

Determining the effect of environmental variables on water erodibility of the Sistan floodplain

Amineh Hoseinbor¹, Ali Shahriari^{2*}, Ebrahim Shirmohammadi³, Alireza Ziaei Javid⁴, Meisam Rezaei⁵, Seyed Roohollah Mousavi⁶

¹MSc Graduated, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran

²Associate Professor, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran

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

⁴Researcher, Division of Soil Formation, Classification and Survey Researches, Soil and Water Research Institute, Karaj, Iran

⁵Assistant Professor, Soil and Water Research Institute, Education and Extension Organization, Karaj, Iran

⁶PhD in Soil Resource Management, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tehran, Tehran, Iran

Corresponding Author's E-mail: shahriari.ali@uoz.ac.ir

Received: 08 Apr. 2025 Accepted: 19 Apr. 2025
Revised: 14 Apr. 2025 Published: 25 Apr. 2025



Homepage: ijwer.uoz.ac.ir

Abstract: Soil erosion is a critical issue in agricultural ecosystems, with the soil erodibility factor (K) being a key indicator of erosion susceptibility. This study aimed to map the spatial distribution of the K-factor in part of the Sistan Plain, using digital soil mapping techniques. Soil samples from 460 points were analyzed for properties influencing K-factor, including texture, organic matter, structure, and permeability. Four scenarios combining geostatistical methods (ordinary kriging (OK) and ordinary co-kriging (OCK) with topographic and remote sensing variables were evaluated. Results showed that the OCK model integrated with topographic parameters (S1) achieved the highest accuracy (RMSE = 0.016). The K-factor ranged from 0.007 to 0.11 ton/MJ h/mm, with over 60% of the area classified as highly erodible, particularly in the north, northeast, west, and southwest regions. Soil texture, dominated by loam and silt loam, and low organic matter content contributed to high erodibility. The study highlights the effectiveness of combining geostatistical methods with environmental variables for erosion risk mapping and emphasizes the need for periodic monitoring and soil conservation planning in the Sistan Plain.

Keywords: K-factor, Geostatistics, Remote sensing, Geomorphometry, Cokriging

Introduction: Soil erosion is one of the most important aspects of soil and land degradation in agricultural ecosystems and natural resources. The soil erodibility factor (K) in the universal soil loss equation is one of the main influencing factors, indicating the sensitivity of soil to erosion. Today, digital soil mapping has become a powerful method for modeling and presenting accurate soil information and helping to make constructive decisions in the field of precision agriculture and environmental activities. One of the common methods of DSM are the geostatistical methods that have been developed and expanded in the past few decades and researchers have paid a lot of attention to them to describe the spatial changes of soil properties. Therefore, preparing a map of this factor using digital mapping techniques can provide very important information regarding the identification of areas at risk of erosion for users and land managers. Thus, the present study was conducted with the aim of preparing spatial distribution maps of K-factor in part of the Sistan plain.

Methodology: The studied area, with an area of about 235,000 hectares, includes a part of the Sistan plain in the east of Iran and in the north of Sistan and Baluchistan province, located on the Hirmand river delta. The soils are from young development (Entisols) to low to medium development (Aridisols) and in terms of moisture and thermal regime, they are aridic. and hyperthermic. Field studies included sampling from 460 points of the surface soil layer (0-15 cm) using a supervised random method covering the regions of Zabol, Hirmand, Zahak, Nimruz and Hamoun. The characteristics related to the estimation of K-factor (clay, silt, sand, very fine sand, organic matter, structural class and permeability class) were measured based on standard laboratory methods. To prepare

digital maps of K-factor, four scenarios along with two geostatistical methods, ordinary co-kriging (OCK) and ordinary kriging (OK), were used. The four scenarios included S1: OCK model + topographic parameters, S2: OCK model + remote sensing parameters (I), S3: OCK model + remote sensing parameters (II) and S4: only using the OK model. It is worth mentioning that the topography and remote sensing variables are extracted from the digital height model (DEM) with a resolution of 12.5 meters from ALOS-PALSAR satellite and images from Sentinel 1 and Sentinel 2 as auxiliary variables.

Results and Discussion: The results showed that the average of sand, very fine sand, silt and clay in the soils is 41.7, 17, 41.6 and 16.67%, respectively. Also, the average organic matter in the soil was measured at 0.98%, which is in the low content class. The highest amount of K factor calculated in the studied area was 0.11 and the lowest was 0.007 (with an average of 0.06) ton/MJ h/mm, which indicates the high erodibility of the soil in the area. The main textural classes of the studied soils were in three classes: Loam, Silt Loam and Sandy Loam (more than 80% of the samples) and other classes had a small share. It seems that in the soil texture classes with the dominant amount of silt, mainly the amount of clay and organic matter decreases, and this increases the erodibility of the soil. The results of fitting the experimental semivariograms showed that the exponential model had the highest efficiency compared to the others, and the spatial autocorrelation class for the four scenarios under review was strong except for OK. The results of the accuracy assessment of predictions showed that the first scenario (S1), which combined OCK and topographic attributes (S1: diffuse insolation, relative slope position, valley depth), had higher accuracy and lower error (0.016 = RMSE) compared to the other three scenarios (S2: combination of Sentinel-1 bands and NDVI; S3: NDVI, SAVI, IPVI; S4: OK). Statistical description of the data indicated that more than 60% of the data fell into the very high erodibility class, followed by 23% in the high erodibility class, indicating that the spatial distribution maps show that in most areas of the region, especially the north, northeast, west, and southwest, soils have very critical conditions in terms of erosion sensitivity, which should be prioritized in soil management and conservation planning.

Conclusion The present research was conducted with the aim of investigating the role of environmental variables in the preparation of the K-factor prediction map along with the use of COK and OK geostatistical models in a large part of the Sistan Plain. The results showed that the COK model combined with topographic auxiliary variables (extracted from DEM) had the highest accuracy value based on the index provided statistics. Also, the results showed that the changes in the K-factor are in line with the changes in the soil particles size in the region, and their changes in the Sistan plain depend on its geomorphic features (floodplain and delta) and coincide with the changes in the sedimentation regime of the Hirmand River and its branches in the plain. Additionally, due to the unstable geomorphological conditions of the Sistan plain, conducting periodic studies aimed at monitoring the temporal changes of this factor using other spatial modeling approaches such as machine learning algorithms is recommended for the future.

© 2023 University of Zabol, Zabol, Iran.



This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license) (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

تعیین تأثیر متغیرهای محیطی بر فرسایش‌پذیری آبی دشت سیلابی سیستان

آمینة حسین‌بُر^۱، علی شهریار^{۲*}، ابراهیم شیرمحمدی^۳، علیرضا ضیائی جاوید^۴، میثم رضائی^۵، سید روح
اله موسوی^۶

^۱دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران

^۲دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران

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

^۴پژوهش‌گر، بخش تحقیقات تشکیل، طبقه‌بندی و شناسایی خاک، موسسه تحقیقات آب و خاک کشور، کرج، ایران

^۵استادیار، موسسه تحقیقات آب و خاک کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران

^۶دانش‌آموخته دکتری مدیریت منابع خاک، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران، ایران

پست الکترونیکی نگارنده مسئول: shahriari.ali@uoz.ac.ir

وبگاه نشریه: ijwer.uoz.ac.ir



تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۱۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۲۵

تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۱/۳۰ تاریخ چاپ: ۱۴۰۴/۰۲/۰۵

چکیده: فرسایش خاک یک مسئله حیاتی در اکوسیستم‌های کشاورزی است که در آن عامل فرسایش‌پذیری آبی خاک (فاکتور-K) به عنوان شاخص کلیدی برای تعیین حساسیت به فرسایش شناخته می‌شود. این مطالعه با هدف مدل‌سازی مکانی فاکتور-K در بخشی از دشت سیستان و با استفاده از فن‌های نقشه‌برداری رقومی خاک انجام شد. نمونه‌های خاک از ۴۶۰ نقطه جمع‌آوری و برای ویژگی‌های موثر بر فاکتور-K، شامل بافت، ماده الی، ساختمان و نفوذپذیری، مورد تحلیل قرار گرفتند. چهار سناریو ترکیبی از روش‌های زمین‌آماري کریجینگ معمولی (OK) و کو-کریجینگ معمولی (COK) با متغیرهای توپوگرافی و سنجش‌ازدور ارزیابی شدند. نتایج نشان داد که مدل OCK با پارامترهای توپوگرافی (S1) بالاترین دقت را داشت (RMSE = 0.016). مقدار فاکتور-K بین ۰/۰۰۷ تا ۰/۱۱ تن بر مگاژول ساعت بر میلی‌متر متغیر بود و بیش از ۶۰٪ از منطقه؛ به‌ویژه در مناطق شمال، شمال شرق، غرب و جنوب غرب، به‌عنوان مناطق با فرسایش‌پذیری بالا طبقه‌بندی شدند. بافت خاک که عمدتاً لومی و سیلت لومی بود و محتوای کم ماده الی، به فرسایش‌پذیری بالا کمک کردند. این مطالعه اثربخشی ترکیب روش‌های زمین‌آماري با متغیرهای محیطی برای نقشه‌برداری خطر فرسایش را تایید می‌کند و نیاز به پایش دوره‌ای و برنامه‌ریزی حفاظت از خاک در دشت سیستان را برجسته می‌سازد.

کلیدواژگان: فاکتور-K، زمین‌آمار، سنجش‌ازدور، ژئومورفومتری، کوکریجینگ

۱- مقدمه

نقشه فاکتور-K فرآیندی زمان‌بر، هزینه‌بردار و وابسته به حجم زیاد فعالیت‌های آزمایشگاهی است. از طرفی از دیدگاه فنی محدوده تغییرات این فاکتور در مرز واحدهای نقشه‌های پلی‌گونی محدود می‌گردد که به‌طور جد این تغییرات مکانی وابسته به مقیاس آن مطالعه نیز است. همه این موارد در شرایطی است که این محیط شدن تغییرات در محدوده واحدهای نقشه خاک منجر به تغییرات ناگهانی در مرز بین واحدها می‌گردد که با اصل تغییرپذیری مکانی، تدریجی و پیوسته خاک‌ها در زمین‌نما متناقض است (Liu et al., 2020). برای غلبه بر این محدودیت در نقشه‌برداری فاکتور-K از روش‌های نقشه‌برداری رقومی خاک (DSM) که مبتنی بر مشاهدات، دانش خاک‌شناس و متغیرهای محیطی استوار است (Hartemink et al., 2008) می‌توان استفاده نمود. به‌عبارتی دیگر از طریق جمع‌آوری و ایجاد دستگاه‌های اطلاعات مکانی خاک با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی، مشاهدات میدانی و دستگاه‌های استنتاج مکانی خاک-زمین‌نما نقشه‌های پیش‌بینی ویژگی‌های مورد مطالعه همراه با آنالیز عدم قطعیت آن تهیه می‌شود (Lagacherie & McBratney, 2006).

