Journal of Geography and Planning
Online ISSN: 2717-3534 Print ISSN: 2008-8078
Homepage: https://geoplanning.tabrizu.ac.ir

# Assessing the impact of land-use changes on soil erosion using the global RUSLE model over the period 2004–2024 (Case study: Ghouri Chay Watershed)

**Aghil Madadi**[1]✉, **AmirHesam Pasban**[2]

1. Corresponding Author, Professor, Department of Physical Geography, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. E-mail: aghil48madadi@yahoo.com
2. Ph.D Student, Department of Physical Geography, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran, Iran. E-mail: a.hesam773@gmail.com

## Article Info

**Article type:**
Research Article

**Article history:**
Received: 1 October 2025
Revised: 13 February 2026
Accepted: 18 February 2026
Published: 29 July 2026

**Keywords**:
Random Forest,
soil loss,
Sentinel-2, GEE,
Ghuri Chay watershed.

## ABSTRACT

**Objective**: The aim of this study was to analyze the relationship between vegetation indices and soil erosion using the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) in the Firozabad watershed, Ardabil Province.

**Methods**: The research was based on integrating vegetation indices with the RUSLE model. For this purpose, Sentinel-2 satellite imagery from 2024 was used to derive six vegetation indices, including NDVI, SAVI, MSAVI, EVI, GNDVI, and VARI. These indices were calculated and mapped using Google Earth Engine and ArcGIS. Simultaneously, the RUSLE model was applied to estimate soil erosion intensity, incorporating rainfall erosivity (R), soil erodibility (K), slope length and steepness (LS), vegetation management (C), and conservation practices (P). By overlaying these factors, a soil erosion map of the watershed was produced. To assess the correlation between vegetation indices and soil erosion, Pearson's correlation and linear regression analyses were conducted in SPSS.

**Results**: Results showed that soil erosion values ranged from 2.46 to 98.73 tons per hectare per year. Pearsons analysis revealed the strongest positive and significant correlations with NDVI and EVI (0.38), followed by MSAVI (0.29) and VARI (0.26). In contrast, SAVI exhibited a negative correlation (-0.22), highlighting its protective role in sparsely vegetated areas by accounting for soil background effects. Interestingly, higher values of NDVI and EVI were associated with increased erosion, suggesting the influence of overgrazing, rainfed farming, and surface soil loss. Regression analysis confirmed these patterns, with the highest coefficients of determination ($R^2$) for NDVI (0.148) and EVI (0.146), indicating their greater explanatory power for soil erosion variability. In comparison, VARI (0.13), MSAVI (0.08), GNDVI (0.070), and SAVI (0.074) showed weaker explanatory capacity.

**Conclusions**: The results revealed that NDVI and EVI exhibited the strongest positive and significant correlations with soil erosion and had higher explanatory power in analyzing its variations, while the SAVI index better reflected the protective role of vegetation in sparsely covered areas. Therefore, integrating the RUSLE model with vegetation indices can serve as an effective tool for identifying key factors influencing erosion and supporting sustainable soil management planning in watersheds.

**Cite this article:** Madadi, A., & Pasban, A.H. (2026). Assessing the impact of land-use changes on soil erosion using the global RUSLE model over the period 2004–2024 (Case study: Ghouri Chay Watershed). *Journal of Geography and Planning*, 30(97), 390-409. http//doi.org/10.22034/gp.2026.69434.3459

© The Author(s).
Publisher: University of Tabriz.
DOI: http//doi.org/10.22034/gp.2026.69434.3459

## Introduction

Soil, as the primary foundation for sustaining human life, is one of the most valuable and essential natural resources. It not only underpins agricultural production but also plays a pivotal role in maintaining the stability of natural ecosystems. Soil is a dynamic and complex system composed of minerals, organic matter, water, and air, providing a habitat for countless species and a growth medium for plants. The topsoil layer, in particular, is critical, as it supplies more than 97% of human food, and with global population growth and rising food demand, its protection has become increasingly vital. Despite its importance, soil faces severe threats from both human activities—such as land-use change, overgrazing, and unsustainable resource exploitation—and natural factors including climate change and intense precipitation events. Among these threats, soil erosion represents one of the most significant challenges, as a natural process exacerbated by anthropogenic pressures that leads to the loss of fertile topsoil. Soil erosion diminishes soil productivity, disrupts water cycles, degrades natural resources, and reduces carbon storage. Globally, it is estimated that approximately 75 billion tons of soil are lost annually, causing economic losses exceeding 400 billion USD. In developing countries, soil erosion exacerbates food insecurity, poverty, and social instability. In Iran, particularly in mountainous and semi-arid regions, soil erosion has become a critical concern, with estimates indicating an average soil loss of 20 tons per hectare per year, highlighting the urgent need for effective monitoring and management strategies.

## Materials and Methods

The Ghouri Chay watershed, located in Ardabil Province, northwestern Iran, was selected as the study area. It encompasses parts of Nir, Ardabil, and Kosar counties, with the majority situated in Nir. Geographically, it extends between 48°02′–48°31′ E and 37°46′–38°11′ N, covering an area of approximately 803 km². The Ghouri Chay River, the main watercourse of the basin, originates from the northeastern slopes of the Bozqoush Mountains at an altitude of about 2,500 meters above sea level.The watershed features steep slopes, diverse geology, and varying land uses, making it highly susceptible to soil erosion. The study employed the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) to estimate and analyze soil erosion over the period 2004–2024. RUSLE, a semi-empirical and widely used model, accounts for five factors: rainfall erosivity (R), soil erodibility (K), slope length and steepness (LS), cover-management (C), and support practices (P). Data included Sentinel-2 imagery for 2024 to derive vegetation cover, ALOS PALSAR DEM at 12.5 m resolution for topographic parameters, long-term rainfall data from meteorological stations, and soil texture maps of Iran at a scale of 1:250,000. GIS-based processing was performed using ArcGIS 10.8 and Google Earth Engine (GEE), with additional statistical analyses conducted in SPSS and Excel. Land-use maps for 2004 and 2024 were generated using Landsat 5 TM and Sentinel-2 imagery, classified into six categories—rainfed agriculture, irrigated agriculture, rangeland, forest, residential, and water bodies—using a supervised random forest algorithm in GEE. Accuracy assessment using the Kappa coefficient confirmed high reliability (2004: Kappa=0.97, overall accuracy=98%; 2024: Kappa=0.96, overall accuracy=94%).

## Results

Land-use analysis revealed notable changes over the two decades. Rainfed agricultural areas increased by 1,005 ha, irrigated agriculture by 292 ha, and residential areas by 105 ha, while rangelands and forests decreased by 1,186 ha and 119 ha, respectively. Water bodies also declined by 97 ha. These transformations indicate intensified human pressure on natural resources, contributing directly to higher soil erosion rates. RUSLE-derived soil erosion maps showed that annual soil loss increased from 0–26.65 t/ha in 2004 to 0–37.18 t/ha in 2024. Areas with very low erosion decreased from 67,224 ha (84% of the basin) to 65,541 ha (49.82%), while low, moderate, high, and very high erosion classes expanded, particularly in northern, western, and southeastern parts of the watershed. Mean erosion rates by land use further highlighted the impact of anthropogenic changes: rainfed agriculture increased from 0.18 to 0.22 t/ha, irrigated agriculture from 0.28 to 0.30 t/ha, rangeland from 0.35 to 0.61 t/ha, residential areas from 0.09 to 0.37 t/ha, and forests decreased from 0.72 to 0.02 t/ha, reflecting the protective role of forest cover.

## Conclusion

The findings demonstrate that land-use changes over the past two decades have substantially influenced soil erosion dynamics in the Ghouri Chay watershed. The expansion of agricultural and residential areas, combined with decreased rangeland and forest cover, steep slopes, overgrazing, and inadequate soil conservation measures, has intensified erosion processes. This trend poses serious ecological and socio-economic risks, including soil degradation, reduced agricultural productivity, and diminished ecosystem services. The study underscores the necessity of immediate management interventions, such as vegetation restoration, erosion control, improved agricultural practices, grazing regulation, and the implementation of mechanical and biological soil conservation

strategies. Moreover, continuous monitoring using remote sensing and GIS integrated with RUSLE modeling provides an effective decision-support tool for sustainable watershed management. Overall, the research highlights that proactive land-use planning and conservation policies, combined with advanced technological tools and community engagement, are crucial for mitigating soil erosion and promoting ecological and economic sustainability in similar semi-arid and mountainous regions.

**Keywords:** Random Forest, Soil Loss, Sentinel-2, Google Earth Engine, Ghouri Chay Basin.

جغرافیا و برنامه ریزی
شاپا چاپی: ۸۰۷۸-۲۰۰۸ شاپا الکترونیکی: ۳۵۳۴-۲۷۱۷
Homepage: https://geoplanning.tabrizu.ac.ir

# بررسی تاثیر تغییرات کاربری اراضی بر میزان فرسایش خاک با استفاده از مدل جهانی RUSLE طی بازه زمانی ۲۰۰۴ تا ۲۰۲۴ (مطالعه موردی: حوضه آبخیز قوری چای)

**عقیل مددی[۱]✉، امیرحسام پاسبان[۲]**

۱. نویسنده مسئول، استاد، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایانامه: aghil48madadi@yahoo.com

۲. دانشجوی دکتری، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایانامه: a.hesam773@gmail.com

**اطلاعات مقاله**

**نوع مقاله:**
مقاله پژوهشی

**تاریخ دریافت:** ۱۴۰۴/۰۷/۰۹
**تاریخ بازنگری:** ۱۴۰۴/۱۱/۲۴
**تاریخ پذیرش:** ۱۴۰۴/۱۱/۲۹
**تاریخ انتشار:** ۱۴۰۵/۰۵/۰۷

**کلیدواژه‌ها:**
جنگل تصادفی،
هدررفت خاک،
سنتینل ۲،
گوگل ارث انجین،
حوضه قوری‌چای.

**چکیده**

فرسایش خاک یکی از چالش‌های اساسی محیط‌زیست و بهره‌برداری پایدار از منابع طبیعی به‌شمار می‌رود که تحت تأثیر عوامل متعددی همچون شرایط اقلیمی، ویژگی‌های خاک، شیب، کاربری اراضی و پوشش گیاهی قرار دارد. هدف این پژوهش، برآورد میزان فرسایش خاک و تحلیل تغییرات آن طی یک دوره بیست‌ساله (۲۰۰۴–۲۰۲۴) در حوضه آبخیز قوری‌چای در استان اردبیل با استفاده از مدل جهانی فرسایش خاک اصلاح‌شده (RUSLE) می‌باشد. در این راستا، شش عامل اصلی مدل شامل فرسایندگی باران، فرسایش‌پذیری خاک، طول و درجه شیب، پوشش گیاهی و اقدامات مدیریتی محاسبه و در محیط ArcGIS تلفیق شدند. داده‌های مورد استفاده شامل تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-2 برای سال ۲۰۲۴، تصاویر TM لندست ۵ برای سال ۲۰۰۴، مدل رقومی ارتفاعی ۱۲/۵ متر (ALOS PALSAR)، آمار بارندگی بیست‌ساله و نقشه بافت خاک ایران بودند. به‌منظور بررسی تغییرات کاربری اراضی، طبقه‌بندی نظارت‌شده با الگوریتم جنگل تصادفی در محیط Google Earth Engine اجرا شد و صحت طبقه‌بندی با ضریب کاپا ارزیابی گردید. نتایج نشان داد که طی دوره ۲۰۰۴ تا ۲۰۲۴ تغییرات چشمگیری در کاربری اراضی حوضه رخ داده است. اراضی دیم، آبی و مناطق مسکونی افزایش قابل‌توجهی یافته‌اند، در حالی‌که مراتع، جنگل‌ها و پهنه‌های آبی با کاهش مساحت روبه‌رو شدند. این تغییرات بیانگر فشار انسانی و بهره‌برداری ناپایدار از منابع طبیعی است. اجرای مدل RUSLE نشان داد که میانگین فرسایش سالانه خاک از ۲۶/۶۵ تن در هکتار در سال ۲۰۰۴ به ۳۷/۱۸ تن در هکتار در سال ۲۰۲۴ افزایش یافته است. علاوه بر افزایش مقدار حداکثری فرسایش، طبقات خطر نیز دستخوش تغییر شده‌اند، به‌طوری که مساحت اراضی با خطر کم و متوسط افزایش یافته و محدوده‌های با خطر زیاد و خیلی زیاد نیز هرچند به‌طور نسبی اندک، اما به‌صورت پراکنده در مناطق شیب‌دار و کوهستانی گسترش یافته‌اند. این یافته‌ها نشان می‌دهد که تغییر کاربری‌های طبیعی به کاربری‌های انسانی، کاهش تراکم پوشش گیاهی و شدت گرفتن الگوهای بارندگی مؤثرترین عوامل در افزایش فرسایش خاک حوضه بوده‌اند. نتایج پژوهش بر ضرورت اجرای فوری اقدامات مدیریتی شامل حفاظت و احیای پوشش گیاهی، مدیریت بهینه کشاورزی، کنترل رواناب و پیشگیری از چرای مفرط تأکید دارد تا از گسترش مناطق بحرانی و کاهش بیشتر پایداری اکولوژیکی جلوگیری شود.

**استناد:** مددی، عقیل و پاسبان، امیرحسام (۱۴۰۵). بررسی تاثیر تغییرات کاربری اراضی بر میزان فرسایش خاک با استفاده از مدل جهانی RUSLE طی بازه زمانی ۲۰۰۴ تا ۲۰۲۴ (مطالعه موردی: حوضه آبخیز قوری چای). *جغرافیا و برنامه‌ریزی*، ۳۰ (۹۷)، ۳۹۰–۴۰۹.

http//doi.org/10.22034/gp.2026.69434.3459

ناشر: دانشگاه تبریز.

© نویسندگان.

