

Investigating the spatial distribution of soil wind-erodible indices using geostatistical methods in the Sistan plain

Ali Shahriari^{1*} , Seyed Morteza Mohammadi², Ebrahim Shirmohammadi³, Akram Fatemi Ghomesheh⁴, Hadi Galavi⁵

1. *Corresponding Author*, Associate Professor, Soil Science and Engineering Department, Faculty of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran
2. Assistant Professor, Department of Statistics, Faculty of Basic Sciences, University of Zabol
3. Assistant Professor, Soil Science and Engineering Department, Faculty of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran
4. Associate Professor, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Razi University, Iran
5. Assistant Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Water and Soil, University of Zabol, Iran

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received: 21 July 2024

Revised: 26 August 2024

Accepted: 10 October 2024

Keywords:

Deltaic Soils, Cokriging, Alluvial Activities, Aeolian Activities.

ABSTRACT

The study of land erodibility and its spatial modeling is the main and key information for sustainable land management. Wind erosion is one of the main environmental hazards in Sistan region. Therefore, this research aimed to investigate the spatial changes and modeling of wind erodibility indices in the Sistan Plain. For this purpose, 181 points were selected over the plain, and surface soil was sampled. The studied indices included the laboratory wind-erodible fraction (EF), the wind-erodible fraction based on Fryrear formula (EFF), López formula (EFL), Bouajila formula (EFB), soil crust factor (SCF), dry aggregate stability (DAS) and the soil erodibility. Also, some physical and chemical characteristics were measured in soil samples using standard methods. IDW, kriging, and cokriging were used as geostatistical analysis methods. The results showed that the best variogram model for EFF, SCF, EFB, and DAS was the spherical model, and for EFL, EF, and soil erodibility was the exponential model and the spatial fit for all indices was in the average spatial fit class. The best predictive methods were simple cokriging with covariate of sand for EFF (RMSE=5.724) and soil erodibility (RMSE=85.576), with covariate of clay for EFB (RMSE=2.950) and DAS (RMSE=14.481) and with covariate of sand to clay ratio for EF (RMSE=17.966) and ordinary cokriging method for SCF (RMSE=0.163) and EFL (RMSE=36.312) with covariate of sand to clay ratio. The average values of EFF equal to 29.13%, SCF equal to 0.45%, EFL equal to 75.25%, EFB equal to 83.09%, EF equal to 54.97%, DAS equal to 72.18% and soil erosion equal to 121.67 Mg ha⁻¹ yr⁻¹. The highest values of wind-erodible indices were observed in the southern parts of the Sistan plain, and, the lowest values were observed in the northern and western parts. However, the highest value of DAS was found in the northern and western parts and the lowest in the southern part of the plain. There was a high match between the spatial distribution of erodibility indices and the spatial distribution of soil particle size. The changes in soil mineral particles in the region depend on the geomorphic nature of the region and are in line with the changes in the sedimentation regime of the Hirmand River and its branches, as well as wind erosion and sedimentation processes in the Sistan Plain.

Cite this article: Shahriari, A., Mohammadi, S. M., Shirmohammadi, E., Fatemi Ghomesheh, A., & 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



© Ali Shahriari

Publisher: University of Sistan and Baluchestan

DOI: 10.22111/jneh.2024.49372.2060

* Corresponding Author Email: shahriari.ali@uoz.ac.ir

مجله علمی پژوهشی مخاطرات محیط طبیعی، دوره ۱۴، شماره ۴۳، پیاپی ۱، بهار ۱۴۰۴

بررسی پراکنش مکانی شاخص‌های فرسایش‌پذیری بادی خاک با استفاده از

روش‌های زمین‌آماري در دشت سیستان

علی شهریار^{۱*}، سید مرتضی محمدی^۲، ابراهیم شیرمحمدی^۳، اکرم فاطمی قمشه^۴، هادی گلو^۵

۱. دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل (نویسنده مسئول)

۲. استادیار گروه آمار، دانشکده علوم پایه، دانشگاه زابل

۳. استادیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل

۴. دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی

۵. استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۳۱ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۳/۰۶/۰۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۱۹ واژه‌های کلیدی: خاک‌های دلتایی، کوکریجینگ، فعالیت‌های آبرفتی، فعالیت‌های بادرفتی.	مطالعه فرسایش‌پذیری اراضی و مدل‌سازی مکانی آن از جمله اطلاعات اصلی و کلیدی برای مدیریت پایدار اراضی می‌باشد. فرسایش بادی یکی از مخاطرات اصلی محیطی در منطقه سیستان به‌شمار می‌آید. از این‌رو، این پژوهش با هدف بررسی تغییرات مکانی و مدل‌سازی شاخص‌های فرسایش‌پذیری بادی در دشت سیستان انجام شد. بدین منظور ۱۸۱ نقطه مطالعاتی در اراضی دشت سیستان انتخاب و از خاک سطحی آنها نمونه‌برداری شد. شاخص‌های مورد مطالعه شامل بخش فرسایش‌پذیر بادی آزمایشگاهی (EF)، بخش فرسایش‌پذیر بادی بر اساس فرمول فرایر (EFF)، لویز (EFL)، بواجیلا (EFB)، فاکتور سله خاک (SCF)، پایداری خاکدانه خشک (DAS) و میزان تخمینی فرسایش خاک بود. همچنین برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی در نمونه‌های خاک با استفاده از روش‌های استاندارد اندازه‌گیری شد. روش وزن‌دهی معکوس فاصله، کریجینگ و کوکریجینگ به‌عنوان روش‌های آنالیزهای زمین‌آماري مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد که بهترین مدل تغییرنا برای EFL، SCF، EFB و DAS مدل کروی و برای EF، EFL و فرسایش خاک مدل نمایی بود و تناسب مکانی برای کلیه شاخص‌ها در کلاس تناسب مکانی متوسط قرار گرفت. روش کوکریجینگ ساده با متغیر کمکی شن برای $RMSE=724/5$ (EFF) و فرسایش خاک $RMSE=85/576$، با متغیر کمکی رس برای $RMSE=950/2$ (EFB) و $RMSE=481/14$ (DAS) و با متغیر کمکی نسبت شن بر رس برای $RMSE=966/17$ (EF) و روش کوکریجینگ معمولی برای $RMSE=163/0$ (SCF) و $RMSE=312/36$)) با متغیر کمکی نسبت شن بر رس، به‌عنوان بهترین روش‌های پیش‌بینی انتخاب شدند. مقادیر میانگین EFF برابر ۲۹/۱۳ درصد، SCF برابر ۰/۴۵، EFL برابر ۷۵/۲۵ درصد، EFB برابر ۸۳/۰۹ درصد، EF برابر ۵۴/۹۷ درصد، DAS برابر ۷۲/۱۸ درصد و فرسایش خاک برابر ۱۲۱/۶۷ مگاگرم در هکتار در سال بود. در قسمت‌های جنوبی دشت سیستان بیشترین مقادیر شاخص‌های فرسایش‌پذیر بادی و در قسمت‌های شمالی و غربی کمترین مقادیر مشاهده شد. اما بیشترین مقدار DAS در قسمت شمالی و غربی و کمترین آن در قسمت جنوبی دشت مشاهده شد. تطابق بالایی بین نحوه پراکنش شاخص‌های فرسایش‌پذیری با نحوه پراکنش ذرات خاک در منطقه وجود داشت. تغییرات ذرات معدنی خاک در منطقه وابسته به ماهیت ژئومورفیک منطقه و هم‌راستا با تغییرات رژیم رسوب‌گذاری رودخانه هیرمند و شاخه‌های آن و همچنین فرایندهای فرسایش بادی و رسوب‌گذاری آن در دشت سیستان می‌باشد.

استناد: شهریار، علی، محمدی، سید مرتضی، شیرمحمدی، ابراهیم، فاطمی قمشه، اکرم، گلو، هادی. (۱۴۰۴). بررسی پراکنش مکانی شاخص‌های فرسایش‌پذیری بادی خاک با استفاده از روش‌های زمین‌آماري در دشت سیستان. مخاطرات محیط طبیعی، ۱۴(۴۳)، ۱۱۱-۱۳۲.

DOI: 10.22111/jneh.2024.49372.2060



ناشر: دانشگاه سیستان و بلوچستان © علی شهریار^{*}، سید مرتضی محمدی، ابراهیم شیرمحمدی، اکرم فاطمی قمشه، هادی گلو.

مقدمه

فرسایش خاک^۱ تابعی از خصوصیت‌های عامل فرساینده و عامل فرسایش‌پذیر است. فرسایش‌پذیری خاک^۲ خصوصیتی است که میزان حساسیت خاک را در برابر جدا شدن و انتقال توسط عوامل فرسایش‌دهنده (آب و باد) نشان می‌دهد (واعظی و همکاران، ۱۳۸۷) و یکی از عوامل مهم در تخمین درست مقدار فرسایش خاک و ارائه راهکارهای مبارزه با این پدیده است (استواری و همکاران، ۱۳۹۴). این خصوصیت به ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک‌ها وابسته است و عموماً به‌عنوان یکی از خصوصیت‌های ذاتی با مقدار ثابت در نظر گرفته می‌شود (رفاهی، ۱۳۹۴). بر این اساس در مناطق متأثر از فعالیت‌های بادی^۳، مطالعه پراکنش مکانی فرسایش‌پذیر بادی خاک (بورلی و همکاران^۴، ۲۰۱۴) و فاکتورهای مرتبط و مؤثر بر آن (پازتور و همکاران^۵، ۲۰۱۶؛ سیرجانی و همکاران^۶، ۲۰۱۹؛ هان و همکاران^۷، ۲۰۲۳) برای تصمیم‌گیری و برنامه‌ریزی‌های مدیریتی منطقه‌ای ضروری است.

شاخص‌های مختلفی برای مطالعه فرسایش‌پذیری بادی خاک توسط پژوهشگران استفاده می‌شود که برخی از آنها شامل روش‌های اندازه‌گیری مستقیم (تونل باد، اندازه‌گیری آزمایشگاهی) و برخی شامل روش‌های برآوردی (استفاده از فرمول) می‌باشند. دو مورد از پرکاربردترین شاخص‌های برآوردی فرسایش‌پذیری بادی خاک از مدل تخمین فرسایش بادی خاک به نام «معادله اصلاح‌شده فرسایش بادی» (RWEQ^۸) مستخرج می‌شوند (بورلی و همکاران، ۲۰۱۴) و عبارت از بخش فرسایش‌پذیر بادی^۹ و فاکتور سله خاک^{۱۰} می‌باشند (فرایر و همکاران^{۱۱}، ۱۹۹۸). پژوهشگرانی نیز بر روی فرمول بخش فرسایش‌پذیر بادی خاک مطالعه نمودند و بر اساس خصوصیت‌های خاکی مناطق مورد مطالعه فرمول‌هایی را پیشنهاد نمودند (لوپز و همکاران^{۱۲}، ۲۰۰۷؛ بواجیلا و همکاران^{۱۳}، ۲۰۲۲). از سوی دیگر، اندازه‌گیری مستقیم فرسایش‌پذیری بادی خاک نیز منجر به ارائه شاخص‌های آزمایشگاهی نظیر بخش فرسایش‌پذیر بادی آزمایشگاهی (اسکیدمور و همکاران^{۱۴}، ۱۹۹۴؛ لوپز و همکاران، ۲۰۰۷) و پایداری خاکدانه خشک^{۱۵} (کولازو^{۱۶} و بوشیازو^{۱۷}، ۲۰۱۰؛ لینگ و همکاران^{۱۸}، ۲۰۱۸) گردید. همچنین تخمین میزان فرسایش بادی خاک بر اساس خاکدانه‌های غیرقابل فرسایش خاک^{۱۹} مورد توجه برخی پژوهشگران بوده است (زوبک^{۲۰} و فن پلت^{۲۱}، ۲۰۱۴).

