




Evaluation and zoning of soil erosion potential using geomorphometric indexes and Fuzzy approach in Khiavchai watershed, Meshginshahr

Fariba Esfandiyari Darabad¹ | Mahya Yansori² | Maryam Adhami³ | Raof Mostafazadeh⁴ 

1. Department of Physical Geography, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. esfandiyari@uma.ac.ir

2. Department of Physical Geography, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. m.yansori@gmail.com

3. Department of Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, Iran. m.adhami66@yahoo.com

4. Corresponding Author, Department of Natural Resources and Member of Water Management Research Center, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. raoofmostafazadeh@uma.ac.ir

Article Information

Research Paper

Vol:	15
No:	56
P:	28-45
Received:	2023-02-07
Revised:	2023-03-09
Accepted:	2023-04-19
Published:	2024-08-01

Keywords:

- Spatial changes of erosion
- Fuzzy logic
- Topographic wetness Index
- Curvature
- Morphometry index

Cite this Article:

Esfandiyari Darabad, F., Yansori, M., Adhami, M., Mostafazadeh, R. (2024). Evaluation and zoning of soil erosion potential using geomorphometric indexes and Fuzzy approach in Khiavchai watershed, Meshginshahr. *Journal of Arid Regions Geographic Studies* 15(56): 28-45. doi: 10.22034/JARGS.2023.385049.1013

Publisher: Hakim Sabzevari University

© The Author(s)



Abstract

Aim: Erosion is a critical geomorphological process with significant environmental implications, including land degradation, fertility loss, and negative effects on aquatic ecosystems. It is recognized as an environmental hazard due to the substantial damages it can cause.

Materials & Methods: This research uses geomorphometric indicators and a fuzzy approach to zoning the soil erosion potential in the Khiavchai area of Meshginshahr. Various variables were used, including slope, aspect, surface curvature, range length, Melton's roughness coefficient, stream power index, drainage density, topographic wetness index, distance from the river, vegetation, precipitation, and geological formations. The information layers were combined based on their impact on erosion using different fuzzifier functions. The fuzzy gamma operator in a GIS platform was utilized to combine and overlay the indicators.

Finding: The results revealed that approximately 8.4% of the study area exhibited high erosion potential. In comparison, around 18.7% had a high erosion potential, primarily located in the middle parts of the watershed. The high erodibility in these areas can be attributed to erodible geological formations, steep slopes, and high drainage density. Other contributing factors include predominantly southern and western slope aspects, longer slopes, and poor vegetation.

Conclusion: The indicators used in assessing erosion-prone areas provide insights into the geomorphological and hydrological conditions of the study watershed. The prepared erosion map can serve as a foundation for prioritizing soil conservation management measures and reducing the impact of erosion.

Innovation: This research employs a combination of geomorphometric indicators and a fuzzy approach to assess soil erosion potential accurately. The practical application lies in utilizing the study's findings to prioritize areas for effectively implementing erosion mitigation and soil conservation measures in land management.

Extended Abstract

1. Introduction

Erosion, one of the most essential geomorphological processes, is considered an environmental hazard due to significant damages, especially land degradation, fertility reduction, and environmental effects on aquatic ecosystems. Knowing the amount of soil erosion in watersheds allows identifying critical areas and prioritizing management and protection projects. Because there is no accurate information on erosion in watersheds, erosion zoning can determine the sensitivity or potential of different basin areas from the perspective of soil erosion intensity. On the other hand, determining critical areas and prioritizing watershed management measures can be effective in erosion control and management. Considering the common effect of factors affecting soil erosion, it is necessary to evaluate the effect of different variables in a combined and integrated manner. The fuzzy approach has advantages such as the ability to be implemented in a geographic information system (GIS), flexibility to the number of input variables, the ability to run the model in a wide range of geographic conditions, and a significant reduction in uncertainties related to decision-making regarding the importance of each variable. Spatial evaluation of water erosion potential can be considered a fundamental step in identifying critical zones, focusing on protective measures, and reducing soil erosion. The presence of steep slopes and erodible formations, spring rains, high drainage density, and successive droughts have destroyed vegetation. In recent years, human intervention in the region has increased greatly. Due to the region's high slope and mountainous nature, the Khiavchai basin is highly vulnerable regarding erosion potential. In addition, the rapid hydrological response of the basin will cause runoff and, as a result, intensify erosion. On the other hand, intensive exploitation of pastures in the region as summer pastures of Shahsavani nomads is the cause of the destruction of vegetation, so evaluation and preparation of erosion maps can help in optimal soil management and adoption of erosion control strategies. In the current research, soil erosion potential in the Khiavchai area of Meshginshahr is zoned using geomorphometric indicators and a fuzzy approach.

2. Materials and Methods

The advantages of the fuzzy logic approach are the ability to be implemented in the geographic information system (GIS), flexibility in the number of input variables, the ability to be implemented in a diverse range of geographic conditions, and the reduction of uncertainty. In line with the research objectives, topographic maps, geological maps, and digital elevation models (DEM) of the region with a resolution of 27 meters of Aster satellite have been used. Also, Sentinel2 satellite images (with a resolution of 10 meters) were exerted to prepare the region's land use and vegetation layers. ArcGIS software with ArcHydro, SAGA GIS, and ENVI add-ons were used to prepare the thematic layers. In this framework, a model based on fuzzy logic was applied to combine and integrate thematic layers in determining the intensity of erosion. The variables include slope, aspect, surface curvature, range length, Melton's roughness coefficient, stream power index, drainage density, topographic wetness index, distance from the river, vegetation, precipitation, and geological formations. After preparing the information layers, they were combined according to the degree of effect in erosion using different fuzzifier functions. In the following, the combination and overlaying of the indicators have been done using the fuzzy gamma operator in the GIS platform.

3. Results and Discussion

The results showed that about 8.4% of the studied area had very high erosion potential, and about 18.7% of the study area is classified as high erosion potential, distributed in the middle parts of the watershed. The high erodibility conditions of these areas can be attributed to erodible geological formations, steep slopes, and high drainage density. In addition, the predominance of southern and western slope aspects, higher slope length, and poor vegetation are other factors affecting the area's potential for erosion.

4. Conclusions

The use of natural and human variables and factors affecting erosion is one of the significant cases in the current research, which includes geomorphological, hydrological, climatic, vegetation, and geological features. In this regard, the fuzzification process helps to reduce the uncertainty of the classes of effective factors and has provided the possibility of standardizing and combining different subject layers. The indicators used in this research reflect the geomorphological and hydrological conditions of the studied area. Preparation of erosion potential maps is a fundamental step in managing and reducing the effects of erosion. The prepared erosion map can be the basis for prioritizing areas in terms of soil conservation management measures.

5. Acknowledgment & Funding


We would like to sincerely express our gratitude to the University of Mohagheh Ardabili for their invaluable logistical support, which played a significant role in the successful execution of our research.

6. Conflict of Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

ارزیابی و پهنه‌بندی پتانسیل فرسایش خاک با استفاده از شاخص‌های

ژئومورفومتری و رویکرد فازی در حوضه خیاوچای مشکین شهر

فریبا اسفندیاری درآباد^۱، محیا ینصری^۲، مریم ادهمی^۳، رئوف مصطفی‌زاده^۴ 

۱- گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. esfandyari@uma.ac.ir

۲- گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. m.yansori@gmail.com

۳- گروه آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران. m.adhami66@yahoo.com

۴- نویسنده مسئول، گروه منابع طبیعی و عضو پژوهشکده مدیریت آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. raoofmostafazadeh@uma.ac.ir

چکیده:

هدف: فرسایش به‌عنوان یکی از مهم‌ترین فرایندهای ژئومورفولوژیک، به دلیل خسارات قابل توجه مخصوصاً تخریب اراضی، کاهش حاصل‌خیزی و اثرات محیط زیستی بر اکوسیستم‌های آبی به‌عنوان یک مخاطره محیطی نیز مطرح است. در پژوهش حاضر پتانسیل فرسایش خاک در حوضه خیاوچای مشکین شهر با استفاده از شاخص‌های ژئومورفومتری و رویکرد فازی پهنه‌بندی شده است.

روش و داده: متغیرهای مورد استفاده در ارزیابی وضعیت فرسایش شامل شیب، جهت، انحنا، طول دامنه، ضریب ناهمواری ملتون، توان آبراهه، تراکم زهکشی، شاخص رطوبت توپوگرافی، فاصله از آبراهه، پوشش گیاهی، بارش و سازندهای زمین‌شناسی بوده است. پس از تهیه لایه‌های اطلاعاتی، با توجه به نقش و میزان اثرگذاری در فرسایش با استفاده از توابع مختلف فازی‌ساز همسان شدند. در ادامه ترکیب و روی هم‌گذاری شاخص‌ها با عملگر گامای فازی در بستر GIS انجام شده است.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که حدود ۸۴ درصد مساحت منطقه مورد مطالعه در کلاس با پتانسیل فرسایشی بسیار زیاد و حدود ۱۷۷ درصد آن در کلاس با پتانسیل فرسایش زیاد واقع شده‌اند که در قست‌های میانی حوضه توزیع شده‌اند. دلایل شرایط مساعد فرسایش‌پذیری این پهنه‌ها را می‌توان با وجود سازندهای زمین‌شناسی فرسایش‌پذیر، شیب زیاد، تراکم زهکشی بالا توجه نمود. علاوه بر این، غالبیت جهت‌های شیب جنوبی و غربی، طول بیش‌تر دامنه‌ها و ضعف پوشش گیاهی از دیگر عوامل مؤثر بر پتانسیل بالای فرسایش در مناطقی با فرسایش بالا است.

