نشریه علمی
علوم و مهندسی آبخیزداری ایران
Iran-Watershed Management Science & Engineering
Vol. 19, No. 69, Summer 2025
سال نوزدهم- شماره ۶۹- تابستان ۱۴۰۴

Prioritizing Sub Watersheds Based on Health and Sustainability Indicators Using VIKOR and TOPSIS-Mahalanobis Methods

Omid Asadi Nalivan[1]* , Ayding Kornejady[2] , Gholamreza Khosravi[3]

Received: 15-08-2025, Revised 30-08-2025, Accepted: 20-09-2025, Published 20-09-2025
https://doi.org/10.22034/19.69.4

Introduction

Increasing pressures from land use change, overexploitation of water and soil resources, climate change and population growth, reduction of vegetation cover, soil erosion, decline in the quality and quantity of water resources, and reduction of biodiversity have reduced the efficiency of ecosystem services and threatened the health and sustainability of watersheds. The complexity of health and sustainability indicators and the simultaneous existence of quantitative and qualitative criteria highlight the need to use Multi-Criteria Decision-Making (MCDM) methods. Among these methods, the VIseKriterijumska Optimizacija Kompromisno Resenje (VIKOR) method, as a method based on adaptive optimization, allows for prioritizing options based on maximizing group satisfaction and minimizing individual dissatisfaction. On the other hand, the Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) method, in its advanced version, using Mahalanobis distance, is able to take into account the effect of correlation between criteria in calculating the distance. The main objective of this study is to prioritize the sub-watersheds of the Atrak River watershed in northern Golestan Province based on health and sustainability indicators using VIKOR and TOPSIS-Mahalanobis methods.

Materials and Methods

The Atrak River watershed is located in Golestan Province with geographical coordinates of 53° 50˙ to 56° 30˙ North longitude and 36° 50˙ to 38° 20˙ North latitude and has an area of 819,000 hectares. In this study, a total of 16 health and sustainability indicators categorized into five classes of vegetation (percentage of canopy cover), hydrology and climatology (per capita available water), environmental (Environmental Performance Index (EPI) and Total Dissolved Solids (TDS) indices), social (life expectancy, population density, household size, population growth, human development index, gender ratio, and urbanization ratio), and economic (per capita agricultural and horticultural land, per capita livestock, per capita other (honey, silkworms, fish, and poultry), per capita wheat area, and average wheat yield per hectare) were measured to prioritize the sub-watersheds of the Atrak River watershed. In this study, two methods, VIKOR and TOPSIS_Mahalanobis, were used for prioritization. Mahalanobis distance evaluates environmental variables without change and intact, so that all variables are assumed to be unequal. In the Mahalanobis distance method, there is no need to normalize the data, on the other hand, the covariance operator in the computational formula of this method considers the correlation between variables. Due to having 16 indicators and forming a

1. Corresponding author and Assistant Professor, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Maragheh, Maragheh, Iran. O.asadi@maragheh.ac.ir
2. Researcher, Department of Natural Resources, Golestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Gorgan, Iran
3. Ph.D., Graduate of Watershed Science and Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran.

[DOI: 10.22034/19.69.4]

matrix with large dimensions, all calculations were performed in the MATLAB environment.

Results and Discussion

Based on the results of the VIKOR, it was determined that the Gomishan has the worst condition. Therefore, the Gomishan was ranked last in terms of health and stability. On the other hand, the Maraveh Tapeh was ranked first in terms of all three indicators R, S and Q, meaning the best condition. However, the numerical value of Q between the first and second sub-watersheds is very close and does not seem statistically significant. This important issue in the first condition (C1) of the Vikor method showed itself, so that the condition Q2-Q1≥DQ was not met, so the first and second sub-watersheds had to be introduced as the best options together, and as a result, Chat and Gomishan were ranked second and third, respectively. According to the TOPSIS-Mahalanobis results, the Dashli-Brun is in the best condition and Gomishan is in the most critical condition. However, studies show that the numerical values of the first three sub-watersheds are relatively close to each other, but the Gomishan is in the last rank with a large difference. In other words, there is high confidence in the criticality of the Gomishan and the need to allocate watershed management measures to this sub-watershed. The numerical values of the indices in a ranked manner in each sub-watershed showed that the Maraveh Tapeh with seven 1st and only one 4th, was in a better condition than the other sub-watersheds, although the Dashli-Brun sub-watershed was in competition with Maraveh Tapeh with only two 4th and four 1st ranks.

Conclusion

In this study, two multi-criteria decision-making methods, VIKOR and TOPSIS-Mahalanobis, were used to prioritize the sub-watersheds of the Atrak River watershed based on health and sustainability indices. Comparing the results of the two TOPSIS-Mahalanobis and VIKOR methods shows clear similarities and differences, and the source of error can be searched in the structure of the first decision matrix. The results showed that the output of the VIKOR method can be considered more logical than the TOPSIS-Mahalanobis method, because assigning the third rank to the Maraveh Tapeh sub-watershed by the TOPSIS-Mahalanobis method reduces the validity of this method. Therefore, based on the findings of this study, the two Maraveh Tapeh and Dashli Brun sub-watersheds can be jointly introduced as superior sub-watersheds in health and sustainability indicators, and only if it is required to separately allocate management measures to each sub-watershed, Dashli Brun sub-watershed will be given a higher priority, because Maraveh Tapeh is in a relatively better situation. On the other hand, the first and second priority of management measures to improve health and sustainability indicators should definitely be assigned to the Gomishan and then Chat sub-watersheds, respectively. Finally, in solving complex problems such as the present study, one must both reduce the number of indicators and limit oneself to the most basic indicators that represent the overall status of the target sub-areas, or use more flexible methods in introducing and prioritizing target sub-areas such as VIKOR.

Keywords: *Atrak River watershed, Integrated management, Multi-criteria decision-making, Socio-economic indicators, Sustainable development*

Article Type: Research Article

Acknowledgement

The authors of the article are grateful to the General Directorate of Natural Resources and Watershed Management of Golestan Province (financial and spiritual support), Golestan Agricultural Jihad Organization and Golestan Governorate for providing the information needed for the article. The present article has been extracted from the results of a part of the studies for the compilation of a strategic document for the integrated management of the Atrak River watershed.

[DOI: 10.22034/19.69.4]

Conflicts of interest

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

Data Availability Statement

All information and results are provided in the text of the article.

Authors' contribution

All authors reviewed and approved the final manuscript. Individual contributions were as follows: Omid Asadi Nalivan: Conceptualization, Methodology, Data curation, Project administration, Formal analysis, Investigation, Writing - original draft. Ayding Kornejady: Conceptualization, Validation, Software, review & editing. Gholamreza Khosravi: Supervision, Validation, Writing - review & editing.

Citation: Asadi Nalivan O, Kornejady A, Khosravi G. Prioritizing sub watersheds based on health and sustainability indicators using VIKOR and TOPSIS-Mahalanobis methods. jwmseir 2025; 19 (69): 60-81

Iran-Watershed Management Science & Engineering, Year 2025, Vol 19, No 69,PP 60-81

Publisher: Watershed Management Society of Iran

[DOI: 10.22034/19.69.4]

اولویت‌بندی زیرآبخیزها بر اساس شاخص‌های سلامت و پایداری با استفاده از روش‌های VIKOR و TOPSIS-Mahalanobis

امید اسدی نلیوان[1*] ، آیدینگ کرنژادی [2]، غلامرضا خسروی [3]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۲۶، تاریخ داوری: ۱۴۰۴/۰۶/۰۸، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۲۹، تاریخ انتشار ۱۴۰۴/۰۶/۲۹
https://doi.org/10.22034/19.69.4

چکیده

حوزه‌های آبخیز به‌عنوان واحدهای هیدرولوژیکی و اکولوژیکی نقش مهمی در حفظ پایداری بوم‌سازگان‌ها و تأمین منابع آب ایفا می‌کنند. فشارهای ناشی از تغییر کاربری اراضی، بهره‌برداری بی‌رویه و تغییرات اقلیمی موجب کاهش سلامت و پایداری این حوزه‌ها شده است. در این پژوهش، به‌منظور اولویت‌بندی زیرآبخیزهای حوزه آبخیز رودخانه اترک بر اساس شاخص‌های سلامت و پایداری، از دو روش تصمیم‌گیری چندمعیاره VIKOR و TOPSIS-Mahalanobis استفاده شد. برای این منظور، ۱۶ شاخص در چهار بعد هیدرولوژیکی، محیط زیست، اجتماعی و اقتصادی دارای اثرات مثبت و منفی انتخاب و وزن‌دهی شاخص‌ها با روش آنتروپی شانون انجام گرفت. نتایج تحلیل‌ها نشان داد که این دو روش، علی‌رغم تفاوت در الگوریتم و مبانی محاسباتی، در شناسایی زیرآبخیزهای بحرانی و دارای وضعیت مطلوب تا حد زیادی هم‌خوانی دارند. بر اساس نتایج روش VIKOR به عنوان روش برتر بر اساس وضعیت موجود حوزه آبخیز، زیرآبخیزهای مراوه‌تپه (Q=0.000) و داشلی‌برون (Q=0.102) در بهترین وضعیت سلامت و پایداری قرار داشته و اولویت کمتری برای مداخلات حفاظتی دارند، در حالی که زیرآبخیز گمیشان (Q=1) به دلیل مقادیر نامطلوب شاخص‌های هیدرولوژیکی، محیط زیست و اجتماعی-اقتصادی، به‌عنوان آسیب‌پذیرترین زیرآبخیز معرفی شد و نیازمند اقدامات فوری مدیریتی است. همچنین مشخص شد که شاخص‌های اقتصادی و اجتماعی نظیر سرانه کشاورزی، تراکم جمعیت، سرانه گندم، سرانه دام و سرانه سایر محصولات (زنبور عسل و ...) بیشترین تأثیر را در تعیین وضعیت سلامت و پایداری زیرآبخیزها داشته‌اند. بر اساس یافته‌ها، مدیریت جامع و اجرای اقدامات حفاظتی در زیرآبخیزهای بحرانی با رویکردهای تلفیقی و استفاده از ابزارهای نوین تصمیم‌گیری توصیه می‌شود.

کلمات کلیدی: **شاخص‌های اقتصادی-اجتماعی، تصمیم‌گیری چندمعیاره، توسعه پایدار، حوزه آبخیز رودخانه اترک، مدیریت جامع**

نوع مقاله: پژوهشی

استناد: اسدی نلیوان امید، کرنژادی آیدینگ، خسروی غلامرضا. اولویت‌بندی زیرآبخیزها بر اساس شاخص‌های سلامت و پایداری با استفاده از روش‌های VIKOR و TOPSIS-Mahalanobis. علوم ومهندسی آبخیزداری ایران. ۱۴۰۴؛ ۱۹(۶۹): ۱-علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، سال ۱۴۰۴، دوره ۱۹، شماره ۶۹، صفحه ۶۰-۸۱

علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، سال ۱۴۰۴، دوره ۱۹، شماره ۶۹، صفحه ۶۰-۸۱

ناشر: انجمن آبخیزداری ایران

۱- نویسنده مسئول و استادیار، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران o.asadi@maragheh.ac.ir
۲-استادیار پژوهشی، بخش تحقیقات منابع طبیعی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان گلستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، گرگان، ایران
۳- فارغ‌التحصیل دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

