

Comparison of Estimative and Laboratory Methods for Measuring the Wind-Erodible Fraction of Soil and Its Spatial Modeling in the Hamoun Wetland

Marzieh Rigi Khales¹, Ali Shahriari^{2*} , Ebrahim Shirmohammadi³, Vahid Rahdary⁴, Abbas Miri⁵

1. M.Sc. Department of Soil Science and Engineering, University of Zabol, Zabol, Iran

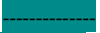
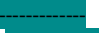
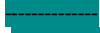
2. **Corresponding Author**, Associate Professor, Department of Soil Science and Engineering, University of Zabol, Zabol, Iran

Email: shahriari.ali@uoz.ac.ir ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6061-4029>

3. Assistant Professor, Department of Soil Science and Engineering, University of Zabol, Zabol, Iran

4. Assistant Professor, Department of Environmental Sciences, University of Zabol, Zabol, Iran

5. Associate Professor, Department of Rangeland and Watershed Management, University of Zabol, Zabol, Iran

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article	Wind erosion is a major environmental hazard in arid regions. Studying the wind-erodible fraction (WEF) of soil and its spatial modeling is essential for sustainable land management. Due to its exposure to the 120-day winds and the impacts of both climatic and anthropogenic droughts, the Sistan region exhibits highly susceptible conditions for wind erosion. The dried bed of the Hamoun Wetland has become one of the primary sources of dust storms in eastern Iran. This research aimed to evaluate common methods for measuring WEF and to spatially model it using geostatistical techniques in the International Hamoun Wetland. A total of 199 sampling points were selected from the bed of Hamoun Wetland using a stratified random sampling method, and soil samples were collected from the surface layer at these points. Subsequently, the soil properties required for estimating the wind-erodible fraction using estimative methods were measured. Laboratory-measured WEF and estimated values based on Fryrear (WEFF), Usman (WEFU), López (WEFL), Rakkar (WEFR), Dufková (WEFD), Bouajila (WEFB), and Motemani (WEFM) formulas were computed. Spatial modeling was performed using IDW, Kriging, and Cokriging. Results showed a mean WEF of 36.57%, indicating lower erodibility. A significant negative correlation between laboratory WEF and computational estimates revealed the limited performance of existing equations in this region, likely due to high soil variability and dependence on local factors. These equations, developed from limited datasets, fail to represent the wide spectrum of soil types. Thus, the spherical model was identified as the best variogram for WEF, with moderate spatial fitness. Cokriging using SAR as an auxiliary variable outperformed (RMSE=15.719 and ME=-0.014) Kriging and IDW. From a zoning perspective, northeastern (Hamoun-e Puzak) and western (some parts of the Hamoun-e Sabouri and the Hamoun-e Hirmand) parts of the wetland showed the highest erosion susceptibility. These findings underscore the necessity of developing region-specific equations and should inform management strategies to reduce erosion and dust storms.
Article history:	
Received: 	
Revised: 	
Accepted: 	
Published: 	
Keywords: Wind Erosion, Dust Storms, Hyper-Arid Regions, Wetland Soils, Cokriging, Sistan.	

How to Cite: Last Name, Initial., Last Name, Initial., & Last Name, Initial. (2021). Title of paper. *Journal of Natural Environmental Hazards*, -- (--), ----.



© The Author/Authors

DOI: 000000000000000000

Publisher: University of Sistan and Baluchestan

EXTENDED ABSTRACT

INTRODUCTION

Wind erosion is a major environmental hazard in arid regions worldwide. Studying the wind-erodible fraction of soil and its spatial modeling in the form of maps is essential information for the protection and sustainable management of land. Numerous methods have been proposed by researchers to estimate and measure the wind-erodible fraction of soils, each differing based on the study region and the influencing factors. The Sistan region experiences severe winds known as the "120-day winds." Due to climatic and anthropogenic droughts, the Hamoun Wetland, the primary water source in eastern Iran, has been seriously affected, and its dried bed is recognized as the main source of dust in the region. Therefore, this research aims to investigate common methods for measuring the wind-erodible fraction of soil and to spatially model it using common geostatistical methods in the International Hamoun Wetland.

DATA AND METHODOLOGY

To carry out this research, a total of 199 sampling points were selected from the bed of Hamoun Wetland using a stratified random sampling method, and soil samples were collected from the surface layer (0–10 cm) at these points (Figure 1).

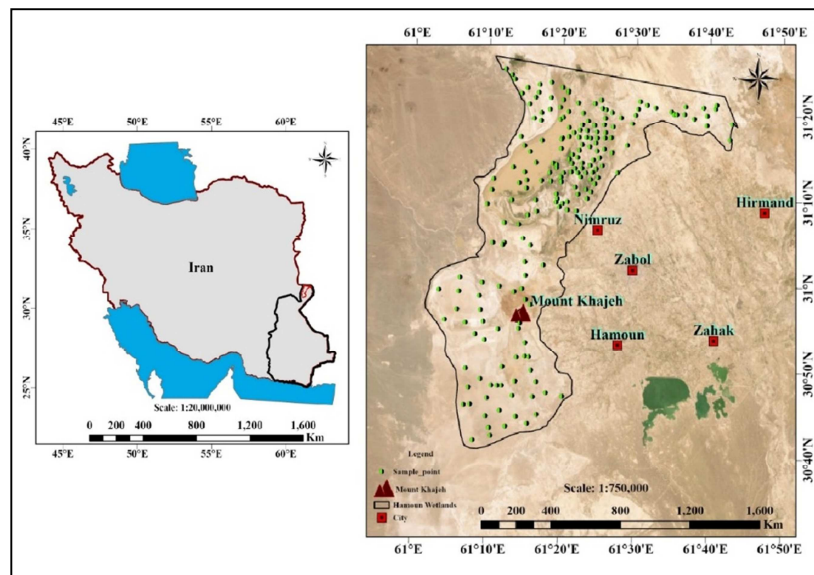


Figure 1: Location of the study area and sampling points (Authors)

Subsequently, the soil properties required for estimating the wind-erodible fraction using estimative methods, including organic matter (OM), clay, silt, sand, the sand-to-clay ratio (Sand/Clay), and calcium carbonate equivalent (CCE), as well as key basic properties, namely bulk density (BD), soil reaction (pH), electrical conductivity (EC), sodium adsorption ratio (SAR), saturation percentage (SP), and cation exchange capacity (CEC), were measured. After that, at these points, the laboratory-based Wind Erodible Fraction (WEF), as well as the wind-erodible fraction calculated based on the Fryrear (WEFF), Usman (WEFU), López (WEFL), Rakkar (WEFR), Dufková (WEFD), Bouajila (WEFB), and Motemani (WEFM) formulas, were estimated and computed. Statistical analysis of soil chemical and physical parameters as well as wind-erodible fractions was performed using SPSS. Geostatistical analyses were conducted using GS^+ and ArcGIS software, employing three conventional methods in soil studies: kriging, cokriging, and inverse distance weighting (IDW). It should be noted that for kriging and cokriging, both ordinary and simple modes were considered, while for IDW, powers up to three were examined. Furthermore, measured soil properties that exhibited a significant correlation

with the wind-erodible fraction were investigated as auxiliary variables, each separately, within the cokriging approach. To evaluate the accuracy of the models, the coefficient of determination (R^2), mean error (ME), and root mean square error (RMSE) were calculated, the latter representing the mean prediction accuracy and indicating the magnitude of expected error.

RESULTS AND DISCUSSION

The results showed the soils of Hamoun Wetland bed exhibit, from a physical property perspective, a medium texture with a predominance of silt particles, resulting in moderate bulk density and saturation percentage. The fertility characteristics of these soils mainly ranged from moderate to low values (except calcium carbonate equivalent). The properties reflecting soil salinity and sodicity indicated that the study area contains saline and sodic soils; however, compared to the Sistan Plain, the mean sodium values were lower. The results indicated that the mean WEF in the region was 36.57 percent, representing a low level of erodibility. Furthermore, a significant negative correlation between the laboratory-measured WEF and the computationally estimated erodibility parameters revealed the inefficacy of these parameters in the Hamoun Wetland. The reason for this finding is the high variability of the soil's wind-erodible fraction, which is highly dependent on regional factors (environmental characteristics, particularly soil properties) and land management practices. Moreover, these equations were developed based on a limited number of datasets and may not be representative of the wide spectrum of soil types. Consequently, the performance of existing estimation parameters may not provide satisfactory accuracy in predicting laboratory-measured parameters in a specific region. This underscores the necessity of investigating and analyzing the factors influencing laboratory-derived indices within a given region prior to developing a new, region-specific equation. Correlation analysis between soil properties and the Wind Erodible Fraction (WEF) revealed that bulk density (BD), silt content, and cation exchange capacity (CEC) exhibited a significant negative relationship with WEF, whereas electrical conductivity (EC) and sodium adsorption ratio (SAR) showed a significant positive relationship with WEF. Accordingly, the best variogram model for the Wind Erodible Fraction (WEF) was the spherical model, and the spatial dependence of WEF fell into the moderate spatial dependence class (Table 1). The evaluation of the geostatistical models also demonstrated that the Cokriging method with SAR as the auxiliary variable was the superior technique for the spatial modeling of the soil's wind-erodible fraction compared (RMSE=15.719 and ME=-0.014) to Kriging and Inverse Distance Weighting (IDW). From a zoning perspective, the northeastern (Hamoun-e Puzak) and western (some parts of the Hamoun-e Sabouri and the Hamoun-e Hirmand) parts of the wetland and certain areas in its west exhibited the highest susceptibility to wind erosion.

Table 1: Variogram parameters, model selection criteria, and variogram validation controls

Parameter	Model	Nugget (C_0)	Sill (C_0+C)	Range (m)	Spatial variance (C/C_0+C)	Spatial dependence class	R^2	RSS
WEF	Spherical	95.8	336.1	37700	0.715	moderate	0.904	4510

CONCLUSION

In conclusion, the indiscriminate use of erodibility estimation models without validation against local data can lead to inaccurate estimates. Furthermore, the integration of field and laboratory data with advanced geostatistical methods, such as cokriging, provides a powerful tool for generating precise and reliable maps for land managers and decision-makers. Focusing on the critical areas identified in this study can serve as an effective step toward mitigating dust events and conserving land resources in the Hamoun catchment basin.

ETHICAL CONSIDERATIONS

Conflict of Interest Statement: The authors declare no conflict of interest.

Ethical Statement: This article does not contain any studies with human participants or animals performed by any of the authors.

REFERENCES

References [in Persian]

