



## Sub-watersheds Hydrological Security Prioritization of the Gorganroud Watershed based on Indicators of Hydrologic Alteration (IHA)

Mohammad Tavosi<sup>1</sup> | Mehdi Vafakhah<sup>2\*</sup> | Seyed Hamidreza Sadeghi<sup>3</sup> | Seyed Mohiuddin Batani<sup>3</sup>

1. PhD student, Department of Watershed Engineering, Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modares University, Noor, Iran.
2. Professor and Scientific member, Department of Watershed Engineering, Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modares University, Noor, Iran. Email: [vafakhah@modares.ac.ir](mailto:vafakhah@modares.ac.ir)
3. Professor and Scientific member, Department of Watershed Engineering, Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modares University, Noor, Iran.
3. Professor, Department of Civil, Environmental, and Construction Engineering and Water Resources Research Center, University of Hawaii, USA

ARTICLE INFO	ABSTRACT
<p><b>Article type:</b> Research Article</p> <p><b>Article History:</b> Received April 03, 2024 Revised May 04, 2024 Accepted June 04, 2024</p> <p><b>Keywords:</b> <i>Decision matrix,</i> <i>Flow regime,</i> <i>Voshangir dam,</i> <i>Water security,</i> <i>Water resources management.</i></p>	<p>The current research was conducted with the aim of hydrological security prioritization at subwatershed scale. To do this, 31 hydrological variables of streamflow in 16 sub-watersheds of the Gorganroud watershed, which were equipped with hydrometric stations, were calculated using Indicators of Hydrological Change (IHA) software. Shannon's entropy was used to weight the hydrological variables of the streamflow. Finally, four Multi-Criteria Decision-Making Methods (MCDMs) including Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution (TOPSIS), VlseKriterijumska Optimizacija I Kaompromisno Resenje (VIKOR), Simple Additive Weighting (SAW) and COMplex PROportional Assessment (COPRAS) were implemented to prioritize the subwatersheds. The results showed that C23 (zero flow days) and C27 (high pulse count) variables received the highest and lowest weights with values of 0.057 and 0.006, respectively. The results of the subwatersheds prioritization based on the hydrological security showed that subwatershed S11 according to TOPSIS and VIKOR methods and subwatersheds S15 and S2 according to SAW and COPRAS methods have the highest hydrological security score. On the other hand, subwatershed S10 according to TOPSIS, VIKOR and COPRAS methods and subwatershed S14 according to SAW method were given the last priority. Evaluating the efficiency of MCDM methods showed that the VIKOR method provided more accurate results with the least intensity of variations.</p>

**Cite this article:** Tavosi, M., Vafakhah, M., Sadeghi, H., & Batani, M. (2024). Sub-watersheds Hydrological Security Prioritization of the Gorganroud Watershed based on Indicators of Hydrologic Alteration (IHA). *ECO HYDROLOGY*. 11 (2), 192-206. Doi: [doi.org/10.22059/IJE.2024.374860.1812](https://doi.org/10.22059/IJE.2024.374860.1812)



© Mohammad Tavosi, Mehdi Vafakhah, Seyed Hamidreza Sadeghi, Seyed Mohiuddin Batani

**Publisher:** University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/IJE.2024.374860.1812>

## اولویت‌بندی امنیت هیدرولوژیکی زیر آبخیزهای حوضه آبخیز گرگان‌رود بر اساس شاخص‌های تغییر هیدرولوژیک (IHA)

محمد طاوسی<sup>۱</sup>، مهدی وفاخواه<sup>۲\*</sup>، سید حمیدرضا صادقی<sup>۳</sup>، سید محی‌الدین باطنی<sup>۴</sup>

۱. دانشجوی مقطع دکتری، گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران.
۲. استاد و عضو هیئت علمی گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران.  
ایمانه: [vafakhah@modares.ac.ir](mailto:vafakhah@modares.ac.ir)
۳. استاد و عضو هیئت علمی گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران.
۴. استاد گروه مهندسی عمران، محیط‌زیست، و ساخت‌وساز و مرکز تحقیقات منابع آب، دانشگاه هاوایی، ایالات متحده آمریکا.

چکیده	اطلاعات مقاله
پژوهش حاضر با هدف اولویت‌بندی امنیت هیدرولوژیکی در مقیاس زیر آبخیز انجام شده است. برای این منظور، ۳۱ متغیر هیدرولوژیکی جریان در ۱۶ زیرحوضه آبخیز گرگان‌رود که مجهز به ایستگاه هیدرومتری بودند، با استفاده از نرم‌افزار شاخص‌های تغییر هیدرولوژیک (IHA) محاسبه و از آنتروپی شانون برای وزن‌دهی به آن‌ها استفاده شد. در نهایت، برای اولویت‌بندی زیر آبخیزها چهار روش تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM) شامل (TOPSIS) Technique for Order Preference by، VlseKriterijumska Optimizcija I (VIKOR)، Similarity to an Ideal Solution، Simple Additive Weighting (SAW)، Kaompromisno Resenje (COPRAS) و Proportional Assessment اجرا شد. نتایج نشان داد متغیر C23 (روزهای صفر جریان) و C27 (تعداد ضربان بالا) به ترتیب با مقادیر ۰/۰۵۷ و ۰/۰۰۶ بیشترین و کمترین وزن را دریافت کردند. نتایج اولویت‌بندی امنیت هیدرولوژیکی جریان نشان داد براساس روش‌های TOPSIS و VIKOR زیر آبخیز S11 و براساس روش‌های SAW و COPRAS زیر آبخیزهای S15 و S2 بالاترین امتیاز امنیت هیدرولوژیکی را دارند. از سوی دیگر، زیر آبخیز S10 براساس روش‌های TOPSIS، VIKOR و COPRAS و زیر آبخیز S14 براساس روش SAW در اولویت آخر قرار گرفتند. ارزیابی کارایی روش‌های MCDM نشان داد روش VIKOR با کمترین شدت تغییرات، نتایج دقیق‌تری را ارائه داده است.	<p>نوع مقاله: پژوهشی</p> <p>تاریخ‌های مقاله:</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۱۵</p> <p>تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۲/۱۲</p> <p>تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۱۵</p> <p>کلیدواژه‌ها: امنیت آب، رژیم جریان، سد و شمشگیر، ماتریس تصمیم، مدیریت منابع آب</p>

استناد: طاوسی، محمد، وفاخواه، مهدی، صادقی، سید حمیدرضا، باطنی، سید محی‌الدین. (۱۴۰۳). اولویت‌بندی امنیت هیدرولوژیکی زیر آبخیزهای حوضه آبخیز گرگان‌رود بر اساس شاخص‌های تغییر هیدرولوژیک (IHA). اكو هيدرو لوژي، ۱۱(۲)، ۱۹۲-۲۰۶.

DOI: <http://doi.org/10.22059/IJE.2024.374860.1812>

© محمد طاوسی، مهدی وفاخواه، سید حمیدرضا صادقی، سید محی‌الدین باطنی. ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <http://doi.org/10.22059/IJE.2024.374860.1812>



## ۱. مقدمه

امنیت حوضه آبخیز می‌توان تابع معکوس خطرپذیری دانست که عموماً به عنوان درجه حفاظت مورد انتظار در برابر یک رویداد است که سبب جلوگیری از وقوع آن می‌شود. شاخص‌هایی همچون تاب‌آوری، آسیب‌پذیری، پایداری هر یک، بعد خاصی از حوضه آبخیز را مورد ارزیابی قرار می‌دهند. حال آنکه امنیت هیدرولوژیکی حوضه آبخیز همه ابعاد امنیت محور مؤثر در بخش هیدرولوژیکی یک حوضه آبخیز را در بر می‌گیرد و به‌نوعی می‌توان امنیت حوضه آبخیز را توانایی پدافند غیرعاملی آن در برابر سلطه هیدرولوژی<sup>۱</sup> دانست. سلطه هیدرولوژی قدرتی است که به واسطه آب در بخشی ایجاد می‌شود و به‌نوعی سبب تهدید سایر بخش‌ها می‌شود. حال امنیت حوضه آبخیز توان مقابله با این تهدید را از طریق پدافند غیرعامل بیان می‌کند. بهره‌برداری اصولی از منابع آب و پایداری متغیرهای هیدرولوژیکی، همواره از مهم‌ترین اهداف مدیریت جامع حوضه آبخیز است و امنیت حوضه آبخیز را تأمین می‌کند [۱]. همان‌طور که مشخص است، رویکرد مدیریت جامع حوضه آبخیز روشی برای دستیابی به توسعه پایدار است. با توجه به وجود چالش‌هایی از قبیل سیلاب و فرسایش، یکی از رویکردهای مفید برای حل چالش‌های موجود، استفاده از رویکرد مدیریت جامع حوضه آبخیز است که مورد توافق بیشتر جامعه علمی و اجرایی کشور نیز است [۲]. بوم‌سازگان‌های طبیعی مجموعه پیچیده‌ای از اجزای مختلفی از جمله مقوله‌های مرتبط با زمین، مؤلفه‌های اقلیمی، منابع آبی، خاک، عوامل بیولوژیکی و سایر عناصری است که بر ابعاد اجتماعی جامعه تأثیر می‌گذارد. از طرفی، وضعیت یک حوضه به شرایط هیدرولوژیکی آن بستگی دارد. عدم تعادل در هر یک از اجزای حوضه باعث ایجاد ناامنی در شرایط هیدرولوژیکی حوضه می‌شود و امنیت کل مجموعه را تحت تأثیر قرار می‌دهد [۳]. بنابراین امنیت باعث تعادل سامانه‌های داخلی و خارجی مؤثر بر یک حوضه می‌شود [۴]. امروزه با افزایش جمعیت، فعالیت‌های انسانی و استفاده غیرمنطقی از زمین، سلامت حوضه در معرض تهدید قرار گرفته و باعث کاهش امنیت حوضه آبخیز در ابعاد مختلف شده است [۵]. در این راستا و به دنبال تخریب روزافزون محیط زیستی، لزوم توجه به رویکردهای نوین برای ارزیابی و پایش حوضه‌های آبخیز، مدیریت، تصمیم‌گیری و برقراری ثبات و تعادل در آن‌ها، تعیین‌کننده امنیت حوضه‌های آبخیز است. از سوی دیگر، به دلیل اینکه حوضه آبخیز یک سامانه پویا و پیچیده است، تهدیدها و آسیب‌های وارد شده به ساختار و خدمات آن به اخلاص و حتی فروپاشی آن منجر می‌شود [۶]. به علاوه، امروزه رودخانه‌ها در اغلب نقاط کشور بر اثر دخالت‌های انسانی همچون ساخت‌وسازهای غیر مجاز، انتقال آب بین حوضه‌ای، تغییرات زیادی یافته‌اند. این دخالت‌ها سبب شده است تا جریان رودخانه‌ها کاهش یابد و در برابر تغییرات فصلی و تناوب سیلاب به‌شدت آسیب‌پذیر شوند [۷]. این تغییرات آثار مخربی روی خدمات و امنیت حوضه آبخیز دارد [۷].