مقدمه

حوزه‌های آبخیز به عنوان واحدهای هیدرولوژیکی و اکولوژیکی، نقش کلیدی در چرخه آب، پایداری بوم‌سازگان‌ها، تأمین آب و رفاه اجتماعی دارند [۳، ٦، ۲۲]. با این حال، فشارهای فزاینده ناشی از تغییر کاربری اراضی، بهره‌برداری بی‌رویه از منابع آب و خاک، تغییرات اقلیمی و رشد جمعیت، کاهش پوشش گیاهی، فرسایش خاک، افت کیفیت و کمیت منابع آب و کاهش تنوع زیستی موجب کاهش کارایی خدمات اکوسیستمی و تهدید سلامت و پایداری حوزه‌های آبخیز شده است [۲، ۱۱، ۲۱]. در چنین شرایطی، ارزیابی شاخص‌های سلامت و پایداری حوزه‌های آبخیز و اولویت‌بندی آن‌ها برای تخصیص بهینه منابع، تدوین برنامه‌های مدیریتی و کاهش خطرات محیط زیست، ضرورتی اجتناب‌ناپذیر است [۳، ٤، ٦]. مدیریت این حوضه‌ها نیازمند شناسایی مناطقی است که کمترین پایداری را دارند و یا از نظر خدمات بوم‌سازگانی در اولویت حفاظت و بازسازی قرار می‌گیرند. سلامت و پایداری حوزه آبخیز مفاهیمی چندبعدی هستند که ارزیابی آن‌ها نیازمند استفاده هم‌زمان از شاخص‌های هیدرولوژیکی، محیط زیست، اجتماعی و اقتصادی است [۲، ۲۲]. پیچیدگی این شاخص‌ها و وجود هم‌زمان معیارهای کمی و کیفی، ضرورت استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM[1]) را آشکار می‌سازد [۱، ۲۳]. روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره به دلیل توانایی در تحلیل هم‌زمان معیارهای کمی و کیفی، به طور گسترده در مدیریت حوزه‌های آبخیز استفاده می‌شوند. روش‌های MCDM، معیارهای کیفی و کمی مختلفی را برای پیدا کردن بهترین راه‌حل در نظر می‌گیرند. به‌زبان ساده، روش‌های MCDM در مواقعی کاربرد دارند که تصمیم‌گیرنده می‌بایست بین چند گزینه اولویت‌بندی و درجه ارجحیت خود را مشخص کند و برای این اولویت‌بندی چندین معیار از جنس‌ها و مقیاس‌های مختلف مدنظر دارد [۵]. در میان این روش‌ها، روش VIKOR[2] به عنوان روشی مبتنی بر بهینه‌سازی سازشی، با ارزیابی فاصله نسبی هر گزینه از راه‌حل ایده‌آل و ضدایده‌آل، امکان اولویت‌بندی گزینه‌ها را بر اساس بیشینه‌کردن رضایت گروهی و کمینه‌کردن نارضایتی فردی فراهم می‌سازد [۹، ۱۷، ۱۹، ۲٤، ۲۵]. از سوی دیگر، روش TOPSIS[3] که بر اساس نزدیکی نسبی به راه‌حل ایده‌آل مثبت و دوری از راه‌حل ایده‌آل منفی عمل می‌کند [۱۲]، در نسخه پیشرفته خود با استفاده از فاصله Mahalanobis قادر است اثر هم‌بستگی بین معیارها را در محاسبه فاصله لحاظ نماید. این ویژگی باعث افزایش دقت و واقع‌گرایی نتایج به‌ویژه در داده‌های پیچیده و چندبعدی می‌شود [۱۰، ۱٤، ۲۷، ۳۱]. مطالعات زیادی در زمینه اولویت‌بندی با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره انجام شده است. رحیمی و همکاران [۲۰] در تحقیقی دو مدل TOPSIS و VIKOR را در حوزه آبخیز سد ایلام جهت اولویت‌بندی اقدامات آبخیزداری در ۱۲ زیرآبخیز مقایسه کردند. در این مطالعه ۱۸ معیار جهت اولویت‌بندی و با استفاده از روش آنتروپی شانون وزن‌دهی شدند. نتایج نشان داد که در اولویت اول هر دو مدل یکسان عمل کردند و در سایر اولویت‌ها متفاوت بودند. همچنین بازدیدهای میدانی نتایج مدل VIKOR را تأیید کردند. سرکار و همکاران [۲۳] در مطالعه‌ای به اولویت‌بندی حوزه آبخیز رودخانه Pindar (Uttarakhand districts of Chamoli and Bageshwar) با استفاده از تحلیل مورفومتریک با رویکردهای AHP[4]، FAHP[5]، TOPSIS، VIKOR به منظور تدوین یک برنامه مدیریتی مناسب برای مبارزه با تخریب زمین[6] به منظور کمک به مدیریت و حفاظت آینده پرداختند. اولویت‌بندی زیرآبخیزها نشان داد که طبق مدل‌های AHP، FAHP، TOPSIS و VIKOR، زیرآبخیز ۲٦ مستعدترین زیرآبخیز برای فرسایش است. یافته‌های آن‌ها نشان داد که معیارهای مورفومتریک در شناسایی مکان‌ها ی مستعد فرسایش بسیار مؤثر هستند. نتایج نشان داد که با توجه به مقادیر درصد تغییرات و شدت، می‌توان اظهار داشت که مدل FAHP نسبت به سایر مدل‌ها از دقت بیشتری برخوردار بوده است. عباسی و همکاران [۱] در تحقیقی از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره TOPSIS، VIKOR، SAW[7]، CF[8] و پارامترهای مورفومتریک برای اولویت‌بندی فرسایش‌پذیری زیرآبخیزها در حوزه آبخیز Ouljet Es Soltane (شمال مراکش) پرداختند. آن‌ها بیان داشتند که شناسایی مناطق مستعد فرسایش خاک برای اجرای اقدامات پیشگیرانه در حوزه آبخیز Ouljet Es Soltane و تضمین توسعه پایدار آن بسیار مهم است. نتایج نشان داد که از ۲۰ زیرآبخیز، زیرآبخیز ۱٦ حساسیت بالایی به فرسایش دارد و از نظر خطر فرسایش به عنوان یکی از آسیب‌پذیرترین مناطق طبقه‌بندی می‌شود. همچنین بر اساس نتایج مدل‌های VIKOR، SAW و TOPSIS، حساسیت زیرآبخیزها به فرسایش به چهار دسته کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد طبقه‌بندی شد. نتایج نشان داد که روش‌های VIKOR، TOPSIS و SAW در مقایسه با مدل CF دقت پیش‌بینی بیشتری نشان دادند. از دیگر مطالعات می‌توان به اسدی نلیوان و همکاران [۳، ٤]، چزگی [۷]، چزگی و سهیلی [۸]، ماتوسز و همکاران [۱٦]، اپریکوویچ و تسنگ [۱۷]، شریفی‌کیا و همکاران [۲٦] و تاج‌بخش و همکاران [۲۹] ا اشاره کرد.

هدف اصلی این پژوهش اولویت‌بندی زیرآبخیزهای آبخیز رودخانه اترک در شمال استان گلستان بر اساس شاخص‌های سلامت و پایداری با بهره‌گیری از روش‌های VIKOR و TOPSIS-Mahalanobis است. اولویت‌بندی حوزه‌های آبخیز ابزاری کلیدی در مدیریت منابع آب و خاک است که امکان تخصیص بهینه منابع، پیشگیری از تخریب محیط‌زیست و افزایش کارایی برنامه‌های حفاظتی

1. Multi-Criteria Decision-Making
2. VIseKriterijumska Optimizacija Kompromisno Resenje
3. Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution
4. Analytic Hierarchy Process
5. Fuzzy Analytic Hierarchy Process
6. land degradation
7. Simple Additive Weighting
8. Compound Factor

[DOI: 10.22034/19.69.4]

را فراهم می‌سازد [۱، ۲، ۱۳، ۱۵، ۲۸، ۳۰]. این پژوهش از چند جهت دارای نوآوری است. استفاده هم‌زمان از روش VIKOR (به‌عنوان روشی مبتنی بر سازش) و TOPSIS-Mahalanobis (به‌عنوان نسخه ارتقایافته TOPSIS) به لحاظ هم‌بستگی بین معیارها امکان مقایسه دقت و کارایی این دو رویکرد را در رتبه‌بندی حوزه‌های آبخیز فراهم می‌کند. برخلاف بسیاری از مطالعات که تنها یک یا چند شاخص محدود را بررسی می‌کنند، در این پژوهش مجموعه‌ای از شاخص‌های هیدرولوژیکی، محیط زیست، اقتصادی و اجتماعی در قالب یک چارچوب جامع مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین استفاده از فاصله Mahalanobis باعث کاهش خطای ناشی از نادیده گرفتن ساختار هم‌بستگی داده‌ها و افزایش دقت تصمیم‌گیری در شرایط پیچیده می‌شود. در تحقیق حاضر، گزینه‌های هدف شامل زیرآبخیزهای حوزه آبخیز رودخانه اترک بوده و معیارهای مدنظر برای اولویت‌بندی چندمعیاره شامل شاخص‌های منتخب از بطن دیدگاه‌های مختلف هیدرولوژیکی، اکولوژیکی، اجتماعی-اقتصادی و ترکیبی از آن‌ها بوده که می‌توان به شاخص‌های سلامت و پایداری اشاره نمود. قاعدتاً، ارزش و وزن هرکدام از این شاخص‌ها در دید تصمیم‌گیرنده برابر نبوده، لذا وزن‌دهی به این معیارها با روش‌های مختلف رایج از اهمیت خاصی برخوردار بوده و نتیجه نهایی اولویت‌بندی گزینه‌ها را دستخوش تغییر قرار خواهد داد.

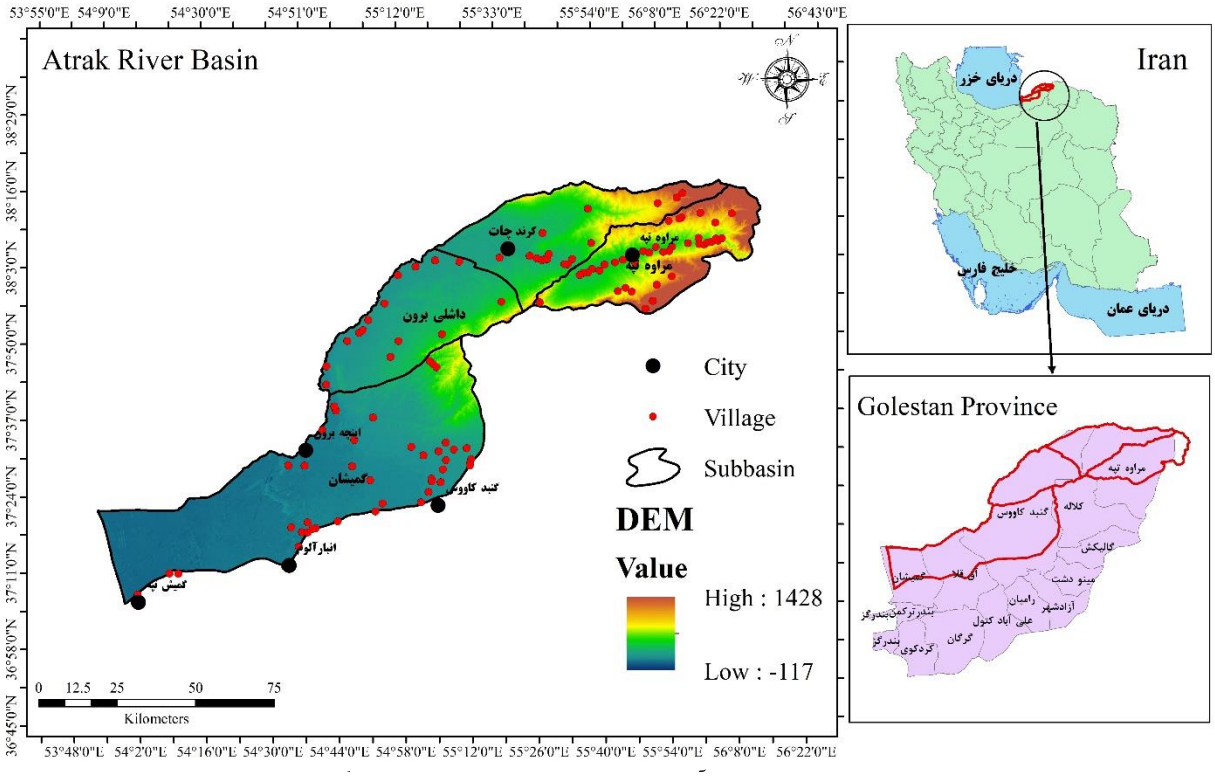
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

حوزه آبخیز رودخانه اترک با مختصات جغرافیایی ´۵۰ °۵۳ الی ´۳۰ °۵۶ طول شمالی و ´۵۰ °۳۶ الی ´۲۰ °۳۸ عرض شمالی در استان گلستان قرارگرفته است و دارای مساحت ۸۱۹۰۰۰ هکتار است. شکل ۱ نقشه موقعیت محدوده مورد مطالعه در تقسیمات سیاسی را نشان می‌دهد. میزان تغییرات ارتفاعی از ۱۱۷- تا ۱۴۲۸ متر متغیر است. این محدوده دارای چهار شهرستان و ۱۲۱ روستا است. متوسط میزان بارندگی ۲۶۲ میلی‌متر در سال، متوسط دمای منطقه ۱۷/۵ درجه و متوسط تبخیر و تعرق ۱۷۸۵ میلی‌متر و نوع اقلیم نیز خشک و نیمه‌خشک است. شکل ۲ نمودار جریانی مراحل تحقیق را نشان می‌دهد.

