

## Analysis of the relationship between land use contributions to sediment yield with landscape metrics and soil erosion factors in the Kasilian watershed

Fatemeh Akbari Emamzadeh <sup>1</sup>, Abdulvahed Khaledi Darvishan <sup>2\*</sup>, Mehdi Vafakhah <sup>3</sup>, Kazem Nosrati <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Ph.D. Candidate, Department of Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, Iran.

<sup>2</sup> Associate professor, Department of Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, Iran.

<sup>3</sup> Professor, Department of Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, Iran.

<sup>4</sup> Professor, Department of Physical Geography, School of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

### Extended Abstract

#### Introduction

Soil erosion and sedimentation are integral components of natural geomorphological cycles, playing a pivotal role in regulating watershed functionality, preserving water quality, maintaining agricultural productivity, and ensuring the long-term sustainability of ecosystems. Under natural conditions, these processes contribute to landscape evolution and nutrient redistribution. However, human activities combined with climate change have greatly accelerated erosion and sedimentation rates, causing severe environmental damage and substantial economic losses worldwide. Factors such as land use changes, deforestation, overgrazing, and improper land management have intensified soil degradation and sediment transport, seriously threatening both terrestrial and aquatic ecosystems across diverse regions. In response to these growing challenges, understanding sediment source dynamics has become critically important. Identifying primary sediment contributors and accurately measuring their relative impacts are vital for developing effective conservation and management strategies. Additionally, analyzing the landscape structure through landscape metrics, which assess spatial patterns, connectivity, and fragmentation of land uses, offers important insights into how landscape features directly affect erosion and sediment movement processes. Integrating such comprehensive landscape-level analyses significantly improves our ability to predict erosion risks and design targeted interventions to effectively protect vital soil and water resources, ultimately supporting environmental health and promoting sustainable land management practices for future generations.

#### Materials and Methods

This study aimed to examine the effects of landscape metrics and erosion-related factors on suspended sediment generation across different land use types in the Kasilian Watershed, located in Mazandaran Province, northern Iran. The area lies on the southern slopes of the Alborz Mountains and drains into the Caspian Sea. It features a complex land use mosaic including natural forest, agriculture, rangeland, and plantation forest, each with distinct structural and ecological characteristics affecting erosion potential. A sediment fingerprinting approach using 59 geochemical tracers was employed. These tracers were analyzed in 36 source samples and 8 suspended sediment samples collected at the watershed outlet. Discriminant function analysis was performed using the FingerPro package in R. Potassium, sodium, and lead were identified as the most effective tracers for source discrimination. These elements were then applied in a multivariate model to estimate the proportional contributions of each land use type. Simultaneously, spatial analysis using the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) was conducted. RUSLE factors included soil erodibility, rainfall erosivity, topographic slope-length and steepness, cover management, and conservation practices. These were mapped with spatial data and overlaid with land use distribution. Landscape structure was also quantified using FRAGSTATS 4.2 to calculate metrics such as patch density, mean patch size, edge contrast, and nearest neighbor distance.

## Results and Discussion

The sediment source apportionment results revealed a striking dominance of rangelands, which contributed an estimated 76% of the suspended sediment load. In contrast, natural forests, agricultural lands, and plantation forests were responsible for only 9%, 6%, and 6% of sediment contributions, respectively. This disproportionate contribution from rangelands is particularly noteworthy considering their relatively remote position from the watershed outlet. Several factors account for this observation: (1) Rangelands exhibited the highest values for the cover-management factor (C), indicating sparse and degraded vegetation cover; (2) The slope-length and steepness factor (LS) was also elevated in rangeland areas, signaling steep terrain prone to rapid runoff and detachment; (3) Soil erodibility (K) was greater in these zones, further exacerbating erosion potential. Additionally, a high mean Euclidean nearest neighbor distance (ENN\_MN) in rangeland parcels suggests that these patches are more isolated and less buffered by adjacent vegetative covers, reducing their resilience to erosive forces. These results underscore the complexity of sediment production processes and highlight the importance of considering both biophysical and spatial variables in watershed-scale erosion studies. Despite the geographical distance of rangelands from the watershed outlet, their structural fragility, topographic exposure, and low vegetative cover make them particularly susceptible to erosion and significant contributors to downstream sediment loads.

## Conclusion

From a management perspective, the integration of landscape metrics with erosion-related biophysical parameters provides a comprehensive framework for identifying critical sediment source areas. This approach goes beyond traditional point-based monitoring and enables a broader understanding of sediment dynamics across the landscape. The insights gained from this study offer a solid scientific basis for prioritizing conservation actions such as reforestation, rangeland restoration, slope stabilization, and the implementation of soil conservation practices tailored to specific local conditions. Moreover, this research contributes meaningfully to the broader conversation on sustainable watershed management in the face of climatic uncertainty and increasing human pressures. By combining sediment fingerprinting techniques, geospatial analysis, and landscape ecology principles, this study presents a replicable methodology that can be applied in other watersheds facing similar challenges. In conclusion, the findings emphasize the urgent need for integrated assessment frameworks that link land use, topography, and landscape structure with sediment generation and transport processes. These approaches are essential for guiding targeted, evidence-based policies and building ecological resilience. As climate change continues to intensify hydrological extremes and land degradation, proactive sediment management informed by science and supported by spatial tools will be vital to maintaining the productivity, sustainability, and environmental health of watersheds.

**Keywords:** Fingerprinting, patch cohesion index, sediment sources, soil erodibility factor, soil erosion.

**Article Type:** Research Article

## Acknowledgement

We would like to express our sincere gratitude to the Tarbiat Modares University for the financial and logistical support that significantly contributed to the research project.

## Conflicts of interest

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

## Data Availability Statement:

All information and results are included within the article text.



### Authors' contribution

**Fatemeh Akbari Emamzadeh:** Data collection, analysis, field investigation, methodology development, software application, validation, data visualization and mapping, and drafting the initial manuscript; **Abdulvahed Khaledi Darvishan:** Conceptual design, data collection, analysis, field investigation, methodology development, project management, software application, scientific supervision, validation, data visualization and mapping, manuscript editing and revision; **Mehdi Vafakhah:** Conceptual design, analysis, methodology development, scientific supervision, manuscript editing and revision; **Kazem Nosrati:** Conceptual design, analysis, methodology development, software application, scientific supervision, validation, manuscript editing and revision.

\*Corresponding Author, E-mail: Abdulvahed Khaledi Darvishan, a.khaledi@modares.ac.ir

**Citation:** Akbari Emamzadeh, F., Khaledi Darvishan, A., Vafakhah, M., & Nosrati, K (2026). Analysis of the relationship between land use contributions to sediment yield with landscape metrics and soil erosion factors in the Kasilian watershed. *Water and Soil Management and Modeling*, 6(1),94 -108.

doi: 10.22098/mmws.2025.17776.1621

Received: 07 July 2025, Received in revised form: 24 July 2025, Accepted: 03 August 2025, Published online: 21 March 2026  
*Water and Soil Management and Modeling*, Year 2026, Vol. 6, No. 1, pp. 94-108.

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

© Author(s)





## تحلیل ارتباط سهم کاربری های اراضی در تولید رسوب با سنجه های سیمای سرزمین و عوامل مؤثر بر فرسایش خاک در حوزه آبخیز کسلیان

فاطمه اکبری امامزاده<sup>۱</sup>، عبدالواحد خالدی درویشان<sup>۲\*</sup>، مهدی وفاخواه<sup>۳</sup>، کاظم نصرتی<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور

<sup>۲</sup> دانشیار گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور

<sup>۳</sup> استاد گروه آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران

<sup>۴</sup> استاد گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

### چکیده

اجرای برنامه های مؤثر در حفاظت از منابع آب و خاک و کنترل رسوب، نیازمند درک دقیق از منابع رسوب و سهم نسبی آن ها در فرآیندهای تولید رسوب است؛ چرا که این اطلاعات در شناسایی مناطق بحرانی و هدایت اقدامات مدیریتی نقش اساسی ایفا می کنند. پژوهش حاضر با هدف تحلیل ارتباط سهم کاربری های مختلف اراضی در تولید رسوب معلق با سنجه های سیمای سرزمین و سایر عوامل مؤثر بر فرسایش خاک است. در حوزه آبخیز کسلیان استان مازندران انجام شد. بدین منظور ۵۹ ردیاب ژئوشیمی در ۳۶ نمونه منابع رسوب شامل کاربری های جنگل طبیعی، کشاورزی، مرتع و جنگل دست کاشت و ۸ نمونه رسوب معلق اندازه گیری شد. با بهره گیری از آزمون های آماری دامنه، کروסקال-والیس و تحلیل تابع تفکیک در بسته نرم افزاری FingerPro در محیط R، ردیاب های بهینه برای منشأیابی رسوبات معلق تعیین شدند؛ به طوری که عناصر پتاسیم (K)، سدیم (Na) و سرب (Pb) به عنوان ردیاب های مؤثر انتخاب شدند. تحلیل سنجه های سیمای سرزمین با استفاده از نرم افزار FRAGSTATS انجام شد. نتایج حاصل از منشأیابی رسوبات معلق نشان داد که سهم نسبی کاربری های مرتع، جنگل طبیعی، کشاورزی و جنگل دست کاشت در تولید رسوب به ترتیب ۷۶، ۹، ۶ و ۶ درصد است. همچنین نتایج نشان داد که سهم بالای کاربری مرتع در تولید رسوب، با توجه به مقادیر بالای ضریب پوشش گیاهی ( $C=0/33$ )، فرسایش پذیری خاک ( $K=0/03$ )، عامل توپوگرافی ( $LS=25/58$ )، و شاخص پراکندگی لکه ها ( $ENN-MN=575/3$ )، قابل تبیین است. این نتایج می تواند پایه ای علمی برای شناسایی مناطق بحرانی، اولویت بندی اقدامات حفاظتی، و تدوین راهبردهای مؤثر در مدیریت جامع منابع آب و خاک باشد.

