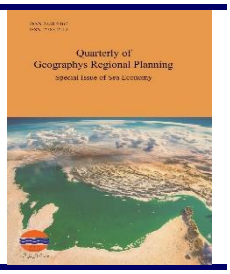
Iranian Association of Geopolitical

Geography(Regional Planning)
Volume 15, Issue 59, Summer 2025
ISSN (Print): 2228-6462 - ISSN (Online): 2783-2112
Journal Homepage: https://www.jgeoqeshm.ir/



Research Paper

Analysis of the Impact of Soil Properties and Gravel Cover on Wind Erosion Intensity in Eastern Isfahan Using Wind Tunnel Experiments

Hamidreza Karimzadeh*[1], Mehdi Adelnasab[2], Fatemeh Adelnasab3

1. Associate Professor of Natural Resources Engineering, Isfahan University of Technology. Isfahan, Iran
2. PhD student in Rangeland Science and Engineering, Faculty of Natural Resources Engineering, Isfahan University of Technology, Iran.
3. Bachelor's degree student in Rangeland and Watershed Engineering, Faculty of Natural Resources Engineering, Isfahan University of Technology. Iran

ARTICLEINFO

PP: 395-408

Use your device to scan and read the article online

Keywords: *Wind erosion, gravel cover, soil properties, wind tunnel, geomorphology of eastern Isfahan*

Abstract

Wind erosion is one of the destructive processes affecting soil in arid and semi-arid regions of the world and poses a serious threat to soil resource sustainability. This study aimed to analyze the impact of physicochemical properties of soil and surface gravel cover on wind erosion intensity across different geomorphological units in eastern Isfahan. A total of 27 soil samples were collected from nine different geomorphological units. The physical properties (soil texture, gravel percentage, bulk density, saturation moisture) and chemical characteristics (EC, pH, calcium, magnesium, potassium, calcium carbonate) of the samples were determined. Wind erosion simulation experiments were conducted using a wind tunnel device at three levels of gravel cover (control, 15%, and 30%) and at three wind speed levels (threshold, twice the threshold, and four times the threshold). Data were analyzed using three-way ANOVA and multivariate regression. The results showed that increasing gravel cover percentage significantly reduced wind erosion intensity across all geomorphological units. Higher wind erosion was observed in soils with high clay content and salinity. Multivariate regression analysis indicated that calcium, magnesium, and calcium carbonate had the most significant positive impact on increasing soil resistance to erosion. Additionally, increasing wind speed exponentially raised soil loss, especially in sensitive landforms such as playas and mining areas. The combination of favorable physicochemical properties and surface gravel cover can significantly reduce wind erosion intensity. The findings highlight the necessity of conservation planning based on regional soil characteristics and wind speed for effective desert land management.

Citation: Karimzadeh, H., Adelnasab, M. and Adelnasab, F. (2025). **Analysis of the Impact of Soil Properties and Gravel Cover on Wind Erosion Intensity in Eastern Isfahan Using Wind Tunnel Experiments.** Geography (Regional Planning), 15(59),395-408

DOI:10.22034/jgeoq.2025.526593.4280

***Corresponding author:** **Hamidreza Karimzadeh, E- Mail:** karimzadeh@iut.ac.ir
Copyright © 2024 The Authors. Published by Qeshm Institute. This is an open access article under the CC BY license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Extended Abstract

Introduction

Wind erosion is one of the destructive processes affecting soil in arid and semi-arid regions of the world and poses a serious threat to soil resource sustainability. This study aimed to analyze the impact of physicochemical properties of soil and surface gravel cover on wind erosion intensity across different geomorphological units in eastern Isfahan. A total of 27 soil samples were collected from nine different geomorphological units. The physical properties (soil texture, gravel percentage, bulk density, saturation moisture) and chemical characteristics (EC, pH, calcium, magnesium, potassium, calcium carbonate) of the samples were determined. Wind erosion simulation experiments were conducted using a wind tunnel device at three levels of gravel cover (control, 15%, and 30%) and at three wind speed levels (threshold, twice the threshold, and four times the threshold). Data were analyzed using three-way ANOVA and multivariate regression. The results showed that increasing gravel cover percentage significantly reduced wind erosion intensity across all geomorphological units. Higher wind erosion was observed in soils with high clay content and salinity. Multivariate regression analysis indicated that calcium, magnesium, and calcium carbonate had the most significant positive impact on increasing soil resistance to erosion. Additionally, increasing wind speed exponentially raised soil loss, especially in sensitive landforms such as playas and mining areas. The combination of favorable physicochemical properties and surface gravel cover can significantly reduce wind erosion intensity. The findings highlight the necessity of conservation planning based on regional soil characteristics and wind speed for effective desert land management.

Methodology

Data were analyzed using three-way analysis of variance and multivariate regression.

Results and discussion

The results showed that changes in soil properties and gravel cover can significantly reduce wind erosion. One of the most important findings was that soils with a high percentage of clay and silt, such as agricultural lands and hillside plains, are more susceptible to wind erosion than sandy soils. This effect is especially noticeable in soils with higher salinity. These results are consistent with previous studies that have shown that finer-grained and more saline soils are more susceptible to wind erosion. Therefore, in areas with fine-grained and high-salinity soils, the use of soil amendment techniques such as increasing calcium and magnesium in the soil can significantly reduce wind erosion. The results also showed that the percentage of surface gravel plays a key role in reducing the intensity of wind erosion. Gravel cover of the soil surface, by creating an obstacle in the wind path and increasing the surface roughness, reduces wind speed near the soil surface and prevents the detachment of soil particles. This effect was especially pronounced at higher wind speeds, indicating that gravel cover plays a vital role in reducing erosion during severe storm conditions. In this study, increasing the percentage of gravel from 15% to 30% significantly reduced soil loss, especially in sensitive geomorphological units such as playas. Comparison of different geomorphological units showed that lands with suitable physical characteristics (such as alluvial plains and developed alluvial fans) showed greater resistance to wind erosion than more vulnerable lands (such as mines and playas). In particular, at higher wind speeds, units such as mines and playas that lacked vegetation and sufficient gravel cover experienced a sharp increase in erosion rates. This result is consistent with previous studies that have shown that lands with poor or no gravel surface cover are more susceptible to erosion. In particular, these units are most affected by dust storms and strong winds. In this study, the interaction effect of wind speed and gravel cover on wind erosion rates was clearly observed. In all geomorphological units, increasing wind speed caused a significant increase in soil loss rates, but this increase was much more severe in more sensitive units such as mines and playas. At higher speeds (2 and 4 times the threshold speed), differences between geomorphological units became more pronounced. At these rates, more resistant units such as alluvial plains remained stable against wind erosion, while other units

suffered a sharp decline in soil quality. This observation emphasizes the importance of considering climatic conditions and regional characteristics in designing strategies to combat wind erosion. The results of statistical analyses of this study (such as three-way analysis of variance) also showed that soil and surface cover characteristics interact to play an effective role in controlling wind erosion. Also, regression analysis showed that factors such as calcium, magnesium, and calcium carbonate have the greatest effect in predicting soil resistance to wind erosion.

Conclusion

Combined management of soil physicochemical properties and application of surface coverings can effectively reduce wind erosion and increase the resilience of desert soils to dust storms. Based on these findings, several management suggestions are presented to reduce wind erosion in arid and semi-arid areas. First, in areas with fine-grained and saline soils, the use of soil amendment techniques such as adding calcium and magnesium or other minerals can increase soil resilience. Secondly, the creation of surface gravel covers in desert and vulnerable lands, especially in areas with strong winds, can have a great impact on reducing wind erosion. Thirdly, in areas facing high wind speeds, the use of multiple protection methods such as mulching, creating drought-resistant vegetation, and regulating soil structure is essential to prevent soil particle loss. This research emphasizes that to effectively combat wind erosion in arid and semi-arid areas, soil management programs should be designed regionally and in accordance with the specific characteristics of each landform and climatic characteristics. Finally, this study can be the basis for future research in the field of wind erosion modeling and assessing the effects of climate change on soil dynamics.

Keywords: Wind erosion, gravel cover, soil properties, wind tunnel, geomorphology of eastern Isfahan

Funding
There is no funding support.

Authors' Contribution
Authors contributed equally to the conceptualization and writing of the article. All of the authors approved thecontent of the manuscript and agreed on all aspects of the work declaration of competing interest none.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

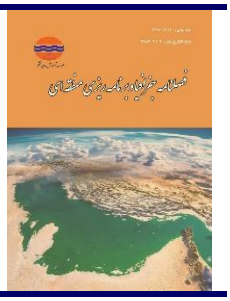
Acknowledgments

We are grateful to all the scientific consultants of this paper.