نتیجه‌گیری: شاخص‌های مورد استفاده در این پژوهش، منعکس‌کننده وضعیت ژئومورفولوژیکی و هیدرولوژیکی منطقه مورد مطالعه است. تهیه نقشه‌های پتانسیل فرسایش گامی اساسی در راستای مدیریت و کاهش اثرات فرسایش محسوب می‌شود. نقشه فرسایش تهیه شده می‌تواند مبنای اولویت‌بندی مناطق از نظر اقدامات مدیریتی باشد.

نوآوری، کاربرد نتایج: در این تحقیق از ترکیبی از شاخص‌های ژئومورفومتریکی و رویکرد فازی برای ارزیابی دقیق پتانسیل فرسایش خاک استفاده شده است. کاربرد عملی یافته‌های مطالعه حاضر در راستای اولویت‌بندی مؤثر مناطق برای اجرای اقدامات کاهش فرسایش و حفاظت خاک در مدیریت اراضی است.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

شماره: ۱۵

دوره: ۵۶

صفحه: ۲۸-۴۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۱۸

تاریخ ویرایش: ۱۴۰۱/۱۲/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۱/۳۰

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۵/۱۱

کلیدواژه‌ها:

- تغییرات مکانی فرسایش
- منطبق فازی
- شاخص رطوبت توپوگرافی
- انحنا، سطح زمین
- شاخص مورفومتری

نحوه ارجاع به این مقاله:

اسفندیاری درآباد، فریبا، ینصری، محیا، ادهمی، مریم، و مصطفی‌زاده، رئوف. (۱۴۰۳). ارزیابی و پهنه‌بندی پتانسیل فرسایش خاک با استفاده از شاخص‌های ژئومورفومتری و رویکرد فازی در حوضه خیاوچای مشکین شهر. *مطالعات جغرافیایی مناطق خشک*، ۱۵(۵۶): ۲۸-۴۵.
doi: 10.22034/JARGS.2023.385049.1013

ناشر: دانشگاه حکیم سبزواری



© نویسنده(گان).

۱- مقدمه

فرسایش خاک یکی از مؤلفه‌های اصلی تخریب زمین به شمار می‌رود که در اثر عدم حفاظت خاک و فعالیت‌های کشاورزی ناپایدار تشدید می‌شود (Hellin et al., 2006; Talebi Khiavi et al., 2017). جلوگیری از هدررفت خاک بر انتخاب راهکارهای مناسب برای حفاظت خاک متکی است و این به نوبه خود نیازمند درک کاملی از فرایندهای فرسایش است (Morgan, 2005). تشدید تخریب خاک و کاهش بهره‌وری اراضی در مناطق خشک و نیمه‌خشک عمدتاً ناشی از فعالیت‌های انسانی و یا تغییرات اقلیمی است (Cornelis, 2006; Ghorbani et al., 2021). در صورتی که بهره‌برداری از خاک بر اساس استعداد و توان تولیدی اراضی باشد تخریب خاک کاهش پیدا می‌کند (lal et al., 2000). پژوهش‌های متعددی در خصوص ارزیابی فرسایش انجام شده است که به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود. ژو و همکاران پتانسیل فرسایش خاک را در استان هوبئی^۱ کشور چین با بهره‌گیری از یک مدل عصبی - فازی و GIS مورد ارزیابی و تحلیل قرار دادند. ایشان از متغیرهای شیب، نحوه استفاده از زمین، پوشش گیاهی، توان فرساینده‌ی باران و فرسایش‌پذیری خاک استفاده شد. منطقه بر اساس مدل فرسایش با دقت ۸۸ درصد به شش کلاس فرسایش طبقه‌بندی شد و مشخص شد که حدود ۳۰ درصد منطقه با خطر فرسایش روبرو است (Zhu et al., 2009). همچنین، باکمچندرا در تحقیق خود مدلی ساده و کارآمد، بر مبنای توابع عضویت فازی به منظور ارزیابی و تحلیل خطر فرسایش خاک در بستر GIS را ارائه نمود. نقشه کاربری/پوشش زمین، شاخص پوشش گیاهی تفاضلی نرمال شده (NDVI)، توان فرساینده‌ی باران، فرسایش‌پذیری خاک و شیب زمین به عنوان متغیرهای ورودی استفاده شدند و بر کارایی مدل فازی در ارزیابی و تحلیل مکانی خطر فرسایش تأکید (Bakimchandra, 2011). فائوزی و همکاران به تهیه نقشه ریسک فرسایش حوضه آبخیز سیاک^۲ در اندونزی با استفاده از رویکرد فازی پرداختند و نشان دادند که ریسک فرسایش حوضه مطالعاتی عمدتاً (۶۸/۵۴ درصد حوضه) در کلاس متوسط قرار گرفته است (Fauzi et al., 2017). فاکتورهای اصلی مؤثر بر فرسایش را می‌توان مرتبط با عوامل اقلیم، خاک، توپوگرافی و پوشش زمین دسته‌بندی نمود. در این رابطه، میزان شیب، جهت شیب، طول دامنه و شکل دامنه متغیرهای مهمی به شمار می‌روند. در شیب‌های تند سرعت رواناب بیش‌تر است و نیز در شیب‌های طولانی میزان دریافت بارش و قدرت فرساینده‌ی رواناب بیش‌تر است. در شکل‌های مختلف شیب نیز بر اساس فاصله از خط تقسیم آب و نیز تغییرات عمق خاک مقدار فرسایش متفاوت خواهد بود. جهت شیب نیز از نظر میزان استقرار پوشش گیاهی بر مقدار فرسایش مؤثر خواهد بود (Wang et al., 2014). پوشش گیاهی متأثر از اقلیم بوده و در ارتباط با نوع خاک از قدرت تخریب و فرسایش خاک می‌کاهد و زمینه نفوذ آب را فراهم می‌کند.

برای کنترل و مهار فرسایش خاک، شناسایی و آگاهی از عوامل اثرگذار بر فرسایش خاک و شدت تأثیر آن‌ها و اولویت‌بندی مناطق از نظر تولید رسوب ضروری است. کنترل فرسایش خاک و تصمیم‌گیری در خصوص اقدامات حفاظتی و آبخیزداری، ارزیابی مکانی پتانسیل فرسایش خاک به ضرورتی اجتناب‌ناپذیر تبدیل شده است. شناخت میزان فرسایش خاک در سطح حوضه‌های آبخیز، شناسایی پهنه‌های بحرانی و اولویت‌بندی پروژه‌های مدیریتی و حفاظتی را میسر می‌نماید. چون اطلاعات درست و کمی از میزان فرسایش در حوضه‌های آبخیز در دست نیست، لذا قبل از پهنه‌بندی فرسایش می‌تواند میزان حساسیت یا پتانسیل پهنه‌های مختلف حوضه از منظر شدت فرسایش خاک را مشخص نماید (Naderi et al., 2010). از طرفی تعیین پهنه‌های بحرانی و اولویت‌بندی اقدامات آبخیزداری می‌تواند در کنترل و مدیریت فرسایش مؤثر باشد. با توجه به تأثیر مشترک عوامل مؤثر بر فرسایش خاک، لازم است اثر متغیرهای مختلف به صورت ترکیبی و یکپارچه مورد ارزیابی قرار گیرد. رویکرد فازی از مزیت‌هایی مانند قابلیت اجرا در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)، انعطاف‌پذیری نسبت به کمیت متغیرهای ورودی، قابلیت اجرای مدل در طیف متنوعی از شرایط جغرافیایی و کاهش قابل توجه عدم قطعیت‌های مربوط با تصمیم‌گیری در خصوص میزان اهمیت هر یک از متغیرها برخوردار هستند. استفاده از سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی در تعیین داده‌های ورودی مدل‌های برآورد فرسایش امکان ارزیابی سریع، ترکیب و تجزیه و تحلیل داده‌های مکانی را فراهم می‌کند (Timmermans, 2005). منطق فازی از این قابلیت برخوردار است تا مفاهیم، متغیرها و شاخص‌ها را به صورت ریاضی تبیین نماید و شرایط استنباط، کنترل و تصمیم‌گیری در شرایط عدم قطعیت را میسر سازد. نظریه مجموعه فازی با لحاظ عدم قطعیت‌ها ابزاری مناسب برای ایجاد سیستم‌های مدیریت ریسک بلایای طبیعی و ترکیب رویکرد فازی با سایر تکنیک‌ها است (Nandalal & Ratnayake, 2011; Li, 2013). به دلیل ماهیت مکانی وقوع فرسایش و توانایی سیستم اطلاعات جغرافیایی امکان ارزیابی و مدل‌سازی مکانی فرسایش میسر خواهد شد.