**واژه های کلیدی:** انگشت نگاری، شاخص پراکندگی لکه ها، عامل فرسایش پذیری خاک، فرسایش خاک، منابع رسوب.

### نوع مقاله: پژوهشی

\*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: عبدالواحد خالدی درویشان، a.khaledi@modares.ac.ir

**استناد:** اکبری امامزاده، فاطمه، خالدی درویشان، عبدالواحد، وفاخواه، مهدی، و نصرتی، کاظم (۱۴۰۵). تحلیل ارتباط سهم کاربری های اراضی در تولید رسوب با سنجه های سیمای سرزمین و عوامل مؤثر بر فرسایش خاک در حوزه آبخیز کسلیان. *مدل سازی و مدیریت آب و خاک*، ۱(۱)، ۹۴-۱۰۸.

doi: 10.22098/mmws.2025.17776.1621

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۱۶، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۵/۰۲، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۱۲، تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۱/۰۱



مدل سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۵، دوره ۱ شماره ۱، صفحه ۹۴ تا ۱۰۸

© نویسندگان

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی

## ۱- مقدمه

فرسایش خاک و رسوب‌گذاری، پدیده‌هایی طبیعی هستند که در دهه‌های اخیر به‌واسطه دخالت‌های گسترده انسانی در محیط‌زیست و مدیریت ناپایدار منابع طبیعی، شدت بیشتری یافته‌اند (Arabkhedri, 2014). فرسایش خاک به‌عنوان یکی از مشکلات زیست‌محیطی جهانی، در مقیاس‌های مختلف منطقه‌ای و جهانی، نگرانی‌های جدی ایجاد کرده است (Thakuria, 2023). فرسایش خاک یکی از مهم‌ترین منابع تأمین رسوبات معلق در آب‌های سطحی به‌شمار می‌رود. افزایش میزان این رسوبات در رودخانه‌ها، موجب ته‌نشینی رسوب در بستر رودخانه‌ها و مخازن، افزایش خطر سیل، بالا رفتن هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری از سامانه‌های تصفیه آب، تغییر در مورفولوژی رودخانه‌ها، انتقال مواد مغذی و آلاینده‌ها به اکوسیستم‌های آبی و کاهش کیفیت آب می‌شود (Vercruyse et al., 2017; Nosrati et al., 2017; Collins et al., 2020). فرسایش خاک و تولید رسوب تحت تأثیر عوامل متعددی از جمله اقلیم، پوشش گیاهی، شیب، نوع خاک و کاربری اراضی قرار دارد. این عوامل با ایجاد تغییر در ساختار سطح زمین، شرایط هیدرولوژیکی و پایداری خاک، سهم متفاوتی در شدت و گستره فرسایش دارند. تشخیص و اولویت‌بندی این عوامل برای بهینه‌سازی مدل‌های پیش‌بینی فرسایش و نیز طراحی اقدامات مدیریتی و حفاظتی، از اهمیت زیادی برخوردار است. مطالعات متعددی از جمله Adnan et al. (2021) و Nahib et al. (2024) با هدف بررسی نقش و اولویت این عوامل در سطوح مختلف مکانی انجام شده است. در همین راستا، در مطالعه‌ای که توسط Kamari Yekdangi et al. (2025) در حوزه آبخیز کسپلیان در شمال ایران انجام شد، نقش و اهمیت عوامل مؤثر بر فرسایش خاک و تولید رسوب سالانه با استفاده از مدل تجربی G2 مورد بررسی قرار گرفت. یافته‌های پژوهش نشان داد که عامل باران (R) بیش‌ترین تأثیر را بر فرسایش سالانه خاک داشته و پوشش گیاهی (V) به‌عنوان دومین عامل مهم شناسایی شد. بر پایه یافته‌های این پژوهش، مشخص شد که اولویت‌بندی عوامل پویای مؤثر بر فرسایش خاک، نقش کلیدی در فهم بهتر تعامل میان این عوامل دارد و می‌تواند زمینه‌ساز برنامه‌ریزی مؤثرتر و اجرای دقیق‌تر اقدامات حفاظتی باشد. این رویکرد مدیریتی، ابزاری کاربردی در اختیار سیاست‌گذاران و مسئولان حوزه منابع طبیعی، به‌ویژه در زمینه حفاظت از خاک قرار می‌دهد تا تصمیمات خود را بر پایه داده‌های علمی و هدفمند اتخاذ کنند. همچنین در مطالعات اخیر، توجه پژوهشگران به تأثیر سنجه‌های سیمای سرزمین بر فرآیندهای هیدرولوژیکی و تولید رسوب افزایش یافته است (Zhang et al., 2019; Xu et al., 2017; Zhao et al., 2024).

2024). برای نمونه، در پژوهشی که توسط Liu et al. (2024) در دو حوضه نمونه از فلات لوس چین انجام شد، رابطه میان سنجه‌های سیمای سرزمین (LMS) با رواناب و رسوب‌گذاری تحلیل شد. یافته‌های پژوهش نشان دادند که شاخص یکنواختی شانون و شاخص انسجام لکه‌ای از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر میزان رواناب و رسوب‌گذاری هستند. همچنین نتایج حاکی از آن بود که فرآیندهای هدررفت آب و خاک در مقیاس منطقه‌ای به‌شدت تحت تأثیر ساختار فضایی و نحوه پیکربندی چشم‌انداز قرار دارند. این موضوع بر اهمیت درک الگوهای فضایی در مدیریت مؤثر منابع آب و خاک تأکید می‌کند و می‌تواند مبنایی علمی برای برنامه‌ریزی و اجرای اقدامات پیشگیرانه در زمینه کنترل فرسایش خاک در مقیاس چشم‌انداز فراهم آورد.

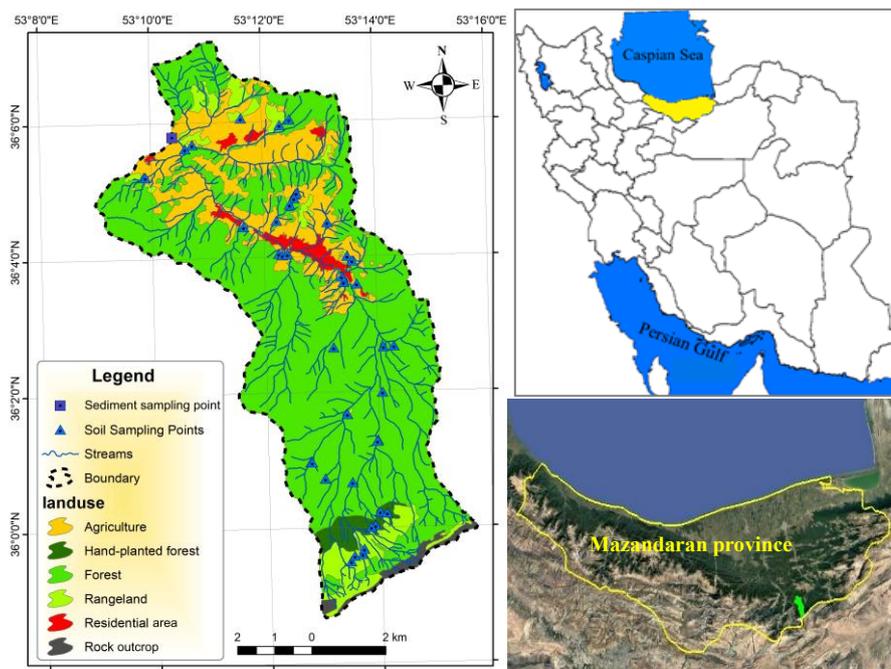
شناسایی منابع تولید رسوب در برنامه‌ریزی‌های مدیریتی آبخیزها به‌منظور تدوین و اجرای راهکارهای مؤثر در کنترل فرسایش و رسوب و حفاظت از منابع خاک نقش کلیدی دارد (Walling et al., 2008; Nosrati et al., 2017). در سال‌های اخیر، روش منشأیابی رسوب به‌عنوان ابزاری مطمئن برای شناسایی منابع اصلی تولید رسوب و تعیین سهم نسبی هر منبع در آبخیز به‌کار گرفته شده است. این روش با مقایسه ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی منابع مختلف با رسوبات برداشت‌شده در خروجی آبخیز، امکان شناسایی مناطق تولید رسوب را فراهم می‌سازد (Pulley et al., 2015; Owens et al., 2016; Ramos et al., 2025). در همین راستا، مطالعه‌ای توسط Karimi et al. (2021) در آبخیز واز واقع در استان مازندران با بهره‌گیری از ویژگی‌های ژئوشیمیایی و نرم‌افزار FingerPro در محیط R انجام شد که هدف آن تعیین سهم نسبی منابع رسوب‌زا با تکیه بر کاربری/پوشش‌های مختلف اراضی بود. نتایج تفکیک سهم کاربری‌های مختلف اراضی نشان داد که اراضی کشاورزی، مرتع، جنگل و کناره‌های آبراهه به‌ترتیب ۰/۱۸، ۷/۹۰، ۵/۶۹ و ۸۶/۲۱ درصد از رسوب معلق کل را تولید می‌کنند. افزون بر این، با محاسبه سهم ویژه تولید رسوب معلق به ازای هر هکتار، مشخص شد که کناره‌های آبراهه با سهم ویژه ۰/۵۱۳ درصد، بیش‌ترین مشارکت و جنگل‌ها با سهم تنها ۰/۰۰۷ درصد، کم‌ترین نقش را در تولید رسوب معلق دارند. این نتایج نشان می‌دهند که روش منشأیابی ژئوشیمیایی می‌تواند ابزاری کارآمد برای تعیین مناطق اولویت‌دار در برنامه‌ریزی‌های حفاظت خاک و کنترل رسوب باشد. از سوی دیگر، فاصله منابع رسوب تا خروجی آبخیز و ویژگی‌های انتقال رسوب نقش مهمی در تعیین سهم نهایی هر منبع در بار معلق خروجی ایفا می‌کنند و این موضوع باید در تحلیل‌های منشأیابی و مدیریت رسوب به‌دقت مورد توجه قرار گیرد (Walling, 2005). برخلاف اغلب مطالعات پیشین که