-
- 1 Soil erosion
 - 2 Soil erodibility
 - 3 Aeolian activities
 - 4 Borelli et al.
 - 5 Pásztor et al.
 - 6 Sirjani et al.
 - 7 Han et al.
 - 8 Revised Wind Erosion Equation
 - 9 Wind-erodible fraction (EF)
 - 10 Soil crust factor (SCF)
 - 11 Fryrear et al.
 - 12 López et al.
 - 13 Bouajila et al.
 - 14 Skidmore et al.
 - 15 Dry aggregate stability (DAS)
 - 16 Colazo
 - 17 Buschiazzi
 - 18 Ling et al.
 - 19 Nonerodible aggregates
 - 20 Zobeck
 - 21 Van Pelt

یکی از نیازهای اساسی برای مطالعات علوم زمین، وجود نقشه‌های خاک است که دارای اطلاعات عمده‌ای برای منابع طبیعی، محیط‌زیست و مدیریت اراضی هستند (پهلوان‌راد^۱ و اکبری‌مقدم^۲، ۲۰۱۸) و پراکنش مکانی آنها را نمایش می‌دهند. از این‌رو، تقاضا برای نقشه‌های خصوصیت‌های خاک با وضوح و کیفیت خوب افزایش یافته است. زمین‌آمار شاخه‌ای از علم آمار است که به‌عنوان ابزارهای مناسب و قوی برای ارزیابی تغییرپذیری مکانی و برآورد متغیرهای منطقه‌ای استفاده می‌شود. تغییرات متغیر در محیط را به دو مولفه تصادفی و سیستماتیک تقسیم‌بندی می‌کنند که در آن تغییرات متغیر به کمک تغییرنا مشخص می‌گردد، واریانس تخمین را می‌توان به‌دست آورد و به کمک آن به این نتیجه رسید که روش تخمین مناسب بوده و یا نامناسب بوده است (دلبری و همکاران^۳، ۲۰۱۹؛ سلمی و همکاران^۴، ۲۰۲۲). روش‌های زمین‌آمار معمول کریجینگ، کوکریجینگ و روش وزن‌دهی معکوس فاصله (Inverse Distance Weighting) می‌باشد که در روش کریجینگ و IDW از متغیرهای کمکی استفاده نمی‌شود؛ اما در روش کوکریجینگ از متغیرهای کمکی برای تخمین متغیر اصلی با الگوریتم‌های متفاوت استفاده می‌شود (عبدالرحمان و همکاران^۵، ۲۰۲۱). با وجود اینکه زمین‌آمار چندین دهه در علوم خاک کاربرد داشته است؛ اما مطالعات بسیار محدودی بر روی پراکنش مکانی فرسایش‌پذیری بادی خاک (بورلی و همکاران، ۲۰۱۴؛ پازتور و همکاران، ۲۰۱۶؛ غلامی و همکاران^۶، ۲۰۲۱؛ رضایی و همکاران^۷، ۲۰۲۳) صورت گرفته است و عمده مطالعات متمرکز بر خصوصیت‌های موثر بر فرسایش و فرسایش‌پذیری بادی بوده است.

منطقه سیستان در شرق ایران واقع در دلتای رودخانه هیرمند و دارای اقلیمی به‌شدت خشک با وزش بادهای شدید موسوم به بادهای ۱۲۰ روزه است (میرک‌زهی و همکاران^۸، ۲۰۱۸) که با کاهش ذخایر آبی سطحی و زیرسطحی آن و در نتیجه کاهش پوشش گیاهی، خاک منطقه به‌شدت مستعد فرسایش بادی و بروز پدیده گرده و غبار است (علی‌صوفی و شهریاری، ۱۳۹۹). از این‌رو، فرسایش بادی و مسائل مرتبط با آن در این منطقه بسیار فعال است. بنابراین، این پژوهش با هدف مطالعه تغییرات مکانی فرسایش‌پذیری بادی با استفاده از زمین‌آمار در دشت سیستان در راستای کمک به مدیریت (تصمیم‌گیری و اجرای پروژه‌های مختلف) و برنامه‌ریزی و به‌عبارت دیگر، آمایش سرزمین آن صورت پذیرفت.

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعاتی

دشت سیستان در قسمت جنوب‌شرقی ایران و در شمال استان سیستان و بلوچستان واقع شده است. رژیم رطوبتی خاک‌های منطقه مورد مطالعه، اریدیک و رژیم دمایی آن‌ها، هایپرترمیک است و مواد مادری آن‌ها، آبرفتی و جزء

1 Pahlavan-Rad
2 Akbarimoghaddam
3 Delbari et al.
4 Selmy et al.
5 AbdelRahman et al.
6 Gholami et al.
7 Rezaei et al.
8 Mirakzehi et al.

دشت‌های سیلابی محسوب می‌شود. اراضی دشت سیستان متأثر از رسوبات رودخانه هیرمند و انشعابات آن می‌باشد و از لحاظ تکامل خاک‌رخی جزء خاک‌های جوان به‌شمار می‌رود (میرکزه‌ی و همکاران، ۲۰۱۸). پدیده‌ی خشکسالی دشت سیستان که با کاهش میزان بارندگی سالانه نسبت به متوسط دراز مدت همراه بوده، سبب کاهش رطوبت خاک، افزایش تبخیر و به‌دنبال آن تشدید بادهای ۱۲۰ روزه سیستان، موجب افزایش فرسایش بادی شده است. میانگین سالیانه تبخیر در منطقه سیستان نزدیک به ۴۰۰۰ میلی‌متر از سطح تشتک‌های تبخیر برآورد گردیده است (دانش‌شهرکی و همکاران، ۱۳۹۵) (شکل ۱).

نمونه‌برداری و تعیین ویژگی‌های خاک

تعداد ۱۸۱ نقطه در سری‌های خاک غالب دشت سیستان مشخص و از خاک سطحی (۱۰-۰ سانتی‌متری) با روش تصادفی نظارت‌شده، نمونه‌برداری انجام شد (شکل ۱). بخشی از نمونه‌های خاک ابتدا هوا خشک و سپس از الک دو میلی‌متری عبور داده شد و ۱۳ ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی (خصوصیت‌های مرتبط با حاصلخیزی و شوری و قلیایت خاک) شامل درصد رس (Clay)، سیلت (Silt)، شن (Sand) (همچنین نسبت شن به رس)، درصد رطوبت اشباع (SP)، قابلیت هدایت الکتریکی در عصاره اشباع (EC)، واکنش خاک در گل اشباع (pH)، درصد ماده آلی (OM)، کربنات کلسیم معادل خاک (CCE)، ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC)، نسبت جذب سدیم (SAR)، میزان فسفر (P) و پتاسیم (K) در دسترس در نمونه‌های خاک با استفاده از روش‌های استاندارد اندازه‌گیری شدند. همچنین، بخشی از نمونه‌های دست‌نخورده نیز برای اندازه‌گیری شاخص‌های برآوردی مستقیم مورد استفاده قرار گرفت.

محاسبه شاخص‌های فرسایش‌پذیری بادی خاک

با استفاده از اطلاعات آزمایشگاهی و با به‌کارگیری معادله‌های ۱ تا ۵ ارائه‌شده در زیر، اقدام به محاسبه شاخص‌های فرسایش‌پذیری بادی شد. دو شاخص بخش فرسایش‌پذیر بادی (EFF) و فاکتور سله خاک (SCF) در این مدل بر اساس معادلات مشخص (معادله ۱ و ۲) برآورد گردیدند (فرایر و همکاران، ۱۹۹۸).

$$EFF = 29.09 + 0.31 Sa + 0.17 Si + [0.33 \times (Sa/Cl)] - 2.59 OM - 0.95 Ca \quad (1)$$

که در آن EFF بخش فرسایش‌پذیری بادی بر اساس فرمول فرایر و همکاران، Sa شن، Si سیلت، Cl رس، OM ماده آلی و Ca کربنات کلسیم معادل است و تمامی پارامترها به درصد می‌باشند.

$$SCF = 1/[1 + 0.0066 (Cl^2) + 0.021 (OM^2)] \quad (2)$$

که در آن SCF فاکتور سله خاک، Cl درصد رس و OM درصد ماده آلی است.

برآورد بخش فرسایش‌پذیر بادی خاک بر اساس مطالعات لوپز و همکاران (EFL) از معادله زیر (معادله ۳) صورت پذیرفت (لوپز و همکاران، ۲۰۰۷):

$$EFL = 4.77 + (7.43 (Sa/Cl)) + 27.6/OM \quad (3)$$

که در آن EFL بخش فرسایش‌پذیری بادی بر اساس فرمول لوپز و همکاران، Sa شن، Cl رس و OM ماده آلی است و تمامی پارامترها به درصد می‌باشند.

برآورد بخش فرسایش‌پذیر بادی خاک بر اساس مطالعات بواجیلا و همکاران (EFB) از معادله زیر (معادله ۴) انجام شد (بواجیلا و همکاران، ۲۰۲۲):

$$EFB = 125.83 - 0.59 Cl - 0.22 Si - 0.25 Sa + 0.29 OM - 0.69 Ca \quad (۴)$$

که در آن EFB بخش فرسایش‌پذیری بادی بر اساس فرمول بواجیلا و همکاران، Sa شن، Si سیلت، Cl رس، OM ماده آلی و Ca کربنات کلسیم معادل است و تمامی پارامترها به درصد می‌باشند. همچنین، بخش فرسایش‌پذیری بادی آزمایشگاهی خاک (EF) معادله آن به صورت زیر است:

$$EF = (W < 0.84 / TW) \times 100 \quad (۵)$$

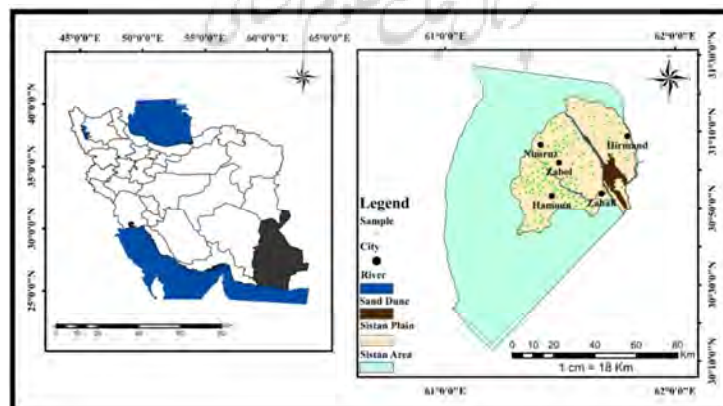
که در آن EF بخش فرسایش‌پذیری بادی آزمایشگاهی خاک، $W < 0.84$ وزن خاکدانه‌های کوچک‌تر از 0.84 میلی‌متر پس از ۵ دقیقه شیک کردن با سرعت متوسط و TW وزن کل نمونه خاک (۲۰۰ گرم) است (اسکیدمور و همکاران، ۱۹۹۴؛ لویز و همکاران، ۲۰۰۷).

پایداری خاکدانه خشک یکی از خصوصیت‌های خاکی مهم است که برای نشان دادن فرسایش‌پذیری بادی در برابر فرسایش بادی استفاده می‌شود و این امکان را می‌دهد که یک مدل‌سازی ساده ریاضی برای تخمین مقاومت خاک در برابر فرسایش بادی در هر منطقه صورت گیرد و معادله آن به صورت زیر است (کولازو و بوشیازو، ۲۰۱۰):

$$DAS = [1 - (W < 0.84 / W > 0.84)] \times 100 \quad (۶)$$

که در آن DAS درصد پایداری خاکدانه خشک، $W < 0.84$ وزن خاکدانه‌های کوچک‌تر از 0.84 میلی‌متر در زمان دوم و $W > 0.84$ وزن خاکدانه‌های بزرگ‌تر از 0.84 میلی‌متر در زمان اول است. زمان اول پس از ۳۰ ثانیه شیک کردن و زمان دوم پس از ۵ دقیقه شیک کردن (با احتساب ۳۰ ثانیه اول) است (لینگ و همکاران، ۲۰۱۸).

تخمین میزان فرسایش خاک نیز بر اساس خاکدانه‌های پایدار خاک با قطر بیشتر از 0.84 میلی‌متر (خاکدانه‌های غیرقابل فرسایش خاک) بر اساس روش زوبک و ون پلت (۲۰۱۴) انجام شد.



شکل ۱: موقعیت منطقه مورد مطالعه و نقاط نمونه‌برداری (منبع: نویسندگان)

تجزیه و تحلیل های آماری و زمین آمار

تجزیه و تحلیل آماری پارامترهای فیزیکی و شیمیایی خاک و شاخص های فرسایش پذیری بادی با استفاده از نرم افزار SPSS نسخه ۲۶ صورت گرفت. 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. گفتنی است که برای هر روش زمین آمار دو حالت ساده (simple) و معمولی (ordinary) در نظر گرفته شد و همچنین کلیه خصوصیت های خاکی مورد اندازه گیری شده به صورت متغیر کمکی و به صورت جداگانه در روش کوکریجینگ مورد بررسی قرار گرفتند. به عبارت دیگر، برای هر شاخص فرسایش پذیری بادی ۳۱ حالت از روش های زمین آمار مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. به منظور ارزیابی دقت مدل ها ضریب تبیین (R^2)، 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 (متین فر و همکاران، ۱۳۹۹). با مقایسه این آماره ها، مدل سازی ها با یکدیگر مقایسه و بهترین مدل برای هر شاخص انتخاب شد.

