Assessment of Spatial Variability of Soil Erodibility Factor (K) Using Geostatistical Technique

Jafar Karimi Shiasi [a], **Farzaneh Fotouhi Firoozabad** [b, *], **Ali Fathzadeh** [c], **Mehdi Hayatzadeh** [c], **Mostafa Shirmardi** [d]

[a] *Master's degree in soil and water conservation, Ardakan University, Ardakan, Iran.*
[b] *Assistant Professor, Department of Natural Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Ardakan, Ardakan, Iran.*
[c] *Associate Professor, Department of Natural Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Ardakan, Ardakan, Iran.*
[d] *Associate Professor, Department of Horticultural Sciences, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Ardakan, Ardakan, Iran.*

Research Full Paper
Article History (Received: 2025/08/24 Accepted: 2026/06/28)

Extended abstract

1- Introduction

Soil susceptibility to erosional processes such as detachment by raindrop impact or shear from surface runoff is referred to as soil erodibility. Intrinsic soil properties including texture, aggregate stability, shear strength, infiltration capacity, and the content of organic matter and chemical elements are the most important factors influencing soil erodibility. Although other factors, such as the degree of disturbance (e.g., tillage), also have an impact, the dependence of soil erodibility on the soil's physical, mechanical, hydrological, chemical, geological, mineralogical, and biological characteristics makes its concept and assessment complex. Various approaches are commonly used to determine and estimate soil erodibility. These include:

* Long-term direct measurement of soil loss under natural rainfall conditions.

* Rainfall simulation experiments.

* Predictive models and equations based on measurable, independent soil variables correlated with erodibility.

Due to the time-consuming and labor-intensive nature of direct measurement, researchers often rely on rainfall simulators, models, and predictive equations for estimating soil erodibility. Over the past decade, numerous studies across different landforms have been conducted to predict the soil erodibility factor using both classical statistical and geostatistical methods. Geostatistics encompasses various techniques—such as kriging—to estimate the spatial variability of a given variable. Kriging has been widely applied by soil scientists to assess soil erodibility factors. The Dourahan watershed is a sub-basin of the Greater Karun River. Given the construction of several hydroelectric dams along the Karun, identifying erosion-prone areas within the watershed is essential to prevent reservoir capacity reduction due to sediment accumulation. Proper management measures must be implemented to control erosion in these areas. Accordingly, this study investigates the soil erodibility index in the Dourahan watershed. Furthermore, due to the variety of interpolation techniques, identifying the method with the least estimation error for assessing spatial variations of terrain factors is necessary. This study therefore evaluates several common interpolation methods, including ordinary kriging, simple kriging, and the inverse distance weighting (IDW) method with a power of two.

* **Corresponding Author: f.fotouhi@ardakan.ac.ir**

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-01]

[DOI: 10.61882/jeer.16.2.2]

2- Methodology

The Dourahan watershed, with a total area of 3,964.01 ha, is located in Borujen County, Chaharmahal and Bakhtiari Province, Iran, and is a sub-basin of the Greater Karun River. Its geographic coordinates range from 31°36′45″ to 31°42′43″ N latitude and 51°03′07″ to 51°13′00″ E longitude. Based on accessibility to different parts of the watershed and geological, lithological, and topographic maps, 58 surface soil samples were collected using a stratified random sampling design. Sampling plots were 20 × 20 m in size, and samples were taken from the 0–30 cm depth. Soil structure codes were determined in the field based on aggregate size and shape, and infiltration rates were estimated using the tables proposed by Wischmeier and Smith. Selected physico-chemical properties—including particle size distribution (hydrometer method) and organic matter content (Walkley–Black method)—were analyzed in the laboratory. The percentage of sand, silt, clay, and very fine sand was calculated. The soil erodibility factor (K) was computed using the Wischmeier and Smith equation. Spatial mapping of the K-factor was conducted using ordinary kriging, simple kriging, and inverse distance weighting with power 2. Cross-validation techniques and statistical indices—mean error (ME), mean bias error (MBE), mean absolute error (MAE), root mean square error (RMSE), and mean square error (MSE)—were used to assess and compare interpolation accuracy.

3- Results

Analysis of soil physical and chemical properties indicated that the watershed soils are predominantly light-textured, ranging from loam to silty loam, with moderately adequate organic matter and high lime content. Soil structure was mostly very fine to fine granular and crumb-like. According to the USLE classification, most samples fell into structure group 1, with fewer in groups 2 and 3. Soil profile permeability was generally moderate (class 3), with occasional occurrences in classes 4 and 5. The soil erodibility index (K-factor) across the watershed ranged from 0.0148 to 0.0661 $t \cdot h \cdot MJ^{-1} \cdot mm^{-1}$, with a coefficient of variation (CV) of 0.27, indicating moderate variability. The best-fitting semivariogram model for ordinary kriging was Gaussian, while for simple kriging it was spherical. Ordinary kriging with a Gaussian model provided the most accurate estimation (RMSE = 0.01020). Erodibility maps showed that the eastern part of the watershed had the highest K-factor values, the central part had moderate values, and the western part had the lowest. The low values in the west are due to extensive rock outcrops, which act as a protective layer against erosion. Overall, soil erodibility decreases from east to west across the watershed.

4- Discussion & Conclusions

The results highlight the need for similar studies in other regions of Iran with different soil textures and gravel contents, in order to better understand the influence of clay and silt on soil erodibility. In addition, two important parameters in Iran—salinity and sodicity (saline–sodic conditions)—may significantly affect soil erodibility. Experiments using rainfall simulators are recommended to evaluate their impacts. For optimal utilization of soil and water resources and reduction of erosion, integrated watershed management is essential. This requires comprehensive baseline data on watershed characteristics, including erosion susceptibility maps, vegetation cover maps, and geological maps. Using appropriate interpolation methods (e.g., various kriging approaches, IDW) with sufficient sample collection can yield reliable and accurate soil erodibility maps, supporting effective erosion control and land management strategies.

Key Words: Dourahan watershed; Soil erosion; Kriging; Inverse distance weighting (IDW); Universal Soil Loss Equation (USLE).

Cite this article: Karimi Shiasi , J., Fotouhi Firoozabad, F., Fathzadeh, A., Hayatzadeh, M. & Shirmardi, M. (2026). Assessment of Spatial Variability of Soil Erodibility Factor (K) Using Geostatistical Technique. *Journal of Environmental Erosion Research. 2026; 16 (2) :96-114*. http//doi.org/10.61882/jeer.16.2.2

© The Author(s).
DOI: http//doi.org/10.61882/jeer.16.2.
Published by Hormozgan University Press.
URL: http://magazine.hormozgan.ac.ir

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-01]
[DOI: 10.61882/jeer.16.2.2]

ارزیابی تغییرات مکانی ضریب فرسایش‌پذیری خاک (K) با استفاده از تکنیک زمین‌آمار

جعفر کریمی شیاسی: *دانش آموخته کارشناسی ارشد حفاظت آب و خاک دانشگاه اردکان، اردکان، ایران.*
فرزانه فتوحی فیروزآباد *: *استادیار، گروه مهندسی طبیعت، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه اردکان، اردکان، ایران.*
علی فتح زاده: *دانشیار، گروه مهندسی طبیعت، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه اردکان، اردکان، ایران.*
مهدی حیات زاده: *دانشیار، گروه مهندسی طبیعت، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه اردکان، اردکان، ایران.*
مصطفی شیرمردی: *دانشیار، گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه اردکان، اردکان، ایران.*

نوع مقاله: پژوهشی
تاریخچهٔ مقاله (تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۰۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۰۷)
DOI: http//doi.org/10.61882/jeer.16.2.2

چکیده

تغییرپذیری عامل فرسایش‌پذیری خاک یا مقاومت خاک در برابر حرکت ذرات، از اجزاء مهم معادله جهانی فرسایش خاک می‌باشد. پژوهش حاضر با هدف بررسی تغییرپذیری مکانی عامل فرسایش‌پذیری خاک در بخشی از حوزه آبخیز دوراهان در شهرستان بروجن از استان چهارمحال و بختیاری انجام شد. برای تهیه نقشه‌های لازم، نمونه‌برداری به صورت شبکه نظام‌بند در ۵۸ نقطه و از عمق ۰ تا ۳۰ سانتیمتری سطح خاک صورت گرفت. ساختمان خاک، درصد مواد آلی، نفوذپذیری، درصد ماسه درشت، درصد ماسه خیلی ریز و سیلت اندازه‌گیری شد. تغییرپذیری مکانی عامل فرسایش‌پذیری خاک با استفاده از تغییرنما و نسبت واریانس اثر قطعه‌ای به واریانس کل مورد بررسی قرار گرفت و برای تهیه نقشه پهنه‌بندی عامل فرسایش‌پذیری از روش‌های مختلف درون‌یابی از جمله کریجینگ ساده، کریجینگ معمولی و وزن‌دهی عکس فاصله استفاده شد. اعتبار نقشه‌ها با کاربرد شاخص‌های آماری خطا ارزیابی گردید. نتایج نشان داد که شاخص فرسایش‌پذیری خاک در کل حوزه آبخیز بین ۰/۰۶۶۱- ۰/۰۱۴۸ تن‌ساعت بر مگاژول میلی‌متر متغیر است. تغییرپذیری حوزه آبخیز از نظر شاخص فرسایش‌پذیری در گروه متوسط قرار دارد. بهترین مدل برازش داده شده برای شاخص فرسایش‌پذیری در روش کریجینگ معمولی، گوسی و در روش کریجینگ ساده، مدل دایره‌ای می‌باشد. روش کریجینگ معمولی با مدل کروی با RMSE=۰/۰۱۰۲۰، بهترین برآورد و مناسب‌ترین روش از بین سایر روش‌های میان‌یابی می‌باشد. نقشه‌ی پهنه‌بندی شاخص فرسایش‌پذیری خاک نشان داد که بخش شرقی حوزه آبخیز حساسیت بالاتری به فرسایش دارد و در سمت غرب حوزه آبخیز به دلیل رخساره‌های کوهستانی دارای کم‌ترین مقدار بوده است. این امر بیشتر به‌دلیل کاهش نفوذپذیری خاک، افزایش میزان سیلت، کمتر بودن مقدار رس و همچنین وجود سازندهای حساس به فرسایش می‌باشد. البته تأثیر عوامل بیرونی از جمله چرای مفرط دام در مراتع و تخریب پوشش گیاهی را نیز نباید نادیده گرفت.