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- منطقه مورد مطالعه

حوزه آبخیز معرف کسلیان در دامنه‌های شمالی رشته‌کوه البرز بین  $53^{\circ}08'$  تا  $53^{\circ}15'$  طول شرقی و  $35^{\circ}58'$  تا  $36^{\circ}07'$  عرض شمالی در بخش شرقی استان مازندران واقع شده است (Gholami et al., 2009). مساحت آبخیز کسلیان برابر با  $67/22$  کیلومتر مربع و شیب متوسط این آبخیز  $15/8$  درصد برآورد شده است. میانگین بارندگی سالانه در منطقه حدود  $791$  میلی‌متر گزارش شده است (Dehghani, 2013). این حوزه آبخیز دارای چهار کاربری اصلی شامل جنگل، مرتع، کشاورزی و مناطق مسکونی بوده و عمدتاً دارای پوشش جنگلی است (شکل ۱). نقشه کاربری اراضی در پژوهش (Kamari Yekdangi et al., 2023) تهیه شده و در پژوهش حاضر نیز مورد استفاده قرار گرفت.

تنها به تعیین منابع رسوب از طریق شاخص‌های ژئوشیمیایی یا مدل‌های تجربی اکتفا کرده‌اند، در این پژوهش با تحلیل نقش سنج‌های سیمای سرزمین و ویژگی‌های محیطی (نظیر پوشش گیاهی، شیب و کاربری اراضی)، سهم هر نوع کاربری اراضی در تولید رسوب معلق در حوزه آبخیز کسلیان مورد ارزیابی قرار گرفت. از طرف دیگر، فاصله منابع رسوب تا خروجی آبخیز در تحلیل منشأیابی رسوب مورد توجه قرار گرفت. حوزه آبخیز کسلیان به دلیل شرایط توپوگرافی کوهستانی، وجود شیب‌های تند و همچنین فشار فزاینده فعالیت‌های انسانی از جمله جنگل‌تراشی، توسعه اراضی کشاورزی و تخریب پوشش گیاهی، با خطر بالای هدررفت خاک و تولید رسوب مواجه است. بنابراین، شناسایی دقیق منابع رسوب و تحلیل فضایی مؤلفه‌های مؤثر بر تولید رسوب می‌تواند بستر تصمیم‌سازی برای مدیریت پایدار منابع خاک و آب در این منطقه فراهم آورد.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی حوزه آبخیز کسلیان و نقاط نمونه‌برداری منابع رسوب و رسوب معلق

Figure 1. Location of the Kasilian watershed and Sampling points of the sediment source and suspended sediment

جنگل دست‌کاشت و ۸ نمونه از اراضی کشاورزی برداشت شد. هر نمونه با ۵ تکرار برداشت شد و پس از حذف خاک سطحی، نمونه‌های تکراری با یکدیگر ترکیب شده و در نهایت، ۵۰۰ گرم خاک به‌عنوان نمونه نهایی جمع‌آوری شد (Lizaga et al., 2019). نمونه‌برداری در آبان ماه انجام شد؛ در این زمان، پوشش سبز مراتع به‌تدریج کاهش یافته و گیاهان به مرحله نیمه‌خفتگی پاییزی نزدیک می‌شدند. اراضی کشاورزی پس از برداشت محصولات تابستانه معمولاً در وضعیت آیش یا آماده‌سازی برای

### ۲-۲- نمونه‌برداری منابع رسوب و رسوب معلق

نقاط نمونه‌برداری از منابع رسوب، با استفاده از نقشه کاربری اراضی و بازدیدهای میدانی و با در نظر گرفتن نشانه‌های عینی فرسایش در سطح منطقه انتخاب شدند. نمونه‌برداری از خاک با روش نظام‌مند تصادفی و متناسب با مساحت هر نوع کاربری اراضی انجام گرفت. نمونه‌ها از عمق صفر تا پنج سانتی‌متری خاک برداشت شدند (Mohammadi, 2019). در این راستا، ۱۴ نمونه از کاربری مرتع، ۱۰ نمونه از جنگل طبیعی، ۴ نمونه از

کشت زمستانه بودند. علاوه بر نمونه‌های خاک، نمونه‌برداری از رسوبات معلق نیز در تیر ماه در خروجی حوزه آبخیز صورت گرفت و تعداد ۸ نمونه رسوب برداشت شد. به‌منظور اطمینان از جمع‌آوری حداقل ۵ تا ۱۰ گرم رسوب معلق مورد نیاز برای آنالیزهای ژئوشیمیایی، حجم تقریبی ۲۰۰ لیتر آب در هر نوبت به‌صورت دستی برداشت شد. نمونه‌ها در کیسه‌های پلاستیکی کدگذاری شده قرار داده شدند و با حفظ دمای چهار درجه سانتی‌گراد به آزمایشگاه دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تربیت مدرس برای آماده‌سازی و انجام مراحل آزمایشگاهی منتقل شدند.

### ۳-۲- اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی

نمونه‌های خاک به مدت ۲۴ ساعت و نمونه‌های رسوب به مدت ۷۲ ساعت توسط دستگاه خشک‌کن انجمادی<sup>۱</sup> خشک شدند. سپس نمونه‌ها از دستگاه خارج شده، با استفاده از هاون چینی آسیاب شدند و ذرات کوچک‌تر از ۶۳ میکرومتر با الک جدا شده و در ظروف فالکن شماره‌گذاری شده نگهداری شدند. سپس نمونه‌ها به آزمایشگاه نوین شیمیا ارسال شد تا تحلیل‌های ژئوشیمیایی و اندازه‌گیری غلظت عناصر فلزات سنگین با استفاده از دستگاه طیف‌سنجی جرمی پلاسمای جفت‌شده القایی (ICP-MS) انجام شود (Fan et al., 2017; Mohammadi et al., 2019). برای اندازه‌گیری ویژگی‌های ژئوشیمیایی نمونه‌ها، مقدار ۰/۲۵ گرم از ذرات ریزتر از ۶۳ میکرومتر هر نمونه با محلول aqua regia که شامل ترکیب سه به یک اسیدکلریدریک غلیظ و اسید نیتریک است، مخلوط شد. این مخلوط در دمای ۲۲۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴ ساعت روی یک صفحه داغ قرار گرفت تا فرآیند هضم اسیدی کامل انجام شود. در نهایت غلظت ۵۹ عنصر بر حسب میلی‌گرم در هر کیلوگرم بیان شد.

### ۳-۴- انتخاب ترکیب بهینه ردیاب‌های ژئوشیمیایی و تعیین سهم منابع مختلف در تولید رسوبات معلق

برای انتخاب ترکیب بهینه‌ای از ردیاب‌های ژئوشیمیایی که توانایی تفکیک مؤثر منابع مختلف رسوب را داشته باشند، از یک روش آماری سه مرحله‌ای بهره گرفته شد. نخستین گام در فرآیند منشأیابی، حذف ردیاب‌های ناپایا بود تا دقت تحلیل‌های بعدی افزایش یابد (Palazón and Navas, 2017). در این مرحله، ردیاب‌هایی که دامنه تغییرات آن‌ها ناکافی بود، بر اساس آزمون دامنه‌شناسایی و حذف شدند (Nosrati et al., 2018; Tiecher et al., 2018). در گام دوم، آزمون آماری ناپارامتری کروسکال والیس به‌کار گرفته شد تا ردیاب‌هایی که بین حداقل دو منبع رسوب اختلاف معناداری در غلظت ندارند، حذف شوند (Pulley

### ۳-۵- بررسی مقاومت مکانی (فاصله منبع رسوب تا خروجی)

مقاومت مکانی به معنای میزان نزدیکی یا فاصله منبع رسوب از رودخانه یا خروجی آبخیز است. بر این اساس، واحدهایی که در نزدیکی خروجی قرار دارند، معمولاً سهم بیشتری در تولید رسوبات خروجی نسبت به واحدهایی با فاصله بیشتر دارند. برای ارزیابی مقاومت مکانی کاربری‌های اراضی، از فاصله متوسط وزنی آن‌ها تا خروجی آبخیز استفاده شد. این فاصله با استفاده از رابطه ۱ محاسبه می‌شود که در آن به مساحت پلیگون‌ها وزن داده می‌شود؛ به‌گونه‌ای که پلیگون‌هایی با مساحت بیشتر تأثیر بیشتری در محاسبه دارند (Masfai et al., 2018).

$$D_{Wj} = \sum_{i=1}^n (d_i * w_i / n), \quad w_i = \frac{a_i}{\sum_{i=1}^n \frac{a_i}{n}} \quad (1)$$

در این رابطه،  $D_{Wj}$  نشان‌دهنده فاصله متوسط وزنی برای منبع‌زام است،  $d_i$  فاصله مرکز ثقل پلیگون  $i$  ام تا خروجی آبخیز،  $w_i$  وزن پلیگون (بر پایه مساحت آن)،  $n$  تعداد کل پلیگون‌های منبع‌زام و  $a_i$  مساحت پلیگون  $i$  ام است.

