



Relationship between Vegetation and Morphometric Indices with Soil Erosion Rate in Meshkin Chai Watershed using RUSLE Model

Mousa Abedini^{1✉} | Amir Hesam Pasban² | Ava Nouri³

1. Corresponding Author, Department of Physical Geography, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. abedini@uma.ac.ir

2. Department of Physical Geography, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. a.hesam773@gmail.com

3. Department of Physical Geography, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. avanouri1996@gmail.com

Article Information

Research Paper

Vol:	16
No:	61
P:	1-24
Received:	2024-10-27
Revised:	2025-01-19
Accepted:	2025-01-23
Published:	2025-11-01

Keywords:

- Vegetation
- Morphometry
- RUSLE
- Meshkin Chai

Cite this Article:

Abedini, Mousa., Pasban, Amir Hesam & Nouri, Ava. (2025). Relationship between Vegetation and Morphometric Indices with Soil Erosion Rate in Meshkin Chai Watershed using RUSLE Model. *Journal of Arid Regions Geographic Studies* 16(61): 1-24.
doi: 10.22034/jargs.2025.485712.1157

Publisher: Hakim Sabzevari University

Authors retain the copyright and full publishing rights



10.22034/jargs.2025.485712.1157

Abstract

Aim: This study aims to investigate the relationship between vegetation and morphometric indices with soil erosion rates in the Meshkin Chai watershed using the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) model.

Materials & Method: To achieve the research objective, the RUSLE empirical model was employed to estimate annual soil erosion. For this purpose, various datasets were utilized, including rainfall data from the Meteorological Organization, a 1:250,000 soil texture map obtained from the Forests, Rangelands and Watershed Management Organization of Iran, a 30-meter Digital Elevation Model (DEM), and Landsat 9 satellite imagery. These datasets were integrated in a Geographic Information System (GIS) environment, and following the overlay of all relevant layers, the average soil erosion rate across the watershed was calculated. Subsequently, vegetation and morphometric indices were analyzed to assess their influence on the soil erosion process using ArcMap, and erosion zonation maps were generated.

Finding: The results indicated that soil loss across the entire watershed ranged from 0 to 108.61 tons per hectare per year, with a total annual soil erosion estimate of 50.89 tons per hectare per year. Additionally, the relationship between vegetation and morphometric indices with annual soil erosion was examined. Among these indices, the slope index showed the highest influence and a statistically significant correlation with annual soil erosion, accounting for 74% of the variation in soil erosion.

Conclusion: This study generated a soil erosion risk map for the Meshkin Chai watershed using the RUSLE model and GIS analysis. The findings revealed that slope, vegetation cover, slope curvature, and topography indices had the strongest correlations with annual soil erosion, with their impacts being statistically significant.

Innovation: The novelty of this study lies in the integration of vegetation and morphometric indices to assess their combined effect on soil erosion within the Meshkin-Chai watershed.

Extended Abstract

1. Introduction

Land degradation has become one of the most critical environmental crises of the present century. Human activities in the past century, particularly industrial agriculture and uncontrolled development have accelerated land degradation and surface soil loss. Soil erosion is rapidly expanding on a global scale, turning into a significant environmental challenge. Natural factors such as land slope, rainfall, and soil type directly influence soil erosion. However, human land management practices can modify these factors, playing a crucial role in either increasing or reducing soil erosion. Adopting appropriate agricultural methods and implementing soil conservation techniques can significantly prevent erosion and enhance soil stability.

2. Materials and methods

In this study, the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) was used to estimate soil erosion in the Meshkin-Chay watershed. This model is widely applied due to its semi-empirical structure, ease of implementation, and limited data requirements. RUSLE operates based on five key factors as rainfall, soil type, slope, vegetation cover, and land management, allowing for adaptation and calibration in different climatic and geographical conditions. Compared to more complex models like WEPP or SWAT, RUSLE requires fewer data and lower costs while providing a faster assessment of erosion on a large scale, making it a suitable option for both scientific and practical studies. Next, to integrate vegetation and morphometric indices, several parameters, including NDVI, SAVI, MSAVI, Topographic Wetness Index (TWI), Stream Power Index (SPI), Curvature, Profile Curvature, Plan Curvature, Slope, and Length-Slope Factor (LSF) were examined. After generating the soil erosion map using the RUSLE model, we aimed to analyze the impact of various factors on erosion rates in the study area. Pearson's correlation analysis was employed to assess the relationship between model factors (such as land slope, soil type, and vegetation cover) and soil erosion rates. This analysis helps identify the key factors influencing soil erosion and propose appropriate mitigation strategies.

3. Results and Discussion

To create the final soil erosion map for the study area, the RUSLE model layers were overlaid in ArcMap using the Raster Calculator tool. The resulting map showed that annual soil erosion ranged from 0 to 108.61 tons per hectare per year. The average annual soil erosion for the Meshkin-Chay watershed was estimated at 50.89 tons per hectare per year. A regression analysis was conducted to determine the contribution of each RUSLE factor to soil loss, where soil loss was considered the dependent variable, and rainfall erosivity, soil erodibility, vegetation cover, topography, and soil conservation were the independent variables. The results indicated that the topographic factor had the highest impact on annual soil loss, with a coefficient of determination (R^2) of 0.94. These findings align with those of Abedini et al. (2022), who also reported that topography had the most significant influence on annual soil erosion in RUSLE-based assessments, with an R^2 of 0.95. After generating spatial distribution maps for the indices (TWI, SPI, Slope, Curvature, Plan Curvature, Profile Curvature, NDVI, SAVI, MSAVI, EVI, and LSF), the correlation between these indices and annual soil erosion in the Meshkin-Chay watershed was analyzed. Regression analysis, a statistical method for estimating a quantitative variable based on its relationship with one or more quantitative variables, was utilized. This relationship, ranging from 0 to 1, indicates the model's explanatory power, where 0 means the model does not explain any variation, and 1 indicates full explanatory power. For the regression analysis, the required layers were imported into SPSS software, and Pearson's correlation coefficient was used. In this model, annual soil erosion was the dependent variable (Y), while the selected indices were independent variables (X). According to the results, Slope ($R^2 = 0.74$), NDVI ($R^2 = 0.48$), LSF ($R^2 = 0.44$), and Plan Curvature ($R^2 = 0.49$) exhibited the highest correlation and significance in explaining soil erosion in the Meshkin-Chay watershed.

4. Conclusion

This study utilized the RUSLE model to estimate soil erosion in the Meshkin-Chay watershed. Rainfall data, soil texture maps, Landsat 9 satellite imagery, a digital elevation model (DEM), and other

environmental data were incorporated. The results showed that soil erosion varied between 0 and 108.61 tons per hectare per year, with an average annual rate of 50.89 tons per hectare. The rainfall erosivity (R) map indicated values ranging from 127.77 to 162.92 MJ·mm. The highest soil erodibility (K) was observed in northern regions, while the topographic factor (LS) had the greatest impact in areas with steep slopes. Vegetation cover (C) varied between 0 and 0.59 and played a significant role in reducing erosion. Among the studied indices, Slope, NDVI, LSF, and Plan Curvature had the highest impact on soil erosion. These findings can be applied to soil management and erosion mitigation in similar watersheds.

5. Acknowledgement & Funding

- The manuscript did not receive a grant from any organization.

6. Conflict of Interest

- The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.



دانشگاه حکیم سبزواری

مطالعات خرفایای مناطق خشک



ارتباط شاخص‌های پوشش گیاهی و مورفومتری با میزان فرسایش خاک در حوضه آبخیز مشکین‌چای با استفاده از مدل RUSLE

موسی عابدینی^۱✉، امیرحسام پاسبان^۲، آوا نوری^۳

۱- نویسنده مسئول، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. abedini@uma.ac.ir

۲- گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. a.hesam773@gmail.com

۳- گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. avanouri1996@gmail.com

چکیده

هدف: ارتباط شاخص‌های پوشش گیاهی و مورفومتری با میزان فرسایش خاک در حوضه آبخیز مشکین‌چای با استفاده از مدل RUSLE است.

روش و داده: برای دستیابی به هدف پژوهش از مدل تجربی فرسایش خاک جهانی اصلاح‌شده استفاده شد. بدین منظور به ترتیب برای برآورد فرسایش سالانه خاک در حوضه مورد مطالعه، از داده‌های بارش سازمان هواشناسی، نقشه بافت خاک با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰ اخذ شده از سازمان منابع طبیعی و آبخیزداری کشور، مدل رقمی ارتفاع ۳۰ متری و تصاویر ماهواره‌ای لندست ۹ استفاده شد. این داده‌ها در محیط سامانه اطلاعات مکانی تلفیق شده و پس از روی هم‌گذاری لایه‌ها، میزان متوسط فرسایش خاک در سطح حوضه محاسبه گردید. در ادامه، با تحلیل شاخص‌های پوشش گیاهی و مورفومتری، تأثیر این عوامل بر فرآیند فرسایش خاک در محیط ArcMap ایجاد و نقشه‌های پهنه‌بندی تهیه شدند.

یافته‌ها: با توجه به نتایج به دست آمده میزان هدررفت خاک برای کل حوضه در دامنه بین ۰ تا ۱۰۸/۶۱ تن در هکتار در سال برآورد شد. همچنین فرسایش کل سالانه خاک حوضه مورد مطالعه برابر با ۵۰/۸۹ (تن بر هکتار در سال) برآورد گردید. در بررسی دیگر ارتباط بین شاخص‌های پوشش گیاهی و مورفومتری با میزان فرسایش سالانه خاک انجام پذیرفت. بنابراین بر اساس نتایج به دست آمده شاخص Slope (۷۴٪ درصد) بیش‌ترین تأثیرگذاری و همبستگی معنی‌داری با میزان فرسایش سالانه خاک در حوضه آبخیز مشکین‌چای داشت.

نتیجه‌گیری: در این پژوهش، نقشه خطر فرسایش خاک حوضه مشکین‌چای با استفاده از مدل RUSLE و تحلیل GIS تهیه شد. نتایج نشان داد شاخص‌های شیب، پوشش گیاهی، انحناء دامنه و توپوگرافی بیش‌ترین همبستگی را با فرسایش سالانه داشته و تأثیرگذاری آن‌ها به‌طور معناداری مشخص شد.

نوآوری، کاربرد نتایج: در این پژوهش با ترکیب شاخص‌های پوشش گیاهی و مورفومتری و ارتباط آن با فرسایش خاک در حوضه آبخیز مشکین‌چای مورد بررسی قرار گرفت.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

شماره:	۱۶
دوره:	۶۱
صفحه:	۱-۲۴
تاریخ دریافت:	۱۴۰۳/۰۸/۰۶
تاریخ ویرایش:	۱۴۰۳/۱۰/۳۰
تاریخ پذیرش:	۱۴۰۳/۱۱/۰۴
تاریخ انتشار:	۱۴۰۴/۰۸/۱۰

کلیدواژه‌ها:

- پوشش گیاهی
- مورفومتری
- مدل جهانی فرسایش خاک اصلاح‌شده
- مشکین‌چای

نحوه ارجاع به این مقاله:

عابدینی، موسی، پاسبان، امیرحسام و نوری، آوا. (۱۴۰۴). ارتباط شاخص‌های پوشش گیاهی و مورفومتری با میزان فرسایش خاک در حوضه آبخیز مشکین‌چای با استفاده از مدل RUSLE. ۱۶(۶۱): ۱-۲۴.

doi: 10.22034/jargs.2025.485712.1157

ناشر: دانشگاه حکیم سبزواری



نویسندگان حق نشر و حقوق کامل انتشار را حفظ می‌کنند.

۱- مقدمه

مسئله تخریب زمین به یکی از مهم‌ترین بحران‌های زیست‌محیطی قرن حاضر تبدیل شده است (Hurni et al., 2015). فعالیت‌های انسانی در قرن گذشته، به ویژه کشاورزی صنعتی و توسعه بی‌رویه، باعث تسریع فرآیند تخریب زمین و از دست رفتن خاک سطحی شده است (Ullah et al., 2022). تخریب خاک، پدیده‌ای همه‌گیر است که در تمامی فعالیت‌های مخرب انسانی ریشه دارد. خاک به عنوان ستون فقرات زمین، نقش حیاتی در تأمین خدمات اکوسیستمی ایفا می‌کند و تخریب آن، اکوسیستم‌ها را به لبه‌ی پرتگاه می‌کشاند (Keesstra et al., 2016; Robinson et al., 2017). خاک، پایه و اساس حیات در هر منطقه است و متأسفانه به دلیل توسعه بی‌رویه شهرها، فعالیت‌های معدنی و گردشگری، همواره در معرض تخریب و آلودگی قرار می‌گیرد (Borrelli et al., 2022). حوضه‌های آبخیز جهان در معرض تهدید جدی چالش‌های زیست‌محیطی قرار دارند. تغییرات آب و هوایی، از جمله افزایش دما، تغییر الگوهای بارندگی و وقوع پدیده‌های شدید جوی، باعث تخریب خاک، کاهش کیفیت آب و در نهایت، کاهش بهره‌وری این حوضه‌ها می‌شود. کشاورزی صنعتی با روش‌های ناپایدار خود نیز بر این مشکلات افزوده و به تشدید فرسایش خاک و آلودگی منابع آبی کمک می‌کند. در این شرایط، پایداری بلندمدت حوضه‌های آبخیز به شدت به خطر افتاده است (Fagbohun et al., 2016). عوامل محیطی مختلفی مانند آب و هوا، جنس خاک، شکل زمین و پوشش گیاهی با فرسایش خاک در تعامل هستند و باعث کاهش تدریجی حاصلخیزی خاک می‌شوند (Abedini & Paban, 2023). تخریب خاک بر اثر فرسایش در مقیاس جهانی به شدت رو به گسترش است (Xiong and Leng, 2024). مخاطرات زیست‌محیطی به عنوان یکی از جدی‌ترین تهدیدات، منابع ارزشمند خاک و آب را در معرض خطر جدی قرار داده است (Borrelli et al., 2022). تغییرات آب و هوایی با افزایش قدرت نیروهای محرک اولیه، فرسایش خاک را شدت می‌بخشد (Azari et al., 2021). بارندگی بیشتر باعث می‌شود ذرات خاک جدا شده و رواناب بیش‌تری ایجاد شود (Qiu et al., 2022; Feng et al., 2023). فرسایش خاک در مقیاس وسیع به یکی از معضلات بزرگ زیست‌محیطی تبدیل شده است (Serbaji et al., 2023). عوامل طبیعی مانند شیب زمین، بارندگی و نوع خاک، به طور مستقیم بر فرسایش خاک تأثیر می‌گذارند؛ اما نحوه مدیریت زمین توسط انسان، با تغییر دادن این عوامل، می‌تواند نقش مهمی در کاهش یا افزایش فرسایش خاک داشته باشد. انتخاب روش‌های کشاورزی مناسب و اعمال روش‌های حفاظت از خاک، می‌تواند به طور قابل توجهی از فرسایش خاک جلوگیری کرده و پایداری خاک را افزایش دهد (Wang et al., 2022; Koirala et al., 2019).

