


Assessment of water erosion intensity in the Mian-Ab watershed of Shushtar under climate change scenarios for the period 2021–2040

Yasmin Ghobishawi¹, Reza Zakerinejad^{2*} 

1. Master's degree in Remote Sensing and Geographic Information Systems, University of Isfahan, Iran

2. Corresponding Author, Associate Professor, Faculty of Geographical Sciences and Planning, University of Isfahan, Isfahan, Iran

Email: r.zakerinejad@geo.ui.ac.ir ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-1949-2757>

Article Info	ABSTRACT
<p>Article type: Research Article</p> <p>Article history: Received: [REDACTED] Revised: [REDACTED] Accepted: [REDACTED] Published: [REDACTED]</p> <p>Keywords: Water Erosion, Mid-Ab, Climate Change Scenario.</p>	<p>Water erosion is a dynamic and destructive process in which topsoil is detached and transported by raindrop kinetic energy and surface runoff shear stress (rill or sheet flow). This leads to decreased soil fertility, infrastructure damage and increased sedimentation in waterways. This study aimed to assess the current and future potential of water erosion in the Mianab-Shushtar watershed (Khuzestan Province) by employing the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) integrated with the BCC-CSM2-MR climate model scenario within a Geographic Information System (GIS) framework. The methodological novelty of this study lies in its future projection, which relies on high-resolution, up-to-date data. The Slope Length and Steepness factor (LS) were calculated using a Digital Elevation Model (DEM) and SAGA GIS analytical tools. The Rainfall Erosivity factor (R) was extracted from the novel SM2RAIN-MONITORING data obtained from the WorldClim site. The land cover factor (C) was determined based on the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) derived from Landsat 9 satellite imagery for 2023. The Support Practice factor (P) was omitted because of the scarcity of regional management data. The results indicated that the erosion distribution is highly topographically dependent, with the highest estimated rates concentrated in the eastern and southeastern areas, exhibiting high LS values. Nevertheless, over 90% of the watershed area fell within the “Very Low & Low” erosion class. Long-term projections (up to 2040) raise alerts regarding stability failure and the expansion of erosion toward the central and western parts of the basin. Consequently, management strategies must simultaneously implement preventative measures in the west and center, alongside necessary adjustments in the east. This study provides a documented framework for prioritizing management interventions in similar semi-arid basins in Southern Iran by presenting a localized, high-spatial-accuracy model.</p>

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



© The Author/Authors

Publisher: University of Sistan and Baluchestan

DOI: 00000000000000000000

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

EXTENDED ABSTRACT

INTRODUCTION

Life on Earth, particularly biological and agricultural activities, is profoundly dependent on soil; however, the global challenges of land degradation and water erosion (sheet, rill, and gully erosion) threaten the health of ecosystems across Iran. In the context of managing this crisis, global erosion models such as RUSLE serve as foundational tools for research; nevertheless, the existing literature consistently emphasizes the need for precise parameter localization, especially given the dominant role of the topographic factor (LS) in the mountainous regions of Iran (Mohammadi et al., 2018; Nejad Afzali et al., 2019). Furthermore, key modulating factors, such as climate change and land use, require attention in long-term projections (Wang et al., 2016). Despite the strategic importance of agriculture in the Shushtar interbasin area, this region remains under-researched concerning water erosion; this research gap highlights an urgent need to update spatial analyses using high-resolution spatial data and to assess the watershed's stability against future climatic changes (up to the 2040 horizon). Consequently, the core issue of this study is the accurate assessment of current and future erosion potential using the RUSLE model and contemporary data (such as SM2RAIN-MONITORING and Landsat 9 NDVI from 2023). The ultimate goal of this research is to provide a localized and reliable framework for erosion risk assessment, establishing a precise basis for long-term natural resource conservation planning under the changing climatic conditions of Southern Iran.

DATA AND METHODOLOGY

The Inter-basin (Miyān-Ab) watershed, covering an approximate area of 2053 km², is situated in a specific geographical location within the Khuzestan Province, approximately 40 km north of Ahvaz, located between 31°36' latitudes and longitude ranging from 48°45' to 49°01'; its mean elevation is 292 meters above sea level. This watershed is shown in Figure (1). The study area (Shushtar Inter-basin) is characterized by a hot and semi-humid climate (average precipitation of 322 mm and a peak temperature of 45.9°C in July) and active geology (including the Neogene Fars formations and susceptibility to seismicity), all of which influence its erodibility and soil-water conditions.

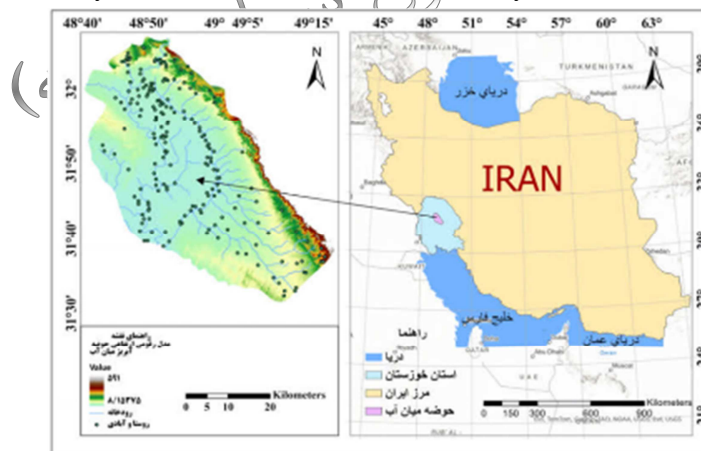


Figure 1: Location of the study area (Source: Authors)

The methodology for this research was designed based on the RUSLE model to assess soil erosion in the Shushtar Inter-basin watershed across two time frames (present and future: 2021–2040). The implementation of this model was conducted hierarchically and with a high spatial precision. Spatial maps of the topographic factor (LS), cover-management factor (C), and support practice factor (P) were generated using a Digital Elevation Model (DEM) and satellite imagery. The soil erodibility factor (K) was determined using soil maps. In the subsequent phase, the primary erosion driver, the rainfall factor (R), was updated for the future period using data from the BCC-CSM2-MR climate

model obtained from WorldClim. Finally, by employing software such as ArcGIS and Google Earth Engine, the current erosion potential ($A=R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P$) and projected future erosion were calculated, and final maps were produced to allow for a quantitative and spatial analysis of the changes resulting from future climate scenarios.

RESULTS AND DISCUSSION

The RUSLE model was employed for erosion zonation in the Shushtar Watershed. Climate projections up to 2040 indicated a significant increase in the Rainfall Erosivity factor (R), escalating from a maximum of 1333.28 to 3823.38, which will lead to a fundamental intensification of the total erosive energy across the entire watershed. The Soil Erodibility factor (K), calculated using global data and Equations (1) and (2), yielded values ranging from 0.01599 to 0.345254, with the highest erosion susceptibility concentrated in the southern and northeastern sections, which were characterized by lighter soil textures. Furthermore, the Slope Length factor (LS), as shown in the figure, demonstrated an increase in value from west to east, where the eastern and northeastern regions exhibited the maximum values (up to approximately 342), indicating steeper slopes. In contrast, the cover management factor (C), derived from NDVI, showed a decrease in vegetation cover (greenness) from 0.50 in the west to 0.14 in the east. Following the standardization of the layers, the final map of water erosion confirmed the heterogeneous distribution of erosion, with its concentration located in the eastern and southeastern areas (critical zones) of the watershed. In the current condition (Figure 2), the 'Very Low' erosion class accounted for the largest area share at 77.296. However, the long-term projection trend (Figure 2) suggests an increase in the share of the Moderate (4.147% to 4.365%) and High (1.516% to 1.607%) classes, as well as an alarming spatial expansion of risk towards the western part of the watershed.

$$(1) \quad sn1 = 1 - \frac{sand}{100}$$

$$(2) \quad \text{Factor } K = \left(0.2 + 0.3 \times e^{-0.0256 \times sand \times \left(1 - \frac{flt}{100} \right)} \right) \times \left(\frac{silt}{silt + clay} \right)^{0.3} \times \left(1 - \frac{0.25 \times C}{C + e^{3.72 - 2.95 \times C}} \right) \times \left(1 - \frac{0.7 \times sn1}{sn1 + e^{-5.51 + 22.9 \times sn1}} \right)$$

Table 1: Percentage of Water Erosion Status: Current and Predicted (or Projected)

Classification	Current Erosion Percentage	Predicted Erosion Percentage
Very Low	77/296	77.644
Low	16/697	16/02
Moderate	4/147	4/365
High	1/516	1/607
Very High	0/343	0/364

CONCLUSION

The research conducted on the Shushtar Inter-basin using the RUSLE model decisively confirms the hypothesis regarding the high susceptibility of erosion to topographical factors, as the highest concentration of erosion was observed in the mountainous eastern and southeastern regions, with the Slope Length factor (LS) acting as the predominant parameter in the erosion process. Concurrently, this study validated the effectiveness of the vegetation cover factor (C) in the central and western parts of the basin in mitigating erosion, thereby demonstrating the high efficiency of the localized RUSLE model in providing a realistic estimation of erosion rates under Iranian conditions. From a management perspective, although the majority of the basin is currently stable, necessitating a focus on the critical eastern and southeastern areas, long-term analyses projecting toward the 2040 horizon indicate a risk of gradual system instability due to climate change (CC). This projected instability expands the vulnerability domain, mandating the implementation of more robust conservation

measures and the execution of green development programs across the entire basin rather than the current limited interventions.

ETHICAL CONSIDERATIONS

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

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

REFERENCES

References (in Persian)


- Ahmadi, A., & Seddighi-Far, Z. (2017). Estimation of soil erosion and sediment yield using the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) in Hableh Rood Watershed. *Physical Geography Quarterly*, 10(3 (Serial 37)), 83-103. [20.1001.1.20085656.1396.10.37.6.7](https://doi.org/10.22085/656.1396.10.37.6.7). [In Persian].
- Ansari Lari, A., & Ansari, M. (2018). Estimate the amount of soil erosion in Marvdasht plain (Iran, Fars) by RUSLE Model. *Quantitative Geomorphological Research*, 4(4), 134-149. [In Persian].
- Ansari Lari, A. and Ansari, M. (2017). Evaluation of soil erosion risk and sedimentation potential by using EPM model in Gabric basin- SE Hormozgan- Iran. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 6(11), 1-14. doi: 10.22111/jneh.2017.2965. [In Persian].
- Asadi, H., Jafari, M., Ashrafzadeh, A., & Sharifi, A.. (2018). Forecasting the effect of climate change on soil erosion hazard in Navrood watershed. *JOURNAL OF WATER AND SOIL CONSERVATION (JOURNAL OF AGRICULTURAL SCIENCES AND NATURAL RESOURCES)*, 25(2), 235-250. [10.22069/jwsc.2018.12223.2679](https://doi.org/10.22069/jwsc.2018.12223.2679). [In Persian].
- Babaei, M. , Hosseini, S. Z. , Nazari Samani, A. and Almodaresi, S. A. (2016). Assessment of soil erosion using RUSLE 3D, case study: Kan Watershed. *Watershed Engineering and Management*, 8(2), 165-181. doi: 10.22092/ijwmse.2016.106454. [In Persian].
- Barabarian, A. and Mohseni, N. (2025). Spatio-Temporal Modeling of Soil Erosion Using the RUSLE Model and Its Impact on Soil Quality. *Geography and Environmental Planning*, 36(2), 113-140. doi: 10.22108/gep.2025.143683.1732. [In Persian].
- Ebrahimzadeh, S. , Argany, M. and Mirdar Harijani, F. (2024). Modeling the rate of soil erosion and sediment yield using the RUSLE / SDR model in the Dizgaran watershed. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 13(39), 1-24. doi: 10.22111/jneh.2024.39109.1823. [In Persian].
- Ghobishawi, Y. and Zakerinejad, R. (2025). Evaluation and Comparison of Different Data Mining Models for Identifying Areas at Risk of Gully Erosion (Study Area: Mian Ab Watershed in Khuzestan Province). *Physical Geography Research*, doi: 10.22059/jphgr.2025.387443.1007862. [In Persian].
- Ghabishavi, Y., & Zaketinezhad, R. (2025). Evaluation and Zonation of Gully Erosion Risk in the Mianab Shushtar Watershed. *The 11th International Conference on Environmental Engineering, Geography and Natural Resources*. <http://openaccess.ir/c/eiconf11/paper/1504066>. [In Persian].
- Hesami, S. D., Nazarnajad, H., Erfanian, M., Abghari, H., Mahmoudi, M. A., & Rostami-Khalaj, M. (2024). Estimation of soil erosion rate in Gavashan watershed using the RUSLE 3D model. *Environment and Water Engineering*, 10(3), 392-407. <https://doi.org/10.22034/ewe.2024.421459.1898>. [In Persian].
- Khaledi Darvishan, A. , Faraji, J. , Gholami, L. and Khorsand, M. (2021). Spatio-temporal variation of soil erosion in Khamsan representative watershed using RUSLE. *Watershed Engineering and Management*, 13(3), 534-547. doi: 10.22092/ijwmse.2021.128809.1752. [In Persian].
- Kordavani, P. (2002). Soil Conservation, 7th Edition, Tehran University Press [In Persian].
- Madadi, A. , asghari saraskanroud, S. , Neghaban, S. and Marhamat, M. (2023). Application of Support Vector Machine (SVM) and Boosted Regression Tree (BRT) to Model the Sensitivity of Gully Erosion in the Watershed of Shore River Moher City. *Physical Geography Research*, 55(4), 83-101. doi: 10.22059/jphgr.2023.360424.1007775. [In Persian].
- Mirzadeh Koohshahi F, Akbarian M, Khorani A. (2023). Assessing Climate Change Impact on Soil Erosion in Minab Watershed, Iran. *E.E.R.* 13 (2) :63-81. [20.1001.1.22517812.1402.13.2.4.8](https://doi.org/10.1001.1.22517812.1402.13.2.4.8). [In Persian].
- Mohammadi, M. , Fallah, M. , Kavian, A. , Gholami, L. and Omidvar, E. (2016). The Application of RUSLE Model in Spatial Distribution Determination of Soil loss Hazard. *Journal of Ecohydrology*, 3(4), 645-658. doi: 10.22059/ije.2016.60368. [In Persian]
- Mohammadi , Sh, Karimzadeh, HR., & Alizadeh, M. (2018). Spatial estimation of soil erosion in Iran using RUSLE model. *IRANIAN JOURNAL OF ECOHYDROLOGY*, 5(2), 551-569. <https://sid.ir/paper/254031/en>. [In Persian].
- Nezhadafzali, K. , Shahrokhi, M. R. and Bayatani, F. (2019). Assessment soil erosion using RUSLE model and identification the most effective factor in Dekhan watershed basin of southern Kerman. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 8(20), 21-38. doi: 10.22111/jneh.2018.21894.1316. [In Persian].