## مقدمه

فرسایش خاک به دلیل کاهش تولید جهانی غذا به یکی از معضلات جدی زیست‌محیطی تبدیل شده است (بن‌سخریا و بوهاتا[1]، ۲۰۲۲). این پدیده منجر به از دست رفتن زمین‌های حاصلخیز شده و در نتیجه، کاهش تولیدات کشاورزی را به دنبال دارد. انتقال رسوبات نیز سبب آلودگی غیرنقطه‌ای و افت کیفیت آب می‌شود (ایجاز[2] و همکاران، ۲۰۲۳). فرسایش نه تنها محیط‌های مستعد را تحت تأثیر قرار می‌دهد، بلکه بر مناطق مجاور نیز اثرات مخرب بر جای می‌گذارد (خو[3] و همکاران، ۲۰۲۳). تخریب اکوسیستم‌ها ناشی از تغییرات کاربری اراضی، محیط‌های رودخانه‌ای را نیز دچار آسیب کرده و بقای طیف وسیعی از گونه‌ها را تهدید می‌کند (سانچز[4] و همکاران، ۲۰۲۵). دو عامل اصلی فرسایش خاک، آب و باد هستند. شدت و سرعت فرسایش تحت تأثیر عواملی همچون توپوگرافی، ویژگی‌های اقلیمی، جنگل‌زدایی، خصوصیات خاک، تغییرات کاربری اراضی و گسترش شهری ناشی از افزایش جمعیت قرار دارد (جیانگ[5] و همکاران، ۲۰۲۳). نتایج مطالعه‌ی ارزیابی جهانی تخریب خاک ناشی از فعالیت‌های انسانی (GLASOD[6]) نشان داد که در مقیاس جهانی، حدود ۵۶ درصد از اراضی (به‌استثنای مناطق سرد، مرطوب و بیابانی) در معرض فرسایش آبی و حدود ۲۸ درصد از اراضی در معرض فرسایش بادی هستند (پالیاگورو[7] و همکاران، ۲۰۲۳). همچنین به‌طور میانگین، میزان فرسایش سالانه خاک در سطح جهانی بین ۱۲ تا ۱۵ تن در هکتار در سال برآورد شده است (بوینو[8]، ۲۰۲۴). از آن‌جایی که فرسایش خاک و تخریب زمین باعث ایجاد مشکلات عمده در بسیاری از کشورها شده است، تلاش‌های زیادی برای توسعه مدل‌های فرسایش خاک صورت گرفته است. ایجاد و اجرای مدل مؤثر می‌تواند داده‌ها و اطلاعات مناسبی در مورد وضعیت فعلی و روند فرسایش و همچنین پتانسیل تجزیه و تحلیل سناریوهای مختلف مدیریت و حفاظت ارائه دهد (محمدی، کریم‌زاده و علی‌زاده، ۱۳۹۷). به همین دلیل جلوگیری و پیش فرسایش خاک و ارزیابی عوامل اصلی فرسایش در محیط اولین قدم در انتخاب روش‌ها و راهبردهای مناسب برای کنترل فرسایش خاک است (بیاتی‌خطیبی، ۱۳۹۴). مدل‌های زیادی جهت برآورد فرسایش خاک خصوصا فرسایش آبی و توسعه طرح‌های مدیریتی فرسایش خاک ارائه شده‌اند که بسیاری از این مدل‌ها نیز در نواحی مختلف ایران مورد تحقیق قرار گرفته است. از جمله مدل‌های پرکاربرد در ارزیابی فرسایش خاک می‌توان به مدل اصلاح‌شده جهانی فرسایش خاک[9] (RUSLE) اشاره کرد (رنارد[10] و همکاران، ۱۹۹۷). در واقع مدل معادله جهانی فرسایش خاک اصلاح‌شده یک مدل تجربی است که بر اساس معادله جهانی فرسایش خاک طراحی شده است. تغییرات کاربری اراضی در دو دهه اخیر، به‌ویژه در حوضه‌های آبخیز، با افزایش تبدیل اراضی طبیعی و مرتعی به کاربری‌های کشاورزی و سکونتگاهی، نقش قابل توجهی در تشدید فرسایش خاک داشته است. حوضه آبخیز قوری‌چای در استان اردبیل طی دو دهه اخیر با تغییرات چشمگیر کاربری اراضی مواجه بوده که می‌تواند الگو و شدت فرسایش خاک را به‌طور قابل توجهی دگرگون سازد. ارزیابی کمی این تغییرات با استفاده از مدل جهانی RUSLE، به‌عنوان یکی از معتبرترین و پرکاربردترین مدل‌های برآورد فرسایش خاک، امکان تحلیل دقیق اثرات تغییر کاربری بر نرخ فرسایش سالانه خاک را فراهم می‌آورد. از این رو، بررسی تغییرات کاربری اراضی و ارتباط آن با فرسایش خاک طی دو دهه گذشته در این حوضه، نه تنها به شناسایی مناطق بحرانی و پرخطر کمک می‌کند، بلکه می‌تواند مبنای تصمیم‌گیری برای مدیریت بهینه منابع طبیعی، اجرای اقدامات حفاظتی و برنامه‌ریزی‌های توسعه پایدار در استان اردبیل قرار گیرد. اگرچه مدل RUSLE و تصاویر ماهواره‌ای پیش‌تر در مطالعات فرسایش خاک ایران

1. Bensekhria and Bouhata
2. Ejaz
3. Xu
4. Sanchez
5. Jiang
6. Global Land Assessment of Soil Oegradation (GLASOD)
7. Palliyaguru
8. Bueno
9. Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)
10. Renard

به‌کار رفته‌اند، هدف این پژوهش ارائه تحلیلی یکپارچه و کمّی از تأثیر تغییرات کاربری اراضی بر شدت و توزیع مکانی فرسایش طی دو دهه گذشته (دوره زمانی ۲۰۰۴ تا ۲۰۲۴) است. در این راستا، از تصاویر Landsat-5 برای سال ۲۰۰۴، Sentinel-2 برای سال ۲۰۲۴، و داده‌های سری زمانی بارش ایستگاهی برای استخراج و محاسبه پارامترهای مدل RUSLE استفاده شد. انتخاب این دو مقطع زمانی به این دلیل صورت گرفت که محاسبه این پارامترها به داده‌هایی هم‌تراز و هم‌رزولوشن نیاز دارد و برای بسیاری از سال‌های میانی، تصاویر همسان، فاقد پوشش ابر و دارای کیفیت قابل استفاده موجود نبود. افزون بر این، تغییرات کاربری اراضی در حوضه مورد مطالعه ماهیتی کند و تدریجی دارد و استخراج نقشه فرسایش به‌صورت سالانه نه‌تنها نوسان معناداری نشان نمی‌داد، بلکه به تولید الگوهایی پراکنده و فاقد تبیین علمی منجر می‌شد. در مقابل، مقایسه بلندمدت دو طیف زمانی ۲۰ ساله امکان مشاهده تغییرات برجسته و معنادار در کاربری اراضی و پیامدهای فرسایشی آن را فراهم می‌کند و می‌تواند نقاط بحرانی حوضه را برای سیاست‌گذاران اجرایی حفاظت خاک و برنامه‌ریزی اراضی با دقت بیشتری آشکار سازد.

## پیشینه پژوهش

### مطالعات داخلی

تاکنون مطالعات زیادی در خصوص تغییرات کاربری اراضی و ارتباط آن با فرسایش خاک در داخل و خارج از کشور انجام شده است. برای مثال، غلامی و همکاران (۱۴۰۳)، در پژوهشی به بررسی تأثیر تغییر کاربری اراضی بر فرسایش خاک در حوضه آبخیز چرداول ایلام با استفاده از مدل RUSLE پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که میانگین فرسایش خاک در سال ۲۰۰۵ حدود ۱۳/۲۳ تن در هکتار در سال بوده است، در حالی که این مقدار در سال ۲۰۲۰ به ۲۰/۱۳ تن در هکتار در سال افزایش یافته است. یافته‌ها حاکی از آن است که اراضی بایر، به دلیل فقدان پوشش گیاهی، بیشترین میزان فرسایش خاک را به خود اختصاص داده‌اند. گرشاسبی و جوکار سرهنگی (۱۴۰۳)، تاثیر تغییرات کاربری اراضی و بارش بر میزان فرسایش خاک در حوضه اوارد نکارود را با استفاده از مدل جهانی فرسایش خاک مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهند که میانگین سالانه فرسایش خاک از ۱/۶۴ تن در هکتار در سال (طی سال‌های ۱۹۸۰ تا ۲۰۰۰) به ۱/۷۵ تن در هکتار در سال (طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰) افزایش یافته است. این افزایش عمدتاً به دلیل کاهش پوشش گیاهی در منطقه بوده است. همچنین، یافته‌ها حاکی از روند کاهشی در مساحت جنگل‌ها و مراتع و افزایش در مساحت جنگل‌های تخریب‌شده، زمین‌های زراعی و مناطق مسکونی است. مددی، اصغری سراسکانرود و حاجت‌پور قلعه‌رودخان (۱۴۰۳)، با هدف بررسی تغییرات کاربری اراضی بر فرسایش خاک در حوضه آبریز قلعه‌رودخان فومن را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان‌دهنده این بود که کاربری مسکونی با افزایش ۲۷/۱۷ کیلومتر مربعی از سال ۱۳۷۱ تا ۱۴۰۲ بیش‌ترین تغییر را در بازه زمانی ۳۰ ساله داشت. همچنین با توجه به نقشه پهنه‌بندی فرسایش، مساحت طبقه با پتانسیل فرسایش بسیار زیاد و زیاد از ۱۸/۰۴ و ۳۱/۰۵ درصد در سال ۱۳۷۱ به ۲۲/۵۲ و ۳۲/۳۴ درصد در سال ۱۴۰۲ افزایش پیدا کرده است. آقایاری، اصغری سراسکانرود و زینالی (۱۴۰۴)، با هدف بررسی تغییرات کاربری اراضی و اثرات آن بر فرسایش خاک در شهرستان نمین را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج این پژوهش نشان داد، بیشترین میزان مساحت در سال ۲۰۰۲ مربوط به مراتع ضعیف و زراعت دیم، به ترتیب با ۷۱/۴۹ و ۹۱/۲۰ کیلومتر مربع و در سال ۲۰۲۴، مربوط به مراتع ضعیف و مراتع دیمی به ترتیب با ۶۲/۴۲ و ۹۳/۲۷ کیلومترمربع می‌باشد. با توجه به نقشه پهنه‌بندی فرسایش سال ۲۰۰۲ به ترتیب ۱۵/۰۵ و ۲۲/۴۶ درصد و طبق پهنه‌بندی فرسایش ۲۰۲۴ به ترتیب ۱۵/۹۲ و ۲۵/۰۴ درصد از مساحت شهرستان در دو طبقهٔ بسیار پرخطر و پرخطر قرار دارند. عابدینی، پاسبان و نوری (۱۴۰۴)، ارتباط بین شاخص‌های پوشش گیاهی و مورفومتری با فرسایش خاک در حوضه آبخیز مشکین‌چای مورد بررسی قرار دادند. این پژوهش که با استفاده از مدل RUSLE صورت گرفت، نشان داد که میزان فرسایش خاک در کل حوضه در محدوده‌ای بین صفر تا ۱۰۸/۶۱ تن در هکتار در سال قرار دارد و متوسط فرسایش سالانه آن به ۵۰/۸۹ تن در هکتار در سال می‌رسد. نتایج همبستگی این مطالعه بیانگر آن است که شیب (با تأثیر ۰/۷۴)، پوشش گیاهی (با تأثیر ۰/۴۸)، توپوگرافی (با تأثیر ۰/۴۴)، و انحنای دامنه (با تأثیر ۰/۴۷) بیشترین تأثیر و همبستگی معنادار را با میزان فرسایش سالانه خاک در این منطقه داشته‌اند. زیاری و حمیدی کای (۱۴۰۴)، به تحلیل عوامل

موثر بر تغییرات کاربری اراضی در شهر ارومیه پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که منطقه مورد مطالعه طی سه دهه گذشته سال‌های ۱۹۹۳–۲۰۲۳ از ۲۶۷۶۸ هکتار از اراضی شهری ارومیه اراضی بایر ۲۸۳۸ هکتار کاهش، اراضی باغی ۵۷۶۴ هکتار کاهش، اراضی شهری (انسان ساخت) ۳۷۴۴ هکتار افزایش و اراضی کشاورزی ۲۲۰۴ هکتار افزایش یافته است و همچنین مناطق آبی به دلیل ساخت سد سیلوانا به صورت فصلی دارای آب است. همچنین سه عامل جمعیت، ثروت، پیشرفت فناوری اصلی‌ترین عوامل تغییرات کاربری اراضی شهری ارومیه شناخته شدند. برابریان و محسنی (۱۴۰۴) مدلسازی فرسایش خاک را با استفاده از مدل RUSLE مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که در مقیاس زمانی ۲۰ ساله حدود ۹۰ درصد از مساحت منطقه در کلاس فرسایشی شدید با مقدار ۲۰ تا ۴۰ تن در هکتار در سال قرار دارد. کلاس‌های فرسایشی با مقدار هدررفت خاک کمتر از ۱۰ تا ۲۰ تن در هکتار در سال حدود ۸ درصد از مساحت منطقه را پوشش می‌دهند.

