

Research Paper



The role of landforms and lithology in the rate of soil erosion in Zonuzchay catchment



Fariba Karami*¹, Davoud Mokhtari², Farnoosh Ahmadi³



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



DOI:10.22034/HYD.2023.53806.1660

Reference to this article: Karami, Fariba; Mokhtari, Davoud; Farnoosh Ahmadi. (2023). The role of landforms and lithology in the rate of soil erosion in Zonuzchay catchment. *Hydrogeomorphology*, 10(37): 1 – 24.

Keywords

RUSLE model, Topographic position index, Lithology unites, Zonuzchay catchment, NW Iran.

Receive Date: 2022/10/23

Accept Date: 2023/10/30

Available: 2024/01/20

ABSTRACT

Soil is one of the most important natural resources of any country, erosion process degrades the soil and leaves irreparable damage. The aim of this study is to estimate the rate of soil erosion and its relationship with landforms and lithology unites of Zonuzchay catchment in Marand county. In this study was used the modified global model of soil loss (RUSLE), geographic information system (GIS) and remote sensing (RS) to estimate the rate of soil erosion. To implement the model, rainfall erosivity factors (R), soil erodibility factor (K), slope length-gradient factor (LS), conservation practice factor (P) and cover management factor (C) in Arc GIS environment calculated and Then a soil erosion map was drawn in five class of hazard (very low, low, medium, high and very high). Topographic position index (TPI) was used to classify and map the landforms of the catchment. Then, the role of different landforms and lithology unites in relation to soil erosion rates was investigated by combining relevant maps. The results showed that the values of Average soil erosion is 1.71 tons per hectare per year. Valleys and deeply incised streams on heights and slopes (94.27 km²) and then Mountain tops and high ridges (89.21 km²) have the highest rate of erosion. In Zonuzchay catchment, soil erosion is mostly on the flysch type deposits, red and gray conglomerates with Marl layers and alluvial terraces. Investigation of regression relationships between (RUSLE) model factors and soil erosion of Zonuzchay catchment showed that the slope length-gradient factor (LS) has the greatest effect in calculating the rate of erosion of Zonuzchay catchment.

* Corresponding Author: Fariba Karami

E-mail: fkarami@tabrizu.ac.ir

1. Department of Geomorphology, Professor in Geomorphology, Faculty of Planning and Enviromental Science, University of Tabriz

2. Department of Geomorphology, Professor in Geomorphology, Faculty of Planning and Enviromental Science, University of Tabriz

3. M.A. in Geomorphology, University of Tabriz

Extended Abstract

Introduction

Soil erosion and its induced land degradation, as one of the most serious global environmental problems affecting human sustainable development, has attracted the extensive attention of policy makers and scholars (Wang and Su, 2020). Soil erosion has the potential to change soil structure and negatively affects soil fertility, land productivity, food security, biological diversity and the global carbon cycle (Hua et al., 2019). The cause of soil erosion is related to climatic conditions (especially torrential rains), topography and high slope, lithology and human activities such as land use change, destruction of vegetation, increase in agricultural production, excessive livestock grazing, etc (Karami and Bayati Khatibi, 2019). The global rate of annual soil erosion is approximated to be 75 billion tons. Iran loses more than two billion tons every year, approximately three times the rates of other Asian countries. Approximately 125 million of the 165 million ha of the country experiences erosion. This is roughly 75% of the entire country and 60% of Iran's agricultural land. Iran's average erosion is 30–32 ton/ha/year, which is 4.3 times the global average. Economic losses caused by SE in Iran have been estimated to be 10 trillion rial (Arabameri et al., 2020). Zonuzchay catchment, with an area of about 323 square kilometers, is located in Marand county in East Azarbaijan province. This river is one of the Aras River sub-catchments leading to the Caspian Sea. Flooding is one of the most common river processes in the Zanuzchai catchment. On the other hand, the range instabilities due to high altitudes and faults in geological formations prone to instability have caused many problems in this catchment. In such a situation, large amounts of soil will be unavailable during a flood. Marand is known as one of the centers of horticultural production in East Azarbaijan province and the country's northwest region. Therefore, considering the importance of soil in this area and the necessity of implementing soil protection operations, the present study investigates the role of lithological units and landforms in the soil erosion of the Zonuzchai catchment.

Methodology

Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)

This model is one of the widely used methods for calculating the rate of erosion in numerous catchments worldwide. This model is improved version of the universal soil loss equation (equ.1).

$$A=R \times K \times L \times S \times C \times P \quad (1)$$

where A denotes average annual soil loss ($t \text{ ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$), R is rainfall-runoff erosivity factor ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ yr}^{-1}$), K is soil erodibility factor ($\text{Mg ha h ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$), LS is slope length, C is crop management factor (ranges from zero to 1), and P is conservation support practice factor (Tousif Bhatti et al., 2021). Sediment delivery ratio (SDR) was used to validate the calculated sedimentation rate with observed sedimentation. Sediment delivery ratio (SDR) is the most appropriate method to calculate the amount of sediment output from a basin. The SDR equals sediment output from the catchment to the erosion produced in it, calculated according to equation (equ.2).

$$\text{SDR}=Y/E \quad (2)$$

In this relationships, Y is the amount of output sediment in tons, and E is the amount of erosion created in tons in the catchment area.

Topographic Position Index (TPI) to classify landforms

In the present study, the Topographic Position Index (TPI) was used to prepare the landforms map of the Zonuzchai catchment. TPI (equ.3) compares the elevation of each cell in a DEM to the mean elevation of a specified neighborhood around that cell. Mean elevation is subtracted from the elevation value at center (Weiss, 2001; Jenness, 2006).

$$TPI = Z_0 - \sum_{n-1} Z_n / n \quad (3)$$

where Z_0 = elevation of the model point under evaluation, Z_n = elevation of grid, n = the total number of surrounding points employed in the evaluation.

Results and Discussion

The results of soil erosion estimation using the RUSLE model in the Zonuzchay catchment showed that the average soil erosion is 1.71 tons per hectare per year. Based on the soil erosion map, classified into five risk classes (very low, low, medium, high, and very high), a major part of the catchment (67.07%) is the very low erosion class. The next classes are 23.74% in the low class, 6.83% in the medium class, 1.93% in the high class, and 0.44% in the high erosion class. It includes many levels corresponding to steep slopes, heights, and areas where the accumulation of waterways is high. Medium, low, and very low classes are also included in slopes with low slopes, flat areas, and plains. In addition, calculating the SDR found that the maximum estimated sediment (28.34 tons per hectare) is less than the observed sediment (32.71 tons per hectare). Combining the soil erosion map with the landforms map in the Zonuzchay catchment showed that the highest erosion is in the valleys and cuts located on the heights and slopes with an area of 94.27 square kilometers, and the lowest amount of erosion is in the small hills in the plains and drains. It belongs to high mountains with an area of 4.19 and 4.80 square kilometers. The comparison of soil erosion maps and lithology units found that soil erosion is mostly on flash-type deposits and red and gray conglomerates with interlayers of marl and alluvial defenses.

Conclusions

The general results show that the areas with high and very high erosion, with an area of about 2.37% of the entire catchment, are observed in the northern, southeastern, and eastern parts of the Zonuzchay catchment. Areas with low and very low erosion cover the largest catchment area (90.81%). The high and high erosion levels are located on the steep slopes of the heights and areas where the flow of waterways accumulates a lot. Medium, low, and very low levels also include slopes with low slopes, flat areas, and plains. Among the factors of the RUSLE model, the topography factor (LS) shows the most significant effect in estimating the amount of soil erosion in the Zonuzchay catchment.

References

- Arabameri, A., Tiefenbacher, J.P., Blaschke, T., Pradhan, B., Tien Bui, D. (2020). Morphometric Analysis for Soil Erosion Susceptibility Mapping Using Novel GIS-based Ensemble Model, *Remot Sensing*, 12 (874), 1-24.
- Hua, T., Zhao, W., Liu, Y., Liu., Y. (2019). Influencing factors and their interactions of water erosion based on yearly and monthly scale analysis: A case study in the Yellow River basin of China, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss*, 1-22.
- Jenness, J. (2006). Topographic Position Index (tpi jen.avx) extension for ArcView 3.x, v. 1.2. Jenness Enterprises. Available at: <http://www.jennessent.com/arcview/tpi.htm>.
- Karami, F., Bayati Khatibi, M. (2019). The Modeling of Soil Erosion and Prioritizing Sediment Production in Sattarkhan Dam Basin Using MUSLE and SWAT Models, *Hydrogeomorphology*, 6(18), 115-137.
- Mahmoodi, M.A., Naghshbandi, S.P. (2020). Estimation of Soil Erosion by RUSLE and Remote Sensing Data of Gawshan Dam Basin, *Journal of Water and Soil*, 33(6), 845-856.
- Wang, Z., Su. Y. (2020). Assessment of Soil Erosion in the Qinba Mountains of the Southern Shaanxi Province in China Using the RUSLE Model, *sustainability*, 12(1733), 1-17.
- Weiss A. (2001). Topographic position and landforms analysis. ERSI User Conference, San Diego, USA.

مقاله پژوهشی



نقش لندفرم‌ها و لیتولوژی در میزان فرسایش خاک حوضه آبریز زنوزچای

فریبا کرمی*، داود مختاری^۲، فرنوش احمدی^۳

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



ارجاع به این مقاله: کرمی، فریبا؛ مختاری، داود؛ فرنوش، احمدی (۱۴۰۲). نقش لندفرم‌ها و لیتولوژی در میزان فرسایش خاک حوضه آبریز زنوزچای. هیدروژئومورفولوژی، ۱۰ (۳۵): ۲۴ - ۱.

DOI:10.22034/HYD.2023.53806.1660



چکیده

خاک یکی از مهم‌ترین منابع طبیعی هر کشور می‌باشد، فرایند فرسایش سبب تنزل خاک شده و خسارات جبران ناپذیری را بر جای می‌گذارد. هدف پژوهش حاضر، برآورد میزان فرسایش خاک و بررسی نقش لندفرم‌ها و واحدهای لیتولوژی در فرسایش خاک حوضه آبریز زنوزچای شهرستان مرند می‌باشد. این شهرستان در استان آذربایجان شرقی و در شمال غرب کشور قرار دارد. در این پژوهش برای برآورد میزان فرسایش خاک از مدل جهانی اصلاح شده هدررفت خاک (RUSLE)، سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) و سنجش از دور (RS) استفاده شد. برای اجرای مدل عوامل فرسایش باران (R)، فرسایش پذیری خاک (K)، توپوگرافی (LS)، حفاظت خاک (P) و مدیریت پوشش گیاهی (C) در محیط Arc GIS محاسبه و سپس نقشه فرسایش خاک در ۵ کلاس خطر (بسیار کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد) ترسیم شد. برای طبقه‌بندی و ترسیم نقشه لندفرم‌ها نیز از شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI) استفاده شد. سپس نقش لندفرم‌ها و واحدهای لیتولوژی مختلف بر ارتباط با نرخ فرسایش خاک و با تلفیق نقشه‌های مربوطه بررسی شدند. نتایج اجرای مدل نشان داد که متوسط فرسایش خاک ۱/۷۱ تن در هکتار در سال است. نتایج نقشه فرسایش نشان داد که بخش عمده‌ای از حوضه (۶۷/۰۷ درصد) جزء طبقه فرسایشی خیلی کم و ۲/۳۷ درصد آن در طبقه فرسایشی خیلی زیاد و زیاد قرار دارند. با تلفیق نقشه لندفرم‌ها و فرسایش خاک معلوم شد که بیشترین فرسایش در مجموع به دره‌ها و بریدگی‌های واقع بر ارتفاعات و دامنه‌ها با مساحت ۹۴/۲۷ کیلومتر مربع و سپس ستیغ‌های مرتفع و قله کوه‌ها با ۸۹/۲۱ کیلومتر مربع اختصاص دارد. در حوضه زنوزچای، فرسایش خاک بیشتر بر روی نهشته‌های تیپ فلیش، کنگلومرای قرمز و خاکستری با میان لایه‌های مارنی و پادگانه‌های آبرفتی می‌باشد. ضریب همبستگی بین عوامل مدل (RUSLE) و فرسایش خاک نشان داد که عامل توپوگرافی (LS) بیشترین اثرگذاری را در محاسبه فرسایش حوضه زنوزچای دارد.

