



Prioritization of Sub-Basins Based on Flood Potential Using Multi-Criteria Decision-Making Methods (Fakhrabad Watershed, Yazd, Iran)

Ehsan Bazrafshan¹ , Hossein Malekinezhad² *, Seyed Zeynalabedin Hosseini³
Mehdi Sepehri⁴

1. PhD student in Watershed Science and Engineering, Faculty of Natural Resources and Desert Studies, University of Yazd, Iran. Email: Ehsan.bazrafshan71@gmail.com.
2. Associate Professor, Faculty of Natural Resources and Desert Studies, University of Yazd, Iran (Corresponding Author). Email: hmalekinezhad@yazd.ac.ir.
3. Associate Professor, Faculty of Natural Resources and Desert Studies, University of Yazd, Iran. Email: zhosseini@yazd.azc.ir.
4. PhD in Watershed Science and Engineering, Range Department Expert, Forests and Rangelands Research Institute, Iran. Email: sepehri_mehdi@ymail.com.

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 13 July 2026

Revised 07 August 2026

Accepted 24 August 2026

Available online 23

September 2026

Keywords:

Sub-basin prioritization

Analytic Hierarchy Process

(AHP)

Best-Worst Method (BWM)

IRNAHP method

Fakhrabad watershed

ABSTRACT

Research Topic: Prioritization of Sub-Basins Based on Flood Potential Using Multi-Criteria Decision-Making Methods (Fakhrabad Watershed, Yazd, Iran)

Objective: Flooding is a serious challenge in the Fakhrabad watershed (Yazd Province, Iran), causing significant damage to infrastructure and agricultural lands. This study aimed to identify and prioritize flood-prone sub-basins in this area.

Method: Eight effective criteria including DEM, slope, rainfall, fractal dimension, connectivity index, topographic saturation rate, topographic control index, and stream power index were selected. Three multi-criteria decision-making methods (AHP, BWM, and IRNAHP) were used for weighting and ranking the sub-basins. Finally, the SWAT model output was used as a reference for comparison.

Results: The AHP method identified sub-basins 4, 3, 31, 27, and 29 as the most flood-prone but showed low accuracy. The BWM method, with a reduced number of pairwise comparisons, provided higher accuracy and ranked sub-basins 4, 3, 31, 27, and 24 as having the highest flood potential. The IRNAHP method, using interval rough numbers, produced the most accurate results, identifying sub-basins 4, 3, 31, 27, and 24 as the most flood-prone areas.

Conclusions: Although the IRNAHP method yielded the most accurate results, considering ease of application and computational efficiency, the BWM method is recommended as an efficient and practical approach for flood hazard zoning in arid and semi-arid regions.

Cite this article: Bazrafshan, E., Malekinezhad, H., Hosseini, S., Sepehri, M. (2026). Prioritization of Sub-Basins Based on Flood Potential Using Multi-Criteria Decision-Making Methods (Fakhrabad Watershed, Yazd, Iran). *Journal of ECOHYDROLOGY*, 13(3), 1539-1563.



<https://doi.org/10.22059/ije.2025.400762.1881>

© Ehsan Bazrafshan, Hossein Malekinezhad, Seyed Zeynalabedin Hosseini, Mehdi Sepehri.

Publisher: University of Tehran Press

DOI: <https://doi.org/10.22059/ije.2025.400762.1881>

Extended Abstract

Introduction

Flooding is one of the major natural hazards affecting human settlements, infrastructure, agricultural lands, and natural resources. The spatially heterogeneous nature of flood-generating processes makes the identification of areas with higher flood potential an important component of watershed management and flood-risk reduction. This issue is particularly important in arid and semi-arid regions, where highly variable precipitation, steep topography, limited vegetation cover, and concentrated rainfall events can generate rapid runoff and localized flooding. Therefore, identifying and prioritizing sub-basins according to their relative flood potential can provide a practical basis for watershed planning and the allocation of flood-control measures.

Flood susceptibility and hazard assessment commonly involve multiple physiographic, hydrologic, and geomorphological factors. Because these factors have different dimensions and relative effects on runoff generation and flood response, multi-criteria decision-making (MCDM) methods have increasingly been used to integrate them within a spatial framework. The Analytic Hierarchy Process (AHP) is one of the most widely used approaches; however, conventional AHP may require a relatively large number of pairwise comparisons and can be sensitive to uncertainty in expert judgments. The Best-Worst Method (BWM) reduces the number of required pairwise comparisons by focusing on the best and worst criteria. The Interval Rough Number AHP (IRNAHP) approach further provides a mechanism for representing uncertainty and imprecision in expert judgments through interval rough numbers rather than fuzzy numbers.

The Fakhrabad watershed in Yazd Province, Iran, is exposed to flood-related hazards, making the identification of relatively flood-prone sub-basins important for watershed management. The present study aimed to identify and prioritize the sub-basins of the Fakhrabad watershed according to their flood potential and to compare the performance of three MCDM approaches, namely AHP, BWM, and IRNAHP. An additional objective was to evaluate the consistency of the resulting prioritizations against the spatial information obtained from the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) hydrological model.

Materials and Methods

Study framework

The study was conducted in the Fakhrabad watershed, located in Yazd Province, central Iran. The watershed covers an area of about 20,014 ha, has a mean elevation of approximately 2,720 m and a mean annual precipitation of about 205 mm. Using contour lines at a scale of 1:25,000 together with a 30 m digital elevation model, the watershed was divided into 31 sub-basins, and the spatial flood potential of each sub-basin was assessed using a combination of topographic, rainfall, geomorphological, and hydrological indicators. The overall methodological framework consisted of four main stages: (1) preparation of spatial flood-related criteria, (2) weighting of criteria using three MCDM approaches, (3) calculation and ranking of the flood potential of the sub-basins, and (4) comparison of the resulting rankings with SWAT model outputs.

Selection and preparation of flood-potential criteria

Eight criteria relevant to flood generation and concentration were selected: digital elevation model (DEM), slope, rainfall, fractal dimension of the drainage network, index of connectivity, topographic wetness index (TWI), topographic control index (TCI), and stream power index (SPI).

The DEM served as the basis for deriving slope and other terrain-related indices. Rainfall distribution was included because precipitation directly affects the amount and temporal concentration of surface runoff. The fractal dimension characterized drainage-network complexity, while the index of connectivity represented the degree to which runoff and sediment are transferred through the drainage system. TWI described spatial variations in soil-moisture accumulation and saturation potential, and TCI represented the influence of terrain configuration—particularly depressions and irregularities—on flow concentration and hydrological response. SPI characterized the potential energy and erosive power of flowing water as a function of contributing area and slope.

The 30 m DEM was processed in ArcGIS 10.7 to derive the required topographic and hydrological layers. Criteria were standardized according to their relationship with flood potential and incorporated into the MCDM framework.

Multi-criteria decision-making methods

Three MCDM approaches were applied to determine criterion weights and rank the sub-basins.

The Analytic Hierarchy Process (AHP) was applied by constructing pairwise comparison matrices for the selected criteria using the 1-9 Saaty scale. Relative importance was determined through expert judgments, the consistency ratio of each matrix was checked, and the resulting weights were used to calculate the flood-potential score of each sub-basin. With eight criteria, each expert completed 28 pairwise comparisons.

The Best-Worst Method (BWM) was used as an alternative weighting approach. The most and least important criteria are first identified, after which the best criterion is compared with the others and the others with the worst criterion, and optimal weights are obtained by solving a min-max linear programming model. For eight criteria this requires only 13 comparisons per expert instead of 28, simplifying the decision-making process and limiting the inconsistency introduced by redundant comparisons.

The Interval Rough Number AHP (IRNAHP) method was also applied to account for uncertainty in expert judgments. Interval rough numbers represent uncertain assessments through lower and upper approximation intervals rather than single crisp values, allowing each expert to provide two values when hesitating between adjacent points of the Saaty scale. Consistency ratios were computed separately for the lower and upper approximations and averaged, and the weighted criteria were integrated into a flood-potential score and priority ranking. For each method, the standardized criteria and their weights were combined into an overall flood-potential index, and the sub-basins were ranked from higher to lower flood potential.

SWAT modelling and comparative assessment

The Soil and Water Assessment Tool (SWAT) was used as an independent hydrological reference for evaluating the spatial prioritization produced by the MCDM approaches. The model represented major components of the hydrological cycle, including precipitation, evapotranspiration, infiltration, surface runoff, percolation, and baseflow, with runoff simulated via the SCS Curve Number (SCS-CN) approach and evapotranspiration estimated using the Penman-Monteith method. Input data comprised the 30 m DEM, land-use and soil maps, daily meteorological records, and monthly discharge data from the hydrometric station at the watershed outlet.

Model calibration and uncertainty analysis were conducted using the SUFI-2 algorithm within SWAT-CUP, with calibration over 1998-2013 and validation over an independent period (2014-2022). Performance was assessed using the Nash-Sutcliffe efficiency (NSE) and the coefficient of determination (R^2). The spatially distributed SCS-CN values from the calibrated model, reflecting the combined effect of land use, vegetation cover, soil and slope on runoff generation, were then used to derive a sub-basin flood-potential reference map for assessing agreement with the MCDM-based prioritizations.

Results

The results demonstrated that the three MCDM methods produced broadly similar spatial patterns in the identification of high-priority sub-basins, although differences were observed in the final ranking of some sub-basins. The SWAT simulations provided the hydrological basis for evaluating the MCDM results. The model showed acceptable performance, with NSE and R^2 of 0.71 and 0.72 during calibration and 0.70 and 0.72 during validation, corresponding to a "good" and an "acceptable" performance class, respectively, according to the criteria of Moriasi et al. (2007). On this basis, sub-basins 4, 3, 31, 27, and 24 were identified as the areas with the highest runoff-generation potential, whereas sub-basins 15, 22, 14, 21, and 19 showed the lowest values.

The AHP method identified sub-basins 4, 3, 31, 27, and 29 as the five highest-priority sub-basins in terms of flood potential, while sub-basins 15, 22, 14, 21, and 6 were ranked lowest. However, comparison with the SWAT-based reference indicated that the AHP-based prioritization had lower agreement with the hydrological results than the other approaches. The BWM method produced a different fifth-ranked sub-basin. The five highest-priority sub-basins identified by BWM were 4, 3, 31, 27, and 24, and the lowest-priority sub-basins were 15, 22, 21, 14, and 19. The first four priority sub-basins were therefore consistent with those obtained from AHP, while sub-basin 24 replaced sub-basin 29 among the highest-priority areas. The BWM results showed a higher degree of agreement with the SWAT reference than the conventional AHP results.

The IRNAHP method also identified 4, 3, 31, 27, and 24 as the highest-priority sub-basins and 15, 22, 14, 21, and 19 as the lowest-priority ones. The resulting spatial pattern showed the highest agreement with the SWAT-based reference among the three MCDM approaches, with differences relative to BWM confined to intermediate ranking positions. This result indicates that incorporating uncertainty in the weighting process through interval rough

numbers can improve the representation of expert judgments and consequently enhance the correspondence between MCDM-based prioritization and hydrological response.

The repeated identification of sub-basins 4, 3, 31, and 27 among the highest-priority areas across the different methods indicates that these sub-basins possess a relatively consistent combination of the characteristics represented by the selected flood-related criteria. In contrast, the difference between sub-basins 24 and 29 demonstrates the sensitivity of lower-ranked priority positions to the choice of weighting method.

Discussion

The results demonstrate the importance of the weighting procedure in spatial flood prioritization. Although all three approaches used the same eight flood-related criteria, their different approaches to representing expert preferences resulted in differences in the final ranking of some sub-basins.

The conventional AHP approach is straightforward and widely applicable; however, the large number of pairwise comparisons can increase the burden on decision-makers and may introduce inconsistencies into the weighting process. In the present study, this limitation was reflected in the comparatively lower agreement of the AHP-based ranking with the SWAT reference.

The BWM approach reduced the number of pairwise comparisons by requiring judgments primarily in relation to the best and worst criteria. This characteristic makes BWM potentially attractive for practical watershed applications in which expert time and computational resources are limited. In the present study, BWM produced a priority pattern closer to the hydrological reference than conventional AHP.

The IRNAHP approach provided the highest agreement with the SWAT-based reference. One possible explanation is its ability to represent uncertainty associated with expert judgments through interval rough numbers rather than relying exclusively on precise numerical comparisons. Flood generation is controlled by interacting processes and spatially variable watershed characteristics; consequently, representing uncertainty in the weighting stage may improve the robustness of the resulting prioritization. This advantage, however, is obtained at the cost of a considerably larger number of judgments, since each expert must provide interval-valued responses for all 28 comparisons.

The consistency of sub-basins 4, 3, 31, and 27 among the highest-priority areas is particularly important from a watershed-management perspective. These areas can be considered priority locations for more detailed hydrological investigation and for the planning of structural and non-structural flood mitigation measures. Nevertheless, the results should be interpreted as a relative prioritization of sub-basins, rather than as a direct estimation of flood discharge or flood depth. The integration of MCDM techniques with hydrological modelling can therefore provide a useful screening framework for identifying locations where more detailed flood studies should be concentrated.

The comparison also highlights the complementary nature of MCDM and hydrological modelling. MCDM methods are capable of integrating multiple spatial criteria and expert knowledge, whereas SWAT provides a process-based representation of watershed hydrological response. Because observed discharge data were available only at the watershed outlet, the spatially distributed SWAT outputs also made it possible to evaluate sub-basin-scale priorities that could not be verified with the available measurements. Using SWAT as an independent reference therefore provides a means of assessing whether the spatial priorities derived from expert-based criteria are consistent with simulated runoff behaviour.

Conclusions

This study developed and evaluated an MCDM-based framework for prioritizing sub-basins according to their flood potential in the Fakhrabad watershed of Yazd Province, Iran. Eight flood-related criteria, including DEM, slope, rainfall, drainage-network fractal dimension, index of connectivity, topographic wetness index, topographic control index, and stream power index, were integrated using AHP, BWM, and IRNAHP. The results showed that the AHP approach identified sub-basins 4, 3, 31, 27, and 29 as the highest-priority areas, whereas both BWM and IRNAHP identified sub-basins 4, 3, 31, 27, and 24. Comparison with SWAT outputs indicated that IRNAHP provided the highest agreement with the hydrological reference, suggesting that the representation of uncertainty in expert judgments can improve flood-potential prioritization.