## مطالعات خارجی

خو و همکاران (۲۰۲۳)، با بهره‌گیری از مدل RUSLE فرسایش خاک را از سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۰ ارزیابی و روند پیش‌بینی آن را برای سال‌های ۲۰۳۰ تا ۲۰۵۰ انجام دادند. نتایج نشان داد فرسایش خاک فرسایش خاک با نوساناتی روبه‌رشد همراه بوده و پوشش گیاهی عامل اصلی تأثیرگذار بر میزان آن است. همچنین، بخش شرقی منطقه مورد مطالعه به عنوان آسیب‌پذیرترین ناحیه در برابر فرسایش شناخته شد. مرچان و همکاران (۲۰۲۳)، با استفاده از مدل RUSLE و سیستم اطلاعات جغرافیایی به مطالعه فرسایش خاک در حوضه آبریز اریباس دل دوروه پرداختند. یافته‌های این تحقیق نشان داد که مناطقی با شیب تند، خاک‌های سست و پوشش گیاهی اندک، بیشترین میزان فرسایش را تجربه کرده‌اند، به طوری که این فرسایش در برخی نواحی به بیش از ۲۰۰ تن در هکتار در سال می‌رسد. جیس[1] و همکاران (۲۰۲۵) مدل‌سازی فرسایش خاک را با استفاده از مدل RUSLE در حوضه نیبار در کشور هند مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که فرسایش سالانه خاک بین ۰ تا ۸۴۰ تن در هکتار در سال متغیر است. در پژوهشی دیگر سانچز و همکاران (۲۰۲۵) تاثیر کاربری اراضی بر فرسایش خاک را با استفاده از مدل جهانی RUSLE در منطقه نشویای در کشور پرو مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که میانگین فرسایش خاک در زیرحوضه نِشویای پرو طی سال‌های ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۲ از ۳/۸۷ به ۴/۵۵ تن در هکتار در سال افزایش یافته و ۷/۶۵ درصد از مساحت منطقه از حد تحمل فرسایش خاک فراتر رفته است. همچنین، تغییر کاربری اراضی از جنگل به زمین‌های کشاورزی بیشترین نقش را در تشدید فرسایش داشته است.

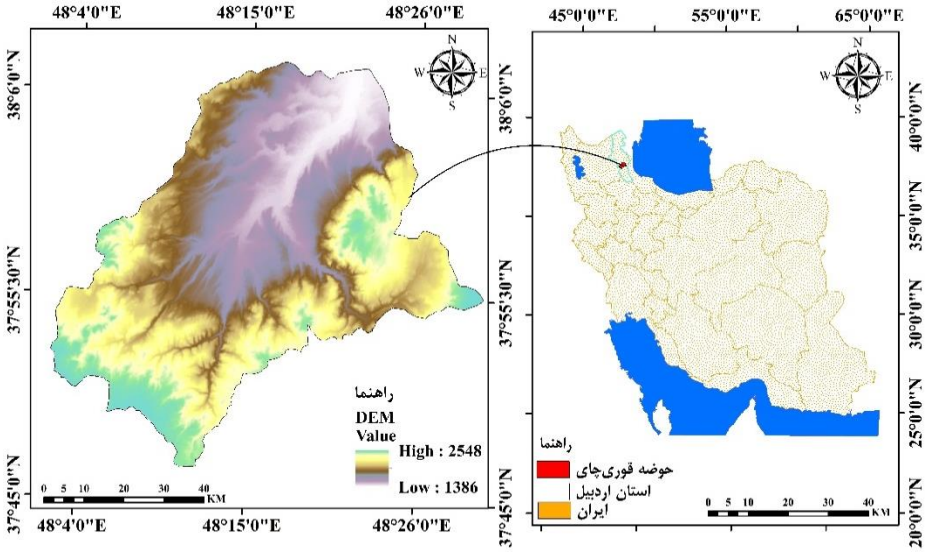
با توجه به مطالعات انجام شده در داخل و خارج کشور می‌توان چنین بیان کرد تغییرات کاربری اراضی و کاهش پوشش گیاهی نقش تعیین‌کننده‌ای در افزایش میزان فرسایش خاک دارند. در بسیاری از حوضه‌های آبخیز ایران، مانند چرداول، اوارد نکارود، قلعه‌رودخان، نمین و مشکین‌چای، افزایش سطح اراضی کشاورزی، مسکونی و بایر، همراه با کاهش مراتع و جنگل‌ها، منجر به رشد محسوس فرسایش خاک در طول دهه‌های اخیر شده است. همچنین، تحلیل شاخص‌های مورفومتری و پوشش گیاهی نشان می‌دهد که عواملی مانند شیب، توپوگرافی و انحنای دامنه، همبستگی قابل توجهی با شدت فرسایش دارند. مطالعات خارجی نیز روند مشابهی را تأیید می‌کنند؛ مناطق با شیب تند، خاک‌های سست و پوشش گیاهی اندک بیشترین میزان فرسایش را تجربه کرده‌اند و تغییر کاربری از جنگل به زمین‌های کشاورزی، اثر مستقیمی بر افزایش فرسایش دارد. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که تغییرات کاربری اراضی و کاهش پوشش گیاهی، به‌ویژه در نواحی با شیب و توپوگرافی نامطلوب، عامل اصلی تشدید فرسایش خاک هستند و مدیریت بهینه اراضی و حفظ پوشش گیاهی، کلید کاهش آسیب‌های فرسایشی محسوب می‌شود.

1. Jess

## روش پژوهش

### منطقه مورد مطالعه

حوضه آبخیز قوری‌چای در استان اردبیل قرار دارد و بخش‌هایی از شهرستان‌های نیر، اردبیل و کوثر را دربرمی‌گیرد. بخش عمده این حوضه در محدوده شهرستان نیر واقع شده است. از نظر موقعیت جغرافیایی، این حوضه بین طول‌های شرقی ۴۸ درجه و ۲ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۳۱ دقیقه و عرض‌های شمالی ۳۷ درجه و ۴۶ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۱۱ دقیقه قرار گرفته است. وسعت حوضه حدود ۸۰۳ کیلومتر مربع است. رودخانه قوری‌چای به عنوان آبراهه اصلی حوضه، از دامنه‌های شمال‌شرقی رشته‌کوه بزقوش (در منطقه گچی‌قیران) و از ارتفاعی حدود ۲۵۰۰ متر از سطح دریا سرچشمه می‌گیرد (مددی و همکاران، ۱۳۹۹).




**شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه**

### داده‌ها و روش‌ها

برای برآورد و تحلیل میزان فرسایش خاک در حوضه آبخیز قوری‌چای واقع در استان اردبیل، از مدل جهانی فرسایش خاک اصلاح‌شده (RUSLE) استفاده شد. انتخاب این مدل به دلیل ماهیت نیمه‌تجربی، سهولت اجرا، نیاز محدود به داده‌های ورودی و قابلیت انطباق در شرایط متنوع اقلیمی و جغرافیایی انجام گرفت. مدل RUSLE بر اساس شش عامل اصلی شامل فرسایندگی باران(R)، فرسایش‌پذیری خاک(K)، عامل طول و درجه شیب (LS)، عامل پوشش گیاهی (C) و اقدامات مدیریتی (P) عمل می‌کند. داده‌های مورد استفاده در این پژوهش شامل تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-2 برای سال ۲۰۲۴ به‌منظور استخراج نقشه پوشش گیاهی، مدل رقومی ارتفاعی ALOS PALSAR با قدرت تفکیک ۱۲/۵ متر جهت محاسبه پارامترهای توپوگرافی، آمار بارندگی ماهانه و سالانه اخذشده از سازمان هواشناسی کشور و نقشه بافت خاک ایران با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰ بود. پردازش و تولید لایه‌های اطلاعاتی در محیط ArcGIS 10.8 و سامانه Google Earth Engine انجام شد و تحلیل‌های تکمیلی با استفاده از نرم‌افزارهای SPSS و Excel صورت گرفت. علاوه بر این، به‌منظور بررسی نقش تغییرات کاربری اراضی در شدت و الگوی مکانی فرسایش خاک، نقشه‌های کاربری برای سال‌های ۲۰۰۴ و ۲۰۲۴ در محیط گوگل ارث انجین ابتدا تصاویر ماهواره‌ای مربوط به هر سال از سنجنده‌های TM لندست ۵ برای سال ۲۰۰۴ و سنتینل ۲ برای سال ۲۰۲۴ انتخاب سپس با استفاده از نمونه‌های آموزشی برداشت‌شده با استفاده از الگوریتم طبقه‌بندی نظارت‌شده جنگل تصادفی در محیط GEE اجرا شد و طبقه‌بندی نهایی کاربری اراضی در قالب کلاس‌های اصلی شامل اراضی زراعی، مرتع، مناطق مسکونی، مناطق آبی، جنگل، و مناطق بایر تهیه گردید. در نهایت، برای ارزیابی دقت نقشه‌ها از شاخص ضریب کاپا استفاده شد تا صحت و قابلیت اعتماد نتایج

بررسی گردد. مقایسه این نقشه‌ها امکان شناسایی تغییرات کاربری در بازه زمانی مورد مطالعه را فراهم ساخت و نقش آن‌ها در تغییر شدت فرسایش خاک مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج این بخش از پژوهش شرایطی را فراهم می‌سازد تا ارتباط میان کاربری‌ها و افزایش یا کاهش مقادیر فرسایش شناسایی شود و بدین ترتیب مناطق بحرانی که بیشترین تغییر در میزان فرسایش را تجربه کرده‌اند، مشخص گردند.

برای اطمینان از صحت و اعتبار لایه‌های ورودی مدل RUSLE، تمامی فاکتورها به‌صورت جداگانه بررسی و صحت‌سنجی شدند. لایه فرسایندگی باران (R) با استفاده از داده‌های ۲۰ ساله بارانسنجی ایستگاه‌های داخل و اطراف حوضه تولید شد و با اجرای اعتبارسنجی متقاطع در مرحله درون‌یابی، خطای فضایی (RMSE) و پایداری مکانی مقادیر کنترل گردید. عامل فرسایندگی خاک (K) از ترکیب نقشه بافت خاک ایران، جداول مورگان و نقشه FAO استخراج شد و با مقایسه تطبیقی میان طبقات بافتی و مقادیر استاندارد، صحت تخصیص مقادیر K تأیید شد. در مورد عامل توپوگرافی به‌دلیل احتمال وجود خطاهای راداری و آرتیفکت‌ها درDEM سنجنده ALOS PALSAR با تفکیک ۱۲/۵ متر (نظیر خطاهای ارتفاعی، چاله‌های مصنوعی و نویز نواری)، پیش‌پردازش کامل شامل پر کردن چاله‌ها، هموارسازی ملایم، حذف نویز و بازبینی دستی انجام شد. سپس مقادیر شیب، جهت جریان و نقاط ارتفاعی DEM با داده‌های Google Earth مقایسه شد تا از همخوانی ارتفاعات و حذف شیب‌های غیرواقعی اطمینان حاصل گردد و اعتبار نهایی LS تضمین شود. لایه C نیز بر اساس طبقات استخراج‌شده از تصاویر ماهواره‌ای تهیه شد و با بررسی تطبیقی باGoogle Earth و نقشه‌های موجود کنترل گردید تا مقادیر C با وضعیت واقعی پوشش منطقه سازگار باشد. در خصوص عامل Pبا توجه به منابع معتبر RUSLE و گزارش‌های منطقه‌ای، در شرایطی که هیچ‌گونه عملیات حفاظتی (نوارکشی، کشت روی خطوط تراز، کشت نواری، مالچ، سازه‌های کنترل فرسایش و...) در حوضه وجود نداشته باشد، مقدار P برای کل منطقه برابر ۱ در نظر گرفته می‌شود. در نتیجه این عامل از نظر فضایی ثابت بوده و به‌صورت منطقی از فرمول به‌عنوان یک ضریب خنثی حذف می‌شود. این تعیین مقدار P بر اساس اصول مدل RUSLE و سازگاری کامل با وضعیت واقعی حوضه انجام شده و به همین دلیل به اعتبار علمی نتایج آسیبی وارد نمی‌کند. مجموعه این اقدامات نشان می‌دهد که لایه‌های R، K، LS و C با کنترل صحت مکانی، منابع معتبر و تطابق با داده‌های مرجع تولید شده‌اند و عامل P نیز بر اساس مستندات علمی و وضعیت واقعی منطقه صحیح انتخاب شده است.

## نقشه کاربری اراضی

در این پژوهش به‌منظور تهیه نقشه کاربری اراضی، از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۵ (TM) مربوط به سال ۲۰۰۴ و تصاویر سنتینل ۲ مربوط به سال ۲۰۲۴ استفاده گردید. انتخاب این داده‌ها به دلیل دسترسی رایگان، پوشش گسترده، و قابلیت مقایسه بین‌دوره‌ای آن‌ها صورت گرفت. در این راستا فرایند پردازش داده‌ها در محیط سامانه گوگل ارث انجین (GEE) و با استفاده از الگوریتم طبقه‌بندی جنگل تصادفی انجام شد. این پلتفرم به دلیل توان پردازشی بالا، دسترسی آسان به آرشیو کامل داده‌های ماهواره‌ای و ابزارهای تحلیل مکانی، بستر مناسبی برای انجام چنین مطالعاتی فراهم می‌آورد. از آنجا که تصاویر موجود در GEE به‌صورت پیش‌پردازش‌شده و در قالب بازتاب زمینی ارائه می‌شوند، نیازی به اعمال تصحیحات اتمسفری مجدد وجود ندارد. این ویژگی علاوه بر کاهش زمان و هزینه پردازش، موجب ارتقای کیفیت داده‌ها و فراهم‌سازی امکان استخراج دقیق‌تر عوارض و تغییرات کاربری اراضی می‌شود (محمدی، ابراهیمی و بذرافشان، ۱۴۰۲).