کلیدواژه‌ها

فرسایش خاک، لندفرم‌ها، مدل RUSLE، شاخص موقعیت توپوگرافی، حوضه آبریز زنوزچای، شمال غرب ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۸/۰۸

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۱۰/۳۰

* نویسنده مسئول: فریبا کرمی
 رایانامه: fkarami@tabrizu.ac.ir

۱-استاد گروه ژئومورفولوژی، دانشکده برنامه ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز

۲-استادگروه ژئومورفولوژی، دانشکده برنامه ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز

۳-دانش آموخته کارشناسی ارشد ژئومورفولوژی، دانشکده برنامه ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز

مقدمه

فرسایش خاک و تخریب زمین ناشی از آن، به عنوان یکی از جدی ترین مشکلات محیط زیست جهانی موثر بر توسعه پایدار بشر، توجه گسترده سیاستگذاران و محققان را به خود جلب کرده است (وانگ و سو^۱، ۲۰۲۰: ۱). فرسایش خاک توانایی تغییر ساختار خاک را دارد و بر حاصلخیزی خاک، بهره‌وری زمین، امنیت غذایی، تنوع بیولوژیکی و چرخه جهانی کربن تأثیر منفی می‌گذارد (هوا^۲ و همکاران، ۲۰۱۹: ۱). علت فرسایش خاک به شرایط اقلیمی (بویژه بارش‌های رگباری)، توپوگرافی و شیب زیاد زمین، لیتولوژی و فعالیت‌های انسانی مانند تغییر کاربری زمین، از بین بردن پوشش گیاهی، افزایش تولیدات کشاورزی، چرای بی‌رویه دام و غیره مربوط می‌شود (کرمی و بیاتی خطیبی، ۱۳۹۸: ۱۱۶). لندفرم‌ها^۳ که حاصل اثرات متقابل اقلیم و زمین‌شناسی هستند بر جریان آب سطحی، انتقال رسوب، خصوصیات خاک و اقلیم در مقیاس محلی تا منطقه‌ای تأثیرگذارند، به علاوه پدیده‌هایی همچون پوشش گیاهی نیز به طور مستقیم از الگوهای لندفرم تأثیر می‌پذیرند. شناسایی و طبقه‌بندی لندفرم‌ها اهمیت و کاربرد فراوانی در مطالعات خاکشناسی، فرسایش و رسوب و غیره دارد (بهرامی و همکاران، ۱۳۹۲: ۸). برای مثال، در شیب‌های تند و قسمت‌های بالایی دامنه‌ها، رواناب‌ها بیشتر تشکیل می‌شوند و در نتیجه فرسایش تشدید می‌شود. رواناب‌ها رسوبات حاصل از فرسایش بخش‌های بالایی دامنه‌ها را در پنجه دامنه‌ها انباشته می‌کنند. در دامنه‌های محدب نیز، میزان رواناب بیشتر و در نتیجه مقدار فرسایش نیز زیاد است (بیاتی خطیبی و کرمی، ۱۳۹۰). همچنین بررسی مقاومت واحدهای سنگی نسبت به فرسایش در مطالعات فرسایش و رسوب از اهمیت زیادی برخوردار است. چون که بعضی از واحدهای سنگی بسیار فرسایش‌پذیر و در رسوب‌زایی از استعداد بالایی برخوردار می‌باشد (فتحی زاد و همکاران، ۱۳۹۵: ۱۹۱). نرخ جهانی فرسایش خاک سالانه ۷۵ میلیارد تن تخمین زده می‌شود (عرب عامری و همکاران، ۲۰۲۰: ۲). در اروپا، بالاترین میزان متوسط سالانه از بین رفتن خاک (در سطح کشور) در ایتالیا ۸/۴۶، اسلونی ۷/۴۳ و اتریش ۷/۱۹ تن در هکتار در سال یافت می‌شود (روسکوپف^۴ و همکاران، ۲۰۲۰: ۳۵۴). ایران هر ساله بیش از دو میلیارد تن، تقریباً سه برابر سایر کشورهای آسیایی تلفات خاک دارد. تقریباً ۱۲۵ میلیون از ۱۶۵ میلیون هکتار سطح کشور، فرسایش را تجربه می‌کند. این تقریباً ۷۵٪ کل کشور و ۶۰٪ زمین‌های کشاورزی ایران است. متوسط فرسایش در ایران ۳۲-۳۰ تن در هکتار در سال است که ۴/۳ برابر متوسط جهانی است (عرب عامری و همکاران، ۲۰۲۰: ۲). این در حالیست که محمدی و همکاران (۱۳۹۷: ۵۵۱) با استفاده از مدل RUSLE متوسط فرسایش سالانه خاک در کشور را حدود ۲۴ تن در هکتار برآورد کردند و نشان دادند سالانه حدود ۶ میلیارد تن خاک از اراضی کشور فرسایش می‌یابد. خسارات اقتصادی ناشی از فرسایش خاک در ایران ۱۰ تریلیون ریال برآورد شده است (عرب عامری و همکاران، ۲۰۲۰: ۲). بنابراین، مدیریت و حفاظت از فرسایش خاک در ایران در راستای اهداف توسعه پایدار سازمان ملل متحد ضروری است.

با توجه به اهمیت موضوع برآورد نرخ فرسایش خاک و تاثیر عوامل مختلف مانند لیتولوژی و لندفرم‌ها در آن، مطالعات ارزشمند زیادی در دنیا و داخل کشور انجام شده است. برای مثال، فتحی زاد و همکاران (۱۳۹۵) در پژوهشی نقش حساسیت به فرسایش سازندهای زمین‌شناسی را در فرسایش و تولید رسوب زیرحوضه‌های رودخانه دویرج استان ایلام را بررسی کردند. نتایج نشان داد که حساسیت واحدهای زمین‌شناسی به فرسایش نقش به‌سزایی در تولید رسوب دارد. بطوری‌که بالا بودن فرسایش و تولید رسوب زیرحوضه ۱ نسبت به زیرحوضه ۲ به دلیل وجود سازندهای حساس به فرسایش به ویژه سازند گچساران بوده است. مکرم و همکاران (۱۳۹۶) در پژوهشی ارتباط ویژگی‌های مورفومتری حوضه نازلوچای و فرسایش‌پذیری در سطوح مختلف ارتفاعی را با استفاده از شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI) بررسی کردند. هدف پژوهش ارزیابی میزان حساسیت لندفرم‌ها به فرسایش از طریق ویژگی‌های مورفومتری در حوضه مطالعاتی بود. نتایج تحقیق نشان داد که با افزایش میزان چگالی زهکشی میزان فرسایش‌پذیری افزایش می‌یابد و دره‌های U شکل و زهکش‌های مرتفع دارای بیشترین فرسایش‌پذیری هستند. جعفرزاده و رضائی (۱۳۹۶) در پژوهشی برآورد فرسایش خاک را در حوضه سفیدرود با تاکید بر نقش لندفرم‌ها با استفاده از مدل PSIAC انجام دادند. نتایج تحقیق نشان داد که مناطق کوهستانی و کوهپایه‌ای حساسیت

- 1- Wang and Su
- 2- Hua
- 3- Landforms
- 4- Rosskopf

بیشتری نسبت به فرسایش داشته و عوامل موثر بر فرسایش در این مناطق فعالیت بیشتری دارند. بطوری که ۱۷ درصد از مناطق کوهستانی دارای فرسایش بسیار زیاد، ۵۸ درصد فرسایش زیاد و ۲۵ درصد فرسایش متوسط قرار دارند. باقریان کلات و همکاران (۱۳۹۷) در پژوهشی تاثیر نوع لیتولوژی بر میزان فرسایش و رسوبدهی خاک در حوزه آبخیز سد سنگرد در خراسان رضوی را با استفاده از روش‌های آماری بررسی کردند. نتایج نشان داد که لیتولوژی‌های مورد بررسی از نظر فرسایش و رسوبدهی با یکدیگر تفاوت معنی‌دار دارند. دو واحد کاری شامل مارن و کنگلومرا به ترتیب با رسوبدهی ۲۶۰/۹ و ۴۵/۱ گرم در متر مربع دارای بیشترین و کمترین مقدار رسوبدهی در منطقه می‌باشند. حبیبی و پیروان (۱۳۹۸) در مطالعه‌ای تاثیر پارامترهای ژئومورفیک بر میزان رسوب حوضه حبله رود را با استفاده از روش رگرسیون چندگانه بررسی کردند. نتایج نشان داد که بیشترین ارتباط را پارامترهای شیب، محیط حوضه، پوشش گیاهی و فرسایش پذیری سازندها داشته است. تازی پناه و همکاران (۱۴۰۱) در پژوهشی به طبقه‌بندی لندفرم‌ها با استفاده از شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI) و بررسی ریسک واقعی فرسایش آنها در مناطق کوهستانی (مطالعه موردی: حوضه آبخیز خراسان، استان فارس) پرداختند. برای تعیین کلاس‌های ریسک واقعی فرسایش از روش کورین استفاده شد و فرسایش در سه کلاس کم، متوسط و زیاد طبقه‌بندی شد. در کلاس فرسایش کم، متوسط و زیاد لندفرم‌های آبراهه، یال‌های مرتفع و قله به ترتیب با ۴۴، ۵۷ و ۵۹ درصد بیشترین سطح را به خود اختصاص دادند. اسفندیاری و همکاران (۱۴۰۱) در پژوهشی با تلفیق شاخص‌های زمینی و پوشش گیاهی حوضه آبخیز عموقین اردبیل فرسایش خاک را برآورد کردند. نتایج مطالعه نشان داد که مقدار متوسط فرسایش سالانه خاک برای کل حوضه در دامنه بین ۱/۲۱ تا ۵/۵۳ تن در هکتار در سال متغیر است. همچنین بررسی شاخص‌های زمینی با مدل RUSLE نشان داد که عامل پوشش گیاهی با ضریب تعیین ۰/۴۷ درصد نسبت به سایر شاخص‌های مورد مطالعه دارای همبستگی بیشتری است. زنگ و همکاران^۱ (۲۰۱۷) در پژوهشی، فرسایش خاک منطقه کوهستانی ولینگ^۲ چین را که دارای سازندهای کارستی بود، با استفاده از مدل RUSLE در دوره زمانی ۲۰۱۳-۲۰۰۰ ارزیابی کردند. نتایج تحقیق نشان داد که در این مدت فرسایش متوسط و زیاد به فرسایش کم تغییر پیدا کرده است. در واقع، کاهش تدریجی در تغییرات زمانی و مکانی فرسایش خاک در منطقه مورد مطالعه آشکار شد. وانگ و سو (۲۰۲۰) در پژوهشی فرسایش خاک را در کوهستان کیوینبا^۳ در جنوب استان شانکسی چین با استفاده از مدل RUSLE و GIS ارزیابی کردند. نتایج، نشان داد، توزیع مکانی فرسایش خاک، دارای ناهمگنی مکانی می‌باشد. مناطقی با فرسایش زیاد در مناطق با شیب بیش از ۳۵ درجه و در مناطق کوهستانی میانی با ارتفاع متوسط ۲۰۰۰-۸۰۰ متری قرار داشتند. دوآرت و همکاران^۴ (۲۰۲۱) در پژوهشی، فرسایش خاک دو منطقه کوهستانی بارانی مونتالگر^۵ و فلات خشک آلتجو^۶ را در کشور پرتغال با استفاده از مدل RUSLE مقایسه کردند. در این زمینه ۸ سناریو مختلف تعریف شد. نتایج نشان داد رفتار فرسایش خاک در هر دو منطقه مشابه می‌باشد، بطوری که تغییرات مکانی در فاکتور طول شیب LS در سنایورهای مختلف اعمال شده تاثیر قابل توجهی در برآورد فرسایش خاک دارد.