نتایج و بحث

خصوصیت های خاک

بر اساس چولگی و کشیدگی، داده ها بیشتر نرمال هستند به جز Sand/Clay، P، K، CCE، EC و SAR که از شرایط نرمال کمی فاصله دارند (جدول ۱). همچنین ضریب تغییرات (C.V.) معیار تغییر پذیری نسبی است و اگر $0/20 \leq C.V. \leq 0/50$ نشان دهنده تغییر پذیری اندک، $0/50 < C.V. \leq 0/21$ تغییر پذیری متوسط و اگر $C.V. \geq 0/50$ تغییر پذیری بالا است (کریمی نژاد و همکاران^۱، ۲۰۱۵) که بر این اساس CCE و pH در دشت سیستان دارای تغییر پذیری نسبی کم، SP، Silt، Sand و OM دارای تغییر پذیری متوسط و Sand/Clay، CEC، P، K، EC و SAR دارای تغییر پذیری بالا هستند. از نظر C.V.، تغییرات pH هم راستا با مطالعات سارانی و همکاران^۲ (۲۰۱۶) و دلبری و همکاران (۲۰۱۹) و CCE هم راستا با هاشمی و همکاران (۱۳۹۵) بود. در خصوص تغییر پذیری متوسط SP، Silt، Sand و OM نیز هم راستا با مطالعات سارانی و همکاران (۲۰۱۶)، دلبری و همکاران (۲۰۱۹) و جمال زئی ثمره و همکاران (الف و ب، ۱۴۰۰) بود. همچنین تغییر پذیری بالای Clay، P، EC و SAR در منطقه سیستان توسط محققین متعددی بیان شده است (میر و همکاران، ۱۳۹۴؛ جمال زئی ثمره و همکاران، الف، ۱۴۰۰؛ سارانی و همکاران، ۲۰۱۶؛ دلبری و همکاران، ۲۰۱۹). به نظر می رسد که پیچیدگی عوامل خاک ساز در دشت سیستان در اثر تداخل همزمان فعالیت های آبرفتی و بادرفتی (میرکزهی و همکاران، ۲۰۱۸) دلیل این تغییرات باشد.

مقدار میانگین SP در دشت سیستان ۳۳/۶۸ درصد است (جدول ۱) که مقدار متوسطی است و مطالعات نشان داده که در منطقه میانکنگی سیستان در خاک سطحی میانگین این خصوصیت (۴۶/۶۷ درصد) بیشتر از میانگین آن در خاک سطحی کل دشت می باشد (غلامعلی زاده آهنگر و همکاران، ۱۳۹۳؛ هاشمی و همکاران، ۱۳۹۵) اما نتایج یک پژوهش نشان داد که میانگین SP در کل دشت در خاک سطحی برابر ۳۴/۰۷ درصد است (جمال زئی ثمره و

1 Karimi Nezhad et al.

2 Sarani et al.

همکاران، ب، ۱۴۰۰) که با نتایج این پژوهش هم‌خوانی دارد. میانگین درصد رس در منطقه کم (۱۵/۶۸ درصد) بود که این مقدار در نتیجه فعالیت‌های آبرفتی و رسوب‌گذاری تغییر می‌نمود که به نتایج برخی محققین در منطقه سیستان نزدیک بود (جمال‌زئی ثمره و همکاران، الف، ۱۴۰۰؛ پهلوان‌راد و اکبری‌مقدم، ۲۰۱۸). میانگین سیلت نیز برابر ۴۱/۴۵ درصد بود که با توجه به شرایط ژئومورفیک دشت سیستان (دلتای رودخانه هیرمند) دور از انتظار نیست و هم‌راستا با مطالعات پیشین است (جمال‌زئی ثمره و همکاران، الف، ۱۴۰۰؛ سارانی و همکاران، ۲۰۱۶؛ شهریاری و همکاران^۱، ۲۰۱۹). همچنین میانگین شن در منطقه برابر ۴۲/۸۷ درصد بود که حاصل فعالیت‌های آبرفتی و بادرفتی در منطقه می‌باشد و نتایج با مطالعات گذشته هم‌خوانی داشت (جمال‌زئی ثمره و همکاران، الف، ۱۴۰۰؛ سارانی و همکاران، ۲۰۱۶؛ شهریاری و همکاران، ۲۰۱۹).

جدول ۱: برخی ویژگی‌های آماری خصوصیت‌های خاک

خصوصیت	میانگین	کمینه	بیشینه	واریانس	چولگی	کشیدگی	انحراف معیار	ضریب تغییرات
SP (%)	۳۳/۶۸	۲۱	۵۴	۴۹/۴۲	۰/۷۲۴	-۰/۰۰۲	۷/۰۳	۰/۲۱
Clay (%)	۱۵/۶۸	۳	۴۳	۶۶/۳۶	۰/۸۹۷	۰/۲۵۸	۸/۱۵	۰/۵۲
Silt (%)	۴۱/۴۵	۷	۸۳	۲۲۱/۸۹	۰/۰۷۹	-۰/۳۱۹	۱۴/۹۰	۰/۳۶
Sand (%)	۴۲/۸۷	۱۰	۸۹	۳۸۷/۶۵	۰/۲۳۳	-۰/۸۲۴	۱۹/۶۹	۰/۴۶
Sand/Clay	۴/۴۰	۰/۳۹	۲۶/۳۳	۱۹/۳۷	۲/۴۴۰	۷/۶۵۳	۴/۴۰	۱/۰۲
OM (%)	۰/۹۸	۰/۱۷	۲/۵۲	۰/۲۱	۰/۵۰۴	۰/۰۸۴	۰/۴۶	۰/۴۷
CCE (%)	۲۰/۲۰	۱۲/۵۰	۳۹/۵۰	۹/۳۲	۱/۰۸۱	۸/۱۵۸	۳/۰۵	۰/۱۵
CEC (meq 100g ⁻¹)	۱۰/۵۶	۲/۴۰	۳۹/۶۰	۲۹/۵۶	۰/۹۹۹	۰/۵۴۸	۵/۴۴	۰/۵۲
P (mg kg ⁻¹)	۸/۷۵	۱	۳۸	۴۰/۴۴	۲/۰۴۱	۵/۵۸۴	۶/۳۶	۰/۷۳
K (mg kg ⁻¹)	۲۰۰/۱۱	۶۰	۷۶۰	۱۲۲۸۵/۲۸	۲/۱۲۰	۶/۸۸۲	۱۱۰/۸۴	۰/۵۵
EC dS m ⁻¹)	۱۹/۲۶	۰/۷۲	۲۱۸	۱۲۷۲/۳۸	۳/۱۷۱	۱۰/۸۹۲	۳۵/۶۷	۱/۸۵
pH	۸/۳۸	۷/۸۰	۸/۹۰	۰/۰۵	۰/۰۱۴	-۰/۴۴۰	۰/۲۳	۰/۰۳
SAR (mmol L ⁻¹)	۳۶/۸۰	۱/۲۱	۶۲۴/۷۳	۷۶۴۹/۱۶	۴/۲۶۶	۲۰/۰۸۰	۸۷/۴۶	۲/۲۸

همان‌طور که در جدول ۱ ملاحظه می‌شود، میانگین ماده آلی خاک برابر ۰/۹۸ درصد است که هم‌راستا با مطالعات گذشته در دشت سیستان بود (پهلوان‌راد و همکاران^۲، ۲۰۱۸) که به اعتقاد محققین ذخایر کربن مواد آلی در خاک-های مناطق خشک مانند دشت سیستان بسیار کم است و این به دلیل اقلیم خشک حاکم، پوشش گیاهی فقیر و شدت فعالیت عوامل فرسایشی می‌باشد (غلامعلی زاده آهنگر و همکاران، ۱۳۹۳؛ علی‌صوفی و شهریاری، ۱۳۹۹). میزان میانگین کربنات کلسیم معادل ۲۰/۲۰ درصد بود که به اعتقاد برخی محققین در دشت‌های سیلابی و اراضی پست به دلیل نزدیک بودن آب زیرزمینی غنی از کربنات‌ها به سطح خاک، تجمع و فراهمی آنها در خاک طبیعی است (شاتزل^۳ و اندرسون^۴، ۲۰۰۵) که یکی از رایج‌ترین آن کربنات کلسیم می‌باشد (علی‌صوفی و شهریاری، ۱۳۹۹) و این نتایج هم‌راستا با یافته‌های سایر پژوهشگران در دشت سیستان است (میر و همکاران، ۱۳۹۴؛ رضازاده شمخال و

1 Shahriari et al.

2 Pahlavan-Rad et al.

3 Schaetzl

4 Anderson

همکاران، ۱۳۹۵). درخصوص ظرفیت تبادل کاتیونی که میانگین آن ۱۰/۵۶ (میلی اکیوالان بر ۱۰۰ گرم خاک) بود، در منطقه مطالعات کمی صورت گرفته و این میزان از مقدار ظرفیت تبادل کاتیونی برآورد شده در منطقه میانکنگی (۱۸/۷۲) کمتر بود (سارانی و همکاران، ۲۰۱۶) که به احتمال زیاد مربوط به عوامل موثر بر ظرفیت تبادل کاتیونی در منطقه میانکنگی نسبت به کل دشت می باشد. میانگین فسفر قابل جذب در دشت سیستان برابر ۸/۷۵ میلی گرم بر کیلوگرم بود که با نتایج دهمرده و همکاران (۱۴۰۰) در منطقه سد سیستان همخوانی داشت. همچنین میانگین پتاسیم قابل جذب برابر ۲۰۰/۱۱ میلی گرم بر کیلوگرم بود که کمی بیشتر از مطالعات مشابه در منطقه بود (دهمرده و همکاران، ۱۴۰۰؛ دلبری و همکاران، ۲۰۱۹).

میانگین هدایت الکتریکی خاکهای دشت سیستان ۱۹/۲۶ دسی زیمنس بر متر بود (حدول ۱) که میزان بالایی است و با میانگین هدایت الکتریکی منطقه میانکنگی (۵/۸۹) بسیار فاصله دارد (سارانی و همکاران، ۲۰۱۶). همچنین واکنش خاک میانگینی برابر ۸/۳۸ دارا بود که همراستا با نتایج سایر پژوهشگران در منطقه است (دلارامی زاده و همکاران، ۱۳۹۹؛ پهلوان راد و اکبری مقدم، ۲۰۱۸). نسبت جذب سدیم خاک در منطقه میانگینی برابر ۳۶/۸۰ میلی-مول بر لیتر داشت که نشان از سدیمی بودن خاکهای مورد مطالعه دارد و با نتایج پژوهشگران در منطقه میانکنگی فاصله زیادی نشان داد (سارانی و همکاران، ۲۰۱۶). هدایت الکتریکی خاک و نسبت جذب سدیم دارای تغییرات زیادی در دشت سیستان هستند و در منطقه خاکهایی بدون مشکل شور و سدیمی بودن تا خاکهایی به شدت شور و سدیمی مشاهده شد. بالا رفتن مقدار سدیم باعث پراکنش رسها و تخریب ساختمان خاک شده (شاتزل و اندرسون، ۲۰۰۵) و در نتیجه میزان فرسایش پذیری بادی افزایش می یابد (تاجیک و 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 آنها می شود (اخضری و همکاران^۱، ۲۰۱۵) و در نتیجه فرسایش خاک را تشدید کند.

در مجموع می توان اظهار داشت که خاکهای مورد مطالعه از منظر خصوصیت های فیزیکی دارای بافتی متوسط تا درشت با غالبیت ذرات شن و سیلت هستند. خصوصیت های حاصلخیزی این خاکها بیشتر مقادیر متوسط تا کمی را شامل می شدند (به جز کربنات کلسیم معادل و پتاسیم قابل جذب). خصوصیت های منعکس کننده شوری و سدیمی بودن خاکها نشان دادند که منطقه مورد مطالعه دارای خاکهای شور و سدیمی است.

بر اساس نتایج ارائه شده در جدول ۲، کلیه شاخص های فرسایش پذیری بادی خاک مورد مطالعه از منظر آماری و بر حسب چولگی و کشیدگی نرمال هستند و EFL و میزان فرسایش خاک (Soil Erodibility) از شرایط نرمال کمی فاصله دارند. همچنین طبق ضریب تغییرات EFB دارای تغییرپذیری پایین، SCF، EFF و DAS دارای تغییرپذیری متوسط و EFL و میزان فرسایش خاک دارای تغییرپذیری بالا می باشند. درخصوص EFF و EF، نتایج همراستا با سایر پژوهشگران است (نوری و همکاران، ۱۴۰۱؛ بورلی و همکاران، ۲۰۱۴؛ رضایی و همکاران، ۲۰۲۳). میانگین EFF در دشت سیستان برابر ۲۹/۱۳ درصد بود (محدوده ۵۲/۸۹ - ۱/۷۷ درصد) که مشابه میانگین این شاخص در جمهوری چک و مجارستان بود (بورلی و همکاران، ۲۰۱۴). شیاتی و همکاران^۲ (۱۹۶۵) اظهار داشتند

1 Akhzari et al.

2 Shiyaty et al.

بخش فرسایش‌پذیر بادی خاک کمتر از ۴۰ درصد نشان از فرسایش‌پذیری کم، بین ۴۰ تا ۵۰ درصد کلاس فرسایش-پذیری متوسط و بیش از ۵۰ درصد فرسایش‌پذیری بالا را نشان می‌دهد و بر این اساس میانگین منطقه در کلاس فرسایش‌پذیری کم قرار می‌گیرند. باید توجه داشت که EFF بر اساس فرمول بود و کلاس‌بندی مورد اشاره برای EF آزمایشگاهی است. همچنین میانگین SCF در منطقه برابر ۰/۴۵ بود (محدوده ۰/۹۴ - ۰/۰۸) که بیشتر از میانگین خاک‌های اروپا (۰/۳۹) بود (بورلی و همکاران، ۲۰۱۴). لازم به یادآوری است نتایج این خصوصیت متناسب با EFF تغییر می‌کند و عددی بین ۰ تا ۱ بوده و هرچه به ۱ نزدیک شود خاک فرسایش‌پذیرتر است (فرایر و همکاران، ۱۹۹۸).

