

Prioritizing Sediment Generation Potential of Sub-Watersheds Using the Best-Worst Method and Observed Sediment Data

A. Nasiri Khiavi¹, S. H. R. Sadeghi^{2*}, M. Maerker³,
A. Katebi-Kord⁴, P. S. Sadeghi⁵, S. S. Ghiasi⁶, and M.
Vafakhah⁷

Abstract

This study investigated the zoning of Sub-Watersheds (SWs) in Taleqan Watershed in Alborz Province regarding Sediment Generation Potential (SGP) using the Multi-Criteria Decision-Making (MCDM)-based Best-Worst Method (BWM). The BWM approach was employed to prioritize the SWs. To this end, Principal Component Analysis (PCA) assisted in identifying the criteria conditioning SGP and after quantifying these criteria, a decision network was created considering their impacts. Subsequently, SGP was classified into five different categories using ArcGIS 10.8 software. The MCDM method was validated using observed sediment data from 18-gauge stations in the outlet of SWs. The results indicated that SW6 was identified as a critical area from the viewpoint of SGP, with northern SWs generally demonstrating a higher potential for sediment generation than southern SWs. The prioritization of SWs revealed that the BWM approach had 33.33% number-wise similarity with that obtained based on observed data. Notably, the percentage of similarity between the BWM approach and observed data in SGP classification was approximately 50% in the low and very low categories. The independent samples t-test showed that the MCDM approach had insignificant differences with the observed data in prioritizing SGP. Moreover, the BWM approach displayed a high correlation with criteria such as time of concentration and bifurcation ratio with respective correlation values of 0.81 and 0.70. The findings underscored the significance of employing various MCDM approaches while considering observed data in sediment yield-related analyses. Thus, a comprehensive and integrated approach at the SW scale is emphasized to enhance sediment management and water resource management.

Keywords: Optimal Decision-Making, Multi-Criteria Decision-Making (MCDM), Interdisciplinary Approach, Sediment Modeling, Integrated Watershed Management (IWM).

Received: October 31, 2024

Accepted: February 6, 2025

اولویت‌بندی توان‌مندی تولید رسوب زیرآب‌خیزها با استفاده از روش بهترین-بدترین و داده‌های مشاهداتی

علی نصیری‌خیایوی^۱، سیدحمیدرضا صادقی^{۲*}، میکائیل
مائرکر^۳، آزاده کاتبی‌کورد^۴، پدیده‌السادات صادقی^۵،
سیدسعید غیائی^۶ و مهدی وفاخواه^۷

چکیده

پژوهش حاضر باهدف پهنه‌بندی زیرآب‌خیزها در آب‌خیز طالقان البرز از نظر توان‌مندی تولید رسوب با استفاده از رویکرد بهترین-بدترین (BWM) مبتنی بر روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM) انجام شد. در این راستا، شناسایی معیارهای تأثیرگذار بر تولید رسوب با تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) تعیین و پس از کمی‌سازی این معیارها، شبکه تصمیم تهیه شد. در ادامه، توان‌مندی تولید رسوب در پنج طبقه با کمک نرم‌افزار ArcGIS 10.8 دسته‌بندی شد. اعتبارسنجی روش MCDM با استفاده از داده‌های واقعی رسوب در ۱۸ زیرآب‌خیز صورت گرفت. نتایج نشان داد که زیرآب‌خیز ۶ به‌عنوان زیرآب‌خیز بحرانی در تولید رسوب شناسایی شد و زیرآب‌خیزهای شمالی عموماً توان‌مندی بیش‌تری برای تولید رسوب نسبت به زیرآب‌خیزهای جنوبی نشان دادند. بررسی اولویت‌بندی زیرآب‌خیزها بیانگر این بود که رویکرد BWM با داده‌های مشاهداتی، ۳۳/۳۳ درصد مشابهت داشت. البته شایان ذکر است که درصد تشابه طبقه‌بندی مربوط به توان‌مندی تولید رسوب در طبقات کم و خیلی کم بین رویکرد BWM با داده‌های مشاهداتی در حدود ۵۰ درصد بود. هم‌چنین، نتایج آزمون T مستقل نشان داد که رویکرد MCDM تفاوت معنی‌داری با داده‌های مشاهداتی در مدل‌سازی تولید رسوب نداشت. علاوه بر این، رویکرد BWM، تأثیرپذیری بالایی از معیارهایی مانند زمان تمرکز و نسبت انشعاب‌پذیری به‌ترتیب با مقادیر همبستگی ۰/۸۱ و ۰/۷۰ داشت. یافته‌ها نشان‌دهنده ضرورت استفاده از رویکردهای مختلف MCDM و توجه به داده‌های مشاهداتی در تحلیل‌های مرتبط با تولید رسوب در آب‌خیزها هستند. بر همین اساس ضرورت اتخاذ یک رویکرد جامع و ترکیبی برای بهبود مدیریت رسوب و منابع آب در مقیاس زیرآب‌خیزها تأکید می‌شود.

کلمات کلیدی: تصمیم‌گیری بهینه، تصمیم‌گیری چندهدفه، رویکرد میان‌رشته‌ای، مدل‌سازی رسوب، مدیریت جامع آب‌خیز.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۸/۱۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۱۱/۱۸

1- Research and Education Center for Agriculture and Natural Resources of Ardabil Province, Ardabil, Iran.

2- Professor, Watershed Management Engineering Department, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. Email: sadeghi@modares.ac.ir

3- Leibniz Centre for Agricultural Landscape Research (ZALF), Germany.

4- Ph.D. in Watershed Sciences and Engineering, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

5- M.Sc. in Watershed Sciences and Engineering, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

6- Ph.D. Student in Watershed Sciences and Engineering, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

7- Professor, Watershed Management Engineering Department, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

*- Corresponding Author

Doi: [10.22034/IWRR.2025.486446.2798](https://doi.org/10.22034/IWRR.2025.486446.2798)



۱- مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اردبیل، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اردبیل، ایران.

۲- استاد، گروه مهندسی آب‌خیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

۳- مرکز تحقیقات چشم‌انداز کشاورزی Leibniz (ZALF)، آلمان.

۴- دکتری علوم و مهندسی آب‌خیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

۵- کارشناس ارشد علوم و مهندسی آب‌خیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

۶- دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آب‌خیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

۷- استاد، گروه مهندسی آب‌خیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان بهار ۱۴۰۴ امکان‌پذیر است.

مانند فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP²)، فرآیند تحلیل شبکه‌های (ANP³)، روش وزن‌دهی افزایشی ساده (SAW⁴)، VIKOR⁵، TOPSIS⁶ و رویکردهای نظریه بازی (از قبیل Condorcet، امتیازدهی Borda و چانه‌زنی Fallback) و روش بهترین-بدترین (BWM⁷) می‌توانند مؤثر باشند. این رویکردها، زیرآب‌خیزها را به صورت نیمه‌توزیعی اولویت‌بندی می‌کنند. در این مطالعه از رویکرد BWM برای پهنه‌بندی توان‌مندی تولید رسوب استفاده شده است. این رویکرد معمولاً برای پهنه‌بندی توان‌مندی تولید پدیده‌های طبیعی استفاده می‌شود. همچنین بر اساس تحلیل بهترین و بدترین حالت‌ها، بهترین راه‌کارهای ممکن برای مدیریت و کنترل مخاطرات طبیعی را ارائه می‌دهد (Nasiri Khiavi et al., 2021, 2024).

پژوهش‌های متعددی در داخل و خارج از کشور در ارتباط با مدل‌سازی رسوب و کاربرد رویکردهای MCDM در پهنه‌بندی رسوب در آب‌خیزهای مختلف صورت گرفته است. Kumar et al. (2023) پژوهشی را با استفاده از روش‌های سنجش‌از دور و سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی، همراه با مدل‌سازی جغرافیایی و تحلیل مؤلفه‌های اصلی انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که زیرآب‌خیزهای رودخانه Beas در هندوستان، تولید بالای رواناب و رسوب دارند که می‌تواند منجر به چالش‌هایی در مدیریت سیلاب‌های ناگهانی شود. Kamaraj et al. (2024) پژوهش خود را با تحلیل ویژگی‌های ریخت‌سنجی آب‌خیز Awash با استفاده از تحلیل همبستگی و روش جمع‌وزنی انجام دادند. آب‌خیز مطالعاتی به شش زیرآب‌خیز تقسیم شد و ۱۱ متغیر انتخابی برای اولویت‌بندی فرسایش خاک مورد استفاده قرار گرفت. این مطالعه سه زیرآب‌خیز را با پتانسیل قابل توجهی برای فرسایش خاک شناسایی کرد که نیازمند اقدام‌های حفاظتی هستند. یافته‌های آن‌ها نشان‌دهنده اثربخشی استفاده از یک روش آماری مبتنی بر GIS برای مطالعات مکانی مرتبط با حفاظت خاک و مدیریت منابع آب است. Dofee et al. (2024) پژوهشی را برای ارزیابی فرسایش خاک در آب‌خیز Omo در جنوب اتیوپی انجام دادند. براساس نتایج ۱۹ زیرآب‌خیز که ۴۳ درصد از مساحت آب‌خیز را تشکیل می‌دهند، به‌شدت در برابر فرسایش خاک آسیب‌پذیر هستند. Hailu et al. (2024) یک مطالعه جامع را با استفاده از مدل SAWT به‌منظور ارزیابی پویایی فرسایش خاک در آب‌خیز Tekeze در اتیوپی انجام دادند. یافته‌های پژوهش نشان داد که مدل SWAT در ارزیابی فرسایش و پاسخ‌های هیدرولوژیکی عملکرد قابل‌قبولی داشته است. به‌ویژه، این مطالعه تفاوت‌های قابل توجهی در تولید رسوب در زیرآب‌خیزهای مختلف نشان داد و مشخص کرد که شش زیرآب‌خیز دارای تولید رسوب بالایی داشتند. Adhami et al. (2019) با استفاده از نظریه بازی‌ها، تغییرات رفتار هیدرولوژیک آب‌خیز گلازچای اشنویه آذربایجان غربی را با توجه به سناریوهای مدیریت

