

Research Paper



Prioritization of Flood Susceptibility in Hydrological Units Using the MACBETH Model A Case Study of the Varzeqan-Chai Watershed



Masoumeh Rajabi^{1*} , Davoud Mokhtari² , Lili Asl Mohammadi³

1- Professor of Geomorphology, Department of Geomorphology, University of Tabriz, Tabriz, Iran. mrjabi@tabrizu.ac.ir

2- Professor of Geomorphology, Department of Geomorphology, University of Tabriz, Tabriz, Iran. d_mokhtari@tabrizu.ac.ir

3- PhD student, Department of Geomorphology, University of Tabriz, Tabriz, Iran. Liliamo1975@gmail.com

Keywords

Flood, Prioritization, Hydro-geomorphic Indicators, MACBETH Model, Varzeqan-Chai Watershed, Northwestern Iran.

Receive: 2026/01/02

Accepted: 2026/05/03

Published: 2026/00/00

ABSTRACT

Introduction

Prioritizing watershed sub-basins based on their flood potential plays a crucial role in guiding policy-making and improving water resources management strategies, particularly in areas located near critical infrastructure and environmentally sensitive zones. Given the mountainous nature of the study area, the presence of unstable atmospheric systems, and precipitation-generating weather patterns, the likelihood of flooding in this basin is considerable. In spring, the combined effects of snowmelt and rainfall-induced runoff led to a substantial increase in discharge, which can trigger flooding and erosion and pose a threat to surrounding agricultural lands. Therefore, identifying and analysing the factors influencing the flood susceptibility of the region can be highly beneficial for developing effective flood risk management and mitigation strategies, as well as for sustainable water resources planning in this and other similar areas.

Methodology

In this study, 1:100,000 scale geological maps, land-use maps, climatic data from meteorological stations located within and around the watershed, a digital elevation model (DEM), and field observations were used. Data processing and spatial analyses were performed in the ArcGIS software environment. For the analysis, a set of morphometric and climatic indices including stream number and order, stream length, drainage density and texture, drainage frequency, curve number (CN), area, compactness coefficient, circularity ratio, form factor, relief, slope, and precipitation was employed. Subsequently, the MACBETH weighting method was applied to determine the relative importance of hydro-geomorphic and climatic parameters, and by applying the derived weights, the final flood susceptibility map was produced.

*Corresponding Author: Masoumeh Rajabi E-mail: mrjabi@tabrizu.ac.ir

How to cite this article: Rajabi, M., Mokhtari, D., & Asl Mohammadi, L. (2026). Prioritization of Flood Susceptibility in Hydrological Units Using the MACBETH Model: A Case Study of the Varzeqan-Chai Watershed. *Hydrogeomorphology*, 13(48): 86 – 106.

DOI: [10.22034/hyd.2026.70656.1831](https://doi.org/10.22034/hyd.2026.70656.1831)



Copyright: © by the authors

Publisher: University of Tabriz

Results and Discussion

After calculating the geomorphometric parameter values for each sub-basin, the weighting process was carried out using the MACBETH model. Once the influence of each parameter on the sub-basins of the region was determined, the final weight of each sub-basin was computed based on the sum of the 14 parameters employed in the study, and the sub-basins were subsequently prioritized. The final parameter weights for the 12 sub-basins under investigation indicate that Sub-basins 5, 11, and 2, with coefficients of 0.264, 0.184, and 0.145 respectively, have the highest weights and thus exhibit the greatest flood sensitivity.

Following the determination of the final parameter weights, a final map was generated to prioritize the Varzeqan-Chai sub-basins in terms of flood susceptibility by applying the obtained weights to each thematic layer. Out of the 12 analyzed sub-basins, 3 sub-basins fall into the "very high" sensitivity class, 2 into the "high" class, 2 into the "moderate" class, 2 into the "low" class, and 3 into the "very low" class.