تابحال پژوهش‌های متعددی زیادی در خصوص هدررفت خاک و ارتباط آن با شاخص‌های پوشش گیاهی و مورفومتری انجام شده است. به عنوان مثال، انسیسی و همکاران، با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و مدل معادله جهانی تلفات خاک تجدید نظر شده RUSLE^۱، تغییرات کاربری اراضی و تأثیر آن بر فرسایش خاک در حوضه وینیکی اتیوپی را در بازه زمانی ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۸ مورد بررسی قرار دادند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که با گسترش زمین‌های کشاورزی، میزان فرسایش خاک به طور چشمگیری از ۱۰/۰۲ تن در هکتار در سال ۱۹۹۸ به ۴۳/۴۸ تن در هکتار در سال ۲۰۱۸ افزایش یافته است. این مطالعه همچنین نشان می‌دهد که اراضی کشاورزی بیشترین سهم را در تولید رسوب در این منطقه دارند (Aneseyee et al., 2021). بهارات و همکاران، با بهره‌گیری از پارامترهای مورفومتری، به بررسی وضعیت فرسایش خاک در حوضه کالینادی^۲ در جنوب غرب هندوستان پرداختند. نتایج نشان داد که بیشتر زیرحوضه‌ها، در پهنه با پتانسیل زیاد فرسایش خاک قرار دارد و نتایج مدل با داده‌های مشاهداتی دو زیرحوضه دارای همخوانی کامل است (Baharat et al., 2021). پاون و همکاران، با بهره‌گیری از مدل RUSLE، به ارزیابی و مکان‌یابی دقیق مناطق مستعد فرسایش خاک در دوالخا پرداختند. آن‌ها همچنین تأثیر کاربری‌های مختلف زمین و پوشش گیاهی بر میزان فرسایش را مورد بررسی قرار دادند. نتایج پژوهش نشان داد که ۵ درصد از مناطق مورد مطالعه در معرض خطر بسیار شدید فرسایش قرار دارند و ۱۰ درصد دیگر نیز در معرض خطر بالا و شدید هستند. با این حال، بخش قابل توجهی از منطقه (۷۰ درصد) در دسته مناطق کم خطر طبقه‌بندی شده است. این پژوهشگران به این نتیجه رسیدند که مناطق شمال شرقی دوالخا به دلیل شیب تند، بیشترین آسیب‌پذیری را در برابر فرسایش خاک دارند (Pawn et al., 2020). سنگاپتا و همکاران، نیز با استفاده از پارامترهای مورفومتری، به ارزیابی فرسایش حوضه تنگات^۳ هندوستان پرداختند. این حوضه دارای پنج پهنه با پتانسیل فرسایش خیلی زیاد تا خیلی کم بود و حدود ۷۶ درصد مساحت حوضه در پهنه‌ای با پتانسیل فرسایش زیاد و خیلی زیاد قرار داشت

1. Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)

2. Kalinadi
3. Tenughat

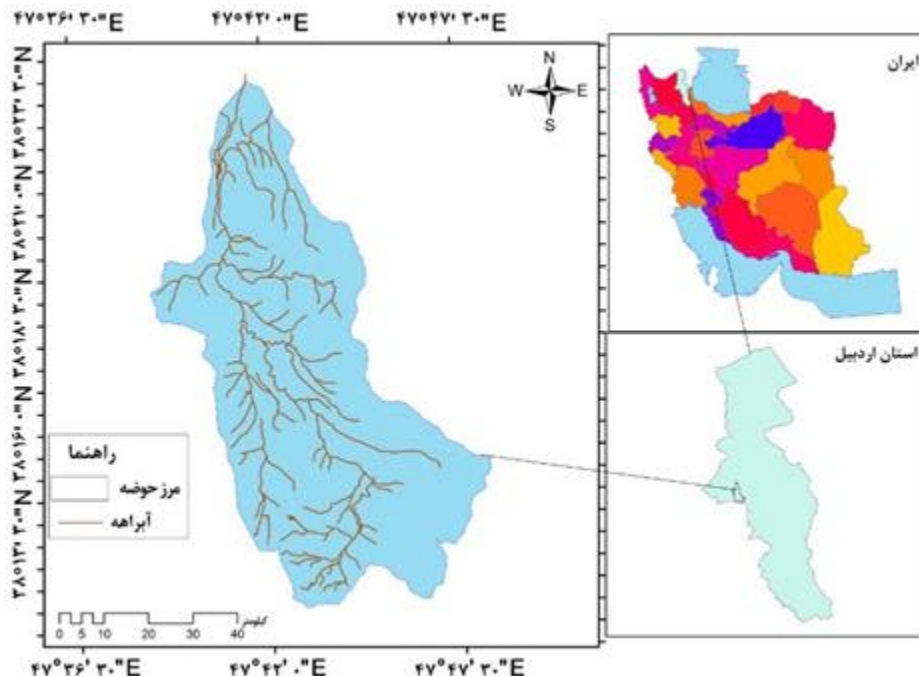
(Sengupta et al., 2021). مرچان و همکاران، با استفاده از RUSLE و GIS به بررسی فرسایش خاک در حوضه اریباسدل دوروه پرداختند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که مناطق با سطوح فرسایش شدید، یعنی با بیش‌ترین تلفات (بیش از ۲۰۰ تن در هکتار در سال)، مربوط به مناطقی با شیب تند، خاک‌های ضعیف توسعه‌یافته و پوشش گیاهی با پوشش گیاهی کم یا بدون پوشش گیاهی است. از سوی دیگر، مناطقی با سطوح پایدار فرسایش (تا ۱۰ تن در هکتار در سال) در مناطق مسطح، با خاک‌های توسعه‌یافته‌تر و پوشش گیاهی با تراکم و پوشش علفی بالاتر یافت می‌شوند (Merchan et al., 2023). سرباجی و همکاران، پیش‌بینی میزان فرسایش خاک در جنوب عراق را با استفاده از مدل RUSLE انجام دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که میزان فرسایش خاک منطقه در دامنه بین ۰ تا ۱۸۹ تن در هکتار در سال متغیر است (Serbaji et al., 2023). ذکرآب و همکاران، با هدف ارزیابی خطر نسبی رسوب اضافی و بارگذاری مواد مغذی به دریاچه‌های منفرد به دلیل فرسایش بین شیبی در حوضه‌های آبریز، از معادله جهانی تلفات خاک تجدید نظر شده (RUSLE) و مدل توزیع رسوب (SEDD) برای تخمین تلفات و رسوب‌گذاری خاک پرداختند. نتایج بررسی نشان داد که به دلیل شیب‌های تند (به طور متوسط ۲۱ درصد)، همه حوضه‌های دهانه به شدت مستعد از دست دادن خاک بودند و به دلیل کوچک بودن بیشتر آن‌ها (به طور متوسط ۲۰۳ هکتار)، بخش زیادی از مواد فرسایش یافته منتقل شده به داخل دریاچه‌ها رسوب می‌کند (DeCrap et al., 2023). در ایران نیز محمدی و همکاران، با استفاده از مدل RUSLE میانگین فرسایش در مقیاس کشور ایران ۲۴ تن در هکتار در سال برآورد نمودند و نقش عامل توپوگرافی را بیش از سایر عوامل مشخص نمودند (Mohammadi et al., 2018). امانپور و همکاران، با استفاده از طبقه‌بندی شی‌گرا و مدل RUSLE به بررسی اثر تغییر کاربری اراضی بر فرسایش خاک و تولید رسوب در حوضه رامهرمز پرداختند و نتایج این تحقیق نشان داد که مناطق مسکونی، اراضی بایر و کشاورزی دیم در منطقه افزایش یافته است. در مقابل پهنه‌های آبی مراتع و محصولات آبی در منطقه کاهش یافته است. نتیجه تغییر این مساحت‌ها کاهش پوشش طبیعی خاک و افزایش فرسایش در منطقه مورد مطالعه بود (Amanpour et al., 2022). اسفندیاری درآباد و همکاران، با تلفیق شاخص‌های زمینی و پوشش گیاهی برای برآورد و شناسایی خطر فرسایش خاک در حوضه آبخیز عموقین با استفاده از مدل RUSLE مورد مطالعه قرار دادند. نتایج این مطالعه نشان داد که میزان فرسایش خاک در حوضه مورد بررسی به طور قابل توجهی متغیر است و بین ۱/۲۱ تا ۵/۵۳ تن در هکتار در سال برآورد می‌شود. تحلیل روابط بین عوامل مؤثر بر فرسایش و نتایج مدل RUSLE حاکی از آن است که عامل پوشش گیاهی بیشترین تأثیر را بر میزان فرسایش خاک دارد. در حالی که عامل توپوگرافی تأثیر قابل توجهی بر نتایج مدل نداشته است. در بررسی دیگر بین شاخص‌های زمینی با مدل RUSLE نتایج نشان داد که عامل پوشش گیاهی با ضریب تبیین ۰/۴۷ درصد نسبت به سایر شاخص‌های مورد مطالعه دارای همبستگی بیشتری است (Esfandiari Darabad et al., 2022). طاهری بابادی و همکاران، در پژوهشی تأثیر تغییر کاربری اراضی در فرسایش خاک شهرستان بهبهان با استفاده از مدل معادله جهانی اصلاح شده فرسایش خاک (RUSLE) در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) مورد بررسی قرار دادند. نتایج نقشه فرسایش در دو سال ۲۰۰۰ و ۲۰۲۱ نشان داد که میزان فرسایش خاک با گذر زمان بیشتر شده است. در سال ۲۰۲۱ بیش‌ترین مقدار فرسایش با استفاده از پیش‌بینی مدل RUSLE، منحصر به آبراهه‌ها و رودخانه‌هاست. همچنین بیشترین مساحت منطقه در طبقه خطر فرسایش کم قرار داشته است (Taheri Babadi et al., 2022). عابدینی و همکاران، با بهره‌گیری از رویکرد شی‌گرا، به ارزیابی و تهیه نقشه کاربری اراضی حوضه آبخیز نیرچای پرداخته شد. نتایج این مطالعه نشان داد که روش شی‌گرا با دقت بسیار بالایی (صحت کلی ۹۹ درصد و ضریب کاپا ۰/۸۸ درصد) قادر به طبقه‌بندی کاربری‌های اراضی است. بر اساس این نقشه، بیشترین مساحت را مراتع ضعیف با حدود ۸۰۶۹ هکتار و کمترین مساحت را مناطق آبی با ۷۰ هکتار به خود اختصاص داده‌اند (Abedini et al., 2022). عابدینی و پاسبان، با بهره‌گیری از مدل RUSLE، به بررسی میزان فرسایش خاک در حوضه آبریز خیاوچای مشکین شهر و ارتباط آن با عوامل مختلف پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد عامل توپوگرافی با ضریب همبستگی ۰/۹۲ درصد بیشترین تأثیر را در برآورد فرسایش سالانه خاک توسط مدل RUSLE داشته است. در بررسی دیگر ارتباط بین شاخص‌های هیدروژئومورفیک و پوشش گیاهی با میزان فرسایش سالانه خاک انجام گرفت و نتایج نشان داد که شاخص‌های تفاضل پوشش گیاهی نرمال شده و انحناء مقطع به ترتیب با ضریب همبستگی ۰/۵۷ و ۰/۰۵ نسبت به شاخص‌های دیگر به ترتیب بیشترین و کم‌ترین تأثیرگذاری را دارا هستند (Abedini & Pasban et al., 2023). هدف از این پژوهش ارتباط شاخص‌های پوشش گیاهی و مورفومتری با میزان فرسایش خاک در حوضه آبخیز مشکین‌چای با استفاده از مدل RUSLE است. بنابراین این پژوهش با

ادغام شاخص‌های پوشش گیاهی و پارامترهای مورفومتری (مانند شیب، انحناء دامنه، رطوبت توپوگرافی، توان آبراهه و ...) همچنین ارتباط و همبستگی این شاخص‌های با میزان فرسایش خاک با استفاده از مدل RUSLE، گامی نوین در تحلیل عوامل تأثیرگذار بر فرسایش خاک برمی‌دارد. این رویکرد، نه تنها دقت شبیه‌سازی فرسایش را در حوضه آبخیز مشکین‌چای افزایش می‌دهد؛ بلکه امکان تفکیک نقش نسبی هر شاخص را در فرآیند فرسایش فراهم می‌سازد که می‌تواند مبنای علمی بهتری برای مدیریت پایدار خاک ارائه دهد.

۲- مواد و روش

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

حوضه آبخیز مشکین‌چای با مختصات جغرافیایی ۴۷ درجه و ۱۸ دقیقه و ۴ ثانیه تا ۴۷ درجه و ۴۱ دقیقه و ۲۰ ثانیه طول شرقی و ۳۸ درجه و ۱۳ دقیقه و ۱۵ ثانیه تا ۳۸ درجه و ۲۹ دقیقه و ۳۷ ثانیه عرض شمالی در محدوده سیاسی-اداری شهرستان مشکین‌شهر استان اردبیل واقع شده است. حوضه آبریز مشکین‌چای با مساحتی بالغ بر ۱۹۶/۴۷ کیلومترمربع بخش‌هایی از دامنه‌های شمالی توده آتشفشانی سبلان را زهکشی می‌کند. مشکین‌چای از زیرحوضه‌های سیستم حوضه آبریز ارس به‌شمار می‌رود. رودخانه مشکین‌چای آبراهه اصلی این حوضه محسوب می‌گردد که رودخانه‌ای دائمی به‌شمار می‌رود. در محدوده این حوضه روستاهای متعددی وجود دارد که اکثراً در پیرامون آبراهه‌ها مکان‌گزینی شده‌اند. این روستاها در قسمت‌های میانی و پایین‌دست استقرار یافته‌اند. در قسمت‌های بالادست حوضه به دلیل شرایط توپوگرافی خشن سکونتگاهی وجود ندارد. در شکل (۱) موقعیت جغرافیایی حوضه آبخیز مشکین‌چای ارائه شده است.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی حوضه آبخیز مشکین‌چای در ایران و استان اردبیل

۲-۲- روش پژوهش

در پژوهش حاضر به منظور برآورد میزان فرسایش خاک حوضه آبخیز مشکین‌چای از مدل جهانی فرسایش خاک اصلاح‌شده (RUSLE) استفاده شد. دلیل استفاده از این مدل به دلیل ساختار نیمه‌تجربی، سادگی در اجرا و نیاز به داده‌های محدود، یکی از پرکاربردترین مدل‌های برآورد فرسایش خاک است. این مدل بر اساس پنج عامل اصلی شامل بارندگی، نوع خاک، شیب، پوشش گیاهی و مدیریت اراضی عمل می‌کند و امکان تطبیق و کالیبراسیون آن برای شرایط مختلف اقلیمی و جغرافیایی وجود دارد. در

مقایسه با مدل‌های پیچیده‌تر مانند WEPP^۱ یا SWAT^۲، و ... RUSLE با هزینه کمتر و داده‌های کمتر قابل اجرا است و سرعت بیشتری در ارزیابی فرسایش در مقیاس‌های وسیع دارد، که آن را به گزینه‌ای مناسب برای مطالعات علمی و عملی تبدیل کرده است. در گام بعد با هدف تلفیق شاخص‌های پوشش گیاهی و مورفومتری از قبیل: NDVI^۳، SAVI^۴، MSAVI^۵، رطوبت توپوگرافی (TWI)^۶، قدرت آبراهه (SPI)^۷، انحنای دامنه^۸، انحنای مقطع^۹، انحنای سطح^{۱۰}، شیب^{۱۱}، طول دامنه (LSF)^{۱۲}، مورد بررسی قرار می‌گیرند. پس از تهیه نقشه فرسایش خاک با استفاده از مدل RUSLE، ما به دنبال بررسی تأثیر عوامل مختلف بر میزان فرسایش در منطقه هستیم. با استفاده از روش آماری همبستگی پیرسون، میزان ارتباط بین هر یک از عوامل مدل (مانند شیب زمین، نوع خاک و پوشش گیاهی) با میزان فرسایش خاک ارزیابی می‌شود. این تحلیل به ما کمک می‌کند تا عوامل اصلی مؤثر بر فرسایش خاک را شناسایی کرده و راهکارهای مناسب برای کاهش آن را ارائه دهیم.

