



Investigating the Role of Landforms in Soil Erosion Rates Using the RUSLE Model and GEE System (Case Study: Basins of the Southern Slope of the Sahand Mountain Massif)

Mousa Abedini ^{1*}, Aboozar Sadeghi ², Aghil Madadi ³

¹Professor in Geomorphology, Department of Physical Geography, Faculty of Social Sciences, University of Mohagheh Ardabili, Ardabil, Iran

² PhD Student in Geomorphology, Department of Physical Geography, Geomorphology, Faculty of Social Sciences, University of Mohagheh Ardabili, Ardabil, Iran

³Professor in Geomorphology, Department of Physical Geography, Faculty of Social Sciences, University of Mohagheh Ardabili, Ardabil, Iran

Article Info

Abstract

Article History

Received: 23 December 2024

Revised: 27 January 2025

Accepted: 06 February 2025

Available Online: 07 February 2025

Keywords:

Landform Classification

Soil Erosion

Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)

Google Earth Engine (GEE)

Watershed Management

This study aimed to investigate the role of landforms in soil erosion across the southern slope basins of the Sahand mountain range. Using the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) model and the Google Earth Engine (GEE) platform, key factors affecting erosion including rainfall erosivity (R), soil erodibility (K), slope length and steepness (LS), vegetation cover management (C), and soil conservation practices (P) were analyzed, and landforms were classified within this system. The results indicated that areas with very high and high erosion levels, covering approximately 0.45% of the total area, were predominantly located on steep slopes and at higher elevations, where increased rainfall and reduced vegetation cover led to severe erosion. Conversely, areas with low and very low erosion characterized by dense vegetation and gentle slopes accounted for more than 95% of the study area. Furthermore, the analysis revealed that landforms such as water channels, cliffs, and narrow valleys exhibited the highest erosion rates, whereas flatter features like plains and alluvial terraces experienced the least erosion. This study highlights the strong potential of GEE for large-scale geospatial analysis and presents an effective approach to sustainable land management and erosion mitigation. These findings can support policymakers and researchers in planning targeted protective measures for similar watersheds.

*Corresponding author: Dr. Mousa Abedini

E-mail address: Abedini@uma.ac.ir

How to cite this article: Abedini, M., Sadeghi, A., & Madadi, A. (2025). Investigating the Role of Landforms in Soil Erosion Rates Using the RUSLE Model and GEE System, Case Study: Basins of the Southern Slope of the Sahand Mountain Massif. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 14(2), 223-244. <https://doi.org/10.22067/geoeh.2025.91165.1535>



©2025 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Soil erosion represents one of the most pressing environmental challenges, significantly impacting natural resources and hindering sustainable development. It depletes soil fertility, jeopardizes food security, threatens biodiversity, and disrupts the global carbon cycle. Several factors contribute to erosion, including climatic conditions such as intense rainfall, topographical elements like slope gradient, soil characteristics, and human activities such as land-use change, deforestation, and overgrazing.

Landforms play a critical role in determining the severity and spatial distribution of soil erosion. Geomorphological analysis offers valuable insights into the interaction between natural processes and anthropogenic activities, thereby supporting sustainable land management. This study aims to assess the influence of landforms on soil erosion by applying the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) model in conjunction with the spatial data processing capabilities of Google Earth Engine (GEE).

Study Area

This research was conducted in the southern slope basins of the Sahand Mountain Range, located in East Azerbaijan Province, Iran. The study area includes the Qaleh Chay, Sufi Chay, Mardagh Chay, Lilan Chay, and parts of the Qaranqu basins. Elevation in the region ranges from 3964 meters in mountainous areas to 1236 meters in the plains, covering a total area of 3821.41 km². The region's diverse topography, variable precipitation, and heterogeneous vegetation make it an ideal case for examining the effects of landforms on soil erosion.

Material and Methods

The RUSLE model was used to estimate soil erosion. This model calculates average annual soil loss based on five factors:

- Rainfall erosivity (R): Represents the intensity and kinetic energy of rainfall.
- Soil erodibility (K): Indicates the vulnerability of soil to erosion.
- Slope length and steepness (LS): Reflects the topographic impact on erosion potential.
- Vegetation cover management (C): Accounts for the protective effects of land cover.
- Conservation practices (P): Evaluates the effectiveness of soil conservation methods.

These factors were derived using long-term rainfall data, satellite imagery, digital elevation models (DEMs), and land-use maps, all processed through the Google Earth Engine (GEE) platform. Landform classification was performed using the Multi-Scale Topographic Position Index (MTPI) within GEE to identify and categorize distinct geomorphic units.

Results and Discussion

Erosion mapping revealed that soil loss in the study area ranged from 0 to 40 tons per hectare per year. Areas with very high and high erosion, making up only 0.45% of the total area, were mostly located on steep slopes at higher elevations, where rainfall intensity was greater and vegetation cover was sparse. In contrast, more than 95% of the area experienced low to very low erosion, typically found in flat plains and densely vegetated regions.

Landform classification further showed that features such as water channels, cliffs, and narrow valleys exhibited the highest erosion rates, whereas flatter landforms like alluvial terraces and plains were associated with the lowest erosion levels.

Conclusion

This study demonstrates that the RUSLE model combined with GEE is a powerful tool for conducting large-scale soil erosion assessments. The integration of GEE enabled high-resolution spatial analysis, efficient data processing, and improved model accuracy. The findings indicate that very high and high erosion zones, covering approximately 17.33 km², are concentrated in upper watershed areas characterized by higher altitudes, greater rainfall, and limited vegetation cover. Conversely, low and very low erosion zones, accounting for about 3623.11 km², are located in flatter areas with dense vegetation. This research underscores the importance of incorporating landform analysis into natural resource management and soil conservation strategies. The outcomes provide essential insights for policymakers to prioritize vulnerable areas for conservation initiatives and promote sustainable land-use planning.



بررسی نقش لندفرم‌ها در میزان فرسایش خاک با مدل RUSLE و سامانه GEE،

مطالعه موردی: حوضه‌های دامنه جنوبی توده کوهستان سهند

موسی عابدینی^۱، ابوذر صادقی^{۲*}، عقیل مددی^۳

^۱ استاد، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
^۲ دانشجوی دکتری، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخچه مقاله:	این پژوهش با هدف بررسی نقش لندفرم‌ها در میزان فرسایش خاک در حوضه‌های دامنه جنوبی توده کوهستان سهند انجام شد. با استفاده از مدل اصلاح‌شده جهانی فرسایش خاک (RUSLE) و سامانه گوگل ارث انجین (Google Earth Engine)، عوامل مؤثر بر فرسایش شامل فرساینده‌ی بارش (R)، فرسایش‌پذیری خاک (K)، طول و شدت شیب (LS)، مدیریت پوشش گیاهی (C) و عملیات حفاظتی خاک (P) مورد ارزیابی قرار گرفت و طبقه‌بندی لندفرم‌ها نیز در این سامانه انجام گرفت. نتایج تحقیق نشان داد که مناطق با فرسایش خیلی زیاد و زیاد با مساحتی حدود ۰/۴۵ درصد معادل ۱۷/۳۳ کیلومترمربع را شامل می‌شود. این مناطق در بالادست حوضه که دارای ارتفاع بالا، میانگین بارندگی بیشتر و دارای پوشش گیاهی کمتری بوده رخ داده است. مناطق با فرسایش خیلی کم و کم مساحتی حدود ۹۵/۵۴ درصد معادل ۳۶۲۳/۱۱ کیلومترمربع بوده است که در مناطق دارای پوشش گیاهی پر تراکم، بارندگی کم‌تر و در مناطق دشت‌ها و مسطح بوده است. علاوه بر این، تحلیل لندفرم‌های منطقه نشان داد که بیش‌ترین میزان فرسایش در لندفرم‌های آبراهه‌ها، پرتگاه‌ها و دره‌های باریک مشاهده می‌شود. در حالی‌که لندفرم‌های مسطح‌تر نظیر دشت‌ها و تراس‌های آبرفتی از فرسایش کمتری برخوردارند. استفاده از سامانه GEE در این پژوهش قابلیت بالای آن را در ترکیب و تحلیل داده‌های جغرافیایی مقیاس‌پذیر نشان داد و روشی مؤثر برای مدیریت پایدار اراضی و کاهش فرسایش خاک فراهم آورده شد. این یافته‌ها می‌توانند در برنامه‌ریزی‌های مدیریتی و اجرای عملیات حفاظتی در حوضه‌های آبخیز مشابه، توسط مسئولین و محققین مورد استفاده قرار گیرند.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۰۳	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۱/۰۸	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۱۸	
کلمات کلیدی:	
طبقه‌بندی اشکال زمین	
فرسایش خاک	
معادله بازنگری‌شده جهانی فرسایش خاک (RUSLE)	
موتور گوگل ارث انجین (GEE)	
مدیریت حوضه آبخیز	

مقدمه

فرسایش خاک و تخریب زمین ناشی از آن، به عنوان یکی از جدی‌ترین مشکلات محیط زیست جهانی موثر بر توسعه پایدار بشر، توجه گسترده سیاستگذاران و محققان را به خود جلب کرده است (Wang & Su, 2020). فرسایش خاک توانایی تغییر ساختار خاک را دارد و بر حاصلخیزی خاک، بهره‌وری زمین، امنیت غذایی، تنوع بیولوژیکی و چرخه جهانی کربن تأثیر منفی می‌گذارد (Hua, Zhao, Liu & Liu, 2019). علت فرسایش خاک به شرایط اقلیمی بویژه بارش‌های رگباری، توپوگرافی و شیب زیاد زمین، لیتولوژی و فعالیت‌های انسانی مانند تغییر کاربری زمین، از بین بردن پوشش گیاهی، افزایش تولیدات کشاورزی، چرای بی‌رویه دام و غیره مربوط می‌شود (Karami & Bayati Khatibi, 2019).

