



Analysis and Zoning of Soil Erosion Rate and its Relationship with Hydrogeomorphic Indicators and Vegetation, Case Study: Khiavchai watershed, MeshkinShahr



Mousa Abedini*¹, AmirHesam Pasban²



This paper is an open access and licenced under the CC BY NC licence.



DOI:10.22034/HYD.2023.58528.1708

Reference to this article: Abedini, M.; Pasban, A.H. (2023). Analysis and Zoning of Soil Erosion Rate and its Relationship with Hydrogeomorphic Indicators and Vegetation, Case Study: Khiavchai watershed, MeshkinShahr. *Hydrogeomorphology*, 11(38): 40-59

Keywords

Soil Erosion, Regression, RUSLE model, Normal Vegetation Index, Hydrogeomorphic, Khiavchai watershed, Northwest of Iran.

Receive Date: 2023/09/20

Accept Date: 2023/12/24

Available: 2024/04/21

A B S T R A C T

Soil erosion is one of the serious environmental threats that can affect the political, social and economic aspects of countries. One of the widely used experimental models for estimating the amount of soil erosion is the modified global soil erosion equation known as the RUSLE model. The purpose of this research is to analyze and zone the amount of soil erosion and its relationship with hydrogeomorphic indicators and vegetation cover of Khiavchai Meshkinshahr watershed in Ardabil province. RUSLE model factors include rain erosion (R), soil erodibility (K), topography (LS), vegetation (C) and protection operations (P). respectively, by using rainfall data, soil texture layer, digital model of height and land use were prepared in the environment of geographic information system (GIS) and after overlapping the layers, the amount of annual soil erosion between 0 and 150.54 tons per hectare per year in The area level was estimated. In the next step, the hydrogeomorphic and vegetation indices that are effective in soil erosion include topographic moisture index (TWI), waterway capacity index (SPI), domain curvature index (Curvature), section curvature index (Profil Curvature), surface curvature index (Plan) Curvature) and Normalized Vegetation Index (NDVI) were created in ArcMap environment and zoning maps were prepared. The results of this research also showed that the topography factor with a correlation coefficient of 0.92% had the greatest impact on the estimation of annual soil erosion by the RUSLE model. In another study, the relationship between hydrogeomorphic indices and vegetation cover with annual soil erosion rate was conducted, and the results showed that normal vegetation cover indices and cross-sectional curvature were the most and least effective with correlation coefficients of 0.57 and 0.05, respectively, compared to other indices. The results of this research confirm the possibility of combining the effective indicators of hydrogeomorphic and vegetation on erosion, as well as the possibility of using other effective indicators and the capabilities of RS and GIS to quantitatively estimate the amounts of soil erosion.

* Corresponding Author: Mousa Abedini

E-mail: Abedini@uma.ac.ir

1. Professor of Physical Geography (Geomorphology), University Of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran, Email: Abedini@uma.ac.ir.

2. Ph.D in Physical Geography Student in Department(Geomorphology), University Of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran, Email: a.hesam773@gmail.com.

Extended Abstract

Introduction

Soil erosion and production of sediment load in the watershed has become one of the most important environmental problems today, therefore, preventing its occurrence is considered as one of the most important factors to protect natural resources. The increase in soil loss of catchment areas is a constant challenge that, with the increase in population and the pressure on natural resources and unsustainable cultivation in sloping soils and lands, causes a decrease in production in the lands (Motamadirad et al., 2023; 148). The RUSLE empirical equation is the most appropriate method for soil erosion risk assessment due to the need for little data and easy model structure. This is especially true for most developing countries where the use of more complex models may be limited by the lack of acceptable input data (Ammar et al., 2023; 2).

Methodology

The data and tools used in the research include: 25,000 digital layers of the country's mapping organization, a digital elevation model with a resolution of 30 meters, daily, monthly and annual rainfall statistics from the country's meteorological organization, a 1:250,000 map of Iran's soil texture, Landsat OLI 8 satellite image. Regarding 2021, the studied area was obtained from the website www.usgs.gov, and in the next step, radiometric corrections, including Flash atmospheric correction, were applied to these images.

RUSLE Model: In order to estimate the amount of erosion in the studied time period, the RUSLE model was used. The modified global model of soil erosion is used as a developed model of the global model of soil erosion to predict the annual soil erosion from a certain level (RezaeiMoghadam et al., 2022; 5; Renard and Freidmund, 1994; 291). RUSLE model is based on 6 factors including rain erosivity factor (R), soil erodibility factor (K), topography factor (L.S), vegetation factor (C) and protection operation factor (P) which is in the form of equation (1) (Wischmeier and Smith, 1987; 31)

$$A = R * K * C * LS * P$$

Rain erosion (R) determines the effect of rainfall intensity on sheet and furrow erosion. Soil erodibility (K) refers to the sensitivity of soil to erosion and is controlled by climate, soil properties, land use and vegetation. It is an essential component in estimating soil erosion. LS refers to slope length and slope factor. P is the protection factor and C is the coverage management factor. P and C have dimensionless effects on the management and cropping system, while the LS factor has dimensionless effects on slope and slope length. All these dimensionless parameters are normalized in a relative unit (Dabral et al., 2008; 1788).

Results and Discussion

To prepare the annual average soil erosion map from the product of rain erosion factors (R), soil erodibility (K), vegetation management (C), topography (LS), and protection operations (P) based on equation 1 in the geographic information system environment. GIS was calculated and the values of annual soil loss (A) were obtained in terms of tons per hectare per year. The resulting map has been presented in Figure (7). According to Figure (7), the values of the annual soil erosion map in the Khiavchai watershed ranged from 0 to 154.50 tons per hectare per year at the pixel level. Finally, using a regression relationship, the effect of each factor of RUSLE model on soil loss was determined, with soil loss as a dependent variable and factors of rain erosion, soil erodibility, vegetation, topography, and soil protection as independent variables. The results showed that the topography factor with the correlation coefficient had the greatest effect on the annual soil loss of Khiavchai watershed. Table (3) shows the correlation coefficient of RUSLE model factors with annual soil loss.

Conclusions

In this research, the analysis and zoning of the soil erosion rate from the modified global model of soil erosion and its relationship with the hydrogeomorphic indicators and vegetation of Khiavchai-Meshkinshahr watershed was done using RS and GIS technologies. To implement the RUSLE model, the layers of rain erosion (R), soil erodibility (K), topography (LS), vegetation (C), and soil protection operations (P) were prepared in the ArcMap environment and were overlapped with each other to create an annual soil erosion map (RUSLE). The results of the implementation of the RUSLE model showed that the annual soil erosion in the area varied between 0 and 154.50 tons per hectare per year. The highest amount of which could be seen in the northern part of the domain and smaller amounts are scattered in the middle parts of the domain. Investigating the regression relationships between the RUSLE model factors and the annual

soil erosion rate showed that the topography factor with the highest coefficient of determination of 0.92 was the most important in estimating the annual soil erosion with the RUSLE model. In the next step, the map of environmental indicators was prepared and zoned, including watercourse power, topographic humidity, slope curvature, surface curvature, section curvature and normal vegetation index in GIS environment. Then, using the regression relationship, the correlation of each index in the Excel environment with the amount of annual soil erosion in Khiavchai watershed was studied. The results of the study showed that the Normalized Difference Vegetation Index with a value of 0.57% had a high correlation coefficient compared to other studied indices. Also, the lowest value was related to the surface curvature index with a value of 0.05.

References

- Ammar, A.K., Alaa, m., Fadhil, K., Alzahrani, H., &Hamad, S. (2023). Predicting soil erosion rate at transboundary sub-watersheds in Ali Al-Gharbi, Southern Iraq, Using RUSLE-Based GIS Model, *Sustainability*, 15:1776.
- Dabral, p.p., Baithuri, N. &Pandey, A. (2008). Soil erosion assessment in a hilly catchment of North Eastern India using USLE, GIS and remote sensing, *Water Resources Management*, 22(12):1783-1798.
- Motamedirad, M., ZanganehAsadi, M.A., &Ajam, H. (2023). Investigating the rate of soil erosion and sediment production using the RUSLE model and the modified Pesiak method (case study: Kal Ismail catchment area of Shahrood, Semnan province), *Quantitative Geomorphology Research*, 11(4): 147-165.
- Renard, K.G. &Freidmund, J.R. (1994).Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the RUSLE, *Journal of Hydrology*. 157, 287-306.
- RezaeiMoghadam, M.H., Hijazi, A., &Mozbani, M. (2022). Estimation of sediment erosion in the Sikan catchment basin using the modified global soil erosion model, *Hydrogeomorphology*, 32(9): 1-23.
- Wischmeier, W.H., & Smith, D.D. (1978).Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning (No. 537). Department of Agriculture, Science and Education Administration.



تجزیه و تحلیل و پهنه‌بندی میزان فرسایش خاک و ارتباط آن با شاخص‌های هیدروژئومورفیک و پوشش گیاهی، مطالعه موردی: حوضه آبریز خیاوچای، مشکین شهر



موسی عابدینی*^۱، امیرحسام پاسبان^۲



این مقاله به صورت دسترسی باز و با لایسنس CC BY NC کرییتیو کامنز قابل استفاده است.



ارجاع به این مقاله: عابدینی، موسی؛ پاسبان، امیرحسام (۱۴۰۲). تجزیه و تحلیل و پهنه‌بندی میزان فرسایش خاک و ارتباط آن با شاخص‌های هیدروژئومورفیک و پوشش گیاهی، مطالعه موردی: حوضه آبریز خیاوچای، مشکین شهر. هیدروژئومورفولوژی، ۱۰ (۳۵): ۵۹-۱۹.

DOI:10.22034/HYD.2023.58528.1708



چکیده

فرسایش خاک از جمله تهدیدات زیست‌محیطی جدی است که می‌تواند بر جنبه‌های سیاسی، اجتماعی و اقتصادی کشورها تأثیر بگذارد. یکی از مدل‌های تجربی پرکاربرد برای تخمین میزان فرسایش خاک معادله جهانی فرسایش خاک اصلاح‌شده موسوم به مدل RUSLE می‌باشد. هدف از این پژوهش تجزیه و تحلیل و پهنه‌بندی میزان فرسایش خاک و ارتباط آن با شاخص‌های هیدروژئومورفیک و پوشش گیاهی حوضه آبریز خیاوچای مشکین شهر می‌باشد. فاکتورهای مدل RUSLE شامل فرسایش باران (R)، فرسایش‌پذیری خاک (K)، توپوگرافی (LS)، پوشش گیاهی (C) و عملیات حفاظتی (P) است که به ترتیب عامل فرسایش باران با استفاده از داده‌های بارندگی، لایه بافت خاک، مدل رقمی ارتفاعی و کاربری اراضی می‌باشد در محیط سامانه اطلاعات مکانی (GIS) تهیه شده‌اند و پس از روی هم‌گذاری لایه‌ها، مقدار فرسایش سالانه خاک بین ۰ تا ۱۵۰/۵۴ تن بر هکتار در سال در سطح حوضه برآورد شد. در گام بعد شاخص‌های هیدروژئومورفیک و پوشش گیاهی که در رخداد فرسایش خاک موثر هستند شامل شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI)، شاخص توان آبراهه (SPI)، شاخص انحنا دامنه (Curvature)، شاخص انحنا مقطع (Profil Curvature)، شاخص انحنا سطح (Plan Curvature) و شاخص پوشش گیاهی عادی (NDVI) در محیط ArcMap ایجاد و نقشه‌های پهنه‌بندی تهیه شدند. نتایج این پژوهش همچنین 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 انحنا مقطع به ترتیب با ضریب همبستگی ۰/۵۷ و ۰/۰۵ نسبت به شاخص‌های دیگر به ترتیب بیش‌ترین و کم‌ترین تأثیرگذاری را دارا می‌باشند. نتایج این پژوهش امکان تلفیق شاخص‌های موثر هیدروژئومورفیک و پوشش گیاهی بر فرسایش و نیز امکان استفاده از سایر شاخص‌های موثر و قابلیت‌های RS و GIS را جهت تخمین کمی مقادیر فرسایش خاک را تأیید می‌نماید.