در دهه‌های اخیر افزایش جمعیت و فعالیت‌های گسترده انسان در عرصه‌های طبیعی، بهره‌برداری غیراصولی از منابع، خاک و پوشش گیاهی و تخریب اراضی، کشور را در معرض بحران‌های محیط‌زیستی قرار داده است (Mishra et al., 2022; Kateb et al., 2021). نتیجه آن بروز عواملی چون از بین رفتن پوشش گیاهی، سیل، فرسایش و رسوب و کاهش حاصلخیزی خاک، کاهش توان تولیدی مراتع و پیامدهای منفی اقتصادی-اجتماعی است (Rahimi et al., 2020). امروزه مدیریت آب‌خیز را به‌عنوان علم بررسی تعامل بین فرآیندهای مختلف طبیعی و کاربری‌های زمین و همچنین مدیریت زمین، آب و بوم‌سازگان‌های متنوع آب‌خیز به‌صورت یکپارچه در نظر می‌گیرند (Chakraborty et al., 2020; Kateb et al., 2021). بر همین اساس درک بهتر سامانه‌های آب‌خیز و تبیین شیوه‌های مدیریتی مناسب در راستای دستیابی به توسعه پایدار، شناخت جنبه‌های مختلف آن امری ضروری است (Nasiri Khiavi et al., 2022). با توجه به افزایش روزافزون تخریب‌های محیط‌زیستی و لزوم توجه به رویکردهای جدید برای ارزیابی پایش وضعیت بوم‌سازگان‌ها، مدیریت مخاطرات طبیعی از قبیل رسوب ضروری است (Carpenter, 2006; Adhami et al., 2016; Avand et al., 2022). از طرفی، فرآیندهای فرسایش و رسوب سبب خسارت‌های اقتصادی، کاهش حاصلخیزی خاک سطحی و درنهایت هدررفت انرژی، خاک و مسائل امنیتی آب در سطح جهانی و محلی می‌شود (Pimentel et al., 2015; Yuan et al., 2015; Lal et al., 2001). این پدیده‌ها به‌طور مکرر منجر به هدررفت ظرفیت تولید بوم‌سازگان، خسارت به سدهای مخزنی و آلودگی آب‌های سطحی می‌شود (Erenstein, 1999; Yuan et al., 2015).

به‌دلیل وجود ناهمگونی‌های مختلف در آب‌خیز، فرآیندهای هیدرولوژیکی و مرتبط با منابع آب در طیف وسیعی از مقیاس‌های زمانی و مکانی عمل می‌کنند (Birkel and Soulsby, 2015). بنابراین، اتخاذ یک رویکرد عملی و میان‌رشته‌ای (Qi et al., 2022) برای مدیریت جامع آب‌خیز و همچنین مدیریت رسوب ضروری است. در بسیاری از مطالعات، مدل‌های تجربی برای تجزیه و تحلیل فرسایش و رسوب استفاده شده است. این در حالی است که برای دستیابی به تصمیم‌گیری بهینه بایستی از روش‌های مختلفی برای اولویت‌بندی زیرآب‌خیزها از نظر تولید رسوب استفاده کرد. روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM¹) از جمله روش‌های ارزیابی چندمعیاره هستند که کاربردهای زیادی در زمینه‌های مختلف دارند (Esangbedo and Bai, 2019). بنابراین، در موضوعات مربوط به مدیریت آب‌خیز مانند اولویت‌بندی زیرآب‌خیزها، استفاده از MCDM

مشارکتی کاربری اراضی مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش از سه رویکرد Condorcet، امتیازدهی Borda و چانه‌زنی Fallback برای اولویت‌بندی زیرآب‌خیزها و عملیات مدیریتی استفاده شدند. نتایج نشان داد که اثر سناریوهای مختلف مدیریتی بر کاهش رواناب و رسوب چشم‌گیر بوده است. (Nasiri Khiavi et al., 2024) برای پهنه‌بندی توان‌مندی تولید سیلاب در آب‌خیز چشمه‌کیله از رویکردهای نظریه بازی و BWM استفاده کرد. بر اساس BWM در آب‌خیز سه‌هزار، زیرآب‌خیز ۹ و در آب‌خیز دوهزار، زیرآب‌خیز ۱۰ با وزن‌های $0/253$ و $0/283$ بیش‌ترین توان‌مندی تولید سیلاب را داشتند. در هر دو رویکرد BWM و نظریه بازی، تفاوت‌هایی در الگوهای اولویت‌بندی زیرآب‌خیزها مشاهده شد که به دلیل ساختارهای مختلف BWM و نظریه بازی بود. در نهایت، بر اساس مشاهدات میدانی و شواهد شنیداری، زیرآب‌خیزهای ۹ و ۱ از نظر پوشش گیاهی در وضعیت مناسبی قرار نداشتند و همچنین سیلاب‌های یخچالی در تابستان باعث شده بود که این دو زیرآب‌خیز براساس تولید سیلاب در اولویت قرار گیرند. در نهایت، نتایج BWM تأیید کرد که این روش، اولویت‌بندی بهتری را بر اساس اجماع گروه‌داران نسبت به نظریه بازی ارائه می‌دهد. جمع‌بندی پیشینه پژوهش نشان می‌دهد که در مطالعات مربوط به رسوب از روش‌های مختلف استفاده شده است. روش‌های سنتی و معمول تصمیم‌گیری چندمعیاره دارای نقاط ضعف قابل توجهی هستند. از مهم‌ترین نقاط ضعف این روش‌ها می‌توان به عدم قطعیت بالای این روش‌ها به دلیل تأثیرپذیری بیش‌تر از نظرات کارشناسی اشاره نمود. این درحالی‌که روش‌های نوین تصمیم‌گیری چندمعیاره مانند BWM، دارای عدم قطعیت پایینی هستند. همچنین این روش‌ها توانایی حل مسائل مربوط به اولویت‌بندی‌های مفهومی را دارند. پیچیدگی محاسبات در این روش‌ها برای شبکه‌های بزرگ، پیچیده و زمان‌بر است. همچنین تغییرات کوچک در اولویت‌های وزن‌دهی ممکن است تأثیر زیادی بر نتایج داشته باشد. در این پژوهش رویکرد جدید BWM به سبب عدم قطعیت پایین‌تر نسبت به سایر روش‌های معمول و عملکرد خوب در مجموع رویکردهای معرفی شده در خانواده MCDM (Rezaei, 2016; Nasiri Kaivi et al., 2024a) مورد استفاده قرار گرفت. از طرفی از دلایل مهم انتخاب آب‌خیز طالقان به عنوان منطقه هدف، مجهز بودن برخی از زیرآب‌خیزهای این آب‌خیز به ایستگاه‌های

ثبت داده است که در نهایت می‌توان بر اساس داده‌های واقعی و مشاهداتی، میزان صحت رویکرد BWM را در اولویت‌بندی رسوب، اعتبارسنجی کرد. طبقاً نتایج حاصل از این پژوهش می‌تواند گامی مهم و مؤثر در رسیدن به روشی دائمی در پژوهش‌ها به منظور اولویت‌بندی زیرآب‌خیزها از نظر توان‌مندی تولید رسوب باشد. از این‌رو، پژوهش حاضر با هدف اولویت‌بندی زیرآب‌خیزها از نظر توان‌مندی تولید رسوب با استفاده از رویکرد BWM و صحت‌سنجی نتایج آن براساس داده‌ها مشاهداتی رسوب‌سنجی در آب‌خیز طالقان البرز انجام شد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- ویژگی‌های منطقه مورد مطالعه

آب‌خیز بالادست سد طالقان به مساحت حدود ۹۴۰ کیلومتر مربع و در محدوده عرض و طول جغرافیایی ۳۶ درجه و ۳۶ دقیقه و ۵ ثانیه و ۵۰ درجه و ۴۵ دقیقه و ۲۲ ثانیه قرار گرفته است. حداکثر و حداقل ارتفاع آب‌خیز طالقان از سطح دریا به ترتیب ۴۰۴۲ و ۱۷۷۳ متر و میانگین ارتفاع منطقه ۲۷۴۵/۱۶ متر از سطح دریاست. از نظر کاربری/پوشش زمین، بیش از ۸۵ درصد مساحت آب‌خیز مرتعی است که بیش از ۶۰ درصد مراتع دارای پوشش گیاهی ضعیف و ۴۰ درصد دارای پوشش گیاهی متوسط هستند. میانگین شیب و طول بزرگ‌ترین آبراهه این آب‌خیز به ترتیب ۴۶/۶۳ درصد و ۳۹ کیلومتر برآورد شده است. این منطقه از شمال به الموت، از جنوب به زیاران، از شرق به کرج و از غرب به آب‌خیز شاهرود محدود می‌شود. میانگین بارندگی سالانه در ایستگاه باران‌سنجی گلپار واقع در آب‌خیز طالقان ۳۷۳ میلی‌متر است (Razavizadeh et al., 2017; Noor et al., 2014). مراتع منطقه مورد مطالعه در پهنه رویشی ایران و تورانی و اقلیم پوشش گیاهی البرزی قرار دارند. اکثر تیپ‌های گیاهی منطقه دارای پوشش متوسط و ضعیف با روند منفی و ثابت بوده و گونه‌های غالب آن شامل *Artemisia sp.*، *Bromus sp.*، *Thymus sp.*، *Astragalus sp.* هستند. این در حالی است که حدود ۸۰ هزار واحد دامی در منطقه در حال چرا هستند. شکل (۱) نشان‌دهنده موقعیت کشوری و استانی و جدول (۱) نیز نشان‌دهنده موقعیت نقطه‌ای و ارتفاع هر یک از ایستگاه‌های آب‌سنجی آب‌خیز طالقان در استان البرز است.