واژگان کلیدی: حوزه آبخیز دوراهان، فرسایش خاک، کریجینگ، وزن‌دهی عکس فاصله، USLE.

* **نویسندهٔ مسئول:** f.fotouhi@ardakan.ac.ir

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-01]
[DOI: 10.61882/jeer.16.2.2]

۱ـ مقدمه

فرسایش‌پذیری خاک یا به عبارتی Soil Erodibility به میزان حساسیت ذاتی خاک در برابر فرآیندهای فرسایشی اطلاق می‌شود و نشان‌دهنده تمایل ذرات خاک به جدا شدن و انتقال تحت تأثیر انرژی برخورد قطرات باران و نیروی برشی جریان سطحی است. این کمیت به‌عنوان عامل K در مدل‌های پیش‌بینی فرسایش آبی، مانند USLE و نسخه‌های به‌روز آن به‌کار می‌رود و تحت تأثیر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مانند بافت، ساختار، درصد مواد آلی و سایر خصوصیات قرار دارد (Abiye and Dengiz, 2025).

ویژگی‌های ذاتی خاک از قبیل بافت، پایداری خاکدانه، مقاومت برشی، ظرفیت نفوذپذیری و مقدار مواد آلی و عناصر شیمیایی خاک، مهمترین عوامل مؤثر بر مقدار فرسایش‌پذیری خاک هستند. اگرچه عواملی از قبیل میزان بهم خوردگی (مانند شخم) نیز بر آن مؤثر است (Morgan, 2005; Khalilmoghadam et al., 2011). به دلیل تأثیرپذیری فرسایش-پذیری از خواص فیزیکی، مکانیکی، هیدرولوژی، شیمیایی، ژئولوژی، کانی شناسی و زیست‌شناختی خاک (Veihe, 2002) مفهوم و نحوه ارزیابی آن پیچیده است. اغلب برای تعیین و برآورد فرسایش‌پذیری خاک، سه روش زیر استفاده می‌شود (Zhang et al., 2019): الف) اندازه‌گیری واقعی میزان هدررفت خاک در شرایط باران طبیعی در دوره طولانی، ب) استفاده از شبیه‌سازی بارندگی، و ج) استفاده از مدل‌ها و معادلات پیش‌بینی‌کننده متکی به متغیرهای مستقل و قابل اندازه‌گیری خاک که با فرسایش‌پذیری همبستگی دارند. به علت سختی و زمان بر بودن اندازه‌گیری فرسایش پذیری واقعی خاک، محققان بیش‌تر از شبیه‌ساز باران، مدل‌ها و معادلات پیش‌بینی کننده در برآورد فرسایش‌پذیری خاک بهره می‌گیرند (Karami et al., 2018; Zhang et al., 2019).

محققان زیادی برای برآورد فرسایش‌پذیری خاک از روابط تجربی کمک گرفته‌اند (Zhang et al., 2019; Ostovari et al., 2018; Wang et al., 2016). یکی از مهم‌ترین و متداول‌ترین مدل‌های تجربی، رابطه جهانی هدررفت خاک (USLE) و نسخه‌های تکامل‌یافته‌ی آن از قبیل MUSLE و RUSLE است. شاخص فرسایش‌پذیری در این مدل، با شبیه‌سازی باران به مدت دو ساعت با شدت ۶۳/۵ میلی‌متر در ساعت (Khormai et al., 2016) و از تقسیم مقدار هدررفت خاک از کرت استاندارد بر شاخص فرسایندگی باران توسعه یافته است (Zhang et al., 2004). کرت استاندارد، زمینی به عرض ۱/۸۳ متر و طول ۲۲/۱ متر با شیب ۹ درصد، شخم خورده در جهت شیب، و تحت آیش دائمی است که سطح آن هیچ‌گونه پوشش و بقایای گیاهی ندارد (Wischmeier and Smith, 1978). برای برآورد این شاخص، Wischmeier و Smith (۱۹۷۸)، رابطه رگرسیونی بر اساس پنج ویژگی خاک شامل ماسه درشت، مجموع ماسه خیلی ریز و سیلت، ماده آلی، ساختمان و نفوذپذیری نیمرخ خاک توسعه داده‌اند که به صورت نمودار ترسیمی مرکب نیز ارائه شده است.

با توجه به این حقیقت که روش‌های سنتی برآورد تلفات خاک توزیع مکانی فرسایش‌پذیری خاک را به دقت در نظر نمی‌گیرند، آگاهی از میزان تغییرات مکانی عامل فرسایش‌پذیری در کنار سایر عوامل مانند کاربری اراضی و شیب منطقه، راهنمایی اساسی برای اولویت‌بندی و پیاده‌سازی طرح‌های کنترل فرسایش است (Arnold, 1996). به همین علت در دهه گذشته مطالعات زیادی در لندفرم‌های مختلف برای پیش‌بینی عامل فرسایش‌پذیری خاک با استفاده از روش‌های آمار کلاسیک و زمین آمار انجام شده است (Imani et al., 2014). زمین آمار شامل روش‌های مختلفی از جمله کریجینگ برای تخمین تغییرپذیری مکانی یک متغیر است. کریجینگ به طور گسترده توسط دانشمندان علوم خاک برای ارزیابی

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-01]

[DOI: 10.61882/jeer.16.2.2]

عامل فرسایش‌پذیری خاک مورد استفاده قرار می‌گیرد (Lie & Heap, 2008). امروزه تغییرات کاربری اراضی و چرای بیش از حد مراتع باعث از دست روی و فرسایش خاک شده است. برای جلوگیری از این بحران، اتخاذ شیوه‌های مناسب کشت (مثل کشت روی خطوط تراز و...)، جلوگیری از چرای بیش از حد و در نهایت اتخاذ استراتژی‌های درست توسط برنامه‌ریزان و پیاده‌سازی آن به وسیله مدیران با دقت بیشتر، می‌تواند به حفظ محیط زیست و در نهایت به افزایش طول عمر منابع بیانجامد (Biswas & Pani, 2015).

تحقیقات پیشین در زمینه پهنه‌بندی فرسایش‌پذیری خاک نشان می‌دهد که روش‌های درون‌یابی مکانی، به‌ویژه روش‌های زمین‌آماری، از دقت و کارایی بالاتری برخوردارند. در این مطالعات، روش کریجینگ با مدل‌های مختلفی مانند نمایی و گوسی، به‌عنوان مناسب‌ترین روش برای برآورد و ترسیم نقشه‌های فرسایش‌پذیری خاک در بسیاری از حوزه‌های آبخیز معرفی شده است (Baskan & Dengiz, 2008؛ Motagian et al., 2009؛ Mirzaee et al., 2016 ؛ Kiani Harchegani et al.,2019، Gholami et al., 2020، Javadi et al., 2022)، همچنین در برخی پژوهش‌ها از روش وزن‌دهی عکس فاصله (IDW) برای میان‌یابی عامل فرسایش‌پذیری خاک استفاده شده است که اگرچه در مواردی نتایج قابل قبولی ارائه داده، اما در مقایسه با کریجینگ از دقت کمتری برخوردار بوده است (Panagos et al., 2012؛ Khosraviaqdam et al., 2019؛ Olaniya et al., 2020). علاوه بر این، به‌کارگیری مدل‌های تجربی فرسایش نظیر RUSLE و WEPP در ترکیب با روش‌های زمین‌آماری و داده‌های سنجش از دور، نقش مؤثری در بهبود تحلیل الگوی مکانی و شناسایی مناطق حساس به فرسایش داشته است (Babaei et al., 2016؛ Mirzaee et al., 2016). به‌طور کلی، مرور منابع نشان می‌دهد که استفاده از روش‌های کریجینگ و در مواردی IDW، به‌عنوان رویکردهای مناسب برای پهنه‌بندی فرسایش‌پذیری خاک، مورد تأکید اغلب مطالعات داخلی و خارجی قرار گرفته است.

از آنجایی که فرسایش خاک امروزه به یک معضل بزرگ تبدیل شده، فرسایش خاک امنیت غذایی جامعه بشری و محیط زیست را به خطر می‌اندازد و حاصل فرسایش، تولید رسوب در حوضه‌های پایین دست است. از طرفی حوضه آبخیز دوراهان از زیر حوضه‌های کارون بزرگ است و با توجه به احداث چندین سد برق- آبی در مسیر کارون، برای جلوگیری از کاهش ظرفیت مفید مخازن سدها ضرورت دارد که مناطق فرسایش‌پذیر در حوضه، شناسایی و با اقدامات مدیریتی صحیح، کنترل شود.