حوضه‌های آبخیز از بهترین سامانه‌های طبیعی برای برنامه‌ریزی و مدیریت هستند. پیچیدگی و چندبعدی بودن سامانه‌های طبیعی، فرایند تصمیم‌گیری را به‌ویژه در شرایطی که تحت تأثیر دخالت‌های انسانی قرار دارند، برای مدیران دشوار می‌کند [۸]. برای حل مشکلات حوضه آبخیز، روش‌های تصمیم‌گیری جامع و مطمئن، راه‌حل مناسبی را ارائه می‌دهند [۴ و ۹]. بنابراین، استفاده از روش‌های مناسب اجماع نظرات در ابعاد مختلف از جمله رویکردهای تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM)<sup>۲</sup>، برای استفاده بهینه از منابع مشترک حوضه آبخیز [۱۰]، شناسایی مشکلات سامانه آبخیز و ارائه راهکارهای جامع و کامل، ضروری است. در بسیاری از مطالعات پژوهشگران برای حل مشکلات و تعیین اولویت‌های مدیریتی از رویکردهای MCDM استفاده کرده‌اند [۱۱-۲۵]. با توجه به کاربرد گسترده و کارایی زیاد رویکردهای MCDM برای وزن‌دهی متغیرها، در سال‌های اخیر، مطالعات متعددی در زمینه اولویت‌بندی زیرحوضه‌های آبخیز با مد نظر قرار دادن مسائل متفاوت مؤثر بر حوضه‌های آبخیز انجام شده است [۲۶-۳۲]. به طور خاص، در زمینه منابع آب، پایداری امنیت آب، انتقال آب و امنیت اکولوژیکی با کاربرد رویکردهای مختلف MCDM مطالعات مختلفی صورت گرفته است. به‌عنوان مثال، روش‌های VIKOR<sup>۳</sup>، TOPSIS<sup>۴</sup>، SAW<sup>۵</sup> و COPRAS<sup>۶</sup> در پژوهش‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است [۳۱-۳۵]. در جدیدترین پژوهش، خزاعی فیض‌آباد و پوررضا بیلندی [۳۶] به‌منظور شناسایی مناطق دارای پتانسیل آب زیرزمینی از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره AHP<sup>۷</sup> و ANP<sup>۸</sup> استفاده کردند.

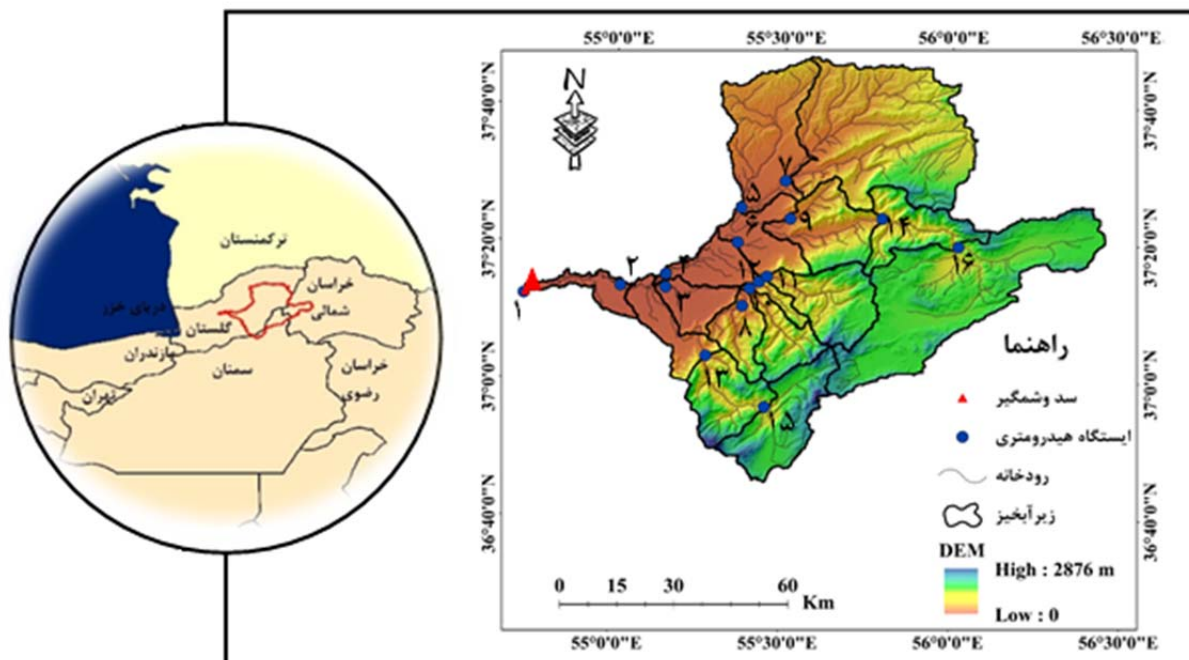
1. Hydro-Hegemony
2. Multi-criteria decision-making
3. VlseKriterijumska Optimizcija I Kaompromisno Resenje
4. Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution
5. Simple Additive Weighting
6. COMplex PROportional ASsessment
7. Analytic Hierarchy Process
8. Analytic Network Process

با توجه به موارد یادشده، تا کنون در هیچ پژوهشی امنیت حوضه آبخیز از منظر مؤلفه‌های هیدرولوژیکی جریان با کاربرد روش‌های MCDM صورت نگرفته است. از طرف دیگر، محاسبه برخی از متغیرهای هیدرولوژیکی، با استفاده از نرم‌افزارهای آماری، برای محاسبه دشوار یا غیر ممکن هستند. نرم‌افزار شاخص‌های تغییر هیدرولوژیکی<sup>۱</sup> (IHA Software 7.1) می‌تواند برآورد فرایندهای مربوط به جریان محیط زیستی را بهبود بخشد و موجب تسهیل در ارزیابی‌های شرایط طبیعی جریان آب تحت اثر فعالیت‌های انسانی شود. این نرم‌افزار برای محاسبه مقادیر متغیر هیدرولوژیکی طراحی شده است که امکان تعیین ویژگی تغییرات درونی و بین سالانه را فراهم می‌کند [۳۷]. بی‌شک متغیرهای هیدرولوژیکی جریان مقوله‌های مرتبط از اجزای مهم یک حوضه آبخیز هستند که بر امنیت آن تأثیر می‌گذارند. لذا با توجه به مشکلات فراوان حوضه‌های آبخیز کشور همچون سیلاب و خشکسالی‌های پی‌درپی که عمدتاً ناشی از تغییرات و نوسانات مؤلفه‌های هیدرولوژیکی جریان و منابع آب هستند، پژوهش حاضر با هدف اولویت‌بندی امنیت هیدرولوژیکی حوضه آبخیز براساس متغیرهای هیدرولوژیکی جریان با استفاده از روش‌های متفاوت تصمیم‌گیری چندمعیاره تدوین شده است.