ارزیابی شاخص‌های پوشش گیاهی و ژئومورفومتری: شاخص‌های گیاهی معمولاً اندازه‌های بدون بعد به دست آمده از داده‌های رادیومتریک هستند که در اصل نشان‌دهنده مقدار پوشش گیاهی موجود در یک چشم‌انداز مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این پژوهش سه شاخص NDVI، SAVI و MSAVI به منظور تهیه نقشه پوشش گیاهی مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرند. شاخص‌های گیاهی مانند NDVI، SAVI و MSAVI ابزاری قدرتمند برای سنجش از دور و ارزیابی پوشش گیاهی هستند. این شاخص‌ها به دلیل ارتباط تنگاتنگ پوشش گیاهی با فرآیند فرسایش خاک، در مطالعات مربوط به فرسایش خاک کاربرد گسترده‌ای یافته‌اند. پوشش گیاهی با تثبیت خاک، کاهش سرعت رواناب و افزایش نفوذپذیری خاک، نقش به‌سزایی در کنترل فرسایش خاک دارد. شاخص NDVI به دلیل سادگی محاسبه و حساسیت به تغییرات پوشش گیاهی، پرکاربردترین شاخص در این زمینه است. شاخص SAVI برای مناطق خشک و نیمه خشک که تغییرات روشنایی خاک در آن‌ها زیاد است، مناسب‌تر است. شاخص MSAVI نیز یک اصلاحیه بر روی SAVI است که عملکرد آن را در شرایط مختلف بهبود می‌بخشد. با استفاده از این شاخص‌ها می‌توان تغییرات پوشش گیاهی را در طول زمان پایش کرد و از این طریق به تغییرات در میزان فرسایش خاک پی برد. همچنین، با ترکیب این شاخص‌ها با سایر داده‌های مکانی مانند نقشه‌های توپوگرافی، نوع خاک و کاربری زمین، می‌توان تحلیل جامع‌تری از فرسایش خاک ارائه داد. به طور خلاصه، این شاخص‌ها کمک می‌کنند تا عوامل مؤثر بر فرسایش خاک را بهتر بشناسیم و اقدامات مناسب برای کنترل این پدیده را برنامه‌ریزی کنیم.

شاخص تفاضل پوشش گیاهی نرمال شده (NDVI): پوشش گیاهی، سدی مستحکم در برابر فرسایش خاک حوضه آبریز مشکین‌چای است. ریشه‌های گیاهان با ایجاد شبکه‌ای پیچیده در دل خاک، مانع از شسته شدن خاک توسط آب می‌شوند. علاوه بر این، تاج پوشش گیاهی همچون چتری محافظ، انرژی باران را جذب کرده و از سرعت جریان آب می‌کاهد. حفظ پوشش گیاهی، یکی از مهم‌ترین راهکارها برای مقابله با فرسایش خاک است. مطالعات نشان داده‌اند که پوشش گیاهی متراکم، حتی در شرایط سخت اقلیمی، می‌تواند به طور مؤثری از خاک محافظت کند. در مقابل، تخریب پوشش گیاهی، به ویژه در شیب‌ها، منجر به فرسایش شدید خاک و بروز مشکلات زیست‌محیطی متعدد می‌شود (Refahi, 2006). شاخص تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی (NDVI) که از طریق سنجش از دور محاسبه می‌شود، یکی از مهم‌ترین شاخص‌ها برای اندازه‌گیری مقدار و سلامت پوشش گیاهی در یک منطقه است. برای تصویر لندست این شاخص به صورت رابطه ۱ است.

$$NDVI = \frac{IR - R}{IR + R} \quad \text{رابطه ۱}$$

NDVI مقادیر بین -۱ تا +۱ را به خود می‌گیرد. پوشش گیاهی سالم به دلیل فرآیند فتوسنتز، نور مادون قرمز نزدیک را بیشتر از نور قرمز بازتاب می‌کند و در نتیجه، مقادیر مثبت بالاتری در شاخص NDVI را ایجاد می‌کند. برعکس، مناطق فاقد پوشش گیاهی مانند شهرها، بیابان‌ها، آب و ابرها معمولاً مقادیر NDVI نزدیک به صفر یا منفی دارند (Armin et al., 2020).

1. Water Erosion Prediction Project (WEPP)
2. Soil and Water Assessment Tool (SWAT)
3. Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)
4. Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI)
5. Modified Soil-Adjusted Vegetation Index (MSAVI)
6. Topographic Wetness Index (TWI)
7. Stream Power Index (SPI)

8. Curvatur
9. Profil Curvatur
10. Plan Curvatur
11. Slope
12. Slope Length Factor (SLF)

شاخص MS-AVI: شاخص MS-AVI که در سال ۱۹۹۴ توسط کوئیتال معرفی شد، یک روش بهبودیافته برای اندازه‌گیری پوشش گیاهی است. برخلاف شاخص‌های قبلی، MS-AVI نیازی به تخمین اولیه مقدار پوشش گیاهی ندارد. در این شاخص، فاکتور تصحیح به طور خودکار محاسبه می‌شود و این باعث می‌شود که بتوان پوشش گیاهی را دقیق‌تر، حتی در مناطقی با پوشش گیاهی کم، تشخیص داد. منحنی تغییرات MS-AVI نیز ساده‌تر و قابل فهم‌تر است (Gilbert et al., 2002). این شاخص به صورت رابطه ۲ بیان می‌شود.

$$MS-AVI = \frac{NIR-R}{NIR+R+L} \cdot (1+L) \quad \text{رابطه ۲}$$

شاخص SAVI: شاخص SAVI، که توسط هوت در سال ۱۹۸۸ ارائه شد، به عنوان یک ابزار قدرتمند برای برآورد دقیق پوشش گیاهی در شرایط مختلف خاک، به ویژه در مناطقی با خاک‌های روشن و تیره، شناخته می‌شود. این شاخص مبتنی بر نسبت‌بندی باندهای طیفی طراحی شده و برخلاف شاخص‌های قبلی، حساسیت کمتری به تغییرات پس‌زمینه خاک نشان می‌دهد. ویژگی منحصر به فرد SAVI این است که خطوط هم‌سبزه آن در ناحیه منفی مادون قرمز نزدیک (NIR) و مادون قرمز (IR) یکدیگر را قطع می‌کنند. این ویژگی باعث می‌شود تا شاخص SAVI بتواند تغییرات پوشش گیاهی را با دقت بیشتری شناسایی کرده و تأثیر عوامل محیطی مانند نوع خاک را کاهش دهد. در واقع، SAVI با اعمال یک ضریب اصلاحی بر روی شاخص NDVI، تأثیر روشنایی خاک را تعدیل می‌کند و به این ترتیب، امکان برآورد دقیق‌تر پوشش گیاهی را فراهم می‌آورد. مطالعات اولیه بر روی گیاه پنبه و سایبان‌ها در خاک‌های با رنگ‌های متفاوت، نشان داده‌اند که SAVI می‌تواند تغییرات پوشش گیاهی را نسبت به شاخص‌های دیگر با دقت بیشتری تشخیص دهد. این شاخص به صورت رابطه ۳ بیان می‌شود.

$$SAVI = \frac{NIR-R}{NIR+R+L} \cdot (1+L) \quad \text{رابطه ۳}$$

L در این فرمول فاکتور تصحیح بوده و از صفر برای منطقه با پوشش گیاهی بالا تا ۱ برای مناطق با پوشش گیاهی خیلی کم تغییر می‌کند و برای مناطق با پوشش گیاهی متوسط ۰/۵ است. در این فرمول باعث می‌شود که تغییرات شاخص پوشش گیاهی -۱ تا +۱ باشد و اگر فاکتور L به صفر برسد شاخص SAVI برابر شاخص NDVI خواهد بود (Gilbert et al., 2002).

شاخص EVI: در مناطق خشک و نیمه‌خشک، به دلیل شرایط خاص محیطی، استفاده از شاخص EVI برای سنجش پوشش گیاهی با مشکلاتی همراه است. این شاخص قادر نیست پوشش گیاهی کم‌تراکم را به خوبی تشخیص دهد و تأثیر عوامل دیگری مانند نوع خاک را نیز در نظر می‌گیرد. به همین دلیل، دانشمندان به دنبال شاخص‌های بهتری هستند که این محدودیت‌ها را برطرف کنند. اخیراً گروهی از محققان، شاخص پوشش گیاهی EVI را برای استفاده در داده‌های MODIS طبق معادله ۴ پیشنهاد کرده‌اند (Farrokhzadeh et al., 2018).

$$EVI = \left(\frac{P_{NIR}^* - P_{RED}^*}{P_{NIR}^* + C_1 P_{RED}^* - C_2 P_{BLUE}^* + 1} \right) 1 + L \quad \text{رابطه ۴}$$

که در آن EVI شاخص پوشش گیاهی بازسازی شده، R_{NIR} بازتاب در ناحیه مادون قرمز نزدیک، R_{RED} بازتاب در ناحیه قرمز، R_{BLUE} باند آبی و مقادیر ضرایب L، C_1 و C_2 به ترتیب -۱، -۶ و -۷/۵ هستند. این شاخص در بازه -۱ تا +۱ قرار دارد. از مزایای این شاخص این است که از اثرات اتمسفر و پخش آبروسل می‌کاهد، در واقع EVI یک NDVI تغییر یافته است که در آن فاکتور تنظیم خاک (L) و دو ضریب C_1 و C_2 لحاظ می‌گردد (Farrokhzadeh et al., 2018).

طول دامنه: طول دامنه به عنوان یکی از عوامل کلیدی در میزان فرسایش خاک در حوضه‌های آبریز شناخته می‌شود. در این پژوهش، با بهره‌گیری از داده‌های شیب و تجمع جریان، لایه طول دامنه تولید گردید. برای استخراج لایه طول دامنه در سطح حوضه رابطه ۵ مورد استفاده قرار گرفت. این رابطه به عوامل توپوگرافی مانند طول شیب (L) و شیب زمین (S) مرتبط است که به طور مستقیم بر میزان فرسایش خاک تأثیرگذارند و توسط محققان زیادی مورد استفاده قرار گرفته است (Abedini et al., 2024; Luca et al., 2012).

1. Near-Infrared (NIR)

2. Infrared (IR)

$$LSF = (fa \times \frac{\text{cell_size}}{22.3})^{0.4} (\sin \theta / 0.896)^{1.3} \quad \text{رابطه ۵}$$

که در آن LSF: فاکتور طول دامنه، fa: تجمع جریان است.

توان آبراهه (SPI): توان آبراهه، شاخصی مهم در ژئومورفولوژی برای ارزیابی انرژی رودخانه و توان حمل رسوبات است. این انرژی، که از شیب بستر و دبی جریان ناشی می‌شود، محرک اصلی فرایندهای فرسایش و رسوب‌گذاری است. با استفاده از مدل‌های رقومی ارتفاعی، می‌توان شیب کانال را با دقت بالا محاسبه و توان رودخانه را تخمین زد. این شاخص به تحلیل پویایی رودخانه‌ها و نقش آن‌ها در شکل‌گیری زمین‌های آبرفتی کمک می‌کند (Bizzi and Lerner, 2015). این شاخص به صورت رابطه ۶ بیان می‌گردد.

$$SPI = A_s \tan B \quad \text{رابطه ۶}$$

که در آن SPI: شاخص قدرت جریان، A_s : مساحت ویژه جریان، Q: درجه شیب است.

رطوبت توپوگرافی (TWI): شاخص رطوبت توپوگرافی با ترکیب مساحت حوضه بالادست و شیب، مناطق مستعد اشباع و توزیع رطوبت خاک را شناسایی می‌کند. این شاخص که در مدل TOPMODEL معرفی شده، ابزار مهمی برای تحلیل فرایندهای هیدرولوژیکی و ارزیابی خطر فرسایش است. TWI در کنار شیب و انحنای زمین، در مدل‌سازی حوزه‌های کشاورزی، محیط زیست و پیش‌بینی تولید محصول کاربرد گسترده‌ای دارد و با نمایش تأثیر توپوگرافی بر توزیع رطوبت، نقشه‌های دقیقی برای مدیریت منابع طبیعی ارائه می‌دهد (Moore and Grayson, 1991; Qin et al., 2009). شاخص رطوبت توپوگرافی به‌صورت رابطه ۷ ارائه شده است.

$$TWI = A_s / \tan \beta \quad \text{رابطه ۷}$$

در رابطه ذکر شده A_s سطح ویژه حوضه برحسب مساحت تجمعی بالادست (مساحت بالادست در واحد طول خط تراز)، β درجه شیب است.

انحنای دامنه، سطح و مقطع از شاخص‌های مهم توپوگرافی هستند که در تحلیل رفتار آب و خاک و فرایندهای فرسایش و رسوب‌گذاری نقش اساسی دارند. انحنای دامنه، با استفاده از DEM (۳۰ متر استر) و ایجاد سه لایه انحنای دامنه، انحنای مقطع و انحنای سطح مورفولوژی زمین را به‌صورت مقعر (مثبت)، محدب (منفی) یا صاف (صفر) توصیف می‌کند و نشان‌دهنده جهت و شکل شیب است. انحنای سطح، تغییرات شیب در مسیر جریان را نشان داده و با شدت جریان و فرایندهای رسوب‌گذاری مرتبط است. این شاخص سطوح محدب را با مقادیر منفی و مقعر را با مقادیر مثبت مشخص می‌کند (رابطه ۸). انحنای مقطع نیز بیانگر همگرایی یا واگرایی جریان‌ها است؛ مقادیر مثبت به واگرایی (خط‌الرأس‌ها) و مقادیر منفی به همگرایی (دره‌ها) اشاره دارد (رابطه ۹). این شاخص‌ها درک جامعی از دینامیک جریان و تغییرات زمین را فراهم می‌کنند (Rejith et al., 2019; Babolimoakher et al., 2019).

$$n \times g(a \times d^2 + b \times e^2 + c + d \times e) / (d^2 + e^2)(1 + (d^2 e^2))^{1.5} \quad \text{رابطه ۸}$$

$$n \times g(b \times d^2 + a \times e^2 - c \times d \times e) / (d^2 + e^2)^{1.5} \quad \text{رابطه ۹}$$

ارزیابی فرسایش خاک: در این مطالعه، برای تخمین میزان فرسایش خاک از مدل جهانی تجدیدنظر شده فرسایش خاک (RUSLE) بهره بردیم. این مدل که با تکیه بر داده‌های سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی پارامترهای خود را تعیین می‌کند، ابزاری قدرتمند برای ارزیابی فرسایش خاک محسوب می‌شود. شایان ذکر است که مدل اصلی USLE در سال ۱۹۴۷ توسط سازمان تحقیقات کشاورزی آمریکا برای محاسبه فرسایش سطحی ارائه شد (Wischmeier and Smith, 1978). نسخه تجدیدنظر شده آن (RUSLE) جهت برآورد فرسایش خاک و طراحی برنامه‌های حفاظتی مورد استفاده قرار می‌گیرد

(Renard and Freidmund, 1994). مدل RUSLE یک مدل برآورد فرسایش آبی است که با شش عامل زیر ارتباط دارد و به صورت رابطه ۱۰ ارائه می‌شود.

$$A = R \times K \times LS \times C \times P \quad \text{رابطه ۱۰}$$

در این معادله، میزان فرسایش خاک در هر هکتار (A) تحت تأثیر عوامل مختلفی قرار می‌گیرد. این عوامل شامل شدت بارندگی (R)، قابلیت فرسایش خاک (K)، طول و شیب زمین (LS)، پوشش گیاهی (C) و اقدامات حفاظتی (P) است. C و P بدون واحد هستند، در حالی که R بر حسب مگاژول میلی‌متر در هکتار بر ساعت در سال و K بر حسب تن در ساعت بر مگاژول بر میلی‌متر بیان می‌شود.