Conclusions

In the present study, an effort was made to examine the role of hydro-geomorphic and climatic indices in the flood susceptibility of the sub-basins within the Varzeqan-Chai watershed. Fourteen hydro-geomorphic and climatic parameters were employed to assess the sub-basins. The zoning results indicate that approximately 66% of the watershed area falls within the "high" and "very high" susceptibility classes, about 6.7% lies in the "moderate" class, and roughly 24.06% is categorized as "low" and "very low." This distribution highlights the predominance of high-risk zones in the region and underscores the necessity of prioritizing flood management efforts in the most vulnerable parts of the watershed.



اولویت بندی سیل خیزی واحدهای هیدرولوژیک با استفاده از مدل MACBETH مطالعه موردی: حوضه آبریز ورزقان چای



معصومه رجبی^{۱*}، داود مختاری^۲، لی لی اصل محمدی^۳

۱- استاد گروه ژئومورفولوژی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. mrajabi@tabrizu.ac.ir

۲- استاد گروه ژئومورفولوژی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. d_mokhtari@tabrizu.ac.ir

۳- دانشجوی مقطع دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. Liliamo1975@gmail.com

چکیده

شناسایی و اولویت بندی زیرحوضه ها بر اساس میزان سیل خیزی، از منظر مدیریت حوضه های آبریز، در برنامه ریزی پروژه های کنترل سیلاب و آبخیزداری نقش بنیادی دارد. در همین راستا، پژوهش حاضر با هدف شناخت دقیق پتانسیل سیل خیزی واحدهای هیدرولوژیک حوضه آبریز ورزقان چای و ارائه راهکارهای مدیریتی مؤثر، با بهره گیری از مدل تصمیم گیری چندمعیاره (MACBETH) انجام پذیرفت. حوضه آبریز ورزقان چای، با وسعت تقریبی ۴۰۷/۸ کیلومتر مربع، در استان آذربایجان شرقی واقع شده و به عنوان سرشاخه اصلی رودخانه اهرچای شناخته می شود. برای دستیابی به اهداف پژوهش، محدوده مورد مطالعه با استفاده از مدل رقومی ارتفاع با تفکیک مکانی ۱۰ متر و بر اساس ویژگی های شبکه زهکشی و شرایط توپوگرافی به ۱۲ زیرحوضه مجزا تقسیم گردید. شاخص های مورد ارزیابی شامل مساحت، تعداد و رتبه آبراهه ها، طول آبراهه، تراکم و بافت زهکشی، شماره نفوذ، تناوب آبراهه، ضریب فشردگی، نسبت مدور بودن، ضریب شکل، میزان برجستگی، شیب و بارش است. نتایج وزن دهی نهایی پارامترها حاکی از آن است که زیرحوضه های شماره ۵، ۱۱ و ۲، به ترتیب با ضرایب ۰/۲۶۴، ۰/۱۸۴ و ۰/۱۴۵، بیشترین حساسیت نسبت به سیل خیزی را دارا هستند. در مقابل، زیرحوضه شماره ۷ با ضریب ۰/۰۵۴ کمترین وزن را به خود اختصاص داده است؛ از این رو، این زیرحوضه از پایین ترین سطح حساسیت نسبت به سیل خیزی برخوردار است. پس از تعیین وزن نهایی پارامترها، با اعمال اوزان به دست آمده بر هر یک از لایه ها، نقشه نهایی تهیه گردید. از مجموع ۱۲ زیرحوضه مورد مطالعه، سه زیرحوضه در طبقه «خیلی زیاد»، دو زیرحوضه در طبقه «زیاد»، دو زیرحوضه در طبقه «متوسط»، دو زیرحوضه در طبقه «کم»، و سه زیرحوضه در طبقه «خیلی کم» از نظر حساسیت به سیل قرار دارند. یافته های مکانی نشان می دهد که در حدود ۲۶۸/۸۳ کیلومترمربع از سطح حوضه در طبقات «زیاد» و «خیلی زیاد» قرار گرفته است که معادل ۶۶ درصد کل مساحت حوضه می باشد. همچنین، ۲۷/۴ کیلومترمربع از اراضی حوضه در طبقه «متوسط» قرار دارد که برابر با ۶/۷ درصد مساحت کل حوضه است. در مقابل، حدود ۹۸/۰۹ کیلومترمربع در طبقات «کم» و «خیلی کم» واقع شده که در مجموع ۲۴/۰۶ درصد منطقه مورد مطالعه را شامل می شود.