کلیدواژه‌ها

فرسایش خاک، رگرسیون، مدل RUSLE، شاخص پوشش گیاهی عادی، هیدروژئومورفیک، حوضه آبریز خیاوچای، شمال غرب ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۰۳

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۱/۲۹

* نویسنده مسئول: موسی عابدینی

رایانامه: Abedini@uma.ac.ir

۱- استاد گروه جغرافیای طبیعی (ژئومورفولوژی)، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران، Email: Abedini@uma.ac.ir

۲- دانشجوی مقطع دکترای گروه جغرافیای طبیعی (ژئومورفولوژی)، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران، Email: A.hesam773@gmail.com

مقدمه

فرسایش خاک و تولید بار رسوب در حوضه آبریز امروزه به یکی از معضلات مهم زیست‌محیطی تبدیل شده است بنابراین، جلوگیری از بروز آن از مهم‌ترین عوامل برای حفاظت منابع طبیعی به شمار می‌رود از طرفی افزایش هدررفت خاک در حوضه‌های آبریز، چالشی مداوم است که با افزایش جمعیت و فشار وارده به منابع طبیعی و کشت و کارهای ناپایدار در خاک‌ها و اراضی شیب‌دار، موجب کاهش تولید در اراضی می‌گردد (معمدی‌راد و همکاران، ۱۴۰۲: ۱۴۸). از سوی دیگر فرسایش خاک در مقیاس بزرگ یکی از شدیدترین مشکلاتی است که می‌تواند منجر به آسیب زیست‌محیطی شود (سرباجی^۱ و همکاران، ۲۰۲۳: ۱۵). در نتیجه بر جنبه‌های سیاسی، اجتماعی و اقتصادی کشورها به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه تأثیر می‌گذارد (هیسل^۲ و همکاران، ۲۰۲۲: ۷۸۲). برآورد تقریبی نشان می‌دهد که سالانه ۱۰ میلیون هکتار از زمین‌های زراعی به دلیل فرسایش خاک تخریب می‌شود. به همین دلیل، تولیدات کشاورزی کاهش می‌یابد که منجر به کاهش اقتصاد و افزایش سوءتغذیه می‌شود (الجزولی^۳ و همکاران، ۲۰۱۹: ۳۶۲). در طی ۴۰ سال اخیر مدل USLE به سبب داشتن محاسبات ساده، پرکاربردترین روش تخمین پتانسیل فرسایش خاک و برآورد اثرات عملیات‌های مدیریتی مختلف بوده است که دارای ویژگی‌ها و دامنه کاربردی منحصر به فرد خود است (واسیم^۴ و همکاران، ۲۰۲۳: ۲). معادله جهانی از دست دادن خاک (USLE) توسط بخش کشاورزی ایالات متحده در سال ۱۹۷۸ برای پیش‌بینی میزان خاک فرسایش یافته در طول زمان ایجاد شد (وایتینگتون^۵، ۲۰۲۲: ۳۲۵). این مدل از جمله روش‌های تجربی است که میانگین بلندمدت فرسایش شیاری و ورقه‌ای را بر اساس داده‌های نمودار جمع‌آوری شده در شرق ایالات متحده ارزیابی می‌کند. محققان نسخه جدیدتری از مدل USLE با نام معادله تجدیدنظر شده جهانی هدررفت خاک^۶ (RUSLE) ارائه داده‌اند که برآوردهای دقیق‌تری از فاکتورهای R، K، C و P فرسایش خاک ارائه می‌دهد. علی‌رغم این که یک روش تجربی است، ترکیب RS^۷، GIS^۸ و RUSLE برآوردهای فرسایش خاک و توزیع جغرافیایی آن را با هزینه‌های قابل قبول و با دقت بیشتر در مناطق بزرگ‌تر تولید می‌کند. معادله تجربی RUSLE به دلیل نیاز به داده کم و ساختار مدل آسان، مناسب‌ترین روش برای ارزیابی خطر فرسایش خاک است. این امر به‌ویژه برای اکثر کشورهای در حال توسعه صادق است جایی که استفاده از مدل‌های پیچیده‌تر ممکن است به دلیل فقدان داده‌های ورودی قابل قبول محدود شود (آمر^۹ و همکاران، ۲۰۲۳: ۲). تاکنون مطالعات زیادی در خصوص فرسایش خاک و ارتباط آن با عوامل محیطی در داخل و خارج کشور انجام شده است برای مثال، سانتوس^{۱۰} و همکاران (۲۰۱۷)، بررسی تغییرات کاربری اراضی و نقش آن در فرسایش خاک در کشور برزیل، سینگ^{۱۱} و همکاران (۲۰۲۰)، بررسی تغییرات کاربری اراضی بر روی تالاب هارایک در ایالت پنجاب کشور هندوستان، الصیاد و همکاران (۲۰۲۳)، مدل‌سازی فرسایش خاک در تونس با استفاده از مدل RUSLE و GIS، سرباجی و همکاران (۲۰۲۳)، پیش‌بینی میزان فرسایش خاک در جنوب عراق با استفاده از مدل RUSLE، لوگ^{۱۲} و همکاران (۲۰۲۳)، ارزیابی فرسایش خاک با استفاده از مدل راسل در کوه گورا، در ایران نیز زندگی و همکاران (۱۳۹۱)، ارزیابی نقشه خطر فرسایش خاک و ارتباط آن با برخی عوامل محیطی در حوضه آبریز وازرود مازندران، واعظی و همکاران (۱۳۹۶)، ارزیابی مدل RUSLE در عرصه‌های زهکش کوچک در منطقه نیمه‌خشک شمال‌غربی ایران، فیضی‌زاده (۱۳۹۶)، بررسی تغییرات کاربری اراضی و نقش آن در فرسایش حوضه سد علویان در شهرستان مراغه استان آذربایجان شرقی، امانپور و همکاران (۱۴۰۰)، بررسی اثر تغییر کاربری اراضی بر فرسایش خاک و تولید رسوب در حوضه رامهرمز با استفاده از طبقه‌بندی شی‌گرا و مدل RUSLE، عابدینی و همکاران (۱۴۰۱)، ارتباط شاخص‌های پوشش گیاهی و ژئومورفیک با مقادیر فرسایش و رسوب در حوضه آبریز کوزه توپراقی، عابدینی و همکاران (۱۴۰۲)، بررسی تاثیر تغییرات کاربری اراضی در یک دوره بیست سال بر میزان فرسایش و رسوب حوضه رضی‌چای، مددی و همکاران (۱۴۰۲)، بررسی و ارزیابی میزان هدررفت خاک در کاربری‌های اراضی حوضه آبریز آتشگاه با استفاده از مدل تجربی فرسایش خاک جهانی، نور و عرب‌خدری (۱۴۰۲)، برآورد فرسایش خاک و نسبت تحویل رسوب را با استفاده از مدل RUSLE در پایگاه تحقیقات

1- Serbaji
2- Hessel
3- El Jazouli
4- Waseem
5- Whittington

6- Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)
7- Remotr Sensing (RS)
8- Geographic Information System (GIS)

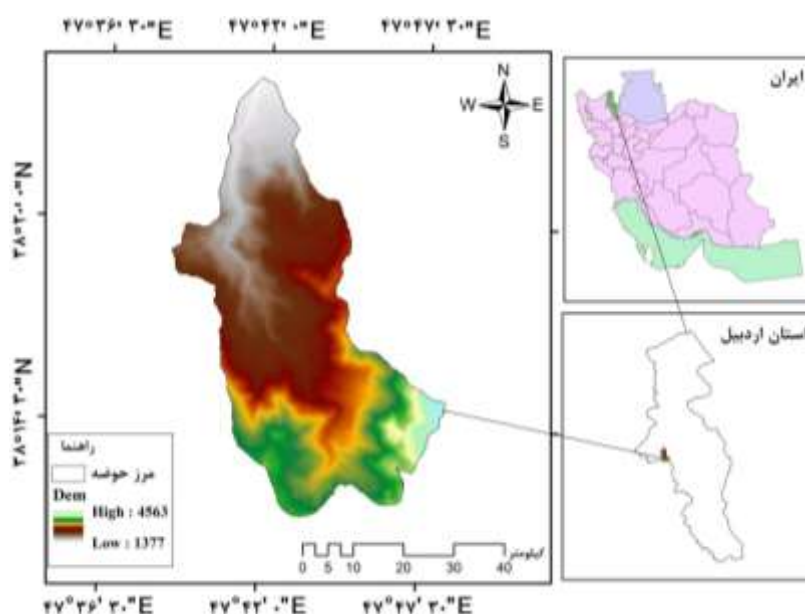
9- Ammar
10- Santos
11- Singh
12- Laougue

حفاظت خاک سنگانه اشاره کرد. بنابراین هدف از این پژوهش تجزیه و تحلیل و پهنه‌بندی میزان فرسایش خاک و ارتباط آن با شاخص‌های هیدروژئومورفیک و پوشش گیاهی در حوضه آبریز خیاوچای مشکین شهر می‌باشد.

۲- مواد و روش

۲-۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز خیاوچای به وسعت تقریبی ۱۴۰ کیلومتر مربع در حاشیه غربی کوه سبلان، در جنوب شهرستان مشکین شهر قرار گرفته، از نظر تقسیمات سیاسی بخشی از استان اردبیل و از لحاظ تقسیمات جاماب از زیرحوضه‌های آبریز بزرگ خزر محسوب می‌شود. که با هشت زیرحوضه در محدوده جغرافیایی ۴۷ درجه و ۳۶ دقیقه و ۳۰ ثانیه تا ۴۷ درجه و ۴۷ دقیقه و ۳۰ ثانیه طول شرقی و ۳۸ درجه و ۱۴ دقیقه و ۳۰ ثانیه تا ۳۸ درجه و ۲۰ دقیقه و ۰ ثانیه عرض شمالی و در ارتفاع ۴۵۶۳ متر از سطح دریا در محل قله کسری در ارتفاعات جنوبی حوضه و کمینه ارتفاع ۱۳۷۵ متر در محل ایستگاه هیدرومتری پل سلطانی واقع است (عابدینی و همکاران، ۱۴۰۱). در شکل (۱) موقعیت جغرافیایی حوضه مورد مطالعه ارائه شده است.



شکل (۱): موقعیت جغرافیایی حوضه آبریز خیاوچای

Figure (1): Geographical location of Khiavchai watershed

۲-۲- داده‌ها و ابزار پژوهش

داده‌ها و ابزارهای مورد استفاده در پژوهش شامل: لایه‌های رقومی ۲۵۰۰۰ سازمان نقشه برداری کشور، مدل رقومی ارتفاعی با تفکیک ۳۰ متری، آمار بارندگی روزانه، ماهانه و سالانه از سازمان هواشناسی کشور، نقشه ۱:۲۵۰۰۰۰ بافت خاک ایران، تصویر ماهواره‌ای لندست OLI 8 مربوط به سال ۲۰۲۱ منطقه مورد مطالعه از سایت www.usgs.gov دریافت و در مرحله بعد تصحیحات رادیومتریکی شامل تصحیح اتمسفری Flaash رو تصاویر روی این تصاویر اعمال شد. در این پژوهش از نرم افزارهای ArcGIS 10.7 جهت ترسیم نقشه‌ها و تحلیل‌های مرتبط به آن و همچنین از نرم افزار ENVI 5.3 جهت تهیه لایه‌های پوشش گیاهی و کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه و نیز از نرم‌افزارهای آماری همچون Excel جهت محاسبات آماری و روابط رگرسیونی معادلات بهره‌گیری شده است. همچنین از نرم‌افزارهای جانبی دیگری همچون Google Earth نیز جهت برداشت نقاط کنترلی و تهیه برخی از اطلاعات مورد نیاز استفاده خواهد شد.