امروزه نقشه‌برداری رقومی خاک به روشی قدرتمند برای مدل‌سازی و ارائه دقیق اطلاعات خاک و کمک به تصمیم‌گیری‌های سازنده در زمینه کشاورزی دقیق و فعالیت‌های زیست‌محیطی تبدیل شده است (Arrouays et al., 2014). علاوه بر این روش مذکور باعث شده تا پژوهشگران با دستیابی آسان و ارزان به اطلاعات زود یافت و داده‌های سنجش از دور، همچنین بهره‌گیری از افزایش سرعت پردازش و الگوهای داده‌کاوی در رایانه‌ها، بتوانند نقشه‌های پیوسته‌ای از تغییرات مکانی ویژگی‌های خاک تهیه کنند (Minasny & McBratney, 2016; Camera et al., 2017; Mousavi et al., 2022). روش‌های زمین‌آماري هستند که در چند دهه گذشته تکامل و گسترش یافته است و از سوی محققین برای توصیف تغییرات مکانی خصوصیات خاک به آن‌ها توجه زیادی شده است، از این رو، مطالعات متعددی در کشورهای

بخش عمده‌ای از کشور ایران در مناطق با آب و هوایی خشک و نیمه‌خشک قرار گرفته است و به‌طور جدی تحت تاثیر عوامل فرساینده است. این مسئله یک مشکل زیست‌محیطی جدی است که منجر به از دست رفتن تداوم خدمات اکوسیستمی می‌شود که حیات بشری را در معرض خطر قرار می‌دهد (Afzali et al., 2022). یکی از انواع فرسایش‌های مهم و مخرب در دنیا فرسایش آبی است و کشور ما نیز از این امر مستثنا نیست. برای نمونه محمدی و همکاران (Mohammdi et al., 2021) فرسایش خاک را با استفاده از مدل G2 که بر مبنای الگوریتم و ورودی‌های مدل RUSLE توسعه یافته است، آنالیز کردند و گزارش کردند که میانگین سالانه فرسایش خاک را برای ایران ۱۶/۵ تن در هکتار معادل ۲/۷ میلیارد تن برآورد کردند. امروزه برای تعیین مقدار فرسایش در حوزه‌های آبخیز از روش‌های مختلفی استفاده می‌شود. تعیین مناسب مقدار فرسایش نقش مهمی در مدیریت کاهش فرسایش خاک دارد. معادله جهانی فرسایش خاک که مدل USLE نامیده می‌شود، از پرکاربردترین معادلات برای برآورد فرسایش خاک است (Golshan et al., 2018) که پس از آن نسخه اصلاح شده آن (RUSLE) ارائه شد. در معادله جهانی فرسایش، فاکتور فرسایش‌پذیری خاک (K) یکی از عوامل تاثیرگذار بر مقدار تلفات خاک است و حساسیت خاک را به فرسایش آبی نشان می‌دهد، از این رو مطالعه و تعیین آن حائز اهمیت زیادی است (Panagos et al., 2014). از جمله عوامل موثر بر فرسایش خاک، پایداری فیزیکی خاک در برابر عوامل فرساینده است که با شاخص فرسایش‌پذیری در معادله جهانی فرسایش خاک مشخص می‌شود (Ostovari et al., 2016; Tian et al., 2022).

ارزیابی و نقشه‌برداری و تعیین فرسایش‌پذیری خاک می‌تواند در مدیریت و حفاظت از منابع طبیعی تاثیر بسزایی داشته باشد (Baskan et al., 2010) باید توجه داشت که وجود داده‌های کمی و مکانی می‌تواند باعث بهینه شدن مدیریت حفاظت خاک و کنترل فرسایش در مناطق مختلف گردد (Kamangar et al., 2015). رویکردهای مرسوم تهیه

منطقه کوشی هیمالیا با روش GIS و RS پرداختند که بر اساس نتایج آن‌ها خطر فرسایش در حوضه کوشی به هشت طبقه از خیلی کم تا بسیار زیاد تقسیم گردید. آلابز و همکاران (Alaboz et al., 2021)، در گزارش خود که به تهیه نقشه رقومی فاکتور-K پرداختند، عوامل فرسایش‌پذیری خاک را بر اساس رویکردهای زمین‌آماری در کشور ترکیه مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که بیشترین مقدار فرسایش متناسب با بیشترین مقدار پایداری خاکدانه‌ها و ضریب فرسایش خاک (K) بوده است. به‌طور کلی ایشان پیشنهاد نمودند که استفاده از GIS برای تخمین فاکتور-K در مقیاس‌های محلی (Merchán et al., 2023) تا ملی (Raj et al., 2023) کارا است. همچنین در راستای ره‌گیری عوامل موثر بر پراکنش مکانی فاکتور-K یو و همکاران (Yu et al., 2023) در مطالعه خود در کشور چین نشان دادند که پس از ویژگی‌های خاک (بعد فراکتال، میانگین وزنی پایداری خاکدانه)، پارامترهای توپوگرافی و اقلیمی نقش موثری را در پیش‌بینی این فاکتور ارائه نمودند، هرچند که عوامل انسانی و پوشش گیاهی کمترین میزان اهمیت را داشتند.

علی‌رغم مطالعات انجام‌شده در ایران و جهان در استفاده از روش‌های زمین‌آماری در پیش‌بینی ویژگی‌های خاک، اما در معدود مطالعاتی پژوهشگران به کاربرد ویژگی‌های غیرخاکی (متغیرهای محیطی: توپوگرافی و سنجش‌ازدور) در تلفیق با روش زمین‌آماری توجه نموده‌اند که به دلیل سادگی بیشتر در فرآیند برآزش در روش‌های زمین‌آماری نسبت به الگوریتم‌های یادگیری ماشین، این تحقیق به بررسی کارایی رویکردهای زمین‌آماری در قالب چهار سناریو مدل‌سازی مکانی (S1: فاکتور-K + متغیرهای توپوگرافی، S2: فاکتور-K + ترکیب باندهای سنتینل-۱ و NDVI؛ S3: فاکتور-K + NDVI، SAVI، IPVI؛ S4: کریجینگ معمولی (OK)) پرداخته است؛ بنابراین، با توجه به اهمیت و جایگاه دشت سیستان به‌عنوان یکی از دشت‌های سیلابی و آبرفتی کشور که در انتهای رودخانه هیرمند قرار گرفته است، انجام تحقیق حاضر به‌منظور بررسی نحوه تغییرات و پراکنش مکانی فاکتور-K و ره‌گیری نقش متغیرهای محیطی بر دقت تهیه نقشه رقومی آن در این منطقه مورد مطالعه ضروری به نظر

مختلف برای درون‌یابی و تعیین توزیع مکانی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک انجام‌شده است (Delbari et al., 2010; Mousavi et al., 2022; Tamiru et al., 2023). روش‌های متداول زمین‌آماری شامل کریجینگ (OK)، کوکریجینگ (COK) و وزن دهی معکوس فاصله (IDW) است (Abdel-Rahman et al., 2021). در کریجینگ و IDW از متغیرهای کمکی استفاده نمی‌شود، اما در کوکریجینگ از متغیرهای کمکی مستخرج از منابع توپوگرافی، سنجش‌ازدور و حتی خاک که با متغیر هدف از نظر کمی یا مفهومی بر اساس نظر کارشناس مرتبط هستند برای ارتقاء در دقت تخمین متغیر اصلی استفاده می‌شود (Lecocq et al., 2013).

با توجه به اهمیت موضوع و قابلیت‌های بالای روش‌های زمین‌آماری در مطالعات متعددی محققان اقدام به مدل‌سازی مکانی فاکتور-K در نقاط مختلف دنیا نموده‌اند. یوسفی و همکاران (Yousefi et al., 2015) به بررسی برآورد فرسایش و تولید رسوب در حوضه آبخیز لاورفین (استان هرمزگان) با استفاده از داده‌های سنجش‌ازدور (RS)، سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) و مدل تجربی RUSLE پرداختند. میزان فرسایش خاک با استفاده از عوامل مدل جهانی فرسایش خاک RUSLE محاسبه شد. نتایج پژوهش ایشان نشان داد که مناطقی در بخش میانی حوضه با خطر فرسایش خیلی زیاد قرار دارند. علاوه‌براین استفاده از یک رویکرد ترکیبی پردازش داده‌ها در GIS، داده‌های RS و استفاده از مدل RUSLE می‌تواند به مطالعه مقدار فرسایش و بار رسوب خاک در اراضی کشاورزی پرداخت. مزبانی و همکاران (Mezban et al., 2021) با استفاده از روش RUSLE به ارزیابی فرسایش در حوضه آبریز سیکان پرداختند و اظهار داشتند که این روش برای برآورد فرسایش خاک مناسب بوده و بالا بودن شن خیلی ریز و سیلت موجب افزایش فرسایش‌پذیری خاک می‌گردد. زحمتکش و همکاران (Zahmatkesh et al., 2024) به مطالعه فرسایش‌پذیری آبی خاک در حوضه آبخیز علی‌آباد رودبار در استان گیلان پرداختند و دریافتند که روش OK نسبت به IDW عملکرد بهتری دارد. یودین و همکاران (Uddin et al., 2016)، به بررسی تغییرات مکانی فرسایش خاک در

می‌رسد.

۲-۳- برآورد فرسایش پذیری خاک

اندازه‌گیری مستقیم و میدانی فاکتور-K در یک سطح وسیع از نظر زمان و هزینه مقبول نیست، بنابراین برای رفع این محدودیت از نمودار ویشمایر و اسمیت (Wischmeier & Smith, 1987) استفاده می‌گردد. در همین راستا نمونه‌های خاک پس از هوا خشک شدن، از الک دو میلی‌متری عبور داده شدند و آزمایش‌های فیزیکی و شیمیایی موردنیاز برای برآورد فاکتور-K شامل: درصد ماده الی، رس، سیلت، شن و شن خیلی ریز بر روی نمونه‌ها با استفاده از روش‌های استاندارد و متداول انجام گرفت (Wischmeier & Smith, 1987). پس از اندازه‌گیری ویژگی‌های موثر در اندازه‌گیری فاکتور-K مقادیر این شاخص بر اساس رابطه (۱) محاسبه گردید.

$$k = 0.1317[(2.1 \times 10^{-4} M^{1.14} (12 - OM) + 3.25(S - 2) + 2.5(P - 3)/100)] \quad (1)$$

که در آن فاکتور-K فرسایش پذیری خاک (تن در هکتار در ساعت بر هکتار در مگاژول در میلی‌متر)، M از حاصل ضرب (درصد رس - ۱۰۰) × (درصد سیلت + درصد شن خیلی ریز) به دست می‌آید، OM درصد ماده‌آلیخاک، S کلاس ساختمان خاکدانه، و P کلاس نفوذپذیری خاک است. بر اساس اصلاحیه اورسوالد و همکاران (Auerswald et al., 2016; Auerswald et al., 2014) برای نمونه خاک‌هایی با مقادیر بالای سیلت و شن ریز (بیش ۷۰٪) برآورد فاکتور فرسایش‌پذیری آبی (K) انجام شد. شایان ذکر است برای برآورد کلاس ساختمان خاکدانه و کلاس نفوذپذیری خاک از جدول‌های ۱ و ۲ استفاده شد (Renard et al., 1997). بر اساس طبقه‌بندی ارائه‌شده توسط پرتا-بلانکو و کاراسکو-لِتلیِر (Beretta-Blanco & Carrasco-Letelier, 2017) فاکتور-K در پنج کلاس شدت فرسایش‌پذیری خیلی کم (۰/۱۸ - ۰/۱۰)، کم (۰/۲۶ - ۰/۱۸)، متوسط (۰/۳۶ - ۰/۲۶)، زیاد (۰/۵ - ۰/۳۶) و خیلی زیاد (>۰/۵) قرار دارد که این طبقه‌بندی مبنای تصمیم‌گیری در این تحقیق نیز می‌باشد.

۲- روش‌شناسی

۲-۱- توصیف منطقه مطالعاتی و عملیات میدانی

منطقه مورد مطالعه با مساحتی حدود ۲۳۵۰۰۰ هکتار شامل بخشی از اراضی دشت سیستان در شرق کشور و در شمال استان سیستان و بلوچستان، بر روی دلتای رودخانه هیرمند واقع شده است (شکل ۱). دامنه تغییرات ارتفاعی منطقه از ۴۹۲-۴۵۲ متر نسبت به سطح دریا متر است. همچنین شیب منطقه نیز بین ۱-۲ درصد است و خاک‌ها از لحاظ میزان تکامل جوان (آنتی‌سولز) تا با تکامل کم تا متوسط (اردی‌سولز) بوده و از لحاظ وضعیت رژیم رطوبتی و حرارتی به ترتیب اریدیک و هایپرترمیک هستند (Mirakzahi et al., 2018). مطالعات میدانی در این مطالعه شامل تعیین موقعیت ۴۶۰ محل نمونه‌برداری به روش نظارت‌شده تصادفی، و سپس نمونه‌برداری از لایه خاک سطحی (صفر تا ۱۵ سانتی‌متر) است (شکل ۱). پس از جمع‌آوری، شماره‌گذاری و ثبت موقعیت مکانی، نمونه‌ها به آزمایشگاه تحقیقاتی خاکشناسی جهت انجام آزمایش‌های فیزیکی و شیمیایی لازم منتقل گردیدند.

۲-۲- روندنمای کلی تحقیق

تحقیق حاضر در پنج گام اصلی شامل: گام اول: تهیه پایگاه اطلاعات خاک، مطالعات میدانی، آزمایشگاهی و برآورد فاکتور-K است، گام دوم: تهیه تغییرهای کمکی محیطی از منابع اطلاعاتی موجود و در دسترس - داده‌های توپوگرافی و سنجش‌ازدور، گام سوم: اجرای سناریوهای مدل‌سازی چهار سناریو فاکتور-K و متغیرهای توپوگرافی، سنجش‌ازدور و برازش نیم‌تغییرنمای تجربی، گام چهارم: ارزیابی دقت پیش‌بینی فاکتور-K و گام پنجم: تهیه نقشه‌های پیش‌بینی مکانی هر سناریو و انتخاب مناسب‌ترین سناریو می‌شود (شکل ۲).