- Noor, H. and Arabkhedri, M. (2023). Prediction of soil erosion and sediment delivery ratio using RUSLE at Sanganeh soil conservation research station. *Water and Soil Management and Modelling*, 3(1), 42-53. doi: 10.22098/mmws.2022.11085.1098. [In Persian].
- Rezaee, P., Faridi, P., Ghorbani, M., & Kazemi, M. (2014). Estimation of soil erosion using the RUSLE model and identification of its most effective factor in the Gabrik Watershed, southeastern Hormozgan province. *Quantitative Geomorphological Research*, 3(1), 97-113. [20.1001.1.22519424.1393.3.1.7.3](https://doi.org/10.1001.1.22519424.1393.3.1.7.3). [In Persian].
- Teimouri, F., Bazrafshan, O., & Rafiei sardoei, e. (2019). Assessment of Climate Change and Land Use Change on Soil Erosion (Case study: Kondaran. *IRANIAN JOURNAL OF ECOHYDROLOGY*, 6(2), 353-368. [10.22059/ije.2019.274886.1038](https://doi.org/10.22059/ije.2019.274886.1038). [In Persian].
- Vosoghi, S., Zakerinejad, R. and entezari, M. (2025). Prediction of Gully Erosion and identifying factors affecting it using the Maximum Entropy Model and BCC-CSM2-MR climate change models for the years 2020-2040 (case study: Alamarvdasht watershed). *Journal of Geography and Planning*, 28(90), 163-141. doi: 10.22034/gp.2023.57572.3169. [In Persian].
- Zakerinejad R. (2023). Evaluating the Rate of Soil Erosion and Sedimentation of the Khasoyeh Watershed Using the USPED Model and GIS and its Comparison to Water Erosion Types. *E.E.R.* 13 (3) :239-256. [20.1001.1.22517812.1402.13.3.12.8](https://doi.org/10.1001.1.22517812.1402.13.3.12.8). [In Persian].
- Zakeri, R. and Falah, S. (2023). Evaluation of Water Erosion Hazard Map Using the Combination of the RUSLE Model and Gully Erosion Density Map in Alamarvdasht Watershed of Fars Province, Iran. *Quantitative Geomorphological Research*, 11(4), 189-209. doi: 10.22034/gmpj.2022.360905.1375. [In Persian].
- Zakerinejad, R. and Moavi, M. (2024). Investigating the effects of land use changes on vegetation (Case study: Mian-Ab watershed in the period 2000-2020). *Journal of Arid Regions Geographic Studies*, 15(55), 147-132. doi: 10.22034/jargs.2023.407397.1049. [In Persian].

References (in English)

- Belasri, A., A. Lakhoul, and Oumaima, Iben Halima. (2017). Soil erodibility mapping and its correlation with soil properties of Oued El Makhazine watershed, Morocco. *Journal of Materials and Environmental Science*, Vol 8(9): 3208-3215.
- Casabella-González, M. J., Borselli, L., & García-Meza, J. V. (2021). Soil Horizon erodibility assessment in an area of Mexico susceptible to gully erosion. *Journal of South American Earth Sciences*, 111, 103497.
- Fazly Yusof, Mohd., Rozi, Abdullah., Nor Azazi, Zakari and Aminuddin AB, Ghani. (2011). Modified Soil erodibility factor, K for Peninsular Malaysia soil series, 3rd International Conference on Managing Rivers in the 21st Century.
- Hudson N. Soil conservation. *Shahid Chamran University Press*; 1993.
- Kamaludin, H., Lihan, T., Rahman, Z. A. R., Mustapha, M. A., Idris, W. M. R., & Rahim, S. A. (2013). Integration of remote sensing, RUSLE and GIS to model potential soil loss and sediment yield (SY). *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 10(10), 4567-4596. DOI: 10.5194/hessd-10-4567-2013
- Marques, V. S., Ceddia, M. B., Antunes, M. A. H., Carvalho, D. F., Anache, J. A. A., Rodrigues, D. B. B., & Oliveira, P. T. S. (2019). USLE K-Factor Method Selection for a Tropical Catchment. *Sustainability*, 11(7), 1840. <https://doi.org/10.3390/su11071840>
- 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(2), 1627. <https://doi.org/10.3390/su15021627>.
- Morgan, R. P. C. (2009). Soil erosion and conservation. John Wiley & Sons.
- Nearing m, foster g, lane l. (1989). a process-based soil erosion model for usda water erosion prediction project. *transactions of asae*. 32(5):1587-1593.
- Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., McCool, D. K., & Yoder, D. C. (1997). Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). U.S. *Department of Agriculture, Agriculture Handbook No. 703*.
- Tang, W., Liu, H., & Liu, B. (2013). Effects of gully erosion and gully filling on soil degradation in the black soil region of Northeast China. *Journal of Mountain Science*, 10, 913-922. <https://doi.org/10.1007/s11629-013-2560-5>.
- Tucker, C. J. (1979). "Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation." *Remote Sensing of Environment*, 8(2), 127-150.
- Wang, Bin., Zheng, Fenli and Guan, Yinghui. (2016). Improved USLE-K factor prediction: A case study on water erosion areas in China. *International Soil and Water Conservation Research*, Vol 4: 168-176.
- Williams, J. (1990). The erosion-productivity impact calculator (EPIC) model: a case history. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 329(1255), 421-428. <https://doi.org/10.1098/RSTB.1990.0184>.
- Wischmeier, W.H., & Smith, D.D. (1978) Predicting Rainfall Erosion Losses. A Guide to Conservation Planning. *The USDA Agricultural Handbook No. 537*, Maryland.
- Zhang, B., Zhang, G., Yang, H., Wang, H., & Li, N. (2018). Soil erodibility affected by vegetation restoration on steep gully slopes on the Loess Plateau of China. *Soil Research*, 56, 712-723. <https://doi.org/10.1071/SR18129>.
- Zhu, B., Zhou, Z., & Li, Z. (2021). Soil Erosion and Controls in the Slope-Gully System of the Loess Plateau of China: A Review. , 9. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.65703>
- Zhu, D., Wang, T. W., Cai, C. F., Li, L., & Shi, Z. H. (2009). Large-scale assessment of soil erosion using a neuro-fuzzy model combined with GIS: A case study of Hubei Province, China. *Land Degradation & Development*, 20(6), 654-666.

ارزیابی شدت فرسایش آبی حوضه آبخیز میان آب شوستر تحت سناریوهای تغییر اقلیم در دوره زمانی ۲۰۲۱ - ۲۰۴۰

یاسمین غیباشوی^۱، رضا ذاکری نژاد^{۲*} 

۱. کارشناسی ارشد سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی دانشگاه اصفهان

۲. دانشیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه ریزی دانشگاه اصفهان (نویسنده مسئول)

ایمیل: r.zakerinejad@geo.ui.ac.ir ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-1949-2757>

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>نوع مقاله: مقاله پژوهشی</p> <p>تاریخ دریافت: ---/---/--- تاریخ ویرایش: ---/---/--- تاریخ پذیرش: ---/---/--- تاریخ انتشار: ---/---/---</p> <p>واژه‌های کلیدی: فرسایش آبی، حوضه آبخیز میان آب شوستر، سناریو تغییر اقلیم.</p>	<p>فرسایش آبی، فرآیندی دینامیک و مخرب است که طی آن ذرات خاک سطحی تحت تأثیر انرژی جنبشی قطرات باران و نیروی برشی ناشی از رواناب سطحی متمرکز (شیاری یا ورقه‌ای) از محل اصلی خود جدا شده و جابجا می‌شوند؛ این پدیده، منجر به کاهش حاصلخیزی خاک، تخریب زیرساخت‌ها و افزایش رسوب‌گذاری در آبراه‌ها می‌گردد. این پژوهش با هدف ارزیابی و تعیین پتانسیل فرسایش آبی حوضه آبخیز میان آب شوستر (خوزستان)، از معادله جهانی فرسایش خاک تجدیدنظر شد (RUSLE) و سناریو اقلیم مدل BCC-CSM2-MR در بستر سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) بهره برد. نوآوری روش‌شناختی این مطالعه پیش بینی آینده، استفاده از منابع داده‌ای به روز و با تفکیک فضایی بالا استوار است؛ عامل طول شیب (LS) با استفاده از مدل رقمی ارتفاع (DEM) و ابزارهای تحلیلی SAGA GIS محاسبه شد. عامل فرسایش باران از داده‌های نوین SM2RAIN-MONITORING، سایت WorldClim استخراج و عامل پوشش گیاهی بر اساس شاخص NDVI حاصل از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۹ در سال ۲۰۲۳ تعیین گردید، در حالی که عامل مدیریتی (P) به دلیل محدودیت داده‌های منطقه‌ای در تحلیل مستتر شد. نتایج نشان داد که توزیع فرسایش تابعی شدید از توپوگرافی است؛ بیشترین نرخ فرسایش تخمینی در نواحی شرقی و جنوب شرقی که دارای عامل LS بالا هستند، متمرکز شده است. با این حال، بیش از ۹۰ درصد از مساحت حوضه در کلاس فرسایش کم و خیلی کم قرار دارد. پیش‌بینی بلندمدت (تا ۲۰۴۰) زنگ خطر وقوع شکست پایداری و گسترش فرسایش به سمت مرکز و غرب حوضه را به صدا درآورده است. لذا، راهبرد مدیریتی نیازمند اجرای همزمان راهکارهای پیشگیرانه در غرب و مرکز، در کنار اصلاحات شرق است. این تحقیق با ارائه یک مدل بومی‌سازی شده با دقت مکانی بالا، چارچوبی مستند برای اولویت‌بندی مداخلات مدیریتی در حوضه‌های مشابه نیمه خشک جنوب ایران ارائه می‌نماید.</p>

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

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

مقدمه

زندگی در روی کره زمین به آب، هوا، نورخورشید و خاک وابسته است. خاک، سطحی ترین قسمت پوسته جامد زمین را تشکیل می‌دهد که به صورت پوشش سست و کم ضخامت سنگ‌هایی را که هنوز تخریب نشده، پوشانیده است (کردوانی، ۱۳۸۱). خاک از عملکرد فرایندهای مختلف، از جمله فرایندهای زمین‌شناسی، اقلیمی و یا دخالت انسان به وجود می‌آید. امروزه، اکثر کشورها با مشکلات ناشی از تخریب شدید زمین و فرسایش خاک مواجه هستند (مرگان^۱، ۲۰۰۹). آب و باد دو عامل اصلی فرسایش هستند (هادسون^۲، ۱۳۷۲). فرسایش خاک ناشی از آب به عنوان یک نگرانی زیست‌محیطی و منبع قابل توجهی برای انتقال رسوبات به رودخانه‌ها، یک پدیده تهدیدکننده تخریب زمین است که حدود یک میلیارد هکتار سرزمین را در جهان را تحت تأثیر قرار می‌دهد. این نوع هدر رفت خاک یکی از عوامل اصلی تخریب سرزمین و بیابان زایی خصوصاً در اقلیم‌های خشک و نیمه خشک می‌باشد (ذاکری نژاد و همکاران^۳، ۱۴۰۴؛ ذاکری نژاد^۴ و همکاران^۳، ۲۰۲۱). فرسایش آبی بر اساس تغییرات در ویژگی‌های مورفومتریکی آن در دامنه‌های تپه‌ها به اشکال مختلف از جمله فرسایش بارانی یا پاشمانی، فرسایش ورقه‌ای یا سطحی، فرسایش شیاری یا آبراهه‌ای و فرسایش آبکندی (بدلند) رخ می‌دهد. (مددی، ۱۴۰۲). به دلیل اهمیت برآورد و مدیریت این پدیده مدل‌های زیادی ارائه شده است که از مهم ترین این مدل‌ها می‌توان به معادله جهانی فرسایش خاک (USLE)، پروژه پیش بینی فرسایش آبی (WEPP)، ابزار ارزیابی خاک و آب (SWAT) و مدل اروپایی فرسایش خاک (EUROSEM) اشاره نمود (نژاد، افضلی و همکاران، ۱۳۹۸: ۲۲). طی ۴۰ سال اخیر، مدل USLE به دلیل داشتن محاسبات ساده، پرکاربردترین روش تخمین پتانسیل فرسایش خاک و برآورد تاثیرات عملیات مدیریتی مختلف بوده است و به دنبال آن، نسخه جدید مدل USLE با نام جهانی معادله جهانی تجدید نظر شده هدررفت خاک (RUSLE) توسعه یافته که برآوردهای دقیق تری از عوامل R, K, C, P, S و L و فرسایش خاک انجام می‌دهد (نژاد افضلی و همکاران، ۱۳۹۸: ۲۲). مدل‌سازی فرسایش خاک با تکیه بر مدل جهانی فرسایش خاک (USLE) و نسخه اصلاح شده آن (RUSLE) به عنوان سنگ‌بنای پژوهش‌های جهانی و ملی شناخته می‌شود. در سطح بین‌المللی، تلاش‌های گسترده‌ای بر کالیبراسیون دقیق تر پارامترهای این مدل با شرایط منطقه‌ای صورت گرفته است. آناچه^۴ و همکاران (۲۰۱۹) در مطالعه‌ای بر اهمیت نمودار RUSLE در تعیین ضریب فرسایش‌پذیری خاک (K) در مناطق گرمسیری تأکید کردند، در حالی که یوسف^۵ و همکاران (۲۰۱۱) در مالزی محاسبه این ضریب را از طریق معادله TEW کارآمدتر دانستند. این پژوهش‌ها، که میراث‌دار کارهای کلاسیک ویشمایر و اسمیت^۶ (۱۹۷۸) هستند، به طور کلی بر این نکته توافق دارند که ویژگی‌های ذاتی خاک، شامل بافت و مواد آلی (آن‌طور که بلاسری^۷ و همکاران (۲۰۱۷) اشاره کردند)، نقش محوری در میزان فرسایش‌پذیری دارند. همچنین وانگ^۸ و همکاران (۲۰۱۶) در چین نشان دادند که تغییرات اقلیمی و کاربری اراضی موجب تغییرات مکانی قابل توجهی در مقادیر پارامترها می‌شود و این امر ضرورت بومی‌سازی مدل را تقویت می‌کند.