## ۲. مواد و روش‌ها

### ۱.۲. منطقه مطالعه شده

حوضه آبخیز گرگان‌رود (قسمت بالادست سد وشمگیر) با مساحت ۷۱۶۶/۸۷ کیلومترمربع بین مختصات جغرافیایی ۳۳° ۳۶' تا ۳۷° ۴۵' عرض شمالی و ۴۵° ۱۳' تا ۵۴° ۰۳' طول شرقی در استان گلستان واقع شده است (شکل ۱). حداکثر ارتفاع این حوضه ۲۸۸۷ متر و حداقل آن ۶ متر از سطح دریا است. طول رودخانه اصلی حوضه نیز ۳۳۳ کیلومتر است. متوسط بارش سالانه حوضه از ۲۳۱ تا ۸۴۸ میلی‌متر تغییر می‌کند و متوسط دمای سالانه بسته به مناطق و ایستگاه‌ها ۱۱ و ۱۸/۱ درجه سانتی‌گراد است. حوضه آبخیز گرگان‌رود از لحاظ اقلیمی بسیار متنوع بوده و طبق طبقه‌بندی دومارتن این حوضه دارای اقلیم‌های مرطوب، نیمه‌مرطوب، مدیترانه‌ای، نیمه‌خشک و خشک است. کاربری اراضی عمده حوضه به‌ویژه در جنوب و شرق جنگلی بوده و در شمال و غرب منطقه، دشت‌های آبرفتی به‌صورت زراعی و مرتع در حال بهره‌برداری هستند. وقوع بارش‌های شدید به همراه تشکیلات زمین‌شناسی حساس به فرسایش و تغییر شدید کاربری اراضی از جنگل به اراضی دیم، سبب فراهم آمدن پتانسیل لازم برای تشکیل رواناب و در نتیجه، فرسایش و رسوب در حوضه شده است [۳۸].



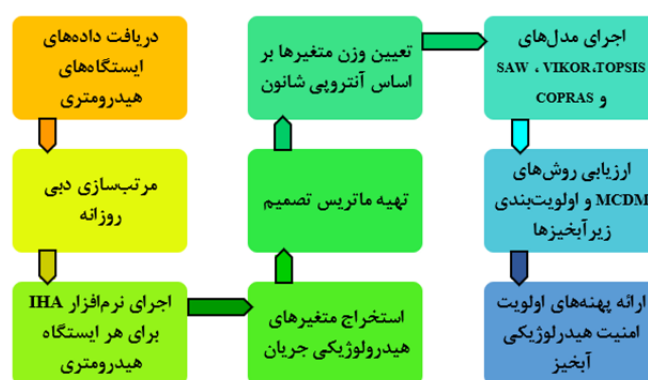
شکل ۱: موقعیت جغرافیایی حوضه آبخیز گرگان‌رود در کشور

## ۲.۲. جمع آوری داده‌های مورد نیاز

در این پژوهش به منظور محاسبه شاخص‌های تغییر هیدرولوژیکی جریان، آمار دبی روزانه کلیه ایستگاه‌های هیدرومتری واقع در حوضه آبخیز مورد مطالعه از شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان گلستان دریافت شد. پس از بررسی و مرتب‌سازی داده‌ها، ۱۶ ایستگاه‌های هیدرومتری در خروجی هر زیرآبخیز طی سال‌های آماری ۱۳۸۸ تا ۱۴۰۱ به‌عنوان سال آماری مشترک در نظر گرفته شد. در جدول ۱ مشخصات ایستگاه‌های هیدرومتری قابل مشاهده است. همچنین نمودار جریانی روش پژوهش در شکل ۲ ارائه شده است.

جدول ۱: مشخصات جغرافیایی ایستگاه‌های هیدرومتری

نام ایستگاه	کد ایستگاه	طول جغرافیایی (درجه)	عرض جغرافیایی (درجه)	ارتفاع از سطح دریا (متر)
سد گرگان	۱	۵۴.۷	۳۷.۲	۲
قزاقلی	۲	۵۵.۰	۳۷.۲	۲۵
اراز کوسه	۳	۵۵.۲	۳۷.۲	۳۵
گنبد	۴	۵۵.۲	۳۷.۳	۳۷
حاجی قوشان	۵	۵۵.۴	۳۷.۴	۷۳
قره شور	۶	۵۵.۴	۳۷.۳	۷۷
تمر-گرگان	۷	۵۵.۵	۳۷.۵	۱۱۵
جنگله	۸	۵۵.۴	۳۷.۲	۱۸۰
قوچمز	۹	۵۵.۵	۳۷.۴	۱۸۱
لزوره	۱۰	۵۵.۴	۳۷.۲	۱۹۶
گالیکش	۱۱	۵۵.۵	۳۷.۳	۲۳۷
قلی تپه	۱۲	۵۵.۴	۳۷.۲	۲۴۳
نوده-خرمالو	۱۳	۵۵.۳	۳۷.۱	۲۸۰
تنگراه	۱۴	۵۵.۸	۳۷.۴	۴۵۹
پل غزنوی-تیل‌آباد	۱۵	۵۵.۵	۳۶.۹	۹۱۲
دشت	۱۶	۵۶.۰	۳۷.۳	۱۰۱۰



شکل ۲: نمودار جریانی روش پژوهش

## ۳.۲. تعیین شاخص‌های تغییرات هیدرولوژیکی جریان

برای محاسبه شاخص‌های تغییرات هیدرولوژیکی جریان از نرم‌افزار IHA استفاده شده است. نرم‌افزار شاخص‌های تغییرات هیدرولوژیکی جریان به وسیله مرکز تکنولوژی و علوم طبیعی (NSTC)<sup>۱</sup> ارائه شده است که با استفاده از این نرم‌افزار می‌توان با داده‌های روزانه دبی، بسیاری از متغیرهای مؤثر در تغییر جریان را محاسبه کرد. شاخص‌های تغییرات هیدرولوژیکی (IHA) یک مجموعه توسعه‌یافته آماری هستند که برای ارزیابی درجه تغییر هیدرولوژیکی جریان رودخانه استفاده می‌شوند. این مجموعه آماری شامل ۶۷ متغیر است که به دو

زیرگروه شامل ۳۳ شاخص شاخص تغییر هیدرولوژیکی جریان (IHA) و ۳۴ مؤلفه جریان محیط زیستی (EFC) <sup>۱</sup> تقسیم می‌شود [۳۷]. با استفاده از این نرم‌افزار پنج ویژگی اساسی رژیم جریان شامل مقدار، تداوم، زمان‌بندی، فراوانی و میزان مورد بررسی قرار می‌گیرد [۳۹]. در پژوهش حاضر ۳۱ شاخص تغییر هیدرولوژیکی جریان که بر امنیت هیدرولوژیکی حوضه آبخیز مؤثرند به شرح جدول ۲ استخراج شد.

جدول ۲: متغیرهای هیدرولوژیکی جریان

جریان ملامنه	بزرگی و استمرار جریان‌های سالانه	فراوانی و مدت پالس‌های جریان	فراوانی و مدت برگشت جریان
مؤلفه جریان	کمینه ۱روزه	مدت فراوان کم	تعداد برگشت جریان
سپتامبر	کمینه ۳روزه	فراوان کم	نوسانات کاهشی ضعیف
اکتبر	کمینه ۷روزه	مدت فراوان کم	نوسان افزایشی ضعیف
نوامبر	کمینه ۱۰روزه	فراوان کم	مدت فراوان بالا
دسامبر	کمینه ۱۳روزه	فراوان کم	فراوان بالا
ژانویه	کمینه ۱۷روزه	فراوان کم	مدت فراوان کم
فوریه	کمینه ۲۰روزه	فراوان کم	فراوان کم
مارس	کمینه ۲۳روزه	فراوان کم	فراوان کم
آوریل	کمینه ۲۷روزه	فراوان کم	فراوان کم
مه	کمینه ۳۰روزه	فراوان کم	فراوان کم
ژوئن	کمینه ۳۳روزه	فراوان کم	فراوان کم
ژوئیه	کمینه ۳۷روزه	فراوان کم	فراوان کم
اوت	کمینه ۴۰روزه	فراوان کم	فراوان کم

#### ۴.۲. تعیین وزن هریک از متغیرهای هیدرولوژیکی جریان در امنیت حوضه آبخیز

برای تعیین وزن هریک از متغیرهای جدول ۲ از مدل وزن‌دهی آنتروپی شانون <sup>۲</sup> استفاده شد. آنتروپی شانون، یکی از رویکردهای مدیریتی است که به‌منظور برخورد با اختلال و عدم قطعیت‌های موجود در یک سامانه مورد استفاده قرار می‌گیرد [۴۰ و ۴۱]. تئوری آنتروپی نخستین‌بار توسط بولتزمن در قالب اصل ترمودینامیک مطرح و سپس توسط شانون به صورت کمی ارائه شد. در واقع آنتروپی مفهومی است که پراکندگی و بی‌نظمی در پدیده‌های طبیعی را تخمین می‌زند. این مفهوم که در دانش ترمودینامیک کاربرد بسیار دارد، امروزه به سایر علوم نیز راه یافته است. این مدل نشان می‌دهد چگونه از بین عوامل مؤثر بر یک هدف، می‌توان مهم‌ترین عامل را تخمین زد. بنابراین هر چه آنتروپی یک متغیر تصادفی بیشتر باشد، عدم قطعیت ما در مورد آن متغیر تصادفی بیشتر است [۴۲]. در پژوهش ابتدا ماتریس تصمیم از طریق محاسبه هریک از متغیرهای جدول ۲ در هر زیرحوضه آبخیز تهیه شد سپس آنتروپی هر متغیر طبق محاسبات مدل تعیین و وزن هر متغیر براساس رابطه ۱ محاسبه شد.

$$W_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^n d_j} \quad (1)$$

که در آن  $d_j$  درجه دگرگونی یا تنوع هر متغیر و  $W_j$  وزن متغیر است.