با توجه به پیشینه تحقیق، پژوهش حاضر سعی دارد میزان فرسایش خاک را در حوضه آبریز زنوزچای شهرستان مرند برآورد کند و نقش لندفرم‌ها و واحدهای لیتولوژی را در فرسایش خاک بررسی کند. در حوضه آبریز زنوزچای، سیلاب به‌عنوان یکی از متداول‌ترین فرایندهای رودخانه‌ای می‌باشد که بارش‌های رگباری-همرفتی اواخر زمستان و اوایل فصل بهار و همزمانی آنها با ذوب برف کوهستان-ها، شرایطی مساعد را برای وقوع سیلاب فراهم می‌آورد. از طرف دیگر، وجود ناپایداری‌های دامنه‌ای بدلیل وجود ارتفاعات و گسل‌های زیاد، سازندهای زمین‌شناسی مستعد ناپایداری مخصوصا وجود مارن‌های گچدار، ماسه‌سنگ با میان لایه‌های مارنی، تیپ فلیش، کنگلومرای ضخیم و پادگانه‌های آبرفتی مسائل متعددی را در این حوضه بوجود آورده است. در چنین شرایطی در صورت وقوع سیلاب،

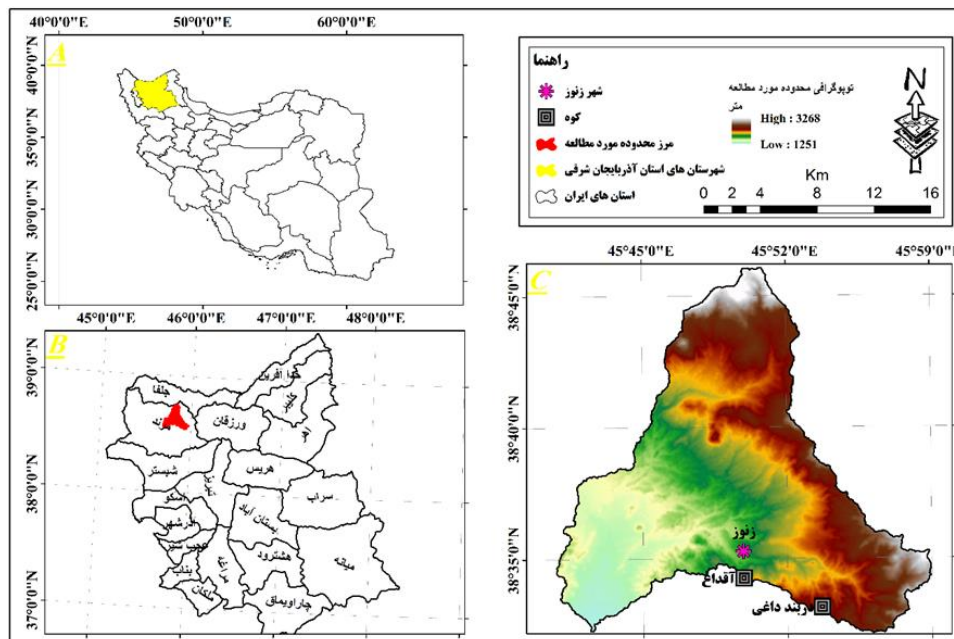
- 1- Zeng et al.
- 2- Wuling
- 3- Qinba
- 4- Duarte et al.
- 5- Montalegre
- 6- Alentejo

مقادیر زیادی از خاک از دسترس خارج می‌شود. از آنجایی که شهرستان مرند به‌عنوان یکی از قطب‌های تولید محصولات باغی در استان آذربایجان شرقی و منطقه شمال غرب کشور شناخته می‌شود و با توجه به اهمیت خاک در این منطقه و ضرورت اجرای عملیات حفاظت خاک، هدف پژوهش حاضر برآورد فرسایش خاک و میزان تولید رسوب در حوضه زنونچای است. وجه تمایز و جنبه نوآوری پژوهش حاضر، بررسی تلفیقی فرسایش خاک، لندفرم ها و واحدهای لیتولوژی حوضه است. یعنی مطالعه نقش لندفرم‌ها و واحدهای لیتولوژی در فرسایش خاک حوضه زنونچای با مدل RUSLE و با استفاده از نرم افزار Arc/GIS می‌باشد. در ارتباط با مطالعات حوضه زنونچای، کاشی زنوزی و همکاران (۱۳۹۲) در پژوهشی با تهیه نقشه سیمای طرح با هدف کنترل فرسایش براساس الگوی ژئومورفولوژی اقدام کردند. در این مطالعه با توجه به واحدهای شکل زمین، شیوه‌های مناسب برای کنترل فرسایش بررسی شد. همچنین کاشی زنوزی و همکاران (۱۳۹۴) در پژوهشی با استفاده از ویژگی‌های هیدروژئومورفولوژی، رسوب تولیدی در حوضه‌های زنونچای و زیلبرچای را محاسبه کردند. نتایج حاصل از مقایسه مقادیر محاسباتی با آمار مشاهداتی رسوب نشان داد مقدار رسوب محاسباتی در دو حوضه آبخیز مورد مطالعه به‌ترتیب با اطمینان ۸۵ و ۹۱ درصد مورد تایید است.

مواد و روش

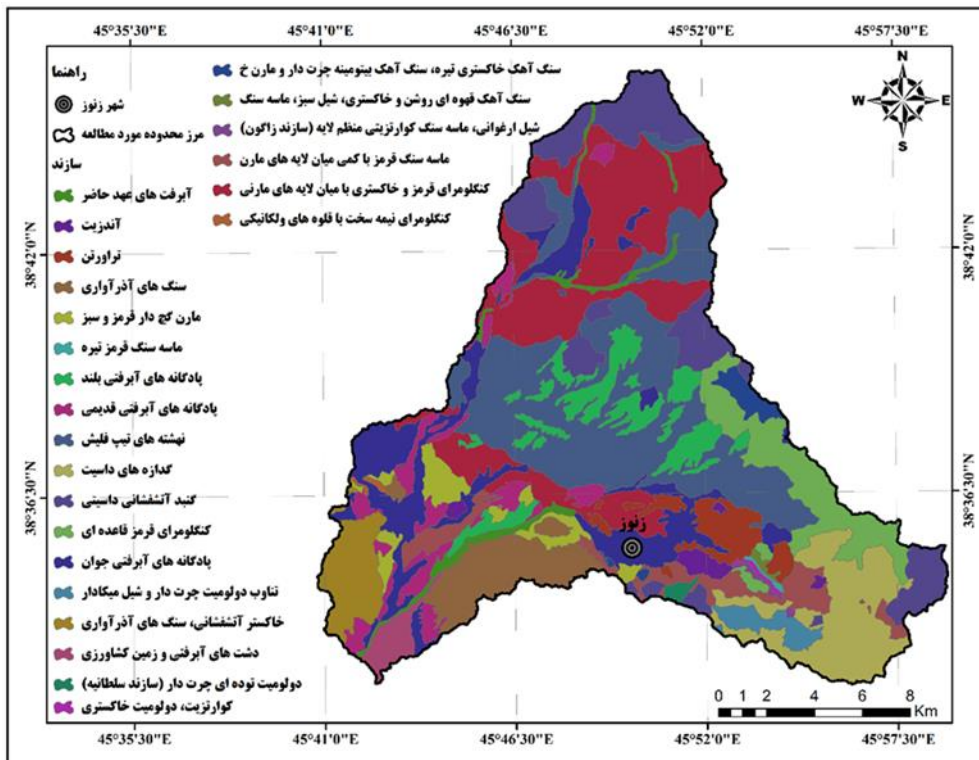
معرفی حوضه آبریز زنونچای

زنوزچای در استان آذربایجان شرقی و در محدوده سیاسی- اداری شهرستان مرند واقع شده است. مساحت این حوضه در حدود ۳۲۳ کیلومترمربع می‌باشد و در مختصات جغرافیایی ۳۸ درجه و ۳۲ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۴۶ دقیقه عرض شمالی و ۴۵ درجه و ۴۰ دقیقه تا ۴۵ درجه و ۵۹ دقیقه طول شرقی قرار گرفته است (شکل ۱). حوضه مورد مطالعه از شمال به ارتفاعات قزلداغ با ارتفاع ۲۷۱۲ متر و از شرق به ارتفاعات دربندداغی با ارتفاع ۳۱۸۲ متر و از جنوب به کوه اوداغی با ارتفاع ۲۴۲۴ متر و کوه آقداغ محدود شده است. زنوزچای پس از عبور از شهر یامچی به رودخانه زیلبرچای می‌پیوندد. رودخانه زیلبرچای نیز به رود ارس و در نهایت دریای خزر منتهی می‌شود. بیشترین سازندهای زمین‌شناسی حوضه را نهشته‌های تیپ فلیش که شامل سنگ‌های مارنی همراه با میان لایه‌های ماسه سنگی و آهکی و شیل و کنگلومرا می‌باشد و کنگلومرای قرمز و خاکستری با میان لایه‌های مارنی- کنگلومرای تشکیل می‌دهد. هر دو سازند مربوط به ائوسن هستند (شکل ۲).



شکل (۱): نقشه معرفی حوضه آبریز زنونچای در استان و کشور

Fig (1): The Zonuzchay catchment map



شکل (۲): نقشه واحدهای لیتولوژی حوضه آبریز زونوزچای

Fig (2): The geology formations map of Zonuzchay catchment

مدل جهانی فرسایش خاک تجدید نظر شده (RUSLE)

این مدل جزء روش‌های پرکاربرد محاسبه میزان فرسایش در بسیاری از حوضه‌های آبریز در سراسر جهان می‌باشد. این مدل نسخه اصلاح شده، مدل جهانی فرسایش خاک است. رابطه (۱) معادله این مدل را نشان می‌دهد (رنارد و همکاران، ۱۹۹۷؛ به نقل از عزیزیان و کوهی، ۱۳۹۷: ۲۸۵).

$$A=R \times K \times L \times S \times C \times P \tag{1}$$

A میزان خاک فرسایش یافته (تن در هکتار در سال)، R عامل فرساینده‌گی باران (مگاژول میلی‌متر در هکتار ساعت سال)، K عامل فرسایش‌پذیری خاک (تن ساعت بر مگاژول بر میلی‌متر)، L عامل طول دامنه (بی بعد)، S عامل درجه شیب زمین (بی بعد)، C عامل مدیریت پوشش گیاهی (بی بعد) و P عامل حفاظت خاک (بی بعد) می‌باشد (محمودی و نقشبندی، ۱۳۹۸: ۸۴۶؛ بهاتنی و همکاران، ۲۰۲۱: ۶).

عامل فرساینده‌گی باران (R)

عامل (R) شاخصی از قدرت فرساینده‌گی باران است که اثرات شدت و مدت بارندگی را در ایجاد فرسایش خاک نشان می‌دهد. این عامل حاصلضرب انرژی جنبشی یک رخداد (E) و حداکثر شدت ۳۰ دقیقه ای (I30) آن است. برای محاسبه شاخص R اطلاعات دقیق و پیوسته‌ای از هر رخداد مورد نیاز است که از ارقام ثبت شده توسط بارانسنج‌ها بدست می‌آید (محمودی و نقشبندی، ۱۳۹۸: ۸۴۷؛ زارع و همکاران، ۱۳۹۸: ۱۵۹). از آنجایی که آمار انرژی جنبشی بارندگی و داده های تفصیلی رگبار (شدت بارندگی) به ندرت در ایستگاه‌های هواشناسی موجود می‌باشند، میزان R را می‌توان با استفاده از شاخص اصلاح شده فورنیه برای تمام ایستگاه‌ها تخمین زد (رنارد و فریموند، ۱۹۹۴؛ به نقل از صفاری و همکاران، ۱۳۹۷: ۸۷). شاخص فورنیه بر اساس رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

$$F = \sum_{i=12}^{12} \frac{p_i^2}{\bar{p}} \tag{2}$$

در این رابطه P_i : متوسط بارندگی (میلی متر) در ماه i و p متوسط بارندگی سالیانه (میلی متر) است. در این مطالعه با استفاده از رابطه-
ی (۳)، شاخص فورنیه برای تمام ایستگاهها محاسبه می شود و مقدار R برای هر یک از ایستگاههای شاخص بر اساس روابط زیر برآورد
می شود. در این رابطه، R عامل فرساینده باران برحسب $(MJ\ mm\ ha^{-1}\ y^{-1}\ h^{-1})$ و F مقدار شاخص فورنیه است. در جدول (۲)
ایستگاههای مورد مطالعه و مقادیر میانگین بارش سالانه، مقادیر عامل فرساینده باران (R) و شاخص فورنیه (F) آمده است.

$$R = 0.07397 * F^{1/847} \quad F < 55\ mm \quad (3)$$

$$R = 98.77 - 6.081 * F + 0.4770 * F^2 \quad F > 55\ mm \quad (4)$$

عامل فرسایش پذیری خاک (عامل K)

این عامل میزان حساسیت خاک را در برابر جدا شدن و انتقال ذرات بیان می کند که این حساسیت به بافت خاک، پایداری خاکدانهها،
خصوصیات شیمیایی و بیولوژیکی آن بستگی دارد (ژانگ^۱ و همکاران، ۲۰۱۷: ۳۹). مقادیر عامل فرسایش پذیری خاک بر حسب تن
ساعت بر مگاژول میلی متر از صفر تا یک متغیر است. بدین صورت که مقادیر زیاد برای خاکهای دارای سیلت یا شن خیلی ریز زیاد و
خاکهایی با مقادیر زیاد رس که خود یک عامل پایداری است دارای میزان K حدود ۰/۰۵ تا ۰/۱۵ می باشند (واعظی و همکاران،
۱۳۹۶: ۳). برای محاسبه این فاکتور از نقشه بافت خاک و گروه هیدرولوژیکی خاک حوضه زونچای سازمان منابع طبیعی استان
استفاده شد که طبق رابطه (۵) که توسط لیو^۲ و همکاران (۲۰۰۱) و رنارد^۳ و همکاران (۱۹۹۷) ارائه شده قابل برآورد می باشد.

$$K = 7.594(0.0034 + 0.0405 \exp[-\frac{1}{2} * (\frac{\log(D_g) + 1.659}{0.7101})^2]) \quad (5)$$

در رابطه فوق K ، میزان حساسیت خاک در برابر جدا شدن ذرات، D_g ، میانگین هندسی قطر ذرات تشکیل دهنده خاک (mm) می باشد
و از رابطه (۶) به دست می آید:

$$D_g = \sum f_i * D_i \quad (6)$$

که در آن f_i ، درصد فروانی هر ذره (شن، ماسه و رس) و D_i ، قطر هندسی هر ذره (mm) می باشد (عزیزیان و کوهی، ۱۳۹۷: ۲۸۷). قابل
ذکر است مورگان ضریب فرسایش پذیری (عامل) را برای خاکهای مختلف در جدولی ارائه کرده (احمدی، ۱۳۸۸: ۵۰۷) که در حوضه
زونچای فاکتور فرسایش پذیری خاک، براساس بافت خاک، گروه هیدرولوژیکی خاک و مقادیر جدول مورگان مطابق با مطالعات مشابه
(گلی مختاری و همکاران ۱۳۹۷: ۹؛ اسفندیاری و همکاران، ۱۴۰۱: ۸۳) برآورد شده است.