۲-۳- روش تحقیق

۲-۳-۱- مدل RUSLE

به‌منظور برآورد میزان فرسایش در دوره زمانی مورد مطالعه از مدل RUSLE استفاده خواهد شد. مدل جهانی فرسایش خاک اصلاح شده به‌عنوان مدل توسعه یافته مدل جهانی فرسایش خاک برای پیش‌بینی فرسایش سالانه خاک از یک سطح معین به‌کار می‌رود (رضایی مقدم و همکاران، ۱۴۰۱: ۵؛ رنارد و فریموند^۱، ۱۹۹۴: ۲۹). مدل RUSLE از ۶ عامل شامل عامل فرساینده‌گی باران (R)، عامل فرسایش‌پذیری خاک (K)، عامل توپوگرافی (L.S)، عامل پوشش گیاهی (C) و عامل عملیات حفاظتی (P) تبعیت می‌کند که به‌صورت رابطه (۱) است (ویشمایر و اسمیت^۲، ۱۹۸۷: ۳۱).

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

فرسایش باران (R) تأثیر شدت بارندگی را بر فرسایش شیار و ورقه‌ای تعیین می‌کند. فرسایش‌پذیری خاک (K) به حساسیت خاک نسبت به فرسایش اشاره دارد و توسط آب و هوا، خواص خاک، کاربری زمین و پوشش گیاهی کنترل می‌شود. این یک جزء ضروری در برآورد فرسایش خاک است. LS به طول شیب و فاکتور شیب اشاره دارد. P به عامل حفاظتی و C عامل مدیریت پوشش است. C و P اثرات بدون بعد بر مدیریت و سیستم کشت دارند در حالی که عامل LS تأثیر بدون بعد بر شیب و طول شیب دارد. همه این پارامترهای بدون بعد در یک واحد نسبی نرمال شدند (دابریل^۳ و همکاران، ۲۰۰۸: ۱۷۸۸).

- عامل فرساینده‌گی باران (R)

فرسایش بارندگی (R) از نظر کمی تأثیر بارندگی بر سطح خاک را منعکس می‌کند (ویشمایر و اسمیت، ۱۹۶۵: ۳۱). شرایط فرسایشی خاک با برخورد قطرات باران با خاک سطحی و تبدیل انرژی جنبشی به انرژی پتانسیل تعیین می‌شود. بنابراین فرسایش بارندگی با افزایش شدت بارندگی افزایش می‌یابد (آرنولدز^۴، ۱۹۸۰: ۱۳۱). فرسایش ناشی از بارندگی را می‌توان به‌صورت رابطه (۲) بیان کرد (چادهوری و نیاک^۵، ۲۰۰۳: ۳۸۸).

$$R = 79 + 0.363 * P_a \quad (2)$$

که در آن، P_a میانگین بارندگی سالانه است.

- عامل فرسایش‌پذیری خاک (K)

عامل فرسایش‌پذیری خاک بیانگر حساسیت ذاتی خاک به فرسایش است و سهولت جدا شدن ذرات خاک بر اثر انرژی جنبشی قطرات باران و انتقال آن‌ها به وسیله نیروی رواناب را نشان می‌دهد (کلارستاقی و همکاران، ۱۳۹۸: ۵۷). مورگان برای ضریب فرسایش‌پذیری خاک‌های مختلف اعدادی را پیشنهاد نموده است که در نشان داده شده است (احمدی، ۱۳۸۶). به‌منظور تهیه نقشه عامل فرسایش‌پذیری خاک (K) از نقشه بافت خاک ۱:۲۵۰۰۰۰ ایران و اطلاعات جدول (۱) استفاده گردید.

1- Renard and Freidmund
2- Wischmeier and Smith

3- Dabral
4- Arnoldus

5- Choudhury and Nayak

جدول (۱): ضریب فرسایش پذیری خاک (K) (منبع: احمدی، ۱۳۸۶).

Table (1): soil erodibility coefficient (K) (source: Ahmadi, 2016)

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 سنی
۰/۳۷	خاک‌های لومی	۰/۴۸	خاک‌های سیلتی لومی
۰/۳۷	خاک‌های لومی رسی	۰/۲۵	خاک‌های سیلتی رسی

- طول شیب و فاکتورهای شیب (LS)

فاکتورهای طول شیب (L) و شیب (S) با استفاده از مدل ارتفاعی دیجیتال (DEM¹) محاسبه خواهد شد. طول شیب، فاصله‌ای را که در آن رسوب‌گذاری صورت می‌گیرد یا جریان زمینی به یک کانال مجزا برخورد می‌کند توصیف می‌کند (ویشمایر و اسمیت، ۱۹۷۸: ۳۱). تاثیر طول و شیب بر فرسایش توسط عوامل L و S بیان می‌شود. شیب تند مهم‌ترین عامل تعیین‌کننده هدررفت خاک نسبت به طول شیب است. طول شیب به‌عنوان فاصله بین منبع نقطه جریان زمینی و نقطه رواناب در یک کانال مجزا با شیب ملایم اندازه‌گیری می‌شود (اولرانمی^۲ و همکاران، ۲۰۲۰: ۱۰۸). هدررفت خاک در واحد سطح با افزایش طول شیب افزایش می‌یابد (گنساری و رامش، ۲۰۱۶: ۹۵۷). علاوه بر این، ویژگی‌های سه‌بعدی زمین به‌طور متناسب بر افت خاک تاثیر می‌گذارد (هانگ^۳ و همکاران، ۲۰۲۰: ۱۸۰). این نشان می‌دهد که شیب‌ها افت خاک را در تسکین پیچیده کنترل می‌کنند و بنابراین، یک پارامتر ضروری برای محاسبه ضریب LS در نظر گرفته می‌شود. عامل L و S را می‌توان به‌صورت رابطه (۴) بیان کرد (ویز^۴ و همکاران، ۲۰۱۸: ۱۳۶۹).

(۴)

$$LS = [(\text{Flow accumulation grid}) \times (\text{cell size}/22.13)]^{0.4} \times [\text{Sin}(\text{slope grid} \times 0.01745)/0.0896]^{1.3}$$

که در آن Flow Accumulation تجمع جریان به سمت بالای شیب برای هر سلول، Cell Size اندازه سلول‌های شبکه و Slope شیب، به‌دست آمده از نقشه شیب (برحسب درجه) می‌باشد. از عدد ۰/۰۱۷۴۵ برای تبدیل واحد به رادیان در محیط GIS استفاده می‌گردد.

- ضریب مدیریت پوشش گیاهی (C)

مدیریت پوشش گیاهی (C) با اندازه‌گیری نسبت هدررفت خاک از زمین زراعی ارزیابی می‌شود (ویشمایر و اسمیت، ۱۹۷۸: ۳۱). این الگوی کشت مناسب و اتخاذ شیوه‌های مدیریتی برای کاهش فرسایش خاک را نشان می‌دهد (وانگ^۵ و همکاران، ۲۰۲۰: ۳۶۵۳). بسیاری از محققان فاکتور C را بر اساس طبقات کاربری زمین/پوشش زمین ارزیابی کرده‌اند (پاندی^۶ و همکاران، ۲۰۰۷: ۷۳۳). عوامل مدیریت زراعی بر اساس کلاس‌های LULC^۷ به بررسی ماهیت متغیر فرسایش خاک در طول سال‌ها کمک می‌کند. نقشه کاربری/پوشش زمین با استفاده از تصویر لندست ۸ OLI تهیه خواهد شد. طبقات کاربری زمین/پوشش زمین مقادیر C را از ۰ تا ۱ اختصاص دادند (جدول ۲).

1- Digital Elevation Model
2- Olorunfemi
3- Huang
4- Vijith

5- Wang
6- Pandey
7- LandUse/LandCover

جدول (۲): ارزش‌های اجرایی مدیریت پوشش برای کلاس‌های مختلف کاربری/پوشش زمین (پاندی و همکاران، ۲۰۰۷: ۷۳۳).

Table (2): Performance values of cover management for different land use/cover classes (Source: Pandey et al., 2007; 733)

پهنه آبی	زمین بایر	پوشش گیاهی	کشاورزی	مسکونی	طبقات کاربری زمین/پوشش زمین
۰	۰/۱۳	۰/۰۰۰۸	۰/۲۸	۰/۰۰۲	فاکتور c

- عامل عملیات حفاظت خاک (P)

عملکرد تولید رسوب و رواناب توسط شیوه‌های مختلف حفاظت از خاک کنترل می‌شود و C عوامل مهمی برای کاهش فرسایش خاک و رواناب سطحی هستند میزان فرسایش خاک با روش‌های حمایتی انجام شده در زمین‌های زیر کشت تعیین می‌شود. کشاورزی خطی، کشت نواری و روش‌های کشت تراس برای کنترل فرسایش خاک موثر است. جدول ۳ مقادیر عملیات حفاظتی شیب را نشان می‌دهد. هر چه ارزش عملیات حفاظتی بالاتر باشد، اقدامات انجام شده برای محدود کردن فرسایش خاک کم‌تر است (شین، ۱۹۹۹: ۴۷).

جدول (۳): مقادیر عملیات حفاظتی در شیب‌های مختلف (منبع: شین، ۱۹۹۹: ۴۷).

Table (3): Values of protection operations in different slopes (source: Shin, 1999; 47)

شیب (درصد)	۷-۰	۱۱-۷/۳	۱۱/۶-۳/۱۷	۱۷/۲۶-۶/۸	<۲۸/۶
P فاکتور	۰/۲۷	۰/۳	۰/۴	۰/۴۵	۰/۵

- تلفیق لایه‌ها و تهیه نقشه فرسایش خاک

پس از تهیه لایه‌ها و طبقه‌بندی هر کدام از آن‌ها مطابق شرایط منطقه و دامنه اعداد به دست آمده، نقشه نهایی فرسایش خاک با هم‌پوشانی لایه‌های مذکور تهیه و به کلاس‌های مختلف فرسایش طبقه‌بندی شد. آماده‌سازی و تهیه لایه‌های اطلاعاتی مورد نیاز به صورت رستری، مقدار هدررفت سالانه خاک از طریق حاصل ضرب عامل‌های مدل RUSLE با توجه به رابطه ۱ و با استفاده از ابزار Spatial Analyst و گزینه Raster Calculator در محیط ArcGIS بر حسب تن بر هکتار در سال محاسبه خواهد شد.

۳-۲- شاخص‌های هیدروژئومورفیک و پوشش گیاهی

- شاخص پوشش گیاهی نرمال شده (NDVI^۲)

شاخص تفاضل پوشش گیاهی نرمال شده (NDVI) پرکاربردترین معیار رویش پوشش گیاهی است که با استفاده از فن‌آوری سنجش‌از‌دور به دست می‌آید. برای تصویر لندست این شاخص به صورت رابطه ۶ می‌باشد (عابدینی و همکاران، ۱۴۰۱: ۱۱۴).

$$NDVI = (IR - R) / (IR + R) \quad (۶)$$

این شاخص معرف انعکاس انرژی خورشیدی از سطح زمین است که انواع شرایط پوشش گیاهی را نشان می‌دهد. مقادیر NDVI بین ۱- و ۱+ در نوسان است. زمانی که پاسخ طیفی اندازه‌گیری شده از سطح زمین برای هر دو باند خیلی مشابه باشد، مقادیر NDVI به صفر نزدیک می‌شود. برای محاسبه شاخص NDVI از باندهای ۴ و ۵ تصویر لندست OLI ۸ سال ۲۰۲۱ استفاده شد (رابطه ۶) و نقشه شاخص مذکور برای منطقه مورد مطالعه با استفاده از نرم‌افزار Envi 5.6 به دست آمد.