#### ۵.۲. کاربرد روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره برای اولویت‌بندی زیرآبخیزها

در پژوهش حاضر از چهار روش MCDM شامل TOPSIS، VIKOR، SAW و COPRAS به‌منظور اولویت‌بندی زیرآبخیزها استفاده شده است.

##### ۱.۵.۲ روش TOPSIS

این روش توسط Chen و همکاران [۴۲] ارائه شده است. براساس این روش دو مفهوم «حل ایدئال» و «شباهت به حل ایدئال» استفاده شده است. حل ایدئال حلی است که از هر جهت بهترین باشد که عموماً در عمل وجود نداشته و سعی بر آن است که به آن نزدیک شد. به‌منظور اندازه‌گیری شباهت یک طرح (یا گزینه) به حل ایدئال و ضد ایده‌آل، فاصله آن طرح (یا گزینه) از حل ایده‌آل و ضد ایده‌آل اندازه‌گیری می‌شود. سپس گزینه‌ها براساس نسبت فاصله از حل ضد ایدئال به مجموع فاصله از حل ایدئال و ضد ایدئال ارزیابی و رتبه‌بندی می‌شوند. مراحل در این روش به این صورت است که پس از تشکیل ماتریس تصمیم و نرمال‌سازی آن، ماتریس بی‌مقیاس وزن‌دار تعیین شده و حل‌های ایدئال و ضد ایدئال تعیین می‌شود و درنهایت فاصله از حد ایدئال محاسبه و شاخص شباهت براساس رابطه ۲ محاسبه شده و گزینه‌ها براساس آن رتبه‌بندی می‌شوند.

$$C_i^* = \frac{S_i^-}{(S_i^+ + S_i^-)} \quad (2)$$

که در آن  $S_i^+$  و  $S_i^-$  فاصله از حل ضد ایدئال و ایدئال و  $C_i^*$  شاخص شباهت است.

### ۲.۵.۲. روش VIKOR

روش VIKOR برای بهینه‌سازی چندمعیاره سامانه‌های پیچیده توسعه یافته است. براساس این روش همواره چند گزینه مختلف وجود دارد که این گزینه‌ها براساس چند معیار به صورت مستقل ارزیابی می‌شوند و در نهایت، گزینه‌ها براساس ارزش، رتبه‌بندی می‌شود [۴۳]. در این روش نیز همانند روش TOPSIS، ابتدا ماتریس تصمیم تشکیل شده و نرمال می‌شود. سپس بردار وزن معیارها تعیین و ماتریس وزن‌دار تشکیل و در ادامه نقاط ایدئال مثبت و ضد ایدئال منفی تعیین شده و مقادیر سودمندی (S) و تأسف (R) برای هر متغیر محاسبه می‌شود. در نهایت شاخص VIKOR (Q) برای هر گزینه تعیین و گزینه‌ها براساس S، Q و R مرتب می‌شوند.

### ۳.۵.۲. روش SAW

در این روش جهت تصمیم‌گیری، تنها به ماتریس تصمیم‌گیری و بردار وزن شاخص‌های ارزیابی نیاز است. این روش مانند روش VIKOR و TOPSIS عمل می‌کند، اما روشی بسیار ساده‌تر است. در این روش که با نام روش ترکیب خطی وزن‌دار نیز شناخته می‌شود، پس از بی‌مقیاس کردن ماتریس تصمیم، با استفاده از ضرایب وزنی معیارها، ماتریس تصمیم بی‌مقیاس وزن‌دار به دست می‌آید و با توجه به این ماتریس، امتیاز هر گزینه محاسبه می‌شود [۴۴].

### ۴.۵.۲. روش COPRAS

روش COPRAS در سال ۱۹۹۶ توسط دانشمندان دانشگاه فنی Vilnius Gediminas کشور لیتوانی توسعه یافت [۴۵]. روش COPRAS در عین سادگی، بسیار کاربردی و قدرتمند بوده و برای محاسبه آن، نیازی به عملیات پیچیده ریاضی نیست. این روش پیشنهادها را مقایسه کرده و اولویت‌ها را با در نظر گرفتن شرایط متضاد معیارها براساس وزن معیارها تعیین می‌کند. این فرض وابستگی مستقیم و متناسب با اهمیت و درجه کاربردی (اولویت) پیشنهادها دارد. براساس این روش پس از تعیین ماتریس تصمیم نرمال‌شده، ماتریس تصمیم نرمال موزون تعیین شده و گزینه بهینه انتخاب می‌شود.

### ۶.۲. ارزیابی کارایی روش‌های MCDM

به‌منظور مقایسه نتایج روش‌های MCDM با یکدیگر، از روش شدت تغییرات ( $\Delta I$ ) براساس رابطه ۳ استفاده شد.

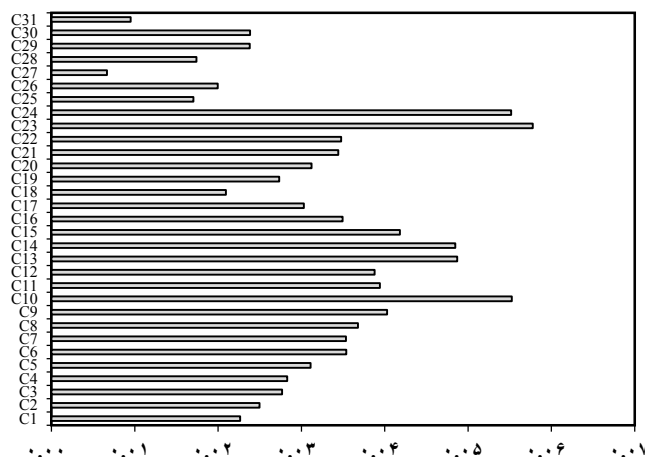
$$\Delta I = \frac{\sum_{i=1}^N \text{rank } i(1) - \text{rank } i(2)}{N} \quad (3)$$

که در آن  $\Delta I$  شدت تغییرات دو مدل،  $\text{rank } i(1)$  و  $\text{rank } i(2)$  به ترتیب رتبه زیرآبخیز در مدل‌های اول و دوم است.

## ۳. یافته‌ها

### ۱.۳. محاسبه متغیرهای هیدرولوژیکی جریان و تعیین وزن

با ورود داده‌های دبی روزانه هر ایستگاه هیدرومتری به نرم‌افزار IHA، مقادیر متغیرهای هیدرولوژیکی به شرح جدول ۳ محاسبه و برای وزن‌دهی به هر متغیر، مدل آنتروپی شانون اجرا شد. در شکل ۳ مقادیر وزن هر متغیر قابل مشاهده است. بر این اساس متغیر C23 (روزهای صفر جریان) و C27 (تعداد ضربان بالا) به ترتیب با مقادیر ۰/۰۵۷ و ۰/۰۰۶ بیشترین و کمترین وزن را دریافت کردند.



