



Development of Regional Models for Predicting Water Soil Erosion Using Sediment Gauging Data and Advanced Statistical Methods (Case Study: Urmia Lake Watershed)

Mohammad Tahmoures¹ 

1. Corresponding Author, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (SCWMRI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran. E-mail: m.tahmoures@areeo.ac.ir

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: Nov. 9, 2025

Revised: Dec. 29, 2025

Accepted: Jan. 6, 2026

Published online: Feb. 2026

Keywords:

*Water erosion,
Sediment Delivery Ratio (SDR),
Regional modeling,
Urmia Lake,
Multivariate regression.*

ABSTRACT

Soil erosion prediction at the watershed scale remains a critical challenge in sustainable land and water resource management. Although many studies have applied various empirical and statistical models, most have not adequately integrated long-term sediment records with a regional approach that accounts for both environmental and hydrological variability. The aim of this study is to develop regional models for predicting soil erosion rates through the integration of long-term sediment monitoring data and advanced statistical techniques, including Factor Analysis (FA), Principal Component Analysis (PCA), and Clustering methods, across the Urmia Lake watershed. Sediment data from 30 selected gauging stations within the major sub-basins were collected over a 20-year period and correlated with hydrological, topographic, geological, climatic, and land-use parameters of the study area. Initially, PCA was applied to reduce multicollinearity among input variables and to identify the principal factors controlling sediment transport. Subsequently, using hierarchical clustering based on hydrological behavior and sediment load, the sub-basins were divided into two distinct groups. Finally, the results of the factor analysis were employed as optimized inputs for multivariate regression modeling, leading to the development of regional predictive models. The validation results demonstrated that the developed models possess a high explanatory capacity, with an average coefficient of determination (R^2) of 0.89 at the regional scale. The findings indicated that three primary factors — agricultural land area, erosion-prone lithological formations, and mean annual discharge — exerted the greatest influence on variations of the Sediment Delivery Ratio (SDR) across the sub-basins. The developed regional models provide strong potential for rapid assessment of erosion risk in newly monitored sub-basins without the need for extensive field measurements, offering an effective decision-support tool for sustainable land management, soil erosion control, and watershed policy planning within the Urmia Lake basin.

Cite this article: Tahmoures, M. (2026). Development of Regional Models for Predicting Water Soil Erosion Using Sediment Gauging Data and Advanced Statistical Methods (Case Study: Urmia Lake Watershed), *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 56 (12), 3435-3454. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.405398.670042>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.405398.670042>



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Urmia Lake basin, the largest inland water body in Iran, represents a vital socio-environmental resource and is currently facing rapid decline due to both climatic and anthropogenic stressors. Water-induced soil erosion and subsequent sedimentation processes in its tributaries drastically reduce soil fertility, degrade water quality, and lead to siltation that impairs lake water inflows and increases environmental risks for the entire basin. Identifying the key drivers of sediment yield and mapping spatial erosion potential are crucial for effective watershed management. This study addresses the challenge of limited sediment data in the region by integrating statistical and GIS-based techniques to develop robust, spatially-explicit prediction models for erosion and sediment delivery.

Method

Study Area and Data:

The Urmia Lake watershed covers approximately 52,000 km² and comprises several major sub-basins, including Zarrineh Rood, Simineh Rood, Aji Chay, and Lesser Zab. Thirty sediment gauging stations with consistent records of annual streamflow and suspended sediment (covering 1991–2021) were selected for analysis.

Variable Selection and Extraction:

Thirty predictor variables covering five thematic categories—physiography, climate, geology/geomorphology, land use/vegetation, and soil physical properties—were extracted using advanced GIS platforms and remote sensing (Landsat NDVI).

- Physiography: sub-basin area, mean slope, shape index, elevation.
- Climate: mean annual precipitation, maximum rainfall intensity, aridity index.
- Geology/Geomorphology: percentage of erodible formations, lithology, drainage density.
- Land Use/Vegetation: agricultural land and rangeland area, NDVI.
- Soil: dominant soil texture, infiltration rate.

Statistical Analysis and Modeling:

To address multicollinearity and reduce model complexity, Principal Component Analysis (PCA) was applied, transforming the suite of 30 interrelated variables into a set of orthogonal principal components. Hierarchical Cluster Analysis was then used to stratify sub-basins into two homogeneous regional groups based on physiographic and hydrological features. Within each cluster, stepwise multiple regression models were established to predict the natural logarithm of the Sediment Delivery Ratio (SDR), the main indicator of basin-scale erosion risk. Model performance was validated using the coefficient of determination (R^2), Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE), and Relative Root Mean Square Error (RRMSE). Seven widely-used empirical SDR equations (e.g., Roehl, Fournier, Garbrecht) were evaluated to select the most spatially-accurate formulation for final erosion mapping.

Results

Principal Drivers and Model Outcomes:

PCA revealed that just three principal components (agricultural land area, abundance of erodible lithology, and mean annual discharge) explained over 85% of the SDR variance across sub-basins. This demonstrates that spatial SDR variability can be reliably captured using a compact set of landscape, land use, and hydrologic indicators.

Regression models developed for the two clusters yielded strong predictive power:

- Cluster 1 (northern/cooler sub-basins): $R^2 = 0.89$, NSE = 0.85
- Cluster 2 (southern/semi-arid sub-basins): $R^2 = 0.77$, NSE = 0.72

Spatial SDR maps generated using the best-fitted empirical equation matched the ground-measured sediment data from stations with >81% accuracy.

Spatial Patterns and Management Insights:

Critical erosion hotspots ($SDR > 0.4$) are notably concentrated in the southern and southwestern regions of the basin, particularly in the Simineh Rood and Godarchai sub-basins. These areas are typified by steep slopes, prevalence of easily erodible geological units, and intensive agriculture—all factors that elevate erosion potential. In contrast, central and northern sub-basins displayed moderate or lower SDR values, often benefiting from greater natural vegetation cover and more stable geomorphological setting.

Conclusions

The study demonstrates that regional modeling, combining PCA and cluster-based regression, offers a high-accuracy, cost-effective solution for spatial erosion assessment in data-limited basins. The identification of key predictor variables and high mapping reliability provide valuable guidance for policy makers and practitioners. Future studies can further improve predictive capabilities by incorporating near real-time remote sensing and exploring machine learning approaches for capturing non-linear sediment transport dynamics.

Integrating advanced statistical approaches (PCA, Cluster Analysis, multivariate regression) with hydrological and spatial data proves effective for predicting and mapping water soil erosion in large and complex catchments. The resulting SDR regional model and spatial erosion maps offer actionable tools for prioritizing erosion control and watershed conservation efforts within the Urmia Lake basin.

Author Contributions

Writing—original draft preparation, methodology, software, Conceptualization, funding acquisition, resources, M.T.

Data Availability Statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

The authors gratefully acknowledge the financial support of the The Vice-Presidency for Science, Technology and Knowledge (Project code: 24-29-29-034-980445) for conducting this research.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct. The study involved only soil sampling and laboratory analysis, without any interaction with humans or animals; hence, ethical approval was not applicable.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest

توسعه مدل‌های منطقه‌ای پیش‌بینی فرسایش آبی خاک با استفاده از داده‌های رسوب‌سنجی و روش‌های آماری پیشرفته (مطالعه موردی: حوزه آبخیز دریاچه ارومیه)

محمد طهمورث^۱^۱. نویسنده مسئول، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران. رایانامه:m.tahmoures@areeo.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	در سال‌های اخیر، پیش‌بینی نرخ فرسایش خاک در حوزه‌های آبخیز با استفاده از داده‌های رسوب‌سنجی و مدل‌های آماری، به‌عنوان یکی از چالش‌های اصلی مدیریت منابع خاک مطرح بوده است. با وجود مطالعات متعدد در این زمینه، اغلب مدل‌ها فاقد رویکرد منطقه‌ای و تلفیق جامع داده‌های بلندمدت رسوب‌سنجی با شاخص‌های هیدرولوژیکی و زیست‌اقلیمی هستند. هدف این پژوهش، توسعه مدل‌های منطقه‌ای جهت پیش‌بینی نرخ فرسایش خاک با تلفیق داده‌های رسوب‌سنجی بلندمدت و روش‌های پیشرفته آماری شامل تحلیل عاملی (FA)، تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) و خوشه‌بندی (Clustering) در حوزه آبخیز دریاچه ارومیه می‌باشد. داده‌های رسوب‌سنجی از ۳۰ ایستگاه منتخب در زیرحوضه‌های اصلی طی یک دوره ۲۰ ساله جمع‌آوری و با پارامترهای هیدرولوژیکی، توپوگرافیک، زمین‌شناسی، اقلیمی و کاربری اراضی زیرحوضه‌های منطقه مطالعاتی مرتبط شدند. ابتدا، با استفاده از PCA، هم‌خطی بین متغیرهای ورودی کاهش داده شد و عوامل اصلی مؤثر بر انتقال رسوب شناسایی شدند. سپس، با استفاده از خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی و بر اساس عملکرد هیدرولوژیکی و بار رسوبی، زیرحوضه‌ها به دو گروه مجزا تقسیم شدند. در نهایت، نتایج حاصل از تحلیل عاملی، به عنوان ورودی‌های بهینه‌سازی شده در مدل رگرسیون چندمتغیره مورد استفاده قرار گرفته و مدل‌های پیش‌بینی منطقه‌ای توسعه یافتند. نتایج اعتبارسنجی مدل‌ها نشان داد که مدل‌های توسعه‌یافته از دقت و توان تبیین بالایی برخوردارند؛ به گونه‌ای که میانگین ضریب تعیین (R^2) آن‌ها در مقیاس منطقه‌ای برابر با ۰/۸۹ به دست آمد. نتایج نشان داد که سه عامل اصلی شامل مساحت اراضی کشاورزی، سازندهای حساس به فرسایش و دبی متوسط سالیانه بیشترین تأثیر را در تغییرات نسبت تحویل رسوب (SDR) زیرحوضه‌های مطالعاتی دارند. مدل‌های منطقه‌ای حاصله از این پژوهش قابلیت بالایی برای ارزیابی سریع ریسک فرسایش در زیرحوضه‌های جدید بدون نیاز به پایش میدانی طولانی‌مدت فراهم می‌آورند و می‌توانند به عنوان ابزاری مؤثر در مدیریت پایدار اراضی و حفاظت از منابع طبیعی، پایش و کنترل فرسایش خاک و سیاست‌گذاری آبخیزداری در حوزه آبخیز دریاچه ارومیه مورد استفاده قرار گیرند.

واژه‌های کلیدی:

دریاچه ارومیه،
رگرسیون چندمتغیره،
فرسایش آبی،
مدل منطقه‌ای،
نسبت تحویل رسوب.

استناد: طهمورث، محمد (۱۴۰۴). توسعه مدل‌های منطقه‌ای پیش‌بینی فرسایش آبی خاک با استفاده از داده‌های رسوب‌سنجی و روش‌های آماری پیشرفته (مطالعه موردی: حوزه آبخیز دریاچه ارومیه)، مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۶ (۱۲)، ۳۴۵۴-۳۴۳۵.

<https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.405398.670042>

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.405398.670042>

مقدمه

فرسایش خاک به عنوان یکی از عوامل جدی تهدیدکننده حاصلخیزی خاک و در نتیجه توان تولیدی آن، از مهمترین مسائل زیست‌محیطی کشورهای در حال توسعه محسوب شده و همواره به عنوان یکی از مهمترین مشکلات و نگرانی‌های محیطی در زمینه دستیابی به توسعه پایدار مطرح می‌باشد (Alatorre, et al., 2022). گرچه پدیده فرسایش خاک، به عنوان خطری بالقوه در کشورهای جهان به شمار می‌آید، اما نقش فرسایش و تولید رسوب در کاهش حاصلخیزی و هدررفت خاک، پر شدن مخازن دریاچه‌ها، تالاب‌ها، سدها، گرفتگی و انسداد مجاری آبیاری، آبراهه‌ها و رودخانه‌ها، گل‌آلود کردن آب رودخانه‌ها و کاهش کیفیت آب و آلودگی منابع آب سطحی بخش‌های پایین دست از گذشته‌های دور تاکنون مورد توجه متخصصین و کارشناسان علوم زمین و منابع طبیعی بوده است. برای جلوگیری و یا کاهش اثرات این پدیده، نیاز به برنامه‌ریزی و اجرای اقدامات حفاظت خاک و کنترل فرسایش و رسوب در چارچوب طرح‌های آبخیزداری می‌باشد. بدین ترتیب لازم است جهت کاهش فرسایش و تولید رسوب، در ابتدا مناطق بحرانی در حوزه‌های آبخیز شناسایی شده و پس از آن اولویت‌بندی به منظور مهار فرسایش و تولید و حمل رسوب در چارچوب اجرای طرح‌های آبخیزداری انجام شود (نیک کامی و شادفر، ۱۴۰۰). از سوی دیگر عدم وجود ایستگاه‌های آب‌سنجی و رسوب‌سنجی در بسیاری از حوضه‌های کشور باعث شده تا استفاده از روش‌های تحلیل منطقه‌ای رسوب بیشتر مدنظر قرار گیرد (چیت‌ساز و همکاران، ۱۴۰۰). شناسایی مناطق اصلی تولید رسوب و برآورد نسبت تحویل رسوب نقش به‌سزایی در تدوین روش‌ها و راهبردهای مدیریت حوضه‌ها و طراحی برنامه‌های حفاظت خاک دارد (نور و عرب‌خداری، ۱۴۰۲).