### ۳-۶- ارزیابی تأثیر عوامل فرسایش بر سهم کاربری‌های اراضی در تولید رسوب معلق

در این مطالعه، به‌منظور بررسی نقش پارامترهای مؤثر بر فرسایش خاک در ارتباط با کاربری اراضی، از نقشه‌های آماده مربوط به مؤلفه‌های مدل RUSLE شامل ضریب فرسایش‌پذیری خاک (K)، عامل بارندگی (R)، عامل حفاظت خاک (P)، ضریب پوشش و کاربری اراضی (C) و عامل ترکیبی طول و شیب (LS) استفاده شد. این نقشه‌ها از مطالعه (Kamari Yekdangi et al., 2025) که در همین حوزه آبخیز انجام شده بود، استخراج شد و به‌منظور

<sup>2</sup> Discriminant Function Analysis

<sup>1</sup> Freeze Dryer

توانایی در محاسبه طیف گسترده‌ای از شاخص‌های ساختاری و فضایی در مقیاس‌های لکه، کلاس و منظر، یکی از پرکاربردترین ابزارهای تحلیل الگوی سیمای سرزمین محسوب می‌شود (McGarigal et al., 2002). سنجش‌های انتخاب‌شده بر اساس هدف مطالعه (تحلیل ارتباط ساختار فضایی کاربری‌های اراضی با تولید رسوب)، ساختار داده‌های طبقه‌بندی‌شده و هم‌چنین با استناد به مطالعات پیشین (Zhang et al., 2019; Motamedi et al., 2020; Ghorbani et al., 2019)، در جدول ۱ ارائه شده است. این شاخص‌ها برای هر کاربری به‌صورت مجزا محاسبه شدند تا ساختار فضایی هر کاربری در مقیاس طبقه قابل‌تحلیل باشد. در مرحله بعد، نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل ساختار سیمای سرزمین با داده‌های مربوط به سهم هر کاربری اراضی در تولید رسوب معلق به‌دست‌آمده از منشأیابی رسوب مورد بررسی قرار گرفت تا نقش سنجش‌های فضایی در تبیین سهم رسوب‌زایی کاربری‌ها تحلیل شود. این تلفیق نوآورانه بین سنجش منابع رسوب، ساختار فضایی چشم‌انداز، و ویژگی‌های هیدروژئومورفیک آبخیز، امکان شناسایی دقیق‌تر مناطق بحرانی و پیشنهاد اقدامات حفاظتی هدفمند در مقیاس خرد را فراهم می‌سازد.

همانگی فضایی، در محیط نرم‌افزار ArcGIS پردازش و تطبیق داده شد. برای ارزیابی میانگین مقادیر هر یک از این پارامترها در کاربری‌های مختلف اراضی (شامل جنگل طبیعی، مرتع، اراضی کشاورزی و جنگل دست‌کاشت)، از ابزار Zonal Statistics استفاده شد. در مرحله بعد نتایج به‌دست‌آمده با داده‌های منشأیابی رسوب که به روش انگشت‌نگاری استخراج شده بود، تحلیل شد تا تأثیر عوامل فرسایش بر سهم کاربری اراضی در تولید رسوب معلق مشخص شود.

## ۲-۷- تحلیل ارتباط سنجش‌های سیمای سرزمین با سهم کاربری‌های اراضی در تولید رسوب معلق

به‌منظور ارزیابی ساختار فضایی سیمای سرزمین و بررسی تأثیر آن بر سهم کاربری‌های اراضی در تولید رسوب معلق، از مجموعه‌ای از شاخص‌های ساختاری در سطح کاربری اراضی استفاده شد. برای این منظور، نقشه کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه در قالب فرمت رستری و با تفکیک کاربری‌های اصلی شامل جنگل طبیعی، مرتع، کشاورزی و جنگل دست‌کاشت تهیه شد. تحلیل سنجش‌های سیمای سرزمین با استفاده از نرم‌افزار FRAGSTATS نسخه ۴.۲ انجام شد. این نرم‌افزار به‌دلیل

جدول ۱- فهرست سنجش‌های سیمای سرزمین مورد مطالعه

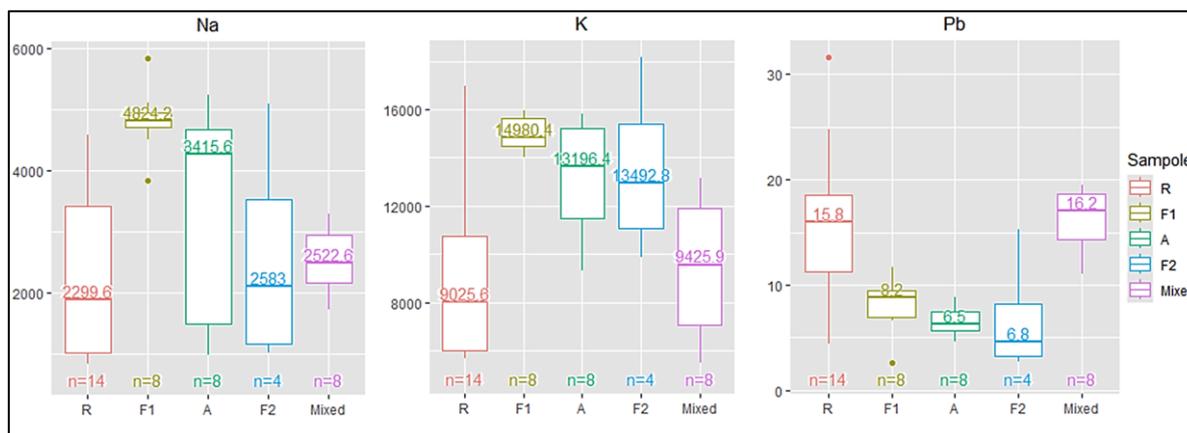
Table 1. List of the landscape metrics used in the study

Metric	Abbreviation	Description	Unit
Class Area	CA	Total area of all patches of a specific land use or land cover class	ha
Percent of Landscape	PLAND	Percentage of landscape area occupied by each class	%
Number of Patches	NP	Number of patches of a specific land use class	count
Patch Density	PD	Patch density (number of patches per unit area)	number/100 ha
Largest Patch Index	LPI	Largest patch index (ratio of the largest patch area to total landscape area)	%
Total Edge	TE	Total edge length of all patches of a specific land use class	m
Edge Density	ED	Edge-to-area ratio for each class	m/ha
Mean Patch Area	AREA_MN	Mean patch area for each land use class	ha
Mean Shape Index	SHAPE_MN	Mean shape index (average perimeter-to-area ratio)	unitless
Mean Euclidean Nearest Neighbor Distance	ENN_MN	Mean Euclidean nearest-neighbor distance between patches of the same type	m
Percentage of Like Adjacencies	PLADJ	Percentage of like adjacencies (percentage of shared edges between similar patches)	%
Patch Cohesion Index	COHESION	Measuring spatial aggregation and connectivity	unit less
Aggregation Index	AI	Degree of aggregation or clumping of patches within a specific class	%

می‌توانند به‌عنوان ردیاب‌های بهینه به‌منظور تعیین سهم مشارکت هر یک از کاربری‌های اراضی در حوزه آبخیز کسپیلان مورد استفاده قرار گیرند. در پژوهش Vale et al. (2022) نیز با اجرای آزمون‌های دامنه و کروکال والیس عناصر حذف شده و در نهایت سه عنصر  $Pbex$ ،  $Bi$  و  $Si$  به‌عنوان ردیاب بهینه انتخاب شدند. شکل ۲ نتایج نمودار جعبه‌ای را برای ردیاب‌های بهینه در هر کاربری نشان می‌دهد.

