

Research Paper



Prioritization of Anjird sub-basins using Principal Component Analysis based on morphometric parameters



Ali Akbari Babil¹ , Mahdi Erfanian^{2*} , Hadi Beygi Heidarlou³

1. PhD Student, Dept. of Range and Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Urmia University, Iran. aliakbarib1358@gmail.com
 2. Associate Professor, Dept. of Range and Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Urmia University, Iran, erfanian.ma@gmail.com
 3. Assistant Professor, Dept. of Forestry, Faculty of Natural Resources, Urmia University, Urmia, Iran. h.beygi@urmia.ac.ir

Keywords

**Drainage density,
Circularity ratio,
Bifurcation ratio,
Prioritization,
Anjird, PCA, Iran.**

ABSTRACT

Introduction

Population growth and climate change are significant challenges of the 21st century, placing substantial pressure on water and soil resources (Misra, 2014). Excessive and improper use of these resources leads to destructive floods, increased soil erosion, and sedimentation. This issue fundamentally challenges sustainable watershed development (Meshram and Sharma, 2017). Effective watershed management practices are essential for mitigating natural hazards like floods and erosion and often require prioritizing sub-basins. Morphometric analysis is widely used to examine hydrological characteristics and conduct research on water resources and soil conservation (Malik et al., 2019). Effective watershed management, which aims to meet current and future needs, necessitates optimal management of water and soil resources (Aouragh and Essahlaoui, 2018). One of the most efficient methods for prioritizing sub-basins is to use morphometric parameters, especially in areas with limited hydro-climatic data, including precipitation, discharge, and sediment (Meshram and Sharma, 2017). Simultaneous analysis of morphometric parameters' effects on flooding and erosion for sub-basins prioritization has received limited attention (Aouragh and Essahlaoui, 2018). Typically, previous studies have focused on prioritization from either the perspective of flooding or erosion and sedimentation. In this study, Principal Component Analysis (PCA) was used to prioritize the sub-basins of the Anjird based on morphometric parameters, offering a promising approach for future watershed management.

Methodology

The Anjird basin located in East Azerbaijan Province near Ahar, drains into the Aharchay River and is situated upstream of the Emarat Dam. This study employed morphometric parameters to prioritize its 11 sub-basins. A review of numerous research articles identified 15 morphometric parameters as significant factors in flooding and erosion.

Received: 2025/01/14

Accepted: 2025/06/07

Published: 2025/10/20

*Correspondin Author: Mahdi Erfanian E-mail: m.erfanian@urmia.ac.ir

How to cite this article: Akbari Babil, Ali., Erfanian, Mahdi., & Beygi Heidarlu, Hadi. (2025). Prioritization of Anjird sub-basins using Principal Component Analysis based on morphometric parameters .Hydrogeomorphology, 12(44): 18-35.

DOI: [10.22034/HYD.2025.65404.1773](https://doi.org/10.22034/HYD.2025.65404.1773)



Copyright: © by the authors

Publisher: University of Tabriz

These parameters include drainage density, average bifurcation ratio, stream frequency, drainage texture ratio, surface flow length, circularity ratio, form factor, elongation ratio, compactness coefficient, infiltration number, constant of channel maintenance, mean slope, ruggedness number, relief ratio, and hypsometric integral. To accomplish this, eight topographic maps from the Mapping Organization, on a scale of 1:25,000, were used to digitize contour lines and elevation points, thereby preparing the Digital Elevation Model (DEM) and the drainage network for morphometric analysis. The parameters for the 11 sub-basins were sorted in descending order. For parameters with a direct relationship to flood potential and erosion, the highest and lowest values were assigned ranks 1 and 11, respectively (Meshram and Sharma, 2017), (Arefin et al., 2020). Conversely, for parameters such as bifurcation ratio, compactness coefficient, surface flow length, and constant of channel maintenance, which have inverse relationships with flooding and erosion (Rezaei Moghaddam et al., 2020), the lowest and highest values were assigned ranks 1 and 11, respectively. The average rank of the 15 morphometric parameters was then calculated for each sub-basin, with the sub-basin having the lowest average rank identified as the most critical (priority 1). Principal Component Analysis (PCA), a multivariate statistical technique for dimensionality reduction, prioritized the sub-basins based on key morphometric parameters (Siddiqui et al., 2020). SPSS 26 software facilitated the PCA, while R software generated the correlation matrix. The prioritization results from six PCA-based parameters must align with those based on 15 parameters. Therefore, reducing data dimensionality is crucial for prioritizing sub-basins, as it significantly lowers costs and saves time.

Results and Discussion

In this study, 15 morphometric parameters were extracted for the 11 sub-basins of the Anjird. Among these parameters, four—bifurcation ratio, compactness coefficient, surface flow length, and channel constant of channel maintenance—have an inverse relationship with flood risk and sediment production. In contrast, the remaining 11 parameters exhibit a direct relationship. In this basin, the highest drainage density (8.5) is observed in sub-basin A2-3, while the lowest (2.4) is found in sub-basin A1-5. The circularity ratio reaches its maximum value (0.65) in sub-basin A1-4 and its minimum value (0.35) in sub-basin A2-2. The highest surface flow length (0.21) is recorded in sub-basin A5-1, with the lowest value (0.06) observed in sub-basins A2-3, A1-3, and A1-4. Sub-basin A1-4 had the lowest average rank, thus being identified as priority 1. In contrast, sub-basin A5 had the highest average rank, placing it as the last priority. In the PCA analysis, the first three components accounted for approximately 89% of the total variance. Two parameters with the highest correlation coefficient were chosen from each component after rotation using the Varimax method to select key parameters. The key parameters selected through PCA from the initial 15 morphometric parameters were drainage density, circularity ratio, bifurcation ratio, stream frequency, compactness coefficient, and hypsometric integral. Similarly, in the prioritization based on these six key parameters, sub-basin A1-4 remained as priority 1, and sub-basin A5 continued to have the highest average rank, reaffirming the utility of the PCA method in data dimensionality reduction. Ultimately, priority based on both the 15 parameters and the six key parameters were produced for the entire basin.

Conclusions

The Anjird basin, located in East Azerbaijan Province and upstream of the Emarat Dam, has been evaluated for prioritization concerning flood and erosion risks. Sub-basin A1-4 is the highest priority, while sub-basins A1-1, A1-2, and A1-3 are considered secondary priorities. The results indicate that sub-basin A5 is in better condition than the others. The prioritization results based on the six key parameters selected using the PCA approach were similar to those based on all 15 morphometric parameters. The PCA method facilitates sub-basin prioritization by reducing the number of parameters, thereby saving time and costs. This study's findings align with other research, highlighting drainage density, circularity ratio, and bifurcation ratio as significant parameters in the prioritization process. Identifying critical sub-basins and optimizing their management can lead to effective watershed management practices. This approach helps reduce sediment inflow to the Emarat Dam reservoir and minimizes flood damage in the downstream villages of the watershed.

مقاله پژوهشی



اولویت‌بندی زیرحوضه‌های انجرد با روش تحلیل مولفه‌های اصلی بر اساس پارامترهای مورفومتری



علی اکبری باویل^۱، مهدی عرفانیان^{۲*}، هادی بیگی حیدرلو^۳

۱- دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه ارومیه ایران. aliakbarib1358@gmail.com

۲- دانشیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه ارومیه، ایران. erfanian.ma@gmail.com

۳- استادیار گروه جنگل‌داری، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه ارومیه، ایران. h.beygi@urmia.ac.ir

چکیده

مدیریت حوضه‌ها به‌منظور کاهش مخاطرات طبیعی از جمله فرسایش، رسوب‌گذاری و سیلاب، از اهمیت بالایی برخوردار است و مستلزم ارزیابی و اولویت‌بندی زیرحوضه‌ها می‌باشد. در این پژوهش، زیرحوضه‌های انجرد واقع در استان آذربایجان شرقی با بهره‌گیری از تحلیل پارامترهای مورفومتری، از منظر نیاز به اقدامات حفاظت خاک و آب اولویت‌بندی شده‌اند. به‌دلیل عدم دسترسی به مدل رقومی ارتفاع (DEM) با دقت مناسب، از نقشه‌های توپوگرافی با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ جهت تولید مدل ارتفاعی و تحلیل مورفومتری استفاده شد. در این راستا، ۱۵ پارامتر مورفومتری مؤثر در فرآیندهای هیدروژنومورفولوژیکی شامل تراکم زهکشی، نسبت انشعاب، فراوانی آبراهه‌ها، نسبت بافت زهکشی، طول جریان سطحی، ضریب گردی، ضریب فرم، نسبت کشیدگی، ضریب فشردگی، عدد نفوذ، ثابت نگهداری، شیب متوسط، عدد ناهمواری، نسبت ناهمواری و انتگرال هیپسومتریک استخراج گردید. سپس زیرحوضه‌ها بر اساس مقادیر هر پارامتر از رتبه ۱ تا ۱۱ طبقه‌بندی و با محاسبه میانگین رتبه‌ها، اولویت‌بندی نهایی انجام شد. برای کاهش تعداد متغیرها و شناسایی شاخص‌ترین پارامترها، از تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) بهره گرفته شد. نتایج PCA نشان داد که ۶ پارامتر شامل تراکم زهکشی، ضریب گردی، نسبت انشعاب، فراوانی آبراهه‌ها، ضریب فشردگی و انتگرال هیپسومتریک دارای بیشترین اهمیت هستند. مقایسه نتایج اولویت‌بندی بر اساس تمامی پارامترها با نتایج حاصل از پارامترهای منتخب PCA، تطابق قابل قبولی را نشان داد که مؤید کارایی این روش آماری در ساده‌سازی فرآیند اولویت‌بندی است. بر این اساس، زیرحوضه A1-4 با پایین‌ترین میانگین رتبه، بالاترین اولویت مدیریتی و زیرحوضه A5 کمترین اولویت را به خود اختصاص دادند. نتایج این پژوهش می‌تواند در تدوین راهبردهای مدیریتی به‌منظور کاهش ورود رسوبات به مخزن سد عمارت و کاهش آثار مخرب سیلاب مؤثر واقع شود.

کلیدواژه‌ها

تراکم زهکشی، نسبت گردی،
نسبت انشعاب، اولویت‌بندی،
PCA، انجرد، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۱۷

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۷/۲۸

*نویسنده مسئول: مهدی عرفانیان

رایانامه: m.erfanian@urmia.ac.ir

ارجاع به این مقاله: اکبری باویل، علی؛ عرفانیان، مهدی؛ بیگی حیدرلو، هادی (۱۴۰۴). اولویت‌بندی زیرحوضه‌های انجرد با روش تحلیل

مولفه‌های اصلی بر اساس پارامترهای مورفومتری. هیدروژنومورفولوژی، ۱۲ (۴۴): ۳۵-۱۸.