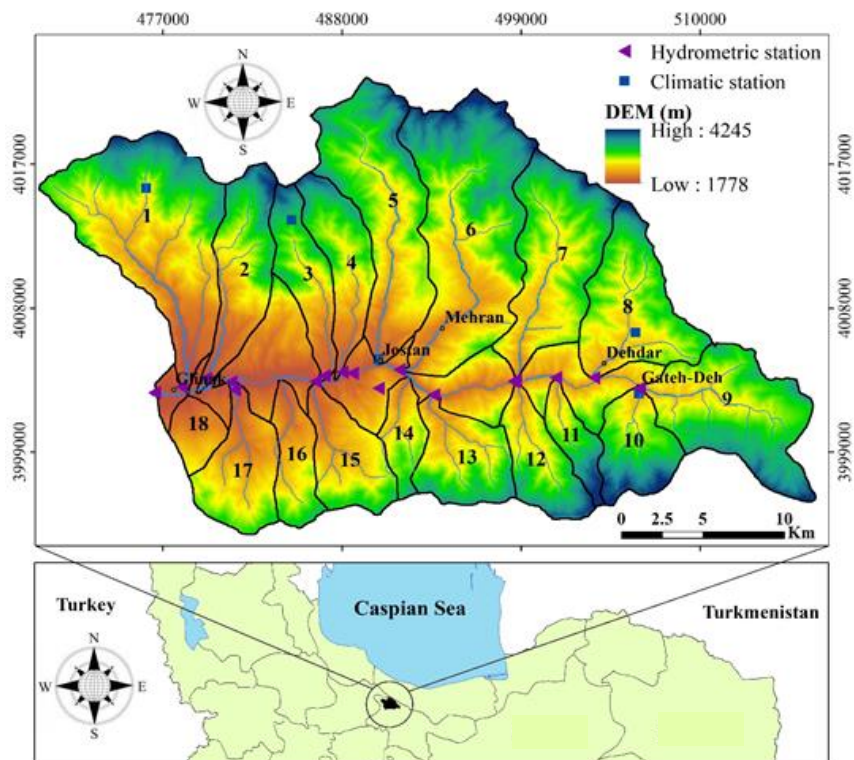


Fig. 1- Geographical location of the Taleqan Watershed area, Alborz Province, Iran

شکل ۱- موقعیت کشوری و استانی آبخیز طالقان، استان البرز

Table 1- Characteristics of the river gauge stations in each sub-watershed of the Taleqan Watershed, Alborz Province, Iran

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های آب‌سنجی در هر زیرآبخیز، آبخیز طالقان، استان البرز

Sub-watershed	Station	X (m)	Y (m)	Area (Km ²)	Elevation (m)
1	Hasanjoo	50.76	36.17	94.7	1800
2	Shahrak	50.79	36.18	37.12	1820
3	Karkabood	50.85	36.18	29.04	1900
4	Khoien	50.87	36.18	27.48	1920
5	Jovestan	50.89	36.17	65.69	1940
6	Mehran	50.91	36.18	102.17	1960
7	Narian	50.99	36.18	61.69	2120
8	Dehdar	51.04	36.18	48.23	2235
9	Garab	51.07	36.17	56.61	2300
10	Gatedeh	51.07	36.17	24.77	2308
11	Sikan	51.01	36.18	12.55	2165
12	Mashino	50.98	36.18	26.48	2120
13	Khajireh	50.93	36.17	28.12	2020
14	Nesa	50.87	36.18	16.97	1980
15	Orazan	50.85	36.18	26.72	1900
16	Khodkavand	50.77	36.18	21.23	1879
17	Jazan	50.79	36.17	27.1	1840
18	Minavand	50.73	36.16	14.65	1800

۲-۲- منابع داده

با توجه به لزوم استفاده از لایه‌های مختلف اطلاعاتی، مدل رقومی ارتفاع با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر با استفاده از سامانه Google Earth Engine (GEE) دانلود شد. نقشه‌های مرز آبخیز، توپوگرافی، شبکه زهکشی منطقه، پوشش گیاهی و کاربری اراضی، اطلاعات جمعیت‌شناختی آبخیز و جاده‌ها از اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان البرز دریافت شد. همچنین داده‌های دبی جریان رودخانه‌ای مربوط به سال‌های آبی ۱۳۵۰-۱۴۰۰ و داده‌های بارندگی و دما مربوط به سال‌های ۱۳۶۰-۱۴۰۰ به ترتیب از شرکت آب منطقه‌ای استان البرز و سازمان هواشناسی کشور دریافت شد. مقیاس نقشه‌های مورد استفاده ۱:۲۵۰۰۰ بود و طول دوره آماری ایستگاه‌های آب‌سنجی متفاوت بود. به‌طور کلی سعی شد که در بسیاری از ایستگاه‌ها از قبیل کنده، مهران، دهر، جویستان و گلینک از داده‌های سال‌های آبی ۱۳۵۰ تا ۱۴۰۰ استفاده شود. همچنین در بخش داده‌های اقلیمی نیز از داده‌های ۱۳۶۰ تا ۱۴۰۰ در آبخیز طالقان استفاده شد. نمونه‌برداری رسوب برای زیرآبخیزهای فاقد آمار منتشره توسط شرکت آب منطقه‌ای، نیز به صورت دستی و به‌مدت یک‌سال انجام شد. در ارتباط با برداشت داده‌های رسوب روزانه نیز برای خروجی هر زیرآبخیز، یک نفر متصدی تحت آموزش قرار گرفت. به‌منظور تعیین میزان مواد معلق خروجی از زیرآبخیزها، نمونه‌برداری آب در مواقع معمولی هر سه روز یک‌بار و در مواقع سیلابی، دو بار در روز صورت گرفت.

۳-۲- کمی‌سازی معیارهای اثرگذار بر توان‌مندی تولید

رسوب

معیارهای مورد استفاده برای پهنه‌بندی توان‌مندی تولید رسوب براساس مرور منابع مختلف شامل فرسایش‌دگی باران، فرسایش‌پذیری خاک، ارتفاع، انحنا، نیمرخ، انحنا، سطح، بارش متوسط سالانه، تراکم زهکشی، دبی روزانه، درصد اراضی غیرقابل نفوذ، زمان تمرکز، شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI⁸)، شماره منحنی، شیب آبراهه اصلی، شیب، ضریب شکل، ضریب فشردگی، طول آبراهه اصلی، طول کل آبراهه، طول مستطیل معادل، عرض مستطیل معادل، عرض زیرآبخیز، قطر دایره هم‌سطح، مساحت اراضی کشاورزی، مساحت اراضی مرتعی، محیط زیرآبخیز، مساحت زیرآبخیز، نسبت انشعاب‌پذیری، نسبت کشیدگی و نسبت گردی بود (Tamene and Vlek, 2007; Adhami et al., 2016; Adhami et al., 2016; Setyawan et al., 2016; Mokarram and Zarei, 2021; Avand et al., 2023; Nasiri Khiavi et al., 2024).

بر اساس معیارهای منتخب در توان‌مندی تولید رسوب، ابتدا نقشه مدل رقومی ارتفاع ۳۰ متری SRTM با استفاده از سامانه GEE تهیه شد

(Kandil et al., 2024). سپس در نرم‌افزار ArcGIS 10.8، نقشه‌های

تندی شیب و جهت شیب تهیه شد.

به‌منظور تهیه نقشه کاربری زمین از تصاویر ماهواره Sentinel-2 در تاریخ ۲۰۲۳/۰۶/۰۱ تا ۲۰۲۳/۰۶/۲۸ پس از اعمال تصحیحات هندسی، اتمسفری و رادیومتریک در محیط سامانه GEE استفاده شد (Zhao et al., 2024). بدین منظور بر اساس پایش در سامانه GEE، نمونه‌های تعلیمی تهیه شد. نمونه‌های تعلیمی (برای نمونه مناطق مسکونی، اراضی مرتعی، کشاورزی و پهنه آبی) برای هر کدام از طبقات به‌صورت تصادفی از سطح منطقه مورد مطالعه جمع‌آوری شد. در نهایت براساس ارزیابی صحت، بهترین روش برای طبقه‌بندی کاربری زمین انتخاب شد (Nasiri Khiavi et al., 2022). برای نمونه‌برداری از داده‌های تعلیمی برای هر کاربری از سامانه Google Earth Engine استفاده شد و دو دسته داده‌برداری برای مراحل آموزش و آزمون انجام شد. پس از برداشت داده‌های تعلیمی برای طبقه‌بندی تصویر کاربری اراضی از الگوریتم‌های یادگیری ماشین در سامانه Google Earth Engine استفاده شد که در نهایت براساس نتایج ارزیابی صحت، الگوریتم جنگل تصادفی با ضریب صحت ۸۹ درصد به‌عنوان الگوریتم بهینه انتخاب شد. در ادامه نقشه‌های مربوط به انحنا، سطح، فاصله از رودخانه و تراکم زهکشی در نرم‌افزار ArcGIS 10.8 تهیه شد. برای تهیه شاخص TWI از نرم‌افزار SAGA-GIS استفاده شد (Mattivi et al., 2019). نقشه‌های خاک‌شناسی و فرسایش‌پذیری خاک از اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان البرز به دست آمد. برای تهیه نقشه بارش متوسط و حداکثر سالانه از محصولات مربوط به سنجنده MODIS در سامانه GEE استفاده شد (Kibret et al., 2020; Ebrahimi et al., 2021). در نهایت معیارهای فیزیوگرافی شامل زمان تمرکز براساس روش Kirpich (Nasiri Khiavi et al., 2021)، شیب آبراهه اصلی، ضریب شکل، ضریب فشردگی، طول مستطیل معادل، عرض مستطیل معادل، قطر دایره هم‌سطح، نسبت کشیدگی و نسبت گردی در محیط نرم‌افزار Microsoft Excel براساس فراسنجه‌های مستخرج از فایل‌های شکلی مختلف از نرم‌افزار ArcGIS 10.8 برای هر زیرآبخیز کمی‌سازی شد.

