



Identification and Analysis of Wind Erosion and Dust Emission Hotspots in Bushehr Province, Iran

Golamreza Rahi ¹, Somaye Dehghani ², Hamidreza Abbasi ³, Reza Abbasi ⁴, AmirArsalan Kamali ⁵

1. Forests and Rangelands Research Department, Bushehr Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Bushehr, Iran.: ghrahi@gmail.com
2. Soil and Water Research Department, Bushehr Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Bushehr, Iran.: somayehdehghany@yahoo.com
3. Research institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Karaj, Iran; E-mail: abbasi.hamidreza@gmail.com
4. Animal Science Research Department, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Karaj, Iran; E-mail: reza.ab.6606@gmail.com
5. Animal Science Research Department, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Karaj, Iran; E-mail: aakamali52@gmail.com

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: July. 16, 2025

Revised: Aug. 25, 2025

Accepted: Aug. 30, 2025

Published online: Nov. 2025

Keywords:

*Wind erosion threshold velocity,
Arid and semi-arid region,
Total wind erosion,
Active erosion hotspots*

ABSTRACT

Wind erosion is one of the most critical environmental and agricultural factors, increasing risks to soil productivity and food security, with significant consequences for ecosystems and human well-being. Considering that Bushehr Province is located in arid and semi-arid regions and frequently experiences dust storms, this study aimed to evaluate soil susceptibility to wind erosion, measure the wind erosion threshold velocity, and examine its relationship with soil properties in the province. Soil samples were collected from 22 stations across seven counties in Bushehr Province to determine observational threshold velocity (m/s), calculated threshold velocity (m/s), and total wind erosion (kg/m²/min) at three wind velocity classes of 15, 20, and 25 m/s. The results indicated that the lowest observational and calculated threshold velocities, 5 and 6 m/s respectively, were recorded in Pahlevankeshi village and rangelands in the Gorgor hotspot of Tangestan County. The highest velocities, 15 and 19.4 m/s, were observed in abandoned lands along Kabgan Road, shrimp farming sites, and rangelands in the counties of Genaveh, Deylam, Dayyer, and Bushehr. Furthermore, the highest wind erosion, 47.7 and 34.4 kg/m²/min, occurred in areas with the lowest threshold velocity (6 m/s), such as managed rangelands, while the lowest wind erosion, 0.36 and 1 kg/m²/min, was recorded in areas with the highest observational and calculated threshold velocities (15 and 19.4 m/s), including shrimp farms and abandoned rangelands. These findings demonstrate that these regions are active dust hotspots in southern Iran and require serious local and regional management strategies.

Cite this article: 1. Rahi, G. R., Dehghani, S., Abbasi, H. R., Abbasi, R. & Kamali, A. A (2025). Identification and Analysis of Wind Erosion and Dust Emission Hotspots in Bushehr Province, Iran, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 56 (9), 2483-2502. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.389359.669978>

© The Author(s). Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.389359.669978>



EXTENDED ABSTRACT

Background and Aim

Wind erosion is one of the most critical environmental and agricultural factors that significantly reduces soil productivity and poses a threat to food security, with substantial consequences for ecosystems and human well-being. This study aimed to assess the susceptibility of soils to wind erosion, measure threshold wind velocity, and examine its relationship with soil properties in Bushehr Province, south Iran. Specifically, the research focused on determining the threshold wind erosion velocity in potential dust source areas, evaluating wind erosion amounts at different wind speeds (15, 20, and 25 km/h), and analyzing the key physical and chemical soil factors influencing wind erosion intensity across seven counties of the province. The findings are expected to support improved land management and effective control strategies against wind erosion in the region.

Methodology

In this study, undisturbed soil samples (approximately 25 kg) were collected from wind erosion-prone areas to measure observational and calculated threshold wind velocity (m/s) as well as wind-eroded sediment flux (kg/m²/min). Additionally, 22 composite soil samples were taken from a depth of 0–30 cm across seven arid counties of Bushehr for physical and chemical analyses. After recording field characteristics, samples were transferred to the Soil Science Laboratory at the Agricultural Research Center of Bushehr.

Findings

The lowest threshold wind velocities (5 and 6 m/s) were observed in Pahlevan-Keshi village and rangeland areas of Tangestan County, while the highest values (15 and 19.4 m/s) were recorded in abandoned lands near Kabgan Road and shrimp farming sites in Genaveh and Bushehr counties. Maximum wind erosion rates (47.7 and 31.4 kg/m²/min) occurred in areas with low threshold velocities (6 m/s), whereas minimum erosion rates (0.36 to 1 kg/m²/min) were found in areas with higher resistance to wind erosion (15 m/s). The findings demonstrated that wind erosion susceptibility is strongly influenced by soil texture (sand, silt, and clay content), surface structure, and chemical properties, particularly calcium carbonate equivalent (CCE) and electrical conductivity (EC). Higher sand and CCE contents in light-textured soils increased erosion rates, while greater clay, silt, and salinity levels, along with stabilizing cations (e.g., Ca²⁺ and Mg²⁺), enhanced inter-particle cohesion and improved resistance to wind. The effectiveness of surface gravel and sand cover varied depending on their density, size, and spatial distribution. Overall, wind erosion in the region is a result of the complex interaction of physical, chemical, and climatic factors and requires localized, multi-factorial management strategies.

Conclusion

Wind erosion in the study area is significantly affected by soil texture—especially sand, clay, and silt content—as well as chemical and climatic conditions. Sandy soils with low moisture and poor vegetation cover were most vulnerable, while heavier-textured soils showed greater resistance. Chemical characteristics such as CCE and EC demonstrated texture-dependent effects on soil structure stability. Effective erosion control demands site-specific, multi-variable management strategies, including vegetation restoration and soil structure improvement, particularly in critical hotspots such as the southwestern rangelands of Bushehr. These areas are recognized as active dust storm sources in southern Iran and require urgent regional and local planning efforts.

Author Contributions

Conceptualization: GH.R and H.A.; Methodology: GH.R and H.A.; Software: S.D and R.A.; Validation: A.K and S.D.; Formal analysis: A.K and GH.R; Investigation: GH.R, R.A and S.D.; Resources: R.A and A.K.; Data curation: R.A and S.D.; Writing—original draft: S.D.; Writing—review & editing: GH.R, R.A, A.K, S.D, and Z.R.; Visualization: H.A, R.A, and A.K.; Supervision: GH.R and S.D.; Project administration: GH.R. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Data Availability Statement

The data supporting the findings of this study are available from the authors upon reasonable request.

Acknowledgements

This research is part of the project “*Monitoring of Factors Influencing Dust and Sand Sources in Bushehr Province*”, conducted in collaboration with the Research Institute of Forests and Rangelands and the Agricultural Research, Education and Extension Organization of Bushehr Province. The authors sincerely

appreciate the valuable guidance and support of the managers and experts of these centers, which greatly contributed to improving the quality of this research.

Ethical Considerations

This study, as part of the above-mentioned project, was conducted in collaboration with the Research Institute of Forests and Rangelands and the Agricultural Research, Education and Extension Organization of Bushehr Province. The authors confirm that the research fully adhered to ethical principles, and no data fabrication, falsification, plagiarism, or misconduct occurred.

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest

شناسایی و تحلیل کانون‌های فرسایش بادی و تولید گرد و غبار در استان بوشهر

غلامرضا راهی^۱، سمیه دهقانی^۲، حمیدرضا عباسی^۳، رضا عباسی^۴، امیر ارسلان کمالی^۵

۱. بخش تحقیقات جنگل‌ها و مراتع، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان بوشهر، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج

کشاورزی، بوشهر، ایران. رایانامه: ghrahi@gmail.com

۲. بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان بوشهر، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی،

بوشهر، ایران. رایانامه: somayehdehghany@yahoo.com

۳. مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران. رایانامه:

abbasi.hamidreza@ymail.com

۴. بخش تحقیقات علوم دامی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان بوشهر، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، بوشهر، ایران.

رایانامه: Reza.Ab.6606@Gmail.Com

۵. بخش تحقیقات علوم دامی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان بوشهر، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی،

بوشهر، ایران. رایانامه: aakamali52@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	فرسایش بادی یکی از جدی‌ترین عوامل محیطی و کشاورزی، سبب افزایش خطراتی برای بهره‌وری خاک و امنیت غذایی می‌شود که پیامدهای زیادی برای اکوسیستم‌ها و رفاه انسان دارد. باتوجه به قرارگیری استان بوشهر در منطقه خشک و نیمه‌خشک و وقوع طوفان‌های گرد و غبار در این منطقه، این پژوهش با هدف ارزیابی حساسیت خاک به بادبردگی، اندازه‌گیری سرعت آستانه فرسایش بادی و ارتباط با ویژگی‌های خاک در استان بوشهر انجام شد. نمونه های خاک از ۲۲ ایستگاه موردنظر از ۷ شهرستان استان بوشهر با هدف تعیین شاخص‌های سرعت آستانه فرسایش مشاهداتی (متر بر ثانیه)، سرعت آستانه محاسباتی (متر بر ثانیه) و جمع باد بردگی (کیلوگرم بر مترمربع در دقیقه) در سه کلاس ۱۵، ۲۰ و ۲۵ متر بر ثانیه برداشت شد. نتایج نشان داد کمترین سرعت آستانه فرسایش بادی مشاهداتی و محاسباتی ۵ و ۶ متر بر ثانیه متعلق به روستای پهلوان‌کشی و اراضی مرتعی از کانون گرگور در شهرستان تنگستان می‌باشد و بیشترین آن ۱۵ و ۱۹/۴ متر بر ثانیه متعلق به اراضی رها شده در جاده کیگان، سایت‌های پرورش میگو، اراضی مرتعی مله سوخته از کانون شهرستان گناوه، دیلم، دیر و بوشهر می‌باشد. همچنین بیشترین بادبردگی با میزان ۴۷/۷ و ۳۱/۴ کیلوگرم بر مترمربع در دقیقه در مناطقی با کمترین سرعت آستانه فرسایش بادی ۶ متر بر ثانیه مربوط به مرتع دست کاشت و کمترین بادبردگی با میزان ۰/۳۶ و ۱ کیلوگرم بر مترمربع در دقیقه در مناطقی با بیشترین سرعت آستانه فرسایش مشاهداتی و محاسباتی (۱۵ و ۱۹/۴ متر بر ثانیه) مربوط به سایت‌های پرورش میگو و مرتع رهاشده در منطقه می‌باشد. یافته‌ها نشان می‌دهد که این مناطق از کانون‌های فعال گرد و غبار جنوب کشور بوده و نیازمند مدیریت جدی در سطح محلی و منطقه‌ای هستند.

استناد: راهی، غلامرضا، دهقانی، سمیه؛ عباسی، رضا، عباسی، حمیدرضا، و کمالی، امیرارسلان (۱۴۰۴) شناسایی و تحلیل کانون‌های فرسایش بادی و تولید گرد و غبار

در استان بوشهر، مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۶ (۹)، ۲۴۸۳-۲۵۰۲. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.389359.669978>

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران. © نویسندگان.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.389359.669978>

مقدمه

فرسایش بادی خاک یکی از مهم‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی در مقیاس جهانی، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک به شمار می‌رود (Borrelli et al., 2016; Gholami & Mohammadifar, 2022). تغییرات اقلیمی فزاینده، به‌ویژه افزایش شدت و فراوانی خشکسالی‌ها، در کنار فعالیت‌های انسانی نظیر چرای بیش‌ازحد، جنگل‌زدایی، کشت مداوم و رهاسازی اراضی کشاورزی، نقش چشمگیری در تسریع فرآیند فرسایش بادی و گسترش بیابان‌زایی ایفا کرده‌اند (Middleton & Kang, 2017; Middleton, 2020; Chen et al., 2014).