شناسه دیجیتالی: 10.22034/HYD.2025.65404.1773



Copyright: ©2025 by the authors

Publisher: University of Tabriz

افزایش جمعیت و تغییرات اقلیمی از جمله مهم‌ترین چالش‌های قرن بیست و یکم به‌شمار می‌آیند که فشار چشمگیری بر منابع طبیعی به‌ویژه منابع آب و خاک وارد کرده‌اند (میسرا^۱، ۲۰۱۴: ۱۵۴). منابع آب و زمین، در هر منطقه‌ای از جهان، محدود و تجدیدنپذیر هستند و استفاده بی‌رویه از آن‌ها می‌تواند به چالشی اساسی در مسیر دستیابی به توسعه پایدار تبدیل شود (مشرام و شرما^۲، ۲۰۱۷: ۱۵۰۵). از این‌رو، مدیریت بهینه و برنامه‌ریزی‌شده این منابع، برای تأمین نیازهای نسل حاضر و آینده، امری اجتناب‌ناپذیر تلقی می‌شود و مستلزم ارزیابی جامع و دقیق حوضه‌ها است.

در این راستا، یکی از روش‌های ساده، کاربردی و مقرون‌به‌صرفه، تحلیل و اولویت‌بندی زیرحوضه‌ها بر اساس پارامترهای مورفومتری است (آئورق و اساح لائویی^۳، ۲۰۱۸: ۱۲). پارامترهای مورفومتری، به‌عنوان شاخص‌هایی کمی، ارتباط میان فرآیندهای هیدرولوژیکی نظیر رواناب و فرسایش را با ویژگی‌های زمین‌شناسی، خاک‌شناسی، ژئومورفولوژی و توپوگرافی حوضه‌ها آشکار می‌سازند (عامری و همکاران^۴، ۲۰۱۸: ۱۳۹۰). با توجه به این‌که اجرای اقدامات آبخیزداری با هدف حفاظت هم‌زمان از آب و خاک در کل سطح یک حوضه غالباً امکان‌پذیر نیست، شناسایی و اولویت‌بندی زیرحوضه‌ها، ضرورت ویژه‌ای می‌یابد. تحلیل پارامترهای مورفومتری می‌تواند اطلاعات ارزشمندی درباره ویژگی‌های هیدرولوژیکی حوضه‌ها در اختیار قرار دهد (سینگ و همکاران^۵، ۲۰۱۴: ۱۱۲) و حتی در مواردی که نقشه‌های خاک، زمین‌شناسی یا ژئومورفولوژی در دسترس نیستند، همچنان ابزار قابل اعتمادی برای اولویت‌بندی محسوب می‌شود (بیسواس و همکاران^۶، ۱۹۹۹: ۱۵۵).

در سال‌های اخیر، به‌ویژه در شرایط بحران منابع آبی، تحلیل مورفومتری به‌صورت گسترده در مطالعات حفاظت و مدیریت منابع آب مورد استفاده قرار گرفته است (ملیک و همکاران^۷، ۲۰۱۹: ۱). با این حال، تعدد پارامترهای مورفومتری، تنوع عملکرد آن‌ها و همچنین همبستگی درونی میان بسیاری از این متغیرها، چالش‌هایی را در فرآیند تحلیل و اولویت‌بندی ایجاد می‌کند. در چنین شرایطی، استفاده از تکنیک‌های آماری پیشرفته مانند تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA)^۸، راهکاری مؤثر برای کاهش ابعاد داده‌ها، حذف هم‌خطی بین متغیرها و تمرکز بر مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار محسوب می‌شود (سالم و حسین^۹، ۲۰۱۹: ۲۹۲؛ خریف و لاتپوا^{۱۰}، ۲۰۲۰: ۲۰۹).

پژوهش‌های متعددی با استفاده از پارامترهای مورفومتری و روش PCA در راستای اولویت‌بندی زیرحوضه‌ها انجام شده‌اند. برای نمونه، مشرام و شرما (۲۰۱۷) با استفاده از ترکیب تحلیل مورفومتری و تکنیک PCA، زیرحوضه‌های رودخانه شاکار در هندوستان را اولویت‌بندی کردند. آن‌ها از پارامترهایی چون ناهمواری نسبی، عدد ناهمواری، نسبت انشعاب، تراکم زهکشی، ضریب گردی، نسبت کشیدگی، طول جریان سطحی، فاکتور شکل، فراوانی آبراهه، نسبت ناهمواری، شیب متوسط و انتگرال هیپسومتری بهره گرفتند و در نهایت، نسبت ناهمواری، فراوانی آبراهه‌ها و نسبت انشعاب را به‌عنوان مؤثرترین پارامترها در اولویت‌بندی معرفی کردند. همچنین، آرفاین و همکاران^{۱۱} (۲۰۲۰) با هدف تعیین اولویت‌های مدیریتی برای حفاظت از منابع آب و خاک در زیرحوضه‌های مرتفع شمال بنگلادش، از روش PCA استفاده کردند و در تحلیل خود پارامترهایی نظیر تراکم زهکشی، ضریب گردی، نسبت کشیدگی و نسبت انشعاب را به‌عنوان معیارهای کلیدی شناسایی کردند.

مطالعه گوارثانام‌بیکای و سائیانارایان (۲۰۲۴) نیز نمونه‌ای دیگر از کاربرد این روش‌ها است. آنان با استفاده از ۱۳ پارامتر مورفومتری، اقدام به اولویت‌بندی ۱۷ زیرحوضه رودخانه نویال در هند کردند و نسبت انشعاب، ضریب گردی و نسبت ناهمواری را به‌عنوان پارامترهای کلیدی در تعیین شدت فرسایش و تولید رسوب شناسایی نمودند. در مطالعه دیگری، شادود و همکاران (۲۰۲۵) برای بررسی خطر سیلاب در ۱۰ زیرحوضه رودخانه کبیر شمالی سوریه، ۱۶ پارامتر مورفومتری را استخراج کرده و با بهره‌گیری از روش امتیازدهی مرکب، زیرحوضه‌ها را در پنج سطح اولویت طبقه‌بندی کردند.^{۱۲}

¹ Misra² Meshram & Sherma³ Aouragh & Essahlaoui⁴ Ameri et al⁵ Singh et al⁶ Biswas et al⁷ Malik et al⁸ Principle Component Analysis⁹ Salem & Hosein¹⁰ Kherif & Latypova¹¹ Arefine et al

در ایران نیز پژوهش‌های مختلفی در زمینه اولویت‌بندی حوضه‌های صورت گرفته است. برای نمونه، بابایی و همکاران (۲۰۱۷) با هدف مکان‌یابی چاه‌های تغذیه مصنوعی در دشت ارومیه و شناسایی معیارهای کلیدی مؤثر، از تحلیل مؤلفه‌های اصلی استفاده کردند. آنان نشان دادند که این روش، ضمن کاهش زمان و هزینه، امکان تصمیم‌گیری دقیق‌تر در پروژه‌های مدیریت منابع آب و آبخیزداری را فراهم می‌کند. همچنین، رضایی‌مقدم و همکاران (۲۰۲۰) با بهره‌گیری از روش SWARA، زیرحوضه‌های اندچای در شمال‌غرب ایران را از منظر سیل‌خیزی تحلیل کردند. نتایج آن‌ها حاکی از اهمیت بالای بافت زهکشی، نسبت بافت و تراکم زهکشی در تهیه نقشه‌های اولویت‌بندی خطر سیلاب بود. منبری و همکاران (۲۰۲۳) نیز در تعدادی از حوضه‌های استان کردستان، با استفاده از مدل‌های رگرسیون چندمتغیره، رابطه دبی سیلاب با پارامترهای مورفومتری را بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که پارامترهای طول حوضه، مساحت و طول جریان سطحی، بیش‌ترین همبستگی را با دبی سیلاب دارند و با افزایش دوره بازگشت، این همبستگی تقویت می‌شود.

در این چارچوب، هدف اصلی پژوهش حاضر، اولویت‌بندی زیرحوضه‌های انجرد واقع در استان آذربایجان شرقی، با استفاده از پارامترهای مورفومتری و تکنیک تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) است. این حوضه که در شهرستان اهر واقع شده و در بالادست سد عمارت قرار دارد، به رودخانه مرزی ارس زهکشی می‌شود. وقوع سیلاب‌های مکرر در گذشته و افزایش تولید رسوب و ورود آن به مخزن سد، لزوم اجرای اقدامات مدیریتی در قالب پروژه‌های بیولوژیک و سازه‌ای آبخیزداری را ضروری ساخته است. بنابراین، شناسایی زیرحوضه‌های بحرانی، نه تنها به تسریع در تصمیم‌گیری، بلکه به کاهش هزینه‌ها و صرفه جویی در زمان کمک خواهد کرد.

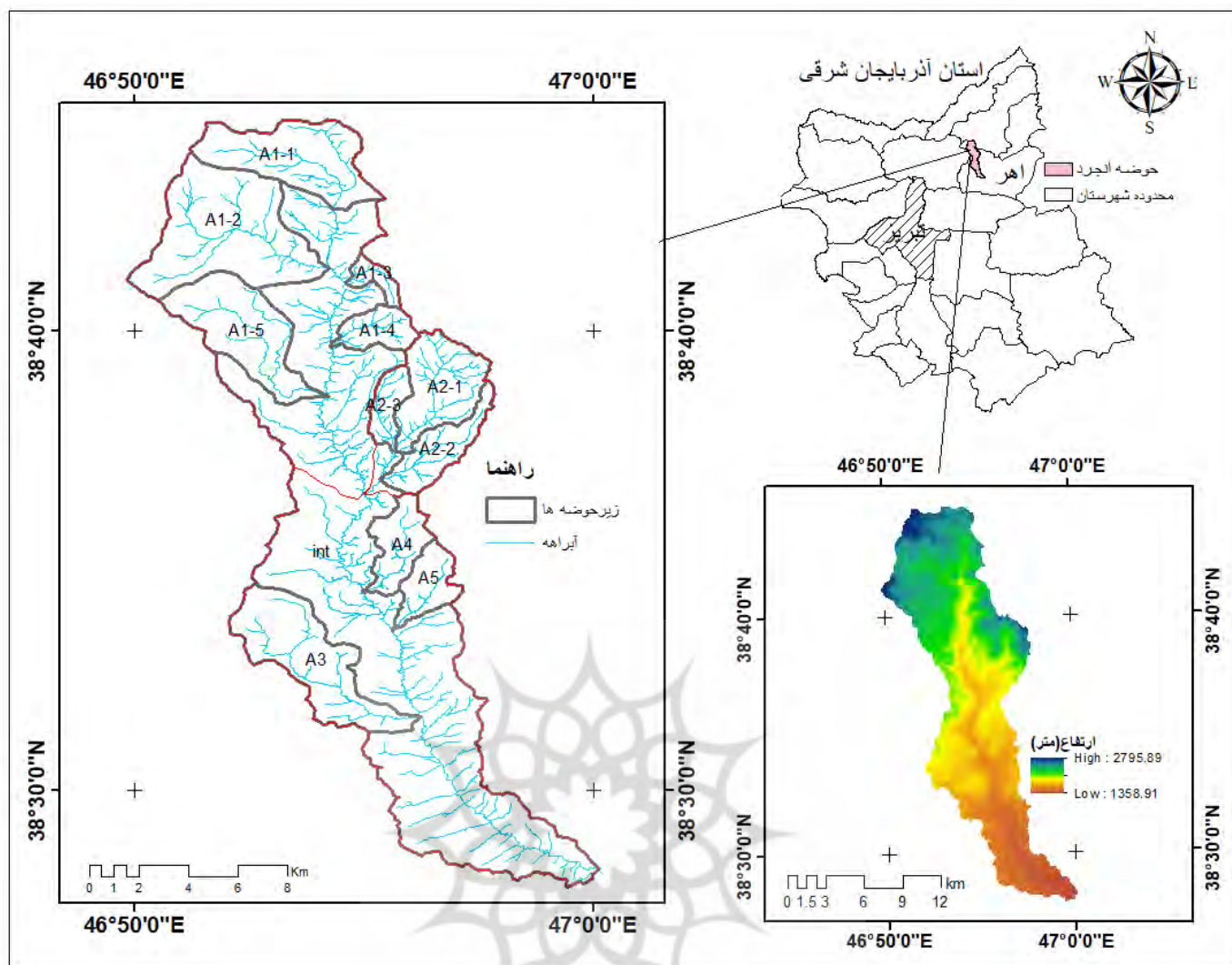
نوآوری این پژوهش شامل کاربرد تکنیک آماری تحلیل مؤلفه‌های اصلی به منظور کاهش تعداد پارامترهای مورفومتری مورد نیاز در اولویت‌بندی حوضه‌ها می‌باشد که در تحقیقات گذشته، مورد توجه نگرفته است. بعلاوه، روش امتیازدهی به پارامترهای مورفومتری و در نظر گرفتن تاثیر مثبت یا منفی هر یک از پارامترها در فرآیند تولید سیلاب و رسوب، برای اولین بار در ایران مطرح شده است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