## روش طبقه‌بندی جنگل تصادفی[1]

الگوریتم جنگل تصادفی در حال حاضر یکی از کارآمدترین و پرکاربردترین روش‌های یادگیری ماشین به‌شمار می‌رود و در سال‌های اخیر استفاده گسترده‌ای در زمینه طبقه‌بندی تصاویر سنجش از دور یافته است. این الگوریتم در زمره روش‌های یادگیری ناپارامتری قرار می‌گیرد و بر پایه مجموعه‌ای از درخت‌های تصمیم عمل می‌کند (محمدی، ابراهیمی و بذرافشان،

1. Random Forest (RF)

۱۴۰۲). به بیان دیگر، در فرآیند اجرای جنگل تصادفی تعداد زیادی درخت تصمیم رشد داده می‌شود که هر یک بر اساس یک زیرمجموعه تصادفی از داده‌های آموزشی و ویژگی‌های ورودی ساخته می‌شوند. هر درخت تصمیم به‌طور مستقل آموزش می‌بیند و در مرحله طبقه‌بندی، برای هر نمونه ورودی یک رأی واحد به کلاس پیشنهادی خود اختصاص می‌دهد. در نهایت، الگوریتم با ترکیب نتایج و رأی‌گیری میان درخت‌ها، نمونه ورودی را در کلاسی قرار می‌دهد که بیشترین رأی را به‌دست آورده باشد. این فرآیند علاوه بر افزایش دقت طبقه‌بندی، منجر به کاهش بیش‌برازش و بهبود توانایی تعمیم الگوریتم می‌شود (جینسن[1]، ۲۰۱۵). یکی از نقاط قوت اصلی جنگل تصادفی، توانایی آن در پردازش داده‌های پیچیده با تعداد ویژگی‌های زیاد و مدیریت داده‌های نویزی است. همین ویژگی‌ها موجب شده است که این الگوریتم به‌عنوان یکی از بهترین گزینه‌ها در تحلیل داده‌های سنجش از دور و تهیه نقشه‌های کاربری و پوشش اراضی معرفی شود. در این پژوهش، فرآیند طبقه‌بندی کاربری اراضی به‌طور کامل با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی در محیط سامانه گوگل ارث انجین انجام شد. در این محیط، ابتدا تصاویر ماهواره‌ای پردازش و شاخص‌های مربوط به پوشش زمین استخراج می‌شوند، سپس نمونه‌های آموزشی برای هر کلاس کاربری تعیین شده و الگوریتم جنگل تصادفی با استفاده از این داده‌ها مدل خود را آموزش می‌دهد. در نهایت، مدل آموزش‌دیده، تمام پیکسل‌های تصویر را به کلاس‌های کاربری مشخص طبقه‌بندی می‌کند.

## ارزیابی صحت نقشه‌های کاربری اراضی

در این پژوهش، به‌منظور ارزیابی صحت و دقت نقشه‌های تولیدشده، از ضریب کاپا و صحت کلی استفاده شد. این شاخص‌ها به‌عنوان معیارهای استاندارد و مناسب برای سنجش دقت طبقه‌بندی تصاویر مطرح هستند. پس از انجام طبقه‌بندی با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی، مقادیر ضریب کاپا و صحت کلی برای ارزیابی دقت طبقه‌بندی محاسبه گردید. صحت کلی، که به‌عنوان شاخصی برای ارزش‌گذاری دقت طبقه‌بندی به‌کار می‌رود، از نسبت جمع عناصر قطر اصلی ماتریس خطا به تعداد کل پیکسل‌ها و با رابطه (۱) محاسبه می‌شود (باسکولا[2] و همکاران، ۲۰۱۷).

رابطه ۱)
$$OA = \frac{\sum_{K}^{N} = 1 N_{k k}}{n} \times 100$$

در این رابطه OA صحت کلی، $\sum_{K}^{N} = 1 N_{k k}$ مجموع پیکسل‌های درست طبقه‌بندی‌شده و n کل پیکسل‌های طبقه‌بندی‌شده می‌باشد.

با توجه به این‌که برای نهایی نمودن نقشه کاربری اراضی، باید همه شاخص‌های دقت طبقه‌بندی با یک و یا چند شاخص آماری معتبر برازش داده شود. شاخص کاپا از جمله روش‌های آماری می‌باشد که با رابطه (۲) قابل بیان است (چی[3] و همکاران، ۲۰۲۲).

رابطه ۲)
$$K = \frac{N \sum_{i=1}^{r} Xii - \sum_{i=1}^{r} (Xio \times Xoi)}{N^2 - \sum_{i=1}^{r} (Xio \times Xoi)}$$

در این رابط K شاخص کاپا، r تعداد ردیف ماتریس طبقه‌بندی، Xii تعداد مشاهدات در ردیف و ستون (محور اصلی ماتریس)، Xio مجموع مشاهدات در ردیف (مجموع ردیف برای هر کاربری)، Xoi مجموع مشاهدات در ستون (مجموع ستون برای هر کاربری) و N مجموع کل مشاهدات ماتریس طبقه‌بندی می‌باشد. دامنه کاپا بین صفر و یک متغیر می باشد که عدد یک نشان دهنده همسویی صددرصد نقشه طبقه‌بندی شده با واقعیت زمینی است. در محاسبه ضریب کاپا علاوه بر پیکسل‌هایی که درست

1. Jensen
2. Basukala
3. Chi

طبقه‌بندی‌شده‌اند پیکسل‌هایی که نادرست طبقه‌بندی‌شده‌اند نیز دخالت داده می‌شوند، ازاین‌رو معیار مناسبی برای مقایسه نتایج طبقه‌بندی‌های مختلف می‌باشد (ویانا[1] و همکاران، ۲۰۱۹).

## مدل RUSLE

در این پژوهش جهت برآورد میانگین سالانه فرسایش خاک از مدل RUSLE استفاده شد. مدل RUSLE تابعی از شش فاکتور ورودی فرسایندگی باران (R)، فرسایش پذیری خاک (K)، طول و درجه شیب (LS)، مدیریت پوشش گیاهی (C) و عملیات حفاظتی (P) است.

حساسیت خاک به فرسایش، تابعی از خصوصیات خاک است و تغییر خصوصیات خاک با کاربری اراضی و توپوگرافی در ارتباط است. فرسایش خاک بر اساس مدل RUSLE با استفاده از رابطه (۳) زیر محاسبه می‌شود (ویشمایر و اسمیت[2]، ۱۹۷۸).

$$A=R.K.LS.C.P$$ رابطه ۳)

در این رابطه A میانگین فرسایش خاک در واحد سطح (تن در هکتار در سال)، R فاکتور فرسایندگی باران ($mm\ h^{-1}\ y^{-1}\ h^{-}$[1])، K فاکتور فرسایش پذیری خاک ($t\ h\ MJ^{-1}\ mm^{-1}$)، LS فاکتور توپوگرافی، C فاکتور پوشش گیاهی و P فاکتور عملیات حفاظتی خاک می‌باشد. LS و C و P بدون واحد می باشند.

## عامل فرسایندگی باران (R)

فرسایندگی باران به‌صورت قدرت تراکمی باران در بروز فرسایش تعریف می‌شود که معمول‌ترین شاخص فرسایندگی باران، فاکتور R مربوط به مدل RUSLE می‌باشد. بررسی مقالات علمی نشان می‌دهد، در بسیاری از نقاط دنیا، فاکتور R همبستگی بالایی با فرسایش خاک دارد (آرخی و نیازی، ۱۳۸۹؛ ویشمایر و اسمیت، ۱۹۷۸). فاکتور R برای دوره‌های مختلف، از حاصل‌ضرب انرژی جنبشی باران (E) در حداکثر شدت بارش ۳۰ دقیقه‌ای (I30) به دست می‌آید. ازآنجایی‌که نمودار بارندگی و داده‌های تفصیلی رگبار (شدت بارندگی) به‌ندرت در ایستگاه‌های هواشناسی موجود می‌باشند، اغلب از مقادیر متوسط بارندگی ماهیانه و سالیانه، جهت برآورد فاکتور R در مدل RUSLE استفاده می‌شود (رنارد و فریدموند[3]، ۱۹۹۴). در این پژوهش نیز برای محاسبه فاکتور R، بعد از تعیین ایستگاه‌های شاخص در منطقه موردمطالعه، بارندگی ماهیانه و سالیانه در این ایستگاه‌ها و در دوره‌های زمانی موردمطالعه بازسازی گردید. در مرحله بعد با استفاده از معادله‌های (۴، ۵ و ۶) شاخص فورنیر برای تمام ایستگاه‌ها محاسبه شد.

$$MFI=\sum^{12}_{i=1} Pi^2/P$$ رابطه ۴)

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

$$R=0.07397\times MFI^{1.847} MFI<55mm$$ رابطه ۵)

$$R=(95.77-6.081\times F+0.4770\times MFI^2)/1\ MFI\geq 55mm$$ رابطه ۶)

در این رابطه R متوسط فرسایندگی بر حسب $Mj.mm.ha^{-1}.h^{-1}.month^{-1}$ برای دوره آماری، n تعداد سال های آماری، mj تعداد حوادث فرساینده برای ماه j و EL30 میزان فرسایندگی باران برای رخداد K است. فرسایندگی باران برای هر رخداد بارش

1. Viana
2. Wischmeier and Smith
3. Renard and Freidmund

به دست می‌آید. پس از محاسبه عامل R در ایستگاه‌های مورد مطالعه، تغییرات مکانی آن با استفاده از روش درون‌یابی عکس فاصله وزنی (IDW[1]) مورد بررسی و نقشه تغییرات مکانی عامل R تهیه می‌گردد.

## عامل فرسایش‌پذیری خاک (K)

برای برآورد ضریب فرسایش‌پذیری خاک (K) در این پژوهش، ابتدا از نقشه بافت خاک ۱:۲۵۰۰۰۰ ایران استفاده شد و منطقه مورد مطالعه از آن برش داده شد تا توزیع فضایی کلاس‌های خاک در حوضه مشخص گردد. کلاس‌های خاک شامل لوم، رسی-لوم و ماسه‌لوم بودند و مقادیر K بر اساس جدول پیشنهادی مورگان و سایر منابع معتبر بین‌المللی، که در مطالعات داخلی متعدد نیز به کار گرفته شده‌اند، تعیین شد. سپس در محیط GIS، هر واحد بافت خاک شناسایی و مقادیر متناظر K به آن اختصاص داده شد و با استفاده از ابزارهای رستری، نقشه نهایی عامل فرسایش‌پذیری خاک تولید گردید. اعتبار این لایه با توجه به تطابق آن با داده‌های توصیفی منطقه و کاربرد گسترده آن در مطالعات مشابه (احمدی، ۱۳۸۸؛ عابدینی و پاسبان؛ ۱۴۰۳؛ مددی و همکاران؛ ۱۴۰۱). روش مناسبی برای برآورد K در سطح حوضه به شمار می‌رود و می‌تواند به طور مستقیم در مدل RUSLE مورد استفاده قرار گیرد.

**جدول ۱. ضریب فرسایش پذیری خاک (K)** (منبع: احمدی، ۱۳۸۸)

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

## عامل طول و درجه شیب (LS)

فاکتورهای S و L در مدل RUSLE بیانگر تأثیر توپوگرافی بر فرسایش خاک هستند. ثابت شده است که افزایش طول شیب و درجه شیب می‌تواند سرعت جریان سطحی آب را افزایش دهد و در نتیجه فرسایش خاک را تشدید کند. بنابراین، در این پژوهش با بهره‌گیری مدل رقومی ارتفاعی ۱۲/۵ متر در محیط ArcGIS و ابزار ArcHydro، تحلیل‌های مربوط به ویژگی‌های فیزیکی حوضه از جمله طول شیب استخراج شد. همچنین، نقشه درجه شیب و تجمیع جریان نیز از همین داده ارتفاعی تهیه و در بخش تحلیل مکانی مورد استفاده قرار گرفت. به‌طور کلی، می‌توان دو عامل طول شیب و درجه شیب را در قالب یک شاخص ترکیبی در نظر گرفت که با نماد LS نشان داده می‌شود و با استفاده از رابطه (۷) به دست می‌آید (محمدی، کریم‌زاده و علی‌زاده، ۱۳۹۷).

$$LS=[(\text{Flow accumulation grid}) \times (\text{cell size}/22.13)]^{0.4} \times [\text{Sin}(\text{slope grid} \times 0.01745)/0.0896]^{1.3}$$ رابطه ۷)

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

## عامل پوشش گیاهی (C)

فاکتور پوشش گیاهی بیانگر نسبت مقدار خاک از بین رفته از زمین زیرکشت، به خاک فرسوده شده از همان قطعه زمین در طی آیش مداوم و عاری از پوشش یا بقایای گیاهی می‌باشد (ویشمایر و اسمیت، ۱۹۷۸). مقدار عامل پوشش گیاهی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۵ TM برای سال ۲۰۰۴ و سنیتل ۲ برای سال ۲۰۲۴ و با کاربرد رابطه (۸) محاسبه می‌شود.

1. Inverse distance weighting (IDW)

$$C=\exp(-\alpha\ NDVI/\beta\text{-}NDVI)$$ رابطه ۸)

که در آن NDVI شاخص تفاوت پوشش گیاهی نرمال شده α-2 وβ-1 پارامترهایی هستند که شکل رابطه منحنی بین NDVI و C را مشخص می‌کنند.

### عامل عملیات حفاظتی خاک (P)

در مدل RUSLE عامل P نشان‌دهنده هدررفت خاک در شرایط اجرای عملیات حفاظتی (کشت روی خطوط تراز، کشت نواری، تراس‌بندی و زهکشی زیرسطحی) نسبت به هدررفت خاک تحت زراعت شخم در جهت شیب است این عملیات حفاظتی به دلیل تأثیر بر سرعت رواناب، زمان تمرکز و نیروی هیدرولیکی رواناب بر خاک سبب کاهش فرسایش می‌شوند و ارزش عددی این عامل از صفر (نشان‌دهنده عملیات حفاظتی کامل) تا یک (بدون عملیات حفاظتی) متغیر است. همچنین در صورتی‌که عملیات اصلاحی و مدیریتی در منطقه مورد مطالعه‌ای صورت نگرفته باشد یعنی کشت و کار در امتداد ردیف‌های شیب باشد ارزش P برای کل حوضه ۱ در نظر گرفته می‌شود (ویشمایر و اسمیت، ۱۹۷۸؛ بیاتی خطیبی و همکاران، ۱۳۹۱). بنابراین در این پژوهش به‌دلیل عدم اجرای عملیات حفاظتی خاک در حوضه مورد مطالعه عدد ۱ برای کل حوضه در نظر گرفته شد.