دریاچه ارومیه به عنوان یکی از پیکره‌های آبی مهم بین‌المللی، در سال‌های اخیر بر اثر عوامل اقلیمی و انسانی نظیر تقاضای روزافزون آب مصرفی ناشی از رخداد خشکسالی جهت بخش‌های مختلف شرب، کشاورزی، صنعت، گسترش اراضی آبی زراعی و باغی، حفر بی‌رویه چاه‌های نیمه‌عمیق و عمیق، بهره‌برداری و برداشت غیراصولی از منابع آب سطحی و زیرزمینی، اجرای طرح‌های توسعه منابع آب و خاک و احداث سدهای مخزنی با کاهش بسیار شدید منابع آب ورودی به مخزن و افزایش تبخیر مواجه شده و در سالیان اخیر بخش وسیعی از وسعت این دریاچه خشک گردیده است. به موازات خشکیدگی آب این دریاچه در دهه گذشته، در اثر پدیده فرسایش و انتقال مواد رسوبی ریز دانه توسط رودخانه‌ها به داخل مخزن دریاچه ارومیه، مخاطرات محیطی، چالش‌ها و مشکلات بسیار زیادی ایجاد شده و پدیده رسوب-گذاری در برخی از نقاط ساحلی مانع از نفوذ آب سطحی در دلتای رودخانه‌ها و تغذیه طبیعی مخزن دریاچه شده است. همچنین، در اثر تله‌اندازی نهشته‌های رسوبی ریز دانه ناشی از سیلاب‌های فصلی بویژه در گستره مصب رودخانه‌های منتهی به مخزن دریاچه ارومیه، آب ورودی به مخزن کاهش یافته و حجم زیادی از آب پیش از ورود به داخل دریاچه تبخیر می‌شود (Taghavi et al., 2020).

استفاده از برخی از ویژگی‌های سهل‌الوصول حوضه و برقراری ارتباط بین این خصوصیات و دبی رسوب، باعث شده تا روش‌های تحلیل منطقه‌ای در حوضه‌های فاقد آمار یک ابزار قدرتمند جهت برآورد دبی رسوب تلقی شود. شعبانی و همکاران (۱۳۸۶) با استفاده از روش تجزیه عاملی و رگرسیون چند متغیره، عوامل مؤثر بر رسوب حوضه طالقان را مساحت اراضی کشاورزی، مساحت حوضه‌ها، مساحت سازندهای حساس و پستی و بلندی حوضه معرفی کردند و اظهار داشتند که ۸۸ درصد تغییرات رسوب‌دهی منطقه مورد بررسی، تحت تاثیر متغیرهای مذکور می‌باشد. ثقفیان و همکاران (۱۳۸۸) نیز با استفاده از روش تجزیه و تحلیل عاملی در حوزه‌های آبخیز جنوب غرب ایران عواملی همچون مساحت حوضه، درصد تحدب و درصد اراضی با جهت شمال غربی را به ترتیب مؤثرترین عوامل بر تولید رسوب این حوضه‌ها معرفی نمودند. چیت‌ساز و همکاران (۱۴۰۰) در تحقیقی به مدل‌سازی رسوب معلق و تعیین عوامل مؤثر بر آن در حوزه‌های آبخیز کارون بزرگ و کرخه پرداختند و بیان نمودند که ویژگی‌های فیزیوگرافی حوضه‌ها مانند محیط، مساحت، طول آبراهه اصلی و پستی و بلندی حوضه‌ها نسبت به سایر عوامل اقلیمی، پوشش گیاهی و زمین‌شناسی حوضه‌های مورد مطالعه، از درجه اهمیت بیشتری در تولید رسوب منطقه برخوردارند. نیک کامی و همکاران (۱۴۰۰) در قالب طرح پژوهشی با عنوان "تهیه و یکپارچه‌سازی نقشه‌ها و داده‌های رقومی حوضه‌ها و توسعه پایگاه داده‌های مکانی، زمانی و موضوعی مرتبط با فرسایش و رسوب‌دهی در حوضه‌های رده هفت کشور" با استفاده از مدل EPM میزان رسوب‌دهی و با در نظر گرفتن ضریب انتقال رسوب حوضه‌ها میزان فرسایش خاک را تعیین و نقشه فرسایش خاک کشور برای حوزه‌های آبخیز مشرف به ایستگاه‌های آب‌سنجی را ارائه نمودند. نتایج تحقیق مذکور نشان داد که میانگین رسوب‌دهی و میزان متوسط وزنی فرسایش خاک در حوضه‌های مشرف بر ایستگاه‌های دارای آمار رسوب در کشور، به ترتیب ۳/۳ و ۱۶ تن در هکتار در سال است. کمترین و بیشترین میزان فرسایش خاک نیز به ترتیب با مقادیر ۹ و ۳۲/۴ تن در هکتار در سال متعلق به مناطق زاگرس میانی و



زاگرس جنوبی است. کمبری یکدانه‌گی و همکاران (۱۴۰۳) در پژوهشی به ارزیابی کارایی مدل‌های G2 و IntEro در برآورد فرسایش خاک و تولید رسوب سالانه در آبخیز کسلیان استان مازندران پرداختند. در این آبخیز، نتایج مدل‌های G2 و IntEro اندازه‌ی فرسایش خاک را به ترتیب ۱/۳۰ و ۲/۳۵ تن بر هکتار در سال نشان داد. در این پژوهش مدل‌های تجربی بررسی شده نتایجی مشابهی را نشان دادند. بر پایه‌ی تغییرات کاربری در آبخیز معرف کسلیان اندازه‌های برآوردی فرسایش و تولید رسوب سالانه قابل قبول و منطقی بود، اما تفاوت نتایج با داده‌های مشاهده‌ای بسیار زیاد بود و این یافته نشان‌دهنده‌ی کارایی کم مدل‌ها بود. با استفاده از مدل G2 (که بر اساس الگوریتم و ورودی‌های مدل RUSLE توسعه یافته است) و با تکیه بر اطلاعات ورودی دور سنجی شده، میانگین سالانه فرسایش خاک در ایران را ۱۶/۵ تن در هکتار (معادل ۲/۷ میلیارد تن تلفات سالانه کل) تخمین زدند. اسدی (۱۴۰۱) با اشاره به عدم توافق در خصوص مقدار دقیق فرسایش آبی در کشور، بیان کرد ارقام بیش از ۵-۶ تن در هکتار در سال به عنوان متوسط بلندمدت فرسایش آبی در کشور چندان منطقی به نظر نمی‌رسد. این امر به این دلیل است که بیش از نیمی از کشور شامل مناطق بیابانی و خشک می‌شود و نشانه‌های فرسایش شدید در بسیاری از مناطق مشاهده نمی‌شود. علاوه بر این در بخش‌های زیادی از کشور، مانند جنگل‌های طبیعی دست نخورده، مراتع با پوشش گیاهی مناسب، باغات و اراضی آبی مسطح، سطوح سنگی و مناطق مسکونی و همچنین در نواحی آبی و شن‌زارها، میزان فرسایش آبی تقریباً صفر یا بسیار کم است.

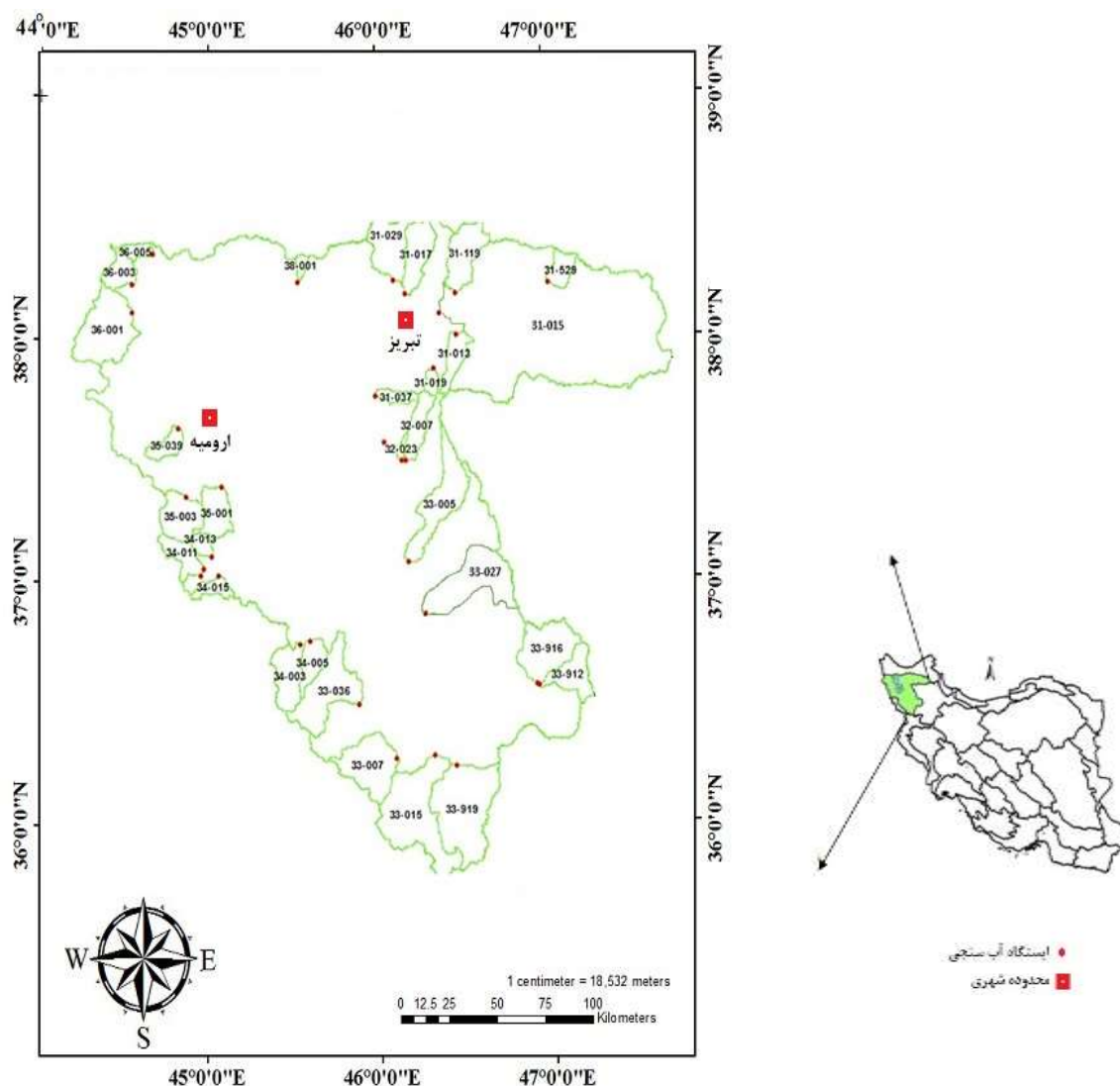
در مجموع می‌توان گفت که حوزه آبخیز دریاچه ارومیه به دلیل شرایط اقلیمی خاص، ساختار زمین‌شناسی حساس و فشارهای شدید انسانی (شامل تغییر کاربری اراضی و چرای بی‌رویه)، یکی از مناطق بحرانی کشور از نظر فرسایش محسوب می‌شود. ترسیم نقشه‌های دقیق میزان فرسایش، زیربنای هرگونه تصمیم‌گیری مؤثر در زمینه مدیریت منابع طبیعی و اجرای پروژه‌های آبخیزداری است. با توجه به گستردگی این حوزه و محدودیت‌های اجرایی برای اندازه‌گیری مستقیم رسوب در همه نقاط آن، توسعه مدل‌های تجربی منطقه‌ای مبتنی بر داده‌های رسوب‌سنجی معتبر، امری حیاتی به نظر می‌رسد. این پژوهش با هدف پر کردن این خلأ، بر توسعه مدل‌های آماری پیشرفته برای پیش‌بینی رسوب‌دهی ویژه در زیرحوضه‌های این دریاچه متمرکز است.