شکل ۳: مقادیر وزن هر یک از متغیرهای هیدرولوژیکی جریان براساس مدل آنتروپی شانون

جدول ۳: مقادیر متغیرهای هیدرولوژیکی جریان، حوضه آبخیز گرگان‌رود

متغیر	زیرآب‌خیز															
	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶
C1	۰.۴	۱.۷۳	۱.۳۸	۰.۵۱	۰.۱۴	۰.۱۴	۰.۶۷	۰.۴۵	۰.۱۲	۰.۰۰	۱.۰۲	۰.۰۸	۰.۶۱	۰.۲۸	۰.۴۷	۱.۳۷
C2	۱.۹	۳.۵۵	۱.۷۸	۱.۷۲	۰.۲۵	۰.۱۶	۰.۹۴	۰.۷۹	۰.۱۹	۰.۰۱	۱.۱۰	۰.۱۲	۰.۷۰	۰.۲۹	۰.۵۴	۱.۵۰
C3	۲.۱	۴.۰۶	۲.۸۳	۱.۵۰	۰.۳۹	۰.۱۷	۰.۳۷	۰.۶۹	۰.۱۶	۰.۰۱	۱.۱۸	۰.۱۸	۰.۸۰	۰.۵۰	۰.۵۹	۱.۴۰
C4	۱.۰	۴.۰۲	۳.۳۲	۰.۸۴	۰.۴۹	۰.۲۱	۰.۰۸	۰.۷۶	۰.۱۹	۰.۰۱	۱.۳۳	۰.۲۵	۱.۰۳	۰.۸۹	۰.۶۱	۱.۴۵
C5	۰.۷	۶.۷۴	۴.۶۱	۲.۱۷	۰.۵۸	۰.۳۰	۰.۴۴	۱.۰۲	۰.۳۵	۰.۰۱	۱.۴۴	۰.۳۰	۱.۲۹	۱.۶۳	۰.۶۱	۱.۶۱
C6	۶.۲	۱۷.۸۸	۱۰.۹۱	۴.۸۸	۱.۲۴	۰.۵۴	۰.۶۶	۱.۷۰	۱.۰۵	۰.۰۱	۳.۱۸	۰.۸۰	۲.۷۲	۳.۷۳	۰.۶۳	۲.۵۱
C7	۱۸.۲	۳۱.۴۸	۱۷.۳۱	۱۴.۲۲	۱.۵۳	۰.۷۸	۱.۷۷	۲.۹۷	۳.۶۳	۰.۰۱	۶.۰۷	۱.۰۲	۴.۳۲	۶.۴۷	۰.۹۳	۳.۸۷
C8	۲۲.۹	۲۶.۲۶	۱۳.۳۸	۱۳.۱۶	۱.۰۸	۰.۵۹	۲.۵۲	۲.۹۴	۳.۹۶	۰.۰۱	۴.۸۴	۰.۷۱	۴.۱۳	۳.۴۸	۰.۷۰	۳.۶۷
C9	۱۵.۹	۱۱.۳۰	۴.۱۷	۶.۳۹	۰.۵۳	۰.۳۵	۲.۱۶	۱.۵۵	۱.۳۹	۰.۰۱	۲.۰۱	۰.۴۳	۲.۰۸	۰.۹۹	۰.۴۸	۱.۷۷
C10	۹.۳	۱.۴۷	۰.۷۱	۰.۹۷	۰.۱۱	۰.۲۰	۰.۸۱	۰.۶۹	۰.۴۹	۰.۰۳	۱.۲۶	۰.۲۰	۰.۷۱	۰.۲۱	۰.۲۳	۰.۵۰
C11	۶.۸	۳.۲۳	۱.۱۷	۲.۳۸	۰.۰۷	۰.۴۸	۱.۹۵	۰.۵۸	۰.۲۵	۰.۰۲	۱.۱۷	۰.۱۱	۰.۸۲	۰.۲۹	۰.۲۷	۰.۶۲
C12	۴.۲	۲.۰۳	۰.۵۱	۱.۵۴	۰.۰۲	۰.۱۸	۲.۴۲	۰.۵۹	۰.۱۸	۰.۰۰	۰.۸۶	۰.۰۷	۰.۳۸	۰.۱۳	۰.۳۱	۰.۸۱
C13	۰.۰	۰.۱۰	۰.۰۵	۰.۰۶	۰.۰۰	۰.۰۲	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۳۰	۰.۰۲	۰.۱۲	۰.۰۱	۰.۱۶	۰.۰۴
C14	۰.۰	۰.۱۱	۰.۰۶	۰.۰۹	۰.۰۰	۰.۰۳	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۰۰	۰.۳۷	۰.۰۲	۰.۱۲	۰.۰۲	۰.۱۷	۰.۰۴
C15	۰.۰	۰.۱۳	۰.۰۷	۰.۱۱	۰.۰۰	۰.۰۳	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۱	۰.۰۰	۰.۴۰	۰.۰۳	۰.۱۴	۰.۰۲	۰.۱۷	۰.۰۸
C16	۰.۰	۰.۳۸	۰.۱۲	۰.۲۳	۰.۰۱	۰.۰۶	۰.۰۳	۰.۰۳	۰.۰۳	۰.۰۰	۰.۵۷	۰.۰۳	۰.۲۴	۰.۰۴	۰.۲۰	۰.۲۱
C17	۰.۱	۱.۵۳	۰.۵۷	۰.۵۷	۰.۰۴	۰.۱۱	۰.۰۸	۰.۳۰	۰.۰۷	۰.۰۰	۰.۷۰	۰.۰۷	۰.۴۱	۰.۱۷	۰.۲۶	۰.۴۵
C18	۴۶.۴	۱۲۲.۴	۸۲.۰۲	۸۶.۵۴	۱۳.۳۴	۴۷.۰۶	۳۶.۴۳	۲۱.۷۲	۱.۷۴	۴۲.۶۷	۴.۶۸	۲۵.۴۹	۴۴.۷۷	۴.۵۰	۲۶.۲۴	۲۶.۲۴
C19	۴۳.۶	۱۰۴.۴	۵۴.۵۷	۷۱.۴۹	۶.۴۱	۲۷.۹۰	۱۸.۹۴	۱۴.۶۵	۰.۶۷	۲۵.۷۹	۳.۴۷	۱۲.۹۳	۲۶.۷۴	۲.۸۷	۱۵.۴۸	۱۵.۴۸
C20	۳۹.۷	۷۶.۸۸	۳۶.۴۹	۴۸.۴۹	۳.۹۵	۳.۳۳	۱۵.۳۰	۱۰.۱۲	۹.۱۱	۰.۳۲	۱۶.۹۳	۲.۲۸	۸.۵۹	۱۶.۰۴	۱.۷۹	۹.۸۴
C21	۳۱.۷	۴۳.۱۳	۲۲.۳۶	۲۱.۶۴	۱.۹۶	۱.۱۴	۶.۴۱	۴.۵۳	۵.۲۵	۰.۰۹	۸.۴۰	۱.۳۱	۵.۵۵	۷.۸۲	۱.۱۰	۵.۴۴
C22	۲۲.۱	۲۶.۳۸	۱۴.۲۵	۱۲.۴۵	۱.۳۲	۰.۷۲	۳.۵۷	۲.۸۱	۳.۱۶	۰.۰۵	۴.۸۶	۰.۸۷	۳.۹۳	۴.۷۵	۰.۸۱	۳.۵۲
C23	۱۳۳	۵۵.۸	۰.۰۰	۷۵.۶۷	۱۱.۵۰	۱۱.۸۳	۲۴.۷۵	۹.۰۸۳	۲۷۷.۸	۰.۵۸	۰.۲۵	۱۱.۱۷	۱۱.۱۷	۴۰.۱۷	۰.۰۰	۲۰.۵۰
C24	۰.۰	۰.۰۱	۰.۰۲	۰.۰۵	۰.۰۰	۰.۰۷	۰.۰۱	۰.۰۰	۰.۰۲	۰.۰۰	۰.۲۲	۰.۰۷	۰.۰۷	۰.۰۱	۰.۳۶	۰.۰۳
C25	۰.۰	۵.۵۰	۳.۶۷	۱۱.۵۰	۲.۷۵	۱۰.۲۵	۱۳.۱۷	۶.۰۰	۲.۶۷	۰.۰۰	۵.۸۳	۲.۵۸	۵.۶۷	۶.۴۲	۱.۹۲	۶.۰۰
C26	۰.۰	۱۷.۶۵	۳۰.۱۴	۸.۵۸	۵۹.۸۴	۹.۶۲	۷.۳۵	۱۷.۴۳	۴۴.۷۹	۰.۰۰	۱۵.۶۹	۴۱.۸۳	۱۷.۹۷	۲۴.۰۸	۵۹.۵۹	۲۰.۲۶
C27	۱.۶	۵.۷۵	۶.۴۲	۴.۱۷	۴.۲۵	۴.۷۵	۳.۳۳	۵.۰۰	۲.۴۲	۱.۱۷	۲.۹۲	۲.۱۷	۴.۶۷	۴.۸۳	۰.۸۳	۵.۰۸
C28	۲۱.۸	۴.۲۲	۳.۶۳	۴.۷۳	۲.۴۲	۱.۵۸	۳.۶۱	۲.۴۳	۴.۲۹	۳.۶۸	۳.۲۹	۱۳.۵۴	۷.۱۲	۲.۴۶	۷.۸۷	۳.۷۵
C29	۲.۶	۳.۴۵	۲.۴۰	۲.۰۹	۰.۲۶	۰.۲۷	۱.۰۳	۰.۸۴	۰.۶۵	۰.۱۷	۰.۹۸	۰.۱۰	۰.۸۱	۱.۱۵	۰.۰۳	۰.۵۹
C30	-۱.۱	-۲.۴۰	-۱.۴۰	-۱.۶۳	-۰.۱۸	-۰.۱۶	-۰.۵۸	-۰.۵۳	-۰.۳۷	-۰.۰۸	-۰.۷۵	-۰.۰۷	-۰.۵۲	-۰.۶۶	-۰.۰۴	-۰.۴۸
C31	۳۱.۱	۱۰۴.۴۰	۱۱۲.۴۰	۱۱۷.۸۰	۱۴۶.۹۰	۱۰۱.۱۰	۱۱۱.۵۰	۱۲۲.۱۰	۳۶.۰۰	۸.۶۷	۷۰.۸۳	۲۵.۶۷	۶۴.۴۲	۱۱۱.۰۰	۲۷.۵۰	۱۰۶.۳۰

## ۲.۳. نتایج اولویت‌بندی امنیت هیدرولوژیکی زیرآب‌خیزها با استفاده از روش‌های MCDM

پس از تعیین وزن هریک از متغیرهای هیدرولوژیکی جریان، ماتریس تصمیم به همراه وزن‌ها به مدل‌های SAW، VIKOR، TOPSIS و COPRAS وارد شد. در جدول‌های ۴ تا ۶ نتایج اولویت‌بندی زیرآب‌خیزها براساس هریک از روش‌های یادشده قابل مشاهده است. براساس روش‌های TOPSIS و VIKOR زیرآب‌خیز S11 و براساس روش‌های SAW و COPRAS زیرآب‌خیزهای S15 و S2 بالاترین اولویت امنیت هیدرولوژیکی را کسب کردند. از سوی دیگر، زیرآب‌خیز S10 براساس روش‌های TOPSIS، VIKOR و COPRAS و زیرآب‌خیز S14 براساس روش SAW در اولویت آخر قرار گرفتند.