- Ahmadi, A., Ghorbanian, R., Jafarzadeh, A. A. (2017). Factors affecting inherent soil erodibility against wind (Case study: Tabriz Plain). Proceedings of the 15th Iranian Soil Science Congress, Isfahan University of Technology, Iran. [in Persian]
- Ali-Soufi, M. and Shahriari, A. (2020). Investigation of some chemical properties and amounts of some nutrient elements associated with dust in Sistan Plain. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 9(23), 99-116. doi: 10.22111/jneh.2019.29207.1504 [in Persian]
- Arbab 1, Pahlavanravi 2, Piri Sahragard H, Amiri M. (2018). Accuracy Assessment of Geo-Statistics and Artificial Neural Networks Methods to Estimate Threshold Wind Velocity: A Case of Jazinak Region, Sistan Plain. *E.E.R.*; 8 (3), pp 87-105. [in Persian]
- Asadzadeh, F., Khosravi Aghdam, K., Zawareh, M., Yaghmaian Mahabadi, N., Ramzanpour, H. (2017). Spatial changes of soil mineral particles using geostatistics and remote sensing for soil texture zoning. *Water and Soil Journal (Agricultural Sciences and Industries)*, 32: 7, pp 1222-1207. [in Persian]
- Behnam, V., Gholamalizadeh Ahangar, A., Rahmanian, M., Bameri, A. (2019). Spatial Distribution of Some Physical and Chemical Properties of Soil using Geostatistic Methods (Case study: Zabol to Zahedan Route). *Environment and Water Engineering*, 5:3, pp 251-263[in Persian]
- Dahmardeh, M., Mohammadghasemi, M. and Ghasemi, I. (2022). Evaluation of conservation and recreational functions of Hamoon wetland, using conditional valuation approach. *Iranian Journal of Agricultural Economics and Development Research*, 53(1), 129-143. doi: 10.22059/ijaedr.2021.332234.669091 [in Persian]
- Delarami, A., Gholamalizadeh, A., Shabani, A. (2020). Determining Optimal Combination of Input Variables Using Gamma Test for Absorbable Potassium Modeling in the Fuzzy-Neural System (Case Study: Mian-Kangi Region Zabol). *Crop Science Research in Arid Regions*, 2(1), pp 67-75. [In Persian]
- Ebrahimi-Khusfi, M. (2023). Analysis of Changes in the Area of Hamoon Wetlands and other Water Bodies in Sistan Region using Satellite Images. *Geography and Development*, 21(71), 139-165. doi: 10.22111/gdj.2023.7598 [in Persian]
- Eskandari Damaneh, H., Gholami, H., Khosravi, H., Mahdavi Najafabadi, R., Khoorani, A., & Li, G. (2020). Modeling Spatial and Temporal Changes in Land-Uses and Land Cover of the Urmia Lake Basin, Applying Cellular Automata and Markov Chain. *Geography and Environmental Sustainability*, 10(2), 57-72. doi: 10.22126/ges.2020.5303.2238 [in Persian]
- Gholamalizade Ahangar, A., Sarani, F., Hashemi, M., Shabani, A. 2015. Comparison of Linear Regression Methods, Geostatistical and Artificial Neural Network Modeling of Organic Carbon in Dry Land of Sistan Plain, *Journal of Water and Soil*. 6:28, pp 1250-1260. [in Persian]
- Hasani Pak, A. A. (2010). Geostatistics. University of Tehran Press, 330 pp. [in Persian]
- Hashemi, M., Gholamalizadeh Ahangar, A., Bameri, A., Sarani, F., Hejazizadeh, A. (2016), Survey and Zoning of Soil Physical and Chemical Properties Using Geostatistical Methods in GIS (Case Study: Miankangi Region in Sistan), *Journal of Water and Soil*, 30 (2), pp 443-458. [In Persian]
- Hosseini, A., Shahriari, A., Shirmohammadi, E., Ziaei Javid, A. R., Rezaei, M., & Mousavi, R. (2022). Determining the effect of environmental variables on water erodibility of the Sistan floodplain. *Journal of Iranian Water Engineering Research*, 2(4), 57-78. <https://doi.org/10.22034/ijwer.2025.515438.1074> [in Persian]
- Jafarnia, S., Akbarinia, M. (2014). Investigation of spatial distribution of soil and water properties by use of geostatistics in Mangrove forest of Qeshm Island. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*. 22:4, pp 673-686. [in Persian]
- Jamalzehi Samareh, Y., Shahriari, A., Pahlavan-Rad, M. R., Ziaie Javid, A. and Bameri, A. (2024). Three-dimensional mapping of soil saturation percentage using the combination of geostatistical methods and environmental variables in the Sistan Plain. *Journal of Water and Soil Conservation*, 31(4), 89-111. doi: 10.22069/jwsc.2025.22614.3746 [in Persian]
- Maleki S, Soffianian A R, Soltani Koupaie S, Pourmanafi S, Rahdari V. (2019). Habitat suitability modeling of water birds and waders in Hamun wetland by Maximum Entropy model. *Wetland Ecology*, 11 (2):5-14 [in Persian]
- Mir, H., Gholamalizadeh Ahangar, A., Shabani, A. (2016), Determination of the Most Important Soil Parameters Affecting the Availability of Phosphorus in Sistan Plain, Using Connection Weight Method in Neural Networks, *Journal of Water and Soil*, 9(26), pp 1674-1687. [In Persian]
- Noori, A., Eftekhari, K., Efandiari, M., Mohammadi Torkashvand, A., Ahmadi, A. (2022). Estimation of soil erodible fraction using artificial neural network models and integration of artificial neural network with genetic algorithm in the part of Qazvin province. *E.E.R.* 12 (1), pp 145-159. [in Persian]
- Owliaie, H., Salehi, A., Zareian, G. (2024). Assessment of geostatistical models for zoning spatial distribution of some soil properties in Darengan region with different land uses, Fars province. *Iranian Journal of Soil and Water Research*. 55:1, pp 97-116. [In Persian]
- Rezazadeh Shamkhal, S., Gholamalizadeh, A., Ghazmeh, S., Froughifar, H., Bameri, A. (2016). Evaluation of Different Interpolation Methods in Spatial Estimation of Soil Properties in Sistan Plain. *Water and Soil Science*, 26(2-2), pp 151-162. [in Persian]

Shahriari, A., Mohammadi, S. M., Shirmohammadi, E., Fatemi Ghomesheh, A. and Galavi, H. (2025). Investigating the spatial distribution of soil wind-erodible indices using geostatistical methods in the Sistan plain. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 14(43), 111-132. doi: 10.22111/jneh.2024.49372.2060 [in Persian]

Tajik, F., Rahimi, H., Pazira, A. (2002). The effect of soil organic matter, electrical conductivity and sodium adsorption ratio on the tensile strength of aggregates, *Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources*, 3, pp 1-15. [In Persian]

References [in English]

- Abdel-Rahman, M.A., Zakarya, Y.M., Metwaly, M., & Koubouris, G. (2021). Deciphering Soil Spatial Variability through Geostatistics and Interpolation Techniques. *Sustainability*, 13: 194.
- Alizadeh Motaghi, F., Hamzehpour, N., Mola Ali Abasiyan, S., Rahmati, M. (2020). The wind erodibility in the newly emerged surfaces of Urmia Playa Lake and adjacent agricultural lands and its determining factors. *Catena*, 194, pp 104675. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104675>
- Bouajila, A., Omara, Z., Ajari, A., Bol, R., Brahim, N., (2022). Improved estimation and prediction of the wind-erodible fraction for Aridisols in arid southeast Tunisia. *Catena* 211, 106001. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.106001>
- Cambardella, C.A., Moorman, T.B., Novak, J.M., Parkin, T.B., Karlen, D.L., Turco, R.F., Konopka, A.E. (1994). Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil Science Society of America Journal*, 58, pp 1501-1511.
- Christie J. & Bostwick P. (2012). Climate change adaptation plan for coastal and inland wetlands in the state of Michigan. A white paper prepared for the Michigan Department of Environmental Quality Wetlands Program and Coastal Management Program. Association of State Wetlands Managers, Windham, Maine.
- Colazo, J.C. and Buschiazso, D.E. (2010). Soil dry aggregate stability and wind erodible fraction in a semiarid environment of Argentina. *Geoderma*, 159: 228-236.
- Delbari, M., Loiskandl, W., Afrasiab, P. (2010). Uncertainty assessment of soil organic carbon content spatial distribution using geostatistical stochastic simulation. *Soil Res.* 48, 27-35.
- Dufková, J.K., Prochazka, V., Szturc, J., Mašíček, T. (2021). Using the equation for computing the wind erodible fraction of soils in the conditions of the Czech Republic. *Acta Horticulturae et Regionotecturae* 24 (1), 63-70. <https://doi.org/10.2478/ahr-2021-0025>
- Fan, X., Weng, Y., and Tao, J. (2016). Towards decadal soil salinity mapping using Landsat time series data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geo information*. 52, 32-41.
- Fryrear, D.W., Saleh, A., Bilbro, J.D., Schomberg, H.M., Stout, J.E. and Zobeck, T.M. (1998). Revised Wind Erosion Equation (RWEQ), Wind Erosion and Water Conservation Research Unit, USDAARS- SPA Cropping Systems Research Laboratory. Technical Bulletin No 1.
- Fryrear, D.W., Krammes, C.A., Williamson, D.L., Zobeck, T.M. (1994). Computing the wind erodible fraction of soils. *J. Soil Water Conserv.* 49 (2), 183-188. <https://doi.org/10.1080/00224561.1994.12456849>
- Guo, Z., Chang, C., Wang, R., Li, J. (2017). Comparison of different methods to determine wind-erodible fraction of soil with rock fragments under different tillage/management. *Soil & Tillage Research*, 168, pp 42-49. <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.12.008>
- Han, Y., Zhao, W., , Ding, J. and Santos Ferreira, C.S. (2023). Soil erodibility for water and wind erosion and its relationship to vegetation and soil properties in China's drylands. *Science of the Total Environment* 903: 166639. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166639>
- Jamalzei Samareh, Y., Shahriari, A., Pahlavan-Rad, M. R., Ziaie Javid, A., Bameri, A. 2025. Spatial modeling of soil saturation percentage using machine learning methods in Sistan Plain. *Agriculture, Environment and Society* 5 (1), 19-31. doi: 10.22034/jelsa.2025.479520.1087
- Karaoglu, M., Erdel, E. (2023). Soil properties and mapping of the Aralik-Igdir wind erosion area-I (surface). *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, 18 (2), pp 277 – 288. doi: 10.26471/cjees/2023/018/258
- Khatei, G., Rinaldo, T., Van Pelt, R.S., D'Odorico, P., Ravi, S. 2025. On the differential effects of salinity and sodicity on aeolian erosion dynamics and particulate emissions. *Earth Surface Processes and Landforms* 50, e70040. <https://doi.org/10.1002/esp.70040>
- Li J., and Heap A.D. (2011). A review of comparative studies of spatial interpolation methods in environmental sciences: performance and impact factors. *Ecological Informatics* 6:3-4. 228-241.
- López, M.V., de Dios Herrero, J.M., Hevia, G.G., Gracia, R. and Buschiazso, D.E. (2007). Determination of the wind-erodible fraction of soil using different methodologies. *Geoderma* 139, 407-411. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.03.006>
- Mirakzei, K., Pahlavan-Rad, M., Shahriari, A., Bameri, A. 2018. Digital soil mapping of deltaic soils: a case study from Hirmand (Helmand) river delta. *Geoderma* 313, 233-240. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.10.048>
- Motameni, S., Soroush, A., Fattahi, S.M., & Eslami, A. (2024). A data-driven approach for assessing the wind-induced erodible fractions of soil. *Journal of Arid Environments*, 222: 105152.
- Ninerola, V.B., Navarro-Pedreno, J., Gomez Lucas, I., Melendez Pastor, I. and Jordan Vida, M. (2017). Geostatistical assessment of soil salinity and cropping systems used as soil phytoremediation strategy. *Journal of Geochemical Exploration*. 174. 53-58.

- Pahlavan-Rad, M., Dahmardeh, K., Brungard, C. 2018. Predicting soil organic carbon concentrations in a low-relief landscape, eastern Iran. *Geoderma Regional* 15, e00195. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2018.e00195>
- Pahlavan-Rad, M.R., Akbarimoghaddam, A. 2018. Spatial variability of soil texture fractions and pH in a floodplain (case study from eastern Iran). *Catena* 160, 275-281. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.10.002>
- Pásztor, L., Négyesi, G., Laborczi, A., Kovacs, T. (2016). Integrated spatial assessment of wind erosion risk in Hungary. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 16, 2421–2432. <https://doi.org/10.5194/nhess-16-2421-2016>
- Rakkar, M.K., Blanco-Canqui, H., Tatarko, J., (2019). Predicting soil wind erosion potential under different corn residue management scenarios in the central Great Plains. *Geoderma* 353, 25–34. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.05.040>
- Rezaei, M., Mohammadifar, A., Gholami, H., Mina, M., Riksen, M.J.P.M., Ritsema, C. (2023). Mapping of the wind erodible fraction of soil by bidirectional gated recurrent unit (BiGRU) and bidirectional recurrent neural network (BiRNN) deep learning models. *Catena*, 223, pp 106953. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.106953>
- Sarani, F., Ahangar, A.G., Shabani, A. (2016). Predicting ESP and SAR by artificial neural network and regression models using soil pH and EC data (Miankangi Region, Sistan and Baluchestan Province, Iran). *Archives of Agronomy and Soil Science* 62 (1), 127-138. <https://doi.org/10.1080/03650340.2015.1040398>
- Schaetzl, R. J., Anderson, S. 2005. *Soils: Genesis and Geomorphology*, Cambridge University Press, 833 p.
- Selmy, S.A., Abd El-Aziz, S., El-Desoky, A., & El-Sayed, M.A. (2022). Characterizing, predicting, and mapping of soil spatial variability in Gharb El-Mawhoub area of Dakhla Oasis using geostatistics and GIS approaches. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*. 21. 383-396. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2021.10.013>
- Shahriari, M., Delbari, M., Afrasiab, P., Pahlavan-Rad, M.R. 2019. Predicting regional spatial distribution of soil texture in floodplains using remote sensing data: A case of southeastern Iran. *Catena* 182, 104-149. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104149>
- Shiyatyi, E.I., (1965). Wind structure and velocity over a rugged soil surface. *Vestnik Sel.-khoz. Nauki* 10.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.07.012>
- Skidmore, E.L., Hagen, L.J., Armburst, D.V., Durar, A.A., Fryrear, D.W., Potter, K.N., Wagner, L.E. and Zobeck, T.M. (1994). Methods for investigating basic processes and conditions affecting wind erosion. In: Lal, R. (Ed.), *Soil Erosion Research Methods*. Soil & W. Cons. Soc. Ankeny, USA, pp. 295–330.
- Usman, H. (1995). Wind erosion in northeastern Nigeria. 1. Erodibility factors. *Arid Land Res. Manag.* 9 (4), 457–466. <https://doi.org/10.1080/15324989509385912>
- Webb, N.P., Strong, C.L. (2011). Soil erodibility dynamics and its representation for wind erosion and dust emission models. *Aeolian Res.* 3, 165–179.

مقایسه روش های تخمینی و آزمایشگاهی اندازه گیری بخش فرسایش پذیر بادی خاک و مدل سازی مکانی آن در تالاب هامون

مرضیه ریگی خالص^۱، علی شهریاری^{۲*} , ابراهیم شیرمحمدی^۳، وحید راهداری^۴، عباس میری^۵

۱. دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران

۲. دانشیار، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران (نویسنده مسئول)

ایمیل: shahriari.ali@uoz.ac.ir <https://orcid.org/0000-0001-6061-4029> ORCID:

۳. استادیار، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران

۴. استادیار، گروه محیط زیست، دانشگاه زابل، زابل، ایران

۵. دانشیار، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشگاه زابل، زابل، ایران

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: --/--/---

تاریخ ویرایش: --/--/---

تاریخ پذیرش: --/--/---

تاریخ انتشار: --/--/---

واژه های کلیدی:

فرسایش بادی، طوفان های گرد و غبار، مناطق فراخشک، خاک های تالابی، کوکریچینگ، سیستان.