به سبب تنوع روش‌های درون‌یابی لازم است تا کم خطاترین روش در ارزیابی تغییرات مکانی فرسایش‌پذیری خاک مشخص گردد لذا در این مقاله تلاش شده است تا تعدادی از رایج‌ترین روش‌های درون‌یابی نرم افزار ArcGIS نظیر کریجینگ معمولی و ساده به همراه روش وزن‌دهی عکس فاصله مورد ارزیابی قرار گیرد. به کمک روش‌های درون‌یابی اشاره شده، پهنه‌بندی شاخص فرسایش‌پذیری آبی خاک صورت انجام شد.

۲- روش پژوهش

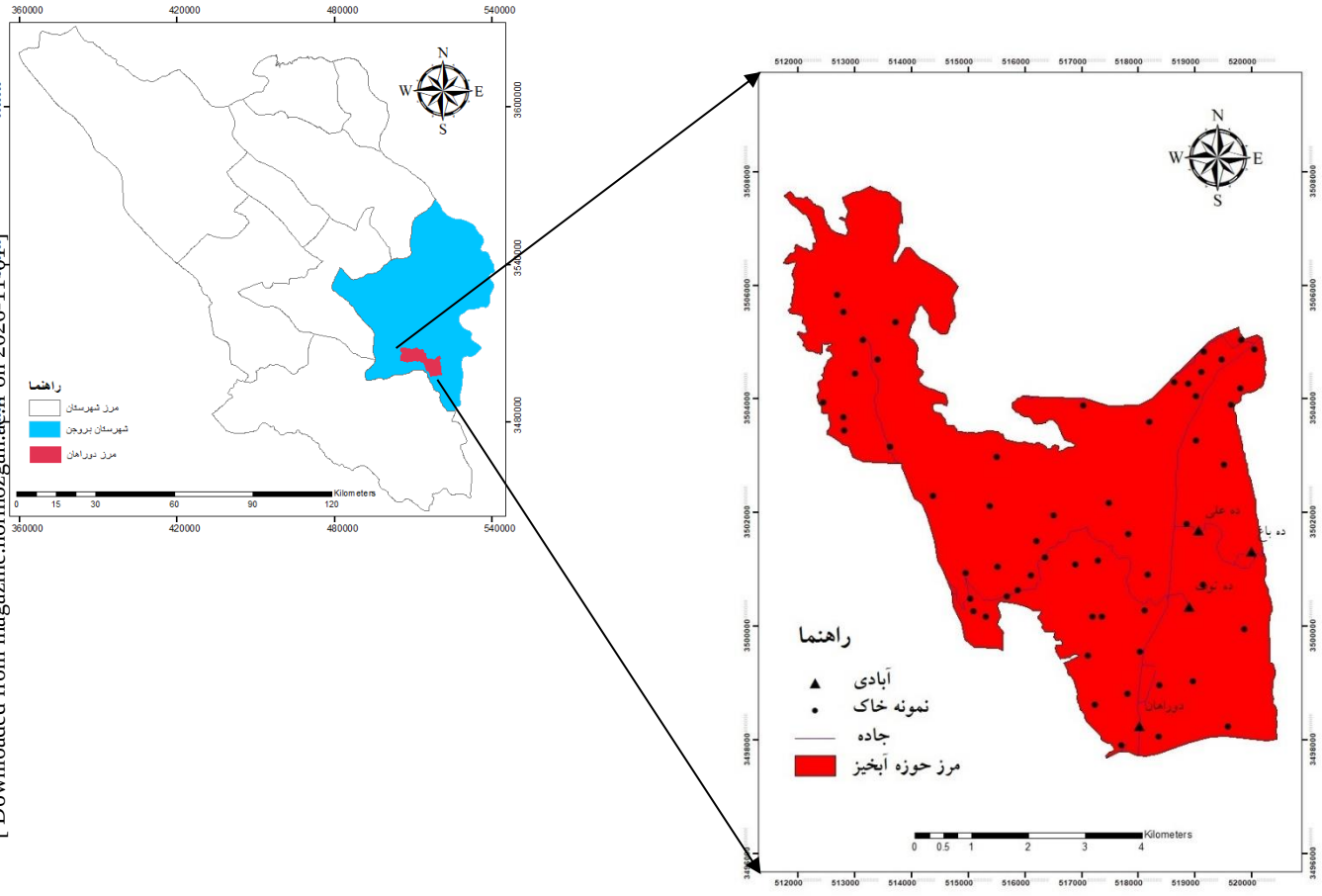
۲-۱- منطقه مورد مطالعه

حوزه آبخیز دوراهان از زیر حوزه‌های آبریز کارون بزرگ، با مجموع مساحت ۳۹۶۴/۰۱ هکتار، در شهرستان بروجن، استان چهارمحال و بختیاری واقع می‌باشد. مختصات جغرافیایی این حوزه آبخیز ″۴۵ ′۳۶ °۳۱ الی ″۴۳ ′۴۲ °۳۱ عرض شمالی و ″۰۷ ′۰۳ °۵۱ الی ″۰۰ ′۱۳ °۵۱ طول شرقی است. دسترسی به حوزه آبخیز از طریق مسیر شهرستان بروجن-

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-01]

[DOI: 10.61882/jeer.16.2.2]

لردگان و در حدود ۴۵ کیلومتر از شـهر بروجن به سـمت لردگان امکان‌پذیر اسـت. در داخل حوزه آبخیز نیز راه‌های ارتباطی از نوع آسـفالته ۳ و جیپ‌رو وجود دارد. شـیب حوزه آبخیز تقریباً ۳۰ تا ۶۰ درصـد اسـت. حوزه آبخیز مورد مطالعه جزء زون رورانده یا زاگرس مرتفع می‌باشد. اقلیم حوزه آبخیز برآیندی از عناصر مختلف انتزاعی اقلیمی است و عمدتاً تحت تأثیر ارتفاعات، سیستم‌های مدیترانه‌ای و فراسرد ارتفاعی است و اقلیم این حوزه آبخیز طبق تقسیم‌بندی آمبرژه، در دسـته اقلیم ارتفاعات قرار دارد. حداقل ارتفاع و حداکثر ارتفاع حوزه آبخیز به ترتیب ۱۹۷۸ و ۲۹۹۸ متر از سطح دریا می‌باشد و متوسط بارش حوزه آبخیز ۶۸۲/۶ میلی‌متر در سال است، متوسط حجم بارندگی در حوزه آبخیز تقریباً ۵۳/۶ میلیون متر مکعب می‌باشد (Sabz Arian Consulting Engineers, 2021). متوسط حداقل دما در سردترین ماه سال ۱۲/۲- مربوط به دی‌ماه، متوسط حداکثر دما در گرم‌ترین ماه سال ۲۷/۹ مربوط به تیرماه می‌باشد. از نظر کاربری اراضی ۷۸ درصد سطح حوزه آبخیز را تیپ مرتع و باقی مانده را مناطق کشاورزی و مسکونی تشکیل می‌دهد (Karimi Shiasi, 2024). شکل (۱) موقعیت مکانی حوزه آبخیز دوراهان واقع در شهرستان بروجن، استان چهارمحال و بختیاری و کشور ایران را نشان می‌دهد.



شکل ۱: موقعیت مکانی نقاط نمونه‌برداری در حوزه آبخیز دوراهان

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-01]

[DOI: 10.61882/jeer.16.2.2]

۲-۲- جمع آوری داده‌های پژوهش

در ابتدا به کمک نقشه‌های توپوگرافی مقیاس ۱:۵۰۰۰۰ رقومی سازمان جغرافیایی، تصاویر ماهواره‌ای ETM^{+} و با استفاده از نرم افزار ArcGIS مرز منطقه مطالعاتی ترسیم شد. سپس با در نظر گرفتن شرایط کلی منطقه، الگوی نمونه‌برداری تصادفی برای حوزه آبخیز مشخص شد. با توجه به شرایط دسترسی به بخش‌های مختلف منطقه و بر اساس نقشه واحدهای سنگ شناسی، زمین‌شناسی و توپوگرافی، در مجموع ۵۸ نمونه از خاک سطحی به روش طبقه‌بندی- تصادفی در داخل حوزه آبخیز با استفاده از پلات ۲۰*۲۰ تا از عمق ۰ تا ۳۰ سانتی‌متری برداشت شد. کدهای ساختمان خاک نیز بر اساس اندازه و شکل خاکدانه‌ها در صحرا و نفوذپذیری آب در خاک از جداول پیشنهادی ویشمایر و اسمیت تعیین گردید (Karimi Shiasi, 2024).

۲-۳- نمونه‌برداری آزمایشگاهی

نمونه‌های خاک پس از انتقال به آزمایشگاه هوا خشک شده و بعد از عبور از الک ۲ میلی‌متری، برخی از ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک‌های مورد مطالعه نظیر توزیع اندازه ذرات به روش هیدرومتری (Karimi Shiasi, 2024) و مقدار مواد آلی نیز با استفاده از روش والکی و بلک (Karimi Shiasi, 2024) تعیین شد. پس از انجام آزمایشات مربوطه، درصد ذرات معدنی خاک شامل شن، سیلت و رس و همچنین درصد شن خیلی ریز محاسبه شد.