این پژوهش با هدف بهبود دقت و کارایی مدل‌سازی رسوب‌دهی در حوضه‌های آبخیز دریاچه ارومیه، سه رویکرد مکمل را دنبال می‌کند. نخست، با به کارگیری تحلیل عاملی^۱ (FA) و تحلیل مؤلفه‌های اصلی^۲ (PCA)، ابعاد داده‌ها کاهش یافته و مهم‌ترین متغیرهای اثرگذار بر رسوب‌دهی استخراج می‌شود. دوم، زیرحوضه‌ها بر اساس ویژگی‌های هیدرولوژیکی مشابه خوشه‌بندی^۳ شده تا امکان توسعه مدل‌های منطقه‌ای به جای مدل‌های نقطه‌ای فراهم شود. در نهایت، بر پایه عوامل استخراج شده، مدل‌های رگرسیون چندمتغیره منطقه‌ای توسعه و اعتبارسنجی می‌شوند تا چارچوبی کارآمد و قابل اتکا برای پیش‌بینی رسوب ارائه شود.

روش‌شناسی پژوهش

حوزه آبخیز دریاچه ارومیه با وسعت تقریبی ۵۱۹۶۴ کیلومتر مربع به عنوان یکی از شش حوضه آبریز اصلی در تقسیم بندی هیدرولوژی ایران به‌شمار می‌رود و گستره وسیعی از استان‌های آذربایجان غربی، آذربایجان شرقی و کردستان را در شمال غرب ایران در بر می‌گیرد. این حوضه در شمال، مشرق و جنوب به ترتیب به حوزه‌های آبخیز رودخانه ارس، قزل اوزن و از غرب به مرز کشورهای ترکیه و عراق محدود می‌شود. در حدود ۳۳۴۶۹ کیلومتر مربع از سطح این حوضه را مناطق کوهستانی (۶۴/۴ درصد)، ۱۲۵۶۴ کیلومتر مربع آن را دشت‌ها و کوهپایه‌ها (۲۴/۲ درصد)، ۵۳۲۰ کیلومتر مربع را سطح دریاچه ارومیه (۱۰/۲ درصد) و ۶۱۱ کیلومتر مربع آن را نیز مناطق شهری و روستایی (۱/۲ درصد) تشکیل می‌دهد. شکل ۱، موقعیت جغرافیایی حوزه آبخیز دریاچه ارومیه، موقعیت حوضه‌های منتخب و محل ایستگاه‌های آب‌سنجی در خروجی آن‌ها را نشان می‌دهد.

در حوزه آبخیز دریاچه ارومیه تعداد ۳۲ رودخانه بزرگ و کوچک وجود دارد که آبدهی رودخانه‌ها توسط ۱۱۶ ایستگاه آب‌سنجی اندازه‌گیری شده و شبکه زهکشی آن‌ها جریان‌های سطحی را به سمت دریاچه ارومیه به صورت یک حوضه بسته هدایت می‌کند. سیمینه رود و آجی چای از جمله رودخانه‌های مهم و بزرگ حوضه مذکور بوده که گستره وسیعی از این حوضه را در بر می‌گیرند.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی حوزه آبخیز دریاچه ارومیه، موقعیت حوضه‌های منتخب و محل ایستگاه‌های آب‌سنجی در خروجی آن‌ها

فرآیند انجام پژوهش حاضر در چند گام متوالی طراحی و اجرا گردید تا الگوی منطقه‌ای پیش‌بینی فرسایش خاک با دقت بالا در حوزه آبخیز دریاچه ارومیه تدوین شود.

۱. انتخاب ایستگاه‌ها و محدوده‌های مطالعاتی

در نخستین گام، ۳۰ ایستگاه آب‌سنجی فعال در سطح حوزه آبخیز دریاچه ارومیه به همراه زیرحوضه‌های متناظر آن‌ها به عنوان واحدهای پایه تحلیل انتخاب شدند. معیار انتخاب شامل دربرگیری حداقل ۳۰ سال داده معتبر هیدرورسوبی (دوره ۱۳۶۹/۱۳۷۰ تا ۱۳۹۹/۱۴۰۰)، پوشش مناسب مکانی در سطح سه استان آذربایجان شرقی، آذربایجان غربی و کردستان، و تنوع مساحت زیرحوضه‌ها بود. در انتخاب ایستگاه‌ها دقت شد که هیچ سد یا سازه تنظیمی در بالادست آن‌ها وجود نداشته باشد تا تأثیری بر داده‌های دبی و رسوب نگذارد. توزیع مکانی ایستگاه‌ها در شکل (۱) و ویژگی‌های هیدرولوژیکی آن‌ها در جدول (۱) نشان داده شده است.

۲. تفکیک داده‌ها به مجموعه‌های آموزشی و آزمون

در گام دوم، داده‌های بلندمدت گردآوری شده از این ایستگاه‌ها به صورت تصادفی به دو زیرمجموعه تقسیم شد: ۷۰ درصد داده‌ها برای آموزش و واسنجی مدل و ۳۰ درصد برای آزمون و صحت‌سنجی عملکرد آن به کار رفت. برای ارزیابی دقت پیش‌بینی‌ها، مقادیر تخمینی رسوب با داده‌های واقعی حاصل از منحنی‌های سنج‌های مقایسه گردید.

۳. برآورد میانگین رسوب معلق بلندمدت

به منظور تخمین میانگین سالانه رسوب معلق در هر ایستگاه، از روش آماری «میانگین دسته‌ها» بهره گرفته شد که نخستین بار توسط Jansson (1970) معرفی شده است. در این روش، داده‌های متناظر دبی-رسوب به ترتیب صعودی مرتب و به چند گروه تقسیم می‌شوند. سپس برای هر گروه، میانگین دبی و غلظت رسوب محاسبه و مجموعه‌ای از داده‌های جدید (Q-C) ایجاد می‌گردد. این داده‌ها در الگوی لگاریتمی برازش داده شده و معادله توانی رابطه (۱) برای محاسبه رسوب روزانه و به تبع آن سری سالانه رسوب استخراج می‌شود:

$$Q_s = aQ_w^b \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در این رابطه، Q_s دبی رسوب به ازای مقادیر دبی جریان، Q_w دبی جریان، a و b ضرایب معادله هستند.

۴. انتخاب شاخص‌ها و ویژگی‌های توضیحی زیرحوضه‌ها:

در ادامه، برای هر زیرحوضه، ۳۰ شاخص کمی از گروه‌های مختلف (هیدرولوژیکی، فیزیوگرافی، ژئومورفولوژی، اقلیمی، زمین‌شناسی و خاک، و کاربری اراضی/پوشش گیاهی) استخراج شد. انتخاب متغیرها بر اساس بررسی منابع، سوابق پژوهشی و قضاوت کارشناسی صورت گرفت؛ فهرست کامل پارامترها در جدول (۲) آمده است.

۵. آماده‌سازی داده‌ها و تبدیل لگاریتمی:

به منظور کاهش ناهمگونی ابعاد و تثبیت واریانس داده‌ها، تمامی متغیرهای مستقل و متغیر وابسته (رسوب‌دهی ویژه) به مقیاس لگاریتمی تبدیل شدند تا شرایط لازم برای تحلیل‌های چندمتغیره فراهم شود.

۶. شناسایی متغیرهای اثرگذار با تحلیل‌های آماری:

برای تعیین شاخص‌های کلیدی مؤثر بر تولید رسوب، از دو رویکرد آماری مکمل استفاده شد: تحلیل عاملی (FA) برای استخراج مؤلفه‌های اثرگذار و تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) برای رفع هم‌خطی میان متغیرها و کاهش ابعاد داده‌ها. عوامل منتخب به‌عنوان ورودی‌های اصلی مدل‌های آماری در گام‌های بعدی استفاده شدند.

۷. همگن‌سازی زیرحوضه‌ها با روش خوشه‌بندی:

به‌منظور افزایش دقت مدل‌های پیش‌بینی، حوضه‌های مورد مطالعه با بهره‌گیری از تحلیل خوشه‌ای سلسله‌مراتبی بر اساس ویژگی‌های هیدرولوژیک و اقلیمی به گروه‌های همگن تقسیم گردیدند. این طبقه‌بندی امکان ایجاد مدل‌های منطقه‌ای مجزا برای هر گروه را فراهم کرد.

۸. مدل‌سازی آماری چندمتغیره و طراحی روابط منطقه‌ای:

در هر گروه همگن، با استفاده از روش رگرسیون چندمتغیره گام‌به‌گام (Stepwise MRA) روابط آماری بین متغیرهای مستقل منتخب و متغیر وابسته تخمین زده شد. تمامی تحلیل‌ها در محیط نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۶ انجام گرفت.

۹. ارزیابی و واسنجی مدل‌ها:

برای سنجش عملکرد مدل‌ها، شاخص کارایی نش-ساتکلیف (Nash-Sutcliffe (1970) براساس رابطه (۲) و شاخص خطای نسبی میانگین مربعات (RRMSE) طبق رابطه (۳) محاسبه گردید:

$$NSE = 1 - [\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2 / \sum_{i=1}^n (O_i - O_m)^2] \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$RRMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2} / \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n O_i \quad \text{رابطه (۳)}$$

که در آن‌ها، NSE شاخص ارزیابی و کارایی مدل (این ضریب هرچه به یک نزدیک‌تر باشد، کارایی مدل بهتر خواهد بود)، O_i مقادیر مربوط به رسوب مشاهده‌ای (اندازه‌گیری شده در ایستگاه آب‌سنجی)، O_m میانگین مقادیر مربوط به رسوب مشاهده‌ای و P_i داده مربوط به برآورد رسوب و $RRMSE$ میانگین نسبی مربعات خطا است. دامنه تغییرات $RRMSE$ از صفر تا بی‌نهایت بوده و هرچه مقادیر به صفر

نزدیک‌تر باشد، کارایی مدل بیشتر است. ۱۰- محاسبه شاخص نسبت تحویل رسوب؛ از میان روش‌های متعدد محاسبه SDR، هفت روش مورد ارزیابی قرار گرفت و با توجه به آنالیزهای آماری، مناسب‌ترین روش (با داشتن بیشترین مقدار دقت و کم‌ترین خطا) برای محاسبه SDR در حوضه‌های منطقه مطالعاتی انتخاب شد.

۱۱. برآورد فرسایش ویژه و تهیه نقشه نهایی:

در گام پایانی، با تلفیق مقادیر SDR منتخب با داده‌های مربوط به تولید رسوب هر زیرحوضه، میزان فرسایش ویژه خاک محاسبه شد. سپس نقشه پهنه‌بندی مکانی فرسایش در محیط GIS ترسیم و مناطق بحرانی حوزه آبخیز دریاچه ارومیه شناسایی گردیدند.