References

1. Armbrust, D.V. 1987. Principles of soil erosion: detachment, movement, and deposition. Reprints-US Department of Agriculture, Agricultural Research Service, USA.
2. Bottomley, P.2014. Methods of Soil Analaysis. 2nd Edition, Acsess, Orgegan.1094 p.
3. Buschiazzo, D.E.; Zobeck, T.M. & Abascal, S.A. 2007. Wind erosion quantity and quality of an Entic Haplustoll of the semi-arid pampas of Argentina. Journal of Arid Environments 69: 29-39.
4. Colazo, J.C. & Buschiazzo, D.E. 2010. Soil dry aggregate stability and wind erodible fraction in a semiarid environment of Argentina. Geoderma 159(2): 228-236.
5. Erpul, G.; Gabriels, D. & Janssens, D. 1998. Assessing the drop size distribution of simulated rainfall in a wind tunnel. Soil and Tillage research 45(4): 455-463
6. Fryrear, D.W.; Sutherland, P.L.; Davis, G.; Hardee, G. & Dollar, M. 1999. Wind erosion estimates with RWEQ and WEQ. In Proceedings of Conference Sustaining the Global Farm, 10th International Soil Conservation Organization Meeting, 11-12 May, Purdue University. pp. 760-765.
7. Gomes, L.; Arrue, J.L.; Lopez, M.V.; Sterk, G.; Richard, D.; Gracia, R.; Sabre, M.; Gaudichet, A. & Frangi, J.P.

2003. Wind erosion in a semiarid agricultural area of Spain: the WELSONS project. Catena 52(3-4): 235-256.
8. Li, F.; Zhang, H.; Zhang, T.H. & Shirato, Y. 2003. Variation of sand transportation rates in sandy grasslands a long a desertification gradient in northern China. Catena 56(3): 255-275.
9. Liu, M.X.; Wang, J.A.; Yan, p.; Liu, L.Y.; Ge, Y.Q.; Li, X.Y.; Hu, X.; Song, Y. & Wang, L. 2006. Wind tunnel simulation of ridge tillage effects on soil erosion from cropland. Soil and Tillage Research 90(3-4): 242-251.
10. López Sánchez, M.V. 1998. Wind erosion in agricultural soils: an example of limited supply of particles available for erosion. Catena 33(1): 17-28.
11. Nordstorm, K.F & Hotta, S.H. 2004. Wind erosion from cropland in the USA: a reviw of problems, solutions and prospects. Geoderma 121(3): 157-169.
12. Page, A.L.; Miller, R.H. & Jeeney, D.R. 1992. Methods of Soil analysis. In: *Chemical and Mineralogical Properties*. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin. pp. 56-71.
13. Skidmore, E.L. 2000. Air, soil, and water quality as influenced by wind erosion and strategies for mitigation. In Second international symposium of new technologies for environmental monitoring and agro-applications proceedings, 4-5 October, Tekirdag, Turkey. pp. 216-221.
14. Sterk, G. 2000. Flattened residue effects on wind speed and sediment transport. Soil Science Society of America Journal 64(3): 852-858.
15. Van Donk, S.J.; Liao, C. & Skidmore, E.L. 2008. Using temporally limited wind data in the Wind Erosion Prediction System. Transactions of the ASABE 51(5): 1585-1590.
16. Yang, S.; Lianyou, L. & Ping, C. 2005. Areview of soil erodibility in water and wind erosion research. Journal of Geographical Science 15(3): 167-179.
17. Zhang, Z.; Wieland, R.; Reiche, M.; Funk, R.; Hoffmann, C.; Li, Y. & Sommer, M. 2012. Identifying sensitive areas to wind erosion in the Xilingele grassland by computational fluid dynamic modeling. Ecological Informatics 8(3): 37-49.
18. 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.
19. Zhao, Y. & Pei, Y. 2010. A study on distributed simulation of soil wind erosion and its application to the Tuhaimajia River Basin. Procedia Environmental Sciences 2(1): 1555-1569.
20. Zobeck, T.M.; Baddock, M.; Van Pelt, R.S.; Tatarko, J. & Acosta-Martinez, V. 2013. Soil property effects on wind erosion of organic soils. Aeolian Research 10: 43-51.



فصلنامه جغرافیا (برنامه ریزی منطقه ای)

دوره ۱۵، شماره ۵۹، تابستان ۱۴۰۴

شاپا چاپی: ۶۴۶۲- ۲۲۲۸ شاپا الکترونیکی: ۲۱۱۲ -۲۷۸۳

Journal Homepage: https://www.jgeoqeshm.ir/

انجمن ژئوپلیتیک ایران

مقاله پژوهشی

تحلیل تأثیر خصوصیات خاک و پوشش سنگریزه بر شدت فرسایش بادی در شرق اصفهان با استفاده از آزمایش‌های تونل باد

حمیدرضا کریم زاده*- دانشیار مهندسی منابع طبیعی دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

مهدی عادل نسب - دانشجوی دکتری علوم و مهندسی مرتع، دانشکده مهندسی منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان، ایران

فاطمه عادل نسب - دانشجوی کارشناسی مهندسی مرتع و آبخیز داری، دانشکده مهندسی منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان، ایران

اطلاعات مقاله

شماره صفحات: ۳۹۵-۴۰۸

از دستگاه خود برای اسکن و خواندن مقاله به صورت آنلاین استفاده کنید

واژه‌های کلیدی:

فرسایش بادی، پوشش سنگریزه‌ای، ویژگی‌های خاک، تونل باد، ژئومورفولوژی شرق اصفهان

چکیده

فرسایش بادی به عنوان یکی از فرآیندهای مخرب خاک در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان، تهدیدی جدی برای پایداری منابع خاک به شمار می‌رود. این پژوهش با هدف تحلیل تأثیر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک و پوشش سنگریزه سطحی بر شدت فرسایش بادی در واحدهای ژئومورفولوژیکی مختلف شرق اصفهان، انجام شد. در این مطالعه، ۲۷ نمونه خاک از ۹ واحد ژئومورفولوژیکی مختلف برداشت شد. ویژگی‌های فیزیکی (بافت خاک، درصد سنگریزه، جرم مخصوص ظاهری، رطوبت اشباع) و شیمیایی EC ، pH، کلسیم، منیزیم، پتاسیم، کربنات کلسیم نمونه‌ها تعیین گردید. آزمایش‌های شبیه‌سازی فرسایش بادی با استفاده از دستگاه تونل باد در سه سطح پوشش سنگریزه‌ای (شاهد، ۱۵٪ و ۳۰٪) و در سه سطح سرعت باد (حد آستانه، دو برابر و چهار برابر حد آستانه) انجام شد. داده‌ها با استفاده از تحلیل واریانس سه‌عاملی و رگرسیون چندمتغیره تحلیل گردیدند.نتایج نشان داد که افزایش درصد پوشش سنگریزه به طور معناداری شدت فرسایش بادی را در همه سطوح ژئومورفولوژیکی کاهش داد. در خاک‌های دارای درصد بالای رس و شوری بالا، میزان فرسایش بادی بیشتر بود. تحلیل رگرسیون چندمتغیره مشخص کرد که کلسیم، منیزیم و کربنات کلسیم بیشترین تأثیر مثبت را بر افزایش مقاومت خاک در برابر فرسایش داشتند. همچنین افزایش سرعت باد، موجب افزایش نمایی میزان هدررفت خاک شد، به‌ویژه در لندفرم‌های حساس نظیر پلایا و معادن. ترکیب ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی مناسب و ایجاد پوشش سطحی سنگریزه‌ای می‌تواند به طور قابل توجهی شدت فرسایش بادی را کاهش دهد. یافته‌های این پژوهش ضرورت برنامه‌ریزی حفاظتی مبتنی بر ویژگی‌های منطقه‌ای خاک و سرعت باد در مدیریت اراضی بیابانی را تأکید می‌کند

استناد: کریم زاده، حمیدرضا ، عادل نسب، مهدی و عادل نسب، فاطمه. (۱۴۰۴). **تحلیل تأثیر خصوصیات خاک و پوشش سنگریزه بر شدت فرسایش بادی در شرق اصفهان با استفاده از آزمایش‌های تونل باد**. فصلنامه جغرافیا (برنامه ریزی منطقه ای)، ۱۵(۵۹)،۳۹۵-۴۰۸