فرسایش بادی یکی از مخاطرات اصلی محیطی در مناطق خشک جهان است. مطالعه بخش فرسایش پذیر بادی خاک و مدل سازی مکانی آن، اطلاعاتی کلیدی برای مدیریت پایدار اراضی را فراهم می کند. منطقه سیستان به دلیل قرارگیری در معرض بادهای ۱۲۰ روزه و اثرات خشکسالی های اقلیمی و انسانی، دارای شرایط بسیار مستعد فرسایش بادی است و بستر خشک تالاب هامون به یکی از منابع اصلی گردوغبار در شرق ایران تبدیل شده است. هدف این پژوهش، بررسی روش های متداول اندازه گیری بخش فرسایش پذیر بادی خاک و مدل سازی مکانی آن با استفاده از زمین آمار در تالاب بین المللی هامون بود. بدین منظور، ۱۹۹ نقطه از بستر تالاب هامون به روش تصادفی طبقه بندی شده انتخاب و از خاک سطحی آنها نمونه برداری شد. سپس خصوصیات خاکی مورد نیاز برای برآورد روش های محاسباتی بخش فرسایش پذیر بادی و خصوصیات مهم پایه اندازه گیری شدند. در این نقاط، بخش فرسایش پذیر بادی آزمایشگاهی (WEF) و مقادیر برآورد شده با فرمول های فرایر (WEFF)، عثمان (WEFU)، لویز (WEFL)، راکر (WEFR)، دوفکو (WEFD)، بواجیلا (WEFB) و متمنی (WEFM) محاسبه شد. مدل سازی مکانی با روش های وزن دهی معکوس فاصله، کریجینگ و کوکریچینگ انجام گرفت. نتایج نشان داد میانگین WEF در منطقه ۳۶/۵۷ درصد است که بیانگر فرسایش پذیری در سطح کم می باشد. همبستگی منفی معنی دار بین WEF آزمایشگاهی و برآوردهای محاسباتی، عملکرد محدود روش های موجود در شرایط تالاب هامون نشان داد که دلیل آن تغییرپذیری بالای خاک و وابستگی شدید به عوامل منطقه ای و مدیریت اراضی است. این معادلات بر پایه داده های محدود تدوین شده اند و طیف وسیع خاک ها را پوشش نمی دهند. از نظر مدل سازی مکانی، مدل کروی بهترین برازش را برای WEF داشت و تناسب مکانی در کلاس متوسط قرار گرفت. روش کوکریچینگ با متغیر کمکی SAR، نسبت به کریجینگ و IDW بهترین روش برای مدل سازی مکانی بخش فرسایش پذیر خاک بود. از نظر پهنه بندی، بخش های شمال شرق (هامون پوزک) و مناطقی در غرب (بخش هایی از هامون ساپوری و هامون هیرمند) تالاب، بیشترین حساسیت را به فرسایش بادی نشان دادند که باید در برنامه های کاهش فرسایش و گردوغبار مورد توجه مدیران قرار گیرد.

استناد: نام خانوادگی، نام؛ نام خانوادگی، نام؛ و نام خانوادگی، نام (۱۴۰۰). عنوان مقاله. مخاطرات محیط طبیعی، -- (--)، ----

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

مقدمه

فرسایش پذیری خاک خصوصیتی است که میزان حساسیت خاک را در برابر جدا شدن و انتقال توسط عوامل فرسایش دهنده (آب، باد و یخچال) نشان می دهد (وب^۱ و استرانگ^۲، ۲۰۱۱؛ هان^۳ و همکاران، ۲۰۲۳) و یکی از عوامل مهم در تخمین درست مقدار فرسایش خاک و ارائه راهکارهای مبارزه با این پدیده است (هان و همکاران، ۲۰۲۳). این خصوصیت به ویژگی های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک ها وابسته است و عموماً به عنوان یکی از خصوصیات ذاتی با مقدار ثابت در نظر گرفته می شود (سیرجانی^۴ و همکاران، ۲۰۱۹؛ بواجیلا^۵ و همکاران، ۲۰۲۲؛ هان و همکاران، ۲۰۲۳). بر این اساس در مناطق متأثر از فعالیت های بادی، مطالعه فرسایش بادی و فرسایش پذیر بادی خاک و فاکتورهای مرتبط و مؤثر بر آن (پازتور^۶ و همکاران، ۲۰۱۶؛ سیرجانی و همکاران، ۲۰۱۹؛ هان و همکاران، ۲۰۲۳) برای تصمیم گیری و برنامه ریزی های مدیریتی منطقه ای ضروری است.

روش های مختلفی برای مطالعه فرسایش پذیری بادی خاک توسط پژوهشگران استفاده می شود که برخی از آنها شامل روش های اندازه گیری مستقیم (تونل باد، اندازه گیری آزمایشگاهی) و برخی شامل روش های تخمینی (استفاده از فرمول) می باشند. اندازه گیری مستقیم فرسایش پذیری بادی خاک منجر به ارائه شاخص آزمایشگاهی بخش فرسایش پذیر بادی آزمایشگاهی (اسکیدمور^۷ و همکاران، ۱۹۹۴؛ لوپز^۸ و همکاران، ۲۰۰۷) گردید که به عنوان اصلی ترین شاخص فرسایش پذیری بادی خاک مورد پذیرش محققین است و صحت روش های فرمولی بر اساس رابطه و میزان همبستگی با این شاخص مورد ارزیابی قرار می گیرد. از این رو پژوهشگرانی متعددی بر روی برآورد بخش فرسایش پذیر بادی خاک با استفاده از فرمول ریاضی، مطالعه نموده اند و بر اساس خصوصیات خاکی مناطق مورد مطالعه فرمول هایی را پیشنهاد نمودند. فرمول فرایریر یکی از پرکاربرترین فرمول ها در این زمینه بوده که از مطالعه بخش فرسایش پذیر بادی خاک های آمریکا بدست آمده است (فرایریر^۹ و همکاران، ۱۹۹۴)، همچنین فرمول عثمان در خاک های نیجریه (عثمان^{۱۰}، ۱۹۹۵)، فرمول لوپز در خاک های اسپانیا و آرژانتین (لوپز و همکاران، ۲۰۰۷)، فرمول راکار در خاک های آمریکا (راکار^{۱۱} و همکاران، ۲۰۱۹)، فرمول دوفکوا در خاک های کشور چک (دوفکوا^{۱۲} و همکاران، ۲۰۲۱)، فرمول بواجیلا در خاک های تونس (بواجیلا و همکاران، ۲۰۲۲) و اخیراً فرمول متمنی در خاک های آرژانتین، چین، چک، ایران، تونس، ترکیه نیجریه و آمریکا (متمنی^{۱۳} و همکاران، ۲۰۲۴) بدست آمد. احمدی و همکاران (۱۳۹۶) پژوهشی برای تعیین عوامل مؤثر بر فرسایش پذیری بادی خاک در دشت تبریز انجام دادند و دریافتند که ساختمان خاک، درصد رس و ماده آلی رابطه منفی و معنی داری با بخش فرسایش پذیر بادی خاک دارند. به این دلیل خصوصیات خاکی مورد اشاره (ساختمان خاک، درصد رس و ماده آلی) باعث پایداری خاک در برابر فرسایش پذیری

¹ Webb

² Strong

³ Han

⁴ Sirjani

⁵ Bouajila

⁶ Pásztor

⁷ Skidmore

⁸ López

⁹ Fryrear

¹⁰ Usman

¹¹ Rakkar

¹² Dufková

¹³ Motameni

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

بادی آن است. نوری و همکاران (۱۴۰۱) شاخص بخش فرسایش پذیری بادی خاک^۱ (WEF) در برابر باد را با روش های ماشین بردار پشتیبان^۲ و GA-ANN در دشت الله آباد قزوین تخمین زدند. یافته ها نشان داد که WEF همبستگی معنی داری در سطح یک درصد با pH، EC، SAR، ماده آلی و رس داشت. کاراقلو^۳ و اردل^۴ (۲۰۲۳) به عدم ارتباط مناسب بین WEF اندازه گیری شده در آزمایشگاه و برآورد شده با فرمول اشاره نمودند و آن را مربوط به شرایط منطقه مورد مطالعه (در کشور ترکیه) دانستند. ایشان فاکتور فرسایش پذیر بادی اندازه گیری شده در آزمایشگاه را مناسب تر دانستند. هان و همکاران (۲۰۲۳) به بررسی سه معادله ارائه شده برای برآورد فاکتور فرسایش پذیر بادی پرداختند (فرایریر و همکاران، ۱۹۹۸؛ لوپز و همکاران، ۲۰۰۷؛ بواجیلا و همکاران، ۲۰۲۲) و اظهار داشتند در اراضی خشک کشور چین، معادله مربوط به فرایریر و همکاران (۱۹۹۸) بهتر عمل کرده است. همچنین فاکتور فرسایش پذیر بادی با خشکی، میزان شن و جرم مخصوص ظاهری خاک رابطه ای مثبت و معنی دار نشان داد و با بیومس زیرزمینی (وزن ریشه های خشک)، میزان رس، سیلت، کربنات کلسیم، کربن آلی، نیتروژن و فسفر کل خاک، رابطه ای منفی و معنی دار نشان داد.

یکی از شاخه های علم آمار، زمین آمار است که ابزاری قدرتمند برای بررسی تغییر پذیری و کمی کردن غیر یکنواختی فراهم می کند (سلمی^۵ و همکاران، ۲۰۲۲) و شامل روش های مختلفی برای تخمین پذیری مکانی یک متغیر است (لی^۶ و هیپ^۷، ۲۰۱۱). از این رو، یکی از روش های متداول در نقشه برداری رقومی خاک می باشد. همچنین، روش های زمین آماری بعنوان ابزارهای مناسب و قوی برای برآورد متغیرهای منطقه ای و ارزیابی متغیرهای مکانی در مطالعات خاکی استفاده می شوند (دلبری^۸ و همکاران، ۲۰۱۰؛ سلمی و همکاران، ۲۰۲۲). تخمین زمین آماری شامل دو مرحله است که مرحله اول شامل شناخت و مدل سازی ساختار فضایی متغیر است که توسط آنالیز واریوگرام مورد بررسی قرار می گیرد و مرحله دوم تخمین متغیر مورد نظر با استفاده از توابع زمین آماری از جمله کریجینگ، کوکریجینگ و روش وزن دهی معکوس فاصله (IDW^۹) است (عبدالرحمان^{۱۰} و همکاران، ۲۰۲۱). امروزه با پیشرفت علوم و استفاده از فناوری های جدید مانند دریافت و پردازش داده ها از طریق ماهواره ها و سیستم های پردازش اطلاعات مانند زمین آمار، نقش مهمی در مدیریت منابع خاک و آب دارد و این فناوری علاوه بر اینکه موجب کاهش هزینه ها می شود، باعث افزایش سرعت و دقت در انجام پروژه ها نیز می شود (فن^{۱۱} و همکاران، ۲۰۱۶؛ نینرولا^{۱۲} و همکاران، ۲۰۱۷). رضایی^{۱۳} و همکاران (۲۰۲۳) به مدل سازی بخش فرسایش پذیری بادی با استفاده از روش های آموزش عمیق در استان فارس پرداختند. آنها اظهار داشتند که میانگین قطر خاکدانه ها (MWD) مؤثرترین فاکتور در مدل سازی فرسایش پذیری بادی در منطقه مورد مطالعه بود. آنها برای تهیه نقشه های مربوطه از روش IDW بهره بردند. همچنین در خصوص استفاده از روش های زمین آماری برای مدل سازی مکانی بخش فرسایش پذیری بادی خاک اخیراً

¹ Wind-Erodible Fraction (WEF)

² Support Vector Machine (SVM)

³ Karaoglu

⁴ Erdel

⁵ Selmy

⁶ Li

⁷ Heap

⁸ Delbari

⁹ Inverse Distance Weighting

¹⁰ Abdel-Rahman

¹¹ Fan

¹² Ninerola

¹³ Rezaie

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفا برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

شهریاری و همکاران (۱۴۰۴) اقدام به مدلسازی مکانی شاخص های فرسایش پذیری بادی خاک (از جمله بخش فرسایش پذیر بادی خاک) در دشت سیستان نمودند و دریافتند که روش کوکریجینگ از سایر روش ها بهتر عمل می نماید. با توجه به شرایط تشکیل و تکامل خاک بخصوص از منظر ژئومورفولوژیکی و کاربری اراضی که بین دشت سیستان و بستر خشک تالاب هامون وجود دارد و همچنین جهت وزش باد غالب منطقه، به نظر می رسد انجام پژوهشی مجزا در این پهنه ضروری است.

تالاب ها یکی از با ارزش ترین اکوسیستم در دنیا محسوب می شوند که در اثر پدیده تغییر اقلیم خشکسالی و دخالت انسان صدمه های زیادی به منابع اکولوژیکی با ارزش آنها وارد شده است (ملکی و همکاران، ۱۳۹۸). برخی از فواید تالاب ها امکان استفاده از خدمات آبرزی پروری، حفظ گونه های مختلف گیاهی و جانوری، کنترل کیفیت آب و هوا، کنترل فرسایش خاک و ... می باشد (کریستی^۱ و بوستویک^۲، ۲۰۱۲). بررسی وضعیت تالاب ها و مدلسازی منابع اکولوژیکی آنها می تواند توسط مدیران برای درک روند تغییرات پوشش اراضی آنها تصمیمات موثری باشد (اسدزاده و همکاران، ۱۳۹۷؛ اسکندری دامنه و همکاران، ۱۳۹۹). تالاب هامون واقع در منطقه سیستان دارای منابع غنی و ارزشمندی هست که در زمان پرآبی امرار معاش مردم منطقه به آن وابسته بوده است و باعث پویایی و خود کفایی اقتصادی مردم این منطقه بود (ابراهیمی خسفی، ۱۴۰۱). متأسفانه در حال حاضر به دلیل خشکسالی های پی در پی نقش و کارکرد خود را از دست داده است مثلاً نیاز و مراتع و حتی آب این دریاچه از بین رفته است (دهمرد و همکاران، ۱۴۰۱). با توجه به خشکسالی ها و عدم آبیگری، این تالاب به کانون اصلی گرد و غبار در منطقه سیستان تبدیل شده است، از این رو فرسایش بادی و مصائب مرتبط با آن در این منطقه بسیار فعال و تاثیرگذار است. لذا این پژوهش با هدف بررسی و مقایسه روش های متداول اندازه گیری بخش فرسایش پذیر بادی خاک (تخمینی و آزمایشگاهی) و همچنین مدلسازی مکانی آن با استفاده از روش های معمول زمین آمار در تالاب هامون انجام شد.