## ۳- نتایج و بحث

پس از اجرای آزمون‌های آماری، ردیاب‌های نامناسب حذف شده و در نهایت سه عنصر  $K$ ،  $Na$  و  $Pb$  به‌عنوان ردیاب بهینه انتخاب شدند. با توجه به آزمون‌های اجراشده و تعداد ردیاب‌های باقی‌مانده، می‌توان گفت که میان عنصرهای ردیاب در کاربری‌های مختلف زمین اختلاف معناداری هست و این عناصر

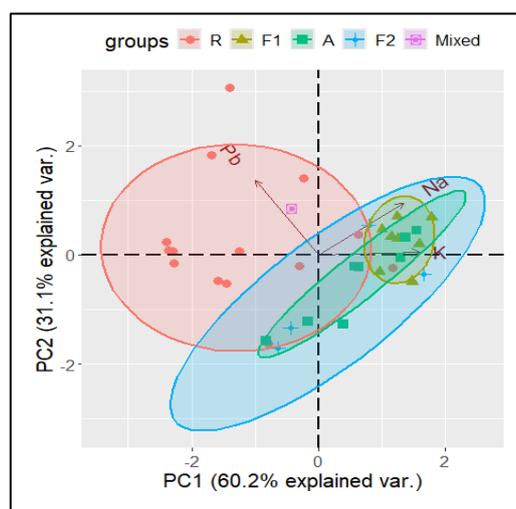


شکل ۲- نمودار جعبه‌ای ردیاب‌های بهینه (میلی‌گرم بر کیلوگرم) در کاربری‌های مختلف مرتع (R)، جنگل طبیعی (F1)، جنگل دست کاشت (F2) و کشاورزی (A) در آبخیز معرف کسلیان

Figure 2. Box plots of the optimum tracers ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) in different land uses, including (R: rangeland, F1: natural forest, F2: hand-planted forest, A: agriculture) in the Kasilian watershed

رسوب بوده است. پیکان‌های ردیاب‌های حذف شده در نمودار همبستگی موازی با ردیاب‌های بهینه‌ای است که انتخاب می‌شوند. نتیجه نشان داد که پس از انجام آزمون تابع تفکیک، همبستگی معناداری بین عنصرهای ردیاب است. همچنین نتایج نمودار تحلیل مؤلفه اصلی نشان داد پس از انجام آزمون تابع تفکیک، ردیاب‌های بهینه قادر به تفکیک منابع اصلی تولید رسوب هستند و در مجموع، در دو محور اول و دوم بیش از ۸۰ درصد واریانس داده‌ها پوشش داده شده است. (Lizaga et al. (2020) نیز نشان دادند که همبستگی معناداری میان عنصرهای ردیاب در این نمودار است.

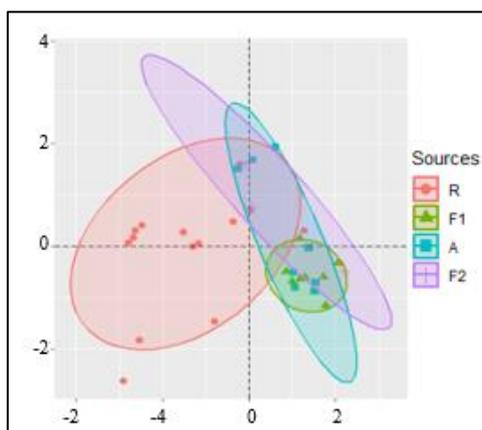
نتایج شکل ۲ نشان می‌دهد که در میان ردیاب‌های بهینه عنصر Pb بیش‌ترین غلظت را در کاربری مرتع و کم‌ترین غلظت را در کاربری کشاورزی داشت. غلظت عنصر K و Na در کاربری جنگل طبیعی بیش‌ترین و در کاربری مرتع کم‌ترین بود. این نمودارها به‌وضوح تفاوت غلظت عناصر بین کاربری‌های مختلف را نمایش می‌دهند. شکل ۳، نمودار حاصل از تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) روی ماتریس تابع تفکیک را نشان می‌دهد. در این نمودار، جایگاه نمونه‌های منبع نسبت به یکدیگر و همچنین نسبت به نمونه رسوب ترکیبی، در چهار ناحیه فضای مؤلفه‌ای مشخص شده‌اند. این تحلیل پس از آزمون‌های آماری و انتخاب ردیاب‌های بهینه انجام شده و هدف آن، بررسی توانایی تفکیک‌پذیری منابع



شکل ۳- نمودار تحلیل مؤلفه اصلی در کاربری‌های مختلف مرتع (R)، جنگل طبیعی (F1)، جنگل دست کاشت (F2) و کشاورزی (A) در آبخیز معرف کسلیان

Figure 3. Principal component analysis in different land uses, including (R: rangeland, F1: natural forest, F2: hand-planted forest, A: agriculture) in the Kasilian watershed

شکل ۴، نمودار حاصل از تحلیل تابع تفکیک را در فضای سه‌بعدی نمایش می‌دهد که موقعیت نسبی منابع مختلف رسوب را بر اساس ترکیب ردیاب‌های منتخب مشخص کرده است. این نمودار نشان می‌دهد که برخی از منابع رسوب دارای هم‌پوشانی فضایی هستند، به این معنا که مرز تفکیک آن‌ها در فضای ترکیب‌های شیمیایی به‌طور کامل مشخص نیست. این هم‌پوشانی می‌تواند ناشی از شباهت‌های زمین‌شناسی میان کاربری‌های مختلف باشد؛ شباهتی که منجر به نزدیکی مقادیر ردیاب‌ها در منابع مختلف و در نتیجه کاهش قدرت تفکیک مدل می‌شود. این مسئله پیش‌تر نیز توسط پژوهشگران دیگر مانند Collins and Walling (2002) مطرح شده و به‌عنوان یکی از چالش‌های شناسایی منشأ رسوب در اراضی با زمین‌شناسی یکنواخت شناخته شده است.

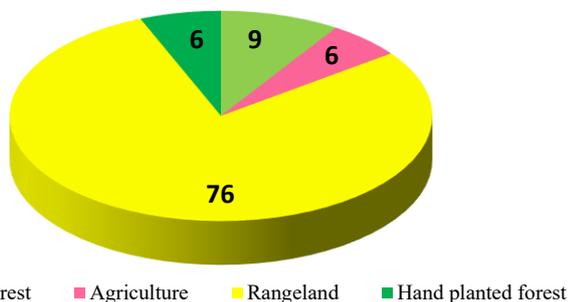


شکل ۴- نمودار تحلیل تابع تفکیک در کاربری‌های مختلف مرتع (R)، جنگل طبیعی (F1)، جنگل دست کاشت (F2) و کشاورزی (A) در آبخیز معرف کسلیان

Figure 4. Discriminant function analysis plot in different land uses, including (R: rangeland, F1: natural forest, F2: hand-planted forest, A: agriculture) in the Kasilian watershed

(شکل ۵). اختلاف زیادی میان سهم منابع رسوب وجود داشت. بیش‌ترین سهم نسبی منابع رسوب نیز مربوط به کاربری مرتع بود. Sharifi et al. (2020) نیز در مطالعه خود اشاره کردند که مراتع تخریب‌شده بیش‌ترین میزان فرسایش و غلظت رسوب را دارند. هم‌چنین Astorga et al. (2020) در ارزیابی سهم منابع رسوب، نشان دادند که مراتع منبع غالب رسوب هستند.

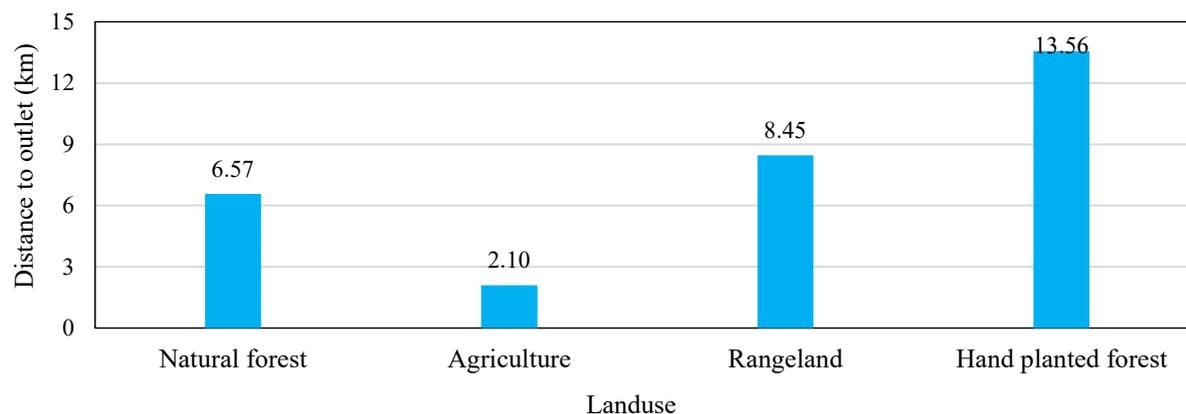
نتایج حاصل از اجرای مدل ترکیبی چندمتغیره در بسته FingerPro برای تعیین سهم نسبی منابع کاربری کشاورزی، مرتع، جنگل دست کاشت و طبیعی نمونه‌های رسوب منفرد جمع‌آوری شده صورت گرفته در آبخیز مطالعاتی محاسبه شد. سهم نسبی کاربری‌های جنگل طبیعی، کشاورزی، مرتع و جنگل دست کاشت در تولید رسوب معلق به ترتیب ۹، ۶، ۷۶ و ۶ درصد بود



شکل ۵- سهم کاربری‌های اراضی در تولید رسوب معلق در منطقه مطالعه  
Figure 5. Contribution of land uses to suspended sediment yield in the study area

موضوع نشان می‌دهد که علی‌رغم فاصله نسبتاً زیاد تا خروجی، شرایط فیزیکی مرتع به‌گونه‌ای است که حجم زیادی از رسوب تولیدشده، به خروجی منتقل می‌شود؛ بنابراین، عوامل مانند ساختار سیمای سرزمین و عوامل محیطی انتقال رسوب را تسهیل می‌کنند.

