

مطالعات جغرافیایی مناطق خشک

دوره دهم، شماره سی و هشتم، زمستان ۱۳۹۸

تأیید نهایی: ۱۳۹۸/۱۱/۲۱

دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۱۲/۲۴

صص ۱-۱۳

**بررسی سرعت آستانه‌ی فرسایش بادی و تأثیرپذیری آن از خصوصیات خاک
در کانون‌های تولید گردوغبار استان البرز**

صادق ظهرابی، کارشناس ارشد بیابان‌زدایی-دانشگاه تهران

حسن خسروی*، دانشیار بیابان‌زدایی-دانشگاه تهران

طیبه مصباح‌زاده، استادیار بیابان‌زدایی-دانشگاه تهران

محمد جعفری، استاد مرتعداری-دانشگاه تهران

مصطفی دستورانی، استادیار بیابان‌زدایی، دانشگاه حکیم سبزواری

چکیده

گردوغبار یکی از مخاطرات طبیعی است که عمدتاً در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان رخ می‌دهد و به همین دلیل یکی از معضلات اصلی کشور ایران نیز به شمار می‌رود. استان البرز از جمله مناطقی است که به دلیل شرایط آب و هوایی، کاهش بارندگی و وجود منشأهای داخلی تولید گردوغبار در سال‌های اخیر به شدت در معرض طوفان‌های محلی گردوغبار قرار گرفته است. در این پژوهش به بررسی خصوصیات خاک و تأثیر آن بر فرسایش بادی و سرعت آستانه در کانون‌های تولید گردوغبار استان البرز پرداخته شده است. در منطقه‌ی مطالعاتی، ۲۷ نمونه خاک تا عمق ۵ سانتی‌متری جمع‌آوری و به آزمایشگاه منتقل گردید. همچنین از دستگاه تونل باد جهت اندازه‌گیری سرعت آستانه استفاده شد. مطالعات حاصل از تحلیل گلباد و گل‌طوفان در منطقه نشان داد که جهت باد غالب در منطقه، از شمال غرب است و بیش از نیمی از بادهای منطقه دارای توان فرسایشی می‌باشند و توانایی جابجایی ذرات خاک و تولید گردوغبار را دارند. به منظور بررسی رابطه‌ی خصوصیات خاک و سرعت آستانه، از آزمون رگرسیون و روش حذف پس‌رو استفاده شد. نتایج نشان داد رطوبت خاک، اندازه‌ی ذرات، میزان آهک و مقاومت برشی و فشاری خاک، تأثیرگذارترین پارامترهای مؤثر بر سرعت آستانه هستند. هرچه میزان آهک در خاک بیشتر باشد، با ایجاد چسبندگی بیشتر ذرات، مقاومت فشاری و برشی خاک و همچنین سرعت آستانه افزایش می‌یابد؛ از جهتی با افزایش درصد ذرات با قطر بین ۰/۱ تا ۰/۵ میلی‌متر در خاک، سرعت آستانه کاهش می‌یابد. میزان درصد سدیم در خاک‌های نمونه‌برداری شده بسیار بالاست و همین عامل باعث از هم‌پاشیدگی ذرات خاک و کاهش سرعت آستانه‌ی فرسایش بادی در منطقه‌ی مورد مطالعه می‌شود. نتایج پژوهش نشان داد که رطوبت، مهم‌ترین و بارزترین پارامتر مؤثر بر سرعت آستانه‌ی فرسایش بادی در کانون گردوغبار است.

واژگان کلیدی: فرسایش بادی، رطوبت خاک، تونل باد، اندازه‌ی ذرات، روش حذف پس‌رو، البرز.

* Email: hakhosravi@ut.ac.ir

نویسنده‌ی مسئول:

این مقاله مستخرج از پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد دانشجو با عنوان «بررسی خصوصیات اداپتیکی کانون‌های ریزگرد بیابانی (مطالعه‌ی موردی استان البرز)» می‌باشد.

۱- مقدمه

پدیده‌ی گردوغبار یکی از پدیده‌های مخرب و رایج در نواحی خشک و بیابانی جهان و ایران است که می‌تواند آثار زیان‌باری را بر روی زندگی انسان و محیط‌زیست داشته باشد (آذرنیوند و همکاران، ۱۳۹۳: ۳۰۰). زمانی که بر اثر پیدایش شیب میان دو سرزمین باد می‌وزد، شرایط برای پیدایش طوفان‌های گردوغباری را فراهم می‌کند. طوفان گردوغبار که به‌عنوان رویدادی تکرارشونده در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان، از بلایای طبیعی به شمار می‌آید، در عرض جغرافیایی ۴۰ درجه شمالی و جنوبی کره‌ی زمین بیش‌تر از سایر نقاط جهان رخ می‌دهد (موحدی و همکاران، ۱۳۹۲: ۳۷). کشور ایران در یک منطقه با آب‌وهوای خشک قرار گرفته است و بیش از ۷۰ درصد از مساحت این کشور را مناطق خشک و نیمه‌خشک دربرمی‌گیرد و فرسایش بادی یکی از عوامل اصلی محدودکننده‌ی حاصلخیزی خاک در بسیاری از نقاط دنیا از جمله ایران به شمار می‌رود (Zhao et al., 2006: 71). در غرب و جنوب غرب ایران، فرسایش بادی در رده‌ی مهم‌ترین مشکلات زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی قرار دارد (ابراهیمیان و همکاران، ۱۳۹۲: ۳) که باعث می‌شود در خاک، روند قهقرایی به وجود آید (Webb et al., 2017: 85). مهار فرسایش بادی زمانی مؤثر خواهد بود که اطلاعات کافی در خصوص عوامل مؤثر بر آن از جمله قدرت فرساینده‌ی باد و پتانسیل فرسایش‌پذیری خاک در دسترس باشد (رفاهی، ۱۳۸۲: ۳۲۰). "فرسایش‌پذیری" به ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی خاک بستگی دارد؛ درحالی‌که "فرساینده‌ی" به فیزیک باد مانند سرعت و جهت آن مربوط می‌شود (Liu et al., 2007: 611). به‌طورکلی خطر فرسایش بادی در مناطقی شدیدتر است که خاک سست، خشک و برهنه بوده و بادهای با سرعت و تکرار زیاد وجود داشته باشند (Kardous et al., 2005: 3199). اندازه و پایداری خاکدانه‌ها از عوامل مهم اثرگذار بر فرسایش بادی هستند (Negyesi et al., 2004: 588). مقاومت خاک‌های با بافت سنگین در برابر فرسایش بادی نسبت به خاک‌های با بافت سبک بیش‌تر است (Pásztor et al., 2016: 2421).