DOI: 10.22034/jgeoq.2025.526593.4280

* **نویسنده مسئول:** حمیدرضا کریم زاده، **پست الکترونیکی:**karimzadeh@iut.ac.ir

مقدمه

فرسایش بادی یکی از مهم‌ترین فرایندهای تخریب خاک در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان به‌شمار می‌رود و تهدیدی جدی برای منابع طبیعی، کشاورزی و سکونتگاه‌های انسانی محسوب می‌شود (رفاهی، ۱۳۸۳) این پدیده در شرایطی که پوشش گیاهی ضعیف، بارندگی اندک و بادهای شدید وجود دارد، شدت بیشتری می‌یابد و موجب جدا شدن، حمل و رسوب ذرات خاک می‌شود (Zhao & Pei, (2010؛Gomez et al., 2003 در ایران که دو سوم از وسعت کشور در اقلیم خشک و نیمه‌خشک واقع شده و حدود ۴۵ میلیون هکتار از اراضی را بیابان‌ها تشکیل می‌دهند، فرسایش بادی یکی از اصلی‌ترین عوامل تخریب خاک و منابع طبیعی به شمار می‌رود (کریمی نظر و همکاران، ۱۳۸۸) منطقه شرق اصفهان، به‌دلیل موقعیت جغرافیایی و شرایط اقلیمی خاص، از جمله کانون‌های اصلی فرسایش بادی و منشأ گردوغبار در مرکز ایران محسوب می‌شود. میانگین بارندگی سالانه این منطقه کمتر از ۵۰ میلی‌متر بوده و پوشش گیاهی طبیعی آن به‌شدت محدود است. علاوه بر آن، فعالیت‌های انسانی مانند کشاورزی ناپایدار، بهره‌برداری از معادن گچ و شن و ماسه، و تخریب منابع آب، موجب تشدید فرسایش بادی در این منطقه شده‌اند (مشکوه و همکاران، ۱۳۸۴؛ احمدی و همکاران، ۱۳۸۳).فرسایش بادی یک فرایند پیچیده و چندعاملی است که شدت آن به دو دسته عوامل بستگی دارد: خصوصیات ذاتی خاک (فرسایش‌پذیری) و ویژگی‌های باد (قدرت فرسایشگری(Yang ؛ Skidmore, 1974) et al., 2005خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک نظیر بافت خاک، درصد سنگریزه، میزان رطوبت، ماده آلی، میزان کلسیم و منیزیم، نقش تعیین‌کننده‌ای در میزان فرسایش‌پذیری خاک دارند(Colazo & Buschiazzo, 2007 ؛ Liu et al., 2007) از سوی دیگر، سرعت و جهت باد، به‌عنوان عوامل بیرونی، کنترل‌کننده فرآیند جدا شدن و انتقال ذرات خاک هستند .در میان خصوصیات سطحی خاک، وجود سنگریزه‌های سطحی اهمیت ویژه‌ای دارد. پوشش سنگریزه‌ای می‌تواند با کاهش تماس مستقیم باد با خاک، کاهش میزان نیروی برشی اعمال شده و افزایش زبری سطح زمین، نقش مؤثری در کاهش شدت فرسایش ایفا کند .(Fryrear et al., 1999)بر همین اساس، مطالعات متعددی به بررسی نقش درصد پوشش سنگریزه در کاهش هدررفت خاک پرداخته‌اند و نتایج آنها نشان داده است که افزایش پوشش سنگریزه به طور معناداری می‌تواند شدت فرسایش بادی را کاهش دهد(López Sánchez, 1998.؛Armbrust, 1987) از منظر کاربردی، شناخت دقیق فرایندهای مؤثر بر فرسایش بادی و اثرگذاری متغیرهایی چون سنگریزه، خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک و ویژگی‌های باد، می‌تواند در طراحی و اجرای برنامه‌های مدیریت خاک و کنترل فرسایش مؤثر باشد. استفاده از شبیه‌سازهای آزمایشگاهی نظیر تونل باد، ابزاری مناسب برای بررسی و تحلیل رفتار خاک در شرایط کنترل‌شده و قابل تکرار است(Zhang et al., 2012 ؛ Erpul et al., 1998)دستگاه تونل باد، با ایجاد سرعت‌های مختلف باد بر روی نمونه‌های خاک، امکان سنجش پارامترهایی نظیر سرعت حد آستانه فرسایش و میزان هدررفت خاک را فراهم می‌آورد.در مطالعات پیشین نیز، اهمیت عوامل داخلی خاک همچون ترکیب ذرات، میزان کلسیم کربنات، هدایت الکتریکی و کربن آلی در تعیین حساسیت خاک به فرسایش بادی تأکید شده است(Zhao et (al., ؛ Prasuhin, 2012 2006به‌طور خاص، نقش کاتیون‌های دوظرفیتی مانند کلسیم و منیزیم در بهبود پیوستگی ذرات خاک و کاهش فرسایش‌پذیری، در تحقیقات متعدد مورد توجه قرار گرفته است(Van Donk et al., (2008؛ Gomez et al., 2003 با توجه به شرایط اقلیمی حاکم بر شرق اصفهان و آسیب‌پذیری بالای این منطقه در برابر فرسایش بادی، انجام تحقیقاتی که به‌طور همزمان تأثیر ویژگی‌های ذاتی خاک و عوامل سطحی مانند پوشش سنگریزه را بررسی کنند، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. پژوهش حاضر در راستای این ضرورت، با هدف تحلیل اثر خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک و پوشش سنگریزه در شدت فرسایش بادی خاک‌های منطقه شرق اصفهان، و با استفاده از داده‌های حاصل از آزمایش‌های تونل باد انجام شده است.نتایج این پژوهش می‌تواند به ارائه راهکارهای کاربردی برای مدیریت بهینه اراضی بیابانی، طراحی برنامه‌های کاهش فرسایش بادی، و حفاظت از منابع خاک و پوشش گیاهی در مناطق خشک و نیمه‌خشک کشور کمک کند .همچنین یافته‌های این مطالعه می‌تواند مبنایی برای تحقیقات تکمیلی آینده در زمینه مدلسازی فرسایش بادی و ارزیابی اثرات تغییرات اقلیمی بر پویایی خاک باشد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش به‌منظور بررسی اثر ویژگی‌های خاک و پوشش سنگریزه بر شدت فرسایش بادی، در منطقه شرق اصفهان انجام شد. منطقه مورد مطالعه در فلات مرکزی ایران، در حوزه آبخیز زاینده‌رود و در فاصله کمتر از ۲۰ کیلومتر از مرکز شهر اصفهان قرار دارد. این منطقه دارای اقلیم خشک با میانگین بارش سالانه حدود ۵۰ میلی‌متر در دشت‌ها و تا ۲۵۰ میلی‌متر در ارتفاعات شمالی است (رفاهی، ۱۳۸۳).جهت نمونه‌برداری، ابتدا نقشه ژئومورفولوژی منطقه تهیه و بر اساس آن ۹ واحد کاری شامل مخروط‌افکنه‌های جوان و تکامل‌یافته، معادن گچ و شن و ماسه، دشت دامنه‌ای، زمین کشاورزی، پلایا و دشت آبرفتی انتخاب گردید. از هر واحد سه نمونه خاک سطحی از عمق ۰ تا ۷ سانتی‌متر برداشت شد که در مجموع ۲۷ نمونه تهیه گردید. نمونه‌ها پس از هوا خشک شدن، از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند و جهت تعیین ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی به آزمایشگاه منتقل شدند .ویژگی‌های فیزیکی شامل درصد سنگریزه، بافت خاک ، روش هیدرومتری، جرم مخصوص ظاهری روش کلوخه‌ای؛ و رطوبت اشباع اندازه‌گیری شد. ویژگی‌های شیمیایی نیز شامل هدایت الکتریکی(EC) ، اسیدیته خاک(pH) ، میزان کلسیم، منیزیم، سدیم، پتاسیم، کربنات کلسیم، سولفات، کلر و کربن آلی مطابق روش‌های استاندارد ؛ تعیین گردید.برای شبیه‌سازی شرایط فرسایش بادی، از دستگاه تونل باد آزمایشگاه صحرایی دانشگاه صنعتی اصفهان استفاده شد. این تونل قادر بود سرعت‌های باد بین ۲ تا ۱۸ متر بر ثانیه را در ارتفاع ۳۰ سانتی‌متری ایجاد کند .نمونه‌ها تحت سه سطح پوشش سنگریزه (شاهد، ۱۵٪ و ۳۰٪) و در سه سطح سرعت (سرعت حد آستانه، دو برابر و چهار برابر حد آستانه) قرار گرفتند.آزمایش‌ها در قالب طرح کاملاً تصادفی و سه عاملی انجام شدند و داده‌ها با استفاده از تحلیل واریانس و رگرسیون چندمتغیره تحلیل گردید.