مطالعه درباره ارتباط بین پوشش گیاهی و طبقه‌بندی لندفرم اهمیت دارد زیرا توزیع پوشش گیاهی، برپایه تجزیه و تحلیل ویژگی‌های لندفرم، از جنبه‌های مهم فرایند درک اکولوژی است (Hoersch, Braun & Schmidt 2002; Pfeffer, Pebesma & Burroug, 2003; Zawawi, Shiba, Janatun & Jemali, 2014). تجزیه و تحلیل زمین و لندفرم‌ها به همراه اطلاعات داده‌های خاک و زمین‌شناسی سطحی، به درک توپوگرافی منطقه کمک می‌کند و مناسب‌ترین مکان‌ها را برای استفاده‌های گوناگون زمین، تعیین می‌کند. فرم زمین (Landform) اصطلاح کلی برای اشکال مختلف سطح زمین است (Mokarram & Sathyamoorthy, 2018). اشکال زمین، به عنوان یکی از مهم‌ترین اجزای محیط جغرافیای فیزیکی (Summerfield, 2014) هسته اصلی پژوهش‌های جغرافیایی را تشکیل می‌دهد (Xiong, Tang, Yang & Li, 2021). هر شکل زمین حاوی اطلاعات جغرافیایی زیادی در مورد محیط طبیعی، منابع اکولوژیکی و فعالیت‌های انسانی است (Du et al., 2019). انواع مختلف اشکال زمین تحت تأثیر نیروهای درونی مانند هیدرولوژیکی، زمین‌شناسی و اکولوژیکی شکل گرفته‌اند (Evans, 2012). در علوم زمین بسیار مورد توجه قرار گرفته است زیرا دامنه کاربرد گسترده‌ای دارد؛ از جمله این کاربردها می‌توان به تهیه نقشه سنگ‌شناسی، پیش‌بینی ویژگی‌های خاک و تهیه نقشه پوشش گیاهی و کشاورزی دقیق اشاره کرد (Piffner & Kuhni, 2003; Florinsky, 2003; Eilers, Manning & Fuller, 2002).

اصل طبقه‌بندی زمین‌ریخت‌ها باید به گونه‌ای باشد که نه تنها انواع مختلف این شکل‌های زمین را شناسایی و دسته‌بندی کند و تنوع ساختار فضایی آن‌ها را نمایش دهد، بلکه بتواند دلایل شکل‌گیری آن‌ها را هم توضیح دهد. به این معنا که باید مشخص کند این زمین‌ریخت‌ها چگونه و تحت تأثیر چه عواملی، مانند نیروهای خارجی مثل فرسایش، باد، آب یا فعالیت‌های انسانی، در طی زمان و در مکان‌های مختلف به وجود آمده‌اند و تغییر کرده‌اند. این رویکرد به درک عمیق‌تر ما از فرآیندهای زمین‌شناسی کمک می‌کند (Zhang et al., 2020). ساختار اشکال زمین در مقیاس‌های مختلف به راحتی قابل فهم نیست و از نظر مقیاس، عمومیت ندارد و بین مناطق مختلف مطالعه تفاوت دارد. بافت زمین، که یکی از اجزای سطح اشکال زمین است، ویژگی‌های خاص و منحصر به فردی را برای اشکال زمین ایجاد کرده است (Shang et al., 2020; Trevisani & Rocca, 2015). طبقه‌بندی اشکال زمین که شامل شناسایی و تقسیم سطح زمین به انواع مختلف اشکال زمین می‌شود، اساس و اولین گام در نقشه‌برداری ژئومورفولوژی است (Mokarram & Sathyamoorthy, 2018).

در سال‌های اخیر، با بهره‌گیری از منابع داده‌های مختلف مانند مدل رقومی ارتفاع (DEM)، روش‌های سنتی به تدریج با روش‌های خودکار مختلف، به ویژه تکنیک‌های طبقه‌بندی رقومی عوارض زمین، جایگزین شده‌اند (Draguț & Eisank, 2011). با توسعه روش‌های کسب داده‌های DEM، طبقه‌بندی عوارض زمین با استفاده از DEM به دلیل دقت بالا و طرح طبقه‌بندی منطقی‌اش، به یک تکنیک اصلی و نقطه داغ در طبقه‌بندی عوارض زمین تبدیل شده است (Xiong, Zhu, Zhang & Tang, 2018). تاکنون، دو تکنیک اصلی برای تشخیص فرم زمین را می‌توان به عنوان روش‌های مبتنی بر پیکسل و مبتنی بر شیء نتیجه‌گیری کرد (Li, Xiung, Tang & Strobl, 2020). در رویکرد مبتنی بر پیکسل، فرم زمین به عنوان یک واحد مقیاس منطقه‌ای، از نظر

روابط توپولوژیکی، اطلاعات مورفولوژیکی و ساختار فضایی آن در نظر گرفته نمی‌شود (Cao, Fang, Yao & Xiong, 2020). روش مبتنی بر شیء که نسبت به انواع مختلف فرم‌های زمین حساس است، بر اساس ناپیوستگی‌های مورفولوژیکی، رویکرد محبوب دیگری است و به‌طور گسترده در زمینه‌های مختلف مورد استفاده قرار گرفته است (Verhagen & Dragu, 2012).

تشخیص شکل زمین مبتنی بر آبخیز به تدریج به نقطه جدیدی در زمینه تشخیص شکل زمین تبدیل شده است و پتانسیل کافی و عملکرد خوبی را در مطالعات مرتبط نشان داده است. شناسایی لندفرم‌های مختلف در یک منطقه یا حوضه آبریز و تهیه نقشه در بازه زمانی مختلف و تحلیل روند تغییرات آنها از جمله کاربردهای اختصاصی تصاویر ماهواره‌ای است. در امر مدیریت محیط، معمولاً ارزیابی ماهیت بلایای طبیعی، منابع طبیعی و به ویژه نحوه توزیع و تغییرات آنها برحسب زمان، کاربرد نقشه لندفرم و مطالعات ژئومورفولوژیکی را ضروری می‌سازد. مطالعاتی در این رابطه انجام شده ولی اینکه دقیقاً بحث لندفرم بر فرسایش در سامانه GEE اندک بود؛ که می‌توان به این موارد داخلی و خارجی اشاره کرد: کرمی و همکاران (Karami, Mokhtari & Ahmadi, 2023) به بررسی نقش لندفرم‌ها در میزان فرسایش خاک حوضه آبریز زون‌چای پرداختند. نتایج آنها نشان داد که بیش‌ترین فرسایش در مجموع دره‌ها و بریدگی‌های واقع بر ارتفاعات و دامنه‌ها با مساحت ۹۴/۲۷ کیلومتر مربع و سپس سستیغ‌های مرتفع و قله کوه‌ها با ۸۹/۲۱ کیلومتر مربع اختصاص دارد. عابدینی و صادقی (Abedini & Sadeghi, 2024) به بررسی فرسایش در حوضه مردق چای با استفاده از مدل RUSLE در سامانه GEE پرداختند. به این نتیجه رسیدند که میزان فرسایش در مناطق بالادست حوضه که میزان بارش بالا و پوشش گیاهی کم‌تر بوده فرسایش بیش‌تر بوده است. مطالعه‌ای توسط سنتانی و همکاران (Sentani, Niam & Boogaard, 2024) در مورد بررسی احتمال فرسایش با استفاده از روش RUSLE و پلتفرم (GEE) در حوضه آبخیز تونتانگ اندونزی انجام شد. این پژوهش از داده‌های متنوعی شامل داده‌های بارش (CHIRPS)، نقشه‌های خاک (Open Land Map)، تصاویر ماهواره‌ای (Sentinel-2) و مدل‌های توپوگرافی (SRTM) برای برآورد پارامترهای مدل RUSLE بهره برد. نتایج نشان داد که فرسایش خاک در حوضه تونتانگ طی سال‌های ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۱ عمدتاً در سطح متوسط بوده و مناطق با فرسایش شدیدتر در بخش‌های زیرحوضه‌های سنجوبو، روپنینگ^۱ و توتانگ هیلیر^۲ مشاهده شده‌اند. به‌ویژه، زیرحوضه روپنینگ بیش‌ترین نرخ فرسایش (تا حدود ۴۰ تن در هکتار در سال) را به دلیل عوامل انسانی و تغییرات کاربری زمین تجربه کرده است. استفاده از پلتفرم GEE در این مطالعه، امکان تحلیل و تجسم دقیق داده‌های جغرافیایی و فضایی را فراهم آورده است. یکی دیگر از مطالعات برجسته در زمینه ارزیابی فرسایش خاک، تحقیق انجام‌شده توسط سود و همکاران (Sud et al., 2024) است که به بررسی فرسایش خاک در حوضه آبخیز ستلج با استفاده از مدل RUSLE و پلتفرم Google Earth Engine پرداخته است. این مطالعه از روش‌های نوین سنجش از دور و تحلیل جغرافیایی برای برآورد عوامل اصلی RUSLE استفاده کرده است. نتایج نشان دادند که ۹۲ درصد از منطقه مطالعه با فرسایش شدید مواجه است و میانگین فرسایش سالانه برابر با ۱۰۷۴۰ تن در هکتار در سال بوده است. این تحقیق روش‌شناسی جامعی برای تحلیل‌های بزرگ‌مقیاس ارلئه داده و بر اهمیت استفاده از داده‌های ابری برای مدیریت منابع طبیعی و کاهش اثرات فرسایش تأکید کرده است.