۲-۴- روش محاسبه عامل فرسایش‌پذیری خاک

عامل فرسایش‌پذیری خاک مفهومی پیچیده است که منعکس‌کننده شمار زیادی از ویژگی‌های خاک بوده و مقاومت خاک در برابر فرسایش را نشان می‌دهد (Buttafuoco et al., 2012). این عامل به توصیف کمی توانایی ذرات نسبت به جدا شدن می‌پردازد. در واقع این فاکتور بیان می‌کند در شرایط یکسان، خاک‌های مختلف فرسایش‌پذیری متفاوتی دارند (Goldman et al., 1986). این متغیر بسیار مهم خاک در مدل USLE تحت عنوان عامل K شناخته شده و تخمین اولیه آن با استفاده از داده‌های توزیع اندازه ذرات و همچنین مقدار ماده آلی امکان‌پذیر است (Morgan, 2009). ویشمایر و اسمیت (Wischmeier & Smith., 1978) بین پانزده خصوصیت خاک و عامل فرسایش‌پذیری خاک، رابطه‌ای به دست آوردند که خیلی عملی نبود و سرانجام توانستند همبستگی خوبی را بین عامل فرسایش‌پذیری و پنج خصوصیت فیزیکی خاک برقرار کنند. این خصوصیات شامل مجموع درصد سیلت با ابعاد ۰/۰۰۵ – ۰/۰۲ میلی‌متر و شن خیلی ریز با ابعاد ۰/۰۵/۱-۰/۰ میلی‌متر، درصد شن با ابعاد ۲- ۰/۱ میلی‌متر، مقدار مواد آلی، نوع ساختمان خاک و نفوذپذیری بودند و بر طبق این خصوصیات معادله (۱) و (۲) را برای محاسبه عامل فرسایش‌پذیری خاک ارائه کردند:

$$K = \frac{\{(2.1 \times M^{1.14})(10^{-7})(12 - a) + 3.25(b - 2)(10^{-3}) + 2.5(c - 3)10^{-3}\}}{100} \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$M = (\%Silt + \%Very\ fine\ sand) \times (100 - \%Clay) \quad \text{رابطه (۲)}$$

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-01]

[DOI: 10.61882/jeer.16.2.2]

در این رابطه K عامل فرسایش‌پذیری خاک، a درصد مواد آلی، b کد ساختمان خاک، c کد نفوذپذیری خاک می‌باشد. در این رابطه عامل فرسایش‌پذیری خاک (K) در سیستم آمریکایی بر حسب ۰/۰۱ تن ساعت بر فوت تن اینچ می‌باشد که به منظور تبدیل واحد K از سیستم امریکایی (US) به سیستم بین المللی (SI) از ضریب ۰/۱۳۱۷ استفاده گردید. واحد K در سیستم بین المللی تن ساعت بر مگاژول میلیمتر است (Karimi Shiasi, 2024). حدود استفاده از این رابطه تا ۷۰ درصد سیلت است و برای مقادیر بیشتر سیلت صادق نیست و در مورد مقادیر بیشتر سیلت باید از خود نموگراف استفاده کرد.

۲-۵- تجزیه و تحلیل‌های زمین‌آماری

با توجه به ماهیت زمین‌آماری پژوهش و تمرکز بر تحلیل ساختار وابستگی مکانی ضریب فرسایش‌پذیری خاک، از روش‌های مبتنی بر واریوگرام استفاده شد. روش‌های قطعی نظیر IDW به دلیل عدم امکان مدل‌سازی ساختار همبستگی مکانی، صرفاً جهت مقایسه محدود مورد استفاده قرار گرفتند. یکی از اساسی‌ترین ابزارها در علم زمین‌آمار، نیم‌تغییرنما است که برای توضیح و توصیف ارتباط مکانی یک متغیر به کار می‌رود. نیم‌تغییرنما کمیتی برداری است که درجه همبستگی مکانی و شباهت بین نقاط اندازه‌گیری‌شده را برحسب مربع تفاضل مقدار دو نقطه و با توجه به جهت و فاصله آنها برآورد می‌کند. با برازش مدل نیم‌تغییرنما مناسب به ساختار فضایی داده‌ها و تعیین پارامترهای آن، وجود همسان‌گردی و ناهمسان‌گردی داده‌ها برای هر مدل برازش داده شده در چهار امتداد جغرافیایی مورد بررسی قرار گرفت. سپس از روش‌های مختلف از جمله روش کریجینگ معمولی، کریجینگ ساده و وزن‌دهی عکس فاصله با توان دو، جهت پهنه‌بندی شاخص فرسایش‌پذیری خاک استفاده شد. به منظور بررسی نرمال بودن داده‌های آزمایشی، از آزمون کلموگروف-اسمیرنوف استفاده شد. برای بررسی دقت روش‌های میان‌یابی و انتخاب بهترین روش میان‌یابی، روش‌های مختلفی وجود دارد که یکی از مهم‌ترین این روش‌ها تکنیک ارزیابی دوجانبه* می‌باشد. این تکنیک بر این اساس است که در هر مرحله یک نقطه مشاهده‌ای حذف شده و با استفاده از بقیه نقاط مشاهده‌ای، آن نقطه برآورد می‌شود. این کار برای کلیه نقاط مشاهده‌ای تکرار می‌شود، به طوری که در آخر به تعداد نقاط مشاهده‌ای، برآورد وجود خواهد داشت. معیارهای مختلفی نیز برای ارزیابی کارآیی روش‌های میان‌یابی وجود دارد که می‌توان به میانگین قدر مطلق خطا (دقت) (MAE)† و ریشه دوم میانگین مربع خطا (RMSE)‡ اشاره کرد. معادلات محاسبه آنها به قرار ذیل است:

رابطه (۳)
$$MAE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|Z^*(x_i) - Z(x_i)|$$

رابطه (۴)
$$RMSE = \left[\frac{\sum(Z^*(x_i) - Z(x_i))^2}{n}\right]^{\frac{1}{2}}$$

* Cross Validation
† Mean Absolute Error (MAE)
‡ Root Mean Square Error (RMSE)

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-01]
[DOI: 10.61882/jeer.16.2.2]

که در آن:

$Z^*(x_i)$= مقدار برآورد شده متغیر مورد نظر، $Z(x_i)$= مقدار اندازه‌گیری شده متغیر مورد نظر، n= تعداد داده‌ها.

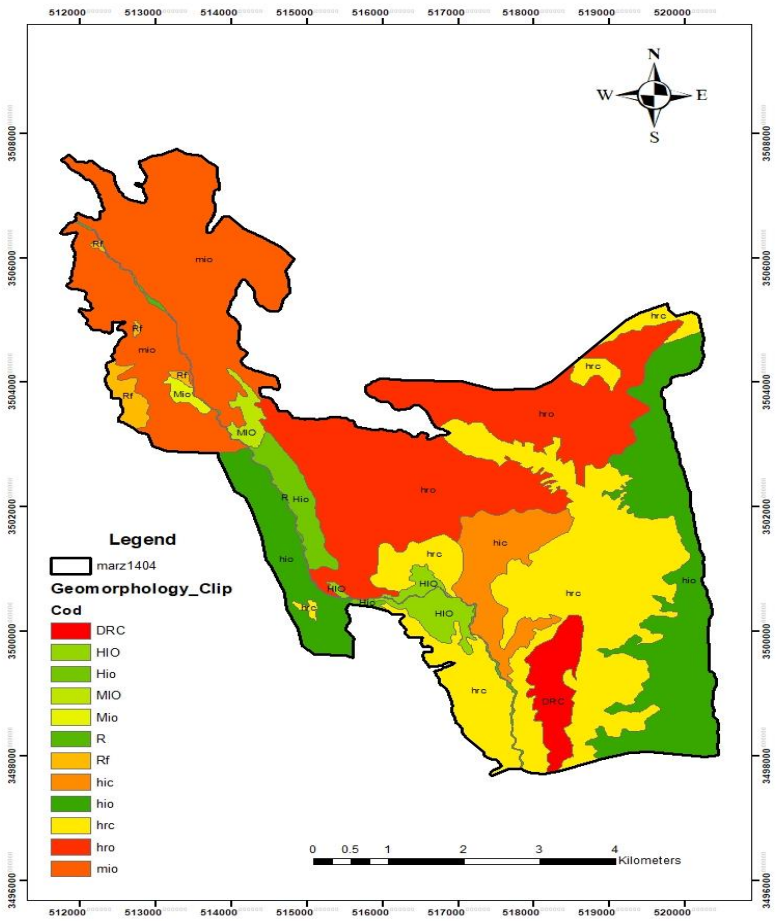
RMSE، به‌عنوان پارامتر مهمی جهت نشـان دادن دقت تحلیل مکانی در سـامانه اطلاعات جغرافیایی و سـنجش از دور محسوب می شود (Bai et al., 2018). این شاخص بیانگر دقت میانگین پیش‌بینی است و هر مدلی که کم‌ترین مقدار RMSE را داشته باشد به‌عنوان بهترین مدل انتخاب می‌شود. MAE، معرف دقت روش و مقدار متوسط خطا است که این مقدار هر چه به صفر نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده درستی آزمایش است ولی در عمل مقدار این شاخص صفر نمی شود. از نظر تئوری چنان‌چه این شاخص مساوی صفر شود، نمایان‌گر این مطلب است که این روش از دقت صد در صدی برخوردار بوده و مقدار تخمین زده شده یک کمیت، دقیقاً برابر مقدار واقعی آن می‌باشد. مقدار MAE مقدار اریبی نمونه‌ها را نشان می‌دهد و در حالت مطلوب بایستی این مقدار برابر صفر باشد. مقادیر مثبت یا منفی آن به ترتیب نشان دهنده برآورد بیش‌تر یا کم‌تر از مقدار واقعی آن می‌باشد (Wackernagel, 2003).