۴-۲- انتخاب معیارهای مؤثر بر تولید رسوب با تحلیل

مؤلفه‌های اصلی (PCA⁹)

برای انتخاب و کمی‌سازی معیارهای مورد استفاده، از PCA به‌عنوان یک روش تحلیلی پیش‌رفته برای شناسایی و انتخاب معیارهای فیزیوگرافی و هیدرواقلمی اثرگذار بر اولویت‌بندی زیرآبخیزها استفاده شد (Foody et al., 2004; Bro and Smilde, 2014; Bucherie

(et al., 2022). این روش در فرآیند کاهش تعداد معیارها در مطالعات مکانی از اهمیت بالایی برخوردار است، به‌ویژه در مواردی که مجموعه داده‌ها ممکن است به‌طور قابل توجهی پیچیده و دارای روابط متقابل یا خودهمبسته باشند. برای انجام این تحلیل‌ها، محاسبات آماری با استفاده از نرم‌افزار SPSS انجام گرفت. در این راستا، مؤلفه‌های اصلی با دقت بر اساس واریانس تجمی شناسایی شدند (Abdrabo et al., 2023). پس از تعیین مؤلفه‌های اصلی، معیارهای مؤثر به‌طور هوشمندانه براساس معناداری ضرایب همبستگی برای هر مؤلفه انتخاب شدند (Martins and Nunes, 2020).

۲-۵- کاربرد رویکرد BWM و اولویت‌بندی توان‌مندی رسوب در زیرآبخیزها

برای اولویت‌بندی زیرآبخیزها از نظر تولید رسوب بر اساس معیارهای مؤثر از BWM استفاده شد. در مرحله اول، عامل‌های تعریف‌شده، برای اعمال BWM انتخاب شد (Rezaei, 2016). سپس بهترین و بدترین عامل انتخاب شد. ترجیح بهترین معیار بر معیارهای دیگر با عددی بین ۱ تا ۹ موردسنجش قرارگرفت و بهترین معیار انتخاب شد. به‌منظور انتخاب بدترین معیار نیز مرحله قبل تکرار شده و بر این اساس ترجیح سایر معیارها بر بدترین معیار تعیین شد (Nasiri Khiavi et al., 2024). درنهایت زیرآبخیزها از نظر تولید رسوب اولویت‌بندی شد. پس از وزن‌دهی زیرآبخیزها بر اساس معیارهای منتخب در ارتباط با توان‌مندی تولید رسوب، برای نقشه‌بندی از نرم‌افزار ArcGIS 10.8 بهره گرفته شد. لازم به‌ذکر است که به‌دلیل تفاوت‌های دامنه و محدوده اعداد طبقه‌بندی، وزن‌ها در ابتدا بین صفر و یک نرمال شدند (Nasiri Khiavi et al., 2021, 2024). این فرآیند نرمال‌سازی به‌منظور یکسان‌سازی و همگن‌سازی وزن‌ها، امکان مقایسه مؤثر و معتبر آنها را فراهم می‌سازد. در مرحله بعد، توان‌مندی تولید رسوب در پنج طبقه مختلف طبقه‌بندی شد که شامل طبقه بسیارپایین (۰-۰/۲)، پایین (۰/۲۱-۰/۴)، متوسط (۰/۴۱-۰/۶)، بالا (۰/۶۱-۰/۸) و بسیاربالا (۰/۸۱-۱) بود (Nasiri Khiavi et al., 2024). این طبقه‌بندی بر مبنای وزن‌ها و اولویت‌های استخراج‌شده از زیرآبخیزها صورت گرفت و به‌منظور تحلیل دقیق‌تر رویکرد BWM برای شناسایی و درک توان‌مندی رسوب در آبخیز طالقان ارائه شد.

۲-۶- اعتبارسنجی رویکرد BWM در تولید رسوب و تعیین رویکرد بهینه

پس از تهیه نقشه مربوط به توان‌مندی تولید رسوب، به‌منظور اعتبارسنجی و بهینه‌سازی روش BWM، از داده‌های مشاهداتی و واقعی مقدار رسوب (بر حسب تن در روز) در خروجی ۱۸ زیرآبخیز

استفاده شد. این داده‌های مشاهداتی به‌عنوان مبنای ارزیابی و مقایسه روش BWM عمل کردند. در پایان، با انجام تحلیل‌های لازم، صحت‌سنجی رویکرد مورد استفاده شده در تولید رسوب انجام شد. علاوه بر این، برای بررسی همبستگی و انحراف‌معیار میان روش دسته‌بندی و معیارهای توان‌مندی تولید رسوب، نمودار Taylor با استفاده از زبان برنامه‌نویسی R تهیه شد. این نمودار به‌صورت چشمی ارتباطات و انحرافات میان داده‌ها را به تصویر می‌کشد و قابلیت درک بهتری از بُعد آماری مطالعات فراهم می‌آورد. درنهایت، شبکه همبستگی مقایسه‌ای نتایج حاصل از روش طبقه‌بندی توان‌مندی تولید رسوب با داده‌های مشاهداتی، با استفاده از زبان برنامه‌نویسی Python ارائه شد.

۳- نتایج و یافته‌های پژوهش

مقادیر کمی معیارهای مؤثر بر تولید رسوب در هر زیرآبخیز در جدول ۲ ارائه شده است. براساس نتایج، کاربری مرتعی خوب با مساحت ۴۴۲۵۸/۹۸ هکتار دارای بیش‌ترین گسترش در آبخیز مطالعاتی بود. این در حالی است که کاربری‌های مرتع متوسط (۲۸۷۸۱/۰۷ هکتار)، مرتع فقیر تا متوسط (۳۵۳۷/۹۱ هکتار)، اراضی زراعی-باغی (۳۰۱۶/۳۳ هکتار)، اراضی باغی (۱۰۱۱/۷۲ هکتار)، مناطق مسکونی (۶۸/۵۱ هکتار) و اراضی کشاورزی (۱۰/۱۷ هکتار) به ترتیب بیش‌ترین تا کم‌ترین کاربری را شامل شدند. نتایج مربوط به معیارهای نهایی‌شده در هر مؤلفه براساس درصد واریانس و ضریب همبستگی در جدول ۳ ارائه شده است. براساس نتایج، معیارهای مساحت، ضریب فشردگی، شیب، انحنای سطح، اراضی کشاورزی و فرساینده‌گی باران در مؤلفه‌های شش‌گانه انتخاب شدند. همچنین، جدول (۴) نشان‌دهنده اولویت‌بندی زیرآبخیزها از نظر تولید رسوب با رویکرد BWM است. در ادامه پهنه‌بندی و آرایش مکانی زیرآبخیزها از نظر توان‌مندی تولید رسوب براساس رویکرد BWM در آبخیز طالقان، استان البرز در شش طبقه بدون اولویت، اولویت‌های خیلی‌پایین، پایین، متوسط، بالا و خیلی‌بالا از نظر توان‌مندی تولید رسوب در شکل (۲) ارائه شده است. مقادیر کمی مشاهداتی و واقعی رسوب برحسب تن بر روز در ۱۸ ایستگاه آب‌سنجی مورد مطالعه در خروجی زیرآبخیزهای آبخیز طالقان در جدول ۵ ارائه شده است. همچنین، پهنه‌بندی و آرایش مکانی زیرآبخیزها از نظر تولید رسوب مبتنی بر داده‌های واقعی در شکل ۳ ارائه شده است. نتایج آزمون T مستقل در بررسی معناداری اولویت‌بندی داده‌های واقعی رسوب و رویکرد MCDM در مدل‌سازی رسوب در جدول (۶) نشان داده شده است. همچنین نتایج مقایسه‌ای اولویت‌بندی کیفی زیرآبخیزها از نظر تولید رسوب در جدول (۶) ارائه شده است. همچنین، نمودار Taylor به‌منظور بررسی ضرایب همبستگی و انحراف‌معیار بین معیارهای منتخب و رویکرد MCDM در مدل‌سازی رسوب در شکل (۴) ارائه شده است.

Table 2- Quantitative values of the parameters affecting sediment generation in Taleqan Watershed, Alborz Province, Iran

جدول ۲- مقادیر کمی معیارهای مؤثر بر تولید رسوب در آبخیز طالقان، استان البرز

Criteria	Sub-watershed								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
El	2709.50	2730.00	2775.70	2800.00	2839.20	2899.10	2880.80	2828.30	3000.80
PrC	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
PIC	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Pmax	259.50	269.40	276.90	320.60	363.40	332.80	284.10	252.90	214.60
Dd	2.00	2.90	3.00	3.40	2.80	2.70	2.40	1.90	1.50
Emin	1787.00	1805.00	1893.00	1900.00	1940.00	1957.00	2116.00	2250.00	2326.00
Emax	3614.00	3919.00	3878.00	3859.00	4037.00	4001.00	3940.00	3875.00	3915.00
Dmax	24.70	7.30	3.30	19.60	56.80	15.70	6.50	6.10	2.40
Dda	4.00	0.70	0.20	3.00	8.50	2.20	1.80	0.80	1.30
Imper	8.50	6.00	1.50	1.60	2.00	1.40	6.70	5.30	4.90
Tc	1.20	1.00	0.80	0.80	1.30	1.30	1.00	0.80	1.00
TWI	6.50	6.50	6.30	6.30	6.30	6.30	6.20	6.10	6.40
CN	79.20	73.60	75.50	68.60	76.80	74.10	75.30	69.20	66.60
Sms	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
Sl	45.00	47.30	50.90	48.50	51.10	49.10	52.60	52.30	45.80
FF	0.20	0.10	0.10	0.10	0.10	0.20	0.30	0.30	0.30
CC	1.50	1.80	1.80	1.80	1.70	1.50	1.50	1.40	1.40
Lms	20.30	18.70	14.90	15.30	22.20	21.90	14.80	12.80	14.80
L	188.90	109.00	88.10	94.20	185.20	278.30	149.60	89.70	82.00
Erl	22.80	18.70	16.20	15.80	22.50	25.00	19.60	15.30	15.90
Ww	5.60	2.50	2.30	2.20	3.60	5.40	4.40	5.00	4.50
Werl	6.00	3.30	2.90	2.90	4.60	6.00	4.70	4.40	4.90
Cd	11.00	6.90	6.10	5.90	9.10	11.40	8.90	7.80	8.50
Fa	621.60	199.90	174.90	170.40	102.10	297.30	131.50	82.60	425.40
P	57.30	39.90	34.30	36.30	56.20	65.00	49.80	41.50	47.60
Ra	4301.20	2513.70	1747.50	1368.40	2141.60	3407.30	1721.90	2652.40	5356.40
A	91.10	36.50	25.50	29.60	70.20	97.90	57.90	47.50	57.90
Br	3.40	2.60	4.80	3.50	6.80	3.90	2.80	4.70	3.80
Er	0.50	0.40	0.40	0.40	0.40	0.50	0.50	0.50	0.50
Mr	0.50	0.30	0.30	0.30	0.40	0.40	0.40	0.50	0.50