1- Shin

2- Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

- شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI¹)

شاخص رطوبت توپوگرافی اولین بار به وسیله بون و کرکبی (۱۹۷۹) در مدل بارش-رواناب TOPMODEL معرفی شد که می‌تواند تأثیر توپوگرافی را بر تولید رواناب به صورت کمی بیان کند و به عنوان یک شاخص فیزیکی، مکان مناطق اشباع سطحی و توزیع مکانی رطوبت خاک را برآورد می‌کند (ملکی و همکاران، ۱۳۹۳). TWI در مقایسه با ویژگی‌های توپوگرافی ترکیبی دیگر، مانند شاخص قدرت جریان در بسیاری موارد در کاربردهای مربوط به کشاورزی دقیق استفاده می‌شود که نمونه‌هایی از این کاربردها شامل استفاده از نقشه TWI به عنوان شاخصی برای الگوی رطوبت خاک در مزرعه به خصوص در اراضی تپه ماهوری، ترکیب TWI و ویژگی‌های توپوگرافی اصلی (مانند زاویه شیب، انحنای شیب) با یکدیگر به عنوان ورودی برای تهیه نقشه رقومی خاک برای پیش‌بینی توزیع مکانی نوع و ویژگی‌های خاک، در مقیاسی بهتر می‌باشد (کین^۲ و همکاران، ۲۰۰۹). شاخص رطوبت توپوگرافی به صورت رابطه ۷ ارائه شده است (مور و گریسون^۳، ۱۹۹۱: ۸).

$$TWI = A_s / \tan \beta \quad (7)$$

در رابطه ذکر شده A_s سطح ویژه حوضه برحسب مساحت تجمعی بالادست (مساحت بالادست در واحد طول خط تراز)، β درجه شیب می‌باشد. این شاخص، گرایش آب را به جمع شدن در هر نقطه از درجه شیب می‌باشد. این شاخص، گرایش آب را به جمع شدن در هر نقطه از حوضه (برحسب A_s) و تمایل نیروهای گرانشی را به انتقال آب به پایین دست (برحسب $\tan \beta$ به عنوان شیب هیدرولیکی تقریبی) توصیف می‌کند.

- شاخص توان آبراهه (SPI⁴)

توان آبراهه میزان زمان مصرف انرژی است و به طور گسترده در مطالعات فرسایش و محل رسوب به عنوان اندازه‌گیری قدرت فرسایش آب جاری استفاده می‌شود هم‌چنین این شاخص ظرفیت انتقال فضایی توزیع شده را محاسبه می‌کند و ممکن است برای ارزیابی چشم‌انداز فرسایش بیش از سایر رویکردها مناسب باشد، زیرا این امر منجر به انعطاف و انحراف جریان می‌شود. این توزیع فضایی، پتانسیل خسارت خاک را با استفاده از بارش رواناب و باران یکنواخت محاسبه می‌کند شاخص توان آبراهه (SPI) به صورت رابطه ۸ محاسبه می‌شود (شارما^۵، ۲۰۱۰: ۲۰۵).

$$SPI = A_s \tan B \quad (8)$$

در رابطه ذکر شده A_s و $\tan B$ هستند به ترتیب منطقه خالص حوضه و شیب محلی هستند.

- شاخص انحنای دامنه (Curvator)

انحنای دامنه یا انحنای شیب حوضه زهکشی را درجایی نشان می‌دهد که به نمایش فرایندهای فرسایش و رواناب کمک می‌کند. مقادیر انحنای نمایه، مورفولوژی توپوگرافی را نشان می‌دهد که دارای یک انحنای مثبت، منفی و یک مقدار صفر است انحنای مثبت به صورت یک مقعر رو به بالا و انحنای منفی نشانگر محدب رو به پایین است هم‌چنین مقدار صفر نشان‌دهنده سطوح صاف است (رژ^۶ و همکاران، ۲۰۱۹: ۳۵۴). از این رو شاخص انحنای دامنه با استفاده از DEM با ابعاد 20×20 در محیط Arc Map تهیه گردید و در نهایت سه لایه

- 1- Topographic Wetness Index (TWI)
- 2- QIN
- 3- Moore and Grayson
- 4- Stream Power Index (SPI)
- 5- Sharma
- 6- Rejith

شامل Curvature, profile Curvatur, Plan curvature ایجاد گردید.

- شاخص انحناء سطح (Profile Curvator)

انحناء سطح معرف اندازه تغییر شیب منحنی میزان، در طول مسیر جریان است و بنابراین انحناء سطح نشان‌دهنده شدت جریان آب و فرایندهای حمل و رسوب‌گذاری می‌شود. به طوری که مقدار منفی این انحنا سطوح محدب (کوژ) و مقدار مثبت آن سطوح مقعر (کاو) را نشان می‌دهد (بابلی‌موخر، ۱۳۹۷؛ ۹۷). شاخص انحناء سطح به صورت رابطه ۹ ارائه شده است.

$$n \times g(a \times d^2 + b \times e^2 + c + d \times e) / (d^2 + e^2)(1 + (d^2e^2)^{1.5}) \quad (9)$$

در این رابطه n : برای تبدیل واحدها از m^3/s^2 به $m^{1/2}$ استفاده می‌شود. g : تأثیر گرانش زمین را در نظر می‌گیرد. b : تأثیر شیب جانبی را در نظر می‌گیرد. شیب جانبی، زاویه بین یک سطح شیب‌دار و یک سطح افقی است. a : تأثیر شیب طولی را در نظر می‌گیرد. شیب طولی، زاویه بین یک خط شیب‌دار و یک خط افقی است. c : این پارامتر تأثیر تغییر جهت شیب را در نظر می‌گیرد. تغییر جهت شیب، زاویه بین دو خط شیب‌دار مجاور است. d : فاصله بین نقطه مورد نظر و نقطه مرجع است. e : ارتفاع نقطه مورد نظر نسبت به نقطه مرجع است (Guzzetti et al., 2000; 14).

- شاخص انحناء مقطع (Plan Curvator)

انحناء مقطع، بیانگر تغییرات جهت در طول یک منحنی می‌باشد بنابراین نشان‌دهنده واگرایی و هم‌گرایی توپوگرافیکی است. مقادیر مثبت انحناء مقطع واگرایی جریان را نشان داده که دربرگیرنده خط الراس‌ها و ستیغ‌ها 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 (بابلی‌موخر، ۱۳۹۷؛ ۹۷). شاخص انحناء مقطع به صورت رابطه ۱۰ ارائه شده است.

$$n \times g(b \times d^2 + a \times e^2 - c \times d \times e) / (d^2 + e^2)^{1.5} \quad (10)$$

در این معادله n : ضریب مقیاس، g : شتاب گرانش، b : منبع اصلی Curvator اصلی، a : منبع فرعی Curvator اصلی، c : منبع Curvator فرعی، d : مقدار مشتق اول تابع Z نسبت به x ، e : مقدار مشتق اول تابع Z نسبت به y می‌باشد (Guzzetti et al., 2000; 14).

پس از این که نقشه‌های پهنه‌بندی هر یک از شاخص‌های TWI, SPI, Slope, Curvature, Plan Curvature, Profile Curvature, NDVI به دست آمد. ارتباط این شاخص‌ها با میزان فرسایش سالانه خاک به صورت رابطه رگرسیونی در محیط ExcelStat به دست آمد تا میزان همبستگی آن‌ها مشخص شود. 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 (آرخی و همکاران، ۱۴۰۱: ۴۴). برای انجام تحلیل رگرسیون در این پژوهش، بعد از تهیه لایه‌های مورد نیاز، مقادیر متوسط این لایه‌ها وارد محیط نرم‌افزار ExcelStat شده و با استفاده از ماژول Statistics روش REGRESS عمل رگرسیون انجام گردید. در این مدل رگرسیونی متوسط فرسایش سالانه خاک به‌عنوان متغیر وابسته (Y) و شاخص‌های TWI, SPI, NDVI, Profile Curvature, Plan Curvature, Curvature, Slope به‌عنوان متغیرهای مستقل (X) در نظر گرفته شدند. از این رو با توجه به توضیحات مذکور نتایج حاصل از شاخص‌ها که در جدول (۴) ارائه شده است می‌توان نتیجه گرفت که عامل پوشش گیاهی عادی (NDVI) با ضریب تعیین ۰/۵۷ و شاخص انحنای سطح با ۰/۰۵ نسبت به سایر شاخص‌های مورد مطالعه به ترتیب بیش‌ترین و کم‌ترین

همبستگی را دارا می‌باشند. نتایج این پژوهش مشابه نتایجی است که عابدینی و همکاران (۱۴۰۱: ۱۲۴) به آن دست یافتند. نتایج حاصل از همبستگی میان فرسایش و شاخص‌های مورد مطالعه در جدول (۴) ارائه شده است.

جدول (۴): همبستگی میان فرسایش سالانه خاک با شاخص‌های محیطی در حوضه آبریز خیاوچای

Table (4): Correlation between average soil erosion and environmental indicators in Khiavchay watershed

شاخص	ضریب همبستگی (R^2)	رابطه رگرسیونی
TWI	۰/۰۹	$y = -0.3736x + 2.7268$
SPI	۰/۰۸	$y = -0.7699x + 4.6086$
NDVI	۰/۵۷	$y = 8.0982x - 3.1132$
Curvatore	۰/۲۰	$y = -54.182x + 2.4568$
Profil Curvator	۰/۰۵	$y = 91.938x + 2.3994$
Plan Curvator	۰/۳۰	$y = 96.886x + 2.2896$

۳- یافته‌ها

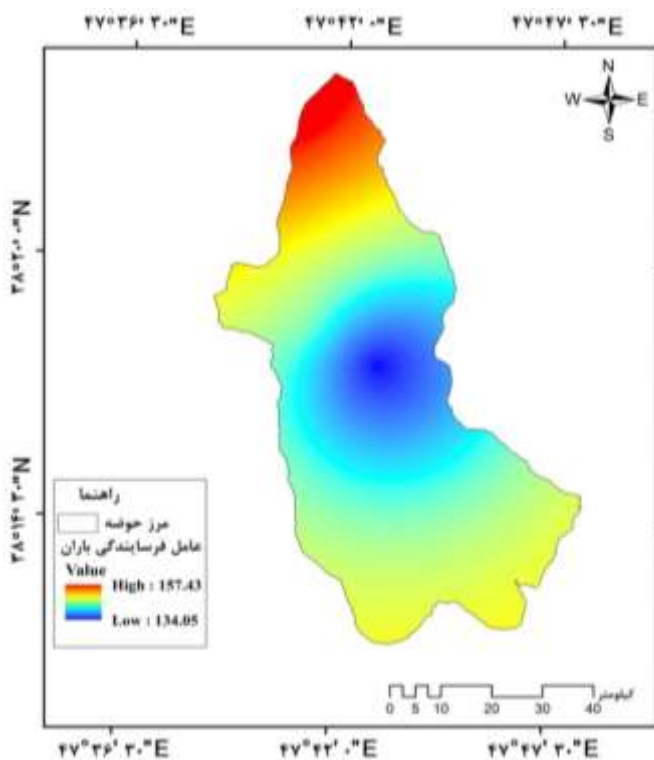
نتایج حاصل از محاسبه میزان شاخص فرساینده‌گی باران در ایستگاه‌های مورد مطالعه با استفاده از شاخص اصلاح شده فورنیه (رابطه ۶) در طی دوره آماری ۱۰ ساله ایستگاه‌های بارانسنجی (۶ ایستگاه) داخل و اطراف حوضه مورد مطالعه به دست آمد سپس نقشه فاکتور فرساینده‌گی باران (R) بر اساس اطلاعات به دست آمده تهیه شد که در شکل (۲) ارائه شده است. با توجه به شکل (۲) مقدار متوسط عامل R در حوضه آبریز خیاوچای بین ۱۳۴/۰۵ تا ۱۵۷/۴۳ مگاژول بر میلی‌متر بر هکتار در ساعت متغیر می‌باشد. بالاترین ارزش عامل R در قسمت شمالی حوضه است که بیش‌ترین بارندگی را دارد و کم‌ترین آن قسمت‌های مرکزی حوضه را شامل می‌شود. همچنین بین بارش سالانه و مقادیر R همبستگی ($R^2=0/79$) برقرار می‌باشد.