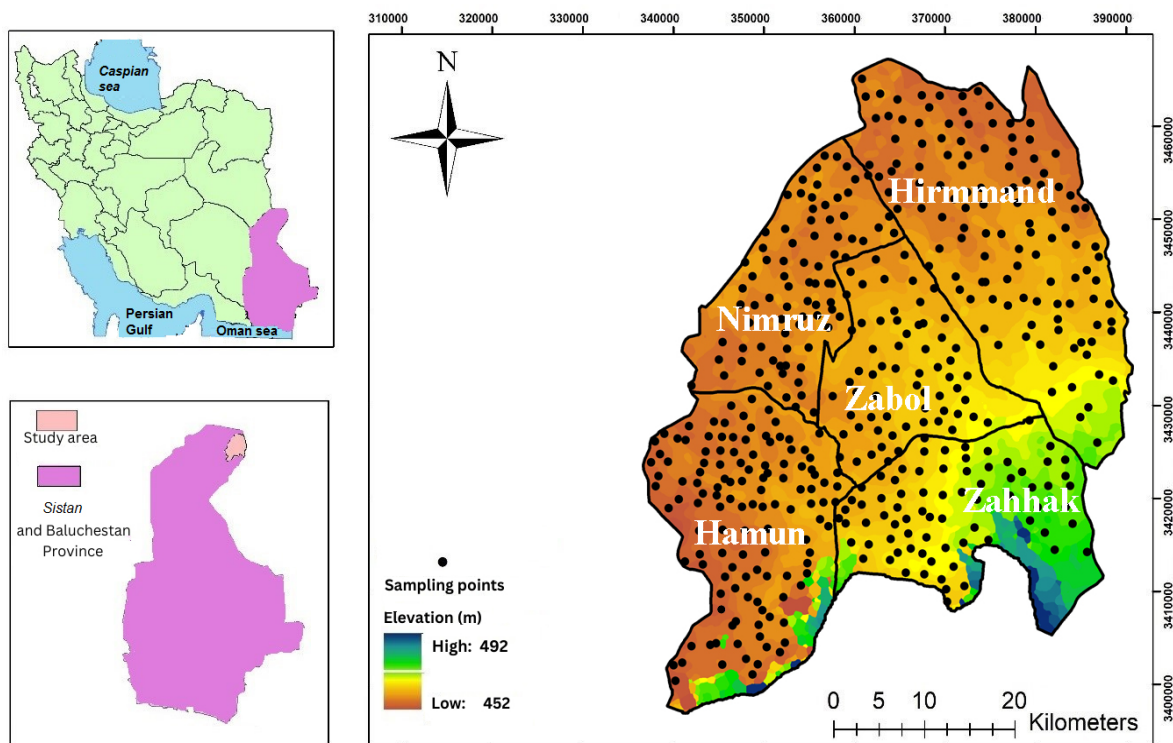


Fig. 1 Location of the study area and distribution of sampling points (black circles)

شکل ۱ موقعیت منطقه مورد مطالعه و پراکنش نقاط نمونه‌برداری (دایره‌های مشکی)

ماهواره‌ای منطبق با زمان نمونه‌برداری در بازه‌های زمانی "۱۳۹۷/۱۲/۰۱" و "۱۳۹۸/۱۱/۲۹" به صورت میانگین دوره مطالعاتی از منطقه مطالعاتی توسط سامانه متن‌باز و برخط گوگل ارث انجین (GEE) با درصد پوشش ابری کمتر از ۱۰٪ دریافت گردیدند (Gorelick et al., 2017). تصاویر سنجنش‌ازدور دریافت شده دارای وضوح مکانی پایه ۱۰ متر بودند که با تابع بازنمونه‌گیری خطی در محیط نرم‌افزار R به وضوح مکانی ۳۰ متر تبدیل شدند. تصاویر ماهواره

جدول ۱ برآورد کلاس ساختمان خاک برای محاسبه فاکتور-K (Renard et al., 1997)

Table 1 Estimation of soil structure class to calculate K-factor (Renard et al., 1997)

Structure Type	Structure Class
Very fine granular: 1-2 mm	1
Fine granular: 2-5 mm	2
Medium or coarse granular: 5-10 mm	3
Blocky, platy or massive: >10 mm	4

۲-۴- متغیرهای کمکی مورد استفاده

پارامترهای توپوگرافی

برای مدل‌سازی مکانی فاکتور-K منطقه از متغیرهای توپوگرافی و سنجنش‌ازدور استخراج شده از مدل رقومی ارتفاع با وضوح ۱۲/۵ متر از ماهواره آلوس-پالسار و تصاویر ماهواره‌های سنتینل ۱ و سنتینل ۲ توسط نرم‌افزار SAGA GIS (نسخه ۴/۷) به عنوان متغیرهای کمکی استفاده گردید. همچنین پیش از تهیه متغیرهای توپوگرافی، از توابع پیش‌پردازش (Fill-Sink) موجود در نرم‌افزار SAGA GIS برای تصحیح خطاهای موجود در مدل رقومی ارتفاع شامل پر کردن فرورفتگی‌ها و حفظ شیب نزولی در طول مسیر جریان استفاده شد (Wang & Liu, 2006).

داده‌های سنجنش‌ازدور

در این مطالعه از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۱ و ۲ برای استخراج شاخص‌های سنجنش‌ازدور استفاده شد. تصاویر

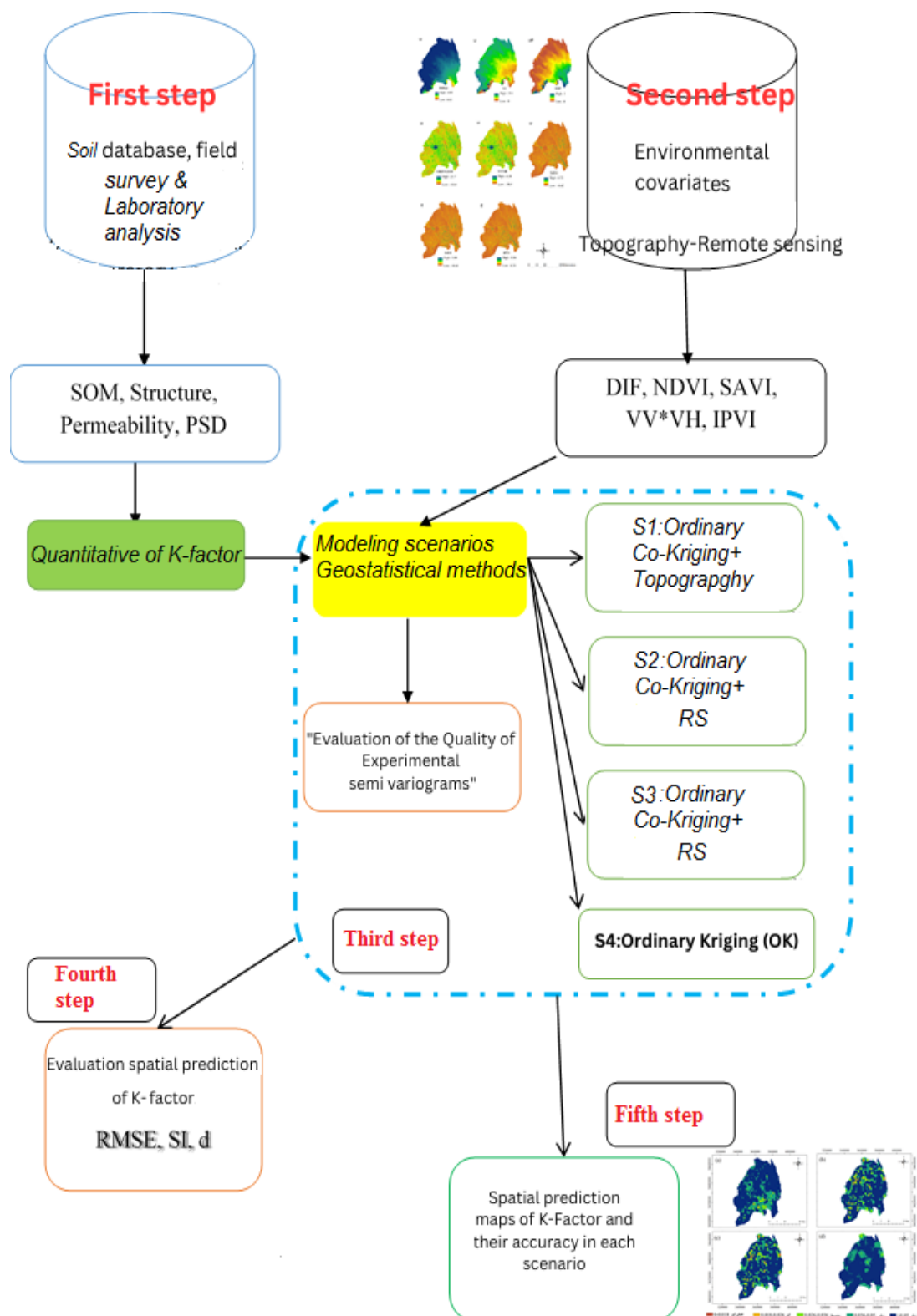


Fig. 2 The trend of the present research

شکل ۲ روندنمای تحقیق حاضر

جدول ۲ برآورد کلاس نفوذپذیری و هدایت هیدرولیکی اشباع خاک برای کلاس‌های بافت غالب (Renard et al., 1997)

Table 2 Soil permeability classes and saturated hydraulic conductivity ranges estimated from major soil textural classes (Renard et al., 1997)

Texture class	Saturated hydraulic conductivity (mm/h)	Class description	Permeability class
Sand	61<	Fast and very fast	1
Loamy Sand, Sandy Loam	20.3-61	Moderate fast	2
Loam, Silty Loam, Silt	5.1-20.3	Moderate	3
Sandy Clay Loam, Clay Loam	2-5.1	Moderate low	4
Silty Clay Loam, Sand Clay	1-2	Slow	5
Silty Clay, Clay	1>	Very slow	6

۲-۵- مدل سازی مکانی

روش کریجینگ

کریجینگ معمولی یکی از اساسی‌ترین روش‌های کریجینگ است که تخمین متغیر Z در یک مکان مشاهده نشده را بر اساس میانگین وزنی مکان‌های مشاهده شده مجاور در یک منطقه معین اراده می‌کند (Setianto & Triandini, 2013). میانگین وزنی داده شده توسط پیش‌بینی کننده کریجینگ معمولی در یک سایت نمونه برداری نشده $Z(s_0)$ به صورت رابطه (۲) تعریف می‌شود:

$$Z(s_0) = \sum_{i=1}^n \lambda z(s_i) \quad (2)$$

که در آن، λ وزن‌های اختصاص داده شده به هر یک از نمونه‌های مشاهده شده است.

روش کوکریجینگ

مدل کوکریجینگ (COK) مبتنی بر ایجاد یک مدل مناسب برای پیوستگی متقاطع و وابستگی فضایی بین متغیرهای اصلی و کمکی است (رابطه (۳)). همبستگی مثبت بین متغیرها را منطقه بندی متقاطع یا هم منطقه ای می‌نامند که با استفاده از نیمه متغیر متقابل رابطه (۴) قابل محاسبه است (Oliver, 2010).

$$\hat{Y}_{v_1v_2}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{\alpha=1}^N [Z_{v_1}(x_{\alpha} + h) - (Z_{v_1}(x_{\alpha}))] \times [Z_{v_2}(x_{\alpha} + h) - Z_{v_2}(x_{\alpha})] \quad (3)$$

سنتینل به عنوان بخش مهمی از پروژه نظارت جهانی محیط زیست، نقش محوری در پایش تغییرات جهانی زمین، جو، اقیانوس و آب و هوا ایفا می‌کند. سنتینل ۱ که در سال ۲۰۱۴ پرتاب شد که مجهز به باند تصویربرداری رادار دیافراگم مصنوعی (SAR) بوده و دارای انواع روش تصویربرداری تک نواری (SM)، بسیار گسترده (EM) و حالت تداخل سنجی گسترده (IW) است (Zhou et al., 2018). برخی از محققان اشاره کرده‌اند که اطلاعات خاک استخراج شده از تصاویر رادار تک قطبی محدود است که تاثیر خاصی بر نتایج دارد. ما و همکاران (Ma et al., 2021) نشان دادند که ترکیب مناسب تصاویر رادار می‌تواند به طور موثری با پراکندگی و ویژگی‌های خاک همبستگی داشته باشد؛ بنابراین در این مطالعه از ترکیب داده‌های رادارهای تک قطب سنتینل ۱ جهت مدل سازی و پیش‌بینی متغیر هدف استفاده شد. پوشش گیاهی یکی از عوامل اصلی فرسایش خاک است؛ بنابراین شاخصه‌ای پوشش گیاهی (مستخرج از سنتینل-۲) برای پیش‌بینی دقیق تر فاکتور K به عنوان دسته‌ای دیگر از متغیرهای کمکی مورد استفاده قرار گرفتند. در ادامه کلیه شاخصه‌ای مربوط به پوشش گیاهی، نسبت‌های باندهای استخراج شده از تصاویر سنتینل ۱-۲ و مشتقات مدل رقومی ارتفاع در جدول ۳ ارائه شده است.