کلیدواژه ها

سیل، اولویت بندی، شاخص های هیدروژئومورفیک، مدل MACBETH، حوضه آبریز ورزقان چای، شمال غرب ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۱۳

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۷/۰۰

*نویسنده مسئول: معصومه رجبی **ارجاع به این مقاله:** رجبی، معصومه؛ مختاری،؛ اصل محمدی (۱۴۰۵). اولویت بندی سیل خیزی واحدهای هیدرولوژیک با استفاده از مدل MACBETH مطالعه موردی: حوضه آبریز ورزقان چای. هیدروژئومورفولوژی، دوره ۱۳ (شماره ۴۸): ۸۶-۱۰۶.

رایانامه: mrajabi@tabrizu.ac.ir

شناسه دیجیتال مقاله: [10.22034/hyd.2026.70656.1831](https://doi.org/10.22034/hyd.2026.70656.1831)



در میان انواع مختلفی از بلایای طبیعی نظیر زمین لغزش، سونامی، زمین لرزه، فوران آتشفشانی، سیل به عنوان یکی از رایج ترین و مخرب ترین پدیده ها در نظر گرفته می شود که تقریباً در سراسر جهان اتفاق می افتد (دوسی و همکاران^۱، ۲۰۱۳؛ ۱۶؛ داس^۲، ۲۰۱۸؛ ۶۸۱؛ ترمه و همکاران^۳، ۲۰۱۸؛ ۴۳۹). طبق گزارش جهانی برنامه عمران سازمان ملل در مورد خطر بلایای طبیعی، سیلاب به همراه زلزله و خشکسالی، بالاترین رتبه را از لحاظ خسارت مالی و جانی به همراه دارد (محمودزاده و همکاران، ۱۳۹۶: ۷۲۱). سیلاب با سهم ۴۴/۲۸ درصدی از مجموع ۷۳۴۸ حادثه فاجعه آمیز جهان بین سال های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۹، خسارتی معادل ۲/۹۷ تریلیون دلار برای گذاشته و جان ۷ میلیون نفر را گرفته است (وانگ و همکاران^۴، ۲۰۲۳؛ ۱۸۶؛ رضایی مقدم و همکاران، ۱۴۰۲: ۳۲۶). در سرتاسر جهان، بیش از یک سوم سطح زمین در معرض خطر وقوع سیلاب ها قرار دارد، جایی که بیش از ۷۰ درصد از جمعیت در آن سکونت دارند (آکسوی و همکاران^۵، ۲۰۱۶: ۱۳۸). گرمایش جهانی و توسعه در پنج دهه اخیر نیز، سبب تغییرات بزرگ در الگوی بارش و افزایش خطرات سیل در بسیاری از مناطق شده است (کوهارتاکورجا و همکاران^۶، ۲۰۱۱: ۳۶۱؛ فرامرزی و همکاران، ۱۳۹۸: ۱۰۵۷). اندازه و رویداد سیلاب در هر منطقه بستگی به عوامل متعددی دارد. ویژگی های فیزیکی حوضه آبریز نظیر شکل، شیب شبکه آبراهه های و ناهمواری زمین توأم با خصوصیات هیدرولوژیکی مانند بارش، ذخیره و تلفات برگابی و چالابی، تبخیر و تعرق، نفوذپذیری و اقدامات ناشی از فعالیت های بشری در بروز و تشدید سیلاب و یا کاهش و افزایش میزان خسارت ناشی از آن دخالت