### تلفیق لایه‌ها و تهیه نقشه فرسایش خاک

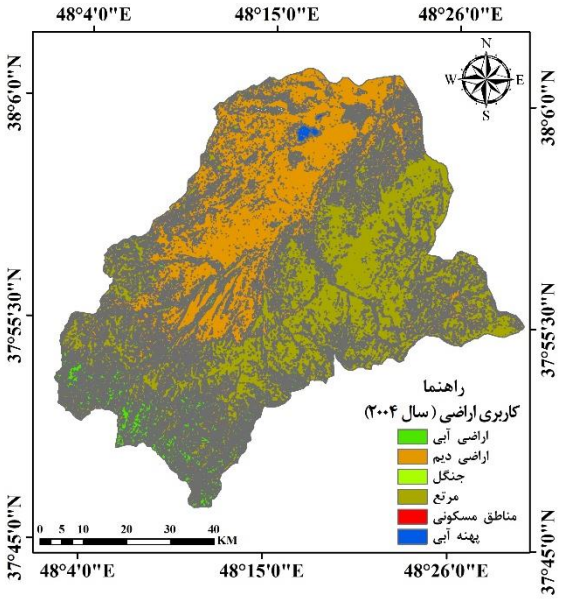
پس از تهیه لایه‌ها و طبقه‌بندی هرکدام از آن‌ها مطابق شرایط منطقه و دامنه اعداد به‌دست‌آمده، نقشه نهایی فرسایش خاک با هم‌پوشانی لایه‌های مذکور تهیه و به کلاس‌های مختلف فرسایش طبقه‌بندی می‌شوند. آماده‌سازی و تهیه لایه‌های اطلاعاتی مورد نیاز به صورت رستری باید باشند. از این‌رو مقدار هدررفت سالیانه خاک از طریق حاصل ضرب عامل‌های مدل RUSLE با توجه به رابطه ۳ و با استفاده از توابع Spatial Analyst و گزینه Raster Calculator در محیط ArcGIS برای سال‌های ۲۰۰۴ و ۲۰۲۴ بر حسب تن بر هکتار در سال محاسبه شد.

## نتایج

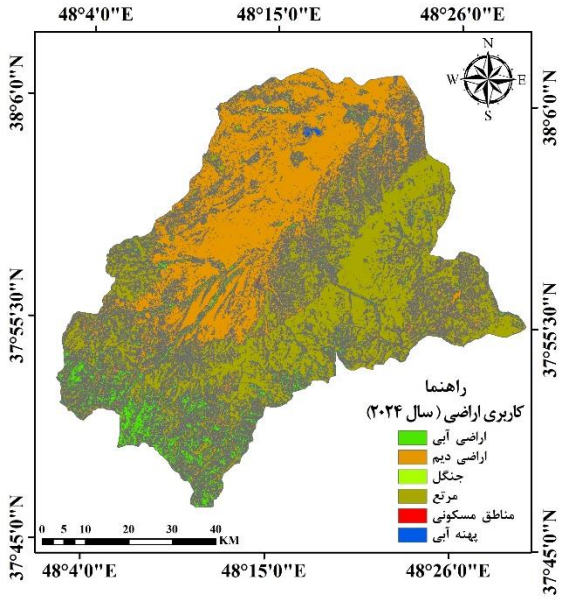
### تحلیل نقشه‌های کاربری اراضی سال‌های ۲۰۰۴ و ۲۰۲۴

در این پژوهش به‌منظور تحلیل تغییرات کاربری اراضی حوضه آبخیز قوری‌چای طی بازه زمانی بیست‌ساله (۲۰۰۴–۲۰۲۴)، تصاویر لندست ۵ TM و سنتینل-۲ به‌ترتیب برای سال‌های ۲۰۰۴ و ۲۰۲۴ به‌کار گرفته شدند و طبقه‌بندی نظارت‌شده با الگوریتم جنگل تصادفی در محیط گوگل ارث انجین اجرا گردید. از این‌رو کاربری‌های اراضی در قالب شش کلاس شامل اراضی دیم، اراضی آبی، مرتع، جنگل، مناطق مسکونی و پهنه‌های آبی مورد تفکیک قرار گرفتند که هر یک بیانگر بخش مهمی از ساختار اکولوژیکی و کارکردی حوضه هستند. نتایج ارزیابی دقت نشان داد که نقشه‌های کاربری اراضی حاصل از قابلیت اطمینان بالایی برخوردارند، به‌طوری‌که ضریب کاپا و دقت کلی برای سال ۲۰۰۴ به‌ترتیب ۰/۹۷ و ۹۸ درصد و برای سال ۲۰۲۴ برابر با ۰/۹۶ و ۹۴ درصد برآورد شد. مقایسه نتایج دو دوره نشان داد که طی بازه زمانی بیست‌ساله، تحولات قابل توجهی در الگوی کاربری اراضی رخ داده است. در این میان، اراضی دیم با افزایش ۱۰۰۵ هکتار و اراضی آبی با افزایش ۲۹۲ هکتار رشد قابل توجهی داشته‌اند که می‌توان آن را ناشی از توسعه فعالیت‌های کشاورزی و تغییر اولویت‌های اقتصادی منطقه دانست. به موازات این تغییرات، مناطق مسکونی نیز با رشد ۱۰۵ هکتاری گسترش یافته‌اند که نشانگر روند رو به رشد جمعیت و توسعه فضاهای انسانی است. در مقابل، کاربری‌های طبیعی شامل مراتع و جنگل‌ها به ترتیب با کاهش ۱۱۸۶ و ۱۱۹ هکتاری مواجه شده‌اند. کاهش این دو کاربری نشان‌دهنده فشار انسانی بر منابع طبیعی و تخریب تدریجی اکوسیستم‌های منطقه است که پیامدهایی چون تشدید فرسایش خاک، کاهش نفوذپذیری و افزایش رواناب سطحی را در پی خواهد داشت. همچنین پهنه‌های آبی با کاهش ۹۷ هکتاری روبه‌رو شدند که می‌تواند در ارتباط با تغییرات اقلیمی، افت بارش‌های مؤثر، برداشت بیش از حد منابع آب و

یا فرآیندهای رسوب‌گذاری باشد. برآیند این تغییرات مؤید آن است که روند تبدیل کاربری‌های طبیعی به کاربری‌های انسانی، پایداری محیطی منطقه را به‌طور جدی تحت تأثیر قرار داده و منجر به کاهش خدمات اکوسیستمی و تشدید فرآیندهای تخریبی شده است. در شکل (۲ و ۳) و جدول (۲) به‌ترتیب نقشه‌های کاربری اراضی و میزان تغییرات کاربری اراضی بین سال‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۲۴ حوضه آبخیز قوری‌چای ارائه شده است.




**شکل ۲. نقشه کاربری اراضی سال ۲۰۰٤ حوضه آبخیز قوری‌چای**




**شکل ۳. نقشه کاربری اراضی سال ۲۰۲٤ حوضه آبخیز قوری‌چای**

**جدول ۲. میزان تغییرات کاربری اراضی بین سال‌های ۲۰۰٤ تا ۲۰۲٤ حوضه آبخیز قوری‌چای**

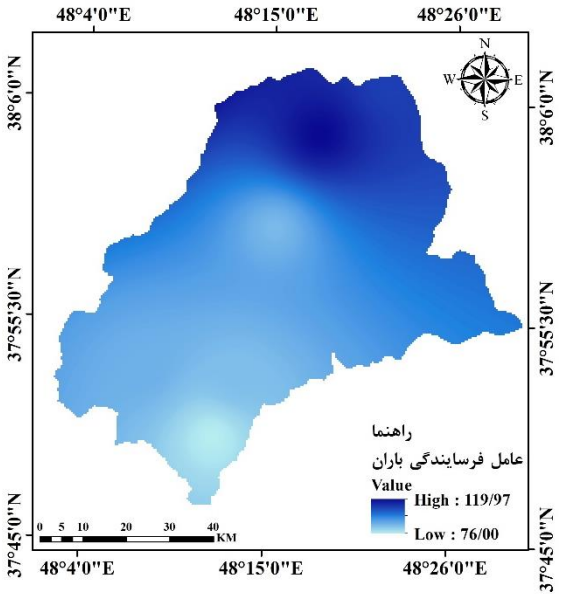
| کاربری‌ها | مساحت (هکتار) سال ۲۰۰۴ | مساحت (هکتار) سال ۲۰۲۴ | میزان تغییرات (هکتار) | روند تغییرات |
|---|---|---|---|---|
| اراضی دیم | ۳۴۰۶۶ | ۳۵۰۷۱ | ۱۰۰۵ | افزایشی |
| اراضی آبی | ۹۰۱۴ | ۹۳۰۶ | ۲۹۲ | افزایشی |
| مرتع | ۳۶۳۴۰ | ۳۵۱۵۴ | ۱۱۸۶ | کاهشی |
| جنگل | ۵۲۵ | ۴۰۶ | ۱۱۹ | کاهشی |
| مناطق مسکونی | ۱۳۰ | ۲۳۵ | ۱۰۵ | افزایشی |
| پهنه آبی | ۱۷۵ | ۷۸ | ۹۷ | کاهشی |

## تحلیل عوامل مدل جهانی فرسایش خاک اصلاح‌شده RUSLE

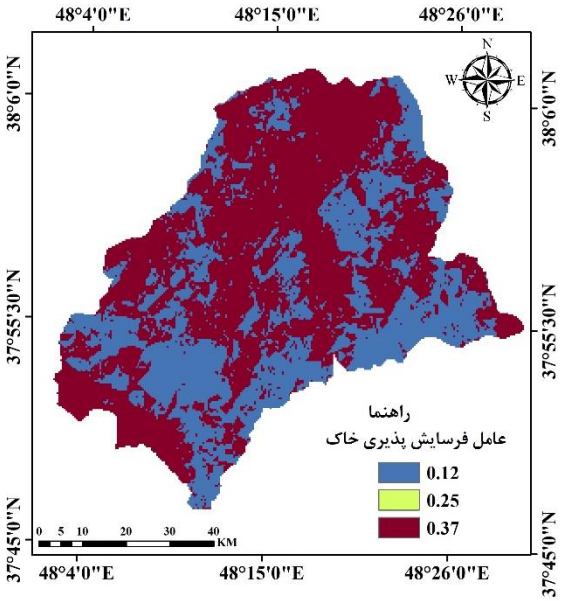
جهت محاسبه عامل فرسایندگی باران (R)، آمار بارش ماهانه و سالانه ۲۰ ساله ایستگاه‌های باران سنجی مورد استفاده قرار گرفت. سپس با استفاده از شاخص اصلاح شده فورنیه مقادیر فرسایندگی باران مورد محاسبه قرار گرفت. با انتقال این اعداد به محیط برنامه ArcGIS و اعمال درون‌یابی به روش IDW نقشه رستری ۳۰ متری تغییرات مکانی (R) تهیه شد که در شکل (۴) ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود مقدار R از ۷۶ تا ۱۱۹/۹۷ (مگاژول بر میلی متر بر هکتار در سال) متغیر است که بیش‌ترین مقدار آن مربوط به قسمت‌های شمالی و کم‌ترین آن مربوط به قسمت‌های مرکزی و جنوب حوضه است. در شکل (۵)، عامل فرسایش‌پذیری خاک (K) ارائه شده است که جهت تهیه این عامل نیز از جدول (۱) و نقشه بافت خاک ایران با مقیاس

۱:۲۵۰۰۰۰ بهره گرفته شد. در گام بعد نقشه رستری ۳۰ متری عامل فرسایش‌پذیری خاک تهیه شد. براساس نتایج به‌دست آمده مقدار K در سه طبقه ۰/۱۲، ۰/۲۵ و ۰/۳۷ متغیر است. نقشه عامل پوشش گیاهی (C) نیز با استفاده از شاخص NDVI برای سال ۲۰۰۴ و ۲۰۲۴ مورد محاسبه قرار گرفت. همان‌گونه که در شکل (۶) و (۷) مشاهده می‌شود عامل C برای سال ۲۰۰۴ بین ۰/۱۵ تا ۰/۵۱ و برای سال ۲۰۲۴ در دامنه بین ۰/۱۵۷ تا ۰/۵۱۷ متغیر است.

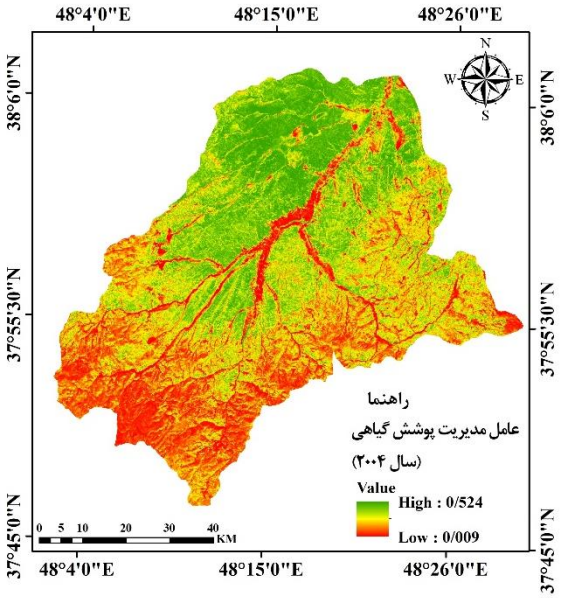
به‌منظور برآورد عامل طول و درجه شیب از مدل رقومی ارتفاعی ۱۲/۵ متر Alos Palsar استفاده شد. با استفاده از این نقشه و ابزار ArcHydro در محیط برنامه ArcGIS ابتدا نقشه جهت جریان تهیه شد و در مرحله بعد با استفاده از این عامل نقشه جریان تجمعی تهیه و تولید شد. در گام بعد نقشه شیب منطقه مورد مطالعه برحسب درجه و با استفاده نقشه DEM تهیه شد. در نهایت نقشه رستری ۳۰ متری LS تهیه شد که در شکل (۸) ارائه شده است. با توجه به نتایج به دست آمده مقدار LS از صفر تا ۵/۷۵ متغیر است. مناطق شمال شرقی، جنوب و جنوب غربی حوضه دارای LS بیش‌تری می‌باشد. بررسی شرایط مدیریتی و الگوی کشت در حوضه نشان داد که هیچ‌گونه عملیات حفاظتی مؤثر بر کاهش فرسایش، مانند تراس‌بندی یا کشت روی خطوط تراز، اجرا نشده است. الگوی کشت غالب در منطقه نیز عمدتاً در امتداد شیب بوده و بنابراین امکان کاهش هدررفت خاک از طریق مدیریت حفاظتی وجود نداشته است. بر این اساس، مقدار عامل P برای تمامی بخش‌های حوضه برابر با ۱ در نظر گرفته شد؛ مقداری که بیانگر عدم نقش‌آفرینی اقدامات مدیریتی در کنترل فرسایش خاک در منطقه مورد مطالعه است.