داده ها و روش ها

منطقه مورد مطالعه و اسنخراج داده ها

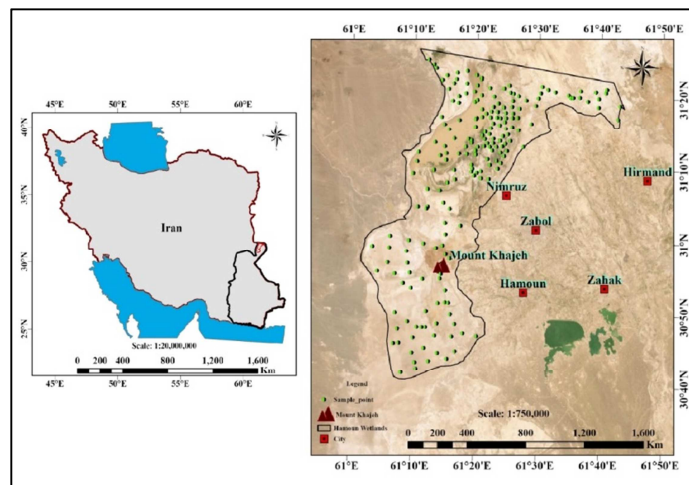
تالاب هامون در دشت سیستان در جنوب شرق ایران واقع شده است، این تالاب در بین مرز ایران افغانستان قرار دارد. تالاب هامون از سه بخش هامون سابوری، پوزک و هیرمند تشکیل شده است، مساحت تالاب هامون حدود ۳۰۰۰۰۰ هکتار در ۳۰ درجه و ۴۵ دقیقه تا ۳۱ درجه و ۳۷ دقیقه عرض جغرافیای، ۶۰ درجه و ۵۶ دقیقه تا ۶۱ درجه و ۴۳ دقیقه طول جغرافیای در غرب شهر زابل در شمال سیستان بلوچستان قرار دارد (ملکی و همکاران، ۱۳۹۸). متوسط بارندگی منطقه کمتر از ۵۰ میلی متر می باشد و اقلیم این منطقه بر اساس طبقه بندی دوما رتن فوق خشک می باشد (میرکزهی^۳ و همکاران، ۲۰۱۸). ۱۹۹ نقطه از بستر تالاب هامون به روش تصادفی طبقه بندی شده انتخاب و از خاک سطحی آنها (۱۰-۰ سانتیمتر) نمونه برداری شد (شکل ۱).

¹ Christie

² Bostwick

³ Mirakzehi

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.



شکل ۱: موقعیت منطقه مورد مطالعه و نقاط نمونه برداری (نویسنده گان)

سپس خصوصیات خاکی مورد نیاز برای برآورد روش های محاسباتی بخش فرسایش پذیر بادی شامل ماده آلی (OM)، رس (Clay)، سیلت (Silt)، شن (Sand)، نسبت شن به رس (Sand/Clay) و کربنات کلسیم معادل (CCE) و خصوصیات مهم پایه خاک شامل جرم مخصوص ظاهری (BD)، واکنش خاک (pH)، هدایت الکتریکی (EC)، نسبت جذب سدیم (SAR)، درصد رطوبت اشباع (SP) و ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) با استفاده از روش های استاندارد اندازه گیری شدند.

سپس در این نقاط بخش فرسایش پذیر بادی آزمایشگاهی (WEF)، بخش فرسایش پذیر بادی بر اساس فرمول فرایر (WEFF)، عثمان (WEFU)، لوپز (WEFL)، راکار (WEFR)، دوفکوا (WEFD)، بواجیل (WEFB) و متمنی (WEFM) برآورد و محاسبه گردید (معادلات ۱ تا ۸).

$$WEF = (W < 0.84 / TW) \times 100 \quad (1)$$

که در آن WEF بخش فرسایش پذیری بادی آزمایشگاهی خاک، $W < 0.84$ وزن خاکدانه های کوچکتر از ۰/۸۴ میلیمتر پس از ۵ دقیقه شیک کردن با سرعت متوسط بر روی الک صاف با تخلخل مناسب (قطر ۰/۸۴ میلیمتر) و TW وزن کل نمونه خاک (۲۰۰ گرم) است (اسکیدمور و همکاران، ۱۹۹۴؛ لوپز و همکاران، ۲۰۰۷) و سه تکرار در نظر گرفته شد و سپس میانگین سه تکرار در محاسبات استفاده شد.

$$WEFF = 29.09 + 0.31 Sa + 0.17 Si + [0.33 \times (Sa/Cl)] - 2.59 OM - 0.95 Ca \quad (2)$$

$$WEFU = 80.13 + 0.133 Sa + 0.532 Si + [0.356 \times (Sa/Cl)] - 6.330 OM - 2.432 Ca \quad (3)$$

$$WEFL = 4.77 + (7.43 (Sa/Cl)) + 27.6/OM \quad (4)$$

$$WEFR = 84.3 + 2.64 Si - 0.30 Cl - 7.43 OM - 0.15 RC \quad (5)$$

$$WEFD = -40.20 + 1.44 Sa + 1.08 Si - [5.40 \times (Sa/Cl)] + 6.13 OC + 84.17 Ca \quad (6)$$

$$WEFB = 125.83 - 0.59 Cl - 0.22 Si - 0.25 Sa + 0.29 OM - 0.69 Ca \quad (7)$$

$$WEFM = 30.051 - [0.52 Sa - 0.23 Cl - 1.14 OM] \quad (8)$$

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

که در معادلات بالا WEFF بخش فرسایش پذیری بادی بر اساس فرمول فرایریر (فرایریر و همکاران، ۱۹۹۴)، WEFU بخش فرسایش پذیری بادی بر اساس فرمول عثمان (عثمان، ۱۹۹۵)، WEFL بخش فرسایش پذیری بادی بر اساس فرمول لویز (لویز و همکاران، ۲۰۰۷)، WEFR بخش فرسایش پذیری بادی بر اساس فرمول راکار (راکار و همکاران، ۲۰۱۹)، WEFD بخش فرسایش پذیری بادی بر اساس فرمول دوفکوا (دوفکوا و همکاران، ۲۰۲۱)، WEFB بخش فرسایش پذیری بادی بر اساس فرمول بواجیلا (بواجیلا و همکاران، ۲۰۲۲) و WEFM بخش فرسایش پذیری بادی بر اساس فرمول متمنی (متمنی و همکاران، ۲۰۲۴) برآورد و محاسبه می شود. همچنین در این معادلات Sa شن، Si سیلت، Cl رس، OM ماده آلی، OC کربن آلی، Ca کربنات کلسیم معادل و RC پوشش بقایای گیاهی است (برای تمامی نقاط صفر در نظر گرفته شد)، و تمامی پارامترها به درصد می باشند.

تجزیه و تحلیل های آماری و مدلسازی مکانی

تجزیه و تحلیل آماری پارامترهای شیمیایی و فیزیکی خاک و بخش های فرسایش پذیری بادی با استفاده از نرم افزار SPSS نسخه ۲۶ انجام شد. آنالیزهای زمین آمار با استفاده از نرم افزارهای GS⁺ و ArcGIS نسخه ۱۰/۳ و سه روش مرسوم در مطالعات خاک کریجینگ، کوکریجینگ و روش وزن دهی معکوس فاصله انجام شد. شایان ذکر است که بر اساس سابقه تحقیق در این خصوص، برای روش های کریجینگ و کوکریجینگ دو حالت معمولی (ordinary) و ساده (simple) و روش وزن دهی معکوس فاصله تا توان سه در نظر گرفته شد. همچنین خصوصیات خاکی اندازه گیری شده که با بخش فرسایش پذیر بادی همبستگی (همبستگی پیرسون در سطح ۹۵ و ۹۹ درصد) معناداری (مثبت یا منفی) داشتند، در گام نخست به عنوان متغیر کمکی در روش کوکریجینگ بکار گرفته شدند و در گام دوم بر اساس خصوصیات زمین آماری و ارزیابی مدل ها، بهترین متغیر انتخاب شد. پیش از استفاده از روش های کریجینگ و کوکریجینگ، فرض ایستایی ذاتی با رسم تغییرنمای تجربی و بررسی رفتار آن در فواصل کوتاه تأیید شد. همچنین عدم وجود روند فضایی معنادار با آزمون روند مرتبه اول و دوم بررسی گردید. علاوه بر این، در روش کوکریجینگ برازش تغییرنمای متقابل (cross-variogram) بین دو متغیر اصلی و کمکی انجام شد. شایان ذکر است اعتبارسنجی مدل های زمین آماری به روش اعتبارسنجی متقابل (cross-validation) انجام شد، بدین صورت که داده ها به طور تصادفی به دو بخش آموزش (برآورد پارامترها) و آزمون (محاسبه خطای پیش بینی) تقسیم گردیدند. به منظور ارزیابی دقت مدل ها از منظر خصوصیات مکانی (همبستگی مکانی) از ضریب تبیین (R^2) و مجموع مربعات باقیمانده (RSS) استفاده شد و جهت انتخاب بهترین مدل زمین آماری برای تهیه نقشه فرسایش پذیری بادی خاک از میانگین خطا (ME) و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) (بیان گر دقت میانگین پیش بینی می باشد و شدت خطای مورد انتظار را نشان می دهد) محاسبه گردید (جمال رئی ثمره و همکاران، ۱۴۰۳؛ شهریاری و همکاران، ۱۴۰۴). با مقایسه این آماره ها مدل سازی ها با یکدیگر مقایسه و بهترین مدل برای هر شاخص انتخاب شد.

نتایج و بحث

خصوصیات آماری و همبستگی پارامترها

در جدول ۱ برخی خصوصیات آماری پارامترهای فرسایش پذیری بادی خاک مورد مطالعه ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می گردد عمده پارامترهای مورد مطالعه بر اساس آماره های کشیدگی و چولگی در شرایط نرمال قرار

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

دارند، بجز بخش فرسایش‌پذیر خاک بر اساس فرمول لوپز (WEFL). همچنین بر اساس آماره ضریب تغییرات معیار تغییرپذیری نسبی است و اگر داده‌ها نسبت ۰/۲۵ باشند نشان دهنده ضریب تغییرات اندک است و اگر بین ۰/۲۵ تا ۰/۵۰ باشد ضریب تغییرات متوسط است و اگر بیشتر از ۰/۵۰ باشد ضریب تغییرات تغییرپذیری بالا را نشان می‌دهد (کریمی نژاد و همکاران ۲۰۱۵) که بر این اساس پارامترهای WEFR و WEFL تغییرپذیری کم، WEF و WEFD و WEFM تغییرپذیری متوسط و WEFU، WEFF و WEFL تغییرپذیری زیاد را در منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهند.

شیاتی^۱ و همکاران (۱۹۶۵) اظهار داشتند بخش فرسایش‌پذیر بادی خاک کمتر از ۴۰ درصد نشان از فرسایش‌پذیری کم، بین ۴۰ تا ۵۰ درصد کلاس فرسایش‌پذیری متوسط و بیش از ۵۰ درصد فرسایش‌پذیری بالا را نشان می‌دهد و بر این اساس میانگین منطقه در کلاس فرسایش‌پذیری کم قرار می‌گیرند. بر این اساس با توجه به اینکه مقدار میانگین WEF تالاب هامون ۳۶/۵۷ درصد است که مقدار فرسایش‌پذیری کم را نشان می‌دهد که نزدیک به مقدار فرسایش‌پذیری متوسط است (جدول ۱). این مقدار از WEF بدست آمده در دشت سیستان (۵۴/۹۷ درصد) کمتر بود (شهریاری و همکاران، ۱۴۰۴). همچنین این مقدار میانگین از مقادیر WEF در اراضی پست پلایای دریاچه ارومیه (۵۲/۱ درصد) (علیزاده متقی^۲ و همکاران، ۲۰۲۰) و از مقدار میانگین آن در استان فارس (۶۶/۸۷ درصد) (رضایی و همکاران، ۲۰۲۳) و استان قزوین (۶۹/۹۲ درصد) نیز کمتر بود (نوری و همکاران، ۱۴۰۱).