شاخص‌های مورد استفاده

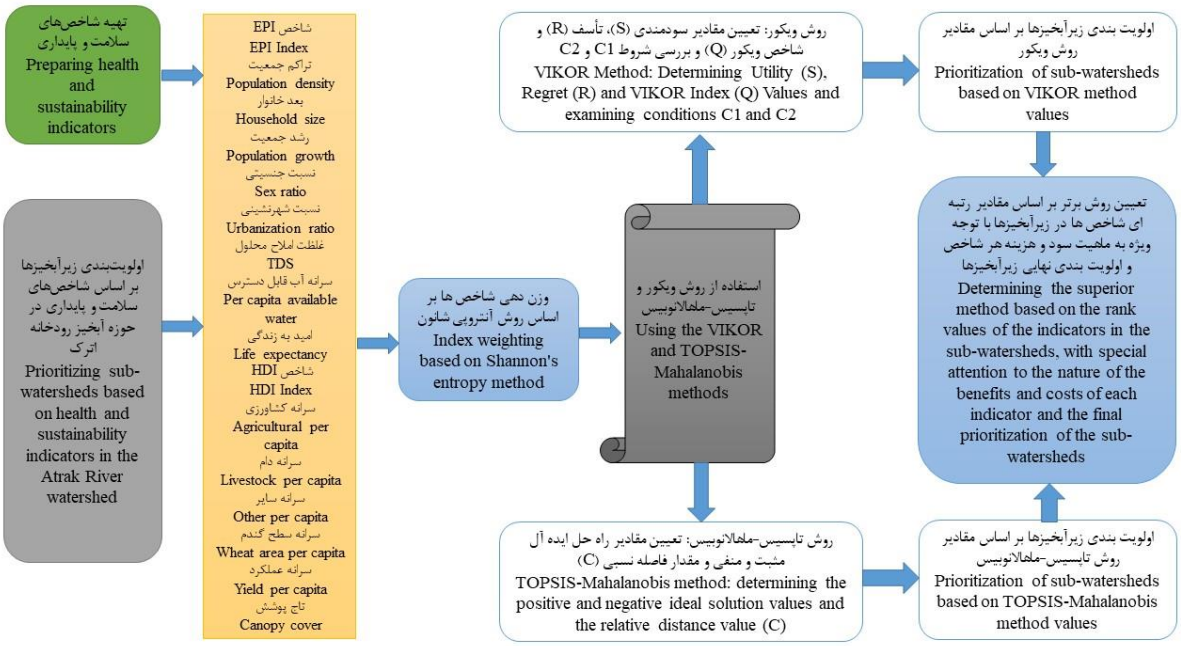
در این تحقیق در مجموع ۱۶ شاخص سلامت و پایداری شامل درصد تاج‌پوشش، سرانه آب قابل دسترس، EPI و TDS، امید به زندگی، تراکم جمعیت، بعد خانوار، رشد جمعیت، شاخص توسعه انسانی، نسبت جنسیتی و نسبت شهرنشینی و اقتصادی سرانه اراضی کشاورزی و باغی، سرانه دام، سرانه سایر (زنبور عسل، کرم ابریشم،



شکل ۱- موقعیت حوزه آبخیز رودخانه اترک در ایران و استان گلستان

Fig 1. Location of the Atrak River watershed in Iran and Golestan Province

[DOI: 10.22034/19.69.4]



شکل ۲- نمودار جریانی مراحل تحقیق

Fig 2. Flowchart of research

ماهی و طیور)، سرانه سطح گندم و متوسط عملکرد گندم در هکتار در زیرآبخیزهای مراوه‌تپه، چات، داشلی‌برون و گمیشان اندازه‌گیری شد. تمام شاخص‌های مورد استفاده از نشریه شماره ۵۰۵ معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس جمهور (دفتر نظام فنی اجرایی) و سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری (معاونت آبخیزداری) اخذ شده است [۱۸]. لازم به ذکر است که در ابتدا ۱۸ شاخص انتخاب شده بود و بر اساس نتایج هم‌خطی، ۲ شاخص حذف شدند.

تراکم جمعیت: تراکم جمعیت از نسبت تعداد جمعیت به مساحت منطقه به دست می‌آید. واحد اندازه‌گیری این شاخص نفر در کیلومترمربع است که هر چقدر مقدار آن کمتر باشد، میزان فشار به منابع طبیعی کمتر خواهد بود. **بعد خانوار:** متوسط بعد خانوار نیز از نسبت تعداد جمعیت به تعداد خانوار به دست می‌آید. افزایش این شاخص باعث کاهش توان اقتصادی خانوار می‌شود. **نسبت جنسیتی:** این شاخص از نسبت تعداد مردان به زنان و به صورت درصد بیان می‌شود. **شهرنشینی:** شهرنشینی و افزایش آن، بر اقتصاد و محیط‌زیست یک منطقه تأثیر زیادی دارد. از مهم‌ترین این آثار منفی شهرنشینی به خطر انداختن محیط‌زیست، استفاده بی‌رویه از منابع و تهدید حیات بشر در آینده و پیامدهای منفی اجتماعی اقتصادی است. **رشد سالانه جمعیت:** رشد سالانه عبارت است از نسبت تغییرات سالانه یک جمعیت به کل جمعیت که به صورت درصد بیان می‌شود. تمامی اطلاعات و ارقام مربوط به پنج شاخص فوق از آمار نفوس و مسکن سال ۱۳۹۵ استفاده شده است. **EPI**: این شاخص از طریق میانگین تغییرات مساحت زمین‌های کشاورزی در حوضه و تغییرات جمعیت شهری (به درصد) در طول دوره مطالعاتی به شکل رابطه ۱ قابل محاسبه می‌باشد:

$$EPI = \frac{(\text{تغییر در جمعیت شهری حوضه (٪)} + \text{تغییر در مساحت زمین‌های کشاورزی در حوضه (٪)})}{۲} \quad (۱)$$

EPI راه مؤثری برای ارزیابی تعادل بین جمعیت شهری و مساحت مناطق زراعی ارائه می‌دهد؛ تعادل بین این دو با حفظ سلامت محیط‌زیست ناشی از فعالیت‌های انسانی رابطه مستقیمی دارد. مقادیر مثبت EPI نشان‌دهنده فشار مضاعف بر روی پوشش گیاهی طبیعی باقی‌مانده در حوضه است [٦]. **کل مواد محلول جامد (TDS)**: غلظت املاح محلول (TDS) در تعیین تناسب آب در مصارف شرب انسان و دام، کشاورزی و صنعت، نقش مهمی دارد. اطلاعات این شاخص از شرکت آب منطقه‌ای گلستان دریافت شده است. **سرانه آب قابل دسترس:** تنش آب زمانی رخ می‌دهد که آب در دسترس به کمتر از ۱۷۰۰ مترمکعب در سال به ازای هر نفر برسد [٦]. سرانه آب قابل دسترس از طریق رابطه ۲ قابل محاسبه است:

$$WA = \frac{\text{میانگین دراز مدت جریان رودخانه}}{\text{جمعیت حوزه}} \quad (۲)$$

HDI: HDI معیار کلی از وضعیت توسعه انسانی است که دست‌آورد کشورها را در سه بعد اساسی توسعه شامل بهداشت و سلامت (امید به زندگی)، آموزش و سطح استاندارد زندگی نشان می‌دهد [٦]. امید به زندگی در بدو تولد از شاخص‌های مهم و بیانگر وضعیت فرهنگی، اجتماعی، اقتصادی و بهداشتی هر جامعه است. شاخص آموزش با استفاده از دو پارامتر طول دوره مورد انتظار برای تحصیل کودکان در سن ورود به مدرسه و متوسط طول دوره‌ای که

[DOI: 10.22034/19.69.4]

صرف آموزش شده است محاسبه می‌شود. بعد از آن از رابطه ۳ مقدار نهایی این زیر شاخص محاسبه شد [٦]:

$$EI = \frac{(MYSI \times EYSI)^{0.5}}{0.951} \quad (۳)$$

که در آن: EI شاخص آموزش، MYSI شاخص میانگین سال‌های تحصیل، EYSI شاخص سال‌های مورد انتظار برای تحصیل هستند.

سرانه درآمد ناخالص ملی (GNI) عبارتست از درآمد کل حاصل شده از اقتصاد تولیدی ناشی از تولید محصولات داخلی و مالکیت عوامل تولیدکننده منهای درآمدی که صرف پرداخت هزینه بابت واردات عوامل تولیدی از سایر جهان شده است، این مقدار با استفاده از نرخ برابری قدرت خرید (PPP) به دلار بین‌المللی تبدیل شده و سپس بر جمعیت کشور در اواسط سال موردنظر تقسیم می‌شود. در نهایت محاسبه HDI با استفاده از رابطه ٤ تعیین شد:

$$HDI = (LEI \times EI \times Log\ II)^{1/3} \quad (٤)$$

در این رابطه LEI شاخص امید به زندگی، EI شاخص آموزش و II شاخص درآمد است [٦]. **شاخص میزان تاج پوشش:** این شاخص میزان پوشش سطح خاک لخت را نشان می‌دهد که هر چقدر مقدار آن بیشتر باشد (به صورت طبیعی) حوزه آبخیز سلامت و پایداری بیشتری نسبت به معضلات فرسایش و رسوب دارد. اطلاعات این بخش از اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان گلستان دریافت شده است. مقادیر شاخص پوشش گیاهی در هر زیرآبخیز بر اساس میانگین وزنی طبقات پوشش با اختصاص نرخ‌های عددی ۱ الی ٤ به طبقات تاج پوشش ۲۵-۱۰٪، ۵۰-۲۵٪، ۷۵-۵۰٪ و بیش از ۷۵٪ صورت گرفت. **سرانه اراضی کشاورزی و باغی:** این شاخص از تقسیم مساحت اراضی باغی و کشاورزی به جمعیت به دست می‌آید و یک شاخص مهم اقتصادی محسوب می‌شود. هر چقدر مقدار این سرانه بیشتر باشد، نشان‌دهنده مالکیت زمین بیشتر و در نتیجه درآمد بیشتر است. **سرانه تعداد دام:** این شاخص از تقسیم تعداد دام موجود به جمعیت به دست می‌آید و یکی دیگر از شاخص‌های مهم اقتصادی محسوب می‌شود. هر چقدر مقدار این سرانه بیشتر باشد، نشان‌دهنده تعداد دام بیشتر و در نتیجه درآمد بیشتر است. **سرانه سایر محصولات درآمدی:** این شاخص از تقسیم تعداد سایر محصولات درآمدی شامل زنبور عسل، کرم ابریشم، ماهی و طیور به جمعیت به دست می‌آید و یک شاخص مهم اقتصادی محسوب می‌شود. هر چقدر مقدار این سرانه بیشتر باشد، نشان‌دهنده درآمد بیشتر است. **سرانه سطح کاشت گندم:** این شاخص از تقسیم میزان مساحت کشت گندم به عنوان یکی از غلات مهم به جمعیت به دست می‌آید و یک شاخص مهم اقتصادی محسوب می‌شود. هر چقدر مقدار این سرانه بیشتر باشد، نشان‌دهنده تولید بیشتر گندم است. **سرانه متوسط عملکرد گندم در هکتار:** این شاخص از تقسیم میزان تولیدی گندم به هکتار به دست می‌آید و یک شاخص مهم اقتصادی محسوب می‌شود. هر چقدر مقدار این سرانه بیشتر باشد، نشان‌دهنده عملکرد بهتر تولید گندم در هکتار و در نتیجه افزایش درآمد به ازای هر هکتار است. اطلاعات پنج شاخص فوق از جهاد کشاورزی استان گلستان دریافت شده است.

روش VIKOR

روش VIKOR به‌عنوان نسخه اصلاح‌شده روش‌های اولویت‌بندی چندمعیاره قدیم، توسط اُپریکوویچ و تسنگ [۱۷] ارائه شده است. روش VIKOR مبتنی بر برنامه‌ریزی توافقی در تصمیم‌گیری چندمعیاره است [۲۰]. برنامه‌ریزی توافقی به‌نوعی از برنامه‌ریزی اطلاق می‌شود که به یک راه‌حل امکان‌پذیر ختم شود، به‌طوری‌که این راه‌حل در نزدیک‌ترین فاصله از راه‌حل ایده‌آل قرار گرفته است. مراحل انجام این روش به شرح زیر است [۱۷]:

تهیه ماتریس تصمیم: در این روش ماتریس تصمیمی ایجاد شده که شامل m گزینه (سطر) و n معیار (ستون) است. در واقع، در این روش m گزینه (زیرآبخیز) نسبت به n معیار یا متغیر تصمیم (شاخص‌های سلامت و پایداری) مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. در این ماتریس معیاری که دارای مطلوبیت مثبت است، معیار سود و معیاری که دارای مطلوبیت منفی است، معیار هزینه نامیده می‌شود.

استانداردسازی (بی‌مقیاس نمودن) ماتریس تصمیم: در این گام مقادیر موجود در ماتریس تصمیم طی یک عملیات ریاضی هم‌مقیاس (نرمال) می‌شوند. به این ترتیب که هرکدام از مقادیر بر اندازه بردار مربوط به همان شاخص تقسیم می‌شود. درنتیجه هر درایه X_{ij} از رابطه ۵ به دست می‌آید (بردار ویژه).

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^{m} x_{ij}} \quad (۵)$$

X_{ij} بیانگر نمره خام معیار i اُم در گزینه j ام و r_{ij} مقدار نرمال شده جدید می‌باشد. معادله فوق را نُرم یک نیز می‌نامند.

وزن‌دهی به ماتریس استاندارد: در این مرحله به هر متغیر تصمیم، وزنی اختصاص می‌یابد. در این تحقیق از روش آنتروپی شانون استفاده شده است.