از نظر موقعیت جغرافیایی، حوضه انجرد بین ۳۸ درجه و ۲۸ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۴۴ دقیقه عرض شمالی و بین ۴۶ درجه و ۴۹ دقیقه تا ۴۷ درجه طول شرقی واقع شده است و مساحت آن حدود ۱۸۱۲۷ هکتار است (شکل ۱). حوضه انجرد در استان آذربایجان شرقی و در مجاورت شهرستان اهر قرار گرفته است و به اهرچای زهکش می‌شود. این حوضه در بالادست سد عمارت واقع شده است و جزء حوضه ارس می‌باشد. این سد در مرز استان‌های آذربایجان شرقی و اردبیل واقع است و بزرگترین سد استان اردبیل می‌باشد. تاکنون در این حوضه، اقدامات آبخیزداری انجام نگرفته است اما طبق گزارشات موجود، در اولویت اجرای پروژه‌های سازه‌ای و بیولوژیکی اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان آذربایجان شرقی قرار دارد. از روستاهای مسکونی داخل حوضه می‌توان به روستاهای کاشان، رواسجان، اذغان، زنگ ملک، ابریق، زندآباد، ابللو، گلوجه ابللو، انجرد، سراجلو و یار آلوجه اشاره کرد.

در این تحقیق، کدگذاری زیرحوضه‌های انجرد، مطابق با گزارش‌های مطالعات تفصیلی اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان آذربایجان شرقی دو زیرحوضه A1 با کدهای A1-1، A1-2، A1-3، A1-4 و A1-5 و زیرحوضه A2 با کدهای A2-1، A2-2، A2-3 انجام شده است (شکل ۱).



شکل (۱): موقعیت جغرافیایی حوضه انجرد در استان آذربایجان شرقی
Figure (1): The geographical location of Anjerd watershed in the East Azerbaijan Province

توصیف پارامترهای مورفومتری

به دلیل در دسترس نبودن مدل رقومی ارتفاع DEM پایگاه ALOS PALSAR با قدرت تفکیک مکانی ۱۲/۵ متر در منطقه مورد مطالعه، به منظور استخراج پارامترهای مورفومتری و مرز زیر حوضه‌ها از نقشه‌های توپوگرافی رقومی ۱:۲۵۰۰۰ سازمان نقشه‌برداری شامل تعداد ۶ شیت (5366 1NE, 5367 2NE, 5367 2NW, 5367 2SE, 5367 2SW, 5466 4NW) در برگرفته حوضه انجرد استفاده شد. با ساخت لایه TIN از روی خطوط تراز و نقاط ارتفاعی، نقشه مدل رقومی ارتفاع یا DEM حوضه تهیه گردید (شکل ۱). پس از استخراج شبکه آبراهه‌ها در نرم افزار ArcMap 8.1 و ابزارهای الحاقیه Spatial Analyst و تصحیح آن‌ها از روی نقشه رقومی ۱:۲۵۰۰۰ موجود، در نهایت رتبه بندی آبراهه‌ها با سیستم استرالر^۱ انجام گرفت.

با مرور جامع مقالات و منابع، تعداد ۱۵ پارامتر مورفومتری به منظور اولویت‌بندی زیر حوضه‌ها از دیدگاه سیل‌خیزی و فرسایش انتخاب گردید که شامل (۱) تراکم زهکشی، (۲) میانگین نسبت انشعاب، (۳) فروانی آبراهه‌ها، (۴) نسبت بافت زهکشی، (۵) طول جریان سطحی، (۶) نسبت یا ضریب گردی، (۷) فاکتور فرم، (۸) نسبت یا ضریب کشیدگی، (۹) نسبت یا ضریب فشردگی، (۱۰) شماره نفوذ، (۱۱) ثابت نگه داشت، (۱۲) شیب متوسط حوضه، (۱۳) عدد ناهمواری، (۱۴) نسبت ناهمواری و (۱۵) انتگرال هیپسومتری می‌باشند.

¹ Strahler

روابط مورد استفاده برای محاسبه این پارامترها در جدول ۱ ارائه شده است. لازم به ذکر است مساحت، محیط و طول حوضه (جزء پارامترهای اصلی)، تعداد آبراهه‌ها، تراکم زهکشی، نسبت انشعاب، فراوانی آبراهه‌ها، نسبت بافت زهکشی، طول جریان سطحی، ثابت نگه داشت و عدد نفوذ (جزء پارامترهای خطی یا مبتنی بر طول)، نسبت گردی، فاکتور فرم، نسبت کشیدگی، ضریب فشردگی پارامترهای شکل و شیب، عدد ناهمواری، نسبت پستی بلندی و انتگرال هیپسومتری (جزء پارامترهای دو بعدی یا مبتنی بر مساحت) در هر زیرحوضه استخراج گردید.

جدول (۱): پارامترهای مورفومتری انتخابی در اولویت‌بندی زیرحوضه‌های انجرد

Table (1): Morphometric parameters selected for Anjerd sub-watersheds prioritization

نام پارامتر	توصیف و رابطه ریاضی	منبع اصلی
* رتبه آبراهه (u)	بر اساس سیستم رتبه‌بندی استرالر	Strahler (1964)
* نسبت انشعاب (R_b)	$R_b = N_u / N_{u+1}$ که N_u و N_{u+1} تعداد آبراهه‌ها با رتبه u و u+1	Schumm (1956)
میانگین نسبت انشعاب (R_B)	متوسط نسبت انشعاب تمام رتبه‌ها	Strahler (1964)
تراکم زهکشی (D_d)	$D_d = L / A$ که L جمع طول تمام آبراهه‌ها، مساحت حوضه (Km^2)	Horton (1945)
فراوانی آبراهه‌ها (F_s)	$F_s = N / A$ که N تعداد کل آبراهه‌ها برای تمام رتبه‌ها	Horton (1945)
نسبت بافت (T)	$T = N / P$ که N تعداد کل آبراهه‌ها و P محیط حوضه (Km)	Horton (1945)
فاکتور فرم (R_f)	$R_f = A / L^2_b$ که L_b طول حوضه (Km)	Horton (1945)
نسبت گردی (R_c)	$R_c = 4\pi A / P^2$	Miller (1953)
نسبت کشیدگی (R_e)	$R_e = (2/L_b) * (A/\pi)^{0.5}$	Schumm (1956)
ضریب فشردگی (C_c)	$C_c = 0.2821 P / A^{0.5}$	Strahler (1964)
طول جریان سطحی (L_o)	$L_o = 1 / (2D_d)$	Horton (1945)
ثابت نگه‌داشت کانال (C)	$C = 1 / D_d$	Schumm (1956)
شماره نفوذ (IF)	$IF = D_d * F_s$	Faniran (1968)
نسبت ناهمواری (R_h)	$R_h = H / L_b$ اختلاف ارتفاع حداکثر و حداقل، طول حوضه (Km)	Schum (1956)
عدد ناهمواری (R_n)	$R_n = D_d * R_h$	Schum (1956)
انتگرال هیپسومتری (HI)	بر اساس مقادیر حداقل، حداکثر و میانگین ارتفاع حوضه (رابطه ۱)	Pike & Wilson (1978)
شیب متوسط حوضه (SLp)	از نقشه مدل رقومی ارتفاع، نقشه درصد شیب تهیه می‌شود	

* از مقادیر ردیف ۱-۲ در محاسبه میانگین نسبت انشعاب زیرحوضه‌ها استفاده شد.

اقدامات حفاظت آب و خاک می‌بایست با در نظر گرفتن اثرات مثبت یا منفی پارامترها روی پتانسیل سیل‌خیزی، فرسایش و رسوب انجام شوند. هر پارامتر به نحوی انتخاب شده است که یا اثر مثبت (مستقیم) و یا اثر منفی (معکوس) روی سیل‌خیزی و تولید رسوب داشته باشد. بر اساس مرور منابع مختلف، ۱۵ پارامتر به‌منظور اولویت‌بندی زیرحوضه‌ها استفاده گردید که از بین پارامترهای جدول ۱، نسبت انشعاب، ضریب فشردگی، طول جریان سطحی و ضریب نگه‌داشت، رابطه معکوس (منفی) با سیل‌خیزی، فرسایش و تولید رسوب دارند و سایر پارامترها دارای اثر مستقیم (مثبت) روی پتانسیل سیل‌خیزی، فرسایش و رسوب هستند. به‌عنوان نمونه، زیرحوضه‌های دارای مقدار نسبت انشعاب بزرگتر، دارای پتانسیل سیل‌خیزی پایین‌تر می‌باشند.