Although IRNAHP produced the most accurate results in the present study, BWM offers an efficient alternative because it requires fewer pairwise comparisons and is relatively straightforward to implement. Therefore, for practical flood-hazard prioritization in arid and semi-arid watersheds, BWM can provide a useful balance between methodological simplicity and agreement with hydrological modelling results. The proposed framework can support watershed managers in identifying priority sub-basins for further investigation, monitoring, and flood-risk reduction. However, the ranking should be considered a screening and prioritization tool and should be complemented by detailed hydrodynamic and flood-inundation modelling where site-specific design or risk assessment is required.

Acknowledgements

The authors gratefully acknowledge the experts who participated in the pairwise comparisons for criteria weighting.

Funding

This article is extracted from the PhD dissertation of the first author at Yazd University, and received no specific grant from any funding agency in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Author's contributions

E. Bazrafshan (PhD candidate): conceptualization, methodology, software, data curation, formal analysis, investigation, and writing original draft, as part of his PhD dissertation. H. Malekinezhad (main supervisor and corresponding author): conceptualization, supervision, project administration, validation, and writing, review and editing. S.Z. Hosseini (second supervisor): supervision, methodology, and review and editing. M. Sepehri (advisor): methodology, formal analysis, and writing, review and editing. All authors read and approved the final manuscript.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Ethical considerations

The authors have observed ethical issues, including plagiarism, data fabrication and falsification, double publication or submission, and redundancy.

Data availability statement

The data supporting the findings of this study are available from the corresponding author upon reasonable request.



اولویت‌بندی زیرحوضه‌ها بر اساس پتانسیل سیل‌خیزی با بهره‌گیری از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (حوضه آبخیز فخرآباد یزد)

احسان بذرافشان^۱، حسین ملکی نژاد^{۲*}، سید زین‌العابدین حسینی^۳، مهدی سپهری^۴

۱. دانشجوی دکتری رشته علوم و مهندسی آبخیز، دانشکده منابع طبیعی و کویرشناسی، دانشگاه یزد، ایران. رایانامه: Ehsan.bazrafshan71@gmail.com

۲. دانشیار، دانشکده منابع طبیعی و کویرشناسی، دانشگاه یزد، ایران (نویسنده مسئول). رایانامه: hmalekinezhad@yazd.ac.ir

۳. دانشیار، دانشکده منابع طبیعی و کویرشناسی، دانشگاه یزد، ایران. رایانامه: zhosseini@yazd.ac.ir

۴. دکتری رشته علوم و مهندسی آبخیز، کارشناس بخش مرتع، مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، ایران. رایانامه: sepehri_mehdi@ymail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: پژوهشی	موضوع: اولویت‌بندی زیرحوضه‌ها بر اساس پتانسیل سیل‌خیزی با بهره‌گیری از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (حوضه آبخیز فخرآباد یزد)
تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۴/۲۲	هدف: سیلاب یکی از چالش‌های جدی در حوضه آبخیز فخرآباد (استان یزد) است که خسارت‌های قابل توجهی به زیرساخت‌ها و اراضی وارد می‌کند. این پژوهش با هدف شناسایی و اولویت‌بندی زیرحوضه‌های مستعد تولید سیلاب در این حوضه انجام شد.
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۵/۱۶	روش تحقیق: هشت معیار مؤثر شامل DEM، شیب، بارندگی، شاخص فراکتال، شاخص پیوستگی، نرخ اشباع توپوگرافی، شاخص کنترل توپوگرافی و قدرت جریان انتخاب شدند. برای وزن‌دهی و رتبه‌بندی زیرحوضه‌ها، سه روش تصمیم‌گیری چندمعیاره AHP، BWM و IRNAHP به کار رفت. در گام نهایی، خروجی مدل SWAT به عنوان مرجع مقایسه استفاده شد.
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۰۲	یافته‌ها: روش AHP زیرحوضه‌های ۳، ۴، ۳۱ و ۲۷ را پرخطرترین معرفی کرد، اما دقت پایینی داشت. روش BWM با کاهش تعداد مقایسه‌های زوجی، دقت بیشتری داشت و زیرحوضه‌های ۴، ۳، ۳۱ و ۲۷ را در اولویت بالای سیل‌خیزی قرار داد.
تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۷/۰۱	روش IRNAHP با استفاده از اعداد بازه‌ای، دقیق‌ترین نتایج را ارائه داد و زیرحوضه‌های ۴، ۳، ۳۱ و ۲۷ را به عنوان سیل‌خیزترین مناطق شناسایی کرد.
کلیدواژه‌ها: اولویت‌بندی زیرحوضه‌ها، فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی، روش BWM، روش IRNAHP، حوضه فخرآباد.	نتیجه‌گیری: روش IRNAHP دقیق‌ترین نتایج را دارد، اما با توجه به سهولت کاربرد و کاهش زمان محاسبات، روش BWM به عنوان گزینه‌ای کارآمد برای پهنه‌بندی خطر سیل در مناطق خشک و نیمه‌خشک توصیه می‌شود.

استناد: بذرافشان، احسان؛ ملکی نژاد، حسین؛ حسینی، سید زین‌العابدین. اولویت‌بندی زیرحوضه‌ها با بهره‌گیری از پتانسیل سیل‌خیزی با بهره‌گیری از



روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (حوضه آبخیز فخرآباد یزد). مجله کوهپدولوژی، ۱۳(۳)، ۱۵۳۹-۱۵۶۳.

<https://doi.org/10.22059/ije.2025.400762.1881>

ناشر: انتشارات دانشگاه تهران. © احسان بذرافشان، حسین ملکی نژاد، سید زین‌العابدین حسینی، مهدی سپهری.

چکیده

سیلاب یکی از چالش‌های جدی در حوضه آبخیز فخرآباد واقع در استان یزد، به شمار می‌رود که به‌ویژه از منظر اقتصادی، خسارت‌های قابل توجهی را به زیرساخت‌ها و اراضی وارد می‌سازد. از این رو، شناسایی و اولویت‌بندی مناطق مستعد تولید سیلاب در این حوضه می‌تواند نقش مؤثری در برنامه‌ریزی و اجرای اقدامات حفاظتی در زمینه‌های کنترل سیلاب، حفاظت خاک و مدیریت منابع آب ایفا کند. در این پژوهش، به منظور اولویت‌بندی زیرحوضه‌های منطقه تحت مطالعه از نظر میزان سیل‌خیزی، هشت معیار مؤثر شامل مدل رقومی ارتفاع (DEM)، شیب، بارندگی، شاخص فراکتال، شاخص پیوستگی، نرخ اشباع توپوگرافی، شاخص کنترل توپوگرافی و قدرت جریان انتخاب و تحلیل شدند. به منظور وزن‌دهی و رتبه‌بندی زیرحوضه‌ها، از سه روش تصمیم‌گیری چندمعیاره شامل فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP)، روش بهترین - بدترین (BWM) و روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی اصلاح‌شده با اعداد بازه‌ای IRNAHP استفاده شد. در گام نهایی، به منظور ارزیابی دقت و صحت نتایج حاصل از این روش‌ها، خروجی مدل شبیه‌سازی SWAT به عنوان مرجع مقایسه مورد استفاده قرار گرفت. یافته‌های حاصل از روش AHP نشان داد زیرحوضه‌های شماره ۴، ۳، ۳۱، ۲۷ و ۲۹ دارای بالاترین پتانسیل سیل‌خیزی هستند، در حالی که زیرحوضه‌های ۱۵، ۲۲، ۱۴، ۲۱ و ۶ کمترین میزان خطر سیل‌خیزی را به خود اختصاص دادند. با این حال، دقت کلی این روش پایین ارزیابی شد؛ زیرا تعدد مقایسه‌های زوجی موجب افزایش عدم قطعیت در فرایند وزن‌دهی به معیارها شد. در روش BWM، که با ساختار ساده‌تری نسبت به AHP همراه است، زیرحوضه‌های ۴، ۳، ۳۱، ۲۷ و ۲۴ در بالاترین سطح سیل‌خیزی و زیرحوضه‌های ۱۵، ۲۲، ۲۱، ۱۴ و ۱۹ در پایین‌ترین سطح قرار گرفتند. کاهش قابل ملاحظه در تعداد مقایسه‌های زوجی در این روش، به کاهش ابهام در تصمیم‌گیری و افزایش دقت نسبت به AHP منجر شد. در روش IRN-AHP، نتایج با BWM تطابق زیادی داشت و زیرحوضه‌های ۴، ۳، ۳۱، ۲۷ و ۲۴ به عنوان سیل‌خیزترین و زیرحوضه‌های ۱۵، ۲۲، ۱۴، ۲۱ و ۱۲ به عنوان کم‌خطرترین مناطق شناسایی شدند. ویژگی بارز این روش، امکان تعیین وزن معیارها به صورت بازه‌ای با استفاده از اعداد فازی نامعین بود که موجب کاهش عدم قطعیت ذاتی قضاوت‌های انسانی و افزایش دقت نهایی شد. مقایسه نتایج IRN-AHP با داده‌های مدل مرجع و مطالعات پیشین نیز بیانگر عملکرد دقیق‌تر این روش در اولویت‌بندی مناطق سیل‌خیز بود. در مجموع، با وجود آنکه IRN-AHP دقیق‌ترین نتایج را ارائه داد، با در نظر گرفتن سهولت کاربرد، کاهش زمان محاسبات و کاهش تعداد مقایسات زوجی، روش BWM به عنوان گزینه‌ای کارآمد و عملی برای پهنه‌بندی خطر سیل در مناطق خشک و نیمه‌خشک توصیه می‌شود.

مقدمه

بلایای طبیعی در سال‌های اخیر به عنوان یکی از چالش‌های مهم جهانی و منطقه‌ای شناخته شده‌اند و آثار اجتماعی، اقتصادی و محیط زیستی گسترده‌ای به همراه دارند. پژوهش‌ها نشان می‌دهند فرکانس و شدت بلایای طبیعی طی چند دهه گذشته، تحت تأثیر تغییرات اقلیمی و گرمایش جهانی، افزایش چشمگیری یافته است (اسلام^۱ و همکاران، ۲۰۲۵). در میان بلایای طبیعی، سیل به عنوان یکی از حوادث شایع و ویران‌کننده شناخته می‌شود که جان هزاران نفر را می‌گیرد و خسارت‌های مالی میلیارد دلاری به جوامع وارد می‌کند؛ علاوه بر آن، تأثیرات منفی قابل توجهی بر اکوسیستم‌ها دارد (آجین^۲ و همکاران، ۲۰۲۵؛ جهان و همکاران، ۲۰۲۵). براساس پایگاه داده بین‌المللی بلایای طبیعی (EM-DAT)، طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۹، از مجموع ۷۳۴۸ رخداد بلایای طبیعی، ۳۲۵۴ مورد مربوط به سیلاب‌ها بوده است که ۴۴ درصد از کل بلایا را تشکیل می‌دهد و خسارت‌های اقتصادی ناشی از آن‌ها حدود ۶۵۱ میلیارد دلار برآورد شده است (ون لونه‌اوت، بلو و مک‌کلین، ۲۰۲۰). ایران نیز از جمله کشورهایی است که بخش‌های وسیعی از آن در معرض خطر سیل قرار دارند. در سال‌های اخیر، سیلاب‌های مخرب به دلیل تغییرات اقلیمی و مدیریت ناکافی حوضه‌های آبخیز، از جمله جنگل‌زدایی، چرای بیش از حد و عدم انجام اقدامات پیشگیرانه، خسارت‌های گسترده‌ای به بار آورده‌اند. برای نمونه، سیلاب‌های زمستان ۱۳۹۷ و بهار ۱۳۹۸ در ۲۵ استان ایران، ۷۷ کشته و حدود ۲/۲ میلیارد دلار خسارت مالی به جا گذاشتند

1. Islam

2. Ajin

3. VanLoenhout, Below, & McClean

(خسروی و همکاران، ۲۰۱۹). رشد جمعیت، تغییر الگوی بارندگی، توسعه اقتصادی و تغییرات اقلیمی از مهم‌ترین عوامل افزایش فرکانس و شدت سیلاب‌ها در سطح جهانی و ایران هستند. پهنه‌بندی خطر سیلاب به عنوان یکی از ابزارهای مؤثر برای کاهش خسارت‌های ناشی از سیل مطرح است و ترکیب سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) با روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDA) در این زمینه کاربرد گسترده‌ای یافته است. میان روش‌های مختلف MCDA، تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) بیشترین استفاده را در ارزیابی و پهنه‌بندی سیل‌خیزی داشته است و مطالعات متعدد نشان می‌دهند این روش در شناسایی مناطق پرخطر با دقت مناسبی عمل می‌کند. برای نمونه، محمود و گن (۲۰۱۸) با استفاده از روش AHP و ۱۰ شاخص مهم، مناطق مستعد سیلاب را شناسایی کردند و نقشه‌های تولیدشده با رخدادهای تاریخی سیل هم‌پوشانی بالایی داشتند. پژوهش‌های دیگر نیز مانند جهان^۱ و همکاران (۲۰۲۵)، شارکر^۲ و همکاران (۲۰۲۵) و چیکماز، بیلدیریم و دمیر (۲۰۲۵) نشان می‌دهند ترکیب GIS و روش‌های سلسله‌مراتبی تحلیلی می‌تواند به شناسایی و اولویت‌بندی مناطق پرخطر و هدایت برنامه‌ریزی‌های شهری و کشاورزی کمک کند.