نتایج بررسی‌های انجام‌شده نشان می‌دهد که پدیده‌ی فرسایش بادی ماهیت بسیار پیچیده‌ای دارد و عوامل متعددی از جمله ویژگی‌های خاک از طریق تأثیر بر فرسایش‌پذیری آن بر شدت فرسایش بادی تأثیر می‌گذارند. Ravi و همکاران (۲۰۰۶) دریافتند که سرعت آستانه‌ی فرسایش برشی در سطح خاک خشک نسبت به خاک مرطوب کم‌تر است. مطالعات دانگ و همکاران (۲۰۰۷) نشان داد رطوبت سطح خاک یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر حرکت ذرات خاک توسط باد است. Cornelis و همکاران (۲۰۰۴) بیان داشتند که رطوبت خاک سطحی، اندازه و چگالی ذرات خاک از جمله عواملی هستند که بر سرعت آستانه تأثیر می‌گذارند. محمودآبادی و همکاران (۱۳۹۰) به مطالعه‌ی اثر توزیع اندازه‌ی ذرات بر شدت فرسایش بادی پرداختند و به این نتیجه رسیدند که با افزایش اندازه‌ی ذرات از شدت فرسایش بادی کاسته می‌شود. نتایج تحقیقات امین و همکاران (۱۳۹۴) و دیمن و مصطفی‌زاده (۱۳۹۴) در بررسی منشأ، اثرات و راهکارهای پدیده‌ی گردوغبار در ایران نشان داد که تغییر اقلیم، فعالیت‌های انسانی و الگوهای سکونت انسانی موجب افزایش تخریب خاک، بیابان‌زایی و تخریب مواد مغذی موردنیاز گیاهان شده که این عوامل موجب تشدید طوفان‌های گردوغبار می‌گردد. نتایج مطالعات محمودآبادی و همکاران (۱۶۷) نشان داد کربن و ماده‌ی آلی خاک می‌تواند باعث چسبندگی خاکدانه‌ها و مقاومت بیش‌تر خاک به فرسایش شود.

یکی از مهم‌ترین گام‌های مقابله با پدیده‌ی گردوغبار و آثار مخرب آن‌ها، شناسایی کانون‌های گردوغبار و تشخیص و بررسی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک در این مناطق است. درواقع، بدون اطلاع از ویژگی‌های خاک کانون‌های مولد طوفان‌های گردوغبار، نمی‌توان به مقابله‌ی سریع با آن‌ها برخاست. مطالعات رایگانی و همکاران (۱۳۹۵) نشان داد که کانون‌های بالفعل تولید گردوغبار وسعت زیادی از استان البرز را به خود اختصاص داده‌اند و از طرفی به دلیل هم‌مرز بودن با بیابان‌های دشت بوئین‌زهرا در استان قزوین پهنه‌ی گردوغبارخیز وسیع‌تری را در مقابل باد قرار داده‌اند و به‌عنوان یک تهدید جدی محسوب می‌شوند. از این‌رو، در این پژوهش به بررسی نقش و تأثیر خصوصیات خاک بر سرعت آستانه‌ی فرسایش بادی و وقوع پدیده‌ی گردوغبار در کانون‌های فعال استان البرز پرداخته شده است.

۲- منطقه‌ی مورد مطالعه

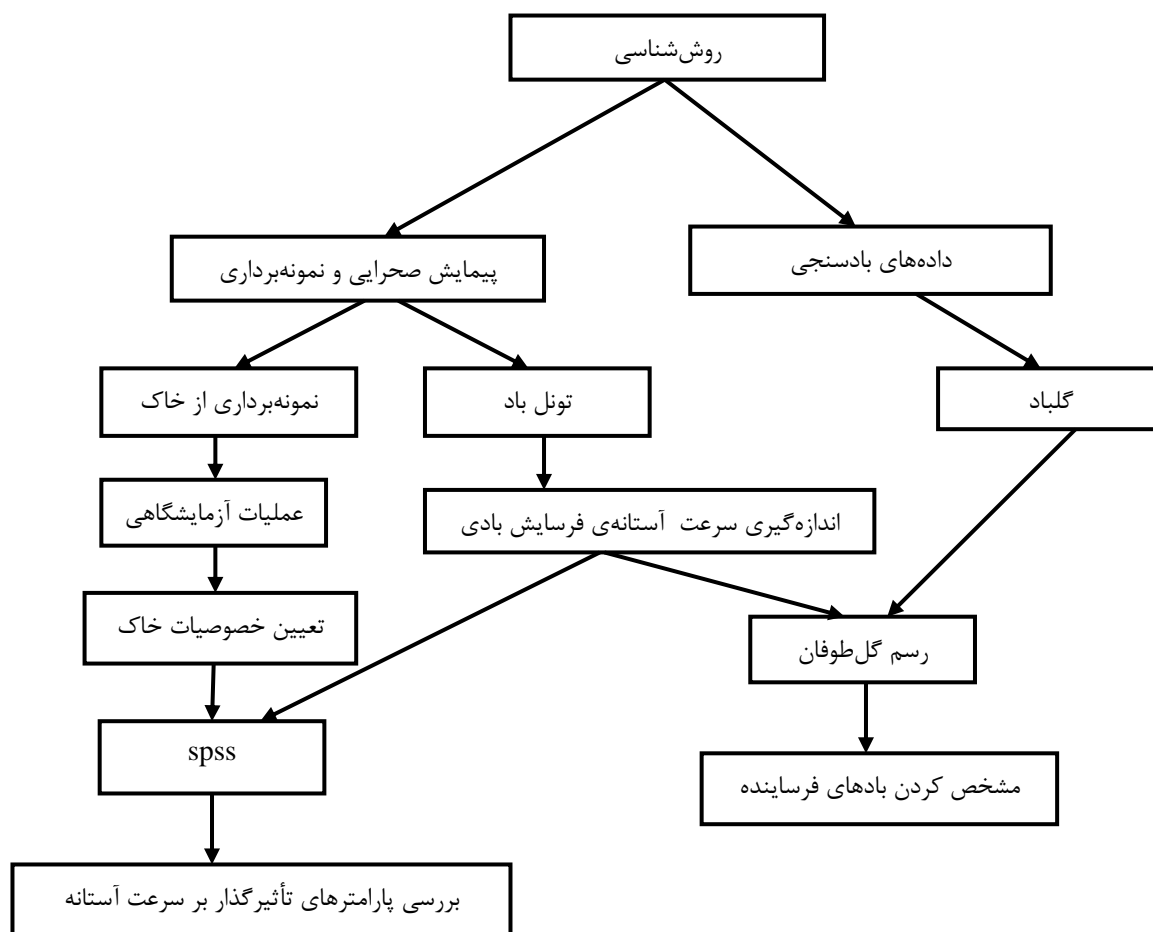
استان البرز با مساحت حدود ۵۱۴۱۸۶ هکتار بین عرض جغرافیایی $35^{\circ} 32'$ تا $36^{\circ} 20'$ شمالی و طول جغرافیایی $50^{\circ} 09'$ تا $51^{\circ} 27'$ شرقی واقع شده است. این استان در نیمه‌ی شمال ایران قرار گرفته است و از شمال به استان مازندران، از جنوب به استان مرکزی، از شرق به استان تهران و از غرب و شمال غرب به استان قزوین محدود می‌شود (شکل ۱). ارتفاعات البرز، مهم‌ترین نقش را در شکل‌گیری اقلیم استان به عهده دارند. استان البرز در فصول سرد سال متأثر از سیستم‌های شمالی و شمال غربی و غربی به‌ویژه جنوب غربی بوده و ریزش‌های آن متأثر از فعالیت این سیستم‌ها می‌باشند. بارندگی‌های این منطقه از ماه‌های آبان و آذر آغاز و تا اواسط اردیبهشت‌ماه ادامه می‌یابد. اقلیم بیابانی در قسمت‌های جنوبی و اقلیم‌های نیمه‌ی مرطوب و مرطوب در قسمت‌های شمالی قرار دارد. پوشش گیاهی در این نواحی مناسب نبوده و فقط به هنگام بهار و سال‌های پر باران دارای رشد و نمو کافی است. مراتع استان البرز نیز به علت چرای بی‌رویه‌ی دام، ظرفیت مفید خود را از دست داده که به دنبال آن پتانسیل فرسایش‌پذیری خاک افزایش پیدا کرده است.