نتایج بررسی فاصله منابع تا خروجی حوزه نشان داد که اراضی کشاورزی در نزدیک‌ترین موقعیت به خروجی قرار دارند و معمولاً در مناطق پایاب دیده می‌شوند. فاصله زیاد جنگل دست کاشت نشان‌دهنده موقعیت آن در بالادست آبخیز است. جنگل طبیعی و مرتع نیز حدوداً فاصله متوسط دارند (شکل ۶). این



شکل ۶- فاصله متوسط وزنی کاربری اراضی تا خروجی آبخیز

Figure 6. Mean weighted distance of land uses to the watershed outlet

شکننده و حساس به فرسایش، نقش مهمی در افزایش میزان تولید رسوب ایفا می‌کنند. بنابراین، این سه عامل به‌طور هم‌افزا سهم عمده‌ای در افزایش تولید رسوب معلق در اراضی مرتعی دارند که تأثیر آن‌ها در مقایسه با سایر کاربری‌ها برجسته‌تر است. هم‌چنین Zakeri et al. (2020) در مطالعه‌ای در شمال شرق ایران عنوان کردند که عامل توپوگرافی (LS) مهم‌ترین عامل مؤثر در فرسایش خاک منطقه است و با افزایش پوشش گیاهی، میزان فرسایش و رسوب‌گذاری سالانه به‌شدت کاهش یافته و بخش بزرگ‌تری از منطقه دچار فرسایش خفیف تا متوسط خواهد شد. هم‌چنین نتایج پژوهش Habashi et al. (2018) نشان داد فاکتور توپوگرافی با بالاترین مقدار ضریب تبیین بیش‌ترین تأثیر را در برآورد فرسایش سالانه خاک داشته است.

نتایج ارزیابی تأثیر عوامل فرسایش بر سهم کاربری‌های اراضی در تولید رسوب معلق نشان داد که عوامل C، LS و K در کاربری مرتع بیش‌تر از سایر کاربری‌ها بوده‌اند. بنابراین، سهم زیاد تولید رسوب در اراضی مرتعی عمدتاً به‌دلیل شیب زمین، پوشش گیاهی ضعیف و ویژگی‌های ذاتی خاک‌های این نواحی (مانند بافت و ساختار حساس به فرسایش) است (جدول ۲). این امر نشان می‌دهد که در اراضی مرتعی، به‌دلیل شیب‌های تندتر و طولانی‌تر مسیر جریان رواناب، شرایط فیزیکی برای انتقال و تولید رسوب بیش‌تر فراهم است. هم‌چنین، پوشش گیاهی نسبتاً کم و پراکندگی نامناسب گیاهان حفاظتی در این مناطق باعث کاهش تثبیت خاک و افزایش حساسیت آن به فرسایش می‌شود. علاوه بر این، ویژگی‌های ذاتی خاک‌های مرتعی از جمله بافت و ساختار

جدول ۲- نتایج عوامل فرسایش در کاربری‌های اراضی حوزه آبخیز کسلیان (Kamari Yekdangi et al., 2025)

Table 2. Results of erosion factors across land uses in the Kasilian watershed (Kamari Yekdangi et al., 2025)

Land Use	Parameter				
	C	K	Ls	P	R
Natural Forest	0.23	0.02	15.34	0.1	313.32
Agriculture	0.27	0.02	12.04	0.7	342.65
Rangeland	0.33	0.03	25.58	0.6	278.99
Hand-planted forest	0.30	0.02	18.21	0.1	268.44

می‌شود. چرا که لکه‌های پراکنده‌ی مرتعی نمی‌توانند به‌صورت مؤثر در برابر اثرات مستقیم قطرات باران، رواناب سطحی و انتقال ذرات خاک مقاومت کنند. به بیان دیگر، هر چه پوشش گیاهی یکنواخت‌تر و پیوسته‌تر باشد، توان مهار فرسایش بیش‌تر خواهد بود، (جدول ۳). بنابراین، ENN\_MN بالا در کاربری مرتع به‌عنوان یکی از محرک‌های اصلی در افزایش تولید رسوب شناخته می‌شود. نتایج مطالعه‌ی Xu et al. (2017) نشان داد که فرآیندهای فرسایش خاک با الگوهای چشم‌انداز منطقه رابطه‌ای معنادار دارند؛ به‌طوری‌که در مقیاس کل چشم‌انداز، شاخص گسستگی (fragmentation) همبستگی مثبتی با میزان فرسایش

هم‌چنین نتایج تحلیل اثر سنجه‌های سیمای سرزمین در سهم کاربری‌های اراضی در تولید رسوب معلق نشان داد که میانگین فاصله اقلیدسی نزدیک‌ترین همسایه که نشان‌دهنده میانگین فاصله اقلیدسی بین هر لکه (patch) و نزدیک‌ترین لکه دیگر از همان طبقه پوشش/کاربری اراضی است، در کاربری مرتع بیش‌تر از سایر کاربری‌هاست. اگر ENN\_MN بالا باشد (لکه‌های مرتع از هم دور باشند)، پیوستگی پوشش گیاهی کاهش یافته و توانایی زمین برای محافظت در برابر بارش‌های فرساینده و رواناب سطحی کم‌تر می‌شود. این وضعیت باعث افزایش رواناب، شست‌وشوی خاک و در نهایت افزایش تولید رسوب

رابطه‌ای مستقیم و معنادار با شدت فرسایش خاک در حوضه آبخیز کوزه‌تپراقی اردبیل دارند.

خاک از خود نشان داد. هم‌چنین (Ghorbani et al. (2020 در مطالعه‌ای نشان دادند که شاخص‌های میانگین شکل لکه‌ها (SHAPE\_MN) و میانگین مساحت لکه‌ها (AREA\_MN)

جدول ۳- نتایج سنج‌های چشم‌انداز در کاربری‌های اراضی منطقه

Table 3. Results of landscape metrics across land uses in the study area

Land Use	Landscape metric												
	Class Area (CA)	Percentage of Landscape (PLAND)	Number of Patches (NP)	Patch Density (PD)	Largest Patch Index (LPI)	Total Edge (TE)	Edge Density (ED)	Mean Patch Area (AREA_MN)	Mean Shape Complexity (SHAPE_MN)	Mean Euclidean Nearest Neighbor Distance (ENN_MN)	Percentage of Like Adjacencies (PLADJ)	Spatial Cohesion (COHESION)	Aggregation Index (AI)
Natural Forest	4799.25	69.82	21	0.3	65.53	130380	18.97	228.53	1.62	124.82	96.23	99.78	96.81
Agriculture	1226.79	17.84	16	0.23	15.49	136981	19.93	76.67	1.98	138	88.34	98.93	89.39
Rangeland	482.95	7.02	16	0.23	3.94	61705	8.98	30.18	1.98	575.3	86.37	95.56	88.02
Hand-planted Forest	128.26	1.87	1	0.01	1.87	9553	1.39	128.26	2.37	N/A	91.28	96.86	94.76

محیط زیستی را نیز هم‌زمان در نظر گیرد. این یافته‌ها می‌توانند پایه‌ای علمی برای شناسایی مناطق بحرانی، اولویت‌بندی اقدامات حفاظتی و تدوین راهبردهای مؤثر در مدیریت جامع منابع آب و خاک فراهم آورند. کاهش پراکندگی لکه‌های مرتعی، ارتقای پیوستگی فضایی و بهبود کیفیت پوشش گیاهی از جمله مهم‌ترین راهکارها برای کاهش تولید رسوب معلق در این نوع کاربری‌ها به‌شمار می‌روند. بر پایه یافته‌های این پژوهش، به‌نظر می‌رسد که به‌منظور مدیریت مؤثر منابع آب و خاک در حوضه‌های آبخیز باید ساختار فضایی لکه‌ها، نوع کاربری و ویژگی‌های محیطی نظیر پوشش گیاهی، شیب زمین و بافت خاک نیز هم‌زمان در تصمیم‌گیری‌ها لحاظ شوند. سهم بالای برخی کاربری‌ها، به‌ویژه اراضی مرتعی، در تولید رسوب معلق نشان می‌دهد که لازم است اقدامات مدیریتی فراتر از حفاظت صرف انجام گیرد. تقویت یکنواختی و پیوستگی پوشش گیاهی، کاهش شیب مؤثر و طول رواناب از طریق مداخلاتی هم‌چون اصلاح شیب‌بندی یا کشت نوار، و بهبود کیفیت خاک با افزایش ماده آلی و کاهش بهره‌برداری‌های مخرب، می‌توانند به‌طور چشم‌گیری از شدت فرسایش بکاهند. در مجموع، اتخاذ رویکردی جامع که در آن فاکتورهای مؤثر بر فرسایش نظیر C، LS، K و در کنار سیاست‌گذاری‌های کاربری اراضی دیده شوند، می‌تواند گامی مؤثر در برای کاهش مخاطرات فرسایش و افزایش پایداری اکولوژیکی حوضه‌های آبخیز باشد.