در مجموع هشت فاکتور محیطی شامل سه پارامتر توپوگرافی و هشت شاخص سنجش از دور به عنوان متغیر کمکی برای پیش‌بینی فاکتور K مورد استفاده قرار گرفتند که برای ارائه جزئیات بیشتر پراکنش مکانی آن‌ها در شکل ۳ ارائه شده است

جدول ۳ متغیرهای کمکی استخراج شده از مدل رقومی ارتفاع و تصاویر ماهواره‌های سنتینل ۱ و ۲

Table 3 Auxiliary variables extracted from digital height model and images of Sentinel 1 and 2 satellites

The origin of covariates	Auxiliary variable	Code	Olaya, and Conrad, (2009)
Topography	Diffuse Insulation (Kwh/m ²)	DI	Olaya, and Conrad, (2009)
	Relative Slope Position (m)	RSP	Olaya, and Conrad, (2009)
	Valley Depth (m)	VD	Ma (2018)
Remote sensing	VV×VH	VV×VH	Zhang et al. (2020)
	VH ² ×VV ² ×VH	VH ² ×VV ² ×VH	Tucker (1979)
	NDVI	NDVI= B8-B4/B8+B4	Huete (1988)
	SAVI	SAVI=(B8-B4/B8+B4+0.5)×1.5	Crippen (1990)
	IPVI	IPVI= B8/B8+B4	Olaya, and Conrad, (2009)

NDVI: Normalized Difference Vegetation Index, SAVI: Soil Adjusted Vegetation Index, IPVI: Infrared Percentage Vegetation Index. B8: Near infrared band of Sentinel -2, B4: Red band of Sentinel -2. VV= vertical waves and receives vertical waves, VH= vertical waves and receives horizontal waves.

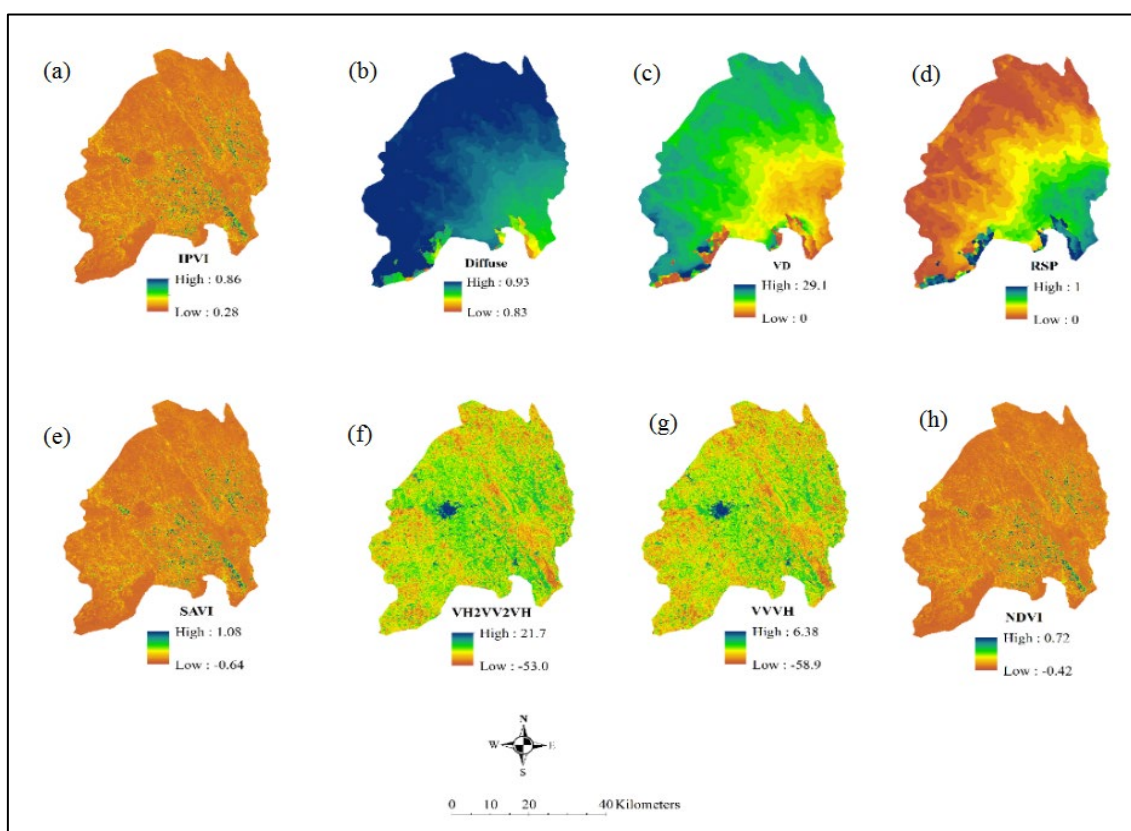


Fig. 3 Spatial distribution map of environmental variables used to predict the K-factor

شکل ۳ نقشه پراکنش مکانی متغیرهای محیطی مورد استفاده برای پیش‌بینی فاکتور K-

انتخاب و مورد استفاده قرار گرفتند که به ترتیب شامل سناریو ۱: مدل COK، داده‌های توپوگرافی، سناریو ۲: مدل COK و سناریو ۳: داده‌های RS و مدل COK و داده‌های RS بودند.

جایی که Z_{v1} و Z_{v2} متغیرهای اولیه و ثانویه هستند و به ترتیب $N(h)$ تعداد جفت‌های (x_{α}, Z_{v1}) و $(x_{\alpha+h}, Z_{v2})$ در بردار فاصله $|h|$ است. در این تحقیق متغیرهای کمکی مورد استفاده برای پیش‌بینی فاکتور K- در مدل COK در سه سناریو کلی

ارزیابی نتایج مدل‌سازی مکانی

۳- نتایج و بحث

ارزیابی کارایی مدل‌های مورد استفاده در پیش‌بینی فاکتور- K فرسایش‌پذیری با استفاده از آماره‌های میانگین ریشه مربعات خطای (RMSE)، شاخص پراکندگی (SI) و شاخص توافق ویلموت (d) انجام گردید (روابط (۴)، (۵) و (۶)). SI آماره‌های است که میزان پراکندگی باقیمانده‌ها را اندازه‌گیری می‌نماید. به موجب آن مقادیر کوچک‌تر SI نشان‌دهنده خطای کمتر است. مقادیر d از ۰ تا ۱ متغیر است و نسبت میانگین مربعات خطا و خطای بالقوه را اندازه‌گیری می‌نماید که به موجب آن $d = 1$ تطابق کامل بین مقادیر مشاهده‌شده و پیش‌بینی‌شده را نشان می‌دهد (Taghizadeh et al., 2021).

$$RMSE = \frac{\sqrt{\sum(\gamma_i - \bar{\gamma})^2}}{N} \quad (4)$$

$$SI = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum(\gamma_i - \bar{\gamma})^2}}{\bar{\gamma}} \quad (5)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\gamma_i - \bar{\gamma})^2}{\sum_{i=1}^n (|\gamma_i - \bar{\gamma}| + |\gamma_i - \bar{\gamma}|)^2} \quad (6)$$

در روابط فوق γ_i داده اندازه‌گیری‌شده، $\hat{\gamma}_i$ مقدار پیش‌بینی‌شده است. همچنین $\bar{\gamma}$ میانگین داده‌های اندازه‌گیری‌شده و $\hat{\gamma}^-$ میانگین داده‌های پیش‌بینی‌شده، e_i مقادیر اندازه‌گیری‌شده، e مقادیر پیش‌بینی‌شده و N برابر با تعداد داده‌ها است.

سناریوهای مدل‌سازی مکانی

به‌طور کلی مدل‌سازی فاکتور- K در این پژوهش در قالب چهار سناریو صورت پذیرفت که شامل S1: مدل OCK + پارامترهای توپوگرافی، S2: مدل OCK + پارامترهای سنجش‌ازدور (I)، S3: مدل OCK + پارامترهای سنجش‌ازدور (II) و S4: فقط با استفاده از مدل OK که در جدول ۴ ارائه شده است.

۱-۳- توصیف آماری

نتایج توصیف آماری ویژگی‌های اندازه‌گیری‌شده خاک در جدول ۵ ارائه شده است. بر اساس تجزیه و تحلیل آماری، میانگین شن، سیلت و رس به ترتیب برابر با ۴۱/۷، ۴۱/۶ و ۱۶/۶۷ درصد است. به طوری که کمترین و بیشترین مقدار شن برابر با ۶ تا ۹۹ درصد، سیلت برابر با ۱ تا ۷۳ و رس برابر با ۰ و ۴۳٪ است. کمترین و بیشترین مقدار شن خیلی ریز به ترتیب ۰/۳۴ تا ۴۸/۴۶ اندازه‌گیری شد. مقادیر میانگین اندازه ذرات در پژوهش حاضر تا حد زیادی مشابه و هم‌راستا با نتایج مطالعات پیشین در دشت سیستان بود (Pahlavan-Rad & Akbarimoghaddam, 2018; Shahriari et al., 2019; Shahriari et al., 2025) که می‌تواند بیانگر الگوی رسوب‌گذاری در دلتای رودخانه هیرمند و بستر تالاب هامون است (Mirakzehi et al., 2018). کمترین آن ۰/۰۰۷ (با میانگین ۰/۰۶) ton/MJ h/mm محاسبه شد که به ترتیب در کلاس‌های شدت فرسایش‌پذیری خیلی کم تا خیلی زیاد را شامل می‌شود. در مقیاس جهانی فاکتور فرسایش‌پذیری در محدوده ۰-۰۰۵-۰۰۲ ton/MJ h/mm برای مناطق مرکزی شیلی (Bonilla & Johnson, 2012)، ۰/۰۲۶-۰/۰۷۶ ton/MJ h/mm برای کشورهای اروپایی (Panagos et al., 2014)، ۰/۰۲-۰/۰۷ ton/MJ h/mm برای استرالیا (Yang et al., 2018)، ۰/۰۴۴-۰/۰۱۳ ton/MJ h/mm برای یونان (Efthimiou, 2020)، ۰/۰-۰/۰۵۴ ton/MJ h/mm برای برزیل (Godoi et al., 2021) و ۰/۰-۰/۱۱ ton/MJ h/mm برای هندوستان (Raj et al., 2023) گزارش شده است. در کشور ایران نیز فرسایش‌پذیری خاک در محدوده ۰/۰۲۵-۰/۰۴۹ ton/MJ h/mm برای هشتروند استان آذربایجان شرقی (Vaezi)

جدول ۴ سناریوهای مختلف مدل‌سازی فاکتور- K با

استفاده از روش‌های OK و OCK

Table 4 Different scenarios of K-factor modeling using OCK and OK methods

Auxiliary variables	S1	S2	S3	S4
	Diffuse	VV*VH	SAVI	---
	VD	NDVI	NDVI	---
	RSP	VH ² *VV ² *VH	IPVI	---

فرسایش‌پذیری خاک (فاکتور-K) است. عمده کلاس بافت خاک‌های مورد مطالعه در سه کلاس لوم (Laom)، لوم سیلتی (Silt Loam) و لوم شنی (Sandy Loam) قرار داشت (بیش از ۸۰٪ نمونه‌ها) و سایر رده‌ها سهم کمی را داشتند. کرمی و همکاران (Karami et al., 2018) بیشترین مقدار فاکتور-K را برای کلاس بافت لوم گزارش کردند و مالیک و همکاران (Mallick et al., 2015) اظهار داشتند که در کلاس بافت‌هایی با مقدار سیلت غالب (لوم، لوم شنی و لوم سیلتی) عمدتاً مقدار رس و ماده‌آلیکاهش می‌یابد، از این رو در مطالعه آن‌ها بیشترین مقدار فرسایش‌پذیری خاک در خاک‌هایی با بافت لوم سیلتی و لوم گزارش شد.