عامل توپوگرافی (LS)

عامل توپوگرافی اثرات طول شیب (L) و درجه شیب (S) را بر میزان فرسایش خاک نشان می دهد (محمودی و نقشبندی، ۱۳۹۸:
۸۴۹). برای محاسبه این فاکتور از رابطه (۹) استفاده شد.

$$LS = (Flow\ Accumulation * \frac{Cell\ Size}{22^{13}})^{0.4} * \quad (9)$$

$$(\frac{\sin(slope) * 0.01745}{0.0896})^{1.3}$$

Flow Accumulation، جهت جریان رودخانهها را نشان می دهد که در نرم افزار Arc GIS قابل محاسبه است (طالبی خیاوی و مصطفی
زاده، ۲۰۲۲: ۵). Cell Size، اندازه پیکسل سائز سلولهای نقشه جهت جریان که پایه آن نیز نقشه DEM می باشد را نشان می دهد. در
این پژوهش برای تهیه نقشه عامل LS از DEM ۱۲/۵ متری ماهواره Alos Palsar استفاده گردید. ابتدا نقشه شیب از DEM حوضه
مورد مطالعه استخراج شد. سپس نقشه جهت جریان با استفاده از الحاقیه هیدرولوژی موجود در نرم افزار ArcGIS با استفاده از تابع
Flow Accumulation تهیه شد. در نهایت نقشه عامل LS طبق رابطه ی (۹) استخراج گردید.

- 1- Zhang
- 2- Liu
- 3- Renard

عامل مدیریت پوشش گیاهی (عامل C)

این عامل اثر گیاهان، پوشش خاک، هوموس خاک و فعالیت های موجودات خاک بر روی فرسایش را نشان می دهد و بیانگر مقدار خاک از بین رفته از زمین زیر کشت، به خاک فرسوده شده از همان قطعه زمین در طی آیش مداوم و عاری از پوشش و بقایای گیاهی- می باشد. در این پژوهش برای محاسبه عامل (C) از شاخص پوشش گیاهی (NDVI) با استفاده از تصویر ماهواره لندست ۸ سنجنده OLI و رابطه ی (۷) به دست آمد.

$$NDVI = \frac{IR (BAND 5) - R (BAND 4)}{IR (BAND 5) + R (BAND 4)} \quad (7)$$

مقدار این شاخص از ۱- تا ۱+ است. رابطه بین C و NDVI به صورت رابطه (۸) قابل محاسبه است. به این ترتیب، مقدار C در هر سلول می تواند مورد محاسبه قرار گیرد. مقدار C بین صفر و یک است که با مقدار NDVI رابطه عکس دارد.

$$C = \frac{1 - NDVI}{2} \quad (8)$$

عامل حفاظت خاک (عامل P)

این عامل تأثیر اقدامات حفاظتی صورت گرفته در سطح حوضه را بر مقدار فرسایش تولید شده در آن نشان می دهد (توماس و همکاران، ۲۰۱۸). منظور از کارهای حفاظتی، بیشتر کشت در روی خطوط تراز، کشت نواری و تراس بندی، درختکاری، جلوگیری از قطع بی رویه درختان و جلوگیری از چرای بی رویه دام است (عزیزیان و کوهی، ۱۳۹۷: ۲۸۸). مقدار ضریب P از ۰ تا ۱ متغیر است صفر نشان دهنده عملکرد خوب حفاظت و یک نشان دهنده عملکرد ضعیف حفاظت است (بهاتی^۱ و همکاران، ۲۰۲۱: ۹). در این پژوهش مقادیر فاکتور P بر اساس مقادیر مطالعات مشابه (آسیدو^۲، ۲۰۱۸: ۷؛ صفاری و همکاران، ۱۳۹۷: ۸۹ و خالدی و همکاران، ۱۴۰۰: ۵۴۰) برای کاربری های مختلف حوضه بدست آمده است.

ارتباط فاکتورهای فرسایش در میزان هدر رفت سالانه خاک

در این پژوهش، از ضریب همبستگی برای بررسی ارتباط بین متغیر وابسته و متغیرهای مستقل و همچنین تأثیر بیشترین عامل در میزان هدر رفت سالانه خاک استفاده شده است. در این زمینه، هدر رفت سالانه خاک به عنوان متغیر وابسته و فاکتورهای فرسایش باران، فرسایش پذیری خاک، طول شیب، حفاظت خاک و پوشش گیاهی به عنوان متغیرهای مستقل در نظر گرفته شدند (گلی مختاری و همکاران، ۱۳۹۷: ۶). ضریب همبستگی همیشه بین ۰ تا ۱ درصد است که صفر درصد نشان دهنده این است که مدل مورد استفاده هیچ یک از تغییرپذیری داده های پاسخ در اطراف میانگین آن را تبیین نمی کند و مقدار یک درصد نشان می دهد که مدل مورد استفاده تغییرپذیری داده ها را در اطراف میانگین آن را تبیین می کند (اسفندیاری و همکاران، ۱۴۰۱: ۹۱).

محاسبه نسبت تحویل رسوب (SDR)

برای اعتبارسنجی میزان رسوب محاسباتی با رسوب مشاهده ای از نسبت تحویل رسوب (SDR)، استفاده شد. این شاخص مناسب ترین روش برای محاسبه مقدار رسوب خروجی از یک حوضه می باشد. نسبت تحویل رسوب برابر است با نسبت مقدار رسوب خروجی از حوضه به فرسایش تولید شده در آن که طبق رابطه (۱۰) محاسبه می شود. براساس تحقیقات صورت گرفته در این زمینه مقدار SDR بین ۰ تا ۱ متغیر می باشد و هرچه مساحت حوضه آبریز افزایش یابد مقدار SDR نیز کاهش می یابد. در این مطالعه از چهار مدل، میدمنت، وانونی، USDA و بویس (روابط ۱۴-۱۱)، برای محاسبه SDR استفاده گردید (آرخی و نیازی، ۱۳۸۹: ۴؛ عزیزیان و کوهی، ۱۳۹۷: ۲۸۹).

$$SDR = \frac{Y}{E} \quad (10)$$

$$SDR = 0.035A^{-0.3} \quad (11)$$

1- Bhatti
2- Asiedu

$$SDR = 0 \cdot 4724A^{-0.125} \quad (12)$$

$$SDR = 0 \cdot 5656A^{-0.11} \quad (13)$$

$$SDR = 0 \cdot 3750A^{-0.2382} \quad (14)$$

که در روابط فوق: A مساحت حوضه آبریز بر حسب کیلومتر مربع، Y مقدار رسوب خروجی بر حسب تن و E مقدار فرسایش ایجاد شده بر حسب تن در حوضه آبریز می باشد.

شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI) برای طبقه بندی لندفرم ها

مفهوم کلی و کاربرد شاخص موقعیت توپوگرافی این است که به صورت دقیق و غیر توصیفی مرز لندفرم هایی مانند: ارتفاعات، شیب تند، مناطق مسطح، دره و غیره را با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی به صورت اتوماتیک و سریع، تعریف و تعیین نماید (ملکی و همکاران، ۱۳۹۵: ۱۳۲). در پژوهش حاضر به منظور تهیه نقشه لندفرم های حوضه آبریز زوزچای از شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI) استفاده شد. این شاخص طبق رابطه (۱۵) مقایسه ارتفاع هر سلول در یک مدل رقومی ارتفاع با میانگین ارتفاع سلول های همسایه می باشد. در نهایت ارتفاع میانگین از مقدار ارتفاع در مرکز کم می شود (ویز، ۲۰۰۱؛ جنز، ۲۰۰۶: ۲۰).

$$TPI_I = Z_0 - \frac{\sum_{n=1} Z_n}{n} \quad (15)$$

در این رابطه، Z_0 ارتفاع نقطه مدل تحت ارزیابی، Z_n ارتفاع از شبکه و n تعداد کل نقاط اطراف در نظر گرفته شده در ارزیابی است. شاخص موقعیت توپوگرافی، ارزش هر پیکسل در DEM را با ارزش پیکسل مشخص اطراف آن مقایسه می کند. مقادیر مثبت TPI نشان دهنده مناطقی است که بالاتر از نقاط اطراف قرار گرفته (تپه ها) و مقادیر منفی TPI نشان دهنده مناطقی است که پایین تر از اطرافشان هستند (دره ها). مقادیر صفر و نزدیک صفر نیز نشان دهنده مناطق مسطح (جایی که شیب نزدیک صفر است) یا مناطقی با شیب ثابت هستند (مکرر و همکاران، ۱۳۹۶: ۱۳۴). بر اساس مقادیر TPI یک طبقه بندی برای لندفرم صورت گرفته است که در جدول ۱)

شاخص موقعیت توپوگرافی در حوضه شناسایی شد. در نهایت، نقشه های فرسایش خاک و لندفرم های حوضه زوزچای که با شاخص

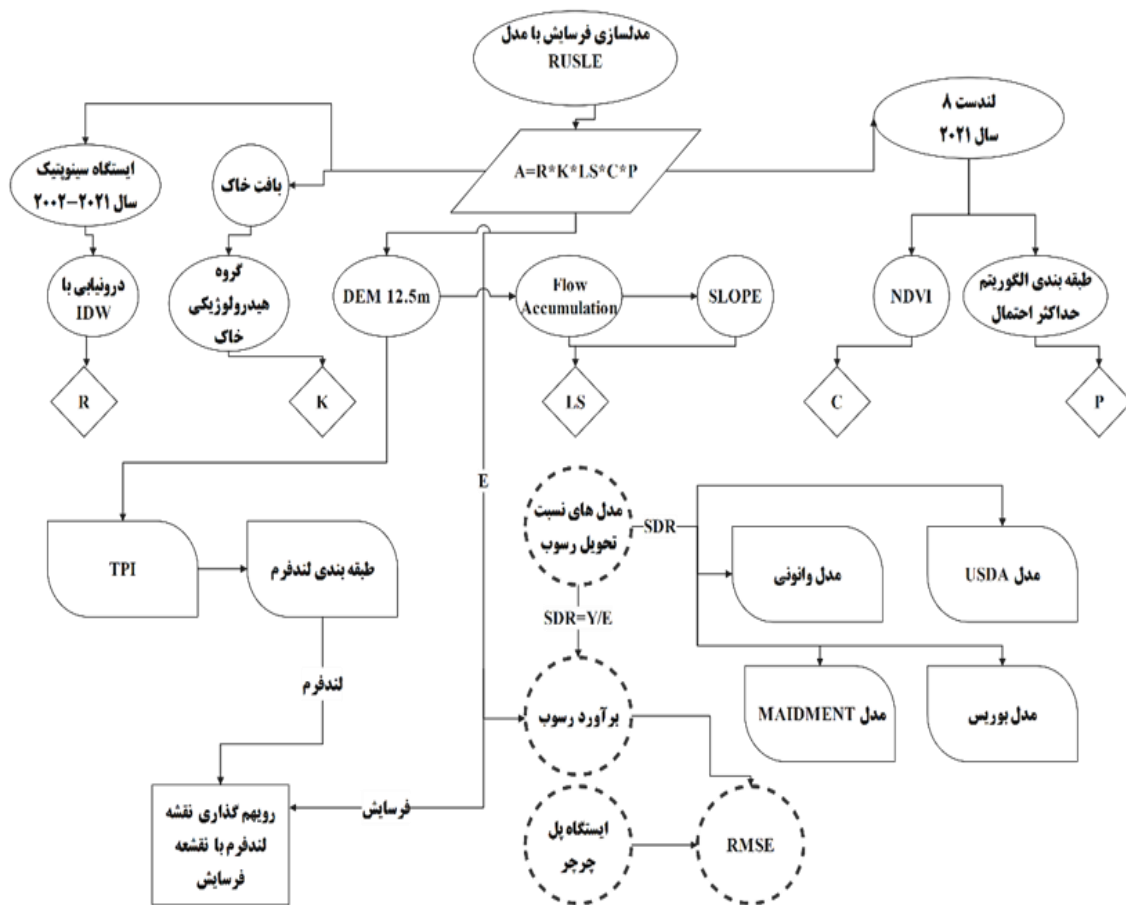
و شاخص های مورد استفاده، شکل (۳) فلوچارت مراحل تحقیق حاضر نشان می دهد. TPI بدست آمده اند در محیط GIS رویهم گذاشته شدند