فرسایش متوسط سالانه خاک با مدل RUSLE، از طریق حاصل ضرب پارامترهای R، K، LS، C و P محاسبه می‌شود. این مدل که نسخه پیشرفته‌تر مدل اولیه است، برای برآورد انواع مختلف فرسایش، از جمله ورقه‌ای و شیاری، توسعه یافته است. RUSLE با پایه فیزیکی قوی‌تر، به اراضی کشاورزی، مراتع و مناطق طبیعی قابل تعمیم بوده و تغییرات زمانی عوامل مؤثر بر فرسایش، مانند پوشش گیاهی و نوسانات بارش، را با دقت در نظر می‌گیرد. این ویژگی، آن را به ابزاری مؤثر برای مدیریت پایدار خاک تبدیل کرده است (Damene and Satyal, 2023; Hesami et al., 2024).

عامل فرسایش باران: قدرت فرسایش‌زایی باران، که اغلب با شاخص R در مدل‌های ارزیابی فرسایش خاک مانند USLE و RUSLE نمایش داده می‌شود، به شدت بارش و انرژی جنبشی آن بستگی دارد. مطالعات نشان داده‌اند که این شاخص ارتباط مستقیمی با میزان فرسایش خاک دارد. با این حال، به دلیل کمبود داده‌های دقیق بارندگی در بسیاری از مناطق، اغلب از مقادیر متوسط ماهانه و سالانه بارندگی برای برآورد شاخص R استفاده می‌شود. در این تحقیق، پس از انتخاب ایستگاه‌های باران‌سنجی مناسب و جمع‌آوری داده‌های بارندگی در دوره زمانی مشخص، شاخص فورنیر برای هر ایستگاه محاسبه شد (Renard and Freidmund, 1994; Arkhi & Niazi, 2012). در این پژوهش داده‌های بارش از دوره آماری ۱۰ ساله ایستگاه باران‌سنجی موجود در داخل و اطراف حوضه کسب شد. سپس با کاربرد روابط (۱۱، ۱۲ و ۱۳) زیر مقدار R مورد محاسبه قرار گرفت.

$$F = \frac{\sum_{i=1}^{12} P_i^2}{\sum_{i=1}^{12} P} \quad \text{رابطه ۱۱}$$

که در این رابطه P_i متوسط بارندگی به میلی‌متر در ماه i و P متوسط بارندگی سالانه (میلی‌متر) است.

$$R = 0.07397 \times MFI - 1.847 MFI < 55 \text{ mm} \quad \text{رابطه ۱۲}$$

$$R = (95.77 - 6.081 \times F + 0.4770 \times MFI^2) / 1 \quad MFI \geq 55 \text{ mm} \quad \text{رابطه ۱۳}$$

در این رابطه R متوسط فرسایش بر حسب $\text{Mj.mm.ha}^{-1}.\text{h}^{-1}.\text{month}^{-1}$ برای دوره آماری، n تعداد سال‌های آماری، MJ تعداد حوادث فرسایش برای ماه z و EL30 میزان فرسایش باران برای رخداد K است. فرسایش باران برای هر رخداد بارش به دست می‌آید.

پس از محاسبه عامل R در ایستگاه‌های باران‌سنجی مورد مطالعه، تغییرات مکانی آن با استفاده از روش درون‌یابی عکس فاصله وزنی (IDW) مورد بررسی و نقشه تغییرات مکانی عامل R تهیه گردید.

عامل توپوگرافی: به طور کلی، طول شیب تأثیر مستقیمی بر شدت فرسایش دارد. هرچه شیب طولانی‌تر باشد، نیروی فرسایش بیشتر عمل کرده و خاک بیشتری را با خود می‌برد. این فرسایش در انتهای شیب به اوج خود می‌رسد (Sadeghi et al., 2022). عامل‌های C و L در مدل RUSLE، اهمیت توپوگرافی در فرسایش خاک را آشکار می‌سازند. افزایش طول و شیب زمین، با تسریع جریان آب سطحی، به طور مستقیم بر شدت فرسایش می‌افزاید (Bahatti et al., 2022). در این پژوهش، برای تحلیل ویژگی‌های فیزیکی حوضه، از داده‌های مدل رقمی ارتفاع (DEM)² با دقت ۳۰ متر در محیط نرم‌افزار ArcGIS و

ابزارهای ArcHydro استفاده شد. با بهره‌گیری از این ابزارها، طول شیب حوضه تعیین و همچنین درجه و درصد شیب آن از مدل رقومی ارتفاع (DEM) استخراج گردید. در بخش تحلیل‌های مکانی، با ترکیب عوامل طول شیب (L) و درجه شیب (S) شاخص LS به‌عنوان معیاری برای ارزیابی فرسایش‌پذیری خاک در نظر گرفته شد (Rahimi & Mezbani, 2013). برای به دست آوردن ضریب LS از رابطه (۱۴) در محیط Raster Calculator استفاده شد. به عبارتی دیگر این رابطه به عوامل توپوگرافی مانند طول شیب (L) و شیب زمین (S) مرتبط است که به طور مستقیم بر میزان فرسایش خاک تأثیرگذارند و توسط محققان زیادی مورد استفاده قرار گرفته است (Abedin et al., 2024; Garshasbi and Sarhangi, 2024; Zakerinezhad and Fallah, 2023; Luca et al., 2012).

$$LS = (fa \times \frac{\text{cell_size}}{22.3})^{0.4} (\frac{\sin}{0} \cdot 0896)^{1.3} \quad \text{رابطه ۱۴}$$

در این رابطه LSF فاکتور طول دامنه، fa تجمع جریان است.

عامل فرسایش‌پذیری خاک: میزان فرسایش‌پذیری خاک نشان می‌دهد که ذرات خاک تا چه اندازه به راحتی تحت تأثیر نیروهای خارجی مانند بارش باران از هم جدا شده و توسط رواناب جابه‌جا می‌شوند. به عبارت دیگر، این عامل بیانگر حساسیت ذاتی خاک در برابر فرسایش است (Kelarestaghi et al, 2009). مورگان مقادیر عددی مشخصی را برای ضریب فرسایش‌پذیری انواع مختلف خاک پیشنهاد کرده است که در جدول ۱ آمده است (Ahmadi, 2009). به منظور تهیه نقشه عامل فرسایش‌پذیری خاک (K) از نقشه بافت خاک ۱:۲۵۰۰۰۰ ایران اخذ شده از سازمان منابع طبیعی و آبخیزداری کشور، و اطلاعات جدول (۱) استفاده گردید.

جدول ۱. ضریب فرسایش‌پذیری خاک (K).

K	وضعیت خاک	K	وضعیت خاک
۰/۱	اراضی مقاوم به فرسایش	۰/۵	خاک سطحی با پوشش سنگریزه‌ای
۰/۴۲	خاک‌های ماسه‌ای نرم	۰/۱۶	خاک‌های ماسه‌ای
۰/۴۲	خاک‌های لومی با ماسه بسیار ریز	۰/۱۲	خاک‌های لومی شنی
۰/۳۷	خاک‌های لومی	۰/۴۸	خاک‌های سیلتی لومی
۰/۳۷	خاک‌های لومی رسی	۰/۲۵	خاک‌های سیلتی رسی

منبع: Ahmadi, 2009

عامل پوشش گیاهی: پژوهشگران با استفاده از شاخص پوشش گیاهی نرمال شده روش‌های متنوعی برای برآورد عامل C در مدل‌های ارزیابی فرسایش خاک ارائه کرده‌اند (Mohammadi et al., 2018) در این پژوهش، برای تهیه نقشه عامل C در حوضه مورد مطالعه، ابتدا با بهره‌گیری از تصویر ماهواره‌ای Landsat 9 سال ۲۰۲۳ و رابطه ۱۵، شاخص NDVI محاسبه شد. سپس، با استفاده از نرم‌افزار ENVI، نقشه توزیع مکانی با استفاده از رابطه (۳-۶) به دست آمد. این نقشه به عنوان ورودی مدل، برای برآورد کمی عامل C مورد استفاده قرار گرفت.

$$NDVI = (P_{NIR} - P_{Red}) / (P_{NIR} + P_{Red}) \quad \text{رابطه ۱۵}$$

در این رابطه P_{Red} باند قرمز و P_{NIR} باند مادون نزدیک است.

پس از محاسبه NDVI برای کل حوضه، در نهایت توزیع مکانی مقادیر C در حوضه نیز با استفاده از رابطه ۱۶ و توسط تحلیل‌گر مکانی نرم‌افزار ArcGIS به دست آمد (Huang et al., 2020).

$$C = 0.407 - 0.5953 * NDVI \quad \text{رابطه ۱۶}$$

عامل حفاظت خاک: در مدل RUSLE، عامل P نشان‌دهنده نسبت فرسایش خاک در شرایط اجرای عملیات حفاظتی مانند کشت روی خطوط تراز، کشت نواری و ترانس‌بندی به فرسایش خاک در شرایط زراعت شخم در جهت شیب است. این عامل، که مقادیر آن بین صفر (برای عملیات حفاظتی کامل) تا یک (عدم وجود هرگونه عملیات حفاظتی) متغیر است. با این حال، به دلیل نبود اطلاعات

کافی درباره مدیریت اراضی در این تحقیق، همانند پیشنهاد ویشمایر و اسمیت (۱۹۷۸)، عامل P برای کل حوضه ۱ در نظر گرفته شد (Wischmeier and Smith, 1978).

تلفیق لایه‌ها و تهیه نقشه فرسایش خاک: پس از تهیه لایه‌ها و طبقه‌بندی هر کدام از آن‌ها مطابق شرایط منطقه و دامنه اعداد به‌دست‌آمده، نقشه نهایی فرسایش خاک با هم‌پوشانی لایه‌های مذکور تهیه و به کلاس‌های مختلف فرسایش طبقه‌بندی شد.

• ارتباط شاخص‌های پوشش گیاهی و مورفومتری با فرسایش خاک حوضه آبخیز مشکین‌چای

به منظور بررسی ارتباط شاخص‌های پوشش گیاهی و ژئومورفومتری با فرسایش خاک حوضه مورد مطالعه از نرم‌افزار SPSS جهت تجزیه و تحلیل داده‌ها و همبستگی بین شاخص‌های مورد استفاده بهره گرفته شد تا میزان اثرگذاری هریک از این شاخص‌ها در ارتباط با فرسایش خاک حوضه مورد مطالعه بیان شود. از این رو ضریب همبستگی پیرسون یکی از کاربردی‌ترین روش‌های آماری است که به بررسی جهت و اندازه هم خطی بودن بین متغیر مستقل و وابسته می‌پردازد (Shogrkhodaei et al., 2023).

• آزمون همبستگی پیرسون

رایج‌ترین شاخص برای اندازه‌گیری ارتباط خطی بین دو متغیر کمی، ضریب همبستگی پیرسون است. این ضریب نشان می‌دهد که تا چه اندازه تغییرات یک متغیر با تغییرات متغیر دیگر همراه است. شرط اصلی استفاده از ضریب پیرسون، پارامتریک بودن متغیرها است؛ یعنی آن‌ها باید توزیع نرمال داشته و در سطح اندازه‌گیری فاصله‌ای یا نسبی قرار گیرند. با این حال، در برخی موارد خاص، مانند زمانی که متغیرها در مقیاس شبه‌فاصله‌ای (تراکمی) هستند یا یکی از متغیرها دو ارزشی است، برخی پژوهشگران استفاده از ضریب پیرسون را مجاز می‌دانند. البته، تفسیر نتایج در این موارد نیاز به دقت بیشتری دارد.

۳- یافته‌ها

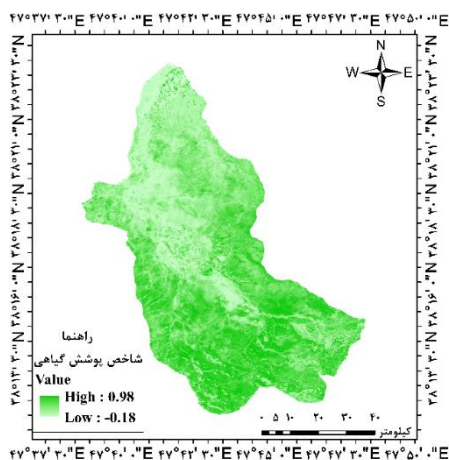
• برآورد شاخص‌های پوشش گیاهی و ژئومورفومتری

شاخص تفاضل پوشش گیاهی نرمال شده: در این پژوهش، از شاخص پوشش گیاهی نرمال شده به عنوان یک معیار برای ارزیابی پوشش گیاهی و پیش‌بینی میزان فرسایش خاک استفاده شده است. NDVI که از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۹ استخراج شده، نشان‌دهنده تراکم و مقدار پوشش گیاهی در حوضه آبخیز مشکین‌چای است. مقادیر NDVI در این منطقه بین ۰/۱۸- تا ۰/۹۸ متغیر بوده و در شکل ۲ ارائه شده است. با توجه به این که پوشش گیاهی نقش مهمی در کنترل فرسایش خاک دارد، این مطالعه به بررسی رابطه بین NDVI و میزان فرسایش خاک در راستای بهبود مدیریت زمین می‌پردازد. با توجه به نتایج به‌دست آمده بیش‌ترین میزان تراکم شاخص پوشش گیاهی در قسمت‌های جنوب و جنوب غربی حوضه متمرکز است. در مقابل در قسمت‌های مرکزی و شمالی حوضه از میزان شدت تراکم پوشش گیاهی کاسته و مقادیر پایین‌تری را داراست. نتایج این پژوهش با نتایج عابدینی و همکاران که در حوضه آبخیز کوزه‌توپراقی انجام دادند و مقدار شاخص NDVI در این حوضه در دامنه بین ۰/۲۱- تا ۰/۸۵ به‌دست آمد، همسو است (Abedini et al., 2024).

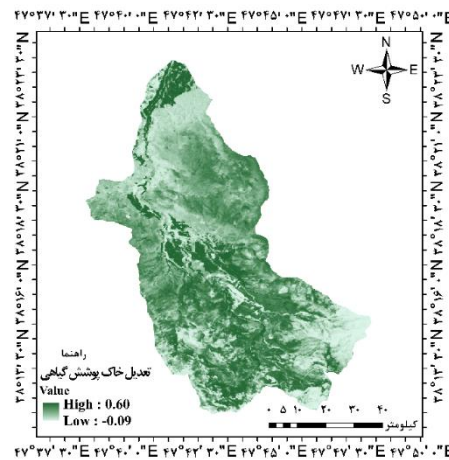
شاخص‌های SAVI و SAVI: با در نظر گرفتن به اینکه یکی از معیارهای مهم و مؤثر در میزان کاهش و یا افزایش فرسایش خاک پوشش گیاهی است در همین راستا شاخص‌های پوشش گیاهی در حوضه مورد مطالعه محاسبه شد. در این پژوهش برای اعمال شاخص‌های پوشش گیاهی از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۹ برای سال ۱۴۰۲ استفاده شده است. نقشه‌های شاخص‌های پوشش گیاهی SAVI و SAVI حاصل از دو تصویر انتخاب‌شده در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است. بیش‌ترین باندهای که در محاسبه شاخص‌های گیاهی مورد استفاده قرار می‌گیرند در محدوده باندهای قرمز و مادون‌قرمز نزدیک هستند. دلیل این امر خاصیت جذب نور قرمز توسط رنگ‌دانه‌های موجود در کلروفیل و انعکاس شدید گیاهان در بخش مادون‌قرمز طیف الکترومغناطیس است. با توجه به شکل‌های (۳ و ۴) مقادیر شاخص‌های SAVI و SAVI برای حوضه آبخیز مشکین‌چای به ترتیب در دامنه بین ۰/۰۹- تا ۰/۶۰ و ۰/۰۷- تا ۰/۶۴ به دست آمد.