فرسایش بادی فرآیندی است که در آن باد ذرات خاک را از سطح زمین جدا کرده و از طریق مکانیسم‌هایی مانند خزش، جهش و تعلیق به حرکت درمی‌آورد و سپس در نقاط دیگر رسوب می‌دهد. ویژگی‌های ذرات منتقل‌شده، ازجمله اندازه، ترکیب و زمان ماندگاری آن‌ها در هوا، بر شدت اثرات زیست‌محیطی این پدیده تأثیرگذار است (Goossens & Riksen, 2004). در نتیجه این پدیده، ذرات ریزدانه و مواد آلی ارزشمند از سطح خاک جدا می‌شوند، ظرفیت نگهداری آب کاهش می‌یابد، حاصل‌خیزی کاهش یافته و در نهایت تخریب خاک و زمین تشدید می‌گردد (Colazo & Buschiazzi, 2010; Lal, 2017 and Zhao et al., 2022). افزون بر این، گرد و غبار ناشی از فرسایش بادی می‌تواند به فواصل دور منتقل شده و کیفیت هوا، منابع آب و سلامت انسان را تهدید کند (Shepherd et al., 2016; Tian et al., 2021).

برآوردها نشان می‌دهد که نزدیک به یک‌سوم از اراضی کره زمین به‌نوعی تحت تأثیر فرسایش بادی قرار گرفته‌اند (Yang et al., 2022). عوامل متعددی در شدت فرسایش بادی نقش دارند که شامل ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، رطوبت، بافت، سرعت و جهت باد، توپوگرافی، پوشش گیاهی، و شیوه‌های مدیریتی اراضی می‌شوند (Liu et al., 2019; Kouchami et al., 2019; Mina et al., 2021). برای درک بهتر این پدیده، مطالعات بسیاری به بررسی رابطه بین نرخ فرسایش بادی و ویژگی‌های خاک پرداخته‌اند. به‌عنوان مثال، Sirjani et al (2019) و Shahabinejad et al (2020) ارتباط معنی‌داری بین نرخ فرسایش و میانگین وزنی قطر ذرات خاک، کربنات کلسیم، قابلیت هدایت الکتریکی و سایر ویژگی‌های موثر در مناطق خشک ایران گزارش کرده‌اند.

بافت خاک، به‌ویژه نسبت ذرات رس، سیلت و شن، از طریق اثرگذاری بر ویژگی‌هایی مانند جرم مخصوص ظاهری، پایداری خاکدانه، میزان تخلخل، چسبندگی و مقاومت برشی، نقش مهمی در تعیین آستانه فرسایش‌پذیری خاک دارد (Mazaheri et al., 2012). علاوه بر این، در مناطق خشک و نیمه‌خشک، میزان کربن غیرآلی به‌ویژه کربنات کلسیم معادل قابل توجه است و می‌تواند با تأثیر بر حساسیت خاک به فرسایش، شدت فرسایش بادی را کنترل کند (Mazaheri et al., 2012). در همین راستا، Borrelli et al (2016) گزارش کردند که وجود کربن آلی و کربنات کلسیم معادل، با بهبود پایداری خاکدانه‌ها، موجب کاهش فرسایش بادی می‌شود. همچنین، مطالعات (Bronick and Lal, 1990) و Zobeck & Popham (1990) نشان داده‌اند که شیوه‌های خاک‌ورزی و مدیریت اراضی می‌توانند مقاومت خاک در برابر باد را به‌طور چشمگیری تغییر دهند.

یکی از روش‌های دقیق و مؤثر برای بررسی پویایی فرسایش بادی، استفاده از تونل باد در مقیاس آزمایشگاهی یا میدانی است. این ابزار امکان شبیه‌سازی شرایط مختلف باد را فراهم کرده و می‌توان با آن، اثر ویژگی‌های خاک، پوشش گیاهی و اقدامات مدیریتی را بر نرخ فرسایش سنجید (Kouchami et al., 2019; Shao, 2008). در مناطقی که پایش‌های مستمر دشوار بوده و داده‌های قابل اعتماد محدود است، تونل‌های باد قابل حمل می‌توانند ابزار ارزشمندی برای ارزیابی خطر فرسایش باشند، حتی اگر خطاهای جزئی در اجرای آزمایش وجود داشته باشد (Marzen et al., 2020). در همین راستا، مینا و همکاران (۱۴۰۲) با استفاده از تونل باد و الگوریتم‌های یادگیری ماشین، عوامل مؤثر بر سرعت آستانه فرسایش بادی را بررسی کرده و نشان دادند که عواملی چون رطوبت خاک، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها، توزیع اندازه ذرات، و مقاومت فشاری، نقش تعیین‌کننده‌ای در شروع فرسایش دارند. همچنین، مطالعه‌ای در استان کرمان توسط شهابی‌نژاد و همکاران (۱۳۹۹) نشان داد که شدت فرسایش بادی در این منطقه بین ۰/۳ تا ۳/۴۱ گرم بر متر مربع در دقیقه متغیر بوده و رابطه‌ای آماری نزدیکی بین سرعت آستانه و شدت فرسایش وجود دارد. لذا برای مدیریت مؤثر این پدیده، ارزیابی سریع و دقیق خطر فرسایش بادی ضروری است تا بتوان برنامه‌های کنترل فرسایش را به‌موقع اجرا کرد (Kouchami-Sardoo et al., 2020). این موضوع به‌ویژه در مناطقی که حفاظت در برابر بادهای حداقل فرساینده است، اهمیت بیشتری دارد.

استان بوشهر با قرارگیری در نوار جنوبی ایران و مجاورت با خلیج فارس، در زمره نواحی خشک و نیمه‌خشک کشور قرار دارد که همواره در معرض وقوع طوفان‌های گردوغبار است. وسعت این استان حدود ۲۵۳۶۰ کیلومتر مربع بوده و بیش از ۴۱۹۸۳۷ هکتار آن (معادل ۶/۱۶ درصد) را اراضی بیابانی تشکیل می‌دهند؛ شرایطی که به‌طور طبیعی حساسیت بالایی نسبت به فرسایش بادی ایجاد می‌کند. تکرار

طوفان‌های گردوغبار، کاهش کیفیت خاک، افت حاصلخیزی اراضی و تهدید امنیت غذایی از جمله پیامدهای مستقیم این پدیده هستند. افزون بر این، پراکنش ذرات معلق ناشی از فرسایش بادی می‌تواند سلامت جوامع انسانی را تهدید کرده و آثار مخربی بر زیرساخت‌ها و محیط‌زیست بر جای گذارد.

با وجود چنین پیامدهایی، تاکنون تحقیقات اندکی به‌طور جامع به بررسی ویژگی‌های مؤثر بر فرسایش بادی خاک‌های استان بوشهر پرداخته‌اند و داده‌های میدانی قابل اتکا در این زمینه بسیار محدود است. این در حالی است که ویژگی‌های خاک، از جمله بافت، پایداری خاکدانه‌ها، کربنات کلسیم معادل و کربن آلی، نقشی اساسی در تعیین شدت فرسایش دارند. نبود شناخت دقیق از این عوامل، سبب می‌شود که برنامه‌ریزی‌های مدیریتی و اقدامات حفاظتی در این مناطق با کارایی لازم همراه نباشد.

از آنجا که استان بوشهر یکی از کانون‌های فعال گرد و غبار در کشور محسوب می‌شود، انجام پژوهش‌های میدانی با بهره‌گیری از روش‌های تجربی مانند تونل باد، ضرورتی اجتناب‌ناپذیر است. تعیین سرعت آستانه فرسایش بادی و بررسی میزان بادبردگی در شرایط مختلف باد (۱۵، ۲۰ و ۲۵ متر بر ثانیه) و همچنین تحلیل روابط میان ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک با شدت فرسایش، می‌تواند چشم‌انداز روشنی برای درک فرآیندهای مؤثر بر این پدیده فراهم آورد. نتایج این مطالعه علاوه بر غنی‌سازی دانش علمی در حوزه فرسایش بادی، مبنایی کاربردی برای طراحی اقدامات پیشگیرانه، مدیریت منابع طبیعی و کاهش آسیب‌پذیری اراضی در برابر تهدیدات ناشی از گرد و غبار در استان بوشهر خواهد بود.

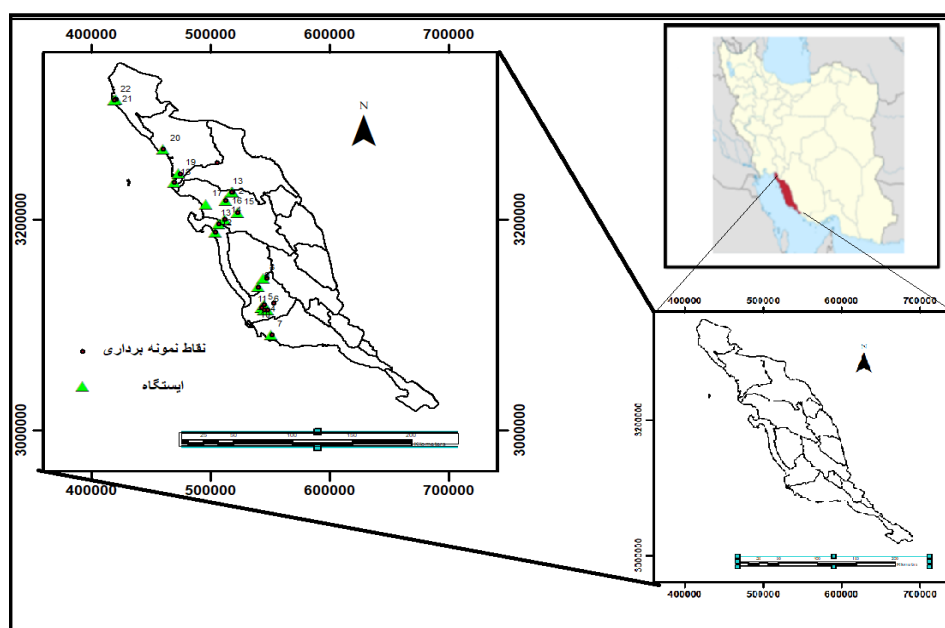
روش‌شناسی پژوهش

موقعیت منطقه

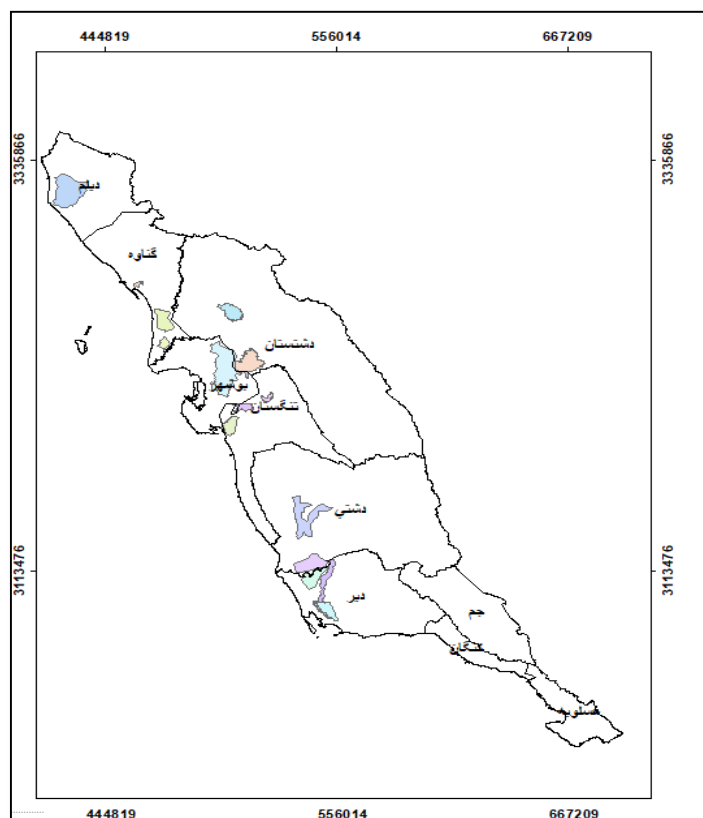
منطقه مورد مطالعه شامل اراضی بیابانی هفت شهرستان در استان بوشهر است. این استان در جنوب‌غربی ایران قرار داشته و در فاصله ۲۷ درجه و ۱۸ دقیقه تا ۳۰ درجه و ۱۴ دقیقه عرض شمالی و ۵۲ درجه و ۶ دقیقه تا ۵۲ درجه و ۵۸ دقیقه طول شرقی واقع شده است. بر اساس طبقه‌بندی اقلیمی دومارتن، استان بوشهر در شش گروه اقلیمی مختلف قرار می‌گیرد: فراخشک گرم، فراخشک معتدل، خشک بیابانی گرم، خشک بیابانی معتدل، نیمه‌خشک گرم و نیمه‌خشک معتدل. از نظر تقسیمات کشوری، استان بوشهر دارای ۹ شهرستان است که از این میان ۷ شهرستان شامل بوشهر، تنگستان، دشتستان، دشتی، دیر، دیلم و عسلویه به‌عنوان مناطق بیابانی شناخته می‌شوند. اراضی بیابانی این استان حدود ۱۶/۶ درصد از کل مساحت آن را شامل می‌شود.