جدول (۱): طبقه بندی انواع لندفرم ها بر اساس شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI) (ویز، ۲۰۰۱؛ جنز، ۲۰۰۶: ۲۰)

Table (1): Classification of landforms based on the topographic position index (TPI)

مقادیر TPI	نوع لندفرم	ردیف
$-1 < TPI < 1$	دره های آبراهه های میانی، دره های کم عمق	۱
$TPI > 1$	فلات های بالایی (سطوح مسطح واقع بر ارتفاعات)	۲
$-1 < TPI < 1$	تپه های محلی	۳
$TPI \leq -1$	تپه های کوچک در دشت	۴
$TPI \geq 1$	ستبغ های مرتفع، قله کوه	۵
$TPI \leq -1$	دره ها و بریدگی های واقع بر ارتفاعات، آبراهه عمیق	۶
$-1 < TPI < 1$	دامنه های باز	۷
$-1 < TPI < 1$	دشت های کوچک	۸
$TPI \geq 1$	زهکش های مرتفع	۹
$TPI \leq -1$	دره های u شکل	۱۰

1- Weiss
2- Jenness



شکل (۳): نمودار جریان‌ی پژوهش

Fig (3). Research flowchart

یافته‌ها و بحث

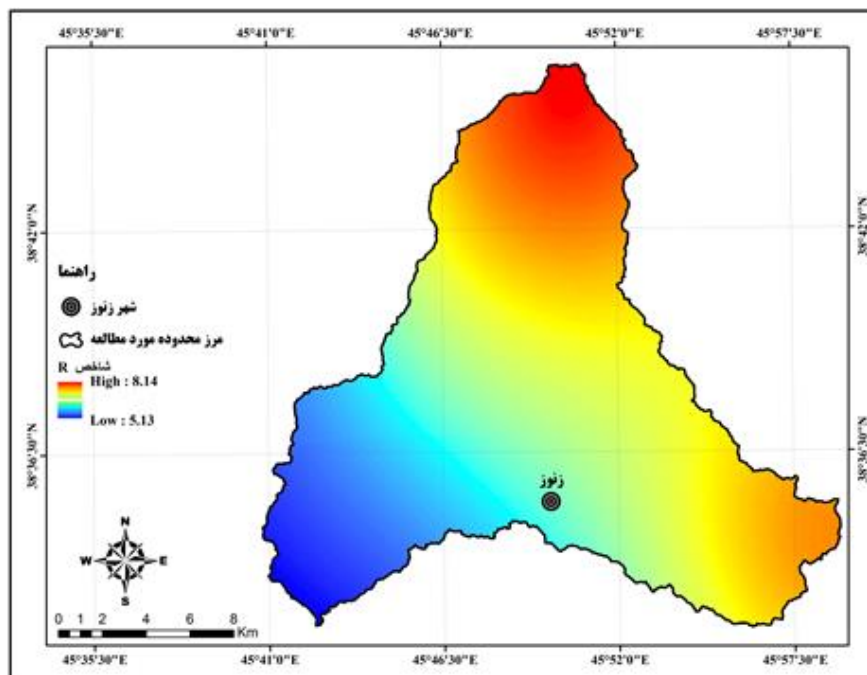
برآورد میزان فرسایش خاک با استفاده از مدل RUSLE

عامل فرساینده باران (R)

در پژوهش حاضر برای محاسبه عامل فرساینده باران از داده‌های ایستگاه سینوپتیک مجاور حوضه شامل مرند، جلفا، شرق تبریز، فرودگاه تبریز، شبستر، اهر، ورزقان و کلیبر (به دلیل نبود ایستگاه سینوپتیک در داخل حوضه مورد نظر) استفاده شد. برای تهیه نقشه R ابتدا شاخص فورنیه با استفاده از داده‌های میانگین ماهانه و سالانه ایستگاه‌های مورد نظر محاسبه شد (جدول ۲). سپس عامل R برای ایستگاه‌های مورد نظر محاسبه و نقشه آن از طریق روش درونیابی IDW ترسیم شد (شکل ۴). به این ترتیب، حداکثر مقدار شاخص فورنیه (F) در حوضه زون‌چای برابر با ۶۵/۳۱ مربوط به ایستگاه کلیبر و حداقل آن برابر با ۲۴/۸۴ مربوط به ایستگاه جلفا بدست آمد. براساس نقشه عامل R حداکثر میزان فرساینده باران در شمال، شرق و جنوب شرق حوضه دیده می‌شود و جنوب غربی و جنوب حوضه دارای کمترین مقدار فرساینده باران هستند.

جدول (۲): مقادیر میانگین بارندگی سالانه، شاخص فورنیه و عامل فرساینده باران ایستگاهها در بازه زمانی ۱۵ سال
 Table (2): Average of annual rainfall, Fournier index and rainfall erosivity factors of the stations in a period of 15 years

ایستگاه	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	ارتفاع (متر)	بارندگی سالانه (میلی متر)	شاخص فورنیه	عامل فرساینده باران MJ mm ha-1y-1h-1
جلفا	۳۸° ۵۵' ۴۷"	۴۵° ۳۶' ۳۵"	۷۲۹	۲۴۰/۱۲	۲۴/۸۴	۱/۶۲
اهر	۳۸° ۲۹' ۲۴"	۴۷° ۰۲' ۵۹"	۱۳۸۸	۲۷۹/۸۶	۲۹/۲۷	۲/۲۰
فرودگاه تبریز	۳۸° ۰۷' ۱۱"	۴۶° ۱۳' ۴۷"	۱۳۴۴	۲۶۹/۲۵	۳۰/۰۱	۲/۳۰
سهند	۳۷° ۵۵' ۱۲"	۴۶° ۰۹' ۴۵"	۱۶۹۱	۲۱۹/۴۴	۲۵/۸۴	۱/۷۵
کلیبر	۳۷° ۵۲' ۱۱"	۴۶° ۰۱' ۴۸"	۱۱۹۰	۵۰۹	۶۵/۳۲	۸/۱۵
مرند	۳۸° ۲۲' ۴۸"	۴۵° ۴۶' ۱۲"	۱۵۳۶	۴۱۷/۵۱	۴۳/۹۴	۴/۶۵
ورزقان	۳۸° ۳۰'	۴۴° ۴۰' ۱۲"	۱۶۷۶	۴۸۵	۵۹/۱۵	۷/۶۸
شبستر	۳۸° ۱۰' ۱۲"	۴۵° ۴۰' ۴۷"	۱۳۹۴	۲۲۱/۰۴	۲۵/۶	۱/۷۳
شرق تبریز	۳۸° ۰۲' ۵۹"	۴۶° ۲۰' ۲۴"	۱۵۰۶	۳۲۳/۶۶	۵۰/۶۵	۶/۰۵



شکل (۴): نقشه عامل فرساینده باران (R) در حوضه آبریز زونوزچای
 Fig (4): Rainfall erosivity factor map of Zonuzchay catchment

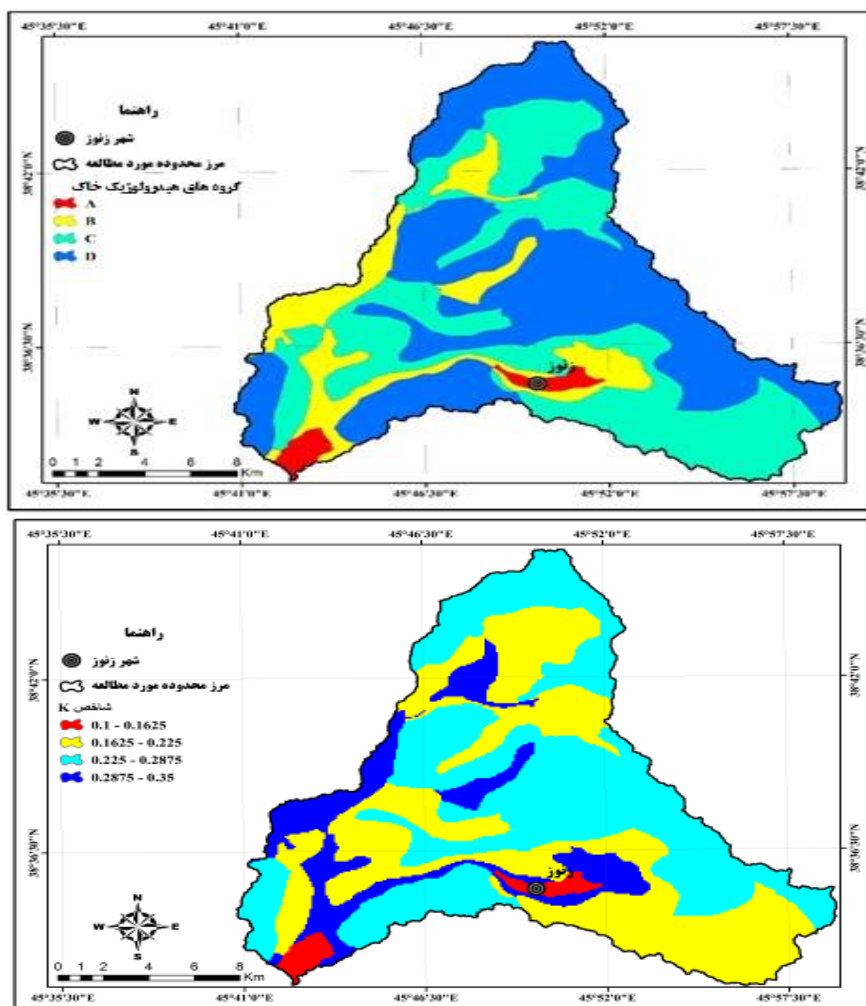
عامل فرسایش پذیری خاک (K)

مقادیر عامل K با استفاده از مطالعات پیشین و گروه‌های هیدولوژیکی خاک برای بافت‌های مختلف خاک محدوده مورد نظر استخراج شده است (جدول ۳). در حوضه زونوزچای بیشترین میزان این عامل مربوط به گروه هیدولوژیکی B برابر با ۰/۳۵ مگا تن در هکتار در ساعت بر مگا ژول هکتار میلی‌متر و حداقل آن مربوط به گروه A برابر با ۰/۱ مگا تن در هکتار در ساعت بر مگا ژول هکتار میلی‌متر

می‌باشد. گروه‌های C و D نیز به ترتیب برابر با ۰/۲ و ۰/۲۷ مگا تن در هکتار در ساعت بر مگا ژول هکتار میلی‌متر بوده است. گروه A دارای مساحت ۷/۲۵ کیلومترمربع که در قسمت‌های جنوب و جنوب غرب محدوده به صورت پراکنده می‌باشد. گروه B با ۴۴/۲۳ کیلومتر مربع در قسمت‌های جنوب، جنوب غرب و شمال را شامل می‌شود. گروه C نیز با ۱۲۳/۱۳ کیلومتر مربع تقریباً همه بخش‌های محدوده مورد مطالعه را شامل می‌شود و گروه D که دارای مساحت ۱۴۵/۶۰ کیلومتر مربع می‌باشد. قسمت‌های جنوب، جنوب غرب، شمال غرب و قسمت‌های مرکزی حوضه آبریز زنونزچای را در برمی‌گیرد (شکل ۵).