شکل ۱: نقشه‌ی موقعیت منطقه‌ی مورد مطالعه

۳- روش تحقیق

جهت اجرای پژوهش حاضر با استفاده از داده‌های بادسنجی ایستگاه کرج در بازه‌ی زمانی ۲۰۰۰-۲۰۱۶ جهت داده‌های غالب در منطقه مشخص گردید. سپس با استفاده از دستگاه تونل باد سرعت آستانه‌ی فرسایش بادی در مناطق نمونه‌برداری برآورد گردید. در مناطق نمونه‌برداری، علاوه بر اندازه‌گیری سرعت آستانه، تعداد ۲۷ نمونه خاک از عمق ۱ تا ۵ سانتی‌متری جمع‌آوری شد. پارامترهای خاک (آهک، سدیم، فسفر، کلسیم، منیزیم، ماده‌ی آلی، ازت، رطوبت، مقاومت برشی، مقاومت فشاری، درصد ذرات با قطر بین $0/1$ تا $0/5$ میلی‌متر، EC و pH) در آزمایشگاه اندازه‌گیری شد (کازمی و همکاران، ۱۳۹۷: ۵۶). در نهایت با استفاده از سرعت آستانه‌ی به‌دست‌آمده و داده‌های بادسنجی گلباد و گل-طوفان منطقه رسم گردید و رابطه‌ی بین خصوصیات خاک و سرعت آستانه به دست آمد. شکل (۲) روش نمودار جریانی تحقیق را نشان می‌دهد.



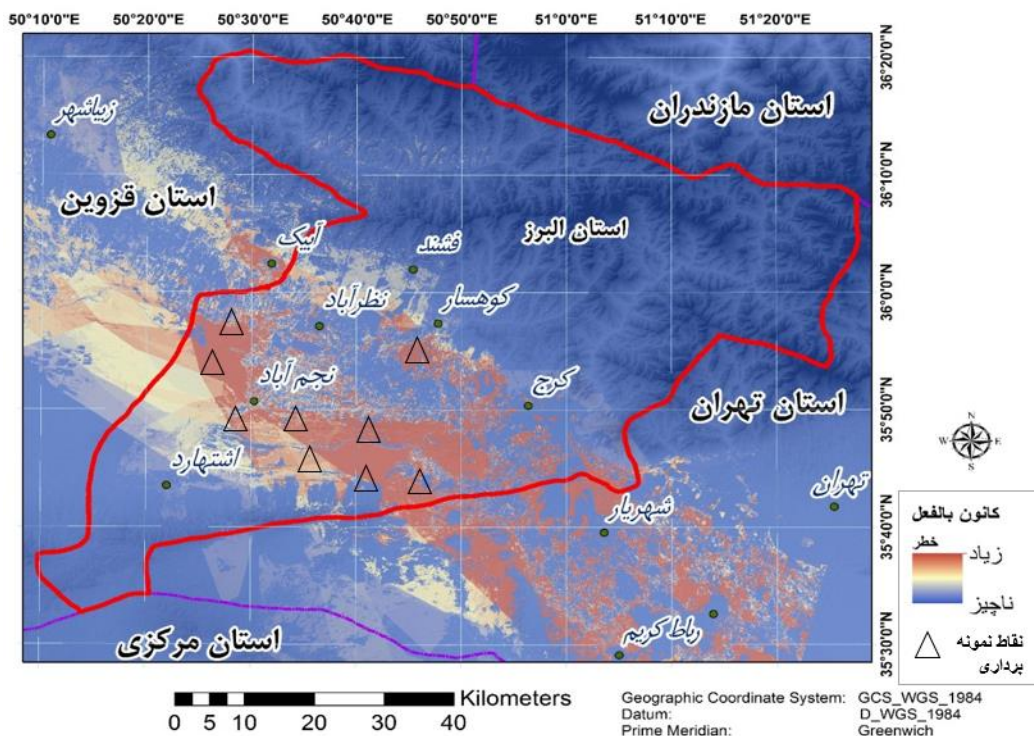
شکل ۲: نمودار جریان‌ی تحقیق

مراحل تحقیق به شرح زیر توصیف می‌شود:

مرحله‌ی اول: با استفاده از مطالعات (رایگانی و همکاران، ۱۳۹۵: ۶) موقعیت کانون‌های بالفعل تولید گردوغبار در استان البرز مشخص شد.

مرحله‌ی دوم: پس از بازدید میدانی، موقعیت مناطق نمونه‌برداری، ۹ سایت نمونه‌برداری، در کانون‌های تولید گردوغبار استان مشخص گردید. شکل ۳ کانون‌های بالفعل تولید گردوغبار و نقاط نمونه‌برداری را نشان می‌دهد.

مرحله‌ی سوم: با توجه به هدف تحقیق و مطالعات صحرائی جهت آنالیز پارامترهای خاک در هر منطقه اقدام به نمونه‌برداری خاک در عمق سطحی (که تحت تأثیر فرسایش بادی قرار دارد) شد. نمونه‌های خاک به آزمایشگاه انتقال یافته و ویژگی‌های مورد مطالعه بر روی هر نمونه خاک مورد آنالیز قرار گرفت.



شکل ۳: نقشه‌ی کانون‌های بالفعل تولید گردوغبار و پراکنش نقاط نمونه‌برداری (رایگانی و همکاران، ۱۳۹۵)

مرحله‌ی چهارم: جهت اندازه‌گیری سرعت آستانه‌ی فرسایش بادی در ۹ نقطه‌ی پایلوت از دستگاه تونل باد استفاده شد. کف دستگاه تونل باد بر سطح خاک قرار گرفت، به طوری که جهت باد غالب با دستگاه هم‌جهت و سطح خاک با کف تونل باد کاملاً تراز بود تا باعث بهم خوردن ساختمان خاک نگردد. در هر نقطه‌ی نمونه‌برداری، سرعت آستانه‌ی فرسایش باد با تنظیم سرعت باد دستگاه به وسیله‌ی کلید تنظیم‌کننده اندازه‌گیری شد. با اولین حرکت ذره‌ی خاک، سرعت آستانه‌ی دستگاه تونل باد توسط دستگاه بادسنج اندازه‌گیری و ثبت گردید (عظیم‌زاده، ۱۳۸۲: ۸).



شکل ۴: اندازه‌گیری سرعت آستانه‌ی فرسایش بادی دستگاه تونل باد

مرحله‌ی پنجم: به منظور رسم گلباد و گل‌طوفان منطقه، از داده‌های بادسنجی جمع‌آوری شده از ایستگاه‌های هواشناسی استان البرز و سرعت آستانه‌ی فرسایش بادی برآورد شده، استفاده گردید. برای رسم گلباد داده‌های بادسنجی ایستگاه سینوبتیک منطقه در دوره‌ی آماری ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۶ به محیط نرم‌افزار WRplot وارد شده و سپس گلباد منطقه که نشان‌دهنده‌ی سرعت، جهت و فراوانی بادهای منطقه و نیز میزان و جهت بادهای غالب رخ داده است،