شاخص پیشرفته پوشش گیاهی (EVI): این شاخص به عنوان یکی از ابزارهای قدرتمند سنجش از دور برای ارزیابی پوشش گیاهی، اطلاعات ارزشمندی در مورد تغییرات پوشش گیاهی در حوضه آبخیز مشکین‌چای ارائه می‌دهد. با توجه به شرایط اقلیمی خاص این منطقه و فعالیت‌های انسانی همچون کشاورزی و دامداری، تغییرات EVI در این حوضه می‌تواند ناشی از عوامل مختلفی مانند تغییرات بارندگی، دما، مدیریت اراضی و گسترش مناطق شهری باشد. با توجه به شکل ۵ مقادیر این شاخص برای حوضه آبخیز

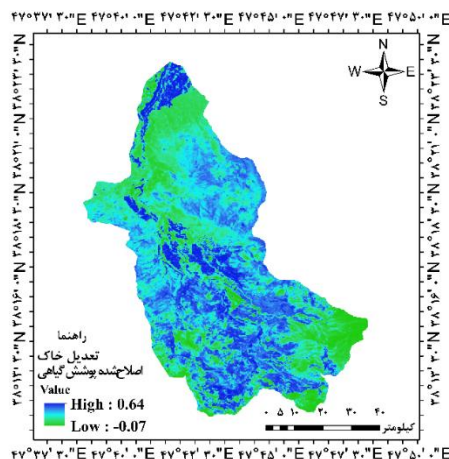
مشکین چای در دامنه بین ۰/۱۱- تا ۰/۹۰ به دست آمد. همانطور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود بیشترین مقادیر این شاخص در قسمت‌های شمالی و مرکز حوضه حاکم است و در مقابل مقادیر پایین این شاخص در مناطق شمال غرب و جنوب شرقی است.



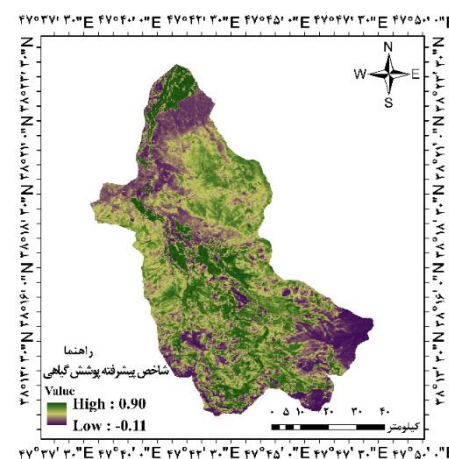
شکل ۲. شاخص پوشش گیاهی نرمال شده (NDVI) حوضه آبخیز مشکین چای



شکل ۳. نقشه شاخص تعدیل خاک پوشش گیاهی (SAVI) حوضه آبخیز مشکین چای



شکل ۴. نقشه شاخص تعدیل خاک اصلاح شده پوشش گیاهی (MSAVI) حوضه آبخیز مشکین چای



شکل ۵. نقشه شاخص پیشرفته پوشش گیاهی (EVI) حوضه آبخیز مشکین چای

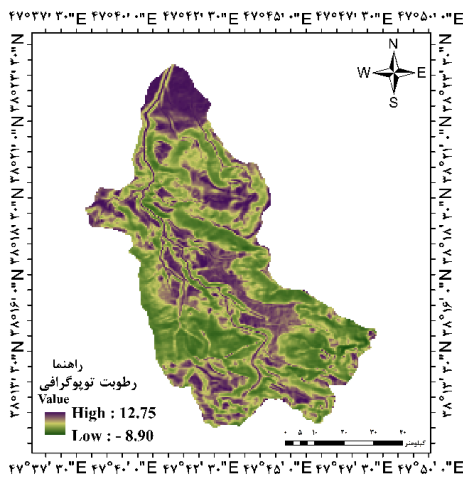
شاخص رطوبت توپوگرافی به عنوان یک شاخص کلیدی، اثرات متقابل عوامل زمین‌شناختی بر روی تولید رواناب و فرایندهای مرتبط با رسوب را نشان می‌دهد. با فرض یکنواختی شرایط خاک، توزیع مکانی TWI در حوضه آبخیز مشکین چای در شکل ۶ ارائه شده است. این شاخص به خوبی می‌تواند الگوهای توزیع رطوبت در سطح حوضه را توضیح دهد. مقدار شاخص رطوبت توپوگرافی در محدوده ۸/۹۰- تا ۱۲/۷۵ است. همان‌طور که شکل ۶ نشان می‌دهد، توزیع شاخص رطوبت توپوگرافی در حوضه به طور قابل توجهی متفاوت است. نواحی مرکزی و شمالی (سطح هموار) دارای بالاترین مقادیر این شاخص هستند، در حالی که مناطق جنوبی، جنوب غربی و برخی قسمت‌های شمال غربی (مناطق شیب‌دار) مقادیر کمتری را نشان می‌دهند. این تفاوت نشان می‌دهد که مناطق با شاخص رطوبت توپوگرافی بالا، به دلیل تجمع بیشتر آب و کاهش نفوذپذیری خاک، مستعدتر به فرسایش آبی هستند. در مقابل، مناطق با شاخص پایین‌تر به دلیل شیب بیشتر و زهکشی بهتر، از نظر فرسایش پایدارتر هستند. شاخص قدرت جریان (SPI)، مشابه شاخص رطوبت توپوگرافی، مسیر جریان آب را پیش‌بینی می‌کند؛ اما به جای تمرکز بر رطوبت، SPI به ما می‌گوید که آب با چه سرعتی در یک منطقه خاص جریان پیدا می‌کند. در واقع، SPI نشان می‌دهد که شیب زمین چه تأثیری بر شتاب گرفتن جریان آب دارد. مقادیر SPI در حوضه آبخیز مشکین چای بین ۶/۷۵- تا ۱۳/۷۵ است. همان‌طور که شاخص SPI به طور مستقیم با پتانسیل فرسایش خاک ارتباط دارد، مناطق با SPI بالا مستعد فرسایش بیشتری هستند و برعکس. در شکل ۷، این رابطه به وضوح قابل

مشاهده است. مناطق جنوبی و جنوب غربی حوضه با مقادیر بالای SPI، بیشترین پتانسیل فرسایش را نشان می‌دهند، در حالی که مناطق شمالی حوضه با مقادیر پایین‌تر SPI، از پتانسیل فرسایش کمتری برخوردارند. در پژوهش حاضر، برای بررسی تأثیر توپوگرافی بر فرسایش خاک در حوضه آبخیز مشکین‌چای، لایه طول دامنه به عنوان یک متغیر کلیدی در نظر گرفته شد. با توجه به نقش مؤثر طول دامنه در فرایند فرسایش، این لایه با بهره‌گیری از اطلاعات شیب و تجمع جریان تولید گردید. بدین ترتیب، امکان ارزیابی کمی و کیفی تأثیر طول دامنه بر فرسایش خاک در حوضه مورد مطالعه فراهم شد. در شکل ۸ توزیع فضایی شاخص طول دامنه در محدوده حوضه آبخیز مشکین‌چای ارائه شده است. مقادیر طول دامنه برای حوضه آبریز مشکین‌چای در دامنه بین ۰ تا ۸۴/۷۰ متغیر است. مطالعات نشان داده است که رابطه مستقیمی بین طول دامنه و میزان فرسایش خاک وجود دارد. به عبارت دیگر، هرچه طول دامنه بیش‌تر باشد، پتانسیل فرسایش خاک در آن منطقه نیز بیش‌تر خواهد بود. این بدان معناست که در شرایط یکسان، پهنه‌هایی با طول دامنه بیش‌تر در معرض خطر فرسایش شدیدتر قرار دارند. در حوضه مورد مطالعه، اغلب پهنه‌هایی که طول دامنه بالایی دارند در قسمت‌های بالادست حوضه واقع شده‌اند. دلیل اصلی این امر، ناهمواری بالای مناطق بالادست است که باعث افزایش طول دامنه و در نتیجه افزایش پتانسیل فرسایش می‌شود. برعکس، در قسمت‌های پایین‌دست حوضه که ناهمواری کم‌تری وجود دارد، طول دامنه نیز کم‌تر بوده و در نتیجه خطر فرسایش خاک کم‌تر است.

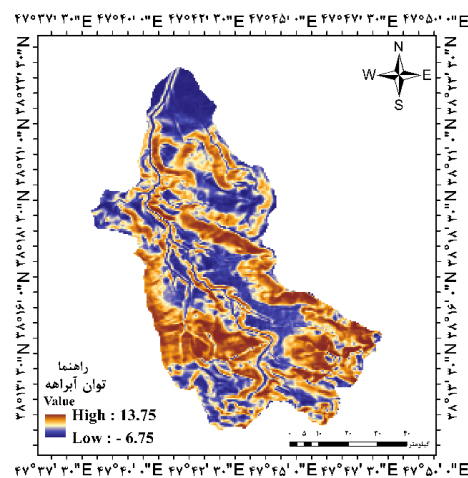
انحناء دامنه نشان‌دهنده میزان انحراف سطح از صاف بودن و یا به‌عبارتی دیگر محدب و مقعر بودن دامنه را نشان می‌دهد. از شاخص انحناء برای اندازه‌گیری میزان ناهمواری سطح زمین می‌توان استفاده نمود. از این‌رو شاخص انحناء برای حوضه آبخیز مشکین‌چای در محیط ArcMap تهیه شد که در شکل ۹ ارائه شده است. با توجه به شکل مقدار شاخص انحناء دامنه برای حوضه مورد مطالعه در دامنه بین ۳/۲۵- تا ۴/۷۵ به دست آمد.

شاخص انحناء سطح نشان‌دهنده واگرایی و هم‌گرایی توپوگرافیکی است. مقادیر مثبت انحناء پلان واگرایی جریان را نشان داده که دربرگیرنده خط‌الرأس‌ها است و مقادیر منفی آن هم‌گرایی جریان‌ها (دره‌ها) را نشان می‌دهد. واحد اندازه‌گیری انحناء برحسب رادیان بر متر یا درجه بر متر (درجه در ۱۰۰ متر) بیان می‌گردد. شکل ۱۰ شاخص انحناء پلان حوضه آبخیز مشکین‌چای را نشان می‌دهد. با توجه به شکل مقدار شاخص انحناء سطح برای حوضه مورد مطالعه بین ۱/۲۰- تا ۱/۸۲ متغیر است. همچنین با توجه به شکل قسمت‌های مرکزی و شمال شرقی حوضه و بخش‌های شمالی و مرکزی به‌ترتیب دارای مقادیر بیش‌تر و کم‌تری را به‌خود اختصاص داده است. در شکل ۱۰ نقشه شاخص انحناء سطح ارائه شده است.

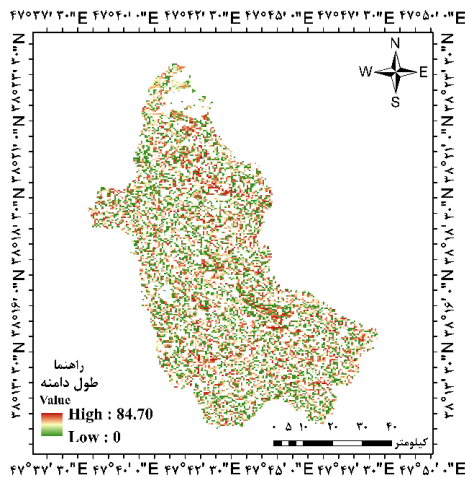
انحناء مقطع معرف اندازه تغییر شیب منحنی میزان، در طول مسیر جریان است. مقدار منفی این انحناء معرف سطوح محدب (کوژ) و مقدار مثبت آن سطوح مقعر (کاو) را نشان می‌دهد. شکل ۱۱ شاخص انحناء مقطع حوضه آبخیز مشکین‌چای را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج شکل مقدار به‌دست آمده برای حوضه مورد مطالعه بین ۲/۲۵- تا ۲/۶۵ می‌باشد. در شکل ۱۱ نقشه شاخص انحناء مقطع ارائه شده است.



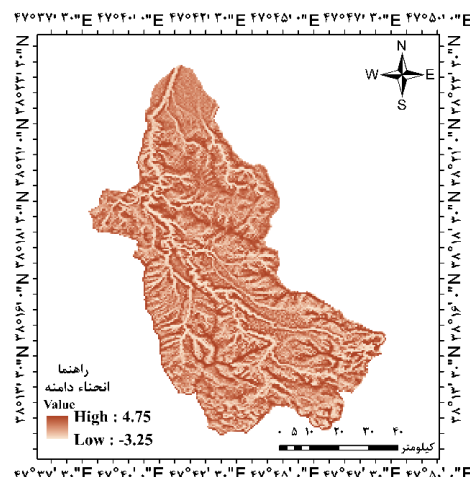
شکل ۶. نقشه شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI) حوضه آبخیز مشکین‌چای



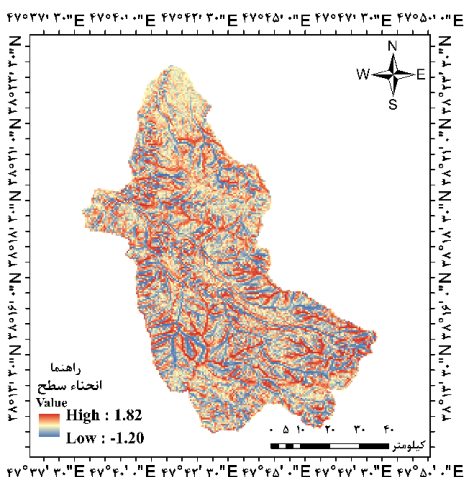
شکل ۷. نقشه شاخص توان آبراهه (SPI) حوضه آبخیز مشکین‌چای



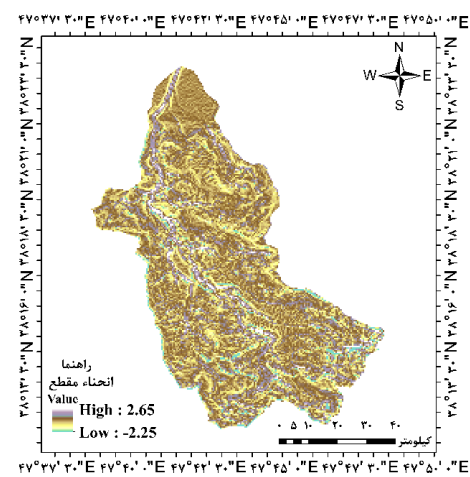
شکل ۸. نقشه شاخص طول دامنه (LSF) حوضه آبخیز مشکین چای



شکل ۹. نقشه شاخص انحناء دامنه (Curvature) حوضه آبخیز مشکین چای



شکل ۱۰. نقشه شاخص انحناء سطح (Plan Curvature) حوضه آبخیز مشکین چای



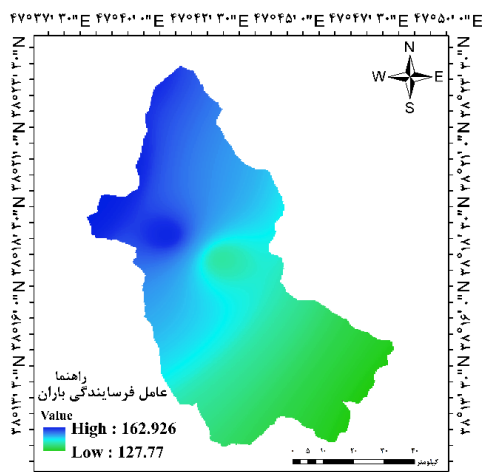
شکل ۱۱. نقشه شاخص انحناء مقطع (Profile Curvature) حوضه آبخیز مشکین چای