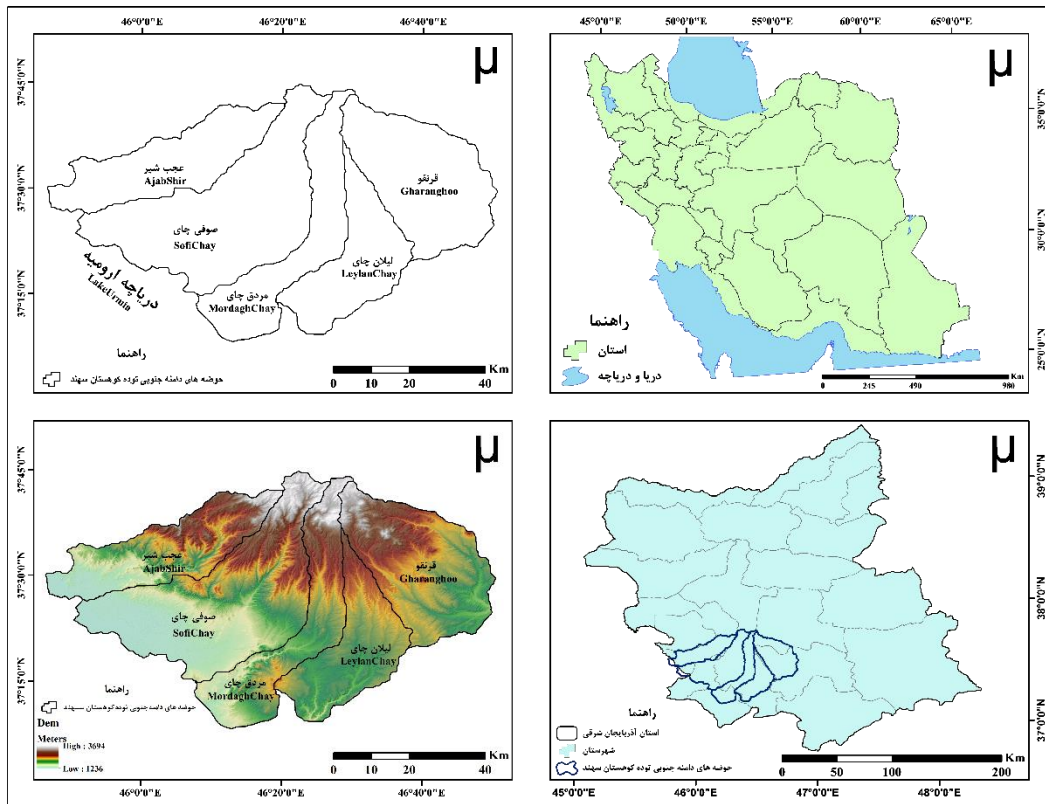
در منطقه خاک سیاه (یان‌شو، چین) به دلیل فعالیت‌های طبیعی و انسانی شدید، دچار فرسایش پیچیده‌ای شده که منجر به تخریب خاک و تأثیرات منفی زیست‌محیطی و کشاورزی شده است. گائو و همکاران (Gao et al., 2024) به مطالعه ارزیابی دقیق فرسایش خاک، با استفاده از فناوری رادار تداخل‌سنجی (InSAR) و الگوریتم‌های یادگیری ماشین در پلتفرم Google Earth Engine در این منطقه پیشنهاد دادند. این روش امکان پایش در مقیاس منطقه‌ای با دقت میلی‌متری را فراهم می‌آورد. همچنین، آسیب‌پذیری منطقه‌ی مطالعه (شهرستان یان‌شو، چین) با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی ارزیابی شده است.

نتایج نشان می‌دهند که در پنج‌سال گذشته، تغییرشکل خاک منفی بوده و عوامل مؤثر شامل فرسایش آب و یخ‌زدگی-ذوب‌شدن است. ۷۳/۳٪ از منطقه مستعد فرسایش است، به‌ویژه در مناطق رودخانه‌ای، ارتفاعات بالا و شیب‌های تند. پوشش گیاهی مناسب می‌تواند خطر فرسایش را کاهش دهد. این روش قابلیت گسترش برای پایش فرسایش خاک در مناطق وسیع‌تر را دارد و می‌تواند به استراتژی‌های حفاظت از خاک‌های کشاورزی کمک کند.

در این پژوهش از سامانه GEE برای استخراج لندفرم‌ها و همچنین محاسبه فرسایش با استفاده از مدل **RUSLE** استفاده شد. که می‌توان گفت جزء اولین کارهایی است که در داخل ایران با استفاده از این سامانه متن باز قدرتمند انجام شده است. به همین دلیل شاید امکان خطا در بعضی از نقشه‌ها باشد. سامانه GEE که یک سامانه آنلایین و دارای داده‌های زیادی بوده برای انجام کار با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های موجود یکی از بهترین سامانه‌های متن باز و کدنویسی در زمینه علوم مکانی است. این تحقیق با معرفی استفاده از پلتفرم **Google Earth Engine (GEE)** در تحلیل تأثیر لندفرم‌ها بر فرسایش خاک، گامی مهم در ارتقا دقت و کارایی مدل‌سازی فرسایش در مقیاس‌های وسیع برداشته است. با استفاده از این سامانه، که دسترسی به مجموعه‌های عظیم داده‌های ماهواره‌ای و منابع اطلاعاتی متنوع را فراهم می‌آورد، برای اولین بار این توانمندی به‌کار گرفته شده تا فرسایش خاک در ارتباط با ویژگی‌های لندفرم‌های مختلف در مناطق گسترده ارزیابی شود. این مطالعه نه تنها در انتخاب روش جدید تحلیل، بلکه در کاربرد عملی GEE برای مدل‌سازی فرسایش خاک با استفاده از داده‌های فضایی دقیق و به‌روز است، که امکان انجام تحلیل‌های مکانی-زمانی پیشرفته را به‌طور چشمگیری تسهیل کرده است.

منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه در این پژوهش حوضه‌های دامنه جنوبی توده کوهستان سهند است. حوضه قلعه چای که از سهند سرچشمه گرفته و در نهایت وارد حوضه دریاچه ارومیه می‌شود. حوضه صوفی چای که سد علویان نیز بر روی این حوضه احداث شده است از شهرستان‌های مراغه و بناب عبور کرده تا در نهایت وارد حوضه دریاچه ارومیه می‌شود. حوضه آبخیز مردق چای پس از سرچشمه گرفتن از کوهستان سهند، از شرق شهرستان مراغه عبور می‌کند، سپس وارد شهرستان ملکان شده و در نهایت به حوضه دریاچه ارومیه می‌ریزد. حوضه لیلان چای نیز وارد رودخانه زرینه رود می‌شود و بخشی از حوضه قرنقو که در قسمت جنوبی کوهستان سهند قرار گرفته است محدوده مورد مطالعه در این پژوهش هستند. میانگین ارتفاعی این حوضه‌ها برابر با ۱۸۷۵ متر، بالاترین نقطه ارتفاعی ۳۹۶۴ و کم‌ترین نقطه ارتفاعی ۱۲۳۶ متر است (DEM SRTM 30m). مساحت کل حوضه‌های مورد مطالعه برابر با ۳۸۲۱/۴۱ کیلومتر مربع بوده است (شکل ۱).



شکل ۱- محدوده مورد مطالعه حوضه‌های دامنه جنوبی توده کوهستان سهند
Fig.1. Study area, in the south slopes of Sahand mountain range

روش تحقیق

برای طبقه‌بندی لندفرم‌های حوضه‌های دامنه جنوبی توده کوهستان سهند از یک مدل چند مقیاسه (MTPI) استفاده شد. این مدل توسط تئوبالد و همکاران (۲۰۱۵) به کار گرفته شد؛ با استفاده از نقشه‌های حاصل از مدل TPI و نقشه‌های ترکیب شده TPI با سنگ‌شناسی و نقشه‌های تنوع فیزیوگرافی برای تولید نقشه‌های مرتبط با محیط زیست و سازگاری موجودات زنده با آب و هوا را تولید کردند. شالوده این مدل بر پایه مدل TPI و نقشه سایه و روشن متأثر از زاویه تابش خورشید، که شکل و فرم پدیده‌های ژئومورفولوژی را در یک منطقه نشان می‌دهند، پایه‌گذاری شده است. شاخص موقعیت توپوگرافی TPI نشان‌دهنده ارتفاع هر سلول در یک مدل رقمی ارتفاعی DEM که نسبت به میانگین ارتفاع سلول‌های اطراف آن سلول در یک شعاع مشخص، مورد بررسی قرار می‌گیرد؛ یا به عبارتی اختلاف بین ارتفاع هر سلول نسبت به میانگین ارتفاع سلول‌های اطراف آن می‌باشد برای محاسبه شاخص موقعیت توپوگرافی TPI از رابطه‌های (۱ و ۲) استفاده می‌شود (Sepahvand, Ahmadi, Nazari Samani & FeyzNiya, 2017).

$$TPI = Z_0 - \bar{Z} \quad (1)$$

$$Z = \frac{1}{n_R} \sum_{i \in R^Z} i \quad (2)$$

که در آن \bar{Z} ارتفاع نقطه مورد بررسی، Z ارتفاع میانگین نقاط حاشیه، n تعداد نقاط اطراف شعاع تعیین شده برای بررسی نقاط همسایه است مطابق (رابطه ۱ و رابطه ۲) مقادیر TPI می‌تواند دارای سه حالت منفی، مثبت و صفر باشد مقادیر مثبت نشان می‌دهند که ارتفاع نقطه مرکزی بیشتر از میانگین ارتفاع نقاط اطرافش است (تپه‌ها و کوه‌ها)، مقادیر منفی نشان می‌دهند که ارتفاع نقطه

مرکزی کمتر از میانگین ارتفاع نقاط اطرافش است (دره‌ها) و مقادیر صفر یا نزدیک به صفر و شیب کمتر از ۵ درجه باشد، نشان دهنده مناطق هموار (دشت‌ها) است.