### سپاسگزاری

از دانشگاه تربیت مدرس بابت حمایت‌های مالی و پشتیبانی اجرایی صمیمانه سپاسگزاری می‌شود.

با وجود آنکه کاربری مرتع میانگین فاصله نسبتاً زیادی با خروجی آبخیز داشت ( $D_w = 1/45$ ) بیش‌ترین سهم را در تولید رسوب معلق به خود اختصاص داد. این وضعیت را می‌توان با در نظر گرفتن مقادیر بالای عوامل C، LS، K و شاخص ENN\_MN در اراضی مرتعی بهتر تبیین کرد. مقدار زیاد عامل C نشان‌دهنده پوشش گیاهی ضعیف است که موجب افزایش حساسیت خاک به فرسایش سطحی می‌شود. از سوی دیگر، مقدار بالای LS بیانگر شیب‌های تند و دامنه‌های بلند در این نواحی است که امکان تولید رواناب و انتقال رسوب را بیش‌تر می‌کند. هم‌چنین، مقدار بالای K نشان می‌دهد که ویژگی‌های ذاتی خاک، مانند بافت و ساختار، آن را مستعد فرسایش ساخته‌اند. افزون بر این، مقدار زیاد ENN\_MN به گسست فضایی و پراکندگی لکه‌های مرتعی اشاره دارد؛ وضعیتی که انسجام ساختاری چشم‌انداز را کاهش داده و فرایند فرسایش و انتقال رسوب را تسهیل می‌کند. در مجموع، به نظر می‌رسد ترکیب عوامل اکولوژیکی، توپوگرافی و ساختاری چشم‌انداز در کاربری مرتع، نقش تعیین‌کننده‌ای در تشدید فرسایش و انتقال رسوب داشته و باعث شده است این کاربری، علی‌رغم فاصله‌ی زیاد از خروجی، هم‌چنان نقش اصلی در رسوب‌دهی آبخیز ایفا کند.

### ۴- نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که سهم کاربری‌های مختلف اراضی در تولید رسوب معلق به‌طور قابل‌توجهی متفاوت است؛ تفاوتی که نمی‌توان صرفاً با موقعیت مکانی یا فاصله تا خروجی آبخیز توضیح داد. بر این اساس، ارزیابی نقش کاربری‌های اراضی در تولید رسوب باید علاوه بر موقعیت مکانی، ساختار فضایی و ویژگی‌های

## تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافعی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

## دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است.

## مشارکت نویسندگان

فاطمه اکبری امامزاده: گردآوری داده‌ها، تحلیل، بررسی میدانی، تدوین روش‌شناسی، کار با نرم‌افزار، اعتبارسنجی، ترسیم و تجسم داده‌ها، نگارش پیش‌نویس اولیه مقاله؛ عبدالواحد خالدی درویشان: طراحی مفهومی، گردآوری داده‌ها، تحلیل، بررسی میدانی، تدوین روش‌شناسی، مدیریت پروژه، کار با نرم‌افزار، نظارت علمی، اعتبارسنجی، ترسیم و تجسم داده‌ها، ویرایش و بازنگری مقاله؛ مهدی وفاخواه: طراحی مفهومی، تحلیل، تدوین روش‌شناسی، نظارت علمی، ویرایش و بازنگری مقاله؛ کاظم نصرتی: طراحی مفهومی، تحلیل، تدوین روش‌شناسی، کار با نرم‌افزار، نظارت علمی، اعتبارسنجی، ویرایش و بازنگری مقاله.

## منابع

حبشی، خلیل، محمدی، شاهین، کریمزاده، حمیدرضا، و پورمنافی، سعید (۱۳۹۷). ارزیابی خطر فرسایش خاک در دشت کوهپایه - سگزی با استفاده از مدل تجدید نظر شده جهانی فرسایش خاک (RUSLE). *مخاطرات محیط طبیعی*، ۷(۱۵)، ۱۶۳-۱۸۰. doi: 10.22111/jneh.2017.3216

دهقانی، نوید، وفاخواه، مهدی، و بهره مند، عبدالرضا. (۱۳۹۲). شبیه سازی جریان رودخانه با استفاده از مدل هیدرولوژیکی - توزیعی WetSpa حوزه آبخیز کسلیان. *پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*، ۲۰(۶)، ۲۵۳-۲۶۱.

شریفی، احمد، شیرانی، حمید، بسالت‌پور، علیرضا و اسفندیارپور بروجنی، علی (۱۳۹۹). ارزیابی اثر کاربری جنگل و مرتع بر فرسایش بین‌شیاری و برخی ویژگی‌های فیزیکی خاک در جنوب شرقی

ایران. *آب و خاک*، ۳۴(۲)، ۴۶۹-۴۵۵. doi:10.22067/jsw. v34i2.83911

عرب‌خدری، محمود. (۱۳۹۳). بررسی عوامل عمده فرسایش آبی در ایران. *مجله مدیریت اراضی*، ۲(۱)، ۱۷-۲۶. doi: 10.22092/lmj.2014.100081

غلامی، بهرام، گنبد، محمد، عضدی، محمد و جوکار، علیرضا (۱۳۸۸). بررسی اثر تغییرات کاربری اراضی در ایجاد رواناب و خطر سیلاب حوزه‌ی آبخیز کسلیان. *علوم و مهندسی آبخیزداری ایران*، ۳(۹)، ۵۵-۵۷. doi:10.1001.1.20089554.1388.3.9.8.0

قربانی، اردوان، حزبوی، مصطفی‌زاده، رئوف و علائی، نازیلا (۱۳۹۹). تحلیل ارتباط بین سنج‌های سیمای سرزمین و فرسایش خاک حوزه آبخیز کوزه تهرانی، استان اردبیل. *جغرافیا و مخاطرات محیطی*، ۳۶(۹)، ۶۵-۹۰. doi:10.22067/geoeh.2021.67020.0

کریمی، نبیه، غلامی، لیل، کاویان، علی و خالدی درویشان، عبدالواحد (۱۴۰۱). تعیین سهم ویژه منابع رسوب معلق در آبخیز واز با استفاده از ویژگی‌های ژئوشیمیایی. *اکوهیدرولوژی*، ۹(۴)، ۷۰۵-۷۱۸. doi:10.22059/ije.2023.344381.1649

کمری یکدانگی، فائزه، سارونه، فاطمه، خالدی درویشان، عبدالواحد، موسوی، وحید، آقاییگامین، سهیلا (۱۴۰۲). کارایی روش‌های مختلف تهیه نقشه کاربری/پوشش اراضی در حوضه آبخیز معرف کسلیان. *اکوهیدرولوژی*، ۱۰(۳)، ۳۲۱-۳۳۴. doi:10.22059/ije.2023.361471.1743

معمودی، راضیه، آذری، محمود و منصفی، رضا. (۱۳۹۸). ارتباط الگوی سیمای سرزمین و رسوب در برخی از زیرحوضه‌های آبخیز استان گلستان. *مهندسی و مدیریت آبخیز*، ۱۱(۴)، ۹۵۵-۹۷۱. doi: 10.22092/ijwmse.2018.120525.1456

مصفاپی، جمال، اختصاصی، محمدرضا و صالح پورجم، امین. (۱۳۹۷). مقایسه عملکرد روش انگشت‌نگاری و اندازه‌گیری صحرایی فرسایش در منشایابی رسوبات آبی. *علوم و مهندسی آبخیزداری ایران*، ۱۲(۴۰)، ۹-۱۰. doi:10.1001.1.20089554.1397.12.40.2.9

نصرتی، کاظم، و جلالی، سعیده. (۱۳۹۶). بررسی تولید رسوب معلق در حوضه زهکشی زیارت‌گران در فصول مختلف با استفاده از تکنیک منشایابی رسوب. *اکوهیدرولوژی*، ۴(۳)، ۸۸۷-۸۹۵. doi: 10.22059/ije.2017.62646

## References

- Adnan, S., Aldefae, A. H., & Humaish, W. H. (2021). Soil erosion and the influenced factors: A review article. *In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 1058(1): 012041. doi: 10.1088/1757899X/1058/1/012041
- Arabkhedri, M. (2014). A review on major water erosion factors in Iran. *Land Management Journal*, 2(1), 17-26. doi: 10.22092/lmj.2014.100081 [In Persian]
- Astorga, R., Garcias, T., Borgatello, G., Velasco, H., Padilla, R., Dercon, G., & Mabit, L. (2020). Use of geochemical fingerprints to trace sediment sources in an agricultural catchment of Argentina. *International Soil and Water Conservation Research*, 8(4), 410-417. doi: 10.1016/j.iswcr.2020.10.006
- Collins, A. L. (2020). Sediment source fingerprinting: Benchmarking recent outputs, remaining challenges and emerging themes. *Journal of Soils and Sediments*, 20(12), 4160-4193. doi: 10.1007/s11368-020-02755-4
- Collins, A. L., Walling, D. E., Sickingabula, H. M., & Leeks, G. J. L. (2002). Suspended sediment source fingerprinting in a small tropical catchment and some management implications.