جدول ۴: اولویت بندی امنیت هیدرولوژیکی زیرآبخیزها مبتنی بر متغیرهای هیدرولوژیکی جریان با استفاده از روش TOPSIS

رتبه	$C_i^*$	زیرآبخیز
۳	۰.۴۶	S1
۲	۰.۴۹	S2
۶	۰.۴۰	S3
۷	۰.۳۹	S4
۱۴	۰.۳۱	S5
۱۰	۰.۳۵	S6
۱۱	۰.۳۵	S7
۱۲	۰.۳۴	S8
۱۵	۰.۳۰	S9
۱۶	۰.۲۶	S10
۱	۰.۵۴	S11
۹	۰.۳۵	S12
۵	۰.۴۰	S13
۱۳	۰.۳۲	S14
۴	۰.۴۶	S15
۸	۰.۳۷	S16

جدول ۵: اولویت بندی امنیت هیدرولوژیکی زیرآبخیزها مبتنی بر متغیرهای هیدرولوژیکی جریان با استفاده از روش VIKOR

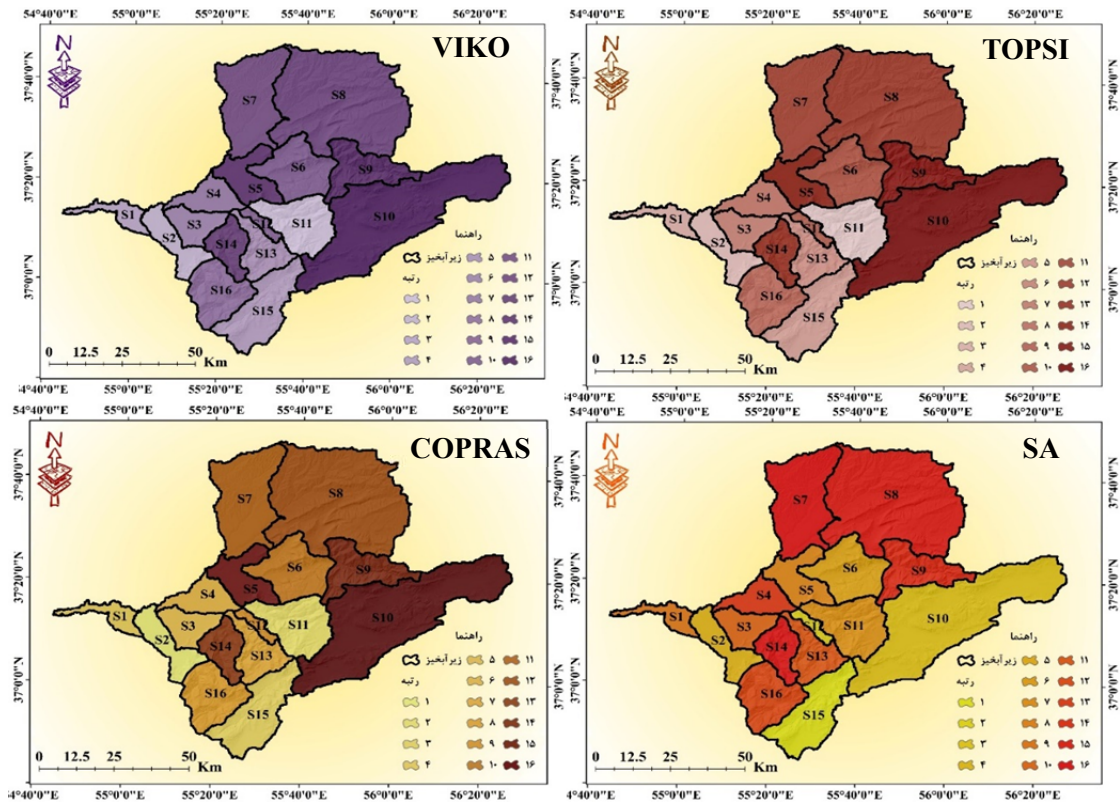
اولویت بندی زیرآبخیز براساس R	R	اولویت بندی زیرآبخیز براساس S	S	اولویت بندی زیرآبخیز براساس Q	Q
S11	۰.۰۴۸	S11	۰.۴۴۰	S11	۰.۰۰۰
S4	۰.۰۵۰	S2	۰.۴۶۱	S2	۰.۳۲۳
S13	۰.۰۵۱	S1	۰.۵۶۰	S4	۰.۳۵۶
S3	۰.۰۵۲	S15	۰.۵۶۲	S13	۰.۴۱۸
S16	۰.۰۵۲	S3	۰.۵۸۷	S3	۰.۴۴۲
S9	۰.۰۵۳	S13	۰.۶۰۱	S15	۰.۵۰۳
S2	۰.۰۵۴	S4	۰.۶۱۱	S16	۰.۵۰۷
S7	۰.۰۵۴	S16	۰.۶۱۷	S1	۰.۵۵۶
S15	۰.۰۵۴	S7	۰.۶۸۹	S9	۰.۶۷۲
S14	۰.۰۵۴	S8	۰.۶۹۰	S7	۰.۶۷۹
S6	۰.۰۵۴	S6	۰.۶۹۷	S6	۰.۷۲۲
S12	۰.۰۵۴	S12	۰.۶۹۸	S12	۰.۷۲۴
S1	۰.۰۵۵	S14	۰.۷۰۹	S14	۰.۷۳۸
S5	۰.۰۵۵	S9	۰.۷۲۱	S8	۰.۷۵۹
S8	۰.۰۵۵	S5	۰.۷۳۶	S5	۰.۸۳۱
S10	۰.۰۵۸	S10	۰.۷۶۰	S10	۱.۰۰۰

جدول ۶: اولویت‌بندی امنیت هیدرولوژیکی زیرآب‌خیزها مبتنی بر متغیرهای هیدرولوژیکی جریان

با استفاده از روش SAW و COPRAS

روش COPRAS			روش SAW	
امتیاز	زیرآب‌خیز	رتبه	وزن	زیرآب‌خیز
۱۰۰.۰۰	S2	۸	۰.۳۴۵	S1
۹۶.۵۶	S11	۴	۰.۴۴۹	S2
۸۲.۴۳	S15	۹	۰.۲۷۷	S3
۸۱.۸۱	S1	۱۲	۰.۲۴۹	S4
۵۸.۶۶	S3	۷	۰.۳۶۷	S5
۵۶.۵۰	S4	۵	۰.۴۳۶	S6
۵۵.۷۲	S13	۱۵	۰.۱۹۰	S7
۴۸.۶۲	S16	۱۴	۰.۱۹۱	S8
۴۲.۵۹	S12	۱۳	۰.۲۱۴	S9
۴۱.۷۹	S6	۳	۰.۸۹۰	S10
۳۳.۳۹	S7	۶	۰.۴۰۵	S11
۳۲.۱۶	S8	۲	۰.۸۹۰	S12
۲۷.۱۸	S14	۱۰	۰.۲۷۱	S13
۲۳.۸۱	S9	۱۶	۰.۱۶۶	S14
۲۱.۳۷	S5	۱	۱.۶۶۲	S15
۱۰.۰۳	S10	۱۱	۰.۲۶۹	S16

بمنظور نمایش بصری نتایج، پهنه‌های اولویت امنیت هیدرولوژیکی زیرآب‌خیزها در شکل ۴ ارائه شد.



شکل ۴: پهنه‌های اولویت امنیت هیدرولوژیکی زیرآب‌خیزها براساس روش‌های MCDM، حوضه آبخیز گرگان‌رود

### ۳.۳. نتایج ارزیابی کارایی روش‌های MCDM

با مقایسه دو به دو نتایج مدل‌های MCDM، ماتریس شدت تغییرات محاسبه شد (جدول ۷). براساس آن روش VIKOR با کمترین مقدار شدت تغییرات (برابر با ۵/۱۴) بهترین کارایی را در اولویت‌بندی امنیت هیدرولوژیکی زیرآب‌خیزها داشته است.

جدول ۷: ماتریس مقایسه نتایج مدل‌های MCDM براساس شاخص شدت تغییرات

مجموع	COPRAS	SAW	VIKOR	TOPSIS	
۶.۶۸	۲.۲۲	۲.۴۳	۲.۰۴	-	TOPSIS
۵.۱۴	۲.۰۷	۱.۵۵	-	۱.۵۴	VIKOR
۵.۱۶	۱.۶۲	-	۱.۴۸	۲.۰۴	SAW
۶.۵۱	-	۲.۱۰	۲.۲۳	۲.۱۸	COPRAS

### ۴. بحث و نتیجه‌گیری

نتایج وزن‌دهی متغیرها براساس مدل آنتروپی شانون نشان داد تعداد روزهای صفر جریان (C23) و شاخص جریان پایه (C24) بیشترین وزن را به خود اختصاص داده‌اند. در واقع، این دو متغیر بیشترین تغییرات و نوسان را در بین ایستگاه‌های هیدرومتری طی سال‌های آماری داشته‌اند و به‌نوعی نقش عامل محدودکننده را در امنیت هیدرولوژیکی حوضه آبخیز بازی می‌کنند. در این باره ستایشی نساز و همکاران [۴۶] نیز به تغییرات و نوسانات این متغیرها طی سال‌های مختلف اشاره داشته‌اند. این در حالی است که متغیر ضربان بالا (C27) تغییرات و بی‌نظمی محسوسی نداشته‌اند، از این‌رو کمترین وزن به آن اختصاص داده شده است.