مناطق نمونه‌برداری

به منظور اندازه‌گیری فرسایش بادی، نمونه‌برداری از ۲۲ کانون مورد نظر از ۷ شهرستان بیابانی استان بوشهر انجام گرفت (شکل ۱).



شکل ۱. نمای کلی مناطق نمونه‌برداری خاک و ایستگاه گرد و غبار در استان بوشهر و تصاویر از مناطق فرسایش بادی در هفت شهرستان استان بوشهر.

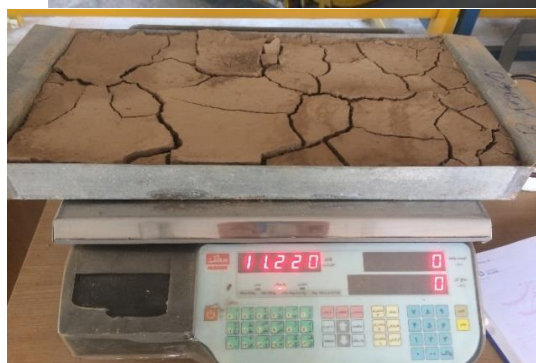


ادامه شکل ۱. نمای کلی مناطق نمونه‌برداری خاک و ایستگاه گرد و غبار در استان بوشهر و تصاویر از مناطق فرسایش بادی در هفت شهرستان استان بوشهر.

در این مطالعه، نمونه‌های دست‌نخورده‌ای به وزن ۲۵ کیلوگرم از کانون‌های فرسایش برداشت شد. هدف از این نمونه‌برداری، اندازه‌گیری شاخص‌های سرعت آستانه فرسایش مشاهداتی (m/s)، سرعت آستانه فرسایش محاسباتی (m/s) و میزان بادبردگی ($kg/m^2/min$) بود. همچنین ۲۲ نمونه خاک از عمق ۰ تا ۳۰ سانتی‌متر برای بررسی ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک جمع‌آوری شد. پس از ثبت خصوصیات ظاهری خاک، نمونه‌ها به آزمایشگاه مرکز تحقیقات استان بوشهر منتقل شدند.

بررسی سرعت آستانه و شدت فرسایش بادی

به منظور اندازه‌گیری سرعت آستانه و شدت فرسایش بادی، از تونل باد آزمایشگاه مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور استفاده شد (شکل ۲). این تونل دارای چهار بخش اصلی است: مولد باد برای تولید جریان هوا، لوله پیتوت جهت اندازه‌گیری فشار دینامیکی باد، فشارسنج الکترونیکی برای ثبت تغییرات فشار، محفظه آزمایش که نمونه‌ها در آن قرار داده می‌شوند. این تونل باد قابلیت شبیه‌سازی سرعت‌های مختلف باد از ۰/۵ تا ۳۰ متر بر ثانیه را دارا بوده و تنظیم شدت باد از طریق کنترل دور LG متصل به دستگاه انجام می‌شود. محفظه آزمایش دارای ابعاد ۹۴ سانتی‌متر عرض، ۸۰ سانتی‌متر ارتفاع و ۱۶ متر طول است. نمونه‌های خاک در سینی‌های مخصوص با ابعاد ۵۰×۳۰×۵ سانتی‌متر در بخش میانی تونل قرار گرفتند.



شکل ۲. نمایی از تونل باد مورد استفاده در تحقیق، توزین نمونه خاک در آزمایشگاه تونل باد و قرارگیری سینی آزمایش در محفظه آزمایش تونل باد

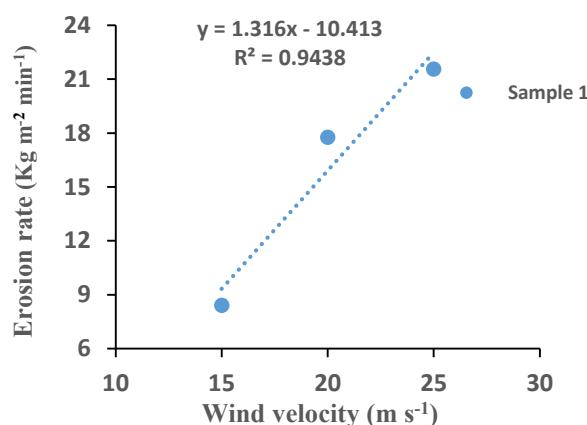
تعیین سرعت آستانه فرسایش بادی

برای تعیین سرعت آستانه فرسایش بادی، نمونه‌های خاک در سینی‌های آزمایش قرار داده شده و سطح آن‌ها با کاردک به آرامی و بدون فشردن صاف شد. سپس نمونه‌ها با ترازویی با دقت ۵ گرم وزن‌کشی شده و در تونل باد قرار گرفتند. سرعت باد به تدریج افزایش یافت تا جایی که حرکت معنی‌دار ذرات خاک از سطح سینی به‌طور یکنواخت و در زمان‌های متفاوت از نقاط مختلف آغاز شد. در این لحظه، مقدار سرعت باد به عنوان سرعت آستانه فرسایش مشاهداتی ثبت شد. برای افزایش دقت اندازه‌گیری، این آزمایش چندین بار تکرار شد. در روش محاسباتی، میزان بادبردگی در سرعت‌های مختلف ثبت گردید و از طریق مدل‌سازی داده‌ها با رابطه خط بادبردگی در برابر سرعت باد، مقدار سرعت آستانه فرسایش بادی به صورت عددی تعیین شد. در این روش، مقدار Y (میزان بادبردگی) در رابطه خط برابر صفر قرار داده شد و مقدار متناظر سرعت باد، به عنوان سرعت آستانه محاسبه گردید.

اندازه‌گیری میزان فرسایش بادی

پس از تعیین سرعت آستانه فرسایش بادی، هر نمونه خاک به مدت ۲۰ دقیقه در معرض بادهایی با سرعت‌های بالاتر از سرعت آستانه قرار داده شد. پس از این مدت، نمونه‌ها مجدداً وزن‌کشی شده و اختلاف وزن اندازه‌گیری شد. مقدار کاهش وزن نمونه‌ها، بیانگر میزان فرسایش بادی ($\text{kg/m}^2/\text{min}$) در هر سرعت باد بود. در جدول ۱، میزان بادبردگی یکی از نمونه‌های خاک استان بوشهر در سرعت‌های مختلف

ارائه شده است. همچنین، ارتباط میان سرعت باد و میزان بادبردگی به صورت تحلیل گرافیکی و رابطه ریاضی بررسی گردید. در این تحلیل، محور X بیانگر سرعت باد و محور Y نشان‌دهنده شدت فرسایش بود. پس از ترسیم بهترین خط برازش شده بر روی داده‌ها، نقطه برخورد این خط با محور X ، معادل سرعت آستانه فرسایش بادی مشخص شد (شکل ۳).



شکل ۳. اندازه‌گیری فرسایش‌پذیری بادی به عنوان شیب خط رابطه بین مقدار فرسایش و سرعت باد

جدول ۱. میزان فرسایش در سرعت‌های مختلف باد یک نمونه

جمع بادبردگی (کیلوگرم بر مترمربع دقیقه)	میزان فرسایش (کیلوگرم بر مترمربع در دقیقه)	سرعت آستانه محاسباتی (متر بر ثانیه)	سرعت باد (متر بر ثانیه)	سرعت آستانه فرسایش (مشاهداتی (متر بر ثانیه))
۴۷/۷۲	۸/۴		۱۵	
	۱۷/۷۶	۷/۹۱	۲۰	۶
	۲۱/۵۶		۲۵	

نمونه‌برداری و تجزیه فیزیکی و شیمیایی خاک

در این مطالعه، برای انجام آزمایش‌های فیزیکی و شیمیایی، ۲۲ نمونه خاک از عمق ۰ تا ۳۰ سانتی‌متر در نزدیکی کانون‌های فرسایش بادی با استفاده از بیلچه‌ای از جنس پلی‌اتیلن جمع‌آوری شد (Yang et al., 2016; Li et al., 2016). پس از جمع‌آوری، نمونه‌های خاک در شرایط سایه خشک شدند و سپس از الک با اندازه منافذ ۲ میلی‌متر عبور داده شدند. برای تعیین ویژگی‌های فیزیکی خاک، بافت خاک با استفاده از روش هیدرومتری اندازه‌گیری شد (Bouyoucos, 1962) اسیدیته خاک گل اشباع با استفاده از دستگاه pH متر و الکتروود شیشه‌ای (McLean, 1983) ارزیابی گردید. قابلیت هدایت الکتریکی در عصاره گل اشباع تعیین شدند (Roads, 1996). درصد کربنات کلسیم معادل خاک از طریق روش خنثی‌سازی با اسید کلریدریک یک نرمال و تیتراسیون با هیدروکسید سدیم اندازه‌گیری شد (Nelson, 1996). برای اندازه‌گیری درصد رطوبت اشباع، نمونه‌های خاک به روش وزنی اندازه‌گیری شدند. در این روش، به نمونه‌ها آب افزوده و خاک اشباع تهیه شد، سپس نمونه‌ها در آون در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت خشک شدند و پس از خشک شدن، وزن مجدد آن‌ها اندازه‌گیری شد. درصد رطوبت اشباع با استفاده از رابطه زیر محاسبه گردید (Famiglietti et al., 1998):

$$\text{رابطه (۱)} \quad 100 \times ((\text{وزن خاک خشک} / (\text{وزن خاک خشک} - \text{وزن خاک اشباع})) - \text{درصد رطوبت اشباع})$$

مقادیر کاتیون‌های کلسیم و منیزیم در عصاره اشباع گل خاک با استفاده از روش کمپلکسومتری و تیتراسیون با EDTA تعیین شد (Richards., 1954). مقادیر سدیم و پتاسیم نیز در عصاره اشباع خاک با استفاده از دستگاه شعله‌سنج اندازه‌گیری شدند (Sparks., 2020). نسبت جذب سدیم (SAR) با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد. در این محاسبه، نسبت سدیم به کلسیم و منیزیم عصاره گل اشباع به عنوان معیاری برای نسبت سدیم به کلسیم و منیزیم در سطح ذرات رس خاک در نظر گرفته شد:

$$SAR = \frac{Na}{\sqrt{(ca + mg)/2}}$$

رابطه (۲)

که در آن Na، Ca و Mg به ترتیب غلظت سدیم، کلسیم و منیزیم محلول خاک بر حسب واحد میلی اکوی والان بر لیتر می‌باشد.

تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها

نرمال بودن توزیع آماری داده‌ها با آزمون کلموگروف اسمیرنوف، توصیف آماری و آزمون ضریب همبستگی پیرسون^۲ برخی ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی با فرسایش خاک با استفاده از نرم‌افزار SPSS 25^۳ انجام گرفت.

نتایج و بحث

تحلیل کانون‌های فرسایش

ویژگی‌های کانون‌های احتمالی فرسایش بادی از هفت شهرستان بیابانی از در استان بوشهر در جدول ۲ ارائه شده است.

۱. کانون شهرستان بوشهر: شهرستان بوشهر دارای منطقه‌ای تحت تأثیر فرسایش بادی به نام بوشهر-چغادک-عالیشهر است که بخشی از آن با شهرستان‌های تنگستان و دشتستان مشترک می‌باشد. سطح کل فرسایش بادی در این شهرستان ۵۷۹۱۳ هکتار است. در این منطقه، کانون‌های فرسایش شامل حله (سایت ۱۸)، بوشهر (سایت ۱۷)، چاه کوتاه (سایت ۱۶) و بخشی از ابوالفیروز (سایت‌های ۱، ۲ و ۳) قرار دارند. **۲. کانون شهرستان دشتستان:** شهرستان دشتستان دارای سه کانون است که یکی از آن‌ها با شهرستان بوشهر مشترک می‌باشد. کانون بویری با مساحت ۶۵۱۵ هکتار شامل سایت ۴ است و کانون ابوالفیروز با مساحت ۱۰۶۷۳ هکتار شامل سایت‌های ۱، ۲ و ۳ می‌باشد. **۳. کانون شهرستان دشتی:** شهرستان دشتی نیز دارای دو کانون مند ۱ و مند ۲ است که یکی از آن‌ها با شهرستان دیر مشترک است. کانون مند ۱ شامل سایت‌های ۸ و ۹ و کانون مند ۲ شامل سایت‌های ۵، ۶، ۱۰ و ۱۱ با مساحت ۲۸۱۲۳ هکتار است که بخشی از آن با شهرستان دیر مشترک می‌باشد. **۴. کانون شهرستان دیر:** شهرستان دیر دارای دو کانون ریزگرد فعال است که کانون مند ۲ با شهرستان دشتی مشترک بوده و کانون بردخون با مساحت ۱۱۸۵۲ هکتار شامل سایت ۷ می‌باشد. **۵. کانون شهرستان تنگستان:** شهرستان تنگستان دارای چهار کانون است که کانون ابوالفیروز با شهرستان دشتستان و کانون گرگور با شهرستان بوشهر مشترک است. کانون گرگور با مساحت ۴۷۲۵ هکتار شامل سایت‌های ۱۲ و ۱۳ می‌باشد. کانون عالی شهر (کانون ۱۴) با مساحت ۲۸۵۴ هکتار و کانون چاه پیر (کانون ۱۵) با مساحت ۱۳۴۹ هکتار نیز در این شهرستان قرار دارند. **۶. کانون شهرستان گناوه:** شهرستان گناوه نیز دارای دو کانون است که شامل کانون اول رود شور با مساحت ۷۳۱۲ هکتار (سایت ۱۹) و کانون ریگ با مساحت ۷۸۵ هکتار (سایت ۲۰) می‌باشد. **۷. کانون شهرستان دیلم:** کانون شهرستان دیلم شامل سایت‌های ۲۱ و ۲۲ در سایت پرورش میگوی دیلم با مساحت ۶۱۰۷ هکتار است.

جدول ۲. ویژگی‌های کانون‌های فرسایش بادی در استان بوشهر

شهرستان	نام منطقه تحت تأثیر فرسایش بادی	کانون	جهت باد غالب	مساحت (هکتار)	سایت‌های آزمایشی
بوشهر	برازجان - چغادک - عالیشهر	حله، بوشهر، چاهکوتاه، ابوالفیروز	شمال غربی	57,913	۳، ۲، ۱، ۱۶، ۱۷، ۱۸
دشتستان	دیلم - گناوه - شبانکاره و برازجان - چغادک - عالیشهر	بویری، ابوالفیروز، بوشهر - عالیشهر	شمال غربی	۱۷,۱۸۸	۱، ۲، ۳، ۴، مشترک با بوشهر - عالیشهر
دشتی	خورموج - بردخون	مند ۱، مند ۲	شمال غربی	28,123	۸، ۹، ۱۰، ۱۱، مشترک با دیر
دیر	خورموج - بردخون و آبدان	مند ۲، بردخون	شمال غربی	11,852	۲، ۷
تنگستان	خورموج - بردخون و برازجان - چغادک - عالیشهر	ابوالفیروز، گرگور، عالی شهر، چاه پیر	شمال غربی	۸۹۲۸	۱۲، ۱۳، ۱۴، ۱۵، مشترک با بوشهر
گناوه	دیلم - گناوه - شبانکاره	رود شور، ریگ	شمال غربی	۸۰۹۷	۱۹، ۲۰
دیلم	دیلم - گناوه - شبانکاره	(سایت پرورش میگوی دیلم)	شمال غربی	۶۱۰۷	۲۱، ۲۲

توصیف آماری

خلاصه‌ای از پارامترهای آماری مربوط به برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در منطقه مورد مطالعه (شامل دامنه تغییرات، حداقل، حداکثر، میانگین و ضریب تغییرات) در جدول ۳ ارائه شده است. درصد شن با میانگین ۵۱/۳ درصد، دامنه‌ای از ۱۷/۶ تا ۸۹/۶ درصد را شامل می‌شود. درصد سیلت با میانگین ۳۰/۵ درصد، بین ۲ تا ۶۲ درصد متغیر بود. همچنین، درصد رس با میانگین ۱۸/۱۱ درصد، بیشترین ضریب تغییرات را در میان اجزای بافت خاک نشان داد. ($CV = 66.3\%$). با توجه به تنوع بالای درصد شن، سیلت و رس (از چند درصد تا چند ده درصد)، می‌توان نتیجه گرفت که پهنه وسیعی از خاک‌های مختلف مناطق خشک و نیمه‌خشک استان بوشهر در این مطالعه پوشش داده شده‌اند. در میان این اجزای بافتی، رس بیشترین نوسان را داشته و تغییرات سیلت و شن نیز به صورت قابل توجهی متغیر بوده‌اند. این مقادیر نشان‌دهنده تنوع بافت خاک‌ها است که اغلب در محدوده کلاس بافتی متوسط قرار می‌گیرند. در میان ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی، کمترین ضریب تغییرات (CV) مربوط به اسیدیته (pH) خاک بود. مقادیر آهک نیز به خوبی نشان‌دهنده ماهیت آهکی خاک‌های منطقه هستند. در مقایسه با سایر ویژگی‌ها، مقادیر EC و SAR نوسانات بسیار بالایی داشتند، به طوری که بیشترین تغییرات مربوط به هدایت الکتریکی (EC) بود. این موضوع به شرایط اقلیمی و خاک‌های استان بوشهر مرتبط است، به ویژه اینکه مناطق مورد مطالعه شامل خاک‌های شور و غیرشور بودند. در نتیجه، مقادیر SAR بین ۳ تا ۹۵۰ درصد و EC بین ۰/۵ تا ۸۱ دسی‌زیمنس بر متر متغیر بوده که نشان‌دهنده بیشترین اختلاف بین حداقل و حداکثر مقادیر در این دو پارامتر است. نتایج این تحقیق با یافته‌های Sirjani et al (2019) مطابقت دارد، به طوری که در مطالعه آن‌ها نیز مقادیر هدایت الکتریکی (EC) در استان فارس بین ۰/۵ تا ۱۴۸ دسی‌زیمنس بر متر و مقادیر سدیم قابل جذب (SAR) از ۰/۳ تا ۶۶۲ درصد گزارش شده است.

جدول ۳. خلاصه آماری برخی ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی در منطقه مورد مطالعه

متغیر	واحد	محدوده	کمترین	بیشترین	میانگین	ضریب تغییرات
شن	%	۷۲	۱۷/۶	۸۹/۶	۵۱/۳	۵۴/۸
سیلت	%	۶۰	۲	۶۲	۳۰/۵	۶۱
رس	%	۳۸	۲/۴	۴۰/۴	۱۸/۱	۶۶/۳
نسبت جذب سدیم	(meq L ⁻¹)0.5	۹۴۷	۳	۹۵۰	۲۳۲	۸۶
کلسیم + منیزیم محلول	meq.L ⁻¹	۳۶۷	۹	۳۷۶	۱۴۱/۶	۷۹/۴
گچ	%	۲۰۵/۴	۸/۹	۲۱۴/۳	۵۵/۵	۱۲۳
آهک	%	۳۷	۴۵	۸۲	۵۸/۷	۲۳/۲
pH	-	۱	۶/۸	۷/۸	۷/۱	۴/۷
قابلیت هدایت الکتریکی	dS.m ⁻¹	۸۰/۷	۰/۵	۸۱/۲	۲۳/۶	۹۲/۷
درصد اشباع	%	۴۶	۲۴	۷۰	۴۲	۳۳/۸