• برآورد میزان فرسایش خاک با استفاده از مدل RUSLE

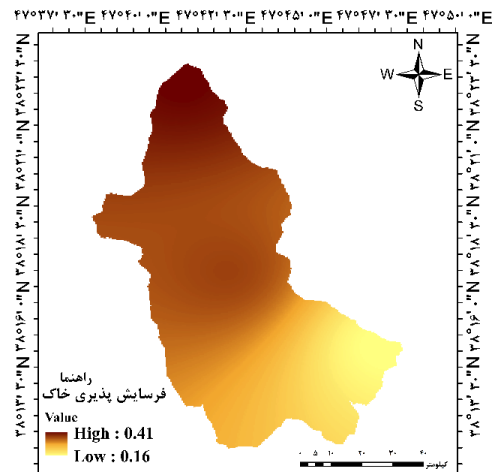
جهت محاسبه عامل فرسایش‌دهی باران از آمار بارش ماهانه و سالانه ۲۰ ساله ایستگاه‌های باران‌سنجی در منطقه مورد مطالعه مورد استفاده قرار گرفت. سپس با استفاده از شاخص اصلاح شده فورنیه با استفاده از رابطه ۱۲ و ۱۳، مقادیر فرسایش‌دهی باران با کاربرد رابطه ۱۱ مورد محاسبه قرار گرفت. با انتقال این اعداد به محیط برنامه Arc GIS و اعمال درون‌یابی به روش IDW نقشه رستری ۳۰ متری تغییرات مکانی تهیه گردید که در شکل ۱۲ ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود مقدار R از ۱۲۷/۷۷ تا ۱۶۲/۹۲ (مگاژول بر میلی متر بر هکتار در سال) متغیر است. بیش‌ترین مقدار آن به دلیل ارتفاع زیاد مربوط به قسمت‌های شمال و شمال غربی حوضه و کم‌ترین آن با توجه به ارتفاع کم مربوط به قسمت‌های مرکزی و جنوبی حوضه است. غلامی و همکاران در حوضه آبخیز چرداول ایلام نشان دادند که افزایش و کاهش عامل R با کاهش و افزایش ارتفاع در ارتباط است که نتایج پژوهش حاضر با نتایج ایشان تطابق دارد (Gholami et al., 2024). عامل فرسایش‌پذیری خاک با استفاده از جدول ۱ و نقشه بافت ۱:۲۵۰۰۰۰ خاک ایران نقشه رستری ۳۰ متری عامل فرسایش‌پذیری خاک تهیه گردید که در شکل ۱۳ نشان داده شده است. بر اساس نتایج به‌دست آمده مقدار عامل K در حوضه مطالعاتی بین ۰/۱۶ تا ۰/۴۱ متغیر است. قسمت‌های شمالی و بخش‌های مرکزی و جنوبی حوضه به ترتیب دارای بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار K را به خود اختصاص داده است. ذاکری‌نژاد و فلاح در حوضه آبخیز علامرودشت استان فارس نشان دادند که میزان فرسایش‌پذیری خاک در دامنه بین ۰/۱۴ تا ۰/۴۰ به دست آمد که با نتایج پژوهش حاضر مطابقت دارد (Zakeri Nejad & Fallah., 2023). جهت محاسبه عامل توپوگرافی از مدل ارتفاع رقومی (DEM 30m) ماهواره ASTER

استفاده شد. با استفاده از این نقشه و ابزار ArcHydro در محیط برنامه ArcGIS نقشه جهت جریان (Flow Direction) تولید شد سپس با استفاده از نقشه Fdr نقشه جریان تجمعی^۱ تهیه و استخراج و در گام بعد اقدام به تهیه نقشه شیب به درجه نیز با استفاده از نقشه DEM منطقه تهیه و تولید شد. در نهایت نقشه عامل توپوگرافی حوضه آبخیز مشکین‌چای تهیه شد که در شکل ۱۴ نشان داده شده است. عابدینی و همکاران در پژوهشی در حوضه آبخیز بالیخلوچای در استان اردبیل نشان دادند که عامل توپوگرافی در دامنه بین ۰ تا ۲۱/۱۸ به دست آمد که در دامنه‌های پرشیب به خصوص اطراف آبراهه‌ها به دلیل کوهستانی بودن حوضه مورد مطالعه این مقدار بیشتر است و با نتایج این پژوهش هم‌سو است (Abedini et al., 2022). با توجه به نتایج به دست آمده مقدار LS از ۰ تا ۱۵/۵۳ متغیر است. جهت تهیه نقشه عامل پوشش گیاهی (C) با استفاده از شاخص NDVI برای سال ۱۴۰۲ مقادیر عامل پوشش گیاهی مورد محاسبه قرار گرفت. همان‌گونه که در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود عامل C بین ۰ تا ۰/۵۹ متغیر است و میزان عامل C در قسمت‌های شمال و شمال غربی حوضه دارای بیشترین مقادیر و در مقابل قسمت‌های جنوب و جنوب غربی دارای کمترین مقدار پوشش گیاهی را به خود اختصاص داده‌اند. در شکل ۱۵ نقشه عامل پوشش گیاهی (C) حوضه مورد مطالعه ارائه شده است. نقشه عامل عملیات حفاظتی (P) نیز برای کل حوضه ۱ در نظر گرفته شد.

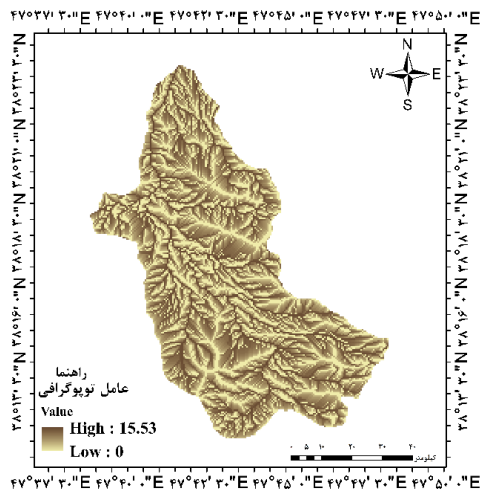
برای تهیه نقشه نهایی فرسایش خاک حوضه مورد مطالعه در نهایت با همپوشانی لایه‌های مدل RUSLE در محیط ArcMAP و با استفاده از ابزار Raster Calculator اقدام به تهیه نقشه خروجی گردید (شکل ۱۶). همان‌طور که در این نقشه ملاحظه می‌شود مقدار فرسایش سالانه خاک بین ۰ تا ۱۰۸/۶۱ تن بر هکتار در سال متغیر است. همچنین متوسط فرسایش سالانه خاک برای حوضه آبخیز مشکین‌چای برابر ۵۰/۸۹ تن در هکتار در سال به دست آمد. در نهایت با استفاده از یک رابطه رگرسیونی میزان اثرگذاری هریک از عامل‌های مدل RUSLE بر روی هدر رفت خاک تعیین گردید که هدر رفت خاک به‌عنوان متغیر وابسته و عامل‌های فرسایش پذیری باران، فرسایش پذیری خاک، پوشش گیاهی، توپوگرافی و حفاظت خاک به‌عنوان متغیر مستقل در نظر گرفته شدند. نتایج نشان داد که عامل توپوگرافی با ضریب تبیین ۰/۹۴ درصد بیشترین تأثیر را در هدر رفت سالانه خاک حوضه آبخیز مشکین‌چای دارد و با نتایج پژوهش عابدینی و همکاران که عامل توپوگرافی با ضریب تبیین ۰/۹۵ بیشترین تأثیرگذاری را در برآورد فرسایش سالانه خاک با استفاده از مدل RUSLE را نشان می‌دهد؛ مطابقت دارد (Abedini et al., 2022). در جدول ۲ ضریب همبستگی عامل‌های مدل RUSLE با هدر رفت سالانه خاک ارائه شده است.



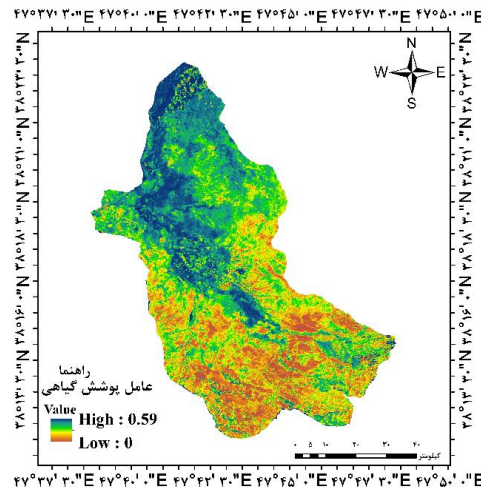
شکل ۱۲. نقشه عامل فرسایش‌پذیری باران (R) حوضه آبخیز مشکین‌چای



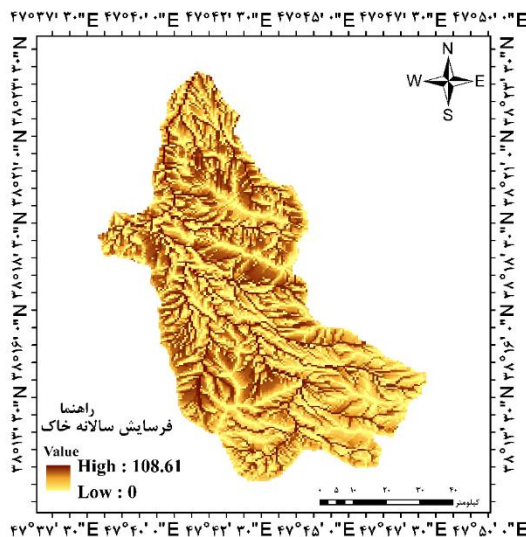
شکل ۱۳. نقشه عامل فرسایش‌پذیری خاک (K) حوضه آبخیز مشکین‌چای



شکل ۱۴. نقشه عامل توپوگرافی (LS) حوضه آبخیز مشکین چای



شکل ۱۵. نقشه عامل پوشش گیاهی (C) حوضه آبخیز مشکین چای



شکل ۱۶. نقشه فرسایش سالانه خاک (RUSLE) حوضه آبخیز مشکین چای

جدول ۲. ضریب تبیین (R²) فاکتورهای مدل RUSLE با هدررفت سالانه خاک

فاکتور	ضریب همبستگی (R ²)	رابطه رگرسیونی
R	۰/۴۹	Y= 8.743605x+001
K	۰/۳۴	Y= 2.591429x-002
LS	۰/۹۴	Y= 4.631086x+001
C	۰/۴۳	Y= 2.611682x-001
P	۰/۳۸	Y= 6.195196x-001

• ارتباط میان شاخص‌های استخراج شده با مقادیر فرسایش سالانه خاک

پس از این‌که نقشه‌های پهنه‌بندی هر یک از شاخص‌های TWI, SPI, Slope, Curvature, Plan Curvature, Profile Curvature, NDVI, SAVI, MSAVI, EVI و LSF به دست آمد. میزان همبستگی شاخص‌ها با مقدار فرسایش سالانه خاک

در حوضه آبخیز مشکین‌چای به دست آمد. به عبارتی دیگر تجزیه رگرسیون یک وسیله آماری است که برای برآورد ارزش یک متغیر کمی با توجه به رابطه‌اش با یک متغیر با یک یا چند متغیر کمی دیگر به کار می‌رود. این رابطه طوری است که با استفاده از یک متغیر می‌توان دیگری را پیش‌بینی کرد. همچنین این رابطه همیشه بین ۰ تا ۱ درصد است که ۰ نشان‌دهنده این است که مدل مورد استفاده هیچ یک از تغییرپذیری داده‌های پاسخ در اطراف میانگین آن را تبیین نمی‌کند و مقدار ۱ درصد نیز نشان می‌دهد که مدل مورد استفاده تغییرپذیری داده‌ها را در اطراف میانگین آن تبیین می‌کند. برای انجام تحلیل رگرسیون در این پژوهش، بعد از تهیه لایه‌های موردنیاز، مقادیر این لایه‌ها وارد محیط نرم‌افزار SPSS شده و با استفاده از ضریب همبستگی پیرسون انجام گردید. در این مدل فرسایش سالانه خاک به عنوان متغیر وابسته (Y) و شاخص‌های مورد استفاده به عنوان متغیرهای مستقل (X) در نظر گرفته شدند. با توجه به نتایج به دست آمده در بین شاخص‌های استخراج شده شاخص‌های Slope (۰/۷۴ درصد)، NDVI (۰/۴۸ درصد)، LSF (۰/۴۴ درصد) و شاخص Plan Curvatore (۰/۴۹ درصد) بیش‌ترین تأثیرگذاری و همبستگی معنی‌داری با میزان فرسایش سالانه خاک در حوضه آبخیز مشکین‌چای داشته‌اند. در جدول ۳ همبستگی شاخص‌های مورد مطالعه با میزان فرسایش سالانه خاک در حوضه آبخیز مشکین‌چای ارائه شده است.

جدول ۳. همبستگی مقادیر شاخص‌های مورد مطالعه با فرسایش سالانه خاک در حوضه آبخیز مشکین‌چای

RUSLE	TWI	SPI	NDVI	SLOPE	LSF	EVI	SAVI	MSAVI	Plan Curvatore	Profil Curvatore	Curvatore
	۰/۰۵۹	۰/۰۳	***۰/۴۸	***۰/۷۴	***۰/۴۴	*۰/۱۹	*۰/۱۵	۰/۰۲۵	***۰/۴۹	***۰/۳۶	۰/۲۵

* اطمینان در سطح ۹۵ درصد

** اطمینان در سطح ۹۹ درصد

۴- بحث و نتیجه‌گیری

مدل RUSLE که عوامل و پارامترهای اصلی این مدل شامل پارامترهای فرساینده‌گی باران (R)، فرسایش‌پذیری خاک (K)، توپوگرافی (LS)، پوشش گیاهی (C) و عامل عملیات حفاظتی خاک (P) است. در این پژوهش داده‌های مربوط به بارش از تعدادی از ایستگاه‌های باران‌سنجی منتخب داخل و مناطق مجاور حوضه آبخیز مشکین‌چای استفاده شد. برای تهیه نقشه عامل فرسایش‌پذیری خاک از نقشه بافت خاک ۱:۲۵۰۰۰۰ ایران اخذ شده از سایت فائو و اطلاعات جدول ۱ که توسط مورگان برای ضریب فرسایش‌پذیری خاک‌های مختلف اعدادی را پیشنهاد نموده است؛ استفاده شد. برای محاسبه عامل پوشش گیاهی از تصویر ماهواره‌ای لندست ۹ برای سال ۲۰۲۳ که از سایت زمین‌شناسی آمریکا تهیه شده بود استفاده شد. جهت تهیه عامل توپوگرافی نیز از مدل رقومی ارتفاع (DEM) با قدرت تفکیک ۳۰ متر (استر) اخذ شده از سایت زمین‌شناسی آمریکا استفاده شد همچنین برای عامل عملیات حفاظتی خاک نیز به دلیل عدم اجرای عملیات حفاظتی عدد ۱ در نظر گرفته شد برای کل حوضه. در نهایت پس از تهیه نقشه هریک از عوامل با ضرب عوامل با استفاده از ابزار Raster Calculator در محیط ArcMAP نقشه نهایی فرسایش به دست آمد. نقشه پهنه‌بندی فرسایش در حوضه مورد مطالعه نشان می‌دهد که میزان فرسایش بین ۰ تا ۱۰۸/۶۱ تن بر هکتار در سال متغیر است. همچنین متوسط فرسایش سالانه خاک برای حوضه مورد مطالعه نیز برابر با ۵۰/۸۹ تن بر هکتار در سال به دست آمد. مقدار زیاد تغییرات حاصل فیزیوگرافی، شرایط اقلیمی و پوشش گیاهی محدوده است که البته نباید عامل انسانی و تأثیر فعالیت‌های انسانی در حوضه را نادیده گرفت. بررسی نقشه عامل فرساینده‌گی باران در سطح حوضه نشان داد که مقادیر این عامل با توجه به نقشه R منطقه بین ۱۲۷/۷۷ تا ۱۶۲/۹۲ (مگاژول بر میلی متر بر هکتار در سال) است. که در نواحی پرشیب حوضه دارای مقادیر بیش‌تر بوده و در نواحی کم ارتفاع مخصوصاً نواحی مرکزی دارای کم‌ترین ارزش عددی هستند. به عبارتی دیگر کاهش عامل R رابطه نزدیکی با کاهش ارتفاع و باران در نواحی مختلف حوضه مورد مطالعه دارد. دیگر عامل این مدل که فرسایش‌پذیری خاک (K) بوده دارای مقدار بین ۰/۱۶ تا ۰/۴۱ متغیر بود که بیش‌ترین میزان حساسیت خاک به فرسایش در قسمت‌های شمالی و شمال غربی حوضه را شامل می‌شود. همچنین کم‌ترین مقدار آن نیز در قسمت‌های جنوبی را نشان می‌دهد. عامل توپوگرافی (LS) نیز تأثیر توپوگرافی بر میزان