میانگین EFL و EFB به‌ترتیب برابر ۷۵/۲۵ و ۸۳/۰۹ درصد در منطقه بود (محدوده ۳۳۰/۱۸ - ۱۹/۹۵ درصد و محدوده ۹۱/۱۰ - ۶۵/۱۰ درصد) و هر دو شاخص در کلاس فرسایش‌پذیری بالا قرار گرفتند. هان و همکاران (۲۰۲۳) میانگین این دو شاخص را برای مناطق خشک چین به‌ترتیب ۴۳۰ و ۹۸ برآورد نمودند. میانگین EF (آزمایشگاهی) در منطقه برابر ۵۴/۹۷ درصد بود (محدوده ۹۷/۵۲ - ۹/۳۳ درصد) و در کلاس فرسایش‌پذیری بالا قرار گرفت. این مقدار میانگین EF بسیار مشابه اراضی پست پلاپای دریاچه ارومیه (۵۲/۱ درصد) بود (علیزاده متقی و همکاران^۱، ۲۰۲۰) و کمتر از مقدار میانگین آن در استان فارس (۶۶/۸۷ درصد) (رضایی و همکاران، ۲۰۲۳) و استان قزوین (۶۹/۹۲ درصد) بود (نوری و همکاران، ۱۴۰۱). میانگین DAS خاک‌های دشت سیستان ۷۲/۱۸ درصد بود (محدوده ۹۶/۰۵ - ۲۲/۸۹ درصد) که هر چه این مقدار به ۱۰۰ نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده میزان خاکدانه‌های خشک پایدارتر است. نتایج این شاخص با نتایج کولازو و بوشیازو (۲۰۱۰) در خاک‌های درشت بافت آرژانتین و خاک‌های مرتعی چین (لینگ و همکاران، ۲۰۱۸) هم‌راستا بود. میانگین فرسایش خاک (به‌صورت تخمینی) در منطقه ۱۲۱/۶ مگاگرم در هکتار در سال بود (محدوده ۵۶۰ - مگاگرم در هکتار در سال) که بر اساس گزارش بورلی و همکاران (۲۰۱۷) بسیار بیشتر از میانگین فرسایش خاک تخمینی در کشورهای اروپایی بود.

جدول ۲: برخی خصوصیت‌های آماری شاخص‌های فرسایش‌پذیری بادی خاک

شاخص	میانگین	کمینه	بیشینه	واریانس	چولگی	کشدگی	انحراف معیار	ضریب تغییرات
EFF (%)	۲۹/۱۳	۱/۷۷	۵۲/۸۹	۶۱/۳۲	۰/۳۶۷	۰/۴۳۳	۷/۸۳	۰/۲۷
SCF	۰/۴۵	۰/۰۸	۰/۹۴	۰/۰۵	۰/۱۹۴	-۰/۹۵۴	۰/۲۲	۰/۴۹
EFL (%)	۷۵/۲۵	۱۹/۹۵	۳۳۰/۱۸	۳۱۱۶/۰۸	۲/۳۲۲	۶/۴۴۵	۵۵/۸۲	۰/۷۴
EFB (%)	۸۳/۰۹	۶۵/۱۰	۹۱/۱۰	۱۳/۹۸	-۰/۷۹۸	۱/۸۴۲	۳/۷۴	۰/۰۵
EF (%)	۵۴/۹۷	۹/۳۳	۹۷/۵۲	۴۶۷/۵۵	-۰/۱۵۵	-۰/۰۳۹	۲۱/۶۲	۰/۳۹
DAS (%)	۷۲/۱۸	۲۲/۸۹	۹۶/۰۵	۲۵۸/۳۳	-۰/۷۵۵	-۰/۰۳۷	۱۶/۰۷	۰/۲۲
Soil Erodibility (Mg ha ⁻¹ yr ⁻¹)	۱۲۱/۶۷	۰	۵۶۰	۹۱۵۸/۳۶	۱/۲۱۴	۲/۶۴۷	۹۵/۷۰	۰/۷۹

نتایج همبستگی بین شاخص‌های فرسایش‌پذیری بادی مورد مطالعه، نشان از همبستگی بالای این شاخص‌ها با یکدیگر داشت (جدول ۳). همه شاخص‌ها همبستگی مثبت و معنی‌داری در سطح یک درصد با یکدیگر داشتند، به‌جز DAS که با سایر شاخص‌ها همبستگی منفی و معنی‌داری در سطح یک درصد نشان داد که به‌علت ماهیت شاخص

¹ Alizadeh Motaghi et al.

پایداری خاکدانه‌های خشک است. نتایج نشان می‌دهد که انتخاب این شاخص‌ها به دلیل همبستگی بالا در یک راستا (فرسایش‌پذیری بادی خاک) می‌باشد. بالاترین میزان همبستگی بین EF و میزان تخمینی فرسایش خاک (۰/۹۳۸) و پس از آن DAS و میزان تخمینی فرسایش خاک (۰/۸۸۲) و همچنین بین EF و DAS (۰/۸۷۷) مشاهده شد. این نتیجه نشان‌دهنده اهمیت شاخص‌های آزمایشگاهی در برآورد فرسایش‌پذیری و با توجه به تطبیق با محیط طبیعی می‌باشد و همچنین هم‌راستایی با شاخص میزان تخمینی فرسایش خاک با واقعیت منطقه را نشان می‌دهد.

جدول ۳: نتایج همبستگی شاخص‌های فرسایش‌پذیری بادی خاک

Soil Erodibility (Mg ha ⁻¹ yr ⁻¹)	DAS (%)	EF (%)	EFB (%)	EFL (%)	SCF	EFF (%)	
						۱	EFF (%)
					۱	۰/۸۳۲**	SCF
				۱	۰/۷۶۶**	۰/۸۳۲**	EFL (%)
			۱	۰/۶۲۹**	۰/۸۵۶**	۰/۸۸۳**	EFB (%)
		۱	۰/۵۴۹**	۰/۵۷۷**	۰/۶۵۷**	۰/۶۳۲**	EF (%)
	۱	-۰/۸۷۷**	-۰/۵۳۳**	-۰/۵۸۱**	-۰/۶۴۷**	-۰/۶۰۴**	DAS (%)
۱	۰/۸۸۲**	۰/۹۳۸**	۰/۵۰۱**	۰/۵۷۳**	۰/۵۹۴**	۰/۶۰۴**	Soil Erodibility (Mg ha ⁻¹ yr ⁻¹)

** همبستگی معنی‌دار در سطح ۱ درصد

کارگلو^۱ و اردل^۲ (۲۰۲۳) به عدم ارتباط مناسب بین EF و EFF اشاره نمودند و آن را مربوط به شرایط منطقه مورد مطالعه (در کشور ترکیه) دانستند و EF را برای تخمین فرسایش‌پذیری خاک مناسب‌تر دانستند. البته هان و همکاران (۲۰۲۳) به مقایسه EFF، EFL و EFB برای تخمین EF آزمایشگاهی پرداختند و اظهار داشتند EFF نسبت به دو شاخص دیگر بهتر عمل کرده است؛ زیرا مقادیر آن بین ۰ تا ۱۰۰ بوده، ولی دو شاخص دیگر مقادیر بالاتر از ۱۰۰ را نیز داشته‌اند، از این رو EF با EFF هم‌خوانی بهتری دارد. در این مطالعه نیز فقط EFL مقادیری بیش از ۱۰۰ را داشت و بین شاخص‌های فرمولی SCF و EFF بالاترین همبستگی و EFB کمترین همبستگی را با EF نشان دادند. باید توجه داشت که پژوهشگران مختلفی به عدم تطابق کامل EF و EFF اشاره داشته‌اند (لوپز و همکاران، ۲۰۰۷؛ گائو و همکاران^۳، ۲۰۱۷؛ راکار و همکاران^۴، ۲۰۱۹) و معتقدند دلیل این اختلاف بسیار تغییرپذیر بودن بخش فرسایش‌پذیر بادی خاک نسبت به منطقه (خصوصیت‌های محیطی به خصوص خاکی) و مدیریت اراضی است. به هر حال در این پژوهش کلیه شاخص‌ها در مدل‌سازی مکانی استفاده شدند.

تغییرنما و همبستگی مکانی

تغییر نمای مناسب از بین مدل‌های نمایی، کروی، گوسی و خطی برازش گردید و بهترین مدل تغییرنما بر اساس حداقل مجموع مربعات (RSS) و حداکثر مقدار R^2 انتخاب شد (جدول ۴). بهترین مدل تغییرنما برای SCF، EFB و DAS مدل کروی و برای EF، EFL و فرسایش خاک مدل نمایی بود. نسبت واریانس قطعه‌ای به آستانه شاخصی از قدرت ساختار متغیرهای مکانی است. اگر این نسبت کمتر از ۰/۲۵ باشد، متغیر از ساختار مکانی قوی و اگر نسبت بین ۰/۲۵ تا ۰/۷۵ قرار گیرد، ساختار مکانی آن متوسط و اگر این نسبت بیش از ۰/۷۵ باشد، ساختار

1 Karaoglu

2 Erdel

3 Guo et al.

4 Rakkar et al.

مکانی آن ضعیف خواهد بود (کامباردلا و همکاران^۱، ۱۹۹۴). تناسب مکانی برای کلیه شاخص‌های مورد مطالعه در کلاس تناسب مکانی متوسط قرار گرفت. نتایج حاصل از اثر قطعه‌ای و آستانه نشان داد که EFL دارای بالاترین مقدار و SCF دارای کمترین مقدار در هر پارامتر بودند. همچنین، نتایج شعاع تأثیر نشان داد که DAS دارای بالاترین مقدار شعاع و EFF دارای کمترین مقدار شعاع تأثیر بودند. نتایج مقدار ضریب تبیین نشان داد که SCF دارای بالاترین و EFL دارای کمترین مقدار بودند.

جدول ۴: پارامترهای تغییرنما و معیارهای انتخاب مدل و کنترل اعتبار تغییرنما شاخص‌های فرسایش‌پذیری بادی خاک

شاخص	مدل	اثر قطعه C0	آستانه C0+C	شعاع تأثیر A0	تناسب مکانی C0/(C0+C)	کلاس همبستگی	RSS	R ²
(%)EFF	کروی	۳۴/۵	۷۳/۱۴	۴۰۹۰۰	۰/۴۷	M*	۷۳/۶	۰/۹۳۵
SCF	کروی	۰/۰۳	۰/۰۶۴	۶۶۹۰۰	۰/۴۷	M	۰/۰۰۰	۰/۹۶۴
(%)EFL	نمایی	۲۶۳۶	۵۲۷۳	۱۳۱۶۰۰	۰/۵۰	M	۰/۰۰۰	۰/۲۶۶
(%)EFB	کروی	۷/۴	۱۸/۸۳	۵۳۶۰۰	۰/۳۹	M	۳/۲۹	۰/۹۶۵
(%)EF	نمایی	۳۷۵	۷۵۰/۱	۸۵۰۰۰	۰/۵۰	M	۵۱۰۶	۰/۸۳۷
(%)DAS	کروی	۲۱۷/۳	۴۳۴/۷	۱۸۹۶۰۰	۰/۵۰	M	۱۰۳۹	۰/۸۶۶
Soil Erodibility (Mg/ha/yr)	نمایی	۱۷۹/۴	۴۰۳/۹	۱۵۶۰۰	۰/۴۴	M	۳۹۹۵	۰/۸۵۰

M* نشان‌دهنده همبستگی مکانی متوسط

پژوهش‌های متعددی نیز نشان داده‌اند که مدل‌های کروی و نمایی بهترین برازش را بر تغییرات مکانی اغلب ویژگی‌های خاک دارند (یغمائی‌ان مهابادی و همکاران، ۱۳۹۸؛ جیانگ و همکاران^۲، ۲۰۱۲). مدل نمایی از مبدأ مختصات شروع می‌شود و در نزدیکی مبدأ مختصات رفتار خطی از خود نشان می‌دهد، اما آهنگ صعود آن کندتر از مدل کروی می‌باشد و عملاً به سقف یا حد آستانه معینی نمی‌رسد، به همین علت دامنه تأثیر این مدل نامشخص می‌باشد. علت پیدایش داده‌هایی با چنین مدل‌هایی، می‌تواند به دلیل وجود روند در محدوده مورد بررسی و یا بزرگی قابل-ملاحظه دامنه تأثیر نسبت به ابعاد نمونه‌برداری تحت پوشش باشد (پهلوان‌راد و اکبری‌مقدم، ۲۰۱۸). ازسوی دیگر، به دلیل پیچیدگی عوامل خاک‌ساز در اثر تداخل هم‌زمان فعالیت‌های آبرفتی و بادرفتی در دشت سیستان (میرک‌زهی و همکاران، ۲۰۱۸) که بر پراکنش خصوصیت‌های خاک اثر می‌گذارند (شهریاری و همکاران، ۲۰۱۹؛ پهلوان‌راد و اکبری‌مقدم، ۲۰۱۸)، بر شاخص‌های فرسایش‌پذیری که متأثر از این خصوصیت‌ها بوده نیز اثرگذارند و می‌توان دلیل همبستگی مکانی متوسط این شاخص‌ها در منطقه مطالعاتی را مربوط به این موضوع دانست.