توضیح: El (ارتفاع: m)، PrC (انحنای پروفیل)، PIC (انحنای پلان)، Pmax (حداکثر بارش سالانه: mm)، Dd (تراکم زهکشی)، Emin (ارتفاع کمینه: m)، Emax (ارتفاع بیشینه: m)، Dmax (دبی بیشینه: m^3s^{-1})، Dda (دبی روزانه: m^3s^{-1})، Imper (سطوح غیرقابل نفوذ: درصد)، Tc (زمان تمرکز، ساعت)، TWI (شاخص رطوبت توپوگرافی)، CN (شماره منحنی)، Sms (شیب آبراهه اصلی: درصد)، Sl (شیب: درصد)، FF (ضریب فرم)، CC (ضریب فشردگی)، Lms (طول آبراهه اصلی: کیلومتر)، L (طول کل آبراهه: کیلومتر)، Erl (طول مستطیل معادل)، Ww (عرض زیرآبخیز: کیلومتر)، Werl (عرض مستطیل معادل)، Cd (قطره دایره هم‌سطح)، Fa (مساحت اراضی کشاورزی: هکتار)، P (محیط: کیلومتر)، Ra (مساحت اراضی مرتعی: هکتار)، A (مساحت: هکتار)، Br (نسبت انشعاب)، Er (نسبت کشیدگی)، Mr (نسبت گردی)

Note: El (Elevation: m), PrC (Profile Curvature), PIC (Plan Curvature), Pmax (Maximum Annual Precipitation: mm), Dd (Drainage Density), Emin (Minimum Elevation: m), Emax (Maximum Elevation: m), Dmax (Maximum Discharge: m^3/s), Dda (Daily Discharge: m^3/s), Imper (Impervious Areas: %), Tc (Concentration Time: hours), TWI (Topographic Wetness Index), CN (Curve Number), Sms (Main Stream Slope: %), Sl (Slope: %), FF (Form Factor), CC (Compactness Coefficient), Lms (Length of Main Stream: km), L (Total Stream Length: km), Erl (Equivalent Rectangular Length), Ww (Width of Sub-basin: km), Werl (Width of Equivalent Rectangle), Cd (Concentric Circle Diameter), Fa (Area of Agricultural Land: hectares), P (Perimeter: km), Ra (Area of Rangeland: hectares), A (Area: hectares), Br (Branching Ratio), Er (Elongation Ratio), Mr (Circularity Ratio).

Table 2- Continued
جدول ۲- ادامه

Criteria	Sub-watershed								
	10	11	12	13	14	15	16	17	18
El	3105.50	3049.90	2920.50	2767.40	2636.90	2501.80	2450.80	2425.80	2189.00
PrC	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
PIC	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Pmax	193.80	196.70	189.00	179.90	175.10	158.60	153.90	144.40	151.20
Dd	2.00	1.80	1.70	1.90	2.50	3.00	2.60	2.90	2.40
Emin	2321.00	2172.00	2114.00	2014.00	1980.00	1892.00	1873.00	1831.00	1818.00
Emax	3941.00	3943.00	3906.00	3571.00	3398.00	3266.00	3261.00	3146.00	2740.00
Dmax	8.30	1.10	2.20	3.00	0.10	6.90	12.20	6.20	1.30
Dda	1.00	0.30	0.80	0.80	0.00	0.70	0.50	0.80	0.10
Imper	0.10	0.00	0.00	0.00	2.00	0.00	2.10	0.00	0.00
Tc	0.50	0.40	0.60	0.60	0.60	0.70	0.70	0.70	0.40
TWI	6.50	6.20	6.20	6.10	6.00	6.50	6.50	6.60	7.00
CN	72.20	68.50	76.20	69.70	77.40	76.70	76.10	73.60	79.20
Sms	0.20	0.20	0.20	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.20
Sl	46.50	50.70	57.50	54.70	51.30	41.40	38.60	37.50	25.20
FF	0.50	0.20	0.30	0.30	0.20	0.30	0.20	0.20	0.70
CC	1.20	1.70	1.30	1.20	1.60	1.30	1.60	1.30	1.40
Lms	6.90	8.70	10.10	9.60	9.20	10.00	10.50	10.60	4.60
L	49.80	22.00	45.10	54.60	41.70	81.30	54.90	77.80	35.10
Erl	7.70	9.80	9.90	8.80	11.20	9.90	12.00	9.80	8.20
Ww	4.10	1.50	3.00	3.90	2.20	3.30	2.30	3.00	2.80
Werl	4.10	2.00	3.60	4.20	2.30	3.60	2.70	3.70	2.50
Cd	5.60	4.00	5.80	6.00	4.60	5.80	5.20	5.90	4.30
Fa	36.30	0.00	0.10	135.00	8.20	266.40	229.90	288.70	1.30
P	28.20	24.70	28.40	28.00	22.10	28.90	25.90	31.20	15.40
Ra	2533.20	1282.80	2450.40	2525.00	194.80	981.50	927.90	2086.80	1118.20
A	25.70	12.80	24.80	30.20	13.70	27.80	19.40	31.10	11.20
Br	2.80	4.00	4.10	4.10	4.40	4.10	3.70	3.00	3.60
Er	0.70	0.40	0.60	0.70	0.40	0.60	0.40	0.60	0.50
Mr	0.70	0.40	0.60	0.70	0.40	0.60	0.40	0.60	0.50

توضیح: به توضیحات ارائه شده در بخش اول جدول (۲) مراجعه کنید.

Note: Please refer to the explanations provided in the first part of Table (2).

۴- بحث و نتیجه گیری

اولویت بندی شامل بالا بودن میزان فرسایندها (Hastings et al., 2005; de Almeida et al., 2021)، بارش بیشینه سالانه و وجود اراضی غیرقابل نفوذ است. این نتایج (جدول ۴) نه تنها اهمیت انتخاب دقیق زیرآب‌خیزها برای مدیریت و کنترل رسوبات را برجسته می‌سازد، بلکه می‌تواند به برنامه‌ریزی‌های حفاظتی و بهبود کیفیت منابع آب و خاک در مناطق مورد مطالعه کمک کند. الگوی پهنه‌بندی زیرآب‌خیزها از نظر تولید رسوب در مطالعه حاضر، با استفاده از رویکرد MCDM، تفاوت‌های معناداری را میان زیرآب‌خیزهای شمالی و جنوبی نشان داد. به طور کلی، زیرآب‌خیزهای

از مهم‌ترین نتایج این پژوهش، تعیین زیرآب‌خیز ۱۸ به عنوان منطقه‌ای با اولویت بسیار پایین از نظر تولید رسوب است. این موضوع به وضوح تحت تأثیر پایین بودن مقادیر فرسایندها باران و نیز بارش بیشینه سالانه در این منطقه قرار دارد که می‌تواند به کاهش خطرات ناشی از فرسایش خاک و جریان آب کمک کند (Nasiri Khiavi et al., 2024). براساس رویکرد BWM، زیرآب‌خیز ۱۲ به عنوان زیرآب‌خیز با بالاترین توانمندی تولید رسوب شناسایی شد (Avand et al., 2022). تحلیل‌های بیشتر نشان دادند که عوامل مؤثر در این

که در فرایند اولویت‌بندی زیرآبخیزها از نظر تولید رسوب، زیرآبخیزهای ۱۱ و ۱۸ به دلیل عوامل کلیدی مانند بارش بیشینه سالانه کمتر، طول آبراهه کمتر و به‌ویژه مساحت پایین، برای تولید رسوب پایین یا خیلی پایین قرار گرفتند (Ijaz et al., 2022). این اطلاعات می‌تواند راه‌گشای برنامه‌ریزی‌های محلی و منطقه‌ای برای بهینه‌سازی مدیریت منابع آبی و کیفیت خاک باشد.