نقشه عامل پوشش گیاهی C حوضه نیز براساس رابطه ۴ و ۵ تهیه شد که در شکل (۳) ارائه شده است. براساس شکل (۳) مقادیر عامل C از ۰/۰۵ الی ۱/۰۸ متغیر می‌باشد. به طور کلی می‌توان گفت که نیمه جنوبی حوضه آبریز خیاوچای به دلیل وسعت بیش‌تر اراضی جنگلی مقادیر کم‌تری از مقدار C را دارد و بیش‌ترین مقدار در نواحی شمالی به خصوص شمال غربی به دلیل اراضی مرتعی دیده می‌شود. مقادیر فرسایش‌پذیری خاک (K) با استفاده از اطلاعات مورد نیاز از گزارش تفصیلی حوضه آبریز خیاوچای استخراج گردید و پس از آن نقشه عامل K با توجه به جدول ۱ و مطالعات سایر محققین در محیط ArcGIS تهیه شد. نقشه فاکتور فرسایش‌پذیری خاک در شکل (۴) ارائه شده است. براساس شکل (۴) مقدار شاخص فرسایش‌پذیری خاک (K) برای حوضه مورد مطالعه بین ۰/۱۲ تا ۰/۴۸ تن بر هکتار مگاژول بر میلی‌متر متغیر می‌باشد. نقشه عامل توپوگرافی (LS) حوضه مورد مطالعه نیز با تهیه و ایجاد لایه‌های لازم براساس رابطه ۶ به دست آمد که در شکل (۵) ارائه شده است. براساس شکل (۵) مقدار عامل LS برای حوضه مورد مطالعه در دامنه بین ۰ تا ۱۰/۰۷ در سطح پیکسل متغیر می‌باشد که در دامنه‌های پرشیب به خصوص اطراف آبراهه‌ها به دلیل کوهستانی بودن حوضه مورد مطالعه این مقدار بیش‌تر است. و کم‌ترین مقدار آن بر اراضی مسطح و نسبتاً هموار کشاورزی و خط القعر آبراهه‌ها منطبق است. این عامل در مطالعات مختلف با توجه به توپوگرافی هر منطقه و همچنین بی بعد بودن آن دامنه‌های متفاوتی را نشان می‌دهد.

نقشه فاکتور عملیات حفاظتی از طریق طبقه‌بندی مجدد طبقات پوشش گیاهی و اختصاص عدد مربوطه براساس اطلاعات جدول (۲) تهیه شد که در شکل (۶) ارائه شده است. مقدار این عامل بین ۰/۵ تا ۱ برای منطقه مورد مطالعه به دست آمد.

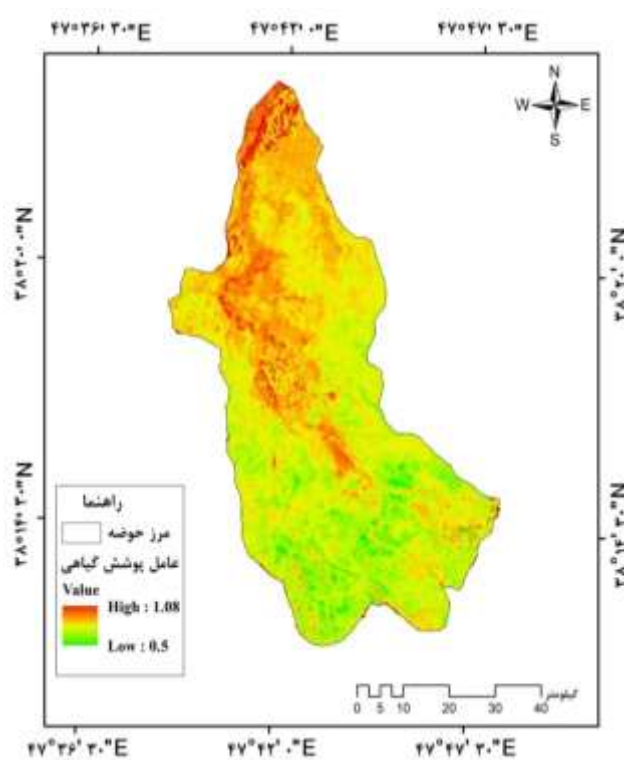
جهت تهیه نقشه فرسایش متوسط سالانه خاک از حاصل ضرب فاکتورهای فرساینده باران (R)، فرسایش پذیری خاک (K)، مدیریت پوشش گیاهی (C)، توپوگرافی (LS)، و عملیات حفاظت (P) براساس رابطه ۱ در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) محاسبه شد و مقادیر هدررفت سالانه خاک (A) بر حسب تن در هکتار در سال به دست آمد. نقشه به دست آمده در شکل (۷) ارائه شده است. بر اساس شکل (۷) مقادیر نقشه فرسایش سالانه خاک در حوضه آبریز خیاوچای بین ۰ الی ۱۵۴/۵۰ تن در هکتار در سال در سطح پیکسل متغیر می‌باشد.

در نهایت با استفاده از یک رابطه رگرسیونی میزان اثرگذاری هر یک از عامل‌های مدل RUSLE بر روی هدر رفت خاک تعیین گردید که هدر رفت خاک به‌عنوان متغیر وابسته و عامل‌های فرساینده باران، فرسایش‌پذیری خاک، پوشش گیاهی، توپوگرافی و حفاظت خاک به عنوان متغیر مستقل در نظر گرفته شدند. نتایج نشان داد که عامل توپوگرافی با ضریب همبستگی بیش‌ترین تاثیر را در هدر رفت سالانه خاک حوضه آبریز خیاوچای دارد. در جدول (۵) ضریب همبستگی عامل‌های مدل RUSLE با هدر رفت سالانه خاک ارائه شده است. طبق گزارش فائو حدود ۳۶ درصد از کل زمین‌ها و ۶۰ درصد از خاک‌های کشاورزی در ایران در معرض فرسایش هستند. در این میان عمده‌ترین دلیل فرسایش شدید خاک در ایران، از بین رفتن پوشش گیاهی است که می‌توان گفت تقریباً در همه مراتع چرای بی‌رویه باعث فرسایش خاک شده به طوری که تراکم دام در آن‌ها دو تا شش برابر ظرفیت چرای موجود است. بنابراین در چنین وضعیتی عجیب نیست که فرسایش خاک در ایران چند برابر متوسط جهانی است، این اتفاق در حالی رخ داده است که خاک به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عناصر کشاورزی برای احیای مجدد به زمان طولانی نیاز دارد (نژادافضلی و همکاران، ۱۳۹۸).



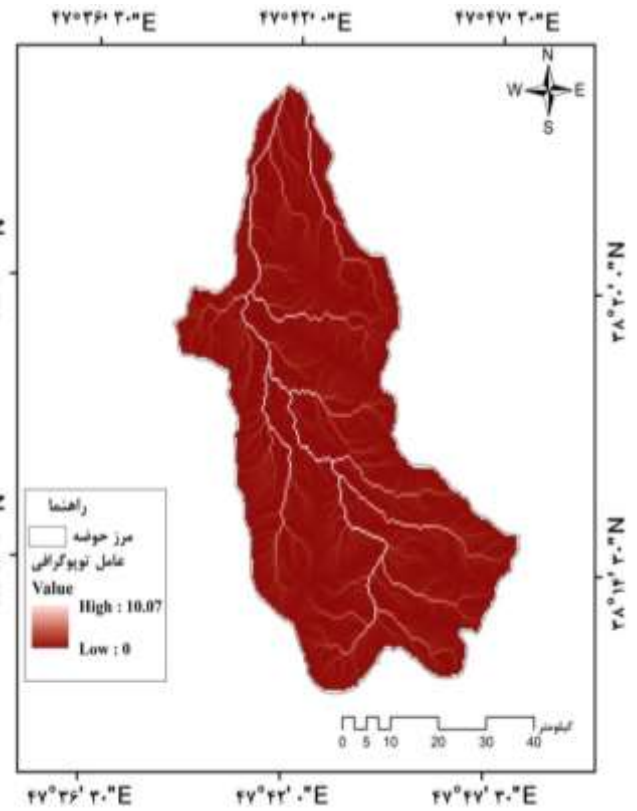
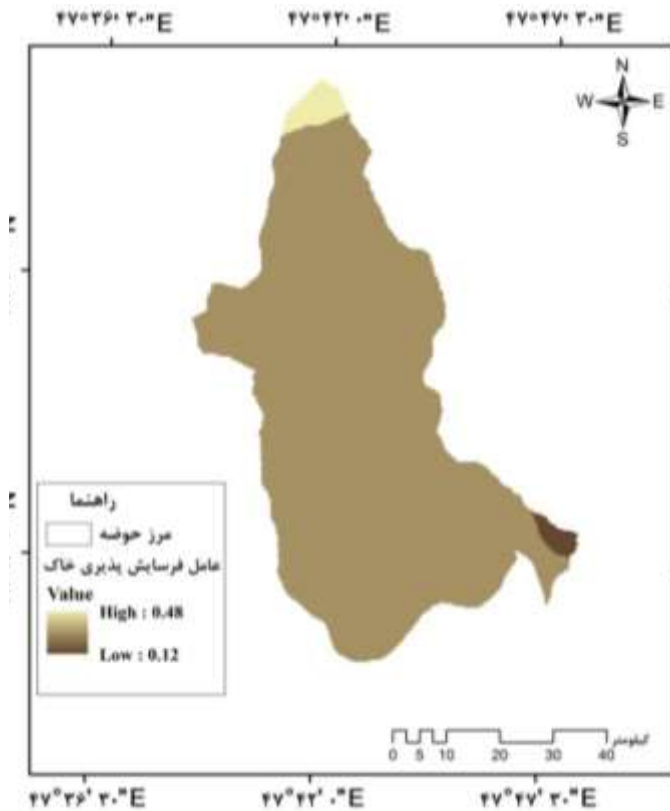
شکل (۲): عامل فرساینده باران (R) حوضه آبریز خیاوچای