محاسبه آنتروپی معیارها: طبق معادله شانون، آنتروپی معیار j اُم از رابطه ٦ قابل محاسبه است.

$$H_j = -\frac{\sum_{i=1}^{m} f_{ij} \ln f_{ij}}{\ln m}, \ (i = 1,...,m; j = 1,...,n) \quad (٦)$$

که در آن:

$$f_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sum_{i=1}^{m} r_{ij}}, \ (i = 1,...,m; j = 1,...,n) \quad (۷)$$

در نهایت، وزن معیار j اُم از رابطه ۸ قابل محاسبه است.

$$w_j = \frac{1 - H_j}{n - \sum_{j=1}^{n} H_j}, \ \sum_{j=1}^{n} w_j = 1, \ (j = 1,...,n) \quad (۸)$$

پس از محاسبه وزن هر یک از معیارها، وزن مربوطه در مقادیر

[DOI: 10.22034/19.69.4]

ستون مرتبط ضرب می‌شود. بدین ترتیب، ماتریس استاندارد به ماتریس استاندارد وزن‌دار تبدیل می‌شود.

تعیین گزینه ایده‌آل مثبت و ایده‌آل منفی: گزینه ایده‌آل مثبت (F^*) و منفی (F^-) برای معیارهای سود به صورت روابط ۹ و ۱۰ قابل تصور است.

$$F^* = \left\{ F_1^* = max\ r_{i1}, F_2^* = max\ r_{i2}, ..., F_n^* = max\ r_{in} \right\} \quad (۹)$$

$$F^- = \left\{ F_1^- = min\ r_{i1}, F_2^- = min\ r_{i2}, ..., F_n^- = min\ r_{in} \right\} \quad (۱۰)$$

محاسبه مقادیر سودمندی[1] و تأسف[2]: برای محاسبه سودمندی برای هر گزینه، مجموع فواصل گزینه i اُم از راه‌حل ایده‌آل مثبت در معیارهای مختلف با استفاده از رابطه ۱۱ محاسبه می‌شود.

$$S_j = \sum_{i=1}^{n} w_i \frac{(F_i^* - F_{ij})}{(F_i^* - F_i^-)} \quad (۱۱)$$

برای محاسبه شاخص تأسف برای هر گزینه، حداکثر فاصله گزینه i اُم از راه‌حل ایده‌آل مثبت در معیارهای مختلف از رابطه ۱۲ تعیین می‌شود.

$$R_j = \max_i \left[w_i \frac{(F_i^* - F_{ij})}{(F_i^* - F_i^-)} \right] \quad (۱۲)$$

محاسبه شاخص VIKOR (Q): این شاخص از رابطه ۱۳ محاسبه می‌شود.

$$Q_i = \upsilon \frac{(S_j - S^-)}{(S^* - S^-)} + (1-\upsilon) \frac{(R_j - R^-)}{(R^* - R^-)} \quad (۱۳)$$

که در آن S^* و R^* به ترتیب برابر با حداکثر مقادیر معیارهای سودمندی و تأسف، S^- و R^- به ترتیب حداقل مقادیر معیارهای سودمندی و تأسف و در نهایت υ در اصطلاح وزن استراتژی حداکثر مطلوبیت گروهی است که عموماً ۰/۵ در نظر گرفته می‌شود.

مرتب‌سازی گزینه‌ها بر اساس مقادیر سودمندی (S)، تأسف (R) و شاخص VIKOR (Q): پس از محاسبه مقادیر S، R و Q، گزینه‌ها به تفکیک هر معیار مرتب می‌شوند. حداقل مقدار در هر گزینه، به‌عنوان گزینه برتر شناخته می‌شود. حال پیش از اولویت‌بندی، طبق یک سری قوانین شرطی بایستی قابل پذیرش بودن این رتبه‌بندی (شرط C1) و پایداری نسبی آن (C2) ارزیابی شود. طبق شرط C1 بایستی رابطه ۱۴ بین گزینه‌های برتر اول و دوم برقرار باشد:

$$Q(a'') - Q(a') \geq DQ \quad (۱۴)$$

که در آن a' و a'' به ترتیب گزینه‌های برتر اول و دوم بوده و DQ از رابطه ۱۵ محاسبه می‌شود.

$$DQ = \frac{1}{J-1} \quad (۱۵)$$

که J تعداد گزینه‌ها است.

شرط C2 مربوط به پایداری نتایج اولویت‌بندی است، به‌طوری‌که گزینه‌های برتر اول و دوم حاصل از شاخص Q، بایستی توسط شاخص S یا R نیز (حداقل یکی از آن‌ها) در رتبه مشابهی قرار گرفته باشند. در صورتیکه یکی از شروط فوق رعایت نشده باشد، بایستی به ارائه مجموعه‌ای توافقی از گزینه‌ها روی آورد که در قالب شروط زیر قابل ارائه‌اند. اگر فقط شرط دوم رعایت نشده باشد، بنابراین هر دو گزینه اول و دوم بایستی به صورت توأم به‌عنوان گزینه‌های برتر مورد توجه تصمیم‌گیران قرار گیرند. اگر شرط اول زیر سؤال رود، بایستی مادامی‌که معادله ۱۶ برقرار باشد، به مجموعه گزینه‌های پیشنهادی خود ($a', a'', ..., a^M$) افزود.

$$Q(a^M) - Q(a') < DQ \quad (۱۶)$$

شرط فوق بایستی از گزینه‌های سوم به بعد ارزیابی شود [۱۷].

روش TOPSIS

روش TOPSIS در سال ۱۹۸۱ توسط هوانگ و یون [۱۲] ارائه شد. TOPSIS بر این مفهوم استوار است که گزینه انتخابی باید کمترین فاصله را با راه حل ایده‌آل مثبت (سود) و بیشترین فاصله را با راه‌حل ایده‌آل منفی (هزینه) داشته باشد که این فاصله از نوع اقلیدسی است. روش TOPSIS در عین سادگی، یکی از موفق‌ترین روش‌های ارزیابی چندمعیاره بوده که مورد استقبال محققان بسیاری قرار گرفته است [۸، ۹، ۱۵، ۱۶]. مراحل روش TOPSIS به شرح ذیل می‌باشد [۱۲].

تهیه ماتریس تصمیم: در این روش ماتریس تصمیمی ایجاد شده که شامل m گزینه (سطر) و n شاخص (ستون) است. در این روش m گزینه (زیرآبخیزهای حوزه آبخیز رودخانه اترک) نسبت به n شاخص یا متغیر تصمیم (شاخص‌های سلامت و پایداری) مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. در این ماتریس شاخصی که دارای مطلوبیت مثبت است، شاخص سود و شاخصی که دارای مطلوبیت منفی است، شاخص هزینه است.

نرمال کردن ماتریس تصمیم: در این گام مقادیر موجود در ماتریس تصمیم طی یک عملیات ریاضی هم‌مقیاس (نرمال) می‌شوند. به این ترتیب که هر کدام از مقادیر بر اندازه بردار مربوط به همان شاخص تقسیم می‌شود. در نتیجه هر درایه X_{ij} از رابطه ۱۷ به دست می‌آید.

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{m} x_{ij}^2}} \quad (۱۷)$$

X_{ij} نشانگر نمره خام صفت iام در گزینه jام و r_{ij} مقدار نرمال شده جدید است.

وزن‌دهی به ماتریس نرمال شده: در این مرحله به هر متغیر تصمیم وزنی اختصاص یافته که این وزن از روش آنتروپی شانون قابل محاسبه می‌باشد.

تعیین راه حل ایده آل مثبت و راه حل ایده آل منفی: در مواقعی

1. Utility Index
2. Regret Index

[DOI: 10.22034/19.69.4]

که با متغیرهای سود سروکار داریم، راه‌حل ایده‌آل مثبت و منفی به ترتیب برابر با حداکثر ($Max(t_{bj})$) و حداقل ($Min(t_{bj})$) مقادیر هر گزینه در هر ستون است و برعکس این قضیه برای متغیرهای هزینه صادق است ($Min(t_{wj})$ و $Max(t_{wj})$).

به دست آوردن اندازه فاصله‌ها: در این مرحله فاصله سایر گزینه‌ها را از راه‌حل ایده‌آل مثبت و منفی با استفاده از روش فاصله اقلیدسی در روابط ۱۸ و ۱۹ سنجیده شده و آن‌ها را به ترتیب d_{ib} و d_{iw} می‌نامند.

$$d_{ib} = \sqrt{\sum_{j=1}^{n}(t_{ij} - t_{bj})^2} \qquad (۱۸)$$

$$d_{iw} = \sqrt{\sum_{j=1}^{n}(t_{ij} - t_{wj})^2} \qquad (۱۹)$$

محاسبه نزدیکی نسبی به راه حل ایده آل: این معیار از طریق رابطه ۲۰ به دست می‌آید. مقادیر نزدیکی نسبی گزینه‌ها، معیار نهایی اولویت‌بندی آن‌ها خواهد بود.

$$S_{iw} = \frac{d_{iw}}{d_{iw} + d_{ib}} \qquad (۲۰)$$

با بررسی الگوریتم‌های محاسباتی نظیر TOPSIS، مشخص می‌شود که این روش‌ها از فاصله اقلیدسی برای محاسبه فاصله به راه‌حل‌های مثبت و منفی ایده‌آل استفاده می‌نمایند که مبتنی بر آن فرض می‌شود که معیارها روند افزایشی-کاهشی یکنواختی دارند و همچنین از تابع توزیع احتمالاتی نرمال (گوسن) پیروی می‌کنند [۲۳]. در حالیکه این فرض در مسائل طبیعی به‌ویژه مخاطرات طبیعی یک ساده‌انگاری محسوب می‌شود.

در مقابل، روش فاصله ماهالانوبیس متغیرهای محیطی را بدون تغییر و دست‌نخورده مورد ارزیابی قرار می‌دهد؛ بطوریکه همه متغیرها، ناهمسان فرض می‌شوند. بنا به مستقل از مقیاس بودن روش فاصله ماهالانوبیس، هیچ نیازی به نرمال‌سازی داده‌ها نیست؛ از سوی دیگر عملگر کوواریانس در فرمول محاسباتی این روش، همبستگی بین متغیرها را در نظر می‌گیرد. بنابراین نتایج آن نیز مبتنی بر عملیات ریاضی قوی‌تر و عاری از فرضیات ساده‌انگارانه بوده و در نتیجه برای تصمیم‌گیران قابل‌اتکاتر خواهد بود [۱۰، ۲۷، ۳۱].

روش Mahalanobis

این نوع از فاصله در سال ۱۹۳۶ توسط پراسانتا کاندرا ماهالانوبیس ارائه شده است [۱۴]. در یک محیط فیزیکی، مشاهده یک پدیده وابسته به یک شرایط مکانی خاص است. این شرایط خاص تحت تأثیر یک سری متغیر در قالب برداری قابل توصیف است. به عبارت دیگر هر سلول از یک محیط فیزیکی در قالب یک بردار به صورت رابطه ۲۱ قابل نمایش است.

$$Cell_i = [a_{i1}, a_{i2}, a_{i3} \ldots a_{in}; S] \qquad (۲۱)$$

که در آن $Cell_i$، i اُمین سلول و a_{i1}، a_{i2}، a_{i3}، ...، a_{in} متغیرهای تأثیرگذار معرف هر پیکسل (مقادیر معیارها در سلول مدنظر) بوده و S بیانگر درجه ایده‌آلی سلول مدنظر است. فاصله سایر پیکسل‌ها از شرایط ایده‌آل موردنظر به صورت رابطه ۲۲ قابل بیان است [۱۴].

$$D_m = \sqrt{\left(x - \bar{M}\right)^T \Sigma^{-1} \left(x - \bar{M}\right)} \qquad (۲۲)$$

که در آن X بردار یا ماتریس متغیرهای تصمیم، m میانگین مقادیر هر یک از متغیرها در بین گزینه‌ها، T معکوس یا به اصطلاح ترآن‌ها ده ماتریس مقادیر متغیرها و Σ^{-1} ماتریس کوواریانس معکوس است. هرچه این فاصله (D_m) کم‌تر باشد به معنای نزدیک‌ترین فاصله احتمالاتی به شرایط موردنظر (ایده‌آل یا تهدیدآمیز) بوده و برعکس. مبتنی بر روابط فاصله ماهالانوبیس که در بالا ارائه شد، مدل تلفیقی و بهبودیافته TOPSIS-Mahalanobis به صورت ذیل ارائه شده و جهت اولویت‌بندی گزینه‌های هدف مورد استفاده قرار خواهد گرفت.

روش تلفیقی TOPSIS-Mahalanobis

با توجه به روابط فوق، روابط تلفیقی پیشنهاد شده در این مطالعه به صورت زیر ارائه می‌شوند.

$$d_{ib} = \sqrt{\left(t_{bj} - t_{ij}\right)^T \Omega^T C^{-1} \Omega \left(t_{bj} - t_{ij}\right)} \qquad (۲۳)$$

$$d_{iw} = \sqrt{\left(t_{ij} - t_{wj}\right)^T \Omega^T C^{-1} \Omega \left(t_{wj} - t_{ij}\right)} \qquad (۲۴)$$

$$C = \frac{d_{iw}}{d_{iw} + d_{ib}} \qquad (۲۵)$$

که در آن $\dot{U}$ برابر با جذر قطر ماتریس وزن شاخص‌ها بوده که پیش‌تر از روش آنتروپی شانون محاسبه شد (رابطه ۲۳).

$$\Omega = diag(\sqrt{W_1}, \sqrt{W_2}, \ldots, \sqrt{W_n}) \qquad (۲۶)$$

مقدار Siw در رابطه ۲۲ بین ۰ و ۱ متغیر بوده و هرچقدر به عدد ۱ نزدیکتر باشد، نشان از وضعیت مطلوبتر زیرآبخیز از نظر شرایط مرکب شاخص‌های سلامت و پایداری بوده و بالعکس هرچقدر به عدد صفر نزدیکتر باشد بیانگر وضعیت بحرانی زیرآبخیز و اولویت بالاتر برای اجرای و تخصیص اقدامات مدیریتی حوزه آبخیز است [۲۷، ۳۱].