در این پژوهش از سامانه (GEE) برای برآورد فرسایش خاک با استفاده از مدل RUSLE استفاده شده است. عوامل مختلفی از جمله فرساینده‌گی بارش-رواناب (R)، فرسایش‌پذیری خاک (K)، طول شیب (L)، شیب زمین (S)، مدیریت کشت (C) و روش‌های حمایتی حفاظت از خاک (P) با استفاده از لایه‌های استخراج‌شده از تصاویر ماهواره‌ای و مجموعه داده‌های محیطی ترکیب شدند. فرساینده‌گی بارش (R) بر اساس داده‌های بارش بلندمدت تعیین شد. فرسایش‌پذیری خاک (K) از طریق GEE و با در نظر گرفتن انواع خاص خاک برای حوضه‌های دامنه جنوبی توده کوهستان سهند برآورد شد. عامل LS، مدیریت کشت (C) و روش‌های حمایتی حفاظت از خاک (P) با استفاده از GEE و داده‌های ماهواره‌ای محاسبه شدند. در این پژوهش همچنین شاخص تفاوت نرمال‌شده پوشش گیاهی (NDVI) را در محاسبه عامل پوشش و مدیریت (C) استفاده شد، تا تغییرات فصلی در پوشش گیاهی را در نظر گرفته باشد. شیب زمین به‌عنوان یک عامل کلیدی در نظر گرفته شد. روش‌شناسی مبتنی بر GEE درک فضایی و دقیقی از پتانسیل فرسایش خاک در سراسر حوضه‌های دامنه جنوبی توده کوهستان سهند فراهم کرد و بر قابلیت گسترش، کارایی و دقت در مدیریت داده‌های جغرافیایی مقیاس بزرگ برای مدل‌سازی فرسایش خاک تأکید داشت. نتایج این تحقیق بینش‌هایی برای اجرای شیوه‌های مدیریت پایدار اراضی در منطقه فراهم می‌آورد.

مدل RUSLE

برای حوضه‌های دامنه جنوبی توده کوهستان سهند، فرسایش خاک با استفاده از تکنیک‌های مدل RUSLE محاسبه شد. مدل فرسایش RUSLE میانگین سالانه از دست دادن خاک در طول زمان را پیش‌بینی می‌کند که ناشی از جریان سطحی از شیب‌های میدانی در شرایط زراعی خاص و رژیم‌های کنترلی، همچنین در مراتع است. رابطه (۳)، روش RUSLE را به صورت فنی نشان می‌دهند.

$$A = R * K * LS * C * P \quad (3)$$

A میزان خاک فرسایش یافته (تن در هکتار در سال)، R عامل فرساینده‌گی بارش-رواناب، K عامل فرسایش‌پذیری خاک، LS طول شیب همراه با درجه شیب، C عامل مدیریت پوشش گیاهی، P عامل حفاظت خاک (Petito et al., 2022).

عامل فرساینده‌گی باران (R)

عامل فرساینده‌گی بارش (R) نقش کلیدی در تأثیرگذاری بر پتانسیل فرسایش خاک ایفا می‌کند. شدت بارندگی یکی از عوامل تعیین‌کننده اصلی فرسایش خاک است (Nam, Lee, Chung & Jeong, 2014). فرسایش سطحی و شیاری که اغلب به‌واسطه جریان رواناب شدید ایجاد می‌شود، با افزایش نرخ بارندگی و اندازه بزرگ‌تر قطرات باران تشدید شده و باعث تسریع در جدایش ذرات خاک می‌گردد (Shen, Zheng, Wen, Han & Hu, 2016). برای محاسبه R، از داده‌های بارندگی ماهانه در بازه‌های ۲۰ ساله (۲۰۲۱-۲۰۰۱) استفاده شده است. رابطه (۴) به‌طور گسترده‌ای توسط پژوهشگران در سطح جهانی مورد استفاده قرار گرفته است (Parveen & Kumar, 2012).

$$R = 79 + 0.363 \times P \quad (4)$$

در این معادله، R نمایانگر عامل فرساینده‌گی بارش (MJ mm ha⁻¹ h⁻¹/yr) و P نشان‌دهنده بارش سالانه (میلی‌متر) است (Diodato, 2004).

عامل فرسایش پذیری خاک (K)

عامل فرسایش خاک (K) نقش حیاتی در ارزیابی آسیب پذیری ذاتی خاک نسبت به فرسایش ناشی از بارش و رواناب ایفا می کند (Musa, Anijofor, Obasa & Awwevuruvwe, 2017). این عامل به ویژگی های مختلف خاک از جمله خصوصیات کانی شناسی، فیزیکی، شیمیایی و مورفولوژیکی وابسته است. میزان از دست دادن خاک را به ازای هر واحد انرژی فرسایشی ناشی از بارندگی، در شرایط مرجع یک قطعه زمین استاندارد با خاک برهنه و تمیز، شیب ۹٪ و طول ۲۲ متر محاسبه می کند. در این مطالعه که در حوزه های دامنه جنوبی توده کوهستان سهند انجام شده است، از تحلیل های جغرافیایی مبتنی بر ابر با استفاده از پلتفرم GEE برای تخمین عامل K بهره گرفته شد. نقشه های انواع خاک و بافت خاک حوزه های دامنه جنوبی توده کوهستان سهند استفاده شد (Panagos, Meusbarger, Ballabio, Borrelli & Alewell, 2014).

عامل توپوگرافی (LS)

عامل LS، که یکی از اجزای کلیدی در ارزیابی نرخ فرسایش خاک است، طول شیب (L) و شدت شیب (S) را در یک شاخص واحد ادغام می کند (Das, Bora & Das, 2022). در حالی که عامل L تأثیر طول شیب بر فرسایش را با در نظر گرفتن فاصله از نقطه آغاز رواناب تا ناحیه رسوب گذاری محاسبه می کند، عامل S بازتابی از تأثیر شدت شیب بر فرسایش خاک است.

$$LS = (\text{Flow Accumulation} \times \text{Cell Size}/0.0896) 0.4 \times (\sin\text{Slope}/0.0896) 1.3 \quad (\delta)$$

در رابطه (δ)، LS نمایانگر ترکیب عامل شدت شیب و طول شیب است، اندازه سلول یا وضوح مدل ارتفاعی دیجیتال (DEM) به عنوان Cell Size مشخص می شود، و زاویه شیب به صورت sinSlope تعریف می گردد (Zhang et al., 2017). تجمع جریان (Flow Accumulation)، که جزء اساسی در محاسبه عامل LS است، مساحت کل منطقه بالادستی که به هر سلول مدل ارتفاعی جریان می یابد را کمی سازی می کند. این پارامتر پتانسیل جریان آب و فرسایش را در نواحی خاص نشان می دهد. مقادیر بالاتر تجمع جریان با افزایش پتانسیل رواناب و حساسیت بیشتر به فرسایش همراه است و اطلاعات مهمی برای اولویت بندی اقدامات کنترل فرسایش در حوزه آبخیز یا مناطق مشابه فراهم می کند.

عامل مدیریت پوشش گیاهی (C)

عامل پوشش زمین (C) وابسته به نوع کاربری زمین بوده و به طور قابل توجهی تحت تأثیر فعالیت های انسانی برای کاهش فرسایش قرار دارد (Ozsahin, Dura & Eroglu, 2018). محاسبه عامل پوشش زمین در یک حوزه آبخیز بزرگ به دلیل تنوع مکانی و پیچیدگی الگوهای پوشش زمین می تواند چالش برانگیز باشد.

عامل حفاظت خاک (P)

عامل اقدامات حفاظتی به درصد فرسایش خاک در مقایسه با کشت در جهت شیب پس از اتخاذ اقدامات حفاظتی خاک و آب اشاره دارد. مقدار P بین ۰ تا ۱ متغیر است. اگر مقدار ۰ باشد، منطقه تحت تأثیر فرسایش خاک قرار ندارد؛ اگر مقدار ۱ باشد، منطقه هیچ گونه اقدام حفاظتی خاک و آب را تجربه نکرده است (Zeng et al., 2017). بررسی میدانی اقدامات حفاظتی خاک و آب زمان بر و پرهزینه است. بنابراین، در این مطالعه تخمین مقدار P با اختصاص مقادیر به انواع کاربری زمین انجام شده است (Lee, Ahn & Im, 2017). مدل RUSLE عامل P را برای نشان دادن تأثیر ترکیبی پوشش زمین، اقدامات حمایتی، نوع کاربری زمین، طول شیب، و تنظیمات سفارشی بر فرسایش خاک در نظر می گیرد. از قابلیت های Google Earth Engine (GEE) برای تحلیل های مقیاس پذیر و مبتنی بر سنجش از دور استفاده می شود تا این روش شناسی را در چارچوب GEE تطبیق دهند. در GEE، عامل P با تعریف یک