Figure (2): Rain erosion factor (R) of Khiavchai watershed



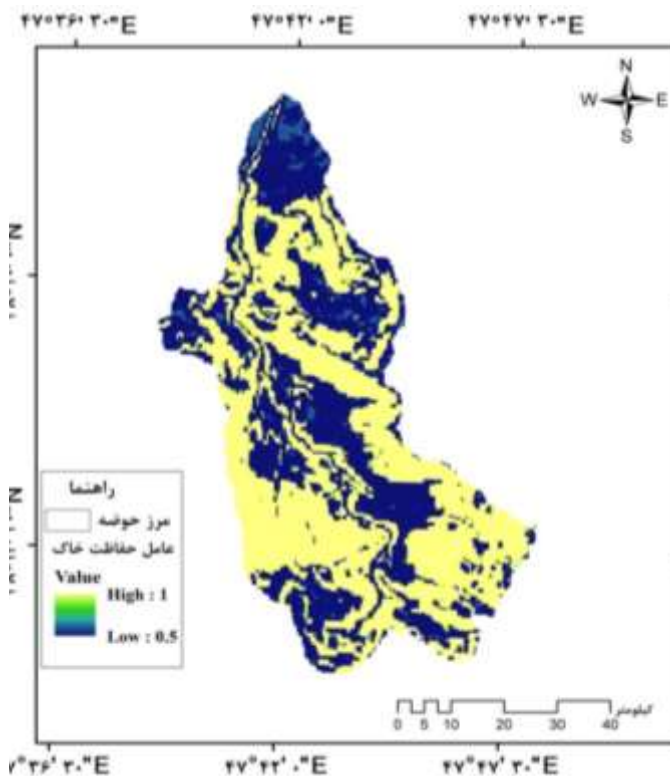
شکل (۳): عامل پوشش گیاهی (C) حوضه آبریز خیاوچای

Figure (3): Vegetation factor (C) of Khiavchai watershed

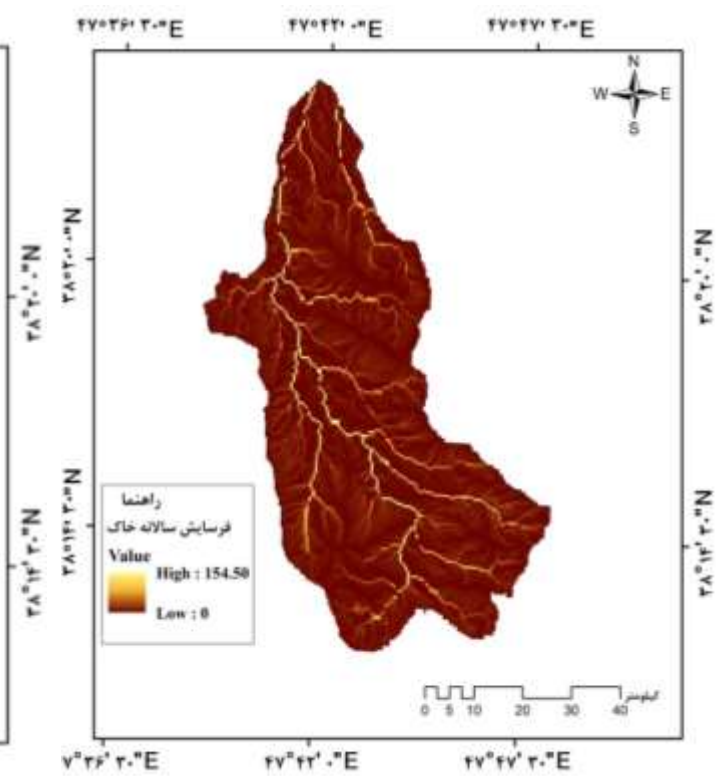


شکل (۴): عامل فرسایش پذیری خاک (K) حوضه آبریز خیاوچای
Figure (4): soil erodibility factor (K) of Khiavchai watershed

شکل (۵): عامل توپوگرافی (LS) حوضه آبریز خیاوچای
Figure (5): Topographic factor (LS) of Khiavchai watershed



شکل (۶): عامل عملیات حفاظتی خاک (P) حوضه آبریز خیاوچای
Figure (6): Soil Protection Operation factor (P) of Khiavchai Watershed



شکل (۷): عامل فرسایش سالانه خاک (RUSLE) حوضه آبریز خیاوچای
Figure (7): Annual Soil Erosion Factor (RUSLE) of Khiavchai Watershed

جدول (۵): ضریب همبستگی فاکتورهای مدل RUSLE با هدررفت سالانه خاک

Table (4): Correlation coefficient of RUSLE model factors with annual soil loss

فاکتور	ضریب همبستگی (R^2)	رابطه رگرسیونی
R	۰/۴۷	$Y= 8.743605x+001$
K	۰/۲۷	$Y= 2.591429x-002$
LS	۰/۹۲	$Y= 4.631086x+001$
C	۰/۳۸	$Y= 2.611682x-001$
P	۰/۴۱	$Y= 6.195196x-001$

دلیل استفاده از همبستگی بین این فاکتورها این است که این عوامل با یکدیگر در ارتباط هستند و تأثیرات متقابلی با یکدیگر دارند. به عبارتی دیگر تأثیر هر فاکتور می‌تواند توسط فاکتورهای دیگر تغییر کند. برای مثال افزایش شیب در کنار کاهش پوشش گیاهی می‌تواند فرسایش خاک را افزایش دهد. به دلیل این تعاملات، بررسی همبستگی بین این فاکتورها کمک می‌کند تا ما مکانیسم‌های دقیق‌تری را که در مدل RUSLE قرار دارند درک کنیم و در بهبود کارایی مدل بهتر عمل کنیم. از طرفی این همبستگی‌ها به ما اجازه می‌دهند تا تأثیرات ترکیبی این عوامل را بر روی فرسایش خاک بهتر پیش‌بینی کنیم. از طرفی دیگر در برخی موارد ممکن است به دلیل شرایط خاص ممکن است افزایش پوشش گیاهی همراه با افزایش فرسایش خاک رخ دهد. این امر می‌تواند ناشی از عواملی مثل نوع خاک، شیب، گونه گیاهان و شدت بارندگی در آن شرایط باشد.

۲-۳- تحلیل عوامل هیدروژئومورفیک

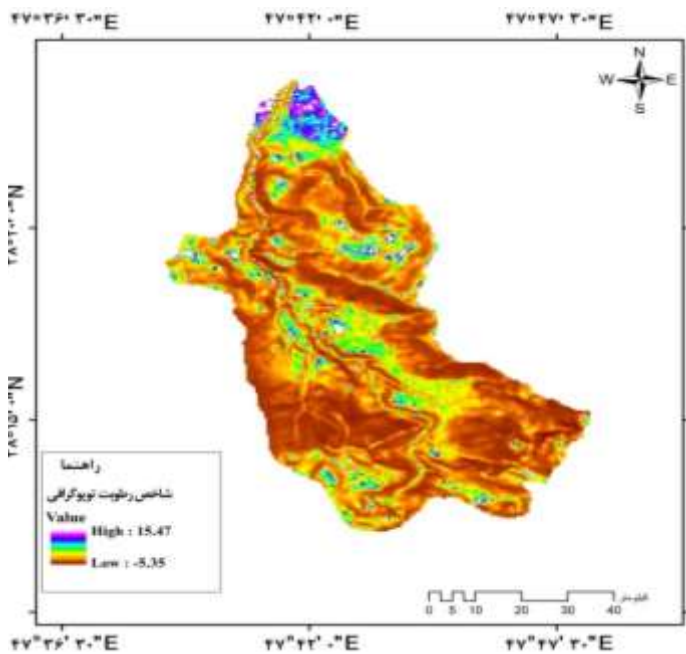
شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI) نشان‌دهنده تأثیرات چندگانه زمین در فرایندهای رواناب اضافی اشباع است و از مرتب‌سازی مواد رسوب معلق مرتبط است. توزیع همگن از شرایط خاک برای محاسبه رطوبت توپوگرافی خاک صورت گرفت. توزیع فضایی شاخص رطوبت توپوگرافی در حوضه آبریز خیاوچای در شکل (۸) ارائه شده است. مقدار شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI) در محدوده بین ۵/۳۵- تا ۱۵/۴۷ می‌باشد. مقدار بالای شاخص رطوبت توپوگرافی بیش‌تر در قسمت شمال حوضه (سطح نسبتاً شیب‌دار) یافت می‌شوند، در حالی که مقادیر کم در قسمت مرکزی و جنوب حوضه آبریز (مناطق هموار و صاف)، معمول است. از این‌رو مناطقی که دارای شاخص رطوبت توپوگرافی بالا هستند دارای اهمیت هستند زیرا خطر فرسایش روان بیش‌تری را نسبت به مناطقی که دارای مقادیر پایین شاخص رطوبت توپوگرافی دارند دارا می‌باشد و بالعکس.

شاخص قدرت جریان (SPI)، فرایندی است که خطوط جریان مشابه را مانند شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI)، پیش‌بینی می‌کند. با این حال مقادیر شبکه نشان‌دهنده شتاب جریان است که با افزایش سرعت شیب آب به سرعت در حال افزایش است. مقادیر SPI در حوضه آبریز مورد مطالعه در محدوده ۱۰/۱۵- تا ۱۸/۲۰ متغیر می‌باشد (شکل ۹). از آنجاکه شاخص قدرت جریان مستقیماً با پتانسیل فرسایش سازگار است از این‌رو مناطقی که با شدت زیاد SPI همراه است دارای پتانسیل فرسایش بالا خواهد بود در حالی که مقادیر پایین‌تر نشان‌دهنده سطح پتانسیل رسوب است. مقادیر بالای شاخص قدرت جریان SPI بیش‌تر در قسمت‌هایی از شمال و مرکز حوضه همچنین به صورت پراکنده در کل حوضه نیز مشاهده می‌شود.

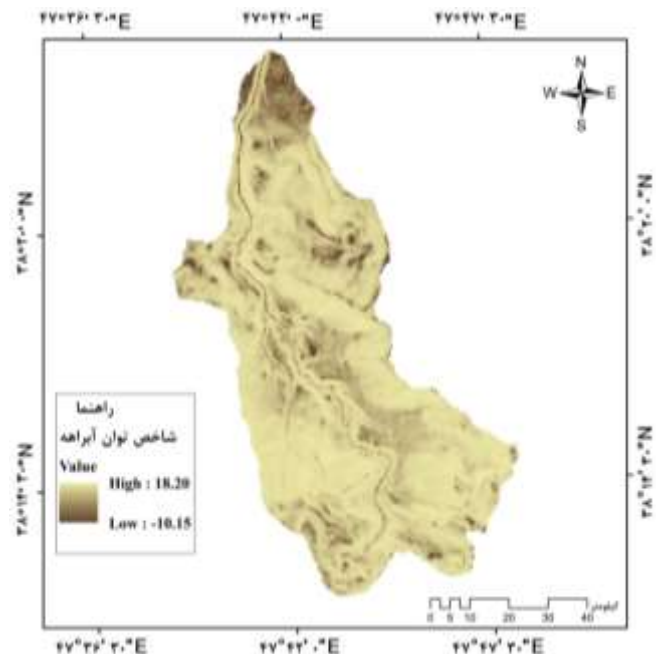
با استفاده از شاخص‌های پوشش گیاهی عادی (NDVI) به عنوان عاملی برای برآورد فرسایش خاک که بیش‌تر مربوط به مدیریت زمین بر کاهش خاک است استفاده می‌شود. در این مطالعه شاخص پوشش گیاهی عادی به عنوان اندازه‌گیری میزان و تراکم پوشش گیاهی در نظر گرفته شد. تصویر شاخص پوشش گیاهی عادی برای سال ۲۰۲۲ از داده‌های ماهواره لندست ۸ OLI به دست آمد. از این‌رو مقادیر شاخص پوشش گیاهی نرمال شده در حوضه آبریز خیاوچای در دامنه بین ۰/۱۷- تا ۱ می‌باشد (شکل ۱۰).