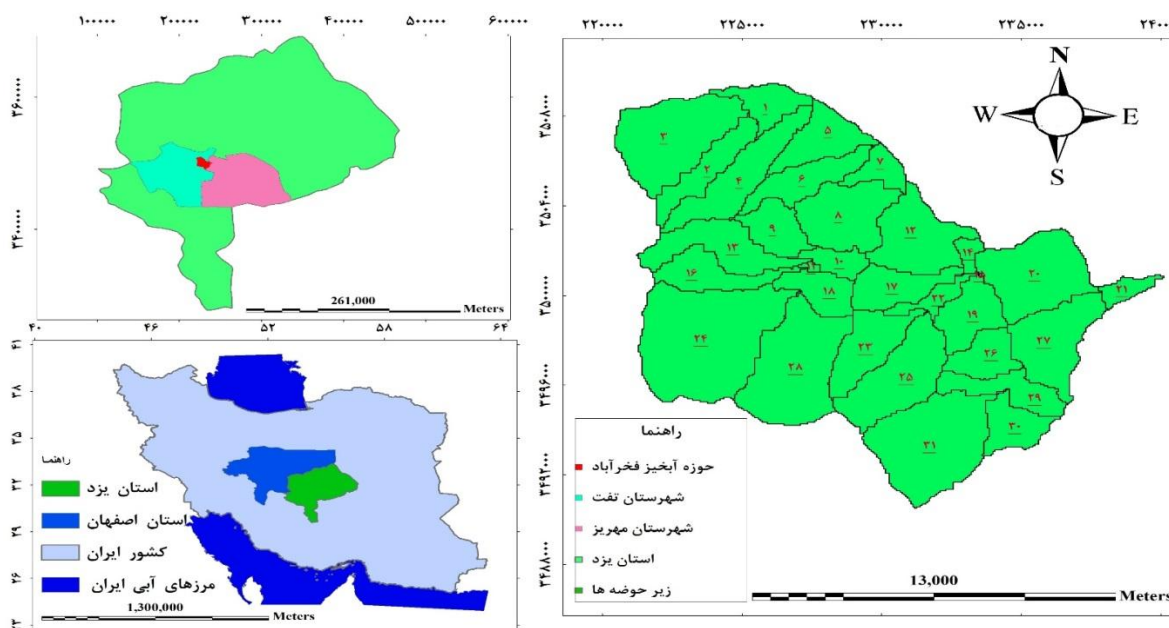
با وجود پیشرفت‌های علمی، هنوز در پیش‌بینی دقیق زمان و شدت سیلاب‌ها محدودیت وجود دارد و واکنش‌های مدیریتی غالباً پس از وقوع بلایا صورت می‌گیرد. این مسئله اهمیت توسعه و به‌کارگیری روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره در مدیریت پیشگیرانه سیلاب را دوچندان می‌کند. بررسی مطالعات گذشته نشان می‌دهد با وجود کاربرد گسترده AHP و مدل‌های SWAT در ارزیابی سیل‌خیزی، نیاز به تلفیق شاخص‌های محلی، ارزیابی زیرحوضه‌ای و توجه به اثرات مداخلات انسانی بر حوضه‌ها همچنان وجود دارد؛ این امر شکاف تحقیقاتی اصلی در این زمینه را مشخص می‌سازد.

حوضه فخرآباد در استان یزد به دلیل شرایط اقلیمی خاص و تغییرات کاربری اراضی، یکی از حوضه‌های حساس در برابر سیل است و افزایش فراوانی و شدت سیلاب‌ها در آن مشاهده شده است. هدف اصلی این مطالعه، استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDA) برای شناسایی و اولویت‌بندی زیرحوضه‌های مستعد سیل‌خیزی در حوضه فخرآباد است. نتایج این پژوهش می‌تواند به انجام بهینه عملیات آبخیزداری و مدیریت پیشگیرانه سیلاب کمک کند و خسارت‌های جانی و مالی ناشی از سیلاب‌ها را به حداقل برساند.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبخیز فخرآباد، یکی از زیرحوضه‌های دشت یزد - اردکان در استان یزد، در دامنه شرقی رشته‌کوه شیرکوه بین طول جغرافیایی ۵۴ درجه و ۲ دقیقه تا ۵۴ درجه و ۱۵ دقیقه شرقی و عرض ۳۱ درجه و ۳۱ دقیقه تا ۳۱ درجه و ۴۱ دقیقه شمالی قرار دارد. این حوضه با مساحتی حدود ۲۰۰۱۴ هکتار و متوسط ارتفاع ۲۷۲۰ متر، متوسط بارندگی سالانه حدود ۲۰۵ میلی‌متر بارش دریافت می‌کند. آب ناشی از بارش‌های برف و باران از طریق رودخانه‌های فصلی به دشت ابراهیم‌آباد منتقل می‌شود. بارش‌ها در مناطق بالادستی مانند ده بالا بیشتر به صورت برف با میانگین ۳۰۰ میلی‌متر و در مناطق پایین‌دست مانند روستای فخرآباد عمدتاً به صورت باران و حدود ۱۰۰ میلی‌متر است که ناشی از اختلاف ارتفاع حدود ۲۲۷۵ متر در حوضه است.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی حوضه آبخیز فخرآباد در ایران و استان یزد

در این مطالعه، به منظور اولویت‌بندی زیرحوضه‌ها براساس شاخص سیل‌خیزی، ابتدا هشت پارامتر مؤثر شامل شاخص پیوستگی زهکش‌ها، مدل رقومی ارتفاعی (DEM)، شاخص فراکتال، ظرفیت نگهداشت آب حوضه، شاخص اشباع خاک، شیب و بارش، براساس منابع موجود محاسبه شد. سپس با به‌کارگیری سه روش تصمیم‌گیری چندمعیاره شامل فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP)، روش بهترین — بدترین (BWM) و روش IRNAHP، اولویت‌بندی زیرحوضه‌ها انجام شد. درنهایت، برای ارزیابی صحت نتایج، خروجی مدل شبیه‌سازی SWAT به عنوان معیار مرجع مورد استفاده قرار گرفت.

روش‌ها

در این مطالعه، سه روش تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDA) شامل دو روش نوین و یک روش متداول، برای تهیه نقشه حساسیت سیلاب براساس معیارهای مرتبط با سیلاب به کار گرفته شدند. مراحل اصلی اجرای این روش‌ها به شرح زیر است:

مراحل تعیین شاخص‌های مرتبط با سیلاب

ارزیابی دقیق مخاطرات سیلاب مستلزم انتخاب شاخص‌های مناسب و مرتبط با پدیده سیلاب است. با توجه به پیچیدگی ماهیت سیلاب‌ها، انتخاب این شاخص‌ها همواره موضوعی مورد بحث و بررسی‌های علمی بوده است (عبدالله، سراج و هاجت، ۲۰۲۱؛ سامانتا^۲ و همکاران، ۲۰۱۶).

در این پژوهش، با انجام بررسی نظام‌مند منابع علمی پیشین، بهره‌گیری از دیدگاه کارشناسان حوضه و در نظر گرفتن قابلیت دسترسی به داده‌های مکانی، هشت شاخص کلیدی مرتبط با پدیده سیلاب استخراج و جمع‌آوری شد. قابل توجه است که شاخص‌های نرخ اشباع‌پذیری توپوگرافی و شاخص فراکتال به صورت غیرمستقیم، تأثیر عوامل نفوذناپذیری سطح بر گسترش سیلاب را نمایان می‌سازند. این مجموعه لایه‌های موضوعی به عنوان ویژگی‌های مکانی تعیین شدند و داده‌های رستری آن‌ها به عنوان ورودی‌های اصلی در چارچوب روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDA) مورد استفاده قرار گرفتند.

شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI¹)

شاخص رطوبت توپوگرافی به عنوان معیاری کمی برای سنجش تأثیر توپوگرافی بر تولید و توزیع رواناب سطحی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این شاخص با ترکیب داده‌های شیب زمین و مقدار تجمع جریان، توانایی شناسایی مناطق با احتمال تجمع بالای رطوبت خاک را دارد و به طور مؤثری می‌تواند نقاط مستعد وقوع سیلاب را تعیین کند. به این ترتیب، TWI به عنوان ابزاری کلیدی در تحلیل‌های هیدرولوژیکی برای پیش‌بینی حساسیت مکانی به رواناب و سیلاب به کار گرفته می‌شود (سپهری و همکاران، ۲۰۲۴).

شاخص کنترل توپوگرافی (TCI²)

شاخص کنترل توپوگرافی بیانگر تأثیر فرورفتگی‌ها و ناهمواری‌های سطح زمین بر جریان و تجمع آب است. نواحی دارای فرورفتگی‌های عمیق‌تر که سریع‌تر آب را جمع‌آوری می‌کنند، در معرض خطر بالاتری از وقوع سیلاب‌های ناشی از بارش قرار دارند. این شاخص به عنوان یکی از ابزارهای متداول در شناسایی مناطق آسیب‌پذیر نسبت به تجمع آب و سیلاب به کار گرفته می‌شود (سپهری و همکاران، ۲۰۲۴).

در این مطالعه نقشه شاخص کنترل توپوگرافی از رابطه ۱ و در محیط نرم‌افزار ArcGIS نسخه ۱۰/۸ استخراج شد.

$$TCI = \ln(A \times S^{\frac{1}{2}}/V) \quad (1)$$

که در آن، A مساحت حوضه، S میانگین شیب و V حجم تجمع آب است.

مدل رقومی ارتفاع و شیب

با توجه به نقش تعیین‌کننده ارتفاع و شیب در هدایت جریان آب و عمق رواناب سطحی، این دو شاخص به عنوان پارامترهای کلیدی و بنیادی در تحلیل‌های مرتبط با سیلاب شناخته می‌شوند (سامانتا و همکاران، ۲۰۱۶). براساس تحقیقات گذشته، رابطه‌ای معکوس بین این شاخص‌ها و میزان نفوذپذیری خاک و طول مدت وقوع سیلاب وجود دارد؛ به گونه‌ای که در بخش‌های بالادست حوضه، افزایش شیب و ارتفاع موجب تشدید جریان‌های سطحی و تجمع آب در این مناطق می‌شود که در نهایت به وقوع سیلاب در نواحی پایین‌دست منجر می‌شود. مدل رقومی ارتفاع (DEM) با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر و مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ از اداره کل منابع طبیعی استان یزد تهیه شد. همچنین، نقشه شیب براساس DEM با بهره‌گیری از ابزار شیب در نرم‌افزار ArcGIS نسخه ۱۰/۸ استخراج شد.

شاخص قدرت جریان (SPI³)

این شاخص به منظور سنجش میزان انرژی و شدت جریان آب در نقاط مشخصی از حوضه‌های آبخیز به کار می‌رود. مشابه شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI)، شاخص SPI نیز تحت تأثیر مساحت حوضه بالادست و زاویه شیب قرار دارد؛ به طوری که با افزایش این عوامل، حجم آب تجمع یافته و سرعت جریان افزایش می‌یابد (خسروی و همکاران، ۲۰۱۹). این شاخص براساس مدل ارتفاع دیجیتال (DEM) در نرم‌افزار ArcGIS 10.7 با استفاده از رابطه ۲ محاسبه شد.

$$SPI = \ln(Atan(S)) \quad (2)$$

که در آن، A مساحت سهمی بالادست در هر پیکسل و S شیب در آن پیکسل به رادیان است.

بعد فراکتالی شبکه زهکشی (FD⁴)

ساختار و پیچیدگی شبکه زهکشی حوضه تأثیر قابل توجهی بر فرایندهای وقوع سیلاب، فرسایش خاک و دیگر مخاطرات طبیعی دارد. از این‌رو، به‌کارگیری شاخصی مناسب برای تحلیل و ارزیابی این شبکه می‌تواند دقت و صحت مطالعات مربوط به سیلاب را به طور چشمگیری ارتقا دهد (سپهری و همکاران، ۲۰۲۰؛ ملکی‌نژاد و همکاران، ۲۰۱۷).

1. Topographic wetness index
2. Topographic control index
3. Stream power index
4. Fractal dimension

ویژگی‌های شبکه زهکشی حوضه نقش مهمی در وقوع سیلاب، فرسایش و سایر مخاطرات طبیعی دارند. بنابراین، انتخاب یک معیار مناسب برای بررسی این شبکه، دقت مطالعات سیلاب را افزایش می‌دهد. فراکتال‌ها برای توصیف شکل‌های نامنظم طبیعی به کار می‌روند که نمی‌توان آن‌ها را به طور مناسب با هندسه اقلیدسی سنتی شرح داد. به خلاف ابعاد اقلیدسی که در آن به نقاط، خطوط، صفحات و حجم‌ها به ترتیب ابعاد صحیح ۰، ۱، ۲ و ۳ اختصاص داده می‌شود (چن^۱ و همکاران، ۲۰۱۹)، نظریه فراکتال پیچیدگی یا نامنظمی اشیای فراکتالی را از طریق بعد فراکتالی آن‌ها اندازه‌گیری می‌کند و از ویژگی خودهماندی^۲ استفاده می‌کند. در این چارچوب، ابعاد فراکتالی معمولاً در محدوده $1 < d < 2$ برای ساختارهای دوبعدی و $2 < d < 3$ برای ساختارهای سه‌بعدی قرار دارند؛ همان‌طور که در رابطه ۳ بیان شده است.

$$d = \frac{\log(N)}{\log(r_b)} \quad (3)$$

d: بعد فراکتالی؛ N: تعداد مقیاس‌های اندازه‌گیری؛ r_b : بخش‌های کوچک در روش شمارش جعبه (اندازه پیکسل) (دی فریتاس سامپایو، کرستانا و رودریگز، ۲۰۱۹).