جدول ۱: برخی خصوصیات آماری پارامترهای فرسایش‌پذیری بادی خاک مورد مطالعه

ضریب تغییرات	انحراف معیار	کشیدگی	چولگی	واریانس	حد اکثر	حداقل	میان	میانگین	پارامتر
۰/۴۵۴	۱۶/۵۹	۱/۳۸۲	۱/۳۵۰	۲۵۷/۲۲	۸۹/۰۵	۱۰/۲۶	۳۱/۴۸	۳۶/۵۷	WEF
۱/۰۱۰	۱۰/۲۷	۰/۲۸۱	۰/۱۲۲	۱۰۵/۴۶	۴۲/۳۷	۱۷/۹۷	۱۰/۵۱	۱۰/۱۷	WEFF
۱/۰۴۲	۲۶/۱۱	-۰/۲۵۲	-۰/۰۳۱	۶۸۱/۸۸	۹۹/۰۲	۳۲/۲۷	۲۷/۱۵	۲۵/۰۶	WEFU
۰/۹۳۱	۴۵/۱۵	۵۹/۳۴۹	۶/۳۵۴	۲۰۳۸/۳۰	۵۱۷/۰۶	۱۵/۱۳	۳۷/۰۴	۴۸/۴۹	WEFL
۰/۱۸۹	۳۷/۴۳	۰/۲۵۰	-۰/۰۰۴	۱۴۰۰/۷۵	۲۹۳/۶۹	۹۳/۴۹	۱۹۵/۷۱	۱۹۷/۸۱	WEFR
۰/۲۹۳	۸۲۵/۲۷	۰/۰۶۱	۰/۰۶۹	۶۸۱۰۷۱/۴۷	۴۷۵۴/۵۸	۵۱۰/۸۰	۲۷۴۵/۹۳	۲۸۱۶/۵۸	WEFD
۰/۱۲۱	۸/۵۳	-۰/۳۸۹	-۰/۰۱۸	۷۲/۷۰	۹۱/۴۵	۵۰/۹۰	۷۰/۷۱	۷۰/۶۰	WEFB
۰/۳۵۹	۹/۴۸	۲/۸۹۲	-۱/۳۲۰	۸۹/۹۳	۴۳/۸۷	۱۵/۳۶	۲۸/۳۸	۲۶/۳۶	WEFM

همه پارامترها بجز WEFB به علت اینکه مقادیر بخش فرسایش‌پذیر بادی را بالای ۱۰۰ درصد و یا زیر صفر تخمین زدند، برآورد قابل قبولی در منطقه مورد مطالعه نداشتند (جدول ۱). با اینکه میانگین برخی پارامترها در محدوده قابل قبول (۱۰۰-۰ درصد) قرار داشت ولی به علت خصوصیات خاک منطقه (ماده آلی بسیار کم و نسبت بالای شن به رس) تخمینهای بالای ۱۰۰ درصد داشت. در مطالعات دیگر نیز مشابه این نتایج بیش تخمینی داشته است (هان و همکاران، ۲۰۲۳؛ متمنی و همکاران، ۲۰۲۴). WEFR و WEFD همه نمونه‌ها را بیشتر از ۱۰۰ درصد تخمین زد که در خصوص WEFR به دلیل ضریب اعمال شده بر مقادیر سیلت که در دشت سیلابی سیستان، سیلت بخش غالب

¹ Shiyaty

² Alizadeh Motaghi

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

بود، است و در مورد WEFD به نظر می رسد ضریب اعمالی بر کربنات کلسیم معادل بسیار بالا بوده است. در مناطق خشک عمدتاً میزان کربنات کلسیم خاکها بالاست و اعمال ضریب ۸۴/۱۷ موجب بروز اعدادی بسیار بزرگ و غیرقابل قبول می شود. البته باید در نظر گرفت که مدل مذکور بر تعداد محدودی داده و در منطقه ای معین بررسی و ایجاد شده است، لذا عدم تناسب آن با منطقه سیستان دور از انتظار نمی باشد. نتایج مشابه در خصوص WEFR و WEFD گزارش شده است (متمنی و همکاران، ۲۰۲۴). WEFM نیز به علت برآورد منفی بخش فرسایش پذیر بادی خاک که غیرمنطقی است، کارایی در تخمین نداشت. ماده آلی بسیار کم، رس کم و شن بسیار زیاد موجب بروز این اتفاق در منطقه مورد مطالعه بود.

نتایج همبستگی بین پارامترهای فرسایش پذیر بادی خاک مورد مطالعه نشان داد (جدول ۲) بخش فرسایش پذیر آزمایشگاهی (WEF) ارتباط مثبتی با هیچ یک از بخش های فرسایش پذیر محاسباتی (فرمولی) بجز WEFD نشان نداد و رابطه منفی و معنادار در سطح ۹۹ درصد با WEFR و در سطح ۹۵ درصد با WEFU و WEFB نشان داد که به نظر می رسد این موضوع ناکارآمدی پارامترهای محاسباتی بخش های فرسایش پذیر بادی خاک در تالاب هامون را نشان می دهد. کاراوقلو و اردل (۲۰۲۳) به عدم ارتباط مناسب بین بخش فرسایش پذیر آزمایشگاهی و پارامترهای محاسباتی بخش های فرسایش پذیر بادی خاک اشاره نمودند و آن را مربوط به شرایط منطقه مورد مطالعه (در کشور ترکیه) دانستند و WEF را برای تخمین فرسایش پذیری خاک مناسب تر دانستند. باید توجه داشت که محققین مختلفی به عدم تطابق کامل پارامترهای آزمایشگاهی با پارامترهای تخمینی (محاسباتی) اشاره داشته اند (لوپز و همکاران، ۲۰۰۷؛ گئو^۱ و همکاران، ۲۰۱۷؛ راکار و همکاران، ۲۰۱۹؛ هان و همکاران، ۲۰۲۳؛ متمنی و همکاران، ۲۰۲۴) و معتقدند دلیل این اختلاف بسیار تغییرپذیر بودن بخش فرسایش پذیر بادی خاک نسبت به منطقه (خصوصیات محیطی؛ بخصوص خاکی) و مدیریت اراضی است. همچنین این معادلات بر اساس تعداد محدودی از داده ها ارائه شده اند، که ممکن است نماینده طیف گسترده ای از انواع خاکها نباشند (متمنی و همکاران، ۲۰۲۴). از این رو عملکرد پارامترهای تخمینی موجود ممکن است دقت رضایت بخش در پیش بینی پارامترهای آزمایشگاهی در یک منطقه خاص نداشته باشند و نیاز به بررسی و تحلیل عوامل موثر بر شاخصهای آزمایشگاهی در آن منطقه و سپس ارائه یک معادله جدید برای آن منطقه باشد.

بر اساس چولگی و کشیدگی، داده ها عمدتاً نرمال هستند به جز Sand/Clay، Sand و SAR که از شرایط نرمال کمی فاصله دارند (جدول ۳). همچنین بر اساس ضریب تغییرات BD و pH در خاک های بستر تالاب هامون دارای تغییرپذیری نسبی کم، OM، Clay، Silt، CCE، SP و CEC دارای تغییرپذیری متوسط و Sand/Clay، Sand و EC و SAR دارای تغییرپذیری بالا هستند (جدول ۳). به نظر می رسد که پیچیدگی عوامل خاکساز در دشت سیستان در اثر تداخل همزمان فعالیت های آبرفتی و بادرفتی (میرکزه‌ی و همکاران، ۲۰۱۸) دلیل این تغییرات باشد (شهریاری و همکاران، ۱۴۰۴).

¹ Guo

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفا برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

جدول ۲: همبستگی بین پارامترهای فرسایش پذیر بادی خاک مورد مطالعه

	WEF	WEFF	WEFU	WEFL	WEFR	WEFD	WEFB	WEFM
WEF %	۱							
WEFF %	-۰/۱۲۵	۱						
WEFU %	-۰/۱۶۹*	۰/۸۹۳**	۱					
WEFL %	-۰/۰۱۷	۰/۳۴۵**	۰/۱۳۱	۱				
WEFR %	-۰/۱۹۱**	۰/۲۱۷**	۰/۴۷۵**	۰/۰۶۲	۱			
WEFD %	۰/۱۳۴	-۰/۸۷۵**	-۰/۹۶۵**	-۰/۰۳۷	-۰/۲۴۵**	۱		
WEFB %	-۰/۱۶۴*	۰/۹۱۳**	۰/۹۰۹**	۰/۱۲۵	۰/۴۴۴**	-۰/۸۶۳**	۱	
WEFM %	-۰/۰۴۵	-۰/۳۲۱**	۰/۱۱۰	-۰/۳۴۱**	۰/۳۳۶**	-۰/۱۱۴	-۰/۲۲۶**	۱

** معنی داری در سطح ۹۹ درصد و * معنی داری در سطح ۹۵ درصد

مقدار میانگین BD در تالاب هامون ۱/۴۵ گرم بر سانتیمتر مکعب بود (جدول ۳) که مقدار متوسطی است. مطالعات رضازاده شمخال و همکاران (۱۳۹۵) در خاک‌های دشت سیستان نشان می‌دهد که این مقدار برابر ۱/۵۳ گرم بر سانتیمتر مکعب است که تفاوت قابل توجهی در این خصوص مشاهده نمی‌شود. به نظر می‌رسد این اختلاف به دلیل افزایش میزان رس و کاهش شن در تالاب نسبت به دشت به وجود آمده است. میانگین درصد رس در منطقه نسبتاً متوسط (۲۷/۶۳ درصد) بود که این مقدار نسبت میانگین رس (حدود ۱۲-۱۶ درصد) در دشت سیستان (هاشمی و همکاران، ۱۳۹۵؛ حسین‌پُر و همکاران، ۱۴۰۱؛ شهریاری و همکاران، ۱۴۰۴؛ پهلوان‌راد^۱ و اکبری‌مقدم، ۲۰۱۸) به صورت قابل توجهی بیشتر بود که این موضوع به ماهیت ژئومورفیک تالاب هامون مربوط می‌گردد. میانگین سیلت نیز برابر ۵۰/۰۲ درصد بود که با دلیلی که ذکر شد این مقدار نسبت به دشت سیستان (حدود ۴۲-۴۰ درصد) (هاشمی و همکاران، ۱۳۹۵؛ حسین‌پُر و همکاران، ۱۴۰۱؛ شهریاری و همکاران، ۱۴۰۴؛ پهلوان‌راد^۱ و اکبری‌مقدم، ۲۰۱۸؛ شهریاری^۳ و همکاران، ۲۰۱۹) بیشتر بود. در نقطه مقابل میانگین شن در تالاب هامون برابر ۲۲/۳۵ درصد بود که نسبت به دشت سیستان (حدود ۴۶-۴۱ درصد) (هاشمی و همکاران، ۱۳۹۵؛ حسین‌پُر و همکاران، ۱۴۰۱؛ شهریاری و همکاران، ۱۴۰۴؛ پهلوان‌راد و اکبری‌مقدم، ۲۰۱۸؛ شهریاری و همکاران، ۲۰۱۹) بسیار کمتر است. به نظر می‌رسد فعال بودن فعالیت‌های آبرفتی و بادرفتی در منطقه و شرایط ژئومورفیک تالاب هامون در انتهای حوزه آبریز هیرمند دلیل این تغییرات می‌باشد (حسین‌پُر و همکاران، ۱۴۰۱؛ شهریاری و همکاران، ۱۴۰۴؛ میرک‌زهی و همکاران، ۲۰۱۸؛ پهلوان‌راد و اکبری‌مقدم، ۲۰۱۸؛ شهریاری و همکاران، ۲۰۱۹؛ جمال‌زئی ثمره^۴ و همکاران، ۲۰۲۵). مقدار میانگین SP در تالاب هامون ۵۳/۹۸ درصد بود که با توجه به افزایش ذرات رس و سیلت در این خاک‌ها نسبت به خاک‌های دشت سیستان، در نتیجه مقدار میانگین SP هم نسبت به خاک‌های دشت (هاشمی و همکاران، ۱۳۹۵؛ جمال‌زئی ثمره و همکاران، ۱۴۰۳؛ شهریاری و همکاران، ۱۴۰۴) بیشتر است.