شمالی در مقایسه با جنوبی‌ها، با توجه به عوامل مختلفی نظیر شیب زمین، نوع خاک و پوشش گیاهی، توان‌مندی بالاتری برای تولید رسوب داشتند. این یافته‌ها اهمیت توجه به توزیع جغرافیایی زیرآبخیزها در مدیریت منابع آب و کنترل فرسایش خاک را نمایان می‌سازد. به‌ویژه، زیرآبخیزهای ۵ و ۶ (شکل ۳)، به‌عنوان مناطق با توان‌مندی بالا یا خیلی‌بالا برای تولید رسوب شناسایی شدند. این نتایج تأکید بر اهمیت این زیرآبخیزها در مدیریت رسوب و برنامه‌ریزی‌های مربوط به حفاظت از منابع آب و خاک دارد. از سوی دیگر، تحلیل‌ها نشان می‌دهد

Table 3- Results of PCA application related to selected parameters in sediment modeling in Taleqan Watershed, Alborz Province, Iran

جدول ۳- نتایج کاربست PCA مربوط به معیارهای منتخب در مدل‌سازی رسوب در آبخیز طالقان، استان البرز

Components	Variance (%)	Selected criteria	R ²
1	40.211	Area	0.915
2	19.098	Compressibility Coefficient	-0.834
3	11.466	Slope	-0.848
4	7.413	Plan curvature	0.818
5	5.662	Farmland area	-0.404
6	4.028	Rainfall erosivity	-0.414

Table 4- Weighting of sub-watersheds based on sediment generation criteria using BWM, Taleqan Watershed, Alborz Province, Iran

جدول ۴- وزن‌دهی زیرآبخیزها براساس معیارهای تولید رسوب با استفاده از BWM، آبخیز طالقان، استان البرز

SW	Criteria						Score
	Area	Compressibility Coefficient	Slope	Plan curvature	Farmland area	Erosivity	
1	0.16	0.03	0.01	0.09	0.40	0.02	0.12
2	0.04	0.01	0.04	0.10	0.04	0.09	0.05
3	0.02	0.01	0.04	0.04	0.04	0.13	0.05
4	0.10	0.01	0.10	0.02	0.03	0.06	0.05
5	0.13	0.01	0.05	0.01	0.03	0.16	0.07
6	0.40	0.10	0.03	0.03	0.13	0.05	0.12
7	0.09	0.04	0.13	0.04	0.04	0.40	0.12
8	0.05	0.04	0.09	0.05	0.02	0.04	0.05
9	0.06	0.05	0.02	0.01	0.16	0.01	0.05
10	0.03	0.40	0.03	0.13	0.01	0.01	0.10
11	0.01	0.01	0.04	0.04	0.01	0.01	0.02
12	0.01	0.06	0.40	0.40	0.01	0.04	0.16
13	0.03	0.16	0.16	0.01	0.10	0.03	0.08
14	0.01	0.02	0.06	0.01	0.01	0.04	0.03
15	0.04	0.09	0.01	0.01	0.06	0.03	0.04
16	0.01	0.03	0.01	0.16	0.05	0.01	0.05
17	0.04	0.13	0.01	0.06	0.09	0.10	0.07
18	0.01	0.04	0.01	0.03	0.01	0.01	0.02

توضیح: سلول‌های آبی و سبز به ترتیب نشان‌دهنده زیرآبخیزهای برنده و بازنده است.

Note: The blue and green cells represent the winning and losing sub-watersheds, respectively.

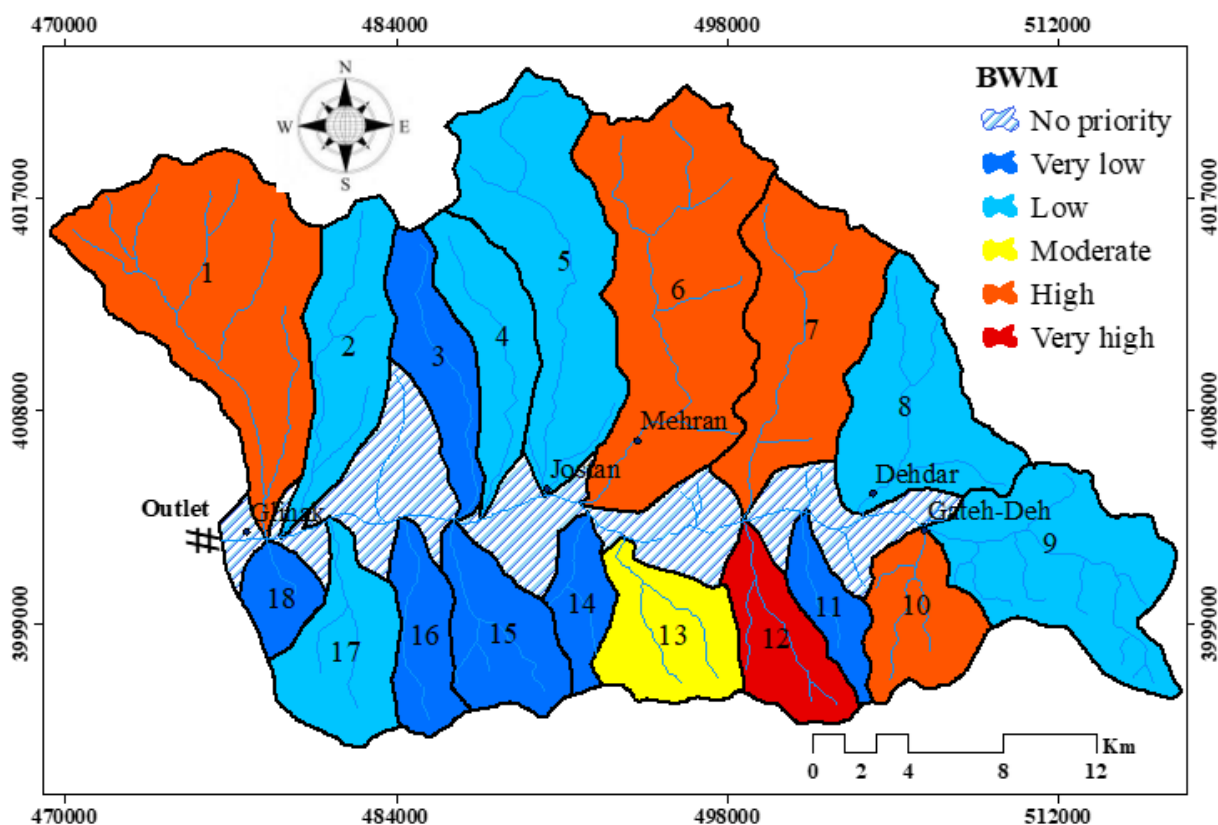


Fig. 2- Spatial distribution of sediment generation in the sub-watersheds based on BWM, Taleqan Watershed, Alborz Province, Iran

شکل ۲- پهنه‌بندی مکانی تولید رسوب در زیرآب‌خیزها براساس BWM، آبخیز طالقان، استان البرز

Table 5- Observed daily sediment values at 18 river gauge stations, Taleqan Watershed, Alborz Province, Iran

جدول ۵- مقادیر مشاهداتی رسوب روزانه در ۱۸ ایستگاه آب‌سنجی، آبخیز طالقان، استان البرز

Sub-watershed	Station	Sediment (Ton Day ⁻¹)
1	Hasanjoon	37.57
2	Shahrak	27.56
3	Karkabood	4.86
4	Khoien	47.41
5	Jovestan	103.73
6	Mehran	124.36
7	Narian	14.18
8	Dehdat	17.02
9	Garab	21.68
10	Gatedeh	8.13
11	Sikan	1.74
12	Mashino	4.46
13	Khajireh	7.45
14	Nesa	0.46
15	Orazan	29.32
16	Khodkavand	52.21
17	Jazan	32.68
18	Minavand	3.13

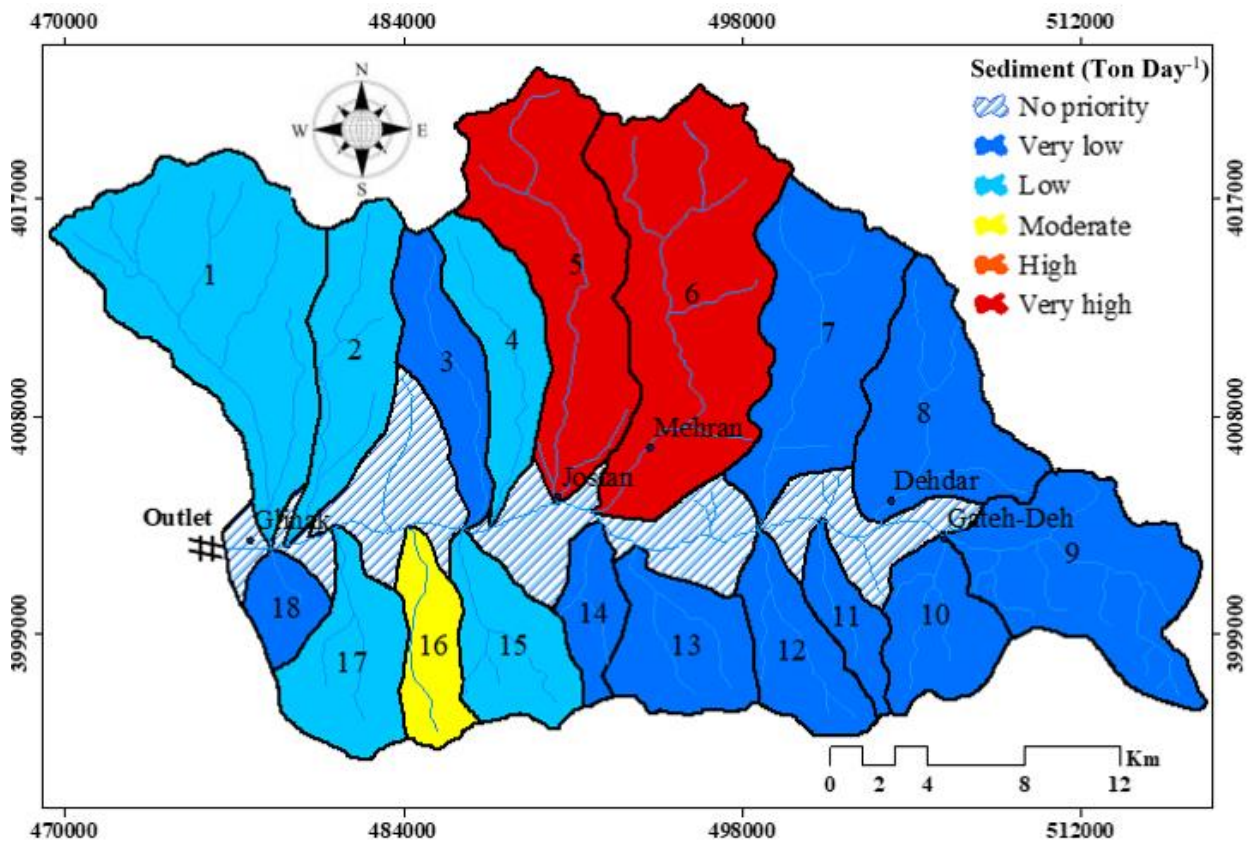


Fig. 3- Mapping of sediment generation based on observed sediment data, Taleqan Watershed, Alborz Province, Iran