ارزیابی مکانی پتانسیل فرسایش آبی می‌تواند گامی اساسی در راستای شناسایی پهنه‌های بحرانی و تمرکز اقدامات حفاظتی و کاهش فرسایش خاک محسوب شود. در پژوهش حاضر به ارزیابی پتانسیل مکانی فرسایش خاک در سطح حوضه آبخیز خیاوچای پرداخته می‌شود. وجود شیب‌های تند و سازندهای فرسایش‌پذیر، وقوع رگبارهای بهاره، تراکم زهکشی بالا و وقوع خشکسالی‌های متوالی باعث تخریب پوشش گیاهی شده و در سال‌های اخیر دخالت انسان در منطقه به شدت افزایش یافته است. حوضه خیاوچای به دلیل شیب بالا و کوهستانی بودن منطقه، از نظر پتانسیل فرسایش دارای آسیب‌پذیری بالایی است. علاوه بر این، واکنش سریع هیدرولوژیک حوضه باعث ایجاد رواناب و در نتیجه تشدید فرسایش خواهد شد. از طرفی، بهره‌برداری شدید از مراتع منطقه به‌عنوان مراتع بیلاق عشایر شاهسون، عامل تخریب پوشش گیاهی است، لذا ارزیابی و تهیه نقشه فرسایش می‌تواند به مدیریت پهنه خاک و اتخاذ راهکارهای کنترل فرسایش کمک نماید. استفاده از متغیرها و عوامل طبیعی و انسانی مؤثر بر فرسایش از موارد قابل توجه در پژوهش حاضر است که شامل ویژگی‌های ژئومورفولوژی، هیدرولوژیک، اقلیمی، پوشش گیاهی و زمین‌شناسی است. از طرفی، تلفیق عوامل مؤثر با رویکرد فازی، از دیگر مواردی است که می‌تواند به‌عنوان جنبه نوآوری پژوهش حاضر ذکر شود. در این راستا، فرایند فازی‌سازی، به کاهش عدم قطعیت کلاس‌های عوامل مؤثر کمک می‌کند و امکان استاندارد نمودن و ترکیب لایه‌های موضوعی مختلف را فراهم نموده است؛ بنابراین، هدف این تحقیق، ارزیابی و پهنه‌بندی خطر فرسایش در آبخیز خیاوچای با استفاده از رویکرد فازی و متغیرهای ژئومورفومتری، کاربری اراضی و توپوگرافی در بستر سیستم اطلاعات جغرافیایی است.

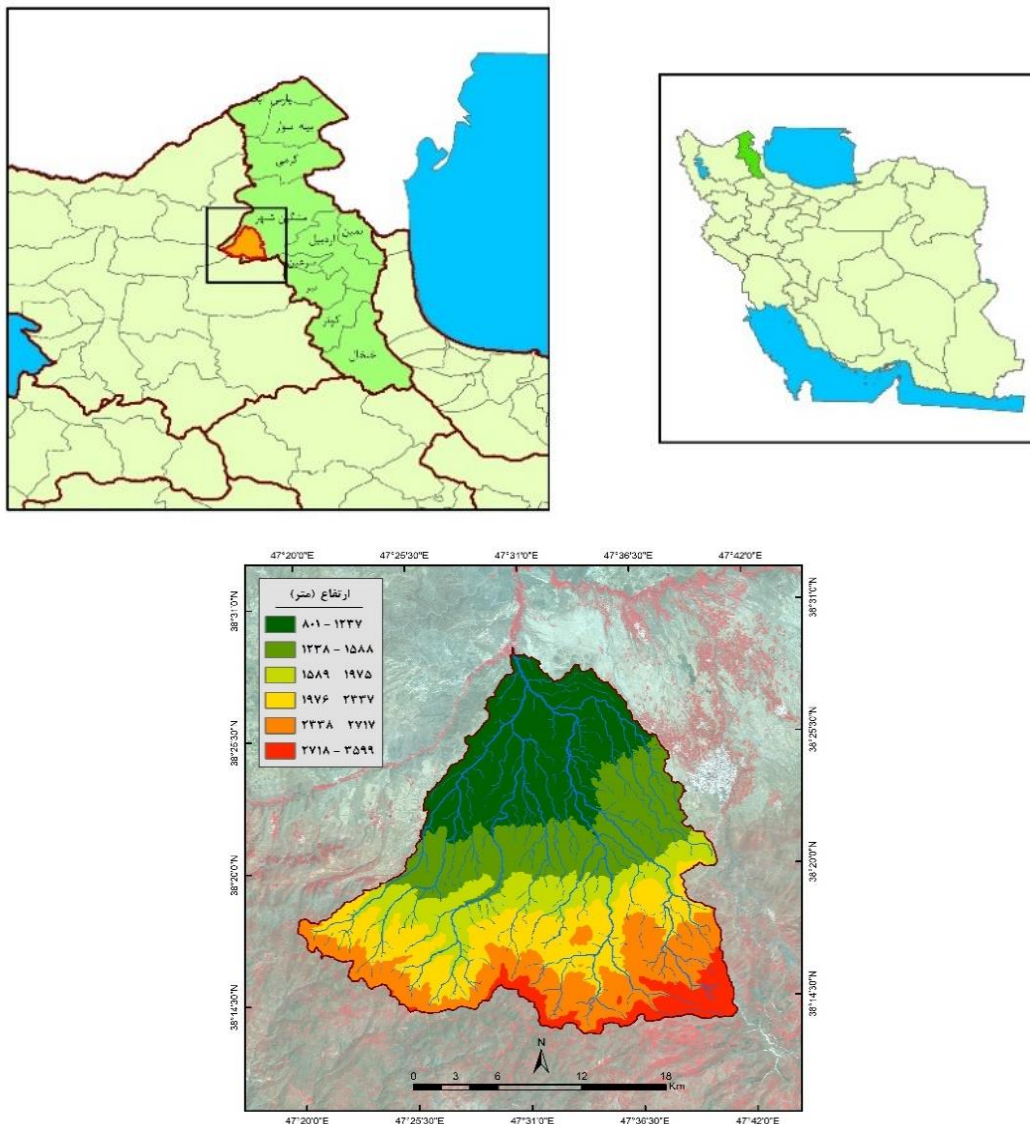
۲- مواد و روش

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

حوضه مطالعاتی با مختصات جغرافیایی ۴۷ درجه و ۱۸ دقیقه و ۴ ثانیه تا ۴۷ درجه و ۴۱ دقیقه و ۲۰ ثانیه طول شرقی و ۳۸ درجه و ۱۳ دقیقه و ۱۵ ثانیه تا ۳۸ درجه و ۲۹ دقیقه و ۳۷ ثانیه عرض شمالی در استان اردبیل واقع شده است (شکل ۱). اقلیم منطقه به روش دمارتن از نوع نیمه‌خشک و به روش آمبرژه مرطوب سرد طبقه‌بندی شده است. بر اساس داده‌های ایستگاه سینوپتیک مشگین‌شهر متوسط بارش سالانه منطقه ۳۸۳/۹ میلی‌متر و متوسط دمای سالانه نیز ۱۰/۷ درجه سانتی‌گراد است. حوضه مطالعاتی از درجه ناهمواری بالایی برخوردار است که نشان‌دهنده انرژی بالای جنبشی و پتانسیل فرسایش در سطح این حوضه است. توده آتشفشانی سبلان در منتهی‌الیه شرقی رشته‌کوه قوشا داغ قرار گرفته است. گدازه‌های سبلان در چند مرحله فوران داشته است که فعالیت اولیه آن مربوط به ائوسن بوده است، اما مخروط‌های کنونی آن حاصل فعالیت دوره پلیوسن و کواترنر است. سنگ‌های مقاوم آذرین درونی (گرانودیوریت) و بیرونی (آندزیت، تراکی - آندزیت و داسیت) بخش‌هایی از منطقه مورد مطالعه را پوشانده است. سازندهای متشکل از شیست‌ها، کنگلومراها و سنگ‌های آهکی در منطقه دارای مقاومت متوسط هستند و سازندهای آبرفتی جوان کواترنری (پادگانه‌های آبرفتی قدیمی، جدید و آبرفت‌های عهد حاضر) که دارای فرسایش‌پذیری بالایی هستند، نیز بخش‌هایی از منطقه خیاوچای را پوشش داده است.

۲-۲- روش پژوهش

در این تحقیق، به‌منظور ارزیابی و پهنه‌بندی خطر فرسایش از فاکتورهای متعدد با تأکید بر شاخص‌های ژئومورفومتریکی در بستر سیستم اطلاعات جغرافیایی استفاده شد. برای ترکیب و یکپارچه‌سازی فاکتورهای مؤثر بر فرسایش نیز از منطق فازی بهره گرفته شد. قابلیت اجرا در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)، انعطاف‌پذیری نسبت به کمیت متغیرهای ورودی، قابلیت اجرا در طیف متنوعی از شرایط جغرافیایی و کاهش عدم قطعیت از مزیت‌های رویکرد منطق فازی است. در راستای اهداف تحقیق از نقشه‌های توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰، نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰، مدل ارتفاعی رقومی (DEM) منطقه با قدرت تفکیک ۲۷ متر ماهواره Aster استفاده شده است. همچنین از تصاویر ماهواره‌ای Sentinel2 (با قدرت تفکیک ۱۰ متر) برای تهیه لایه‌های کاربری اراضی و پوشش گیاهی منطقه استفاده شد. در راستای تهیه و آماده‌سازی لایه‌های موضوعی از نرم‌افزارهای ArcGIS به همراه الحاقیه ArcHyro، SAGAGIS و ENVI استفاده شد. در این چارچوب به‌منظور ترکیب و یکپارچه‌سازی لایه‌های موضوعی در تعیین شدت فرسایش از مدل مبتنی بر منطق فازی بهره گرفته شد. مراحل روی‌هم‌گذاری فازی لایه‌های موضوعی و تهیه نقشه خطر فرسایش به شرح زیر انجام شده است.