۳- نتایج

به منظور برآورد عامل فرسایش‌پذیری خاک برخی از ویژگی‌های خاک اندازه‌گیری شد. نتایج آمار توصیفی در جدول (۱) آمده است. نتایج حاصل از تجزیه ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک نشان داد که خاک حوزه آبخیز عمدتاً دارای بافت سبک لومی تا لومی- سیلتی با ماده آلی تقریباً مناسب و آهک زیاد است. خاک‌های مورد بررسی از نظر شکل ساختمانی دانه‌ای و اسفنجی خیلی ریز تا ریز بوده و کد ساختمانی آن‌ها بر اساس USLE بیش‌تر در گروه ۱ و تعداد کمی هم در گروه ۲ و ۳ بوده است. نفوذپذیری نیمرخ خاک عمدتاً متوسط بوده و در کلاس ۳ و به ندرت برخی موارد در کلاس ها ۴ یا ۵ قرار داشتند. نتایج حاصل از محاسبه شاخص فرسایش‌پذیری نشان داد که شاخص مزبور در کل حوزه آبخیز بین ۰/۰۶۶۱- ۰/۰۱۴۸ تن ساعت بر مگاژول میلی‌متر متغیر است. نقشه ژئومورفولوژی تهیه شده از حوضه آبخیز دوراهان در شکل (۲) نمایش داده شده است. مشخصات رخساره‌های ژئومورفولوژی در جدول (۱) آمده است.

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-01]

[DOI: 10.61882/jeer.16.2.2]



شکل ۲: نقشه رخساره‌های ژئومورفولوژی منطقه مطالعاتی

جدول ۱: مشخصات رخساره‌های ژئومورفولوژی حوضه آبخیز دوراهان

کد رخساره	شرح رخساره	نام و شماره پلی‌گون
mio	کوهستان با دامنه نامنظم و برونزد سنگی بین ۲۵ تا ۵۰ درصد	mio-p1 mio-p2
Rf	دامنه‌های دارای واریزه‌های سنگی	Rf
hio	تپه ماهور با دامنه نامنظم و برونزد سنگی بین ۲۵ تا ۵۰ درصد	hio-p1 hio-p2
hic	تپه ماهور با برونزد سنگی کم‌تر از ۲۵ درصد و دارای فرسایش شیاری	hic
hro	تپه ماهور با دامنه منظم و برونزد سنگی بین ۲۵ تا ۵۰ درصد	hro-p1 hro-p2
hrc	تپه ماهور با دامنه منظم و برنزد سنگی کمتر از ۲۵ درصد و دارای پوشش تخریبی گسترده	hrc-p1 hrc-p2 hrc-p3 hrc-p4 hrc-p5 hrc-p6
DRC	دشت‌های هموار با ضخامت قابل توجهی از آبرفت	DRC
R	مسیل	R

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-01]

[DOI: 10.61882/jeer.16.2.2]

تنوع خاک را می‌توان از طریق آمار تو صیفی بیان کرد. در میان آن‌ها ضریب تغییرات پارامتری قابل توجه برای بیان این تغییرات اســت (Khosraviaqdam et al., 2019). در صــورتی که مقدار ضــریب تغییرات بین ۰/۱۵- ۰ باشــد؛ تغییر پذیری کم، بین ۰/۳۵-۰/۱۵ تغییر پذیری متوســط و اگر بیش از ۰/۳۵ باشــد تغییر پذیری ز یاد خوا هد بود (Khosraviaqdam et al., 2019). با توجه به جدول (۲) ضریب تغییرات شاخص فر سایش‌پذیری برابر با ۰/۲۷ شده است، بنابراین تغییرپذیری حوزه آبخیز از نظر شاخص فرسایش‌پذیری در گروه متوسط قرار دارد.

جدول ۲: میانگین ویژگی‌های فیزیکی- شیمیایی خاک در منطقه مطالعاتی

شاخص آماری / پارامترها	حداقل	حداکثر	میانگین	ضریب تغییرات	انحراف معیار	واریانس
٪ رس	۹/۲۸	۵۱/۲۸	۲۲/۰۸	۰/۴۵	۱۰/۱۲	۱۰۲/۴۲
٪ سیلت	۱۴/۷۲	۶۸/۷۲	۴۳/۸۹	۰/۲۱	۹/۳۲	۸۷
٪ شن بسیار ریز	۳	۳۲	۱۵/۶۸	۰/۴۱	۶/۴۹	۴۲/۲۳
٪ موادآلی	۰/۳۳	۴/۷۰	۲/۰۹	۰/۴۷	۱	۱
فرسایش‌پذیری خاک	۰/۰۱۴۸	۰/۰۶۶۱	۰/۰۳۸۵	۰/۲۷	۰/۰۱۰۶	۰/۰۰۰۱

به منظور بررسی نرمال بودن داده‌های آزمایشی، از آزمون کلموگروف- اسمیرنوف استفاده شد. همان طور که از جدول (۳) مشخص است، عامل فرسایش‌پذیری خاک دارای توزیع نرمال بود.

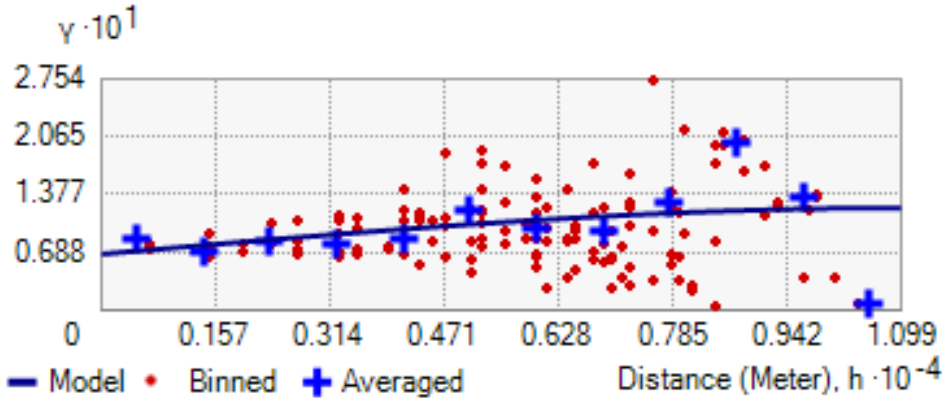
جدول ۳: نتایج آزمون غیر پارامتری کولموگروف- اسمیرونوف

نام متغیر	N	Normal Parameters		Most Extreme Differences			Test Statistic	Asymp. Sig. (2-tailed)
		Mean	Std. Deviation	Absolute	Positive	Negative		
فرسایش‌پذیری خاک	۵۸	۰/۰۳۸۵	۰/۰۱۰۶	۰/۰۹۸	۰/۰۶۸	-۰/۰۹۸	۰/۰۹۸	۰/۲۰۰

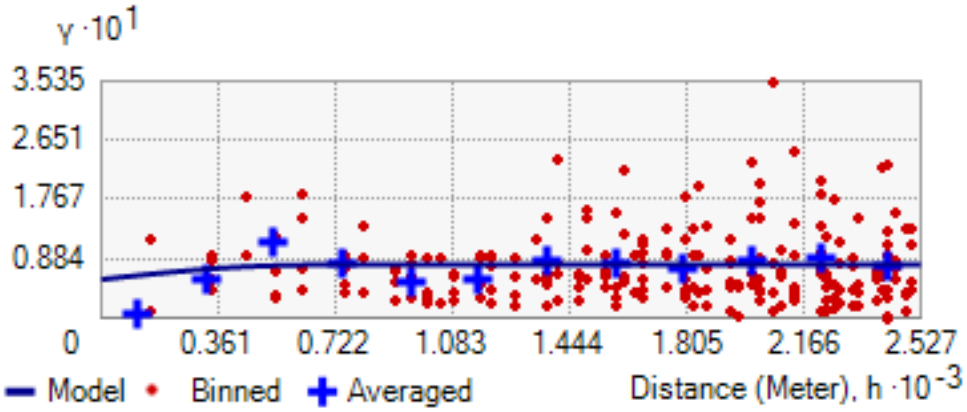
به‌منظور بررسی و مطالعه تغییرات مکانی فرسایش‌پذیری خاک، ابتدا نیم‌تغییرنماهای تجربی به طور مجزا برای روش‌های کریجینگ ساده و کریجینگ معمولی در جهات مختلف جغرافیایی تر سیم و مورد برر سی قرار گرفت. به منظور تعیین ناهم سان‌گردی، نیم‌تغییرنماهای تجربی همه جهته و در جهات مختلف تر سیم شد. شکل‌های (۳) و (۴) تغییرنماهای فرسایش‌پذیری خاک به روش‌های کریجینگ معمولی و ساده را نشان می‌دهد.

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-01]

[DOI: 10.61882/jeer.16.2.2]



شکل۳: تغییرنمای شاخص فرسایش‌پذیری خاک به روش کریجینگ معمولی



شکل ۴: تغییرنمای شاخص فرسایش‌پذیری خاک به روش کریجینگ ساده

نتایج پارامترهای آماری مدل‌های تغییرنمای شاخص فرسایش‌پذیری خاک را برای روش‌های کریجینگ معمولی و ساده نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که بهترین مدل برازش داده شده برای شاخص فرسایش‌پذیری در روش کریجینگ معمولی، گوسی و در روش کریجینگ ساده، مدل دایره‌ای است (جدول ۴).