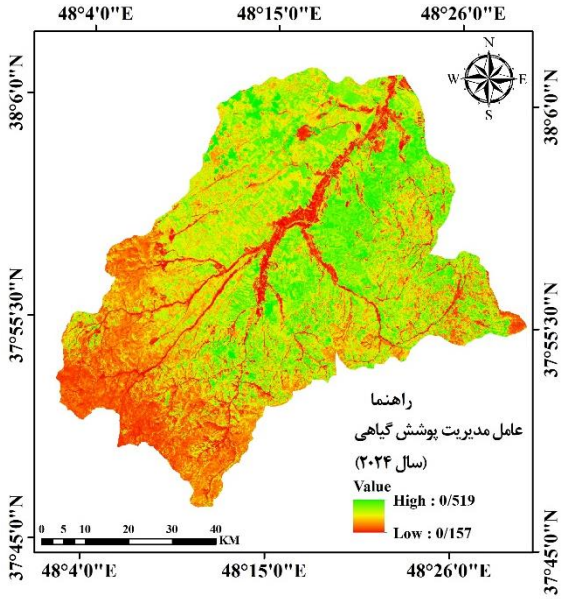

**شکل ٤. نقشه عامل فرسایندگی باران حوضه آبخیز قوری‌چای**



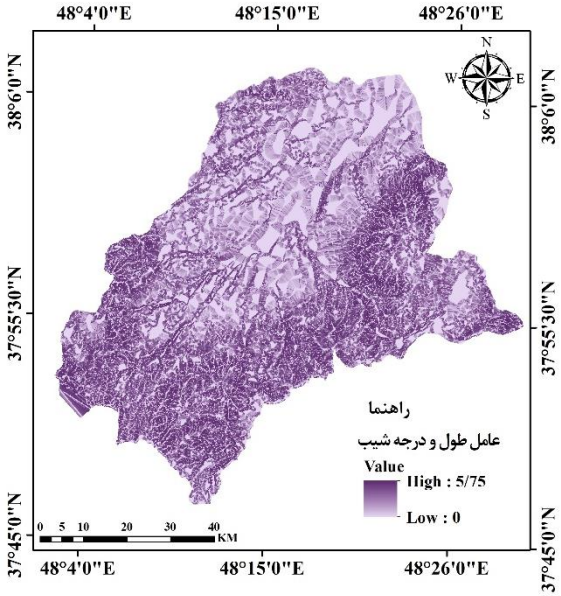

**شکل ٥. نقشه عامل فرسایش‌پذیری خاک حوضه آبخیز قوری‌چای**




**شکل ٦. نقشه عامل مدیریت پوشش گیاهی (سال ۲۰۰٤) حوضه آبخیز قوری‌چای**




**شکل ۷. نقشه عامل مدیریت پوشش گیاهی (سال ۲۰۲٤) حوضه آبخیز قوری‌چای**




**شکل ۸. نقشه عامل طول و درجه شیب حوضه آبخیز قوری‌چای**

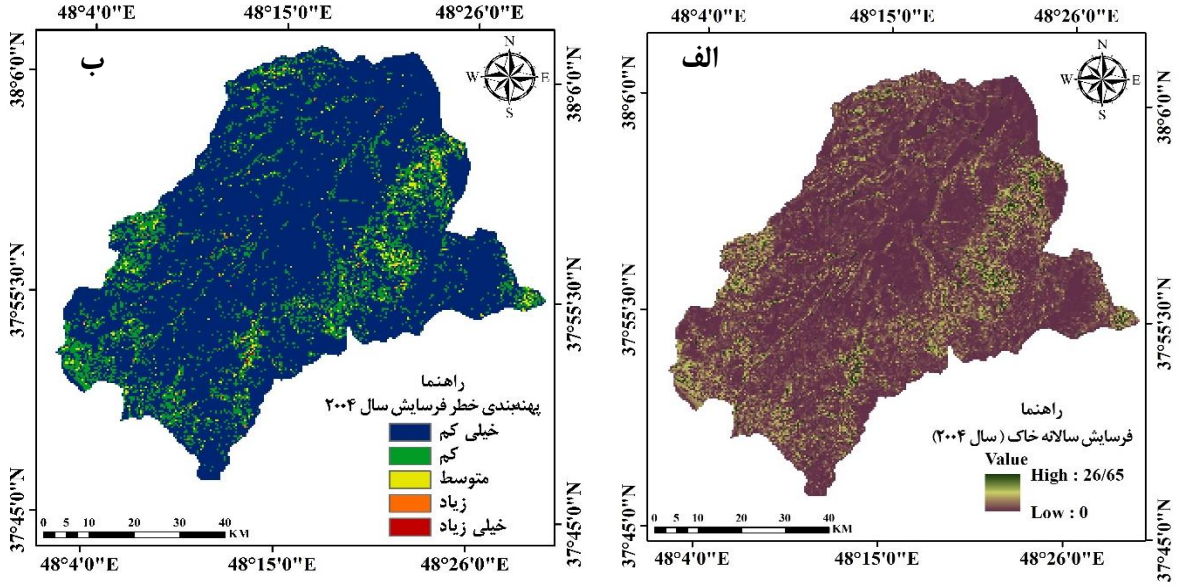
## نقشه نهایی فرسایش سالانه خاک برای سال‌های ۲۰۰۴ و ۲۰۲۴

نتایج حاصل از اجرای مدل RUSLE و تحلیل نقشه‌ها و جدول توزیع طبقات خطر فرسایش خاک در حوضه آبخیز قوری‌چای طی دوره بیست‌ساله ۲۰۰۴ تا ۲۰۲۴ نشان می‌دهد که این حوضه با تغییرات قابل توجهی در شدت و گستره فرسایش مواجه بوده است. بر اساس شکل (۹)، مقدار فرسایش سالانه خاک در سال ۲۰۰۴ در دامنه‌ای بین صفر تا ۲۶/۶۵ تن در هکتار در سال قرار داشته، در حالی که در سال ۲۰۲۴ این مقدار به صفر تا ۳۷/۱۸ تن در هکتار در سال افزایش یافته است (شکل ۱۰)؛ تغییری که علاوه بر افزایش مقادیر حداکثری، نشان‌دهنده گسترش نواحی با فرسایش شدید در بخش‌های غربی، شمال‌شرقی و جنوب

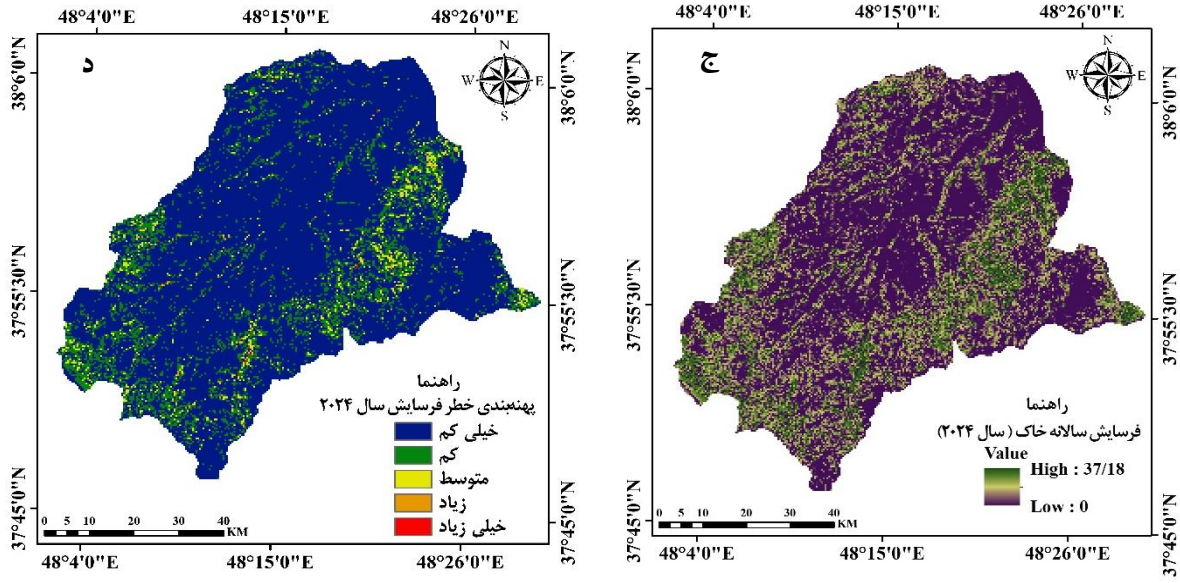
حوضه است. مقایسه نتایج این پژوهش با یافته‌های دبیری و همکاران (۱۴۰۲) در حوزه سقزچی‌چای اردبیل نشان می‌دهد که در هر دو مطالعه روند افزایش فرسایش در زیرحوضه‌های فاقد عملیات آبخیزداری به‌وضوح قابل مشاهده است. دبیری و همکاران گزارش کرده‌اند که در چنین زیرحوضه‌هایی میانگین فرسایش سالانه حدود ۴۸/۱ تن در هکتار افزایش یافته است؛ رقمی که بیانگر شدت بالای تخریب در نبود مداخلات مدیریتی است. یافته‌های پژوهش حاضر نیز این الگو را تأیید می‌کند بررسی داده‌های جدول (۳) نشان می‌دهد که مساحت طبقه خیلی کم از ۶۴۷۳۴ هکتار (۸۴ درصد کل حوضه) در سال ۲۰۰۴ به ۶۵۵۴۱ هکتار (۸۲/۴۹ درصد) در سال ۲۰۲۴ کاهش یافته است که بیانگر خروج بخشی از اراضی کم‌خطر و انتقال آن‌ها به طبقات بالاتر می‌باشد. در مقابل، طبقه کم تغییرات چشمگیری را تجربه کرده و از ۱۰۲۹ هکتار (۱۲/۹۵ درصد) در سال ۲۰۰۴ به ۱۱۱۱۵ هکتار (۱۳/۹۹ درصد) در سال ۲۰۲۴ افزایش یافته است؛ این تغییرات نشان می‌دهد که بخش زیادی از اراضی حوضه وارد محدوده‌ای با خطر ملایم اما رو به رشد فرسایش شده‌اند. همچنین طبقه متوسط از ۱۶۷۶ هکتار (۲/۲۳ درصد) به ۲۴۱۴ هکتار (۳/۰۳ درصد) افزایش یافته است، در حالی که طبقه زیاد از ۲۳۳ هکتار به ۳۳۵ هکتار و طبقه خیلی زیاد از ۳۱ هکتار به ۳۷ هکتار رسیده است. هرچند سهم نسبی این دو طبقه در مقیاس کل حوضه اندک است، اما گسترش آن‌ها در نواحی کوهستانی و شیب‌دار می‌تواند آثار مخرب جدی بر پایداری منابع خاک و آب منطقه داشته باشد. عوامل مؤثر بر این روند شامل شرایط توپوگرافی با شیب‌های تند، کاهش تراکم پوشش گیاهی در مراتع و اراضی کشاورزی، چرای مفرط دام، تغییرات نامناسب کاربری زمین و نبود اقدامات حفاظتی کارآمد بوده‌اند. علاوه بر این، افزایش شدت و تمرکز بارش‌ها در سال‌های اخیر موجب تشدید فرسایندگی باران و تمرکز رواناب سطحی شده و فرآیندهای فرسایش شیاری و خندقی را در بخش‌هایی از حوضه تقویت کرده است. با وجود این، مناطق مرکزی و شرقی حوضه در هر دو دوره زمانی همچنان در طبقات خیلی کم و کم قرار داشته‌اند که این وضعیت ناشی از شیب ملایم‌تر، تراکم بالای پوشش گیاهی و مقاومت نسبی بافت خاک در برابر فرسایش است. در مجموع، نتایج نشان می‌دهد که در طی دو دهه اخیر بخش عمده‌ای از اراضی حوضه از طبقه خیلی کم به سمت طبقات کم و متوسط حرکت کرده‌اند و این روند افزایشی در طبقات بالاتر زنگ خطری جدی برای آینده محسوب می‌شود. در صورت تداوم این شرایط، احتمال گسترش سریع‌تر محدوده‌های با خطر متوسط و زیاد در دهه‌های آینده بسیار بالا خواهد بود. بنابراین، ضرورت اجرای فوری اقدامات مدیریتی نظیر تقویت و احیای پوشش گیاهی، کنترل رواناب، اصلاح الگوهای بهره‌برداری کشاورزی، جلوگیری از چرای مفرط و اجرای طرح‌های مکانیکی و بیولوژیک حفاظت خاک بیش از پیش احساس می‌شود. چنین اقداماتی می‌تواند روند صعودی خطر فرسایش را کنترل کرده و پایداری اکولوژیکی و اقتصادی منطقه را تضمین نماید. در گام بعد به‌منظور تعیین میزان اثرگذاری عوامل مختلف مدل RUSLE بر مقدار فرسایش خاک، تحلیل همبستگی پیرسون بین نقشه‌های عوامل ورودی مدل RUSLE شامل R، K، LS، C و P با نقشه نهایی فرسایش انجام شد. نتایج نشان داد که عامل طول و درجه شیب بیشترین همبستگی مثبت را با میزان فرسایش خاک دارد؛ به‌طوری‌که ضریب همبستگی آن (۰/۷۸)، محاسبه شد. این مقدار بیانگر نقش برجسته شیب و طول دامنه در تشدید فرسایش، به‌ویژه در واحدهای کوهستانی و دامنه‌های پرشیب حوضه است. پس از آن، عامل پوشش گیاهی (C) با ضریب همبستگی (۰/۶۵) در رتبه دوم قرار گرفت که نشان می‌دهد کاهش تراکم پوشش گیاهی و تغییر کاربری اراضی طی بازه ۲۰ ساله، تأثیر قابل‌توجهی بر افزایش فرسایش داشته است. عوامل R و K نیز به ترتیب با مقادیر (۰/۴۲) و (۰/۳۷) همبستگی‌های مثبت اما ضعیف‌تری با فرسایش نشان دادند که بیانگر نقش مکمل آن‌ها در شرایط اقلیمی و ویژگی‌های خاک منطقه است. عامل مدیریتی (P) به دلیل ثابت در نظر گرفته شدن در کل حوضه، فاقد تغییرات مکانی بوده و از تحلیل همبستگی حذف شد. این نتایج اهمیت عامل‌های توپوگرافی و پوشش گیاهی را به‌عنوان مهم‌ترین محرک‌های فضایی فرسایش خاک در حوضه آبخیز قوری‌چای تأیید می‌کند و بیانگر آن است که تغییرات شیب، طول دامنه و افت پوشش گیاهی بیشترین سهم را در افزایش شدت فرسایش طی سال‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۲۴ داشته‌اند.