نتایج روش‌های MCDM نشان داد در روش TOPSIS زیرآب‌خیزهای S11، S2 و S1 به‌ترتیب بیشترین اولویت را در امنیت هیدرولوژیکی حوضه آبخیز دارند. با توجه به اینکه زیرآب‌خیزهای S2 و S1 در خروجی حوضه آبخیز قرار دارند محل تجمع جریان کل حوضه آبخیز خواهند بود. بنابراین منابع آبی پایدار سبب ارتقای امنیت هیدرولوژیکی آن شده است. همچنین زیرآب‌خیز S11 یک زیرآب‌خیز جنگلی با تراکم زهکشی نسبتاً خوبی است که به‌ندرت روز بدون جریان در آن دیده می‌شود. از طرف دیگر، براساس روش TOPSIS زیرآب‌خیزهای S9 و S10 در شرق آبخیز، در اولویت آخر قرار گرفتند. در واقع در این دو زیرآب‌خیز، نبود پوشش گیاهی متراکم و تراکم زهکشی پایین (مخصوصاً زیرآب‌خیز S10) باعث شده است جریان ماهانه و سالانه کمی داشته باشند تا جایی که جریان ماهانه در زیرآب‌خیز S10 بسیار ناچیز و نزدیک به صفر است. از آنجا که بیشترین فاصله را نیز با دریای خزر دارد، به‌طبع از نزولات جوی کمتری نیز برخوردار است و این خود علتی بر کاهش امنیت هیدرولوژیکی جریان در این زیرآب‌خیز شده است. بنابراین براساس این روش لازم است این دو زیرآب‌خیز در اولویت اول مدیریتی قرار گیرد.

در روش VIKOR نیز همانند روش TOPSIS زیرآب‌خیزهای S11 و S2 بالاترین اولویت‌ها را دریافت کردند که مشابه با روش TOPSIS قابل توجیه است. همچنین در این روش نیز علاوه بر زیرآب‌خیز S10، زیرآب‌خیز S5 در درجه بعدی کمترین امتیاز را در امنیت هیدرولوژیکی جریان به خود اختصاص داده است. علت را می‌توان این‌گونه بیان کرد که زیرآب‌خیز S5 در پایین‌دست سد بوستان قرار داشته و جریان ورودی به آن تحت تأثیر سد بوستان است.

نتایج در روش SAW متفاوت از روند به‌دست‌آمده در سایر روش‌ها است. در این روش S15 در جنوب حوضه آبخیز بالاترین اولویت را در امنیت هیدرولوژیکی حوضه آبخیز به خود اختصاص داده است. این زیرآب‌خیز علی‌رغم آنکه در بخش نسبتاً مرتفع آبخیز قرار گرفته و از تراکم زهکشی مناسبی برخوردار است، براساس جدول ۳ متوسط جریان ماهانه مناسبی دارد و تقریباً روزهای بدون جریان در آن به صفر رسیده است. همچنین، بیشترین مقدار شاخص جریان پایه را در بین ایستگاه‌های هیدرومتری حوضه آبخیز دارد. بنابراین با وجود منابع آبی پایدار و مناسب، از امنیت هیدرولوژیکی بالایی برخوردار است. این در حالی است که زیرآب‌خیز S14 در اولویت آخر قرار گرفته است. علت این امر را می‌توان این‌گونه بیان کرد که در این زیرآب‌خیز به‌طور متوسط حدود ۴۰ روز از سال بدون جریان قابل توجه است و شاخص جریان پایه بسیار ناچیز و نزدیک به صفر است. بنابراین امنیت پایینی در وضعیت هیدرولوژیکی جریان آن دیده می‌شود که نیازمند مدیریت و نگاه ویژه به آن است.

در روش COPRAS نیز همانند روش‌های TOPSIS و VIKOR زیرآبخیزهای S1 و S2 در خروجی حوضه آبخیز بالاترین امتیاز را در امنیت هیدرولوژیکی جریان دریافت کرده‌اند که با توجه به توضیحات یادشده قرارگیری این زیرآبخیزها در خروجی آبخیز که تجمع جریان وجود دارد، جریان پایدار دارد و امتیاز آن قابل توجیه است. همچنین زیرآبخیز S10 نیز کمترین امتیاز را دارد که نیازمند توجه ویژه به آن است.

مقایسه کارایی روش‌های مختلف MCDM براساس شاخص شدت تغییرات نشان داد روش VIKOR کمترین شدت تغییرات را به خود اختصاص داده است. بنابراین بهترین روش در اولویت‌بندی امنیت هیدرولوژیک حوضه آبخیز گرگانرود است. به طور مشابه تاجبخش فخرآبادی و چزگی [۴۷] نیز نتایج قابل اطمینانی را از طریق اولویت‌بندی سیل‌خیزی براساس روش VIKOR به دست آوردند. به طور کلی نتایج پژوهش حاضر نشان داد براساس چهار روش تصمیم‌گیری چندمعیاره، زیرآبخیزهای S11، S2 و S1 بالاترین سطح از امنیت هیدرولوژیکی جریان را دارند و به لحاظ وضعیت منابع آب در شرایط خوبی هستند. این در حالی است که زیرآبخیزهای S10، S14 و S5 به لحاظ امنیت هیدرولوژیکی جریان و وضعیت منابع آب، در وضعیت نامناسبی قرار دارند و لازم است در اولویت‌های مدیریتی قرار گیرند. بی‌شک نتایج پژوهش حاضر می‌تواند تصویری از وضعیت منابع آب، امنیت آب و به طور کلی امنیت هیدرولوژیکی جریان حوضه آبخیز گرگانرود در اختیار مدیران و سیاست‌گذاران برای اتخاذ تصمیمات مدیریتی صحیح با هدف ارتقای وضعیت آبخیز قرار دهد. از این‌رو، با توجه به وضعیت منطقه و نتایج به‌دست‌آمده، پیشنهادهای اجرایی و توصیه‌های ضروری ذیل در راستای ارتقای منابع آبی و امنیت هیدرولوژیکی حوضه آبخیز گرگانرود قابل توجه است:

- جلوگیری از کاشت محصولات آبربر همچون برنج و جایگزینی آن با محصولات کشاورزی با نیاز آبی حداقل به‌خصوص در زیرآبخیزهای S10، S14 و S5
- به‌کارگیری شیوه‌های سنتی مدیریت و استحصال آب همچون احیای قنات به‌خصوص در زیرآبخیزهای S14 و S5
- تقویت پوشش گیاهی و احیای رودخانه‌های قدیمی از طریق استحصال و هدایت رواناب به داخل رودخانه‌های اصلی به‌خصوص در زیرآبخیز S10

### تقدیر و تشکر

این اثر تحت حمایت مادی صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور (INSF) برگرفته از طرح شماره (۴۰۲۰۸۴۵) انجام شده است.

### منابع

- [1] Flotemersch JE, Leibowitz SG, Hill RA, Stoddard JL, Thoms MC, Tharme RE. A watershed integrity definition and assessment approach to support strategic management of watersheds. *River Research and Applications*. 2016;32(7):1654-71.
- [2] Sadeghi S. H, Adhami M, Sheikhmohammadi M. Introduction and Applicability of Game Theory in Watershed CoManagement. *Extension and Development of Watershed Management*, 2018; 6(20): 1-8. [Persian]
- [3] Pal S, Debanshi S. Developing wetland landscape insecurity and hydrological security models and measuring their spatial linkages. *Ecological Informatics*. 2021; 1(66):101461.
- [4] Li S, Liu H. Spatio-temporal pattern evolution of coupling coordination between urbanization and ecological resilience in arid region: A case of Ningxia Hui Autonomous Region. *Arid Land Geography*. 2022; 45(4).
- [5] Salvati L, Bajocco S. Land sensitivity to desertification across Italy: past, present, and future. *Applied geography*. 2011 1;31(1):223-31.
- [6] Carpenter S, Walker B, Anderies JM, Abel N. From metaphor to measurement: resilience of what to what?. *Ecosystems*. 2001; 4(8): 65-81.
- [7] Khosravi G, Sadodin A, Ownegh M, Bahremand A, Mostafavi H. Classification and identification of changes in river flow regime using the Indicators of Hydrologic Alteration (IHA) Case study: (The Khormarud River-Tilabad Watershed- Golestan Province). *Iranian Journal of Ecohydrology*, 2019; 6(3): 651-671. [Persian]