نتایج

مقادیر عددی شاخص‌ها در هر زیرآبخیز و ارتباط معنایی بین شاخص و هدف مطالعه که مبنای تعیین ماهیت سود و هزینه بودن هر شاخص است در جدول ۱ ارائه شده است.

مجموعه جداول محاسباتی روش آنتروپی شانون برای ماتریس

[DOI: 10.22034/19.69.4]

جدول ۱- مقادیر عددی شاخص‌های سلامت و پایداری در زیرآبخیزها

Table 1- Numerical values of health and sustainability indicators in sub-watersheds

نام شاخص Indicator	عبارت اختصاری Abbreviation	ارتباط معنایی شاخص و هدف Relationship between indicator and target	مقادیر شاخص‌ها در زیرآبخیزها Values of indicators in sub-watersheds			
			مراوه تپه Maraveh Tapeh	چات Chat	داشلی برون Dashli-Brun	گمیشان Gomishan
شاخص EPI EPI Index	EPI		38.99	49.9	17.6	9.9
تراکم جمعیت Population density	Tarakom		54.9	102.2	83.6	11.6
بعد خانوار Household size	Boad	ارتباط معکوس (هزینه) Reverse connection (cost)	3.7	3.5	3.6	3.8
رشد جمعیت Population growth	Roshd		1.91	1.37	1.21	1.63
نسبت جنسیتی Sex ratio	Jensiati		99.7	101.3	100.5	101.9
نسبت شهرنشینی Urbanization ratio	Shahrneshi		14.2	44.3	34.7	52.2
TDS	TDS		1423	3473	5158	9173
سرانه آب قابل دسترس Per capita available water	WA		3870	2476	2164	2287
امید به زندگی Life expectancy	Omid		73.5	72	71	69
شاخص HDI HDI Index	HDI		0.63	0.613	0.601	0.577
سرانه کشاورزی Agricultural per capita	Sarane_Agr		2.02	0.81	1.42	4.43
سرانه دام Livestock per capita	Sarane_dam	ارتباط مستقیم (سود) Direct connection (profit)	0.45	1.13	1.88	0.4
سرانه سایر Other per capita	Sarane_sayer		0.19	0.51	1.02	0.17
سرانه سطح گندم Wheat area per capita	Sarane_gandom		1.4	0.7	1.1	3.3
سرانه عملکرد Yield per capita	Amalkard		1.68	1.53	1.3	1.4
تاج پوشش Canopy cover	Canopy		1.45	1.69	2.14	1.24

ارائه شده در جدول ۱ محاسبه شد که در جدول ۲ ارائه می‌شود. جدول ۳ وزن شاخص‌های سلامت و پایداری حوزه آبخیز منتج از روش آنتروپی شانون را نشان می‌دهد. بر اساس جدول ۳ سرانه گندم، سرانه سایر محصولات (زنبور عسل و ...)، سرانه دام، سرانه کشاورزی و تراکم جمعیت دارای بیشترین وزن هستند

نتایج روش VIKOR در اولویت‌بندی چندمعیاره زیرآبخیزها

نتایج روش VIKOR در قالب ٤ ماتریس به ترتیب مراحل ذکر شده در بخش مواد و روش‌ها در جداول ٤ تا ٧ ارائه شد. در نهایت با رتبه‌بندی سه شاخص R، S و Q به بررسی اولویت‌بندی زیرآبخیزها (جدول ۸) و همچنین بررسی پذیرش یا رد دو شرط

[DOI: 10.22034/19.69.4]

جدول ۲- مجموعه مراحل محاسباتی وزن شاخص‌ها با روش آنتروپی شانون

Table 2- Set of steps for calculating the weight of indicators using the Shannon entropy method

Canopy	Amalkard	Sarane_gandom	Sarane_sayer	Sarane_dam	Sarane_Agr	HDI	Omid	WA	TDS	Shahrneshi	Jensiati	Roshd	Boad	Tarakom	EPI	**x**
1.45	1.68	1.4	0.19	0.45	2.02	0.63	73.5	3870	1423	14.2	99.7	1.91	3.7	54.9	38.99	مراوه تپه Maraveh Tape
1.69	1.53	0.7	0.51	1.13	0.81	0.613	72	2476	3473	44.3	101.3	1.37	3.5	102.2	49.9	چات Chat
2.14	1.3	1.1	1.02	1.88	1.42	0.601	71	2164	5158	34.7	100.5	1.21	3.6	83.6	17.6	داشلی برون Dashli-Brun
1.24	1.4	3.3	0.17	0.4	4.43	0.577	69	2287	9173	52.2	101.9	1.63	3.8	11.6	9.9	گمیشان Gomishan
Canopy	Amalkard	Sarane_gandom	Sarane_sayer	Sarane_dam	Sarane_Agr	HDI	Omid	WA	TDS	Shahrneshi	Jensiati	Roshd	Boad	Tarakom	EPI	**f**
0.222	0.284	0.215	0.1	0.116	0.232	0.26	0.26	0.36	0.07	0.097	0.247	0.312	0.25	0.217	0.335	مراوه تپه Maraveh Tape
0.258	0.258	0.107	0.269	0.292	0.093	0.253	0.25	0.23	0.18	0.304	0.251	0.224	0.24	0.405	0.429	چات Chat
0.328	0.219	0.169	0.539	0.487	0.163	0.248	0.25	0.2	0.27	0.238	0.249	0.198	0.25	0.331	0.151	داشلی برون Dashli-Brun
0.19	0.236	0.507	0.089	0.103	0.51	0.238	0.24	0.21	0.48	0.359	0.252	0.266	0.26	0.045	0.085	گمیشان Gomishan
Canopy	Amalkard	Sarane_gandom	Sarane_sayer	Sarane_dam	Sarane_Agr	HDI	Omid	WA	TDS	Shahrneshi	Jensiati	Roshd	Boad	Tarakom	EPI	**H1**
0.241	0.257	0.238	0.166	0.18	0.244	0.253	0.25	0.27	0.14	0.163	0.249	0.262	0.25	0.239	0.264	مراوه تپه Maraveh Tape
0.252	0.252	0.173	0.254	0.259	0.159	0.251	0.25	0.24	0.22	0.261	0.250	0.242	0.25	0.264	0.262	چات Chat
0.263	0.24	0.216	0.24	0.252	0.213	0.25	0.25	0.23	0.25	0.246	0.249	0.231	0.25	0.264	0.206	داشلی برون Dashli-Brun
0.228	0.246	0.248	0.156	0.169	0.247	0.247	0.25	0.24	0.25	0.265	0.25	0.254	0.25	0.102	0.151	گمیشان Gomishan
Canopy	Amalkard	Sarane_gandom	Sarane_sayer	Sarane_dam	Sarane_Agr	HDI	Omid	WA	TDS	Shahrneshi	Jensiati	Roshd	Boad	Tarakom	EPI	**H2**
0.71	0.718	0.632	0.59	0.622	0.624	0.721	0.72	0.71	0.63	0.675	0.7213	0.714	0.72	0.627	0.637	اترک Atrak

جدول ۳- وزن شاخص‌های سلامت و پایداری حوزه آبخیز منتج از روش آنتروپی شانون

Table 3: Weight of watershed health and sustainability indicators resulting from the Shannon entropy method

Canopy	Amalkard	Sarane_gandom	Sarane_sayer	Sarane_dam	Sarane_Agr	HDI	Omid	WA	TDS	Shahrneshi	Jensiati	Roshd	Boad	Tarakom	EPI	**W**
0.055	0.053	0.079	0.078	0.072	0.071	0.053	0.05	0.06	0.07	0.061	0.053	0.055	0.05	0.071	0.069	اترک Atrak

[DOI: 10.22034/19.69.4]

C1 و C2 (جدول ۹) و نتیجتاً استنتاج نتایج کاربردی پرداخته شد. مدل VIKOR در انتهای اولویت‌بندی با دو شرط C1 و C2 که پیش‌تر اشاره شد، به اطمینان‌سنجی نتایج خود می‌پردازد که نشان از انعطاف‌پذیری این مدل دارد.

بر اساس جدول ۸ مشخص است که زیرآبخیز گمیشان بدترین وضعیت را داراست. لذا، زیرآبخیز گمیشان، در رتبه آخر سلامت و پایداری قرار می‌گیرد. از سویی زیرآبخیز مراوه تپه از نظر هر سه شاخص R، S و Q در رتبه نخست یعنی بهترین وضعیت قرار می‌گیرد. هرچند، مقدار عددی Q در بین دو زیرآبخیز نخست و دوم (مراوه‌تپه و داشلی‌برون) بسیار نزدیک بوده و به لحاظ آماری معنی‌دار به نظر نمی‌رسد. این مهم در شرط اول (C1) روش VIKOR خود را نشان داده، به‌طوری که شرط Q2-Q1≥DQ برقرار نبوده لذا، می‌بایست دو زیرآبخیز نخست و دوم را توامان به عنوان گزینه‌های برتر معرفی نمود و نتیجتاً چات و گمیشان به ترتیب در رتبه دوم و سوم قرار خواهند گرفت (جدول ۱۰). این در حالی است که بر اساس شاخص ویکور با مقادیر عددی ۰/۰۰۰، ۰/۱۰۲، ۰/۸۴۵ و ۱ به ترتیب زیرآبخیزهای مراوه‌تپه، چات، داشلی برون و گمیشان دارای وضعیت سلامت و پایداری بهتری بر اساس شاخص‌ها مورد بررسی هستند. تغییر اولویت‌بندی زیرآبخیزها بر اساس شروط روش ویکور از مزیت‌های روش فوق است. مزیت این روش در تحقیقات دیگران از جمله چزگی و سهیلی [۸]، ماتوسز و همکاران [۱۶]، کوئک و همکاران [۱۹]، شاه و پان [۲۴] و شرف [۲۵] نیز اشاره شده است که هم‌سو با تحقیق حاضر است.

نتایج روش ترکیبی TOPSIS-Mahalanobis

در روش ترکیبی TOPSIS-Mahalanobis ماتریس تصمیم تشکیل شده ابتدا می‌بایست نرمال‌سازی شده (جدول ۱۱) و سپس ماتریس‌های آرایه و ترآن‌ها ده آرایه (جدول ۱۲ و ۱۳)، کوواریانس و معکوس کوواریانس ماتریس تصمیم (جدول ۱۴، ۱۵) و ماتریس قطری جذر وزن شاخص‌ها (حاصل از روش آنتروپی شانون) (جدول ۱۶) حل خواهد شد. سپس دو ماتریس فاصله از راه‌حل ایده‌آل مثبت و منفی در جداول ۱۷ و ۱۸ ارائه شده‌اند. در نهایت مقادیر فاصله نسبی از راه‌حل ایده‌آل به ترتیب بیشترین به کمترین در جدول ۱۹ ارائه شده است. لازم به ذکر است، به‌سبب دارا بودن ۱۶ شاخص و تشکیل یک ماتریس با ابعاد بزرگ، کلیه محاسبات در محیط MATLAB انجام گرفت. نتایج نشان داد که مقادیر فاصله نسبی C از راه‌حل ایده‌آل به ترتیب با مقادیر عددی ۰/۹۸۵، ۰/۶۳۶، ۵۱۵/ و ۰/۰۳۷ متعلق به زیرآبخیزهای داشلی‌برون، چات، مراوه تپه و گمیشان است و به این ترتیب زیرآبخیز داشلی‌برون وضعیت بهتری نسبت به سایر زیرآبخیزها دارد. این نتایج بیانگر تفاوت بین دو روش VIKOR و TOPSIS-Mahalanobis در اولویت اول است، ولی هر دو روش زیرآبخیز گمیشان را بدترین زیرآبخیز معرفی کرده‌اند. تفاوت در اولویت اول زیرآبخیزها با اهداف مختلف در سایر تحقیقات از جمله عباسی و همکاران [۱]، اُپریکوویچ و تسنگ [۱۷]، رحیمی و همکاران [۲۰]، سرکار و همکاران [۲۳] و تیموری و الوندی [۳۰] نیز بیان شده است که در تحقیق حاضر نیز این تفاوت نمایان شد و همسو با سایر تحقیقات بوده است. بر اساس نتایج و مطالعات میدانی و شناخت کافی نسبت به حوزه آبخیز روش VIKOR نسبت به روش TOPSIS-Mahalanobis نتایج بهتری بر اساس شاخص‌های مورد استفاده جهت اولویت‌بندی زیرآبخیزهای حوزه آبخیز رودخانه اترک ارائه داده است. معرفی روش VIKOR به عنوان روش برتر در مطالعات رحیمی و همکاران [۱۹]، شاه و پان [۲۴]، شریفی‌کیا و همکاران [۲۶] و تیموری و الوندی [۳۰] نیز نسبت به سایر روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره ارائه شده است که هم‌راستا با تحقیق حاضر هستند. این در حالی است که روش TOPSIS در مطالعات ماتوسز و همکاران [۱۶] و در مطالعات سرکار و همکاران [۲۳] روش FAHP به عنوان روش برتر معرفی شده‌اند.