این روش‌ها محدودیت‌های ذاتی تحلیل‌های سنتی را که به فضاهای اقلیدسی یک‌بعدی، دوبعدی و سه‌بعدی محدود می‌شوند، برطرف می‌کنند؛ در نتیجه، هندسه فراکتالی نمایشی جامع‌تر از پدیده‌های طبیعی و نامنظمی‌های ذاتی آن‌ها ارائه می‌دهد. اگرچه خودهماندی به تنهایی یک فراکتال را تعریف نمی‌کند، ساختارهای فراکتالی معمولاً ویژگی‌های خودهماندی را نشان می‌دهند (ملکی‌نژاد و همکاران، ۲۰۱۷). در هیدرولوژی، بعد فراکتالی (FD) به طور مکرر برای توصیف نامنظمی شبکه‌های زهکشی و بررسی همبستگی آن با فرسایش خاک، سیلاب و تولید رسوب به کار می‌رود. ویژگی‌های شبکه زهکشی یک حوضه به عنوان عوامل ژئومورفولوژیکی کلیدی که بر سیل، فرسایش و سایر فرایندهای بلایای طبیعی تأثیر می‌گذارند، شناخته می‌شوند؛ بنابراین، انتخاب معیار مناسب برای ارزیابی شبکه زهکشی نقش حیاتی در افزایش دقت ارزیابی خطر سیل دارد (سپهری و همکاران، ۲۰۲۱). در این مطالعه، معیار بعد فراکتالی (Fr) به عنوان یک شاخص مؤثر برای توصیف ویژگی‌های ساختاری شبکه زهکشی به کار گرفته شد.

شاخص پیوستگی (IC⁴)

در مطالعات هیدرولوژیکی و پژوهش‌های پویای مبتنی بر فرایند، مفهوم اتصال برای توصیف ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی به کار می‌رود (وهل^۵ و همکاران، ۲۰۱۹؛ هکمن^۶ و همکاران، ۲۰۱۸) که نشان‌دهنده میزان ارتباط و پیوستگی بین رسوبات و رواناب در بخش‌های مختلف یک چشم‌انداز است (بورسلی، کاسی و توری، ۲۰۰۸^۷ و هکمن و همکاران، ۲۰۱۸). شاخص پیوستگی پتانسیل حرکت یک ذره از نقطه‌ای به نقطه دیگر را در مقیاس‌های زمانی و مکانی مختلف مشخص می‌کند (بورسلی، کاسی و توری، ۲۰۰۸، فرایرز^۸ و همکاران، ۲۰۱۳). برای تهیه نقشه‌های دقیق و قابل اعتماد از خطر سیل، استفاده از این شاخص‌ها ضروری است. در سال‌های اخیر، چندین شاخص پیوستگی هیدرولوژیکی توسعه یافته‌اند تا میزان پیوستگی در یک چشم‌انداز را ارزیابی کنند (گی^۹ و همکاران، ۲۰۱۶؛ کالسامیلیا^{۱۰} و همکاران، ۲۰۱۸). در این میان، شاخص پیوستگی ارائه‌شده توسط بورسلی، کاسی و توری (۲۰۰۸) که محبوب‌ترین روش محسوب می‌شود، در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته است. ارتفاع هر پیکسل در سراسر منطقه مورد

1. Chen
2. Self-similarity
3. De Freitas Sampaio, Crestana, & Rodrigues
4. Index of Connectivity
5. Wohl
6. Heckmann
7. Borselli, Cassi, & Torri
8. Fryirs
9. Gay
10. Calsamiglia

مطالعه از مدل رقومی ارتفاعی (DEM) استخراج شده است. در این پژوهش، مقادیر شاخص پیوستگی با استفاده از ماژول Raster Calculator در نرم‌افزار ArcGIS 10.7 از DEM محاسبه و استخراج شده‌اند (مشرم^۱ و همکاران، ۲۰۲۲).

پیشینه نظری روش‌های MCDA

فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP)

ساعتی در سال ۱۹۸۰ یک روش چندسطحی و سلسله‌مراتبی ارائه داد که به انسان امکان حل مسائل پیچیده و ذهنی را می‌دهد. در این روش، وزن‌های معیارها و زیرمعیارها توسط مقایسه‌های جفتی تعیین می‌شوند. یک ماتریس مرتبط با معیار یا زیرمعیار تصمیم n به شکل رابطه ۴ ایجاد می‌شود:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix}, a_{ij} = 1, a_{ji} = \frac{1}{a_{ij}} \quad (4)$$

که a_{ij} s نمایش‌دهنده اهمیت نسبی معیارها/زیرمعیارها نسبت به معیار/زیرمعیار j است. در مرحله بعد، عناصر ماتریس A باید ترکیب و نرمال شوند تا ماتریس رتبه‌بندی معیارها/زیرمعیارها به دست آید:

$$A' = \begin{bmatrix} a'_{11} & a'_{12} & \dots & a'_{1n} \\ a'_{21} & a'_{22} & \dots & a'_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a'_{n1} & a'_{n2} & \dots & a'_{nn} \end{bmatrix}, a'_{ii} = a_{ij} / \sum_{j=1}^n a_{ij} \quad (5)$$

از آنجا که وزن‌دهی معیارها/زیرمعیارها براساس دانش کارشناسان محاسبه می‌شود، لازم است که نسبت سازگاری (CR) از ماتریس A با درجه معناداری عدم قطعیت ارزیابی شود که اگر $is < 0.1$ و $CR < 0.1$ باشد، می‌توان فرض کرد که ماتریس یادشده دارای کافی‌ترین سازگاری است. نرخ سازگاری به صورت رابطه ۶ بیان می‌شود:

$$CR = CI/RI \quad (6)$$

که RI (شاخص تصادفی) یک شاخص تصادفی است که براساس ایجاد تصادفی ۵۰۰ ماتریس تعیین می‌شود و شاخص سازگاری (CI) براساس بزرگ‌ترین مقدار ویژه (λ_{max}) ماتریس A و n (تعداد معیارها/زیرمعیارها) محاسبه می‌شود.

$$CI = (\lambda_{max} - n)/(n - 1) \quad (7)$$

در این پژوهش، برای پهنه‌بندی مناطق مستعد سیل‌خیزی از روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) استفاده شد. این روش امکان ترکیب چندین شاخص مؤثر بر سیل‌خیزی و تعیین وزن نسبی هر شاخص را به صورت سیستماتیک فراهم می‌کند. در این مطالعه، هشت شاخص سیل‌خیزی مورد ارزیابی قرار گرفت و برای تعیین وزن نسبی آن‌ها، هر کارشناس مقایسات زوجی میان شاخص‌ها را انجام داد. این فرایند به شناسایی اهمیت نسبی شاخص‌ها و اولویت‌بندی مناطق مختلف حوضه آبریز کمک می‌کند.

روش IRNAHP

در AHP خالص، هر تصمیم فردی در مورد وزن‌دهی به معیارها و زیرمعیارها با ارزش‌های گسسته اعلام می‌شود. در این حالت، تصمیم‌گیرندگان اغلب با معضل تخصیص اهمیت نسبی به معیارها و زیرمعیارهای انتخاب‌شده مواجه می‌شوند و به طور معین، غیرقطعیت، عدم دقت و عدم قطعیت در فرایند تصمیم‌گیری افزایش می‌یابد. در سال‌های اخیر، مفهوم جدیدی در تئوری اعداد گسسته مبتنی بر IRN برای مقابله با عدم قطعیت و عدم دقت معرفی شده است. به این منظور، ترکیب IRN و AHP خالص به عنوان IRNAHP شناخته می‌شود.

مدل ریاضی عدد بازه (IRNAHP)

برای ادغام IRN و AHP خالص، عناصر ماتریس به شماره بازه $IRN(a_{ij})$ انتقال داده می‌شود و مراحل بعدی AHP خالص تکرار می‌شود. بنابراین، برای دریافت مدل ریاضی IRNAHP، سه یا پنج مرحله به عنوان زیر تکرار می‌شود:

مرحله ۱: تشکیل ماتریس‌های مقایسه جفتی توسط k متخصص

$$\begin{bmatrix} 1 & a_{12}^e; a_{12}^{e'} & \dots & a_{1n}^e; a_{1n}^{e'} \\ a_{21}^e; a_{21}^{e'} & 1 & \dots & a_{2n}^e; a_{2n}^{e'} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1}^e; a_{n1}^{e'} & a_{n2}^e; a_{n2}^{e'} & \dots & 1 \end{bmatrix}; 1 \leq i, j \leq n; 1 \leq e \leq k \quad (8)$$

در اینجا، a_{ij}^e و $a_{ij}^{e'}$ نمایانگر اهمیت نسبی معیارها/زیرمعیارها i به معیار/زیرمعیار j هستند که براساس رتبه‌بندی ۹- نقطه‌ای ساعتی انتخاب می‌شوند. اگر هر متخصص برای انتخاب ۲ مقدار از رتبه‌بندی ۹- نقطه‌ای ساعتی هرگونه ابهام داشته باشد، در این صورت $a_{ij}^e \neq a_{ij}^{e'}$ تعیین می‌شود. اگر هیچ ابهامی در انتخاب وجود نداشته باشد، متخصص e یک مقدار انتخاب می‌کند و در این حالت $a_{ij}^e = a_{ij}^{e'}$ داریم.

مرحله ۲: محاسبه نرخ سازگاری برای هر متخصص. این مرحله شبیه به AHP خالص است با این تفاوت که دو نرخ سازگاری وجود دارد: یکی از آن‌ها برای تقریب‌های بالایی (CR_e) و دیگری برای تقریب‌های پایینی (CR_e') نرخ CR نهایی براساس $(CR_e + CR_e')/2$ محاسبه می‌شود.

$$a^{*L} = \begin{bmatrix} a_{11}^{1L}, a_{11}^{1L}, \dots, a_{11}^{kL} & a_{12}^{1L}, a_{12}^{1L}, \dots, a_{12}^{kL} & \dots & a_{1n}^{1L}, a_{1n}^{1L}, \dots, a_{1n}^{kL} \\ a_{21}^{1L}, a_{21}^{1L}, \dots, a_{21}^{kL} & a_{22}^{1L}, a_{22}^{1L}, \dots, a_{22}^{kL} & \dots & a_{2n}^{1L}, a_{2n}^{1L}, \dots, a_{2n}^{kL} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1}^{1L}, a_{n1}^{1L}, \dots, a_{n1}^{kL} & a_{n2}^{1L}, a_{n2}^{1L}, \dots, a_{n2}^{kL} & \dots & a_{nn}^{1L}, a_{nn}^{1L}, \dots, a_{nn}^{kL} \end{bmatrix} \quad (9)$$

مرحله ۳: محاسبه ادغام ماتریس‌های عدد بازه در مرحله ۱ برای به دست آوردن a^{*L} و a^{*U} .

$$a^{*U} = \begin{bmatrix} a_{11}^{1'U}, a_{11}^{2'U}, \dots, a_{11}^{k'U} & a_{12}^{1'U}, a_{12}^{2'U}, \dots, a_{12}^{k'U} & \dots & a_{1n}^{1'U}, a_{1n}^{2'U}, \dots, a_{1n}^{k'U} \\ a_{21}^{1'U}, a_{21}^{2'U}, \dots, a_{21}^{k'U} & a_{22}^{1'U}, a_{22}^{2'U}, \dots, a_{22}^{k'U} & \dots & a_{2n}^{1'U}, a_{2n}^{2'U}, \dots, a_{2n}^{k'U} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1}^{1'U}, a_{n1}^{2'U}, \dots, a_{n1}^{k'U} & a_{n2}^{1'U}, a_{n2}^{2'U}, \dots, a_{n2}^{k'U} & \dots & a_{nn}^{1'U}, a_{nn}^{2'U}, \dots, a_{nn}^{k'U} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$a_{ij}^L = \{a_{ij}^{1L}, a_{ij}^{1L}, \dots, a_{ij}^{kL}\} \text{ and } a_{n1}^U = \{a_{ij}^{1'U}, a_{ij}^{2'U}, \dots, a_{ij}^{k'U}\} \quad (11)$$

با استفاده از معادلات ۸ تا ۱۱، هر عنصر از ماتریس‌های بالا به ادغام مرز خشن (RC) منتقل می‌شود،

$$RC(a_{ij}^{kL}) = [\underline{Lim}(a_{ij}^{kL}), \overline{Lim}(a_{ij}^{kL})] \text{ and } RC(a_{ij}^{k'U}) = [\underline{Lim}(a_{ij}^{k'U}), \overline{Lim}(a_{ij}^{k'U})] \quad (12)$$

سپس با استفاده از معادلات ۱۱ و ۱۲، ادغام مرز خشن (RC) برای a^{*L} و a^{*U} محاسبه می‌شود.

$$RC(a_{ij}^L) = RC(a_{ij}^{1L}, a_{ij}^{1L}, \dots, a_{ij}^{kL}) = \begin{cases} a_{ij}^L = \frac{1}{m} \sum_{e=1}^m a_{ij}^{eL} \\ a_{ij}^U = \frac{1}{m} \sum_{e=1}^m a_{ij}^{eU} \end{cases} \quad (13)$$

$$RC(a_{ij}^U) = RC(a_{ij}^{1'U}, a_{ij}^{2'U}, \dots, a_{ij}^{k'U}) = \begin{cases} a_{ij}^L = \frac{1}{m} \sum_{e=1}^m a_{ij}^{e'L} \\ a_{ij}^U = \frac{1}{m} \sum_{e=1}^m a_{ij}^{e'U} \end{cases} \quad (14)$$

سپس با استفاده از $RC(a_{ij}^L)$ و $RC(a_{ij}^U)$ ، حد پایین و حد بالای عدد خشن بازه برای $IRN(a_{ij})$ به این صورت $IRN(a_{ij}) = [RC(a_{ij}^L), RC(a_{ij}^U)]$ به دست می‌آید. ماتریس $IRN(a_{ij})$ به عنوان رابطه ۱۵ نمایش داده می‌شود.

$$a = \begin{bmatrix} 1 & IRN(a_{12}) & \dots & IRN(a_{1n}) \\ IRN(a_{21}) & 1 & \dots & IRN(a_{2n}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ IRN(a_{n1}) & IRN(a_{n2}) & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (۱۵)$$

مرحله ۴: تعیین رتبه هر معیار (ضریب وزنی عدد گسسته بازه)، $IRN(w_j)$ بردار براساس معادلات ۱۴ و ۱۵ محاسبه می‌شود.