پیشینه پژوهش

فرسایش بادی به عنوان یکی از مهم‌ترین پدیده‌های تخریب سرزمین، همواره مورد توجه پژوهشگران بوده است. این نوع فرسایش که شامل فرآیند جداسازی، انتقال و رسوب ذرات خاک تحت تأثیر نیروی باد می‌شود، در مناطق خشک و نیمه‌خشک که پوشش گیاهی ضعیف و بارندگی کم است، شدت بیشتری دارد (رفاهی، ۱۳۸۳؛ Fryrear et al., 1999) اهمیت بررسی این پدیده به دلیل اثرات گسترده آن بر تخریب منابع خاک، کاهش حاصلخیزی اراضی کشاورزی، ایجاد طوفان‌های گردوغبار و تهدیدات زیست‌محیطی و اقتصادی به کرات در مطالعات مختلف ذکر شده است(Zhao & Pei, 2010.؛ Armbrust, 1987) مطالعات متعددی به بررسی مکانیسم‌های مؤثر بر فرسایش بادی پرداخته‌اند. برای نمونه، Fryrear et al. (1999)تأکید کردند که فرسایش بادی در شرایطی رخ می‌دهد که نیروی برشی باد از مقاومت برشی خاک بیشتر شود. همچنین، López Sánchez (1998)بیان کرد که جهت و سرعت باد نقش اساسی در کنترل فرآیند حمل ذرات دارد و تغییرات زمانی و مکانی قابل توجهی را در میزان فرسایش بادی ایجاد می‌کند.در ایران نیز تحقیقات گسترده‌ای در زمینه فرسایش بادی صورت گرفته است. رفاهی (۱۳۸۳) با بررسی ابعاد گوناگون این پدیده، اهمیت شناخت ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در کنترل فرسایش را برجسته ساخته است. کریمی نظر و همکاران (۱۳۸۸) نیز نشان دادند که بیش از دو سوم خاک‌های ایران مستعد فرسایش بادی هستند و در این راستا مدیریت پایدار خاک ضرورت حیاتی دارد. همچنین احمدی و اختصاصی (۱۳۷۹) با مطالعه بر روی اثر مالچ شن در کنترل فرسایش خاک‌های رسی شور، نقش مؤثر پوشش سطحی در کاهش میزان فرسایش را اثبات کردند.یکی از رویکردهای مؤثر در تحقیقات فرسایش بادی، استفاده از شبیه‌سازهای آزمایشگاهی مانند دستگاه تونل باد است (Zhang et al. (2012 .و Erpul et al. (1998)تونل باد را ابزاری مناسب برای شبیه‌سازی فرسایش و تعیین سرعت حد آستانه ذرات خاک معرفی کردند. این دستگاه امکان کنترل شرایط آزمایشگاهی مانند سرعت باد، میزان سنگریزه و نوع خاک را فراهم می‌کند و داده‌های کمی ارزشمندی ارائه می‌دهد.(Van Donk et al., 2008) در زمینه تأثیر خصوصیات خاک بر فرسایش بادی، مطالعات مختلفی به نقش پارامترهایی نظیر بافت خاک، درصد سنگریزه، کربنات کلسیم، ماده آلی و کاتیون‌های خاک اشاره کرده‌اند. تحقیقات Gomez et al. (2003) و Yang et al. (2005) نشان داده‌اند که بافت خاک (ترکیب شن، سیلت و رس) و وجود کاتیون‌های دوالانسی (مانند کلسیم و منیزیم) که سبب فلوکوله شدن ذرات خاک می‌شوند، نقش کلیدی در تعیین حساسیت خاک به فرسایش دارند.از سوی دیگر، نقش سنگریزه‌های سطحی در کاهش فرسایش بادی بارها مورد بررسی قرار گرفته است Fryrear et al. (1999) .دریافتند که افزایش درصد پوشش سنگریزه‌ای سطح خاک موجب افزایش زبری سطحی، کاهش سرعت باد در سطح زمین و در نتیجه کاهش جداشدگی

ذرات خاک می‌شود. نتایج مشابهی نیز توسط Armbrust (1987) ارائه شد که تأکید داشتند پوشش‌های سطحی غیرزنده همچون سنگریزه‌ها می‌توانند مؤثرترین عامل در کنترل طبیعی فرسایش در مناطق بیابانی باشند.در مطالعات داخلی، مشکوه و همکاران (۱۳۸۴) با بررسی دشت اردکان یزد، رابطه معناداری بین شدت تخریب پوشش گیاهی و میزان فرسایش بادی مشاهده کردند و نشان دادند که افزایش شدت فرسایش ارتباط مستقیم با فقر پوشش گیاهی و شور شدن خاک دارد. همچنین احمدی و همکاران (۱۳۸۳) در منطقه سرخس خراسان، عوامل مؤثر بر افزایش فرسایش بادی را شناسایی و تأثیر آنها بر کیفیت زیستگاه‌های جانوری را بررسی کردند. پژوهش حاضر با اتکا به یافته‌های مذکور، رویکرد جامعی را در پیش گرفته است. در این تحقیق، علاوه بر اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک، نقش پوشش سنگریزه و سرعت‌های مختلف باد در میزان هدررفت خاک ارزیابی شده است. داده‌های این مطالعه نشان دادند که افزایش درصد پوشش سنگریزه سطحی (۱۵٪ و ۳۰٪) به طور معناداری شدت فرسایش بادی را کاهش می‌دهد(Bottomley, 2014 ؛ Page et al., 1992). این یافته همسو با مطالعات پیشین است که بر نقش سنگریزه در حفاظت از سطح خاک تأکید دارند(López Sánchez, 1998.؛ Gomez et al., 2003)همچنین تحلیل رگرسیون چندمتغیره انجام شده در این تحقیق نشان داد که پارامترهای کلسیم، منیزیم، پتاسیم و کربنات کلسیم بیشترین تأثیر را بر افزایش مقاومت خاک در برابر فرسایش بادی دارند. این نتایج با یافته‌های Pei & Zhao (2010) و Zhao et al. (2006) که به نقش کاتیون‌های تثبیت‌کننده در افزایش استحکام خاک اشاره کردند، مطابقت کامل دارد.در نهایت، استفاده از دستگاه تونل باد برای تعیین سرعت حد آستانه و میزان هدررفت خاک، ابزاری ارزشمند در تحلیل دقیق مکانیسم فرسایش بادی فراهم کرده است(Sterk, 2000) ؛ (Zobeck et al., 2013). هرچند محدودیت‌هایی نظیر تفاوت بین شرایط طبیعی و آزمایشگاهی وجود دارد، اما داده‌های حاصل از تونل باد امکان تحلیل روابط علی میان خصوصیات خاک، پوشش سطحی و شدت فرسایش را با دقت بالا فراهم کرده‌اند.با توجه به روند تحقیقات پیشین و نتایج حاصل از این پژوهش، می‌توان نتیجه گرفت که مدیریت مؤثر خاک در مناطق خشک مستلزم توجه به ویژگی‌های ذاتی خاک، استفاده از پوشش‌های سطحی مؤثر و برنامه‌ریزی متناسب با ویژگی‌های اقلیمی منطقه است. این اصول می‌توانند به طور مستقیم در کاهش خطرات زیست‌محیطی ناشی از فرسایش بادی، حفظ منابع خاک و افزایش پایداری اکوسیستم‌های بیابانی نقش‌آفرینی کنند.

بخش یافته‌ها

تحلیل تأثیر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک بر فرسایش‌پذیری بادی

فرسایش‌پذیری خاک‌ها تحت تأثیر مجموعه‌ای از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی قرار دارد که این ویژگی‌ها می‌توانند میزان مقاومت خاک در برابر نیروی برشی باد را تعیین کنند (رفاهی، ۱۳۸۳) در این پژوهش، ویژگی‌های متعددی از جمله درصد سنگریزه، بافت خاک، جرم مخصوص ظاهری، میزان رطوبت اشباع، هدایت الکتریکی(EC) ، pH، کلسیم، منیزیم، سدیم، پتاسیم، کربنات کلسیم و کربن آلی مورد سنجش قرار گرفت و ارتباط آنها با شدت فرسایش بادی ارزیابی شد.در ابتدا، بررسی بافت خاک‌ها نشان داد که ذرات ریزتر (سیلت و رس) نسبت به ذرات درشت‌تر (شن) حساسیت بیشتری به جدا شدن تحت تأثیر باد دارند(Gomez et al., 2003؛نتایج تحلیل نمونه‌ها نشان داد که نمونه‌های دارای درصد رس بالاتر (نظیر دشت دامنه زمین بایر) نسبت به نمونه‌های شنی‌تر (مانند معادن شن و ماسه) فرسایش‌پذیری بیشتری دارند. این نتایج همسو با یافته‌های López Sánchez (1998)بود که خاک‌های ریزدانه را آسیب‌پذیرتر در برابر فرسایش بادی معرفی کرده بود.از منظر درصد سنگریزه، نمونه‌های مخروط‌افکنه‌های تکامل‌یافته و معادن شن و ماسه دارای درصد بالایی از سنگریزه سطحی بودند که این عامل نقش مهمی در کاهش فرسایش بادی ایفا کرد .(Bottomley, 2014) در مقابل، خاک‌های پلایا و زمین‌های کشاورزی که سنگریزه سطحی کمی داشتند، بیشترین میزان هدررفت خاک را نشان دادند (1999) .Fryrear et al نیز گزارش کردند که سنگریزه‌های سطحی از طریق افزایش زبری سطح زمین و کاهش سرعت باد در مجاورت خاک، مقاومت خاک در برابر فرسایش را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهند.بررسی رطوبت اشباع نشان داد که نمونه‌هایی با درصد رطوبت اشباع بالاتر (مانند دشت آبرفتی کشاورزی) پایداری بیشتری در برابر باد داشتند. این یافته با نتایج Armbrust (1987) مطابقت داشت که بیان کرده بود افزایش میزان رطوبت خاک