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌ها و حوضه‌های انتخابی و میزان رسوب‌دهی ویژه آن‌ها

ردیف	نام ایستگاه	نام حوضه	کد ایستگاه	مساحت (km ²)	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	رسوب‌دهی ویژه (t.ha ⁻¹ .yr ⁻¹)
۱	هرزورز	هرزورز چای	۵۲۹-۳۱	۸۴,۲	۳۸-۱۲-۰۰	۴۷-۰۸-۰۰	۰/۶۲
۲	خواجه	پاژ چای	۱۱۹-۳۱	۵۱۱,۸	۳۸-۰۹-۰۰	۴۶-۳۴-۰۰	۲/۷۴
۳	آناختون	گمناب چای	۳۱-۰۱۷	۵۰۲,۳	۳۸-۰۹-۰۰	۴۶-۱۶-۰۰	۲/۸۳
۴	پل سنیخ	سنیخ چای	۳۱-۰۲۹	۵۰۶,۲	۳۸-۰۹-۳۷	۴۶-۱۰-۰۹	۰/۲۴
۵	دریان	دریان چای	۳۸-۰۰۱	۷۱,۲	۳۸-۰۹-۰۳	۴۵-۳۲-۱۶	۰/۲۶
۶	اوربان	دیرعلی چای	۳۶-۰۰۵	۷۳,۱	۳۸-۰۲-۰۰	۴۴-۴۴-۰۰	۰/۳۳
۷	نظرآباد	دریک چای	۳۶-۰۰۳	۸۵,۴	۳۸-۱۱-۰۰	۴۴-۳۶-۰۰	۰/۳۴
۸	چهریق علیا	زولا چای	۳۶-۰۰۱	۷۹۳,۴	۳۸-۰۵-۰۰	۴۴-۳۶-۰۰	۱/۸۴
۹	سعیدآباد	سعیدآباد	۳۱-۰۱۳	۱۳۳,۴	۳۷-۵۹-۰۰	۴۶-۳۵-۰۰	۰/۹۴
۱۰	ونبار	آجی چای	۳۱-۰۱۵	۷۶۱۱,۶	۳۸-۰۷-۰۰	۴۶-۲۴-۰۰	۲/۷۶
۱۱	لیقوان	لیقوان چای	۳۱-۰۱۹	۶۷,۷	۳۷-۵۰-۰۰	۴۶-۲۶-۰۰	۰/۲۲
۱۲	قرمزگل	گمبر چای	۳۱-۰۳۷	۹۰,۴	۳۷-۴۴-۰۰	۴۶-۰۶-۰۰	۰/۳۸
۱۳	تازه‌کند	صوفی چای	۳۲-۰۰۷	۱۳۶,۷	۳۷-۲۸-۰۰	۴۶-۱۶-۰۰	۲/۷۲
۱۴	اسفستانج	اسفستانج	۳۲-۰۲۳	۶۴,۷	۳۷-۲۷-۰۰	۴۶-۱۵-۰۰	۰/۴۱
۱۵	شیرین‌کند	لیلان چای	۳۳-۰۰۵	۱۰۶۹,۴	۳۷-۰۱-۰۰	۴۶-۱۶-۰۰	۳/۰۵
۱۶	چوبلوچه	آجرلو	۳۳-۰۲۷	۱۰۷۴,۲	۳۶-۵۳-۰۰	۴۶-۲۵-۰۰	۳/۲۴
۱۷	شاخه راست آلاسقل	ساروق چای	۳۳-۰۱۶	۵۱۶,۷	۳۶-۲۹-۰۰	۴۷-۰۲-۰۰	۱/۵۷
۱۸	شاخه چپ آلاسقل	ساروق چای	۳۳-۰۱۲	۳۰۲,۸	۳۶-۲۹-۰۰	۴۷-۰۳-۰۰	۱/۱۲
۱۹	سنته	خرخره چای	۳۳-۰۱۹	۱۵۶۱,۳	۳۶-۱۰-۰۰	۴۶-۳۳-۰۰	۲/۰۳
۲۰	پل آنیان	جیغاتو چای	۳۳-۰۱۵	۱۵۷۰,۸	۳۶-۱۲-۰۰	۴۶-۲۶-۰۰	۲/۱۱
۲۱	قبقلو	سقر چای	۳۳-۰۰۷	۴۹۵,۶	۳۶-۱۱-۰۰	۴۶-۱۰-۰۰	۱/۶۳
۲۲	گزل‌گنبد	سیمینه رود	۳۳-۰۳۶	۹۶۰,۴	۳۶-۲۶-۰۰	۴۵-۵۶-۰۰	۱/۹۶
۲۳	کوثر	مهاباد چای	۳۴-۰۰۳	۳۹۶,۱	۳۶-۴۲-۰۰	۴۵-۳۷-۰۰	۱/۰۶
۲۴	بیطاس	مهاباد چای	۳۴-۰۰۵	۸۸,۵	۳۶-۴۱-۰۰	۴۵-۴۲-۰۰	۰/۷۷
۲۵	چپرآباد	کانیرش	۳۴-۰۱۵	۷۰,۱	۳۶-۰۸-۰۰	۴۵-۰۸-۰۰	۰/۴۴
۲۶	پی قلعه	گادار چای	۳۴-۰۱۱	۱۲۳,۵	۳۷-۰۰-۰۰	۴۵-۰۲-۰۰	۰/۸۱
۲۷	اشنویه	گلار چای	۳۴-۰۱۳	۶۸,۱	۳۷-۰۲-۰۰	۴۵-۰۵-۰۰	۰/۳۰
۲۸	قاسملو	بالانج	۳۵-۰۰۱	۲۵۸,۸	۳۷-۲۱-۰۰	۴۵-۰۹-۰۰	۰/۵۲
۲۹	بی بکران	باراندوز چای	۳۵-۰۰۳	۲۶۰,۴	۳۷-۱۷-۰۰	۴۴-۵۴-۰۰	۰/۶۹
۳۰	کلهور	روضه چای	۳۵-۰۳۹	۸۳,۷	۳۷-۳۶-۰۰	۴۴-۵۳-۰۰	۰/۳۲



جدول ۲. عوامل انتخابی مؤثر بر رسوبدهی حوضه‌ها در منطقه مورد پژوهش

گروه اصلی	طبقه	نوع پارامتر
عوامل فیزیوگرافی و ژئومورفومتری	پارامترهای خطی	مساحت حوضه، محیط حوضه، طول حوضه، طول آبراهه اصلی، شیب آبراهه اصلی، تراکم زهکشی
	ارتفاع	ارتفاع متوسط حوضه، شیب متوسط حوضه، ضریب شکل حوضه
	شکل حوضه	پستی و بلندی حوضه
	پارامترهای ژئومورفومتری	درصد مساحت سازندهای حساس به فرسایش، درصد مساحت سازندهای نسبتاً حساس به فرسایش، درصد مساحت سازندهای با حساسیت متوسط به فرسایش، درصد مساحت سازندهای نسبتاً مقاوم و مقاوم به فرسایش، میانگین حساسیت به فرسایش سازندهای حوضه، درصد شن خاک، درصد سیلت خاک، درصد رس خاک
عوامل زمین شناسی و خاک		درصد مساحت زراعت آبی و باغات، درصد مساحت زراعت دیم، درصد مساحت مراتع با تراکم کمتر از ۲۵ درصد، درصد مساحت مراتع با تراکم بیشتر از ۲۵ درصد، درصد مساحت جنگل‌های با تراکم کمتر از ۲۵ درصد، درصد مساحت جنگل‌های با تراکم بیشتر از ۲۵ درصد، درصد مساحت اراضی بدون پوشش و بیرون زدگی سنگی، درصد مساحت سطوح آبی، باتلاق، نیزار و بستر رودخانه، درصد مساحت مناطق مسکونی
عوامل اقلیمی و هیدرولوژی		میانگین بارندگی سالیانه، میانگین دمای سالیانه، میانگین دبی سالیانه

شایان ذکر است برای استخراج عوامل فیزیوگرافی و ژئومورفومتری در حوضه‌های مورد مطالعه از نرم افزار Arc GIS و نسخه الحاقی Arc Hydro استفاده شد. برای استخراج عوامل زمین شناسی و وزن‌دهی به سازندهای منطقه تحقیق از نقشه‌های ۱:۱۰۰۰۰۰ سازمان زمین شناسی کشور (Sahandi and Soheili, 2005) و روش تعیین حساسیت به فرسایش واحدها ارائه شده توسط (Feiznia 1995) استفاده شد. همچنین جهت استخراج پارامترهای خاک نیز از اطلاعات جهانی خاک^۱ با تفکیک مکانی ۱۰۰۰ متر استفاده شد. پس از دانلود داده‌های جهانی بافت خاک از سایت (www.isric.org) میانگین درصد شن خاک، میانگین درصد سیلت و میانگین درصد رس خاک با استفاده از GIS برای حوضه‌های مورد مطالعه استخراج شد.

برای استخراج (عوامل پوشش گیاهی و کاربری اراضی) از نقشه‌های پوشش گیاهی تهیه شده توسط سازمان منابع طبیعی و آبخیزداری کشور و تصاویر رایگان ماهواره سنتینل-۲، استفاده شد. در این پژوهش، با بهره‌گیری از روش طبقه‌بندی پیکسل مبنای نقشه کاربری اراضی منطقه تحقیق تهیه گردیده و سپس با استفاده از GIS درصد مساحت هریک از طبقات در هر حوضه استخراج شد. برای استخراج (عوامل اقلیمی) از نقشه‌های هم‌باران و هم‌دمای حوضه‌های مورد مطالعه، تهیه شده توسط شرکت مدیریت منابع آب ایران استفاده شد.

یافته‌های پژوهش

در این بخش، نتایج حاصل از تحلیل‌های آماری چندمتغیره شامل تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA)، تحلیل عاملی (FA) و مدل‌سازی رگرسیونی برای شناسایی شاخص‌های کلیدی مؤثر بر رسوبدهی در حوضه‌های منتخب منتهی به دریاچه ارومیه ارائه می‌گردد. هدف اصلی، کاهش ابعاد داده‌ها و توسعه یک مدل پیش‌بینی با قابلیت تعمیم منطقه‌ای است.

1 -World Soil Information (ISRIC)

2 -Pixel based

تحلیل عاملی (FA)

تحلیل عاملی برای کاهش هم‌خطی^۱ بین متغیرهای ورودی و شناسایی عوامل پنهان تأثیرگذار بر فرآیند رسوب‌دهی انجام پذیرفت. این تحلیل بر روی ماتریس همبستگی متغیرهای فیزیوگرافی، کاربری اراضی، زمین‌شناسی و هیدرولوژی انجام شد.

انتخاب تعداد عوامل

بر اساس معیار کایزر^۲ که بر نگهداری عواملی با مقدار ویژه^۳ بزرگتر از یک تأکید دارد، تعداد بهینه عوامل استخراج گردید. جدول ۳ مقادیر ویژه و درصد واریانس توضیح داده شده توسط هر عامل را در حوضه‌های مورد بررسی نشان می‌دهد. بر اساس این جدول، سه عامل نخست دارای مقدار ویژه بیشتر از یک بوده و در مجموع ۹۳/۸۵ درصد از تغییرات داده‌های اصلی را تبیین می‌کنند، در نتیجه همین سه عامل برای تحلیل نهایی انتخاب شدند.

جدول ۳. مقایسه ریشه پنهان ماتریسی و درصد واریانس عوامل برای حوضه‌های انتخابی

عوامل	ریشه پنهان ماتریسی	درصد واریانس	مقادیر تجمعی درصد واریانس
۱	۱۶/۱۵۴	۶۶/۱۸	۶۶/۱۸
۲	۵/۳۰۲	۲۱/۴۴	۸۷/۶۲
۳	۲/۲۵۴	۶/۳۳	۹۳/۸۵
۴	۰/۶۱۵	۳/۲۹	۹۷/۱۴
۵	۰/۵۰۲	۱/۰۰۲	۹۸/۴۰۲
۶	۰/۴۹۵	۰/۲۵۵	۹۸/۶۵۷
۷	۰/۳۰۳	۰/۱۲۱	۹۸/۷۷۸
۸	۰/۲۹۵	۰/۱۱۳	۹۸/۸۹۱
۹	۰/۲۴۵	۰/۱۰۸	۹۸/۹۹۹
۱۰	۰/۲۱۲	۰/۱۰۴	۹۹/۱۰۳
۱۱	۰/۰۹۹	۰/۱۰۱	۹۹/۲۰۴
۱۲	۰/۰۵۴	۰/۰۹۸	۹۹/۳۰۲
۱۳	۰/۰۳۲	۰/۰۹۷	۹۹/۳۹۹
۱۴	۰/۰۱۵	۰/۰۹۶	۹۹/۴۹۵
۱۵	۰/۰۱۲	۰/۰۹۴	۹۹/۵۸۹
۱۶	۰/۰۱۱	۰/۰۷۱	۹۹/۶۶۰
۱۷	۰/۰۱۰	۰/۰۵۲	۹۹/۷۱۲
۱۸	۰/۰۰۹	۰/۰۲۷	۹۹/۷۳۹
۱۹	۰/۰۰۸	۰/۰۱۸	۹۹/۷۵۷
۲۰	۰/۰۰۶	۰/۰۱۲	۹۹/۷۶۹
۲۱	۰/۰۰۵	۰/۰۱۱	۹۹/۷۷۸
۲۲	۰/۰۰۳	۰/۰۰۹	۹۹/۷۸۹
۲۳	۰/۰۰۱	۰/۰۰۶	۹۹/۷۹۵
۲۴	۰/۰۰۱	۰/۰۰۵	۹۹/۸
۲۵	۰/۰۰۱	۰/۰۰۳	۹۹/۸۰۳
۲۶	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۹۹/۸۰۴