جدول ۴: پارامترهای آماری مدل‌های نیم‌تغییرنمای شاخص فرسایش‌پذیری خاک

شاخص آماری / روش‌های درون‌یابی	نوع مدل	اثر قطعه‌ای (t.h/Mj.mm)	سقف (t.h/Mj.mm)	حداکثر دامنه تاثیر (متر)	وابستگی مکانی (درصد)	کلاس همبستگی
کریجینگ معمولی	کروی	۰/۰۶۷	۰/۱۲۲	۱۰۹۸۹/۴	۵۴/۹	متوسط
کریجینگ ساده	گوسی	۰/۰۷۶	۰/۰۸۲	۲۵۲۶/۹	۹۲/۶	ضعیف

اگر وابستگی مکانی یا نسبت اثر قطعه‌ای به آستانه جزئی یک مدل کم‌تر از ۲۵ درصد باشد، آن مدل دارای ساختار مکانی قوی و اگر بین ۲۵ تا ۷۵ درصد باشد؛ وابستگی متوسط و اگر هم بیش‌تر از ۷۵ درصد باشد؛ نشان دهنده‌ی وابستگی ضعیف خواهد بود (Afzali et al., 2018؛ Khosraviaqdam et al., 2019). نتایج نیم‌تغییرنماها نشان داد که

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-01]
[DOI: 10.61882/jeer.16.2.2]

ضریب فرسایش‌پذیری خاک در محدوده مورد مطالعه دارای وابستگی مکانی ضعیف تا متوسط است که بیانگر نقش همزمان عوامل ساختاری و تصادفی در تغییرات فضایی این پارامتر می‌باشد. وابستگی مکانی برای روش‌های کریجینگ معمولی و ساده، به ترتیب ۵۴/۹٪ و ۹۲/۶٪ بدست آمده است، بنابراین دارای وابستگی مکانی متوسط و ضعیف است.

۴-۱- محاسبه شاخص‌های آماری خطا

ارزیابی دقت و صحت روش‌های درون‌یابی ذکر شده با شاخص‌های ریشه دوم میانگین مربع خطا و میانگین قدر مطلق خطا در جدول (۵) گزارش شده است.

جدول ۵: مقادیر شاخص‌های آماری خطا در ارزیابی روش‌های درون‌یابی

شاخص آماری / نوع تخمینگر	RMSE	MAE
وزن‌دهی عکس فاصله	۰/۰۱۰۸۰	۰/۰۰۷۸۸۲
کریجینگ معمولی	۰/۰۱۰۲۰	۰/۰۰۸۱۱۷
کریجینگ ساده	۰/۰۱۰۲۸	۰/۰۳۸۵۱۱

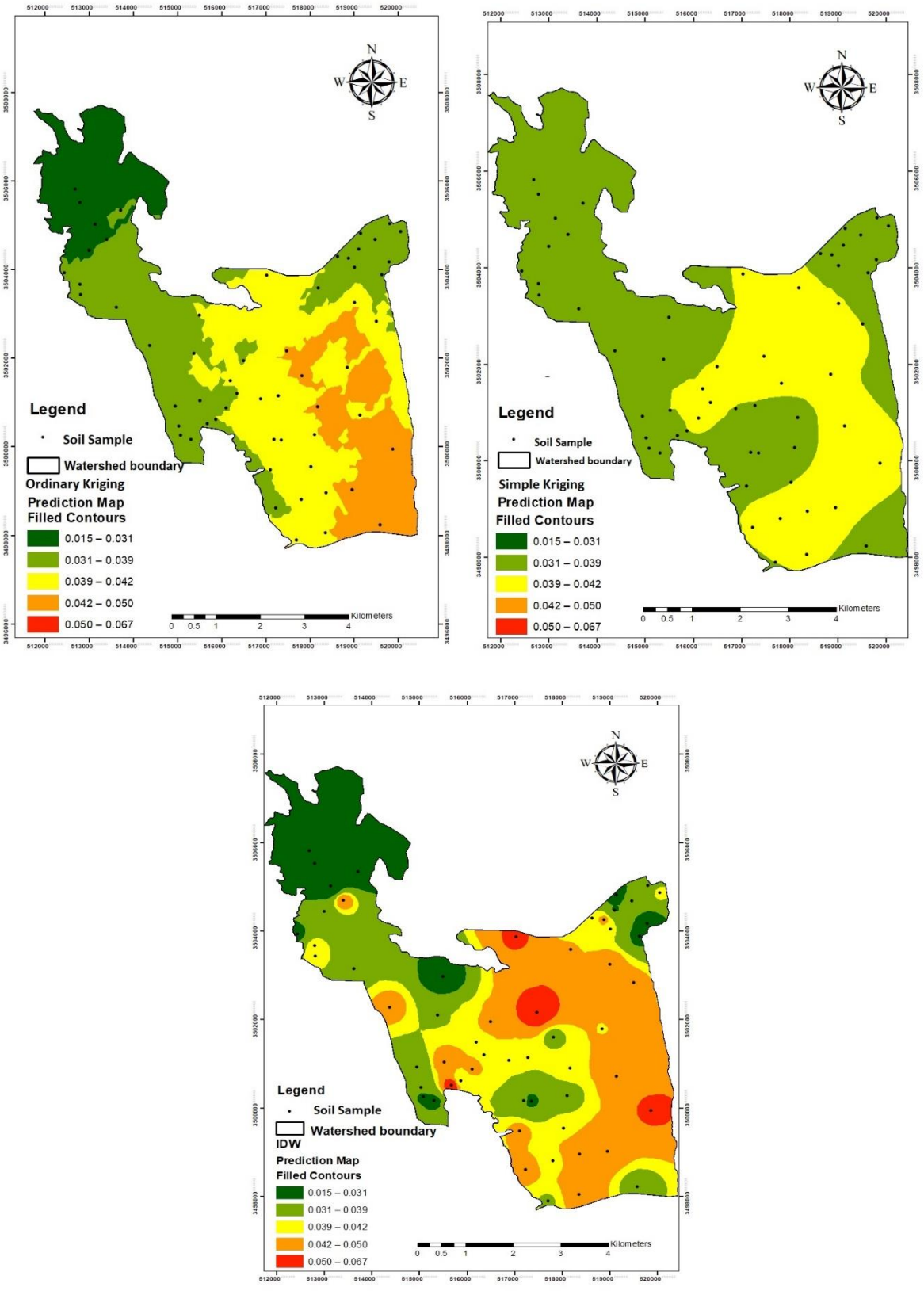
برای تعیین مناسب‌ترین روش میان‌یابی در بین روش‌های درون‌یابی از شاخص RMSE استفاده شد که بیانگر دقت میانگین پیش‌بینی می‌باشد (Mirzaee et al., 2016). هر مدلی که کم‌ترین مقادیر MAE و RMSE را داشته باشد به‌عنوان بهترین مدل انتخاب می‌شود (Javadi et al., 2022). در پژوهش حاضر روش کریجینگ معمولی با مدل کروی بهترین برآورد و مناسب‌ترین روش از بین سایر روش‌های میان‌یابی می‌باشد.

۴-۲- ترسیم نقشه پهنه‌بندی شاخص فرسایش‌پذیری خاک

نقشه‌های پهنه‌بندی شاخص فرسایش‌پذیری خاک با تکنیک‌های مختلف شامل IDW، کریجینگ معمولی و کریجینگ ساده ترسیم گردید. شکل (۵) نقشه‌های پهنه‌بندی شاخص فرسایش‌پذیری خاک به روش IDW، کریجینگ معمولی وکریجینگ ساده را بر حسب تن ساعت بر مگاژول میلی‌متر نشان می‌دهد.

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-01]

[DOI: 10.61882/jeer.16.2.2]

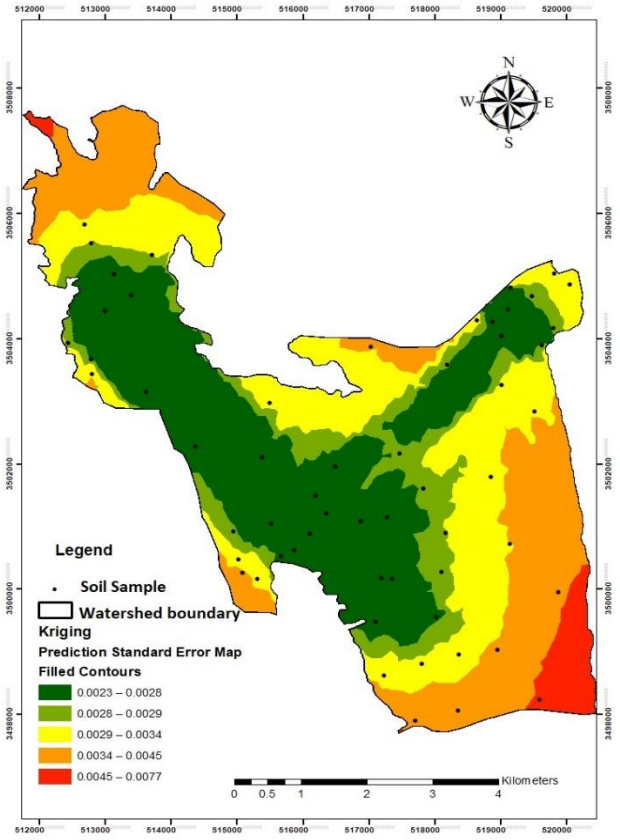


شکل ۵: نقشه‌های پهنه‌بندی شاخص فرسایش‌پذیری خاک با روش‌های درون‌یابی مختلف

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-01]