باعث افزایش نیروی اتصال بین ذرات و در نتیجه کاهش فرسایش می‌شود. در بخش شیمیایی، بررسی هدایت الکتریکی خاک‌ها (EC) حاکی از آن بود که خاک‌های با EC بالاتر (نظیر پلایا با پوشش فقیر) بیشتر مستعد تخریب بودند. این موضوع در راستای یافته‌های Zhao & Pei (2010) قرار دارد که بیان داشتند شوری بالای خاک می‌تواند ساختار خاک را تضعیف و مقاومت آن در برابر نیروی باد را کاهش دهد.همچنین تحلیل کاتیون‌های اصلی خاک نشان داد که مقادیر بالاتر کلسیم و منیزیم (که عامل ایجاد فلوکولاسیون ذرات خاک هستند) موجب کاهش فرسایش‌پذیری شده است. در این تحقیق، نمونه‌های دارای مقادیر بالاتر کلسیم (مانند مخروط‌افکنه‌های تکامل‌یافته) در مقایسه با سایر نمونه‌ها، مقاومت بالاتری نشان دادند .رگرسیون چندمتغیره بر روی داده‌ها نشان داد که متغیرهای کلسیم، منیزیم، پتاسیم و کربنات کلسیم به ترتیب بیشترین اثر را در پیش‌بینی مقاومت خاک‌ها در برابر فرسایش بادی دارند. این موضوع اهمیت افزودن مواد اصلاح‌کننده خاک در مدیریت بیابان‌زدایی و تثبیت خاک‌های بیابانی را برجسته می‌کند.نتایج حاصل از این بخش از پژوهش، بار دیگر اهمیت مطالعه دقیق ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک را برای برنامه‌ریزی مدیریت منابع طبیعی و کنترل فرسایش بادی تأیید می‌کند. همچنین تأکید می‌شود که در کنار اقدامات سطحی مانند پوشش سنگریزه‌ای، باید به اصلاح ویژگی‌های ذاتی خاک‌ها نیز توجه شود تا مقاومت آن‌ها در برابر فرسایش به‌طور پایدار افزایش یابد.

ارزیابی نقش پوشش سنگریزه سطحی در کاهش شدت فرسایش بادی تحت سرعت‌های مختلف باد

وجود پوشش سنگریزه‌ای در سطح خاک یکی از روش‌های مؤثر در کاهش شدت فرسایش بادی به‌شمار می‌رود. پوشش سنگریزه‌ای می‌تواند با ایجاد یک مانع فیزیکی در برابر نیروی برشی باد، سرعت باد در سطح خاک را کاهش داده و از جدا شدن ذرات خاک جلوگیری کند؛ .(López Sánchez, 1998)در این پژوهش، نقش پوشش سنگریزه‌ای در سه سطح شامل بدون پوشش (شاهد)، ۱۵ درصد و ۳۰ درصد پوشش سنگریزه‌ای مورد بررسی قرار گرفت.نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان داد که افزایش میزان پوشش سنگریزه‌ای به‌طور معناداری موجب کاهش میزان هدررفت خاک شد. در سرعت‌های حد آستانه باد، میزان هدررفت خاک برای نمونه‌های بدون پوشش سنگریزه بالاترین مقدار را داشت، در حالی که نمونه‌های با ۳۰ درصد پوشش، کمترین میزان هدررفت را نشان دادند. این نتایج با یافته‌های Armbrust (1987) و Fryrear et al. (1999) که کاهش شدت فرسایش بادی با افزایش درصد سنگریزه را گزارش کردند، کاملاً همسو است.به عنوان نمونه، در شرایط سرعت باد حد آستانه، میزان هدررفت خاک در پلایا (بدون سنگریزه) به ۹۲۰۰ g/m^2 رسید، در حالی که در همان نمونه با ۳۰٪ سنگریزه، این مقدار به حدود ۶۳۰۰ g/m^2 کاهش یافت. این میزان کاهش چشمگیر اهمیت سنگریزه‌های سطحی را در تثبیت خاک‌های بیابانی نشان می‌دهد.با افزایش سرعت باد (۲ برابر و ۴ برابر سرعت حد آستانه)، روند مشابهی مشاهده شد. در تمامی سرعت‌ها، افزایش درصد سنگریزه باعث کاهش معنی‌دار میزان فرسایش شد. برای مثال، در مخروط افکنه جوان در سرعت ۴ برابر حد آستانه، میزان هدررفت در حالت بدون سنگریزه ۴۴۹ گرم در ۳۰×۳۰ سانتی‌متر بود که با افزایش پوشش به ۳۰٪، این مقدار به ۳۲۹ گرم کاهش یافت. این روند کاهشی در تمام واحدهای ژئومورفولوژیکی منطقه مورد مطالعه مشاهده شد، اگرچه شدت آن در زمین‌های مختلف بسته به ویژگی‌های ذاتی خاک متغیر بود.تأثیر پوشش سنگریزه‌ای در کنترل فرسایش بادی در سرعت‌های مختلف باد نیز اهمیت زیادی دارد. همان‌طور که مطالعات López Sánchez (1998) و Zhao et al. (2006) نشان داده‌اند، افزایش سرعت باد معمولاً باعث افزایش نمایی میزان فرسایش می‌شود، اما حضور سنگریزه‌های سطحی می‌تواند این روند را تا حد زیادی مهار کند. داده‌های به‌دست آمده از آزمایش‌ها نشان می‌دهد که تأثیر کاهشی پوشش سنگریزه‌ای در سرعت‌های بالا حتی برجسته‌تر است. به عبارت دیگر، نقش حفاظتی سنگریزه‌ها در بادهای شدید نسبت به بادهای ملایم اهمیت بیشتری می‌یابد.از دیدگاه فرآیندی، سنگریزه‌های سطحی با ایجاد مانع در مسیر جریان باد و افزایش زبری سطحی، انرژی باد را در لایه‌های نزدیک به سطح زمین کاهش داده و باعث افت قدرت جداسازی ذرات خاک می‌شوند .این موضوع به ویژه در مناطق بیابانی که سرعت بادهای غالب زیاد است، از اهمیتویژه‌ای برخوردار است.نکته قابل توجه دیگر آن است که تأثیر پوشش سنگریزه نه تنها به درصد پوشش، بلکه به یکنواختی توزیع سنگریزه‌ها، اندازه ذرات و چگونگی استقرار آنها بر سطح خاک بستگی دارد. در این تحقیق، از سنگریزه‌هایی با قطر حدود ۱.۵ سانتی‌متر و با چیدمان نسبتاً یکنواخت استفاده شد تا شرایط آزمایشگاهی استاندارد حفظ گردد.بررسی آماری نتایج نیز اثر معنادار پوشش سنگریزه را تأیید

کرد. تحلیل واریانس سه‌عاملی (لندفرم × سرعت × سنگریزه) نشان داد که عامل سنگریزه به‌تنهایی توانسته است سهم قابل توجهی از تغییرات در میزان هدررفت خاک را توضیح دهد($p < 0.001$ ؛ $\eta^2=0.42$). این یافته با گزارش‌های قبلی(Gomez et al., 2003؛ Sterk, 2000)مبنی بر اهمیت نقش پوشش‌های سطحی در کنترل فرسایش بادی مطابقت دارد.بر این اساس می‌توان نتیجه گرفت که در برنامه‌های کنترل فرسایش بادی در مناطق خشک، توجه ویژه به استفاده از سنگریزه‌های سطحی به عنوان یک روش ارزان، طبیعی و مؤثر در تثبیت خاک باید در اولویت قرار گیرد. این راهکار به ویژه در مناطقی مانند شرق اصفهان که فرسایش بادی شدید است و منابع برای پوشش گیاهی محدود است، می‌تواند به عنوان یک راهبرد مدیریتی بسیار کارآمد به کار گرفته شود.در مجموع، یافته‌های این تحقیق تأیید می‌کند که پوشش سنگریزه‌ای می‌تواند به طور مؤثر میزان فرسایش بادی را در سرعت‌های مختلف باد کاهش دهد و استفاده از آن در مدیریت اراضی بیابانی و کاهش ریزگردها نقش بسیار مهمی خواهد داشت.