¹ Pahlavan-Rad

² Akbarimoghaddam

³ Shahriari

⁴ Jamalzehi Samareh

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

جدول ۳: برخی ویژگی های آماری خصوصیات خاک تالاب هامون

خصوصیت	میانگین	کمینه	بیشینه	واریانس	چولگی	کشدگی	انحراف معیار	ضریب تغییرات
OM(%)	۱/۳۸	۰/۱۷	۵/۰۷	۰/۲۶۸	۱/۲۵۸	۱/۹۳۴	۰/۵۱۸	۰/۳۸
BD (g/cm ³)	۱/۴۵	۰/۹۹	۱/۹۰	۰/۰۲۰	۰/۲۸۵	۰/۵۸۷	۰/۱۴۲	۰/۱۰
Clay(%)	۲۷/۶۳	۱	۶۴/۸۰	۱۴۶/۶۰۲	۰/۲۰۷	-۰/۱۷۹	۱۲/۱۰۸	۰/۴۴
Silt(%)	۵۰/۰۲	۵/۶۰	۸۴/۴۰	۱۸۶/۰۳۸	-۰/۲۹۴	۰/۴۹۵	۱۳/۶۴۰	۰/۲۷
Sand(%)	۲۲/۳۵	۰/۴۰	۹۰/۴۰	۲۲۱/۳۱۷	۱/۵۵۲	۳/۷۱۹	۱۴/۸۷۷	۰/۶۷
Sand/Clay	۱/۴۷	۰/۱۰	۲۲/۶۰	۷/۹۹۰	۵/۳۵۸	۳۲/۷۲۴	۲/۸۲۷	۱/۹۲
CCE %	۳۲/۹۶	۵/۵۰	۵۶	۹۶/۲۳۱	۰/۰۶۲	۰/۰۶۷	۹/۸۱۰	۰/۳۰
pH	۸/۲۱	۶/۴۰	۹/۰۵	۰/۱۶۷	-۰/۵۳۷	۱/۶۰۴	۰/۴۰۸	۰/۰۵
EC (dS/m)	۱۸/۹۴	۰/۷۶۳	۶۴/۳۰	۲۰۸/۴۰۸	۰/۹۲۹	-۰/۱۵۵	۱۴/۴۳۶	۰/۷۶
SAR (mmol.l)	۱۸/۴۲	۰/۱۵۳	۱۴۶/۷۸	۳۴۳/۱۲۶	۴/۴۸۰	۲۷/۱۶۲	۱۸/۵۲۴	۱/۰۱
SP %	۵۳/۹۸	۲۲/۱۴	۸۹/۹۰	۲۳۰/۴۱۴	۰/۲۸۰	-۰/۵۳۲	۱۵/۱۷۹	۰/۲۸
CEC (meq/100g)	۱۳/۳۸	۳/۶۰	۲۶/۸۰	۱۳/۹۲۷	۰/۳۴۷	۰/۶۷۱	۳/۷۳۲	۰/۲۸

میانگین ماده آلی خاک تالاب هامون برابر ۱/۳۸ درصد است (جدول ۳) که نسبت میانگین این خصوصیت در دشت سیستان (حدود ۱ درصد) (حسین‌نر و همکاران، ۱۴۰۱؛ شهریاری و همکاران، ۱۴۰۴؛ پهلوان‌راد^۱ و همکاران، ۲۰۱۸) کمی بیشتر بوده که این موضوع به احتمال زیاد مربوط به اثر کاربری و پوشش گیاهی در دو منطقه است. در مناطق خشک به اعتقاد محققین ذخایر مواد آلی در خاک ها بسیار کم است و این به دلیل اقلیم خشک منطقه، پوشش گیاهی فقیر و شدت فعالیت عوامل فرسایشی می باشد (غلامعلی زاده آهنگر و همکاران، ۱۳۹۳؛ علی صوفی و شهریاری، ۱۳۹۹؛ شهریاری و همکاران، ۱۴۰۴). میزان میانگین کربنات کلسیم معادل ۳۲/۹۶ درصد بود که بیشتر از مقادیر خاک های دشت سیستان (حدود ۲۰ درصد) (میر و همکاران، ۱۳۹۴؛ رضازاده شمخال و همکاران، ۱۳۹۵؛ شهریاری و همکاران، ۱۴۰۴) بود که به اعتقاد برخی محققین در دشت های سیلابی و اراضی پست به دلیل نزدیک بودن آب زیرزمینی غنی از کربنات ها به سطح خاک، تجمع و فراهمی آنها در خاک طبیعی است (شاتزل^۲ و اندرسون^۳، ۲۰۰۵) که یکی از رایج ترین آن کربنات کلسیم می باشد (علی صوفی و شهریاری، ۱۳۹۹). در خصوص ظرفیت تبادل کاتیونی که میانگین آن ۱۳/۳۸ (میلی اکیوالان بر ۱۰۰ گرم خاک) بود و این میزان از مقادیر این خصوصیت در دشت کمی بیشتر بود که بالاتر بودن عوامل موثر بر آن نظیر مقدار ماده آلی و رس در تالاب هامون نسبت به دشت سیستان (حدود ۱۱ میلی اکیوالان بر ۱۰۰ گرم خاک) (شهریاری و همکاران، ۱۴۰۴) دلیل این امر می باشد. میانگین هدایت الکتریکی خاک های تالاب هامون ۱۸/۹۴ دسی‌زیمنس بر متر بود (جدول ۳) که میزان بالایی است و میانگین واکنش خاک نیز برابر ۸/۲۱ بود که مقادیر این دو خصوصیت بسیار مشابه مقادیر آنها در دشت سیستان (دلارامی و همکاران، ۱۳۹۹؛ شهریاری و همکاران، ۱۴۰۴؛ پهلوان‌راد و اکبری مقدم، ۲۰۱۸) است. نسبت جذب سدیم خاک در تالاب هامون میانگینی برابر ۱۸/۴۲ میلی مول بر لیتر داشت که نشان از سدیمی بودن خاک های مورد مطالعه دارد و این مقدار نسبت جذب سدیم خاک از نتایج بدست آمده توسط پژوهشگران در منطقه میانکنگی (حدود ۷ میلی مول بر لیتر) (سارانی و همکاران، ۲۰۱۶) بیشتر و در کل دشت سیستان (حدود ۳۷ میلی-مول بر لیتر) (شهریاری و همکاران، ۱۴۰۴) بسیار کمتر بود. بالا رفتن مقدار سدیم باعث پراکنش رس ها و تخریب ساختمان خاک شده (شاتزل و اندرسون، ۲۰۰۵) و در نتیجه میزان فرسایش پذیری بادی افزایش می یابد (تاجیک و

¹ Pahlavan-Rad

² Schaetzel

³ Anderson

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفا برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

همکاران، (۱۳۸۱). شوری خاک یک معضل زیست محیطی جدی است که می تواند توانایی استقرار گیاهان را تحت تاثیر قرار دهد و شور و سدیمی شدن خاک رشد گیاهان را کاهش و یا سبب از بین رفتن آن ها می شود (علی صوفی و شهریار، ۱۳۹۹؛ اختری^۱ و همکاران، ۲۰۱۵) و در نتیجه فرسایش خاک را تشدید کند (شهریار و همکاران، ۱۴۰۴).

در مجموع می توان بیان نمود که خاک های بستر تالاب هامون از منظر خصوصیات فیزیکی دارای بافتی متوسط با غالبیت ذرات سیلت و در نتیجه جرم مخصوص ظاهری و درصد رطوبت اشباع متوسط هستند. خصوصیات حاصلخیزی این خاک ها عمدتاً مقادیر متوسط تا کمی را شامل می شدند (بجز کربنات کلسیم معادل). خصوصیات منعکس کننده شوری و سدیمی بودن خاک ها نشان دادند که منطقه مورد مطالعه دارای خاک های شور و سدیمی است، اما نسبت به دشت سیستان مقادیر میانگین سدیم کمتری را نشان داد.

همبستگی بین خصوصیات خاک و WEF در جدول ۴ ارائه شده است. BD، Silt و CEC رابطه ای منفی و معنی دار و EC و SAR رابطه ای مثبت و معنی دار را با WEF نشان دادند. شایان ذکر است از این خصوصیات به عنوان متغیر کمکی در آنالیز زمین آمار (کوکرینینگ) استفاده شد.

پژوهشگران دریافته اند که با کاهش BD فرسایش بادی نیز کاهش می یابد که این موضوع به دلیل افزایش تخلخل و همچنین افزایش ماده آلی خاک بوده است (نان^۲ و همکاران، ۲۰۱۸؛ فلاح زاده^۳ و همکاران، ۲۰۲۰). این نکته حائز اهمیت است که در منابع مختلف حساسیت به فرسایش ذرات سیلت ذکر شده است. باید توجه داشت این موضوع در خصوص فرسایش آبی تقریباً حتمی است ولی مطالعات اخیر در حوزه فرسایش بادی نتایج متفاوتی را نشان می دهد. ذرات سیلت (بخصوص ذرات سیلت ریز؛ ۰/۰۲ - ۰/۰۰۲ میلی متر) تمایل به ایجاد خاکدانه های پایدارتر دارند و از این رو خاک هایی با مقدار سیلت بالاتر در برابر فرسایش بادی مقاوم تر می شوند (شهریار و همکاران، ۱۴۰۴؛ کولازو^۴ و بوشیازو^۵، ۲۰۱۰؛ بواجیلا و همکاران، ۲۰۲۲؛ متمنی و همکاران، ۲۰۲۴).

جدول ۴: همبستگی بین خصوصیات خاک و بخش فرسایش پذیر بادی

	WEF	OM	BD	Clay	Silt	Sand	Sand/Clay	CCE	pH	EC	SAR	SP	CEC
WEF %	۱												
OM %	۰/۰۰۶	۱											
BD (g/cm ³)	-۰/۲۶۴**	-۰/۱۲۹	۱										
Clay %	۰/۰۹۹	-۰/۰۹۴	-۰/۰۳۹	۱									
Silt %	-۰/۱۸۷**	-۰/۰۷۹	-۰/۰۲۴	-۰/۳۳۷**	۱								
Sand %	۰/۰۹۱	۰/۰۰۴	۰/۰۵۳	-۰/۵۰۵**	-۰/۶۴۳**	۱							
Sand/Clay	۰/۰۲۵	۰/۰۸۳	۰/۰۹۳	-۰/۵۳۹**	۰/۲۵۰**	۰/۶۶۸**	۱						
CCE %	۰/۱۳۵	۰/۱۱۶	-۰/۰۴۴	۰/۱۱۴	-۰/۳۷۷**	۰/۱۶۱*	۰/۰۳۱	۱					
pH	۰/۰۵۸	-۰/۰۴۹	-۰/۲۴۵**	۰/۰۷۴	۰/۰۳۵	-۰/۰۹۲	-۰/۱۰۹	-۰/۰۶۴	۱				
EC (dS/m)	۰/۲۶۲**	-۰/۰۵۴	-۰/۰۵۵	۰/۱۴۶*	-۰/۰۵۹	-۰/۰۶۵	-۰/۰۳۶	-۰/۰۲۵	۰/۰۶۲	۱			
SAR (mmol/l)	۰/۱۸۴**	-۰/۰۴۸	-۰/۲۲۴**	۰/۲۰۵**	-۰/۰۴۹	-۰/۱۲۲	-۰/۰۷۰	۰/۰۶۸	۰/۱۱۱	۰/۳۹۸**	۱		
SP %	۰/۰۰۶	-۰/۰۲۷	-۰/۰۰۸	۰/۵۲۲**	-۰/۲۰۵**	-۰/۲۳۷**	-۰/۲۶۵**	۰/۱۳۹*	۰/۱۰۴	۰/۳۶۲**	۰/۳۰۳**	۱	
CEC	-۰/۲۱۶**	۰/۲۰۸**	-۰/۰۱۹	-۰/۰۲۲	-۰/۰۰۱	۰/۰۱۸	-۰/۰۴۴	-۰/۰۸۰	۰/۰۲۰	-۰/۰۵۳	-۰/۱۵۴*	-۰/۰۱۸	۱

¹ Akhzari

² Ling

³ Fallahzade

⁴ Colazo

⁵ Buschiazzo

² Cambardella

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

درصد رطوبت اشباع خاک سطحی منطقه بهترین عملکرد را دارند. همچنین رضازاده شمخال و همکاران (۱۳۹۵) نیز اظهار داشتند برای مدل‌سازی مکانی هدایت الکتریکی و کربنات کلسیم معادل خاک روش کوکریجینگ معمولی در خاک‌های دشت سیستان بهتر عمل نمودند. ارباب و همکاران (۱۳۹۷) در مطالعه‌ای اقدام به برآورد سرعت آستانه فرسایش بادی در منطقه جزینک دشت سیستان نمودند و اظهار داشتند که از بین روش‌های زمین‌آمار، مدل کوکریجینگ با متغیر کمکی سیلت در مقایسه با مدل کریجینگ در برآورد سرعت آستانه فرسایش بادی، دقت بیشتری دارد. حسین‌پور و همکاران (۱۴۰۱) در مدل‌سازی مکانی شاخص فرسایش پذیری آبی در دشت سیستان دریافتند که روش کوکریجینگ معمولی با متغیرهای توپوگرافیک بهتر عمل می‌کند. شهریار و همکاران (۱۴۰۴) در مدل‌سازی مکانی WEF در دشت سیستان دریافتند روش کوکریجینگ ساده با متغیر کمکی نسبت شن به رس بهترین روش تهیه نقشه است. مطالعات متعددی در سال‌های اخیر نشان دادند که روش کوکریجینگ جهت برآورد و تخمین مکانی خصوصیات خاک از سایر روش‌های زمین‌آماري بهتر عمل می‌کنند (اسدزاده و همکاران، ۱۳۹۷؛ بهنام و همکاران، ۱۳۹۸؛ جمال‌زنی ثمره و همکاران، ۱۴۰۳؛ اولیایی و همکاران، ۱۴۰۳).

به نظر می‌رسد در تالاب هامون به دلیل میانگین کمتر میزان شن نسبت به دشت سیستان و همچنین ضریب تغییرات بالای نسبت شن به رس و عدم توزیع نرمال (جدول ۳)، این متغیر نقش زیادی در مدل‌سازی مکانی WEF در تالاب هامون (برخلاف دشت سیستان) نداشته است و نسبت جذب سدیم خاک در مدل‌سازی مکانی WEF به عنوان متغیر کمکی مؤثر حضور دارد. برخی پژوهش‌ها به ارتباط شوری و سدیمی بودن خاک‌ها با فرسایش بادی و فرسایش‌پذیری بادی اشاره نموده‌اند (نوری و همکاران، ۱۴۰۱؛ سیرجانی و همکاران، ۲۰۱۹؛ علیزاده متقی و همکاران، ۲۰۲۰). شوری به دلیل افزایش یون‌های مختلف در خاک ایجاد شده و سدیمی بودن به دلیل افزایش سدیم در محلول خاک و سایت‌های تبادلی خاکدانه‌ها ایجاد می‌شود و این سدیم زیاد موجب تخریب ساختمان خاک از طریق پراکندگی رس‌ها می‌گردد (نوری و همکاران، ۱۴۰۱؛ سیرجانی و همکاران، ۲۰۱۹). باید توجه داشت رفتار شوری و سدیمی بودن خاک‌ها با توجه به شرایط محیطی و خاکی (مانند بافت خاک) در مواجهه با فرسایش بادی متفاوت و پیچیده است و نیاز به مطالعات بیشتری دارد و حتی مقادیر EC و SAR نیز در این شرایط رفتارهای متنوعی دارند (سیرجانی و همکاران، ۲۰۱۹؛ خاظمی^۱ و همکاران، ۲۰۲۵). حتی مطالعات اخیر نشان داده نوع پوسته‌های ایجاد شده نیز مقاومت متفاوتی دارند، به طوریکه پوسته‌های نمکی مقاومت بیشتری در برابر فرسایش بادی نسبت به پوسته‌های سدیمی دارند (خاظمی و همکاران، ۲۰۲۵).