رسم گردید. همچنین برای رسم گل‌طوفان، با به‌کارگیری سرعت آستانه‌ی فرسایش بادی که در عملیات صحرایی و با استفاده از دستگاه تونل باد محاسبه گردید، نمودار گل‌طوفان رسم گردید (احمدی، ۱۳۸۷: ۴۳۰) که این نمودار جهت فراوانی بادهای فرساینده در منطقه را که باعث ایجاد فرسایش بادی و جابجایی ذرات خاک می‌شوند، نشان می‌دهد. مرحله‌ی ششم: جهت بررسی تأثیر ویژگی‌های اندازه‌گیری‌شده بر روی سرعت آستانه‌ی فرسایش بادی از آزمون رگرسیون چندمتغیره و روش حذف پس‌رو استفاده شد. در این روش، ویژگی‌های خاک اندازه‌گیری‌شده به‌عنوان متغیر مستقل و سرعت آستانه به‌عنوان متغیر وابسته در نظر گرفته شد. آزمون وابستگی مرحله‌به‌مرحله در نرم‌افزار انجام گرفت و در هر مرحله، ضعیف‌ترین عامل که نقش کم‌تری در تغییر متغیر وابسته دارد، از روند تحلیل حذف گردید که در آخرین مرحله، تأثیرگذارترین عوامل مشخص می‌شود. مراحل تحلیل توسط آزمون به‌صورت زیر انجام شد:

در مرحله‌ی اول تمامی ویژگی‌های خاک اندازه‌گیری‌شده به‌عنوان متغیر مستقل و سرعت آستانه به‌عنوان متغیر وابسته وارد نرم‌افزار شد. از مرحله‌ی دوم به بعد، نرم‌افزار عواملی را که تأثیر کم‌تری بر تغییر سرعت آستانه دارند، از روند تحلیل خارج می‌کند. به‌این‌ترتیب که در هر مرحله، عاملی را که بیش‌ترین میزان P-value یا سطح معنی‌داری را دارد یا به‌عبارت‌دیگر در سطح خطای یک درصد معنی‌دار نیست، از روند تحلیل حذف می‌شود. نرم‌افزار این کار را تا مرحله‌ای که تمام متغیرها سطح معنی‌داری کم‌تر از ۰/۰۱ داشته باشند، ادامه می‌دهد. متغیرهایی که در مرحله‌ی آخر باقی می‌مانند، بیش‌ترین نقش را در تغییر سرعت آستانه‌ی فرسایش بادی دارند.

۴- نتایج

۴-۱- سرعت آستانه و متغیرهای اندازه‌گیری‌شده در آزمایشگاه خاک‌شناسی

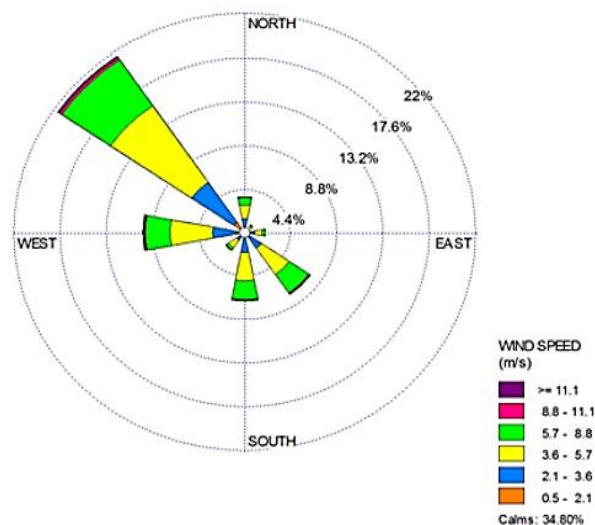
سرعت آستانه‌ی فرسایش بادی و خصوصیات خاک اندازه‌گیری‌شده در جدول (۱) آورده شده است. سرعت‌های آستانه‌ی به‌دست‌آمده در منطقه از ۵/۷ تا ۹ متر بر ثانیه متغیر است که نمایانگر حساسیت‌پذیری بالای مناطق نمونه-برداری به فرسایش بادی است. به دلیل بایر و شکننده بودن اراضی، میزان ماده‌ی آلی و عناصری چون فسفر در خاک‌های نمونه‌برداری بسیار پایین است؛ اما میزان سدیم و کلسیم و EC خاک به نسبت بسیار زیاد است. pH اندازه‌گیری شده نیز به دلیل زیاد بودن عناصری مثل کلسیم و منیزیم به سمت قلیایی یا بازی سوق پیدا کرده است. همچنین مقاومت برشی و فشاری به‌دست‌آمده، پایین هستند و باعث حساسیت بیش‌تر خاک به فرسایش می‌شود.

جدول ۱: سرعت آستانه و میانگین متغیرهای تعیین‌کننده‌ی خصوصیات خاک در مناطق نمونه‌برداری

متغیرها													مناطق نمونه‌برداری	
d (درصد)	pH	EC (dSm/m)	مقاومت فشاری	مقاومت برشی	رطوبت (درصد)	ازت (درصد)	ماده‌ی آلی (درصد)	منیزیم (ppm)	کلسیم (ppm)	فسفر (ppm)	سدیم (ppm)	آهک (درصد)		سرعت آستانه (m/s)
۵۸	۸/۳	۱۴/۳	۱/۲	۲۱	۵/۲	۷/۹	۱/۴	۱۰۳/۷	۵۳/۱	۳/۵	۱۰۳/۲	۱۹/۶	۶/۵	۱
۶۳	۸/۱	۱۳/۹	۱/۳	۲۰	۴/۹	۸/۴	۱/۲	۱۰۴/۲	۵۰/۶	۴/۲	۱۰۶/۷	۱۷/۱	۶	۲
۶۵	۸/۱	۱۲/۲	۱/۳	۱۸	۴/۲	۱۰/۴	۰/۹	۱۰۶/۳	۴۸/۴	۴/۱	۱۰۵/۶	۱۴/۹	۵/۷	۳
۵۶	۸/۵	۱۵/۱	۱/۳	۲۳	۵/۸	۱۰/۰	۱/۴	۱۰۵/۹	۵۴/۲	۳/۳	۱۰۲/۷	۲۰/۷	۷	۴
۵۳	۸/۶	۱۵/۵	۱/۲	۲۴	۶/۵	۹/۷	۱/۵	۱۰۵/۶	۵۷	۳/۸	۱۰۳	۲۳/۵	۹	۵
۶۴	۸/۲	۱۴/۰	۱/۳	۱۸	۴/۷	۸/۶	۱/۳	۱۰۴/۴	۵۰/۳	۳/۷	۱۰۳/۹	۱۶/۳	۶	۶
۶۶	۸/۲	۱۲/۷	۱/۳	۱۷	۴/۴	۱۰/۷	۰/۸	۱۰۶/۵	۵۰/۳	۳/۴	۱۰۵/۲	۱۵/۶	۵/۷	۷
۵۷	۸/۴	۱۵/۳	۱/۳	۲۴	۵/۷	۱۰/۴	۱/۳۹	۱۰۶/۳	۵۴/۷	۴/۵	۱۰۲/۳	۲۱/۲	۷	۸
۵۵	۸/۵	۱۵/۲	۱/۲	۲۴	۶/۱	۹/۵	۱/۵	۱۰۵/۴	۵۵/۶	۴/۱	۱۰۱/۷	۲۱/۸	۸/۴	۹