بررسی اثر همزمان سرعت باد و پوشش سنگریزه بر میزان هدررفت خاک در سطوح ژئومورفولوژیکی مختلف

ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی زمین، شامل نوع زمین‌ریخت (لندفرم)، بافت خاک، پوشش سطحی و خصوصیات شیمیایی، به‌طور مستقیم بر شدت فرسایش بادی تأثیر می‌گذارند(Gomez et al., 2003 ؛ Zhao & Pei, 2010). در این پژوهش، بررسی همزمان نقش سرعت باد و میزان پوشش سنگریزه بر هدررفت خاک در نه واحد ژئومورفولوژیکی شامل مخروط‌افکنه‌های جوان، نسبتا متکامل و تکامل‌یافته، معادن گچ و شن و ماسه، زمین‌های کشاورزی، دشت دامنه‌ای، پلایا و دشت آبرفتی انجام شد.نتایج نشان داد که پاسخ هر واحد ژئومورفولوژیکی به ترکیب عوامل سرعت باد و پوشش سنگریزه متفاوت است. در شرایط بدون پوشش سنگریزه (شاهد)، بیشترین میزان هدررفت خاک مربوط به پلایا با پوشش فقیر بود که در سرعت حد آستانه فرسایش ۹۲۲۱ گرم بر مترمربع ثبت شد. در مقابل، دشت آبرفتی کشاورزی با میزان هدررفت ۱۳۸۸ گرم بر مترمربع، کمترین میزان فرسایش را نشان داد. این یافته‌ها نشان‌دهنده نقش حیاتی نوع لندفرم و ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک در مقاومت در برابر فرسایش هستند. با افزایش پوشش سنگریزه به ۱۵٪ و ۳۰٪، میزان هدررفت در تمامی واحدهای ژئومورفولوژیکی کاهش یافت، اما شدت این کاهش بسته به نوع لندفرم متفاوت بود. برای نمونه، در پلایا با پوشش ۳۰٪ سنگریزه، میزان هدررفت خاک به ۵۳۵۵ گرم بر مترمربع کاهش یافت که نسبت به وضعیت بدون سنگریزه کاهش چشمگیری داشت. این کاهش در دشت آبرفتی کشاورزی نیز مشاهده شد، به‌طوری که هدررفت خاک به ۹۶۷ گرم بر مترمربع کاهش پیدا کرد.افزایش سرعت باد (۲ برابر و ۴ برابر حد آستانه) موجب افزایش میزان فرسایش در همه لندفرم‌ها شد. در سرعت‌های بالاتر، واحدهای آسیب‌پذیر مانند معادن گچ و شن و ماسه و پلایا افزایش شدیدتری در میزان هدررفت نشان دادند. برای مثال، در معدن گچ در سرعت ۴ برابر حد آستانه و بدون پوشش سنگریزه، هدررفت خاک به ۸۵۰ گرم در سطح ۳۰×۳۰ سانتی‌متری رسید (معادل حدود ۹۴۴۴ گرم بر مترمربع). این در حالی بود که با استفاده از پوشش ۳۰٪ سنگریزه، این مقدار به حدود ۶۱۰۰ گرم بر مترمربع کاهش یافت.در بررسی مقایسه‌ای واحدهای مختلف، مشخص شد که دشت‌های آبرفتی و مخروط‌افکنه‌های تکامل‌یافته، به دلیل ویژگی‌های فیزیکی خاص خود از جمله درصد بالای سنگریزه طبیعی، جرم مخصوص بالاتر و درصد رطوبت اشباع مناسب، مقاومت بیشتری در برابر فرسایش بادی از خود نشان دادند(Bottomley, 2014 ؛ López Sánchez, 1998). در مقابل، اراضی کشاورزی و معادن به دلیل خاک ریزدانه‌تر و کاهش پوشش سطحی، حساسیت بالاتری به فرسایش داشتند.تحلیل واریانس سه‌عاملی نتایج این بخش نشان داد که اثر متقابل بین نوع لندفرم و سرعت باد بر میزان فرسایش معنی‌دار بوده است($p < 0.01$ ؛ $\eta^2=0.19$). همچنین، اثر متقابل بین سرعت باد و میزان پوشش سنگریزه نیز بسیار معنادار($p < 0.001$ ؛ $\eta^2=0.42$) بود. این یافته‌ها بر اهمیت توجه به ویژگی‌های سطحی و اقلیمی در مدیریت پایدار خاک تأکید دارند.از منظر مدیریتی، این نتایج نشان می‌دهند که اراضی با ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی حساس (مانند پلایاها و معادن) نیازمند اقدامات حفاظتی ویژه‌ای هستند. به کارگیری پوشش‌های سنگریزه‌ای با تراکم مناسب می‌تواند تا حد زیادی از شدت فرسایش بادی در این مناطق بکاهد. همچنین در زمین‌های کشاورزی، استفاده از روش‌های حفاظتی نظیر مالچ

پاشی یا افزایش پوشش گیاهی در کنار استفاده از سنگریزه‌ها پیشنهاد می‌شود(Sterk, 2000 ؛Zobeck et al., 2013). از طرفی، شناخت الگوهای مکانی–زمانی فرسایش در سطوح مختلف ژئومورفولوژیکی می‌تواند در طراحی برنامه‌های مقابله با گردوغبار و حفظ کیفیت خاک مؤثر باشد. بررسی حاضر نشان داد که در شرایط سرعت بادهای غالب در شرق اصفهان (۴ متر بر ثانیه) و وقوع طوفان‌های مکرر گردوغبار، توجه به الگوی پراکنش زمین‌ریخت‌های آسیب‌پذیر اهمیت زیادی دارد (Zhao & Pei, 2010). همچنین این یافته حاکی از آن است که در مدیریت مناطق بیابانی، تنها تمرکز بر پوشش گیاهی کافی نیست، بلکه مدیریت سطح خاک از طریق تثبیت سنگریزه‌ای یا اعمال مالچ‌های مقاوم می‌تواند کارایی بالایی در کنترل فرسایش داشته باشد (Gomez et al., 2003). در نهایت، ترکیب نتایج این مطالعه با داده‌های اقلیمی و نقشه‌های ژئومورفولوژی می‌تواند مبنایی برای تهیه نقشه‌های حساسیت به فرسایش بادی در مقیاس محلی و منطقه‌ای باشد. این نقشه‌ها قادرند نواحی با اولویت مدیریت حفاظتی بالا را مشخص کرده و در تخصیص منابع برای پروژه‌های تثبیت شن و گردوغبار مؤثر واقع شوند.

بحث و تحلیل

تحلیل تأثیر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی و پوشش سنگریزه در پایداری خاک در برابر فرسایش بادی

یافته‌های این پژوهش نشان داد که ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، به همراه میزان پوشش سنگریزه سطحی، نقش اساسی در تعیین میزان پایداری خاک‌ها در برابر فرسایش بادی دارند. ویژگی‌هایی مانند درصد سنگریزه، بافت خاک، جرم مخصوص ظاهری، رطوبت اشباع، هدایت الکتریکی، اسیدیته (pH) و میزان یون‌های کلسیم و منیزیم، هر یک به نحوی میزان حساسیت خاک به جدا شدن ذرات توسط باد را تحت تأثیر قرار می‌دهند (رفاهی، ۱۳۸۳) در این تحقیق مشخص شد که افزایش درصد سنگریزه سطحی به میزان قابل توجهی از شدت فرسایش بادی می‌کاهد. این یافته با مطالعات پیشین همسو است که نشان داده‌اند پوشش‌های سنگریزه‌ای به دلیل ایجاد مانع فیزیکی بر سطح خاک و افزایش زبری سطحی، سرعت باد را در تماس با خاک کاهش داده و نیروی برشی مؤثر را کم می‌کنند ؛ López Sánchez, 1998)). این اثر در شرایط سرعت باد بالاتر برجسته‌تر بود، که نشان می‌دهد پوشش سنگریزه در کنترل فرسایش ناشی از طوفان‌های شدید اهمیت دوچندانی دارد.ویژگی‌های فیزیکی خاک نیز در میزان فرسایش بادی تاثیرگذار بودند. خاک‌هایی با درصد بالای رس و سیلت، مانند زمین‌های کشاورزی دشت دامنه‌ای، حساسیت بیشتری به فرسایش داشتند. این نتایج با گزارشات Gomez et al. (2003) و Zhao & Pei (2010) مطابقت داشت که خاک‌های ریزدانه را مستعدتر برای جدایش ذرات در برابر باد معرفی کرده بودند.از نظر ویژگی‌های شیمیایی، میزان بالای کلسیم و منیزیم در خاک‌ها منجر به افزایش فلوکوله شدن ذرات خاک و در نتیجه افزایش پایداری خاک شد (Pei & Zhao, 2010؛ Bottomley, 2014) در این تحقیق، نمونه‌هایی از مخروط‌افکنه‌های تکامل‌یافته و دشت‌های آبرفتی که دارای میزان بالای کربنات کلسیم بودند، در مقابل فرسایش مقاوم‌تر ظاهر شدند.افزایش شوری خاک) بالا بودن (EC به ویژه در نمونه‌های پلایا باعث کاهش مقاومت خاک و افزایش میزان فرسایش گردید. این یافته در راستای مطالعات Zhao et al. (2006) است که تأکید کرده بودند شوری بالای خاک می‌تواند منجر به تجزیه ساختار خاک شده و فرسایش‌پذیری را افزایش دهد.همچنین تأثیر متقابل بین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها مشهود بود. برای مثال، حتی در حضور درصد بالایی از ذرات درشت (شن)، اگر ساختار خاک به دلیل شوری بالا یا کمبود کلسیم ضعیف شده بود، میزان فرسایش بادی همچنان زیاد می‌ماند. این مشاهده اهمیت مطالعه چندجانبه و ترکیبی ویژگی‌های خاک را در تحلیل فرسایش بادی آشکار می‌کند.از دیدگاه مدیریتی، نتایج این تحقیق اهمیت توجه همزمان به اصلاح ویژگی‌های ذاتی خاک (از طریق بهبود خصوصیات شیمیایی و فیزیکی) و به کارگیری پوشش‌های سطحی مانند سنگریزه را برجسته می‌سازد. راهکارهایی مانند افزایش میزان کلسیم در خاک‌های ریزدانه و شور، استفاده از مالچ‌های معدنی یا سنگریزه‌ای، و طراحی الگوهای کاشت مقاوم به فرسایش، می‌تواند کارایی برنامه‌های کنترل فرسایش بادی را به طور محسوسی افزایش دهد.