$$IRN(w_{ij}) = ([w_{ij}^L, w_{ij}^U], [w_{ij}'^L, w_{ij}'^U]) = \frac{IRN(a_{ij})}{\sum_{j=1}^n IRN(a_{ij})} = \frac{([a_{ij}^L, a_{ij}^U], [a_{ij}'^L, a_{ij}'^U])}{\left(\left[\sum_{j=1}^n a_{ij}^L, \sum_{j=1}^n a_{ij}^U \right], \left[\sum_{j=1}^n a_{ij}'^L, \sum_{j=1}^n a_{ij}'^U \right] \right)} \quad (۱۶)$$

$$W = \begin{bmatrix} 1 & ([w_{12}^L, w_{12}^U], [w_{12}'^L, w_{12}'^U]) & \dots & ([w_{1n}^L, w_{1n}^U], [w_{1n}'^L, w_{1n}'^U]) \\ ([w_{21}^L, w_{21}^U], [w_{21}'^L, w_{21}'^U]) & 1 & \dots & ([w_{2n}^L, w_{2n}^U], [w_{2n}'^L, w_{2n}'^U]) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ ([w_{n1}^L, w_{n1}^U], [w_{n1}'^L, w_{n1}'^U]) & ([w_{n2}^L, w_{n2}^U], [w_{n2}'^L, w_{n2}'^U]) & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (۱۷)$$

درنهایت، (ضریب وزنی عدد خشن بازه)، $IRN(w_j)$ با استفاده از معادله ۱۸ محاسبه می‌شود.

$$IRN(w_j) = \left(\frac{([w_{ij}^L, w_{ij}^U], [w_{ij}'^L, w_{ij}'^U])}{\left(\left[\sum_{j=1}^n w_{ij}^L, \sum_{j=1}^n w_{ij}^U \right], \left[\sum_{j=1}^n w_{ij}'^L, \sum_{j=1}^n w_{ij}'^U \right] \right)} \right) / n \quad (۱۸)$$

$$\text{Subjecto: } \begin{cases} 0 \leq w_j^L \leq w_j'^L \leq w_j^U \leq w_j'^U \leq 1 \\ 1 \end{cases}$$

روش بهترین – بدترین (BWM)

روش بهترین – بدترین (BWM)، که توسط رضایی (۲۰۱۵) توسعه یافته، از جدیدترین روش‌های MCDA برای مقابله با سیستم‌های چندمعیاره پیچیده است.

در BWM تنها نیاز به مقایسه هر معیار با معیارهای مرجع (بهترین و بدترین) است، در حالی که در AHP مقایسه‌های زوجی کامل انجام می‌شود. این تفاوت باعث کاهش قابل توجه یکی از منابع اصلی عدم قطعیت (یعنی خطاهای ناشی از مقایسه‌های اضافی) خواهد شد.

الگوریتم روش بهترین – بدترین (BWM) به شرح زیر توصیف می‌شود:

مرحله ۱: انتخاب مجموعه‌ای از معیارها/زیرمعیارها مورد نظر و تعیین بهترین/بدترین (مهم‌ترین/کم‌مهم‌ترین) از آن‌ها.

مرحله ۲: تعیین اولویت‌های معیار بهتر نسبت به سایرین (BO) و به‌عکس، یعنی اولویت‌های همه معیارها نسبت به معیار بدتر با استفاده از یک مقیاس رتبه‌بندی ۹-نقطه‌ای (جدول ۱).

$$A_B = (a_{B1}, a_{B2}, \dots, a_{Bn}) \quad (۱۹)$$

$$A_W = (a_{1W}, a_{2W}, \dots, a_{nW}) \quad (۲۰)$$

a_{Bn} اولویت‌های معیار بهتر نسبت به معیار i ام و a_{nW} نمایانگر اولویت‌های معیار i ام نسبت به معیار بدتر است.

مرحله ۳: یافتن وزن‌های بهینه $(w_1^*, w_2^*, \dots, w_3^*)$ با حل مدل زیر:

$$\begin{aligned} \min & \xi \\ \text{s. t.} & \left| \frac{w_B}{w_j} - a_{Bj} \right| \leq \xi, \text{ for all } j \\ & \left| \frac{w_j}{w_W} - a_{jW} \right| \leq \xi, \text{ for all } j \\ & \sum_j w_j = 1 \end{aligned} \quad (۲۱)$$

$$w_j = 0, \text{ for all } j$$

مرحله ۴: بررسی سازگاری به شرح زیر:

$$\text{ConsistencyRatio} = \frac{\xi^*}{\text{ConsistencyIndex}} \quad (22)$$

شاخص سازگاری براساس جدول ۱ محاسبه می‌شود. نسبت سازگاری بین ۰ و ۱ است که مقادیر کمتر از نسبت سازگاری نشان‌دهنده یک ماتریس اولویت متناسب‌ترند.

جدول ۱. مقادیر CI برای روش BWM									
α_{BWM}	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$CI(\max \xi^*)$	0	0.44	1.00	1.63	2.30	3.00	3.73	4.47	5.23

مدل هیدرولیکی SWAT

در این پژوهش از مدل هیدرولوژیکی SWAT¹ استفاده شد؛ این مدل مبتنی بر فیزیک و نیمه‌توزیعی است و قابلیت اجرا در مقیاس‌های زمانی روزانه، ماهانه و سالانه را دارد. SWAT عمدتاً برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی رواناب، رسوب و مواد شیمیایی حاصل از فعالیت‌های کشاورزی در حوضه‌های آبریز مورد استفاده قرار می‌گیرد (بوسیکو^۲ و همکاران، ۲۰۲۰).

ساختار و کارکرد مدل

در این مدل، ابتدا حوضه آبریز براساس نقشه‌های ارتفاعی (DEM) به چندین زیرحوضه تقسیم می‌شود و سپس هر زیرحوضه با توجه به نوع خاک و کاربری اراضی به واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی (HRU) تقسیم‌بندی می‌شود. در این پژوهش داده‌های ورودی مورد نیاز شامل مدل رقومی ارتفاع (DEM) با دقت ۳۰ متر، نقشه‌های کاربری اراضی، نقشه خاک‌شناسی و داده‌های هواشناسی روزانه (بارندگی، دمای حداقل و حداکثر، رطوبت نسبی، تابش خورشیدی و سرعت باد) گردآوری شد. همچنین، داده‌های دبی روزانه از ایستگاه هیدرومتری خروجی حوضه به منظور کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل تهیه شد.

داده‌های مکانی در محیط نرم‌افزار ArcGIS و افزونه ArcSWAT پردازش و وارد مدل شدند. براساس DEM، مرز حوضه و شبکه زهکشی استخراج و حوضه به چندین زیرحوضه تقسیم شد. در ادامه، با ترکیب نقشه‌های کاربری اراضی، نوع خاک و شیب، واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی تولید شدند که امکان تحلیل دقیق‌تر رفتار هیدرولوژیکی در بخش‌های مختلف حوضه را فراهم می‌سازند (غزوی و فاضلی، ۲۰۱۹). شبیه‌سازی رواناب سطحی در مدل SWAT بر پایه معادله شماره منحنی سازمان حفاظت خاک آمریکا (SCS-CN) انجام گرفت. سایر فرایندهای مرتبط با چرخه هیدرولوژیکی از جمله تبخیر و تعرق بالقوه (روش Penman-Monteith)، نفوذ، جریان سطحی، نفوذ عمقی و جریان پایه نیز به صورت روزانه مدل‌سازی شد. مدل ابتدا با استفاده از داده‌های کاربری اراضی پایه اجرا و نتایج اولیه استخراج شد.

به منظور بهینه‌سازی نتایج، فرایند کالیبراسیون مدل با بهره‌گیری از نرم‌افزار SWAT-CUP و الگوریتم SUFI-2 انجام پذیرفت. در این مرحله، پارامترهای حساس مدل از طریق مقایسه نتایج شبیه‌سازی با داده‌های مشاهداتی دبی تنظیم شدند. عملکرد مدل با استفاده از شاخص‌های آماری ضریب کارایی نش — ساتکلیف (NSE) و ضریب تبیین (R^2) ارزیابی شد. درنهایت، پس از دستیابی به نتایج رضایت‌بخش در دوره کالیبراسیون، مدل بر روی یک دوره مستقل دیگر اعتبارسنجی شد.

بحث و نتایج

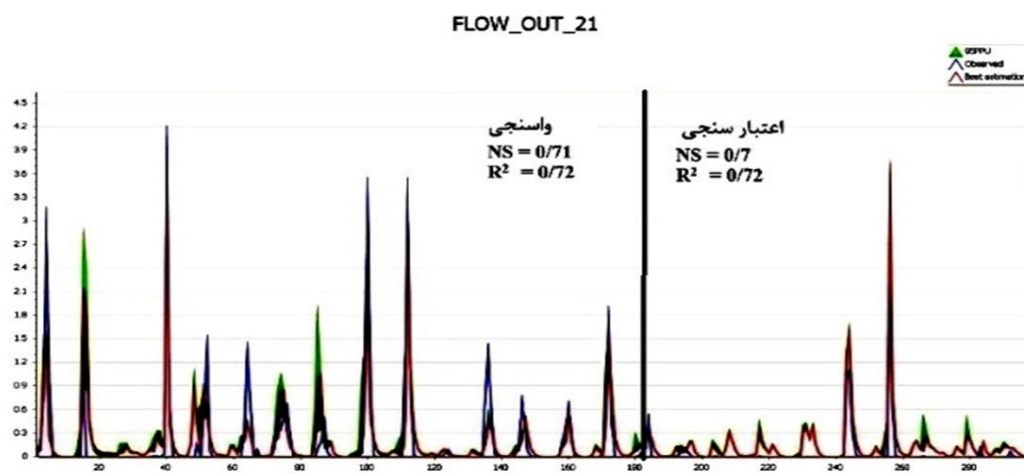
ارزیابی عملکرد روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDA) در اولویت‌بندی زیرحوضه‌ها در تحلیل‌های هیدرولوژیکی و هیدرودینامیکی، مدل‌های توزیع‌شده مبتنی بر فرایندهای فیزیکی، ابزارهای قدرتمندی برای سنجش دقت و همخوانی نتایج حاصل از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDA) محسوب می‌شوند (کومار و پاموکار، ۲۰۲۵). با توجه به گستردگی حوضه آبخیز مورد مطالعه و تنوع قابل توجه آن از نظر ویژگی‌های جغرافیایی و نوع کاربری اراضی، منطقه به ۳۱ زیرحوضه مجزا تقسیم شد. این تفکیک با بهره‌گیری از خطوط هم‌ترازی در مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ و داده‌های مدل رقومی ارتفاع (DEM) با دقت مکانی ۳۰ متر صورت گرفت.

خروجی مدل SWAT

پس از شناسایی و تعیین پارامترهای حساس مدل، شبیه‌سازی توسط مدل SWAT برای دوره واسنجی ۱۵ ساله، از سال ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۳، با بهره‌گیری از داده‌های میانگین دبی ماهانه ایستگاه واقع در خروجی حوضه انجام شد. پس از تکمیل فرایند واسنجی، اعتبارسنجی مدل با استفاده از مقادیر بهینه‌شده پارامترها و به صورت مشابه با دوره واسنجی، برای بازه زمانی هشت‌ساله از سال ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۲ صورت گرفت. در این مرحله، داده‌های میانگین دبی ماهانه ایستگاه واقع در داخل حوضه به کار گرفته شد.

مقایسه دبی ماهانه مشاهداتی و شبیه‌سازی شده

برای ارزیابی عملکرد مدل SWAT در بازتولید جریان آب، نمودار مقایسه‌ای میانگین دبی ماهانه مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در ایستگاه هیدرومتری فخرآباد مورد نظر ترسیم شد. این نمودار، که در شکل ۲ نمایش داده شده است، روند تغییرات دبی طی ماه‌های سال را به صورت تطبیقی نشان می‌دهد و امکان بررسی میزان انطباق نتایج مدل با داده‌های واقعی را فراهم می‌سازد. تحلیل این نمودار می‌تواند به شناسایی ضعف‌ها یا قوت‌های مدل در شبیه‌سازی الگوهای فصلی جریان کمک کند.