در این مطالعه با توجه به مقادیر پارامترهای مورفومتری، به زیرحوضه‌های انجرد رتبه ۱ تا ۱۱ اختصاص داده شد. برای پارامترهای با اثر مثبت، رتبه ۱ به زیرحوضه با حداکثر مقدار پارامتر و برای پارامترهای با اثر منفی (مثلاً نسبت انشعاب)، رتبه ۱ به زیرحوضه با حداقل مقدار پارامتر اختصاص داده شد (مشرام و شرما، ۲۰۱۷؛ ۱۵۰۹؛ آرفین و همکاران، ۲۰۲۰). از نظر هر پارامتر به‌طور مجزا، رتبه ۱ بیانگر وضعیت بحرانی (اولویت اول) می‌باشد. به‌منظور رتبه‌دهی نهایی، میانگین رتبه زیرحوضه‌ها از نظر ۱۵ پارامتر محاسبه شد و زیرحوضه با حداقل میانگین به‌عنوان اولویت اول و زیرحوضه با حداکثر میانگین رتبه‌ها، به‌عنوان اولویت آخر (رتبه آخر) تشخیص داده

شد. زمانی که میانگین رتبه‌ها دو یا چند زیرحوضه برابر باشد، رتبه یکسان به آن‌ها اختصاص یافت. اولویت اول به حوضه‌ای تعلق می‌گیرد که پتانسیل بالاتری از نظر سیل‌خیزی، فرسایش و رسوب دارد که در این پژوهش به‌عنوان زیرحوضه بحرانی شناخته می‌شود و باید اقدامات حفاظت آب و خاک در آن زودتر انجام گیرد.

تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA)

پارامترهای مورفومتری استخراج شده اغلب دارای همبستگی بالا هستند. همبستگی ژنتیکی پارامترها نشان می‌دهد درصد قابل توجهی از اطلاعات توصیف شده توسط یک پارامتر، در سایر پارامترهای مورفومتری وابسته وجود دارد (مشرام و شرما، ۲۰۱۷: ۱۵۰۹). لذا باید پارامترهای مورفومتری با کمترین همبستگی با سایر پارامترها را به‌عنوان پارامترهای شاخص، شناسایی کرد. روش PCA یک تکنیک آماری چندمتغیره برای کاهش ابعاد یک مجموعه داده‌ای با حفظ قابلیت اطمینان متغیرهای اصلی است. از ویژگی‌های مؤلفه‌های اصلی، حفظ حداکثر واریانس کل متغیرها می‌باشد (سی‌دیکویی و همکاران^۱، ۲۰۲۰: ۷). تحلیل مؤلفه‌ها شامل چرخش محورهای مختصات در فضای سه بعدی است و تبدیل متعامد (غیرهمبسته) می‌باشد که در آن هر یک از n متغیر اصلی بر حسب مؤلفه‌های اصلی جدید، قابل توصیف است (مشرام و شرما، ۲۰۱۷: ۱۵۱۰). در این روش، داده‌ها به‌صورت ماتریس $n \times p$ وارد می‌شود که n تعداد زیرحوضه‌ها و p تعداد پارامتر می‌باشد. اولین مؤلفه معمولاً درصد واریانس یا تغییرات قابل توجهی را توصیف می‌کند و درصد تجمعی واریانس تمام مؤلفه‌ها برابر ۱۰۰ درصد می‌باشد.

به‌منظور اجرای تحلیل PCA از نرم‌افزار SPSS 26 استفاده شد. با اعمال چرخش وریماکس سه مؤلفه اصلی نخست، با درصد تجمعی واریانس حداقل ۸۰ درصد انتخاب شد و همچنین دو پارامتر با حداکثر ضریب همبستگی از هر مؤلفه اصلی، تعداد ۶ پارامتر مورفومتری کلیدی، مشخص گردید. لازم به ذکر است مبنای کار پژوهش حاضر، استفاده از ستون مقادیر ضرایب بارگذاری شده روی مؤلفه‌های اصلی با چرخش وریماکس می‌باشد.

بحث و نتایج

پارامترهای مورفومتری

مقادیر پارامترهای پایه شامل مساحت، محیط و طول زیرحوضه‌های انجرد در جدول (۲) آورده شده است. بر اساس این جدول، زیرحوضه A1-3 با مساحت ۱/۵۷ کیلومترمربع کوچک‌ترین و زیرحوضه A3 با ۱۳/۹۸ کیلومترمربع بزرگ‌ترین زیرحوضه مورد بررسی هستند. بیشترین طول حوضه مربوط به زیرحوضه A1-2 با ۶/۳۸ کیلومتر و کمترین آن مربوط به زیرحوضه A1-3 با ۲/۰۵ کیلومتر است. از نظر محیط، زیرحوضه A3 با ۲۱/۶۳ کیلومتر بیشترین مقدار و زیرحوضه A1-3 با ۷/۰۲ کیلومتر کمترین مقدار را داراست. این تفاوت‌ها در ویژگی‌های مورفومتری بیانگر تفاوت در فرآیندهای هیدرولوژیکی، مقدار رواناب و ظرفیت ذخیره‌سازی آب در هر زیرحوضه است. مقادیر پارامترهای مورفومتری استخراج شده برای ۱۱ زیرحوضه انجرد در جدول (۳) ارائه شده است. بر اساس داده‌های جدول (۳)، کم‌ترین مقدار نسبت انشعاب در حوضه انجرد معادل ۳/۴ مربوط به زیرحوضه A1-5 و بیشترین مقدار آن برابر با ۶/۶ در زیرحوضه A5 ثبت گردید. با توجه به این مقادیر، زیرحوضه A1-5، با فرض تساوی سایر پارامترها، دبی اوج بیشتری را نسبت به دیگر زیرحوضه‌ها نشان می‌دهد (رضایی مقدم و همکاران، ۲۰۲۰: ۶۹).

¹ Siddiqui et al

جدول (۲): مقادیر پارامترهای مورفومتری پایه زیرحوضه‌های انجرد
Table (2): The values of basic parameters for Anjerd sub-basins

ردیف	زیرحوضه	مساحت (Km ²)	محیط (Km)	طول حوضه (Km)
۱	A1-1	۱۲/۲۰	۱۷/۴۲	۵/۳
۲	A1-2	۲۰/۲۴	۲۱/۲۹	۶/۳۸
۳	A1-3	۱/۵۷	۷/۰۲	۲/۰۵
۴	A1-4	۳/۴۲	۸/۱۰	۲/۸۵
۵	A1-5	۱۱/۹۲	۱۷/۱۱	۶/۶
۶	A2-1	۸/۹۶	۱۴/۵۲	۵/۰۹
۷	A2-2	۵/۲۳	۱۳/۷۳	۵/۲۳
۸	A2-2	۲/۷۵	۸/۵۷	۳/۴۸
۹	A3	۱۳/۹۸	۲۱/۶۳	۷/۵۵
۱۰	A4	۴/۹۶	۱۲/۳۵	۴/۲۴
۱۱	A5	۴/۰۴	۱۰/۶۹	۴/۰۳

جدول (۳): مقادیر پارامترهای مورفومتری زیرحوضه‌های انجرد
Table (3): The values of morphometric parameters in Anjerd sub-basins

زیرحوضه	Rb*	Dd	Fs	T	Rf	Rc	Re	Cc	Lo	C	IF	Rh	Rn	HI	SLp
A1-1	۳/۵	۴	۱۲/۷	۸/۹	۰/۴۳	۰/۵۱	۰/۷۴	۱/۴	۰/۱۳	۰/۲۵	۵/۰۷	۰/۲۳	۴/۹	۰/۷۴	۲۰/۵
A1-2	۵/۲	۳/۳	۸/۸	۸/۴	۰/۵۰	۰/۵۶	۰/۸۰	۱/۳	۰/۱۵	۰/۳۱	۲۸/۸	۰/۱۳	۲/۷	۰/۴۷	۲۳/۶
A1-3	۴/۱	۸/۳	۴۰/۰	۹/۰	۰/۳۸	۰/۴۰	۰/۶۹	۱/۶	۰/۰۶	۰/۱۲	۳۳۱/۴	۰/۲۵	۴/۳	۰/۴۹	۳۷/۳
A1-4	۴/۵	۸/۰	۳۳/۹	۱/۳	۰/۴۲	۰/۶۵	۰/۷۳	۱/۲	۰/۰۶	۰/۱۳	۲۷۱/۵	۰/۲۵	۵/۷	۰/۵۲	۴۷/۱
A1-5	۳/۴	۲/۴	۳/۴	۲/۴	۰/۲۷	۰/۵۱	۰/۵۹	۱/۴	۰/۲۱	۰/۴۱	۸/۳	۰/۱۲	۱/۹	۰/۵۹	۱۵
A2-1	۴	۷/۷	۲۸/۴	۱/۵	۰/۳۵	۰/۵۳	۰/۶۶	۱/۴	۰/۰۷	۰/۱۳	۲۱۹/۵	۰/۱۷	۶/۷	۰/۴۹	۴۳/۶
A2-2	۵/۶	۷/۶	۳۱/۲	۱/۹	۰/۱۹	۰/۳۵	۰/۴۹	۱/۷	۰/۰۷	۰/۱۳	۲۳۸/۳	۰/۱۶	۶/۲	۰/۳۱	۲۶/۸
A2-3	۵/۱	۸/۵	۳۷/۵	۲/۱	۰/۲۳	۰/۴۷	۰/۵۴	۱/۵	۰/۰۶	۰/۱۲	۳۱۷/۸	۰/۱۷	۵/۱	۰/۴۴	۳۳/۳
A3	۴/۸	۳/۷	۹/۲	۵/۹	۰/۲۵	۰/۳۸	۰/۵۶	۱/۶	۰/۱۴	۰/۲۷	۳۳/۷	۰/۰۶	۱/۷	۰/۵۱	۱۶/۲
A4	۳/۷	۳/۷	۱۳/۱	۵/۳	۰/۲۸	۰/۴۱	۰/۵۹	۱/۶	۰/۱۳	۰/۲۷	۴۸/۹	۰/۰۸	۱/۲	۰/۶۷	۱۸/۳
A5	۶/۶	۳/۸	۱۲/۴	۴/۷	۰/۲۴	۰/۴۴	۰/۵۶	۱/۵	۰/۱۳	۰/۲۶	۴۷/۶	۰/۰۸	۱/۲	۰/۴۴	۱۸/۶

* نسبت انشعاب، Dd: تراکم زهکشی، Fs: فراوانی آبراهه‌ها، T: نسبت بافت، Rf: فاکتور فرم، Rc: نسبت گردی، Re: نسبت کشیدگی، Cc: ضریب فشردگی، Lo: طول جریان سطحی، C: ثابت نگه‌داشت، IF: شماره نفوذ، Rh: نسبت ناهمواری، Rn: عدد ناهمواری، HI: انتگرال هیپسومتری، SLP: متوسط شیب (°/°)

بیشترین تراکم زهکشی با مقدار ۸/۵ در زیرحوضه A3-2 و کمترین آن با مقدار ۲/۴ در زیرحوضه A1-5 به‌دست آمد. ساختار زمین زیرحوضه A2-3 که متشکل از مواد با نفوذپذیری پایین‌تر و ناهمواری‌های شدیدتر است، شرایط بالقوه افزایش تولید سیلاب و رسوب را فراهم می‌آورد (ناوتیال^۱، ۱۹۹۴: ۲۵۵). افزایش تراکم زهکشی موجب تسریع در تخلیه رواناب سطحی از طریق شبکه زهکشی متراکم‌تر می‌شود.