بررسی تطبیقی واکنش لندفرم‌های مختلف به افزایش سرعت باد و اثرات مدیریتی پوشش سطحی

واحدهای ژئومورفولوژیکی مختلف پاسخ‌های متفاوتی به ترکیب سرعت باد و میزان پوشش سنگریزه نشان دادند. یافته‌های پژوهش حاضر نشان داد که زمین‌های دارای ویژگی‌های فیزیکی مناسب (مانند دشت‌های آبرفتی و مخروط‌افکنه‌های تکامل‌یافته) نسبت به زمین‌های آسیب‌پذیرتر (مانند معادن گچ و شن، و پلایاهای فاقد پوشش) مقاومت بیشتری در برابر فرسایش بادی داشتند.در شرایط بدون پوشش سنگریزه و در سرعت حد آستانه، زمین‌های پلایا با کمترین میزان سنگریزه و بالاترین شوری، بیشترین میزان هدررفت خاک را ثبت کردند. در مقابل، دشت‌های آبرفتی با خاک‌های نسبتاً مقاوم، کمترین میزان هدررفت را داشتند. این نتایج با مطالعات قبلی(Sterk,(2000 ؛ Van Donk et al., (2008) که نشان‌دهنده اهمیت نوع زمین‌ریخت و ویژگی‌های سطحی در شدت فرسایش بودند، همخوانی داشت.با افزایش سرعت باد به دو و چهار برابر حد آستانه، اختلاف بین واحدهای مختلف برجسته‌تر شد. در سرعت‌های بالا، خاک‌های آسیب‌پذیرتر (مانند معادن و پلایاها) دچار افزایش نمایی در میزان فرسایش شدند، در حالی که زمین‌های مقاوم‌تر نسبتاً پایدار ماندند. این یافته‌ها اهمیت طراحی مدیریت‌های حفاظتی متناسب با نوع زمین‌ریخت را برجسته می‌کند.استفاده از پوشش سنگریزه سطحی (در دو سطح ۱۵٪ و ۳۰٪) به طور معناداری در همه لندفرم‌ها میزان هدررفت خاک را کاهش داد، اما میزان این کاهش بستگی به ویژگی‌های ذاتی خاک داشت. در زمین‌های حساس‌تر، نظیر پلایا، حتی افزایش ۳۰٪ سنگریزه نیز نتوانست به‌طور کامل از شدت بالای فرسایش در سرعت‌های بالای باد جلوگیری کند، اما در زمین‌های مقاوم‌تر مانند دشت آبرفتی، همین مقدار سنگریزه توانست هدررفت خاک را به شدت کاهش دهد.از دیدگاه عملی، این یافته‌ها نشان می‌دهد که راهبردهای مدیریتی کنترل فرسایش باید متناسب با ویژگی‌های خاص هر لندفرم طراحی شوند. برای اراضی حساس‌تر، ترکیبی از اقدامات چندگانه شامل تثبیت سنگریزه، کاشت گونه‌های مقاوم به خشکی و باد، و اعمال مالچ‌های مصنوعی یا زیستی توصیه می‌شود. در مقابل، برای زمین‌های مقاوم‌تر، ممکن است افزایش حداقلی پوشش سنگریزه یا مدیریت پوشش گیاهی کافی باشد.از سوی دیگر، توجه به نقش جهت و شدت باد غالب منطقه (شمال غربی در شرق اصفهان) می‌تواند در برنامه‌ریزی جهت قرارگیری موانع طبیعی یا مصنوعی بسیار مؤثر باشد. ایجاد پوشش سنگریزه‌ای در راستای جهت باد غالب می‌تواند کارایی حفاظتی را به طور قابل توجهی افزایش دهد.در نهایت، نتایج این بخش تأکید می‌کنند که در طراحی برنامه‌های بیابان‌زدایی و کاهش گردوغبار، باید به صورت منطقه‌ای و مبتنی بر ویژگی‌های لندفرم، اقدام شود. رویکردهای یکسان و همگانی نمی‌توانند به طور مؤثر همه مناطق را در برابر فرسایش بادی محافظت کنند.

نتیجه‌گیری

فرسایش بادی یکی از مشکلات عمده در مناطق خشک و نیمه‌خشک است که به طور جدی تهدیدی برای منابع خاک و زیست‌محیطی محسوب می‌شود. نتایج این پژوهش نشان داد که فرسایش بادی تحت تأثیر چندین عامل مهم قرار دارد که از جمله آنها می‌توان به ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و همچنین پوشش سطحی مانند سنگریزه‌ها اشاره کرد. در این مطالعه، تأثیر این عوامل در مناطق مختلف ژئومورفولوژیکی شرق اصفهان مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان داد که تغییرات در ویژگی‌های خاک و پوشش سنگریزه می‌تواند به طور معناداری فرسایش بادی را کاهش دهد.یکی از مهم‌ترین یافته‌ها این بود که خاک‌هایی با درصد بالای رس و سیلت، مانند زمین‌های کشاورزی و دشت دامنه‌ای، نسبت به خاک‌های شنی‌تر حساسیت بیشتری به فرسایش بادی دارند. این تأثیر به‌ویژه در خاک‌هایی که شوری بالاتری دارند، محسوس‌تر است. این نتایج با مطالعات قبلی که نشان داده‌اند خاک‌های ریزدانه‌تر و شورتر مستعدتر به فرسایش بادی هستند، همسو می‌باشد .از این رو، در مناطق با خاک‌های ریزدانه و شوری بالا، استفاده از تکنیک‌های اصلاحی مانند افزایش کلسیم و منیزیم در خاک می‌تواند موجب کاهش قابل توجهی در فرسایش بادی شود.همچنین نتایج نشان داد که درصد سنگریزه سطحی، نقش کلیدی در کاهش شدت فرسایش بادی ایفا می‌کند. پوشش سنگریزه‌ای سطح خاک، با ایجاد مانعی در مسیر باد و افزایش زبری سطح، موجب کاهش سرعت باد در نزدیکی سطح خاک می‌شود و از جدا شدن ذرات خاک جلوگیری می‌کند .این اثر به‌ویژه در سرعت‌های بالاتر باد برجسته‌تر بود، که نشان می‌دهد پوشش سنگریزه در شرایط طوفان‌های شدید نقش حیاتی در کاهش فرسایش دارد. در این تحقیق، افزایش درصد سنگریزه از ۱۵٪ به ۳۰٪ به طور معناداری میزان هدررفت خاک را کاهش داد، به‌ویژه در واحدهای ژئومورفولوژیکی حساس مانند پلایا.مقایسه