دارند (رضوی، ۱۳۸۷). بررسی و شناخت علل و عوامل و ویژگی های هیدروژئومورفولوژیک و چگونگی تأثیر آنها در مدیریت حوضه های آبریز با رویکرد تقلیل و جلوگیری خسارت های ناشی از وقوع سیل از اهمیت بسیار زیادی برخوردار می باشد (علیزاده، ۱۳۹۶: ۷۱). زیرحوضه های آبریز از نظر پتانسیل فرسایش خاک، تولید رسوب و ایجاد جریان های سطحی با یکدیگر تفاوت دارند؛ در نتیجه، میزان هدررفت منابع آب و خاک در آنها نیز متغیر است (چادواری^۷، ۲۰۱۳: ۳۵۵۷). اولویت بندی زیرحوضه های یک حوضه بر اساس پتانسیل سیل خیزی، با هدف تعیین اولویت در سیاست گذاری ها و اقدامات مدیریتی، می تواند نقش مهمی در مدیریت بهینه حوضه ها داشته باشد (غریب و همکاران، ۱۳۹۷: ۸۹). لذا حفظ و کنترل زیرحوضه هایی که از نظر سیل خیزی اولویت بیشتری داشته و دارای شرایط بحرانی و یا نزدیک تأسیسات عمومی حساس هستند، ضروری است (محمدی و همکاران، ۱۴۰۱: ۴۷). در سطح جهانی و کشور مطالعاتی زیادی صورت گرفته است که به تعدادی از آنها اشاره می گردد. پیشینه پژوهش ها نشان می دهد که عوامل محیطی و ساختاری حوضه ها نقش تعیین کننده ای در بروز سیلاب دارند. مطالعات روستایی (۱۳۹۶) و اعظمی بابانی (۱۳۹۷) تأیید کرده اند که تراکم مناسب پوشش گیاهی موجب کاهش رواناب و در نتیجه کاهش خطر سیلاب می شود، در حالی که شیب های تند و گسترش کاربری کشاورزی سیل خیزی زیرحوضه ها را افزایش می دهد. در حوزه مدل سازی هیدرولوژیکی، پژوهش های رضایی مقدم (۱۳۹۸) و سرائی (۱۳۹۹) با بهره گیری از مدل SWAT و تحلیل پارامترهایی نظیر شیب، بارش و فاصله از رودخانه توانسته اند زیرحوضه های بحرانی را شناسایی کنند؛ همچنین رضایی مقدم (۱۳۹۹) با استفاده از روش SWARA نشان داده است که ترکیب مدل های هیدرولوژیکی و روش های وزن دهی چندمعیاره، دقت بیشتری در تعیین نواحی حساس ارائه می دهد. در مطالعات فازی و چندمعیاره، سعیدی و آسیایی (۱۴۰۰) به این نتیجه رسیدند که ارتفاع بیشترین و کاربری اراضی کمترین وزن را در ارزیابی خطر سیلاب دارا هستند، در حالی که رجبی (۱۴۰۱) و حجازی (۱۴۰۲) اهمیت عواملی همچون شیب متوسط، تراکم زهکشی، شکل حوضه و شرایط هیدرولوژیکی را در افزایش حساسیت بخش های مختلف حوضه ها گزارش کرده اند. در حوزه روش های نوین، نگهبان (۱۴۰۳) با الگوریتم Maxnet ارتفاع، فاصله از آبراهه و کاربری اراضی را به عنوان مهم ترین متغیرهای پیش بینی