ارزیابی مدل‌های زمین‌آماری

براساس شاخص‌های ارزیابی، روش کوکریجینگ ساده با متغیر کمکی شن برای EFF و فرسایش خاک (جدول ۵ و ۶)، کوکریجینگ معمولی برای SCF و EFL با متغیر کمکی نسبت شن بر رس (جدول ۵)، برای EFB و DAS روش کوکریجینگ ساده با متغیر کمکی رس (جدول ۵ و ۶) و کوکریجینگ ساده برای EF با متغیر کمکی نسبت شن بر

¹ Cambardella et al.

² Jiang et al.

رس (جدول ۶) به عنوان بهترین و دقیق ترین روش های پیش بینی برای تهیه نقشه شاخص های فرسایش پذیری بادی خاک در دشت سیستان عمل نمودند.

برخی از پژوهش هایی که اقدام به مقایسه روش های زمین آماری در پیش بینی خصوصیت های خاک نموده اند، استفاده از روش کوکریجینگ را توصیه کرده اند (جعفرنیا و اکبری نیا، ۱۳۹۳). هاشمی و همکاران (۱۳۹۵) در منطقه میانکنگی دشت سیستان اقدام به پهنه بندی خصوصیت های خاک نمودند و دریافتند در میان روش های زمین آماری مورد استفاده، روش کوکریجینگ ساده برای هدایت الکتریکی و روش کوکریجینگ معمولی برای سیلت، کربنات کلسیم معادل و درصد رطوبت اشباع خاک سطحی منطقه بهترین عملکرد را دارند. همچنین رضازاده شمخال و همکاران (۱۳۹۵) نیز اظهار داشتند برای مدل سازی مکانی هدایت الکتریکی و کربنات کلسیم معادل خاک روش کوکریجینگ معمولی در خاک های دشت سیستان بهتر عمل نمودند. ارباب و همکاران (۱۳۹۷) در مطالعه ای اقدام به برآورد سرعت آستانه فرسایش بادی در منطقه جزینک دشت سیستان نمودند و اظهار داشتند که از بین روش های زمین آماری، مدل کوکریجینگ با متغیر کمی سیلت در مقایسه با مدل کریجینگ در برآورد سرعت آستانه فرسایش بادی، دقت بیشتری دارد. مطالعات متعددی در سال های اخیر نشان دادند که روش کوکریجینگ جهت برآورد و تخمین مکانی خصوصیت های خاک از سایر روش های زمین آماری بهتر عمل می کنند (اسدزاده و همکاران، ۱۳۹۷؛ بهنام و همکاران، ۱۳۹۸؛ اولیایی و همکاران، ۱۴۰۳).

جدول ۵: نتایج مقایسه روش های زمین آماری در پهنه بندی شاخص های فرمولی (EFF، SCF، EFL و EFB)

شاخص	روش	متغیر کمی	مدل	RMSE	ME
EFF	کریجینگ	-	معمولی	۶/۶۵۸	۰/۱۰۱
EFF	کریجینگ	-	ساده	۶/۶۴۸	۰/۰۶۵
EFF	کوکریجینگ	Sand	معمولی	۶/۸۶۵	۰/۰۱۸
EFF	کوکریجینگ	Sand	ساده	۵/۷۲۴	۰/۱۱۹
EFF	IDW	-	توان ۱	۶/۶۱۶	۰/۱۹۳
EFF	IDW	-	توان ۲	۶/۷۵۵	۰/۲۳۳
EFF	IDW	-	توان ۳	۷/۰۱۹	۰/۲۹۴
SCF	کریجینگ	-	معمولی	۰/۱۹۳	۰/۰۰۱
SCF	کریجینگ	-	ساده	۰/۱۹۳	-۰/۰۰۰
SCF	کوکریجینگ	Sand/Clay	معمولی	۰/۱۶۳	-۰/۰۰۰
SCF	کوکریجینگ	Sand/Clay	ساده	۰/۱۷۶	-۰/۰۰۲
SCF	IDW	-	توان ۱	۰/۱۹۲	۰/۰۰۳
SCF	IDW	-	توان ۲	۰/۱۹۴	۰/۰۰۵
SCF	IDW	-	توان ۳	۰/۲۰۲	۰/۰۰۸
EFL	کریجینگ	-	معمولی	۵۰/۹۹۸	۰/۵۱۷
EFL	کریجینگ	-	ساده	۵۰/۹۱۴	۰/۳۵۵
EFL	کوکریجینگ	Sand/Clay	معمولی	۳۶/۳۱۲	۰/۲۰۵
EFL	کوکریجینگ	Sand/Clay	ساده	۴۱/۰۰۸	-۰/۲۵۹
EFL	IDW	-	توان ۱	۵۰/۹۹۸	۰/۳۱۸
EFL	IDW	-	توان ۲	۵۰/۰۷۲	۰/۸۲۲

۱/۲۶۲	۵۰/۳۴۵	توان ۳	-	IDW	EFL
۰/۰۱۹	۳/۲۱۱	معمولی	-	کریجینگ	EFB
۰/۰۱۴	۳/۲۱۵	ساده	-	کریجینگ	EFB
۰/۰۱۶	۳/۱۶۱	معمولی	Clay	کوکریجینگ	EFB
-۰/۰۰۱	۲/۹۵۰	ساده	Clay	کوکریجینگ	EFB
۰/۱۶۶	۳/۲۰۰	توان ۱	-	IDW	EFB
۰/۱۳۷	۳/۲۵۳	توان ۲	-	IDW	EFB
۰/۱۷۴	۳/۳۷۷	توان ۳	-	IDW	EFB

در بین متغیرهای کمکی (خصوصیت‌های خاک) ویژگی‌های فیزیکی خاک به‌طور مشخص اندازه ذرات خاک نقش کلیدی را در مدل‌سازی مکانی شاخص‌های فرسایش‌پذیری خاک ایفا نمودند. ارباب و همکاران (۱۳۹۷) نیز بیان نمودند سرعت آستانه فرسایش بادی در منطقه جزینک دشت سیستان مرتبط با بافت خاک (درصد رس، سیلت و شن) سطحی می‌باشند. همان‌طور که اشاره شد متغیر کمکی شن برای EFF و فرسایش خاک، متغیر رس برای EFB و DAS و متغیر کمکی نسبت شن بر رس برای SCF، EFL و EF با متغیر کمکی نسبت شن بر رس، برای EFB و DAS روش کوکریجینگ ساده با متغیر کمکی رس و کوکریجینگ ساده برای EF به‌عنوان متغیر کمکی اصلی عمل نمود. لویز و همکاران (۲۰۰۷) نیز رابطه معنی‌دار مثبت شن و منفی سیلت و رس را مشاهده و برای فرمول پیشنهادی خود جهت برآورد بخش فرسایش‌پذیر بادی خاک، استفاده از نسبت شن بر رس را توصیه نمودند. همچنین کولازو و بوشیازو (۲۰۱۰) نیز به رابطه منفی رس و مثبت نسبت شن بر رس با بخش فرسایش‌پذیر بادی و پایداری خاکدانه خشک خاک اشاره نمودند. پی و همکاران^۱ (۲۰۱۹) نیز به نقش مثبت رس بر پایداری خاکدانه خشک خاک تاکید نمودند و اظهار داشتند که مقدار پایداری خاکدانه خشک را می‌توان با توجه به مقادیر رس در خاک‌ها تخمین زد. پژوهشگران به همبستگی معنی‌داری بخش فرسایش‌پذیر بادی با رس (نوری و همکاران، ۱۴۰۱؛ و سیرجانی و همکاران، ۲۰۱۹) و شن (کادویچ و همکاران^۲، ۲۰۱۴؛ کوچامی ساردو و همکاران^۳، ۲۰۲۰) اشاره نمودند. مطالعات متعدد دیگری نیز رابطه بین اندازه ذرات خاک و فرسایش‌پذیری بادی خاک را نشان داده‌اند (پازتور و همکاران، ۲۰۱۶؛ مینا و همکاران^۴، ۲۰۲۲؛ هان و همکاران، ۲۰۲۳).

پهنه‌بندی شاخص‌های فرسایش‌پذیری بادی خاک

همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، الگوی تغییرات مکانی بخش فرسایش‌پذیر بادی خاک برآوردشده با فرمول (EFF، EFL و EFB) و یا آزمایشگاه (EF) در دشت سیستان مشابه هستند و در قسمت‌های جنوبی منطقه بیشترین مقادیر (فرسایش‌پذیری بالا) و در قسمت‌های شمالی و غربی کمترین مقادیر (فرسایش‌پذیری کم) را دارند. SCF و فرسایش خاک تخمینی نیز از همین الگوی مکانی تبعیت می‌کند، ولی DAS رویه معکوسی با این موارد دارد؛ به این‌صورت که در قسمت‌های شمالی و غربی بیشترین مقادیر (پایداری خاکدانه خشک بالا) و در قسمت‌های جنوبی

1 Pi et al.
2 Kadović et al.
3 Kouchami-Sardoo et al.
4 Mina et al.

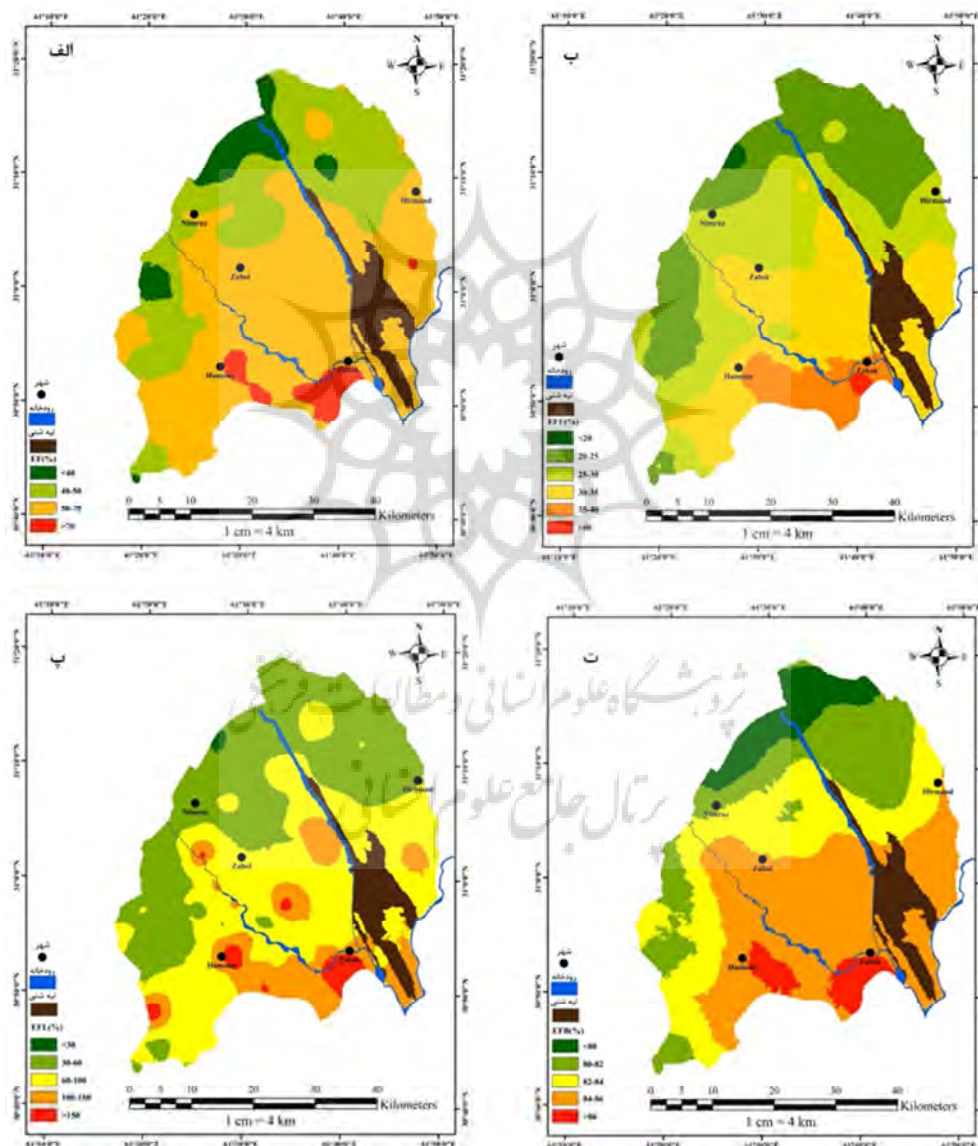
منطقه کمترین مقادیر (پایداری خاکدانه خشک پایین) را نشان داد (شکل ۳). با توجه به اینکه متغیرهای کمکی منتخب در مدل سازی مکانی شاخص های فرسایش پذیری بادی خاک در منطقه از اجزاء اندازه ذرات بودند و همچنین یافته های جمال زئی ثمره و همکاران (الف، ۱۴۰۰) درخصوص مدل سازی مکانی پراکنش اندازه ذرات خاک در دشت سیستان به نظر می رسد، تطابق بالایی بین نحوه (مقداری و مکانی) پراکنش شاخص های فرسایش پذیری بادی با نحوه پراکنش اندازه ذرات خاک در منطقه وجود دارد. به عبارت دیگر، با افزایش شن در دشت سیستان، فرسایش پذیری بادی خاک افزایش و پایداری خاکدانه های خشک کاهش می یابد و حساسیت خاک به فرسایش بادی بیشتر می شود و بالعکس هر چه سیلت و رس خاک ها بیشتر شود، مقاومت خاک در برابر فرسایش بادی خاک در منطقه بیشتر می شود. هاشمی و همکاران (۱۳۹۵) نیز اظهار داشتند که در منطقه روند تغییرات میزان سیلت و رس برعکس تغییرات میزان شن است.