بر اساس جدول ۱۹، زیرآبخیز داشلی برون در بهترین وضعیت و گمیشان در بحرانی‌ترین وضعیت قرار دارد. هرچند، بررسی‌ها نشان می‌دهد مقادیر عددی سه زیرآبخیز اول نسبتا به یکدیگر نزدیک بوده ولی زیرآبخیز گمیشان با اختلاف زیادی در آخرین رتبه قرار دارد. به عبارت دیگر، از بحرانی بودن وضعیت زیرآبخیز گمیشان و لزوم اختصاص اقدامات مدیریت آبخیز به این زیرآبخیز اطمینان بالا وجود دارد.

اما جهت تعیین مدل برتر، می‌توان جدول ۲۰ را به عنوان گواهی مستدل ارائه نمود. جدول ۲۰ متسخرج از ماتریس تصمیم اولیه بوده که در آن مقادیر عددی شاخص‌ها در هر زیرآبخیز به صورت مقایسه درونی، به‌حالت رتبه‌ای ارائه شده‌اند.

بر اساس جدول ۲۰ کاملاً مشخص است که زیرآبخیز مراوه‌تپه با هفت رتبه ۱ و تنها یک رتبه ٤، در وضعیت بهتری نسبت به‌سایر زیرآبخیزها بوده، هرچند زیرآبخیز داشلی برون تنها با دو رتبه ٤ و چهار رتبه ۱ با مراوه‌تپه در رقابت است. در مقابل، زیرآبخیز گمیشان با نُه رتبه ٤، طبیعتاً در بدترین وضعیت سلامت و پایداری به‌سر می‌برد. لذا، مسئله‌ای که از جدول ۲۰ کاملاً قابل استنتاج است، رتبه نخست و آخر جدول اولویت‌بندی چندمعیاره است که می‌بایست به‌ترتیب به زیرآبخیزهای مراوه‌تپه و گمیشان تعلق گیرد.

[DOI: 10.22034/19.69.4]

جدول ٤- مقادیر نرمال شده ماتریس تصمیم

Table 4- Normalized values of the decision matrix

Canopy	Amalkard	Sarane_gandom	Sarane_sayer	Sarane_dam	Sarane_Agr	HDI	Omid	WA	TDS	Shahrneshi	Jensiati	Roshd	Boad	Tarakom	EPI	**Normal**
0.222	0.284	0.215	0.101	0.117	0.233	0.260	0.257	0.358	0.074	0.098	0.247	0.312	0.253	0.218	0.335	مراوه تپه Maraveh Tape
0.259	0.259	0.108	0.270	0.293	0.093	0.253	0.252	0.229	0.181	0.305	0.251	0.224	0.240	0.405	0.429	چات Chat
0.328	0.220	0.169	0.540	0.487	0.164	0.248	0.249	0.200	0.268	0.239	0.249	0.198	0.247	0.331	0.151	داشلی برون Dashli-Brun
0.191	0.237	0.508	0.090	0.104	0.510	0.238	0.242	0.212	0.477	0.359	0.253	0.266	0.260	0.046	0.085	گمیشان Gomishan

جدول ٥- ماتریس وزن‌دار

Table 5- Weighted matrix

0.0553	0.0538	0.0703	0.0784	0.0723	0.0718	0.0533	0.0533	0.0563	0.0711	0.0620	0.0533	0.0548	0.0533	0.0713	0.0694	
Canopy	Amalkard	Sarane_gandom	Sarane_sayer	Sarane_dam	Sarane_Agr	HDI	Omid	WA	TDS	Shahrneshi	Jensiati	Roshd	Boad	Tarakom	EPI	**Weights**
0.012	0.015	0.015	0.008	0.008	0.017	0.014	0.014	0.020	0.005	0.006	0.013	0.017	0.014	0.016	0.023	مراوه تپه Maraveh Tape
0.014	0.014	0.008	0.021	0.021	0.007	0.014	0.013	0.013	0.013	0.019	0.013	0.012	0.013	0.029	0.030	چات Chat
0.018	0.012	0.012	0.042	0.035	0.012	0.013	0.013	0.011	0.019	0.015	0.013	0.011	0.013	0.024	0.011	داشلی برون Dashli-Brun
0.011	0.013	0.036	0.007	0.008	0.037	0.013	0.013	0.012	0.034	0.022	0.014	0.015	0.014	0.003	0.006	گمیشان Gomishan

جدول ٦- راه‌حل ایده‌آل مثبت و منفی

Table 6 - Positive and negative ideal solutions

Canopy	Amalkard	Sarane_gandom	Sarane_sayer	Sarane_dam	Sarane_Agr	HDI	Omid	WA	TDS	Shahrneshi	Jensiati	Roshd	Boad	Tarakom	EPI	**Ideal Solution**
0.328	0.284	0.508	0.540	0.487	0.510	0.260	0.257	0.358	0.074	0.098	0.247	0.198	0.240	0.046	0.085	Best
0.191	0.220	0.108	0.090	0.104	0.093	0.238	0.242	0.200	0.477	0.359	0.253	0.312	0.260	0.405	0.429	Worst

جدول ۷- شاخص‌های R، S و Q

Table 7- R، S and Q indices

Q	**R**	**S**	Canopy	Amalkard	Sarane_g.	Sarane_sayer	Sarane_dam	Sarane_Agr	HDI	Omid	WA	TDS	Shahrneshi	Jensiati	Roshd	Boad	Tarakom	EPI	زیرآبخیز
0.000	0.017	0.098	0.010	0.000	0.011	0.008	0.008	0.011	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.017	0.009	0.007	0.017	مراوه تپه Maraveh Tape
0.845	0.030	0.159	0.007	0.006	0.008	0.013	0.011	0.007	0.004	0.005	0.011	0.003	0.015	0.010	0.003	0.000	0.029	0.030	چات Chat
0.102	0.019	0.105	0.000	0.012	0.010	0.000	0.000	0.010	0.007	0.007	0.011	0.009	0.008	0.005	0.000	0.004	0.019	0.002	داشلی برون Dashli-Brun
1.000	0.034	0.163	0.011	0.009	0.000	0.007	0.008	0.000	0.013	0.013	0.011	0.034	0.022	0.014	0.009	0.014	0.000	0.000	گمیشان Gomishan

[DOI: 10.22034/19.69.4]

جدول ۸- اولویت‌بندی زیرآبخیزها بر اساس سه شاخص R، S و Q (کمترین مقدار در هر شاخص نشانگر زیرآبخیز با بهترین وضعیت)

Table 8 - Prioritization of sub-watersheds based on the three indices R, S and Q (the lowest value in each index indicates the sub-watershed with the best condition)

Q		R		S		زیرآبخیز Subwatershed
رتبه Rank	مقدار عددی Numerical value	رتبه Rank	مقدار عددی Numerical value	رتبه Rank	مقدار عددی Numerical value	
1	0.000	1	0.017	1	0.098	مراوه تپه Maraveh Tape
2	0.102	2	0.019	2	0.105	چات Chat
3	0.845	3	0.030	3	0.159	داشلی برون Dashli-Brun
4	1.000	4	0.034	4	0.163	گمیشان Gomishan

جدول ۹- بررسی پایداری شروط C1 و C2

Table 9- Stability assessment of conditions C1 and C2

	C1		C2
DQ	0.33		
Q2-Q1	0.1016	☒	☑
Q3-Q1	0.8448	☑	

جدول ۱۰- اولویت‌بندی نهایی روش VIKOR به ترتیب بهترین تا بدترین وضعیت سلامت و پایداری

Table 10- Final prioritization of the VIKOR method in order of best to worst health and stability status

نام زیرآبخیز Sub watershed	وضعیت سلامت و پایداری health status and sustainability	رتبه Rank
مراوه تپه، داشلی برون Maraveh Tapeh and Dashli-Brun	بهترین Best	اول First
چات Chat	متوسط Medium	دوم Second
گمیشان Gomishan	بدترین Wrost	سوم Third

جدول ۱۱- ماتریس تصمیم نرمال شده (TOPSIS)

Table 11 - Normalized decision matrix (TOPSIS)

Canopy	Amalkard	Sarane_ gandom	Sarane_ sayer	Sarane_ dam	Sarane_ Agr	HDI	Omid	WA	TDS	Shahrneshi	Jensiati	Roshd	Boad	Tarakom	EPI	Normal
0.44	0.57	0.37	0.16	0.20	0.39	0.52	0.51	0.69	0.13	0.18	0.49	0.61	0.51	0.38	0.59	مراوه تپه Maraveh Tape
0.51	0.52	0.18	0.44	0.50	0.16	0.51	0.50	0.44	0.31	0.57	0.50	0.44	0.48	0.71	0.75	چات Chat
0.64	0.44	0.29	0.87	0.83	0.28	0.50	0.50	0.39	0.46	0.44	0.50	0.39	0.49	0.58	0.26	داشلی برون Dashli-Brun
0.37	0.47	0.87	0.15	0.18	0.86	0.48	0.48	0.41	0.82	0.67	0.51	0.52	0.52	0.08	0.15	گمیشان Gomishan

[DOI: 10.22034/19.69.4]

جدول ۱۲- ماتریس آرایه (t_{bj}-t_{ij})

Table 12- matrix (t_{bj}-t_{ij})

Canopy	Amalkard	Sarane_gandom	Sarane_sayer	Sarane_dam	Sarane_Agr	HDI	Omid	WA	TDS	Shahrneshi	Jensiati	Roshd	Boad	Tarakom	EPI	
0.21	0.00	0.50	0.71	0.63	0.47	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.23	-0.03	-0.30	-0.44	
0.14	0.05	0.68	0.44	0.33	0.70	0.01	0.01	0.25	-0.18	-0.39	-0.01	-0.05	0.00	-0.63	-0.60	t_{bj}-t_{ij}
0.00	0.13	0.58	0.00	0.00	0.59	0.02	0.02	0.31	-0.33	-0.26	0.00	0.00	-0.01	-0.50	-0.12	
0.27	0.09	0.00	0.73	0.65	0.00	0.04	0.03	0.28	-0.69	-0.49	-0.01	-0.14	-0.04	0.00	0.00	

جدول ۱۳- ترآن‌ها ده ماتریس آرایه (t_{bj}-t_{ij})

Table 13- Transpose of the matrix (t_{bj}-t_{ij})

Transpose (t_{bj}-t_{ij})											
0.710	0.436	0.000	0.727	0.000	-0.184	-0.334	-0.694	-0.438	-0.602	-0.116	0.000
0.498	0.682	0.577	0.000	0.000	0.250	0.306	0.284	-0.302	-0.632	-0.502	0.000
0.000	0.051	0.128	0.094	0.000	0.011	0.018	0.032	-0.027	0.000	-0.014	-0.041
0.208	0.136	0.000	0.269	0.000	0.014	0.024	0.044	-0.225	-0.052	0.000	-0.135
				0.469	0.705	0.586	0.000	0.000	-0.008	-0.004	-0.011
				0.629	0.330	0.000	0.651	0.000	-0.386	-0.263	-0.487

جدول ۱۴- کوواریانس ماتریس تصمیم

Table 14- Decision Matrix Covariance

Canopy	Amalkard	Sarane_gandom	Sarane_sayer	Sarane_dam	Sarane_Agr	HDI	Omid	WA	TDS	Shahrneshi	Jensiati	Roshd	Boad	Tarakom	EPI	Cov.
0.002	0.011	-0.063	-0.011	-0.003	-0.063	0.004	0.003	0.019	-0.067	-0.022	-0.001	0.004	-0.003	0.052	0.078	EPI
0.024	0.001	-0.080	0.061	0.060	-0.083	0.003	0.002	-0.003	-0.050	-0.011	0.000	-0.016	-0.005	0.076	0.052	Tarakom
-0.001	0.000	0.005	-0.004	-0.004	0.005	0.000	0.000	0.001	0.003	0.000	0.000	0.001	0.000	-0.005	-0.003	Boad
-0.009	0.004	0.011	-0.029	-0.027	0.013	0.001	0.000	0.012	-0.007	-0.010	0.000	0.010	0.001	-0.016	0.004	Roshd
0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	-0.001	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.001	Jensiati
-0.003	-0.007	0.028	0.003	0.004	0.025	-0.003	-0.002	-0.026	0.051	0.044	0.001	-0.010	0.000	-0.011	-0.022	Shahrneshi
-0.009	-0.012	0.071	-0.006	-0.008	0.069	-0.005	-0.004	-0.030	0.087	0.051	0.001	-0.007	0.003	-0.050	-0.067	TDS
-0.006	0.007	-0.007	-0.026	-0.024	-0.005	0.002	0.002	0.020	-0.030	-0.026	-0.001	0.012	0.001	-0.003	0.019	WA
0.000	0.001	-0.003	0.000	0.000	-0.003	0.000	0.000	0.002	-0.004	-0.002	0.000	0.000	0.000	0.002	0.003	Omid
0.000	0.001	-0.004	0.000	0.000	-0.004	0.000	0.000	0.002	-0.005	-0.003	0.000	0.001	0.000	0.003	0.004	HDI
-0.026	-0.003	0.093	-0.061	-0.060	0.095	-0.004	-0.003	-0.005	0.069	0.025	0.001	0.013	0.005	-0.083	-0.063	Sarane_Agr
0.035	-0.011	-0.056	0.103	0.093	-0.060	0.000	0.000	-0.024	-0.008	0.004	0.000	-0.027	-0.004	0.060	-0.003	Sarane_dam
0.039	-0.012	-0.057	0.115	0.103	-0.061	0.000	0.000	-0.026	-0.006	0.003	0.000	-0.029	-0.004	0.061	-0.011	Sarane_sayer
-0.025	-0.004	0.091	-0.057	-0.056	0.093	-0.004	-0.003	-0.007	0.071	0.028	0.001	0.011	0.005	-0.080	-0.063	Sarane_ gandom
-0.003	0.003	-0.004	-0.012	-0.011	-0.003	0.001	0.001	0.007	-0.012	-0.007	0.000	0.004	0.000	0.001	0.011	Amalkard
0.014	-0.003	-0.025	0.039	0.035	-0.026	0.000	0.000	-0.006	-0.009	-0.003	0.000	-0.009	-0.001	0.024	0.002	Canopy