همان‌گونه که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، عامل اول ۶۶/۱۸ درصد از واریانس را بیان می‌کند و با چرخش انجام شده، برخی متغیرها بار وزنی بیشتری بر روی این عامل داشته و در حقیقت عامل به‌گونه‌ای چرخیده که بیشترین تأثیر را پدید آورده است و این بدان معنی است که توزیع وزن‌های منفرد هر متغیر تا حد ممکن ساده است. در نتیجه هر یک از متغیرهای مورد بررسی در حوضه‌های مورد مطالعه، حداقل و به طور نزدیک با یکی از سه عامل در ارتباط است. در جدول ۴، ماتریس وزنی عاملی و چرخش یافته برای هریک متغیرها ارائه شده است. جدول ۴ نشان می‌دهد که عامل اول به طور مثبت با متغیرهایی مانند درصد اراضی کشاورزی (دیم، آبی و باغات)، درصد

1 -Multicollinearity

2 -Kaiser criterion

3 -Eigenvalue



سازندهای حساس به فرسایش، ارتفاع متوسط، شیب، دبی متوسط سالانه و وضعیت مراتع ارتباط دارد. بنابراین این عامل بیان کننده کاربری اراضی است. در عامل دوم که ۲۱/۴۴ درصد واریانس را بیان می کند، متغیرهایی مانند درصد مساحت سازندهای حساس به فرسایش، مساحت حوضه ها، ضریب فرم حوضه ها، محیط حوضه ها، ارتفاع متوسط حوضه ها و طول رودخانه اصلی، بار وزنی بیشتری را به خود اختصاص داده اند. در عامل دوم متغیر ضریب فرم حوضه ها وزن بیشتری (۰/۹۸۵) را نسبت به سایر متغیرها به خود اختصاص داده است و این طور به نظر می رسد که این عامل بیان کننده شکل و اندازه حوضه ها است. در عامل سوم که ۶/۲۳ درصد تغییر داده های اصلی را شرح می دهد، متغیرهای زمین شناسی (درصد مساحت سازندهای حساس به فرسایش) بار وزنی بیشتری (۰/۸۵۵) را به خود اختصاص داده است، از این رو این عامل بیان کننده وضعیت زمین شناسی در نظر گرفته می شود.

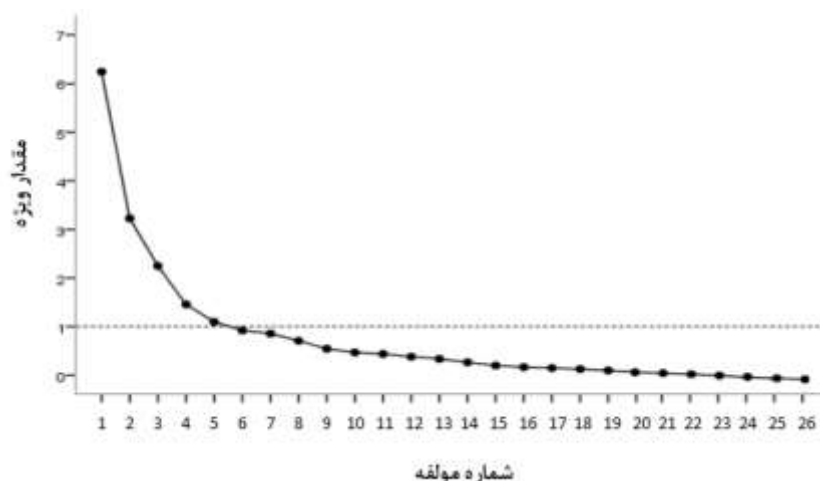
نتیجه تحلیل عاملی نشان می دهد تنوع رسوب دهی حوضه ها عمدتاً تحت تأثیر سه گروه شاخص اصلی کاربری اراضی، ویژگی های فیزیوگرافی و ساختار زمین شناسی است.

جدول ۴. ماتریس وزنی عاملی دوران یافته برای هریک از متغیرها در حوضه های مورد بررسی حوزه آبخیز دریاچه ارومیه

متغیرها	عوامل		
	عامل اول	عامل دوم	عامل سوم
مساحت اراضی کشاورزی (باغات + کشاورزی آبی)	۰/۹۶۱	۰/۳۸۹	۰/۳۳۵
مساحت اراضی کشاورزی دیم	۰/۹۵۲	۰/۳۵۲	۰/۳۶۱
مساحت اراضی با کاربری مرتع	۰/۹۱۸	۰/۲۱۲	۰/۲۹۸
مساحت اراضی تخریب شده و دارای کاربری مرتع ضعیف	۰/۹۴۱	۰/۲۰۵	۰/۲۱۲
مساحت سازندهای حساس به فرسایش و کواترنر	۰/۹۱۲	۰/۳۰۷	۰/۸۵۵
مساحت سازندهای نسبتاً حساس به فرسایش	۰/۶۲۵	۰/۱۹۸	۰/۸۰۴
مساحت سازندهای با حساسیت متوسط به فرسایش	۰/۴۲۱	۰/۱۰۷	۰/۶۶۵
مساحت سازندهای نسبتاً مقاوم و مقاوم به فرسایش	-۰/۰۸۵	-۰/۲۲۲	-۰/۰۵۴
ضریب شکل حوضه	۰/۱۳۵	۰/۹۸۵	۰/۱۱۹
مساحت حوضه	۰/۱۲۱	۰/۴۶۵	۰/۱۵۱
محیط حوضه	۰/۱۰۵	۰/۵۱۲	۰/۲۲۵
طول حوضه	۰/۱۴۷	۰/۹۵۳	۰/۱۰۶
ارتفاع متوسط حوضه	۰/۷۷۸	۰/۴۳۶	-۰/۰۹۹
طول رودخانه اصلی	۰/۱۱۳	۰/۹۱۹	۰/۱۱۶
شیب متوسط حوضه	۰/۷۵۴	۰/۱۹۴	۰/۲۰۲
شیب متوسط رودخانه اصلی	۰/۶۱۲	۰/۱۰۸	۰/۱۰۱
متوسط بارش سالیانه	۰/۴۸۲	-۰/۱۰۳	۰/۳۲۷
متوسط دمای سالیانه	۰/۳۳۶	-۰/۲۴۹	۰/۰۹۳
متوسط دبی سالیانه	۰/۷۸۶	۰/۲۱۵	۰/۲۱۷
ضریب فشردگی حوضه	۰/۱۱۷	۰/۵۰۵	۰/۱۰۷
ضریب گردی حوضه	۰/۱۱۵	۰/۵۱۸	۰/۱۰۲
تراکم آبراهه ای	-۰/۲۴۱	۰/۳۰۳	۰/۱۴۹
پستی و بلندی حوضه	-۰/۲۰۵	۰/۱۰۴	-۰/۱۰۵
NDVI مرطوب ترین سال	۰/۱۰۳	۰/۱۱۴	۰/۱۰۶
NDVI سال نرمال	۰/۰۸۵	۰/۱۵۷	۰/۱۱۱
NDVI خشک ترین سال	۰/۱۵۶	۰/۲۱۶	۰/۱۳۱

تحلیل مولفه های اصلی (PCA)

در گام بعد، تحلیل مؤلفه های اصلی به منظور کاهش ابعاد داده و شناسایی شاخص های کلیدی مؤثر بر رسوب دهی اجرا شد. این تحلیل ابزارهای اصلی را برای مدل سازی رگرسیونی در اختیار قرار داد. طبق نمودار سنگریزه ای (شکل ۲)، پنج مؤلفه نخست ۹۰ درصد تغییرات داده ها را تبیین کردند. شاخص هایی با بار مطلق بالاتر از ۰/۵ به عنوان متغیرهای معنادار در مدل انتخاب شدند (جدول ۵).



شکل ۲. نمودار سنگریزه‌ای برای شناسایی تعداد عوامل اثرگذار بر اساس تحلیل عاملی

جدول ۵. ویژگی‌های انتخاب شده و اثرگذار حوضه‌ها در تولید رسوب در حوزه آبخیز دریاچه ارومیه

نام ویژگی	واحد	کد متغیر	PC ₁	PC ₂	PC ₃	PC ₄	PC ₅
رسوب سالانه	t. yr ⁻¹	Y	۰/۸۵				
مساحت اراضی کشاورزی (دیم، آبی + باغات)	ha	X ₁		۰/۸۲			
مجموع مساحت سازندهای حساس به فرسایش و کوتاه‌تر	ha	X ₂		۰/۷۸			
دبی متوسط سالیانه	m ³ .s ⁻¹	X ₃		-۰/۶۲			
مساحت حوضه	ha	X ₄					-۰/۷۴
ضریب شکل حوضه	-	X ₅			۰/۵۸	۰/۶۳	
مساحت حوضه × دبی متوسط سالیانه	ha. m ³ .s ⁻¹	X ₆		۰/۷۶			

تفسیر متغیرهای کلیدی: متغیر X₁ (کاربری اراضی کشاورزی) با بالاترین بار مثبت، نشان‌دهنده بالاترین تأثیر مستقیم در افزایش پتانسیل فرسایش است. متغیر X₂ تأثیر زمین‌شناسی سست را تأیید می‌کند. X₃ با بار منفی، نشان می‌دهد که اگرچه دبی کلی مهم است، اما در ساختار اصلی مؤلفه، تحت تأثیر عوامل دیگر (مانند طول مسیر جریان) قرار می‌گیرد. X₄ (مساحت حوضه) با بار منفی، ممکن است در برخی زیرحوضه‌ها نشان‌دهنده وجود مناطق تثبیت شده یا تغییر الگوی رواناب با افزایش مساحت باشد، اما در مدل نهایی، متغیر ترکیبی غالب شد. X₆ که بیانگر تعامل مساحت و دبی است، ضریب قوی نشان می‌دهد، که نشان‌دهنده اهمیت فرآیندهای انتقال رسوب در مقیاس کلی حوضه است.

مدل‌سازی رگرسیونی و ارزیابی آماری

برای تعیین رابطه‌ی بین متغیرهای منتخب و میزان رسوب‌دهی (Y، اندازه‌گیری شده بر حسب غلظت یا نرخ تولید رسوب)، رگرسیون چندمتغیره گام‌به‌گام انجام شد. این روش امکان انتخاب بهینه زیرمجموعه‌ای از متغیرها را فراهم می‌آورد که بیشترین قدرت تبیین را دارند. با توجه به ویژگی‌های مؤثر تعیین شده (جدول ۵) اقدام به گروه‌بندی حوضه‌ها به روش تحلیل خوشه‌ای شد. نتایج خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی زیرحوضه‌ها بر اساس شاخص‌های منتخب، دو گروه نسبتاً همگن را نشان داد؛ امری که بیانگر آن است که به‌کارگیری مدل‌های یکنواخت برای کل حوضه از کارایی کافی برخوردار نیست و تفکیک مکانی در تحلیل‌ها ضرورت دارد. روابط به‌دست‌آمده در جدول ۶ آمده‌اند.