شکل ۱. موقعیت حوضه آبخیز خیاوچای در استان اردبیل

• آماده‌سازی و ارزیابی مکانی لایه‌های موضوعی

با توجه به تأثیر متغیرهای مختلف در وقوع فرسایش، مهم‌ترین شاخص‌های کمی ژئومورفیک، اقلیمی، توپوگرافیک زمین‌شناسی و پوشش گیاهی انتخاب شدند. در پژوهش حاضر شامل شیب، جهت، طول دامنه، شاخص توان آبراهه، شاخص رطوبت توپوگرافیک، تقعر سطح زمین، انحنای سطح، عدد ناهمواری ملتون، زمین‌شناسی، پوشش گیاهی و بارش برای ارزیابی فرسایش استفاده شدند. شیب و جهت: لایه‌های شیب و جهت با استفاده از مدل رقومی ارتفاع در محیط نرم‌افزار ArcMap تهیه شد. شاخص انحنای سطح زمین: مقادیر بالاتر شاخص مذکور بیانگر سطوح محدب و مقادیر کم‌تر نشان‌دهنده سطوح مقعر است (Esfandiari Darabad et al., 2022). این شاخص با استفاده از مدل رقومی ارتفاع در محیط نرم‌افزار SAGA GIS تهیه شد. طول دامنه: رابطه مستقیم بین طول دامنه و میزان فرسایش وجود دارد؛ بدین معنی که طول دامنه بیش‌تر منجر به فرسایش بیش‌تر خواهد شد. در تحقیق حاضر، لایه طول دامنه با استفاده از لایه‌های شیب و تجمع جریان تهیه شد. برای استخراج لایه طول دامنه در سطح حوضه آبخیز رابطه ۱ مورد استفاده قرار گرفت (Luca et al., 2011; Abedini et al., 2022).

$$LSF = (fa * Cell - Size / 22.3)^{0.4} * (\text{Sin}\sigma / 0.0896)^{1.3} \quad (1)$$

که در آن، LSF: فاکتور طول دامنه، fa: تجمع جریان است. مقادیر طول دامنه برای حوضه آبخیز خیاوچای از حداقل صفر تا حداکثر ۶۶ متر متغیر است که به پنج دامنه تقسیم‌بندی شد.

توان رودخانه: شاخص توان رودخانه بیانگر مقدار انرژی موجود برای فرسایش، جابه‌جایی رسوبات و انجام فعالیت ژئومورفیک است (Luca et al., 2011; Bizzi & Lerner, 2015; Rezaei Moghaddam et al., 2016). این شاخص از طریق رابطه ۲ محاسبه شد (Luca et al., 2011).

$$SPI = \ln\left(\frac{As}{\tan\sigma}\right) \quad (2)$$

که در آن، SPI شاخص توان رودخانه، As مساحت ویژه جریان و σ درجه شیب است.

شاخص ناهمواری ملتون: یکی از این شاخص‌های مهم و مؤثر به‌منظور سنجش میزان ناهمواری‌ها عدد ناهمواری ملتون است که سطح زمین را بر اساس میزان ناهمواری یا پستی و بلندی طبقه‌بندی می‌کند. عدد ناهمواری ملتون شاخصی مرتبط با تجمع جریان است که از طریق اختلاف بین حداکثر و حداقل ارتفاع حوضه تقسیم بر جذر مربع مساحت حوضه محاسبه می‌شود (Melton, 1965; Sreelakshmy et al., 2021). مقادیر بالاتر عدد ناهمواری ملتون دلالت بر درجه ناهمواری بالا و مقادیر پایین بیانگر غلبه سطوح هموار و مسطح است. شاخص ژئومورفومتریکی عدد ناهمواری ملتون با استفاده از مدل رقومی ارتفاع (DEM) منطقه در محیط نرم‌افزار SAGA GIS تهیه شد.

تراکم زهکشی: بافت، الگو و تراکم شبکه زهکشی می‌تواند در تعیین شدت فرسایش، انتقال رسوب و نیز میزان نفوذ آب دخالت داشته باشد (Mostafazadeh et al., 2018). تراکم زهکشی فاصله از آبراهه و نیز و نیز عکس‌العمل بالا در برابر بارندگی را نشان می‌دهد. برای تهیه لایه تراکم زهکشی از مدل رقومی ارتفاع و شبکه آبراهه‌ای استفاده شد و با استفاده از تابع تراکم خط در ابزار تحلیل‌گر مکانی نرم‌افزار ArcGIS نقشه تراکم زهکشی تهیه شد.

شاخص رطوبت توپوگرافی: یکی دیگر از شاخص‌های اثرگذار بر تغییرات مکانی فرسایش خاک، شاخص رطوبت توپوگرافی است. هر چه شیب بیش‌تر شود، میزان رطوبت موجود کاهش یافته و در مناطقی با ارتفاع کم‌تر رطوبت بیش‌تری وجود دارد. شاخص رطوبت توپوگرافی نشان‌دهنده تجمع جریان است و برای توصیف الگوی مکانی رطوبت خاک استفاده می‌شود. در شرایط یکسان می‌توان گفت که رابطه معکوس میان رطوبت توپوگرافی و فرسایش وجود دارد. این شاخص بیانگر ارتباط شیب سطحی زمین و میزان رطوبت در سطح زمین است (Mostafazadeh et al., 2022). (رابطه ۳).

$$TWI = \ln\left(\frac{As}{S}\right) \quad (3)$$

که در آن، S به‌ترتیب بیانگر سطح ویژه حوضه آبخیز و درصد شیب زمین است.

فاصله از آبراهه: به‌منظور تهیه نقشه فاصله از آبراهه، شبکه زهکشی منطقه از مدل رقومی ارتفاعی استخراج شد و سپس با استفاده از تابع Distance در محیط نرم‌افزار ArcGIS نسبت به تهیه لایه فاصله از آبراهه اقدام شد.

پوشش گیاهی: در پژوهش حاضر از تراکم پوشش گیاهی به‌عنوان یکی از متغیرهای اثرگذار در کاهش میزان فرسایش استفاده شد؛ بنابراین، شاخص تفاضلی نرمال شده پوشش گیاهی (NDVI) به‌عنوان یک شاخص متداول در ارزیابی تراکم توزیع پوشش گیاهی استفاده شد (Anjireddy, 2008; Talebi khiavi and Mostafazadeh, 2022).

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \quad (4)$$

که در آن، NIR و Red به ترتیب بازتاب‌ها در باند مادون‌قرمز نزدیک و باند قرمز هستند. مقادیر NDVI در دامنه بین -۱ تا +۱ قرار دارد و پوشش گیاهی فعال دارای NDVI مثبت است. در پژوهش حاضر برای استخراج شاخص مذکور از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل (اوایل تابستان ۱۴۰۰) استفاده شد.

سازندهای زمین‌شناسی: برای لحاظ تأثیر این عامل، نقشه سازندهای زمین‌شناسی منطقه با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰۰ رقومی و در فرایند ارزیابی مکانی پتانسیل فرسایش استفاده شد.

بارش: نقشه توزیع مکانی بارش منطقه و مقادیر بارش سالانه به‌عنوان عامل مؤثر در فرسایش منطقه در نظر گرفته شد.

• فازی سازی لایه های موضوعی

در فرایند فازی سازی، عدم قطعیت کلاس ها در پدیده هایی دارای همپوشانی مشخص کاهش می یابد و با تخصیص عدد یک به مقادیر نزدیک به ایده آل، به سایر مقادیر که به طور قطع بخشی از مجموعه نیستند ارزش صفر تخصیص می یابد (Sarvar & Kheirizadeh., 2017). در تئوری مجموعه های دقیق برای عضویت هر مجموعه A می توان تابع زیر را تعریف کرد.

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & x \in A \\ 0 & x \notin A \end{cases} \quad (5)$$

این تابع به هر عضو مجموعه A عدد (۱) و به هر عضو خارج از مجموعه عدد (۰) نسبت می دهد. یک مجموعه فازی توسط تابع عضویتی بیان می شود که این تابع درجه عضویت اعضای مجموعه را با یک عدد حقیقی بین صفر و یک نشان می دهد. در این پژوهش از تابع فازی خطی که مقادیری بین مقادیر کمینه و بیشینه را در نظر می گیرد، برای فازی سازی متغیرهای مؤثر در فرسایش استفاده شد.

• روی هم گذاری فازی لایه ها

بعد از فازی سازی لایه های موضوعی مؤثر بر فرسایش در سطح حوضه آبخیز خیابوچای نسبت به ترکیب یا روی هم گذاری فازی آنها اقدام شد. در این پژوهش از روش عملگر گامای فازی روی هم گذاری انجام شد (Lee, 2007):

$$\mu_{\text{combination}} = (\text{Fuzzy algebraic sum})^\lambda \times (\text{Fuzzy algebraic sum})^{1-\lambda} \quad (6)$$

در شکل ۲ مراحل انجام پژوهش به صورت نمودار جریان ارائه شده است.



شکل ۲. نمودار جریان مراحل تهیه نقشه پتانسیل فرسایش خاک در حوضه خیابوچای مشگین شهر

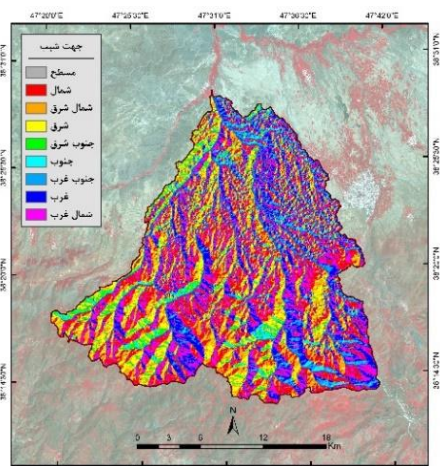
۳- یافته ها

در پژوهش حاضر، متغیرهای مختلف مؤثر بر فرسایش خاک با رویکرد فازی در ارزیابی مکانی فرسایش خیابوچای استفاده شد و در نهایت نقشه پهنه بندی پتانسیل فرسایش در سطح حوضه تهیه شد. علاوه بر متغیرهای ژئومورفومتری، از متغیرهای پوشش گیاهی، بارش، و سازندهای زمین شناسی استفاده شده است. در ادامه توزیع مکانی شاخص های مورد استفاده برای ارزیابی مکانی پتانسیل فرسایش خاک حوضه آبخیز خیابوچای تبیین شده اند. در شکل ۳ نقشه های شیب، جهت، انحنا سطح زمین و طول دامنه ارائه شده است.