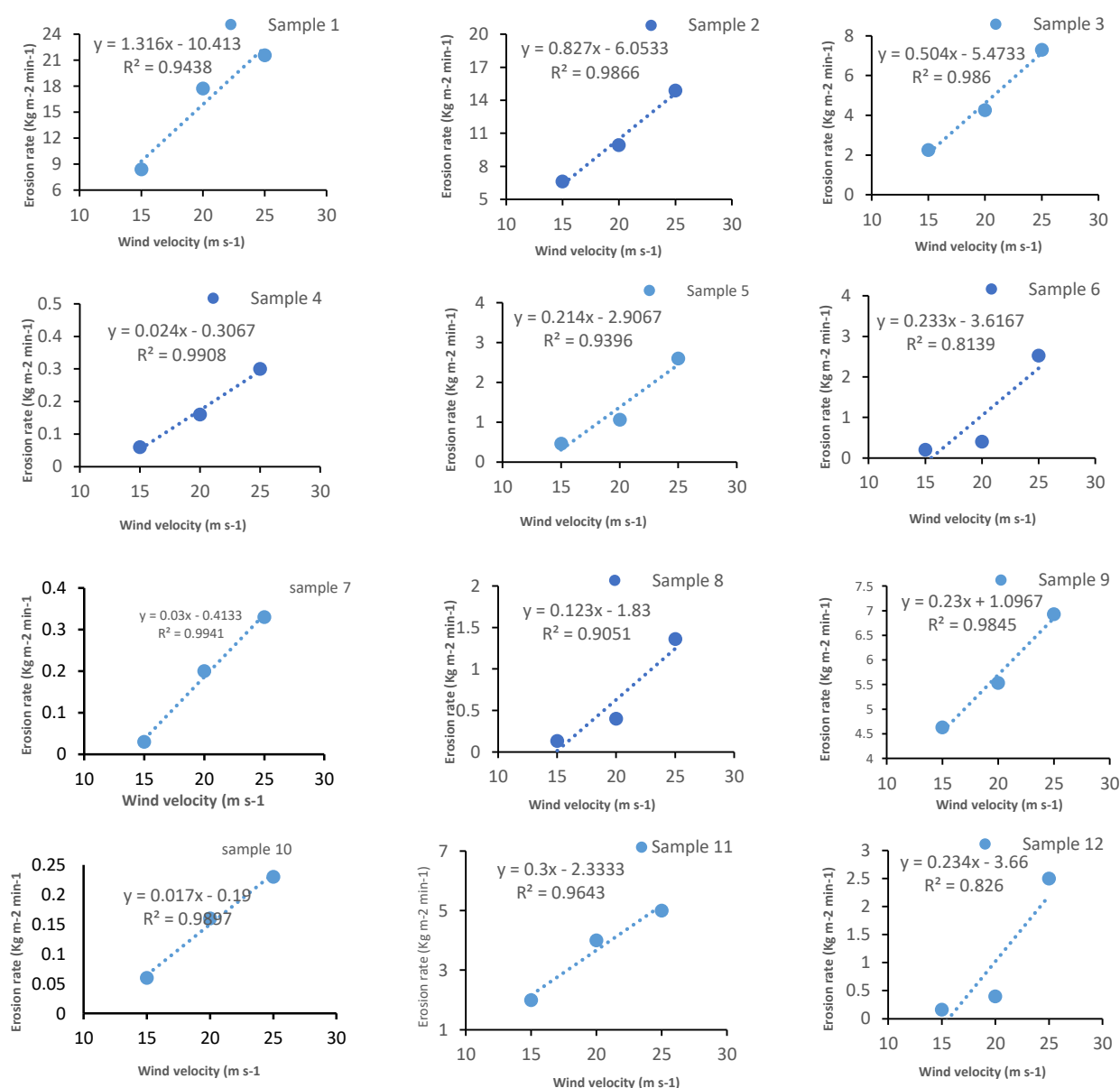
محاسبه فرسایش بادی

شکل ۴ نمودارهای رگرسیونی اندازه‌گیری فرسایش‌پذیری بادی به عنوان شیب خط رابطه بین مقدار فرسایش و سرعت باد (۱۵، ۲۰ و ۲۵ کیلومتر بر ساعت) را نشان می‌دهد. بر اساس جدول ۴، نتایج نشان داد که کمترین و بیشترین سرعت آستانه فرسایش مشاهداتی به ترتیب ۵ و ۱۵ متر بر ثانیه و کمترین و بیشترین سرعت آستانه فرسایش محاسباتی به ترتیب ۴/۷ و ۱۹/۴ متر بر ثانیه بوده است. کمترین سرعت آستانه فرسایش بادی (در هر دو حالت مشاهداتی و محاسباتی به ترتیب ۵ و ۶ متر بر ثانیه) مربوط به روستای پهلوان کشی و اراضی مرتعی است. از میان مناطق بررسی شده، جنوب غربی منطقه مطالعاتی با بافت شنی، پوشش گیاهی بسیار ضعیف، پوشش سنگریزه‌ای کم و رطوبت سطحی پایین، دارای کمترین سرعت آستانه فرسایش بوده و به عنوان بحرانی‌ترین منطقه در بین سایر نقاط شناخته شده است. در مقابل بیشترین سرعت آستانه فرسایش (۱۵ و ۱۹/۱ متر بر ثانیه) متعلق به اراضی رها شده در جاده کبگان و سایت‌های پرورش میگو می‌باشد. بیشترین میزان بادبردگی (۴۷/۷ و ۳۱/۶ کیلوگرم بر مترمربع بر دقیقه) در مناطقی با کمترین سرعت آستانه فرسایش بادی (۶ متر بر ثانیه) و مربوط به مرتع دست کاشت مشاهده شد. درحالی‌که کمترین بادبردگی (۰/۳۶ - ۱ کیلوگرم بر مترمربع بر دقیقه) در مناطقی با بیشترین

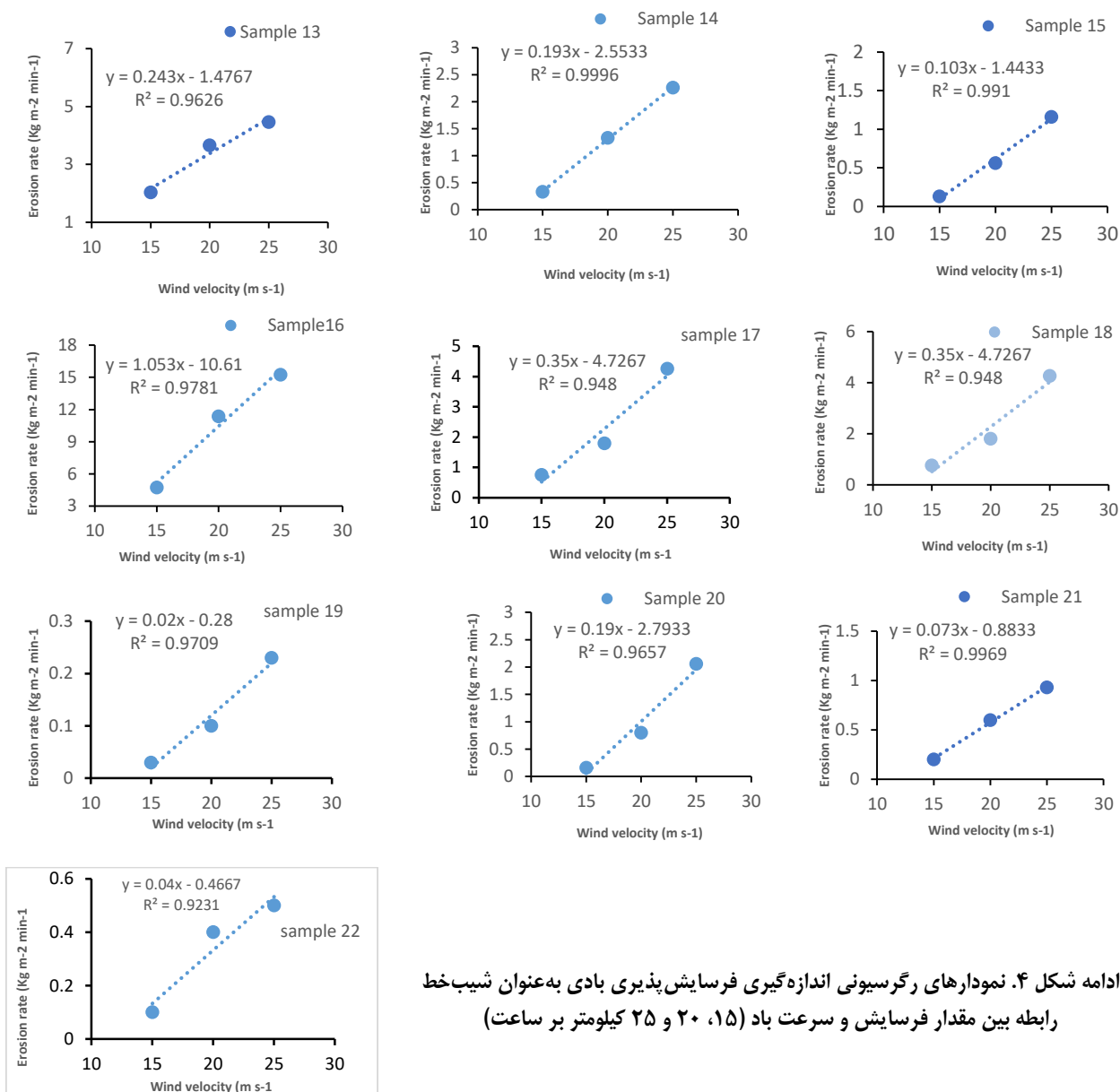
سرعت آستانه فرسایش (۱۵ متر بر ثانیه) متعلق به اراضی رها شده در جاده کبگان، سایت‌های پرورش میگو، اراضی مرتعی مله سوخته از کانون شهرستان گناوه، دیلم، دیر و بوشهر می‌باشد. مطابق با نتایج مطالعه مینا و همکاران (۱۴۰۲) جنوب غربی منطقه استان فارس نیز دارای کمترین سرعت آستانه فرسایش بادی و شرایط بحرانی گزارش شده است.

دامنه گسترده شدت‌های فرسایش بادی مشاهداتی (بین ۵ تا ۱۵ متر بر ثانیه) بیانگر تنوع فرسایش بادی در خاک‌های مورد مطالعه و فرسایش پذیری متفاوت آنها است. 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 (Giuffrida et al., 2016).

شهابی و همکاران (۱۳۹۹) دامنه وسیعی از سرعت‌های آستانه فرسایش بادی بین ۱/۲ تا ۱۰/۴ متر بر ثانیه (ارتفاع ۰/۱۵ متری) را گزارش کردند. همچنین نشان دادند با افزایش سرعت آستانه به طور غیرخطی فرسایش بادی کاهش یافته است.



شکل ۴. نمودارهای رگرسیونی اندازه‌گیری فرسایش پذیری بادی به عنوان شیب خط رابطه بین مقدار فرسایش و سرعت باد (۱۵، ۲۰ و ۲۵ کیلومتر بر ساعت)



ادامه شکل ۴. نمودارهای رگرسیونی اندازه‌گیری فرسایش پذیری بادی به‌عنوان شیب خط رابطه بین مقدار فرسایش و سرعت باد (۱۵، ۲۰ و ۲۵ کیلومتر بر ساعت)

تأثیر ویژگی‌های خاک بر فرسایش‌پذیری بادی

جدول ۵، همبستگی پیرسون بین ویژگی‌های مختلف خاک با سرعت آستانه فرسایش بادی و شدت فرسایش در سرعت‌های ۱۵، ۲۰ و ۲۵ متر بر ثانیه را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه بافت خاک (درصد شن، سیلت و رس) از مؤثرترین عوامل کنترل‌کننده فرسایش‌پذیری بادی به شمار می‌رود، در گام نخست، نقش ذرات اولیه خاک در حساسیت آن نسبت به فرسایش مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داد که درصد شن با سرعت آستانه فرسایش بادی رابطه‌ای منفی و با شدت فرسایش در سرعت‌های مختلف باد رابطه‌ای مثبت دارد. این بدان معناست که با افزایش شن در خاک، مقاومت آن در برابر جداشدگی ذرات کاهش یافته و شدت فرسایش افزایش می‌یابد. درصد اندازه ذرات و بافت خاک با فرسایش بادی در ارتباط می‌باشد (Pásztor et al., 2016). در مقابل، درصد رس و سیلت با شدت فرسایش بادی همبستگی منفی نشان داده‌اند؛ به‌گونه‌ای که با افزایش این ذرات ریز، خاک پایداری بیشتری در برابر نیروی باد از خود نشان می‌دهد. دلیل این موضوع را می‌توان در نقش ذرات ریز، به‌ویژه رس، در ایجاد پیوستگی بین ذرات و تشکیل کلوخه‌ها دانست. خاک‌های دارای درصد رس بالا به دلیل نیروهای چسبندگی قوی، در برابر جدا شدن ذرات توسط باد یا آب مقاومت بیشتری داشته و در نتیجه ضریب فرسایش‌پذیری کمتری دارند (Idah et al., 2008). همچنین سیلت نیز از طریق تقویت ساختار سطحی و تشکیل پوسته خاک، می‌تواند به کاهش فرسایش کمک کند. در این پژوهش، درصد رس خاک بین ۴ تا ۴۰ درصد متغیر بود. بر اساس یافته‌ها، وجود بیش از ۱۰ درصد رس در خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران می‌تواند نقش مؤثری در کاهش فرسایش‌پذیری بادی ایفا کند. این یافته با گزارش (Chepil 1954) مطابقت



دارد که بیان کرده است درصد رس بیش از ۱۵ درصد به طور معناداری باعث کاهش فرسایش بادی می شود. با این حال، افزایش بیش از حد درصد رس (بیش از ۴۰ درصد) ممکن است منجر به افزایش شکندگی خاک و در نتیجه افزایش حساسیت آن به فرسایش گردد.