۲-۳- برازش نیم‌تغییرنمای تجربی

قبل از تهیه نقشه‌های پیش‌بینی مکانی فاکتور-K توسط روش‌های زمین‌آماري، اقدام به برازش نیم‌تغییرنمای تجربی برای تعیین میزان مناسب‌ترین مدل برازش و کلاس همبستگی مکانی متغیر هدف گردید. بر اساس نتایج

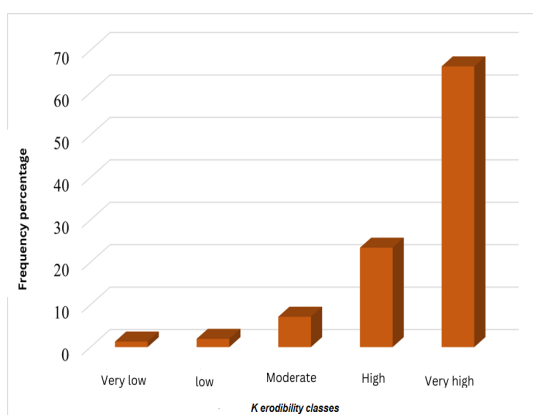


Fig. 4 The percentage of relative frequency of K-factor erodibility classes in Sistan plain

شکل ۴ درصد فراوانی نسبی کلاس‌های فاکتور-K در دشت سیستان

(et al., 2010) ، ۰/۰۱۵-۰/۰۴۷ ton/MJ h/mm برای بالادست سد سیوند استان فارس (Ostovari et al., 2015)، ۰/۰۰۳-۰/۰۳۶ ton/MJ h/mm برای داراب-کلا استان مازندران (Omidvar et al., 2016)، ۰/۰۱-۰/۰۴ ton/MJ h/mm برای دهگلان استان کردستان (Golmohammadi et al., 2018) و ۰/۰۱۱-۰/۰۴۱ ton/MJ h/mm برای علی‌آباد رودبار استاد گیلان (Zahmatkesh et al., 2024) گزارش شده است.

نتایج نشان می‌دهد که محدوده تغییرات فاکتور فرسایش‌پذیری خاک در دشت سیستان در محدوده گسترده‌تری تغییر می‌کند. بر اساس آماره درصد ضریب تغییرات (%CV)، تمام ویژگی‌های خاک اندازه‌گیری شده در منطقه مورد مطالعه دارای تغییرپذیری زیاد می‌باشند (Wilding, 1985). بالا بودن ضریب تغییرات نشان‌دهنده تاثیر عوامل خارجی بر روی متغیر هدف (فاکتور-K) و همچنین سایر ویژگی‌های خاک موثر در برآورد آن است که به‌طور جزئی‌تر محققان این تغییرات را به وضعیت مدیریت اراضی، درجه حاصلخیزی خاک‌ها، کاربری اراضی و تغییرات توپوگرافی مرتبط دانسته‌اند (Tittonell et al., 2010; Liu et al., 2015).

درصد فراوانی کلاس‌های فرسایش‌پذیری خاک در منطقه مورد مطالعه در شکل ۴ ارائه شده است.

بر اساس طبقه‌بندی تصویری موجود به ترتیب حدود ۶۰ و ۲۳٪ از داده‌ها در کلاس فرسایش‌پذیری خیلی زیاد و زیاد قرار دارند. کومار و کوشواها (Kumar & Kushwaha, 2013) اظهار داشتند که دشت سیلابی به دلیل بافت متوسط تا درشت خاک و مقدار ماده‌آلیکم در بین موقعیت‌های ژئومورفیک مورد مطالعه دارای بالاترین مقدار

جدول ۵ خلاصه آماری ویژگی‌های خاک و فاکتور-K در کلیه نقاط نمونه‌برداری (n=460)

Table 5 Statistical summary of soil characteristics and K-factor in all sampling points (n=460)

Parameter	Unit	Min	Max	Mean	SD	%CV
Clay	%	0	43	16.6	8.26	49.5
Silt	%	1	83	41.6	15	36.2
Sand	%	6	99	41.7	20.3	48.7
Very fine sand	%	0.34	48.4	17	7.86	46.2
OM	%	0	2.5	0.98	0.47	47.6
K-factor	ton/MJ h/mm	0.007	0.11	0.06	0.02	33.8

نمونه‌برداری کاهش می‌یابد (Keskin et al., 2019).

استفاده از بیضی همسانگردی از روش‌های رایج برای بررسی میزان ناهمسانگردی است. هرچند که شاخص دقیقی برای کمی کردن میزان ناهمسانگردی وجود ندارد، ولی در صورتی که این نسبت کمتر از ۲/۵ باشد می‌توان از ناهمسانگردی صرف‌نظر کرد و تغییرنا را همسانگرد در نظر گرفت (Oliver & Webster, 2014); بنابراین بر اساس نتایج **جدول ۷** نیم‌تغییرنمای برازش داده‌شده بر داده‌های فاکتور-K همسانگرد در نظر گرفته می‌شود. این نسبت برای فاکتور-K بر اساس مدل OK و بهترین سناریو OCK که S1 است به ترتیب برابر ۱/۳۵ و ۱/۳۳ به دست آمد (**جدول ۷**). با توجه به اینکه مقدار نسبت ناهمسانگردی برای هر دو مدل کمتر از ۲/۵ است، همان‌گونه اشاره شد نیم‌تغییرنمای برازش داده‌شده همسانگرد در نظر گرفته شدند. قطر بزرگ بیضی نشان‌دهنده جهتی است که متغیر مورد بررسی دارای بیشترین پیوستگی مکانی و قطر کوچک آن نشان‌دهنده جهتی است که دارای کمترین پیوستگی مکانی است (Khosravani et al., 2021). **شکل ۵** نشان می‌دهند که ویژگی‌های مورد مطالعه دارای بیشترین پیوستگی در جهت شمال غرب- جنوب شرق و کمترین پیوستگی در جهت شمال غرب- شرق می‌باشند. (Zahmatkesh et al., 2024) نیز در پژوهش خود در خصوص فاکتور-K به نتایج مشابهی در خصوص همسانگردی دست یافتند. که پس از آن سناریو سوم (S3) بود، با مقادیر $RMSE=0.017$ و $SI=0.43$ و دقت همبستگی $d=0.69$ بود که در مرتبه بعدی قرار گرفت.

دو سناریو (S2-S4) نیز نتایج مشابهی را در پیش‌بینی فاکتور-K ارائه نمودند. همان‌گونه که مشاهده گردید، رویکردهایی که در آن روش OCK با متغیرهای کمکی

ارائه‌شده در (**جدول ۶**) نیم‌تغییرنمای تجربی به‌عنوان مناسب‌ترین مدل برازش نسبت به سایر مدل‌های مورد استفاده شناسایی گردید، همچنین در ادامه نتایج کلاس وابستگی (خودهمبستگی) مکانی نشان داد که در همه سناریوها به جز S4 بر اساس طبقه‌بندی ارائه‌شده توسط (Camberdella et al., 1994) در کلاس قوی قرار دارد. در همین راستا محققین (Camberdella et al., 1994; Yu et al., 2023) معتقد هستند که غالباً وابستگی مکانی قوی در اثر فرآیندهای داخلی (ذاتی) و وابستگی مکانی ضعیف در اثر فرآیندهای خارجی (مدیریتی) حاصل می‌شود؛ بنابراین بر اساس نتایج فوق چنین به نظر می‌رسد که تغییرات مکانی فاکتور-K در دشت سیستان تا حد زیادی به پارامترهای مربوط به خاک (بافت، درصد ماده الی، ساختمان، میزان نفوذپذیری) وابسته است و هرگونه تغییر در میزان آن‌ها به‌طور جدی بر روی شدت فرسایش‌پذیری خاک‌های مورد مطالعه تاثیرگذار است. همچنین قوی بودن کلاس همبستگی مکانی بیانگر آن است که استفاده از روش‌های زمین‌آماري به‌خوبی قادر بوده است تا در تجزیه و تحلیل فاکتور-K مفید باشد. شایان ذکر است مطالعات متعددی گزارش نمودند که مدل نمایی بهترین برازش را بر تغییرات مکانی فرسایش‌پذیری خاک دارد و کلاس همبستگی مکانی این فاکتور متوسط تا قوی بود (Ostovari et al., 2015; Zahmatkesh et al., 2024).

بیشترین مقدار دامنه تاثیر مربوط به سناریوهایی بود که در آن از متغیرهای کمکی برای برازش تغییرات مکانی فاکتور-K استفاده‌شده است که برابر ۴۹۲۷ متر حاصل گردید. بالا بودن مقدار دامنه تاثیر نشان‌دهنده این است فواصل نقاط نمونه‌برداری می‌تواند افزایش یافته و تعداد نمونه‌های لازم برای نمونه‌برداری و در نتیجه هزینه‌های لازم برای

جدول ۶ بهترین مدل برازش داده‌شده به نیم‌تغییرنمای فاکتور-K و ضرایب آن‌ها

Table 6 The best model fitted to the semivariogram K-factor and their coefficients

Model	Scenarios	Range of influence (m)	C_0	$C_0 + C$	C_0/C_0+C	Class
Exponential	S1	4927	0.016	0.145	0.11	Strong
	S2	4927	0.016	0.167	0.09	Strong
	S3	4927	0.20	1.41	0.14	Strong
	S4	2236	0.048	0.10	0.48	Moderate

جدول ۷ مقادیر کوچکترین دامنه، بزرگترین دامنه و نسبت ناهمسانگردی تغییرنماهای فاکتور-K برای مدل‌های OK و OCK

Table 7 Values of the smallest range, the largest range and the anisotropy ratio of K-factor variogram for OCK and OK models

Scenario	The smallest range (m)	The largest range (m)	Anisotropy ratio
(OCK) S1-S2-S3	3688	4927	1.33
S4 (OK)	1656	2236	1.35

بیشتری را نسبت به داده‌های سنجش‌ازدور در فرآیند پیش‌بینی ارائه نمودند.

برخی پژوهش‌ها اظهار داشته‌اند که در مناطقی با شیب کم (مانند دشت‌های سیلابی) به دلیل تغییرپذیری کم متغیرهای مرتبط با توپوگرافی، پارامترهای زمین‌نما تاثیر کمتری در پیش‌بینی خصوصیات خاک، بخصوص در سطح خاک دارند (Amirian Chekan et al., 2017; Emami et al., 2024). برخلاف این یافته‌ها، در مطالعه متغیرهای حاضر، متغیرهای مرتبط با توپوگرافی نقش کلیدی در مدل‌سازی مکانی فرسایش‌پذیری خاک ایفا نمودند. اشاره به این نکته در خصوص این متغیرها ضروری به نظر می‌رسد که عمدتاً مرتبط با فعالیت‌های آبرفتی (نظیر عمق دره و درصد نسبی شیب) می‌باشند. فعالیتی که در دشت سیلابی سیستم نقش بسیار مهمی را در تغییرات خصوصیات خاک‌های دارد (Pahlavan-Rad & Akbarimoghaddam, 2018; Mirakzehi et al., 2018; Shahriari et al., 2019)

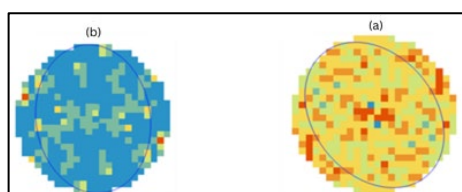


Fig. 5 Anisotropic ellipses of K-factor experimental semivariogram using (a) OCK and (b) OK methods

شکل ۵ بیضی‌های ناهمسانگرد نیم تغییرنمای تجربی فاکتور-K با استفاده از روش‌های (الف) OCK و (ب) OK

توپوگرافی و شاخص‌های طیفی پوشش گیاهی بود از کارایی بالاتری نسبت به روش OK نشان داد.