شاخص انحنا دامنه (Curvator) نشان‌دهنده میزان انحراف سطح از صاف بودن و یا به عبارتی دیگر محدب و مقعر بودن دامنه را نشان می‌دهد. از شاخص انحنا دامنه برای اندازه‌گیری میزان ناهمواری سطح زمین می‌توان استفاده نمود. از این رو شاخص انحنا دامنه برای حوضه آبریز خیاوچای در محیط Arc Map تهیه شد که مقدار این شاخص در دامنه بین $3/72$ - الی $4/33$ متغیر می‌باشد شکل (۱۱). شاخص انحنا سطح (Plan Curvator) این شاخص نشان‌دهنده واگرایی و هم‌گرایی توپوگرافیکی است. مقادیر مثبت انحنا پلان واگرایی جریان را نشان داده که دربرگیرنده خط‌الراس‌ها است و مقادیر منفی آن هم‌گرایی جریان‌ها (دره‌ها) را نشان می‌دهد. واحد اندازه‌گیری انحنا سطح برحسب رادیان بر متر یا درجه بر متر (درجه در ۱۰۰ متر) بیان می‌گردد. شاخص انحنا سطح در دامنه بین $1/25$ - تا $1/77$ متغیر می‌باشد شکل (۱۲).

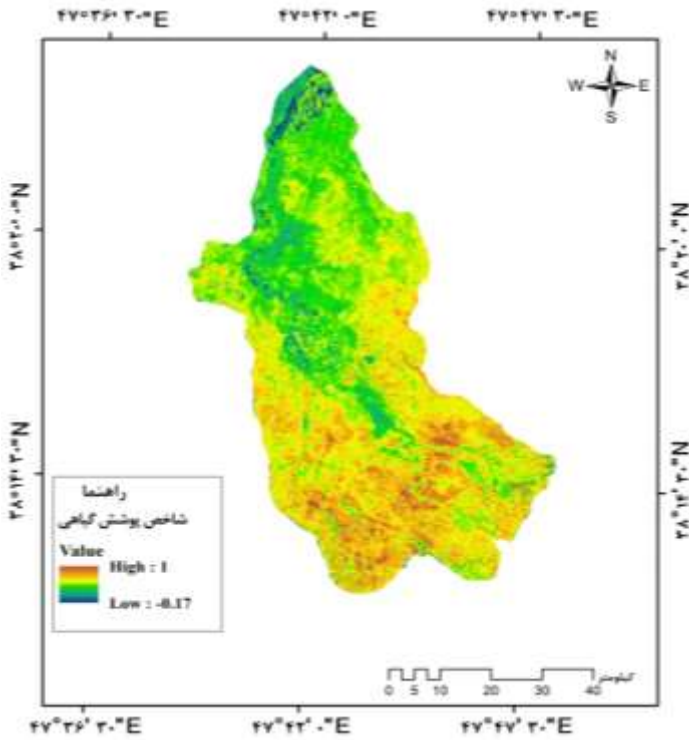
شاخص انحنا مقطع (Profil Curvator) معرف اندازه تغییر شیب منحنی میزان، در طول مسیر جریان است. مقدار منفی این انحنا معرف سطوح محدب (کوژ) و مقدار مثبت آن سطوح مقعر (کاو) را نشان می‌دهد. از این رو شاخص انحنا مقطع حوضه آبریز مورد مطالعه بین $2/12$ - تا $2/54$ متغیر می‌باشد شکل (۱۳).



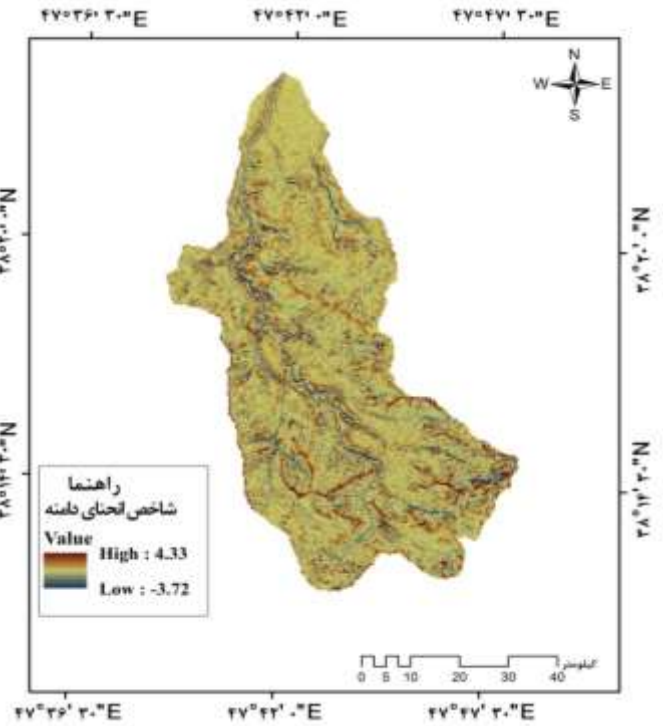
شکل (۸): شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI) حوضه آبریز خیاوچای
Figure (8): Topographic Moisture Index (TWI) of Khiavchai watershed



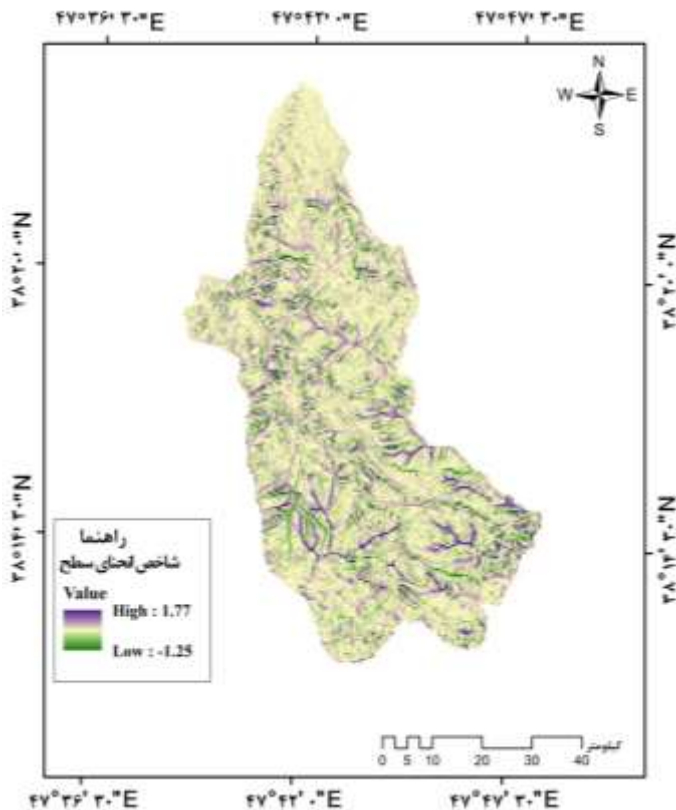
شکل (۹): شاخص توان آبراهه (SPI) حوضه آبریز خیاوچای
Figure (9): Waterway Power Index (SPI) of Khiavchai watershed



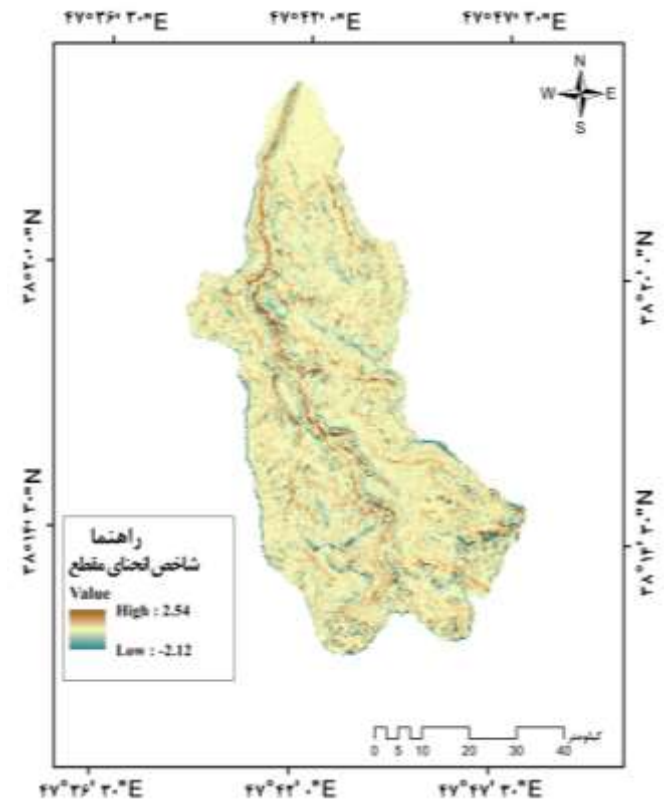
شکل (۱۰): شاخص پوشش گیاهی (NDVI) حوضه آبریز خیاوچای
Figure (10): Vegetation index (NDVI) of Khiavchai watershed



شکل (۱۱): شاخص انحنای دامنه (Curvature) حوضه آبریز خیاوچای
Figure (11): Curvature index of Khiavchai watershed



شکل (۱۲): شاخص انحنای سطح (Plan Curvature) حوضه آبریز خیاوچای
Figure (12): Index of surface curvature (Plan Curvature) of Khiavchai watershed



شکل (۱۳): شاخص انحنای مقطع (Profile Curvature) حوضه آبریز خیاوچای
Figure (13): Profile curvature index of the Khiavchai watershed

۴- بحث و نتیجه‌گیری

فرسایش خاک به‌ویژه در کشورهای درحال توسعه روندی افزایشی دارد که باعث از بین رفتن خاک‌های کشاورزی، آلودگی آب‌های طبیعی در اثر رسوبگذاری می‌شود و مخاطرات زیست‌محیطی جبران‌ناپذیری را به بار می‌آورد. بنابراین بررسی و پایش صحیح هدررفت خاک می‌تواند در جهت کنترل فرسایش مفید و سودمند باشد. در این پژوهش تجزیه و تحلیل و پهنه‌بندی میزان فرسایش خاک از مدل جهانی فرسایش خاک اصلاح شده و ارتباط آن با شاخص‌های هیدروژئومورفیک و پوشش گیاهی حوضه آبریز خیاوچای مشکین شهر با استفاده از فناوری‌های RS و GIS انجام شد. برای اجرای مدل RUSLE، لایه‌های فرساینده‌گی باران (R)، فرسایش‌پذیری خاک (K)، توپوگرافی (LS)، پوشش گیاهی (C)، و عملیات حفاظتی خاک (P) در محیط ArcMap تهیه و با هم‌پوشانی همدیگر نقشه فرسایش سالانه خاک (RUSLE) تهیه شد. نتایج حاصل از اجرای مدل RUSLE نشان داد که مقادیر فرسایش سالانه خاک در حوضه بین ۰ تا ۱۵۴/۵۰ تن در هکتار در سال متغیر است. که بیش‌ترین مقدار آن در قسمت شمال حوضه و مقادیر کم‌تری به‌صورت پراکنده در قسمت‌های میانی حوضه قابل مشاهده است. بررسی همبستگی آماری بین فاکتورهای مدل RUSLE با میزان فرسایش سالانه خاک در منطقه مرد مطالعه نیز نشان داد که عامل توپوگرافی (LS) با ضریب همبستگی ۰/۹۲ بیش‌ترین اهمیت را در برآورد فرسایش سالانه خاک در مدل RUSLE دارد. در گام بعد نیز به تهیه و پهنه‌بندی نقشه شاخص‌های محیطی شامل توان آبراهه، رطوبت توپوگرافی، انحناء دامنه، انحناء سطح، انحناء مقطع و شاخص پوشش گیاهی عادی در محیط GIS صورت گرفت. سپس با استفاده از رابطه رگرسیونی میزان همبستگی هر یک از شاخص‌ها در محیط Excel با مقدار فرسایش سالانه خاک در حوضه آبریز خیاوچای پرداخته شد. نتایج بررسی نشان داد که شاخص تفاضل پوشش گیاهی نرمال شده با مقدار ۰/۵۷ درصد نسبت به سایر شاخص‌های مورد مطالعه از ضریب همبستگی بالایی برخوردار است. همچنین کم‌ترین مقدار مربوط به شاخص انحناء سطح با مقدار ۰/۰۵ می‌باشد. نتایج این پژوهش مشابه نتایجی است که سایر محققین از جمله اسفندیاری درآباد و همکاران (۱۴۰۱)، عابدینی و همکاران (۱۴۰۱)، شارما (۲۰۱۰)، راوات و همکاران (۲۰۱۸) بررسی آن‌ها نشان داد که عامل توپوگرافی و شاخص پوشش گیاهی بیش‌ترین تاثیر گذاری را در برآورد فرسایش خاک دارند. به آن دست یافتند. براساس نتایج به‌دست آمده از این پژوهش اقداماتی حفاظتی از قبیل بذریاشی گونه‌های بومی در عرصه‌های مرتعی، جلوگیری از چرای بی‌رویه و بوته‌کنی جهت تقویت پوشش گیاهی منطقه، شخم زدن زمین‌های کشاورزی عمود بر جهت شیب منطقه مورد مطالعه ضروری می‌باشد. پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده برای برآورد فرسایش خاک در حوضه‌های آبریز مورد مطالعه از شاخص‌های هیدروژئومورفیک و پوشش گیاهی استفاده گردد تا میزان تاثیر گذاری هر یک از این شاخص‌ها در برآورد فرسایش سالانه خاک مشخص گردد.