جدول ۴. نتایج شاخص های محاسبه شده فرسایش بادی در منطقه مورد مطالعه

نام نقطه	y	x	واحد اراضی	منطقه برداشت	سرعت آستانه فرسایش مشاهداتی (متر بر ثانیه)	سرعت آستانه محاسباتی (متر بر ثانیه)	جمع باد بردگی (کیلوگرم بر مترمربع در دقیقه)
سایت ۱	۳۲۲۵۸۴۶	۳۲۲۵۸۴۶	مرتفع دست کاشت	شرق روستای ابوالفیروز	۶	۷/۹۱	۴۷/۷
سایت ۲	۳۲۲۵۹۰۵	۵۱۸۴۶۵	مرتفع دست کاشت	شرق روستای ابوالفیروز	۶	۷/۳۱	۳۱/۴
سایت ۳	۳۲۲۵۸۱۲	۵۱۸۰۸۴	مرتفع تخریب شده	شرق روستای ابوالفیروز	۶	۱۰/۸	۱۳/۸۲
سایت ۴	۳۲۵۴۰۸۹	۵۰۵۰۶۲	دیمزار	جنوب شرق روستای بویری	۱۳	۱۲/۷۷	۰/۵۲
سایت ۵	۳۱۱۵۷۵۲	۵۴۳۲۴۹	رهاشده	جنوب شرق امامزاده قبل از روستای شهینا	۱۲	۱۳/۵	۴/۱۲
سایت ۶	۳۱۱۳۶۷۱	۵۴۷۹۲۵	مرتعی	جنوب مند روبروی روستای شهینا	۱۰	۱۵/۵	۳/۱۳
سایت ۷	۳۰۹۰۱۳۴	۵۵۰۸۳۰	مرتعی	مله سوخته	۱۵	۱۹/۴	۰/۵۶
سایت ۸	۳۱۴۴۳۵۱	۵۴۴۷۲۴	کشاورزی	شمال مند جاده کبگان	۱۲	۱۴/۸۷	۱/۸۹
سایت ۹	۳۱۳۶۰۳۶	۵۳۹۸۸۹	رهاشده	غرب مند جاده کبگان	۶	۴/۷۶	۱۷
سایت ۱۰	۳۱۱۹۳۲۴	۵۴۵۰۴۸	رهاشده	جاده کبگان	۱۵	۱۷/۵۷	۰/۴۵
سایت ۱۱	۳۱۱۳۹۵۸	۵۴۵۴۲۵	مرتعی	اراضی حاشیه جنوبی مند	۶	۷/۷۶	۱۱
سایت ۱۲	۳۱۸۷۸۱۹	۵۰۴۱۲۹	شور ساحلی	غرب روستای چاه تلخ	۱۲	۱۵/۶۴	۳
سایت ۱۳	۳۱۹۵۸۱۵	۵۰۶۷۷۹	مرتعی	شرق روستای پهلوان کشی	۵	۶	۱۰/۱۵
سایت ۱۴	۳۲۰۰۶۷	۵۱۲۱۳۸	حاشیه اراضی کشاورزی	جنوب روستای بنه گز	۱۰	۱۳/۲۲	۳/۹۲
سایت ۱۵	۳۲۰۶۵۳۹	۵۲۲۷۲۲	رهاشده کشاورزی	جنوب روستای چاه پیر	۱۲	۱۴	۱/۸۵
سایت ۱۶	۳۲۱۸۴۲۱	۵۱۲۹۰۲	مرتعی	جنوب روستای تل اشکی	۶	۱۰	۱۳/۳۵
سایت ۱۷	۳۲۱۴۵۶۷	۴۹۶۳۳۷	عرصه و استخر	جزیره	۱۵	۱۹/۱۳	۰/۷۲
سایت ۱۸	۳۲۳۵۰۹۴	۴۶۹۵۶۳	پرورش میگو رود حله	غرب رودحله	۱۰	۱۳/۵	۶/۸۲
سایت ۱۹	۳۲۴۴۰۲۱	۴۷۳۶۶۵	پرورش میگو رود شور	شمال سایت	۱۵	۱۹/۳۲	۰/۳۶
سایت ۲۰	۳۲۶۷۳۰۰	۴۶۰۶۰۹	پرورش میگو خور آرش	غرب سایت	۱۲	۱۴/۷	۳
سایت ۲۱	۳۳۱۴۲۸۳	۴۲۰۸۵۴	پرورش میگو دیلم	داخل سایت	۱۰	۱۲	۱/۷۳
سایت ۲۲	۳۳۱۳۷۸۳	۴۱۹۳۰۲	مجاور سایت پرورش میگو دیلم	جنوب سایت	۱۵	۱۸/۲۲	۱

مطالعه Zou et al. (2018) نیز بیانگر آن است که توزیع اندازه ذرات اولیه (قطر مکانیکی ذرات خاک) تأثیر عمیقی بر وقوع فرسایش بادی دارد. زمانی که انرژی باد از آستانه انرژی لازم برای حرکت دادن ذرات خاک فراتر رود، فرسایش آغاز می شود (Callot et al., 2000; Webb et al., 2006) در چنین شرایطی، ذرات سبک تر، ابتدا توسط باد جدا شده و فرایند فرسایش بادی به صورت تدریجی و انتخابی ادامه می یابد. در مطالعه حاضر، درصد پوشش سطحی شن در خاک از ۱۷ تا ۸۹ درصد متغیر بود. اگرچه انتظار می رفت این پوشش به عنوان عاملی حفاظتی عمل کرده و مقاومت سطح خاک را در برابر باد افزایش دهد، اما نتایج نشان داد که در برخی موارد، پوشش شن منجر به کاهش سرعت آستانه فرسایش شده و در واقع حساسیت خاک را نسبت به باد افزایش داده است. نتایج مطالعه شهابی نژاد و همکاران (۱۳۹۹) نشان داد که عواملی چون افزایش درصد شن، سدیم محلول، هدایت الکتریکی (EC) و نسبت جذب سدیم (SAR)، با افزایش قابل توجه شدت فرسایش همراه بوده اند. با این حال، مطالعات متعددی به نقش حفاظتی پوشش های زبر سطحی مانند شن و سنگریزه ها در برابر فرسایش بادی اشاره کرده اند. برای مثال، (Marticorena et al 1997)، (Marshall 1971)، (Feng et al و Mu 2010) و (2011) گزارش کردند که این عناصر زبر با جذب بخشی از انرژی باد و تقسیم تنش برشی در سطح خاک، از جدا شدن ذرات جلوگیری

می‌کنند. به گفته (Goossens 1994)، یک آستانه بحرانی برای تراکم پوشش‌های زبر سطحی وجود دارد که پس از آن، افزایش تراکم باعث افزایش سرعت آستانه فرسایش و در نتیجه محافظت مؤثرتر از خاک می‌شود. بنابراین، نقش پوشش‌شن در کنترل فرسایش، تابعی از تراکم، اندازه و الگوی پراکنش آن در سطح بوده و ممکن است تحت شرایط مختلف اقلیمی و منطقه‌ای عملکرد متفاوتی داشته باشد. همچنین، اندازه ذرات شن و نقش آن‌ها در مقاومت در برابر باد نیز بررسی شده است. مطالعه (Kouchami-Sardoo et al 2020) نشان داد که فرسایش خاک نسبت به پوسته سطحی، شن بسیار ریز و شن درشت حساس است. ذرات شن ریز ($0.05-0.1$ میلی‌متر) به دلیل وزن کم، به راحتی توسط باد جابجا می‌شوند، در حالی که شن درشت‌تر مقاومت بیشتری دارد. طبق تحقیقات (Li et al 2003) فرسایش بادی فرآیندی انتخابی است که بیشتر ذرات با اندازه 0.1 تا 0.25 میلی‌متر را تحت تأثیر قرار می‌دهد؛ ذرات کوچکتر یا بزرگتر کمتر دچار فرسایش می‌شوند.

در کنار ترکیب بافت خاک، سایر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نیز در میزان فرسایش‌پذیری نقش مهمی دارند. از جمله این عوامل می‌توان به کربنات کلسیم معادل و غلظت عناصر محلول مانند کلسیم، پتاسیم و منیزیم اشاره کرد. در این مطالعه، میزان کربنات کلسیم معادل (CCE) خاک منطقه، که در بازه‌ای بین ۴۵ تا ۸۵ درصد قرار داشت، با سرعت آستانه فرسایش بادی همبستگی منفی و با میزان بادبردگی همبستگی مثبت نشان داد. به عبارتی، افزایش آهک موجب کاهش سرعت آستانه و افزایش شدت فرسایش بادی شد. این نتایج را می‌توان با توجه به ماهیت آهکی خاک‌های منطقه و شرایط اقلیمی خشک و نیمه‌خشک آن تفسیر کرد. بررسی‌های پیشین نیز بیانگر آن هستند که تأثیر کربنات کلسیم بر فرسایش‌پذیری خاک، تابعی از بافت خاک و غلظت آهک است. به عنوان نمونه (Chepil 1954) و (Tatarko 2001) معتقدند که در خاک‌های شنی و شنی‌لومی، آهک با افزایش پایداری خاک‌دانه‌ها موجب کاهش فرسایش‌پذیری می‌شود. در مقابل (Chepil 1954) گزارش کرده است که در سایر انواع خاک، افزایش آهک منجر به تجزیه خاک‌دانه‌ها و کاهش پایداری خاک می‌گردد. همچنین (Colazo & Buschiazzi 2010) در خاک‌های با میزان آهک پایین، رابطه معناداری بین CCE و پایداری خاک مشاهده نکردند. بر این اساس، می‌توان نتیجه گرفت که تأثیر کربنات کلسیم بر فرسایش‌پذیری خاک، رابطه‌ای ساده و خطی نداشته و وابسته به نوع بافت خاک و میزان آهک موجود در آن است. این یافته توسط (Sirjani et al 2019) نیز تأیید شده است؛ آنان گزارش کردند که افزایش محتوای CCE در بافت‌های ریز و متوسط، تأثیر معناداری بر میزان فرسایش خاک نداشته است، اما در خاک‌هایی با مقادیر بالای شن و ماسه ($CCE > 60\%$)، افزایش آهک با افزایش معنادار فرسایش بادی همراه بوده است. علاوه بر این، مطالعه (Kouchami-Sardoo et al 2020) نیز به بررسی تأثیر کربنات کلسیم بر ویژگی‌های مؤثر در فرسایش بادی پرداخت و CCE و میانگین وزنی قطر خاک‌دانه‌ها (MWD) را در کنار پوسته سطحی و توزیع اندازه ذرات، به عنوان متغیرهایی با حساسیت متوسط نسبت به فرسایش‌پذیری معرفی کرد. در همین راستا، پژوهش (Sirjani et al 2019) نیز رابطه‌ای معنادار میان CCE و فرسایش بادی گزارش کرد و بر ارتباط مستقیم فرسایش بادی با ویژگی‌های سطحی خاک تأکید نمود. در منطقه مورد مطالعه، انواع مختلفی از بافت خاک شامل شنی، شنی‌لومی، لومی، لومی‌رسی، رسی سیلتی و لومی‌رسی سیلتی شناسایی شد. این تنوع در بافت می‌تواند عاملی مؤثر در تفاوت واکنش خاک‌ها به مقادیر مختلف کربنات کلسیم بوده و تفسیر نتایج را پیچیده‌تر سازد. بنابراین، نقش CCE در فرسایش‌پذیری بادی باید در چارچوب بافت خاک، اقلیم منطقه و سایر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد ارزیابی قرار گیرد.