- [8] Kundzewicz ZW, Matczak PI. Hydrological extremes and security. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*. 2015; 10(366): 44-53.
- [9] Gandri L, Bana S. Conservation Strategy Analysis in Upstream Watershead: Case Study in Cimandiri Watershead. *Jurnal Ecosolum*. 2021; 16(1):33-48.
- [10] Lee CS. Multi-objective game-theory models for conflict analysis in reservoir watershed management. *Chemosphere*. 2012; 87(6): 8-13.
- [11] Skardi MJ, Afshar A, Solis SS. Simulation-optimization model for non-point source pollution management in watersheds: Application of cooperative game theory. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2013; 17(6): 32-40.
- [12] Mir MA, Ghazvinei PT, Sulaiman NM, Basri NE, Saheri S, Mahmood NZ, Jahan A, Begum RA, Aghamohammadi NJ. Application of TOPSIS and VIKOR improved versions in a multi criteria decision analysis to develop an optimized municipal solid waste management model. *Journal of Environmental Management*. 2016; 15(166): 109-15.
- [13] Akbari M, Meshram SG, Krishna RS, Pradhan B, Shadeed S, Khedher KM, Sepehri M, Ildoromi AR, Alimerzaei F, Darabi F. 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*. 2021; 35(47): 27-45.
- [14] Chang CL, Hsu CH. Multi-criteria analysis via the VIKOR method for prioritizing land-use restraint strategies in the Tseng-Wen reservoir watershed. *Journal of Environmental Management*. 2009; 90(11): 26-30.
- [15] Chang CL, Lin YT. Using the VIKOR method to evaluate the design of a water quality monitoring network in a watershed. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2014; 2(11):10-30.
- [16] Dong J, Huo H, Liu D, Li R. Evaluating the comprehensive performance of demand response for commercial customers by applying combination weighting techniques and fuzzy VIKOR approach. *Sustainability*. 2017; 9(8):1332.
- [17] Malekian A, Azarnivand A. Application of integrated Shannon's entropy and VIKOR techniques in prioritization of flood risk in the Shemshak watershed, Iran. *Water Resources Management*. 2016; 30(1): 9-25.
- [18] Meshram SG, Singh VP, Kahya E, Alvandi E, Meshram C, Sharma SK. The feasibility of multi-criteria decision-making approach for prioritization of sensitive area at risk of water erosion. *Water Resources Management*. 2020; 34(15): 65-85.
- [19] Meshram SG, Adhami M, Kisi O, Meshram C, Duc PA, Khedher KM. Identification of critical watershed for soil conservation using Game Theory-based approaches. *Water Resources Management*. 2021; 35(10): 5-20.
- [20] Meshram SG, Singh VP, Kahya E, Sepehri M, Meshram C, Hasan MA, Islam S, Duc PA. Assessing erosion prone areas in a watershed using interval rough-analytical hierarchy process (IR-AHP) and fuzzy logic (FL). *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. 2022; 36(2):1-6.
- [21] Mulliner E, Malys N, Maliene V. Comparative analysis of MCDM methods for the assessment of sustainable housing affordability. *Omega*. 2016; 59: 46-56.
- [22] Nguyen NM, Bahramloo R, Sadeghian J, Sepehri M, Nazari-pouya H, Nguyen Dinh V, Ghahramani A, Talebi A, Elkhachy I, Pande CB, Meshram SG. Ranking sub-watersheds for flood hazard mapping: A multi-criteria decision-making approach. *Water*. 2023; 15(11):2128.
- [23] Jalali A, Nagesh Kumar D, Srinivasa Raju K. Prioritization of sub-catchments of a river basin using DEM and fuzzy VIKOR. *Indian Academy of Science*. 2018; 1(1):1-11.
- [24] Salehi A, Izadikhah M. A novel method to extend SAW for decision-making problems with interval data. *Decision Science Letters*. 2014; 3(2):22-36.
- [25] Shih HS, Shyur HJ, Lee ES. An extension of TOPSIS for group decision making. *Mathematical and Computer Modelling*. 2007; 45(7-8): 1-13.
- [26] Yu X, Zhang S, Liao X, Qi X. ELECTRE methods in prioritized MCDM environment. *Information Sciences*. 2018; 424: 1-16.
- [27] Mahmoodi E, Azari M, Dastorani MT. Comparison of different objective weighting methods in a multi-criteria model for watershed prioritization for flood risk assessment using morphometric analysis. *Journal of Flood Risk Management*. 2023; 16(2):e12894.

- [28] Nasiri Khiavi A, Vafakhah M, Sadeghi SH. Flood-based critical sub-watershed mapping: comparative application of multi-criteria decision-making methods and hydrological modeling approach. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. 2023; 37(7): 57-75.
- [29] Nasiri Khiavi A, Mostafazadeh R, Ghanbari Talouki F. Using game theory algorithm to identify critical watersheds based on environmental flow components and hydrological indicators. *Environment, Development and Sustainability*. 2024; 9:1-24.
- [30] Sahraei R, Kanani Sadat Y, Homayouni S, Safari A, Oubennaceur K, Chokmani K. A novel hybrid GIS based multi criteria decision making approach for flood susceptibility analysis in large ungauged watersheds. *Journal of Flood Risk Management*. 2023; 16(2):e12879.
- [31] Sarkar P, Sarma US, Gayen SK. Prioritization of sub-watersheds of Teesta River according to soil erosion susceptibility using multi-criteria decision-making in Sikkim and West Bengal. *Arabian Journal of Geosciences*. 2023;16(6):398.
- [32] Sepehri M, Linh NT, Pouya HN, Bahramloo R, Sadeghian J, Ghermezcheshme B, Talebi A, Peyrovan H, Thanh PN. Developing a new multi-criteria decision-making for flood prioritization of sub-watersheds using concept of D numbers. *Acta Geophysica*. 2023; 12:1-3.
- [33] Nie RX, Tian ZP, Wang JQ, Zhang HY, Wang TL. Water security sustainability evaluation: Applying a multistage decision support framework in industrial region. *Journal of Cleaner Production*. 2018; 20(196):70-81.
- [34] Tu Y, Wang H, Zhou X, Shen W, Lev B. Comprehensive evaluation of security, equity, and efficiency on regional water resources coordination using a hybrid multi-criteria decision-making method with different hesitant fuzzy linguistic term sets. *Journal of Cleaner Production*. 2021; 310: 27-44.
- [35] Yu H, Gu X, Liu G, Fan X, Zhao Q, Zhang Q. Construction of regional ecological security patterns based on multi-criteria decision making and circuit theory. *Remote Sensing*. 2022; 14(3):527.
- [36] Khazaei Fizabad A, Pourreza Bilondi M. Identifying areas with underground water potential using multi-criteria decision-making models, AHP and ANP (case study: Naiband-Tabas Plain). *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 2024; 17(5): 917-929. [*Persian*]
- [37] Nasiri Khiavi Ali, Mostafazadeh Raof, Esmali Ouri Abazar, Ghafarzadeh Omid, Golshan Mohammad. Alteration of hydrologic flow indicators in Ardabil Balikhlouchai River under combined effects of change in climatic variables and Yamchi Dam construction using Range of Variability Approach. *Watershed Engineering and Management*. 2020;11(4 ):851-865. [*Persian*]
- [38] Daechini F, Vafakhah M, Moosavi V, Silabi MZ. Performance assessment of five water balance models for runoff simulation in the Gorganrود watershed. *JWSS-Journal of Water and Soil Science* 2022; 26 (2) :263-281. [*Persian*]
- [39] Chen YD, Yang T, Xu CY, Zhang Q, Chen X, Hao ZC. Hydrologic alteration along the Middle and Upper East River (Dongjiang) basin, South China: a visually enhanced mining on the results of RVA method. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. 2010; 24(1): 9-18.
- [40] Hanifinia A, Nazarejad H, Najafi S, Kornejady A. K. Landslide Hazard Mapping Using AHP and Shannon Entropy Models in Cherikabad of Urmia Watershed. *Applied Soil Research*, 2022; 10(3): 130-144. [*Persian*]
- [41] Yufeng S, Fengxiang J. Landslide stability analysis based on generalized information entropy. In 2009 International Conference on Environmental Science and Information Application Technology 2009; 4(2): 83-85.
- [42] Chen SJ, Hwang CL. Fuzzy multiple attribute decision making methods. In *Fuzzy multiple attribute decision making: Methods and applications*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. 1992.
- [43] Opricovic S. Multicriteria optimization of civil engineering systems. *Faculty of Civil Engineering, Belgrade*. 1998; 2(1):5-21.
- [44] Widianta MM, Rizaldi T, Setyohadi DP, Riskiawan HY. Comparison of multi-criteria decision support methods (AHP, TOPSIS, SAW & PROMENTHEE) for employee placement. *Journal of Physics: Conference Series* 2018; 1: 953.
- [45] Vytautas B, Marija B, Vytautas P. Assessment of neglected areas in Vilnius city using MCDM and COPRAS methods. *Procedia Engineering*. 2015; 122: 29-38.

- [46] Setayeshi Nasaz H, Asghari Saraskanrood S, Mostafazadeh R, Madadi A. Investigating changes in the hydrological flow regime and the environmental flow component of EFCs in Khiauchai River in a 30-year period. *Hydrogeomorphology*, 2023; 10(37): 43-25. [*Persian*]
- [47] Tajbakhsh Fakhrabadi S. M, Chezgi J. Effect of morphometric factors in prioritizing flooding of sub-watersheds in the north of Birjand Plain. *Water and Soil Management and Modelling*, 2022; 3(3): 240-255. [*Persian*]