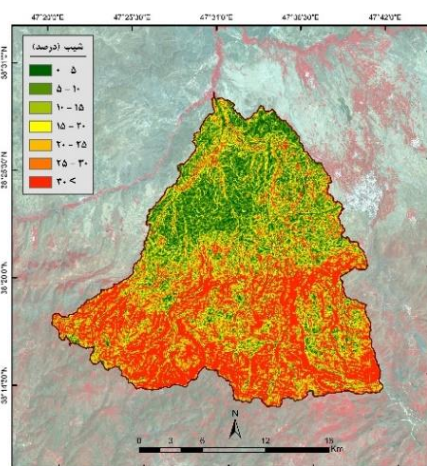
شیب زمین: در مجموع حدود ۴۹ درصد منطقه مورد مطالعه دارای شیب بیش از ۲۰ درصد است. در این خصوص طبقه شیب ۲۰ تا ۲۵ درصد حدود ۱۰/۸ درصد، طبقه شیب ۲۵ تا ۳۰ درصد ۹/۱ درصد و طبقه شیب بیش از ۳۰ درصد معادل ۲۹ درصد مساحت منطقه را به خود اختصاص داده‌اند.

جهت شیب: در این پژوهش، دامنه‌های جنوبی، جنوب غربی، غربی و جنوب شرقی به ترتیب با مقادیر ۳/۹، ۶/۵، ۱۵/۳ و ۶/۱ درصد از سطح حوضه از عضویت بالاتری برخوردار شدند. در جهت‌های شمالی، شمال غربی و شمال شرقی، به‌دلایلی از قبیل ضعف فرایندهای تخریب مکانیکی، دریافت کم‌تر تابش خورشید، رطوبت بالا و پوشش گیاهی متراکم‌تر از فرسایش کم‌تری برخوردار هستند.

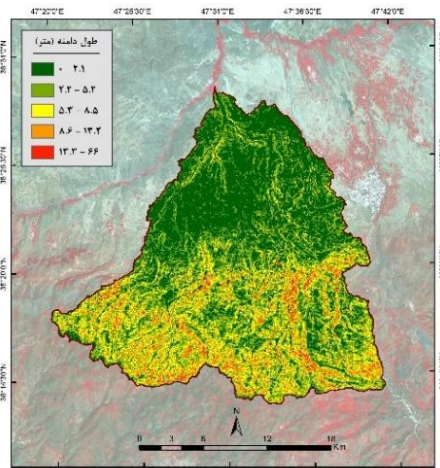
انحنای سطح زمین: در خصوص توزیع مکانی و تأثیر شاخص انحناى سطح زمین در فرسایش منطقه مورد مطالعه می‌توان گفت که سطوح محدب با مقدار شاخص بیش از ۵۱ حدود ۹ درصد مساحت منطقه را در قسمت‌های میانی و بالادست شامل می‌شود. مقادیر شاخص انحناى بین ۴۷ تا ۵۱ حدود ۲۰/۶ درصد منطقه را شامل می‌شوند که باعث تشدید فرایندهای فرسایشی می‌شوند. سطوح با شکل مستقیم دارای مقادیر شاخص انحناى ۴۳ تا ۴۷ هستند و حدود ۲۹/۹ درصد مساحت منطقه را در بر می‌گیرند. شکل مستقیم این سطوح تا حدودی ناشی از رسوب‌گذاری بخش قابل توجهی از آبرفت دامنه‌های فوقانی در این سطوح است. دامنه‌های مقعر دارای مقادیر شاخص انحناى بین ۳۹ تا ۴۳ هستند و حدود ۲۸/۴ درصد مساحت منطقه را شامل می‌شوند و به‌عنوان نقاط رسوب‌گذاری مطرح می‌شوند.



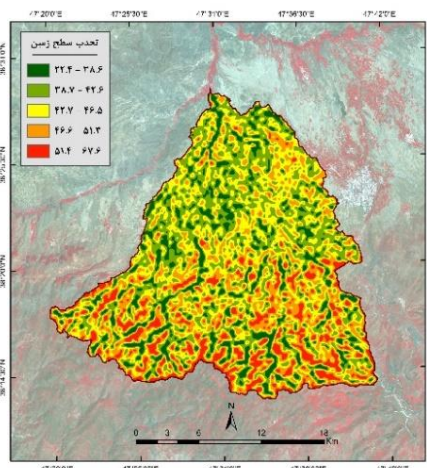
(ب)



(ف)



(د)



(ج)

شکل ۳. نقشه‌های مورد استفاده در ارزیابی مکانی فرسایش حوزه خیاوچای (الف) شیب، (ب) جهت، (ج) انحنای سطح زمین، (د) طول دامنه

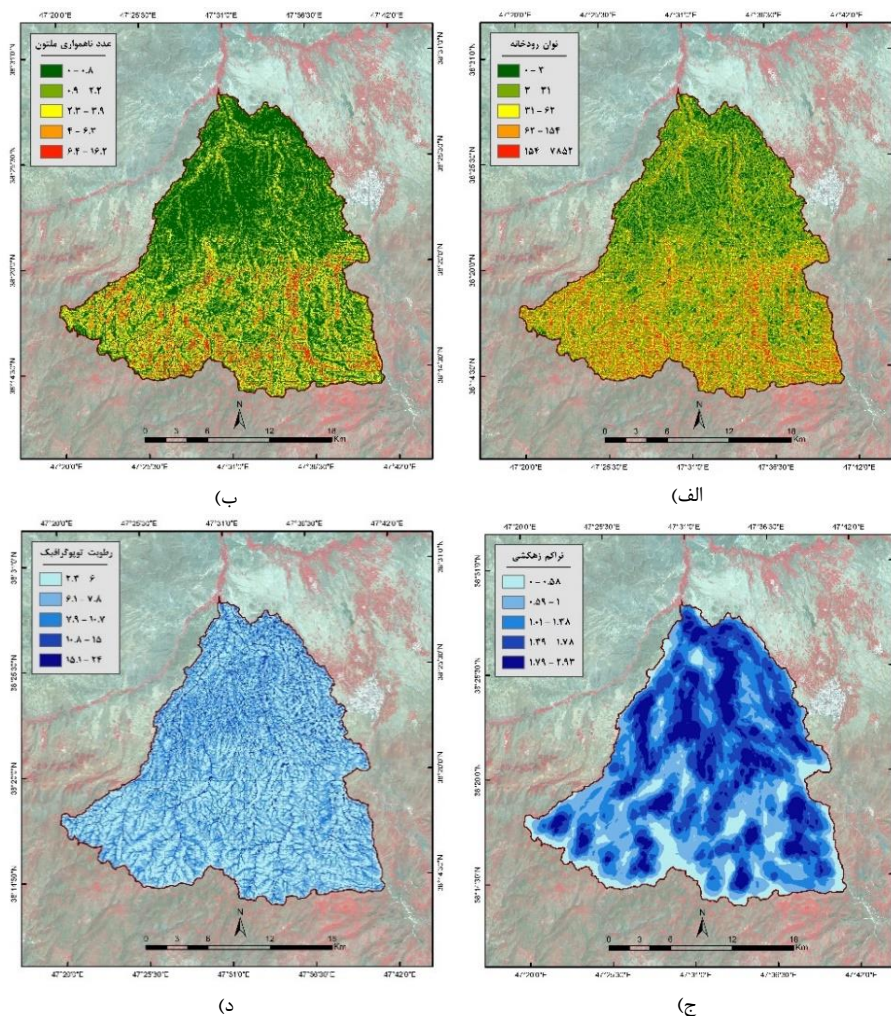
طول دامنه: پهنه‌هایی با مقادیر بالای طول دامنه عمدتاً در قسمت‌های بالادست به دلیل درجه بالای ناهمواری قرار گرفته‌اند و به دلیل بالا بودن پتانسیل فرسایش جزو نقاط ایده‌آل مجموعه فازی در طی فرایند ترکیب و روی هم‌گذاری متغیرها هستند. در شکل ۴ نقشه‌های توان آبراهه، عدد ناهمواری ملتون، تراکم زهکشی و رطوبت توپوگرافی ارائه شده است.

توان رودخانه: به دلیل تنوع توپوگرافی، مقادیر شاخص مذکور دارای تغییرات بالایی است و از مقدار صفر تا ۷۸۵۲ وات بر متر مربع متغیر است. مقادیر بسیار بالای این شاخص منطبق بر پرتگاه‌ها و مناطق پرشیب است. در بخش‌های پائین دست مقادیر شاخص توان رودخانه بین ۰ تا ۳۰ وات بر مترمربع در تغییر است.

عدد ناهمواری ملتون: در طبقه‌بندی مقادیر شاخص عددی ملتون به ۵ کلاس، مقادیر بیش‌تر از ۶ جزو ناهموارترین پهنه‌ها در بودند که حدود ۲/۷ درصد از مساحت حوضه را شامل می‌شوند. مقادیر عدد ناهمواری ۴ تا ۶ حدود ۸/۷ درصد و مناطقی با ناهمواری کم‌تر ۰/۸ حدود ۴۴/۷ درصد مساحت منطقه را شامل شدند.