- 1 Morgan
2. Hudson
3. Zakerinejad
4. Belasri
5. Yusof
6. Wischmeier & Smith
- 7 Belasri
8. Wang

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

این رویکرد جهانی، به سرعت در ایران مورد پذیرش قرار گرفت و پژوهشگران داخلی به دنبال بومی‌سازی مدل RUSLE در محیط GIS و RS بودند. یافته‌های اولیه ابعاد گسترده پدیده را آشکار ساخت؛ به طور خاص، مطالعه محمدی و همکاران (۱۳۹۷) نشان داد که میانگین فرسایش سالانه در کشور حدود ۲۴ تن در هکتار در سال است و عامل توپوگرافی (LS) به عنوان عامل غالب شناسایی شد. این نقش برجسته LS در مناطق کوهستانی و شیب‌دار، در مطالعات متعددی تأیید شده است؛ چنان‌که نژاد افزلی و همکاران (۱۳۹۸) در جنوب کرمان و محمدی و همکاران (۱۳۹۵) در حوضه تالار، ضریب همبستگی بالایی (۰/۹۳) برای این عامل گزارش کردند. تحقیقات داخلی همچنین ارتباط عوامل محیطی و مدیریتی را بررسی کردند؛ برابران و محسنی (۱۴۰۴) رابطه معکوس بین فرسایش و کیفیت خاک در خراسان شمالی را اثبات کردند، در حالی که خالدی درویشان (۱۴۰۰) به سهم غالب فصل زمستان در فرسایش اشاره کرد. علاوه بر این، پژوهش‌هایی نظیر میرچان^۱ و همکاران (۲۰۲۳)، رضائی و همکاران (۱۳۹۳) در هرمزگان و کار احمدآبادی و صدیقی فر (۱۳۹۶)، اهمیت شدید مدیریت کاربری اراضی و انجام طرح در کنترل نرخ فرسایش را برجسته نمودند. با گذشت زمان، پژوهش‌ها از مدل پایه به سمت نسخه‌های اصلاح‌شده و پیشرفته‌تر حرکت کردند تا دقت تخمین فرسایش خاک افزایش یابد. در این راستا، مدل RUSLE گامی مهم تلقی می‌شود؛ به طور مثال، حسامی و همکاران (۱۴۰۳) در حوضه گاوشان با بهره‌گیری از این مدل به برآوردی بسیار نزدیک به واقعیت (۲/۵ تن در هکتار در سال در مقابل ۵/۴ تن در هکتار در سال واقعی) دست یافتند که دقت بالای آن در محاسبه ضریب توپوگرافی (LS) را نشان می‌دهد. این روند اصلاحی توسط نور و عرب خدردی (۱۴۰۲) با اعمال ضرایب اصلاحی در جهت کاهش خطای مدل صورت گرفت. در پژوهشی دیگر نیز توسط ذاکری نژاد و فلاح (۱۴۰۲) با تلفیق مدل RUSLE با تکنیک‌های نوین مکانی برای ارتقای نقشه‌های خطر فرسایش خاک ادامه یافت. در همین مسیر، پژوهش‌های جدیدتر مانند ابراهیم زاده و همکاران (۱۴۰۳) با استفاده از مدل‌های ترکیبی در تولید نقشه‌های دقیق‌تر گام برداشتند. همچنین، غبیشاوی و ذاکری نژاد (۱۴۰۴) با کاربرد مدل‌های یادگیری ماشین CART و SVM در حوضه میان‌آب شوشتر نشان دادند که مدل SVM با $R^2 = 0/۸۴۶$ دقت بیشتری در پیش‌بینی مناطق مستعد فرسایش آب‌کندی دارد. در پژوهشی دیگر با مدل فازی (FUZZY) نیز مشخص گردید که حدود ۵۰/۵۹ درصد از مساحت منطقه در طبقه خطر متوسط قرار دارد (غبیشاوی و ذاکری نژاد، ۱۴۰۴). این یافته‌ها ضرورت به‌کارگیری رویکردهای هوشمند و تلفیقی در مدیریت خطر فرسایش در ایران را برجسته می‌سازند.

در سال‌های اخیر، تمرکز پژوهش‌ها بر بررسی اثرات تغییر اقلیم بر روند فرسایش خاک در ایران افزایش یافته است. در این راستا، میرزاده کوهشاهی و همکاران (۱۴۰۲) با استفاده از سناریوهای اقلیمی SSP افزایش فرسایش را تا سال ۲۰۴۰ پیش‌بینی کردند، در حالی که تیموری و همکاران (۱۳۹۸) با بکارگیری سناریوهای RCP۸/۵ و RCP۲/۶، افزایش قابل توجهی را تا سال ۲۰۵۰ نشان دادند. همچنین، اسدی و همکاران (۱۳۹۷) با سناریوهای A2، A1B و B1 افزایش شدید خطر فرسایش را تا اواخر قرن جاری در حوضه ناورود مدل‌سازی کردند. این نتایج مکمل یافته‌های وثوقی و همکاران (۱۴۰۳) در زمینه شناسایی مکانی عوامل فرسایش آب‌کندی هستند، که همگی بر ضرورت توجه به پیامدهای تغییرات اقلیمی و افزایش خطر فرسایش در بازه‌های زمانی آینده تأکید دارند.

¹ Merchan

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

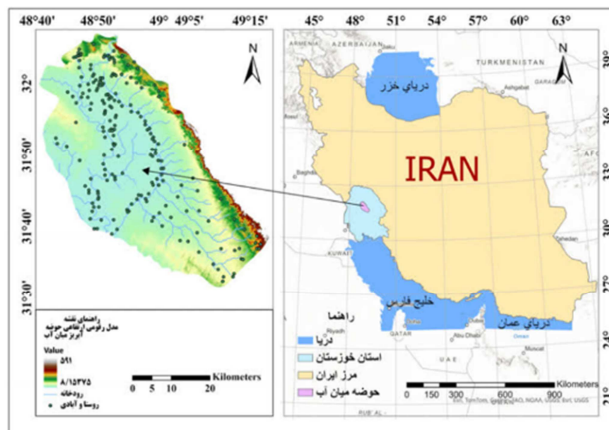
در مجموع، روند کلی پژوهش‌ها نشان می‌دهد که ترکیب مدل‌های تجربی مانند RUSLE با داده‌های سنجش‌ازدور، داده‌های اقلیمی و الگوریتم‌های یادگیری ماشین، بستری قدرتمند برای تحلیل دقیق، پیش‌بینی و مدیریت خطر فرسایش در شرایط اقلیمی متغیر آینده فراهم می‌سازد.

این پژوهش در ارائه اولین مدل پهنه‌بندی فرسایش آبی (RUSLE) در حوضه آبخیز میان‌آب شوشتر، منطقه‌ای با اهمیت استراتژیک کشاورزی و با مطالعات اندک، با اتکاء بر یک رویکرد تلفیقی نوین است. این مطالعه، با فراتر رفتن از اجرای استاندارد مدل RUSLE، با استفاده از داده‌های مکانی با تفکیک بالا شامل بارش جهانی (SM2RAIN-MONITORING) و تصاویر لندست ۹ (برای استخراج دقیق NDVI و محاسبه عوامل C، توانایی تحلیل فضایی فرسایش را در مقیاس ۳۰ متری ارائه می‌دهد. همچنین پیش‌بینی تغییرات آبی فرسایش از سال ۲۰۲۱ تا ۲۰۴۰ تحت سناریوی اقلیمی مدل BCC-CSM2-MR است که آن را به الگویی قابل اعتماد برای برنامه‌ریزی‌های منطقه‌ای تبدیل می‌کند. این تحقیق را به یک الگوی بومی‌سازی شده و قابل اعتماد برای برنامه‌ریزی‌های بلندمدت حفاظت از منابع کشاورزی، باغ‌داری و دامپروری در شرایط اقلیمی جنوب ایران تبدیل می‌کند.

داده‌ها و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

حوضه میان‌آب، با مساحت تقریبی ۲۸۵۳ کیلومتر مربع، در موقعیت جغرافیایی خاصی در استان خوزستان، حدود ۴۰ کیلومتری شمال اهواز، بین عرض جغرافیایی $31^{\circ}36'$ و طول جغرافیایی $48^{\circ}45'$ تا $49^{\circ}01'$ قرار گرفته و میانگین ارتفاع آن ۲۹۲ متر از سطح دریاست این حوضه در شکل (۱) نشان داده شده است. شرایط اقلیمی این منطقه تحت تأثیر موقعیت عرض‌های پایین جغرافیایی و فاصله از دریا، گرم و نیمه‌مرطوب است؛ به طوری که با میانگین بارش سالانه ۳۲۲ میلی‌متر، دمای آن در تیرماه به اوج $45/9$ درجه سلسیوس می‌رسد و یخبندان عملاً نادر است. از منظر زمین‌شناسی، این منطقه که در مرحله‌ی بالآمدگی فعال قرار دارد و مستعد لرزه‌خیزی‌های محلی است، عمدتاً از سازندهای نئوژن گروه فارس شامل ماسه‌سنگ، مارن و آهک تشکیل شده است؛ این ساختار زمین‌شناختی، بستری از رسوبات تخریبی دگرشیب را فراهم آورده که خود در فرآیندهای دگرشکلی و لرزه‌خیزی منطقه نقش دارد.



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی مورد مطالعه. منبع: نگارندگان

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

حوضه آبریز میان‌آب شوشتر، به دلیل قرارگیری در بخش‌های پایانی مسیر رودخانه کارون و برخورداری از توپوگرافی نسبتاً هموار در دشت رسوبی، با چالش‌های خاص فرسایش آبی مواجه است. اگرچه این منطقه عمدتاً دشت است، اما شیب‌های تندتر دامنه کوه‌های زاگرس در بالادست، منشأ اصلی رواناب و بار فیزیکی فرسایش هستند. فرسایش در این حوضه اغلب به صورت فرسایش رودخانه‌ای و فرسایش ناشی از آب‌های پراکنده در اراضی کشاورزی کم‌تراکم یا مناطقی با پوشش گیاهی ضعیف نمود پیدا می‌کند. فعالیت‌های کشاورزی گسترده و استفاده نادرست از اراضی در نزدیکی مسیرهای زهکشی طبیعی، مقاومت خاک‌های لسی و رسوبی منطقه را در برابر نیروی برش جریان آب کاهش می‌دهد. تمرکز اصلی خطر فرسایش در این منطقه، انتقال حجم رسوبات از بالادست به سیستم کانال‌های آبیاری و زهکشی، و همچنین تشدید فرسایش کناره‌های رودخانه‌ها در زمان طغیان است که منجر به ناپایداری مسیر آب و افزایش کدورت آب ورودی به تأسیسات آبی شوشتر می‌شود. نمونه‌هایی از فرسایش‌های آبی حوضه در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۲. نمونه‌هایی از اشکال فرسایش آبی حوضه میان‌آب. منبع: نگارندگان

روش‌شناسی

این پژوهش علاوه بر ارزیابی وضعیت کنونی فرسایش خاک در حوضه میان‌آب شوشتر واقع در استان خوزستان با استفاده از مدل جهانی **RUSLE**، پیش‌بینی تغییرات فرسایش آبی در این حوضه نیز برای افق زمانی ۲۰۲۱-۲۰۴۰ انجام شده است. در این پیش‌بینی، از مدل اقلیمی جهانی **BCC-CSM2-MR** و داده‌های حاصل از پایگاه **WorldClim** به منظور برآورد و به‌روزرسانی عامل بارندگی و رواناب (**R**) استفاده شده است. برای محاسبه عوامل مؤثر بر فرسایش، از نقشه‌های توپوگرافی، داده‌های اقلیمی، اطلاعات خاک، پوشش گیاهی و مشاهدات و برداشت‌های میدانی استفاده گردید. سپس با به‌کارگیری نرم‌افزار **ArcGIS**، سامانه **Google Earth Engine**، نرم‌افزار **SAGA GIS**، پایگاه داده‌ی **www.worldclim** و ابزارهای تحلیلی مرتبط، نقشه‌های ورودی مدل و نتایج نهایی تحلیل‌ها تهیه شدند. شکل (۳) روند کلی مراحل اجرای مدل **RUSLE** و سناریو اقلیمی سال ۲۰۲۱ تا ۲۰۴۰ در این تحقیق را نمایش می‌دهد.

رابطه جهانی اصلاح (تجدیدنظر) شده فرسایش خاک (**RUSLE**) الگوی توسعه یافته (**USLE**) از یک سطح معین برای پیش‌بینی فرسایش سالانه خاک استفاده می‌کند (ذاکری نژاد و فلاح، ۱۴۰۲). معادله جهانی فرسایش خاک به

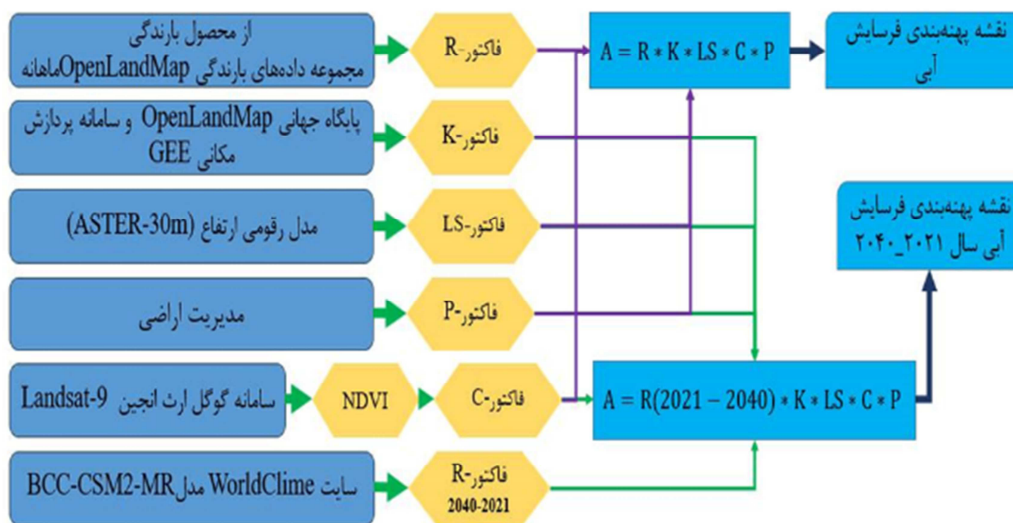
این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

طور عمده در کل جهان برای پیش بینی فرسایش شیاری و ورقه ای در مقیاس مزرعه تا حوضه با انواع شیوه های گوناگون مدیریتی استفاده گردیده است. چندین پارامتر مانند شیب، طول شیب به دست آمده از مدل رقومی ارتفاع (DEM) و تصاویر ماهواره ای را می توان به راحتی با معادله جهانی فرسایش خاک اصلاح شده ادغام کرد. برای تعیین فرسایش سالانه فعلی از رابطه (۱) و برای تعیین فرسایش سالانه آینده از رابطه (۲) استفاده شده است.

$$A = R * K * LS * C * P \quad (1)$$

$$A = R(2021_2040) * K * LS * C * P \quad (2)$$

A: میانگین فرسایش خاک در واحد سطح (تن در هکتار)، K: فرسایش پذیری خاک، R: عامل فرساینده باران، LS: عامل طول شیب، C: عامل پوشش گیاهی، P: عامل اقدامات حفاظتی.



شکل ۳: مواد و روش تحقیق منبع: نگارندگان

یافته های تحقیق

عامل فرساینده باران (R)

مفهوم عبارت فرساینده باران توسط ویشمایر و اسمیت به منظور در نظر گرفتن تأثیر اقلیم بر فرسایش خاک ارائه شد. توان باران در ایجاد فرسایش را فرساینده باران می نامند که تابعی از خصوصیات فیزیکی بارندگی است و با انرژی مستقیم باران، انرژی جنبشی بارندگی و حداکثر شدت بارندگی سی دقیقه ای در ارتباط است (ویشمایر و اسمیت^۱، ۱۹۷۸). فاکتور R، که به عنوان فاکتور فرساینده باران نیز شناخته می شود، نقش اساسی در مدل معادله جهانی تجدید نظر شده فرسایش خاک (RUSLE) ایفا می کند. این فاکتور میزان تأثیر بارندگی بر پتانسیل فرسایش خاک را کمی می کند. به طور خاص، فاکتور R نشان دهنده انرژی جنبشی و شدت رویدادهای بارندگی و ظرفیت آن ها در ایجاد جدایی و انتقال خاک است. فرساینده باران بالای بارندگی، که با فاکتور R نشان داده می شود، با انرژی جنبشی بالاتر قطرات باران و افزایش رواناب سطحی مرتبط است، که هر دو به طور قابل توجهی به فرایندهای فرسایش خاک مانند فرسایش کمک می کنند. خصوصاً فرسایش آبکنده اغلب زمانی ظاهر می شوند که رواناب

¹ Wischmeier and Smith

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

متمرکز جداسازی خاک را تشدید می‌کند، به ویژه در مناطقی با شیب‌های تند، خاک بدون پوشش گیاهی یا ساختار خاک ضعیف باشد (ذاکری نژاد و همکاران ۲۰۱۵). با بومی‌سازی فاکتور R بر اساس شرایط آب و هوایی محلی، محققان و مدیران زمین می‌توانند مناطق پرخطر برای فرسایش را شناسایی کرده و اقدامات حفاظت خاک هدفمند مانند پوشش گیاهی، شخم کانتوری را اجرا کنند (رنارد^۱ و همکاران، ۱۹۹۷). این تضمین می‌کند که استراتژی‌های کاهش خطر به طور مؤثر نیروهای فرسایشی ناشی از بارندگی را برطرف می‌کنند. به طور کلی، نقش فاکتور R در مدل RUSLE برای درک و مدیریت تعامل بین دینامیک بارندگی و فرسایش خاک، به ویژه در زمینه توسعه و گسترش فرسایش آبی، ضروری است.