جدول (۳): گروه‌های هیدرولوژیکی خاک و مقادیر عامل فرسایش پذیری خاک در حوضه آبریز زنونزچای
Table (3): Soil hydrological groups and soil erodibility factor in Zonuzchay catchment

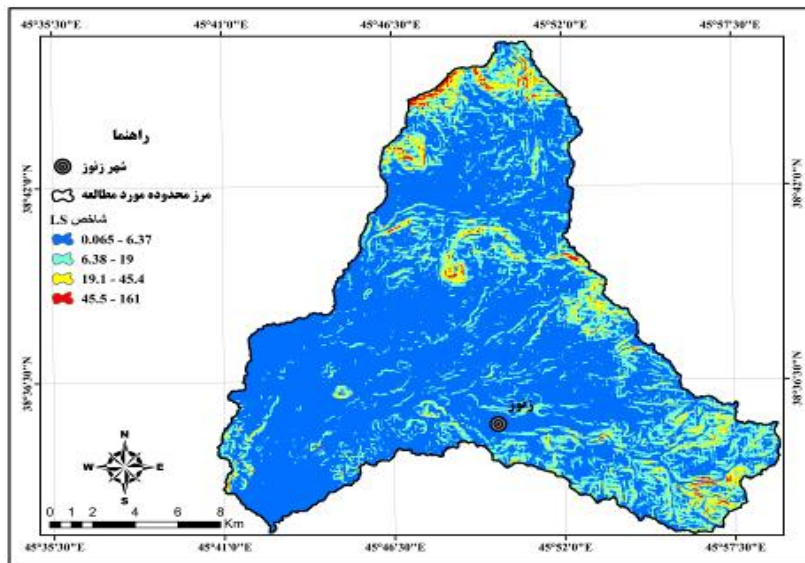
گروه هیدرولوژیکی	عامل K	مساحت (کیلومترمربع)	درصد
D	۰/۲۷	۱۴۵/۶۰	۴۵/۴۷
C	۰/۲	۱۲۳/۱۳	۳۸/۴۵
B	۰/۳۵	۴۴/۲۳	۱۳/۸۱
A	۰/۱	۷/۲۵	۲/۲۷



شکل (۵): نقشه گروه‌های هیدرولوژیکی خاک (بالا) و عامل K در حوضه آبریز زنونزچای (پایین)
Fig5: Soil hydrologic groups map (A) and K factor map of Zonuzchay catchment

عامل توپوگرافی (LS)

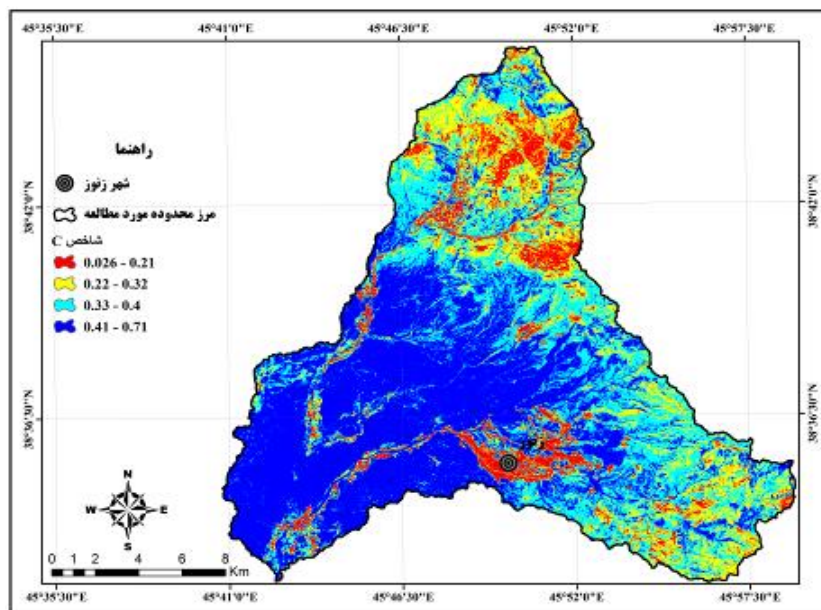
براساس نقشه عامل LS حداقل مقدار شاخص برابر با 0.065 می باشد که بیشتر شیب های کم و هموار را شامل می شود. حداکثر آن نیز برابر با 161 بوده که دامنه های شیبدار، و پرتگاه ها را شامل می شود (شکل ۶).



شکل (۶): نقشه عامل LS در حوضه آبریز زونوزچای
Fig 6: LS factor map of Zonuzchay catchment

عامل مدیریت پوشش گیاهی (C)

مقدار این عامل در حوضه آبریز زونوزچای بین 0.026 تا 0.71 متغیر بوده و متوسط آن 0.36 می باشد (شکل ۷). نقشه عامل C نشان می دهد که بیشترین مقدار این پارامتر در مناطق بدون پوشش گیاهی یا دارای پوشش گیاهی ناچیز است و کمترین آن نیز در مناطقی است که پوشش گیاهی متراکمی دارد. در نقشه مورد نظر مناطقی که با رنگ قرمز مشخص شده دارای پوشش گیاهی متراکمی می باشد و مناطقی با رنگ آبی نشان دهنده بدون پوشش گیاهی یا دارای پوشش گیاهی ناچیز می باشد (شکل ۷).



شکل (۷): نقشه عامل مدیریت پوشش گیاهی (C) در حوضه آبریز زونوزچای

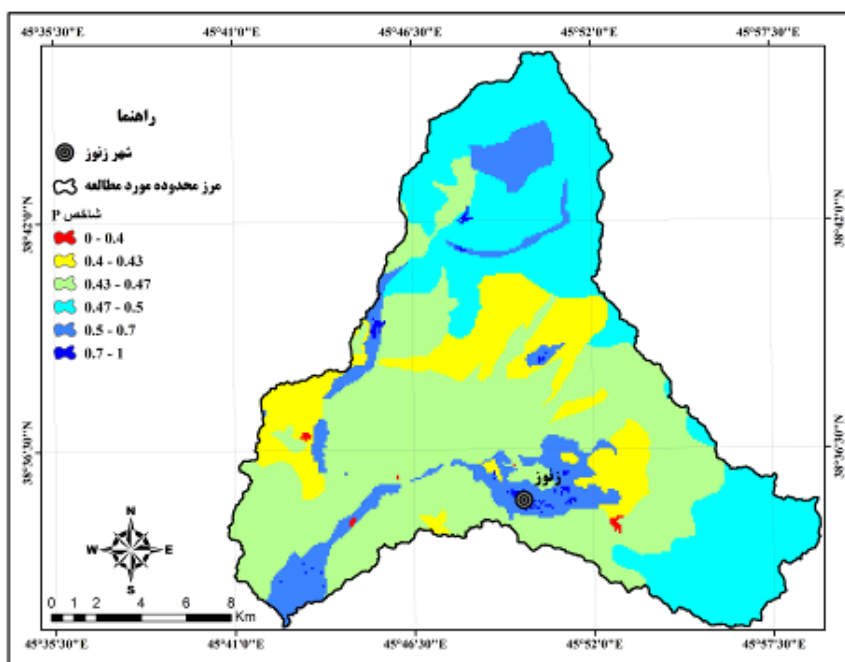
Fig 7: C factor map of Zonuzchay catchment

عامل عملیات حفاظتی خاک (P)

این عامل از طریق طبقه بندی نقشه کاربری اراضی تهیه گردید. مقادیر این عامل بین صفر تا ۱ می باشد. در نقشه (شکل ۸) برای مناطق مسکونی و بایر رنگ قرمز در نظر گرفته شده است و مناطقی با رنگ آبی مربوط به کاربری های زراعی آبی و باغات است. جدول (۴) انواع کاربری های حوضه زونزچای و میزان فاکتور P هر کدام از کاربری ها را نشان می دهد.

جدول (۴): مقادیر فاکتور P برای کاربری های محدوده مورد مطالعه

کاربری	P فاکتور	مساحت (KM ²)	درصد مساحت
زراعت دیم	۰/۴	۴۳/۴۸	۱۳/۴۶
زراعت آبی و باغات	۰/۷	۳۳/۱۳	۱۰/۲۵
سطوح آبی	۰	۰/۵	۰/۱۶
مراتع متراکم	۰/۵	۱۰۲/۱۹	۳۱/۶۲
مراتع نیمه تراکم	۰/۴۷	۸۴/۷۴	۲۶/۲۲
مراتع کم تراکم	۰/۴۳	۵۷/۵۸	۱۷/۸۲
مناطق مسکونی	۱	۱/۵۱	۰/۴۷



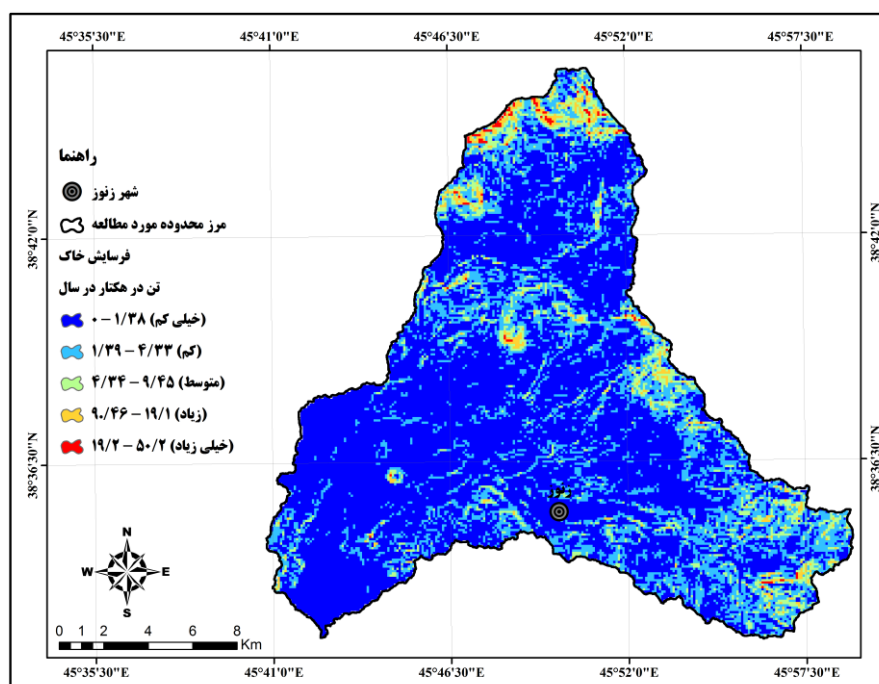
شکل (۸): نقشه عامل عملیات حفاظتی خاک (P) در حوضه آبریز زونزچای

Fig 8: P factor map of Zonuzchay catchment

فرسایش خاک

متوسط فرسایش خاک از طریق ضرب عامل فرساینده باران (R)، عامل فرسایش پذیری خاک (K)، عامل توپوگرافی (LS)، عامل مدیریت پوشش گیاهی (C) و عامل عملیاتی حفاظتی خاک (P) با استفاده از مدل RUSLE در محیط نرم افزار ArcGIS محاسبه شد که در شکل (۹) نشان داده شده است. مقادیر فرسایش خاک در محدوده مورد مطالعه بین ۰ تا ۵۰/۲۰ تن در هکتار در سال در سطح یک پیکسل متغیر می باشد. متوسط فرسایش خاک ۱/۷۱ تن در هکتار در سال است. نقشه فرسایش در ۵ کلاس خطر (بسیار کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد) طبقه بندی شده است. مساحت و درصد هر یک از کلاس های خطر در جدول (۵) ارائه شده است. براین اساس بخش عمده ای از حوضه (۶۷/۰۷ درصد) جزء طبقه فرسایشی خیلی کم می باشد. طبقات بعدی به ۲۳/۷۴ درصد در طبقه

کم، ۶/۸۳ درصد در طبقه متوسط، ۱/۹۳ درصد در طبقه زیاد و ۰/۴۴ درصد در طبقه فرسایشی خیلی زیاد قرار گرفته است. طبقات خیلی زیاد و زیاد منطبق بر دامنه‌های پر شیب، ارتفاعات و مناطقی که تجمع جریان آبراهه‌ها زیاد است را شامل می‌شود. طبقات متوسط، کم و خیلی کم نیز در دامنه‌های با شیب کم و مناطق هموار و دشت‌ها را شامل می‌شود (شکل ۹).