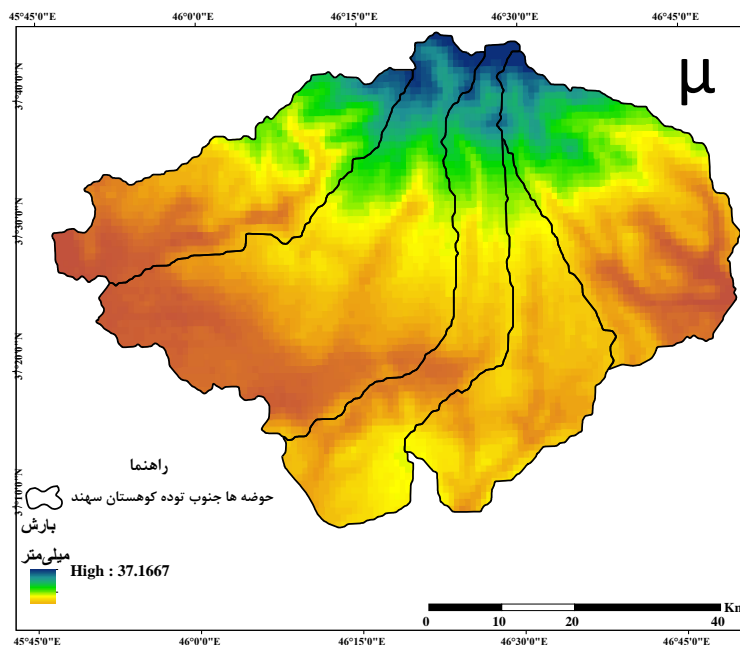
تابع برای استخراج باندها یا ویژگی‌های مرتبط با پوشش زمین (C)، اقدامات حمایتی (M)، کاربری زمین (L)، طول شیب (S) و تنظیمات سفارشی محاسبه می‌شود. با اعمال فرمول **RUSLE** به صورت پیکسلی، مجموعه‌های تصویری مربوط به هر عامل ترکیب شده و یک تصویر برای عامل P تولید می‌شود. قابلیت‌های مقیاس‌پذیر و سنجش از دور GEE کارایی پردازش داده‌های جغرافیایی در مقیاس بزرگ را افزایش داده و امکان ارزیابی جامع حساسیت به فرسایش خاک را فراهم می‌کند. اطمینان از وجود مجموعه‌های تصویری و باندهای لازم در محیط GEE برای محاسبات دقیق عامل P بسیار مهم است. هدف نهایی این است که با استفاده از این رویکرد مبتنی بر GEE، تصمیم‌گیری آگاهانه در مدیریت زمین صورت گیرد، عامل P به حداقل برسد، و اقدامات پایدار برای کاهش فرسایش خاک ترویج شود.

نتایج و بحث

برآورد میزان فرسایش خاک با استفاده از مدل **RUSLE**

عامل فرساینده‌گی باران (R)

توزیع مکانی عامل فرساینده‌گی بارش با استفاده سامانه GEE استخراج شد. در این پژوهش با استفاده از داده‌های بارش (Open LandMap Precipitation) در سامانه GEE نقشه میانگین بارش سالانه تهیه شد. بیش‌ترین بارش منطقه در مناطق بالادست حوضه‌های مورد مطالعه که برابر با ۳۷/۱۶ ملی‌متر و کم‌ترین میزان بارش برابر با ۱۹/۳۳ میلی‌متر در مناطق دشت و پایین دست حوضه‌های دامنه‌های مورد مطالعه مشاهده شد (شکل ۲).

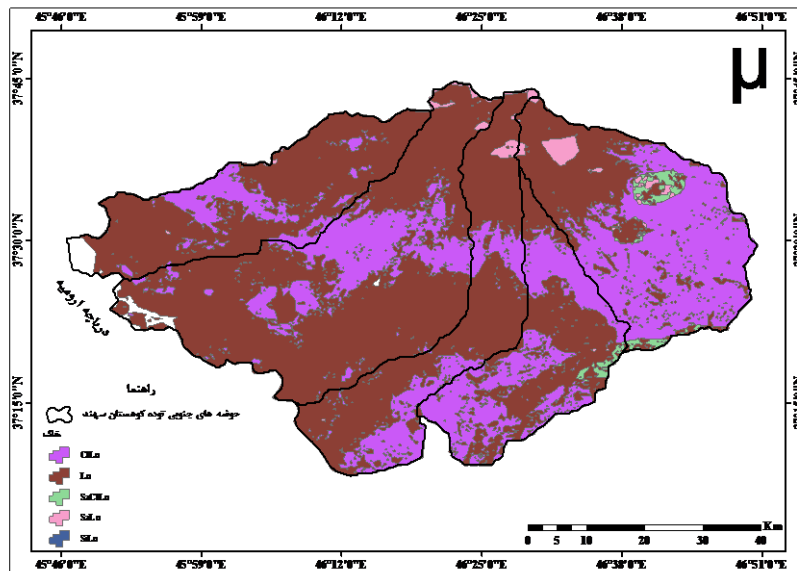


شکل ۲- نقشه عامل R در حوضه‌های دامنه جنوبی توده کوهستان سهند

Fig.2. R-factor map in the southern slope basins of the Sahand mountain range

عامل فرسایش پذیری خاک (K)

در این پژوهش از داده‌های خاک که در ۶ کلاس بر اساس عمق (۰، ۱۰، ۳۰، ۶۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ سانتی متر) در سامانه GEE موجود است از باند ۰ که در ۱۲ کلاس تهیه شده و خاک‌های سطحی را شامل می‌شود استفاده شد (شکل ۳).



شکل ۳- نقشه عامل K در حوضه‌های دامنه جنوبی توده کوهستان سهند

Fig.3. K-factor map in the southern slope basins of the Sahand mountain range

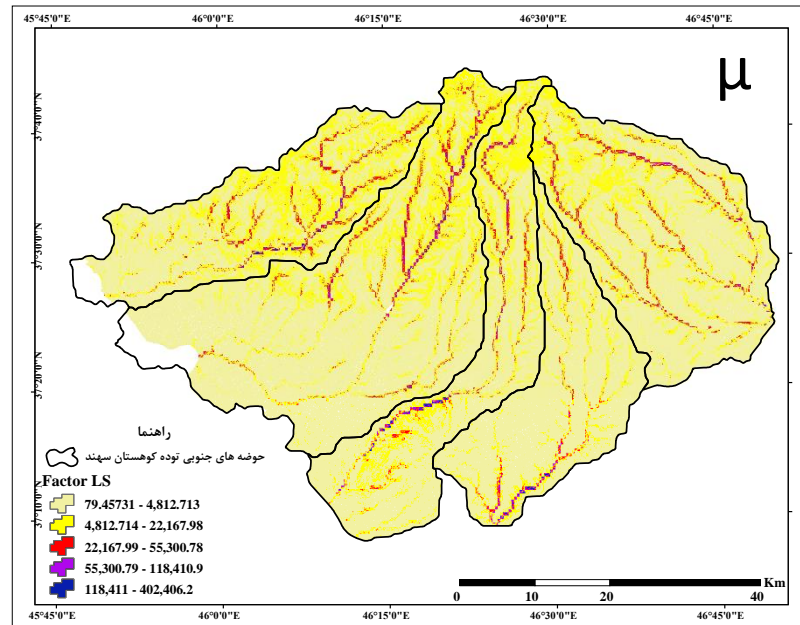
عامل توپوگرافی (LS)

بر اساس نقشه عامل LS حداقل مقدار شاخص برابر با $402/40$ می‌باشد که، بیشتر مناطق با شیب‌های کم و هموار را شامل می‌شود. حداکثر آن نیز برابر با $402/40$ بوده که مناطق با دامنه‌های شیب‌دار و پرتگاه‌ها را شامل می‌شود. شکل ۴ تصویر گرفته شده توسط نگارندگان می‌باشد (شکل ۵).



شکل ۴- نمایی از منطقه پرشیب و پوشش گیاهی تنک در محدوده موزد مطالعه

Fig.4. Steep slopes with sparse vegetation within the study area



شکل ۵- نقشه عامل LS در حوضه‌های دامنه جنوبی توده کوهستان سهند

Fig.5. LS-factor map in the southern slope basins of the Sahand mountain range

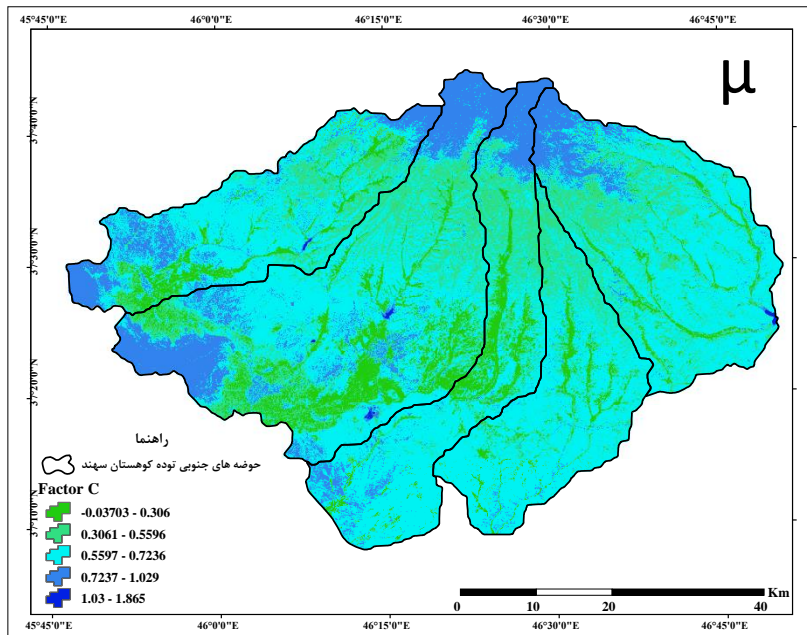
عامل مدیریت پوشش گیاهی (C)

مقدار این عامل در حوضه‌های دامنه جنوبی توده کوهستان سهند بین 0.03 تا $1/86$ متغیر بوده است که میانگین آن برابر با 0.58 بوده است. شکل ۷ نقشه عامل C را در محدوده مورد مطالعه نشان می‌دهد. که بیش‌ترین مقدار این پارامتر در مناطق بالادست حوضه‌ها و مناطق بدون پوشش گیاهی یا دارای پوشش گیاهی ناچیز بوده است و کم‌ترین آن نیز در مناطق بوده که دارای پوشش گیاهی متراکم است. همچنین شکل شماره ۶ تصویر واقعی محدوده مورد مطالعه را نشان می‌دهد که پوشش گیاهی در مناطق بالادست بسیار تنک می‌باشد.