همان‌طور که اشاره شد بخش فرسایش‌پذیر بادی خاک کمتر از ۴۰ درصد نشان از فرسایش‌پذیری کم، بین ۴۰ تا ۵۰ درصد کلاس فرسایش‌پذیری متوسط و بیش از ۵۰ درصد فرسایش‌پذیری بالا را نشان می‌دهد (شیاتی و همکاران، ۱۹۶۵). بر این اساس (شکل ۲) مشاهده می‌شود که مقدار WEF در مناطق شمالی شرقی تالاب هامون (هامون پوزک)، جنوب شرقی (هامون هیرمند) و غرب و جنوب غربی تالاب هامون (بخش‌هایی از هامون سابوری و هامون هیرمند) حساسیت به فرسایش‌بادی بیشتر از سایر مناطق است. بخش‌های عمده‌ای از هامون سابوری کمترین مقادیر فرسایش‌پذیری خاک را نشان دادند.

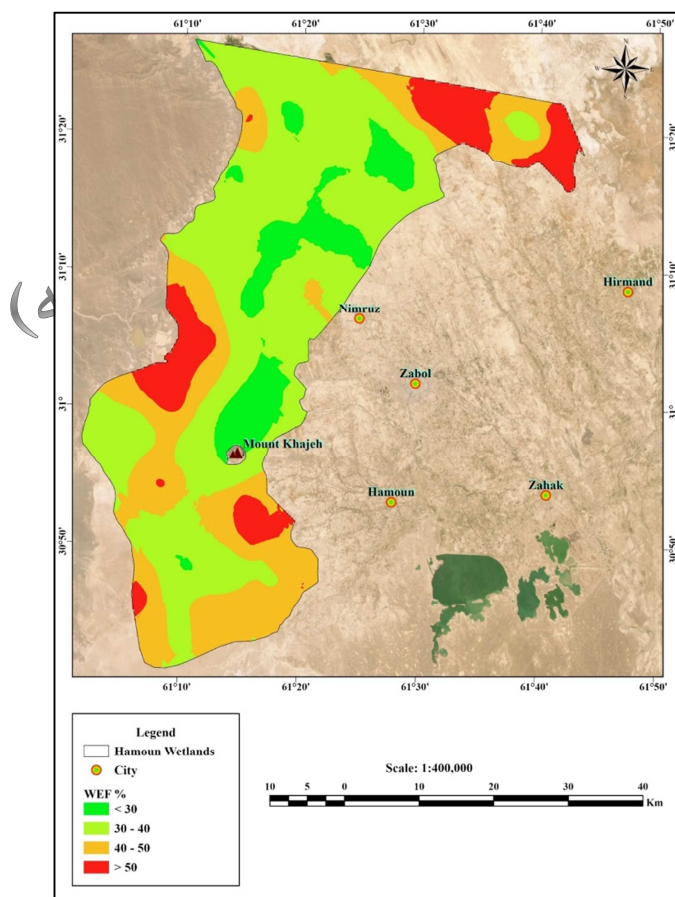
جدول ۶: ارزیابی مدل‌های زمین‌آماري برای مدل‌سازی مکانی WEF

روش	متغیر کمکی	مدل	RMSE	ME
-----	------------	-----	------	----

¹ Khatei

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفا برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

کریجینگ	-	معمولی	۱۵/۸۲۹	۰/۰۲۰
	-	ساده	۱۶/۲۲۲	-۱/۹۲۴
کو کریجینگ	BD	معمولی	۱۵/۸۳۱	۰/۰۲۰
		ساده	۱۵/۷۹۶	-۱/۸۴۷
	Silt	معمولی	۱۵/۹۲۰	۰/۰۵۰
		ساده	۱۶/۰۶۵	-۱/۰۱۴
	EC	معمولی	۱۵/۷۳۵	۰/۰۰۹
		ساده	۱۶/۰۱۰	-۱/۱۸۷
	SAR	معمولی	۱۵/۷۱۹	-۰/۰۱۴
		ساده	۱۵/۹۲۳	-۱/۸۴۶
وزن دهی معکوس فاصله	CEC	معمولی	۱۵/۸۱۷	۰/۰۲۰
		ساده	۱۵/۸۴۸	-۱/۶۲۷
	-	توان ۱	۱۵/۹۴۵	-۰/۴۸۳
	-	توان ۲	۱۶/۳۶۸	-۰/۱۴۹
	-	توان ۳	۱۷/۱۳۵	-۰/۱۲۶



شکل ۲: نقشه پهنه بندی WEF در منطقه مورد مطالعه (نویسندگان)

نتیجه گیری

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفا برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

فرسایش بادی به عنوان یک چالش جدی زیست محیطی در مناطق خشک، لزوم شناسایی و مدل سازی دقیق بخش فرسایش پذیر خاک را برای مدیریت پایدار اراضی ایجاب می کند. این پژوهش با هدف ارزیابی روش های مختلف برآورد و مدل سازی مکانی بخش فرسایش پذیر بادی در تالاب هامون، به عنوان یک کانون بحرانی گردوغبار، انجام شد. یافته های این مطالعه به وضوح نشان داد که روش های متداول محاسباتی برآورد فرسایش پذیری بادی در شرایط خاص تالاب هامون از دقت و کارایی لازم برخوردار نیستند وجود همبستگی منفی و معنی دار بین مقادیر آزمایشگاهی و مقادیر محاسبه شده توسط این معادلات، گویای ناکارآمدی آنها در این منطقه بوده و یا به عبارت بهتر عملکرد پایین و یا محدود این معادلات را در تالاب هامون نشان می دهد. این امر می تواند ناشی از وابستگی شدید این معادلات به شرایط خاص محیطی و نوع خاک منطقه ای که در آن توسعه یافته اند باشد، که لزوم بومی سازی مدل ها و ارائه معادلات منطقه محور را بیش از پیش آشکار می سازد.

از جنبه مدل سازی مکانی، نتایج حاکی از آن بود که بهترین مدل تغییرنما برای WEF بر اساس مجموع مربعات باقیمانده (۴۵۱۰) و ضریب تبیین (۰/۹۰۴) مدل کروی بود و تناسب مکانی WEF در کلاس تناسب مکانی متوسط قرار گرفت. همچنین از میان روش های زمین آماری مورد مطالعه، روش کوکریجینگ معمولی با استفاده از متغیر کمکی SAR، به عنوان دقیق ترین روش برای پهنه بندی مکانی بخش فرسایش پذیر (RMSE= 15.719 و ME= 0.014) در منطقه مورد مطالعه برتری دارد. این یافته بر اهمیت بهره گیری از روش های پیشرفته زمین آمار برای پوشش دادن محدودیت های نقاط نمونه برداری تأکید می کند. پهنه بندی نهایی خطر فرسایش بادی در بستر تالاب هامون نشان داد که بخش های شمال شرق (هامون پوزک)، جنوب شرق (بخش هایی از هامون هیرمند) و غرب (بخش هایی از هامون سابوری و هامون هیرمند) تالاب دارای بالاترین حساسیت هستند. این مناطق باید در اولویت برنامه های مدیریتی و کنترلی قرار گیرند.

در جمع بندی نهایی، می توان گفت تعمیم نسنجیده مدل های برآورد فرسایش پذیری بدون اعتبارسنجی با داده های محلی می تواند به برآوردهای نادرست بیانجامد. همچنین تلفیق داده های آزمایشگاهی میدانی با روش های زمین آمار پیشرفته (مانند کوکریجینگ)، ابزاری قدرتمند برای تهیه نقشه های دقیق و قابل اعتماد برای مدیران و تصمیم گیران فراهم می کند. تمرکز بر مناطق بحرانی شناسایی شده در این مطالعه می تواند گام مؤثری در کاهش پدیده گردوغبار و حفاظت از اراضی در حوضه آبریز هامون باشد.

منابع

- ابراهیمی خوسفی، محسن. (۱۴۰۲). تحلیل تغییرات مساحت تالاب های هامون و سایر پهنه های آبی منطقه سیستان با استفاده از تصاویر ماهواره ای. نشریه جغرافیا و توسعه، ۲۱(۷۱)، ۱۳۹-۱۶۵. doi: 10.22111/gdij.2023.7598
- ارباب، منیژه؛ پهلوانروی، احمد؛ پیری صحراگرد، حسین؛ امیری، میثم. (۱۳۹۷). ارزیابی دقت روش های زمین آمار و شبکه عصبی مصنوعی در برآورد سرعت آستانه فرسایش بادی (مطالعه موردی: منطقه ی جزینک، دشت سیستان). پژوهش های فرسایش محیطی. ۸(۳)، صص ۸۷ تا ۱۰۵.
- احمدی، عباس، قربانیان، رضا و جعفرزاده، علی اصغر. (۱۳۹۶). عوامل مؤثر بر فرسایش پذیری ذاتی خاک در مقابل باد (مطالعه موردی: دشت تبریز). پانزدهمین کنگره علوم خاک ایران. دانشگاه صنعتی اصفهان.
- اسدزاده، فرخ؛ خسروی اقدم، کمال؛ یغمائیان مهابادی، نفیسه؛ رمضانپور، حسن. (۱۳۹۷). تغییرات مکانی ذرات معدنی خاک با استفاده از زمین آمار و سنجش از دور جهت پهنه بندی بافت خاک. آب و خاک، ۳۲(۶)، صص ۱۲۰۷ تا ۱۲۲۲.

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفا برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