شکل (۹): نقشه فرسایش خاک بر اساس مدل RUSLE در حوضه آبریز زونوزچای

Fig 9: Soil erosion map of Zonuzchay catchment

جدول (۵): مساحت و درصد مساحت طبقات فرسایش خاک بر اساس مدل RUSLE در حوضه آبریز زونوزچای

Table (5): Area and percentage of soil erosion classes based on RUSLE model in Zonuzchay catchment

متوسط فرسایش	درصد مساحت	مساحت (Km ²)	پهنه های فرسایش	طبقات
۱/۷۱	۶۷/۰۷	۲۱۴/۵۶	خیلی کم	۰ - ۱/۳۸
	۲۳/۷۴	۷۵/۹۵	کم	۱/۳۹ - ۴/۳۳
	۶/۸۳	۲۱/۸۴	متوسط	۴/۳۴ - ۹/۴۵
	۱/۹۳	۶/۱۷	زیاد	۹/۴۶ - ۱۹/۱
	۰/۴۴	۱/۴۱	خیلی زیاد	۱۹/۲ - ۵۰/۲

محاسبه نسبت تحویل رسوب در حوضه آبریز زونوزچای

در پژوهش حاضر، برای اعتبارسنجی برآورد میزان فرسایش خاک و داده‌های مشاهداتی، محاسبه SDR یا نسبت تحویل رسوب با استفاده از مدل‌های وانونی، USDA، بوریس و میدمنت انجام شد (جدول ۶). نسبت تحویل رسوب در مدل وانونی برابر با ۰/۵۳، در مدل USDA برابر با ۰/۵۶، در مدل بوریس برابر با ۰/۵۵ و در مدل میدمنت برابر با ۰/۴۸ محاسبه گردید. سپس طبق رابطه SDR رسوب خروجی حوضه برآورد شد که مدل USDA و بوریس به ترتیب بیشترین (۲۸/۳۴) و کمترین (۲۴/۳۲) تن در هکتار در سال را نشان دادند. برای ارزیابی مقدار رسوب برآورد شده با رسوب ایستگاه هیدرومتری از پارامتر RMSE استفاده شد که در جدول (۶) آورده

شده است. در نهایت از مقایسه میزان رسوب مشاهده‌ای و برآورد شده مشخص شد که میزان رسوب تخمینی مدل USDA با توجه به میزان RMSE به میزان رسوب مشاهده‌ای نزدیکتر است. با وجود این حداکثر رسوب برآورد شده (۲۸/۳۴ تن در هکتار) نسبت به رسوب مشاهده‌ای (۳۲/۷۱ تن در هکتار) کمتر بدست آمده است.

جدول (۶): نسبت تحویل رسوب و رسوب برآورد شده براساس مدل‌های SDR

Table (6): Sediment delivery ratio and estimated sediment based on SDR models

مدل	رسوب مشاهده‌ای تن در هکتار در سال	حداکثر رسوب برآورد شده تن در هکتار در سال	نسبت تحویل رسوب	RMSE
وانونی	۳۲/۷۱	۲۶/۸۱	۰/۵۳	۵/۹
USDA	۳۲/۷۱	۲۸/۳۴	۰/۵۶	۴/۳۷
بوریس	۳۲/۷۱	۲۷/۷۸	۰/۵۵	۴/۹۳
میدمنت	۳۲/۷۱	۲۴/۳۲	۰/۴۸	۸/۳۹

بررسی عامل موثر در فرسایش خاک براساس مدل RUSLE

نتایج حاصل از روابط رگرسیونی فرسایش سالانه خاک با فاکتورهای R, P, LS, C و K در جدول (۷) ارائه شده است. بدین صورت که بیشترین ضریب تبیین بین فرسایش سالانه خاک با فاکتورهای موثر عامل طول دامنه (LS) است که با مقدار ۰/۹۵ می‌باشد. پس از فاکتور LS، فاکتور R با ضریب تبیین ۰/۲۷ در فرسایش خاک تاثیر مثبتی دارد.

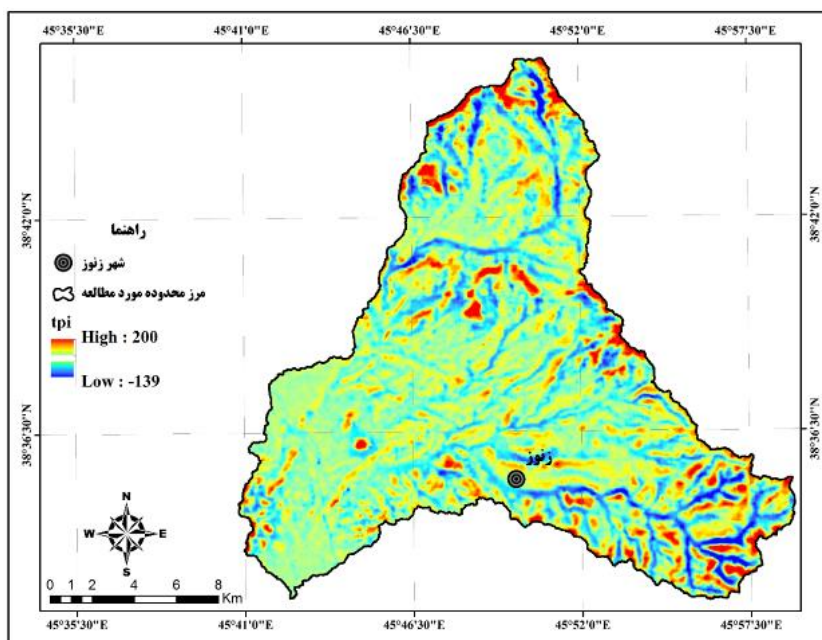
جدول (۷): ضریب همبستگی بین فرسایش خاک با معیارهای تاثیر گذار

Table (7): Correlation coefficient between soil erosion and effective criteria

عوامل مدل	ضریب تبیین
R	۰/۲۷
P	۰/۰۱
LS	۰/۹۵
C	۰/۰۴۶
K	۰/۰۴۸

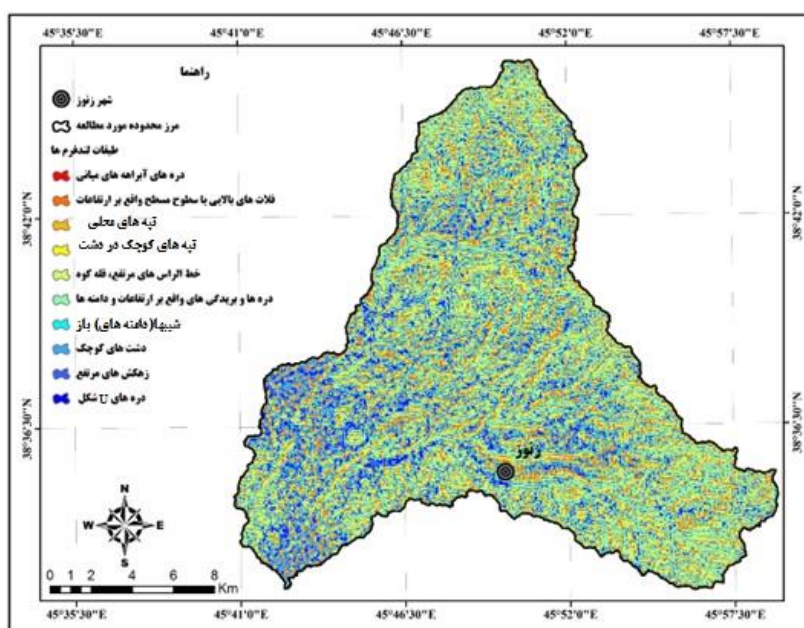
آشکارسازی لندفرم‌های حوضه آبریز زوزچای با استفاده از شاخص TPI

در این پژوهش برای طبقه‌بندی و تفکیک لندفرم‌های حوضه از شاخص موقعیت توپوگرافی با استفاده از مدل رقومی ارتفاع با قدرت تفکیک ۱۲/۵ متر استفاده شد. براساس این شاخص تعداد ۱۰ نوع لندفرم در حوضه زوزچای شناسایی شد. طبق نقشه شاخص موقعیت توپوگرافی، مقادیر TPI منطقه مورد مطالعه بین ۱۳۹- تا ۳۰۰ برای مقیاس ۵×۵ است (شکل ۱۰). هر کدام از لندفرم‌های طبقه‌بندی شده بخشی از منطقه را در بر می‌گیرند. نقشه لندفرم منطقه مورد مطالعه در شکل (۱۱) نشان داده شده است.



شکل (۱۰): نقشه شاخص TPI در حوضه آبریز زنوزچای

Fig 10: TPI Index map of Zonuzchay catchment



شکل (۱۱): نقشه طبقه بندی لندفرمها با استفاده از شاخص TPI

Fig 11: Landforms classification map of Zonuzchay catchment using TPI Index

با تلفیق نقشه فرسایش خاک با نقشه لندفرمها در حوضه آبریز زنوزچای می توان نتیجه گرفت که بیشترین فرسایش در مجموع به دره های و بریدگی های واقع بر ارتفاعات و دامنه ها با مساحت ۹۴/۲۷ کیلومتر مربع اختصاص دارد. ستیغ های مرتفع و قله کوهها هم با ۸۹/۲۱ کیلومتر مربع دومین رتبه را از نظر بیشترین فرسایش دارند. کمترین میزان فرسایش به تپه های کوچک در دشت و زهکش های مرتفع با مساحت ۴/۱۹ و ۴/۸۰ کیلومتر مربع تعلق دارد (جدول ۸).

جدول (۸): مساحت فرسایش خاک در طبقات لندفرمها در حوضه آبریز زنوزچای
 Table (8): The area of soil erosion in the layers of landforms in Zonuzchay catchment

لندفرمها	فرسایش خاک (Km ²)					مجموع
	خیلی کم	کم	متوسط	زیاد	خیلی زیاد	
دره ها و بریدگی های واقع بر ارتفاعات، آبراهه عمیق	57.73	26.17	7.54	2.41	0.41	94.27
دره های آبراهه های میانی، دره های کم عمق	3.07	1.82	0.53	0.21	0.02	5.65
زهکش های مرتفع، بالارود	1.89	1.69	0.83	0.33	0.07	4.80
دره های u شکل	34.59	8.17	1.54	0.37	0.06	44.73
دشت های کوچک	11.70	0.00	0.00	0.00	0.00	11.70
دامنه های باز	15.20	4.66	0.78	0.11	0.01	20.76
فلات های بالایی (سطوح مسطح در ارتفاعات)	28.49	8.02	1.77	0.47	0.05	38.81
تپه های کوچک در دشت	2.11	1.36	0.52	0.17	0.04	4.19
تپه های محلی	3.06	1.70	0.56	0.17	0.04	5.52
ستیغ های مرتفع، قله کوه	52.45	26.25	7.97	2.02	0.52	89.21

نقش واحدهای لیتولوژی در فرسایش خاک حوضه آبریز زنوزچای

از رویهم گذاری نقشه فرسایش خاک و لیتولوژی مشخص شد که فرسایش خاک بیشتر بر روی سازندهای نهشته های تیپ فلیش، کنگلومرای قرمز و خاکستری با میان لایه های مارنی و پادگانه های آبرفتی می باشد (جدول ۹). کمترین میزان فرسایش هم در روی ماسه سنگ قرمز تیره دیده می شود.

جدول (۹): مساحت فرسایش خاک در واحدهای لیتولوژی حوضه آبریز زنوزچای
 Table (9): Soil erosion area in lithological units in Zonuzchay catchment

لیتولوژی	فرسایش خاک (Km ²)					
	خیلی کم	کم	متوسط	زیاد	خیلی زیاد	مجموع
گنبد آتشفشانی داسیتی	7.271	10.663	6.976	3.583	1.043	29.535
کنگلومرای قرمز و خاکستری با میان لایه های مارنی	36.542	12.813	1.855	0.253	0.021	51.484
آبرفت های عهد حاضر	3.382	1.127	0.411	0.063	0.011	4.995
نهشته های تیپ فلیش	45.035	13.825	2.539	0.316	0.021	61.736
پادگانه های آبرفتی قدیمی	11.475	1.444	0.158	0.042	0.011	13.129
پادگانه های آبرفتی جوان	28.460	2.982	0.316	0.011	0.000	31.769
پادگانه های آبرفتی بلند	15.342	2.750	0.263	0.021	0.000	18.377
کنگلومرای قرمز قاعده ای	7.502	7.334	2.592	0.601	0.011	18.039
سنگ آهک خاکستری تیره،	0.569	0.990	1.064	0.306	0.000	2.929
خاکستر آتشفشانی، سنگ های آذرآواری	6.912	2.381	0.453	0.105	0.000	9.852
مارن گچ دار قرمز و سبز	6.543	1.075	0.116	0.011	0.000	7.745
سنگ های آذرآواری	9.926	4.499	0.780	0.074	0.000	15.279
کنگلومرای نیمه سخت با قلوه های ولکانیکی	0.400	0.000	0.000	0.000	0.000	0.400
ماسه سنگ قرمز با کمی میان لایه های مارن	7.249	2.919	0.611	0.032	0.021	10.832
تراورتن	6.543	1.865	0.242	0.021	0.000	8.672
آندزیت	1.212	1.043	0.369	0.116	0.011	2.750
گدازه های داسیت	8.851	9.557	2.950	0.653	0.084	22.096
سنگ آهک قهوه ای روشن و خاکستری، شیل سبز، ماسه سنگ	0.137	0.253	0.095	0.000	0.000	0.485
ماسه سنگ قرمز تیره	0.137	0.126	0.021	0.000	0.000	0.284
کوارتزیت، دولومیت خاکستری	0.200	0.200	0.074	0.011	0.000	0.485
شیل ارغوانی، ماسه سنگ کوارتزیتی منظم لایه (سازند زاگون)	0.327	0.148	0.042	0.011	0.000	0.527
دشت های آبرفتی و زمین کشاورزی	3.656	0.084	0.011	0.032	0.000	3.783
دولومیت توده ای چرت دار (سازند سلطانیه)	0.485	0.253	0.011	0.000	0.000	0.748
تناوب دولومیت چرت دار و شیل میکادار	2.160	1.496	0.084	0.000	0.000	3.741