ضریب فرسایش خاک (K)

شاخص فرسایش‌پذیری خاک (K)، سهولت جدا شدن ذرات خاک در اثر ضربه قطرات باران و نیروی برشی رواناب را نشان می‌دهد. در واقع، این عامل توانایی ذرات نسبت به جدا شدن را به صورت کمی توصیف می‌کند و تحت تاثیر توزیع اندازه ذرات خاک، نفوذپذیری و پایداری ساختمان خاک قرار می‌گیرد. مقادیر عامل فرسایش‌پذیری بر حسب تن ساعت بر مگا ژول میلی‌متر، از صفر تا یک متغیر است (ذاکری نژاد، ۱۴۰۲). شاخص فرسایش خاک (K)، یک پارامتر اساسی در معادله جهانی تلفات خاک (USLE)، حساسیت خاک به جدا شدن و جابجایی توسط آب را نشان می‌دهد و در درک و پیش‌بینی فرسایش آبی بسیار مهم است. این شاخص تحت تاثیر ویژگی‌های خاک مانند بافت، ماده آلی، ساختار و نفوذپذیری قرار می‌گیرد. مطالعات نشان می‌دهد که ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی لایه‌های عمیق‌تر خاک نقش مهمی در تسهیل تشکیل دره‌ها ایفا می‌کند، زیرا این لایه‌ها اغلب به دلیل کاهش پایداری و محتوای مواد آلی، شاخص K بالاتری دارند (کاسابلا-گونزالز^۲ و همکاران، ۲۰۲۱). علاوه بر این، عواملی مانند پوشش گیاهی، شیب و شدت بارندگی با شاخص K برای تشدید فرآیندهای فرسایش در تعامل هستند. به عنوان مثال، تحقیقات انجام شده در فلات لوس در چین نشان داد که احیای پوشش گیاهی به طور قابل توجهی مقدار K را با بهبود ساختار خاک و افزایش محتوای ماده آلی کاهش می‌دهد (ژانگ^۳ و همکاران، ۲۰۱۸). برعکس، در مناطقی با پوشش گیاهی ضعیف یا شیب زیاد، مقدار بالای K با ضعیف کردن مقاومت خاک در برابر جریان آب متمرکز، خطرات فرسایش آب‌کندی را افزایش می‌دهد (ژو^۴، ۲۰۰۹). بنابراین، شاخص K نه تنها آسیب‌پذیری‌های ذاتی خاک را اندازه‌گیری می‌کند، بلکه به عنوان یک ابزار تشخیصی برای اجرای اقدامات کنترل فرسایش مانند احیای پوشش گیاهی و مدیریت شیب عمل می‌کند.

عامل توپوگرافی (LS)

نقشه طول شیب (LS) یک ابزار کلیدی در تحلیل فرسایش خاک است که تأثیر طول شیب و تندی شیب را بر پتانسیل فرسایش خاک نشان می‌دهد. عامل LS از معادله جهانی فرسایش خاک (USLE) مشتق شده است که فرسایش را بر اساس پارامترهای توپوگرافی، اقلیمی، خاک و پوشش زمین پیش‌بینی می‌کند. عامل LS اثرات تجمع رواناب (طول شیب) و انرژی جریان آب (تندی شیب) را ترکیب می‌کند و برای شناسایی مناطق مستعد فرسایش و درک دینامیک فرسایش آبی بسیار مهم است. شیب‌های طولانی رواناب بیشتری را جمع‌آوری می‌کنند که جریان آب

¹ Renard

² Casabella-González

³ Zhang

⁴ Xu

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

را متمرکز می‌کند، انرژی فرسایشی آن را افزایش می‌دهد و شروع و توسعه خندق را تسریع می‌کند. مطالعات در فلات لوس چین نشان می‌دهد که مناطقی با مقادیر LS بالا بیشتر در معرض فرسایش آبکندی هستند (ژو^۱ و همکاران، ۲۰۲۱). تندی شیب سرعت رواناب را افزایش می‌دهد، ظرفیت آن را برای جدا کردن و انتقال ذرات خاک افزایش می‌دهد. سیستم‌های خندقی اغلب در مناطقی که شیب‌های تند با مناطق تجمع جریان بالا همگرا می‌شوند، شروع و گسترش می‌یابند (تانگ^۲ و همکاران، ۲۰۱۳).

اثر فاکتور توپوگرافی (LS) به عنوان یک عامل توپوگرافی، تاثیر مقدار رواناب، سرعت آن و پتانسیل فرسایش را نشان می‌دهد. طول شیب فاصله افقی از منبع جریان بالادست تا نقطه‌ای است که سرعت گردادیان به طور چشمگیری تغییر می‌کند، به طوری که فرآیند فرورانش آغاز می‌شود. به طور کلی، هر چه شیب بیشتر باشد، شدت فرسایش افزایش می‌یابد (احمدآبادی و صدیقی فر، ۱۳۹۶). سرعت فرسایش در امتداد شیب نامنظم است و معمولاً در انتها بیشتر بوده بطوریکه افزایش طول شیب و شیب می‌تواند باعث افزایش سرعت جریان آب بر روی زمین و افزایش فرسایش خاک شود. به طور کلی، هر دو عامل طول شیب و شیب را می‌توان با هم در نظر گرفت که با علامت LS نشان داده می‌شود (انصاری لاری و انصاری، ۱۳۹۵، ۱۳۹۶). شاخص LS از رابطه (۳) محاسبه می‌شود

$$LS = \left(\frac{AS}{22.13}\right)^{0.4} \left(\frac{\sin\theta}{0.0896}\right)^{1.3} \quad (3)$$

در رابطه ۳-۲، AS مساحت مسلول‌هایی را نشان می‌دهد که جریان آب از طریق آن‌ها به سلول مد نظر وارد می‌شود. مقدار این کمیت را می‌توان از رابطه (۴) محاسبه نمود، از طرفی θ در این رابطه نشان‌دهنده شیب زمین است.

$$LS = FLOW \text{ Accumulation} \times Cell \text{ Size} \quad (4)$$

این شاخص با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی استر در نرم‌افزار SAGA-GIS تولید گردید.

عامل پوشش گیاهی (C)

این فاکتور، بیانگر نسبت مقدار خاک از بین رفته از زمین زیر کشت، به خاک فرسوده شده از همان قطعه زمین در طی آیش مداوم و عاری از پوشش یا بقایای گیاهی می‌باشد (رضائی و همکاران ۱۳۹۳). پر کاربردترین معیار رویش گیاهی، شاخص تفاضل پوشش گیاهی نرمال شده (NDVI) است که با استفاده از فناوری سنجش از دور به دست می‌آید. NDVI با پیوند دادن دینامیک پوشش گیاهی با فرآیندهای فرسایش خاک، ابزاری عملی و مقرون به صرفه برای مدیریت ریسک فرسایش آبی ارائه می‌دهد و به دست اندرکاران این امکان را می‌دهد تا اولویت را به مناطق مداخله داده و شیوه‌های مدیریت پایدار زمین را اجرا کنند. این شاخص از طریق رابطه (۵) محاسبه می‌شود (ذاکری نژاد و معاوی، ۱۴۰۳؛ تاکر^۳، ۱۹۷۹).

$$NDVI = \frac{(NIR - R)}{(NIR + R)} \quad (5)$$

مقادیر NDVI بین -۱ تا +۱ متغیر است. مقادیر نزدیک به +۱ نشان‌دهنده پوشش گیاهی سالم و متراکم هستند و مقادیر نزدیک به صفر نشان‌دهنده خاک یا پوشش گیاهی ضعیف هستند. همچنین مقادیر منفی معمولاً نشان‌دهنده آب یا سطوح غیر گیاهی مانند سنگ یا برف هستند. این شاخص می‌تواند به شناسایی مناطق تحت فشار

¹ .Zhu

² . Tang

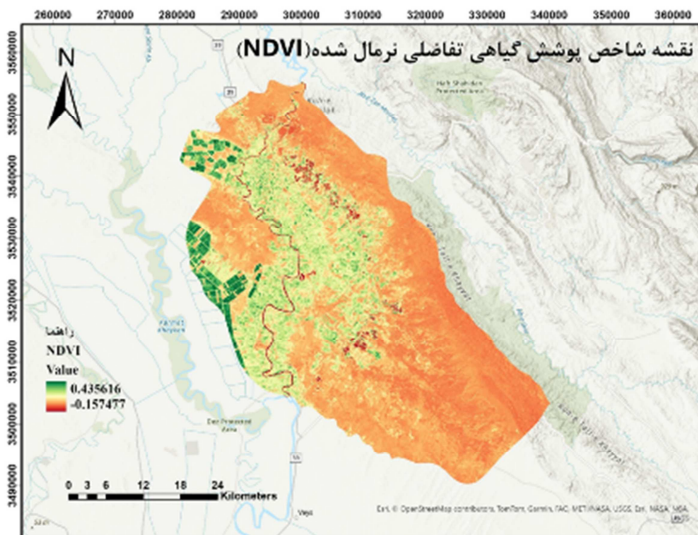
³ Tucker

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

زیست‌محیطی، ارزیابی اثرات تغییرات اقلیمی و بهبود مدیریت کشاورزی کمک کند. در شکل (۴) نقشه شاخص پوشش گیاهی NDVI حوضه آبخیز میان‌آب-شوشتر نشان داده شده است.

در این پژوهش، از تصاویر ماهواره ای لندست ۹ مربوط به سال ۲۰۲۳ با پوشش ابر کمتر از ۱۰ درصد در سامانه گوگل ارث انجین استفاده شد تا تحلیل فضایی و ارزیابی پوشش گیاهی حوضه میان آب انجام شود. پس از پردازش اولیه تصاویر و استخراج باندهای طیفی مورد نیاز، شاخص پوشش گیاهی تفاضلی نرمال شده (NDVI) محاسبه گردید. این شاخص به عنوان معیاری برای سنجش سلامت و تراکم پوشش گیاهی به کار گرفته شد. سپس، نقشه NDVI به سیستم مختصات UTM 39N با تفکیک مکانی ۳۰ متر تبدیل شد. در نهایت، نقشه‌های NDVI با استفاده از پالت رنگی مناسب تهیه و مورد تحلیل قرار گرفت. سپس با ابزار محاسباتی GIS و با استفاده از فرمول (رابطه ۶) (نیرینگ^۱ و همکاران، ۱۹۸۹) فاکتور C استخراج گردید.

$$C = 0.407 - 0.5953 * NDVI \quad (۶)$$



شکل ۴. نقشه شاخص پوشش گیاهی تفاضلی نرمال شده

عامل ضریب حفاظتی (P)

در مدل RUSLE عامل P نشان دهنده هدرفت خاک در شرایط اجرای عملیات حفاظتی (کشت روی خطوط تراز، کشت نواری، تراس بندی و زهکشی زیرسطحی) نسبت به هدرفت خاک تحت زراعت شخم در جهت شیب است (محمدی و همکاران، ۱۳۹۵). این عملیات حفاظتی به دلیل تاثیر بر سرعت رواناب، زمان تمرکز و نیروی هیدرولیکی رواناب بر خاک سبب کاهش فرسایش می شوند و ارزش عددی این عامل از صفر (نشان دهنده عملیات حفاظتی کامل) تا یک (بدون عملیات حفاظتی) متغیر است. از آنجا که عامل حفاظت P در صورت نبود اطلاعات کافی درباره چگونگی مدیریت اراضی می تواند از معادله حذف شود کامالیودن^۲ و همکاران (۲۰۱۳)، در این تحقیق نیز به دلیل نبود اطلاعات کافی عامل P محاسبه نشده است.

¹ Nearing

² Kamaludin

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

نتایج و بحث

در پژوهش حاضر، به منظور ارزیابی و پهنه‌بندی میزان فرسایش آبی در حوضه میان‌آب شوشتر، شاخص‌های اصلی مدل جهانی فرسایش خاک (RUSLE) شامل شاخص فرساینده‌گی بارش (R)، فرسایش‌پذیری خاک (K)، عامل طول و شیب زمین (LS)، فاکتور پوشش گیاهی (C) و عامل مدیریتی (P) محاسبه و در محیط GISPro و ArcMap مورد تحلیل قرار گرفتند. هر یک از این پارامترها به صورت جداگانه استخراج و شاخص‌های لازم برای مدل‌سازی فرسایش بر اساس داده‌های مکانی منطقه تهیه گردید. در پایان، با تلفیق لایه‌های مذکور، نقشه پهنه‌بندی شدت فرسایش آبی برای حوضه مورد مطالعه تولید و ارائه شد. همچنین در این مطالعه، به منظور پیش‌بینی تغییرات فرسایش خاک در آینده، سناریوی اقلیمی دوره زمانی ۲۰۲۱ تا ۲۰۴۰ مورد استفاده قرار گرفت. داده‌های بارش مربوط به این دوره از پایگاه WorldClim استخراج شده و با به‌کارگیری فرمول فورنیه (Fourmier) به شاخص فرساینده‌گی بارش (R) تبدیل گردید. این مقادیر سپس در مدل RUSLE اعمال شد تا تأثیر تغییرات اقلیمی بر شدت فرسایش آبی در بازه زمانی مذکور ارزیابی گردد. در ادامه نتایج هر یک از شاخص‌های ورودی به مدل آورده شده است.

نقشه شاخص عامل فرساینده‌گی باران (R)

فاکتور فرساینده‌گی باران (R) با استفاده از داده‌های بارندگی جهانی از مجموعه داده‌های بارندگی OpenLandMap، به ویژه محصول بارندگی ماهانه SM2RAIN-MONITORING محاسبه شد. فاکتور R از طریق یک روش استاندارد که داده‌های بارندگی ماهانه را به یک شاخص فرسایش‌پذیری جامع تبدیل می‌کند، استخراج شد. محاسبه شامل استخراج داده‌های بارندگی برای حوضه میان‌آب- شوشتر بود که برای این منظور از میانگین بارش در دوره ۲۰ ساله اخیر استفاده شد، سپس اعمال یک تبدیل لگاریتمی بود که اندازه‌گیری‌های بارندگی کل و ماهانه را به یک نمایش عددی از پتانسیل فرساینده‌گی باران تبدیل می‌کند. این رویکرد از تکنیک‌های مدل‌سازی هیدرولوژیکی شناخته‌شده پیروی می‌کند و داده‌های خام بارندگی را به یک شاخص معنی‌دار تبدیل می‌کند که انرژی جنبشی و شدت بارندگی قادر به ایجاد فرسایش آبی و فرسایش سطحی را کمی می‌کند. فاکتور R حاصل، به صورت فضایی تجزیه و تحلیل و با استفاده از سیستم مختصات UTM Zone 39N دانلود شد. برای محاسبه شاخص R از رابطه (۷) استفاده شد.

$$R = 1.73 * 10^{(1.5 * \log(\frac{P_m^2}{P_a}) - 0.08188)} \quad (7)$$

که در آن R فرساینده‌گی باران بر مگازول در میلی‌متر در هکتار در سال است و P_m میزان بارندگی در ماه و P_a بارش در یک سال است.