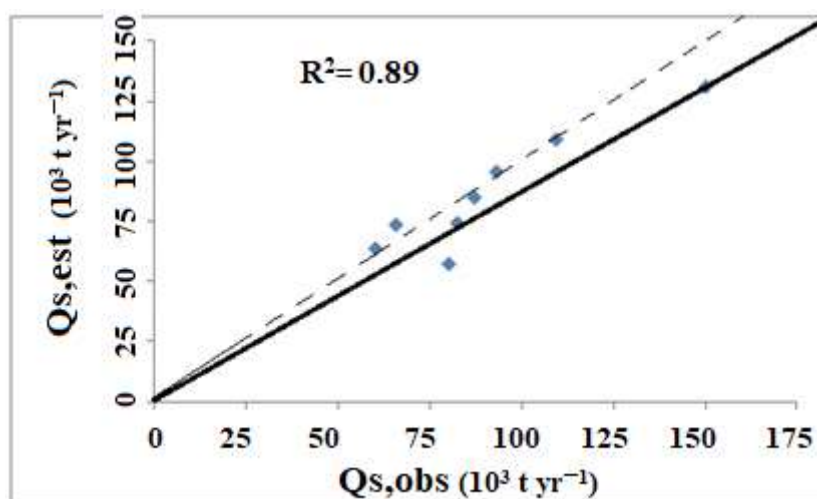
در روابط ارائه شده در جدول ۵، Y: رسوب‌دهی زیر حوضه‌ها بر حسب تن در سال، X₁: مساحت اراضی کشاورزی (دیم، آبی + باغات) بر حسب هکتار، X₂: مجموع مساحت سازندهای حساس به فرسایش و کوتاه‌تر، X₃: دبی متوسط سالیانه، X₄: مساحت حوضه، X₅: ضریب شکل حوضه، X₆: مساحت حوضه بر حسب هکتار × دبی متوسط سالیانه (مترمکعب بر ثانیه).

از بین روابط مختلفی که با استفاده از ترکیبات مستقل متغیرها حاصل شد و در جدول ۶ ارائه شد، مدل شماره ۶ به دلیل داشتن وضعیت بهتر نسبت به بقیه روابط (ضریب نش-ساتکلیف (NS) و ضریب تعیین (R²) بالا و میانگین نسبی مربعات خطا (RRMSE) کمتر)

به عنوان بهترین رابطه رگرسیونی انتخاب شد. با توجه به مدل مذکور مشخص می‌شود که مقدار رسوب‌دهی در حوزه آبخیز دریاچه ارومیه به پنج عامل مساحت اراضی کشاورزی (دیم، آبی و باغات) مساحت حوضه‌ها، مجموع مساحت سازندهای حساس به فرسایش و کواترنر، دبی متوسط سالانه و ضریب فرم حوضه‌ها بستگی دارد که این پنج عامل ۸۹ درصد تغییرات تولید رسوب معلق حوضه‌های انتخابی را کنترل می‌کنند. شکل ۳ رابطه رسوب برآوردی مدل واسنجی شده (مدل ۶) و رسوب مشاهده‌ای را نشان می‌دهد.

جدول ۶- مدل‌های رگرسیونی ساخته شده جهت برآورد رسوب سالانه در حوزه آبخیز دریاچه ارومیه

مدل	معادله رگرسیونی	NS	R ²	RRMSE
معادله‌های رگرسیونی برای حوضه‌های گروه همگن ۱				
۱	$\text{Log}Y=0.409\text{log}x_1+0.909\text{log}x_3+0.365\text{log}x_6-0.554\text{log}x_5-3.009$	۰/۷۸	۰/۷۱	۰/۴۱
۲	$\text{Log}Y=0.058\text{log}x_2+0.402\text{log}x_3+1.156\text{log}x_4-0.057\text{log}x_5+1.066$	۰/۸۱	۰/۷۵	۰/۲۸
۳	$\text{Log}Y=1.054\text{log}x_1+0.882\text{log}x_2+0.092\text{log}x_3+0.64\text{log}x_6-0.753$	۰/۸۹	۰/۸۴	۰/۱۹
معادله‌های رگرسیونی برای حوضه‌های گروه همگن ۲				
۴	$\text{Log}Y=0.354\text{log}x_1+0.602\text{log}x_2+0.108\text{log}x_3-0.97\text{log}x_5+2.53$	۰/۷۹	۰/۷۲	۰/۳۷
۵	$\text{Log}Y=0.455\text{log}x_1+0.705\text{log}x_6+0.2\text{log}x_3-0.802\text{log}x_5+2.033$	۰/۸۵	۰/۷۹	۰/۲۸
۶	$\text{Log}Y=0.418\text{log}x_1+0.731\text{log}x_6+0.259\text{log}x_3-0.876\text{log}x_5+2.858$	۰/۹۲	۰/۸۹	۰/۱۷



شکل ۳. رابطه رسوب برآوردی مدل واسنجی شده (مدل ۶) و رسوب مشاهده‌ای

بحث

تفسیر عوامل کنترل کننده رسوب‌دهی

نتایج تحلیل‌های FA و PCA به‌طور هم‌گرا نشان می‌دهند که رسوب‌دهی در حوضه‌های مورد مطالعه تحت کنترل مجموعه‌ای از عوامل هم‌زمان است. عامل مشترک «کاربری اراضی-هیدرولوژی»، که بیشترین سهم از واریانس را توضیح می‌دهد، بیانگر نقش برجسته مدیریت سطح زمین در تحریک فرایندهای فرسایشی است. گسترش کشاورزی، کاهش پوشش گیاهی و تغییر الگوی نفوذ، مستقیماً بر افزایش انرژی رواناب و ظرفیت حمل رسوب اثر می‌گذارد و بنابراین به‌عنوان مهم‌ترین محرک کوتاه‌مدت تولید رسوب شناخته می‌شود. همچنین نتایج مدل منتخب، وجود رابطه مثبت بین رسوب‌دهی و توسعه اراضی کشاورزی را تأیید می‌کند؛ به‌طوری که افزایش سطح کشت با افزایش رواناب و انتقال ذرات ریز همراه است. این نتیجه با یافته‌های هنربخش و همکاران (۱۳۹۸) و چیت‌ساز و همکاران (۱۳۹۹) در حوضه‌های زاگرس همخوان است. افزون بر این، ضریب مثبت مساحت حوضه در مدل گروه ۱ نشان می‌دهد که فرایندهای فرسایشی در حوضه‌های وسیع‌تر ماهیت تجمعی داشته و حجم بیشتری از رسوب را به خروجی منتقل می‌کنند.

وجود سازندهای کواترنر و واحدهای زمین‌شناسی سست (X2) به‌طور مستقیم با افزایش رسوب‌دهی مرتبط است که با نتایج حکیم‌خانی و عرب‌خدری (۱۳۸۵) و شعبانی و همکاران (۱۳۸۶) مطابقت دارد. این سازندها دارای مقاومت هیدرولیکی پایینی هستند و منبع اصلی تأمین

رسوب محسوب می‌شوند.

کاربرد هم‌زمان تحلیل‌های FA-PCA-Clustering موجب جداسازی نظام‌مند عوامل کنترلی و توسعه مدل‌های منطقه‌ای با قابلیت اطمینان بالا گردید که با یافته‌های (Wang et al (2023); Zanganeh & Naemi (2021) هم‌راستاست. تفکیک حوضه‌ها به دو گروه همگن، نیاز به رویکردهای مدیریتی تفکیک‌شده را اثبات می‌کند.

محاسبه نسبت تحویل رسوب (SDR): بدین صورت که از میان روش‌های متعدد محاسبه SDR، هفت روش مورد ارزیابی قرار گرفتند (جدول ۷). نتایج نشان داد که از میان این هفت روش، روش ارائه شده توسط Renfro (1975)، با داشتن کمترین میانگین نسبی مربعات خطا (RMSE) و بیشترین مقدار شاخص نش-ساتکلیف (NS) به ترتیب برابر با ۰/۲۲ و ۰/۸۶ مناسب‌ترین روش برای محاسبه SDR در منطقه حوزه آبخیز دریاچه ارومیه می‌باشد. پس از محاسبه ضریب رسوب‌زایی (SDR) حوضه‌ها و برآورد رسوب‌دهی برای آن‌ها با مدل رگرسیونی منتخب، با توجه به اینکه نسبت تحویل رسوب، نسبت رسوب به فرسایش می‌باشد، میزان فرسایش خاک نیز براین اساس تعیین و نقش فرسایش ویژه خاک برای منطقه مذکور ترسیم شد (شکل ۴).

جدول ۷. روش‌های تجربی مورد استفاده جهت برآورد نسبت تحویل رسوب در حوزه آبخیز دریاچه ارومیه

ردیف	روش	رابطه
۱	رنفرو (۱۹۷۵) ^۱	$\text{Log SDR} = 1.8768 - 0.14191 * \log(10A)$
۲	ونانی (۱۹۷۵) ^۲	$\text{SDR} = 0.42 A^{-0.25}$
۳	سرویس حفاظت خاک آمریکا (۱۹۷۲) ^۳	$\text{SDR} = 0.5656 A^{-0.11}$
۴	سرویس حفاظت خاک آمریکا (۱۹۸۳) ^۴	$\text{SDR} = 0.417762 A^{-0.34598} - 0.127097$
۵	مانفرو و رنفرو (۱۹۷۵) ^۵	$\text{Log SDR} = 0.294259 + 0.82362 \log(R/L)$
۶	بویس (۱۹۷۵) ^۶	$\text{SDR} = 0.375 A^{-0.238}$
۷	ویلیامز (۱۹۷۷) ^۷	$\text{SDR} = 1.366 * 10^{-12} (A)^{-0.0998} (R/L)^{0.362} (C/N)^{5.44}$

براساس این روش (Renfro (1975)، میانگین SDR زیرحوضه‌ها حدود ۰/۳۵ برآورد شد. این مقدار نشان‌دهنده این است که به طور متوسط ۳۵ درصد از کل رسوب تولیدی در منطقه، به شبکه آبراهه اصلی منتقل می‌شود. نتایج نشان داد که میانگین رسوب‌دهی و میزان متوسط وزنی فرسایش خاک در حوزه آبخیز دریاچه ارومیه (براساس روش رگرسیون چندمتغیره) به ترتیب ۴/۷۴ و ۷/۲۶ تن در هکتار در سال است. به طور کلی، عوامل دخیل و موثر بر فرسایش و رسوب حوزه آبخیز دریاچه ارومیه را می‌توان به سه گروه عوامل انسانی، زمین‌شناسی و فیزیوگرافی تقسیم‌بندی نمود.

تحلیل فضایی SDR: زیرحوضه‌های جنوبی، جنوب‌شرقی و شمال‌شرقی (شامل شیواسان چای، نازلوچای و آجی چای) با SDR بالا (بیش از ۰/۴۰)، کانون‌های بحرانی رسوب محسوب می‌شوند. این نواحی عمدتاً دارای خاک‌های سطحی نازک‌تر و نفوذپذیری کمتری هستند. نواحی شمالی‌تر SDR پایین‌تری دارند (بین ۰/۲۵ تا ۰/۳۰) که نشانگر ظرفیت بالاتر تثبیت رسوبات و وجود دشت‌های آبرفتی وسیع‌تر است.

تحلیل‌های چندمتغیره نشان داد که رسوب‌دهی حوضه ارومیه یک پدیده پیچیده با وابستگی قوی به تعاملات کاربری اراضی، فیزیوگرافی و زمین‌شناسی است. عامل کاربری اراضی با بیشترین بار عاملی، قوی‌ترین متغیر کنترلی کوتاه‌مدت است. مدل رگرسیونی تفکیک‌شده (گروه ۲) با $(R^2 = 0.89)$ به‌عنوان ابزاری کارآمد برای پیش‌بینی رسوب در زیرحوضه‌های غالب شناسایی شد. SDR میانگین ۰/۳۵ و نرخ تولید رسوب کلی ۷/۲۶ تن در هکتار در سال، مقادیری را ارائه می‌دهد که مبنای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی برای حفاظت از تراز آب دریاچه ارومیه و کاهش آلودگی‌های ناشی از رسوبات معلق خواهد بود. ادغام این روش‌های آماری دقیق، چارچوبی استوار برای