بررسی جدول (۴) که توزیع مقادیر فرسایش خاک در کاربری‌های مختلف طی سال‌های ۲۰۰۴ و ۲۰۲۴ را نشان می‌دهد نیز یافته‌های فوق را تکمیل می‌کند. بر اساس این جدول، میانگین فرسایش در اراضی دیم از ۰/۱۸ به ۰/۲۲ تن در هکتار در سال و در اراضی آبی از ۰/۲۸ به ۰/۳۰ تن در هکتار در سال افزایش یافته است که بیانگر نقش مهم تغییر الگوی بهره‌برداری کشاورزی

در تشدید فرسایش می‌باشد. مراتع نیز با رشد میانگین فرسایش از ۰/۳۵ به ۰/۶۱ تن در هکتار بیشترین افزایش را تجربه کرده‌اند که نتیجه کاهش تراکم پوشش گیاهی و چرای مفرط دام است. در مقابل، جنگل‌ها کاهش محسوسی در میانگین فرسایش داشته‌اند و از ۰/۷۲ به ۰/۰۰۲ تن در هکتار رسیده‌اند که می‌تواند ناشی از پایداری پوشش در محدوده‌های باقی‌مانده و نقش حفاظتی آن‌ها در کنترل فرسایش باشد. مناطق مسکونی نیز رشد چشمگیری را در میانگین فرسایش نشان داده‌اند (از ۰/۰۹ به ۰/۳۷ تن در هکتار)، امری که احتمالاً ناشی از گسترش ساخت‌وساز، کاهش نفوذپذیری سطح و افزایش رواناب است. همچنین در مناطق آبی میانگین فرسایش از ۰/۱۴ به ۰/۵۳ تن در هکتار افزایش یافته است که می‌تواند ناشی از رسوب‌گذاری و تغییرات هیدرولوژیکی باشد. این نتایج به‌طور کلی حاکی از آن است که اراضی دیم، مراتع و سکونتگاه‌های انسانی بیشترین سهم را در تشدید فرسایش داشته و نیازمند توجه ویژه در برنامه‌ریزی‌های حفاظتی و مدیریتی حوضه هستند.




**شکل ۹. الف) نقشه فرسایش سالانه خاک (سال ۲۰۰٤) حوضه آبخیز قوری‌چای، ب) کلاس‌های خطر فرسایش خاک**




**شکل ۱۰. الف) نقشه فرسایش سالانه خاک (سال ۲۰۲٤) حوضه آبخیز قوری‌چای، ب) کلاس‌های خطر فرسایش خاک**

**جدول ۳. مساحت و درصد طبقات خطر فرسایش خاک حوضه آبخیز قوری‌چای طی سال‌های ۲۰۰٤ و ۲۰۲٤**

| سال ۲۰۰٤ | | | سال ۲۰۲٤ | | |
|---|---|---|---|---|---|
| خطر فرسایش خاک | هکتار | درصد | هکتار | درصد | روند تغییرات |
| خیلی کم | ۶۷۲۲۴ | ۸۴ | ۶۵۵۴۱ | ۸۲/۴۹ | کاهشی |
| کم | ۱۰۲۹۰ | ۱۲/۹۵ | ۱۱۱۱۵ | ۱۳/۹۹ | افزایشی |
| متوسط | ۱۶۷۶ | ۲/۲۳ | ۲۴۱۴ | ۳/۰۳ | افزایشی |
| زیاد | ۲۲۳ | ۰/۲۹ | ۳۳۵ | ۰/۴۲ | افزایشی |
| خیلی زیاد | ۳۱ | ۰/۰۳ | ۳۷ | ۰/۰۴ | افزایشی |

**جدول ٤. مقادیر فرسایش خاک در کاربری‌های مختلف طی سال‌های ۲۰۰٤ و ۲۰۲٤ حوضه آبخیز قوری‌چای**

| سال ۲۰۰٤ | | | | سال ۲۰۲٤ | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| کاربری‌ها | حداقل | حداکثر | میانگین | حداقل | حداکثر | میانگین |
| اراضی دیم | ۰ | ۲۲/۶۸ | ۰/۱۸ | ۰ | ۲۸/۹۴ | ۰/۲۲ |
| اراضی آبی | ۰ | ۹/۳۱ | ۰/۲۸ | ۰ | ۱۹/۵۳ | ۰/۳۰ |
| مرتع | ۰ | ۲۶/۶۵ | ۰/۳۵ | ۰ | ۳۷/۱۸ | ۰/۶۱ |
| جنگل | ۰ | ۱۱/۲۴ | ۰/۷۲ | ۰ | ۰/۰۰۵ | ۰/۰۰۲ |
| مناطق مسکونی | ۰ | ۰/۵۴ | ۰/۰۹ | ۰ | ۱۲/۹۳ | ۰/۳۷ |
| مناطق آبی | ۰ | ۳/۳۲ | ۰/۱۴ | ۰ | ۳/۶۶ | ۰/۵۳ |

## بحث و نتیجه‌گیری

فرسایش خاک یکی از مهم‌ترین تهدیدهای زیست‌محیطی و توسعه‌ای در مناطق کوهستانی و نیمه‌خشک است که بر حاصلخیزی خاک، کیفیت منابع آب و پایداری اکوسیستم‌ها تأثیر مستقیم دارد. هدف پژوهش حاضر، ارزیابی اثر تغییرات کاربری اراضی بر شدت و گستره فرسایش خاک در حوضه آبخیز قوری‌چای استان اردبیل طی دوره بیست‌ساله ۲۰۰۴ تا ۲۰۲۴ بود. این تحقیق با استفاده از مدل جهانی فرسایش خاک اصلاح‌شده (RUSLE) در محیط GIS، GEE و بهره‌گیری از داده‌های سنجش از دور، شامل تصاویر ماهواره‌ای لندست ۵ TM، برای ۲۰۰۴ و سنتینل ۲ برای سال ۲۰۲۴، مدل رقومی ارتفاعی ALOS PALSAR با قدرت تفکیک ۱۲/۵ متر، نقشه بافت خاک ایران و آمار بارندگی ماهانه و سالانه ایستگاه‌های هواشناسی، به تحلیل تغییرات مکانی و زمانی فرسایش و ارتباط آن با کاربری اراضی پرداختیم. یافته‌های این پژوهش نشان داد که طی دو دهه اخیر، میانگین فرسایش سالانه خاک از ۰/۲۷ تن در هکتار در سال ۲۰۰۴ به ۰/۳۸ تن در هکتار در سال ۲۰۲۴ افزایش یافته است. تحلیل پهنه‌بندی فرسایش نشان داد که مساحت اراضی با فرسایش خیلی کم از ۶۷۲۲۴ هکتار (۸۴ درصد کل حوضه) در سال ۲۰۰۴ به ۶۵۵۴۱ هکتار (۸۲/۴۹ درصد) در سال ۲۰۲۴ کاهش یافته است. در مقابل، مساحت طبقات کم از ۱۰۲۹۰ هکتار (۱۲/۹۵ درصد) به ۱۱۱۱۵ هکتار (۱۳/۹۹ درصد)، طبقه متوسط از ۱۶۷۶ هکتار (۲/۲۳ درصد) به ۲۴۱۴ هکتار (۳/۰۳ درصد) و طبقات زیاد و خیلی زیاد نیز به ترتیب افزایش یافته است، اگرچه سهم نسبی این دو طبقه همچنان اندک است، اما گسترش آن‌ها در نواحی شیب‌دار می‌تواند آثار مخرب جدی بر پایداری منابع خاک و آب داشته باشد. تغییرات کاربری اراضی نیز تأثیر بسزایی بر فرسایش داشت. بررسی نقشه‌های کاربری سال‌های ۲۰۰۴ و ۲۰۲۴ نشان داد که اراضی دیم با افزایش ۱۰۰۵ هکتار و اراضی آبی با افزایش ۲۹۲ هکتار گسترش یافته‌اند. در مقابل، مراتع و جنگل‌ها به ترتیب با کاهش ۱۱۸۶ هکتار و ۱۱۹ هکتار مواجه شده‌اند. همچنین، مساحت سکونتگاه‌ها با رشد ۱۰۵ هکتاری افزایش یافته و پهنه‌های آبی با کاهش ۹۷ هکتار روبه‌رو شده‌اند. این تغییرات بیانگر فشار انسانی بر منابع طبیعی و تغییر الگوی بهره‌برداری است که مستقیماً موجب تشدید فرسایش شده است. بررسی نرخ فرسایش در کاربری‌های مختلف نشان داد که بیشترین افزایش فرسایش در اراضی دیم و مراتع مشاهده شد؛ میانگین فرسایش در اراضی دیم از ۰/۱۸ به ۰/۲۲ تن در هکتار و در مراتع از ۰/۳۵ به ۰/۶۱ تن در هکتار افزایش یافته است. مناطق

مسکونی نیز با افزایش از ۰/۰۹ به ۰/۳۷ تن در هکتار مواجه شدند. در مقابل، جنگل‌ها کاهش نسبی فرسایش را تجربه کردند که بیانگر نقش حفاظتی پوشش جنگلی در کنترل فرآیندهای فرسایشی است. تحلیل پهنه‌ها نشان داد که بخش‌های شمالی، غربی و جنوب‌شرقی حوضه بیشترین نرخ فرسایش را دارند و عوامل مؤثر شامل شیب زیاد، کاهش تراکم پوشش گیاهی، چرای مفرط، تغییر کاربری زمین و نبود اقدامات حفاظتی مناسب است. نتایج این پژوهش تأکید می‌کند که روند تخریب خاک در حوضه قوری‌چای در حال افزایش است و در صورت ادامه این روند، گسترش سریع‌تر پهنه‌های با خطر متوسط و زیاد در دهه‌های آینده دور از انتظار نخواهد بود. بنابراین، اجرای راهکارهای مدیریتی و حفاظتی مانند احیای پوشش گیاهی و مراتع، کنترل رواناب و رسوب، اصلاح الگوی بهره‌برداری کشاورزی، جلوگیری از چرای مفرط و اجرای عملیات مکانیکی و بیولوژیک حفاظت خاک ضروری است. همچنین، پایش مستمر تغییرات کاربری اراضی و ترکیب آن با مدل‌های مکانی فرسایش، ابزاری کارآمد برای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی و جلوگیری از تخریب منابع خاک به شمار می‌رود. در نهایت، این مطالعه نشان داد که تغییرات کاربری اراضی طی دو دهه اخیر بیشترین سهم را در افزایش شدت فرسایش خاک داشته است و تلفیق سیاست‌های پیشگیرانه، بهره‌گیری از فناوری‌های سنجش از دور و GIS و مشارکت جوامع محلی، راهکارهایی کلیدی برای حفظ پایداری اکولوژیکی و اقتصادی حوضه‌های مشابه محسوب می‌شوند.

## منابع


احمدی، حسین (۱۳۸۸). *ژئومورفولوژی کاربردی (فرسایش آبی)*، چاپ ۶، انتشارات دانشگاه تهران، ۵۰۷.