علاوه بر داده‌های گذشته، برای پیش‌بینی تغییرات فرسایش در آینده، لایه بارش پیش‌بینی‌شده دوره ۲۰۲۱ تا ۲۰۴۰ از مدل اقلیمی BCC-CSM2-MR تحت سناریوی SSP ۱۲۶ و با دقت مکانی ۳۰ ثانیه، از پایگاه WorldClim دریافت گردید. داده‌های مذکور پس از یکسان‌سازی با محدوده مطالعاتی، با استفاده از رابطه‌ی (۸) شاخص اصلاح شده فورنیه (MFI) محاسبه شد سپس با جای‌گذاری این شاخص در رابطه‌ی (۹) به شاخص فرساینده‌گی بارش تبدیل شدند تا تغییرات پتانسیل فرساینده‌گی در اثر تغییر اقلیم طی این دوره زمانی مدل‌سازی گردد.

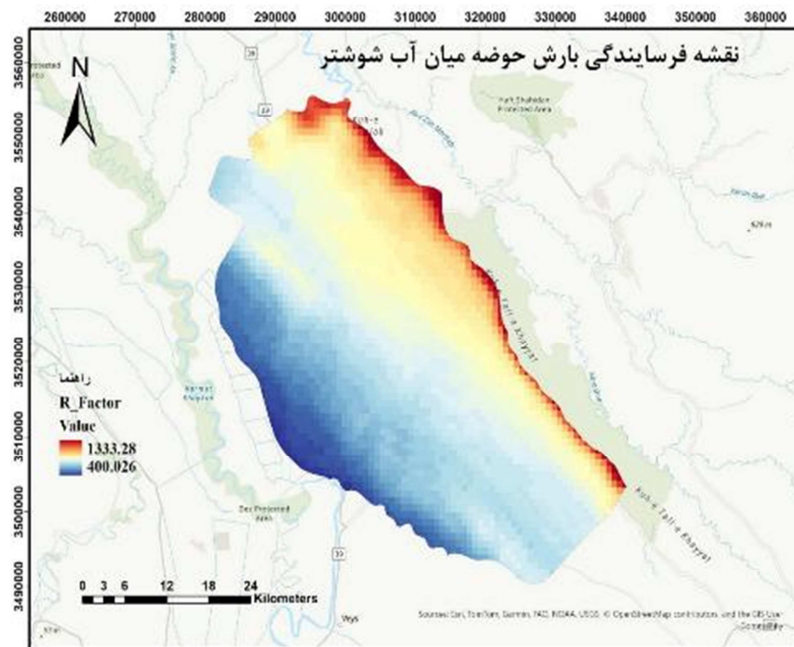
$$MFI = \sum_{i=1}^{12} i^2 / p \quad (8)$$

در رابطه (۸)، P_i متوسط بارندگی ماهانه و P متوسط بارندگی سالانه است.

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

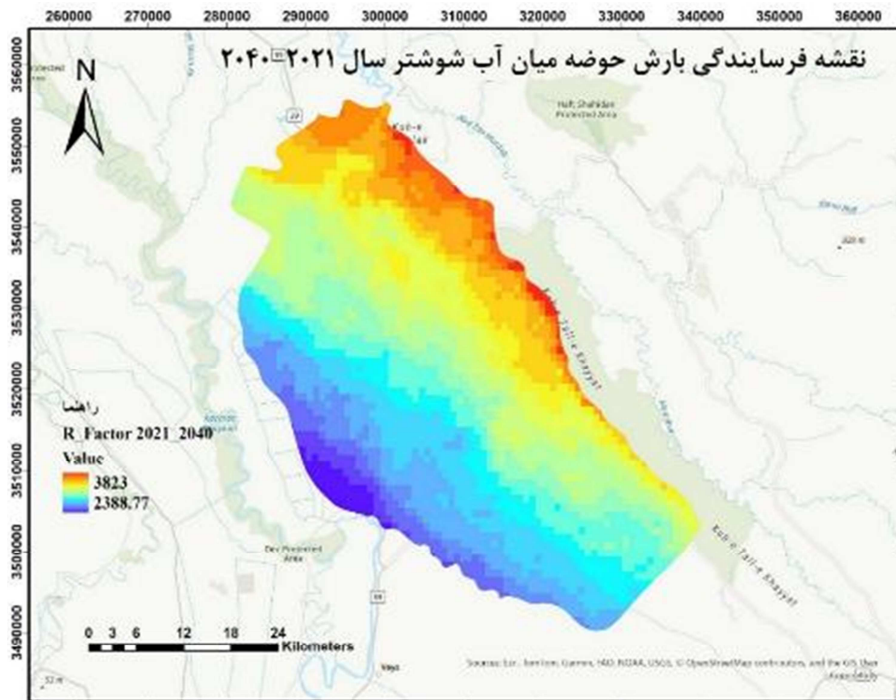
$$R = (95.77 - 6.081 * MFI + 0.477 * MFI^2) \quad (9)$$

نتایج حاصل از محاسبه فاکتور فرسایندهگی باران (R) در دوره گذشته و دوره پیش‌بینی، که به ترتیب در شکل (۵) (مقادیر ۰/۲۶ تا ۱۳۳۳/۲۸) و شکل (۶) (مقادیر ۲۳۸۸/۷۷ تا ۳۸۲۳) نمایش داده شده‌اند، حاکی از افزایش قابل توجه انرژی فرسایندهگی در آینده است. در دوره فعلی، نواحی شرق و شمال شرق حوضه میان‌آب شوشتر با بالاترین مقادیر R قرمز/نارنجی مشخص شده‌اند که نشان‌دهنده تمرکز انرژی بارش در این مناطق است، در حالی که غرب و جنوب‌غربی حوضه کمترین پتانسیل فرسایش‌زایی باران را دارا هستند. با این حال، پیش‌بینی مبتنی بر سناریوی اقلیمی SSP۱۲۶ برای سال‌های ۲۰۲۱ تا ۲۰۴۰ (شکل ۶)، افزایش شدید و گسترده این فاکتور را در کل حوضه نشان می‌دهد؛ به طوری که حداقل مقدار R از ۴۰۰ به بیش از ۲۳۰۰ واحد رسیده است. این ارتقاء شدید مقادیر، به ویژه گسترش نواحی با رنگ‌های گرم، تأیید می‌کند که تغییر اقلیم، پتانسیل فرسایش آبی ناشی از بارش را در تمام بخش‌های حوضه به طور بنیادین تشدید خواهد کرد و نیازمند رویکردهای مدیریتی تطبیقی و مقاوم‌سازی بیشتر زیرساخت‌ها در برابر فرسایش‌های آبی است.



شکل ۵. نقشه فرسایندهگی باران (R)

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



شکل ۶. نقشه فرساینده‌گی باران (R)

ضریب فرسایش خاک (K)

برای محاسبه فاکتور K، داده‌های مکانی با کیفیت خوب از ویژگی‌های خاک، از جمله درصد شن، رس، و همچنین کربن آلی خاک، از پایگاه داده جهانی OpenLandMap استخراج شد. این داده‌ها با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) و سامانه پردازش مکانی Google Earth Engine آماده‌سازی و پردازش شدند. نقشه درصد سیلت از طریق نقشه بافت خاک و مثلث بافت خاک به صورت درصدی در یک شیپ فایل نقطه‌ای ذخیره شد و در مرحله بعد از طریق تابع IDW در GIS درونیایی انجام شده و به صورت نقشه رستری درصد سیلت ذخیره شد و در نهایت برای اعمال در فرمول فرسایش پذیری خاک (K) به سامانه GEE آپلود شد. طبق روابط (۱۰) و (۱۱) (ویلیامز^۱، ۱۹۹۰) این شاخص با مشارکت چندین متغیر در این سامانه با کد نویسی جاوا اسکریپت محاسبه و نقشه نهایی فرسایش پذیری خاک مطابق شکل (۷) تولید و در سیستم کامپیوتری ذخیره شد.

$$sn1 = 1 - \frac{\text{sand}}{100} \quad (10)$$

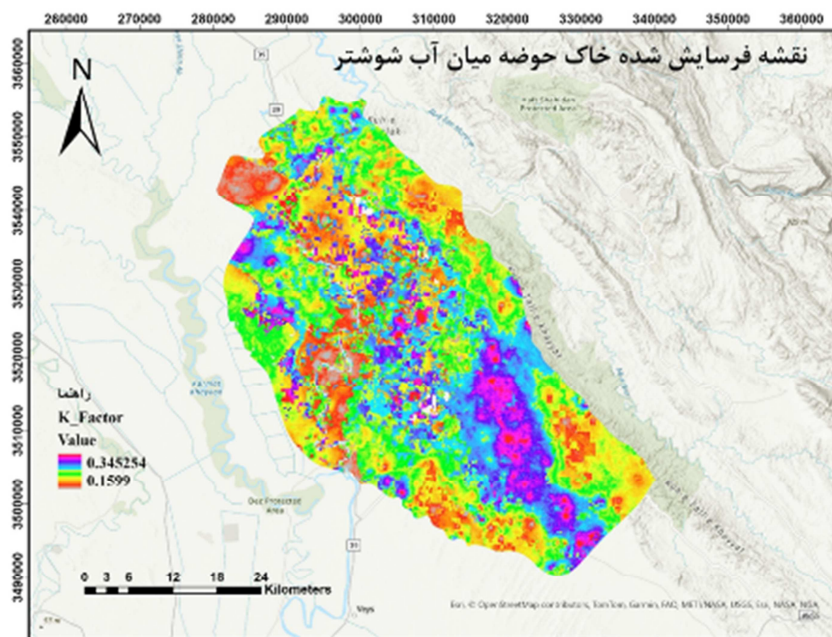
$$\text{Factor K} = \left(0.2 + 0.3 \times e^{-0.0256 \times \text{sand} \times \left(1 - \frac{\text{flt}}{100}\right)}\right) \times \left(\frac{\text{silt}}{\text{silt} + \text{clay}}\right)^{0.3} \times \left(1 - \frac{0.25 \times C}{C + e^{3.72 - 2.95 \times C}}\right) \times \left(1 - \frac{0.7 \times sn1}{sn1 + e^{-5.51 + 22.9 \times sn1}}\right) \quad (11)$$

که در این روابط sand درصد ذرات شن، silt درصد ذرات سیلت، clay درصد ذرات رس و C درصد کربن آلی خاک را نشان می‌دهند.

¹ Williams

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

به منظور تحلیل فضایی مقادیر به دست آمده، نتایج محاسبات فاکتور K در قالب نقشه شکل (۷) ترسیم شد تا تغییرات مکانی فرسایش پذیری خاک در حوضه میان آب شوستر به صورت واضح مشاهده شود. مقادیر K Factor که از حدود ۰/۱۵۹۹ تا ۰/۳۴۵۲۵۴ متغیر هستند، بیانگر حساسیت نسبی خاک منطقه به فرسایش می باشند؛ به طوری که رنگ های آبی، سبز و صورتی مناطق با فرسایش پذیری بالاتر و رنگ های زرد، نارنجی و قرمز نواحی با فرسایش پذیری کمتر را نمایش می دهند. بر اساس نقشه، بخش های جنوبی و شمال شرقی حوضه که دارای بافت های سبک تر و شیب های تندتر هستند، بیشترین مقدار K Factor و در نتیجه بالاترین استعداد فرسایش را دارند، در حالی که مناطق غربی و جنوب غربی حوضه، به ویژه در مسیر رودخانه دز، از مقادیر پایین تری برخوردارند و پایداری خاک در آن ها بیشتر است. این الگو نشان می دهد که تغییرات زمین ریختی و نوع خاک نقش تعیین کننده ای در توزیع فضایی فرسایش پذیری حوضه میان آب شوستر دارند.



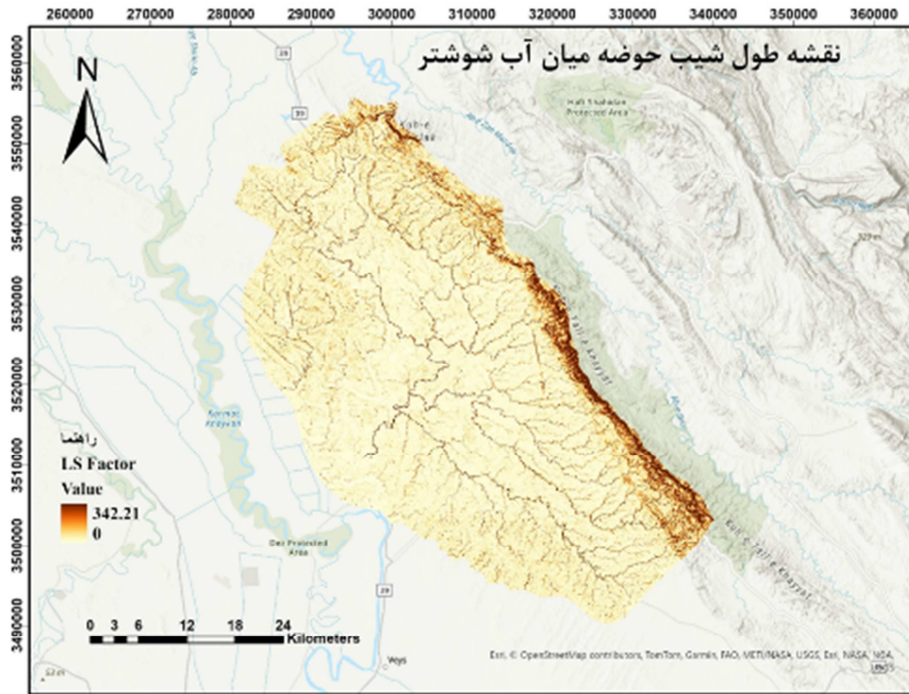
شکل ۷. نقشه فرسایش شده خاک (k)

عامل طول شیب (LS)

فاکتور توپوگرافی (LS)، که تأثیر مقدار رواناب، سرعت آن و در نهایت پتانسیل فرسایش را نشان می دهد، یکی از عوامل کلیدی در مدل سازی فرسایش است؛ طول شیب (که به عنوان فاصله افقی از منبع جریان بالادست تا نقطه ای که تغییرات گرادیان آغاز می شود تعریف می شود)، رابطه ای مستقیم با شدت فرسایش دارد، به طوری که افزایش شیب منجر به افزایش شدت فرسایش می گردد (احمدآبادی و صدیقی فر، ۱۳۹۶). نقشه طول شیب (LS Factor) حوضه میان آب شوستر، همان گونه که در شکل (۸) نمایش داده شده است، تغییرات مورفولوژیکی و توپوگرافی منطقه را آشکار می سازد؛ به این صورت که مقادیر فاکتور LS از غرب به شرق افزایش می یابد؛ نواحی شرقی و شمال شرقی حوضه با مقادیر بالاتر (تا حدود ۳۴۲) بیانگر شیب های تند و طول دامنه های کشیده تر هستند که استعداد فرسایش

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

سطحی را افزایش می‌دهد، در حالی که بخش‌های غربی و جنوب-غربی حوضه با فاکتورهای پایین‌تر، دارای توپوگرافی هموارتر و فرسایش کمتری هستند؛ این توزیع مکانی، ارتباط مستقیمی با فرآیندهای هیدرولوژیکی، جریان روان‌آب و حمل رسوبات در شبکه آبراهه‌های حوضه داشته و در مدل‌سازی خطرات فرسایشی و برنامه‌ریزی حفاظتی خاک نقش مؤثری ایفا می‌کند.