شکل ۶- پوشش گیاهی تنک در مناطق بالا دست محدوده مورد مطالعه

Fig.6. Sparse vegetation in the upper areas of the study area



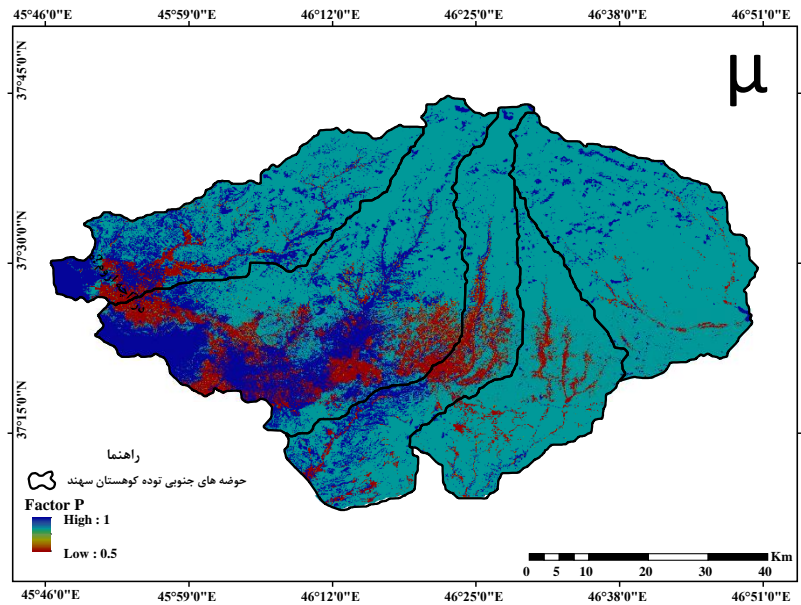
شکل ۷- نقشه عامل C در حوضه‌های دامنه جنوبی توده کوهستان سهند

Fig.7. C-factor map in the southern slope basins of the Sahand mountain range

عامل عملیات حفاظتی خاک (P)

این عامل از طریق طبقه بندی نقشه کاربری اراضی تهیه گردید. مقادیر این عامل بین صفر تا ۱ می‌باشد و نقشه شکل ۸ این

عامل را نشان می‌دهد.

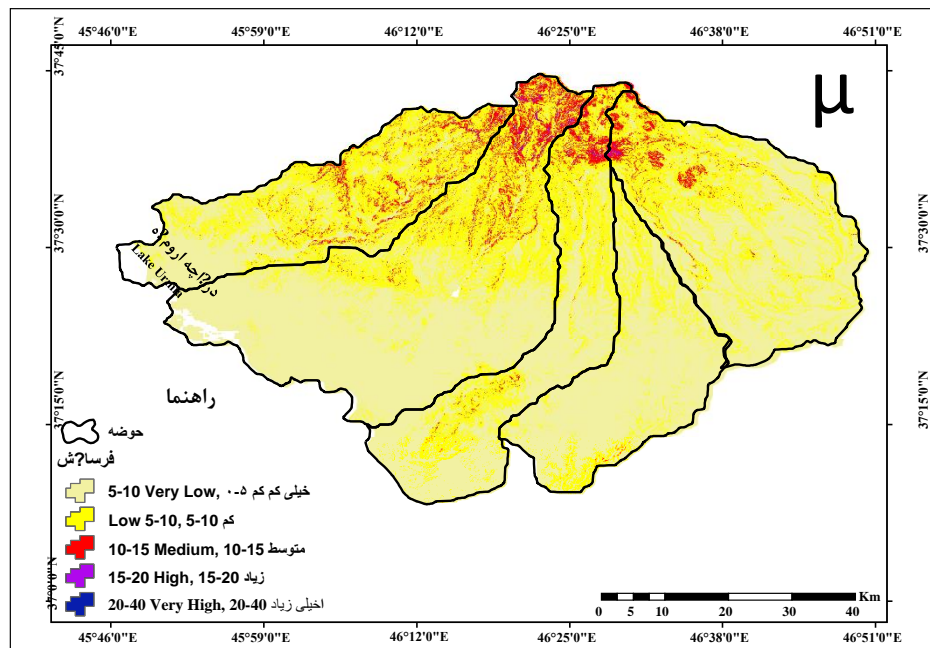


شکل ۸- نقشه عامل P در حوضه‌های دامنه جنوبی توده کوهستان سهند

Fig.8. P-factor map in the southern slope basins of the Sahand mountain range

فرسایش خاک

متوسط فرسایش خاک از طریق حاصل ضرب عامل فرساینده‌گی باران (R)، فرسایش‌پذیری خاک (K)، عامل توپوگرافی (LS)، عامل مدیریت پوشش گیاهی (C) و عامل عملیاتی حفاظتی خاک (P) با استفاده از مدل RUSLE در محیط سامانه GEE محاسبه شد که در شکل ۹ نشان داده شده است. مقادیر فرسایش خاک در محدوده مورد مطالعه بین ۰ تا ۴۰ تن در هکتار در سال در سطح یک پیکسل متغیر می‌باشد. نقشه فرسایش در ۵ کلاس خطر (بسیار کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد) طبقه‌بندی شده است. مساحت و درصد هر یک از کلاس‌های خطر در جدول ۱ ارائه شده است. براین اساس بخش عمده‌ای از حوضه ۶۲/۳۵ جزء طبقه فرسایشی خیلی کم می‌باشد. طبقات بعدی به ترتیب ۳۳/۱۹ درصد در طبقه کم، ۳/۹۹ درصد در طبقه متوسط، ۰/۴۲ درصد در طبقه زیاد و ۰/۰۳ درصد در طبقه فرسایشی خیلی زیاد قرار گرفته است. طبقات خیلی زیاد و زیاد منطبق بر دامنه‌های پرشیب، ارتفاعات و مناطقی که تجمع جریان آبراهه‌ها زیاد است را شامل می‌شود. طبقات متوسط، کم و خیلی کم نیز در دامنه‌های با شیب کم، مناطق هموار و دشت‌ها را شامل می‌شود (شکل ۹).



شکل ۹- نقشه فرسایش خاک در حوضه‌های دامنه جنوبی توده کوهستان سهند

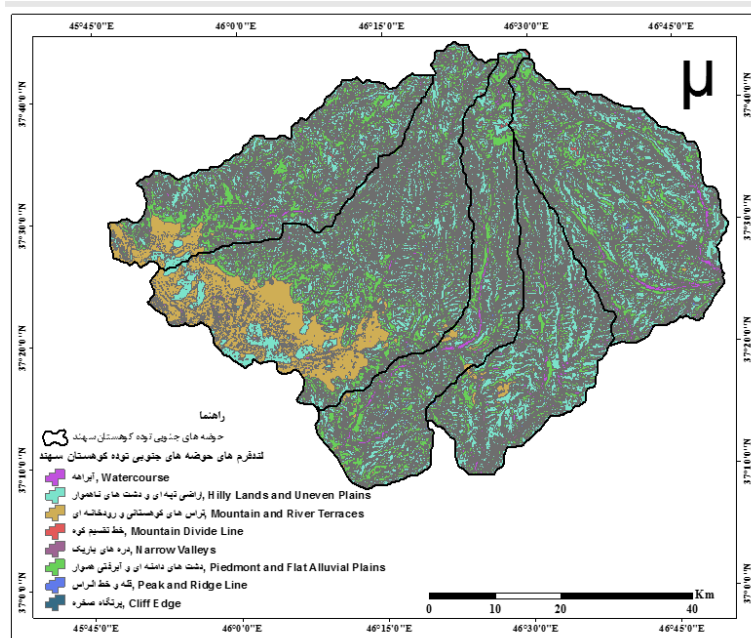
Fig.9. Soil erosion map in the southern slope basins of the Sahand mountain range

جدول ۱- مساحت و درصد مساحت طبقات فرسایش خاک براساس مدل RUSLE در حوضه‌های دامنه جنوبی توده کوهستان سهند
Table 1 - Area and percentage of soil erosion classes based on the RUSLE model in the southern slope basins of the Sahand mountain range

درصد مساحت Percentage of Area	مساحت (Km ²) Area	پهنه‌های فرسایش Erosion Zones	طبقات Classes
62.35	2364.49	خیلی کم Very Low	0-5
33.19	1258.62	کم Low	5-10
3.99	151.46	متوسط Medium	10-15
0.42	16.10	زیاد High	15-20
0.03	1.23	خیلی زیاد Very High	20-40

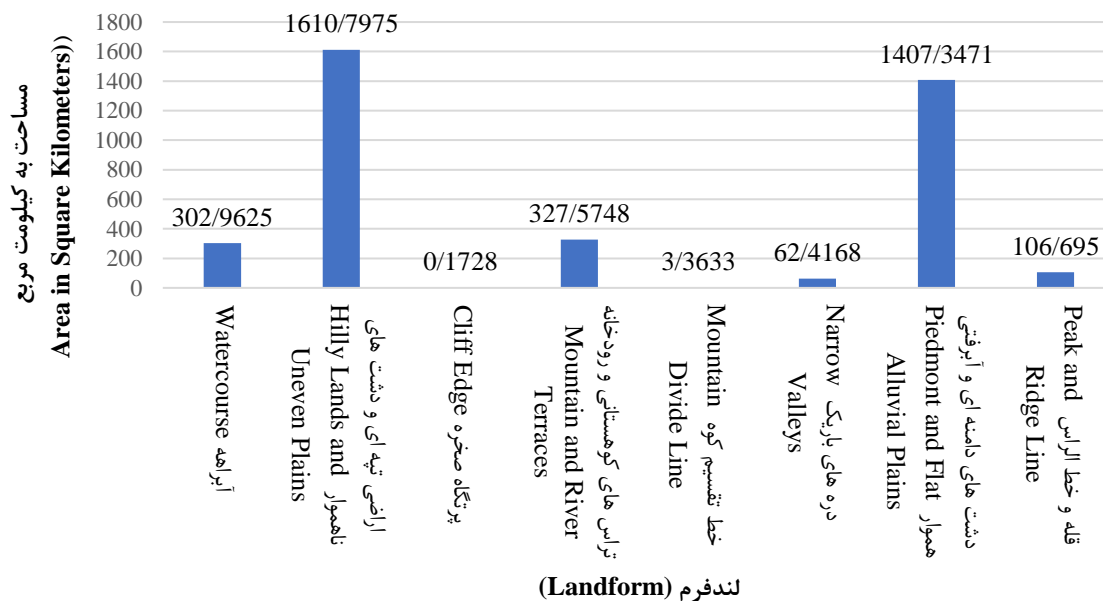
آشکارسازی لندفرم‌های حوضه‌های دامنه جنوبی توده کوهستان سهند