پژوهش‌های متعددی استفاده از روش کوکریجینگ را برای پیش‌بینی خصوصیات خاک توصیه کرده‌اند (Asadzadeh et al., 2019; Owliaie et al., 2024). در دشت سیستان نیز روش OCK برای مدل‌سازی مکانی هدایت الکتریکی استفاده شد.

۳-۳- پیش‌بینی مکانی فاکتور-K

نتایج اعتبار سنجی کارایی سناریوهای مورد استفاده در پیش‌بینی فاکتور-K در جدول ۸ ارائه شده است. بر اساس آماره‌های اعتبار سنجی نتایج موید این است که سناریو اول (S1) دارای کمترین مقدار خطای پیش‌بینی بر اساس آماره‌های $RMSE=0.016$ و $SI=0.35$ و بالاترین دقت همبستگی $d=0.73$ بود (Rezazadeh et al., 2016). کلسیم (Rezazadeh et al., 2016; Behnam et al., 2019)، سیلت، درصد رطوبت اشباع خاک (Hashemi et al., 2016)، رس و کربن‌آلیخاک (Behnam et al., 2019) و شاخص‌های فرسایش‌پذیری بادی خاک (Shahriari et al., 2025) نسبت به سایر روش‌های زمین‌آماری بهترین عملکرد را نشان داده است. از دیدگاه متغیرهای کمکی مورد استفاده در پیش‌بینی فاکتور-K بر اساس بهترین سناریو نتایج نشان داد که پارامترهای مربوط به توپوگرافی (DI, RSP, VD) نسبت به شاخص‌های سنجش‌ازدور به‌طور نسبتاً محسوس تأثیر

جدول ۸ نتایج کارایی سناریوهای مختلف مدل‌سازی مکانی فاکتور-K با استفاده از روش‌های زمین‌آماري

Table 8 Results of different K-factor spatial modeling scenarios using geostatistical methods

Scenarios	RMSE	SI	D
S1 (OCK:K-factor + topography)	0.016	0.35	0.73
S2(OCK: K-factor +RS1)	0.018	1.06	0.45
S3 (OCK: K-factor +RS2)	0.017	0.43	0.69
S4 (OK)	0.018		0.44

نشان‌دهنده تغییرات خصوصیات فیزیکی مرتبط با حرکت عمودی و جانبی ذرات خاک در محیط آبرفتی از طریق فرسایش و رسوب باشد.

۳-۴- پهنه‌بندی مکانی فاکتور-K

از دیدگاه پراکنش مکانی، به‌طور کلی تغییرات مکانی فاکتور-K بر اساس هر چهار سناریو دارای الگوی مشابهی است (شکل ۶) همچنین همان‌گونه که درصد فراوانی نسبی نیز نشان داد (شکل ۳) بیشترین مساحت منطقه به‌ویژه در تحقیقات نشان می‌دهند که وجود مقدار زیادی شن در نواحی جنوبی این منطقه به خاطر نزدیکی به رودخانه سیستان است و احتمالاً ناشی از رسوب سریع و ته‌نشینی زودتر شن‌ها نسبت به دو ذره سیلت و رس در شرایط سیلابی است (Pahlavan-Rad & Akbarimoghaddam, 2018). به‌طور کلی، شهریار و همکاران (Shahriari et al., 2019) بیان کردند که بخش‌های میانی و جنوبی دشت که در نزدیک رودخانه سیستان قرار دارند، دارای مقدار بیشتری شن هستند، درحالی‌که شمال، شمال غرب و غرب منطقه کمترین میزان شن را دارند. همچنین، مقدار بالای شن در برخی از نواحی شمال، شمال شرق و غرب، غرب و جنوب غرب بر اساس دقیق‌ترین سناریو (S1) در کلاس شدت فرسایش‌پذیری خیلی زیاد و زیاد قرار دارند که این نتایج حاکی از وجود پتانسیل بالای تخریب خاک سطحی در منطقه مطالعاتی است. کمترین مقدار فاکتور-K بیشتر در بخش‌های جنوبی منطقه مشاهده گردید. یافته‌های جمال‌زئی ثمره و همکاران (Jamalzehi Samareh et al., 2021) در خصوص مدل‌سازی مکانی پراکنش اندازه ذرات خاک در دشت سیستان نشان داد که تطابق خوبی بین نحوه پراکنش فاکتور-K با نحوه پراکنش اندازه ذرات خاک در منطقه وجود دارد؛ به‌عبارت‌دیگر با افزایش مقدار شن در دشت سیستان فاکتور-K کاهش می‌یابد و حساسیت خاک به فرسایش آبی کمتر می‌شود. هاشمی و همکاران (Hashemi et al., 2016) نیز اظهار داشتند که در منطقه روند تغییرات میزان سیلت و رس عکس تغییرات میزان شن است. ژو و همکاران (Zhu et al., 2022) نیز دریافته‌اند که رابطه بین فاکتور-K و میزان شن معکوس بوده و دلیل این امر وزن بالای ذرات شن که حمل آن با جریان آب را مشکل

و به‌عبارت‌دیگر می‌تواند نشان‌دهنده تغییرات خصوصیات فیزیکی مرتبط با حرکت عمودی و جانبی ذرات خاک در محیط آبرفتی از طریق فرسایش و رسوب باشد.

پژوهش‌های متعددی که اقدام به مقایسه روش‌های زمین‌آماری در پیش‌بینی خصوصیات خاک نموده‌اند، استفاده از روش کوکریجینگ را توصیه کرده‌اند (Asadzadeh et al., 2019; Owliaie et al., 2024). در دشت سیستان نیز روش OCK برای مدل‌سازی مکانی هدایت الکتریکی (Rezazadeh et al., 2016)، کربنات کلسیم (Rezazadeh et al., 2016; Behnam et al., 2019)، سیلت، درصد رطوبت اشباع خاک (Hashemi et al., 2016)، رس و کربن‌آلیخاک (Behnam et al., 2019) و شاخصه‌ای فرسایش‌پذیری بادی خاک (Shahriari et al., 2025) نسبت به سایر روش‌های زمین‌آماری بهترین عملکرد را نشان داده است.

از دیدگاه متغیرهای کمکی مورد استفاده در پیش‌بینی فاکتور-K بر اساس بهترین سناریو نتایج نشان داد که پارامترهای مربوط به توپوگرافی (DI, RSP, VD) نسبت به شاخصه‌ای سنجش‌ازدور به‌طور نسبتاً محسوسی تاثیر بیشتری را نسبت به داده‌های سنجش‌ازدور در فرآیند پیش‌بینی ارائه نمودند. برخی پژوهش‌ها اظهار داشته‌اند که در مناطقی با شیب کم (مانند دشت‌های سیلابی) به دلیل تغییرپذیری کم متغیرهای مرتبط با توپوگرافی، پارامترهای زمین‌نما تاثیر کمتری در پیش‌بینی خصوصیات خاک، بخصوص در سطح خاک دارند (Amirian Chekan et al., 2017; Emami et al., 2024). برخلاف این یافته‌ها، در مطالعه متغیرهای حاضر، متغیرهای مرتبط با توپوگرافی نقش کلیدی در مدل‌سازی مکانی فرسایش‌پذیری خاک ایفا نمودند. اشاره به این نکته در خصوص این متغیرها ضروری به نظر می‌رسد که عمدتاً مرتبط با فعالیت‌های آبرفتی (نظیر عمق دره و درصد نسبی شیب) می‌باشند. فعالیت‌هایی که در دشت سیلابی سیستان نقش بسیار مهمی را در تغییرات خصوصیات خاک‌های دارد (Pahlavan-Rad & Akbarimoghaddam, 2018; Mirakzahi et al., 2018; Shahriari et al., 2019) و به‌عبارت‌دیگر می‌تواند

بالادست ناشی از خشک شدن بستر رودخانه هیرمند کاملاً حساس به فرسایش بوده که با اندک جریان هوا به حرکت درآمده و در پایین دست نشست می کند (Pahlavanravi, 2012; Abbasi et al., 2022). بالا بودن مقادیر شن خیلی ریز و سیلت موجب افزایش فاکتور فرسایش پذیری می گردد (Mezban et al., 2021).

نکته دیگر در منطقه پایین بودن مقدار ماده آلی خاکها است که به دلیلی تاثیر بر روی ساختمان خاک، نفوذپذیری و پوشش گیاهی، پارامتری کلیدی بر فرسایش پذیری خاک است؛ به عبارت دیگر تراکم پوشش گیاهی به دلیل تاثیر بر رواناب و نفوذپذیری خاک یکی دیگر از عوامل موثر بر فاکتور K-فرسایش پذیری است. نتایج پژوهش خوارزمی و همکاران (Kharazmi et al., 2016) نشان داد که در دشت سیستان کلاسهای پوشش گیاهی کاهش چشمگیری داشته و مساحت اراضی کلاس بایر افزوده شده است که منجر به افزایش روند فرسایش خاک و بیابانی شدن این

می نماید، است. همچنین ایشان اظهار داشتند که خاکهای شنی نفوذپذیری بالایی دارند و از این منظر نیز به پایداری آب در محیط و پیشگیری از رواناب کمک می کنند.

احتمالاً به دلیل رسوب بادی در طول وزش «بادهای ۱۲۰ روزه» است. این بادها که از شمال و شمال غرب می وزند، در بازه زمانی خرداد تا اوایل شهریور که جریان آب در رودخانه هیرمند متوقف می شود، باعث رسوب و توزیع مجدد شن و ماسه می شوند (Pahlavan-Rad & Akbarimoghaddam, 2018). بر اساس نقشه فاکتور-K، مقادیر خیلی زیاد آن با آبرفت های ریز و رسوبات رودخانه های مربوط به دوره های نئوژن-کواترنری، هالوئسن و پلیستوسن منطبق است که تحت تاثیر فرسایش کناری قرار دارند (Jahantigh & Hoseini, 2021). علت بالا بودن فرسایش پذیری در این نواحی انفصال ذرات، تخلخل و نفوذپذیری زیاد و ناچیز بودن ضریب مقاومت به شمار می آید (James et al., 2013). همچنین بافت غالب سیلتی اراضی

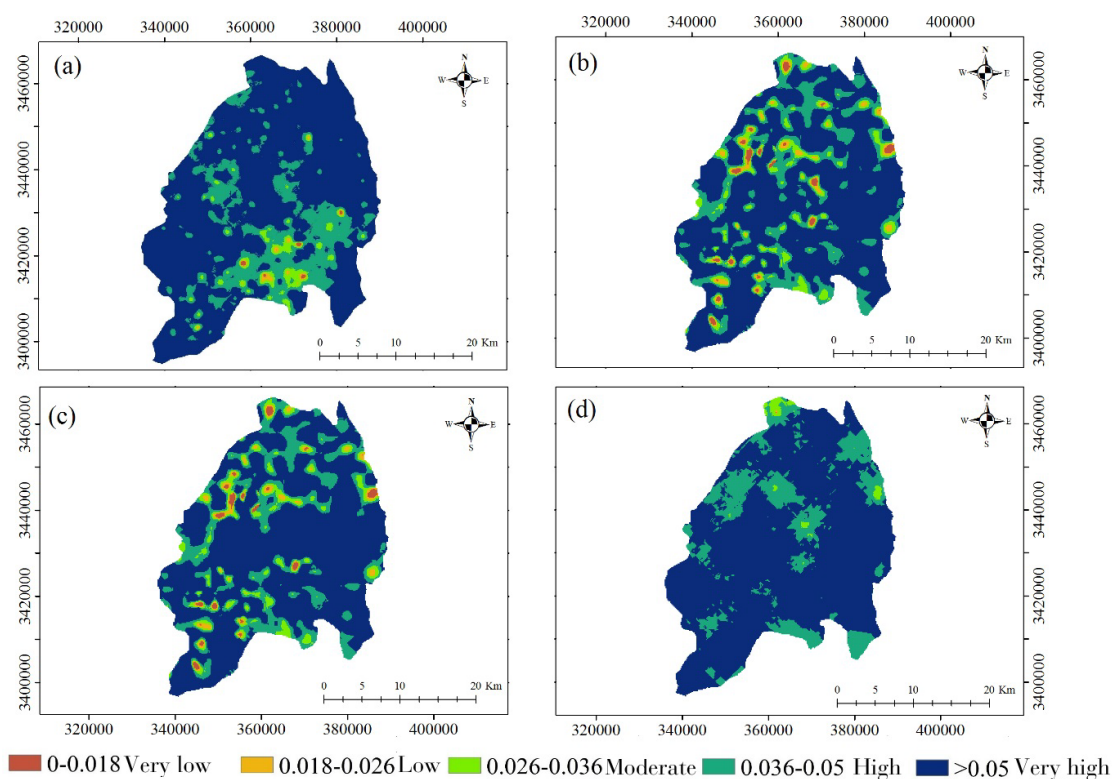


Fig. 6 Spatial distribution of K-factor based on scenarios S1, S2, S3 and S4 according to figures a, b, c and d

شکل ۶ پراکنش مکانی فاکتور-K بر اساس سناریوهای S1، S2، S3 و S4 به ترتیب شکل های a، b، c و d

خاک به‌ویژه در مناطق با حداقل تنوع فیزیوگرافی است.