۵- منابع

- Abedini, M., Bahramnia, F., Mostafazadeh, R., Pasban, A. H. (2022). Investigating the impact of land use changes in a period of twenty years on the rate of erosion and sedimentation in RaziChai Basin, *Geography and Environmental Studies*, 12(45), 114-133. (In Persian).
- Abedini, M., JavadiAlibabalo, S., Mostafazadeh, R., & Pasban, A.H. (2021). Relationship between vegetation and geomorphic indicators with erosion and sediment values in KozehTopraghi watershed, *Hydrogeomorphology*, 32(9), 105-128. (In Persian).
- Allafta, H., & Opp, Ch. (2022). Soil Erosion Assessment Using the RUSLE Model, Remote Sensing, and GIS in the Shatt Al-Arab Basin (Iraq-Iran), *Applied sciences*, 12, 1-17.
- Amanpour, S., Obayat, M., Obayat, M., & Obayat, M. (2021). Investigating the effect of land use changes on soil erosion and sediment production in Ramhormoz basin using object-oriented classification and RUSLE model, *Iran Water and Soil Research*, 52(3), 649-635. (In Persian).
- Ammar, A.K., Alaa, m., Fadhil, K., Alzahrani, H., & Hamad, S. (2023). Predicting Soil Erosion Rate at Transboundary Sub-Watersheds in Ali Al-Gharbi, Southern Iraq, Using RUSLE-Based GIS Model, *Sustainability*, 15,1776.

- Arekhi, S., Barani, Sh., Emadaddian, S. (2022). Zoning Erosion Hazard and Sediment Estimation in Cham Gardalan basin (Ilam province) using the Revised Universal Soil Erosion Equation (RUSLE), *Journal of Natural Environmental Hazards*, 11(34), 35-56.
- Arkhi, S., & Niazi, Y. (2019). Investigating the use of GIS and RS to estimate soil erosion and sediment load using the RUSLE model (case study: upstream basin of Ilam Dam), *Water and Soil Conservation Research*, 17(2), 1-27. (In Persian).
- Arnoldus, H.M.J. (1980). approximation of the rainfall factor in the Universal Soil Loss Equation M, De Boodt, D. Gabriels (Eds.), *Assessment of Erosion*, Wiley, Chichester, 127-132.
- Bablimokher, H., Taghian, A., R., & Shirani, K., (2017). Evaluation of the landslide susceptibility zoning map using the combined method of confidence factor and logistic regression using geomorphic indices, *Quantitative Geomorphology Research*, 7(6), 116- 91. (In Persian).
- Buryak, Z.A., Narozhnyaya, A.G., Gusarov, A.V., & Beylich, A.A. (2022). Solutions for the Spatial Organization of Cropland with Increased Erosion Risk at the Regional Level: A Case Study of Belgorod Oblast, European Russia, *Applied sciences*, 11, 1492.
- Choudhury, M.K., & Nayak, T. (2003). Estimation of soil erosion in Sagar Lake catchment of Central India Proc, *International Conference on Water and Environment*, 387-392.
- Dabral, p.p., Baithuri, N., & Pandey, A. (2008). Soil erosion assessment in a hilly catchment of North Eastern India using USLE, GIS and remote sensing, *Water Resources Management*, 22(12), 1783-1798.
- El Jazouli, A., Barakat, A., Khellouk, R., Rais, J., & El Baghdadi, M. (2019). Remote Sensing and GIS Techniques for Prediction of Land Use Land Cover Change Effects on Soil Erosion in the High Basin of the Oum Er Rbia River (Morocco), *Remote Sensing Applied sciences Environment*, 13, 361-374.
- Elsayed, A., Mostafa, A., Farag, O., Ahmad, B., Dmitry, E., & Mohamad, S. (2023). Integration of RUSLE Model, Remote Sensing and GIS Techniques for Assessing Soil Erosion Hazards in Arid Zones, *Agriculture*, 13(35), 1-19.
- Faizizadeh, b. (2016). Modeling land use changes and its effects on the erosion system in the Alaviyan dam basin using remote sensing and GIS techniques, *Hydrogeomorphology*, 3(11), 21-38. (In Persian).
- Ganasri, B.P. Ramesh, H. 2016. Assessment of soil erosion by RUSLE model using remote sensing and GIS-A case study of Nethravathi Basin Geosci, *Front*, 7 (6), 953-961.
- Gao, J., & Wang, H. (2018). Temporal analysis on quantitative attribution of karst soil erosion: A case study of a peak-cluster depression basin in Southwest China, *Water Resources Management*, 172, 369-377.
- Guzzetti, F., Reichenbach, P., Cardinali, M., & Galli, M. (2000). Probabilistic landslide hazard assessment: A review of methods and applications, *Natural Hazards*, 22(1), 1-59.
- Hessel, R., Wyseure, G., Panagea, I.S., Alaoui, A., Reed, M.S., van Delden, H., Muro, M., Mills, J., Oenema, O., & Areal, F., (2022). Soil-Improving Cropping Systems for Sustainable and Profitable Farming in Europe. *Land*, 11, 780.
- Huang, L., McDonald-Buller, E.C., McGaughey, G., Kimura, Y., & Allen, D.T. (2016). The impact of drought on ozone dry deposition over eastern Texas Atmos. *Environment*, 127, 176-186.
- Laogue, I., Mbaindogoum, D., & Mahamat, A. (2023). Evaluation of Soil Erosion by RUSLE Model in Mount Guera, *Open Access Library Journal*, 10, 1-19. DOI: 10.4236/oalib.1109888.
- Luca, F., Conforti, M., & Robustelli, G. (2011). Comparison of GISbased gully susceptibility mapping using bivariate and multivariate statistics: Northern Calabria, South Italy, *Geomorphology*, 134, 297-308.
- Maddi, A., Pasban, A.H., & Nazaft Tekle, B. (2022). Investigating and evaluating the amount of soil loss in land uses in the Atashgah watershed using the RUSLE model and Landsat satellite images (OLI meter), *Environmental Science Studies*, 8(2), 6625-6612. (In Persian).
- Moore, I.D., & Grayson, R.B. (1991). Landson. Digital terrain Modeling: A review of hydrological, Geomorphological and Biological application. *Hydrology*, 5, 3-30.
- Moore, I.D., & Grayson, R.B. (1991). Landson. Digital terrain Modeling: A review of hydrological, Geomorphological and Biological application. *Hydrology*, 5, 3-30.

- Olorunfemi, I.E., Komolafe, A.A., Fasinmirin, J.T., Olufayo, A.A. & Akande, S.O. (2020). A GIS-based assessment of the potential soil erosion and flood hazard zones in Ekiti State, Southwestern Nigeria using integrated RUSLE and HAND models CATENA, *Land*, 194, 104725.
- Pandey, A., Chowdary, V.M., & Mal, B.C. (2007). Identification of critical erosion prone areas in the small agricultural watershed using USLE, GIS and remote sensing, *Water Resources Management*, 21(4), 729-746.
- Rawat, K. S., & Singh, S. K. (2018). Appraisal of Soil Conservation Capacity Using NDVI Model-Based C Factor of RUSLE Model for a Semi Arid Ungauged Watershed: a Case Study, *Water Conservation Science and Engineering*, 3(1), 47-58.
- Rejith, R.G., & Anirudhan, s. (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.
- Renard, K.G. & Freidmund, J.R. (1994). Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the RUSLE, *Journal of Hydrology*, 157, 287-306.
- Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A., & Porter, J.P. (1991). RUSLE: Revised universal soil loss equation, *Journal of Soil and Water Conservation*, 46 (1), 30-33.
- Santos, J.C.N., Andrade, E.M., Medeiros, P.H.A., & Joao, M. (2017). Land use impact on soil erosion at different scales in the Brazilian semi-arid. *Revista Ciencia Agronomica*, 48(2), 251-260.
- Serbaji, M., Bouaziz, M., & Weslati, O. (2023). Soil Water Erosion Modeling in Tunisia Using RUSLE and GIS Integrated Approaches and Geospatial Data, *Land*, 12(548), 13-22.
- Sharma, A. (2010). Integrating Terrain and Vegetation Indices for Identifying Potential soil Erosion Risk Area, *Geo-Spatial Information Science*, 13(13), 201-209.
- Shin, G.J. (1999). The analysis of soil erosion analysis in watershed using GIS. Ph.D. thesis, Department of Civil Engineering, *Gang-won National University*, 47.
- Singh, S., Bhardwaj, A., & Verma, V. (2020). Remote sensing and GIS based analysis of temporal land use/land cover and water quality changes in Harike wetland ecosystem, Punjab, India. *Journal of Environmental Management*, 262, 11035.
- Vaezi, A.R., Abbasi, M., & Hajimaleki, Kh. (2016). Evaluation of RUSLE model combined with remote sensing and geographic information system in small drainage areas in the semi-arid region, northwest of Iran. *Iran Watershed Science and Engineering*, 11(38), 1-10. (In Persian).
- Vijith, H., Seling, L.W., & Dodge-Wan, D. (2018). Estimation of soil loss and identification of erosion risk zones in a forested region in Sarawak, Malaysia, Northern Borneo, *Environment, Development and Sustainability*, 20(3), 1365-1384.
- Wang, S., Wentz, G.Z., & Gertner, A. (2002). Improvement in mapping vegetation cover factor for the universal soil loss equation by geostatistical methods with Landsat Thematic Mapper images *Remote Sensing*, 23 (18), 3649-3667.
- Waseem, M., Iqbal, F., Humayun, M., Latif, M., Javed, T., & Leta, M. (2023). Spatial Assessment of Soil Erosion Risk Using RUSLE Embedded in GIS Environment: A Case Study of Jhelum River Watershed, *Applied sciences*, 13, 1-16.
- Whittington, D. (2022). Improving the Performance of Contingent Valuation Studies in Developing Countries, *Environmental and Resource Economic*, 22, 323-367.
- Wischmeier, W.H., & Smith, D.D. (1978). Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning (No. 537). Department of Agriculture, *Science and Education Administration*.