- Applied Geography*, 21(4), 387–412. doi: 10.1016/S0143-6228(01)00013-3
- Dehghani, N., Vafakhah, M., & Bahremand, A. (2013). Simulation of river flow using the distributed hydrological model WetSpa in the Kesilian watershed. *Journal of Water and Soil Conservation Research*, 20(6), 253–261 [In Persian]
- Fan, S., & Wang, X. (2017). Analysis and assessment of heavy metals pollution in soils around a Pb and Zn smelter in Baoji City, Northwest China. *Human and Ecological Risk Assessment*, 23(5), 1099–1120. doi: 10.1080/10807039.2017.1300857
- Gholami, B., Gonbad, M., Ozodi, M., & Jokar, A. (2009). Evaluation of the effect of land use changes on runoff and flood risk in the Kasilian watershed. *Journal of Watershed Science and Engineering of Iran*, 3(9), 55–57. doi: 20.1001.1.20089554.1388.3.9.8.0 [In Persian]
- Ghorbani, A., Hezbavi-Mostafazadeh, M., Raouf, A., & Nazila (2020). Analysis of the relationship between landscape metrics and soil erosion in the Kozeh Tapraghi watershed, Ardabil province. *Geography and Environmental Hazards*, 36(9), 65–90. doi: 10.22067/geoeh.2021.67020.0 [In Persian]
- Habashi, K., Mohammadi, Sh., Karimzadeh, H., & Pourmanafi, S (2018). Assessment soil erosion risk in kohpayeh - segzi plain using Revised Universal Soil Loss Equation (RSLE). *Journal of Natural Environmental Hazards*, 7(15), 163-180. doi: 10.22111/jneh.2017.3216 [In Persian]
- Kamari Yekdangi, F., Khaledi Darvishan, A., & Aghabeigi Amin, S. (2025). Prioritization of factors affecting annual soil erosion and sediment yield using combined G2-GeoDetector approach. *Modeling Earth Systems and Environment*, 11(4), 1–17. doi: 10.1007/s40808-025-02484-y
- Kamari Yekdangi, F., Sarouneh, F., Khaledi Darvishan, A., Mousavi, V., & Aghabeigi Amin, S. (2023). Efficiency of different methods for preparing land use/land cover maps in the representative watershed of Kaselian. *Ecohydrology*, 10(3), 321–334. doi: 10.22059/ije.2023.344381.1649 [In Persian]
- Karimi, N., Gholami, L., Kaviani, A., & Khaledi Darvishan, A. (2022). Determination of the relative contribution of suspended sediment sources in the Vaz watershed using geochemical characteristics. *Ecohydrology*, 9(4), 705–718. doi: 10.22059/ije.2023.344381.1649 [In Persian]
- Liu, X., & Zhang, Y. (2022). Landscape analysis of runoff and sedimentation based on land use/cover change in two typical watersheds on the Loess Plateau, China. *Life*, 12(11), 1688. doi: 10.3390/life12111688
- Lizaga, I., Latorre, B., Gaspar, L., & Navas, A. (2020). FingerPro: An R package for tracking the provenance of sediment. *Water Resources Management*, 34(12), 3879–3894. doi: 10.1007/s11269-020-02650-0
- Lizaga, I., Quijano, L., Gaspar, L., Ramos, M. C., & Navas, A. (2019). Linking land use changes to variation in soil properties in a Mediterranean mountain agroecosystem. *Catena*, 172, 516–527. doi: 10.1016/j.catena.2018.09.019
- Masfai Jamal, M., Ekhtesasi, M. R., & Salehpourjam, A. (2018). Comparison of sediment fingerprinting and field measurement methods for sediment source apportionment. *Journal of Watershed Science and Engineering of Iran*, 12(40), 1–9. doi: 20.1001.1.20089554.1397.12.40.2.9 [In Persian]
- McGarigal, K. (2002). Landscape metrics for categorical map patterns.
- Mohammadi, M., Khaledi Darvishan, A., & Bahramifar, N. (2019). Spatial distribution and source identification of heavy metals (As, Cr, Cu and Ni) at sub-watershed scale using geographically weighted regression. *International Soil and Water Conservation Research*, 7(3), 308–315. doi: 10.1016/j.iswcr.2019.01.005
- Motamedi, R., Azari, M. and Monsefi, R. (2019). Relationship between landscape metrics and sediment yield in some watersheds of Golestan Province. *Watershed Engineering and Management*, 11(4), 955-971. doi: 10.22092/ijwmse.2018.120525.1456 [In Persian]
- Nahib, I., Wahyudin, Y., Amhar, F., Ambarwulan, W., Nugroho, N. P., Pranoto, B., ... & Karolinoerita, V. (2024). Analysis of factors influencing spatial distribution of soil erosion under diverse subwatershed based on geospatial perspective: A Case Study at Citarum Watershed, West Java, Indonesia. *Scientifica* 2024, 1–20 doi: 10.1155/2024/7251691
- Nosrati, K., & Jalali, S. (2017). Investigating suspended sediment yield in Ziarat Drainage Basin, Gorgan in different seasons using sediment fingerprinting technique. *Ecohydrology*, 4(3), 887–895. doi: 10.22059/ije.2017.62646 [In Persian].
- Nosrati, K., Collins, A. L., & Madankan, M. (2018). Fingerprinting sub-basin spatial sediment sources using different multivariate statistical techniques and the Modified MixSIR model. *Catena*, 164, 32–43. doi: 10.1016/j.catena.2018.01.003
- Owens, P. N., Blake, W. H., Gaspar, L., Gateuille, D., Koiter, A. J., Lobb, D. A., Petticrew, E. L., Reiffarth, D. G., Smith, H. G., & Woodward, J.

- C. (2016). Fingerprinting and tracing the sources of soils and sediments: Earth and ocean science, geoarchaeological, forensic, and human health applications. *Earth-Science Reviews*, 162, 1–23. doi: 10.1016/j.earscirev.2016.08.012.
- Palazón, L., & Navas, A. (2017). Variability in source sediment contributions by applying different statistic test for a Pyrenean catchment. *Journal of Environmental Management*, 194, 42–53. doi: 10.1016/j.jenvman.2016.07.058
- Pulley, S., Foster, I., & Antunes, P. (2015). The uncertainties associated with sediment fingerprinting suspended and recently deposited fluvial sediment in the Nene River basin. *Geomorphology*, 228, 303–319. doi: 10.1016/j.geomorph.2014.09.016
- Ramos, M. C., Gaspar, L., Lizaga, I., Catalá, A., & Navas, A. (2025). Geochemical composition of suspended sediments generated after erosive rainfall events in nested agroforestry catchments with Mediterranean climate. *Journal of Hydrology*, 650, 132486. doi: 10.1016/j.jhydrol.2024.132486.
- Sharifi, A., Shirani, H., Basaltpour, A., & Esfandiarypour Boroujeni, A. (2020). Assessment of the effects of forest and rangeland land use on interrill erosion and some physical soil properties in southeastern Iran. *Soil and Water*, 34(2), 455–469. doi: 10.22067/jsw.v34i2.83911 [In Persian]
- Thakuriah G. (2023). GIS-based revised universal soil loss equation for estimating annual soil erosion: a case of lower Kuls basin, India. *SN Applied Sciences*, 5(3):1–13. doi: 10.1007/s42452-023-05303-0.
- Tiecher, T., Minella, J. P. G., Evrard, O., Caner, L., Merten, G. H., Capoane, V., & dos Santos, D. R. (2018). Fingerprinting sediment sources in a large agricultural catchment under no-tillage in Southern Brazil (Conceição River). *Land Degradation & Development*, 29(4), 939–951. doi: 10.1002/ldr.2917
- Vale, S., Swales, A., Smith, H. G., Olsen, G., & Woodward, B. (2022). Impacts of tracer type, tracer selection and source dominance on source apportionment with sediment fingerprinting. *Science of The Total Environment*, 831, 154832. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.154832
- Vercruyssen, K., Grabowski, R. C., & Rickson, R. J. (2017). Suspended sediment transport dynamics in rivers: Multi-scale drivers of temporal variation. *Earth-Science Reviews*, 166, 38–52. doi:10.1002/esp.4682
- Walling, D. E. (2005). Tracing suspended sediment sources in catchments and river systems. *Science of the Total Environment*, 344(1-3), 159–184. doi: 10.1016/j.scitotenv.2005.02.011
- Walling, D. E., Collins, A. L., & Stroud, R. (2008). Tracing suspended sediment and particulate phosphorus sources in catchments. *Journal of Hydrology*, 350(1-2), 274–289. doi: 10.1016/j.jhydrol.2007.10.047
- Xu, Y., Tang, H., Wang, B., & Chen, J. (2017). Effects of landscape patterns on soil erosion processes in a mountain-basin system in North China. *Natural Hazards*, 87(3), 1567–1585. doi: 10.1007/s11069-017-2810-3
- Zakeri, E., Mousavi, S. A., & Karimzadeh, H. (2020). Scenario-based modelling of soil conservation function by rangeland vegetation cover in northeastern Iran. *Environmental Earth Sciences*, 79(5), 107. doi: 10.1007/s12665-020-08703-3
- Zhang, Y., Bi, Z., Zhang, X., & Yu, Y. (2019). Influence of Landscape Pattern Changes on Runoff and Sediment in the Dali River Watershed on the Loess Plateau of China. *Land*, 8(12), 180. doi: 10.3390/land8120180
- Zhao, C., Li, P., & Yan, Z. (2024). Effects of landscape pattern on water quality at multi-spatial scales in Wuding River Basin, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 31, 19699–19714. doi: 10.1007/s11356-024-32429-