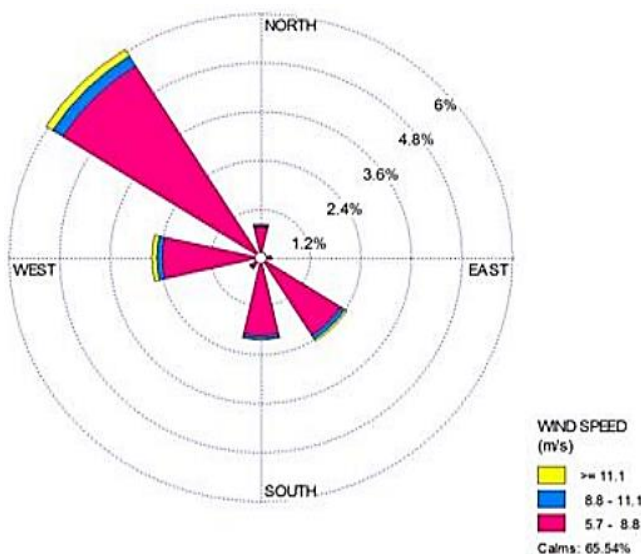
۴-۲- گلباد و گل طوفان

شکل (۵) گلباد سالانه ایستگاه کرج را نشان می‌دهد و بیانگر این است که باد غالب در دوره‌ی آماری ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۶ از جهت شمال غربی می‌وزد. مشاهده می‌شود که بادهای آرام با ۳۴/۸ درصد و پس‌از آن بادهای با سرعت ۳/۶ تا ۵/۷ متر بر ثانیه، بیش‌ترین میزان بادهای منطقه را تشکیل می‌دهند. بادهای با سرعت ۵/۷ تا ۸/۸ متر بر ثانیه، ۱۳/۶ درصد و بادهای با سرعت ۱/۲ تا ۳/۶ متر بر ثانیه نیز ۱۲/۸ درصد از کل بادهای را شامل می‌شود و سایر سرعت‌های باد، در طول دوره‌ی آماری موردنظر، به میزان بسیار کمی رخ داده‌اند.



شکل ۵: گلباد ایستگاه کرج (۲۰۰۰-۲۰۱۶)

شکل شماره‌ی ۶ گل طوفان ایستگاه کرج (با در نظر گرفتن حداقل سرعت آستانه‌ی به‌دست‌آمده در منطقه، ۵/۷ متر بر ثانیه) را نشان می‌دهد و بیانگر این است که اکثر بادهای فرساینده در منطقه نیز از سمت شمال غرب می‌وزد.



شکل ۶: گل طوفان ایستگاه کرج (۲۰۱۶-۲۰۰۰)

۴-۳- بررسی تأثیر ویژگی‌های خاک بر سرعت آستانه با استفاده از آزمون حذف پس‌رو

جدول (۲) متغیرهای ضعیف‌تری را که در مرحله‌ی اول از روند تحلیل حذف می‌شود، نشان می‌دهد.

جدول ۲: سطح معنی‌داری و حذف متغیرها در مراحل اول آزمون

d	pH	EC	مقاومت فشاری	مقاومت برشی	رطوبت	ازت	ماده‌ی آلی	کلسیم	فسفر	سدیم	آهک	متغیر P-value
۰/۰۳۷	۰/۰۲۱	۰/۰۲۶	۰/۲۳	۰/۰۰۶	۰	۰/۰۳۰	۰/۱۴۸	۰/۰۱۲	۰/۲	۰/۳	۰/۰۰۶	مرحله‌ی اول
۰/۰۳۸	۰/۰۳۲	۰/۰۴	۰/۰۰۷	۰/۰۰۴	۰	۰/۰۰۵	۰/۱۳	۰/۰۱۷	۰/۱۱۴	حذف‌شده	۰/۰۰۷	مرحله‌ی دوم
۰/۰۱۵	۰/۰۰۶	۰/۱۳۶	۰/۰۰۶	۰/۰۰۴	۰	۰/۰۱	حذف‌شده	۰/۰۰۲	۰/۲۸۹	حذف‌شده	۰/۰۰۳	مرحله‌ی سوم
۰/۰۰۹	۰/۰۰۶	۰/۰۰۶	۰/۰۰۵	۰/۰۰۵	۰	۰/۰۱۱	حذف‌شده	۰/۰۰۱	حذف‌شده	حذف‌شده	۰/۰۰۲	مرحله‌ی چهارم

در مرحله‌ی اول، متغیر سدیم با سطح معنی‌داری ۰/۳ که بیش‌ترین مقدار را دارد، از مرحله‌ی تحلیل کنار گذاشته شد.

در مرحله‌ی دوم، متغیر ماده‌ی آلی با سطح معنی‌داری ۰/۱۳ بیش‌ترین مقدار را نسبت به بقیه‌ی متغیرها داشت و از مرحله‌ی تحلیل حذف شد.

در مرحله‌ی سوم، متغیر فسفر با توجه سطح معنی‌داری ۰/۲۸۹ از روند تحلیل حذف گردید.

در مرحله‌ی چهارم، تمامی متغیرها که سطح معنی‌داری کم‌تر از یک درصد را داشتند و می‌توان گفت در سطح خطای یک درصد معنی‌دار هستند، آنالیز شدند (جدول ۳).

جدول ۳: ضرایب B و سطح معنی‌داری متغیرهای اصلی

d	pH	مقاومت فشاری	مقاومت برشی	رطوبت	ازت	کلسیم	آهک	متغیر
۰/۳۳۸	۰/۱۹۶	۰/۲۷۷	۰/۴۴۵	۱/۵۶۸	۰/۱۹۹	۰/۸۰۹	۰/۹۴۴	Beta
۰/۰۰۹	۰/۰۰۶	۰	۱/۰۰۴	۰	۰	۱/۰۰۱	۰/۰۰۵	p-value

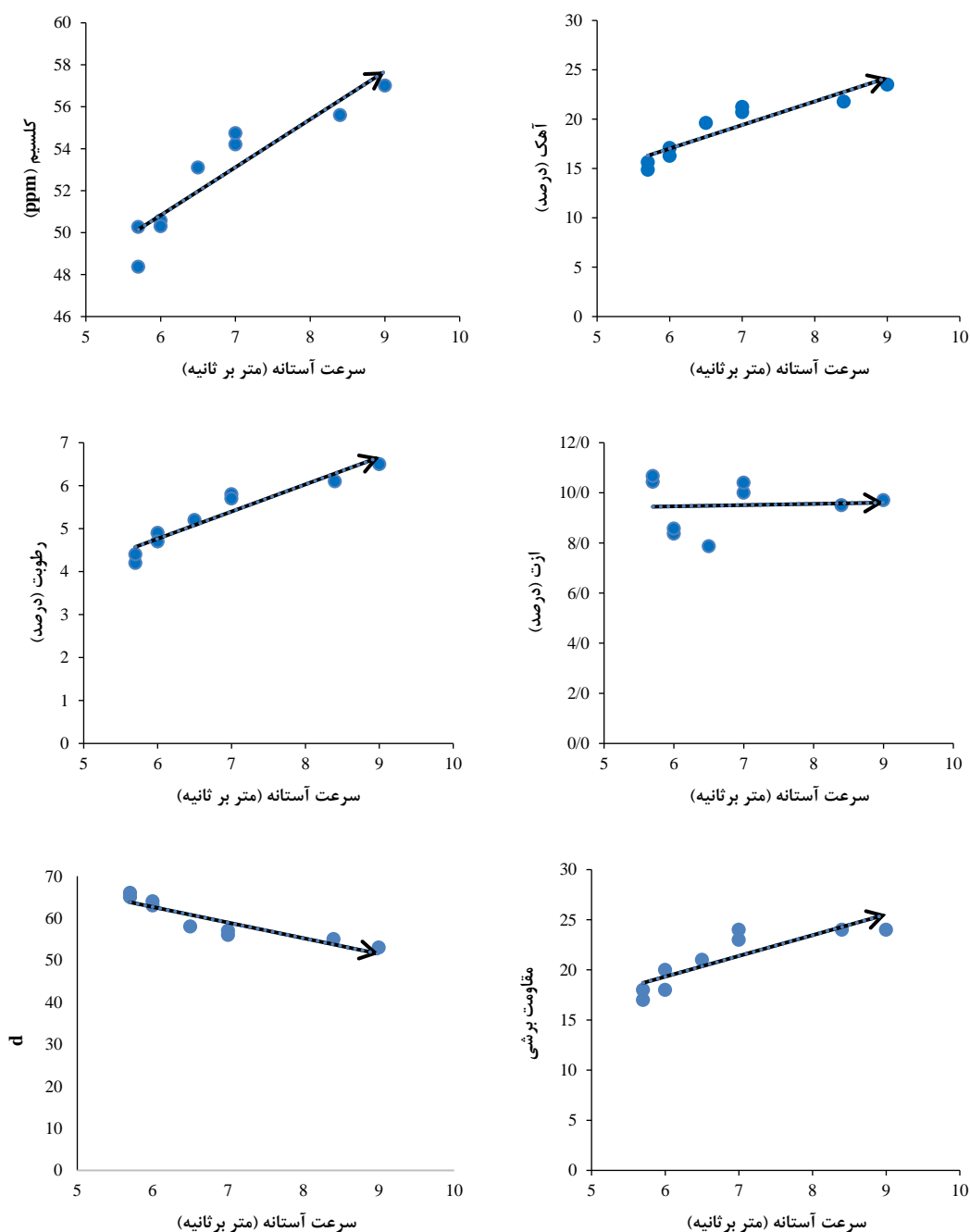
همان‌طور که مشاهده می‌شود تمامی متغیرهای باقیمانده در سطح خطای یک درصد معنی‌دار می‌باشند و دارای P-value کم‌تر از ۰/۰۱ هستند.