جدول ۶: نتایج مقایسه روش های زمین آماری در پهنه بندی شاخص های آزمایشگاهی (DAS.EF و فرسایش خاک)

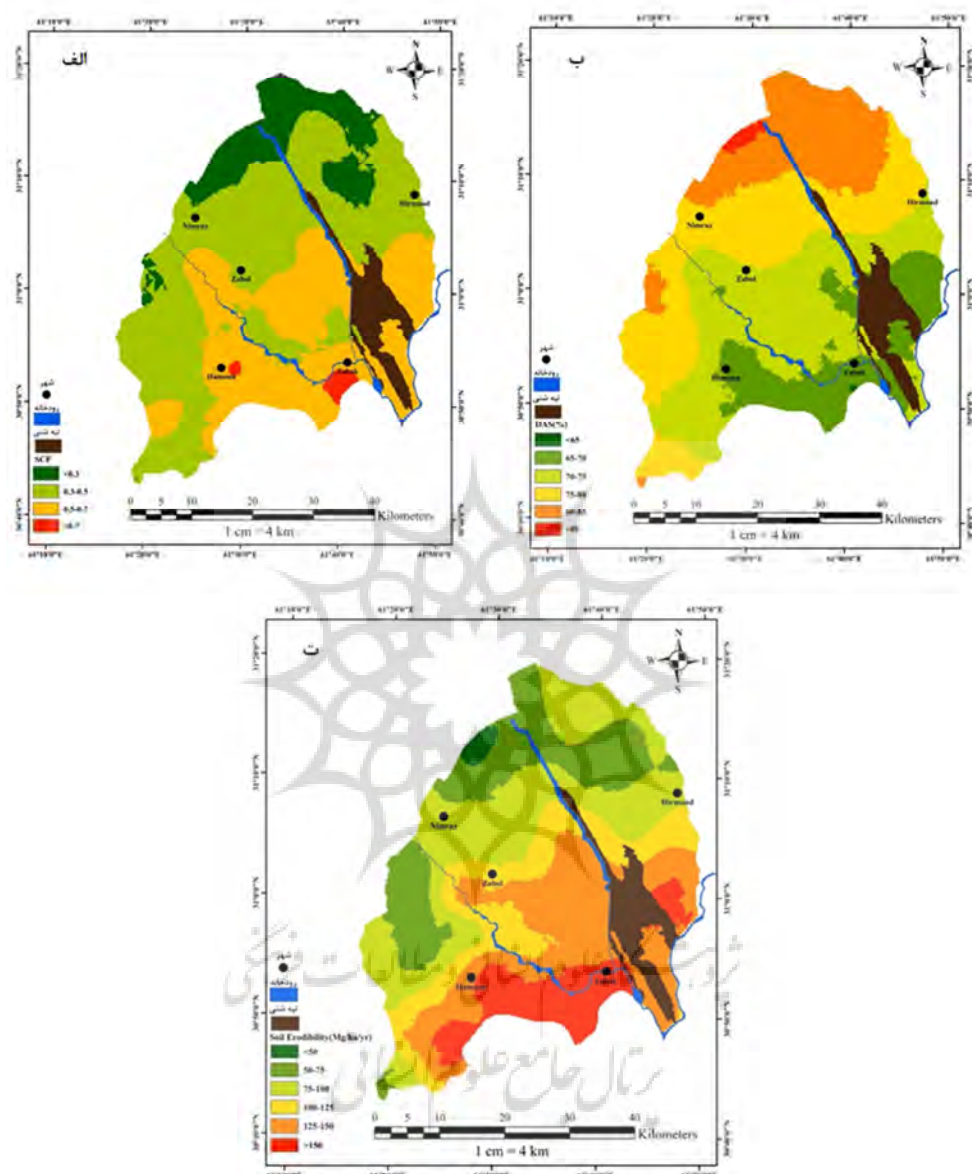
شاخص	روش	متغیر کمکی	مدل	RMSE	ME
EF	کریجینگ	-	معمولی	۲۰/۰۱۱	۰/۱۵۵
EF	کریجینگ	-	ساده	۲۰/۰۹۲	-۰/۰۹۵
EF	کو کریجینگ	Sand/Clay	معمولی	۱۹/۹۱۱	۰/۱۳۴
EF	کو کریجینگ	Sand/Clay	ساده	۱۷/۹۶۶	۰/۴۹۶
EF	IDW	-	توان ۱	۲۰/۴۲۳	۰/۲۵۹
EF	IDW	-	توان ۲	۲۱/۳۶۲	-۰/۰۲۸
EF	IDW	-	توان ۳	۲۲/۴۸۱	۰/۰۹۲
DAS	کریجینگ	-	معمولی	۱۶/۱۶۰	-۰/۰۶۲
DAS	کریجینگ	-	ساده	۱۵/۱۲۸	-۰/۰۶۴
DAS	کو کریجینگ	Clay	معمولی	۱۵/۱۰۳	-۰/۰۶۹
DAS	کو کریجینگ	Clay	ساده	۱۴/۴۸۱	۰/۰۶۳
DAS	IDW	-	توان ۱	۱۵/۷۷۰	-۰/۳۴۸
DAS	IDW	-	توان ۲	۱۶/۵۹۱	-۰/۴۷۷
DAS	IDW	-	توان ۳	۱۷/۴۶۴	-۰/۵۳۳
فرسایش خاک	کریجینگ	-	معمولی	۹۰/۰۲۶	۰/۳۱۷
فرسایش خاک	کریجینگ	-	ساده	۸۹/۳۷۲	-۰/۷۷۲
فرسایش خاک	کو کریجینگ	Sand	معمولی	۸۹/۸۴۷	۰/۲۶۸
فرسایش خاک	کو کریجینگ	Sand	ساده	۸۵/۵۷۶	-۱/۱۹۶
فرسایش خاک	IDW	-	توان ۱	۹۳/۲۹۰	-۰/۶۶۵
فرسایش خاک	IDW	-	توان ۲	۹۸/۷۸۷	۰/۵۱۷
فرسایش خاک	IDW	-	توان ۳	۱۰۴/۳۳۶	۱/۰۰۷

مطالعات نشان داده که مقدار زیاد شن در بخش های جنوبی منطقه، به دلیل نزدیکی به رودخانه سیستان است و احتمالاً در نتیجه رسوب و نشست سریع شن از حالت تعلیق در هنگام وقوع سیل می باشد (پهلوان راد و اکبری مقدم، ۲۰۱۸). در کل دشت نیز شهر یاری و همکاران (۲۰۱۹) اظهار داشتند که بخش های مرکزی و جنوبی آن که در

مجاورت رودخانه سیستان قرار دارند، دارای مقدار بیشتری شن می‌باشد و شمال، شمال غرب و غرب منطقه کمترین میزان شن را دارند. علاوه بر آن، میزان بسیار بالای شن در برخی مناطق احتمالاً ناشی از رسوب بادی در طول وزش «بادهای ۱۲۰ روزه» است. بادهای شدید از شمال و شمال - غربی می‌وزد و ذرات شن و ماسه را در طی ماه خرداد تا اواسط شهریور که جریان آب در رودخانه هیرمند متوقف می‌شود، موجب رسوب‌گذاری و همچنین توزیع مجدد شن می‌شوند (پهلوان‌راد و اکبری‌مقدم، ۲۰۱۸).



شکل ۲: پهنه‌بندی شاخص : الف: EF، ب: EFF، پ: EFL و ت: EFB (منبع: نویسندگان)



شکل ۳: پهنه‌بندی شاخص : الف: SCF، ب: DAS، پ: Soil erodibility (منبع: نویسندگان)

همچنین در کل دشت سیستان بیشترین درصد سیلت در شمال شرق، شرق و به‌ویژه غرب منطقه مورد مطالعه قرار دارد و درصد رس بیشتر در شمال و شمال غرب منطقه مورد مطالعه غالب است (شهریاری و همکاران، ۲۰۱۹). پهلوان‌راد و اکبری‌مقدم (۲۰۱۸) در پژوهش خود بیان کردند که میزان سیلت در محدوده اطراف رودخانه سیستان بالا است و از آنجایی که «فاصله از رودخانه» مهم‌ترین متغیر کمکی در مطالعه این پژوهشگران بود، به احتمال زیاد مقدار رس بالاتر در این خاک‌ها نتیجه زمان ته‌نشینی کندتر سیلت و رس از رسوبات سیلابی بالای رودخانه است. به عبارت دیگر، تغییرات مقادیر ذرات معدنی خاک در منطقه وابسته به ماهیت ژئومورفیک منطقه (دشت سیلابی و

دلتایی) بوده و هم‌راستا با تغییرات رژیم رسوب‌گذاری رودخانه هیرمند و شاخه‌های آن در دشت می‌باشد و همچنین فرایندهای فرسایش بادی و رسوب‌گذاری آن در منطقه بر این تغییرات به‌صورت کمی و مکانی اثر می‌گذارد (جمال-زئی ثمره و همکاران، الف، ۱۴۰۰). از این‌رو، این عوامل به‌صورت مستقیم و با توجه به نتایج این مطالعه بر شاخص‌های فرسایش‌پذیری بادی خاک در دشت سیستان موثر هستند و نتایج این پژوهش می‌تواند کمک شایانی به مدیریت اراضی و تصمیم‌سازی درخصوص توسعه مناطق مختلف نماید.

نتیجه‌گیری

در مناطق خشک با فعالیت بادی قابل توجه، فرسایش بادی و شاخص‌های فرسایش‌پذیری بادی خاک از پارامترهای محیطی بسیار مهم هستند که می‌توانند برای تصمیم‌گیری و مدیریت اراضی به کار گرفته شوند. منطقه سیستان با دارا بودن اقلیمی خشک و وزش بادهای بسیار شدید، یکی از مناطق درگیر با فرسایش بادی است. از این‌رو مدل‌سازی مکانی شاخص‌های فرسایش‌پذیری بادی خاک با استفاده از روش‌های زمین آمار در این مطالعه صورت گرفت و نتایج نشان داد که در مجموع می‌توان اظهار داشت که خاک‌های دشت سیستان دارای بافتی متوسط تا درشت با غالبیت ذرات شن و سیلت بودند و حاصلخیزی کمی داشتند و جزء خاک‌های شور و سدیک بودند. نتایج همبستگی بین شاخص‌های فرسایش‌پذیری بادی مورد مطالعه نشان از همبستگی بالای این شاخص‌ها با یکدیگر داشت که نشان می‌دهد انتخاب این شاخص‌ها به دلیل همبستگی بالا در خصوص فرسایش‌پذیری بادی خاک می‌باشد. همبستگی بالای بین EF، DAS و تخمین فرسایش خاک نشان‌دهنده اهمیت شاخص‌های آزمایشگاهی در برآورد فرسایش‌پذیری و تطبیق آنها با محیط طبیعی است. با این وجود بین شاخص‌های فرمولی، SCF و EFF بالاترین همبستگی را با EF نشان دادند و قابل توصیه در این منطقه می‌باشند.

بهترین مدل تغییرنما برای EFF، SCF، EFB و DAS مدل کروی و برای EFL، EF و فرسایش خاک مدل نمایی بود. همچنین تناسب مکانی برای کلیه شاخص‌های مورد مطالعه در کلاس تناسب مکانی متوسط قرار گرفت. روش کوکریجینگ ساده با متغیر کمکی شن برای EFF و فرسایش خاک، کوکریجینگ معمولی برای SCF و EFL با متغیر کمکی نسبت شن بر رس، برای EFB و DAS روش کوکریجینگ ساده با متغیر کمکی رس و کوکریجینگ ساده برای EF با متغیر کمکی نسبت شن بر رس به عنوان بهترین و دقیق‌ترین روش‌های پیش‌بینی برای تهیه نقشه شاخص‌های فرسایش‌پذیری بادی خاک در دشت سیستان عمل نمودند. الگوی تغییرات مکانی شاخص‌های فرسایش‌پذیر بادی مورد مطالعه در دشت سیستان مشابه هستند و در قسمت‌های جنوبی منطقه بیشترین مقادیر و در قسمت‌های شمالی و غربی کمترین مقادیر را دارند؛ البته DAS رویه معکوسی با این موارد را نشان داد که به ماهیت ضد فرسایشی این شاخص مربوط می‌گردد. با توجه به اینکه متغیرهای کمکی منتخب در مدل‌سازی مکانی شاخص‌های فرسایش‌پذیری بادی خاک در منطقه از اجزاء اندازه ذرات بودند، به نظر می‌رسد تطابق بالایی بین نحوه پراکنش شاخص‌های فرسایش‌پذیری بادی با نحوه پراکنش اندازه ذرات خاک در منطقه وجود دارد. همان‌طور که پژوهش‌ها نشان داده، تغییرات مقادیر ذرات معدنی خاک در منطقه وابسته به ماهیت ژئومورفیک منطقه و هم‌راستا با تغییرات رژیم رسوب‌گذاری رودخانه هیرمند و شاخه‌های آن و همچنین فرایندهای فرسایش بادی و رسوب‌گذاری آن در

دشت می‌باشد. نتایج این مطالعه (مدل‌سازی مکانی شاخص‌های فرسایش‌پذیری بادی خاک) می‌تواند برای مدیران، تصمیم‌سازان و کاربران اراضی در راستای توسعه و زیست پایدار حائز اهمیت و کاربردی باشد.