۱. A: مساحت حوضه به مایل مربع

۲. A: مساحت حوضه به مایل مربع

۳. A: مساحت حوضه به کیلومتر مربع

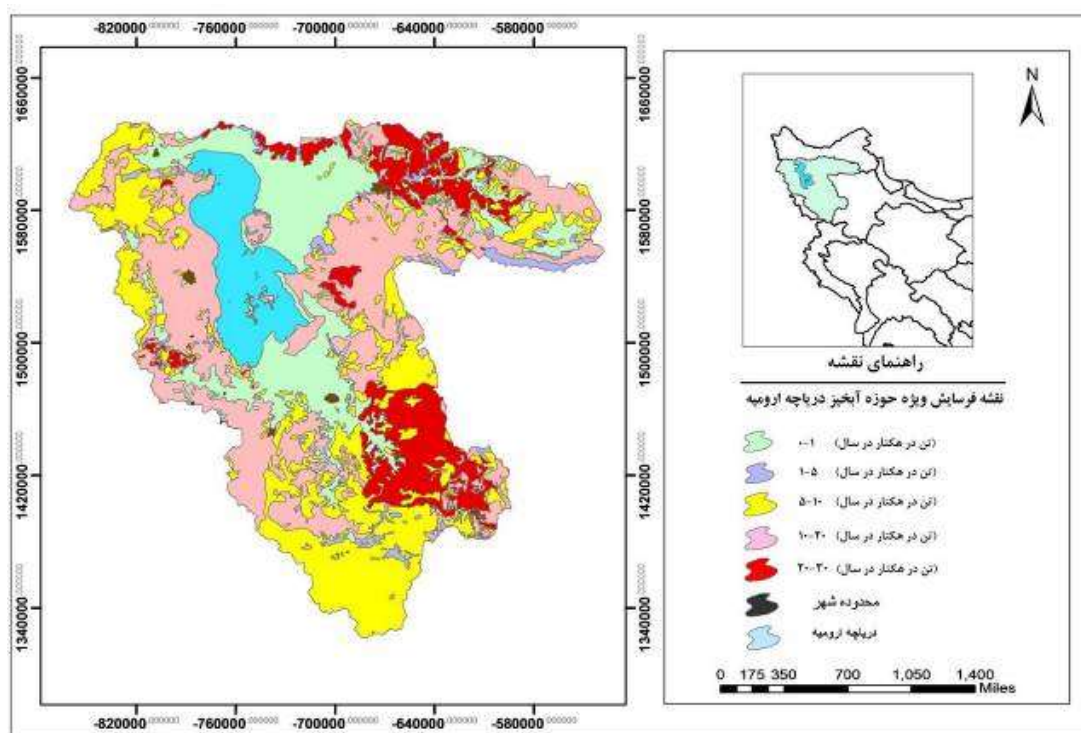
۴. A: مساحت حوضه به مایل مربع

۵. R: اختلاف ارتفاع بین بلندترین و کم ارتفاع‌ترین نقطه حوضه آبخیز به متو L: طول حوضه آبخیز به متر

۶. A: مساحت حوضه به کیلومتر مربع

۷. A: مساحت حوضه به مایل مربع HL: نسبت پستی و بلندی به طول حوضه آبخیز بر حسب مایل به مایل CN: شماره منحنی

پایش و ارزیابی مداوم پروژه‌های احیای اکوسیستم فراهم می‌آورد.



شکل ۴. نقشه فرسایش ویژه حوزه آبخیز دریاچه ارومیه براساس روش روابط آماری (رگرسیون چندمتغیره)

جمع‌بندی تحلیلی و مدیریتی

این مطالعه چندین دستاورد کلیدی را برای مدیریت حوضه دریاچه ارومیه فراهم آورد:

افزایش دقت پیش‌بینی: استفاده‌ی هم‌زمان از روش‌های FA-PCA-Regression دقت پیش‌بینی رسوب را تا ۹۰ درصد افزایش داد و امکان تحلیل منطقه‌ای دقیق را بدون نیاز به داده‌های میدانی گسترده برای تمامی متغیرهای اولیه فراهم کرد. ابزار پایش: مدل توسعه‌یافته قابلیت استفاده برای پایش تغییر کاربری اراضی و ارزیابی اثر اقدامات احیای دریاچه ارومیه (مانند تغییر الگوی کشت) بر دینامیک رسوب را دارد.

اولویت‌بندی مداخله: از منظر سیاست‌گذاری و مدیریت حوضه، زیرحوضه‌هایی که دارای مقادیر بالاتر نسبت تحویل رسوب هستند (SDR ≥ 0.4)، باید در اولویت اجرای اقدامات حفاظتی قرار گیرند. در این مناطق، استفاده توانمند از مداخلات بیولوژیکی مانند کشت گیاهان تثبیت‌کننده و نیز اقدامات سازه‌ای نظیر بانکت‌سنگی و احداث آبیگرهای کوچک می‌تواند به‌طور مؤثر از انتقال رسوبات معلق به دریاچه جلوگیری کند.

تحلیل حساسیت مدل^۱

به‌منظور ارزیابی پایداری و قابلیت اعتماد مدل رگرسیونی منتخب گروه دوم (که دارای بالاترین ضریب نش-ساتکلیف (NSE = ۰/۹۲) و کمترین RMSE بود، تحلیل حساسیت کمی بر روی متغیرهای کلیدی مدل شامل X_1 (کاربری کشاورزی)، X_6 (رواناب ترکیبی) و X_5 (ضریب شکل حوضه) انجام شد. هدف از این تحلیل، تعیین میزان تأثیر تغییر نسبی هر عامل بر پاسخ مدل (مقدار لگاریتمی رسوب خروجی، $\log Y$) در شرایط ثابت بودن سایر متغیرها بود.

در این بررسی، مقدار هر متغیر به‌صورت مجزا در بازه‌ی آماری $(\mu + \sigma)$ تا $(\mu - \sigma)$ نوسان داده شد، در حالی که سایر پارامترها بر میانگین خود ثابت ماندند. این رویکرد، امکان سنجش سهم نسبی هر متغیر در نوسانات خروجی مدل را فراهم ساخت و مقاومت مدل در برابر خطا یا تغییر ورودی‌ها را آشکار نمود.

نتایج نشان داد که مدل نسبت به تغییرات در $\log X_1$ (درصد اراضی کشاورزی) بالاترین حساسیت را دارد. افزایش ده‌درصدی در

مساحت اراضی کشاورزی منجر به افزایش حدود ۶/۵ درصد در مقدار $\log Y$ گردید. این رفتار نشان‌دهنده وابستگی مستقیم ظرفیت انتقال رسوب به شدت بهره‌برداری کشاورزی در دامنه‌هاست و تأکید مجددی بر ضرورت کنترل توسعه نامنظم و تغییر کاربری اراضی شیب‌دار دارد؛ وضعیتی که در زیرحوضه‌های جنوبی (سیمینه‌رود و گدارچای) بیشترین نمود را دارد و با مقادیر بالای $SDR \geq 0.4$ هم‌خوانی نشان می‌دهد.

از سوی دیگر، تحلیل متغیر $\log X_6$ (رواناب ترکیبی) حاکی از آن بود که تغییرات ده‌درصدی در آن موجب نوسان حدود ۴ درصد در خروجی مدل می‌شود. این حساسیت متوسط، نشان‌دهنده نقش غیرمستقیم اما پیوسته فرآیندهای هیدرولوژیکی در انتقال رسوب است؛ یعنی افزایش بارش یا کاهش نفوذپذیری، صرفاً در حضور پوشش‌های ناپایدار یا کاربری‌های مستعد فرسایش اثرگذار خواهد بود. در مقابل، متغیر $\log X_5$ (ضریب شکل حوضه) کمترین میزان حساسیت را نشان داد، به‌طوری‌که تغییر ده‌درصدی در X_5 سبب تغییر کمتر از ۲ درصد در خروجی مدل شد. این نتیجه دلالت بر آن دارد که گرچه شکل هندسی حوضه از نظر آماری در معادله مدل مؤثر است، اما تأثیر آن بر شدت انتقال رسوب، در مقایسه با عوامل کاربری و هیدرولوژیکی، محدودتر و غیرمستقیم‌تر می‌باشد. به‌طور کلی، تحلیل حساسیت مدل بیانگر آن است که عامل انسانی (کاربری اراضی) مهم‌ترین منبع تغییرپذیری در عملکرد مدل بوده و هرگونه توسعه بی‌ضابطه کشاورزی، بیش از سایر متغیرها، موجب افزایش خروج رسوب از زیرحوضه‌ها می‌شود. بدین ترتیب، بهره‌گیری از نتایج این تحلیل در طراحی سیاست‌های مدیریتی و اولویت‌بندی اقدامات حفاظتی اراضی برای زیرحوضه‌های حساس جنوب و جنوب‌غربی ضروری است.

پیشنهادهای مدیریتی مبتنی بر مدل بهینه انتخابی

توسعه این مدل‌های تفکیک شده مکانی، امکان مدیریت منابع آب و رسوب به شیوه دقیق‌تر را فراهم می‌کند؛ کنترل در مبدأ؛ تمرکز بر کاهش اثرات (X_1) از طریق ترویج کشاورزی حفاظتی، تناوب زراعی مناسب و استفاده از پوشش‌های گیاهی مقاوم در مناطق شیب‌دار با کاربری کشاورزی. مدیریت مسیر انتقال؛ مناطق با SDR بالا باید هدف اصلی برای احداث موانع فیزیکی (مانند سنگ‌چین‌ها، نهال‌کاری در امتداد آبراهه‌ها) قرار گیرند تا رسوب قبل از ورود به شبکه اصلی رودخانه‌ها تثبیت شود. آینده‌نگری اقلیمی؛ با توجه به نقش (X_3) (دبی) در مدل، هرگونه تغییر در رژیم بارش منطقه‌ای (افزایش شدت بارندگی‌های کوتاه مدت) می‌تواند منجر به افزایش شدیدتر فرسایش در حوضه‌هایی شود که سازندهای سست دارند، حتی اگر کاربری اراضی تغییر نکند.

نتیجه‌گیری

یافته‌های پژوهش حاضر نشان داد که تغییر کاربری اراضی کشاورزی (X_1) و حضور سازندهای فرسایش‌پذیر (X_2) مهم‌ترین محرک‌های افزایش رسوب در حوضه‌ی دریاچه ارومیه‌اند. ادغام روش‌های آماری دقیق (FA و PCA) و مدل‌سازی رگرسیونی تفکیک‌شده نه‌تنها دقت مدل‌های رسوب را بهبود بخشیده، بلکه ابزار تصمیم‌سازی موثری برای اولویت‌بندی عملیات احیایی و حفاظت خاک در این حوضه حیاتی فراهم می‌آورد.

جهت ارتقای نتایج این طرح و دقت بیشتر در نتایج، ضروری است که شبکه ایستگاه‌های رسوب‌سنجی کشور سامان داده شود. وجود داده‌های بار کف مناسب بر دقت نتایج می‌افزاید. ضریب تحویل رسوب نیز عامل بسیار مهمی در محاسبه میزان فرسایش است، ضریب تحویل رسوب نیز عامل بسیار مهمی در محاسبه میزان فرسایش است؛ از این رو لازم است طرح‌هایی برای محاسبه این ضریب تعریف شده و در حوضه‌های مختلف به اجرا درآیند.

با توجه به نتایج قابل قبول پژوهش حاضر، می‌توان نتیجه گرفت که استفاده توأم از روش‌های تجزیه به مؤلفه‌های اصلی، تجزیه و تحلیل خوشه‌ای و رگرسیون چند متغیره گام به گام به شرط دسترسی به داده‌های دقیق و با کیفیت، کارآیی مناسب و قابل قبولی در برآورد رسوبات حوزه‌های آبخیز دارد. کاربرد و واسنجی مدل‌های رگرسیونی در رابطه با رژیم‌های متفاوت اقلیمی و هیدرولوژیکی حوزه‌های آبخیز کشور جهت رسیدن به الگوی کارآمد استفاده از این معادلات در برآورد بار رسوبی مناطق گوناگون، می‌تواند ثمر بخش واقع شود. تحلیل‌های چندمتغیره این پژوهش نشان داد که رسوب‌دهی در حوضه دریاچه ارومیه فرایندی پیچیده و چندعاملی است که به‌طور



عمده تحت تأثیر برهم کنش میان کاربری اراضی، ویژگی‌های فیزیوگرافی و ساختار زمین‌شناسی قرار دارد. نقش مسلط کاربری اراضی، این متغیر را به عنوان مهم‌ترین عامل کنترل‌کننده تغییرات کوتاه‌مدت رسوب مشخص می‌کند. همچنین، مدل رگرسیونی تفکیک‌شده توانست الگوی قابل اتکایی برای پیش‌بینی رسوب در زیرحوضه‌های غالب ارائه دهد. مجموعه این یافته‌ها نشان می‌دهد که بهره‌گیری از رویکردهای آماری دقیق می‌تواند چارچوبی کارآمد برای پایش و ارزیابی پروژه‌های احیای اکوسیستم و پشتیبانی از تصمیم‌گیری‌های مدیریتی در حوضه دریاچه ارومیه فراهم سازد.