نتایج برازش نیم‌تغییرنمای تجربی نیز نشان داد که مدل نمایی دارای بالاترین دقت در ارائه روند تغییرات مکانی فاکتور-K بود، به‌طوری‌که بر اساس کلاس خودهمبستگی مکانی محاسبه‌شده تغییرات مکانی سه سناریو S1، S2 و S3 در کلاس طبقه-بندی قوی و برای سناریو S4 کلاس متوسط مشاهده گردید. بالا بودن کلاس همبستگی مکانی بیانگر تاثیرپذیری بالای تغییرات مکانی فاکتور-K از ویژگی‌های ذاتی و درونی خاک است که این روند با مقادیر حداقل ماده الی، درصد بالای شن در مناطق جنوبی و مقادیر بالای رس و سیلت در بخش‌های شمالی دشت سیستان هم‌راستا است. نقشه‌های پراکنش مکانی نشان داد که مناطق شمال، شمال شرق و غرب، غرب و جنوب غرب بر اساس دقیق‌ترین سناریو (S1) در کلاس شدت فرسایش‌پذیری خیلی زیاد و زیاد قرار دارند که این نتایج حاکی از وجود پتانسیل بالای تخریب خاک سطحی در منطقه مطالعاتی است. کمترین مقدار فاکتور-K بیشتر در بخش‌های جنوبی منطقه مشاهده گردید.

به‌طورکلی با توجه به اینکه رویکرد مورد استفاده در این تحقیق توانست نقشه پراکنش مکانی فاکتور-K بر اساس بهترین سناریو با دقت خوبی پیش‌بینی نماید، بنابراین می‌توان پیشنهاد نمود تا از نتایج حاصل به‌عنوان یک رویکرد جامع برای مدیریت اراضی و انتخاب مناطق تحت اولویت برای مقابله با خطرات فرسایش آبی در دشت سیستان و همچنین مناطق مشابه مورد استفاده قرار داد.

۵- فهرست نشانه‌ها

K	فاکتور فرسایش‌پذیری خاک
OM	درصد ماده‌آلیخاک
S	کلاس ساختمان خاکدانه
P	کلاس نفوذپذیری خاک
DI	تابش پخشیده
RSP	موقعیت شیب نسبی
VD	عمق دره
NDVI	شاخص نرمال‌شده تفاوت پوشش گیاهی

منطقه شده است. درنهایت، محتوای پایین یا حداقل SOM منجر به افزایش فاکتور-K به‌ویژه در بخش‌های اشاره‌شده گردیده است (Liu et al., 2019). تصاویر شاخص‌های RS نیز نشان می‌دهد (شکل ۳) که این اراضی در دوره مطالعاتی، دارای پوشش گیاهی ضعیف بوده، به‌طوری‌که بیش از ۵۳٪ از اراضی منطقه مورد مطالعه را پهنه‌های فرسایشی تشکیل می‌دهد که دلیل آن وجود اراضی بایر، مراتع با پوشش کم و اراضی کشاورزی است که به دلیل خشک‌سالی‌های متناوب و تامین نشدن نیاز آبی آن در حال تغییر کاربری می‌باشند (Jahantigh, 2021). در مجموع، می‌توان نتیجه گرفت که تغییرات در مقادیر ذرات معدنی خاک در این منطقه به ویژگی‌های ژئومورفیکی آن (دشت سیلابی و دلتایی) بستگی دارد و هم‌زمان با تغییرات در رژیم رسوب‌گذاری رودخانه هیرمند و شاخه‌های آن در دشت است. همچنین، فرآیندهای فرسایش بادی و رسوب‌گذاری در این ناحیه تاثیر کمی و مکانی بر این تغییرات دارند (Jamalzehi Samareh et al., 2021). همچنین شرایط اقلیمی و هیدرولوژیکی منطقه نیز تاثیر اصلی را بر پوشش گیاهی و میزان ماده‌آلیخاک دارد. به همین دلیل، این عوامل به نحوی مستقیم بر شاخص‌های فرسایش‌پذیری آبی خاک در دشت سیستان اثرگذارند و یافته‌های این پژوهش می‌تواند در راستای مدیریت اراضی مفید باشد.

۴- نتیجه‌گیری

تحقیق حاضر با هدف بررسی نقش فاکتورهای محیطی در تهیه نقشه پیش‌بینی فاکتور-K به همراه استفاده از مدل‌های زمین‌آماری COK و OK در بخش وسیعی از اراضی دشت سیستان صورت پذیرفت. به‌طورکلی برای تهیه نقشه پراکنش مکانی فاکتور-K چهار سناریو مدل‌سازی زمین‌آماری مورد بررسی قرار گرفت که درنهایت نتایج نشان داد که در رویکردی که مدل COK در تلفیق با متغیرهای کمکی توپوگرافی (مستخرج از DEM) بودند بالاترین مقدار دقت را بر اساس شاخص‌های آماری ارائه نمودند درحالی‌که روش OK کمترین مقدار دقت را در تهیه نقشه پیش‌بینی فاکتور-K ارائه نمود که این نتایج موثید نقش نمایندگان فاکتورهای خاک‌سازی در پیش‌بینی فاکتور فرسایش‌پذیری

VH	امواج عمودی و امواج افقی Sentinel-1	SAVI	شاخص تعدیل شده پوشش گیاهی خاک
γ_i	داده اندازه گیری شده	IPVI	شاخص پوشش گیاهی درصد مادون قرمز
$\hat{\gamma}_i$	مقدار پیش بینی	B8	باند مادون قرمز نزدیک Sentinel-2
$\bar{\gamma}$	میانگین داده های اندازه گیری شده	B4	باند قرمز Sentinel-2
$\hat{\gamma}^-$	میانگین داده های پیش بینی شده	VV	امواج عمودی و امواج عمودی Sentinel-1

Acknowledgments

The authors would like to express their deepest gratitude to the honorable reviewers of this paper for their valuable time and insightful comments, which greatly contributed to improving the manuscript. We also extend our sincere appreciation to the University of Zabol for its financial support of this research and for providing the laboratory facilities necessary to conduct the experiments.

Credit Authorship Contribution Statement

Conceptualization, A.S., E.S., and S.R.M.; methodology, A.H., A.S., E.S., A.Z.J., M.R., and S.R.M.; software, A.H., A.S., M.R., and S.R.M.; data analysis, A.H., A.S., E.S., A.Z.J., M.R., and S.R.M.; writing—original draft preparation, A.H., A.S., E.S., A.Z.J., M.R., and S.R.M.; writing—review and editing, A.S., E.S., A.Z.J., M.R., and S.R.M.; supervision, A.S. and E.S.. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding

This study was funded by the University of Zabol.

Data Availability Statement

The data that support the findings of this study are available from the corresponding author upon reasonable request

Conflicts of Interest

The authors declare that there are no conflicts of interest regarding the publication of this paper.

References

- 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.
- Afzali, S. F., Khanamani, A., Maskooni, E. K., Berndtsson, R. (2021). Quantitative assessment of environmental sensitivity to desertification using the modified MEDALUS model in a semiarid area. *Sustainability*, 13(14), pp 7817.

- Alaboz, P., Dengiz, O., Demir, S., Şenol, H. (2021). Digital mapping of soil erodibility factors based on decision tree using geostatistical approaches in terrestrial ecosystem. *Catena*, 207, pp 105634.
- Amirian Chekan, A., Taghizadeh Mehrjerdi, R., Sarmadian, F., Heidary, A. (2017). Three-dimensional mapping of soil texture using spline depth functions and artificial neural networks. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 48:1. 113-123. (In Persian with English abstract).
- Arrouays, D., McKenzie, N., Hempel, J., de Forges, A.R., McBratney, A.B. (2014). *GlobalSoilMap: Basis of the Global Spatial Soil Information System*. Taylor & Francis.
- Asadzadeh, F., Khosraviqdam, K., Yaghmaeian Mahabadi, N., Ramezanzpour, H. (2019). Spatial Variation of Mineral Particles of the Soil using Remote Sensing Data and Geostatistics to the Soil Texture Interpolation. *Water and Soil*, 32(6), pp 1207-1222. [Doi: 10.22067/jsw.v32i6.74046](https://doi.org/10.22067/jsw.v32i6.74046). (In Persian with English abstract).
- Auerswald, K., Fiener, P., Martin, W., Elhaus, D. (2014). Use and misuse of the K factor equation in soil erosion modeling. *Catena* 118, pp 220–225.
- Baskan, O., Cebel, H., Akgul, S., Erpul, G. (2010). Conditional simulation of USLE/RUSLE soil erodibility factor by geostatistics in a Mediterranean Catchment, Turkey. *Environmental Earth Sciences*, 60(6), pp 1179-1187.
- 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. [Doi: 10.22034/jewe.2019.200821.1330](https://doi.org/10.22034/jewe.2019.200821.1330). (In Persian with English abstract).D
- Beretta-Blanco, A., Carrasco-Letelier, L. (2017). USLE/RUSLE K-factors allocated through a linear mixed model for Uruguayan soils. *Ciencia E Investigacion Agraria*, 44, pp 100-112.
- Bonilla, C.A., Johnson, O.I. (2012). Soil erodibility mapping and its correlation with soil properties in Central Chile. *Geoderma* 189–190, pp 116–

123.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.05.005>
- Cambardella, C.A., Moorman, T.B., Parkin, T.B., Karlen, D.L., Novak, J.M., Turco, R.F., Konopka, A.E. (1994). Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil Science Society American Journal*. 58(5): pp 1501-1511.
- Camera, C., Zomeni, Z., Noller, J.S., Zissimos, A.M., Christoforou, I.C., Bruggeman, A. (2017). A high resolution map of soil types and physical properties for Cyprus: A digital soil mapping optimization. *Geoderma*. 285, pp 35-49.
- Charman, P.E.V. Roper, M.M. (2007) Soil Organic Matter. In: Charman, P.E.V. and Murphy, B.W., Eds., *Soils—Their Properties and Management*, 3rd Edition, Oxford University Press, Melbourne, pp 276-285.
- Crippen, R. E. (1990). Calculating the vegetation index faster. *Remote sensing of Environment*, 34(1), pp 71-73.
- Delbari, M., Loiskandl, W., Afrasiab, P. (2010). Uncertainty assessment of soil organic carbon content spatial distribution using geostatistical stochastic simulation. *Soil Res*. 48: pp 27-35.
- Efthimiou, N. (2020). The new assessment of soil erodibility in Greece. *Soil Tillage Res*. 204, pp 104720.
<https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104720>
- Emami, M., Khormali, F., Pahlavan-Rad, M.R., Ebrahimi, S. (2024). Preparation of three-dimensional maps of soil particle size fraction by combining quantile regression forest algorithm and spline functions in the north of Golestan province. Iran., *Iranian Journal of Soil and Water Research*. 55:1. Pp 51-68.
<https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.366978.669594>. (In Persian with English abstract).
- Godoi, R. de F., Rodrigues, D.B.B., Borrelli, P., Oliveira, P.T.S. (2021). High-resolution soil erodibility map of Brazil. *Sci. Total Environ*. 781, pp 146673.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146673>
- Golmohammadi, F., Nabiollahi, K., Taghizadeh Mehrjerdi, R., Davari, M. (2018). Digital mapping of soil erodibility (Case study: Dehgolan, Kurdistan Province). *Journal of Water and Soil Conservation*, 24(6), pp 87-103. [Doi: 10.22069/jwsc.2017.13388.2808](https://doi.org/10.22069/jwsc.2017.13388.2808). (In Persian with English abstract).
- Golshan, M., Kavian, A., Ismaili Auri, A., Ziegler, A. (2018). Assessment the soil erodibility factor in different formation in Shamsabad watershed. 13th National Conference on Watershed Science and Engineering of Iran and 3rd National Conference on Protection of Natural Resources and Environment, Mohagheg Ardebil University. (In Persian with English abstract).
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote sensing of Environment*, 202, pp 18-27.
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sens. Environ*. 202, pp 18-27.
- Hartemink, A.E., McBratney, A., & Mendonca-Santos, M.d.L. (2008). *Digital soil mapping with limited data*. Springer.
- 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). *Water and Soil*, 30(2), 443-458. [Doi: 10.22067/jsw.v30i2.25950](https://doi.org/10.22067/jsw.v30i2.25950). (In Persian with English abstract).
- Huete, A. R. 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI): *Remote Sensing of the Environment*, v. 25.
- Jamalzehi Samareh, Y., Shahriari, A., Pahlavan Rad, M., Ziaei Javaid, A. Bameri, 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 with English abstract)
- Kamangar, Mohammad, Farajzadeh Assal, Manouchehr, Badaghi, Marzieh, Kerami, Peyman. (2015). Universal Soil Loss Equation (RUSLE) Calibration Using GIS and Remote Sensing (Case Study: Sykhoran of Watershed Hormozgan). *Geographic Space*, 51: pp 191-207. (In Persian with English abstract).
- Karami, E., Ghorbani Dashtaki, S., Khalilimoghadam, B. (2018). Effects of land management on soil erodibility-A case study in part of Zayandeh-Rood watershed. *Agricultural Engineering*, 40(2), pp105-119. [Doi: 10.22055/agen.2018.18172.1281](https://doi.org/10.22055/agen.2018.18172.1281). (In Persian with English abstract).
- Keskin, H., Grunwald S., Harris, W.G. (2019). Digital mapping of soil carbon fractions with machine learning. *Geoderma*. 339, pp 40-58.
- Khosravani, P., Moosavi, A. A., Baghernejad, M. (2021). Spatial variations of soil penetration resistance and shear strength and the effect of land use type and physiographic unit on these characteristics. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 52(4), pp 1041-1057. [Doi: 10.22059/ijswr.2021.314779.668820](https://doi.org/10.22059/ijswr.2021.314779.668820). (In Persian with English abstract).