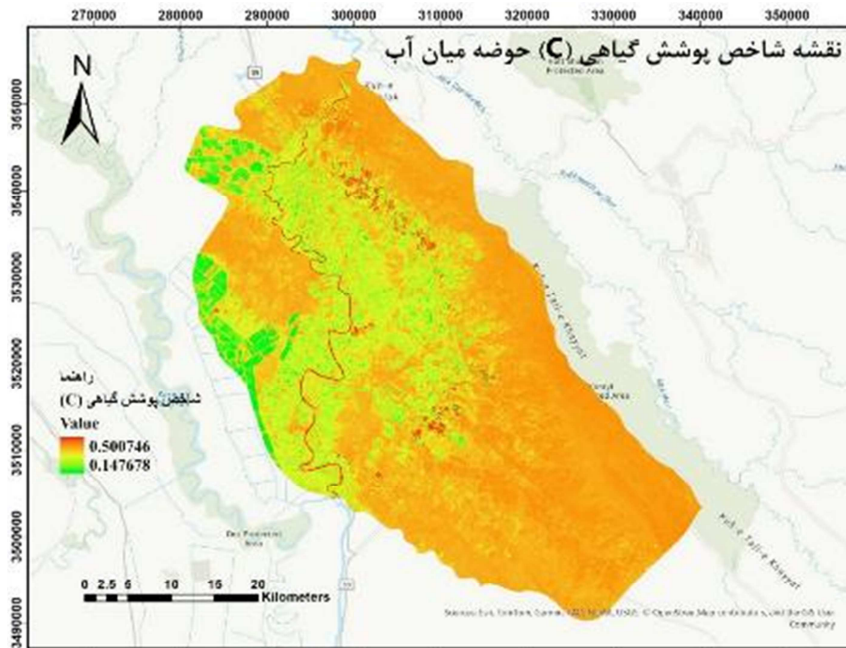


شکل ۸. نقشه طول شیب (LS)

عامل پوشش گیاهی (C)

نقشه عامل پوشش گیاهی (C)، بر اساس شاخص NDVI و با به‌کارگیری رابطه (۵)، تهیه گردید؛ این نقشه مطابق شکل (۹) نشان می‌دهد که پراکنش سبزینه در حوضه میان‌آب شوشتر از غرب به شرق کاهش می‌یابد؛ به طوری که مقادیر بالای شاخص (تا حدود ۰/۵۰) در بخش‌های غربی و مرکزی، که همبسته با وجود اراضی کشاورزی، باغات و پوشش گیاهی متراکم‌تر است، خودنمایی می‌کند. در مقابل، مناطق شرقی و جنوب شرقی حوضه با مقادیر پایین‌تر (نزدیک به ۰/۱۴) نشان‌دهنده اراضی خشک، شیب‌دار و با پوشش گیاهی ضعیف‌تر هستند. این الگوی فضایی، وابستگی مستقیم تراکم گیاهان به شرایط رطوبتی، منابع آبی و نوع کاربری اراضی را تبیین می‌نماید؛ از این رو، تحلیل هم‌زمان این نقشه با نقشه شیب حوضه می‌تواند نشان دهد که مناطق با شیب زیاد، به‌واسطه فرسایش بالاتر و نفوذ کمتر آب، دارای شاخص گیاهی پایین‌تر بوده و نیازمند رویکردهای مدیریتی ویژه همچون تثبیت خاک و توسعه پوشش گیاهی مقاوم هستند.

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



شکل ۹. نقشه شاخص پوشش گیاهی (C)

نقشه پهنه بندی فرسایش آبی انتشار (بدون شماره مجله) آماده انتشار آبی

نقشه پهنه بندی تولید نقشه نهایی پتانسیل فرسایش آبی حوضه، ابتدا لایه‌های ورودی براساس قدرت تفکیک آن‌ها استانداردسازی شدند؛ سپس، با استفاده از قابلیت Raster Calculator در نرم‌افزار ArcGIS 10.8 عملیات ضرب لایه‌ها انجام گرفت و نقشه پتانسیل فرسایش به عنوان خروجی اصلی تهیه شد.

نقشه پهنه‌بندی مطابق شکل (۱۰) نشان‌دهنده‌ی توزیع مکانی ناهمگون فرسایش آبی در حوضه میان‌آب شوشتر است. در نواحی شرقی و جنوب‌شرقی، رنگ‌های قرمز و صورتی بیانگر نقاط بحرانی فرسایش هستند که با موقعیت کوهستانی و شیب‌های زیاد مطابقت دارند. این نواحی به‌واسطه‌ی اختلاف ارتفاع، ساختار زمین‌شناسی شکننده و مسیرهای تمرکز جریان سطحی، بیشترین آسیب‌پذیری را نسبت به فرسایش دارند. در مقابل، بخش‌های مرکزی و غربی حوضه که در نقشه با رنگ‌های زرد و سبز مشخص شده‌اند، عمدتاً دارای توپوگرافی ملایم، پوشش گیاهی متراکم و خاک‌های با نفوذپذیری بالاتر هستند که موجب کاهش شدت رواناب و تثبیت سطح زمین می‌شود. این الگو نشان می‌دهد که فرسایش در میان‌آب شوشتر ماهیتی موضعی دارد و تمرکز آن در نواحی پرشیب است. از دیدگاه مدیریتی، اجرای اقدامات حفاظتی مانند احداث تراس‌های پله‌ای، مدیریت جریان‌های سیلابی و کاشت پوشش گیاهی مقاوم می‌تواند به کاهش تمرکز فرسایش در شرق و جنوب حوضه کمک کند و پایداری کلی منطقه را تقویت نماید. در ادامه، برای درک بهتر توزیع شدت فرسایش در سطح حوضه، می‌توان به نتایج کمی نمودار ستونی شکل (۱۱) نیز توجه کرد که میزان سهم هر طبقه از فرسایش را نشان می‌دهد. که بیشترین سهم از کل حوضه مربوط به طبقه‌ی «خیلی کم» فرسایش است که حدود ۷۷/۲۹۶ درصد از مساحت را شامل می‌شود. این امر نشان‌دهنده‌ی پایداری قابل توجه خاک در بخش اعظم منطقه و اثربخشی الگوهای مدیریتی در کنترل فرسایش آبی است. طبقه‌ی کم فرسایش با ۱۶/۶۹۷ درصد در مرتبه‌ی بعد قرار دارد، در حالی که طبقات متوسط، زیاد و خیلی زیاد فرسایش، سهمی

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

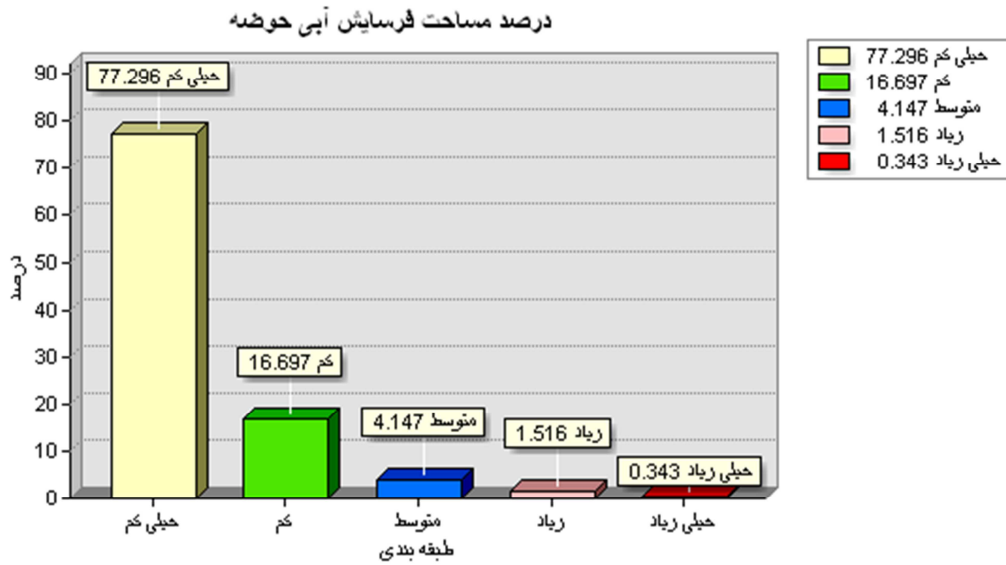
بسیار اندک از کل مساحت را دارند (به ترتیب ۴/۱۴۷، ۱/۵۱۶ و ۰/۳۴۳ درصد). چنین توزیعی گویای آن است که عوامل مؤثر بر فرسایش مانند شیب، بارندگی و پوشش گیاهی عمدتاً در تعادل نسبی قرار دارند و تنها بخش‌های محدودی از حوضه در معرض خطر جدی فرسایش هستند. بدین ترتیب، داده‌های نمودار نه تنها توصیف‌کننده وضعیت کمی فرسایش در منطقه‌اند، بلکه مبنای ارزشمندی برای تحلیل کیفیت خاک و ارزیابی موفقیت راهکارهای مدیریتی در جهت حفاظت از منابع اراضی به شمار می‌آیند.

در مقابل، بررسی روند پیش‌بینی بلندمدت برای افق ۲۰۲۱ تا ۲۰۴۰ نشان‌دهنده یک دگرگونی محتمل و نگران‌کننده است (بر اساس شکل ۱۲ و شکل ۱۳). مدل‌سازی‌های انجام‌شده، بر اساس سناریوهای آبی مورد بررسی، نشان‌دهنده شکست ساختار پایداری غالب حوضه آبخیز مورد مطالعه است. این امر خود را به صورت افزایش مطلق و قابل توجه طبقات پرخطر نشان می‌دهد: سهم طبقه متوسط از ۴/۱۴۷٪ به ۴/۳۶۵٪ و طبقه زیاد از ۱/۵۱۶٪ به ۱/۶۰۷٪ افزایش می‌یابد که به معنای افزایش بیش از ۰/۲٪ در مساحت تحت ریسک متوسط است. مهم‌تر از افزایش کمی، گسترش فضایی هشداردهنده به سمت غرب حوضه است؛ این گسترش به این معناست که مناطقی که پیش‌تر به واسطه توپوگرافی ملایم یا خاک مناسب، از فرسایش در امان بودند، اکنون آسیب‌پذیر شده‌اند. دلالت اصلی مدیریتی این است که تمرکز صرف بر نقاط داغ شرق دیگر کافی نیست. در بلندمدت، لازم است راهکارهای پیشگیرانه مقیاس وسیع در نواحی مرکزی و غربی، با هدف تثبیت پروفیل خاک و مدیریت رواناب در مبدأ، به طور همزمان با اقدامات اصلاحی در شرق اجرا شوند تا از تبدیل شدن پتانسیل پیش‌بینی‌شده به واقعیت هیدرولوژیکی در دو دهه آینده جلوگیری گردد.

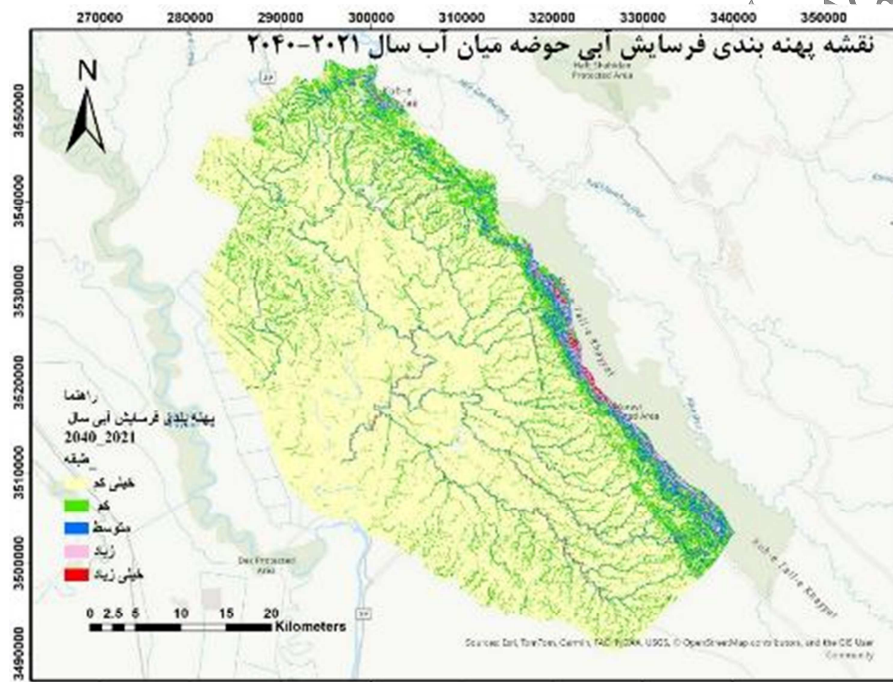


شکل ۱۰. نقشه پهنه بندی فرسایش آبی

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

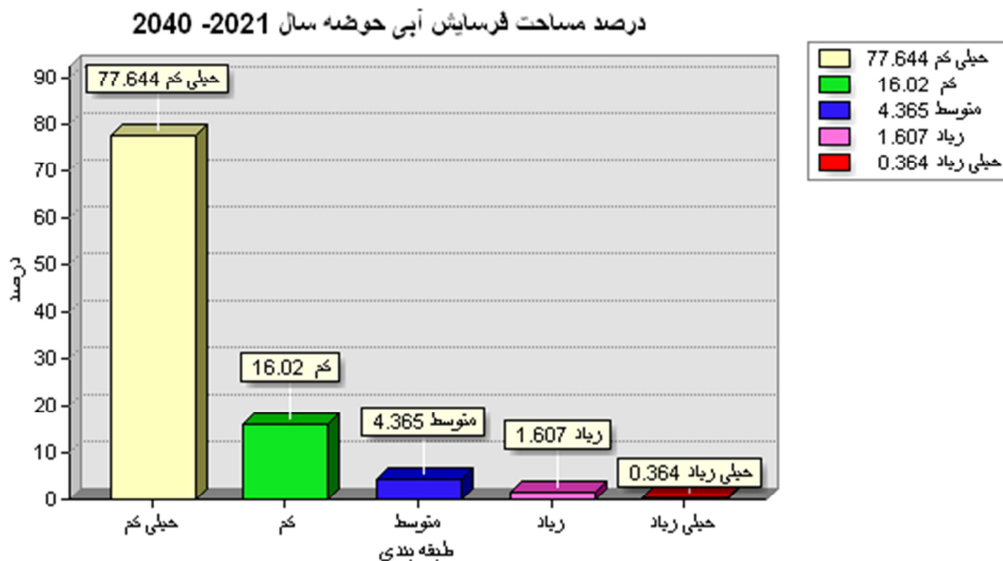


شکل ۱۱. نمودار درصد مساحت فرسایش آبی



شکل ۱۲. نقشه پهنه بندی فرسایش آبی پیش بینی شده

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



شکل ۱۳. نمودار درصد مساحت فرسایش آبی پیش بینی شده

نتیجه‌گیری آماده انتشار (بدون شماره مجله)

بررسی پتانسیل فرسایش آبی در حوضه میان‌آب شوشتر با استفاده از مدل RUSLE و داده‌های مکانی نشان داد که شدت فرسایش در منطقه از توزیع فضایی ناهمگون برخوردار است و بیشترین تمرکز آن در بخش‌های شرقی و جنوب‌شرقی حوضه، یعنی نواحی کوهستانی و پرشیب مشاهده می‌شود. توزیع مکانی فرسایش با عامل طول شیب (LS) همبستگی بالایی دارد و نشان می‌دهد ساختار زمین‌شناسی و توپوگرافی، مؤثرترین پارامتر در افزایش فرسایش است. این یافته با نتایج نژاد افزلی و همکاران (۱۳۹۸) در جنوب کرمان، محمدی و همکاران (۱۳۹۷) در حوضه تالار و بابایی و همکاران (۱۳۹۵) در حوضه کن همخوانی کامل دارد، که در هر سه مطالعه نیز عامل LS به‌عنوان عامل غالب تشخیص داده شد. در مقابل، عامل پوشش گیاهی (C) در مناطق مرکزی و غربی باعث کاهش محسوس میزان فرسایش شده است؛ مشابه یافته‌های ابراهیم‌زاده و همکاران (۱۴۰۳) و نتایج جهانی مرچان و همکاران (۲۰۲۳) که نقش مؤثر پوشش گیاهی در تعدیل رواناب را تأیید کرده‌اند.