شکل ۳- پهنه‌بندی تولید رسوب براساس داده‌های مشاهداتی رسوب، آبخیز طالقان، استان البرز

Table 6- Results of the independent t-test between the MCDM approach and observed sediment data, Taleqan Watershed, Alborz Province, Iran

جدول ۶- نتایج آزمون t مستقل بین رویکرد MCDM و داده مشاهداتی رسوب، آبخیز طالقان، استان البرز

MCDM approach	Daily sediment	
	F Statistic	Sig.
BWM	0.252	0.619

نکات جالبی را نمایان می‌سازد. در حالی که داده‌های مشاهداتی نشان می‌دهد که تعداد زیرآبخیزها در طبقه پایین و خیلی پایین قرار دارند، اما در رویکرد MCDM، وضعیت متفاوتی مشاهده می‌شود. این اختلاف ممکن است ناشی از عامل‌های مختلفی باشد که در رویکرد MCDM مدنظر قرار گرفته، اما در مشاهدات میدانی کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. با بررسی مقایسه‌ای نتایج اولویت‌بندی زیرآبخیزها، مشخص شد که رویکرد BWM با داده‌های مشاهداتی ۳۳/۳۳ درصد مشابهت دارد (Skardi et al., 2013; Wang et al., 2020). شایان ذکر است که نتایج آزمون t مستقل (جدول ۶) نیز نشان داد که رویکرد MCDM

مقادیر مشاهداتی رسوب روزانه جمع‌آوری شده در ۱۸ ایستگاه آبخیز (جدول ۵) مستقر در محل خروجی زیرآبخیزها نیز حاکی از آن است که زیرآبخیز ۶ به‌عنوان یکی از مناطق با تولید رسوب بالا، در وضعیت نامناسبی از نظر مدیریت رسوب قرار دارد. این زیرآبخیز به‌دلیل عوامل متعددی نظیر شرایط اقلیمی، نوع خاک و پوشش گیاهی، به‌عنوان یک نقطه بحرانی در تولید رسوب شناسایی شده است. هم‌چنین، زیرآبخیز ۵ نیز پس از زیرآبخیز ۶ در رده بالای تولید رسوب قرار دارد که می‌تواند به چالش‌های مشابهی در زمینه رسوب‌زایی و مدیریت منابع آب منجر شود. مقایسه این نتایج با رویکرد MCDM

جدول ۷ نشان داد که توانایی رویکرد BWM در اولویت‌بندی زیرآبخیزها از نظر توان‌مندی رسوب در طبقه‌های پایین بسیار بهتر از طبقه‌های بالا بود. براساس نتایج، در بین طبقه‌های پایین و خیلی پایین، در حدود ۵۰ درصد طبقه‌بندی زیرآبخیزها با استفاده از رویکرد BWM با مقادیر مشاهداتی رسوب روزانه مشابه بوده است.

در مدل‌سازی تولید رسوب، تفاوت معناداری با داده‌های مشاهداتی ندارد ولی نافی اختلاف در اولویت‌بندی زیرآبخیزها و برای مثال زیرآبخیز شماره ۵ نیست. علاوه بر این، رویکرد BWM، تأثیرپذیری بالایی از معیارهایی مانند زمان تمرکز و نسبت انشعاب‌پذیری به ترتیب با مقادیر همبستگی ۰/۷۰ و ۰/۸۱ داشت (شکل ۴). بررسی اجمالی

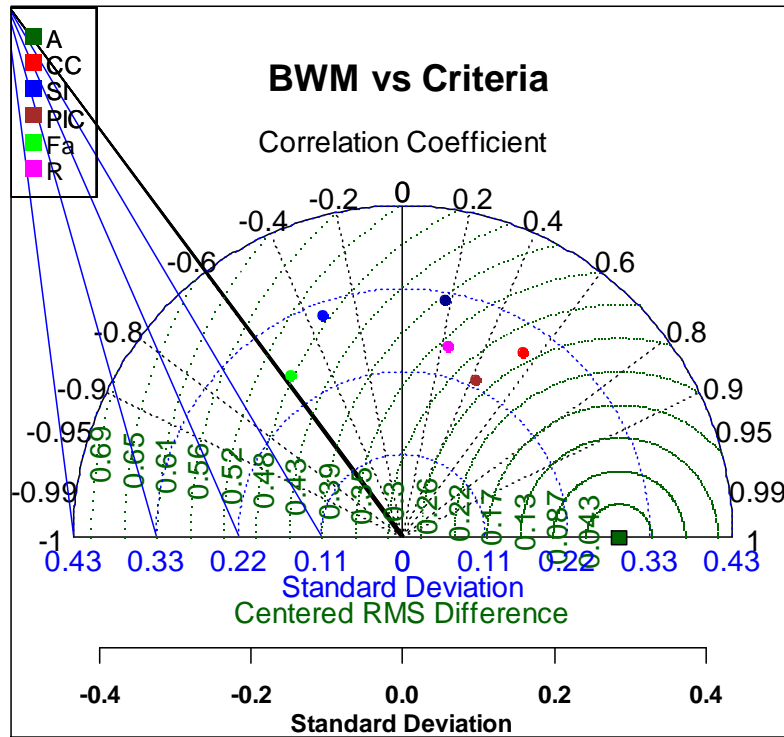


Fig. 4- Comparative Taylor diagram for selected sediment generation criteria, Taleqan Watershed, Alborz Province, Iran

شکل ۴- نمودار مقایسه‌ای Taylor برای معیارهای منتخب تولید رسوب، آبخیز طالقان، استان البرز

MCDM و تغییرپذیری رفتار سامانه آبخیز ناشی از دخالت‌ها و یا فعالیت‌های انسانی و مؤثر بر تولید رسوب اشاره نمود. پیش‌نهاد می‌شود که در مطالعات آتی، تأثیر تغییرات اقلیمی بر توان‌مندی تولید رسوب در زیرآبخیزهای مختلف مورد بررسی قرار گیرد. همچنین، توسعه و بهینه‌سازی مدل‌های پیش‌بینی با استفاده از یادگیری ماشین و هوش مصنوعی، مشارکت گروه‌داران محلی در ارزیابی توان تولید رسوب و انجام پژوهش‌های مشابه در دیگر آبخیزها پیش‌نهاد می‌شود.

یافته‌های پژوهش حاضر، ضرورت کاربست رویکردهای مختلف MCDM و توجه به اهمیت داده‌های مشاهداتی در تحلیل‌های مربوط به رسوب و آب‌شناسی را برجسته می‌سازد. بنابراین، اتخاذ یک رویکرد جامع و ترکیبی می‌تواند به بهبود مدیریت رسوب و منابع آب در این زیرآبخیزها کمک کند. از منابع خطا و عدم قطعیت‌ها در پژوهش حاضر می‌توان به نوسانات در اندازه‌گیری دبی و رسوب و مؤثر بر صحت مدل، دوره نسبتاً کوتاه پایش داده‌های رسوب، پویایی سامانه آبخیز و طبعاً تغییرات فصلی و سالانه در میزان، الگو و نوع بارش و سایر عوامل محیطی، تنوع‌پذیری انتخاب وزن‌دهی معیارها در رویکردهای

Table 7- Comparison of sub-watershed prioritization based on sediment generation using MCDM and observed sediment data, Taleqan Watershed, Alborz Province, Iran

جدول ۷- مقایسه اولویت‌بندی زیرآب‌خیزها براساس تولید رسوب با رویکرد MCDM و داده‌های مشاهداتی رسوب، آب‌خیز طالقان، استان البرز

Sub-watershed	Sediment generation prioritization	
	BWM	Daily sediment
1	High	Low
2	Low	Low
3	Very low	Very low
4	Low	Low
5	Low	Very high
6	High	Very high
7	High	Very low
8	Low	Very low
9	Low	Very low
10	High	Very low
11	Very low	Very low
12	Very high	Very low
13	Moderate	Very low
14	Very low	Very low
15	Very low	Low
16	Very low	Moderate
17	Low	Low
18	Very low	Very low

توضیح: سلول‌های سبز نشان‌دهنده اولویت‌های یکسان در هر رویکرد و در هر ردیف است.

Note: The green cells indicate equal priorities in each approach and in each row.

۵- تقدیر و تشکر

این اثر تحت حمایت مادی بنیاد ملی علم ایران (INSF) برگرفته شده از طرح شماره ۴۰۲۷۰۵۱ انجام شده است. همچنین، نویسندگان مقاله از سازمان هواشناسی کشور و شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان البرز برای آماده‌سازی داده‌های هیدرواقليمی کمال تشکر و قدردانی را دارد.