[DOI: 10.61882/jeer.16.2.2]

نقشه پهنه‌بندی ضریب فرسایش‌پذیری خاک نشان داد که بخش شرقی حوزه آبخیز دارای مقادیر بالاتری از K است. این امر را می‌توان به افزایش درصد سیلت و کاهش درصد رس نسبت داد؛ زیرا خاک‌های سیلتی به دلیل پیوستگی ضعیف ذرات و حساسیت بیشتر به جداشدگی در برابر انرژی بارش، فرسایش‌پذیری بالاتری دارند (Wischmeier & Renard et al., 1997؛Smith, 1978). همچنین کاهش نفوذپذیری خاک در این نواحی موجب افزایش رواناب سطحی و تشدید فرآیند فرسایش می‌شود (Morgan, 2005). از سوی دیگر، حضور سازندهای زمین‌شناسی حساس به فرسایش و رسوبات سست سطحی در بخش‌های شرقی حوزه می‌تواند نقش مهمی در افزایش مقادیر K ایفا کند (Toy et al., 2002؛ Nearing et al., 2017). در مقابل، بخش غربی حوزه آبخیز به دلیل غالب بودن رخنمون‌های سنگی مقاوم‌تر و شیب‌های پایدارتر، مقادیر کمتری از ضریب فرسایش‌پذیری خاک را نشان می‌دهد که با نتایج مطالعات مشابه همخوانی دارد (Morgan, 2005). علاوه بر عوامل طبیعی، فعالیت‌های انسانی نظیر چرای مفرط دام و تخریب پوشش گیاهی نیز می‌توانند با کاهش پایداری خاک و افزایش رواناب، الگوی مکانی فرسایش‌پذیری را تشدید کنند (Karimi Shiasi, 2024؛Lal, 2001). نقشه‌ی خطای تخمین* برای روش کریجینگ معمولی تهیه شد (شکل ۶). این نقشه نشان می‌دهد که بیشترین عدم قطعیت تخمین در نواحی با تراکم کمتر نمونه‌برداری مشاهده می‌شود که با مبانی نظری کریجینگ همخوانی دارد.



شکل ۶: نقشه‌ی خطای تخمین روش کریجینگ معمولی

* Kriging Standard Error

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-01]

[DOI: 10.61882/jeer.16.2.2]

بحث

شاخص فرسایش‌پذیری مدل USLE یکی از عوامل کلیدی در مدل‌سازی فرسایش آبی است و به‌طور مستقیم میزان آسیب‌پذیری خاک در برابر نیروهای جداکننده و انتقال‌دهنده را نشان می‌دهد. این شاخص تحت تأثیر مجموعه‌ای از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک نظیر درصد مواد آلی، درصد شن و سیلت، نفوذپذیری و ساختمان خاک قرار دارد. تغییرپذیری مکانی این ویژگی‌ها سبب می‌شود که مقدار K نیز در مقیاس‌های محلی و حوضه‌ای متغیر باشد. نتایج این تحقیق نشان داد که شاخص فرسایش‌پذیری خاک در کل حوزه آبخیز بین ۰/۰۶۶۱- ۰/۰۱۴۸ تن‌ساعت بر مگاژول میلی‌متر متغیر است. با ضریب تغییرات متوسط، بیانگر ناهمگنی نسبی در ویژگی‌های مؤثر بر فرسایش‌پذیری خاک است. زمین آمار ابزار ارزشمندی در تعیین وابستگی مکانی و میزان این وابستگی مکانی می‌باشد و تلفیق آن با سیستم‌های اطلاعات مکانی برای تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی توزیع مکانی مختلف نظیر خصوصیات خاک نقش مهمی را ایفا می‌نماید. هدف در پژوهش حاضر تهیه نقشه پهنه‌بندی ضریب فرسایش‌پذیری خاک با استفاده از برخی روش‌های درون‌یابی بوده است. بر طبق شاخص‌های دقت سنجی روش کریجینگ معمولی تخمین دقیق‌تری از ضریب فرسایش‌پذیری خاک نسبت به سایر روش‌های مورد بررسی در منطقه از خود نشان داده است. مقایسه‌ی مدل‌های درون‌یابی نشان داد که کریجینگ معمولی با مدل کروی بیشترین دقت را در پیش‌بینی K-factor داشته است (RMSE = 0.0102). این موضوع هم‌راستا با یافته‌های Omidvar و همکاران (۲۰۱۶)، Kiani Harchegani و همکاران (۲۰۱۹)، Gholami و همکاران (۲۰۲۰) و Javadi و همکاران (۲۰۲۲) است که برتری روش‌های کریجینگ نسبت به روش‌های قطعی نظیر وزن‌دهی عکس فاصله را در برآورد متغیرهای خاکی گزارش کرده‌اند. همچنین نقشه پهنه‌بندی ضریب فرسایش‌پذیری خاک (K) نشان داد که بخش شرقی حوزه آبخیز دارای مقادیر بالاتری از K است. این امر را می‌توان به افزایش درصد سیلت و کاهش درصد رس نسبت داد؛ زیرا خاک‌های سیلتی به دلیل پیوستگی ضعیف ذرات و حساسیت بیشتر به جداشدگی در برابر انرژی بارش، فرسایش‌پذیری بالاتری دارند (Wischmeier & Smith, 1978؛ Renard et al., 1997)، همچنین کاهش نفوذپذیری خاک در این نواحی موجب افزایش رواناب سطحی و تشدید فرآیند فرسایش می‌شود (Morgan, 2005). از سوی دیگر، حضور سازندهای زمین‌شناسی حساس به فرسایش و رسوبات سست سطحی در بخش‌های شرقی حوزه می‌تواند نقش مهمی در افزایش مقادیر K ایفا کند (Toy et al., 2002؛ Nearing et al., 2017) در مقابل، بخش غربی حوزه آبخیز به دلیل غالب بودن رخساره‌های سنگی مقاوم‌تر و شیب‌های پایدارتر، مقادیر کمتری از ضریب فرسایش‌پذیری خاک را نشان می‌دهد که با نتایج مطالعات مشابه همخوانی دارد (Morgan, 2005). علاوه بر عوامل طبیعی، فعالیت‌های انسانی نظیر چرای مفرط دام و تخریب پوشش گیاهی نیز می‌توانند با کاهش پایداری خاک و افزایش رواناب، الگوی مکانی فرسایش‌پذیری را تشدید کنند (Lal, 2001؛Karimi Shiasi, 2024). با وجود انطباق کلی نتایج این پژوهش با مطالعات پیشین (Soofi & Emami., & Alipour et al., 2017 & Motagian et al., 2009 & Javadi et al., 2022 2017)، تفاوت در دامنه تغییرات K و توزیع مکانی آن نشان‌دهنده نقش شرایط محلی شامل زمین‌شناسی، اقلیم خرد، و شدت فعالیت‌های انسانی است.

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-01]

[DOI: 10.61882/jeer.16.2.2]

نتیجه‌گیری:

از مزایای نقشه‌های تولیدی، کمی کردن نتایج حاصل می‌باشد که منجر به توانمندی در باز تولید و بهنگام‌سازی اطلاعات به دست آمده می‌گردد. با توجه به ماهیت کمی این گونه نقشه‌ها از آنها می‌توان به عنوان لایه‌های مختلف اطلاعاتی استفاده نمود. لازم به ذکر است که رابطه ویشمایر و اسمیت (۱۹۷۸) یک مدل تجربی کلاسیک بوده و در شرایط مختلف اقلیمی و خاکی ممکن است نیازمند کالیبراسیون محلی باشد. از این‌رو، مقادیر مطلق ضریب K محاسبه‌شده در این پژوهش می‌تواند با عدم قطعیت همراه باشد؛ با این حال، با توجه به تمرکز مطالعه بر تحلیل الگوی تغییرات مکانی و وابستگی فضایی، این عدم قطعیت تأثیر قابل‌توجهی بر نتایج مکانی پژوهش نداشته است. مقدار RMSE حاصل از اعتبارسنجی متقابل نشان‌دهنده وجود عدم قطعیت در برآورد مقادیر مطلق ضریب فرسایش‌پذیری خاک است که می‌تواند ناشی از ناهمگنی ذاتی خاک و ضعف نسبی ساختار مکانی باشد. با این حال، الگوی مکانی حاصل از کریجینگ برای پهنه‌بندی نسبی و شناسایی نواحی مستعد فرسایش در مقیاس حوضه قابل قبول ارزیابی می‌شود. پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی با افزایش تراکم نمونه‌برداری، به‌ویژه در نواحی دارای خطای تخمین بالا، و نیز به‌کارگیری روش‌های نوین درون‌یابی و مدل‌های داده‌محور، دقت برآورد ضریب K بهبود یابد.