واحدهای مختلف ژئومورفولوژیکی نشان داد که زمین‌های با ویژگی‌های فیزیکی مناسب (مانند دشت‌های آبرفتی و مخروط‌افکنه‌های تکامل‌یافته) نسبت به زمین‌های آسیب‌پذیرتر (مانند معادن و پلایاها) مقاومت بیشتری در برابر فرسایش بادی نشان دادند. به‌طور خاص، در سرعت‌های بالاتر باد، واحدهایی مانند معادن و پلایاها که فاقد پوشش گیاهی و سنگریزه کافی بودند، دچار افزایش شدید در میزان فرسایش شدند. این نتیجه با مطالعات قبلی همسو است که نشان داده‌اند اراضی با پوشش سطحی ضعیف یا فاقد سنگریزه، بیشتر مستعد فرسایش هستند. به‌ویژه، این واحدها در شرایط طوفان‌های گردوغبار و بادهای شدید، بیشترین آسیب را می‌بینند.در این پژوهش، اثر متقابل سرعت باد و پوشش سنگریزه بر میزان فرسایش بادی به وضوح مشاهده شد. در همه واحدهای ژئومورفولوژیکی، افزایش سرعت باد باعث افزایش قابل توجه در میزان هدررفت خاک شد، ولی این افزایش در واحدهای حساس‌تر مانند معادن و پلایاها بسیار شدیدتر بود. در سرعت‌های بالاتر (۲ و ۴ برابر سرعت حد آستانه)، تفاوت‌های میان واحدهای ژئومورفولوژیکی آشکارتر شد. در این سرعت‌ها، واحدهای مقاوم‌تر مانند دشت‌های آبرفتی همچنان در برابر فرسایش بادی پایدار باقی ماندند، در حالی که دیگر واحدها دچار کاهش شدید در کیفیت خاک شدند. این مشاهده تأکید دارد بر اهمیت توجه به شرایط اقلیمی و ویژگی‌های منطقه‌ای در طراحی استراتژی‌های مقابله با فرسایش بادی.نتایج تحلیل‌های آماری این مطالعه (مانند تحلیل واریانس سه‌عاملی) نیز نشان داد که ویژگی‌های خاک و پوشش سطحی در تعامل با یکدیگر نقش مؤثری در کنترل فرسایش بادی ایفا می‌کنند. همچنین، تجزیه و تحلیل رگرسیون نشان داد که عواملی چون کلسیم، منیزیم و کربنات کلسیم بیشترین اثر را در پیش‌بینی مقاومت خاک در برابر فرسایش بادی دارند. این نتایج به وضوح نشان می‌دهند که مدیریت ترکیبی ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک و اعمال پوشش‌های سطحی می‌تواند به طور مؤثری فرسایش بادی را کاهش دهد و پایداری خاک‌های بیابانی را در برابر طوفان‌های گردوغبار افزایش دهد.بر اساس این یافته‌ها، چند پیشنهاد مدیریتی برای کاهش فرسایش بادی در مناطق خشک و نیمه‌خشک ارائه می‌شود. اولاً، در اراضی با خاک‌های ریزدانه و شور، استفاده از تکنیک‌های اصلاح خاک مانند افزودن کلسیم و منیزیم یا دیگر مواد معدنی می‌تواند مقاومت خاک را افزایش دهد. ثانیاً، ایجاد پوشش‌های سنگریزه سطحی در اراضی بیابانی و آسیب‌پذیر، به ویژه در نواحی که دارای بادهای شدید هستند، می‌تواند تأثیر زیادی در کاهش فرسایش بادی داشته باشد.ثالثاً، در مناطقی که با سرعت‌های بالای باد مواجه هستند، استفاده از روش‌های حفاظتی متعدد نظیر مالچ پاشی، ایجاد پوشش گیاهی مقاوم به خشکی، و تنظیم ساختار خاک برای جلوگیری از ریزش ذرات خاک ضروری است.این تحقیق تأکید می‌کند که برای مقابله مؤثر با فرسایش بادی در مناطق خشک و نیمه‌خشک، باید برنامه‌های مدیریت خاک به صورت منطقه‌ای و متناسب با ویژگی‌های خاص هر زمین‌ریخت و ویژگی‌های اقلیمی طراحی شوند. در نهایت، این مطالعه می‌تواند مبنای تحقیقات آینده در زمینه مدل‌سازی فرسایش بادی و ارزیابی اثرات تغییرات اقلیمی بر پویایی خاک باشد.

منابع

۱. رفاهی، ح. ۱۳۸۳. *فرسایش بادی و کنترل آن*. انتشارات دانشگاه تهران، ایران.
۲. کریمی‌نظر، م.؛ فخیره، ا.؛ فیض‌نیا، س.؛ راشکی، ع. و میری سلیمان، س.ج. ۱۳۸۸. ارزیابی برخی روش‌های زمین آمار در برآورد سرعت آستانه فرسایش بادی در دشت سیستان. مجله مرتع و آبخیزداری ۶۲: ۴۱۷-۴۰۵.
3. Armbrust, D.V. 1987. Principles of soil erosion: detachment, movement, and deposition. Reprints-US Department of Agriculture, Agricultural Research Service, USA.
4. Bottomley, P.2014. Methods of Soil Analaysis. 2nd Edition, Acsess, Orgegan.1094 p.
5. Buschiazzo, D.E.; Zobeck, T.M. & Abascal, S.A. 2007. Wind erosion quantity and quality of an Entic Haplustoll of the semi-arid pampas of Argentina. Journal of Arid Environments 69: 29-39.
6. Colazo, J.C. & Buschiazzo, D.E. 2010. Soil dry aggregate stability and wind erodible fraction in a semiarid environment of Argentina. Geoderma 159(2): 228-236.
7. Erpul, G.; Gabriels, D. & Janssens, D. 1998. Assessing the drop size distribution of simulated rainfall in a wind tunnel. Soil and Tillage research 45(4): 455-463.
8. Fryrear, D.W.; Sutherland, P.L.; Davis, G.; Hardee, G. & Dollar, M. 1999. Wind erosion estimates with RWEQ and WEQ. In Proceedings of Conference Sustaining the Global Farm,

10th International Soil Conservation Organization Meeting, 11-12 May, Purdue University. pp. 760-765.
9. Gomes, L.; Arrue, J.L.; Lopez, M.V.; Sterk, G.; Richard, D.; Gracia, R.; Sabre, M.; Gaudichet, A. & Frangi, J.P. 2003. Wind erosion in a semiarid agricultural area of Spain: the WELSONS project. Catena 52(3-4): 235-256.
10. Li, F.; Zhang, H.; Zhang, T.H. & Shirato, Y. 2003. Variation of sand transportation rates in sandy grasslands a long a desertification gradient in northern China. Catena 56(3): 255-275.
11. Liu, M.X.; Wang, J.A.; Yan, p.; Liu, L.Y.; Ge, Y.Q.; Li, X.Y.; Hu, X.; Song, Y. & Wang, L. 2006. Wind tunnel simulation of ridge tillage effects on soil erosion from cropland. Soil and Tillage Research 90(3-4): 242-251.
12. López Sánchez, M.V. 1998. Wind erosion in agricultural soils: an example of limited supply of particles available for erosion. Catena 33(1): 17-28.
13. Nordstorm, K.F & Hotta, S.H. 2004. Wind erosion from cropland in the USA: a reviw of problems, solutions and prospects. Geoderma 121(3): 157-169.
14. Page, A.L.; Miller, R.H. & Jeeney, D.R. 1992. Methods of Soil analysis. In: *Chemical and Mineralogical Properties*. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin. pp. 56-71.
15. Skidmore, E.L. 2000. Air, soil, and water quality as influenced by wind erosion and strategies for mitigation. In Second international symposium of new technologies for environmental monitoring and agro-applications proceedings, 4-5 October, Tekirdag, Turkey. pp. 216-221.
16. Sterk, G. 2000. Flattened residue effects on wind speed and sediment transport. Soil Science Society of America Journal 64(3): 852-858.
17. Van Donk, S.J.; Liao, C. & Skidmore, E.L. 2008. Using temporally limited wind data in the Wind Erosion Prediction System. Transactions of the ASABE 51(5): 1585-1590.
18. Yang, S.; Lianyou, L. & Ping, C. 2005. Areview of soil erodibility in water and wind erosion research. Journal of Geographical Science 15(3): 167-179.
19. Zhang, Z.; Wieland, R.; Reiche, M.; Funk, R.; Hoffmann, C.; Li, Y. & Sommer, M. 2012. Identifying sensitive areas to wind erosion in the Xilingele grassland by computational fluid dynamic modeling. Ecological Informatics 8(3): 37-49.
20. 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.
21. Zhao, Y. & Pei, Y. 2010. A study on distributed simulation of soil wind erosion and its application to the Tuhaimajia River Basin. Procedia Environmental Sciences 2(1): 1555-1569.
22. Zobeck, T.M.; Baddock, M.; Van Pelt, R.S.; Tatarko, J. & Acosta-Martinez, V. 2013. Soil property effects on wind erosion of organic soils. Aeolian Research 10: 43-51.