- اسکندری دامنه، هادی، غلامی، حمید، خسروی، حسن، مهدوی، رسول، خورانی، اسداله. و لی، جیمی. (۱۳۹۹). مدل سازی تغییرات مکانی و زمانی کاربری و پوشش اراضی حوضه دریاچه ارومیه با استفاده از ترکیب سلسل خودکار و زنجیره مارکوف. جغرافیا و پایداری محیط (پژوهشنامه جغرافیایی)، ۱۰(۳۵)، ۷۲-۵۷. doi: 10.22126/ges.2020.5303.2238
- اولیایی، حمیدرضا؛ صالحی، علیرضا؛ زارعیان، غلامرضا. (۱۴۰۳). ارزیابی روش های زمین آمار برای پهنه بندی برخی ویژگی های خاک منطقه دارنگان با کاربری های مختلف، استان فارس. تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۵ (۱)، صص ۹۷ تا ۱۱۶.
- بهنام، ولی، غلامعلی زاده آهنگر، احمد، رحمانیان، محمد و بامری، ابوالفضل. (۱۳۹۸). بررسی توزیع مکانی برخی از ویژگی های فیزیکی شیمیایی خاک با استفاده از روش های زمین آمار (مطالعه موردی: مسیر زابل به زاهدان). محیط زیست و مهندسی آب، ۵ (۳)، صص ۲۵۱ تا ۲۶۳.
- تاجیک، فواد، رحیمی، حسن و پذیرا، ابراهیم. (۱۳۸۱). اثر مواد آلی خاک، هدایت الکتریکی و نسبت جذب سدیم بر مقاومت کششی خاکدانه ها. مجله علمی علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، ۳، صص ۱ تا ۱۵.
- جعفرنیا، شهرام و اکبری نیا، مسلم. (۱۳۹۳). بررسی توزیع مکانی برخی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک و آب جنگل های مانگرو جزیره قشم با استفاده از زمین آمار. تحقیقات جنگل و صنوبر ایران، ۲۲ (۴)، صص ۶۷۳ تا ۶۸۶.
- جمال زئی ثمره، یونس، شهریاری، علی، پهلوان راد، محمدرضا، ضیائی جاوید، علیرضا و بامری، ابوالفضل. (۱۴۰۳). نقشه برداری سه بُعدی درصد رطوبت اشباع خاک با استفاده از تلفیق روش های زمین آماری و متغیرهای محیطی در دشت سیستان. مجله پژوهش های حفاظت آب و خاک، ۳۱ (۴)، ۸۹-۱۱۱. doi: 10.22069/jwsc.2025.22614.3746
- حسنی پاک، علی اصغر. (۱۳۸۹). زمین آمار (ژئواستاتستیک). انتشارات دانشگاه تهران. ۳۳۰ ص.
- حسین پُر، امینه، شهریاری، علی، شیرمحمدی، ابراهیم، ضیائی جاوید، علیرضا، رضائی، میثم و موسوی، روح اله. (۱۴۰۱). بررسی ارتباط متغیرهای محیطی و فاکتور فرسایش پذیری آبی خاک در دشت سیلابی سیستان. پژوهش های مهندسی آب/ایران، ۲(۴): ۷۸-۵۷.
- دهمده، مجید، محمد قاسمی، محمود و قاسمی، ایرج. (۱۴۰۱). ارزیابی کارکردهای حفاظتی و تفریحی تالاب هامون با استفاده از رهیافت ارزش گذاری مشروط. تحقیقات اقتصاد و توسعه کشاورزی/ایران، ۵۳ (۱)، ۱۲۹-۱۴۳. doi: 10.22059/ijaedr.2021.332234.669091
- دلارامی، امین، غلامعلی زاده، احمد، و شعبانی، اسماء. (۱۳۹۹). تعیین ترکیب بهینه متغیرهای ورودی با استفاده از آزمون گاما برای مدل سازی پتانسیم قابل جذب در سیستم عصبی-فازی (مطالعه موردی: منطقه میانکنگی؛ زابل). تحقیقات علوم زراعی در مناطق خشک، ۶۷ (۱)، ۲، صص ۶۷ تا ۷۵.
- رضا زاده شمخال، سهیلا؛ غلامعلی زاده، احمد؛ گزمه، سعید؛ فروغی فر، حامد؛ بامری، ابوالفضل. (۱۳۹۵). ارزیابی روش های مختلف درونبایی در برآورد مکانی برخی ویژگی های خاک دشت سیستان. دانش آب و خاک، ۲۶ (شماره ۲ بخش ۲)، صص ۱۵۱ تا ۱۶۲.
- شهریاری، علی، محمدی، سید مرتضی، شیرمحمدی، ابراهیم، فاطمی قمشه، اکرم و گلوی، هادی. (۱۴۰۴). بررسی پراکنش مکانی فرسایش پذیری بادی خاک در دشت سیستان با استفاده از روش های زمین آماری. مجله مخاطرات محیط طبیعی. دوره ۱۴، شماره ۴۳: ۱۳۲-۱۱۱. doi: 10.22111/jneh.2024.49372.2060
- علی صوفی، مسعود؛ شهریاری، علی. (۱۳۹۹). بررسی برخی خصوصیات شیمیایی و میزان برخی عناصر غذایی همراه با گرد و غبار دشت سیستان. مخاطرات محیط طبیعی ۹ (۲۳)، صص ۹۹ تا ۱۱۶.
- غلامعلی زاده آهنگر، احمد، سارانی، فریدون، هاشمی، مسعود و شعبانی، اسماء. (۱۳۹۳). مقایسه روش های رگرسیون خطی، زمین آماری و شبکه عصبی مصنوعی در مدل سازی کربن آلی در اراضی خشک دشت سیستان. نشریه آب و خاک، ۲۸(۶)، صص ۱۲۵۰-۱۲۶۰.
- ملکی، سعیده، سفینیان، علیرضا، سلطانی کوپایی، سعید، پورمنافی، سعید، راهداری، وحید. (۱۳۹۸). مدل سازی مطلوبیت زیستگاه پرندگان آبی و کنار آبی تالاب هامون با استفاده از مدل حداکثر آنتروپی. اکوبیولوژی تالاب (تالاب)، ۱۱(۴۰)، ۵-۱۴.
- میر، حمزه، غلامعلی زاده، احمد و شعبانی، اسماء. (۱۳۹۴). تعیین مهمترین پارامتر های موثر خاک بر فراهمی فسفر در دشت سیستان. نشریه آب و خاک، ۲۹(۶)، صص ۱۶۷۴ تا ۱۶۸۷.
- نوری، علیرضا، افتخاری، کامران، اسفندیاری، مهرداد، محمدی ترکاشوند، علی و احمدی، عباس. (۱۴۰۱). برآورد جزء فرسایش پذیری بادی خاک به کمک مدل های شبکه عصبی مصنوعی و تلفیق شبکه عصبی مصنوعی با الگوریتم ژنتیک در بخشی از اراضی جنوب شرقی قزوین. پژوهش های فرسایش محیطی، ۱۲ (۱)، صص ۱۴۵ تا ۱۵۹.

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

هاشمی، مسعود، غلامعلی زاده آهنگر، احمد، بامری، ابوالفضل، سارانی، فریدون، حجازی زاده، ابوالفضل. (۱۳۹۵). شناسایی و پهنه‌بندی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک با استفاده از روشهای زمین آماری در GIS (مورد مطالعاتی: منطقه میانکنگی؛ سیستان). نشریه آب و خاک، ۳۰ (۲)، صص ۴۴۳-۴۵۸.

- Abdel-Rahman, M.A., Zakarya, Y.M., Metwaly, M., & Koubouris, G. (2021). Deciphering Soil Spatial Variability through Geostatistics and Interpolation Techniques. *Sustainability*, 13: 194.
- Alizadeh Motaghi, F., Hamzehpour, N., Mola Ali Abasiyan, S., Rahmati, M. (2020). The wind erodibility in the newly emerged surfaces of Urmia Playa Lake and adjacent agricultural lands and its determining factors. *Catena*, 194, pp 104675. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104675>
- Bouajila, A., Omara, Z., Ajjari, A., Bol, R., Brahim, N., (2022). Improved estimation and prediction of the wind-erodible fraction for Aridisols in arid southeast Tunisia. *Catena* 211, 106001. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.106001>
- Cambardella, C.A., Moorman, T.B., Novak, J.M., Parkin, T.B., Karlen, D.L., Turco, R.F., Konopka, A.E. (1994). Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil Science Society of America Journal*, 58, pp 1501-1511.
- Christie J, & Bostwick P. (2012). Climate change adaptation plan for coastal and inland wetlands in the state of Michigan. A white paper prepared for the Michigan Department of Environmental Quality Wetlands Program and Coastal Management Program. Association of State Wetlands Managers, Windham, Maine.
- Colazo, J.C. and Buschiazso, D.E. (2010). Soil dry aggregate stability and wind erodible fraction in a semiarid environment of Argentina. *Geoderma*, 159: 228-236.
- Delbari, M., Loiskandl, W., Afrasiab, P. (2010). Uncertainty assessment of soil organic carbon content spatial distribution using geostatistical stochastic simulation. *Soil Res.* 48, 27-35.
- Dufková, J.K., Prochazka, V., Szturc, J., Mašíček, T. (2021). Using the equation for computing the wind erodible fraction of soils in the conditions of the Czech Republic. *Acta Horticulturae et Regiotecturae* 24 (1), 63-70. <https://doi.org/10.2478/ahr-2021-0025>
- Fallahzade, J., Karimi, A.R., Naderi, M., Shirani, H. (2020). Soil mechanical properties and wind erosion following conversion of desert to irrigated croplands in central Iran. *Soil and Tillage Research* 204, 104665. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104665>
- Fan, X., Weng, Y., and Tao, J. (2016). Towards decadal soil salinity mapping using Landsat time series data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geo information*. 52, 32-41.
- Fryrear, D.W., Saleh, A., Bilbro, J.D., Schomberg, H.M., Stout, J.E. and Zobeck, T.M. (1998). Revised Wind Erosion Equation (RWEQ), Wind Erosion and Water Conservation Research Unit, USDAARS- SPA Cropping Systems Research Laboratory. Technical Bulletin No 1.
- Fryrear, D.W., Krammes, C.A., Williamson, D.L., Zobeck, T.M. (1994). Computing the wind erodible fraction of soils. *J. Soil Water Conserv.* 49 (2), 183-188. <https://doi.org/10.1080/00224561.1994.12456849>
- Guo, Z., Chang, C., Wang, R., Li, J. (2017). Comparison of different methods to determine wind-erodible fraction of soil with rock fragments under different tillage/management. *Soil & Tillage Research*, 168, pp 42-49. <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.12.008>
- Han, Y., Zhao, W., Ding, J. and Santos Ferreira, C.S. (2023). Soil erodibility for water and wind erosion and its relationship to vegetation and soil properties in China's drylands. *Science of the Total Environment* 903: 166639. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166639>
- Jamalzehi Samareh, Y., Shahriari, A., Pahlavan-Rad, M. R., Ziaie Javid, A., Bameri, A. (2025). Spatial modeling of soil saturation percentage using machine learning methods in Sistan Plain. *Agriculture, Environment and Society* 5 (1), 19-31. [doi: 10.22034/jelsa.2025.479520.1087](https://doi.org/10.22034/jelsa.2025.479520.1087)
- Karaoglu, M., Erdel, E. (2023). Soil properties and mapping of the Aralik-Igdir wind erosion area-I (surface). *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, 18 (2), pp 277 – 288. [doi: 10.26471/cjees/2023/018/258](https://doi.org/10.26471/cjees/2023/018/258)
- Khaledian, Y., Brevik, E.C., Pereira, P., Cerdà, A., Fattah, M.A., Tazikeh, H. (2017). Modeling soil cation exchange capacity in multiple countries. *Catena* 158, 194-200. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.07.002>
- Khatei, G., Rinaldo, T., Van Pelt, R.S., D'Odorico, P., Ravi, S. 2025. On the differential effects of salinity and sodicity on aeolian erosion dynamics and particulate emissions. *Earth Surface Processes and Landforms* 50, e70040. <https://doi.org/10.1002/esp.70040>
- Li J., and Heap A.D. (2011). A review of comparative studies of spatial interpolation methods in environmental sciences: performance and impact factors. *Ecological Informatics* 6:3-4. 228-241.
- López, M.V., de Dios Herrero, J.M., Hevia, G.G., Gracia, R. and Buschiazso, D.E. (2007). Determination of the wind-erodible fraction of soil using different methodologies. *Geoderma* 139, 407-411. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.03.006>
- Mirakzehi, K., Pahlavan-Rad, M., Shahriari, A., Bameri, A. (2018). Digital soil mapping of deltaic soils: a case study from Hirmand (Helmand) river delta. *Geoderma* 313, 233-240. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.10.048>
- Motameni, S., Soroush, A., Fattahi, S.M., & Eslami, A. (2024). A data-driven approach for assessing the wind-induced erodible fractions of soil. *Journal of Arid Environments*, 222: 105152.
- Nan, L., Dong, Z., Xiao, W., Li, C., Xiao, N., Song, S., Xiao, F., Du, L. (2018). A field investigation of wind erosion in the farming-pastoral ecotone of northern China using a portable wind tunnel: a case study in Yanchi County. *Journal of Arid Land* 10(1), 27-38. <https://doi.org/10.1007/s40333-017-0073-8>

- Ninerola, V.B., Navarro-Pedreno, J., Gomez Lucas, I., Melendez Pastor, I. and Jordan Vida, M. (2017). Geostatistical assessment of soil salinity and cropping systems used as soil phytoremediation strategy. *Journal of Geochemical Exploration*. 174. 53-58.
- Pahlavan-Rad, M. Dahmardeh, K., Brungard, C. 2018. Predicting soil organic carbon concentrations in a low-relief landscape, eastern Iran. *Geoderma Regional* 15, e00195. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2018.e00195>
- Pahlavan-Rad, M.R., Akbarimoghaddam, A. 2018. Spatial variability of soil texture fractions and pH in a floodplain (case study from eastern Iran). *Catena* 160, 275-281. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.10.002>
- Pásztor, L., Négyesi, G., Laborczi, A., Kovacs, T. (2016). Integrated spatial assessment of wind erosion risk in Hungary. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 16, 2421–2432. <https://doi.org/10.5194/nhess-16-2421-2016>
- Rakkar, M.K., Blanco-Canqui, H., Tatarko, J., (2019). Predicting soil wind erosion potential under different corn residue management scenarios in the central Great Plains. *Geoderma* 353, 25–34. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.05.040>
- Rezaei, M., Mohammadifar, A., Gholami, H., Mina, M., Riksen, M.J.P.M., Ritsema, C. (2023). Mapping of the wind erodible fraction of soil by bidirectional gated recurrent unit (BiGRU) and bidirectional recurrent neural network (BiRNN) deep learning models. *Catena*, 223, pp 106953. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.106953>
- Sarani, F., Ahangar, A.G., Shabani, A. (2016). Predicting ESP and SAR by artificial neural network and regression models using soil pH and EC data (Miankangi Region, Sistan and Baluchestan Province, Iran). *Archives of Agronomy and Soil Science* 62 (1), 127-138. <https://doi.org/10.1080/03650340.2015.1040398>
- Schaetzl, R. J., Anderson, S. 2005. *Soils: Genesis and Geomorphology*, Cambridge University Press, 833 p.
- Selmy, S.A., Abd El-Aziz, S., El-Desoky, A., & El-Sayed, M.A. (2022). Characterizing, predicting, and mapping of soil spatial variability in Gharb El-Mawhoub area of Dakhla Oasis using geostatistics and GIS approaches. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*. 21. 383-396. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2021.10.013>
- Shahriari, M., Delbari, M., Afrasiab, P., Pahlavan-Rad, M.R. 2019. Predicting regional spatial distribution of soil texture in floodplains using remote sensing data: A case of southeastern Iran. *Catena* 182, 104-149. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104149>
- Shiyatyi, E.I., (1965). Wind structure and velocity over a rugged soil surface. *Vestnik Sel.-khoz. Nauki* 10.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.07.012>
- Skidmore, E.L., Hagen, L.J., Armburst, D.V., Durar, A.A., Fryrear, D.W., Potter, K.N., Wagner, L.E. and Zobeck, T.M. (1994). Methods for investigating basic processes and conditions affecting wind erosion. In: Lal, R. (Ed.), *Soil Erosion Research Methods*. Soil & W. Cons. Soc. Ankeny, USA, pp. 295–330.
- Usman, H. (1995). Wind erosion in northeastern Nigeria 1. Erodibility factors. *Arid Land Res. Manag.* 9 (4), 457–466. <https://doi.org/10.1080/15324989509385912>
- Webb, N.P., Strong, C.L. (2011). Soil erodibility dynamics and its representation for wind erosion and dust emission models. *Aeolian Res.* 3, 165–179.