شکل ۲. نمودار میانگین دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده ایستگاه حوضه در مرحله صحت‌سنجی و اعتبارسنجی مدل

ارزیابی دقت مدل SWAT با استفاده از شاخص نش – ساتکلیف (NSE) و اعتبارسنجی نتایج

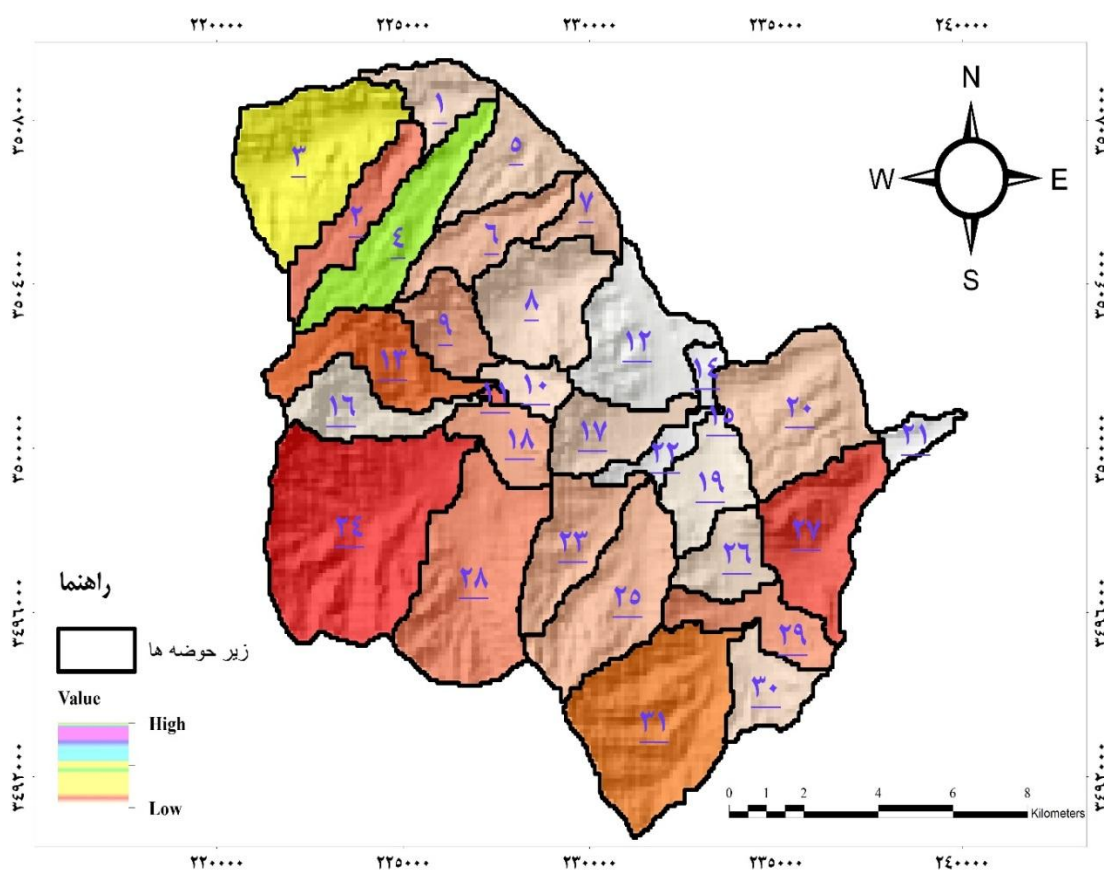
بر اساس طبقه‌بندی عملکرد مدل‌های ارائه‌شده توسط موریاچی و همکاران، مقادیر شاخص نش – ساتکلیف (NSE) به صورت زیر ارزیابی می‌شود: مقادیر بین ۰/۷۵ تا ۱ در طبقه «بسیار خوب»، بین ۰/۶۵ تا ۰/۷۵ در طبقه «خوب» و بین ۰/۵۰ تا ۰/۶۵ در طبقه «قابل قبول» قرار می‌گیرند. مطابق با نتایج حاصل از مدل SWAT، مقدار NSE برابر با ۰/۷۱ محاسبه شد که نشان‌دهنده عملکرد «خوب» مدل در شبیه‌سازی جریان است. پس از تکمیل فرایند واسنجی، مرحله اعتبارسنجی با استفاده از پارامترهای بهینه‌شده مرحله پیشین و با بهره‌گیری از داده‌های میانگین دبی ماهانه ایستگاه هیدرومتری برای دوره آماری هشت‌ساله

(۲۰۱۴ تا ۲۰۲۲) انجام گرفت. نتایج این مرحله نیز نشان‌دهنده عملکرد «قابل قبول» مدل در بازتولید داده‌های مشاهده‌شده است. مقایسه نتایج حاصل از این پژوهش با یافته‌های سایر مطالعات مشابه (زارع‌زاده مهریزی و همکاران، ۲۰۱۶؛ براتی و همکاران، ۲۰۱۹؛ آقاخانی، نصرآبادی، و وفایی‌نژاد، ۲۰۱۸؛ گرگیج، ۲۰۱۸) نشان می‌دهد دقت مدل SWAT در محدوده قابل قبولی قرار دارد و نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی‌ها از نظر کیفی با یافته‌های مطالعات پیشین همخوانی دارد.

جدول ۲. نتایج واسنجی و اعتبارسنجی میانگین دبی ماهانه ایستگاه

مرحله	NS	R ²
واسنجی (FLOW -OUT)	۰/۷۱	۰/۷۲
اعتبار سنجی (FLOW -OUT)	۰/۷۱	۰/۷۲

نتایج حاصل از اعتبارسنجی بیانگر عملکرد رضایت‌بخش مدل در شبیه‌سازی جریان بوده و خلاصه آن در جدول ۲ ارائه شده است. درنهایت، با توجه به نتایج مدل و صحت‌سنجی‌های صورت‌گرفته، نقشه اولویت‌بندی سیل‌خیزی زیرحوضه‌ها با استفاده از خروجی مدل SWAT در محیط نرم‌افزار ArcGIS تولید شده و در شکل ۳ ارائه شده است.



شکل ۳. نقشه اولویت‌بندی سیل‌خیزی حوضه مورد مطالعه با استفاده از مدل SWAT

تحلیل مکانی اولویت سیل‌خیزی زیرحوضه‌ها براساس پارامتر CN در مدل SWAT

با توجه به اینکه عدد منحنی رواناب (CN^2) به عنوان یکی از پارامترهای کلیدی در برآورد رواناب و پتانسیل وقوع سیلاب در مدل SWAT محسوب می‌شود، تحلیل این پارامتر از اهمیت بالایی برخوردار است. مقدار CN تحت‌تأثیر مستقیم ویژگی‌های پوشش گیاهی، نوع کاربری اراضی و شیب منطقه قرار دارد؛ بنابراین تغییرات فضایی این عوامل می‌تواند نقش تعیین‌کننده‌ای در میزان

1. Gorgij
2. Curve Number

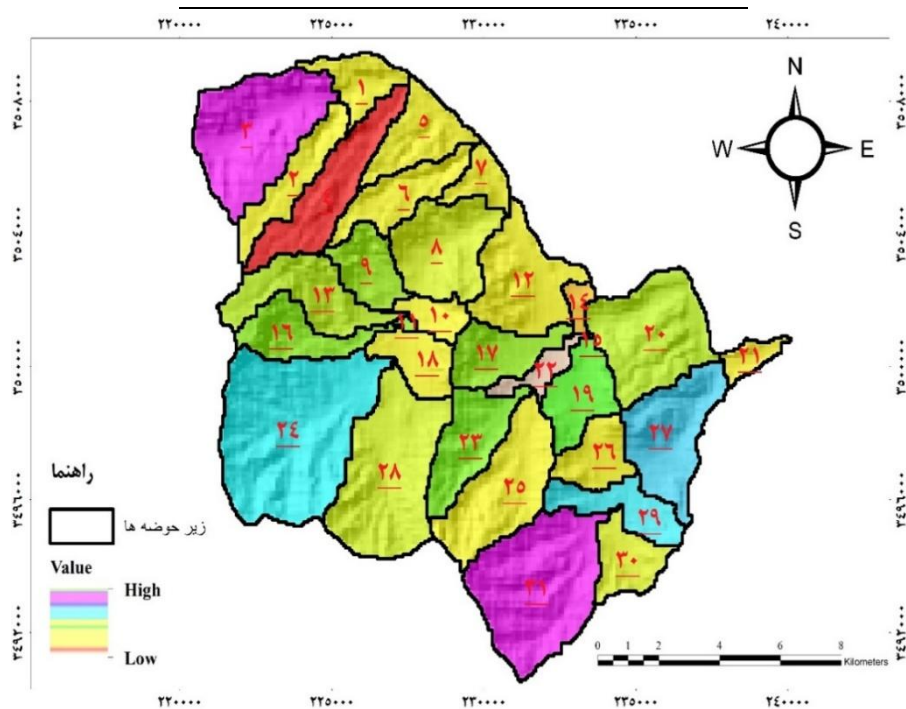
سیلاب‌خیزی هر زیرحوضه داشته باشد. براساس نتایج حاصل از تحلیل مدل، که در شکل ۳ نمایش داده شده است، زیرحوضه‌های شماره ۴، ۳، ۳۱، ۱۳ و ۲۴ دارای مقادیر بالاتری از CN هستند. این موضوع نشان می‌دهد این زیرحوضه‌ها از نظر سیلاب‌خیزی در اولویت بالا قرار دارند و به عنوان مناطق با پتانسیل بالای تولید رواناب سطحی هنگام رخدادهای بارشی شدید شناخته می‌شوند. در مقابل، زیرحوضه‌های شماره ۱۵، ۲۲، ۱۴، ۲۱ و ۱۲ دارای مقادیر پایین‌تری از CN هستند که بیانگر ظرفیت نفوذپذیری بیشتر، پوشش گیاهی مناسب‌تر یا شیب ملایم‌تر این نواحی است؛ در نتیجه، این زیرحوضه‌ها در طبقه‌بندی سیلاب‌خیزی در اولویت پایین‌تری نسبت به سایر مناطق قرار می‌گیرند. این تحلیل می‌تواند مبنای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی در راستای کاهش ریسک سیل، بهینه‌سازی کاربری اراضی و اجرای اقدامات حفاظتی در حوضه آبخیز باشد.

تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) در پهنه‌بندی مناطق مستعد سیل‌خیزی

در این پژوهش، روش وزن‌دهی خطی که یکی از متداول‌ترین روش‌های ارزیابی چندمعیاره است، مورد استفاده قرار گرفت؛ به‌ویژه روش مقایسه زوجی دو به دو به عنوان یکی از روش‌های کلیدی وزن‌دهی به کار گرفته شد؛ در این روش، هر شاخص به صورت مجزا با سایر شاخص‌ها مقایسه شده و وزن نسبی آن تعیین می‌شود. در این فرایند، هر لایه به طور مستقل در مقابل سایر لایه‌ها وزن‌دهی شد و سپس وزن‌های به‌دست‌آمده در قالب یک ماتریس مقایسه زوجی وارد شدند تا ضریب اهمیت هر لایه به صورت مجزا محاسبه شود. برای انجام محاسبات، داده‌های مربوط به لایه‌ها در نرم‌افزار Excel وارد شده و ضرایب اهمیت هر لایه استخراج شد (جدول ۳).

جدول ۳. معیارها و اوزان مورد استفاده در روش AHP

معیار	وزن معیار
Tci	0/224
Twi	0/167
Spi	0/296
S	0/043
P	0/096
Ic	0/252
E	0/036
FR	0/617



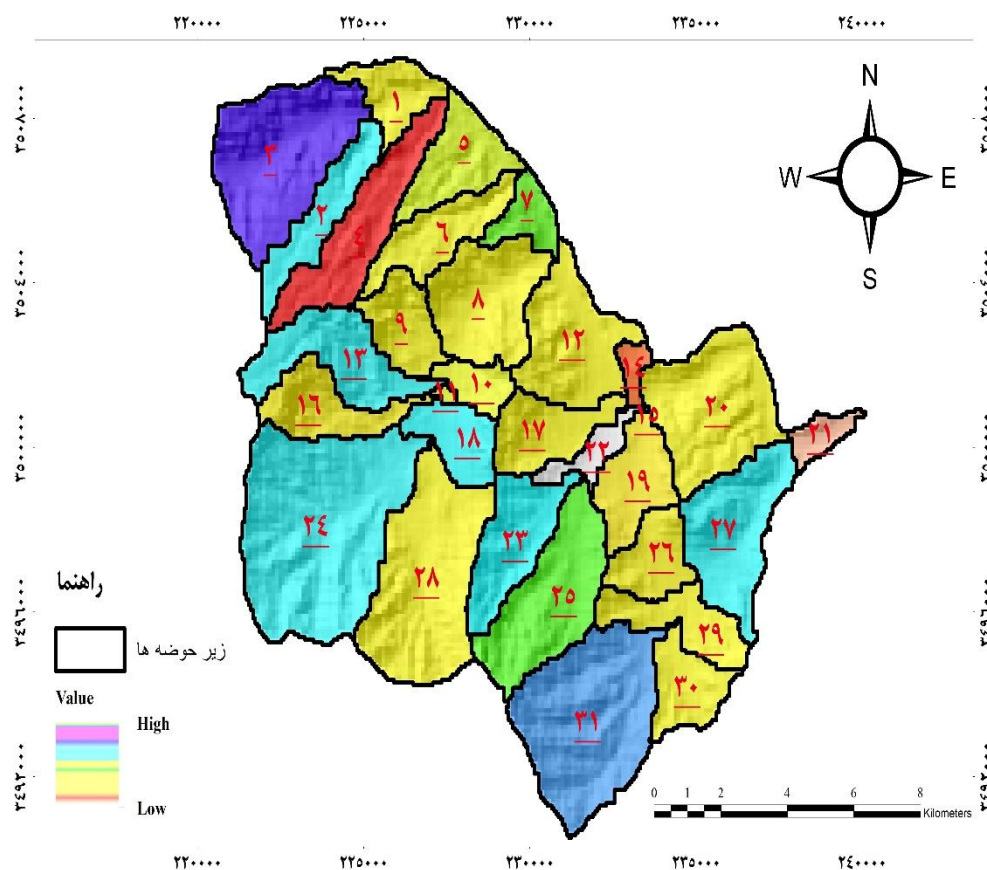
شکل ۴. نقشه اولویت‌بندی سیل‌خیزی حوضه مورد مطالعه با استفاده از مدل AHP

در این پژوهش، روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) به منظور پهنه‌بندی مناطق مستعد سیل‌خیزی به کار گرفته شد. نتایج حاصل نشان می‌دهد زیرحوضه‌های ۴، ۳، ۳۱، ۲۷ و ۲۹ دارای بیشترین درجه سیل‌خیزی هستند، در حالی که زیرحوضه‌های ۱۵، ۲۲، ۱۴، ۲۱ و ۶ از سیل‌خیزی قابل توجه کمتری برخوردارند.