حداکثر فراوانی آبراهه‌ها با عدد ۴۰ در زیرحوضه A1-3 و حداقل آن با ۳/۴ در زیرحوضه A1-5 گزارش شد. در شرایط برابر، نفوذپذیری کمتر زیرحوضه A1-3 سبب افزایش حساسیت آن نسبت به سیلاب و فرسایش می‌شود (آرفین و همکاران، ۲۰۲۰: ۹). همچنین، بیشترین نسبت بافت زهکشی برابر با ۱۷/۵ مربوط به زیرحوضه A2-1 و حداقل آن ۲/۴ در زیرحوضه A1-5 مشاهده شد. نسبت بافت زهکشی که

¹ Nautiyal

تابعی از اقلیم، بارش، پوشش گیاهی، ظرفیت نفوذ خاک و مراحل توسعه حوضه است، شاخص مهمی در تعیین حساسیت حوضه به سیلاب و رسوب می‌باشد (اسمیت^۱، ۱۹۵۰: ۶۶۷).

فاکتور شکل (Rf)، که بیانگر کشیدگی هندسی حوضه است، هر چه به عدد ۱ نزدیک‌تر باشد، نشانگر حوضه‌ای دایره‌ای شکل با طول کوتاه‌تر است که معمولاً با دبی اوج بالاتر و زمان اوج کوتاه‌تر سیلاب همراه است (بیش و همکاران^۲، ۲۰۱۸: ۴۳). بیشترین و کمترین مقدار این پارامتر به ترتیب ۰/۵ و ۰/۱۹ در زیرحوضه‌های A1-2 و A2-2 ثبت شد. بر این اساس، زیرحوضه A2-2 با کشیدگی بیشتر، حساسیت کمتری نسبت به سیل‌خیزی دارد. نسبت گردی (Rg) نیز در زیرحوضه A1-4 با مقدار ۰/۶۵ بیشینه و در زیرحوضه A2-2 با مقدار ۰/۳۵ کمینه است. مقدار نسبت گردی از صفر (حوضه کاملاً کشیده) تا یک (حوضه دایره‌ای شکل) متغیر بوده و نزدیکی به یک نشان‌دهنده پتانسیل بالاتر تولید رواناب و سیلاب است (رضایی مقدم، ۲۰۲۰: ۷۳).

ضریب کشیدگی (Ce) نیز حداکثر مقدار ۰/۸ را در زیرحوضه A1-2 و حداقل ۰/۴۹ را در زیرحوضه A2-2 به خود اختصاص داد. این پارامتر نیز نشان‌دهنده کشیدگی حوضه و ارتباط مستقیم آن با میزان سیل‌خیزی است. ضریب فشردگی (Cc) که برای حوضه‌های دایره‌ای نزدیک به ۱ و برای حوضه‌های کشیده در محدوده ۱/۵ تا ۲/۵ قرار دارد (رضایی مقدم، ۲۰۲۰: ۷۲)، بیشترین مقدار ۱/۷ را در زیرحوضه A2-2 و کمترین مقدار ۱/۲ را در زیرحوضه A1-4 نشان داد. بر اساس این شاخص، زیرحوضه A1-4 با فشردگی کمتر، دارای پتانسیل بالاتری در بروز سیل و فرسایش است.

مقادیر کم طول جریان سطحی (Lo) نشان‌دهنده سرعت بیشتر رواناب سطحی، توسعه بیشتر شبکه زهکشی و شیب‌های تندتر می‌باشد (بیش و همکاران، ۲۰۱۸: ۴۳). بیشترین مقدار Lo (۰/۲۱) متعلق به زیرحوضه A1-5 و کمترین مقدار (۰/۰۶) در زیرحوضه‌های A1-3، A2-3 و A1-4 ثبت گردید. در عین حال، زیرحوضه‌های A2-3، A1-3 و A1-4 بیشترین حساسیت را از نظر سیل‌خیزی و رسوب‌زایی نشان می‌دهند.

ثابت نگهداری کانال (C)، که تحت تاثیر عوامل زمین‌شناسی، نفوذپذیری و شرایط اقلیمی قرار دارد، بیشترین مقدار ۰/۴۱ را در زیرحوضه A1-5 و کمترین مقدار ۰/۱۲ را در زیرحوضه‌های A1-3، A2-3 و A1-4 دارا بود. مقادیر پایین این پارامتر بیانگر خاک‌های حساس، پوشش گیاهی پراکنده و اختلاف ارتفاع زیاد است (شیوم، ۱۹۵۶: ۶۵۷).

نسبت نفوذ (IF) با بیشینه ۳۳۱/۵ در زیرحوضه A1-3 و کمینه ۸/۳ در زیرحوضه A1-5 اندازه‌گیری شد. مقدار پایین این شاخص نشان‌دهنده نفوذپذیری بالاتر و در نتیجه تولید رواناب سطحی کمتر است (رای و همکاران^۳، ۲۰۱۷: ۱۵). بنابراین، زیرحوضه A1-3 با فرض تساوی سایر شرایط، نفوذپذیری کمتری داشته و در نتیجه میزان رواناب سطحی تولیدی در آن افزایش می‌یابد.

نسبت ناهمواری (Rh)، شاخصی از شیب‌های تند و اختلاف ارتفاع، حداکثر مقدار ۰/۲۵ را در زیرحوضه‌های A1-3 و A1-4 و حداقل ۰/۰۶ را در زیرحوضه A3 نشان داد (شیوم، ۱۹۵۶: ۶۱۲). این زیرحوضه‌ها از نظر سیل‌خیزی و رسوب‌زایی در رتبه اول قرار دارند.

عدد ناهمواری (Rn)، که نشان‌دهنده پیچیدگی‌های توپوگرافی و شدت اثر آن بر وقوع سیلاب و فرسایش است (پتون و بیکر^۴، ۱۹۷۶: ۹۴۴؛ آرفین و همکاران، ۲۰۲۰: ۱۱)، بیشترین مقدار ۶/۷ مربوط به زیرحوضه A2-1 و کمترین مقدار ۱/۲ مربوط به زیرحوضه‌های A5 و A4 است.

پارامتر انتگرال هیپسومتری (HI) که از منحنی هیپسومتری استخراج شده و بیانگر مراحل فرسایش حوضه از جوانی تا پیری است، مقادیر حداقل ۰/۳۱ و حداکثر ۰/۷۴ را در زیرحوضه‌های A2-2 و A1-1 به ثبت رساند. مقدار HI بالاتر از ۰/۶ نشان‌دهنده مرحله جوانی و پایین‌تر از ۰/۳ مرحله پیری و نرخ فرسایش کمتر است، مقادیر بین این دو عدد نمایانگر تعادل فرسایشی می‌باشد (پایک و ویلسون^۵، ۱۹۷۱). در این راستا، زیرحوضه A1-1 با ویژگی‌های جوان‌تر، بیشترین رتبه حساسیت فرسایشی را دارد.

¹ Smith

² Bisht et al

³ Rai et al

⁴ Patton & Baker

⁵ Pike & and Wilson

افزایش شیب حوضه منجر به کاهش نرخ نفوذ باران و افزایش رواناب سطحی، فرسایش و سیل خیزی می‌شود (هورتن، ۱۹۴۵). در حوضه انجرد، بیشترین میانگین شیب برابر با ۴۷/۱ درصد در زیرحوضه A1-4 و کمترین مقدار ۱۵ درصد در زیرحوضه A1-5 گزارش شده است که با فرض تساوی سایر پارامترها، زیرحوضه A1-4 از نظر ریسک سیل و فرسایش در رتبه بحرانی قرار می‌گیرد.

زیرحوضه A1-4 همچنین بیشترین مقادیر مربوط به پارامترهای شیب متوسط، نسبت ناهمواری و نسبت گردی را به خود اختصاص داده که این شاخص‌ها تأثیر مستقیمی بر افزایش پتانسیل سیل خیزی و رسوب‌زایی دارند. در مقابل، این زیرحوضه دارای کمترین مقادیر طول جریان سطحی، ضریب فشردگی و ثابت نگهداری کانال است که رابطه معکوس با شدت پدیده‌های سیل خیزی و فرسایش نشان می‌دهد.