مجموعه داده ALOS Landform کلاس‌های شکل زمین را ارائه می‌کند که با ترکیب شاخص بار حرارتی پیوسته ALOS CHILI و شاخص موقعیت توپوگرافی چند مقیاسی ALOS MTPI ایجاد شده‌اند. این شاخص بر اساس داده‌های مدل رقومی ارتفاعی آلوس ۳۰ متری در سامانه GEE کد نویسی شده است به این منظور با استفاده از پروداکت لندفرم چند مقیاسه آلوس، برای حوضه‌های دامنه جنوبی توده کوهستان سهند کدنویسی این پروداکت انجام شد و نقشه لندفرم حوضه‌ها استخراج گردید برای طبقه‌بندی بهتر می‌توان در بین کلاس‌ها نیز طبقه‌بندی به صورت دستی انجام داد تا یک طبقه‌بندی بهینه برای چشم انداز منطقه ایجاد شود (Negahban & Mokarram, 2015). طبقه‌بندی مجدد با استفاده از کلاس‌های طبقه‌بندی نقشه تولید شده و ویژگی‌های ژئومورفولوژی حوضه‌ها در محیط نرم افزار ArcGIS شکل ۱۰ انجام شد تعداد هشت کلاس در این طبقه‌بندی مشخص شد که لندفرم‌های (اراضی تپه‌ای و دشت‌های مرتفع ناهموار) مربوط به شیب‌های بالایی و (تراس‌های کوهستانی، رودخانه‌ای و دره‌های باز) مربوط به شیب‌های پایینی حوضه‌های مورد مطالعه را پوشش داده‌اند. در این محدوده مورد مطالعه لندفرم اراضی تپه‌ای و دشت‌های ناهموار ۴۲/۱۵ درصد، دشت‌های دامنه‌ای و آبرفتی هموار ۳۶/۸۲ درصد، تراس‌های کوهستانی و رودخانه‌ای ۸/۵۷ درصد، آبراهه ۷/۹۲ درصد، قله و خط‌الرأس ۲/۷۹ درصد، دره‌های باریک ۱/۶۳ درصد، خط تقسیم کوه ۰/۰۸ درصد و پرتگاه و صخره ۰/۰۴ درصد را به خود اختصاص داده‌اند (شکل ۱۱).



شکل ۱۰- نقشه طبقه‌بندی لندفرم‌های حوضه‌های دامنه جنوبی توده کوهستان سهند

Fig.10. Landform classification map of the southern slope basins of the Sahand mountain range



شکل ۱۱- نمودار مساحت لندفرم‌های حوضه‌های دامنه جنوبی توده کوهستان سهند

Fig.11. Area chart of landforms in the southern slope basins of the Sahand mountain range

نتیجه‌گیری

این مطالعه به بررسی تأثیرات لندفرم‌ها بر فرسایش خاک با استفاده از مدل RUSLE و با بهره‌گیری از پلتفرم پیشرفته Google Earth Engine (GEE)، روش‌های نوینی برای ارزیابی و مدل‌سازی فرسایش خاک در مقیاس‌های وسیع ارائه داده است. نتایج تحقیق نشان داد که ویژگی‌های لندفرم، به‌ویژه شیب، ارتفاع و نوع پوشش گیاهی، تأثیر قابل توجهی بر شدت فرسایش خاک دارند. در این راستا، مناطق با شیب‌های تند و پوشش گیاهی ضعیف به‌طور مشخصی در معرض فرسایش بیشتری قرار داشتند. از جنبه‌های دیگر، استفاده از Google Earth Engine به‌عنوان یک ابزار قدرتمند برای پردازش داده‌های ماهواره‌ای و تحلیل‌های پیچیده، این امکان را فراهم آورد که به‌طور دقیق و در مقیاس وسیع، فرسایش خاک ارزیابی شود. این پلتفرم توانست تحلیل‌های زمانی و مکانی پیچیده را با دقت میلی‌متری انجام دهد و به‌ویژه در مناطقی که داده‌های زمینی کمیاب یا دسترسی به اطلاعات محدود بود، امکان ارزیابی دقیق فرسایش خاک را فراهم کند. استفاده از تکنیک‌های نوین و مدل RUSLE در این مطالعه به‌کار گرفته شد که به‌طور مؤثری در پیش‌بینی و شبیه‌سازی تغییرات فرسایش خاک در طول زمان کمک کرد.

یافته‌ها همچنین نشان داد که پوشش گیاهی به‌ویژه در مناطق با شیب‌های شدید، نقش مؤثری در کاهش فرسایش خاک ایفا می‌کند. در مناطقی با پوشش گیاهی سالم، میزان فرسایش خاک به‌طور قابل توجهی کمتر از نواحی با پوشش گیاهی ضعیف بود. این نکته بر اهمیت حفاظت از پوشش گیاهی و برنامه‌ریزی‌های کشاورزی و محیط‌زیستی برای جلوگیری از تخریب خاک تأکید می‌کند. نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهند که فرسایش خاک در برخی مناطق با شیب‌های تند و در نزدیکی رودخانه‌ها بیشتر است، و این امر از لحاظ مدیریتی اهمیت ویژه‌ای دارد. علاوه بر این، بررسی‌های پیش‌بینی‌ای که با استفاده از داده‌های موجود انجام شد، حاکی از افزایش ریسک فرسایش خاک در آینده، به‌ویژه در مناطق با تغییرات اقلیمی و مدیریت ناکافی منابع طبیعی است. این مطالعه علاوه بر ایجاد آگاهی درباره تأثیر لندفرم‌ها و پوشش گیاهی بر فرسایش خاک، نشان‌دهنده قابلیت‌های گسترده Google Earth Engine در تحلیل و مدل‌سازی فرسایش خاک به‌ویژه در مقیاس‌های وسیع و با دقت بالا است. این روش‌ها می‌توانند به‌طور مؤثر در توسعه استراتژی‌های مدیریت خاک و برنامه‌های حفاظتی برای مقابله با فرسایش خاک در مناطق آسیب‌پذیر به‌کار گرفته شوند. در نهایت، استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و مدل‌های تحلیلی در ترکیب با Google Earth Engine، مسیر جدیدی را برای پژوهش‌های آینده در زمینه ارزیابی و مدیریت فرسایش خاک و حفاظت از منابع طبیعی باز می‌کند. این روش‌ها می‌توانند به‌ویژه در مناطقی که داده‌های میدانی محدود یا دسترسی به مناطق مشکل است، جایگزینی مؤثر برای روش‌های سنتی ارزیابی فرسایش خاک باشند.

همچنین این نتیجه با نتایج آرخی و بارانی (Arekhi & Barani, 2022) مقایسه مدل RUSLE و EPM در برآورد فرسایش و عابدینی و همکاران (Abedini, Piroozi & Faal Naziri, 2023) بررسی اثرات تغییر کاربری اراضی بر فرسایش و کرمی و همکاران (Karami et al., 2023) نقش لندفرم و لیتولوژی در برآورد فرسایش خاک، منطبق می‌باشد. طبق نتایج این پژوهش، قابلیت سامانه GEE در استخراج لندفرم و محاسبه مدل RUSLE در برآورد میزان فرسایش خاک بصورت مفید و مؤثر می‌باشد و می‌تواند در اجرای عملیات آبخیزداری و حفاظت خاک توسط مسئولین مورد استفاده قرار گیرد.

سیاسگذاری

از کسانی که در تهیه داده‌ها و کلیه مسئولین محترم مجله که در مراحل تهیه و تنظیم محله زحمات بی‌شائبه‌ای را تقبل می‌فرمایند، کمال تشکر و قدردانی را می‌نمایم.