جمع‌بندی و پیشنهادها

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، پیشنهادهای مدیریتی زیر ارائه می‌شود:

تفکیک مکانی مدل‌های رسوبی در سطح زیرحوضه‌ها برای ارتقای دقت پیش‌بینی و طراحی سازه‌های حفاظتی؛ به‌ویژه بهره‌گیری از مدل‌های پارامتریک با ضرایب اختصاصی هر خوشه‌ی همگن.

توسعه برنامه‌های کنترل کاربری کشاورزی در اراضی شیب‌دار و تعیین حد مجاز تغییر کاربری در پهنه‌های بالادست، به منظور کاهش بار رسوب ورودی به دریاچه.

به‌کارگیری مدل‌های هم‌زمان هیدرولوژی و رسوب^۱ تلفیقی همراه با تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) در طرح‌های آینده، به‌منظور کاهش هم‌خطی بین متغیرهای ورودی و بهبود دقت تبیین روابط بین شاخص‌های مورفومتری، زمین‌کاربری و رسوب‌زایی در مقیاس زیرحوضه‌ای

استفاده از داده‌های بازتحلیل اقلیمی و تصاویر سنجش‌ازدور با قدرت تفکیک بالا برای ارزیابی روندهای بلندمدت تغییر SDR در بازه‌های ده‌ساله.

اولویت‌بندی سرمایه‌گذاری حفاظتی در زیرحوضه‌های جنوب و جنوب‌غرب ارومیه با تأکید بر پروژه‌های بازدارنده‌ی توسعه کشاورزی غیرمجاز و تثبیت خاک در اراضی بحرانی.

در مجموع، این مطالعه نشان داد که رویکرد ترکیبی شامل خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی، تحلیل حساسیت، و شاخص‌های زمین‌کاربری، می‌تواند چارچوبی کارآمد و قابل تعمیم برای مدیریت رسوب و پایداری اکوسیستم‌های آبخیز در مناطق بحرانی کشور فراهم سازد. نتایج حاصل قابلیت کاربرد مستقیم در سیاست‌گذاری‌های وزارت جهاد کشاورزی و سازمان حفاظت محیط زیست را دارا هستند.

سپاسگزاری

از معاونت محترم علمی و فناوری ریاست جمهوری به جهت تأمین اعتبار اجرای پروژه و از پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری به دلیل تصویب پروژه تحقیقاتی مذکور (شماره پروژه: ۲۴-۴۷-۹۸۰۴۴۲-۳۱-۲۹) و تهیه امکانات اجرای آن، تشکر و قدردانی می‌شود.

منابع

- اسدی، حسین. (۱۴۰۱). واکای تاریخچه فعالیت دانشگاه‌ها، مراکز تحقیقاتی و سازمان‌های اجرایی مرتبط با فرسایش و حفاظت خاک در ایران. *تحقیقات آب و خاک/ایران*. ۵۳(۲)، ۴۳۳-۴۱۱.
- تقوایی نجیب، حمیدرضا؛ تجریشی، محمدمسعود و مقدس، محمدرحیم. (۱۳۹۹). کاربرد روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره به منظور سنجش اثربخشی پروژه‌های احیای تالاب‌ها جهت تأمین نیاز آب زیست محیطی. *دوازدهمین کنگره ملی مهندسی عمران، تبریز*.
- ثقفیان، بهرام؛ قرمزچشمه، باقر؛ سمیعی، مسعود و عاشقی، رضا. (۱۳۸۸). عوامل موثر بر رسوبدهی معلق حوزه‌های آبخیز جنوب غربی ایران. *مهندسی و مدیریت آبخیز*. ۱(۳)، ۱۵۲-۱۴۰.
- چیت ساز، وحید؛ نظری سامانی، علی اکبر؛ سلطانی، سعید و فیض نیا، سادات. (۱۴۰۰). مدل‌سازی رسوب معلق و تعیین عوامل مؤثر بر آن در حوزه‌های آبخیز کارون بزرگ و کرخه. *نشریه علمی - پژوهشی مرتع و آبخیزداری*. ۷۳(۲)، ۲۹۳-۳۰۳.
- حکیم خانی، شاهرخ و عرب‌خدری، محمود. (۱۳۸۵). تحلیل رگرسیونی بین رسوب معلق و ویژگی‌های هیدروژئومورفولوژیک حوضه دریاچه ارومیه. *مجله علوم کشاورزی/ایران*. ۳۷(۲)، ۸۵-۹۳.
- زنگنه اسدی، محمد علی و ناعمی تبار، مهناز. (۱۴۰۰). ارتباط بین ویژگی‌های هیدروژئومورفیک و بار رسوبی معلق زیر حوضه‌های کشف رود. *تحلیل*

فضایی مخاطرات محیطی. ۸ (۱)، ۱۲۸-۱۱۱.

شعبانی، محمد؛ فیض‌نیا، سادات؛ احمدی، حسن و قدوسی، جمال. (۱۳۸۶). بررسی و تعیین عوامل موثر بر رسوبدهی حوزه‌های آبخیز (مطالعه موردی: حوزه آبخیز طالقان). *منابع طبیعی ایران*. ۶۰ (۳)، ۷۷۱-۷۵۹.

کمری یکدانه‌گی، فاتره؛ خالدی درویشان، عبدالواحد و آقابگی امین، سهیلا. (۱۴۰۳). ارزیابی کارایی مدل‌های G2 و IntErO در برآورد فرسایش خاک و تولید رسوب سالانه در آبخیز معرف کسلیان، استان مازندران. *پژوهش‌های آبخیزداری*. ۳۷ (۲)، ۷۳-۵۵.

نیک‌کامی، داود و شادفر، صمد. (۱۴۰۰). تهیه نقشه فرسایش خاک در حوضه‌های دارای ایستگاه رسوب‌سنجی کشور. *مهندسی و مدیریت آبخیز*. ۱۳ (۲)، ۴۹۶-۴۷۹.

نور، حمزه و عرب‌خدری، محمود. (۱۴۰۲). برآورد فرسایش خاک و نسبت تحویل رسوب با استفاده از مدل RUSLE در پایگاه تحقیقات حفاظت خاک سنگانه. *مدلسازی و مدیریت آب و خاک*. ۳ (۱)، ۵۳-۴۲.

نیک‌کامی، داود؛ شادفر، صمد و جعفری اردکانی، علی. (۱۴۰۰). تهیه و یکپارچه‌سازی نقشه‌ها و داده‌های رقومی حوضه‌ها و توسعه پایگاه داده‌های مکانی، زمانی و موضوعی مرتبط با فرسایش و رسوبدهی در حوضه‌های رده هفت کشور. گزارش نهایی طرح پژوهشی، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری.

نیک‌کامی، داود. (۱۳۹۶). تدوین برنامه راهبردی حفاظت خاک. گزارش نهایی طرح پژوهشی، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری.

هنربخش، افشین؛ نیازی، علی؛ سلطانی کوپایی، سعید و طهماسبی، پژمان. (۱۳۹۸). مدل‌سازی رابطه میزان رسوبات معلق و ویژگی‌های هیدرولوژیکی و محیطی حوضه (مطالعه موردی: حوضه سد دز). *پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی*. ۸ (۱)، ۱۰۵-۱۱۷.

REFERENCES

- Alatorre, L. C., Beguería, S., & García-Ruiz, J. M. (2010). Regional-scale modeling of hillslope sediment delivery: A case study in the Barasona Reservoir Watershed (Spain) using WATEM/SEDEM. *Journal of Hydrology*, 391, 109–123.
- Asadi, H. (2022). A review of the history of activities of universities, research centers, and executive organizations related to soil erosion and conservation in Iran. *Iranian Water and Soil Research*, 53(2), 411–433. (In Persian)
- Chitsaz, V., Nazari Samani, A. A., Soltani, S., & Feyziniya, S. (2021). Modeling suspended sediment and determining its controlling factors in the Great Karun and Karkheh watersheds. *Rangeland and Watershed Management*, 73(2), 293–303. (In Persian)
- Hakim Khani, Sh., & Arab-Khoderi, M. (2006). Regression analysis between suspended sediment and hydro-geomorphological characteristics of the Urmia Lake Basin. *Iranian Journal of Agricultural Sciences*, 37(2), 85–93. (In Persian)
- Honarbaksh, A., Niazi, A., Soltani Koupaei, S., & Tahmasebi, P. (2019). Modeling the relationship between suspended sediment and hydrological and environmental characteristics of a basin: A case study of the Dez Dam Basin. *Quantitative Geomorphological Research*, 8(1), 105–117. (In Persian)
- Honarbaksh, A., Niazi, A., Soltani, S., & Tahmasebi, P. (2019). Modeling the relationship between suspended sediments and hydrological and environmental characteristics of a basin (case study: basin of Dez Dam). *Journal of Quantitative Geomorphological Research*, 8(1), 105–117.
- Jansson, M. B. (1996). Estimating a sediment rating curve of the Reventazón River at Palomo using logged mean loads within discharge classes. *Journal of Hydrology*, 183(4), 227–241.
- Kamari Yekdangheh, F., Khaledi Darvishan, A., & Aghabeygi Amin, S. (2024). Evaluation of the performance of G₂ and IntErO models in estimating soil erosion and annual sediment yield in the Keselyan representative watershed, Mazandaran Province. *Watershed Management Research*, 37(2), 55–73. (In Persian)
- Kumar, A., & Das, G. (2010). Dynamic modeling of daily rainfall, runoff, and sediment yield for a Himalayan watershed. *Agricultural Water Management*, 75(2), 189–193.
- Lamb, E., & Toniolo, H. (2016). Initial quantification of suspended sediment loads for three Alaska North Slope rivers. *Water*, 8(4), 119. <https://doi.org/10.3390/w8040119>
- Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models: Part 1, A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(2), 282–290.
- Nik-Kami, D. (2017). Development of the national strategic plan for soil conservation. *Final Research Project Report, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute*. (In Persian)
- Nik-Kami, D., & Shadfar, S. (2021). Soil erosion mapping in watersheds equipped with sediment gauging stations in Iran. *Watershed Engineering and Management*, 13(2), 479–496. (In Persian)



- Nik-Kami, D., Shadfar, S., & Jafari Ardekani, A. (2021). Preparation and integration of digital maps and datasets of watersheds and development of spatial, temporal, and thematic databases related to erosion and sediment yield in seventh-order basins of Iran. *Final Research Project Report, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute*. (In Persian)
- Noor, H., & Arab-Khoderi, M. (2023). Estimation of soil erosion and sediment delivery ratio using the RUSLE model in the Sanganeh Soil Conservation Research Station. *Soil and Water Modeling and Management*, 3(1), 42–53. (In Persian)
- Sarangi, A., & Bhattacharya, A. K. (2005). Comparison of artificial neural network and regression models for sediment loss prediction from the Banha watershed in India. *Agricultural Water Management*, 78(3), 195–208.
- Saghafian, B., Ghermezcheshmeh, B., Samiei, M., & Asheghi, R. (2009). Factors affecting suspended sediment yield in the southwestern watersheds of Iran. *Watershed Engineering and Management*, 1(3), 140–152. (In Persian)
- Shabani, M., Feyzniya, S., Ahmadi, H., & Ghodousi, J. (2007). Investigation and determination of factors affecting sediment yield in watershed areas: A case study from the Taleqan Watershed. *Iranian Journal of Natural Resources*, 60(3), 759–771. (In Persian)
- Taghvai Najib, H. R., Tajrishi, M. M., & Moghaddas, M. R. (2020). Application of multi-criteria decision-making methods to evaluate the effectiveness of wetland restoration projects for supplying environmental water needs. *Proceedings of the 12th National Civil Engineering Congress, Tabriz, Iran*. (In Persian)
- Wang, Y., Zhang, L., Chen, J., & Li, Q. (2023). Assessing watershed sediment connectivity and spatial clustering using hierarchical analysis and PCA: Implications for soil erosion modeling. *Catena*, 226, 107093. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107093>
- Zanganeh, H., & Naeimi, M. (2021). Spatial variability of sediment delivery ratio and its controlling factors using GIS-based modeling in the Urmia Lake Basin, Iran. *Journal of Water and Soil Conservation Research*, 28(3), 245–258. <https://doi.org/10.22059/jwsc.2021.312451>
- Zangeneh Asadi, M. A., & Naemi Tabar, M. (2021). Relationships between hydro-geomorphic characteristics and suspended sediment load in the sub-watersheds of the Kashafrud Basin. *Spatial Analysis of Environmental Hazards*, 8(1), 111–128. (In Persian).