تقدیر و تشکر

این مطالعه با حمایت مالی (شماره طرح: PR-UOZ1402-9) دانشگاه زابل انجام شده است. بدین وسیله، نویسندگان مراتب سپاس خود را از معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه زابل برای حمایت مالی انجام‌شده اعلام می‌دارند.

منابع

- ارباب، منیژه؛ پهلوانروی، احمد؛ پیری صحراگرد، حسین؛ امیری، میثم. (۱۳۹۷). ارزیابی دقت روش‌های زمین‌آمار و شبکه عصبی مصنوعی در برآورد سرعت آستانه فرسایش بادی (مطالعه موردی: منطقه‌ی جزینک، دشت سیستان). پژوهش‌های فرسایش محیطی. ۸ (۳)، صص ۸۷ تا ۱۰۵.
- استواری، یاسر؛ قربانی دشتکی، شجاع؛ بهرامی، حسینعلی؛ نادری، مهدی؛ عباسی، مؤگان. (۱۳۹۴). تغییرات مکانی فرسایش‌پذیری خاک و عوامل مؤثر بر آن در بالادست سد سیوند. پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۴ (۳)، صص ۱۲۷ تا ۱۴۴.
- اسدزاده، فرخ؛ خسروی اقدم، کمال؛ یغمائیان مهابادی، نفیسه؛ رمضان‌پور، حسن. (۱۳۹۷). تغییرات مکانی ذرات معدنی خاک با استفاده از زمین‌آمار و سنجش‌ازدور جهت پهنه‌بندی بافت خاک. آب و خاک، ۳۲ (۶)، صص ۱۲۰۷ تا ۱۲۲۲.
- اولیایی، حمیدرضا؛ صالحی، علیرضا؛ زارعیان، غلامرضا. (۱۴۰۳). ارزیابی روش‌های زمین‌آمار برای پهنه‌بندی برخی ویژگی‌های خاک منطقه دارنگان با کاربری‌های مختلف، استان فارس. تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۵ (۱)، صص ۹۷ تا ۱۱۶.
- بهنام، ولی؛ غلامعلی زاده آهنگر، احمد؛ رحمانیان، محمد؛ بامری، ابوالفضل. (۱۳۹۸). بررسی توزیع مکانی برخی از ویژگی‌های فیزیک و شیمیایی خاک با استفاده از روش‌های زمین‌آمار (مطالعه موردی: مسیر زابل به زاهدان). محیط زیست و مهندسی آب، ۵ (۳)، صص ۲۵۱ تا ۲۶۳.
- تاجیک، فواد؛ رحیمی، حسن؛ پذیرا، ابراهیم. (۱۳۸۱). اثر مواد آلی خاک، هدایت الکتریکی و نسبت جذب سدیم بر مقاومت کششی خاکدانه‌ها. مجله‌ی علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، ۳، صص ۱ تا ۱۵.
- جعفرنیا، شهرام؛ اکبری نیا، مسلم. (۱۳۹۳). بررسی توزیع مکانی برخی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک و آب جنگل‌های مانگرو جزیره قشم با استفاده از زمین‌آمار. تحقیقات جنگل و صنوبر ایران، ۲۲ (۴)، صص ۶۷۳ تا ۶۸۶.
- جمالزئی ثمره، یونس؛ شهریاری، علی؛ پهلوان راد، محمدرضا؛ ضیائی جاوید، علیرضا؛ بامری، ابوالفضل. (۱۴۰۰). تهیه نقشه‌های سه بُعدی اندازه ذرات خاک در دشت سیلابی سیستان. هفدهمین کنگره علوم خاک ایران و چهارمین همایش ملی مدیریت آب در مزرعه، موسسه تحقیقات خاک و آب کشور، کرج.
- جمالزئی ثمره، یونس؛ شهریاری، علی؛ پهلوان راد، محمدرضا؛ ضیائی جاوید، علیرضا؛ بامری، ابوالفضل. (ب، ۱۴۰۰). کاربرد زمین‌آمار در تهیه نقشه‌های سه‌بعدی درصد رطوبت اشباع خاک (مطالعه موردی: دشت سیستان). هفدهمین کنگره علوم خاک ایران و چهارمین همایش ملی مدیریت آب در مزرعه، موسسه تحقیقات خاک و آب کشور، کرج.
- دانش شهرکی، مهدی؛ شهریاری، علی؛ گنجعلی، مجتبی؛ بامری، ابوالفضل. (۱۳۹۵). تغییرات فصلی و مکانی نرخ گردوغبار حمل‌شده از روی شهرهای دشت سیستان و ارتباط آن با برخی پارامترهای اقلیمی. نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۶ (۲۳)، صص ۱۹۹ تا ۲۱۵.

دلارامی، امین؛ غلامعلی‌زاده، احمد؛ شعبانی، اسماء. (۱۳۹۹). تعیین ترکیب بهینه متغیرهای ورودی با استفاده از آزمون گاما برای مدل‌سازی پتاسیم قابل جذب در سیستم عصبی - فازی (مطالعه موردی: منطقه میانکنگی؛ زابل). تحقیقات علوم زراعی در مناطق خشک، ۶۷، ۲ (۱)، صص ۶۷ تا ۷۵.

دهمرد، علیرضا؛ شهریاری، علی؛ پهلوان راد، محمدرضا؛ شعبانی، اسماء؛ قربانی، مریم. (۱۴۰۰). مدل‌سازی عملکرد گندم با استفاده از برخی خصوصیات خاک در مقیاس مزرعه (مطالعه موردی: مزرعه تحقیقاتی سد سیستان، دانشگاه زابل). مهندسی زراعی، ۴۴ (۱)، صص ۸۱ تا ۹۵.

رضازاده شمخال، سهیلا؛ غلامعلی‌زاده، احمد؛ گزمه، سعید؛ فروغی فر، حامد؛ بامری، ابوالفضل. (۱۳۹۵). ارزیابی روش‌های مختلف درون یابی در برآورد مکانی برخی ویژگی‌های خاک دشت سیستان. دانش آب و خاک ۲۶، (شماره ۲ بخش ۲)، صص ۱۵۱ تا ۱۶۲.

رفاهی، حسینقلی. (۱۳۹۴). فرسایش آبی و کنترل آن (چاپ هفتم). انتشارات دانشگاه تهران، ۶۷۴ ص.

علی‌صوفی، مسعود؛ شهریاری، علی. (۱۳۹۹). بررسی برخی خصوصیات شیمیایی و میزان برخی عناصر غذایی همراه با گردوغبار دشت سیستان. مخاطرات محیط طبیعی ۹ (۲۳)، صص ۹۹ تا ۱۱۶.

غلامعلی‌زاده آهنگر، احمد؛ سارانی، فریدون؛ هاشمی، مسعود؛ شعبانی، اسماء. (۱۳۹۳). مقایسه روش‌های رگرسیون خطی، زمین‌آماري و شبکه عصبی مصنوعی در مدل‌سازی کربن آلی در اراضی خشک دشت سیستان. نشریه آب و خاک، ۶ (۲۸)، صص ۱۲۵۰-۱۲۶۰.

متین‌فر، حمیدرضا؛ مقصودی، زیبا؛ موسوی، سید روح‌الله؛ جلالی، مجتوبه. (۱۳۹۹). ارزیابی روش‌های یادگیری ماشین در نقشه‌برداری رقومی کربن آلی خاک‌های زراعی (بخشی از دشت خرم‌آباد). نشریه آب و خاک، ۴ (۲۴)، صص ۳۲۷ تا ۳۴۳.

میر، حمزه؛ غلامعلی‌زاده، احمد؛ شعبانی، اسماء. (۱۳۹۴). تعیین مهم‌ترین پارامترهای موثر خاک بر فراهمی فسفر در دشت سیستان. نشریه آب و خاک، ۶ (۲۹)، صص ۱۶۷۴ تا ۱۶۸۷.

نظری سامانی، علی‌اکبر؛ احسانی، امیر هوشنگ؛ گلیوری، احمد؛ عبدالشاه‌نژاد، مهسا. (۱۳۹۴). مقایسه نتایج مدل‌های RWEQ و IRIFR در تعیین تأثیر نوع مدیریت اراضی بر فرسایش بادی. مدیریت بیابان، ۶، صص ۳۹ تا ۵۳.

نوری، علیرضا؛ افتخاری، کامران؛ اسفندیاری، مهرداد؛ محمدی ترکاشوند، علی؛ احمدی، عباس. (۱۴۰۱). برآورد جزء فرسایش‌پذیری بادی خاک به کمک مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی و تلفیق شبکه عصبی مصنوعی با الگوریتم ژنتیک در بخشی از اراضی جنوب شرقی قزوین. پژوهش‌های فرسایش محیطی، ۱۲ (۱)، صص ۱۴۵ تا ۱۵۹.

واعظی، علیرضا؛ بهرامی، حسینعلی؛ صادقی، سیدحمیدرضا؛ مهدیان، محمدحسین. (۱۳۸۷). تعیین خطای برآورد عامل فرسایش‌پذیری USLE در خاک‌های آهکی شمال‌غربی ایران. آب و خاک، ۲۲ (۵۲)، صص ۶۱ تا ۷۱.

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

یغمائیان مهابادی، نفیسه؛ سمیعی، کسری؛ زواره، محسن؛ رمضانپور، حسن. (۱۳۹۸). بررسی تغییرات مکانی برخی ویژگی‌های خاک و ارتباط آن با عملکرد چای در منطقه فومن گیلان. تحقیقات کاربردی خاک، ۷ (۲)، صص ۸۲ تا ۹۶.

Abdel-Rahman, M.A., Zakarya, Y.M., Metwaly, M., Koubouris, G. (2021). Deciphering Soil Spatial Variability through Geostatistics and Interpolation Techniques. Sustainability, 13, pp 194.

Akhzari, D., Farokhzadeh, B., Saeedi, C. I., Goodarzi, M. (2015). Effects of Wind Erosion and Soil Salinization on Dust Storm Emission in Western Iran, Journal of Rangeland Science, 5(1), pp 36-48.

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.

Borrelli, P., Ballabio, C., Panagos, P. and Montanarella, L. (2014). Wind erosion susceptibility of European soils. Geoderma, 232-234, pp 471-478.

Borrelli, P., Lugato, E., Montanarella, L., Panagos, P. (2017). A New Assessment of Soil Loss Due to Wind Erosion in European Agricultural Soils Using a Quantitative Spatially Distributed Modelling Approach. Land Degradation & Development, 28, pp 335 - 344.