آرمین، محسن؛ اسکندری‌جهمانی، فاطمه؛ الوانی‌نژاد، سهراب و میرزایی، محمدرضا (۱۳۹۹). اولویت‌بندی مناطق حساس به فرسایش خاک با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، مطالعه موردی بخشی از شهرستان بهمئی، کهگیلویه و بویراحمد. *پژوهش‌های فرسایش محیطی*، ۱۰(۲): ۴۱-۵۸. 20.1001.1.22517812.1399.10.2.2.5

آقایاری، لیلا؛ اصغری سراسکانرود، صیاد و زینالی، بتول (۱۴۰۴). بررسی تغییرات کاربری اراضی و اثرات آن بر فرسایش خاک: مطالعه موردی شهرستان نمین. *هیدروژئومورفولوژی*، ۱۲(۴۳): ۱۴۲-۱۵۸. 10.22034/hyd.2025.65075.1771

برابریان، امین و محسنی، ندا (۱۴۰۴). مدل‌سازی زمانی- مکانی فرسایش خاک با استفاده از مدل RUSLE و اثرات آن بر کیفیت خاک. *جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی*، ۳۶(۲): ۱۱۳-۱۴۰. 10.22108/gep.2025.145683.1732

بیاتی‌خطیبی، مریم (۱۳۹۴). ارزیابی و پیش‌بینی خطر فرسایش خاک در حوضه سراسکندچای با استفاده از مدل USLE و GIS. *جغرافیا و برنامه‌ریزی*، ۱۹(۵۴): ۶۱-۸۱. https://geoplanning.tabrizu.ac.ir/article_4469.html

بیاتی‌خطیبی، مریم؛ کرمی، فریبا؛ رجبی، معصومه و نیکجو، محمدرضا (۱۳۹۱). ارزیابی پهنه های تحت خطر فرسایش خاک در حوضه سراسکندر چای، دامنه‌های شرقی کوهستان سهند با استفاده از مدل USLE و GIS. *جغرافیا و برنامه‌ریزی*، ۱۶(۴۰): ۱-۲۳. https://geoplanning.tabrizu.ac.ir/article_50.html

دبیری، روح‌الله؛ عبقری، هیراد و قربانی، اردوان (۱۴۰۲). اثربخشی عملیات آبخیزداری در کاهش فرسایش و رسوب با استفاده از مدل تجربی MPSIAC (مطالعه موردی: حوزه‌آبخیز سقزچی‌چای استان اردبیل). اثربخشی عملیات آبخیزداری در کاهش فرسایش و رسوب با استفاده از مدل تجربی MPSIAC (مطالعه موردی: حوزه‌آبخیز سقزچی‌چای استان اردبیل). *جغرافیا و مطالعات محیطی*، ۱۲(۴۷): ۱۸۴-۲۰۱. https://journals.iau.ir/article_703758.html

زیاری، کرامت‌اله و حمیدی کای، شهریار (۱۴۰۴). تحلیل عوامل موثر بر تغییرات کاربری اراضی شهری (نمونه موردی: شهر ارومیه). *جغرافیا و برنامه‌ریزی*، ۲۹(۹۲): ۳۳۳-۳۵۵. 10.22034/gp.2024.60785.3240

عابدینی، موسی؛ پاسبان، امیرحسام و نوری، آوا (۱۴۰۴). ارتباط شاخص‌های پوشش گیاهی و مورفومتری با میزان فرسایش خاک در حوضه آبخیز مشکین چای با استفاده از مدل RUSLE. *مطالعات جغرافیایی مناطق خشک*، ۱۶(۶۱): ۱-۲۴. 10.22034/jargs.2025.485712.1157

غلامی، لیلا؛ خالدی‌درویشان، عبدالواحد؛ درختی، سعید و کیانی‌هرچگانی، محبوبه (۱۴۰۳). ارزیابی اثر تغییر کاربری اراضی بر فرسایش خاک با استفاده از مدل RUSLE در حوزه آبخیز چرداول ایلام. *انجمن آبخیزداری ایران*، ۶۵(۱۸): ۱۱-۱. http://jwmsei.ir/article-۱-۱۱۵۳-fa.html

کلارستاقی، عطاالله؛ احمدی، حسن؛ جعفری، محمد و قدوسی، جعفر (۱۳۸۷). پیش‌بینی تغییرات احتمالی کاربری جنگل به دیم کاری با استفاده از مدل‌سازی احتمالاتی در حوزه آبخیز فریم صحرا استان مازندران، *پژوهش و سازندگی*، ۲۱(۳): ۶۳-۵۲. http://jwmsei.ir/article-۱-۱۱۷۵-fa.html

گرشاسبی، فاطمه و جوکارسرهنگی، عیسی (۱۴۰۳). بررسی تاثیر تغییرات کاربری اراضی و بارش بر میزان فرسایش خاک در حوضه اوارد نکارود. *پژوهش‌های فرسایش محیطی*، ۵۳(۱۴): ۱۰۴-۱۲۰. 10.61186/jeer.14.1.102

محمدی، پروا؛ ابراهیمی، کیومرث و بذرافشان، جواد (۱۴۰۲). بررسی تغییرات کاربری اراضی حوزه آبخیز گرگانرود با استفاده از پلتفرم گوگل ارث انجین. *انجمن آبخیزداری ایران*، ۱۷(۶۰): ۱۱-۱۹. 20.1001.1.20089554.1402.17.60.1.3

محمدی، شاهین؛ کریم‌زاده، حمیدرضا؛ و علیزاده، میثم (۱۳۹۷)، برآورد مکانی فرسایش خاک کشور ایران با استفاده از مدل RUSLE، *اکوهیدرولوژی*، ۵(۲): ۵۵۱-۵۶۹. 10.22059/ije.2018.239777.706

مددی، عقیل؛ اصغری سراسکانرود، صیاد؛ و حاجت‌پور قلعه رودخانی، حسین (۱۴۰۳). بررسی تغییرات کاربری اراضی با تاکید بر پوشش جنگلی و اثرات آن بر فرسایش خاک با استفاده از طبقه‌بندی شی‌گرا و تکنیک چندمعیاره مارکوس مطالعه موردی: حوضه آبریز قلعه رودخان فومن. *هیدروژئومورفولوژی*، ۳۹(۱۱): ۱۴۱-۱۶۴. 10.22034/hyd.2024.60739.1731

مددی، عقیل؛ اصغری‌سراسکانرود، صیاد؛ بادامکی، مهدی و قلعه، احسان (۱۳۹۹). پهنه‌بندی خطر سیلاب در حوضه آبریز قوری‌چای کورائیم در استان اردبیل. *پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی*، ۹(۲): ۸۱-۹۷. 10.22034/gmpj.2020.118226

مددی، عقیل؛ پاسبان، امیرحسام و نظافت‌تکله، بهروز (۱۴۰۲). بررسی و ارزیابی میزان هدررفت خاک در کاربری‌های اراضی حوضه آبخیز آتشگاه با استفاده از مدل RUSLE و تصاویر ماهواره‌ای لندست (سنجنده OLI). *مطالعات علوم محیط زیست*، ۸(۲): ۶۶۱۲-۶۶۲۵. 10.22034/jess.2022.355543.1840

Abedini, M., Pasban, A. H., & Nouri, A. (2025). Relationship between vegetation and morphometric indices with soil erosion using the RUSLE model in the Meshgin Chay watershed. *Geographical Studies of Arid Regions*, https://doi.org/10.22034/jargs.2025.485712.1157. [In Persian]

Aghayari, L., Asghari Saras Kanroud, S., & Zeinali, B. (2025). Land use change analysis and its effects on soil erosion: A case study of Namin County. *Hydrogeomorphology*, 12(43), 142–158. [In Persian]

Ahmadi, H. (2009). *Applied Geomorphology (Water Erosion), 6th Edition*, University of Tehran Press, 507 p. [In Persian]

Armin, M., Eskandari-Jahmani, F., Alvaninejad, S., & Mirzaei, M. R. (2020). Prioritization of areas sensitive to soil erosion using satellite images: A case study of part of Bahmei County, Kohgiluyeh and Boyer-Ahmad. *Environmental Erosion Researches*, 10(2), 41–58. [In Persian]

Barabarian, A., & Mohseni, N. (2025). Spatio-temporal modeling of soil erosion using the RUSLE model and its effects on soil quality. *Geography and Environmental Planning*, 36(2), 113–140. [In Persian]

Basukala, A.K., Oldenburg, C., Schellberg, J., Sultanov M., & Dubovyk, O. (2017). Towards improved land use mapping of irrigated croplands: performance assessment of different image classification algorithms and approaches. *European Journal of Remote Sensing*, 50(1): 187-201.

Bayati-Khatibi, M. (2015). Assessment and prediction of soil erosion risk in the Sarasakand Chay watershed using the USLE model and GIS. *Geography and Planning*, 19(54), 61–81. [In Persian]

Bayati-Khatibi, M., Karami, F., Rajabi, M., & Nikjou, M. R. (2012). Evaluation of areas at risk of soil erosion in the Sarasakand Chay watershed, eastern slopes of Sahand Mountain, using the USLE model and GIS. *Geography and Planning*, 16(40), 1–23. [In Persian]

Bensekhria, A., & Bouhata, R. (2022). Assessment and mapping soil water erosion using RUSLE approach and GIS tools: Case of Oued el-Hai Watershed, Aurès West, Northeastern of Algeria. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 11(84), 123-136.

Bueno, F. A. (2024). Estimativa de erosão em área de desflorestamento da Amazônia, bacia do baixo rio Acre. *Revista Geográfica de America Central*, 2, 247-262.

Chi, W., Wang, Y., Lou, Y., Na, Y., & Luo, Q. (2022). Effect of Land Use/Cover Change on Soil Wind Erosion in the Yellow River Basin since the 1990s, *Sustainability*, 14(19): 1-16.

Dabiri, R., Abghari, H., & Ghorbani, A. (2023). Effectiveness of watershed management operations in reducing erosion and sediment using the MPSIAC empirical model (Case study: Saqezchi-Chay watershed, Ardabil Province). *Geography and Environmental Studies*, 12(47), 184–201. https://journals.iau.ir/article_703758.html

Ejaz, N., Elhag, M., Bahrawi, J., Zhang, L., Gabriel, H. F., & Rahman, K. U. (2023). Soil erosion modelling and accumulation using RUSLE and remote sensing techniques: Case study Wadi Baysh, Kingdom of Saudi Arabia. *Sustainability*, 15(4), 3218.

El Jazouli, A., Barakat, A., Khellouk, R., Rais, J., & El Baghdadi, M. (2019). Remote sensing and GIS techniques for prediction of land use land cover change effects on soil erosion in the high basin of the Oum Er Rbia River (Morocco). *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 13, 361–374.

Gershasbi, F., & Jokar-Sarhangi, I. (2024). Investigation of the effect of land use and precipitation changes on soil erosion in the Avarid Nekarud watershed. *Environmental Erosion Researches*, 14(53), 104–120. [In Persian]

Gholami, L., Khaledi-Darvishan, A., Derakhti, S., & Kiani-Harchgany, M. (2024). Assessment of the impact of land use change on soil erosion using the RUSLE model in the Chardavol watershed, Ilam Province. *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering*, 18(65), 1–11. [In Persian]

Jees, R. V., Badimela, U., Kamaraj, J., Madipally, R., & Ghosh, S. (2025). GIS-based RUSLE modeling of soil erosion and sediment yield under future rainfall and land use changes in the Neyyar River Basin, Western Ghats, India. *Journal of Sedimentary Environments*, Advance online publication. https://doi.org/10.1007/s43217-025-00240-x

Jensen, J. R. (2015). *Digital Image Processing* (4th Ed.). University of South Carolina.

Jiang, N., Yao, F., Liu, T., Chen, Z., Hu, C., & Geng, X. (2023). Estimating the soil erosion response to land-use change using GIS-based RUSLE and remote sensing: A case study of Heilongjiang Province, China. *Sustainability*, 15(10), 8004.

Kelarstaqi, A., Ahmadi, H., Jafari, M., & Ghodousi, J. (2008). Prediction of probable forest land use change to dry farming using probabilistic modeling in the Fram Sahara watershed, Mazandaran Province. *Research and Construction*, 21(3), 52–63. [In Persian]

Madadi, A., Asghari Saras Kanroud, S., & Hajatpour Qaleh Rudkhani, H. (2024). Analysis of land use change with emphasis on forest cover and its effects on soil erosion using object-oriented

classification and the multi-criteria MCE technique: A case study of the Qaleh Rudkhan watershed, Fuman. *Hydrogeomorphology*, 11(39), 141–164. [In Persian]

Madadi, A., Asghari Saras Kanroud, S., Badamaki, M., & Ghaleh, E. (2020). Flood hazard zonation in the Ghuri Chay-Kuraim watershed, Ardabil Province. *Quantitative Geomorphological Researches*, 9(2), 81–97. [In Persian]

Madadi, A., Pasban, A. H., & Nezafat-Takleh, B. (2023). Evaluation of soil loss in various land uses of the Atashgah watershed using the RUSLE model and Landsat OLI imagery. *Environmental Science Studies*, 8(2), 6612–6625. [In Persian].

Merchan, L., Martinez-Grana, A.M., Alonso Rojo, P. & Criado, M. (2023). Water Erosion Risk Analysis in the Arribes del Duero Natural Park (Spain) Using RUSLE and GIS Techniques. *Sustainability*, 15(2), p.1627.

Mohammadi, P., Ebrahimi, K., & Bazrafshan, J. (2023). Analysis of land use changes in the Gorganrud watershed using Google Earth Engine platform. *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering*, 17(60), 11–19. [In Persian]

Mohammadi, Sh., Karimzadeh, H. R., & Alizadeh, M. (2018). Spatial estimation of soil erosion in Iran using the RUSLE model. *Ecohydrology*, 5(2), 551–569. [In Persian]

Palliyaguru, C., Basnayake, V., Makumbura, R. K., Gunathilake, M. B., Muttil, N., Wimalasiri, E. M., & Rathnayake, U. (2023). Evaluation of the impact of land use changes on soil erosion in the tropical Maha Oya River Basin, Sri Lanka. *Land*, 12(1), 107.

Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., McCool, D. K., & Yoder, D. C. (1997). Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook No. 703.

Renard, K.G., & Freidmund, J.R. (1994). Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the RUSLE, National Agricultural Library, *Journal of Hydrology*, 157: 287-306.

Sanchez, M., Padilla-Castro, C., Riveros-Lizana, C., Hermoza-Espezua, R. M., Atalluz-Ganoza, D., & Solorzano-Acosta, R. (2025). Impacts of land use on soil erosion: RUSLE analysis in a sub-basin of the Peruvian Amazon (2016–2022). *Geosciences*, 15(1), 15.

Viana, C. M. Girao, I. & Rocha, J. (2019). Long-term satellite image time-series for land use/land cover change detection using refined open source data in a rural region. *Remote Sensing*, 11(9):1104.

Wischmeier, W.H., & Smith, D.D. (1978). Predicting rainfall erosion, losses: a guide to conservation planning, United States Department of Agriculture Handbook, Washington DC. 537: 13-27.

Xu, S., Wang, X., Ma, X., & Gao, S. (2023). Risk assessment and prediction of soil water erosion on the middle northern slope of Tianshan Mountain. *Sustainability*, 15(6), 4826.

Ziyari, K., & Hamidi Kay, Sh. (2025). Analysis of factors influencing urban land-use changes (Case study: Urmia city). *Geography and Planning*, 29(92), 333–355. [In Persian]