در این پژوهش، از روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) به منظور پهنه‌بندی مناطق مستعد سیل‌خیزی در محدوده حوضه مورد مطالعه استفاده شد. نتایج نشان داد زیرحوضه‌های ۴، ۳، ۳۱، ۲۷ و ۲۹ دارای بیشترین درجه سیل‌خیزی بوده و به عنوان نواحی بحرانی شناسایی شدند، در حالی که زیرحوضه‌های ۱۵، ۲۲، ۱۴، ۲۱ و ۶ از کمترین پتانسیل وقوع سیلاب برخوردارند. با این حال، ارزیابی نتایج مدل AHP با مدل شبیه‌سازی هیدرولوژیکی SWAT بیانگر آن است که دقت روش AHP در بازنمایی واقعی توزیع مکانی خطر سیلاب در سطح حوضه، در سطح مطلوبی قرار ندارد و در برخی نواحی، هم‌خوانی ضعیفی میان نتایج دو مدل مشاهده می‌شود. به منظور ارزیابی دقت روش‌های پهنه‌بندی سیلاب مبتنی بر تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDA)، دو رویکرد کلی قابل استفاده است: نخست، بهره‌گیری از داده‌های مشاهداتی سیلاب و دوم، استفاده از مدل‌های عددی هیدرولوژیکی یا هیدرولوژیکی. در بسیاری از کشورهای در حال توسعه، محدودیت در دسترسی به داده‌های دقیق و قابل اعتماد یکی از چالش‌های اساسی محسوب می‌شود؛ زیرا یا داده‌های مشاهداتی در دسترس نیستند، یا در صورت وجود، از کیفیت پایین و توزیع مکانی نامناسب برخوردارند. این موضوع سبب می‌شود تکیه صرف بر داده‌های میدانی برای اعتبارسنجی مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره با عدم قطعیت بالا همراه باشد. در چنین شرایطی، روش AHP به عنوان یکی از روش‌های کارآمد در پهنه‌بندی خطر سیلاب می‌تواند تصویری نسبی از وضعیت سیل‌خیزی زیرحوضه‌ها ارائه دهد، اما به دلیل وابستگی شدید به قضاوت‌های ذهنی کارشناسان، صحت مکانی نتایج آن نیازمند اعتبارسنجی با ابزارهای مدل‌محور است. در منطقه مورد مطالعه، داده‌های هیدرومتری فقط در ایستگاه خروجی حوضه در دسترس بود که به دلیل ماهیت تجمیعی داده‌ها، امکان نمایش تفکیکی رواناب در سطح زیرحوضه‌ها را فراهم نمی‌کرد. در این راستا، مدل SWAT به عنوان ابزاری فرایندمحور و مبتنی بر داده‌های فیزیکی، برای برآورد تفکیک‌پذیر مکانی رواناب و تعیین سهم هر زیرحوضه در تولید جریان سطحی مورد استفاده قرار گرفت. نتایج مدل SWAT مبنایی برای اعتبارسنجی و سنجش دقت مدل AHP فراهم ساخت و امکان تحلیل تطبیقی بین روش تصمیم‌گیری چندمعیاره و رفتار واقعی حوضه را ایجاد کرد. لازم به تأکید است که هدف از به‌کارگیری مدل SWAT در این پژوهش، مقایسه ساختاری دو مدل نبوده، بلکه فقط ارزیابی میزان انطباق نتایج روش AHP با داده‌های شبیه‌سازی‌شده و بررسی توان پیش‌بینی مکانی آن در پهنه‌بندی خطر سیلاب بوده است. به طور کلی، یافته‌ها نشان می‌دهد تلفیق روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره با مدل‌های هیدرولوژیکی فرایندمحور می‌تواند به افزایش دقت، کاهش عدم قطعیت و ارائه تصویری واقع‌گرایانه‌تر از الگوی مکانی سیلاب در مناطق مختلف حوضه منجر شود.

روش BWM

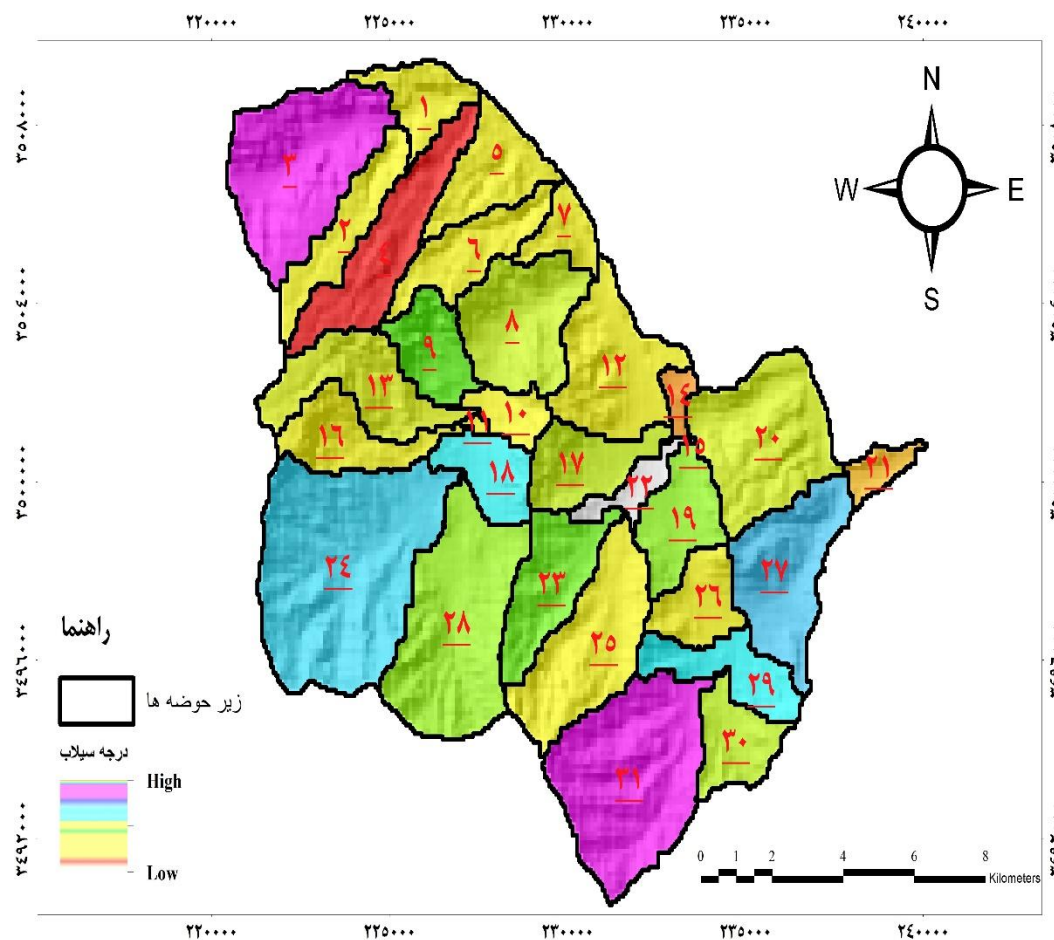
در این بخش، وزن نهایی معیارها براساس مقایسات زوجی انجام‌شده بین بهترین (Best) و بدترین (Worst) معیارها با سایر معیارها، محاسبه و ارائه می‌شود. این وزن‌ها نشان‌دهنده اهمیت نسبی هر معیار در فرایند تصمیم‌گیری هستند. با استفاده از مدل ریاضی BWM، که یک برنامه‌ریزی خطی برای کمینه کردن حداکثر اختلاف بین مقایسات زوجی است، وزن‌های بهینه معیارها به دست آمده و به گونه‌ای تنظیم می‌شوند که با نظر تصمیم‌گیرنده بیشترین سازگاری را داشته باشند.



شکل ۵. نقشه اولویت‌بندی سیل‌خیزی حوضه مورد مطالعه با استفاده از مدل BWM

همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌کنید، در روش BWM، زیرحوضه‌های ۴، ۳، ۳۱، ۲۷ و ۲۴ بیشترین درجه سیل‌خیزی را داشتند، در حالی که زیرحوضه‌های ۱۵، ۲۲، ۲۱، ۱۴ و ۱۹ در پایین‌ترین سطح سیل‌خیزی قرار گرفتند. مقایسه نتایج این روش با روش AHP نشان داد BWM دقت نسبتاً بالاتری نسبت به AHP دارد. یکی از دلایل اصلی کاهش عدم قطعیت در BWM، کاهش قابل توجه تعداد مقایسات زوجی به ۱۴ مقایسه (به جای ۵۶ مقایسه در AHP) است. این کاهش تعداد مقایسات، باعث ساده‌تر شدن فرایند تصمیم‌گیری و افزایش اطمینان کارشناسان در وزن‌دهی شاخص‌ها شده و در نتیجه عدم قطعیت در نتایج مدل را کاهش داده است.

روش IRNAHP



شکل ۶ نقشه اولویت‌بندی سیل‌خیزی حوضه مورد مطالعه با استفاده از مدل IRNAHP

در آخرین مدل به‌کارگرفته‌شده در این مطالعه، یعنی روش IRN-AHP، نتایج حاصل از پهنه‌بندی سیل‌خیزی نشان داد زیرحوضه‌های شماره ۴، ۳، ۳۱، ۲۷ و ۲۴ در بالاترین سطح سیل‌خیزی قرار دارند. درمقابل، زیرحوضه‌های شماره ۱۵، ۲۲، ۱۴، ۲۱ و ۱۲ کمترین درجه سیل‌خیزی را نشان دادند. مقایسه نتایج حاصل از روش IRN-AHP با مدل SWAT و دو روش تصمیم‌گیری چندمعیاره AHP و BWM، نشان‌دهنده دقت بالاتر روش IRN-AHP در شناسایی و پهنه‌بندی مناطق مستعد سیل است. اگرچه این روش نسبت به دو روش AHP و BWM به مقایسات زوجی بیشتری نیاز دارد، ویژگی کلیدی آن، استفاده از بازه‌های عددی به‌جای مقادیر گسسته منفرد است. این ویژگی موجب می‌شود کارشناسان بتوانند در شرایطی که با ابهام یا عدم قطعیت مواجه هستند، وزن‌دهی به شاخص‌ها را با دقت و اطمینان بیشتری انجام دهند. درمقابل، در روش‌های AHP و BWM، الزام به استفاده از مقادیر عددی ثابت ممکن است سبب بروز تردید در تصمیم‌گیری و کاهش دقت نهایی شود. استفاده از بازه‌های عددی در IRN-AHP، ضمن افزایش انعطاف‌پذیری در قضاوت‌های انسانی، عدم قطعیت در فرایند وزن‌دهی را به طور قابل توجهی کاهش می‌دهد. این مزیت به عنوان یکی از عوامل اصلی دقت بالاتر روش یادشده در ارزیابی خطر سیل شناخته می‌شود. نتایج این مطالعه همچنین با یافته‌های تحقیق نگویان^۱ و همکاران (۲۰۲۳) هم‌راستاست. آنان با استفاده از چهار روش BWM، AHP و IRN-AHP برای پهنه‌بندی سیل در حوضه ایرانلو، نشان دادند روش IRN-AHP به دلیل الگوریتم پیشرفته‌تر خود، از دقت بالاتری نسبت به سایر روش‌ها برخوردار است.

نتایج پژوهش یادشده نشان داد هرچند روش IRN-AHP از دقت بالاتری در بازنمایی عدم قطعیت و انعکاس قضاوت‌های کارشناسان برخوردار است، از منظر کارایی، پایداری و سهولت محاسبات، روش BWM به عنوان گزینه بهینه و توصیه‌شده برای پهنه‌بندی خطر سیل‌خیزی معرفی می‌شود (اکبری، مشرام و کریشنا، ۲۰۲۱). این برتری ناشی از ساختار ساده‌تر الگوریتمی، نیاز کمتر به مقایسات زوجی، و درعین حال توانایی حفظ دقت مناسب در وزن‌دهی شاخص‌هاست که موجب می‌شود روش BWM نسبت به سایر مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، کاربردپذیری بیشتری در مطالعات تجربی و برنامه‌ریزی‌های مدیریت سیلاب داشته باشد. در روش BWM، فرایند وزن‌دهی شاخص‌ها با انجام تنها ۱۴ مقایسه زوجی توسط هر کارشناس انجام می‌شود؛ در حالی که در روش IRN-AHP، برای همان مجموعه شاخص‌ها، تعداد مقایسات به ۱۱۲ مورد افزایش می‌یابد. این اختلاف چشمگیر در حجم محاسبات نه تنها زمان و پیچیدگی فرایند تحلیل را به صورت تصاعدی افزایش می‌دهد، بلکه می‌تواند به بروز خطای انسانی، خستگی ذهنی و ناپایداری در قضاوت‌های کارشناسان منجر شود. چنین عواملی، به‌ویژه در مطالعاتی با تعداد زیاد معیارها و زیرمعیارها، احتمال افزایش عدم قطعیت در وزن‌دهی نهایی و کاهش انسجام تصمیم‌گیری را به همراه دارد. از سوی دیگر، ویژگی بارز روش BWM در آن است که با تمرکز بر انتخاب بهترین و بدترین شاخص، نه تنها بار شناختی تصمیم‌گیرندگان را کاهش می‌دهد، بلکه فرایند ارزیابی را از پیچیدگی‌های ناشی از مقایسات گسترده و ذهنیت‌محور رها می‌سازد. این امر به پایداری بالاتر در نتایج، قابلیت تکرار بیشتر تحلیل‌ها و افزایش اعتمادپذیری مدل در شرایط تصمیم‌گیری واقعی منجر می‌شود. درمقابل، اگرچه روش IRN-AHP از نظر نظری امکان مدل‌سازی دقیق‌تر عدم قطعیت‌های ذاتی در قضاوت انسانی را فراهم می‌سازد، اما پیچیدگی محاسباتی و نیاز به تفسیر چندبعدی داده‌ها، کاربست گسترده آن را در پروژه‌های کاربردی محدود می‌سازد. در مجموع، می‌توان نتیجه گرفت که روش BWM با فراهم‌سازی تعادلی میان سادگی محاسباتی، دقت قابل قبول و پایداری نتایج، به عنوان رویکردی بهینه برای پهنه‌بندی خطر سیل‌خیزی در مقیاس‌های عملیاتی پیشنهاد می‌شود. استفاده از این روش به‌ویژه در حوضه‌هایی با محدودیت داده و در مطالعاتی که نیازمند مشارکت چند کارشناس از حوزه‌های گوناگون هستند، می‌تواند به تصمیم‌گیری‌های شفاف‌تر، قابل‌اعتمادتر و کم‌خطاتر منجر شود (اکبری، مشرام و کریشنا، ۲۰۲۱).