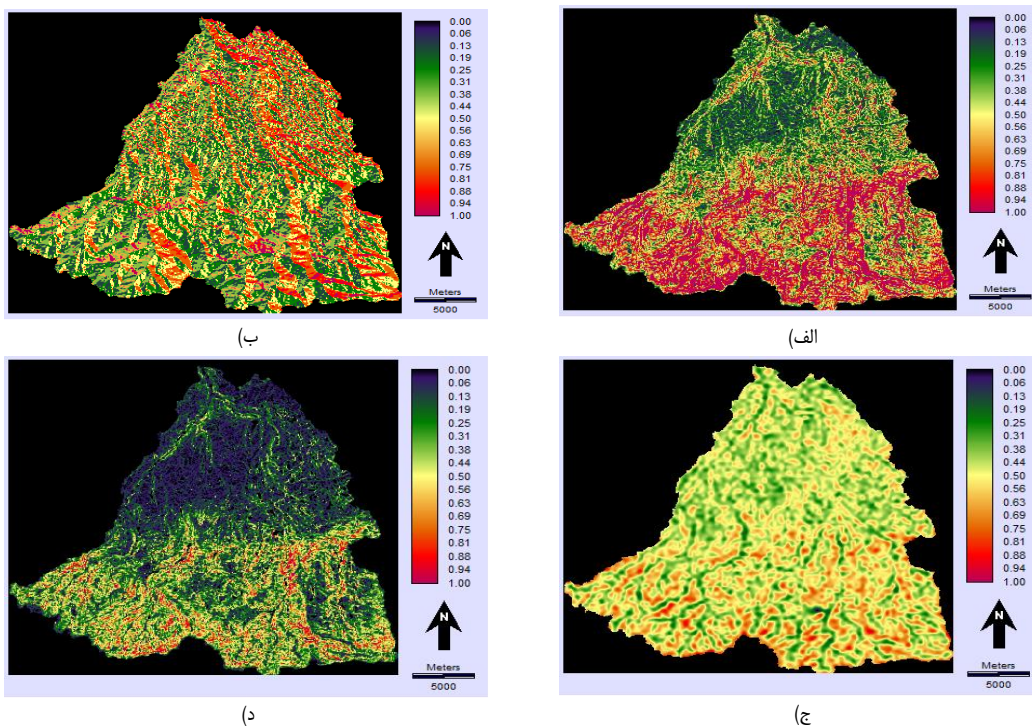
تراکم زهکشی: بین تراکم زهکشی و فرسایش رابطه مستقیم برقرار است و در این خصوص، مقادیر تراکم زهکشی بیش‌تر از ۱/۸ کیلومتر در کیلومترمربع از درجه اهمیت بالاتری برخوردار است.

شاخص رطوبت توپوگرافی: در پهنه‌های با رطوبت توپوگرافی بالا، خاک مرطوب بوده و در نتیجه چسبندگی ذرات مانعی مهم در جدا شدن و جابه‌جایی خاکدانه‌ها خواهد بود و نیز در پهنه‌های مذکور به دلیل رطوبت بالا معمولاً پوشش گیاهی دارای تراکم بالاتری است که نقش حفاظتی بالاتری دارد. در شکل ۵ نقشه‌های فاصله از آبراهه، پوشش گیاهی، سازندهای زمین‌شناسی و بارش ارائه شده است.

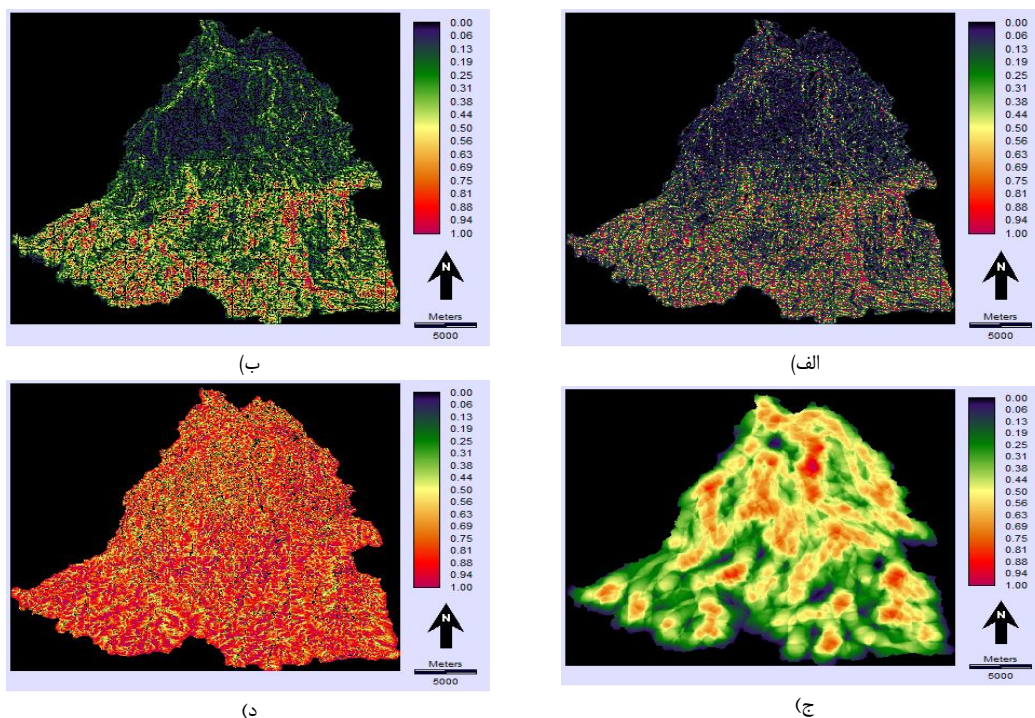


شکل ۴. نقشه‌های مورد استفاده در ارزیابی مکانی فرسایش حوزه خیاوجای الف) توان آبراهه، ب) عدد ناهمواری ملتون، ج) تراکم زهکشی، د) رطوبت توپوگرافی

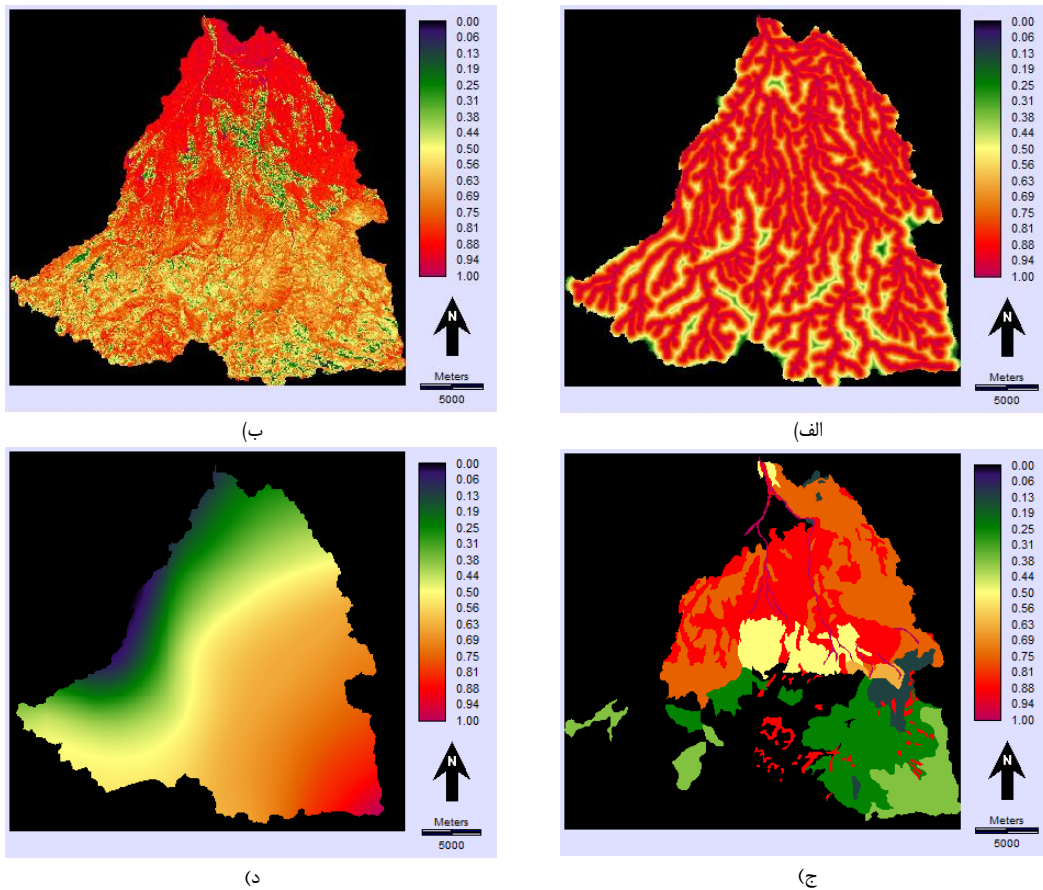
توابع کاهشی فازی استفاده شد. در خصوص لایه فاصله از آبراهه، با توجه به اهمیت فواصل نزدیک به آبراهه‌ها در فرسایش، از تابع کوچک فازی استفاده شد. در مورد دو لایه جهت شیب و سازندهای زمین‌شناسی، کدهایی با مقادیر عددی بالاتر به کلاس‌های فرسایش‌پذیرتر اختصاص یافت و سپس با استفاده از تابع بزرگ فازی سازی شدند.