- Kumar, S., Kushwaha, S. (2013). Modelling soil erosion risk based on RUSLE-3D using GIS in a Shivalik sub-watershed. *Journal of Earth System Science*, 122, pp 389-398.
- Lagacherie, P., McBratney, A.B. 2006. Chapter 1 spatial soil information systems and spatial soil inference systems: perspectives for digital soil mapping. *Developments in Soil Science*. Pp 3 – 22.
- Liu, C. L., Wu, Y. Z., Liu, Q. J. (2015). Effects of land use on spatial patterns of soil properties in a rocky mountain area of Northern China. *Arabian Journal of Geosciences*, 8, pp 1181-1194.
- Ma, C. (2018). Quantitative retrieval of soil salt content based on Sentinel-1 dual polarization radar image. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 34(2), pp 153-158.
- Mallick, J., Al-Wadi, H., Rahman, A., Ahmed, M., Abad Khan, R. (2015): Spatial variability of soil erodibility and its correlation with soil properties in semi-arid mountainous watershed, Saudi Arabia, *Geocarto International*, 31 (6), pp 661-681. [DOI: 10.1080/10106049.2015.1073368](https://doi.org/10.1080/10106049.2015.1073368)
- Merchán, L., Martínez-Graña, A.M., Alonso Rojo, P., Criado, M. (2023). Water Erosion Risk Analysis in the Arribes del Duero Natural Park (Spain) Using RUSLE and GIS Techniques. *Sustainability*. 15, pp 1627.
- Mezbani, M., Rezaei Moghadam, M., Hejazi, A. (2021). Assessment of soil erosion risk in land uses using Revised Universal Soil Loss Equation (Case Study: Sikan Basin). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 10(1), pp 41-63. [Doi: 10.22067/geoch.2021.67238.0](https://doi.org/10.22067/geoch.2021.67238.0). (In Persian with English abstract).
- Minasny, B., McBratney, A.B. (2016). Digital soil mapping: a brief history and some lessons. *Geoderma*. 264, pp 301-311.
- Mirakzehi, K., Pahlavan-Rad, M.R., Shahriari, A., Bameri, A. (2018). Digital soil mapping of deltaic soils: A case of study from Hirmand (Helmand) river delta. *Geoderma*. 313, 233-240.
- Mohammadi, Sh., Balouei, F., Haji, Kh., Khaledi-Darvishan, A., Karydas, C.G. (2021). Country-scale spatio-temporal monitoring of soil erosion in Iran using the G2 model. *International Journal of Digital Earth*, 14:8, pp 1019-1039, [Doi: 10.1080/17538947.2021.191923](https://doi.org/10.1080/17538947.2021.191923).
- Mousavi, S. R., Parsayi, F., Rahmani, A., Sedri, M. H., Kohsar Bostani, M. (2020). Spatial Prediction Some of the Surface Soil Properties Using Interpolation and Machine Learning Models. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 10(3), pp 27-49. [Doi: 10.22069/ejsms.2021.17251.1916](https://doi.org/10.22069/ejsms.2021.17251.1916).
- Mousavi, S. R., Sarmadian, F., Omid, M., Bogaert, P. (2022). Three-dimensional mapping of soil organic carbon using soil and environmental covariates in an arid and semi-arid region of Iran. *Measurement*, 201, pp 111706.
- Olaya, V., Conrad, O. (2009). "Geomorphometry in SAGA." *Developments in soil science* 33, pp 293-308.
- Oliver, M. A. (Ed.). 2010. *Geostatistical applications for precision agriculture*. Springer Science & Business Media.
- Oliver, M. A., Webster, R. (2014). A tutorial guide to geostatistics: Computing and modelling variograms and kriging. *Catena*, 113, pp 56-69.
- Omidvar, E., Kaviani, A., Solaimani, K., & Mashari, S. (2016). Investigation of applicability of soil map units to estimate the spatial variability of soil erodibility. *Desert Ecosystem Engineering*, 4(9), pp 95-107. [Doi: 10.22052/deej.2016.113630](https://doi.org/10.22052/deej.2016.113630). (In Persian with English abstract).
- Ostovari, Y., Ghorbani-Dashtaki, S., Bahrami, H. A., Naderi, M., Dematte, J. A. M., Kerry, R. (2016). Modification of the USLE K factor for soil erodibility assessment on calcareous soils in Iran. *Geomorphology*, 273, pp 385-395.
- Ostovari, Y., Ghorbani-Dashtaki, S., Bahrami, H. A., Naderi, M., Abassi, M. 2015. Spatial changes in soil erodibility and the factors affecting it upstream of the Sivand Dam. *Quantitative Geomorphology Research*, 3: pp 142-127. (In Persian with English abstract).
- 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. [Doi: 10.22059/ijswr.2023.367197.669596](https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.367197.669596). (In Persian with English abstract).
- Pahlavan-Rad, M., Akbarimoghadam, A. (2018). Spatial variability of soil texture fractions and pH in a flood plain (case study from eastern Iran). *Catena*, 160: pp 275-281.
- Panagos, P., Meusbürger, K., Ballabio, C., Borrelli, P., & Alewell, C. (2014). Soil erodibility in Europe: a high-resolution dataset based on LUCAS. *The Science of the total environment*, 479-480, pp 189-200.
- Raj, R., Saharia, M., & Chakma, S. (2023). Mapping of Soil Erodibility Over India. *Catena*, 230, pp 107271. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107271>.
- Renard, K.G., Foster, G.R., Weessies, G.A., McCool, D.K. (1997). *Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*.

- In: Yoder DC, editor. U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook 703.
- 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 with English abstract).
- Setianto, A., Triandini, T. (2013). Comparison of kriging and inverse distance weighted (IDW) interpolation methods in lineament extraction and analysis. *Journal of Applied Geology*, 5(1).
- 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](https://doi.org/10.22111/jneh.2024.49372.2060) (In Persian with English abstract).
- 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](https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104149).
- Taghizadeh-Mehrjardi, R., Schmidt, K., Toomanian, N., Heung, B., Behrens, T., Mosavi, A., Scholten, T. (2021). Improving the spatial prediction of soil salinity in arid regions using wavelet transformation and support vector regression models. *Geoderma*, 383, 114793.
- Tamiru, B., Soromessa, T., Warkineh, B., Legese, G. (2023). Mapping Soil Parameters with Environmental Covariates and Land Cover Projection in Tropical Rainforest, Hangadi Watershed, Ethiopia. *Sustainability*, 15, pp 1066.
- Tian, Z., Liu, F., Liang, Y., Zhu, X. (2022). Mapping soil erodibility in southeast China at 250 m resolution: Using environmental variables and random forest regression with limited samples. *International Soil and Water Conservation Research*, 10(1), pp 62-74.
- Tittonell, P., Muriuki, A., Shepherd, K. D., Mugendi, D., Kaizzi, K. C., Okeyo, J., Vanlauwe, B. (2010). The diversity of rural livelihoods and their influence on soil fertility in agricultural systems of East Africa—A typology of smallholder farms. *Agricultural systems*, 103(2), pp 83-97.
- Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote sensing of Environment*, 8(2), pp 127-150.
- Uddin, K., Murthy, M. S. R., Wahid, S. M., Matin, M. A. (2016). Estimation of soil erosion dynamics in the Koshi basin using GIS and remote sensing to assess priority areas for conservation. *PloS one*, 11(3), pp e0150494.
- Vaezi, A., Bahrami, H., Sadeghi, S. H., Mahdian, M. (2010). Uncertainty of the Soil Erodibility Factor (K), Estimated Using the USLE Nomograph in Calcareous Soils of Hashtrood, (North-West of Iran). *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 40(1), pp 27-34. (In Persian with English abstract).
- Wang, L. Liu, H. (2006). An efficient method for identifying and filling surface depressions in digital elevation models for hydrologic analysis and modelling. *International Journal of Geographical Information Science*, 20 (2), pp 193-213.
- Wilding, L. (1985). Spatial variability: its documentation, accommodation and implication to soil surveys. In: *Soil Spatial Variability. Workshop*, pp 166-194.
- Wischmeier, W.H., Smith, D.D. (1978). *Predicting Rainfall Erosion Losses—A Guide to Conservation Planning*. Agriculture Handbook No. 282, USDA.
- Yang, X., Gray, J., Chapman, G., Zhu, Q., Tulau, M., McInnes-Clarke, S. (2018). Digital mapping of soil erodibility for water erosion in New South Wales, Australia. *Soil Research* 56, pp 158-170. <https://doi.org/10.1071/SR17058>
- Yousefi, B., Nazarnejad, H., Mir Yaqubzadeh, M.H. (2015). Comparison of erosion and sediment estimation methods in order to correct the soil erodibility factor in Nazlochai watershed, Urmia. *Second International Congress of Earth Sciences and Urban Development*. (In Persian with English abstract).
- Yu, W., Jiang, Y., Liang, W., Wan, D., Liang, B., Shi, Z. (2023). High-resolution mapping and driving factors of soil erodibility in southeastern Tibet. *CATENA*. 220, Part B: pp 106725.
- Zahmatkesh, M., Abrishamkesh, S., Yaghmaeian Mahabadi, N., Asadi, H. (2024). Estimation and Zoning of Soil Erodibility Factor in Aliabad Watershed, Roodbar, Guilan Province. *Applied Soil Research*, 11(4), pp 126-141. (In Persian with English abstract).
- Zhang, Z., Du, Y., Lao, C., Yang, N., Zhou, Y., Yang, Y. (2020). Inversion model of soil salt content in different depths based on radar remote sensing. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 51, pp 243-251.
- Zhou, T., Zhao, M., Sun, C., Pan, J. (2018). Exploring the impact of seasonality on urban land-cover mapping using multi-season sentinel-1a and gf-1 wfv images in a subtropical monsoon-climate region. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 7(1), pp 3.
- Zhu, M., He, W., Liu, Y., Chen, Z., Dong, Z., Zhu,

C., Chen, Y., Xiong, Y. (2022). Characteristics of Soil Erodibility in the Yinna Mountainous Area, Eastern Guangdong Province, China.

International Journal of Environmental Research and Public Health, 19, pp 157