پارامتر Beta:

این پارامتر مشخص می‌کند که نقش هر متغیر در تبیین تغییرات سرعت آستانه به چه میزان است. هر اندازه این پارامتر برای متغیری بزرگ‌تر باشد، نشان‌دهنده‌ی نقش بیش‌تر آن متغیر در تبیین تغییرات سرعت آستانه است. با توجه به جدول (۳)، متغیر درصد رطوبت خاک با ضریب Beta (۱/۵۶۸) بیش‌ترین نقش را در تبیین تغییرات سرعت آستانه دارد. متغیر درصد آهک خاک با ضریب Beta (۰/۹۴۴) دومین عامل مؤثر بر تغییرات سرعت آستانه است. پس از این دو متغیر، به ترتیب متغیرهای میزان کلسیم، مقاومت برشی، متغیر d یا درصد ذرات با قطر بین ۰/۱ تا ۰/۵ میلی‌متر، مقاومت فشاری، میزان ازت و میزان pH خاک قرار می‌گیرند.

۴-۴- بررسی روند تغییرات سرعت آستانه و متغیرهای خاک

نمودار روند تغییرات سرعت آستانه به ازای تغییرات خصوصیات در منطقه در شکل (۷) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش متغیرهای درصد رطوبت نسبی، درصد آهک، میزان کلسیم، میزان ازت، مقاومت برشی و فشاری و pH خاک، سرعت آستانه نیز افزایش پیدا می‌کند؛ اما متغیر d با سرعت آستانه رابطه‌ی عکس دارد و با افزایش درصد ذرات با قطر ۰/۵ تا ۰/۱ میلی‌متر در خاک، سرعت آستانه کاهش یافته است.



شکل ۷: روند تغییرات سرعت آستانه به ازای تغییرات خصوصیات پارامترهای خاک منطقه

۵- بحث و نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از اندازه‌گیری سرعت آستانه با استفاده از دستگاه تونل باد صحرایی نشان داد که کم‌ترین سرعت آستانه‌ی فرسایش بادی در منطقه، ۵/۷ متر بر ثانیه و بیش‌ترین سرعت آستانه‌ی به‌دست‌آمده نیز ۹ متر بر ثانیه است. بازه‌ی ۵/۷ تا ۹ متر بر ثانیه نشان‌دهنده‌ی حساسیت خاک منطقه به فرسایش بادی است، از طرفی وسعت این مناطق هم بسیار زیاد است و این مورد می‌تواند یک عامل تهدید جدی در استان البرز و استان‌های مجاورش باشد.

نتایج حاصل از تحلیل گلباد و گل‌طوفان در منطقه‌ی مورد مطالعه نشان داد که جهت بادهای غالب در منطقه از سمت شمال غرب به جنوب شرق است، همچنین مشخص شد که بیش از نیمی از بادهای وزیده‌شده در رده‌ی بادهای فرساینده قرار می‌گیرد (بادهای بیش‌تر از ۵/۷ متر بر ثانیه). به بیان دیگر، با توجه به خصوصیات خاک منطقه اکثر بادهای وزیده‌شده می‌توانند ذرات خاک را جابجا و یا به‌صورت ذرات معلق گردوغبار وارد جو کنند و باعث ایجاد مشکلات زیست‌محیطی شوند.

جهت بررسی رابطه‌ی سرعت آستانه و پارامترهای خاک از آزمون رگرسیون و روش حذف پس‌رو استفاده شد. پارامتر میزان سدیم تبادلی در خاک، به‌عنوان ضعیف‌ترین پارامتر و عاملی که کم‌ترین نقش را بر روند سرعت آستانه‌ی فرسایش بادی دارد، شناخته شد و از روند تحلیل خارج گردید. علت این امر را می‌توان این‌گونه بیان کرد که خاک مناطق نمونه‌برداری‌شده به دلیل شوری بالا حاوی سدیم زیادی است؛ بنابراین متغیر سدیم تبادلی خاک نتوانسته است عاملی باشد که سرعت آستانه را تحت تأثیر قرار دهد. به‌رحال، سدیم باعث ازهم‌پاشیدگی ذرات خاک شده و سبب حساسیت‌پذیری بیش‌تر خاک به فرسایش می‌شود.

پارامتر درصد ماده‌ی آلی خاک به‌عنوان پارامتر بعدی از روند تحلیل حذف شد. ماده‌ی آلی در خاک می‌تواند دو نقش متفاوت داشته باشد: نقش اول زمانی که ماده‌ی آلی زیر ۴ درصد باشد؛ در این صورت با افزایش ماده‌ی آلی و هوموس خاک چسبندگی ذرات خاک بیش‌تر شده و باعث مقاومت خاک به فرسایش می‌شود (Jafari et al., 2018). نقش دوم زمانی که ماده‌ی آلی خاک بیش‌تر از ۴ درصد باشد؛ در این صورت مقدار زیاد ماده‌ی آلی باعث ایجاد پوکی در خاک شده و ساختمان خاک را سست و ناپایدار و شرایط فرسایش خاک را فراهم می‌کند. به دلیل میزان ماده‌ی آلی کم در خاک‌های نمونه‌برداری‌شده، این پارامتر نتوانست تأثیر قابل‌توجهی بر روند تغییرات سرعت آستانه‌ی فرسایش داشته باشد، با این حال مشاهده شد که با افزایش ماده‌ی آلی خاک سرعت آستانه‌ی فرسایش نیز افزایش می‌یافته است. مطالعات محمودآبادی و همکاران (۱۳۹۰: ۱۷۲) نیز مشخص کردند کربن و ماده‌ی آلی در خاک باعث پایداری بیش‌تر خاکدانه‌ها می‌شود.