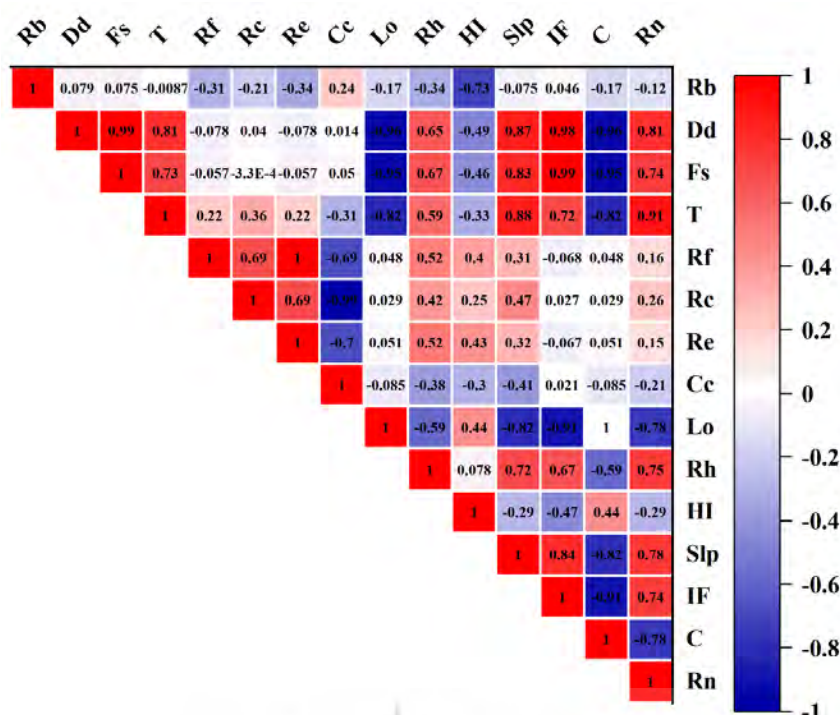
نتایج تحلیل همبستگی

پیش از انجام تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA)، ماتریس همبستگی میان ۱۵ پارامتر مورفومتری محاسبه و مورد ارزیابی قرار گرفت. در این ماتریس (شکل ۲)، روابط بین شاخص‌های مورفومتری و هیدروژنومورفولوژیک به صورت کمی و بصری تحلیل شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که بین بسیاری از شاخص‌ها همبستگی‌های قوی و معناداری وجود دارد. به عنوان نمونه، تراکم زهکشی (Dd) با فراوانی آبراه‌ها (Fs) دارای همبستگی بسیار بالا ($r = 0.99$) است که بیانگر وابستگی شدید این دو شاخص به یکدیگر است. همچنین، شماره نفوذ (IF) با ثابت نگه‌داشت (C) همبستگی بسیار بالایی دارد ($r = 0.98$) که نشان می‌دهد این شاخص‌ها به صورت هم‌جهت تغییر می‌کنند و احتمالاً دارای منشأ یا تأثیر مشترک در فرآیندهای هیدرولوژیکی هستند. از سوی دیگر، برخی شاخص‌ها مانند نسبت بافت (T) با طول جریان سطحی (Lo) ($r = -0.82$) و نیز با عدد ناهمواری (Rn) ($r = -0.91$) همبستگی منفی قوی دارند که نشان‌دهنده تأثیر معکوس افزایش نسبت بافت بر ویژگی‌های فیزیکی زهکش و انرژی محیط است. همچنین، همبستگی منفی بین شیب متوسط (SLp) با طول جریان سطحی (Lo) ($r = -0.82$) و عدد ناهمواری (Rn) ($r = -0.78$) قابل توجه است و بیانگر نقش شیب در کاهش یا افزایش طول مسیر جریان و شدت ناهمواری منطقه است. در مقابل، روابطی با ضریب همبستگی نزدیک به صفر مانند نسبت انشعاب (Rb) با نسبت بافت (T) ($r = -0.0087$) نشان‌دهنده عدم وجود ارتباط معنادار بین این متغیرهاست. به طور کلی، این تحلیل نشان می‌دهد که برخی متغیرها دارای همبستگی شدید با یکدیگر هستند و می‌توانند در تحلیل‌های چندمتغیره موجب هم‌خطی شوند، از این رو، در انتخاب شاخص‌ها برای مدل‌سازی باید دقت کافی انجام شود. همچنین متغیرهای دارای همبستگی منفی قابل توجه نیز می‌توانند نقش کلیدی در تفسیر فرآیندهای ژئومورفولوژیکی و هیدرولوژیکی منطقه ایفا کنند.

بررسی کفایت داده‌ها پیش از اجرای تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA)

کفایت نمونه‌برداری برای اجرای تحلیل PCA از طریق شاخص Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) ارزیابی شد؛ این شاخص باید حداقل ۰/۶ باشد که در بازه ۰/۷ تا ۰/۸ قابل قبول، ۰/۸ تا ۰/۹ خوب و بالاتر از ۰/۹ عالی محسوب می‌شود. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که داده‌ها از نظر کفایت نمونه‌برداری (KMO) شرایط لازم برای اجرای PCA را به خوبی فراهم کرده‌اند.

همان‌طور که در جدول ۴ نشان داده شده است، سه مؤلفه اصلی اول قادر به تبیین حدود ۸۹ درصد از واریانس کل داده‌ها هستند. به طور معمول، در انتخاب تعداد مؤلفه‌ها، هر مؤلفه باید با یک پارامتر اصلی که بیشترین همبستگی را با آن دارد مرتبط شود. در این مطالعه، به منظور حفظ جامعیت تحلیل و افزایش تعداد پارامترهای منتخب، بر اساس سه مؤلفه اصلی با واریانس تجمعی ۸۹ درصد، دو پارامتر با بیشترین همبستگی مثبت یا منفی به هر مؤلفه اختصاص داده شد. این رویکرد علاوه بر کاهش ابعاد داده‌ها، امکان حفظ اطلاعات مرتبط با متغیرهای مهم مورفومتری را فراهم ساخته و زمینه تحلیل‌های بعدی را به شکل دقیق‌تر و علمی‌تر مهیا می‌سازد.



شکل (۲): ماتریس همبستگی پیرسون پارامترهای مورفومتری

Figure (2): Pearson correlation matrix for morphometric parameters

جدول (۴): مقادیر ویژه و درصد واریانس تجمعی توصیف شده توسط مؤلفه‌های اصلی

Table (4): Eigenvalues and total variance explained by principle components

مؤلفه	مقدار ویژه	درصد واریانس	درصد تجمعی واریانس
۱	۷/۸۰۳	۵۲/۰۲۰	۵۲/۰۲۰
۲	۴/۲۳۵	۲۸/۲۳۴	۸۰/۲۵۴
۳	۱/۳۲۴	۸/۸۲۵	۸۹/۰۷۹
۴	۰/۶۶۰	۴/۳۹۷	۹۳/۴۷۷
۵	۰/۴۱۴	۲/۷۵۷	۹۶/۲۳۴
۶	۰/۳۰۸	۲/۰۵۶	۹۸/۲۸۹
۷	۰/۲۲۰	۲/۴۶۶	۹۹/۷۵۵
۸	۰/۰۲۷	۰/۱۸۲	۹۹/۹۳۷
۹	۰/۰۰۸	۰/۰۵۳	۹۹/۹۹۰
۱۰	۰/۰۰۲	۰/۰۱۰	۱۰۰

استخراج پارامترهای کلیدی با استفاده از تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA)

به‌منظور شناسایی پارامترهای مؤثر و کاهش ابعاد داده‌ها، از تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) بهره‌گیری شد. جدول (۵) نتایج حاصل از نرم‌افزار SPSS را نشان می‌دهد که شامل ضرایب بار عاملی (Factor Loadings) پارامترهای مورفومتری در دو حالت: بدون چرخش و با چرخش وریماکس (Varimax) برای سه مؤلفه اول (C1 تا C3) است. مقادیر درج‌شده در جدول بیانگر میزان همبستگی بین هر پارامتر و مؤلفه‌های اصلی هستند.

در حالت بدون چرخش، پارامترهایی نظیر تراکم زهکشی (Dd)، فراوانی آبراهه‌ها (Fs)، طول جریان سطحی (Lo)، درصد شیب متوسط (SLp)، شماره نفوذ (IF)، و ضریب نگه‌داشت کانال (C) بیشترین همبستگی را با مؤلفه اول نشان می‌دهند. با این حال، به دلیل پراکندگی

نسبی ضرایب و عدم تفکیک پذیری مناسب، تفسیر مؤلفه‌ها در این حالت دشوار است. همچنین، میزان بارهای عاملی در این حالت، در مقایسه با حالت چرخش یافته، پایین تر است.

به منظور بهبود تفسیر و تسهیل انتخاب شاخص‌ها، از روش چرخش وریماکس استفاده شد. در این حالت، برای هر یک از سه مؤلفه اول، دو پارامتر با بیشترین بار عاملی و معنی‌داری آماری انتخاب گردید. نتایج حاصل از چرخش نشان داد که: ۱- مؤلفه اول بیشترین همبستگی را با پارامترهای Dd (تراکم زهکشی)، Fs (فراوانی آبراهه‌ها)، Lo (طول جریان سطحی)، IF (شماره نفوذ) و C (ضریب نگهداشت کانال) دارد. ۲- مؤلفه دوم با Rc (نسبت گردی) و Cc (ضریب فشردگی) ارتباط بیشتری دارد و ۳- مؤلفه سوم بیشترین همبستگی را با Rb (نسبت انشعاب) و HI (انتگرال هیپسومتریک) نشان می‌دهد.

با هدف اولویت‌بندی زیرحوضه‌های منطقه مطالعه، از هر مؤلفه دو پارامتر با بالاترین ضرایب همبستگی انتخاب شد. این شش پارامتر شامل Dd, Fs, Rc, Cc, Rb و HI (انتگرال هیپسومتریک) بوده و به عنوان شاخص‌های کلیدی در فرآیند تصمیم‌گیری برای ارزیابی و رتبه‌بندی زیرحوضه‌ها مورد استفاده قرار گرفتند. پارامترهای منتخب در جدول (۵) به صورت برجسته مشخص شده‌اند.

جدول (۵): ماتریس ضرایب همبستگی پارامترهای مورفومتری با مؤلفه‌های اصلی

Table (5): Correlation coefficient matrix of morphometric parameters with principal components

ضرایب در حالت بدون چرخش				ضرایب با چرخش وریماکس			
پارامتر	C1	C2	C3	پارامتر	C1	C2	C3
Rb	۰/۰۲۷	۰/۵۳۳	۰/۷۷۴	Rb	۰/۰۱۹	۰/۱۶۱	۰/۹۲۶
Dd	۰/۹۶۸	۰/۲۱۷	۰/۰۶۲	Dd	۰/۹۸۶	۰/۰۶۷	۰/۱۱۰
Fs	۰/۹۴۵	۰/۲۲۰	۰/۱۰۷	Fs	۰/۹۶۹	۰/۰۹۲	۰/۰۶۹
T	۰/۸۹۸	۰/۱۲۶	۰/۱۱۲	T	۰/۸۵۴	۰/۳۰۱	۰/۱۱۶
Rf	۰/۱۴۶	۰/۸۹۱	۰/۱۰۷	Rf	۰/۰۳۰	۰/۸۶۹	۰/۲۶۸
Rc	۰/۲۳۲	۰/۸۳۶	۰/۳۷۳	Rc	۰/۰۸۴	۰/۹۴۱	۰/۰۰۲
Re	۰/۱۴۴	۰/۹۰۳	۰/۰۷۹	Re	۰/۰۳۰	۰/۸۶۸	۰/۲۹۹
Cc	۰/۱۷۵	۰/۸۵۴	۰/۳۴۸	Cc	۰/۰۳۰	۰/۹۳۷	۰/۰۳۳
Lo	۰/۹۴۲	۰/۲۴۴	۰/۰۴۳	Lo	۰/۰۹۶	۰/۰۸۸	۰/۱۳۶
Rh	۰/۷۵۶	۰/۴۳۹	۰/۲۶۲	Rh	۰/۷۳۰	۰/۴۰۸	۰/۳۶۴
HI	۰/۴۰۳	۰/۶۲۳	۰/۵۶۷	HI	۰/۳۸۹	۰/۲۶۷	۰/۸۰۶
Slp	۰/۹۳۵	۰/۲۲۰	۰/۰۹۲	Slp	۰/۸۸۳	۰/۳۸۳	۰/۰۶۲
IF	۰/۹۳۸	۰/۲۰۸	۰/۱۰۲	IF	۰/۹۶۱	۰/۰۰۸	۰/۰۶۸
C	۰/۹۴۲	۰/۲۴۴	۰/۰۴۳	C	۰/۰۹۶	۰/۰۸۸	۰/۱۳۶
Rn	۰/۸۸۳	۰/۰۹۳	۰/۸۵	Rn	۰/۸۷	۰/۱۸۹	۰/۰۴۹

اولویت‌بندی زیرحوضه‌ها

بر اساس جداول ۶ و ۷، برای هر زیرحوضه، به ازای هر پارامتر مورفومتری، رتبه‌ای مشخص اختصاص یافت. سپس میانگین این رتبه‌ها به منظور تعیین اولویت نهایی هر زیرحوضه محاسبه شد. در فرآیند رتبه‌بندی، زیرحوضه‌ای که دارای کمترین میانگین رتبه‌ها بود، به عنوان اولویت اول (رتبه ۱) و زیرحوضه‌ای با بیشترین میانگین، به عنوان آخرین اولویت در نظر گرفته شد. در مواردی که زیرحوضه‌ها دارای میانگین‌های تقریباً یکسان بودند، اولویت مشابهی به آن‌ها اختصاص یافت (مطابق شکل ۳).