منابع

1. Abiye, W., & Dengiz, O. (2025). Digital mapping of soil erodibility factor in response to land use change using machine learning models. *Environmental Systems Research*, *14*, Article 14. https://doi.org/10.1186/s40068-025-00402-w
2. Afzali, A., Varvani, J., & Jafarinia, R. (2018). Investigation of geostatistical analysis for estimation of spatial variations of soil texture (Case study: Farahan Plant, Markazi Province). *Geographical Journal of Territory*, *15*(58), 1–16. https://sid.ir/paper/116388/en (In Persian)
3. Alipour, H., Malekian, A., Kheirkhah Zarkesh, M. M., & Gharachelo, S. (2017). Estimation of erosion intensity and sedimentation of Ivar watershed using Mpsiac empirical methods. *Geography and Development*, *14*(45), 243–268. https://sid.ir/paper/77257/en (In Persian)
4. Arnold, R. W. (1996). Soil survey reliability: Minimizing the consumer's risk. *Data Reliability and Risk Assessment in Soil Interpretations*, *47*, 13–20. https://doi.org/10.2136/sssaspecpub47.c2
5. Babaei, M., Hosseini, S. Z., Nazari, S. A. A., & Almodaresi, S. A. (2016). Assessment of soil erosion using RUSLE 3D, case study: Kan watershed. *Watershed Engineering and Management*, *8*(2), 165–181. https://sid.ir/paper/234633/en (In Persian)
6. Bai, M., Haghizadeh, A., & Tahmasebipour, N. (2018). Spatial variations of quality groundwater use geostatistical method. *Geographic Space*, *18*(63), 147–164. https://sid.ir/paper/91598/en
7. Baskan, O., & Dengiz, O. (2008). Comparison of traditional and geostatistical methods to estimate soil erodibility factor. *Arid Land Research and Management*, *22*(1), 29–45. https://doi.org/10.1080/15324980701784241
8. Biswas, S. S., & Pani, P. (2015). Estimation of soil erosion using RUSLE and GIS techniques: A case study of Barakar River basin, Jharkhand, India. *Modeling Earth Systems and Environment*, *1*(4), Article 42. https://doi.org/10.1007/s40808-015-0040-3
9. Buttafuoco, G., Conforti, M., Aucelli, P. P. C., Robustelli, G., & Scarciglia, F. (2012). Assessing spatial uncertainty in mapping soil erodibility factor using geostatistical stochastic simulation. *Environmental Earth Sciences*, *66*(4), 1111–1125. https://doi.org/10.1007/s12665-011-1317-0
10. Gholami, A., Valipor Chehardeh Charik, P., & Nourzadeh Hadad, M. (2020). Performance evaluation of geostatistics methods on the zoning of soil chemical properties (Case study: Karun East area). *Geographic Space*, *20*(69), 1–15. https://magiran.com/p2150639 (In Persian)
11. Goldman, S. J., & Jackson, K. E. (1986). *Erosion and sediment control handbook*. McGraw-Hill.
12. Goovaerts, P. (1999). Geostatistics in soil science: State-of-the-art and perspectives. *Geoderma*, *89*(1-2), 1–45. https://doi.org/10.1016/S0016-7061(98)00078-0

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-01]

[DOI: 10.61882/jeer.16.2.2]

13. Imani, R., Ghasemieh, H., & Mirzavand, M. (2014). Determining and mapping soil erodibility factor (case study: Yamchi Watershed in Northwest of Iran). *Open Journal of Soil Science*, *4*, 168–173. https://doi.org/10.4236/ojss.2014.45020
14. Javadi, M. R., Zehtabian, G., Ahmadi, H., Ayoubi, S., & Jafari, M. (2022). Investigation of spatial variability of soil erosion factor using some geostatistical methods (case study: Nomehrood watershed). *Researches in Earth Sciences*, *13*(2), 42–57. https://doi.org/10.48308/esrj.2022.101780
15. 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), 105–119. https://doi.org/10.22055/agen.2018.18172.1281 (In Persian)
16. Karimi Shiasi, J. (2024). *Investigating soil erodibility index in geomorphological facies of Dorahan watershed* [Master's thesis, University of Ardakan]. (In Persian)
17. Khalilimoghadam, B., Afyuni, M., Jalalian, A., Abbaspour, K., & Dehghani, A. (2011). Estimation surface soil shear strength by pedo-transfer functions and soil spatial prediction functions. *Water and Soil*, *25*(1), 187–195. https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.8520 (In Persian)
18. Khormai, H., Kiani, F., & Khormali, F. (2016). Evaluation of soil erodibility factor (K) for loess derived landforms of Kechik watershed in Golestan province. *Water and Soil*, *30*(6), 2078–2086. https://doi.org/10.22067/jsw.v30i6.57027 (In Persian)
19. Khosraviaqdam, K., Momtaz, H. R., & Asadzadeh, F. (2019). Estimation of soil erodibility factor of USLE model and its relationship with landscape features in some parts of Nazzlo-Chay basin, Iran. *Applied Soil Research*, *7*(1), 31–43. https://sid.ir/paper/261901/en (In Persian)
20. Kiani Harchegani, M., Sadeghi, S. H., & Falahatkar, S. (2019). Comparative analysis of soil erodibility factor in Shazand Watershed. *Journal of Ecohydrology*, *6*(1), 153–163. https://sid.ir/paper/254161/en (In Persian)
21. Li, J., & Heap, A. D. (2008). *A review of spatial interpolation methods for environmental scientists* (Record 2008/23). Geoscience Australia. https://www.ist-winner.org
22. Mammadli, N., & Gojamanov, M. (2021). High-resolution soil erodibility K-factor estimation using machine learning generated soil dataset and soil pH levels. *Geodesy and Cartography*, *70*(1), 44–55. https://doi.org/10.24425/gac.2021.136679
23. Mirzaee, S., Ghorbani Dashtaki, S., Mohammadi, J., Asadi, H., & Asadzadeh, F. (2016). Suitable interpolation methods for zoning of interrill erodibility of WEPP model and some soil properties using geostatistics and remote sensing data. *Watershed Engineering and Management*, *8*(1), 42–54. https://sid.ir/paper/234648/en (In Persian)
24. Morgan, R. P. C. (2009). *Soil erosion and conservation* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
25. Motagian, H. R., Mohammadi, J., & Karimi, A. (2009, July). *Geostatistical zoning of soil erodibility at the watershed scale* [Paper presentation]. 11th Iranian Soil Science Congress, Gorgan, Iran. https://civilica.com/doc/291481 (In Persian)
26. Olaniya, M., Bora, P. K., Das, S., & Chanu, P. H. (2020). Soil erodibility indices under different land uses in Ri-Bhoi district of Meghalaya (India). *Scientific Reports*, *10*(1), Article 14986. https://doi.org/10.1038/s41598-020-72070-y
27. Omidvar, E., Kavian, A., Solaimani, K., & Mashari, S. (2016). Investigation of applicability of soil map units to estimate the spatial variability of soil erodibility. *Desert Ecosystem Engineering Journal*, *4*(9), 95–107. https://sid.ir/paper/254521/en (In Persian)
28. Ostovari, Y., Ghorbani-Dashtaki, S., Bahrami, H. A., Abbasi, M., Dematte, J. A. M., Arthur, E., & Panagos, P. (2018). Towards prediction of soil erodibility, SOM and CaCO3 using laboratory Vis-NIR spectra: A case study in a semi-arid region of Iran. *Geoderma*, *314*, 102–112. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.11.014
29. Panagos, P., Meusburger, K., Alewell, C., & Montanarella, L. (2012). Soil erodibility estimation using LUCAS point survey data of Europe. *Environmental Modelling & Software*, *30*, 143–145. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.11.002
30. Sabz Arian Consulting Engineers. (2021). *An evaluation study report on the impacts of watershed management operations in the Dorahan watershed of Borujen county*. Natural Resources and Watershed Management General Office of Chaharmahal and Bakhtiari Province, Bureau of Forests, Range and Watershed Management Organization of Iran. (In Persian).
31. Soofi, M. B., & Emami, H. (2017). Evaluation soil erodibility in catchment of Torogh dam of Mashhad. *Environmental Erosion Research Journal*, *7*(3), 25–38. http://magazine.hormozgan.ac.ir/article-1-403-fa.html (In Persian)
32. Veihe, A. (2002). The spatial variability of erodibility and its relation to soil types: A study from northern Ghana. *Geoderma*, *106*(1-2), 101–120. https://doi.org/10.1016/S0016-7061(01)00120-3
33. Wackernagel, H. (2003). *Multivariate geostatistics: An introduction with applications* (3rd ed.). Springer.

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-01]
[DOI: 10.61882/jeer.16.2.2]

34. Wang, B., Zheng, F., & Guan, Y. (2016). Improved USLE-K factor prediction: A case study on water erosion areas in China. *International Soil and Water Conservation Research*, *4*(3), 168–176. https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2016.08.003
35. Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning* (Agriculture Handbook No. 537). U.S. Department of Agriculture.
36. Young, R. A., Romkens, M. J. M., & McCool, D. K. (1990). Temporal variations in soil erodibility. In R. B. Bryan (Ed.), *Soil Erosion: Experiments and Models* (pp. 41–53). Catena Verlag.
37. Zhang, K., Li, S., Peng, W., & Yu, B. (2004). Erodibility of agricultural soils on the Loess Plateau of China. *Soil and Tillage Research*, *76*(2), 157–165. https://doi.org/10.1016/j.still.2003.09.007
38. Zhang, K., Yu, Y., Dong, J., Yang, Q., & Xu, X. (2019). Adapting & testing use of USLE K factor for agricultural soils in China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *269*, 148–155. https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.09.033

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-01]

[DOI: 10.61882/jeer.16.2.2]