میزان فسفر خاک به‌عنوان سومین عامل کم تأثیر شناخته شد و از تحلیل خارج گردید؛ دلیل این امر را می‌توان این‌گونه بیان کرد که تمامی نقاط نمونه‌برداری جزء اراضی رهاشده، بایر و شکننده محسوب می‌شوند؛ بنابراین از نظر فسفر خاک این مناطق غنی نیستند، پس فسفر نمی‌تواند عامل تعیین‌کننده‌ی سرعت آستانه‌ی فرسایش در مناطق نمونه‌برداری باشد. فسفر غنی در اراضی حاصلخیز و زراعی مشاهده می‌شود.

در مرحله‌ی بعد، پارامتر EC از روند آنالیز کنار گذاشته شد. نقش EC در خاک را این‌گونه می‌توان بیان کرد که با افزایش املاح خاک، میزان EC هم زیاد می‌شود. همان‌طور که گفته شد، سدیم باعث ازهم‌پاشیدگی ذرات خاک می‌شود؛ حال اگر کلسیم و منیزیم در خاک زیاد شوند، میزان EC خاک زیاد شده و نقش ازهم‌پاشیدگی سدیم را کم‌رنگ می‌کند. به عبارتی دیگر، با افزایش EC چسبندگی ذرات خاک به دلیل وجود کلسیم و منیزیم بیش‌تر شده و مقاومت خاک به فرسایش را افزایش می‌دهد. طبق بررسی تغییرات EC و سرعت آستانه‌ی موارد ذکرشده به‌وضوح مشاهده گردید؛ به‌طوری‌که با افزایش EC در خاک، سرعت آستانه‌ی فرسایش نیز روند صعودی به خود گرفت.

در مرحله‌ی آخر پارامترهای آهک، کلسیم، ازت، pH، رطوبت، مقاومت برشی، مقاومت فشاری و d (درصد ذرات با قطر کوچک‌تر از ۰/۵ میلی‌متر) باقی ماندند. این بدین معناست که این پارامترها، تأثیرگذارترین عوامل بر روند سرعت آستانه‌ی فرسایش بادی محسوب می‌شوند.

عنصر کلسیم در خاک باعث خنثی شدن نقش سدیم می‌شود، بنابراین با افزایش آن‌ها چسبندگی ذرات خاک بیش‌تر شده و در نتیجه سرعت آستانه‌ی فرسایش بادی افزایش می‌یابد.

از تعیین‌کننده‌ترین عناصری که باعث چسبندگی ذرات می‌شود، می‌توان به میزان کربنات کلسیم یا آهک موجود در خاک اشاره کرد. نقش سیمانی‌کننده‌ی آهک در خاک بسیار چشم‌گیر است و وجود آهک باعث بالا رفتن pH خاک می‌شود. در پژوهش حاضر، میزان آهک خاک از تأثیرگذارترین پارامترهای مؤثر بر سرعت آستانه‌ی فرسایش بادی شناخته شد. با افزایش میزان آهک در خاک، چسبندگی ذرات بیش‌تر شده و تحمل خاک به فرسایش و سرعت آستانه نیز افزایش می‌یابد. ضمناً افزایش سرعت آستانه‌ی فرسایش بادی به ازای افزایش pH را هم می‌توان ناشی از وجود آهک و تأثیر مستقیم آن بر pH دانست.

مقاومت فشاری و برشی در خاک به‌طور مستقیم به عوامل سیمانی‌کننده بستگی دارد. هرچه پارامترهایی که باعث چسبندگی ذرات می‌شوند، در خاک بیش‌تر یافت شوند، مقاومت برشی و فشاری در خاک نیز افزایش و سرعت آستانه‌ی فرسایش بادی را افزایش می‌دهد (سلوکی و همکاران، ۱۳۸۸: ۲۲). این دو پارامتر طبق بررسی‌ها از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر سرعت آستانه‌ی فرسایش بادی شناخته شدند.

نتایج نشان داد پارامتر d یا درصد ذرات با قطر بین ۰/۱ تا ۰/۵ میلی‌متر از مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار بر سرعت آستانه است؛ به‌طوری‌که هرچه درصد ذرات کوچک‌تر از نیم میلی‌متر در خاک بیش‌تر باشد، سرعت آستانه‌ی فرسایش بادی کاهش می‌یابد؛ یا به‌عبارت‌دیگر، خاک پتانسیل بیش‌تری جهت فرسایش دارد. این نتایج با نتایج حاصل از مطالعات محمودآبادی و همکاران (۱۳۹۰: ۱۷۷) و Bagnold (۱۹۴۱: ۹۳) هم‌خوانی دارد.

نتایج تحقیق نشان داد که رطوبت، مهم‌ترین و بارزترین پارامتر مؤثر بر سرعت آستانه‌ی فرسایش بادی در کانون‌های گردوغباری استان البرز است. هرچه رطوبت خاک بیش‌تر شود، ذرات چسبندگی بیش‌تر و مقاومت در فرسایش بیش‌تر می‌شود (بیابانی و همکاران، ۱۳۹۷: ۹۵). بررسی رابطه‌ی میزان رطوبت خاک و سرعت آستانه‌ی فرسایش بادی نشان داد که با افزایش رطوبت خاک، سرعت آستانه‌ی فرسایش بادی نیز افزایش می‌یابد. Kardous و همکاران (۲۰۰۵، ۳۲۱۵) نیز در پژوهش خود به همین نتایج رسیده بودند. همچنین Dong و همکاران (۲۰۰۷، ۱۱۲) در مطالعات خود رطوبت سطحی خاک را از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر پایداری خاکدانه‌ها و مقاومت در برابر فرسایش معرفی کرده بودند.

با توجه به اینکه کانون‌های بالفعل تولید گردوغبار وسعت چشم‌گیری از مساحت استان البرز را به خود اختصاص داده‌اند، این پژوهش نشان داد که فرسایش بادی و تولید گردوغبار استان البرز را تهدید می‌کند. این مناطق به مرکزیت دشت اشتهارد به دلیل هم‌مرز بودن با بیابان‌های دشت بوئین‌زهر در استان قزوین با آن‌ها ادغام شده‌اند و پهنه‌ی گردوغبارخیز وسیع‌تری را در مقابل باد قرار داده‌اند و به‌عنوان یک تهدید جدی محسوب می‌شوند و پیامدهای زیان‌باری را در استان‌های البرز، تهران و سایر استان‌های مجاور در پی خواهند داشت؛ بنابراین نیاز است نگاهی ویژه به این مناطق شود تا در مرحله‌ی اول از تشدید خطرات حاصل از این مسئله جلوگیری شود و در مرحله‌ی بعد از میزان این خطرات کم کنیم.

منابع

۱. ابراهیمیان، صدیقه، نهتانی، محمد، محمدی، سارا، رفعتپور، شهناز (۱۳۹۲). بررسی خسارات ناشی از ریزگردها بر بخش کشاورزی و محیط زیست. سومین همایش ملی فرسایش بادی و طوفان‌های گردوغبار. دانشگاه یزد، ۸ ص.