نتایج این پژوهش همچنین بر کارایی مدل RUSLE در تخمین واقع‌گرایانه نرخ فرسایش خاک تأکید دارد. میزان برآورد شده فرسایش متوسط برای منطقه میان‌آب، در محدوده‌ای نزدیک به مقادیر گزارش‌شده توسط سید دانا حسامی و همکاران (۱۴۰۳) برای حوضه گاوشان قرار گرفت، که نشان‌دهنده سازگاری مدل با شرایط بومی ایران است. این تطابق با یافته‌های جهانی نظیر مطالعه Anache و همکاران (۲۰۱۹) نیز هم‌خوانی دارد؛ آن‌ها در مناطق گرمسیری، ارتباط مستقیم دقت مدل با تنظیم محلی پارامترها را گزارش کردند. بدین ترتیب، نتیجه این تحقیق مؤید آن است که بومی‌سازی ورودی‌های مدل RUSLE (به‌ویژه ضریب فرسایش‌پذیری خاک و پارامترهای اقلیمی) دقت خروجی را به‌صورت چشمگیری افزایش می‌دهد. از نظر مدیریتی، تطبیق نتایج این پژوهش با مطالعه رضائی و همکاران (۱۳۹۳) در هرمزگان نشان می‌دهد که مناطق با خطر فرسایش بسیار زیاد و پوشش گیاهی اندک، نیازمند مدیریت حفاظتی قوی‌تری برای کاهش نرخ فرسایش هستند. در پژوهش حاضر نیز حدود ۷۷/۲۹۶ درصد از کل مساحت حوضه در طبقه «خیلی کم» فرسایش قرار گرفته که دلالت بر اثرگذاری اقدامات حفاظتی و پایداری نسبی

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

خاک دارد؛ در حالی که نسبت طبقات زیاد و خیلی زیاد کمتر از یک درصد است. این یافته‌ها حاکی از موفقیت نسبی سیاست‌های مدیریتی فعلی و ضرورت تمرکز بیشتر بر مناطق بحرانی شرق و جنوب حوضه می‌باشد. با این حال، تحلیل پیش‌بینی بلندمدت برای افق زمانی ۲۰۲۱-۲۰۴۰ نشان داد که ساختار پایداری فعلی حوضه ممکن است در اثر تغییرات اقلیمی و فشارهای انسانی دچار ناپایداری تدریجی گردد. افزایش سهم طبقات متوسط، زیاد و خیلی زیاد و گسترش فضایی ریسک به سمت مناطق مرکزی و غربی، موید آن است که دامنه‌ی آسیب‌پذیری در حال توسعه بوده و تمرکز بر مداخلات محدود در شرق، دیگر برای حفظ تعادل پویای سیستم کافی نخواهد بود. این سناریوی نگران‌کننده با نتایج مطالعات اخیر ایران در زمینه تأثیر اقلیم بر فرسایش، نظیر پیش‌بینی افزایش فرسایش تا سال ۲۰۴۰ توسط میرزاده کوهشاهی و همکاران (۱۴۰۲) و پیش‌بینی‌های تیموری و همکاران (۱۳۹۸)، همراستا است. براساس یافته‌ها، اجرای اقدامات مدیریتی هدفمند در نواحی بحرانی شرق و جنوب حوضه ضروری است؛ از جمله ایجاد تراس‌های پله‌ای برای مهار رواناب، کاشت پوشش گیاهی مقاوم به خشکی، احداث زهکشی‌های سطحی و تقویت عملیات حفاظتی خاک در اراضی شیب‌دار. همچنین با توجه به نقش مؤثر عامل پوشش گیاهی در کاهش فرسایش، پیشنهاد می‌شود برنامه‌های توسعه سبز در قالب کاشت گونه‌های بومی و مقاوم اجرا شود تا از گسترش فرسایش جلوگیری شود. انجام مطالعات دقیق‌تر بر روی ترکیب ساختار بافت خاک و تغییرات اقلیم نیز می‌تواند در آینده به اصلاح پارامترهای مدل و افزایش دقت پیش‌بینی‌ها کمک کند.

در نهایت، یافته‌های این تحقیق ضمن تأیید روند مطالعات پیشین در ایران و همراستایی با نتایج جهانی، نشان می‌دهد که به‌کارگیری رویکرد تلفیقی مدل‌های تجربی مانند RUSLE و انجام سناریو اقلیمی با سامانه‌های GIS و داده‌های سنجش‌ازدور، ابزاری نوین و معتبر برای پیش‌پویایی خاک و ارائه راهکارهای اجرایی در جهت کاهش خسارات ناشی از فرسایش است. توصیه می‌شود در پژوهش‌های آینده با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای با قدرت تفکیک بالاتر و مدل‌های نیمه‌تجربی ترکیبی، کارایی مدل برای شرایط خاص اقلیمی ایران بیشتر مورد ارزیابی قرار گیرد.

منابع

- ابراهیم زاده، سمیه، ارگانی، میثم و میردار هریجانی، فرشاد. (۱۴۰۳). مدل‌سازی نرخ فرسایش خاک و تولید رسوب با مدل RUSLE/SDR در حوضه آبریز دیزگران. *مخاطرات محیط طبیعی*. ۱۳(۳۹)، ۱-۲۴. [10.22111/jneh.2024.39109.1823](https://doi.org/10.22111/jneh.2024.39109.1823).
- احمدآبادی، علی و صدیقی فر، زهرا. (۱۳۹۶). برآورد میزان فرسایش و تولید رسوب با کمک معادله جهانی فرسایش خاک اصلاح شده (RUSLE) در حوضه آبریز حبله رود. *فصلنامه جغرافیای طبیعی*. ۱۰(۳۱) (پیاپی ۳۷)، ۸۳-۱۰۳. [20.1001.1.20085656.1396.10.37.6.7](https://doi.org/10.1001.1.20085656.1396.10.37.6.7).
- اسدی، حسین، جعفری، محمد، اشرف زاده، افشین و شریفی، آرزو. (۱۳۹۷). پیش‌بینی اثر تغییر اقلیم بر خطر فرسایش خاک در حوضه آبخیز ناورود. *پژوهش‌های حفاظت آب و خاک (علوم کشاورزی و منابع طبیعی)*. ۲۵(۲)، ۲۳۵-۲۵۰. [10.22069/jwsc.2018.12223.2679](https://doi.org/10.22069/jwsc.2018.12223.2679).
- انصاری لاری، احمد و انصاری، مریم. (۱۳۹۶). ارزیابی خطر فرسایش خاک و پتانسیل رسوبدهی حوضه آبریز گابریک استان هرمزگان با استفاده از مدل EPM. *مخاطرات محیط طبیعی*. ۶(۱۱)، ۱-۱۴. [doi: 10.22111/jneh.2017.2965](https://doi.org/10.22111/jneh.2017.2965).
- انصاری لاری، احمد و انصاری، مریم. (۱۳۹۷). برآورد میزان فرسایش خاک در دشت مرودشت (استان فارس) با استفاده از مدل تجربی RUSLE. *پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی*. ۴(۴)، ۱۳۴-۱۴۹. [20.1001.1.22519424.1395.4.4.9.2](https://doi.org/10.1001.1.22519424.1395.4.4.9.2).
- بابایی، مهناز، حسینی، سید زین‌العابدین، نظری سامانی، علی‌اکبر و المدرسی، سید علی. (۱۳۹۵). پهنه‌بندی فرسایش خاک با استفاده از مدل RUSLE 3D. *مطالعه موردی: حوضه آبخیز کن. مهندسی و مدیریت آبخیز*. ۸(۲)، ۱۶۵-۱۸۱. [10.22092/ijwmse.2016.106454](https://doi.org/10.22092/ijwmse.2016.106454).

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

- برایبران، امین و محسنی، ندا. (۱۴۰۴). مدل سازی زمانی- مکانی فرسایش خاک با استفاده از مدل RUSLE و اثرات آن بر کیفیت خاک. *جغرافیا و برنامه ریزی محیطی*. ۳۶(۲)، ۱۱۳-۱۴۰. [10.22108/gep.2025.145683.1732](https://doi.org/10.22108/gep.2025.145683.1732).
- تیموری، فاطمه، بذرافشان، ام البنین و رفیعی ساردویی، الهام. (۱۳۹۸). ارزیابی اثر تغییر اقلیم و تغییر کاربری اراضی بر فرسایش خاک (مطالعه ی موردی: حوضه ی آبخیز کندران). *اگوهیدرولوژی*، ۲۶(۲)، ۳۵۳-۳۶۸. [10.22059/ije.2019.274886.1038](https://doi.org/10.22059/ije.2019.274886.1038).
- حسامی، سید دانا، نظرزاد، حبیب، عرفانیان، مهدی، عبقری، هیراد، محمودی، محمدعلی، رستمی خلج، محمد. (۱۴۰۳). برآورد میزان فرسایش خاک در حوضه آبخیز گاوشان با استفاده از مدل RUSLE 3D. *محیط زیست و مهندسی آب*. ۱۰(۳) ۴۰۷-۳۹۲. <https://doi.org/10.22034/ewe.2024.421459.1898>
- خالدی درویشان، عبدالواحد، فرجی، جلال، غلامی، لیلا و خورسند، محسن. (۱۴۰۰). تغییرات مکانی- زمانی فرسایش خاک در حوضه آبخیز معرف خامسان با استفاده از مدل RUSLE. *مهندسی و مدیریت آبخیز*، ۱۳(۳)، ۵۳۴-۵۴۷. [10.220292/ijwms.2021.128809.1752](https://doi.org/10.220292/ijwms.2021.128809.1752).
- ذاکری نژاد، رضا، جعفری، غلامحسن و رضاپوریان قهفرخی، الهه. (۱۴۰۴). ارزیابی روند بیابان زایی با استفاده از شاخص های پوشش گیاهی و تغییرات ضریب آلودگی در دوره زمانی ۲۰۰۰-۲۰۲۳، مطالعه موردی: حوضه آبریز مند در جنوب غرب ایران. *پژوهش های جغرافیایی طبیعی*، ۵۷(۲): ۷۶-۵۷. [10.22059/jphgr.2025.391710.1007876](https://doi.org/10.22059/jphgr.2025.391710.1007876).
- ذاکری نژاد، رضا. (۱۴۰۲). تهیه نقشه میزان فرسایش و رسوب حوضه آبخیز خسویه با استفاده از مدل USPED و سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) و مقایسه آن با رخساره های فرسایش آبی. *پژوهش های فرسایش محیطی*، ۱۳(۳): ۲۵۶-۲۳۹. [20.1001.1.22517812.1402.13.3.12.8](https://doi.org/10.1001.1.22517812.1402.13.3.12.8)
- ذاکری نژاد، رضا و فلاح، سلمان. (۱۴۰۲). ارزیابی خطر فرسایش آبی با استفاده از ترکیب مدل تجدید نظر شده جهانی فرسایش خاک (RUSLE) و نقشه تراکم خندقی در حوضه آبخیز علامرودشت استان. *پژوهش های ژئومورفولوژی کمی*، ۱۱۹(۴): ۱۱۱-۱۱۴. [10.22034/gmpj.2022.360905.1375](https://doi.org/10.22034/gmpj.2022.360905.1375)
- ذاکری نژاد، رضا و معاوی، مهشید. (۱۴۰۳). بررسی اثرات تغییرات کاربری اراضی در پوشش گیاهی (مطالعه موردی: حوضه میاناب شوستر در بازه زمانی ۲۰۲۰-۲۰۰۰). *مطالعات جغرافیایی مناطق خشک*، ۵۵(۱۴۷): ۱۳۲-۱۴۷. [10.22034/jargs.2023.407397.1049](https://doi.org/10.22034/jargs.2023.407397.1049)
- رضائی، پیمان، فریدی، پروانه، قربانی، منصور و کاظمی، محمد. (۱۳۹۳). برآورد فرسایش خاک با استفاده از مدل RUSLE و شناسایی مؤثرترین عامل آن در حوضه آبخیز گابریک- جنوب خاوری استان هرمزگان. *پژوهش های ژئومورفولوژی کمی*، ۹۷(۱۱۳): ۳(۱). [20.1001.1.22519424.1393.3.1.7.3](https://doi.org/10.1001.1.22519424.1393.3.1.7.3)
- غیبشاهی، یاسمین و ذاکری نژاد، رضا. (۱۴۰۴). ارزیابی و مقایسه ی الگوریتم های مختلف داده کاوی جهت تهیه نقشه خطر فرسایش آبکندی در حوضه آبخیز میان آب شوستر. *پژوهش های جغرافیایی طبیعی*. doi: 10.22059/jphgr.2025.387445.1007862
- غیبشاهی، یاسمین و ذاکری نژاد، رضا. (۱۴۰۴). ارزیابی و پهنه بندی خطر فرسایش آبکندی حوضه آبخیز میان آب شوستر، یازدهمین کنفرانس بین المللی مهندسی محیط زیست، جغرافیا و منابع طبیعی، تهران، <https://civilica.com/doc/2412789>
- کردوانی، پرویز. (۱۳۸۱). کتاب حفاظت خاک، انتشارات دانشگاه تهران چاپ هفتم.
- محمدی، شاهین، کریم زاده، حمیدرضا و علیزاده، میثم. (۱۳۹۷). برآورد مکانی فرسایش خاک کشور ایران با استفاده از مدل RUSLE. *اگوهیدرولوژی*، ۵(۲)، ۵۵۱-۵۶۹. <https://sid.ir/paper/254031/fa>
- محمدی، مازیار، فلاح، مقدسه، کاویان، عطاله، غلامی، لیلا و امیدوار، ابراهیم. (۱۳۹۵). کاربرد مدل RUSLE در تعیین توزیع مکانی خطر هدررفت خاک. *مجله اگوهیدرولوژی*، ۳(۴)، ۶۴۵-۶۵۸. doi: 10.22059/ije.2016.60368
- مددی، عقیل، اصغری سراسکانرود، صیاد، نگهبان، سعید و مرحمت، مهری. (۱۴۰۲). کاربرد ماشین بردار پشتیبان (SVM) و درخت رگرسیون تقویت شده (BRT) جهت مدل سازی حساسیت فرسایش خندقی در حوضه آبخیز رودخانه شور (شهرستان مهر). *پژوهش های جغرافیایی طبیعی*، ۵۵(۴)، ۸۳-۱۰۱. doi: 10.22059/jphgr.2023.360424.1007775
- میرزاده کوهشاهی فرزانه، اکبریان محمد، خورانی اسداله. (۱۴۰۲). ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر فرسایش و هدررفت خاک حوضه آبخیز میناب. *پژوهش های فرسایش محیطی*، ۱۳(۲): ۶۳-۸۱. [20.1001.1.22517812.1402.13.2.4.8](https://doi.org/10.1001.1.22517812.1402.13.2.4.8)
- نژاد افضل، کرامت، شاهرخی، محمد رضا و بیاتانی، فاطمه. (۱۳۹۸). برآورد فرسایش خاک با استفاده از مدل RUSLE و شناسایی مؤثرترین عامل آن در حوضه آبخیز دهکهان (جنوب کرمان). *مخاطرات محیط طبیعی*، ۲۱(۳۸): ۸
- [10.22111/jneh.2018.21894.1316](https://doi.org/10.22111/jneh.2018.21894.1316)