فرسایش خاک را نشان می‌دهد. در واقع نشان داده شده است که افزایش طول و شیب می‌تواند سرعت جریان آب‌های سطحی را افزایش داده و منجر به افزایش فرسایش خاک شود. فرسایش خالص خاک به تغییرات شیب حساس‌تر از طول شیب است. طول شیب فاصله بین نقطه بالایی شروع شیب و نقطه‌ای است که در آن شیب به حداقل مقدار خود می‌رسد و در آن نقطه رسوب می‌کند. بنابراین متوسط مقدار این عامل در حوضه مورد مطالعه برابر با ۰ تا ۱۵/۵۳ است. عامل پوشش گیاهی (C) نشان‌دهنده تأثیر کاشت در مدیریت کشاورزی و اثر پوشش‌های درختی، علفی و زمینی بر کاهش فرسایش خاک است. با افزایش پوشش گیاهی فرسایش خاک کاهش می‌یابد. مقادیر این عامل برای حوضه مورد مطالعه بین ۰ تا ۰/۵۹ متغیر است.

نقشه خطر فرسایش خاک حوضه که از ترکیب و همپوشانی لایه‌های فرسایش‌پذیری باران، فرسایش‌پذیری خاک، پوشش گیاهی، توپوگرافی در محیط GIS تولید گردید. مقدار فرسایش در حوضه مورد مطالعه بین ۰ تا ۲۶/۶۳ تن بر هکتار در سال به دست آمد که این مقدار فرسایش خاک با نتایج سایر محققین نزدیک است. محمدی و همکاران میزان هدررفت خاک ناشی از فرسایش را در حوضه تالار با مدل RUSLE برآورد کردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد میزان فرسایش در منطقه مورد مطالعه بین صفر تا ۱۰۸/۶۱ تن بر هکتار در سال متغیر است (Mohammadi et al., 2018) و مشابه نتایجی است که سایر محققین از جمله اسفندیاری درآباد و همکاران، با ادغام شاخص‌های محیطی و پوشش گیاهی خطر فرسایش خاک در حوزه آبخیز عموقین استان اردبیل را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که مقدار متوسط فرسایش سالانه خاک برای کل حوزه در دامنه بین ۱/۱۲۱ تا ۵/۵۳ تن در هکتار در سال متغیر است (Esfandiari Darabad et al., 2022). واعظی و همکاران، ارزیابی مدل RUSLE در ترکیب با سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در عرصه‌های زهکش کوچک در منطقه نیمه‌خشک شمال غربی ایران پرداختند و نشان دادند میانگین هدررفت خاک برآوردی ۴۳/۶۸ تن در هکتار در سال بود (Vaezi et al., 2017). نورائی‌صفت و همکاران، روند تغییرات هدررفت خاک با تأکید بر نقش فرسایشی رواناب در حوضه آبریز رودخانه کل در استان هرمزگان پرداختند. مقدار بیشینه هدررفت سالانه خاک در شش سال مذکور در مناطق خاصی از حوضه بین ۱۴۰ تا ۴۶۳ تن در هکتار در سال و مقدار میانگین هدررفت سالانه خاک بین ۵/۵ تا ۲۹/۰۴ تن در هکتار در سال متغیر بود (Noraei Sefat et al., 2022). در این پژوهش از شاخص‌های پوشش گیاهی NDVI، SAVI، MSVI و EVI، و از شاخص‌های ژئومورفومتری شامل رطوبت توپوگرافی، قدرت آبراهه، شیب، طول دامنه، انحناء دامنه، انحناء سطح و شاخص انحناء مقطع استفاده شد. بدین منظور جهت برآورد شاخص‌های پوشش گیاهی و ژئومورفومتری از تصویر ماهواره‌ای لندست ۹ اخذ شده از سایت زمین‌شناسی آمریکا برای سال ۱۴۰۲ استفاده شد. در نهایت با توجه به نتایج به دست آمده، هریک از شاخص‌های مورد مطالعه را با فرسایش خاک مورد مقایسه قرار داده و میزان همبستگی و معنی‌داری آن‌ها مشخص گردید که کدام شاخص بیش‌ترین و کم‌ترین تأثیرگذاری را فرسایش منطقه مورد مطالعه دارد. بنابراین بر اساس نتایج به دست آمده شاخص‌های Slope (۰/۷۴ درصد)، NDVI (۰/۴۸ درصد)، LSF (۰/۴۴ درصد) و شاخص Plan Cuvatore (۰/۴۹ درصد) بیش‌ترین تأثیرگذاری و همبستگی معنی‌داری با میزان فرسایش سالانه خاک در حوضه آبخیز مشکین‌چای داشته‌اند. نتایج این پژوهش می‌تواند به‌عنوان ابزاری کارآمد در شناسایی مناطق با خطر بالای فرسایش خاک در حوضه آبخیز مشکین‌چای مورد استفاده قرار گیرد. این اطلاعات می‌توانند برای برنامه‌ریزی و اجرای پروژه‌های مدیریت و حفاظت خاک، نظیر کاشت پوشش گیاهی، ایجاد سازه‌های کنترل فرسایش و تدوین سیاست‌های حفاظت منابع طبیعی مفید باشند. همچنین، یافته‌های پژوهش می‌توانند به مدیران و سیاست‌گذاران محلی کمک کنند تا مناطق بحرانی را اولویت‌بندی کرده و از طریق اجرای اقدامات پیشگیرانه، میزان هدررفت خاک را کاهش دهند.

۵- سپاس‌گزاری

نویسندگان از حمایت‌های مادی و معنوی دانشگاه محقق اردبیلی تشکر می‌نمایند.

۶- فهرست منابع

- آرخی، صالح، و نیازی، یعقوب. (۱۳۸۹). بررسی کاربرد GIS و RS برای تخمین فرسایش خاک و بار رسوب با استفاده از مدل RUSLE (مطالعه موردی: حوضه بالادست سد ایلام). *پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*, ۱۷(۲), ۱-۲۷.
- آرمین، محسن، اسکندری جهمانی، فاطمه، الوانی نژاد، سهراب، میرزایی، محمدرضا. (۱۳۹۹). اولویت‌بندی مناطق حساس به فرسایش خاک با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای (مطالعه موردی: بخشی از شهرستان بهمنی در استان کهگیلویه و بویراحمد). *پژوهش‌های فرسایش محیطی*, ۱۰(۲), ۴۱-۵۸.

- اسفندیاری درآباد، فریبا، مصطفی‌زاده، رئوف، پاسبان، امیرحسام، نظافت تکل، بهروز. (۱۴۰۱). تلفیق شاخص‌های زمینی و پوشش گیاهی برای برآورد و شناسایی خطر فرسایش خاک در حوضه آبخیز عموقین اردبیل. *تحلیل فضایی مخاطرات محیطی*, ۹(۱), ۷۷-۹۶.
- امانپور، سعید، عیبات، محمد، عیبات، محمود، عیبات، ماجده. (۱۴۰۰). بررسی اثر تغییرات کاربری اراضی بر فرسایش خاک و تولید رسوب در حوضه رامهرمز با استفاده از طبقه‌بندی شیء‌گرا و مدل RUSLE. *تحقیقات آب و خاک ایران*, ۵۲(۳), ۶۳۵-۶۴۹.
- بابلی مؤخر، حمید، تقیان، علی رضا، شیرانی، کورش. (۱۳۹۷). ارزیابی نقشه پهنه‌بندی حساسیت زمین لغزش با استفاده از روش تلفیقی فاکتور اطمینان و رگرسیون لجستیک با بکارگیری شاخص‌های ژئومورفومتریک. *پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی*, ۷(۳), ۱۱۶-۹۱.
- حاتمی مسکونی، فتاح، تاریک، اسماعیل، علوی پناه، سیدکاظم (۱۳۹۷). سنجش از دور پوشش گیاهی، جلد اول، چاپ دوم، تهران، انتشارات دانشگاه تهران.
- حسامی، سیددانا، نظرزاده، حبیب، عرفانیان، مهدی، عبقری، هیراد، محمودی، محمدعلی، رستمی خلج، محمد. (۱۴۰۳). برآورد میزان فرسایش خاک در حوزه آبخیز گاوشان با استفاده از مدل RUSLE 3D. *محیط زیست و مهندسی آب*, ۱۰(۳), ۴۰۷-۳۹۲.
- ذاکری نژاد، رضا و فلاح، سلمان. (۱۴۰۲). ارزیابی خطر فرسایش آبی با استفاده از ترکیب مدل تجدید نظر شده‌ی جهانی فرسایش خاک (RUSLE) و نقشه تراکم خندقی در حوضه آبخیز علامرودشت استان. *پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی* ۱۱(۴), ۱۸۹-۲۰۹.
- رحیمی، خلیل، و مزبانی، مهدی. (۱۳۹۲). ارزیابی تغییرات فرسایش حوزه آبخیز سیوند طی سال‌های ۱۹۹۸ تا ۲۰۰۹ با استفاده از مدل RUSLE. *پژوهش‌های فرسایش محیطی*, ۳(۱), ۱۸-۱.
- رفاهی، حسینقلی (۱۳۸۵). فرسایش آبی و کنترل آن، انتشارات دانشگاه تهران. ص ۵۶۱.
- شگرخدايي، سیده زینب، فتح نیا، امان‌اله، هاشمی دره بادامی، سیروس. (۱۴۰۲). بررسی ارتباط آلاینده‌های هوا با شاخص‌های سنجش‌ازدور NDVI، NDBI، LST و ATI در شهر تهران. *جغرافیا و مخاطرات محیطی*, ۱۲(۳), ۱۲۳-۱۴۴.
- صادقی، سیدحمیدرضا، کله هوئی، مهین، نوری، علی، نادری مرنگلو، نسترن، هواسی، معصومه، پای‌فشرده، آراسته، خیرپرست، مهدی، مصطفایی یونجالی، سحر، پیروزنیا، زینب، حمزه‌بی‌بالانی، معصومه. (۱۴۰۲). تغییرات مکانی خطر فرسایش خاک در حوزه آبخیز بریموند استان کرمانشاه. *آب و خاک*, ۳۷(۳), ۴۴۳-۴۵۶.
- طاهری‌بابادی، زینب، متشفع، بهزاد، روشن، سیدحسین. (۱۴۰۱). تأثیر تغییر کاربری اراضی بر فرسایش خاک با استفاده از GIS و سنجش از دور بر مبنای مدل RUSLE (مطالعه موردی: شهرستان بهبهان). *خشک بوم*, ۱۲(۱), ۷۷-۹۲.
- عابدینی، موسی، جوادی علی بابالو، سجاده، مصطفی‌زاده، رئوف، پاسبان، امیرحسام. (۱۴۰۲). اولویت‌بندی زیرحوضه‌های آبخیز کوزه‌توپراقی بر اساس فرسایش خاک و تولید رسوب با استفاده از پسیاک اصلاح‌شده (MPSIAC) در محیط GIS. *مطالعات جغرافیایی مناطق خشک*, ۱۳(۴۹), ۱۸-۳۹.
- عابدینی، موسی، پاسبان، امیرحسام، حسن زاده، نسرین. (۱۴۰۳). بررسی میزان فرسایش خاک و ارتباط آن با شاخص‌های ژئومورفیک و پوشش گیاهی در حوضه آبخیز کوزه‌توپراقی، استان اردبیل. *نشریه جغرافیا و توسعه*, ۲۲(۷۷), ۵۵-۸۰.
- عابدینی، موسی، پاسبان، امیرحسام، نظافت تکل، بهروز. (۱۴۰۲). ارزیابی و تهیه نقشه کاربری اراضی حوضه آبخیز نیرچای با استفاده از روش شیء‌گرا، *جغرافیا و روابط انسانی*, ۵(۴), ۳۱۸-۳۲۸.
- غلامی لیلا، خالدی درویشان عبدالواحد، درختی سعید، کیانی هرچکانی محبوبه. ارزیابی اثرات تغییر کاربری اراضی بر فرسایش خاک با استفاده از مدل RUSLE در حوزه آبخیز چرداول ایلام. *مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران*. ۱۴۰۳؛ ۱۸ (۶۵): ۱-۱۴.
- فرخ‌زاده، بهنوش، منصوری، شهرزاد، سپهری، عادل. (۱۳۹۶). تعیین میزان همبستگی بین شاخص‌های پوشش گیاهی NDVI و EVI با شاخص خشکسالی هواشناسی SPI (مطالعه موردی: مراتع دشتی استان گلستان). *هواشناسی کشاورزی*, ۵(۲), ۵۶-۶۵.
- کلارستاقی، عطاله، احمدی، حسن، جعفری، محمد، و قدوسی، جمال. (۱۳۸۷). پیش بینی تغییرات احتمالی کاربری جنگل به دیم کاری با استفاده از مدل‌سازی احتمالاتی در حوزه آبخیز فریم صحرای استان مازندران. *پژوهش و سازندگی*, (ویژه‌نامه ۲۱) منابع طبیعی), ۵۲-۶۲.

محمدی، شاهین، کریمزاده، حمیدرضا، علیزاده، میثم. (۱۳۹۷). برآورد مکانی فرسایش خاک کشور ایران با استفاده از مدل RUSLE. *اکوهیدرولوژی*, ۵(۲), ۵۵۱-۵۶۹.

ملکی، صدیقه، خرمالی، فرهاد، کریمی، علیرضا. (۱۳۹۳). معرفی الگوریتم های مختلف جریان، برای تهیه نقشه شاخص خیزی و کربن آلی خاک در بخشی از اراضی لسی، منطقه توشن استان گلستان. *پژوهش های حفاظت آب و خاک*, ۲۱(۱), ۱۴۵-۱۶۲.

نورایی صفت الهام، بختیاری کیا مسعود، اکبریان محمد. روند تغییرات هدررفت خاک با تأکید بر نقش فرسایشی رواناب در حوضه آبریز رودخانه کل (استان هرمزگان). *پژوهش های فرسایش محیطی*. ۱۴۰۲; ۱۳ (۱): ۷۰-۹۵.

واعظی علی رضا، حاجی ملکی خالد. ارزیابی مدل RUSLE همراه شده با سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در عرصه های زهکش کوچک در منطقه نیمه خشک، شمال-غربی ایران. *مجله علوم ومهندسی آبخیزداری ایران*. ۱۳۹۶; ۱۱ (۳۸): ۱-۱۰.