References

- Abedini, M., & Sadeghi, A. (2024). Zoning of Erosion Intensity Using the RUSLE Model in the GEE System Case Study: Mardaghchay Basin, East Azerbaijan). Paper presented at the Proceedings of the 10th Conference of the Iranian Geomorphology Association, Tehran, Iran.
- Abedini, M., Piroozi, E., & Faal Naziri, M. (2023). Investigating the Impacts of land use changes on soil erosion in Givi City using the MABAC multi-criteria decision-making model and Landsat satellite images (OLI-TM sensors). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 12(4), 1-26. [In Persian] <https://doi.org/10.22067/geoh.2022.73137.1121>
- Arekhi, S., & Barani, S. (2024). Comparison of EPM and RUSLE models in estimating erosion and sediment production using GIS (Case study: Chamgardalan watershed of Ilam province). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 13(2), 339-371. [In Persian] <https://doi.org/10.22067/geoh.2022.75260.1176>
- Cao, Z., Fang, Z., Yao, & Xiong, L. (2020). Loess Landform Classification Based on Random Forest. *Journal of Geo-Information Science*, 22(3), 452-463. <http://dx.doi.org/10.12082/dqxxkx.2020.190247>
- Das, S., Bora, P. K., & Das, R. (2022). Estimation of slope length gradient (LS) factor for the sub-watershed areas of Juri River in Tripura. *Modeling Earth Systems and Environment*, 8(1), 1171–1177. <https://doi.org/10.1007/s40808-021-01153-0>
- Diodato, N. (2004). Estimating RUSLE's rainfall factor in the part of Italy with a Mediterranean rainfall regime. *Hydrology and Earth System Sciences*, 8(1), 103–107. <https://doi.org/10.5194/hess-8-103-2004>
- Draguț, L., & Eisank, C. (2011). Automated object-based classification of topography from SRTM data. *Geomorphology*, 141, 21–33. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.12.001>
- Du, L., You, X., Li, K., Meng, L., Cheng, G., Xiong, L., & Wang, G. (2019). Multi-modal deep learning for landform recognition. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 158, 63–75. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.09.018>
- Evans, I. S. (2012). Geomorphometry and landform mapping: What is a landform? *Geomorphology*, 137(1), 94–106. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.09.029>
- Florinsky, I., Eilers, R., Manning, G., & Fuller, L. (2002). Prediction of soil properties by digital terrain modelling. *Environmental Modelling & Software*, 17(3), 295–311. [https://doi.org/10.1016/s1364-8152\(01\)00067-6](https://doi.org/10.1016/s1364-8152(01)00067-6)
- Gao, Y., Yang, J., Chen, X., Wang, X., Li, J., Azad, N., ... & He, H. (2024). Using advanced INSAR techniques and machine learning in Google Earth Engine (GEE) to monitor Regional Black Soil Erosion—A Case study of Yanshou County, Heilongjiang Province, northeastern China. *Remote Sensing*, 16(20), 3842. <https://doi.org/10.3390/rs16203842>

- Hoersch, B., Braun, G., & Schmidt, U. (2002). Relation between landform and vegetation in alpine regions of Wallis, Switzerland. A multiscale remote sensing and GIS approach. *Computers Environment and Urban Systems*, 26(2–3), 113–139. [https://doi.org/10.1016/s0198-9715\(01\)00039-4](https://doi.org/10.1016/s0198-9715(01)00039-4)
- Hua, T., Zhao, W., Liu, Y., & Liu, Y. (2019). Influencing factors and their interactions of water erosion based on yearly and monthly scale analysis: A case study in the Yellow River basin of China. *Nat. Hazards Earth*. <https://doi.org/10.5194/nhess-2019-122>
- Karami, F., & Bayati Khatibi, M. (2019). The Modeling of Soil Erosion and Prioritizing Sediment Production in Sattarkhan Dam Basin Using MUSLE and SWAT Models, *Hydrogeomorphology*, 6(18), 115-137. [In Persian] <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23833254.1398.6.18.7.6>
- Karami, F., Mokhtari, D., & Ahmadi, F. (2023). The role of landforms and lithology in the rate of soil erosion in Zonuzchay catchment. *Hydrogeomorphology*, 10(37), 1–24. [In Persian] <https://doi.org/10.22034/hyd.2023.53806.1660>
- Lee, E., Ahn, S., & Im, S. (2017). Estimation of soil erosion rate in the Democratic People's Republic of Korea using the RUSLE model. *Forest Science and Technology*, 13(3), 100–108. <https://doi.org/10.1080/21580103.2017.1341435>
- Li, S., Xiong, L., Tang, G., & Strobl, J. (2020). Deep learning-based approach for landform classification from integrated data sources of digital elevation model and imagery. *Geomorphology*, 354, 107045. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107045>
- Mokarram, M., & Sathyamoorthy, D. (2018). A review of landform classification methods. *Spatial Information Research*, 26(6), 647–660. <https://doi.org/10.1007/s41324-018-0209-8>
- Musa, J., Anijofor, S., Obasa, P., & Avwevuruvwe, J. (2017). Effects of soil physical properties on erodibility and infiltration parameters of selected areas in Gidan Kwano. *Deleted Journal*, 12(1), 46. <https://doi.org/10.4314/njtr.v12i1.8>
- Nam, K., Lee, D., Chung, S., & Jeong, G. (2014). Effect of rainfall intensity, soil slope and geology on soil erosion. *The Journal of Engineering Geology*, 24(1), 69–79. <https://doi.org/10.9720/kseg.2014.1.69>
- Negahban, S., & Mokarram, M. (2015). Landform Classification using Topography Position Index and relationship between it and characteristics of geology (Case Study: Hakan Watershed, Jahrom City). *Environmental Erosion Research*, 5(1), 75-89. [In Persian] <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.22517812.1394.5.1.5.1>
- Ozsahin, E., Duru, U., & Eroglu, I. (2018). Land Use and Land Cover Changes (LULCC), a key to understand soil erosion intensities in the Maritsa Basin. *Water*, 10(3), 335. <https://doi.org/10.3390/w10030335>
- Panagos, P., Meusburger, K., Ballabio, C., Borrelli, P., & Alewell, C. (2014). Soil erodibility in Europe: A high-resolution dataset based on LUCAS. *The Science of the Total Environment*, 479, 189–200. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.02.010>
- Parveen, R., & Kumar, U. (2012). Integrated Approach of Universal Soil Loss Equation (USLE) and Geographical Information System (GIS) for soil loss risk assessment in Upper South Koel Basin, Jharkhand. *Journal of Geographic Information System*, 04(06), 588–596. <https://doi.org/10.4236/jgis.2012.46061>
- Petito, M., Cantalamessa, S., Pagnani, G., Degiorgio, F., Parris, B., & Pisante, M. (2022). Impact of conservation agriculture on soil erosion in the annual cropland of the Apulia region (Southern Italy)

- based on the RUSLE-GIS-GEE framework. *Agronomy*, 12(2), 281. <https://doi.org/10.3390/agronomy12020281>
- Pfeffer, K., Pebesma, E. J., & Burrough, P. A. (2003). Mapping alpine vegetation using vegetation observations and topographic attributes. *Landscape Ecology*, 18(8), 759–776. <https://doi.org/10.1023/b:land.0000014471.78787.d0>
- Sentani, A., Niam, M. F., & Boogaard, F. (2024). Probability of erosion utilizing Google Earth engine and the RUSLE method in the Tuntang watershed. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 1321(1), 012001. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1321/1/012001>
- Sepahvand, A. R., Ahmadi, H., Nazari Samani, A. A., & FeyzNiya, S. (2018). Landforms classification by Topographic Position Index and assessment of the relation between landforms and lithological features. *Researches in Earth Sciences*, 9(1), 30-45. [In Persian] <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20088299.1397.9.1.3.8>
- Shang, R., Peng, P., Shang, F., Jiao, L., Shen, Y., & Stolkin, R. (2020). Semantic segmentation for SAR image based on texture complexity analysis and key superpixels. *Remote Sensing*, 12(13), 2141. <https://doi.org/10.3390/rs12132141>
- Shen, H., Zheng, F., Wen, L., Han, Y., & Hu, W. (2016). Impacts of rainfall intensity and slope gradient on rill erosion processes at loessial hillslope. *Soil and Tillage Research*, 155, 429–436. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.09.011>
- Sud, A., Sajan, B., Kanga, S., Singh, S. K., Singh, S., Durin, B., ... & Chand, K. (2024). Integrating RUSLE Model with Cloud-Based Geospatial Analysis: A Google Earth Engine Approach for Soil Erosion Assessment in the Satluj Watershed. *Water*, 16(8), 1073. <https://doi.org/10.3390/w16081073>
- Summerfield, M. A. (2014). *Global Geomorphology*. London: Routledge.
- Trevisani, S., & Rocca, M. (2015). MAD: robust image texture analysis for applications in high resolution geomorphometry. *Computers & Geosciences*, 81, 78–92. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2015.04.003>
- Verhagen, P., & Drăguț, L. (2012). Object-based landform delineation and classification from DEMs for archaeological predictive mapping. *Journal of Archaeological Science*, 39(3), 698–703. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2011.11.001>
- Wang, Z., & Su, Y. (2020). Assessment of soil erosion in the Qinba mountains of the southern Shaanxi province in China using the RUSLE model. *Sustainability*, 12(5), 1733. <https://doi.org/10.3390/su12051733>
- Xiong, L., Tang, G., Yang, X., & Li, F. (2021). Geomorphology-oriented digital terrain analysis: Progress and perspectives. *Journal of Geographical Sciences*, 31(3), 456–476. <https://doi.org/10.1007/s11442-021-1853-9>
- Xiong, L., Zhu, A., Zhang, L., & Tang, G. (2018). Drainage basin object-based method for regional-scale landform classification: a case study of loess area in China. *Physical Geography*, 1–19. <https://doi.org/10.1080/02723646.2018.1442062>
- Zawawi, A. A., Shiba, M., & Jemali, N. J. N. (2014). Landform classification for site evaluation and forest planning: integration between scientific approach and traditional concept. *Sains Malaysiana*, 43(3), 349–358. http://www.ukm.my/jsm/pdf_files/SM-PDF-43-3-2014/04%20Azita%20Ahmad.pdf

- Zeng, C., Wang, S., Bai, X., Li, Y., Tian, Y., Li, Y., ... & Luo, G. (2017). Soil erosion evolution and spatial correlation analysis in a typical karst geomorphology using RUSLE with GIS. *Solid Earth*, 8(4), 721–736. <https://doi.org/10.5194/se-8-721-2017>
- Zhang, H., Wei, J., Yang, Q., Baartman, J. E., Gai, L., Yang, X., ... & Geissen, V. (2017). An improved method for calculating slope length (λ) and the LS parameters of the Revised Universal Soil Loss Equation for large watersheds. *Geoderma*, 308, 36–45. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.08.006>
- Zhang, H., Zhou, C., Lv, G., Wu, Z., Lu, F., Wang, J., ... & Qin, C. (2020). The Connotation and Inheritance of Geo-information Tupu. *Journal of Geo-information Science*, 22(4), 653-661. <https://doi.org/10.12082/dqxxkx.2020.200167>