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

- نور، حمزه و عرب خدری، محمود. (۱۴۰۲). برآورد فرسایش خاک و نسبت تحویل رسوب با استفاده از مدل RUSLE در پایگاه تحقیقات حفاظت خاک سنگانه. *مدل سازی و مدیریت آب و خاک*, ۳(۱), ۴۲-۵۳. doi: 10.22098/mmws.2022.11085.1098
- وثوقی، شیمیا، ذاکری نژاد، رضا و انتظاری، مزگان. (۱۴۰۳). پیش بینی فرسایش خندقی و شناسایی عوامل موثر بر آن با استفاده از مدل حداکثر آنتروپی و مدل‌های تغییر اقلیمی BCC-CSM2-MR برای سال‌های ۲۰۲۰-۲۰۴۰ (مطالعه موردی: حوضه آبخیز علامرودشت). *جغرافیا و برنامه‌ریزی*. ۲۸ (۹۰). [10.22034/gp.2023.57572.3169](https://doi.org/10.22034/gp.2023.57572.3169).
- هادسون، نورمن. (۱۳۷۲). *حفاظت خاک، انتشارات دانشگاه شهید چمران، دانشگاه کشاورزی*.
- Ahmadi, A., & Seddighi-Far, Z. (2017). Estimation of soil erosion and sediment yield using the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) in Hableh Rood Watershed. *Physical Geography Quarterly*, 10(3): 83-103. [20.1001.1.20085656.1396.10.37.6.7](https://doi.org/10.1001.1.20085656.1396.10.37.6.7). [In Persian].
- Ansari Lari, A., & Ansari, M. (2018). Estimate the amount of soil erosion in Marvdasht plain (Iran, Fars) by RUSLE Model. *Quantitative Geomorphological Research*, 4(4), 134-149. [20.1001.1.22519424.1395.4.4.9.2](https://doi.org/10.1001.1.22519424.1395.4.4.9.2) [In Persian].
- Ansari Lari, A., and Ansari, M. (2017). Evaluation of soil erosion risk and sedimentation potential by using EPM model in Gabric basin- SE Hormozgan- Iran. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 6(11), 1-14. doi: 10.22111/jneh.2017.2965. [In Persian].
- Asadi, H., Jafari, M., Ashrafzadeh, A., & Sharifi, A. (2018). Forecasting the effect of climate change on soil erosion hazard in Navrood watershed. *Journal of water and soil conservation (journal of agricultural sciences and natural resources)*, 25(2), 235-250. [10.22069/jwsc.2018.12223.2679](https://doi.org/10.22069/jwsc.2018.12223.2679). [In Persian].
- Babaei, M., Hosseini, S. Z., Nazari Samani, A., and Almodaresi, S. A. (2016). Assessment of soil erosion using RUSLE 3D, case study: Kan Watershed. *Watershed Engineering and Management*, 8(2), 165-181. doi: 10.22092/ijwms.2016.106454. [In Persian].
- Barabarian, A., and Mohseni, N. (2025). Spatio-Temporal Modeling of Soil Erosion Using the RUSLE Model and Its Impact on Soil Quality. *Geography and Environmental Planning*, 36(2), 113-140. doi: 10.22108/gep.2025.145683.1732. [In Persian].
- Belasri, A., Lakhouili, A., and Iben Halima, O. (2017). Soil erodibility mapping and its correlation with soil properties of Oued El Makhazine watershed, Morocco. *Journal of Materials and Environmental Science*, Vol8(9): 3208-3215.
- Casabella-González, M. J., Borselli, L., & García-Meza, J. V. (2021). Soil Horizon erodibility assessment in an area of Mexico susceptible to gully erosion. *Journal of South American Earth Sciences*, 111, 103497. [10.1016/j.jsames.2021.103497](https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103497)
- Ebrahimzadeh, S., Argany, M., and Mirdar Harijani, F. (2024). Modeling the rate of soil erosion and sediment yield using the RUSLE / SDR model in the Dizgaran watershed. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 13(39), 1-24. doi: 10.22111/jneh.2024.39109.1823. [In Persian].
- Ghobishawi, Y., and Zakerinejad, R. (2025). Evaluation and Comparison of Different Data Mining Models for Identifying Areas at Risk of Gully Erosion (Study Area: Mian Ab Watershed in Khuzestan Province). *Physical Geography Research*, doi: 10.22059/jphgr.2025.387445.1007862. [In Persian].
- Ghabishavi, Y., & Zakerinezhad, R. (2025). Evaluation and Zonation of Gully Erosion Risk in the Mianab Shushtar Watershed. *The 11th International Conference on Environmental Engineering, Geography and Natural Resources*. <http://openaccess.ir/c/eiconf11/paper/1504066>. [In Persian].
- Hesami, S. D., Nazarnajad, H., Erfanian, M., Abghari, H., Mahmoudi, M. A., & Rostami-Khalaj, M. (2024). Estimation of soil erosion rate in Gavashan watershed using the RUSLE 3D model. *Environment and Water Engineering*, 10(3), 392-407. <https://doi.org/10.22034/ewe.2024.421459.1898>. [In Persian].
- Hudson N. (1993). Soil conservation. *Shahid Chamran University Press*; 1993.
- Kamaludin, H., Lihan, T., Rahman, Z. A. R., Mustapha, M. A., Idris, W. M. R., & Rahim, S. A. (2013). Integration of remote sensing, RUSLE and GIS to model potential soil loss and sediment yield (SY). *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 10(10), 4567-4596. DOI: 10.5194/hessd-10-4567-2013
- Khaledi Darvishan, A., Faraji, J., Gholami, L. and Khorsand, M. (2021). Spatio-temporal variation of soil erosion in Khamsan representative watershed using RUSLE. *Watershed Engineering and Management*, 13(3), 534-547. doi: 10.22092/ijwms.2021.128809.1752. [In Persian].
- Kordavani, P. (2002). Soil Conservation, 7th Edition, *Tehran University Press* [In Persian].
- Madadi, A., asghari saraskanroud, S., Neghahban, S., and Marhamat, M. (2023). Application of Support Vector Machine (SVM) and Boosted Regression Tree (BRT) to Model the Sensitivity of Gully Erosion in the Watershed of Shore River Moher City. *Physical Geography Research*, 55(4), 83-101. doi: 10.22059/jphgr.2023.360424.1007775. [In Persian].
- Marques, V. S., Ceddia, M. B., Antunes, M. A. H., Carvalho, D. F., Anache, J. A. A., Rodrigues, D. B. B., & Oliveira, P. T. S. (2019). USLE K-Factor Method Selection for a Tropical Catchment. *Sustainability*, 11(7), 1840. <https://doi.org/10.3390/su11071840>
- 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(2), 1627. <https://doi.org/10.3390/su15021627>.
- Mirzadeh Koohshahi, F., Akbarian, M., Khorani A. (2023). Assessing Climate Change Impact on Soil Erosion in Minab Watershed, Iran. *E.E.R.* 13 (2) :63-81. [20.1001.1.22517812.1402.13.2.4.8](https://doi.org/10.1001.1.22517812.1402.13.2.4.8). [In Persian].

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

- Mohammadi, M., Fallah, M., Kaviani, A., Gholami, L. and Omidvar, E. (2016). The Application of RUSLE Model in Spatial Distribution Determination of Soil loss Hazard. *Journal of Ecohydrology*, 3(4), 645-658. doi: 10.22059/ije.2016.60368. [In Persian]
- Mohammadi, SH., Karimzadeh, HR., & Alizadeh, M. (2018). Spatial estimation of soil erosion in Iran using RUSLE model. *iranian journal of ecohydrology*, 5(2), 551-569. <https://sid.ir/paper/254031/en>. [In Persian].
- Morgan, R. P. C. (2009). Soil erosion and conservation. John Wiley & Sons.
- Nearing M., Foster, G., lane 1.(1989). Sprocess-based soil erosion model for usda water erosion prediction project. *transactions of asae*. 32(5):1587_1593.
- Nezhadafzali, K., Shahrokhi, M. R., and Bayatani, F. (2019). Assessment soil erosion using RUSLE model and identification the most effective factor in Dekhan watershed basin of southern Kerman. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 8(20), 21-38. doi: 10.22111/jneh.2018.21894.1316. [In Persian].
- Noor, H., and Arabkhedri, M. (2023). Prediction of soil erosion and sediment delivery ratio using RUSLE at Sanganeh soil conservation research station. *Water and Soil Management and Modelling*, 3(1), 42-53. doi: 10.22098/mmws.2022.11085.1098. [In Persian].
- Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., McCool, D. K., & Yoder, D. C. (1997). Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). U.S. *Department of Agriculture, Agriculture Handbook No. 703*.
- Rezaee, P., Faridi, P., Ghorbani, M., & Kazemi, M. (2014). Estimation of soil erosion using the RUSLE model and identification of its most effective factor in the Gabrik Watershed, southeastern Hormozgan province. *Quantitative Geomorphological Research*, 3(1), 97-113. [20.1001.1.22519424.1393.3.1.7.3](https://doi.org/10.22519424.1393.3.1.7.3). [In Persian].
- تنگ, W., Liu, H., & Liu, B. (2013). Effects of gully erosion and gully filling on soil degradation in the black soil region of Northeast China. *Journal of Mountain Science*, 10, 913-922. <https://doi.org/10.1007/s11629-013-2560-5>.
- Teimouri, F., Bazrafshan, Oo., & Rafiei sardoei, e. (2019). Assessment of Climate Change and Land Use Change on Soil Erosion (Case study: Kondaran. *IRANIAN JOURNAL OF ECOHYDROLOGY*, 6(2), 353-368. [10.22059/ije.2019.274886.1038](https://doi.org/10.22059/ije.2019.274886.1038). [In Persian].
- Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8(2), 127-150.
- Vosoghi, S., Zakerinejad, R., and Entezari, M. (2025). Prediction of Gully Erosion and identifying factors affecting it using the Maximum Entropy Model and BCC-CSM2-MR climate change models for the years 2020-2040 (case study: Alamarvdasht watershed). *Journal of Geography and Planning*, 28(90), 163-141. doi: 10.22034/gp.2023.57572.3169. [In Persian].
- Wang, B., Zheng, F., and Guan, Yinghui. (2016). Improved USLE-K factor prediction: A case study on water erosion areas in China. *International Soil and Water Conservation Research*, Vol 4: 168-176.
- Williams, J. (1990). The erosion-productivity impact calculator (EPIC) model: a case history. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 329(1255), 421-428. <https://doi.org/10.1098/RSTB.1990.0184>.
- Wischmeier, W.H., & Smith, D.D. (1978). Predicting Rainfall Erosion Losses. A Guide to Conservation Planning. *The USDA Agricultural Handbook No. 537*, Maryland.
- Yusof, M. F., Abdullah, R., Zakari, N. A., & Ghani, A. A. B. (2011). Modified Soil erodibility factor, K for Peninsular Malaysia soil series. In *3rd International Conference on Managing Rivers in the 21st Century*
- Zakerinejad, R. (2023). Evaluating the Rate of Soil Erosion and Sedimentation of the Khasoyeh Watershed Using the USPED Model and GIS and its Comparison to Water Erosion Types. *E.E.R.* 13 (3) :239-256. [20.1001.1.22517812.1402.13.3.12.8](https://doi.org/10.22517812.1402.13.3.12.8). [In Persian].
- Zakerinejad, R., and Falah, S. (2023). Evaluation of Water Erosion Hazard Map Using the Combination of the RUSLE Model and Gully Erosion Density Map in Alamarvdasht Watershed of Fars Province, Iran. *Quantitative Geomorphological Research*, 11(4), 189-209. doi: 10.22034/gmpj.2022.360905.1375. [In Persian].
- Zakerinejad, R., and Moavi, M. (2024). Investigating the effects of land use changes on vegetation (Case study: Mian-Ab watershed in the period 2000-2020). *Journal of Arid Regions Geographic Studies*, 15(55), 147-132. doi: 10.22034/jargs.2023.407397.1049. [In Persian].
- Zakerinejad R., Sommer C., Volker H., Maerker M. (2021). Spatial Disterbution Of Water Erosion Using Stochastic Modeling In The Southern Isfahan Province, Iran, *Geogr FIS DIN QUAT* 44 (2): 203-216.
- Zakerinejad R., Omran A., Maerker M., Hochschild V (2015). Using ASTER remote sensing data set for geological mapping and application of Maxent model to predicting of gully erosion in southwest of Zagros Mountain in Iran. *Remote sensing, in review in Remote Sensing journal*.
- Zakerinejad, R., Jafari, G. H., and Rezapourian Ghahfarokhi, E. (2025). Analysis of Desertification Trends using Vegetation Indices and Albedo Coefficient over 2000-2023: A case study of Mond Basin in Southwest of Iran. *Physical Geography Research*, 57(2), 57-76. doi: 10.22059/jphgr.2025.391710.1007876. [In Persian].
- Zhang, B., Zhang, G., Yang, H., Wang, H., & Li, N. (2018). Soil erodibility affected by vegetation restoration on steep gully slopes on the Loess Plateau of China. *Soil Research*, 56, 712-723. <https://doi.org/10.1071/SR18129>.
- Zhu, B., Zhou, Z., & Li, Z. (2021). Soil Erosion and Controls in the Slope-Gully System of the Loess Plateau of China: A Review. , 9. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.65703>
- Zhu, D., Wang, T. W., Cai, C. F., Li, L., & Shi, Z. H. (2009). Large-scale assessment of soil erosion using a neuro-fuzzy model combined with GIS: A case study of Hubei Province, China. *Land Degradation & Development*, 20(6), 654-666.