پی‌نوشت‌ها

- 1- Multi-Criteria Decision-Making (MCDM)
- 2- The Analytic Hierarchy Process (AHP)
- 3- The Analytic Network Process (ANP)
- 4- Simple Additive Weighting (SAW)
- 5- VIKOR (Viekriterijumsko KOMPromisno Rangiranje)
- 6- Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS)
- 7- Best-Worst Method
- 8- Topographic Wetness Index (TWI)
- 9- Principal Components Analysis (PCA)

- Abdrabo KI, Kantoush SA, Esmail A, Saber M, Sumi T, Almamari M, Elboshy B, and Ghoniem S (2023) An integrated indicator-based approach for constructing an urban flood vulnerability index as an urban decision-making tool using the PCA and AHP techniques: A case study of Alexandria, Egypt. *Urban Climate*. Elsevier 48:101426
- Adhami M and Sadeghi SH (2016) Sub-watershed prioritization based on sediment yield using game theory. *Journal of hydrology* 541:977–987
- Adhami M, Sadeghi SH, Duttman R, and Sheikhmohammady M (2019) Changes in watershed hydrological behavior due to land use comanagement scenarios. *Journal of Hydrology* 577:124001
- Avand M, Khiavi AN, Mohammadi M, and Tiefenbacher JP (2023) Prioritizing sub-watersheds based on soil-erosion potential by integrating RUSLE and game-theory algorithms. *Advances in Space Research* 72(2):471–487
- Avand M, Moradi H, and others (2022) Predicting temporal and spatial variability in flood vulnerability and risk of rural communities at the watershed scale. *Journal of Environmental Management* 323:116261
- Birkel C and Soulsby C (2015) Advancing tracer-aided rainfall--runoff modelling: A review of progress, problems and unrealised potential. *Hydrological Processes* 29(25):5227–5240
- Bro R and Smilde AK (2014) Principal component analysis. *Analytical Methods*, Royal Society of Chemistry 6(9):2812–2831
- Bucherie A, Hultquist C, Adamo S, Neely C, Ayala F, Bazo J, and Kruczkiewicz A (2022) A comparison of social vulnerability indices specific to flooding in Ecuador: principal component analysis (PCA) and expert knowledge. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, Elsevier Ltd 73(October 2021):102897
- Carpenter SR, DeFries R, Dietz T, Mooney HA, Polasky S, Reid W V, and Scholes RJ (2006) Millennium ecosystem assessment: Research needs. *Science, American Association for the Advancement of Science*, 257–258
- Chakraborty A, Biswas S, and Bandopadhyay P (2020) Sustainable management of watershed areas. *Biotica Research Today* 2(2):27–29
- de Almeida KN, dos Reis JAT, Buarque DC, Mendonça ASF, Rodrigues MB, and de Laia Nascimento Sá G (2020) Performance analysis of TRMM satellite in precipitation estimation for the Itapemirim River basin, Espirito Santo state, Brazil. *Theoretical and Applied Climatology* 141(3):791–802
- Dofee AA, Chand P, and Kumar R (2024) Prioritization of soil erosion-prone sub-watersheds using geomorphometric and statistical-based weighted sum priority approach in the middle Omo-Gibe River basin, Southern Ethiopia. *International Journal of Digital Earth* 17(1):2350198
- Ebrahimi H, Aghighi H, Azadbakht M, Amani M, Mahdavi S, and Matkan AA (2021) Downscaling MODIS land surface temperature product using an adaptive random forest regression method and Google Earth Engine for a 19-years spatiotemporal trend analysis over Iran. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. IEEE 14:2103–2112
- Erenstein OCA (1999) The economics of soil conservation in developing countries: The case of crop residue mulching. Wageningen University and Research
- Esangbedo MO and Bai S (2019) Grey regulatory focus theory weighting method for the multi-criteria decision-making problem in evaluating university reputation. *Symmetry* 11(2)
- Foody GM, Ghoneim EM, and Arnell NW (2004) Predicting locations sensitive to flash flooding in an arid environment. *Journal of Hydrology* 292(1–4):48–58
- Hastings BK, Breshears DD, and Smith FM (2005) Spatial variability in rainfall erosivity versus rainfall depth: implications for sediment yield. *Vadose Zone Journal* 4(3):500–504
- Ijaz MA, Ashraf M, Hamid S, Niaz Y, Waqas MM, Tariq MAUR, Saifullah M, Bhatti MT, Tahir AA, Ikram K, and others (2022) Prediction of sediment yield in a data-scarce river catchment at the sub-basin scale using gridded precipitation datasets. *Water*, MDPI 14(9):1480
- Kamaraj P, Thangapandian ID, Karuppanan S, and Garo T (2024) A statistical-based geospatial approach to prioritize the watersheds for soil erosion conservation in the Upper Awash Basin (Upstream Koka), Ethiopia. *Kuwait Journal of Science* 51(2):100198
- Kandil WM, Zarzoura FH, Goma MS, and El-Mewafi Shetiwi ME-M (2024) Rapid enhanced-DEM using Google Earth Engine, machine learning, weighted and spatial interpolation techniques. *World Journal of Engineering*, Emerald Publishing Limited

- Kateb F, Emali-Ouri A, Mostafazadeh R, Sharari M, and Hazbavi Z (2021) Determining the attitude of government and local stakeholders in participatory decision-making for watershed management practices in Unar Chay Watershed, Meshgin Shahr, Iran. *Journal of Watershed Management Research* 12(24):1–12 (In Persian)
- Khiavi AN, Vafakhah M, and Sadeghi SH (2022) Comparative prioritization of sub-watersheds based on Flood Generation potential using physical, hydrological and co-managerial approaches. *Water Resources Management* 36(6):1897–1917
- Kibret KS, Marohn C, and Cadisch G (2020) Use of MODIS EVI to map crop phenology, identify cropping systems, detect land use change and drought risk in Ethiopia-an application of Google Earth Engine. *European Journal of Remote Sensing* 53(1):176–191
- Kumar T and Saizen I (2023) Hydrosocial territories in transition: Implications of traditional agricultural and irrigation water management practices under the effects of social, institutional, and environmental changes in Ladakh, India. *Environmental Development* 47:100880
- Lal R (2001) Soil degradation by erosion. *Land Degradation & Development* 12(6):519–539
- Martins B and Nunes A (2020) Exploring flash flood risk perception using PCA analysis: The case of Mindelo, S. Vicente (Cape Verde). *The Geographical Journal* 186(4):375–389
- Mattivi P, Franci F, Lambertini A, and Bitelli G (2019) TWI computation: A comparison of different open source GISs. *Open Geospatial Data, Software and Standards* 4(1):1–12
- Mishra A, Mukherjee S, Merz B, Singh VP, Wright DB, Villarini G, Paul S, Kumar DN, Khedun CP, Niyogi D and others (2022) An overview of flood concepts, challenges, and future directions. *Journal of hydrologic engineering* 27(6):3122001
- Mokarram M and Zarei AR (2021) Determining prone areas to gully erosion and the impact of land use change on it by using multiple-criteria decision-making algorithm in arid and semi-arid regions. *Geoderma* 403:115379
- Nasiri Khiavi A, Sadeghi SH, and Vafakhah M (2024a) Comparative prioritization of sub-watersheds in flood generation using co-management best-worst method and game theory algorithm. *Water Resources Management* 1–23
- Nasiri Khiavi A, Tavooosi M, Kamari Yekdangi F, Sadikhani M, and Kuriqi A (2024b) Conjunct applicability of MCDM-based machine learning algorithms in mapping the sediment formation potential. *Environment, Development and Sustainability* 1–31
- Nasiri Khiavi A, Vafakhah M, and Sadeghi SH (2021) The impressibility of flood regime from rainfall and land use changes in Cheshmeh Kileh Watershed. *Iranian Journal of Ecohydrology, Faculty of New Sciences and Technologies, University of Tehran* 8(1):221–234 (In Persian)
- Noor H, Vafakhah M, Taheriyoun M, and Moghadasi M (2014) Hydrology modelling in Taleghan mountainous watershed using SWAT. *Journal of Water and Land Development, Polish Academy of Sciences Committee on Agronomic Sciences Section of Land~...*
- Pimentel D, Harvey C, Resosudarmo P, Sinclair K, Kurz D, McNair M, Crist S, Shpritz L, Fitton L, Saffouri R and others (1995) Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits. *American Association for the Advancement of Science* 267(5201):1117–1123
- Qi W, Ma C, Xu H, Zhao K, and Chen Z (2022) A comprehensive analysis method of spatial prioritization for urban flood management based on source tracking. *Ecological Indicators, Elsevier Ltd* 135:108565
- Rahimi F, Najafinejad A, Sheikh V, and Zare Garizi A (2020) Descriptive analysis of public perception about land use modification (Case Study: Chehelchai Watershed, Golestan Province). *Journal of Water and Soil Conservation* 27(2):209–221 (In Persian)
- Razavizadeh S (2017) Combination of AHP and TOPSIS methods to prioritize of flooding in Taleghan sub watersheds. *Natural Ecosystems of Iran*
- Rezaei J (2016) Best-worst multi-criteria decision-making method: Some properties and a linear model. *Omega. Elsevier* 64:126–130
- Setyawan C, Lee C-Y, and Prawitasari M (2019) Investigating spatial contribution of land use types and land slope classes on soil erosion distribution under tropical environment. *Natural Hazards* 98:697–718
- Skardi MJE, Afshar A and Solis SS (2013) Simulation-optimization model for non-point source pollution management in watersheds: Application of cooperative game theory. *KSCE Journal of Civil Engineering* 17(6):1232–1240
- Tamene L and Vlek PLG (2007) Assessing the potential of changing land use for reducing soil erosion and

- sediment yield of catchments: A case study in the highlands of northern Ethiopia. *Soil Use and Management* 23(1):82–91
- Wang J, Stern MA, King VM, Alpers CN, Quinn NWT, Flint AL, and Flint LE (2020) PFHydro: A new watershed-scale model for post-fire runoff simulation. *Environmental Modelling & Software* 123:104555
- Worku H (2017) Integrating climate change adaptation strategies in urban planning and landscape design of Addis Ababa City, Ethiopia: Using urban planning and landscape design to mitigate flooding, drought, and urban heat island effects. *Environmental Quality Management* 27(1):5–21
- Yuan Y, Jiang Y, Taguas E V, Mbonimpa EG, and Hu W (2015) Sediment loss and its cause in Puerto Rico watersheds. *Soil, Copernicus GmbH Göttingen, Germany* 1(2):595–602
- Zhao Z, Islam F, Waseem LA, Tariq A, Nawaz M, Islam IU, Bibi T, Rehman NU, Ahmad W, Aslam RW, and others (2024) Comparison of three machine learning algorithms using google earth engine for land use land cover classification. *Rangeland Ecology & Management* 92:129–137