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, pp 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 American Journal*, 58, pp 1501-1511.
- Colazo, J.C., Buschiazzi, D.E. (2010). Soil dry aggregate stability and wind erodible fraction in a semiarid environment of Argentina. *Geoderma*, 159, pp 228-236.
- Delbari, M., Afrasiab, P., Gharabaghi, B., Amiri, M., Salehian, A. (2019). Spatial variability analysis and mapping of soil physical and chemical attributes in a salt-affected soil. *Arabian Journal of Geosciences*, 12:3, pp 68-86. doi:10.1007/s12517-018-4207-x.
- Fryrear, D.W., Saleh, A., Bilbro, J.D., Schomberg, H.M., Stout, J.E., Zobeck, T.M. (1998). Revised Wind Erosion Equation (RWEQ), Wind Erosion and Water Conservation Research Unit, USDA-ARS- SPA Cropping Systems Research Laboratory. Technical Bulletin No 1.
- Gholami V., Sahour H., Amri M. A. H. (2021). Soil erosion modeling using erosion pins and artificial neural networks. *Catena*, 196, pp 104902.
- Guo, Z., Chang, C., Wang, R., Li, J. (2017). Comparison of different methods to determine the wind-erodible fraction of soil with rock fragments under different tillage/management. *Soil & Tillage Research*, 168, pp 42-49.
- Han, Y., Zhao, W., Ding, J., 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, pp 166639.
- Jiang, H.L., Liu, G.S., Liu, S.D., Li, E.H., Wang, R., Yang, Y.F., Hu, H.C. (2012). Delineation of site-specific management zones based on soil properties for a hillside field in central China. *Archives of Agronomy and Soil Science*. 58:10, pp 1075-1090.
- Kadović, R., Miljković, P., Perić, V., Živanović, N., Bohajar, Y.M.A., Belanović Simić, S. (2014). An analysis of an erodible fraction of sandy soils in Deliblato Sands. *Erozija, Udruženje bujičara Srbije*, 40, pp 38-52. (in Serbian with English abstract)
- 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.
- Karimi Nezhad, M. T., Tabatabaie, S. M., Gholami, A. (2015). Geochemical assessment of steel smelter-impacted urban soils, Ahvaz, Iran. *J. Geochem. Explor.* 152, pp 91-109.
- Kouchami-Sardoo I., Shirani H., Esfandiarpour-Boroujeni I., Besalatpour A., Hajabbasi M. (2020). Prediction of soil wind erodibility using a hybrid Genetic algorithm–Artificial neural network method. *Catena*, 187, pp 104315.
- Ling, N., Zhibao, D., Weiqiang, X., Chao, L., Nan, X., Shaopeng, S., Fengjun, X., Lingtong, D. (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), pp 27-38.
- López, M.V., de Dios Herrero, J.M., Hevia, G.G., Gracia, R., Buschiazzi, D.E. (2007). Determination of the wind-erodible fraction of soil using different methodologies. *Geoderma*, 139, pp 407-411.
- Mina, M., Rezaei, M., Sameni, A., Ostovari, Y., Ritsema, C.J. (2022). Predicting wind erosion rate using portable wind tunnel combined with machine learning algorithms in calcareous soils, southern Iran. *Journal of environmental management*, 304, pp 114171.
- Mina, M., Rezaei, M., Sameni, A., Riksen, M.J.P.M., Ritsema, C. (2023). Estimation of Soil Erodibility by Wind Using Pedo-Transfer and Spectro-Transfer Functions and Machine Learning Models in Fars Province. *Geoderma*, 438, pp 116612.
- Mirakzei, K., Pahlavan-Rad, M., Shahriari, A., Bameri, A. (2018). Digital soil mapping of deltaic soils: a case of study from Hirmand (Helmand) river delta. *Geoderma*, 313, pp 233-240.
- Pahlavan-Rad, M., Dahmardeh, K., Brungard, C. (2018). Predicting soil organic carbon concentrations in a low relief landscape, eastern Iran. *Geoderma Regional*, 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 flood plain (case study from eastern Iran). *Catena*, 160, pp 275-281.
- Pásztor, L., Négyesi, G., Laborcz, A., Kovacs, T. (2016). Integrated spatial assessment of wind erosion risk in Hungary. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 16, pp 2421-2432. <https://doi.org/10.5194/nhess-16-2421-2016>.
- Pi, H., Huggins, D.R., Sharratt, B. (2019). Dry aggregate stability of soils influenced by crop rotation, soil amendment, and tillage in the Columbia Plateau. *Aeolian Research*, 40, pp 65-73.
- 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, pp 25-34.
- 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.
- 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*, 6 (1), pp 1-12. DOI: 10.1080/03650340.2015.1040398
- Schaetzl, R. J., Anderson, S. (2005). *Soils: Genesis and Geomorphology*, Cambridge University Press, 833 Pp.
- Selmy, S.A., Abd El-Aziz, S., El-Desoky, A., El-Sayed, M.A. (2022). Characterizing, predicting, and mapping soil spatial variability in the Gharb El-Mawhoub area of Dakhla Oasis using geostatistics and GIS approaches. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 21, pp 383-396.

- 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, pp 104-149. doi: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, pp 69-80. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.07.012>.
- Skidmore, E.L., Hagen, L.J., Armbrust, D.V., Durar, A.A., Fryrear, D.W., Potter, K.N., Wagner, L.E., 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.
- Zobeck, T.M., Van Pelt, R.S. (2014). *Wind Erosion*. Publications from USDA-ARS / UNL Faculty. 1409.



References

References (in Persian)

- Ali-Soufi, M., 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), pp 99-116. [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., Rahmadian, 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]
- Danesh shahraki, M, Shahriari, A, Ganjali, M, Bameri, A. (2017). Seasonal and Spatial Variability of Airborne Dust Loading Rate over the Sistan Plain Cities and its Relationship with some Climatic Parameters. *J. of Water and Soil Conservation*, 6 (23), pp 199-216. [In Persian]
- Dahmardeh, A., Shahriari, A., Pahlavan Rad, M. R., Shabani, A., Ghorbani, M. (2021). Modeling wheat yield using some soil properties at the field scale (Case study: Sistan dam research farm, university of Zabol). *Agricultural Engineering*, 44(1), pp 81-95. [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]
- Gholamallizade 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]
- 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]
- Jafarnia, S., Akbarinia, M. 2014. Investigation of spatial distribution of soil and water properties by use of geostatistical in Mangrove forest of Qeshm Island. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*. 22:4, pp 673-686. [in Persian]
- Jamalzei Samareh, Y., Shahriari, A., Pahlavan Rad, M., Ziaei Javaid, A., Bameri, A. (a, 2021). Preparation of three-dimensional maps of the size of soil particles in the floodplain of Sistan. The seventeenth Iran Soil Science Congress and 4th National Farm Water Management Conference, Soil and Water Research Institute, Karaj. [in Persian]
- Jamalzei Samareh, Y., Shahriari, A., Pahlavan Rad, M., Ziaei Javaid, A., Bameri, A. (b, 2021). Application of geostatistics in preparing three-dimensional maps of saturation percentage of soil (Case study: Sistan plain). The seventeenth Iran Soil Science Congress and 4th National Farm Water Management Conference, Soil and Water Research Institute, Karaj. [in Persian]
- Matinfar, H., Maqsoodi, Z., Mousavi, S., Jalali, M. (2019). Evaluation of machine learning methods in digital organic carbon mapping of agricultural soils (part of Khorram Abad plain). *Water and Soil magazine*. 24:4, pp 343-327. [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]
- Nazari Samani, A. A., Ehsani, A. H., Golivari, A., Abdolshahnejad, M. (2015). Comparing the Results of RWEQ and IRIFR Models for Determining Land Management Effects on Wind Erosion. *Desert Management*, 3(6), pp 39-53. [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]
- Ostwari Y., Qurbani Dashtaki, S., Bahrami, H., Naderi, M., Abbasi, M. (2014). Spatial changes of soil erodibility and factors affecting it upstream of Sivand dam. *Quantitative Geomorphology Research*, 4 (3), pp 127-144. [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]
- Refahi, H. (2014). *Water erosion and its control* (7th edition). Tehran University Press, 674 p.
- Rezazadeh, 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]
- 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]

- Vaezi, A., Bahrami, H., Sadeghi, S., Mahdian, M. (2008). Determining the estimating error of USLE erodibility factor in calcareous soils of Northwestern Iran. *Water and Soil*, 22(2), pp 61-71. [in Persian]
- Yaghmaeian Mahabadi, N., Samiei, K., Zavvareh, M., Ramezanpour, H. (2019). Spatial variation of some soil properties and their relationship to tea yield in Fouman region, Guilan. *Applied Soil Research*. 7:2, pp 82-96. [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, pp 194.
- Akhzari, D., Farokhzadeh, B., Saeedi, C. I., Goodarzi, M. (2015). Effects of Wind Erosion and Soil Salinization on Dust Storm Emission in Western Iran, *Journal of Rangeland Science*, 5(1), pp 36-48.
- 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.
- Borrelli, P., Ballabio, C., Panagos, P. and Montanarella, L. (2014). Wind erosion susceptibility of European soils. *Geoderma*, 232–234, pp 471-478.
- Borrelli, P., Lugato, E., Montanarella, L., Panagos, P. (2017). A New Assessment of Soil Loss Due to Wind Erosion in European Agricultural Soils Using a Quantitative Spatially Distributed Modelling Approach. *Land Degradation & Development*, 28, pp 335 - 344.
- 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, pp 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 American Journal*, 58, pp 1501-1511.
- Colazo, J.C., Buschiazzi, D.E. (2010). Soil dry aggregate stability and wind erodible fraction in a semiarid environment of Argentina. *Geoderma*, 159, pp 228-236.
- Delbari, M., Afrasiab, P., Gharabaghi, B., Amiri, M., Salehian, A. (2019). Spatial variability analysis and mapping of soil physical and chemical attributes in a salt-affected soil. *Arabian Journal of Geosciences*, 12:3, pp 68-86. doi:10.1007/s12517-018-4207-x.
- Fryrear, D.W., Saleh, A., Bilbro, J.D., Schomberg, H.M., Stout, J.E., Zobeck, T.M. (1998). Revised Wind Erosion Equation (RWEQ), Wind Erosion and Water Conservation Research Unit, USDA-ARS- SPA Cropping Systems Research Laboratory. Technical Bulletin No 1.
- Gholami V., Sahour H., Amri M. A. H. (2021). Soil erosion modeling using erosion pins and artificial neural networks. *Catena*, 196, pp 104902.
- Guo, Z., Chang, C., Wang, R., Li, J. (2017). Comparison of different methods to determine the wind-erodible fraction of soil with rock fragments under different tillage/management. *Soil & Tillage Research*, 168, pp 42–49.
- Han, Y., Zhao, W., Ding, J., 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, pp 166639.
- Jiang, H.L., Liu, G.S., Liu, S.D., Li, E.H., Wang, R., Yang, Y.F., Hu, H.C. (2012). Delineation of site-specific management zones based on soil properties for a hillside field in central China. *Archives of Agronomy and Soil Science*. 58:10, pp 1075-1090.
- Kadović, R., Miljković, P., Perić, V., Živanović, N., Bohajar, Y.M.A., Belanović Simić, S. (2014). An analysis of an erodible fraction of sandy soils in Deliblato Sands. *Erozija, Udruženje bujičara Srbije*, 40, pp 38–52. (in Serbian with English abstract)
- 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.
- Karimi Nezhad, M. T., Tabatabaai, S. M., Gholami, A. (2015). Geochemical assessment of steel smelter-impacted urban soils, Ahvaz, Iran. *J. Geochem. Explor.* 152, pp 91-109.
- Kouchami-Sardoo I., Shirani H., Esfandiarpour-Boroujeni I., Besalatpour A., Hajabbasi M. (2020). Prediction of soil wind erodibility using a hybrid Genetic algorithm–Artificial neural network method. *Catena*, 187, pp 104315.
- Ling, N., Zhibao, D., Weiqiang, X., Chao, L., Nan, X., Shaopeng, S., Fengjun, X., Lingtong, D. (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), pp 27-38.
- López, M.V., de Dios Herrero, J.M., Hevia, G.G., Gracia, R., Buschiazzi, D.E. (2007). Determination of the wind-erodible fraction of soil using different methodologies. *Geoderma*, 139, pp 407–411.
- Mina, M., Rezaei, M., Sameni, A., Ostovari, Y., Ritsema, C.J. (2022). Predicting wind erosion rate using portable wind tunnel combined with machine learning algorithms in calcareous soils, southern Iran. *Journal of environmental management*, 304, pp 114171.
- Mina, M., Rezaei, M., Sameni, A., Riksen, M.J.P.M., Ritsema, C. (2023). Estimation of Soil Erodibility by Wind Using Pedo-Transfer and Spectro-Transfer Functions and Machine Learning Models in Fars Province. *Geoderma*, 438, pp 116612.
- Mirakzehi, K., Pahlavan-Rad, M., Shahriari, A., Bameri, A. (2018). Digital soil mapping of deltaic soils: a case of study from Hirmand (Helmand) river delta. *Geoderma*, 313, pp 233-240.
- Pahlavan-Rad, M., Dahmardeh, K., Brungard, C. (2018). Predicting soil organic carbon concentrations in a low relief landscape, eastern Iran. *Geoderma Regional*, 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 flood plain (case study from eastern Iran). *Catena*, 160, pp 275-281.
- Pásztor, L., Négyesi, G., Laborczi, A., Kovacs, T. (2016). Integrated spatial assessment of wind erosion risk in Hungary. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 16, pp 2421-2432. <https://doi.org/10.5194/nhess-16-2421-2016>.
- Pi, H., Huggins, D.R., Sharratt, B. (2019). Dry aggregate stability of soils influenced by crop rotation, soil amendment, and tillage in the Columbia Plateau. *Aeolian Research*, 40, pp 65-73.
- 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, pp 25-34.
- 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.
- 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*, 6 (1), pp 1-12. DOI: 10.1080/03650340.2015.1040398
- Schaetzl, R. J., Anderson, S. (2005). *Soils: Genesis and Geomorphology*, Cambridge University Press, 833 Pp.
- Selmy, S.A., Abd El-Aziz, S., El-Desoky, A., El-Sayed, M.A. (2022). Characterizing, predicting, and mapping soil spatial variability in the Gharb El-Mawhoub area of Dakhla Oasis using geostatistics and GIS approaches. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 21, pp 383-396.
- 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, pp 104-149. doi:10.1016/j.catena.2019.104149.
- Shiyaty, 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, pp 69-80. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.07.012>.
- Skidmore, E.L., Hagen, L.J., Armbrust, D.V., Durar, A.A., Fryrear, D.W., Potter, K.N., Wagner, L.E., 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.
- Zobeck, T.M., Van Pelt, R.S. (2014). *Wind Erosion*. Publications from USDA-ARS / UNL Faculty. 1409.