۴- نتیجه گیری

پژوهش حاضر به برآورد میزان فرسایش حوضه زوزچای در شهرستان مرند با استفاده از مدل جهانی اصلاح شده فرسایش خاک (RUSLE) اقدام کرد. در اجرای این مدل از ۵ پارامتر شامل عامل فرساینده باران (R)، عامل فرسایش پذیری خاک (K)، عامل طول شیب (LS)، عامل مدیریت پوشش گیاهی (C) و عامل عملیات حفاظتی خاک (P) استفاده شد و نقشه فرسایش خاک در محیط نرم-افزار Arc/GIS ترسیم شد. با اجرای مدل، متوسط فرسایش خاک ۱/۷۱ تن در هکتار در سال بدست آمد. برای اعتبارسنجی برآورد میزان فرسایش خاک، نسبت تحویل رسوب (SDR) با مدل‌های وانونی، USDA، بوریس و میدمنت محاسبه شد و با داده‌های مشاهداتی ایستگاه پل چرچر حوضه زوزچای مقایسه شد. نتیجه مقایسه نشان داد میزان رسوب تخمینی مدل USDA با توجه به RMSE به میزان رسوب مشاهده‌ای نزدیکتر است. ولی حداکثر رسوب برآورد شده (۲۸/۳۴ تن در هکتار) نسبت به رسوب مشاهده‌ای (۳۲/۷۱ تن در هکتار) کمتر بدست آمده است. نتایج کلی نقشه فرسایش خاک نشان می‌دهد مناطق با فرسایش زیاد و خیلی زیاد با مساحتی در حدود ۲/۳۷ درصد کل حوضه، در بخش‌های شمالی، جنوب شرقی و شرق حوضه زوزچای دیده می‌شوند. مناطق با فرسایش کم و خیلی کم، بیشترین مساحت حوضه (۹۰/۸۱ درصد) را دربر گرفته است. طبقات با فرسایش خیلی زیاد و زیاد در دامنه‌های پیر شیب ارتفاعات و مناطقی که جریان آبراهه‌ها زیاد تجمع دارند قرار دارند. طبقات متوسط، کم و خیلی کم نیز با دامنه‌های با شیب کم و مناطق هموار و دشت‌ها را شامل می‌شوند. با تلفیق نقشه فرسایش خاک و نقشه لندفرم‌ها در حوضه زوزچای و در نظر گرفتن مساحت هر کدام از طبقات فرسایش خاک، مشخص می‌شود که بیشترین میزان فرسایش خاک (۹۴/۲۷ کیلومتر مربع) در دره‌ها و بریدگی‌های واقع بر ارتفاعات و دامنه‌ها و آبراهه‌های عمیق اتفاق می‌افتد. همچنین با ترکیب نقشه‌های فرسایش خاک و واحدهای لیتولوژی مشخص شد بیشترین میزان فرسایش در روی نهشته‌های فلیش (۶۱/۷۳ کیلومتر مربع)، پادگانه‌های آبرفتی (۶۳/۲۶ کیلومتر مربع) و کنگلومرای قرمز، خاکستری با میان لایه‌های مارنی (۵۱/۴۸ کیلومتر مربع) می‌باشد. در برآورد میزان فرسایش خاک در حوضه زوزچای از بین عوامل مدل RUSLE، عامل توپوگرافی (LS) بیشترین تاثیر را نشان می‌دهد. این نتیجه با نتایج مطالعات آرخی و نیازی (۱۳۸۹) در حوضه سد ایلام، محمدی و همکاران (۱۳۹۷) در کشور، گلی غفاری و همکاران (۱۳۹۷) در حوضه آبریز نورآباد ممسنی، محمودی و نقشبندی (۱۳۹۸) در حوضه سد گاوشان و دوآرت و همکاران (۲۰۲۱) کوهستان‌های بارانی و فلات‌های خشک پرتغال منطبق می‌باشد. نتایج این تحقیق قابلیت مدل RUSLE را در برآورد میزان فرسایش خاک نشان داد که می‌توان بصورت مفید و موثر در اجرای عملیات آبخیزداری و حفاظت خاک همچنین راهکارهای مدیریتی توسط مسئولین مورد استفاده قرار داد.

منابع

- Ahmadi, H. (2015). Applied Geomorphology (Water Erosion), Publications of Tehran university, pp: 688, Tehran. [In Persian]
- Arabameri, A., Tiefenbacher, J.P., Blaschke, T., Pradhan, B., Tien Bui, D. (2020). Morphometric Analysis for Soil Erosion Susceptibility Mapping Using Novel GIS-based Ensemble Model, *Remot Sensing*, 12 (874): 1-24.
- Arakhi, S., Niazi, Y. (2011). 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 Conversation*, 17(2):1-27. [In Persian]
- Asiedu, J. K. (2018). Assessing the Threat of Erosion to Nature-Based Interventions for Stormwater Management and Flood Control in the Greater Accra Metropolitan Area, Ghana. *Journal of Ecological Engineering*, 19(1).
- Azizian, A., Kohi, S. (2018). Evaluating the effect of different methods for calculating topographic factor on sediment delivery rate based on RUSLE model (Case study: Barajin catchment, Qazvin), *Iran-Water Resources Research*, 14(5): 304-317. [In Persian]

- Bagherian Kalat, A., Lashkaripour, Gh., Ghafoori, M., Abbasi, A. (2019). Investigation on effects of lithology on soil erosion and sediment yield in Sangerd Drainage Basin, *Watershed Engineering and Management*, 10(4): 671-685. [In Persian]
- Bahatti, M.T., Ashraf, M., Anwar, A.A. (2021). Soil Erosion and Sediment Load Management Strategies for Sustainable Irrigation in Arid Regions, *Sustainability*, 13(3547):1-22.
- Duarte, L., Cunha, M., Teodoro, A.C. (2021). Comparing Hydric Erosion Soil Loss Models in Rainy Mountainous and Dry Flat Regions in Portugal, *Land*, 10(554): 1-18.
- Esfandiari Darabad, F., Mostafazadeh, R., Paseban, 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. [In Persian]
- Fathizad, H., Karimi, H., Tavakoli, M. (2016). Role of Sensitivity of Erosion the Geological Formations at Erosion rate and Sediment Yield (Case Study: Sub-Basins of Doviraj River, Ilam Province), *Journal of Watershed Management Research*, 7(13): 193-208. [In Persian]
- Habibi, A., Peyrovan, H. (2019). The Role of Geomorphic Parameters on Sediment Yield Semi-Arid, *Journal of Geographic Space*, 19(66): 63-75. [In Persian]
- Hua, T., Zhao, W., Liu, Y., Liu., Y. (2019). Influencing factors and their interactions of water erosion based on yearly and monthly scale analysis: A case study in the Yellow River basin of China, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss*, 1-22.
- Jafarzadeh Estalkhkhoughi, A., Rezaei, P. (2017). Estimation of Soil Erosion in Sefidrood Watershed by Emphasis on the Role of Landforms, *Journal of Applied Researches in Geographical Sciences*, 17(44): 201-221. [In Persian]
- Jenness, J. (2006). Topographic Position Index (tpi jen.avx) extension for ArcView 3.x, v. 1.2. Jenness Enterprises. Available at: <http://www.jennessent.com/arcview/tpi.htm>.
- Goli Mokhtari, L., shafiei, N., Rahmani, A. (2019). The Estimation of Soil Erosion Using the RUSLE Model (Case Study: Noorabad Mamasani Basin), *Hydrogeomorphology*, 5(17): 1-21. [In Persian]
- Karami, F., Bayati Khatibi, M. (2019). The Modeling of Soil Erosion and Prioritizing Sediment Production in Sattarkhan Dam Basin Using MUSLE and SWAT Models, *Hydrogeomorphology*, 6(18): 115-137. [In Persian]
- Kashi Zenouzi, L., Ahmadi, H., Nazari, A.A. (2015). Using Statistical Hydrogeomorphology Method for Estimating Sediment Yield of Watersheds (Case study: Zonouz Chay and Zilber Chay watersheds), *Journal of Watershed Management Research*, 6(12): 166-174. [In Persian]
- Kashi Zenouzi, L., Ahmadi, H., Saadat, H., Nazari, A.A., Namdar, M. (2013). Developing a Plan Map with the Aim to Control Erosion, Based on the Geomorphology Model (case study: Zonouz Chai watershed), *Geography and Environmental Planning Journal*, 50(2): 39-52. [In Persian]
- Khaledi Darvishan, A., Faraji, J., Gholami, L., Khorsand, M.(2021). Spatio-temporal variation of soil erosion in Khamsan representative watershed using RUSLE, *Watershed engineering and management*, 13(3): 534-547. [In Persian]
- Liu B, Xie Y, Zhang K (2001) Soil loss prediction model. China Science and Technology Press, Beijing (in Chinese).
- Mahmoodi, M.A., Naghshbandi, S.P. (2020). Estimation of Soil Erosion by RUSLE and Remote Sensing Data of Gawshan Dam Basin, *Journal of Water and Soil*, 33(6): 845-856. [In Persian]

- Maleki, A., Marabi, H., Rahimi, H. (2016). An Analysis of Topographic Position Index (TPI) in Sanandaj - Sirjan Zone and Broken Zagros Zone, *Quantitative geomorphological Researches*, 5(17): 129-141. [In Persian]
- Mohammadi, Sh., Karimzadeh, H. R., Alizadeh, M. (2018). Spatial estimation of soil erosion in Iran using RUSLE model, *Ecohydrology*, 5(2): 551-569. [In Persian]
- Mokarram, M., Darvishi, A., Negahban, S. (2017). The Relation between Morphometric Characteristics of Watersheds and Erodibility at different altitude levels using Topographic Position Index (TPI) Case Study: Nazloochoaei Watershed, *Scientific - Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)*, 26(101): 131-142. [In Persian]
- Renard K, Foster G, Weesies G, McCool D, & Yoder D. (1997). Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation RUSLE). US Department of Agriculture (Ed.). Agricultural Handbook. US Department of Agriculture, Washington, 703, 1-251.
- Roskopf, C.M., Di Iorio, E., Circelli, L., Colombo, C., Aucelli, P.P.C. (2020). Assessing spatial variability and erosion susceptibility of soils in hilly agricultural areas in Southern Italy. *Int. Soil Water Conserv. Res.*, 8, 354-362.
- Safari, A. Noori, A. A., Karami. J. (2018). Investigation about the influence of land-cover and land use changes on soil erodibility potential, case study: Gharesou, Gorganrood, *Journal of Spatial Analysis Enviromental Hazard*, 5(1):83-96. [In Persian]
- Talebi Khiavi, H., Mostafazadeh, R., 2022. The spatiotemporal dependencies of terrain indices with soil characteristics in a steep hillslope mountainous area, *Arabian Journal of Geosciences*, 15: 1-18.
- Taripanah, F., Ranjbar, A., Vali, A., Mokarram, M. (2022). Classification of landforms using topographic location index and assessment of their actual Soil Erosion Risk in mountainous areas (Case study: Kharestan watershed), *Iranian Journal of Remote Sensing & GIS*, Articles in Press, Available Online from 01 May 2022. [In Persian]
- Vaezi, A.R., Abasi, M., Haji Maleki, Kh. (2017). Assessment of the RUSLE model integrated with RS and GIS in semi-arid small drainage areas, NW Iran, *Iran-Watershed Management Science & Engineering*, 11(38):1-10.
- Wang, Z., Su. Y. (2020). Assessment of Soil Erosion in the Qinba Mountains of the Southern Shaanxi Province in China Using the RUSLE Model, *sustainability*, 12(1733): 1-17.
- Weiss A. (2001). Topographic position and landforms analysis. ERSI User Conference, San Diego, USA.
- Zeng, Ch., Wang, Sh., Bai, X., Li, Y., Tian, Y., Li, Y., Wu, L., Luo, G. (2017). Soil erosion evolution and spatial correlation analysis in a typical karst geomorphology, using RUSLE with GIS, *Solid Earth Discuss*, 1-27.
- Zhang H, Wei J, Yang Q, et al. (2017) An improved method for calculating slope length (λ) and the LS parameters of the revised universal soil loss equation for large watersheds. *Geoderma* 308:36-45.