopoulos, K. P., N. Barbayiannis and K. Papatolios. 2004. Influence of electrolyte concentration, sodium adsorption ratio, and mechanical disturbance on dispersed clay particle size and critical flocculation concentration in Alfisols. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 35: 1415-1434.
32. Pansu, M. and J. Gautheyrou. 2006. *Handbook of Soil Analysis, Mineralogical, Organic and Inorganic Methods*. Springer.
33. Presley, D. and J. Tatarko. 2009. *Principles of wind erosion and its control*. Kansas State University. Available at: <http://www.weru.ksu.edu>.
34. Puget, P., C. Chenu and J. Balasdent. 2000. Dynamics of soil organic matter associated with particle-size fractions of water-stable aggregates. *European Journal of Soil Science* 51: 595-605.
35. Rezaei Arshad, R., M. Mahmoodabadi, M. H. Farpoor and M. Fekri. 2019. Experimental investigation of rain-induced splash and wash processes under wind-driven rain. *Geoderma* 337: 1164-1174.
36. Shahabinejad, N., M. Mahmoodabadi, A. Jalalian and E. Chavoshi. 2019. The fractionation of soil aggregates associated with primary particles influencing wind erosion rates in arid to semiarid environments. *Geoderma* 356: 113936.
37. Shao, Y. 2008. *Physics and Modelling of Wind Erosion*, 2nd Ed. Springer.
38. Sirjani, E., A. Sameni, A. A. Moosavi, M. Mahmoodabadi and B. Laurent. 2019. Portable wind tunnel experiments to study soil erosion by wind and its link to soil properties in the Fars province, Iran. *Geoderma* 333: 69-80.
39. Six, J., G. Guggenberger, K. Paustian, L. Haumaier, E. T. Elliott and W. Zech. 2001. Sources and composition of soil organic matter fractions between and within soil aggregates. *Soil Science* 52: 607-618.
40. Van Pelt, R. S., M. C. Baddock, T. M. Zobeck, V. Acosta-Martinez, A. J. Schlegel and M. F. Vigil. 2013. Field wind tunnel testing of two silt loam soil on the North American Central High plains. *Aeolian Research* 10: 53-59.
41. Walkley, A. and I. A. Black. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science* 37: 29-38.
42. Webb, N. P., C. L. Strong, A. Chappell, S. K. Marx and G. H. McTainsh. 2013. Soil organic carbon enrichment of dust emissions: magnitude, mechanisms and its implications for the carbon cycle. *Earth Surface Processes and Landforms* 38: 1662-1671.
43. Webb, N. P., J. E. Herrick and M. C. Duniway. 2014. Ecological site-based assessments of wind and water erosion, informing accelerated soil erosion management in rangelands. *Ecological Applications* 24: 1405-1420.
44. Yan, N., P. Marschner, W. Cao, C. Zuo and W. Qin. 2015. Influence of salinity and water content on soil microorganisms. *International Soil and Water Conservation Research* 3: 316-323.
45. Yazdanpanah, N., E. Pazira, A. Neshat, H. Naghavi, A. A. Moezi and M. Mahmoodabadi. 2011. Effect of some amendments on leachate properties of a calcareous saline-sodic soil. *International Agrophysics* 25(3): 307-310.
46. Yazdanpanah, N., M. Mahmoodabadi and A. Cerda. 2016. The impact of organic amendments on soil hydrology, structure and microbial respiration in semiarid lands. *Geoderma* 266: 58-65.
47. Yu, B. and J. Rosewell. 2001. Evaluation of WEPP for runoff and soil loss prediction at Gunnedah, NSW. Australia. *Australian Journal of Soil Research* 39: 1131-1145.
48. Zamani, S. and M. Mahmoodabadi. 2013. Effect of particle-size distribution on wind erosion rate and soil erodibility. *Archives of Agronomy and Soil Science* 59(12): 1743-1753.
49. Zamani, S., M. Mahmoodabadi, N. Yazdanpanah and M. H. Farpoor. 2019. Wind erosion potential of Kerman province using seasonal analysis of wind rose and sand rose. *Journal of Water and Soil* 33(1): 83-101. (In Farsi).

The Influence of Soil Properties on the Wind Erosion Rate at Different Regions of Kerman Province

N. Shahabinejad¹, M. Mahmoodabadi^{2*}, A. Jalalian¹ and E. Chavoshi¹

(Received: October 5-2019; Accepted: April 8-2020)

Abstract

Wind erosion is known as one of the most important land degradation aspects, particularly in arid and semi-arid regions. Soil properties, by affecting soil erodibility, can control the wind erosion rate. The aim of this study was to attribute the soil physical and chemical properties to the wind erosion rate for the purpose of determining the most important property. To this aim, wind erosion rates were measured in-situ at 60 points of Kerman province using a portable wind tunnel facility. The results indicated that wind erosion rates varied from $0.03 \text{ g m}^{-2} \text{ min}^{-1}$ to $3.41 \text{ g m}^{-2} \text{ min}^{-1}$. Threshold wind velocity decreased wind erosion rate following a power function ($R^2=0.81$, $P<0.001$). Clay and silt particles, shear strength, mean weight diameter (MWD), surface gravel, dry stable aggregates ($\text{DSA}<0.25\text{mm}$), soil organic carbon (SOC), calcium carbonate equivalent (CCE) and the concentrations of the soluble Ca^{2+} , K^{+} and Mg^{2+} were inversely proportional to the wind erosion rates following nonlinear functions. On the other hand, Wind erosion was significantly enhanced with increasing the sand fraction, soluble Na^{+} , electrical conductivity (EC) and sodium adsorption ratio (SAR). According to the final results, among the studied soil properties, SAR and MWD were the most effective properties controlling wind erosion in the soils of Kerman province. Therefore, it is recommended to consider suitable conservation practices in order to prevent the sodification and degradation of arid soils.

Keywords: Particle size distribution, Soil structure, Threshold velocity, Random roughness, Soil erosion.

1. Department of Soil Science, College of Agriculture, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran.

2. Department of Soil Science, Agriculture Faculty, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.

*: Corresponding author, Email: mahmoodabadi@uk.ac.ir