جدول (۶): رتبه‌بندی پانزده پارامتر مورفومتری و اولویت‌بندی زیرحوضه‌های انجرد

Table(6): Ranking of fifteen morphometric parameters and anjerd sub-watersheds Prioritization

Sw	Rb	Dd	Fs	T	Rf	Rc	Re	Cc	Lo	Rh	HI	SLP	IF	C	Rn	میانگین	اولویت
A1-1	۱	۵	۷	۴	۲	۳	۲	۳	۲	۱	۱	۳	۶	۲	۵	۲/۹	۲
A1-2	۶	۷	۱۰	۵	۱	۲	۱	۲	۲	۳	۵	۳	۸	۳	۷	۴/۳	۴
A1-3	۳	۲	۱	۴	۳	۶	۳	۵	۱	۱	۵	۲	۱	۱	۶	۲/۹	۲
A1-4	۴	۳	۳	۲	۲	۱	۲	۱	۱	۱	۴	۱	۳	۱	۳	۲/۱	۱
A1-5	۱	۸	۱۱	۹	۵	۳	۵	۳	۳	۳	۳	۴	۹	۴	۸	۵/۳	۶
A2-1	۳	۴	۵	۱	۴	۳	۴	۳	۱	۲	۵	۱	۵	۱	۱	۲/۹	۲
A2-2	۷	۴	۴	۳	۸	۸	۷	۶	۱	۲	۷	۳	۴	۱	۲	۴/۵	۴
A2-3	۶	۱	۲	۳	۷	۴	۶	۴	۱	۲	۶	۲	۲	۱	۴	۳/۴	۳
A3	۵	۶	۹	۶	۶	۷	۶	۵	۲	۴	۴	۴	۷	۲	۹	۵/۵	۷
A4	۲	۶	۶	۷	۵	۶	۵	۵	۲	۴	۲	۴	۶	۲	۱۰	۴/۸	۵
A5	۸	۶	۸	۸	۶	۵	۶	۴	۲	۴	۶	۴	۶	۲	۱۰	۵/۷	۸

جدول (۷): رتبه‌بندی شش پارامتر مورفومتری و اولویت‌بندی زیرحوضه‌های انجرد

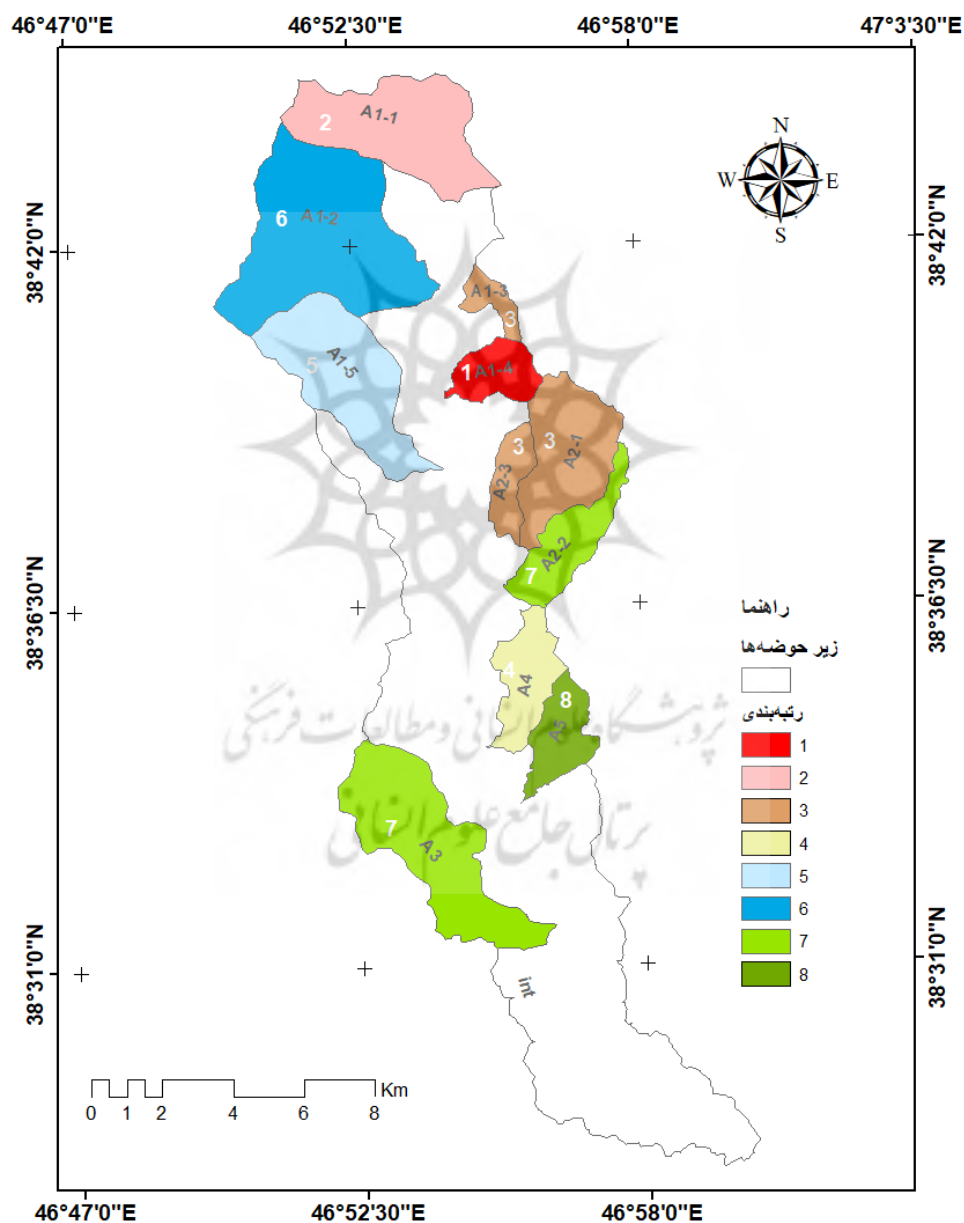
Table (7): Ranking of six morphometric parameters and anjerd sub-watersheds Prioritization

Sw	Dd	Rc	Rb	Fs	Cc	HI	میانگین
A1-1	۵	۳	۱	۷	۳	۱	۳/۳
A1-2	۷	۲	۶	۱۰	۲	۵	۵/۳
A1-3	۲	۶	۳	۱	۵	۵	۳/۸
A1-4	۳	۱	۴	۳	۱	۴	۲/۷
A1-5	۸	۳	۱	۱۱	۳	۳	۴/۸
A2-1	۴	۳	۳	۵	۳	۵	۳/۸
A2-2	۴	۸	۷	۴	۶	۷	۶
A2-3	۱	۴	۶	۲	۴	۶	۳/۸
A3	۶	۷	۵	۹	۵	۴	۶
A4	۶	۶	۲	۶	۵	۲	۴/۵
A5	۶	۵	۸	۸	۴	۶	۶/۲

پژوهش‌های پیشین نیز بر اهمیت انتخاب پارامترهای کلیدی در ارزیابی وضعیت زیرحوضه‌ها تأکید داشته‌اند. به عنوان نمونه، مشرام و شرما (۲۰۱۷) با استفاده از تحلیل مؤلفه اصلی (PCA)، پارامترهای نسبت انشعاب (Rb)، فراوانی آبراهه‌ها (Fs) و ناهمواری نسبی (Rr) را به عنوان عوامل کلیدی معرفی کردند. همچنین، در مطالعه گوارثانام‌بیکای و سائیانارایان (۲۰۲۴)، پارامترهای نسبت انشعاب (Rb)، عدد ناهمواری (Rn) و نسبت گردی (Rc) به عنوان شاخص‌های تعیین‌کننده انتخاب شدند. نتایج تحقیق حاضر نیز با این مطالعات هم‌راستاست؛ به طوری که نسبت انشعاب و نسبت گردی به عنوان پارامترهای کلیدی شناسایی شدند و عدد ناهمواری نیز با یکی از مؤلفه‌های اصلی دارای همبستگی قابل توجهی بود.

در پژوهش آرفین و همکاران (۲۰۲۰) نیز نسبت انشعاب (Rb)، فراوانی آبراهه‌ها (Fs)، نسبت گردی (Rc) و نسبت کشیدگی (Re) به عنوان شاخص‌های اصلی معرفی شدند که با سه پارامتر کلیدی مورد استفاده در این پژوهش مطابقت دارد. اگرچه نسبت کشیدگی نیز در حالت چرخش وریماکس با مؤلفه دوم همبستگی بالا داشت، اما با توجه به معیار انتخاب دو پارامتر با بیشترین همبستگی برای هر مؤلفه، در نهایت انتخاب نشد.

این یافته‌ها با نتایج بابایی و همکاران (۲۰۱۷) در دشت ارومیه نیز همسو است؛ آنان تأکید داشتند استفاده از روش‌های آماری مانند PCA، در شناسایی مناطق بحرانی از طریق تشخیص پارامترهای مؤثر، اثربخش بوده و دقت تحلیل‌ها را افزایش می‌دهد. افزون بر این، مطالعات گاجیه و همکاران (۲۰۱۴) و مالک و همکاران (۲۰۱۹) نیز نشان داده‌اند که پارامترهای Rb و Rc به دلیل ارتباط نزدیک با ویژگی‌های شبکه زهکشی و فرم حوضه، در محدوده‌های جغرافیایی مختلف، به عنوان عوامل کلیدی در اولویت‌بندی مطرح هستند. بررسی تطبیقی نتایج این پژوهش با مطالعات مشابه نشان می‌دهد که بهره‌گیری از پارامترهای مورفومتری کلیدی می‌تواند به عنوان یک گام اولیه، سریع و قابل اعتماد برای اولویت‌بندی زیرحوضه‌ها در مطالعات مدیریت منابع آب و خاک به کار رود. این روش، امکان شناسایی نواحی بحرانی را در مراحل ابتدایی فراهم نموده و ابزار مناسبی برای تصمیم‌گیری مدیران در تخصیص بهینه منابع و اجرای اقدامات حفاظتی فراهم می‌سازد.