۲. احمدی، حسن (۱۳۸۷). ژئومورفولوژی کاربردی: بیابان-فرسایش بادی. جلد دوم، انتشارات دانشگاه تهران. چاپ سوم، ۷۰۶ ص.
۳. امین، پیمان، تقی‌زاده مهرجردی، روح‌الله (۱۳۹۶). بررسی پتانسیل فرسایش‌پذیری بادی خاک در مناطق خشک و فراخشک مرکزی ایران (مطالعه‌ی موردی: دشت یزد-اردکان). پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال پنجم شماره‌ی سوم، صص ۳۵-۲۰.
۴. آذرینوند، حسین، غلامی، حمید، خسروی، حسن (۱۳۹۳). ریزگرد بیابانی در سیستم جهانی. انتشارات دانشگاه تهران، ۳۰۰ ص.
۵. برایموج، ولک، برایموج، ولک، پورریحان، کریم، خلیل ارجمندی، مجید، مصباح زاده، طیبه، کیانیان، محمد، جعفری، محمد (۱۳۹۰). کاربری زمین و منابع خاک. انتشارات دانشگاه تهران، ۳۱۴ ص.
۶. بیابانی، لیلا، احمدی، حسن، خسروی، حسن، نظری سامانی، علی‌اکبر، لطفی، جعفر (۱۳۹۷). کاربرد ویژگی‌های رسوب‌شناسی برای تعیین منشأ تپه‌های ماسه‌ای حاشیه‌ی غربی دریاچه‌ی ارومیه. مدیریت بیابان، سال ششم، شماره‌ی ۱۱، صص ۸۲-۹۸.
۷. رایگانی، بهزاد، خیراندیش، زهرا، کرمانی، فرزانه، محمدی میاب، منصوره، ترابی‌نیا، عابد (۱۳۹۵). شناسایی کانون‌های بالفعل تولید گردوغبار با استفاده از داده‌های سنجش‌ازدور و شبیه‌سازی جریان هوا (مطالعه‌ی موردی: استان البرز). مدیریت بیابان، دوره‌ی ۴، شماره‌ی ۸، صص ۱۵-۶.
۸. رفاهی، حسین (۱۳۸۲). فرسایش بادی و کنترل آن. انتشارات دانشگاه تهران، ۳۲۰ ص.
۹. سلوکی، حمیدرضا، خامه‌چیان، ماشاءالله، حافظی مقدس، ناصر، علوی‌پناه، کاظم (۱۳۸۸). بررسی فرسایش بادی در دشت سیستان و تأثیر آن بر خصوصیات مهندسی خاک. زمین‌شناسی مهندسی ایران، سال دوم، شماره‌ی سوم، صص ۲۶-۱۳.
۱۰. سوری، مهشید (۱۳۸۴). تخریب اراضی با تأکید بر فاکتور خاک. آقایی، مصطفی، جعفری، محمد، پابان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، دانشکده‌ی منابع طبیعی دانشگاه تهران.
۱۱. عظیم‌زاده، حمیدرضا، اختصاصی، محمدرضا (۱۳۸۲). فرسایش بادی: بررسی تأثیر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک در سرعت آستانه‌ی فرسایش بادی (مطالعه‌ی موردی: دشت یزد-اردکان). مجله‌ی منابع طبیعی، جلد ۵۷، شماره‌ی ۲، صص ۱۱-۱.
۱۲. غفاری، دیمین، مصطفی‌زاده، رئوف (۱۳۹۴). بررسی منشأ، اثرات و راهکارهای پدیده‌ی گردوغبار در ایران. نشریه‌ی حفاظت و بهره‌برداری از منابع طبیعی، دوره‌ی ۴، شماره‌ی ۲، صص ۱۲۵-۱۰۷.
۱۳. قره‌چلو، سعید (۱۳۸۹). ارزیابی و مقایسه‌ی الگوریتم‌های مختلف طبقه‌بندی در تهیه‌ی نقشه‌ی شوری سطحی خاک. همایش ملی ژئوماتیک ۸۹.
۱۴. کاظمی، محسن، فیض‌نیا، سادات، خسروی، حسن، مصباح، حمید (۱۳۹۷). تعیین حساسیت رسوبات دریاچه‌ی مهارلو به فرسایش بادی و جهت حرکت گردوغبار حاصل از آن. مدیریت بیابان، سال ششم، شماره‌ی ۱۲، صص ۶۰-۴۹.
۱۵. محمودآبادی، مجید، دهقانی، فاطمه، عظیم‌زاده، حمیدرضا (۱۳۹۰). مطالعه‌ی اثر توزیع اندازه‌ی ذرات خاک بر شدت فرسایش بادی. مدیریت خاک و تولید پایدار، دوره‌ی ۱، شماره‌ی ۱، صص ۹۷-۸۱.
۱۶. محمودآبادی، مجید، رجب‌پور، هدی (۱۳۹۵). بررسی تأثیر رطوبت اولیه خاک بر شدت فرسایش بادی با استفاده از تونل باد آزمایشگاهی. پژوهش‌های حفاظت آب‌وخاک، دوره‌ی ۲۴، شماره‌ی ۲، صص ۱۸۳-۱۶۷.
۱۷. موحدی، سعید، حاتمی بهمن‌بیگلو، خداکرم، نارنگی‌فرد، مهدی (۱۳۹۲). پایش مکانی و زمانی پدیده‌های آب و هوایی مرتبط با گردوغبار در شهرهای ایران. جغرافیا و مطالعات محیطی، شماره‌ی ۱۱، دوره‌ی ۳، صص ۴۸-۳۷.
18. Bagnold, R.A. (1941). *The Physics of Blown Sand and Desert Dunes*. London: Methuen.
19. Cornelis, W. M., Gabriels, D., & Hartmann, R. (2004). A parameterisation for the threshold shear velocity to initiate deflation of dry and wet sediment. *Geomorphology*, 59(1-4), 43-51.
20. Cornelis, W. M., Gabriels, D., & Hartmann, R. (2004). A parameterisation for the threshold shear velocity to initiate deflation of dry and wet sediment. *Geomorphology*, 59(1-4), 43-51.
21. Dong, Z., Mu, Q., & Liu, X. (2007). Defining the threshold wind velocity for moistened sediments. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 112(B8).

22. Jafari, M., Tavili, A., Panahi, F., Zandi Esfahan, E., & Ghorbani, M. (2018). Reclamation of Arid Lands, Springer, 212 p.
23. Kardous, M., Bergametti, G., & Marticorena, B. (2005). Wind tunnel experiments on the effects of tillage ridge features on wind erosion horizontal fluxes. In *Annales Geophysicae*, 23(10), 3195-3206.
24. Liu, L. Y., Li, X. Y., Shi, P. J., Gao, S. Y., Wang, J. H., Ta, W. Q., ... & Xiao, B. L. (2007). Wind erodibility of major soils in the farming-pastoral ecotone of China. *Journal of arid environments*, 68(4), 611-623.
25. Negyesi, G., Lóki, J., Buró, B., & Szabó, S. (2016). Effect of soil parameters on the threshold wind velocity and maximum eroded mass in a dry environment. *Arabian Journal of Geosciences*, 9(11), 588.
26. Pásztor, L., Négyesi, G., Laborczi, A., Kovács, T., László, E., & Bihari, Z. (2016). Integrated spatial assessment of wind erosion risk in Hungary. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16(16), 2421-2432.
27. Ravi, S., Zobeck, T.M., Over, T.M., Okin, G.S., and Odorico, P (2006). On the effect of moisture bonding forces in air-dry soils on threshold friction velocity of wind erosion. *Sedimentology*, 53(3), 597-609.
28. Webb, N. P., Van Zee, J. W., Karl, J. W., Herrick, J. E., Courtright, E. M., Billings, B. J., & Hand, J. L. (2017). Enhancing wind erosion monitoring and assessment for US rangelands. *Rangelands*, 39(3-4), 85-96.
29. Zhao, H. L., Yi, X. Y., Zhou, R. L., Zhao, X. Y., Zhang, T. H., & Drake, S. (2006). Wind erosion and sand accumulation effects on soil properties in Horqin Sandy Farmland, Inner Mongolia. *Catena*, 65(1), 71-79.