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این پژوهش، سه روش تصمیم‌گیری چندمعیاره شامل AHP، BWM و IRNAHP به منظور پهنه‌بندی خطر سیل‌خیزی مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفتند. هدف اصلی پژوهش، بررسی دقت مدل‌ها و تحلیل میزان عدم قطعیت ناشی از فرایند وزن‌دهی به شاخص‌های مؤثر در بروز سیلاب بود. نتایج حاصل نشان داد روش AHP با وجود توانایی قابل توجه در شناسایی مناطق بحرانی سیل‌خیز (ازجمله زیرحوضه‌های ۴، ۳، ۳۱، ۲۷ و ۲۹)، به دلیل تعداد زیاد مقایسات زوجی و وابستگی مستقیم به قضاوت‌های ذهنی کارشناسان، دارای سطح بالاتری از عدم قطعیت است. الزام کارشناسان به انتخاب یک مقدار قطعی از مقیاس ۱ تا ۹ ساعتی (Saaty)، موجب بروز تردید در قضاوت و کاهش اعتمادپذیری در وزن‌دهی نهایی می‌شود. در مقابل، روش BWM با تمرکز بر انتخاب بهترین و بدترین شاخص و کاهش چشمگیر تعداد مقایسات زوجی، توانست نتایجی باثبات‌تر، دقیق‌تر و از نظر محاسباتی ساده‌تر ارائه دهد. کاهش حجم مقایسات در این روش سبب افزایش دقت ذهنی و کاهش خستگی کارشناسان شد و در نتیجه، میزان عدم قطعیت در نتایج نهایی کاهش یافت. افزون بر این، سادگی الگوریتم BWM و نیاز به فقط ۱۴ مقایسه زوجی در مقابل ۱۱۲ مقایسه در IRNAHP، موجب شد این روش از کاربردپذیری و پایداری بالاتری در مطالعات عملیاتی برخوردار باشد. روش IRNAHP نیز عملکردی مطلوب در شناسایی زیرحوضه‌های بحرانی (۴، ۳، ۳۱، ۲۷ و ۲۴) نشان داد و با بهره‌گیری از بازه‌های عددی در فرایند وزن‌دهی، توانست عدم قطعیت ناشی از قضاوت انسانی را بهتر مدل‌سازی کند. با این حال، افزایش تعداد مقایسات زوجی در این روش، ضمن افزایش بار محاسباتی، احتمال بروز خطا و نوسان در ارزیابی‌ها را نیز بیشتر می‌کند. در مجموع، می‌توان نتیجه گرفت که روش IRNAHP در شرایطی که هدف، دستیابی به بیشترین دقت و لحاظ عدم قطعیت در تصمیم‌گیری باشد، گزینه‌ای علمی و دقیق‌تر محسوب می‌شود؛ در حالی که روش BWM به دلیل سادگی محاسبات، ثبات نتایج و قابلیت اجرا در مطالعات گسترده‌تر، گزینه‌ای بهینه و عملیاتی‌تر برای پهنه‌بندی خطر سیلاب به شمار می‌آید. بنابراین، استفاده از BWM در

مطالعات آتی، به‌ویژه در مناطقی با داده‌های محدود یا نیاز به تصمیم‌گیری چند کارشناس، به عنوان رویکردی کارآمد، کم‌خطا و با قابلیت اعتماد بالا توصیه می‌شود.

براساس نتایج این پژوهش، چند پیشنهاد برای بهبود دقت و کارایی مطالعات آتی ارائه می‌شود. در گام نخست، ترکیب روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره با مدل‌های هیدرولوژیکی فرایندمحور مانند SWAT می‌تواند به ارزیابی دقیق‌تر صحت مکانی و کمی نتایج کمک کرده و ارتباط میان خروجی مدل‌های تصمیم‌گیری و واقعیت‌های هیدرولوژیکی منطقه را تقویت کند. همچنین، بهره‌گیری از دیدگاه کارشناسان با تخصص‌های متنوع در حوزه‌های ژئومورفولوژی، مهندسی آب، منابع طبیعی و برنامه‌ریزی محیطی توصیه می‌شود تا فرایند وزن‌دهی به شاخص‌ها از جامعیت و عینیت بیشتری برخوردار شود. در ادامه، توسعه مدل‌های تصمیم‌گیری فازی و احتمالاتی برای لحاظ کردن عدم قطعیت‌های ذاتی داده‌ها و قضاوت‌های انسانی به‌ویژه در مناطق با داده‌های ناقص یا پراکنده، می‌تواند نقش مهمی در افزایش پایداری نتایج ایفا کند. درنهایت، پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده، تحلیل حساسیت معیارها و وزن‌دهی پویا تحت شرایط مختلف اقلیمی و کاربری اراضی مورد بررسی قرار گیرد تا مدل‌های تصمیم‌گیری از پایداری، دقت و قابلیت تعمیم بیشتری در مدیریت جامع سیلاب برخوردار شوند.

- 1 Abdullah, M. F., Siraj, S., & Hodgett, R. E. (2021). An overview of multi-criteria decision analysis (MCDA) application in managing water-related disaster events: Analyzing 20 years of literature for flood and drought events. *Water*, 13(10), 1358. <https://doi.org/10.3390/w13101358>
- 2 Akbari, M., Meshram, S. G., Krishna, R. S., & et al. (2021). Identification of the groundwater potential recharge zones using MCDM models: Full consistency method (FUCOM), best worst method (BWM), and analytic hierarchy process (AHP). *Water Resources Management*, no. 35, 4727–4745. <https://doi.org/10.1007/s11269-021-02924-1>
- 3 Aghakhani, M., Nasrabadi, T., & Vafainejad, A. (2018). Hydrological simulation of Taleghan watershed using SWAT model of environmental science and technology. *Journal of Environmental Science and Technology (JEST)*, 21(9), 147–159.
- 4 Ajin, R. S., Senan, C. P. P. C., Devi, B. A., Costache, R., Nagar, J. K., Rajaneesh, A., & Sajinkumar, K. S. (2025). Flood risk mapping in an urbanized tropical river basin in India using MCDA-AHP: A post-storm event evaluation. *Smart Construction and Sustainable Cities*, 3(1), 10.
- 5 Barati, F., Hosseini, M., Sarimi, A., & Mokhtari, A. (2019). Simulation of hydrological balance of Eskandari watershed using SWAT model and SUFI algorithm. *Iranian Journal of Watershed Science and Engineering*, 14(48), 90–99. (In Persian)
- 6 Borselli, L., Cassi, P., & Torri, D. (2008). Prolegomena to sediment and flow connectivity in the landscape: A GIS and field numerical assessment. *CATENA*, 75(3), 268–277.
- 7 Busico, G., Colombani, N., Frozi, D., Pellegrini, M., Tazioli, A., & Mastrocicco, M. (2020). [Incomplete reference – please provide full title and source].
- 8 Calsamiglia, A., Fortesa, J., García-Comendador, J., Lucas-Borja, M. E., Calvo-Cases, A., & Estrany, J. (2018). Spatial patterns of sediment connectivity in terraced lands: Anthropogenic controls of catchment sensitivity. *Land Degradation & Development*, 29(4), 1198–1210.
- 9 Chen, L., Li, D., Ming, F., Shi, X., & Chen, X. (2019). A fractal model of hydraulic conductivity for saturated frozen soil. *Water*, 11(2), 369.
- 10 Cikmaz, B. A., Yildirim, E., & Demir, I. (2025). Flood susceptibility mapping using fuzzy analytical hierarchy process for Cedar Rapids, Iowa. *International Journal of River Basin Management*, 23(1), 1–13.
- 11 De Freitas Sampaio, L., Crestana, S., & Rodrigues, V. G. S. (2019). Study of gully erosion in South Minas Gerais (Brazil) using fractal and multifractal analysis. *IAEG/AEG Annual Meeting Proceedings*, no. 6, 217–222.
- 12 Fryirs, K. (2013). (Dis)Connectivity in catchment sediment cascades: A fresh look at the sediment delivery problem. *Earth Surface Processes and Landforms*, 38(1), 30–46.
- 13 Gay, A., Cerdan, O., Mardhel, V., & Desmet, M. (2016). Application of an index of sediment connectivity in a lowland area. *Journal of Soils and Sediments*, 16(1), 280–293.
- 14 Ghazavi, R., & Fazeli, A. (2019). Investigation of the effects of land use change on surface runoff using remote sensing and SWAT model. *Journal of Water and Soil Conservation*, 25(6), 191–206.* [In Persian] <https://doi.org/10.22069/jwsc.2019.12697.2739>
- 15 Gorgij, Kh. (2018). *Hydrological simulation of Sarbaz watershed using SWAT model [Master's thesis, Zabol University]*. (In Persian)
- 16 Heckmann, T., Cavalli, M., Cerdan, O., Foerster, S., Javaux, M., Lode, E., Smetanová, A., Vericat, D., & Brardinoni, F. (2018). Indices of sediment connectivity: Opportunities, challenges and limitations. *Earth-Science Reviews*, no. 187, 77–108.
- 17 Islam, I., Rahman, M. A., Adham, M. I., Majumder, A. A. S., & Zaman, A. (2025). Assessment and zonation of flood susceptibility in Sylhet Division, Bangladesh using GIS and analytic hierarchy process (AHP). *Journal of Flood Risk Management*, 18(4), e70121.
- 18 Jehan, Z., Husnain, A., Waseem, M., Ahmad, S., & Leta, M. K. (2025). Sustainable development and flood risk assessment in Haripur District: A multicriteria analysis using AHP and geospatial techniques. *International Journal of Geophysics*, 2025(1), 6480655.

- 19 Khosravi, K., Panahi, M., Golkarian, A., Keesstra, S. D., Saco, P. M., Bui, D. T., & Lee, S. (2020). Convolutional neural network approach for spatial prediction of flood hazard at national scale of Iran. *Journal of Hydrology*, no. 591, 125552. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125552>
- 20 Khosravi, K., Shahabi, H., Pham, B. T., Adamowski, J., Shirzadi, A., Pradhan, B., Dou, J., Ly, H. B., Gróf, G., & Ho, H. L. (2019). A comparative assessment of flood susceptibility modeling using multi-criteria decision-making analysis and machine learning methods. *Journal of Hydrology*, no. 573, 311–323.
- 21 Kumar, R., & Pamucar, D. (2025). A comprehensive and systematic review of multi-criteria decision-making (MCDM) methods to solve decision-making problems: Two decades from 2004 to 2024. *Spectrum of Decision Making and Applications*, 2(1), 178–197.
- 22 Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50 (3), 885–900.
- 23 Mahmoud, S. H., & Gan, T. Y. (2018). Multi-criteria approach to develop flood susceptibility maps in arid regions of Middle East. *Journal of Cleaner Production*, no. 196, 216–229.
- 24 Malekinezhad, H., Talebi, A., Ilderomi, A. R., Hosseini, S. Z., & Sepehri, M. (2017). Flood hazard mapping using fractal dimension of drainage network in Hamadan City, Iran. *Journal of Environmental Engineering and Science*, 12(4), 86–92.
- 25 Meshram, S. G., Ilderomi, A. R., Sepehri, M., & Santos, C. A. G. (2022). Flood prioritization based on fuzzy best–worst multi-criteria decision-making method. *Arabian Journal of Geosciences*, no. 15, 1374.
- 26 Nguyen, N.-M., Bahramloo, R., Sadeghian, J., Sepehri, M., Nazaripouya, H., Nguyen Dinh, V., Ghahramani, A., Talebi, A., Elkhachy, I., Pande, C. B., & Meshram, S. G. (2023). Ranking sub-watersheds for flood hazard mapping: A multi-criteria decision-making approach. *Water*, 15(11), 2128. <https://doi.org/10.3390/w15112128>
- 27 Rezaei, J. (2015). Best-worst multi-criteria decision-making method. *Omega*, no. 53, 49–57.
- 28 Saaty, T. L. (1980). *The analytic hierarchy process*. McGraw-Hill.
- 29 Samanta, S., Koloa, C., Kumar Pal, D., & Palsamanta, B. (2016). Flood risk analysis in lower part of Markham River based on multi-criteria decision approach (MCDA). *Hydrology*, 3(3), 29.
- 30 Sepehri, M., Ghahramani, A., Kiani-Harchegani, M., Ildoromi, A. R., Talebi, A., & Rodrigo-Comino, J. (2021). Assessment of drainage network analysis methods to rank sediment yield hotspots. *Hydrological Sciences Journal*, 66(5), 904–918.
- 31 Sepehri, M., Linh, N. T. T., Pouya, H. N., Bahramloo, R., Sadeghian, J., Ghermezcheshme, B., Talebi, A., Peyrovan, H., & Thanh, P. N. (2024). Developing a new multi-criteria decision-making for flood prioritization of sub-watersheds using concept of D numbers. *Acta Geophysica*, no. 72, 2027–2039.
- 32 Sepehri, M., Malekinezhad, H., Jahanbakhshi, F., Ildoromi, A. R., Chezgi, J., Ghorbanzadeh, O., & Naghipour, E. (2020). Integration of interval rough AHP and fuzzy logic for assessment of flood-prone areas at the regional scale. *Acta Geophysica*, 68(7), 2309–2335.
- 33 Sharker, R., Islam, M. R., Hosen, M. B., Kader, Z., Aziz, M. T., Tahera-Tun-Humayra, U., ... & Roy, A. (2025). GIS-based AHP approach to flood susceptibility assessment in Tangail district, Bangladesh. *Journal of Earth System Science*, 134(1), 26.
- 34 VanLoenhout, J., Below, R., & McClean, D. (2020). *Human cost of disasters: Overview of the last 20 years (2000–2019)*. UN Office for Disaster Risk Reduction & Center for Research on the Epidemiology of Disasters.
- 35 Wohl, E., Brierley, G., Cadol, D., Coulthard, T. J., Covino, T., Fryirs, K. A., Grant, G., Hilton, R. G., Lane, S. N., & Magilligan, F. J. (2019). Connectivity as an emergent property of geomorphic systems. *Earth Surface Processes and Landforms*, 44(1), 4–26.
- 36 Zarezadeh Mehrizi, Sh., Khorani, A., Bazarafshan, J., & Bazarafshan, A. (2016). Evaluating the effectiveness of SWAT model in simulating the runoff of Gamasiab watershed. *Pasture and Watershed (Natural Resources of Iran)*, 70(4), 881–893. (In Persian)