[DOI: 10.22034/19.69.4]

جدول ۱۵- کوواریانس معکوس ماتریس تصمیم

Table 15 - Inverse covariance of the decision matrix

Canopy	Amalkard	Sarane_g..	Sarane_s.	Sarane_d.	Sarane_A.	HDI	Omid	WA	TDS	.Shahr	Jensiati	Roshd	Boad	Tarak.	EPI	Inv. Cov.
-2.70E+17	1.61E+17	3.31E+16	-8.02527E+14	7.61E+16	-5.16E+16	1.32E+17	-9.85E+17	-1.97E+16	-3.91E+16	-1.26E+17	3.48E+18	-1.50E+17	4.18E+17	9.78E+15	-2.50E+16	EPI
-4.93E+16	-1.04E+17	-5.50E+16	-7.05401E+14	4.22E+15	4.15E+16	3.00E+17	-2.93E+17	4.52E+16	-3.68E+15	3.16E+16	-1.05E+18	-7.38E+16	-5.47E+16	-2.95E+16	9.78E+15	Tarakom
-1.69E+19	2.94E+18	3.64E+17	2.51E+17	3.20E+18	-1.78E+17	2.34E+19	-7.63E+19	1.73E+18	-9.05E+17	-4.86E+18	3.11E+18	-1.45E+19	8.67E+18	-5.47E+16	4.18E+17	Boad
9.25E+18	-2.69E+18	-9.23E+16	8.41E+16	-1.95E+18	4.77E+17	-8.97E+18	3.96E+19	-3.99E+17	6.73E+17	2.66E+18	-6.59E+18	8.07E+18	-1.45E+19	-7.38E+16	-1.50E+17	Roshd
-1.37E+19	-1.14E+19	-7.24E+17	6.32E+17	3.34E+18	1.43E+18	4.26E+19	-1.06E+20	3.30E+18	-2.89E+17	-2.15E+18	-8.14E+19	-6.59E+18	3.11E+18	-1.05E+18	3.48E+18	Jensiati
3.11E+18	-8.03E+17	-1.03E+16	-7.40E+15	-6.67E+17	1.09E+17	-3.92E+18	1.53E+19	-1.02E+17	2.68E+17	9.04E+17	-2.15E+18	2.66E+18	-4.86E+18	3.16E+16	-1.26E+17	Shahrneshi
7.87E+17	-2.55E+17	-2.16E+16	-6.65E+15	-1.61E+17	3.16E+16	-3.64E+17	3.92E+18	-2.61E+16	6.59E+16	2.68E+17	-2.89E+17	6.73E+17	-9.05E+17	-3.68E+15	-3.91E+16	TDS
-6.28E+17	-2.41E+17	-2.26E+16	-4.38E+16	1.81E+17	-4.35E+16	3.59E+17	-2.22E+17	1.47E+17	-2.61E+16	-1.02E+17	3.30E+18	-3.99E+17	1.73E+18	4.52E+16	-1.97E+16	WA
4.80E+19	-1.37E+19	-3.74E+17	8.45E+16	-1.04E+19	2.03E+18	-5.45E+19	2.10E+20	-2.22E+17	3.92E+18	1.53E+19	-1.06E+20	3.96E+19	-7.63E+19	-2.93E+17	-9.85E+17	Omid
-1.24E+19	1.97E+18	-2.65E+17	-2.23E+17	2.90E+18	-7.11E+17	2.22E+19	-5.45E+19	3.59E+17	-3.64E+17	-3.92E+18	4.26E+19	-8.97E+18	2.34E+19	3.00E+17	1.32E+17	HDI
4.16E+17	-8.15E+16	-3.23E+16	-1.74E+16	-7.46E+16	-4.48E+15	-7.11E+17	2.03E+18	-4.35E+16	3.16E+16	1.09E+17	1.43E+18	4.77E+17	-1.78E+17	4.15E+16	-5.16E+16	Sarane_Agr
-2.25E+18	4.17E+17	1.54E+16	3.42E+16	4.37E+17	-7.46E+16	2.90E+18	-1.04E+19	1.81E+17	-1.61E+17	-6.67E+17	3.34E+18	-1.95E+18	3.20E+18	4.22E+15	7.61E+16	Sarane_dam
-3.79E+16	9.50E+16	1.89E+15	4.65E+15	3.42E+16	-1.74E+16	-2.23E+17	8.45E+16	-4.38E+16	-6.65E+15	-7.40E+15	6.32E+17	8.41E+16	2.51E+17	-7.05401E+14	-8.02527E+14	Sarane_sayer
-4.78E+16	4.78E+16	-6.2452E+14	1.89E+15	1.54E+16	-3.23E+16	-2.65E+17	-3.74E+17	-2.26E+16	-2.16E+16	-1.03E+16	-7.24E+17	-9.23E+16	3.64E+17	-5.50E+16	3.31E+16	Sarane_gandom
-2.85E+18	1.26E+18	4.78E+16	9.50E+16	4.17E+17	-8.15E+16	1.97E+18	-1.37E+19	-2.41E+17	-2.55E+17	-8.03E+17	-1.14E+19	-2.69E+18	2.94E+18	-1.04E+17	1.61E+17	Amalkard
1.07E+19	-2.85E+18	-4.78E+16	-3.79E+16	-2.25E+18	4.16E+17	-1.24E+19	4.80E+19	-6.28E+17	7.87E+17	3.11E+18	-1.37E+19	9.25E+18	-1.69E+19	-4.93E+16	-2.70E+17	Canopy

جدول ۱۶- ماتریس قطری جذر وزن شاخص‌ها

Table 16- Diagonal matrix of the weight square root of the indicators

Canopy	Amalkard	Sarane_gandom	Sarane_sayer	Sarane_dam	Sarane_Agr	HDI	Omid	WA	TDS	Shahrneshi	Jensiati	Roshd	Boad	Tarakom	EPI	Weights
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	**0.263**	EPI
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	**0.267**	0	Tarakom
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	**0.231**	0	0	Boad
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	**0.234**	0	0	0	Roshd
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	**0.23**	0	0	0	0	Jensiati
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	**0.249**	0	0	0	0	0	Shahrneshi
0	0	0	0	0	0	0	0	0	**0.266**	0	0	0	0	0	0	TDS
0	0	0	0	0	0	0	0	**0.237**	0	0	0	0	0	0	0	WA
0	0	0	0	0	0	0	**0.23**	0	0	0	0	0	0	0	0	Omid
0	0	0	0	0	0	**0.231**	0	0	0	0	0	0	0	0	0	HDI
0	0	0	0	0	**0.268**	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Sarane_Agr
0	0	0	0	**0.268**	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Sarane_dam
0	0	0	**0.28**	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Sarane_sayer
0	0	**0.265**	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Sarane_gandom
0	**0.232**	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Amalkard
0.235	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Canopy

[DOI: 10.22034/19.69.4]

جدول ۱۷- ماتریس فاصله از راه‌حل ایده‌آل مثبت

Table 17- Matrix of distance from the positive ideal solution

گمیشان Gomishan	داشلی برون Dashli-Brun	چات Chat	مراوه تپه Maraveh Tape	d_{ib}
67016893.83	18458322.01	35305482.31	41622556.71	مراوه تپه Maraveh Tape
62208236.06	12756953.81	28329872.14	35305482.31	چات Chat
41824527.48	0	12756953.81	18458322.01	داشلی برون Dashli-Brun
101977888.5	41824527.48	62208236.06	67016893.83	گمیشان Gomishan

جدول ۱۸- ماتریس فاصله از راه‌حل ایده‌آل منفی

Table 18- Matrix of distance from the negative ideal solution

گمیشان Gomishan	داشلی برون Dashli-Brun	چات Chat	مراوه تپه Maraveh Tape	d_{iw}
0	54252458.19	46745414.75	44244054.94	مراوه تپه Maraveh Tape
0	58982344.71	49545897.14	46745414.75	چات Chat
0	70185572.17	58982344.71	54252458.19	داشلی برون Dashli-Brun
0	0	0	0	گمیشان Gomishan

جدول ۱۹- مقادیر فاصله نسبی از راه‌حل ایده‌آل به ترتیب بیشترین (بهترین وضعیت) به کمترین (بحرانی‌ترین وضعیت)

Table 19- Relative distance values from the ideal solution in order from the highest (best situation) to the lowest (most critical situation)

زیرآبخیز Sub watershed	مقدار فاصله نسبی C Relative distance value C
داشلی برون Dashli-Brun	0.989
چات Chat	0.636
مراوه تپه Maraveh Tape	0.515
گمیشان Gomishan	0.037

جدول ۲۰- مقادیر رتبه‌ای شاخص‌ها در زیرآبخیزها با توجه ویژه به ماهیت سود و هزینه هر شاخص

Table 20- Rank values of the indicators in the sub-domains with special attention to the nature of the benefit and cost of each indicator

گمیشان Gomishan	داشلی برون Dashli Brun	چات Chat	مراوه تپه Maraveh Tapeh	شاخص Indicator
1	2	4	3	EPI
1	3	4	2	Tarakom
4	2	1	3	Boad
3	1	2	4	Roshd
4	2	3	1	Jensiati
4	2	3	1	Shahrneshi

[DOI: 10.22034/19.69.4]

ادامه جدول ۲۰- Table 20-

شاخص Indicator	مراوه تپه Maraveh Tapeh	چات Chat	داشلی برون Dashli Brun	گمیشان Gomishan
TDS	1	2	3	4
WA	1	2	4	3
Omid	1	2	3	4
HDI	1	2	3	4
Sarane_Agr	2	4	3	1
Sarane_dam	3	2	1	4
Sarane_sayer	3	2	1	4
Sarane_gandom	2	4	3	1
Amalkard	1	2	4	3
Canopy	3	2	1	4

بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش با هدف اولویت‌بندی زیرآبخیزهای آبخیز رودخانه اترک بر اساس شاخص‌های سلامت و پایداری از دو روش تصمیم‌گیری چندمعیاره VIKOR و TOPSIS-Mahalanobis استفاده شد. مقایسه نتایج دو روش TOPSIS-Mahalanobis و VIKOR بیانگر شباهت‌ها و اختلافات واضحی است که منبع خطا را می‌توان در ساختار ماتریس تصمیم نخست جستجو نمود. ابتدا لازم به ذکر است که روش TOPSIS به تنهایی بسیار ضعیف ظاهر شده و گمیشان را که وضعیت اسفبار شاخص‌های سلامت و پایداری در آن تنها با تفسیر بصری اعداد شاخص‌ها نیز قابل دریافت است، را به عنوان اولویت دوم معرفی نموده که کاملاً متضاد با وضعیت موجود بوده، لذا از ارائه نتیجه این روش در این تحقیق پرهیز شد. این مهم بیانگر نقش مهم فاصله ماهالانوبیس در اصلاح ساختار محاسباتی روش TOPSIS بوده و به اهمیت ارائه این روش ترکیبی صحه می‌گذارد. نتایج نشان داد که، می‌توان خروجی روش VIKOR را نسبت به روش TOPSIS-Mahalanobis منطقی‌تر تلقی نمود، زیرا اختصاص رتبه سوم به زیرآبخیز مراوه‌تپه توسط روش TOPSIS-Mahalanobis از اعتبار این روش می‌کاهد. لذا، بر اساس یافته‌های این تحقیق، دو زیرآبخیز مراوه‌تپه و داشلی‌برون را می‌توان مشترکاً به‌عنوان زیرآبخیزهای برتر در شاخص‌های سلامت و پایداری معرفی نمود و تنها در صورت الزام به تفکیک تخصیص اقدامات مدیریتی به هر زیرآبخیز ، زیرآبخیز داشلی برون در اولویت بالاتری قرار می‌گیرد، زیرا مراوه‌تپه در وضعیت نسبی بهتری به‌سر می‌برد. از سوی دیگر، اولویت نخست و دوم اقدامات مدیریتی جهت بهبود شاخص‌های سلامت و پایداری قطعاً می‌بایست به ترتیب به زیرآبخیز گمیشان و سپس چات تخصیص یابد.