شکل ۶. نقشه‌های فازی در ارزیابی مکانی فرسایش حوزه خیاوچای الف) شیب، ب) جهت، ج) انحنای سطح زمین، د) طول دامنه



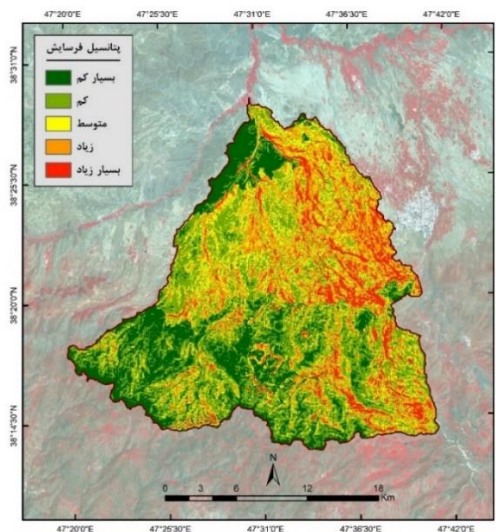
شکل ۷. نقشه‌های فازی در ارزیابی مکانی فرسایش حوزه خیاوچای الف) توان آبراهه؛ ب) عدد ناهمواری ملتون، ج) تراکم زهکشی، د) رطوبت توپوگرافی



شکل ۸. نقشه‌های فازی مورد استفاده در ارزیابی مکانی فرسایش حوزه خیاوچای (الف) فاصله از آبراهه، (ب) NDVI، (ج) سازند زمین‌شناسی، (د) بارش

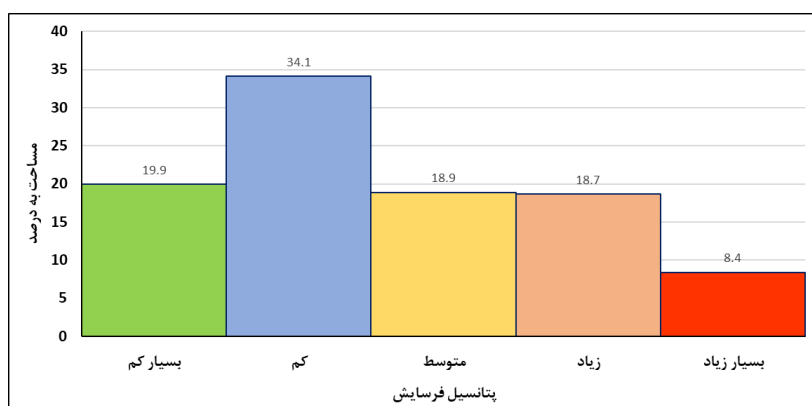
• ترکیب فازی لایه‌ها و تهیه نقشه پهنه‌بندی فرسایش

در طی مراحل قبلی تحقیق در راستای ارزیابی مکانی و پهنه‌بندی پتانسیل فرسایش در سطح حوزه آبخیز خیاوچای شاخص‌های مؤثر بر فرسایش به صورت نقشه تهیه و پهنه‌بندی پتانسیل فرسایش حوزه آبخیز خیاوچای با کاربرد اپراتور گامای فازی تهیه شد. در شکل ۹ پهنه‌بندی پتانسیل فرسایش در سطح حوزه آبخیز خیاوچای ارائه شده است.



شکل ۹. پهنه‌بندی پتانسیل فرسایش حوزه خیاوچای با استفاده از منطق فازی

بر اساس نقشه نهایی پهنه‌بندی پتانسیل فرسایش می‌توان گفت که حوضه مورد مطالعه دارای پتانسیل فرسایشی بالایی است. بر این اساس، حدود ۸/۴ درصد مساحت آبخیز خیاوچای در کلاس با پتانسیل فرسایشی بسیار زیاد و حدود ۱۸/۷ درصد آن در کلاس با پتانسیل فرسایش زیاد واقع شده‌اند که در نیمه شرقی حوضه واقع شده‌اند (شکل ۹). نقشه پهنه‌بندی فرسایش نشان می‌دهد که محدوده‌هایی با فرسایش‌پذیری بالا بر شیب‌های بالای ۲۰ درصد منطبق هستند. همچنین جهت دامنه در مناطق فرسایش‌پذیر بیش‌تر جنوبی هستند. علاوه بر این، می‌توان گفت که مقدار شاخص NDVI در محدوده‌هایی با فرسایش زیاد و بسیار زیاد کم‌تر از ۰/۳۱ است. همچنین محدوده‌های فرسایش‌پذیر با مناطقی با تراکم بالای زهکشی منطبق هستند. باید اشاره شود که پتانسیل بالای فرسایش محدوده مذکور حاصل برآیند شاخص‌های ژئومورفولوژیک، پوشش گیاهی ضعیف و سازندهای زمین‌شناسی فرسایش‌پذیر (سازندهای آبرفتی جوان کواترنری، پادگانه‌های آبرفتی قدیمی، جدید و آبرفت‌های عهد حاضر) است. حدود ۱۹ درصد از مساحت حوضه آبخیز خیاوچای در کلاس با پتانسیل فرسایشی متوسط قرار گرفته است که در قسمت‌های میانی حوضه پراکنده شده‌اند. کلاس فرسایشی کم و بسیار کم به ترتیب ۳۴ و ۲۰ درصد منطقه را به خود اختصاص داده است (شکل ۱۰).



شکل ۱۰. توزیع کلاس‌های فرسایش در سطح حوضه آبخیز خیاوچای

۴- بحث و نتیجه‌گیری

فرسایش خاک جزء فرایندهای ژئومورفولوژیکی بالقوه‌ای است که انعکاسی از چگونگی مدیریت اراضی و شاخص‌های محیطی است. در پژوهش حاضر پتانسیل فرسایش آبخیز خیاوچای مشگین‌شهر استان اردبیل نقشه‌بندی شد. الگوی مکانی فرسایش خاک متأثر از تغییرات شاخص‌های ژئومورفومتری است. از طرفی، با توجه به تعدد عوامل مؤثر بر فرسایش خاک، لازم است پدیده مذکور از ابعاد مختلف مورد ارزیابی قرار گیرد. در این پژوهش، از ۹ شاخص (فیزیوگرافی، مورفومتری) در ترکیب با بارش، کاربری اراضی و زمین‌شناسی و رویکرد فازی استفاده شد. متغیر پوشش گیاهی معرف نقش حفاظتی، متغیر بارش به‌عنوان معرف شرایط بارندگی و از متغیر سازندهای زمین‌شناسی به‌عنوان معرف فرسایش‌پذیری مواد سطحی حوضه استفاده شد. شاخص‌های مورد استفاده در این پژوهش، منعکس‌کننده وضعیت ژئومورفولوژیکی و هیدرولوژیکی منطقه مورد مطالعه است. در این رابطه، تهیه نقشه‌های پتانسیل فرسایش گامی اساسی در راستای مدیریت و کاهش اثرات فرسایش محسوب می‌شود. نقشه فرسایش تهیه شده می‌تواند مبنای اولویت‌بندی مناطق از نظر اقدامات مدیریتی باشد. البته باید ذکر شود که تعدادی از عوامل مؤثر بر فرسایش قابل کنترل نیستند و تمرکز می‌تواند روی عوامل قابل کنترل باشد که می‌توان به پوشش گیاهی اشاره نمود. در مجموع حدود ۲۴ درصد از مساحت حوزه مورد مطالعه دارای فرسایش زیاد و بسیار زیاد است که در بخش‌های شرقی حوزه واقع شده است. حوضه خیاوچای مشگین‌شهر به دلیل شیب زیاد و وجود سازندهای زمین‌شناسی فرسایش‌پذیر از پتانسیل فرسایشی بالایی برخوردار است. ارزیابی مکانی پتانسیل فرسایش آبی می‌تواند گامی اساسی در راستای شناسایی پهنه‌های بحرانی و تمرکز اقدامات حفاظتی و کاهش فرسایش خاک محسوب شود. استفاده از رویکرد فازی و توابع فازی‌ساز امکان در نظر گرفتن پارامترهای متعدد، بی‌بعد نمودن متغیرها و نیز کاهش عدم قطعیت در ارزیابی پتانسیل فرسایش را فراهم می‌کند. با توجه اینکه اکثر شاخص‌های مذکور دارای واحد اندازه‌گیری متفاوت و یا کیفی هستند، لازم است همسان‌سازی شوند. در برخی موارد لازم است که ارزش‌های لایه‌های اطلاعاتی مؤثر بر فرسایش

معکوس شود تا رابطه و تاثیر آن بر فرسایش به درستی اعمال شود. با مرزبندی قطعی کلاس‌های عوامل مؤثر، امکان کاهش عدم قطعیت فراهم می‌شود. در این راستا، باکیمچندرا و نیز فائوزی و همکاران بر کارائی مدل فازی در ارزیابی و تحلیل مکانی خطر فرسایش تأکید نموده‌اند (Bakimchandra, 2011; Fauzi et al., 2017). از محدودیت‌های پژوهش حاضر این است که نقشه فرسایش منطقه از طریق بازدیدهای میدانی مورد ارزیابی قرار گرفته است و در صورت وجود داده‌های مشاهداتی، امکان ارزیابی بهتر نتایج با واقعیت فراهم می‌شد. رویکرد مورد استفاده در پژوهش حاضر می‌تواند در سایر مناطق هم بر اساس داده‌های موجود و با لحاظ متغیرهای بیش‌تر بر مورد استفاده قرار گیرد.

۵- سپاس‌گزاری

این مقاله برگرفته از پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد خانم محیا ینصری است که با حمایت‌های مادی و معنوی دانشگاه محقق اردبیلی انجام شده است.