شکل (۳): نقشه اولویت‌بندی زیرحوضه‌های انجرد با استفاده از روش تحلیل مؤلفه اصلی

Figure (3): Anjerd sub-watersheds Prioritization map using PCA Method

نتایج اولویت‌بندی انجام‌شده نشان می‌دهد که زیرحوضه A1-4 بحرانی‌ترین زیرحوضه، در حوضه انجرد بوده و زیرحوضه‌های A1-1، A2-1 و A1-3 در اولویت دوم قرار می‌گیرند. زیرحوضه A1-4 از نظر پارامترهایی نظیر درصد شیب متوسط، عدد ناهمواری، نسبت گردی، طول جریان سطحی، ضریب فشردگی و ضریب نگهداشت کانال، دارای بالاترین رتبه بوده و از منظر مدیریتی نیازمند توجه فوری برای اجرای اقدامات حفاظتی است.

در دهه‌های اخیر، پژوهش‌های متعددی در داخل و خارج از کشور با بهره‌گیری از پارامترهای مورفومتری و روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM) برای اولویت‌بندی حوضه‌ها انجام شده است. بر این اساس، پیشنهاد می‌شود در حوضه‌هایی که آمار هیدرولوژیکی و رسوبی در دسترس است، نتایج حاصل از تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) مبتنی بر شاخص‌های مورفومتری، با نتایج به‌دست‌آمده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره مبتنی بر ویژگی‌های هیدرولوژیکی و فرسایشی مقایسه و اعتبارسنجی شوند (امیری و همکاران، ۱۳۹۷؛ ذبیحی سیلابی و همکاران، ۲۰۲۴؛ بابایی حصار و همکاران، ۲۰۱۸). شناسایی زیرحوضه‌های بحرانی و جمع‌آوری اطلاعات پایه در مناطقی از کشور که فاقد آمار مستمر و قابل اتکا هستند، همواره یکی از چالش‌های اساسی در برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب و خاک محسوب می‌شود. استفاده از رویکردهای مبتنی بر تحلیل مورفومتری، به‌ویژه در چنین شرایطی، می‌تواند ابزاری مؤثر برای تعیین اولویت اقدامات حفاظتی در فازهای اولیه ارزیابی باشد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، به‌منظور اولویت‌بندی اقدامات حفاظت خاک و آبخیزداری، یازده زیرحوضه انجرد در استان آذربایجان شرقی با استفاده از پارامترهای مورفومتری مورد بررسی قرار گرفتند. برای کاهش پیچیدگی داده‌ها و شناسایی مهم‌ترین عوامل مؤثر، از روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) بهره گرفته شد. نتایج این تحلیل نشان داد که می‌توان تعداد پارامترهای مورفومتری را از ۱۵ شاخص اولیه به شش پارامتر کلیدی شامل تراکم زهکشی، نسبت گردی، نسبت انشعاب، فراوانی آبراهه، ضریب فشردگی، و انتگرال هیپسومتری کاهش داد، بدون آن که دقت یا کارایی نتایج کاهش یابد. مقایسه نتایج اولویت‌بندی زیرحوضه‌ها با استفاده از مجموعه کامل پارامترها و نیز با شش پارامتر منتخب، تطابق بالایی را نشان داد که بیانگر اثربخشی روش PCA در کاهش ابعاد داده‌ها و حفظ انسجام تحلیلی است. بر اساس این اولویت‌بندی، زیرحوضه A1-4 به‌عنوان بحرانی‌ترین منطقه و در صدر اولویت‌های اجرایی اقدامات مدیریتی در زمینه حفاظت از منابع آب و خاک قرار گرفت. پس از آن، زیرحوضه‌های A1-1، A1-3 و A2-1 در رده دوم اهمیت جای گرفتند.

به‌طور کلی، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که تحلیل پارامترهای مورفومتری، به‌ویژه در شرایطی که اطلاعات هیدرولوژیکی، رسوب‌سنجی یا داده‌های میدانی در دسترس نیست، می‌تواند رویکردی سریع، مقرون‌به‌صرفه و قابل‌اعتماد برای شناسایی زیرحوضه‌های بحرانی باشد. این روش قابلیت بالایی در پشتیبانی از تصمیم‌گیری‌های مدیریتی در سطوح اولیه برنامه‌ریزی دارد و می‌تواند زمینه‌ساز اجرای اقدامات مؤثر و هدفمند در حوضه‌های کشور، به‌ویژه در مناطق کوهستانی و دارای شرایط فیزیوگرافی پیچیده باشد. توصیه می‌شود در تحقیق‌های آینده، این روش با دیگر رویکردهای تصمیم‌گیری چندمعیاره و شاخص‌های هیدرولوژیکی ترکیب و اعتبارسنجی شود تا دقت و جامعیت ارزیابی‌ها افزایش یابد.

References

- Ameri, A. A., Pourghasemi, H. R., and Cerda, A. (2018). Erodibility prioritization of sub-watersheds using morphometric parameters analysis and its mapping: A comparison among TOPSIS, VIKOR, SAW, and CF multi-criteria decision making models. *Science of the Total Environment*, 613:1385-1400 .
- Amiri, M., Pourghasemi, H., and Arabameri, A. (2018). Prioritization of flood inundation sub-watersheds of Maharlo watershed in Fars Province using morphometric parameters and VIKOR decision making model, *Iranian Journal of Echydrologymm* 5 (3): 813-8527.
- Babaei Hessar, S., Hamdami, Q. and Ghasemieh, H. (2017). Identify the effective wells in determination of groundwater depth in Urmia Plain using Principal component analysis. *Iranian Journal of Water and Soil*, 31(1): 40-50 .
- Babaei Hessar, S., Ghazavi, R., and Erfanian, M. (2018). Urban flood simulation and prioritization of critical urban sub-catchments using SWMM model and PROMETHEE II approach. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 105, 3-11.
- Menbari, F., Maleki, A., and Hadi, N. (2023). Flood modeling in watersheds using statistical analysis and morphometric characteristics (a case study of watersheds in Kurdistan province). *Iranian Journal of Hydrogeomorphology*, 9(33):105-87 .
- Rezaei Moghaddam, M. H., Hejazi, A., Valizadeh, K., and Rahimpour, T. (2020). Flood Analysis of Subbasins Using WASPAS Model (Case Study: Aland Chai Basin, Northwest of Iran). *Iranian Journal of Hydrogeomorphology*, 7(24): 83-106 .
- Zabihi Silabi, M., Sadeghi, S. H., and Vafakhah, M. (2024). Soil Erosion Elasticity Initiative for Prioritizing Sub-Watersheds. *International Soil and Water Conservation Research*.
- Aouragh, M. H., and Essahlaoui, A. (2018). A TOPSIS approach-based morphometric analysis for sub-watersheds prioritization of high Oum Er-Rbia basin, Morocco. *Spatial Information Research*, 26:187-202 .
- Arefin, R., Mohir, M. M. I., and Alam, J. (2020). Watershed prioritization for soil and water conservation aspect using GIS and remote sensing: PCA-based approach at northern elevated tract Bangladesh. *Applied Water Science*, 10:1-19.
- Bisht, S., Chaudhry, S., Sharma, S., and Soni, S. (2018). Assessment of flash flood vulnerability zonation through Geospatial technique in high altitude Himalayan watershed, Himachal Pradesh India. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 12:35-47.
- Biswas, S., Sudhakar, S., and Desai, V. R. (1999). Prioritisation of subwatersheds based on morphometric analysis of drainage basin: A remote sensing and GIS approach. *Journal of the Indian society of remote sensing*, 27:155-166 .
- Faniran, A. (1968). The index of drainage intensity: a provisional new drainage factor. *Australian Journal of Science*, 31(9): 326-330.
- Gajbhiye, S., Mishra, S. K., and Pandey, A. (2014). Prioritizing erosion-prone area through morphometric analysis: an RS and GIS perspective. *Applied Water Science*, 4:51-61 .
- Govarthanambikai, K., and Sathyanarayan Sridhar, R. (2024). Prioritization of watershed using morphometric parameters through geospatial and PCA technique for Noyyal River Basin, Tamil Nadu, India. *Journal of Water and Climate Change*, 15(3):1218-1231 .

- Horton, R. E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geological society of America bulletin*, 56(3): 275-370 .
- Kherif, F., and Latypova, A. (2020). Principal component analysis. In *Machine learning*. Academic Press, 209-225.
- Langbein, W. B. (1947). Topographic characteristics of drainage basins (No. 968-C). USGPO.
- Malik, A., Kumar, A., Kushwaha, D. P., Kisi, O., Salih, S. Q., Al-Ansari, N., and Yaseen, Z. M. (2019). The implementation of a hybrid model for hilly sub-watershed prioritization using morphometric variables: Case study in India. *Water*, 11(6):1138 .
- Meshram, S. G., and Sharma, S. K. (2017). Prioritization of watershed through morphometric parameters: a PCA-based approach. *Applied Water Science*, 7:1505-1519 .
- Miller, V. C. (1953). A quantitative geomorphic study of drainage basin characteristics in the Clinch Mountain area, Virginia and Tennessee (Vol. 3). New York: Columbia University.
- Misra, A. K. (2014). Climate change and challenges of water and food security. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 3(1):153-165 .
- Nautiyal, M. D. (1994). Morphometric analysis of a drainage basin using aerial photographs: a case study of Khairkuli Basin, District Dehradun, UP. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 22:251-261 .
- Patton, P. C., and Baker, V. R. (1976). Morphometry and floods in small drainage basins subject to diverse hydrogeomorphic controls. *Water Resources Research*, 12(5):941-952 .
- Pike, R. J., and Wilson, S. E. (1971). Elevation-relief ratio, hypsometric integral, and geomorphic area-altitude analysis. *Geological Society of America Bulletin*, 82(4):1079-1084 .
- Rai, P. K., Mishra, V. N., and Mohan, K. (2017). A study of morphometric evaluation of the Son basin, India using geospatial approach. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 7:9-20 .
- Salem, N., and Hussein, S. (2019). Data dimensional reduction and principal components analysis. *Procedia Computer Science*, 163:292-299 .
- Schumm, S. A. (1956). Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey. *Geological Society of America Bulletin*, 67(5): 597-646 .
- Shaddoud, M. A., Costache, R., Kotaridis, I., Fereshtehpour, M., & Kuriqi, A. (2025). Flash flood prioritization assessment using morphometric analysis in the coastal region of the Eastern Mediterranean. *DYSONA-Applied Science*, 6(1), 172-185.
- Siddiqui, R., Said, S., and Shakeel, M. (2020). Nagmati River Sub-watershed prioritization using PCA, integrated PCWS, and AHP: A case study. *Natural Resources Research*, 29:2411-2430 .
- Singh, P., Gupta, A., and Singh, M. (2014). Hydrological inferences from watershed analysis for water resource management using remote sensing and GIS techniques. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 17(2):111-121 .
- Smith, K. G. (1950). Standards for grading texture of erosional topography. *American Journal of Science*, 248(9):655-668.
- Strahler, A. N. (1964). Quantitative geomorphology of drainage basin and channel networks. *Handbook of Applied Hydrology*.