بررسی همبستگی بین پارامترهای شیمیایی خاک با شاخص‌های فرسایش‌پذیری بادی نشان داد که قابلیت هدایت الکتریکی (EC) با سرعت آستانه فرسایش بادی (مشاهداتی و محاسباتی) رابطه‌ای مثبت و با میزان فرسایش در سرعت‌های مختلف باد رابطه‌ای منفی دارد. این در حالی است که نسبت جذب سدیم (SAR) رابطه معناداری با این شاخص‌ها نشان نداد. در تبیین این نتایج، باید به ویژگی‌های خاص منطقه مورد مطالعه اشاره کرد. در این منطقه، وجود خاک‌های آهکی، پوشش سطحی شور، منابع نمک ثانویه و کاربری‌های نامناسب زمین، باعث شده‌اند که مقادیر EC و SAR به طور قابل توجهی در خاک‌های سطحی افزایش یابد. همچنین، فرآیندهای طبیعی مانند هوازگی مواد مادری و آزادسازی یون‌ها در محلول خاک، در کنار تجمع نمک در نتیجه کاربری نادرست زمین، به غلظت بالای املاح در خاک منجر شده‌اند. مقادیر EC در این تحقیق از 0.5 تا 81 دسی‌زیمنس بر متر متغیر بوده که دامنه گسترده‌ای از شوری را در منطقه نشان می‌دهد. از سوی دیگر، به دلیل آهکی بودن خاک‌ها، یون‌های کلسیم (Ca^{2+}) و منیزیم (Mg^{2+}) در محلول خاک غالب هستند که نقش مهمی در پیوند بین ذرات رس و تقویت ساختار خاک ایفا می‌کنند. این ترکیب یونی باعث افزایش اندازه و پایداری خاکدانه‌ها شده و در نهایت، کاهش فرسایش‌پذیری بادی را به دنبال داشته است. در مطالعات مختلف، ساز و کارهای متنوعی برای اثر شوری و ترکیب یونی خاک بر فرسایش‌پذیری گزارش شده است. برای مثال، (Sirjani et al 2019) بیان کرده‌اند که شوری از طریق افزایش پیوند بین ذرات

ریز، موجب تجمع و تشکیل خاک‌دانه‌های بزرگ‌تر می‌شود. به‌طور مشابه، (Warrence et al (2002) اظهار داشتند که شوری می‌تواند با تسهیل فرآیند لخته‌سازی (flocculation)، موجب چسبندگی ذرات ریز و تثبیت خاک شود، به‌ویژه زمانی که EC خاک از ۱/۵ دسی‌زیمنس بر متر فراتر رود. از طرف دیگر، چنانچه غلظت کاتیون‌های مخرب مانند سدیم (Na^+) افزایش یابد و نسبت آن نسبت به کاتیون‌های تثبیت‌کننده بالا باشد، ساختار خاک ممکن است دچار پراکندگی شود. (Moosavi & Sepaskhah (2012) و Farid Giglo et al. (2014) گزارش کردند که افزایش SAR باعث پراکندگی ذرات رس و کاهش پایداری خاک‌دانه‌ها می‌شود. همچنین، Mahmoodabadi et al. (2013) و Yan et al (2015) نیز بر اثرات مخرب تجمع سدیم در فاز تبادلی خاک بر ساختار فیزیکی آن تأکید داشته‌اند. با این حال، چنانچه غلظت کاتیون‌های تثبیت‌کننده مانند کلسیم، منیزیم و پتاسیم بیشتر از سدیم باشد، شوری می‌تواند اثر مثبت بر پایداری ساختار خاک داشته باشد. در همین راستا، (Yazdanpanah et al. (2016 بیان کردند که اثر مثبت EC بر ساختار خاک وابسته به نسبت بین کاتیون‌های تثبیت‌کننده و مخرب است. در این مطالعه نیز به‌نظر می‌رسد ترکیب یونی غالب شامل کلسیم و منیزیم در کنار شوری بالا، موجب تقویت ساختار خاک و کاهش فرسایش‌پذیری بادی شده است. در نهایت، نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که فرسایش بادی تحت تأثیر ترکیبی پیچیده از عوامل فیزیکی (بافت، اندازه و تراکم ذرات) و شیمیایی (EC، CCE و ترکیب یونی) خاک قرار دارد و اثر هر یک باید در چارچوب شرایط اقلیمی و ویژگی‌های منطقه‌ای تبیین شود.

جدول ۵. همبستگی ویژگی‌های فیزیکی شیمیایی خاک با میزان و سرعت آستانه فرسایش باد در منطقه مورد مطالعه

ویژگی‌های خاک	سرعت آستانه فرسایش	سرعت آستانه محاسباتی	جمع باد بردگی	میزان فرسایش (Kg m^{-2})	میزان فرسایش ($\text{Kg m}^{-2} \text{ min}^{-1}$)	میزان فرسایش ($\text{Kg m}^{-2} \text{ min}^{-1}$)
مشاهداتی m.s^{-1}	محاسباتی (m.s^{-1})	بردگی $(\text{Kg m}^{-2} \text{ min}^{-1})$	کیلو متری	در سرعت باد ۱۵ کیلو متری در سرعت باد ۲۰ کیلو متری در سرعت باد ۲۵ کیلو متری	در سرعت باد ۱۵ کیلو متری در سرعت باد ۲۰ کیلو متری در سرعت باد ۲۵ کیلو متری	در سرعت باد ۱۵ کیلو متری در سرعت باد ۲۰ کیلو متری در سرعت باد ۲۵ کیلو متری
شن	*-۰/۴۹	*-۰/۵۳	**۰/۵۹	**۰/۶	**۰/۶	**۰/۵۷
سیلت	*۰/۴۵	*۰/۴۷	**۰/۵۶	**۰/۵۶	**۰/۵۶	**۰/۵۵
رس	*۰/۴۵	*۰/۵۳	*۰/۵۳	**۰/۵۴	**۰/۵۳	*-۰/۴۹
سدیم قابل تبادل	۰/۱	۰/۳۵	-۰/۴	-۰/۴	-۰/۴	-۰/۴
کلسیم + منیزیم محلول	*۰/۴۲	*۰/۴۲	**۰/۵۷	**۰/۵۶	**۰/۵۶	**۰/۵۶
گچ	۰/۳	۰/۳	-۰/۲	-۰/۲	-۰/۲	-۰/۳
آهک	**۰/۶۳	**۰/۶	**۰/۶۵	**۰/۶۲	**۰/۶۵	**۰/۶۵
pH	**۰/۶۹	**۰/۶۹	**۰/۷	**۰/۶۸	**۰/۷۱	**۰/۷
قابلیت هدایت الکتریکی	**۰/۷۱	**۰/۷۳	**۰/۵۴	**۰/۵۳	**۰/۵۴	**۰/۵۵
درصد اشباع	۰/۳	۰/۳	-۰/۳	-۰/۳	-۰/۳	-۰/۴

نتیجه‌گیری نهایی

یافته‌های این مطالعه به وضوح نشان می‌دهد بررسی‌های مکانی حاکی از آن است که نواحی جنوب‌غربی منطقه مطالعاتی و روستای پهلوان‌کشی، به‌دلیل بافت شنی، رطوبت سطحی پایین، پوشش گیاهی ضعیف و عدم وجود سنگ‌ریزه‌های حفاظتی، دارای پایین‌ترین سرعت آستانه فرسایش (۵ تا ۶ متر بر ثانیه) و بیشترین شدت بادبردگی (تا ۴۷/۴۷ کیلوگرم بر مترمربع بر دقیقه) بوده و در زمره بحرانی‌ترین مناطق فرسایش‌پذیر قرار گرفتند. در مقابل، اراضی رهاشده در جاده کبگان و سایت‌های پرورش میگو، اراضی مرتعی مله سوخته از کانون شهرستان گناوه، دیلم، دیر و بوشهر با برخورداری از بافت سنگین‌تر، پوشش سطحی بهتر و ساختار پایدارتر، بیشترین مقاومت در برابر فرسایش بادی (سرعت آستانه تا ۱۹/۴ متر بر ثانیه) را نشان دادند.

همچنین نتایج به‌روشنی نشان می‌دهند که فرسایش‌پذیری بادی در منطقه مورد بررسی، تحت تأثیر مجموعه‌ای از عوامل فیزیکی، شیمیایی و اقلیمی خاک قرار دارد. در میان این عوامل، بافت خاک به‌ویژه درصد شن، رس و سیلت، نقش غالب و تعیین‌کننده‌ای ایفا می‌کند. نتایج تحلیل همبستگی نشان داد که افزایش درصد شن با کاهش سرعت آستانه فرسایش و افزایش میزان بادبردگی همراه بوده است، در حالی که افزایش ذرات ریز مانند رس و سیلت، به‌واسطه تقویت پیوستگی بین ذرات خاک، موجب پایداری ساختاری و کاهش فرسایش‌پذیری

شده است. از سوی دیگر، نقش ترکیبات شیمیایی خاک نیز قابل توجه بود. در حالی که افزایش کربنات کلسیم معادل (CCE) در خاک‌های سبک و شنی با افزایش فرسایش همراه بود، در خاک‌های ریزبافت تأثیر مشخصی نداشت. این امر نشان می‌دهد که تأثیر CCE بر پایداری ساختار خاک، غیرخطی و بافت‌وابسته است. به‌طور مشابه، اثر شوری (EC) نیز تابع نسبت کاتیون‌های تثبیت‌کننده مانند Ca^{2+} و Mg^{2+} به کاتیون‌های پراکنده‌کننده نظیر Na^{+} بود؛ به‌گونه‌ای که در مناطق دارای ترکیب یونی غالب تثبیت‌کننده، شوری موجب تقویت لخته‌سازی و پایداری ساختاری و در نتیجه کاهش فرسایش شد. نقش پوشش سطحی شن و سنگریزه‌ها نیز در قالب یک پارامتر چندبعدی تحلیل شد؛ به‌طوری که اثربخشی این پوشش‌ها به تراکم، اندازه ذرات و الگوی پراکنش آن‌ها وابسته بود. در برخی نواحی، عدم کفایت این پارامترها منجر به عملکرد معکوس و تشدید فرسایش شده است. بر پایه نتایج حاصل، می‌توان نتیجه گرفت که فرسایش‌پذیری بادی در این منطقه، پدیده‌ای با ماهیت چندعلتی و ناحیه‌ای است که مدیریت مؤثر آن نیازمند رویکردی چندمتغیره، مکان‌محور و مبتنی بر داده‌های دقیق خاک‌شناسی و اقلیمی است. در این راستا، به‌کارگیری راهبردهایی نظیر احیای پوشش گیاهی، افزایش ماده آلی خاک، اصلاح شوری و بهبود ساختار خاک، به‌ویژه در نواحی بحرانی نظیر جنوب غرب منطقه و اراضی مرتعی پهلوان‌کشی، باید در اولویت قرار گیرد. بر اساس نتایج این مطالعه، برای مدیریت فرسایش بادی در منطقه پیشنهاد می‌شود ابتدا نواحی بحرانی فرسایش‌پذیر شناسایی و اولویت‌بندی شوند تا اقدامات حفاظتی در آن‌ها متمرکز گردد. بهبود پوشش گیاهی و تثبیت خاک در مناطقی که سرعت آستانه پایین و شدت بادبردگی بالا دارند، اهمیت ویژه‌ای دارد. همچنین اصلاح ساختار خاک و افزایش ماده آلی، به‌ویژه در خاک‌های سبک و شنی، می‌تواند مقاومت خاک در برابر فرسایش را افزایش دهد. کنترل شوری و مدیریت ترکیبات شیمیایی خاک نیز به ارتقای پایداری ساختاری و کاهش اثرات مخرب فرسایش کمک می‌کند. استفاده از سنگریزه‌ها و پوشش‌های حفاظتی سطحی به‌عنوان عوامل فیزیکی بازدارنده در نواحی حساس، می‌تواند نقش مؤثری در کاهش شدت فرسایش داشته باشد. اجرای این راهبردها ضمن کاهش شدت فرسایش بادی، پایه‌ای علمی برای برنامه‌ریزی مدیریتی و حفاظت اراضی فراهم می‌آورد.

سپاسگزاری

پژوهش حاضر بخشی از طرح تحقیقاتی «پایش عوامل مؤثر و منابع گرد و غبار و ماسه‌های روان در استان بوشهر» است که با همکاری مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور و مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان بوشهر انجام شده است. بدین‌وسیله از راهنمایی‌ها و حمایت‌های ارزنده مدیران و کارشناسان محترم این مراکز که در مسیر ارتقاء کیفیت این پژوهش نقش مؤثری ایفا کرده‌اند، صمیمانه قدردانی می‌شود.

هیچگونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد.

منابع

مینا، منیره، ثامن، عبدالمجید، موسوی، سید علی اکبر. و قنبری، یعقوب. (۱۴۰۲). برآورد سرعت آستانه فرسایش بادی با استفاده از تونل باد همراه با الگوریتم‌های یادگیری ماشین. مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۴ (۶)، ۹۳۳-۹۴۷.

شهابی نژاد، نادر، محمودآبادی، مجید، جلالیان، احمد، و چاوشی، الهام. (۱۳۹۹). اندازه‌گیری میدانی فرسایش بادی و سرعت آستانه مرتبط با ویژگی‌های خاک در محیط‌های خشک و نیمه‌خشک. علوم زمین محیط زیست، ۷۸ (۱۶)، ۵۰۱.

REFERENCES

- Bhuyan, S. J., Kalita, P. K., Janssen, K. A., & Barnes, P. L. (2002). Soil loss predictions with three erosion simulation models. *Environmental Modelling & Software*, 17(2), 135-144.
- Borrelli, P., Lugato, E., Montanarella, L., & Panagos, P. (2017). A new assessment of soil loss due to wind erosion in European agricultural soils using a quantitative spatially distributed modelling approach. *Land degradation & development*, 28(1), 335-344.
- Borrelli, P., Robinson, D. A., Fleischer, L. R., Lugato, E., Ballabio, C., Alewell, C., ... & Panagos, P. (2017). An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion. *Nature communications*, 8(1), 2013.
- Bouyoucos, G. J. (1962). Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils 1. *Agronomy journal*, 54(5), 464-465.
- Bronick, C. J., & Lal, R. (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(2), 239-252.

- Callot, Y., Marticorena, B., & Bergametti, G. (2000). Geomorphologic approach for modelling the surface features of arid environments in a model of dust emissions: application to the Sahara desert. *Geodinamica Acta*, 13(5), 245-270.
- Chen, L., Gao, J., Ji, Y., Bai, Z., Shi, M., & Liu, H. (2014). Effects of particulate matter of various sizes derived from suburban farmland, woodland and grassland on air quality of the central district in Tianjin, China. *Aerosol and Air Quality Research*, 14(3), 829-839.
- Chepil, W. S. (1954). Factors that influence clod structure and erodibility of soil by wind: III. Calcium carbonate and decomposed organic matter. *Soil Science*, 77(6), 473-480.
- Colazo, J. C., & Buschiazso, D. E. (2010). Soil dry aggregate stability and wind erodible fraction in a semiarid environment of Argentina. *Geoderma*, 159(1-2), 228-236.
- Famiglietti, J. S., Rudnicki, J. W., & Rodell, M. (1998). Variability in surface moisture content along a hillslope transect: Rattlesnake Hill, Texas. *Journal of hydrology*, 210(1-4), 259-281.
- Farid Giglo, B., Arami, A., & Akhzari, D. (2014). Assessing the Role of Some Soil Properties on Aggregate Stability Using Path Analysis (Case Study: Silty-Clay-Loam and Clay-Loam Soil from Gully Lands in North West of Iran). *Ecopersia*, 2(2), 513-523.
- Feng, G., Sharratt, B., & Wendling, L. (2011). Fine particle emission potential from loam soils in a semiarid region. *Soil Science Society of America Journal*, 75(6), 2262-2270.
- Gholami, H., & Mohammadifar, A. (2022). Novel deep learning hybrid models (CNN-GRU and DLDL-RF) for the susceptibility classification of dust sources in the Middle East: a global source. *Scientific Reports*, 12(1), 19342.
- Giuffrida, F., C. Carla, M Angelo and L. Cherubino. 2016. Effects of salt stress imposed during two growth phases
- Goossens, D. (1994). Effect of rock fragments on eolian deposition of atmospheric dust. *Catena*, 23(1-2), 167-189.
- Goossens, D., & Riksen, M. J. P. M. (2004). Wind erosion and dust dynamics at the commencement of the 21st century. *Wind erosion and dust dynamics: observation, simulation, modelling. Wageningen: ESW publications*, 7-13.
- Idah, M., & Musa, D. (2008). Determination of Erodibility Indices of Soils in Owerri West Local Government Area of Imo State, Nigeria.
- Kouchami-Sardoo, I., Shirani, H., & Besalatpour, A. A. (2020). Determining the Features Influencing the Structural
- Lal, R. (2017). Soil erosion by wind and water: problems and prospects. In *Soil erosion research methods* (pp. 1-10). Routledge.
- Li, F. R., Zhang, H., Zhang, T. H., & Shirato, Y. (2003). Variations of sand transportation rates in sandy grasslands along a desertification gradient in northern China. *Catena*, 53(3), 255-272.
- Li, F., Zhang, J., Huang, J., Huang, D., Yang, J., Song, Y., & Zeng, G. (2016). Heavy metals in road dust from Xiandao District, Changsha City, China: characteristics, health risk assessment, and integrated source identification. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(13), 13100-13113.
- Liu, M., Han, G., & Zhang, Q. (2019). Effects of soil aggregate stability on soil organic carbon and nitrogen under land use change in an erodible region in Southwest China. *International journal of environmental research and public health*, 16(20), 3809.
- Liu, Y., Gao, Y., He, J., Zhou, Y., & Geng, W. (2023). An experimental investigation of wind erosion resistance of desert sand cemented by soybean-urease induced carbonate precipitation. *Geoderma*, 429, 116231.
- Mahmoodabadi, M., Yazdanpanah, N., Sinobas, L. R., Pazira, E., & Neshat, A. (2013). Reclamation of calcareous saline sodic soil with different amendments (I): Redistribution of soluble cations within the soil profile. *Agricultural water management*, 120, 30-38.
- Marshall, J. K. (1971). Drag measurements in roughness arrays of varying density and distribution. *Agricultural Meteorology*, 8, 269-292.
- Marticorena, B., Bergametti, G., Gillette, D., & Belnap, J. (1997). Factors controlling threshold friction velocity in semiarid and arid areas of the United States. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 102(D19), 23277-23287.
- Marzen, M., Kirchhoff, M., Marzloff, I., Aït Hssaine, A., & Ries, J. B. (2020). Relative quantification of wind erosion in argan woodlands in the Souss Basin, Morocco. *Earth surface processes and landforms*, 45(15), 3808-3823.

- Mazaheri, M. R., & Mahmoodabadi, M. (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.
- McLean, E. O. (1982). Soil pH and lime requirement. *Methods of soil analysis: Part 2 Chemical and microbiological properties*, 9, 199-224.
- Middleton, N. (2020). Health in dust belt cities and beyond—an essay by Nick Middleton. *bmj*, 371.
- Middleton, N., & Kang, U. (2017). Sand and dust storms: Impact mitigation. *Sustainability*, 9(6), 1053.
- Mina, M., Rezaei, M., Sameni, A., Moosavi, A. A., & Ritsema, C. (2021). Vis-NIR spectroscopy predicts threshold velocity of wind erosion in calcareous soils. *Geoderma*, 401, 115163.
- Mina, M., Rezaei, M., Sameni, A., Riksen, M. J., & Ritsema, C. (2023). Estimating the indices of soil erodibility to wind erosion using pedo-and spectro-transfer functions in calcareous soils. *Geoderma*, 438, 116612.
- Moosavi, A. A., & Sepaskhah, A. R. (2012). Determination of unsaturated soil hydraulic properties at different applied tensions and water qualities. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 58(1), 11-38.
- Mu, Q. (2010). Effect of nonerodible grains on wind erosion control. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 115(D21).
- Nelson, D. W., & Sommers, L. E. (1982). Total carbon, organic carbon, and organic matter. *Methods of soil analysis: Part 2 chemical and microbiological properties*, 9, 539-579.
- Pásztor, L., Négyesi, G., Laborczy, A., Kovács, T., László, E., & Bihari, Z. (2016). Integrated spatial assessment of wind erosion risk in Hungary. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16(11), 2421-2432.
- Richards, L. A. (Ed.). (1954). *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils* (No. 60). US Government Printing Office.
- Shahabinejad, N., Mahmoodabadi, M., Jalalian, A., & Chavoshi, E. (2020). The influence of soil properties on the wind erosion rate at different regions of Kerman Province.
- Shahabinejad, N., Mahmoodabadi, M., Jalalian, A., & Chavoshi, E. (2019). In situ field measurement of wind erosion and threshold velocity in relation to soil properties in arid and semiarid environments. *Environmental Earth Sciences*, 78(16), 501.
- Shao, Y. (Ed.). (2008). *Physics and modelling of wind erosion*. Dordrecht: Springer Netherlands.
- Shepherd, G., Terradellas, E., Baklanov, A., Kang, U., Sprigg, W., Nickovic, S., ... & Joowan, C. (2016). Global assessment of sand and dust storms.
- Sirjani, E., Sameni, A., Moosavi, A. A., Mahmoodabadi, M., & Laurent, B. (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.
- Sparks, D. L., Page, A. L., Helmke, P. A., & Loeppert, R. H. (Eds.). (2020). *Methods of soil analysis, part 3: Chemical methods*. John Wiley & Sons.
- Tatarko, J. (2001). Soil aggregation and wind erosion: processes and measurements. *Annals of arid zone*, 40(3), 251-264.
- Tian, M., Gao, J., Zhang, L., Zhang, H., Feng, C., & Jia, X. (2021). Effects of dust emissions from wind erosion of soil on ambient air quality. *Atmospheric Pollution Research*, 12(7), 101108.
- Warrence, N. J., Bauder, J. W., & Pearson, K. E. (2002). Basics of salinity and sodicity effects on soil physical properties. *Department of Land Resources and Environmental Sciences, Montana State University-Bozeman, MT*, 129, 1-29.
- Webb, N. P., McGowan, H. A., Phinn, S. R., & McTainsh, G. H. (2006). AUSLEM (AUSTRALIAN Land Erodibility Model): A tool for identifying wind erosion hazard in Australia. *Geomorphology*, 78(3-4), 179-200.
- Yan, N., Marschner, P., Cao, W., Zuo, C., & Qin, W. (2015). Influence of salinity and water content on soil microorganisms. *International soil and water conservation Research*, 3(4), 316-323.
- Yang, G., Sun, R., Jing, Y., Xiong, M., Li, J., & Chen, L. (2022). Global assessment of wind erosion based on a spatially distributed RWEQ model. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 46(1), 28-42.
- Yang, Y., Li, Y., & Zhang, J. (2016). Chemical speciation of cadmium and lead and their bioavailability to cole (*Brassica campestris* L.) from multi-metals contaminated soil in northwestern China. *Chemical Speciation & Bioavailability*, 28(1-4), 33-41.
- Yazdanpanah, N., Mahmoodabadi, M., & Cerdà, A. (2016). The impact of organic amendments on soil hydrology, structure and microbial respiration in semiarid lands. *Geoderma*, 266, 58-65.
- Zhao, Y., Gao, G., Ding, G., Wang, L., Chen, Y., Zhao, Y., ... & Zhang, Y. (2022). Assessing the influencing



factors of soil susceptibility to wind erosion: A wind tunnel experiment with a machine learning and model-agnostic interpretation approach. *Catena*, 215, 106324.

Zobeck, T. M., & Popham, T. W. (1990). Dry aggregate size distribution of sandy soils as influenced by tillage and precipitation. *Soil Science Society of America Journal*, 54(1), 198-204.

Zou, X., Li, J., Cheng, H., Wang, J., Zhang, C., Kang, L., ... & Zhang, F. (2018). Spatial variation of topsoil features in soil wind erosion areas of northern China. *Catena*, 167, 429-439.