۶- فهرست منابع

- اسفندیاری درآباد، فریبا؛ مصطفی‌زاده، رئوف؛ پاسبان، امیرحسام و نظافت تکلہ، بهروز (۱۴۰۱). تلفیق شاخص‌های زمینی و پوشش گیاهی برای برآورد و شناسایی خطر فرسایش خاک در حوضه آبخیز عموقین اردبیل، تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، ۹ (۱)، ۹۶-۷۷.
- رضایی مقدم، محمدحسین؛ رجبی، معصومه؛ دانش‌فراز، رسول و خیری‌زاده، منصور (۱۳۹۵). پهنه‌بندی و بررسی اثرات مورفولوژیکی سیلاب‌های رودخانه زرنه‌رود (از ساری‌قمیش تا سد نوروزلو)، جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۵ (۱)، ۲۰-۱.
- سرور، هوشنگ و خیری‌زاده، منصور (۱۳۹۶). ارزیابی توسعه فیزیکی درون‌زا و برون‌زای شهر مراغه و ارائه الگوی بهینه، برنامه‌ریزی و آمایش فضا، ۲۱ (۳)، ۳۶۷-۳۲۹.
- طالبی‌خیابوی، حسین؛ ذبیحی، محسن و مصطفی‌زاده، رئوف (۱۳۹۶). تأثیر سناریوهای مختلف مدیریت کاربری اراضی بر میزان فرسایش خاک با استفاده از مدل USLE و GIS در آبخیز سد یامچی اردبیل، علوم آب و خاک، ۲۱ (۲)، ۲۳۴-۲۲۱.
- عابدینی، موسی؛ جوادی، سجاده؛ مصطفی‌زاده، رئوف و پاسبان، امیرحسام (۱۴۰۱). ارتباط شاخص‌های پوشش گیاهی و ژئومورفیک با مقادیر فرسایش و رسوب در حوضه آبریز کوزه‌توپراق، هیدروژئومورفولوژی، ۹ (۳۲)، ۱۲۸-۱۰۵.
- قربانی، اردوان؛ حزب‌بوی، زینب؛ مصطفی‌زاده، رئوف و علائی، نازیلا (۱۳۹۹). تحلیل ارتباط بین سنج‌های سیمای سرزمین و فرسایش خاک حوضه آبخیز کوزه‌تپراقی، استان اردبیل، جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۹ (۴)، ۹۱-۶۵.
- مصطفی‌زاده، رئوف؛ حاجی، خدیجه؛ اسمعیلی‌عوری، اباذر و نظرزاد، حبیب (۱۳۹۶). اولویت‌بندی زیرحوضه‌های بحرانی از لحاظ فرسایش و رسوب با استفاده از مدل پاسخ فرسایش حوضه (WERM) و آنالیز مورفومتری (مطالعه موردی: حوضه آبخیز روضه‌چای، استان آذربایجان غربی)، پژوهشنامه مدیریت حوضه آبخیز، ۸ (۱۶)، ۱۴۲-۱۵۶.
- نادری، فتح‌اله، کریمی، حاجی و ناصری، بهروز (۱۳۸۹). پهنه‌بندی پتانسیل فرسایش خاک در حوضه آبخیز آسمان آباد ایلام به روش شاخص فرسایش، پژوهش‌های آبخیزداری (پژوهش و سازندگی)، ۲۳ (۴)، ۵۱-۴۴.

References

- Abedini, M., Javadi, S., Mostafazadeh, R., Pasban, A. (2022). Relationship of Vegetation and Geomorphic Indices with Erosion and Sediment Rates in Koozeh Topraghi Watershed. *Hydrogeomorphology*, 9(32), 128-105. doi: 10.22034/hyd.2022.51464.1636 <https://doi.org/10.22034/hyd.2022.51464.1636> [in Persian]
- Anjireddy, M. (2008). Remote sensing and geographical information systems. BS Publications, Hyderabad. 453p. <https://www.amazon.in/TEXTBOOK-SENSING-GEOGRAPHICAL-INFORMATION-SYSTEMS/dp/9381075972>
- Bakimchandra, O. (2011). Integrated Fuzzy-GIS approach for assessing regional soil erosion risks. Institut für Wasserbau der Universität Stuttgart. <https://elib.uni-stuttgart.de/handle/11682/380>
- Bizzi, S. and Lerner, D. N. (2015). The use of stream power as an indicator of channel sensitivity to erosion and deposition processes. *River Research and Applications*, Vol. 31, pp. 16-27. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/rra.2717>

- CORNELIS, W. M. (2006). Hydroclimatology of wind erosion in arid and semiarid environments. *Dryland ecohydrology*, 141-159. <https://doi.org/10.1007/1-4020-4260-4>
- Esfandiari Darabad, F., Mostafazadeh, R., Pasban, A.H., Nezafat Takleh, B. (2022). Integrating terrain and vegetation indices to estimate and identify the soil erosion risk Amoughin watershed, Ardabil. *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards*, 9 (1) :77-96 <http://dorl.net/dor/20.1001.1.24237892.1401.9.1.5.1> [in Persian]
- Fauzi, M., Suprayogi, I., Sutikno, S., Sandhyavitri, A., & Riyawan, E. (2017). Development of erosion risk map using fuzzy logic approach. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 101, p. 04021). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201710104021>
- Ghorbani, A., Hazbavi, Z., Mostafazadeh, R., & Alaei, N. (2021). Analysis the Relationship between Landscape Metrics and Soil Erosion of KoozehTopraghi Watershed, Ardabil Province. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 9(4), 65-91. <https://doi.org/10.22067/geoh.2021.67020.0> [in Persian]
- Hellin, J. (2006). Better land husbandry: from soil conservation to holistic land management. Science publishers. <https://www.amazon.com/Better-Land-Husbandry-Conservation-Management/dp/1578082447>
- Lal, R., Ahmadi, M., & Bajracharya, R. M. (2000). Erosional impacts on soil properties and corn yield on Alfisols in central Ohio. *Land Degradation & Development*, 11(6), 575-585. [https://doi.org/10.1002/1099-145X\(200011/12\)11:6<3C575::AID-LDR410%3E3.0.CO;2-N](https://doi.org/10.1002/1099-145X(200011/12)11:6<3C575::AID-LDR410%3E3.0.CO;2-N)
- Lee, S. (2007). Application and verification of fuzzy algebraic operators to landslide susceptibility mapping. *Environmental Geology*, 52, 615-623. <https://doi.org/10.1007/s00254-006-0491-y>
- Li, Q. (2013). Fuzzy approach to analysis of flood risk based on variable fuzzy sets and improved information diffusion methods. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13(2), 239-249. <https://doi.org/10.5194/nhess-13-239-2013>
- Lucà, F., Conforti, M., & Robustelli, G. (2011). Comparison of GIS-based gully susceptibility mapping using bivariate and multivariate statistics: Northern Calabria, South Italy. *Geomorphology*, 134(3-4), 297-308. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.07.006>
- Morgan, R. P. C. (2009). Soil erosion and conservation. John Wiley & Sons. https://svgaos.nl/wp-content/uploads/2017/02/Morgan_2005_Soil_Erosion_and_Conservation.pdf
- Melton, M. A. (1965): The geomorphic and paleoclimatic significance of alluvial deposits in Southern Arizona. *Journal of Geology*, 73:1-38. <http://www.jstor.org/stable/30066379>
- Mostafazadeh, R., Haji, Kh., Esmali-Ouri, A., Nazarnejad, H. 2018. Prioritization the critical sub-watersheds based on soil erosion and sediment using Watershed Erosion Response Model (WERM) and morphometric analysis (Case study: Rozechai watershed, West Azerbaijan Province). *Journal of Watershed Management Research*, 8(16):142-156. <http://dx.doi.org/10.29252/jwmr.8.16.142> [in Persian]
- Mostafazadeh, R., Talebi Khiavi, H., Esmali-Ouri, A., & Golshan, M. (2022). Surface runoff and sediment yield response under the rainfall simulation condition controlled by soil variables of a semi-arid landscape. *Environment, Development and Sustainability*, 1-18. <https://doi.org/10.1007/s10668-022-02569-z>
- Naderi, F., Karimi, H., Naseri, B. 2010. Soil erosion potential zoning in Aseman Abad Watershed by Erosion Index, *Watershed Management Researches Journal* (Pajouhesh & Sazandegi), 89: 44-51. <https://sid.ir/paper/200563/en> [in Persian]
- Nandalal, H. K., & Ratnayake, U. R. (2011). Flood risk analysis using fuzzy models. *Journal of Flood risk management*, 4(2), 128-139. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1753-318X.2011.01097.x>
- Rezaei Moghaddam, M. H., Rajabi, M., Daneshfaraz, R., & Keirizadeh, M. (2016). Zonation and Investigating the Morphological Effects of Flooding on Zarrineh-Roud River (From Sariqamish to Noruzlu Dam). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 5(1), 1-20. doi: 10.22067/geo.v5i1.52330 <https://doi.org/10.22067/geo.v5i1.52330> [in Persian]
- Sarvar, H., Kheirizadeh, H. 2017. Analyzing Endogenous and Exogenous Physical Development and Introducing of an Optimum Pattern. *The Journal of Spatial Planning*, 21 (3) :329-367. <http://hsm.sp.modares.ac.ir/article-21-4668-en.html> [in Persian]
- Sreelakshmy, M., Dhanusree, M., & Thangamani, V. (2021). Application of GIS techniques to understand the geomorphometric characteristics of a tropical watershed in South India, *Geology, Ecology, and Landscapes*, <https://doi.org/10.1080/24749508.2021.1952749>
- Talebi Khiavi, H., & Mostafazadeh, R. (2022). The spatiotemporal dependencies of terrain indices with soil characteristics in a steep hillslope mountainous area. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(10), 937. <https://doi.org/10.1007/s12517-022-10220-4>

- Talebikhiavi H, Zabihi M, Mostafazadeh R. 2017. Effects of Land-use Management Scenarios on Soil Erosion Rate using GIS and USLE Model in Yamchi Dam Watershed, Ardabil. *Journal of Water and Soil Science*, 21 (2) :221-234. <http://dx.doi.org/10.18869/acadpub.jstnar.21.2.221> **[in Persian]**
- Timmermans, H. (2005). *Decision Support Systems in Urban Planning*. Taylor & Francis. 252p. <https://cir.nii.ac.jp/crid/1130282272071302144>
- Wang, Z. Y., Lee, J. H., & Melching, C. S. (2014). *River dynamics and integrated river management*. Springer Science & Business Media. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-25652-3>
- Zhu, D., Wang, T. W., Cai, C. F., Li, L., Shi, Z. H. (2009). Large-scale assessment of soil erosion using a neuro-fuzzy model combined with GIS: a case study of Hubei province, China. *Land Degradation & Development*, 20, 654-666. <https://doi.org/10.1002/ldr.956>