در نهایت پیشنهادات زیر از نتایج تحقیق ارائه می‌شود. زیرآبخیز گمیشان به‌عنوان آسیب‌پذیرترین منطقه نیازمند اجرای فوری اقدامات آبخیزداری و احیای پوشش گیاهی است. همچنین کاهش فشار بر منابع آب و کنترل آلودگی آب باید در اولویت قرار گیرد. تمرکز بر شاخص‌های اقتصادی و اجتماعی برای ارتقای توسعه پایدار، همراه با شاخص‌های محیط زیست (پوشش گیاهی، کیفیت آب) برای بهبود خدمات بوم‌سازگانی ضروری است. بر این اساس، توصیه می‌شود که برنامه‌ریزی‌های حفاظتی و بازسازی در حوزه آبخیز اترک با تمرکز بر زیرآبخیزهای دارای وضعیت بحرانی به‌ویژه گمیشان و با در نظر گرفتن رویکردهای تلفیقی اکولوژیکی-اجتماعی انجام گیرد. علاوه بر این، استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره نظیر VIKOR برای سایر حوضه‌های مشابه به منظور ارتقای دقت تصمیم‌گیری در شرایط پیچیده و داده‌های چندبعدی پیشنهاد می‌شود.

محدودیت‌ها و عدم قطعیت‌های تحقیق حاضر شامل وابستگی به داده‌های آماری نسبتا قدیمی، محدودیت عدم تعمیم‌پذیری نتایج تنها بر اساس چهار زیرآبخیز (مراوه‌تپه، چات، داشلی‌برون، گمیشان)، عدم در نظر گرفتن نظرات خبرگان در روش آنتروپی-شانون که می‌تواند نتایج را تحت تأثیر قرار دهد و تغییرات آینده مانند خشکسالی‌های شدید، طرح‌های انتقال آب، تغییر سیاست‌ها یا مهاجرت جمعیت در نظر گرفته نشده است. استفاده از سناریوهای تغییر اقلیم و جمعیت، به‌کارگیری روش‌های فازی یا احتمالی برای کاهش اثر عدم قطعیت‌ها در داده‌ها و وزن‌دهی، ترکیب قضاوت خبرگان با روش‌های آماری و افزایش تعداد زیرآبخیزها برای افزایش قدرت تعمیم از جمله پیشنهادات پژوهشی برای تحقیقات آینده هستند. همچنین اجرای اقدامات حفاظتی در زیرآبخیزهای بحرانی به‌ویژه در گمیشان، مدیریت جامع حوزه آبخیز با مشارکت جوامع محلی، کشاورزان و نهادهای دولتی، تخصیص بهینه منابع مالی بر اساس اولویت‌بندی علمی برای جلوگیری از اتلاف منابع در حوزه‌های کم‌خطر و آموزش بهره‌برداران در زمینه حفاظت از منابع و کاهش فشار بر منابع طبیعی از پیشنهادات مدیریت و اجرایی هستند.

سپاسگزاری

نویسندگان مقاله از اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان گلستان (حمایت مالی و معنوی)، سازمان جهاد کشاورزی گلستان و

[DOI: 10.22034/19.69.4]

استانداری گلستان به جهت در اختیار قرار دادن اطلاعات مورد نیاز مقاله کمال تشکر و قدردانی را دارند. مقاله حاضر مستخرج از نتایج بخشی از مطالعات تدوین سند راهبردی مدیریت جامع حوزه آبخیز رودخانه اترک بوده است.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافعی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است.

مشارکت نویسندگان

همه نویسندگان نسخه نهایی را بررسی و تأیید کردند. مشارکت‌های فردی به شرح زیر بود: امید اسدی نلیوان: مفهوم‌سازی، روش‌شناسی، گردآوری داده‌ها، مدیریت پروژه، تحلیل رسمی، تحقیق، نگارش – پیش‌نویس اصلی. آیدینگ کرنژادی: مفهوم‌سازی، اعتبارسنجی، نرم‌افزار، بررسی و ویرایش. غلامرضا خسروی: نظارت، اعتبارسنجی، نگارش – بررسی و ویرایش.

منابع مورد استفاده

1. Abassi, M.E., Ousmana, H., Saouita, J., El-Hmaidi, A., Iallamen, Z., Jaddi, H., Aouragh, M.H., Boufala, M., Kasse, Z., Ouali, A.E. and Abdallaoui, A. 2024. The combination of Multi-Criteria Decision-Making (MCDM) and morphometric parameters for prioritizing the erodibility of sub-watersheds in the Ouljet Es Soltane watershed (North of Morocco). Heliyon. 10(19). https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e38228.

2. Ahn, S.R. and Kim, S.J. 2019. Assessment of watershed health, vulnerability and resilience for determining protection and restoration Priorities. Environmental Modelling & Software. 122, 103926. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.03.014.

3. Asadi Nalivan, O., Rostami Khalaj, M., Mohseni Saravi, M. and Sour, A. 2016. Prioritizing of watershed management planning using TOPSIS method in the watershed (Case study: Zydasht-Taleghan). Journal of Watershed Management Research. 6(12), 98–107. (In Persian)

4. Asadi-Nalivan, O., Rezayi, F. and Saghazade, N. 2013. Assessment of watershed catchment ecological power with taxonomy method for watershed comprehensive management (Case study: Watershed Zydasht, Taleghan). Environmental Erosion Research Journal. 3(3), 15–26. (In Persian)

5. Ataei, M. 2010. Multi-Criteria Decision Making. Shahrood University of Technology Publications. 348 p. (In Persian)

6. Chaves, H. M. and Alipaz, S. 2007. An integrated indicator based on watershed hydrology, environment, life, and policy: the watershed sustainability index. Water Resources Management. 21(5), 883-895. https://doi.org/10.1007/s11269-006-9107-2.

7. Chezgi, J. 2019. Location and prioritization the underground dam using SWAT and MADM models. Jwmseir. 13(47): 86-95. (In Persian)

8. Chezgi, J. and Soheili, E. 2021. Application of TOPSIS and VIKOR decision making models in site selection of flood spreading projects in arid and semi-arid region. Desert Management. 16, 169–182. DOI:10.22034/jdmal.2021.243145. (In Persian)

9. Erdebilli, B., Gecer, E., Yılmaz, I., Aksoy, T., Hacıoglu, U., Dinçer, H. and Yüksel, S. 2023. Q-ROF Fuzzy TOPSIS and VIKOR Methods for the Selection of Sustainable Private Health Insurance Policies. Sustainability. 15: 9229. https://doi.org/10.3390/su15129229.

10. Ghorbani, H. 2019. Mahalanobis distance and its application for detecting multivariate outliers. Facta Universitatis, Series: Mathematics and Informatics. 3(34): 583-595. https://doi.org/10.22190/FUMI1903583G.

11.Hazbavi, Z., Sadeghi, S.H.R. and Gholamalifard, M. 2019. Dynamic analysis of soil erosion-based watershed health. Geography, Environment, Sustainability, 12(3), 43-59. https://doi.org/10.24057/2071-9388-2018-58.

12. Hwang, C.L. and Yoon, K. 1981. Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications. Springer-Verlag, New York. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-48318-9.

13. Jaiswal, R.K., Ghosh, N.C., Galkate, R.V. and Thomas, T. 2015. Multi Criteria Decision Analysis (MCDA) for Watershed Prioritization. Aquatic Procedia. 4, 1553-1560. https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.201.

[DOI: 10.22034/19.69.4]

14. Mahalanobis, P.C. 1936. On the Generalized Distance in Statistics. Proceedings of the National Institute of Science of India, 2, 49-55.

15. Makhdumi, W. and Dwarakish, G.S. 2024. Prioritization of watersheds using TOPSIS and VIKOR method. In Seventh International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of the Environment (RSCy2019), Proc. SPIE 11174, 111740T. https://doi.org/10.1117/12.2532024.

16. Mateusz, P., Danuta, M., Malgorzata, L., Mariusz, B. and Kesra, N. 2018. TOPSIS and VIKOR methods in study of sustainable development in the EU countries. Procedia Computer Science. 126: 1683–1692. Doi: 10.1016/j.procs.2018.08.109.

17. Opricovic, S. and Tzeng, G.H. 2004. Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. European Journal of Operational Research. 156: 445–455. Doi: 10.1016/S0377-2217(03)00020-1.

18. Presidential Deputy for Strategic Planning and Supervision, Forests, Rangelands and Watershed Management Organization, Deputy for Watershed Management (Publication 505). 2009. Guidelines for Monitoring and Evaluation of Natural Resources and Watershed Management Plans. 196 p. (In Persian)

19. Quek, S.G., Garg, H., Selvachandran, G., Palanikumar, M., Arulmozhi, K. and Smarandaghe, F. 2024. VIKOR and TOPSIS framework with a truthful-distance measure for the (t, s)-regulated interval-valued neutrosophic soft set. Soft Computing. 28 (Suppl 2), 553. https://doi.org/10.1007/s00500-023-08338-y.

20. Rahimy, Z., Tavakoli, M. and Ebrahimi, H. 2025. Comparison of TOPSIS and VIKOR multi-criteria decision-making techniques in prioritizing sub-watersheds for watershed management operations (Case study: Ilam Dam Watershed). Journal of Environmental Erosion Research. 2025, 15 (2):127-143. http//doi.org/10.61186/jeer.15.2.127. (In Persian)

21. Sadeghi, S.H.R., Hazbavi, Z. and Gholamalifard, M. 2019. Interactive impacts of climatic, hydrologic and anthropogenic activities on watershed health. Science of the Total Environment. 648, 880–893. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.004.

22. Sadeghi, S.H.R., Sadoddin, A., Asadi Nalivan, O., Hazbavi, Z., Zare, A. and Moaeri, M.H. 2020. Watershed Health and Sustainability (Necessities, approaches and assessment). Tarbiat Modares University. 218 p. (In Persian)

23. Sarkar, P., Kumar, P., Vishwakarma, D.K., Ashok, A., Elbeltagi, A., Gupta, S. and Kuriqi, A. 2022. Watershed prioritization using morphometric analysis by MCDM approaches. Ecological Informatics. 70. https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2022.101763.

24. Shah, A.I. and Pan, N.D. 2024. Flood susceptibility assessment of Jhelum River Watershed: A comparative study of TOPSIS, VIKOR and EDAS methods. Geosystems and Geoenvironment. 3(4). https://doi.org/10.1016/j.geogeo.2024.100304.

25. Sharaf, I.M. 2023. A new approach for spherical fuzzy TOPSIS and spherical fuzzy VIKOR applied to the evaluation of hydrogen storage systems. Soft Computing. 27: 4403-4423. https://doi.org/10.1007/s00500-022-07749-7.

26. Sharifikia, M., Shayan, S., Yamani, M. and Arab Ameri, A. 2018. Morphometric parameter extraction and analysis for watershed periodization over the Naka Roud Catchment. Journal of Ecohydrology. 5(1), 69-83. doi: 10.22059/ije.2017.231263.550. (In Persian)

27. Sheikh, V., Kornejady, A. and Ownegh, M. 2019. Application of the coupled TOPSIS–Mahalanobis distance for multi-hazard-based management of the target districts of the Golestan Province, Iran. Natural Hazard. 3, 1335-1365. Doi:10.1007/s11069-019-03617-0.

28. Srinivasa Raju, K., Komar, N. and Jalali, A. 2017. Prioritization of sub-catchments of a river watershed using DEM and fuzzy VIKOR. H2Open Journal, 1(1), 1-11. https://doi.org/10.2166/h2oj.2017.001.

29. Tajbakhsh, S.M., Gohari, Z. and Mahmoodzadeh Vaziri, A. 2022. Prioritizing watershed management practices in the Ferizi and Rig-Sefid watersheds using Fuzzy-TOPSIS Method. Water and Soil Management and Modeling, 2(4), 64-76. DOI: 10.22098/MMWS.2022.10465.1084. (In Persian)

30. Teimouri, M. and Alvandi, E. 2022. Comparison of models TOPSIS, SAW, ELECTRE and VIKOR in

[DOI: 10.22034/19.69.4]

order to the prioritization of sedimentation and flood hazard of watersheds. Journal of Environmental Science and Technology. 24(2), 79-99. DOI: 10.30495/jest.2022.45404.4731. (In Persian)

31. Wang, A., Sun, L. and Liu, J. 2024. An Innovative TOPSIS–Mahalanobis Distance Approach to Comprehensive Spatial Prioritization Based on Multi-Dimensional Drought Indicators. Atmosphere. 15(11), 1347. https://doi.org/10.3390/atmos15111347.

[DOI: 10.22034/19.69.4]