References

- Abedini, M., Javadialibabalo, S., Mostafazadeh, R., Pasban, A.H. (2022). Prioritization of Kozetopraghi sub-watersheds based on estimated soil erosion and sediment yield using modified PSIAC model and GIS. *Arid Regions Geographic Studies*, 13(49), 18-39. 10. 2034/JARGS.2023.373965.0 [In Persian]
- Abedini, M., Pasban, A. H., & Hassan Zadeh, N. (2024). Assessment of Soil Erosion and its Relationship with Geomorphic and Vegetation Indices in the Kozeh topraghi Watershed, Ardabil Province. *Geography and Development*, doi: 10.22111/gdj.2024.47961.3619 [In Persian]
- Abedini, M., Pasban, A., & nezafat taklthe, B. (2023). Evaluation and Preparation of Land Use Map of Nirchai Watershed Using object oriented method. *Geography and Human Relationships*, 5(4), 318-328. doi: 10.22034/gahr.2023.393602.1849 [In Persian]
- Amanpour, S., Abiyat, M., abiyat, M., & Abiyat, M. (2021). Investigation of the Effect of Land Use Change on Soil Erosion and Sediment Production in Ramhormoz Basin Using Object-Oriented Classification and RUSLE Model. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 52(3), 635-649. doi: 10.22059/ijswr.2021.316628.668863 [In Persian]
- Aneseyee, A.B., Elias, E., Soromessa, T. and Feyisa, G.L., 2020. Land use/land cover change effect on soil erosion and sediment delivery in the Winike watershed, Omo Gibe Basin, Ethiopia. *Science of the Total Environment*, 728, :138776. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138776>
- Arkhi, S., & Niazi, Y. (2012). Investigating application of GIS and RS to estimate Soil Erosion and Sediment Yield Using RUSLE (Case study: Upper part of Ilam Dam Watershed, Iran). *Journal of Water and Soil Conservation*, 17(2), 1-27. 20.1001.1.23222069.1389.17.2.1.0
- Armin M, Eskandari Jahmani F, alvaninejad S, mirzaei M. Prioritization of erosion-sensitive areas using satellite imagery (Case study: part of Bahmei county in Kohgiluyeh and Boyerahmad province). *E.E.R.* 2020; 10 (2) :41-58. <https://magazine.hormozgan.ac.ir/article-1-545-fa.html> [In Persian]
- Azari, M., Oliaye, A. and Nearing, M.A., 2021. Expected climate change impacts on rainfall erosivity over Iran based on CMIP5 climate models. *Journal of Hydrology*, 593:125826. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125826>
- Babolimoakher, H., Taghian, A., & Shirani, K. (2019). Assessment of Landslide Susceptibility Zoning Map Using Confidence Factor-Logistic Regression Hybrid Method By Means of Geomorphometric Indices. *Quantitative Geomorphological Research*, 7(3), 91-11. 20.1001.1.22519424.1397.7.3.6.4 [In Persian]
- Bharath, A., Kumar, K.K., Maddamsetty, R., Manjunatha, M., Tangadagi, R.B. and Preethi, S., 2021. Drainage morphometry based sub-watershed prioritization of Kalinadi basin using geospatial technology. *Environmental Challenges*, 5: 100277. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100277>
- Bizzi, S., Lerner, D. N. 2015. The use of stream power as an indicator of channel sensitivity to erosion and deposition processes. *River Research and Applications*, 31, 16-27. <https://doi.org/10.1002/rra.2717>
- Borrelli, P., Robinson, D.A., Fleischer, L.R., Lugato, E., Ballabio, C., Alewell, C., Meusburger, K., Modugno, S., Schütt, B., Ferro, V. and Bagarello, V., 2017. An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion. *Nature communications*, 8(1): 2013. <https://www.nature.com/articles/s41467-017-02142-7>
- De Crop, W., Verschuren, D., Ryken, N., Basooma, R., Okuonzia, J.T. and Verdoodt, A., 2023. Accelerated Soil Erosion and Sedimentation Associated with Agricultural Activity in Crater-Lake Catchments of Western Uganda. *Land*, 12(5):976. <https://doi.org/10.3390/land12050976>
- Esfandiari Darabad, F., Mostafazadeh, R., Pasban, A. H., & Nezafat Takleh, B. (2022). Integrating terrain and vegetation indices to estimate and identify the soil erosion risk Amoughin watershed, Ardabil. *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards*, 9(1), 77-96. 20.1001.1.24237892.1401.9.1.5.1 [In Persian]

- Fagbohun, B.J., Anifowose, A.Y., Odeyemi, C., Aladejana, O.O. and Aladeboyeje, A.I., 2016. GIS-based estimation of soil erosion rates and identification of critical areas in Anambra sub-basin, Nigeria. *Modeling Earth Systems and Environment*, 2, 1-10. DOI:10.1007/s40808-016-0218-3
- Farrokhzadeh, B., Mansouri, S., & Sepehri, A. (2018). Determining the correlation between NDVI and EVI vegetation indices and SPI drought index (Case Study: Golestan rangelands). *Journal of Agricultural Meteorology*, 5(2), 56-65. doi: 10.22125/agmj.2018.59724 **[In Persian]**
- Feng, S., Qiu, J., Crow, W.T., Mo, X., Liu, S., Wang, S., Gao, L., Wang, X. and Chen, S., 2023. Improved estimation of vegetation water content and its impact on L-band soil moisture retrieval over cropland. *Journal of Hydrology*, 617:129015. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.129015>
- Gholami L, Khaledi Darvishan A, Derakhti S, Kiani Harchegani M. Effects Evaluation of land use change on soil erosion using the RUSLE model in the Chardavol watershed, Ilam. *jwmseir* 2024; 18 (65) : 1. <https://jwmsei.ir/article-1-1153-fa.html>
- Gilabert, M. A., J. Gonza 1ez-Piqueras, F., J. Garcia-Haro, J. Melia. 2002. A generalized soil-adjusted vegetation index. *Remote Sensing of Environment*. 82, 303–310. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00048-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00048-2)
- Hatami Maskouni, F., Tarik, E., & Alavi Panah, S. K. (2018). *Remote sensing of vegetation* (Vol. 1, 2nd ed.). Tehran: University of Tehran Press. **[In Persian]**
- Hesami, S. D., Nazarnejad, H., Erfanian, M., Abghari, H., Mahmoodi, M. A., & Rostami Khalaj, M. (2024). Estimation of Soil Erosion Rate in Gashan Watershed Using RUSLE 3D Model. *Environment and Water Engineering*, 10(3), 392-407. doi: 10.22034/ewe.2024.421459.1898 **[In Persian]**
- Hesami, S. D. , Nazarnejad, H. , Erfanian, M. , Abghari, H. , Mahmoodi, M. A. and Rostami Khalaj, M. (2024). Estimation of Soil Erosion Rate in Gashan Watershed Using RUSLE 3D Model. *Environment and Water Engineering*, 10(3), 392-407. doi: 10.22034/ewe.2024.421459.1898. **[In Persian]**
- Huang, S., X. Zheng, L. Ma, H. Wang, Q. Huang, G. Leng, E. Meng and Y. Guo. 2020. Quantitative contribution of climate change and human activities to vegetation cover variations based on GA-SVM model. *Journal of Hydrology*, 584: 124687. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124687>
- Huang, S., X. Zheng, L. Ma, H. Wang, Q. Huang, G. Leng, E. Meng and Y. Guo. 2020. Quantitative contribution of climate change and human activities to vegetation cover variations based on GA-SVM model. *Journal of Hydrology*, 584: 124687. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124687>
- Hurni, K., Zeleke, G., Kassie, M., Tegegne, B., Kassawmar, T., Teferi, E., Moges, A., Tadesse, D., Ahmed, M., Degu, Y. and Kebebew, Z., 2015. Economics of Land Degradation (ELD) Ethiopia Case Study: Soil degradation and sustainable land management in the rainfed agricultural areas of Ethiopia: An assessment of the economic implications. DOI:10.1607/s40808-016-0318-3
- Keesstra, S.D., Bouma, J., Wallinga, J., Tittone, P., Smith, P., Cerdà, A., Montanarella, L., Quinton, J.N., Pachepsky, Y., Van Der Putten, W.H. and Bardgett, R.D., 2016. The significance of soils and soil science towards realization of the United Nations Sustainable Development Goals. *Soil*, 2(2):111-128. <https://doi.org/10.5194/soil-2-111-2016>
- Kelarestaghi, A.A, Ahmadi, H., Jafari, M., & Ghodosi, J.. (2009). Probabilistic Prediction of land use change from forest to dry farming using bayesian theorem Modeling in farim drainage basin. *pajouhesh-vasazandegi*. 6(21), 52-62. <https://www.sid.ir/paper/19121/fa> **[In Persian]**
- Koirala, P., Thakuri, S., Joshi, S. and Chauhan, R., 2019. Estimation of soil erosion in Nepal using a RUSLE modeling and geospatial tool. *Geosciences*, 9(4), p.147. <https://doi.org/10.3390/geosciences9040147>
- Luca, F., Conforti, M., Robustelli, G. 2012. Comparison of GISbased gully mapping using bivariate and multivariate statistics: Northern Calabria, South Italy, *Geomorphology*, 134, 297–308. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.07.006>
- Maleki, S., Khormali, F., & Karimi, A. (2014). Introducing different flow direction algorithms to map topographic wetness index and soil organic carbon in a loess hillslope of Toshan area, Golestan Province, Iran. *Journal of Water and Soil Conservation*, 21(1), 145-162. 20.1001.1.23222069.1393.21.1.8.3 **[In Persian]**
- Merchan, L., Martínez-Graña, A.M., Alonso Rojo, P. and Criado, M., 2023. Water Erosion Risk Analysis in the Arribes del Duero Natural Park (Spain) Using RUSLE and GIS Techniques. *Sustainability*, 15(2), p.1627. <https://doi.org/10.3390/su15021627>
- Mohammadi, S., Karimzadeh, H., & Alizadeh, M. (2018). Spatial estimation of soil erosion in Iran using RUSLE model. *Iranian journal of Ecohydrology*, 5(2), 551-569. doi: 10.22059/ije.2018.239777.706 **[In Persian]**
- Moore, I.D., Grayson, R.B. 1991. Landon. Digital terrain Modeling: A review of hydrological, Geomorphological and Biological application. *Hydrol*. 5: 3-30. <https://doi.org/10.1002/hyp.3360050103>
- Noraei Sefat E, Bakhtyari Kia M, Akbarian M. Investigation of Soil Loss Changes with an Emphasis on Runoff Erosion in the Kol River Catchment. *E.E.R.* 2023; 13 (1) :70-95. <https://magazine.hormozgan.ac.ir/article-1-720-fa.html> **[In Persian]**
- Qin, Ch. Z., Zhu, A. X., Pei, T., Li, B. L., Scholten, T., Behrens, T., Zhou, CH. H. 2009. An approach to computing topographic wetness index based on maximum downslope gradient, *Precision Agriculture*, 12(1): 32-43. DOI:10.1007/s11119-009-9152-y

- Qiu, J., Crow, W.T., Wang, S., Dong, J., Li, Y., Garcia, M. and Shangguan, W., 2022. Microwave-based soil moisture improves estimates of vegetation response to drought in China. *Science of The Total Environment*, 849:157535. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157535>
- Rahimi, Kh., & Mazbani, M. (2013). Evaluation of Sivand Basin Erosion by RUSLE Model During 1998 to 2009. *Environmental Erosion Research Journal*, 3(1), 1-18. 20.1001.1.22517812.1392.3.1.1.3 [In Persian]
- Refahi, H. (2006). *Water erosion and its control*. Tehran: University of Tehran Press, p. 561. [In Persian]
- Rejith, R.G., Anirudhan, s., Sunararajan. 2019. Delineation of Groundwater Potential Zones in hard rock Terrain Using Integrated Remote Sensing GIS and MCDM Techniques A Case Study From Vamanapuram River Basin, Kerala, India, Gis and Geostatistical Techniques for Groundwater science, 349-364. DOI:10.1016/B978-0-12-815413-7.00025-0
- Renard, K.G., and Freidmund, J.R. 1994. Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the RUSLE, National Agricultural Library, *Journal of Hydrology*, 157: 287-306. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(94\)90110-4](https://doi.org/10.1016/0022-1694(94)90110-4)
- Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A., McCool, D.K. and Yoder, D.C., 1996. Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). *Agriculture handbook*, 703. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10669-006-5359-x>
- Robinson, D.A., Panagos, P., Borrelli, P., Jones, A., Montanarella, L., Tye, A. and Obst, C.G., 2017. Soil natural capital in Europe; a framework for state and change assessment. *Scientific reports*, 7(1), p.6706. DOI:10.1038/s41598-017-06819-3
- Sadeghi, S., Kalehhouei, M., Noori, A., Naderi Marangelu, N., Havasi, M., Payfeshoordeh, A., Khairparast, M., Mostafaei Younjali, S., Pirooznia, Z., & Hamzeh Bibalani, M. (2023). Spatial Soil Erosion Risk at the Brimvand Watershed in Kermanshah Province, Iran. *Water and Soil*, 37(3), 443-456. doi: 10.22067/jsw.2023.80775.1247 [In Persian]
- Sengupta, S., Mohinuddin, S. and Arif, M., 2021. Sub-watershed prioritization for soil erosion potentiality estimation in tenughat catchment, India. *Geocarto International*, 8(12), 1-30. <https://doi.org/10.1080/10106049.2021.2017008>
- Serbaji, M.M., Bouaziz, M. and Weslati, O., 2023. Soil Water erosion modeling in Tunisia using RUSLE and GIS integrated approaches and Geospatial Data. *Land*, 12(3), 548. DOI:10.3390/land12030548
- Shogrkhodaei, S. Z., Fathnia, A., & Hashemi Darebadami, S. (2023). Investigating the Relationship between Air Pollutants and Remote Sensing Indices (NDVI, NDBI, LST, and ATI) in Tehran. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 12(3), 123-144. doi: 10.22067/geoh.2023.79729.1305 [In Persian]
- Taheri Babadi, Z., Moteshaffeh, B., & Roshan, S. H. (2022). Assessment The Impact of Land use Changes on Soil Erosion using GIS and Remote Sensing Based on The RUSLE Model (Case Study: Behbahan County). *Journal of Arid Biome*, 12(1), 77-92. doi: 10.29252/aridbiom.2023.19670.1924 [In Persian]
- Ullah, S., Syed, N.M., Gang, T., Noor, R.S., Ahmad, S., Waqas, M.M., Shah, A.N. and Ullah, S., 2022. Recent global warming as a proximate cause of deforestation and forest degradation in northern Pakistan. *Plos one*, 17(1): e0260607. DOI:10.1371/journal.pone.0260607
- Vaezi, A., Haji MaAssessment of the RUSLE model integrated with RS and GIS in semi-arid small drainage areas, NW Iran. *jwmseir* 2017; 11 (38) :1-10. <https://jwmsei.ir/article-1-480-fa.html> [In Persian]
- Wang, S., Xu, X. and Huang, L., 2022. Spatial and temporal variability of soil erosion in Northeast China from 2000 to 2020. *Remote Sensing*, 15(1), :225. <https://doi.org/10.1080/01431160110114538>
- Wischmeier, W.H., and Smith, D.D. 1978. Predicting rainfall erosion, losses: a guide to conservation planning, United States Department of Agriculture Handbook, Washington DC. 537: 13-27. DOI: 10.4236/jep.2016.710114
- Xiong, M., & Leng, G., 2024. Global soil water erosion responses to climate and land use changes. *Catena*, 241, 108043. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108043>
- 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]