1 - Doocy et al

2 - Das

3 - Termeh et al

4 - Wang et al

5 - Aksoy et al

6 - Guhathakurta et al

7 - Chowdary

معرفی کرده است و اکرمی مقدم (۱۴۰۳) با روش AHP بارش، شیب و فاصله از رودخانه را اساسی ترین عوامل دانسته است. همچنین محمدی (۱۴۰۴) با مدل Fuzzy Overlay نشان داده که بخش قابل توجهی از اراضی سکونتگاهی در طبقات خطر زیاد و بسیار زیاد قرار دارند. در حوزه مطالعات بین المللی نیز یافته های محمود و رحمان^۱ (۲۰۱۹) در پاکستان، ناتاراجان و همکاران^۲ (۲۰۲۰) در هند، آبیدات و همکاران^۳ (۲۰۲۰) در اردن و توفیقو اسلام و همکاران^۴ (۲۰۲۱) بیانگر نقش عناصر مورفومتریک، عمق سیلاب، تراکم زهکشی و طبقه بندی روش های ارزیابی خطر هستند. افزون بر این، آلام و همکاران^۵ (۲۰۲۱) در بنگلادش گستره وسیعی از زیرحوضه ها را دارای حساسیت بالا گزارش کرده، ویگ و همکاران^۶ (۲۰۲۲) در اروپا اثرات تغییرات کاربری و توسعه شهری را بر تشدید خطر تأیید نموده، ابراهیم خان پاتان و همکاران^۷ (۲۰۲۲) بر برتری روش TOPSIS نسبت به AHP در تعیین نواحی پرخطر تصریح کرده و وهبا و همکاران^۸ (۲۰۲۴) در ژاپن بیان کرده است که حدود یک پنجم منطقه مطالعه شده در طبقات خطر بالا و بسیار بالا قرار دارد. مجموعه این مطالعات تأکید می کنند که ترکیب عوامل توپوگرافی، هیدرولوژیکی، پوشش گیاهی و روش های نوین مدل سازی، دیدگاه جامعی برای شناسایی و مدیریت مناطق سیل خیز فراهم می سازد. حوضه آبریز ورزقان چای در محدوده شهرستان ورزقان و در شرق رودخانه اهرچای واقع شده است. باتوجه به موقعیت جغرافیایی، کوهستانی بودن محدوده و توده های ناپایدار جوی و بارش های تأثیرگذار بر منطقه، وقوع سیلاب در این حوضه محتمل است. در فصل بهار، هم افزایی آب های حاصل از ذوب برف ها و رواناب ناشی از بارندگی، حجم رواناب کلی را به شدت افزایش می دهد که این امر باعث بروز سیلاب و فرسایش در حوضه آبریز مزبور شده و زمین های کشاورزی را در معرض خسارت قرار می دهد. لذا شناسایی و تحلیل عوامل مؤثر در سیل خیزی این منطقه می تواند به ارائه راهکارهایی برای پیشگیری و مدیریت بهتر سیل کمک کند و مبنایی برای طراحی پروژه های کنترل سیلاب، برنامه ریزی توسعه پایدار و مدیریت منابع آب در منطقه مورد مطالعه و مناطق مشابه باشد. علاوه بر این، پژوهش حاضر می تواند به نهادهای ذی ربط در تدوین سیاست گذاری های میان مدت و بلندمدت و اتخاذ تصمیمات کلان مدیریتی کمک کند و در پیشگیری و کاهش اثرات سیل مؤثر واقع شود.

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز ورزقان چای با مساحتی بالغ بر ۴۰۷/۸ کیلومتر مربع در استان آذربایجان شرقی واقع شده است. این حوضه آبریز سرشاخه اصلی رودخانه اهرچای محسوب می شود و بین مختصات جغرافیایی ۳۸° ۲۴' ۱۵" تا ۳۸° ۴۱' ۰۷" و ۳۸° ۱۷' ۲۰" عرض شمالی و ۴۶° ۱۲' ۴۰" تا ۴۶° ۴۰' ۱۲" درجه طول شرقی قرار گرفته است. این منطقه از نظر تقسیمات کشوری در بخش مرکزی شهرستان ورزقان، از توابع استان آذربایجان شرقی قرار دارد. شهرستان ورزقان به دلیل موقعیت جغرافیایی ویژه و قرارگیری در نواحی سرسبز جنگل های ارسباران، در گذشته با عنوان «شهرستان ارسباران» نیز شناخته می شده است. تغییرات ارتفاعی این حوضه از ۱۶۵۸ متر در خروجی حوضه تا ارتفاع ۲۹۵۲ متر مربوط به کوه قصبه داغی می باشد. این حوضه یکی از زیرحوضه های حوضه آبریز دریاچه خزر می باشد که آب های سطحی آن پس از پیوستن به رودخانه ارس به سمت دریاچه خزر هدایت می شوند. شکل (۱) موقعیت جغرافیایی حوضه ورزقان چای را در استان آذربایجان شرقی نشان می دهد.

1- Mahmood and Rahman

2- Natarajan et al

3- Obeidat et al

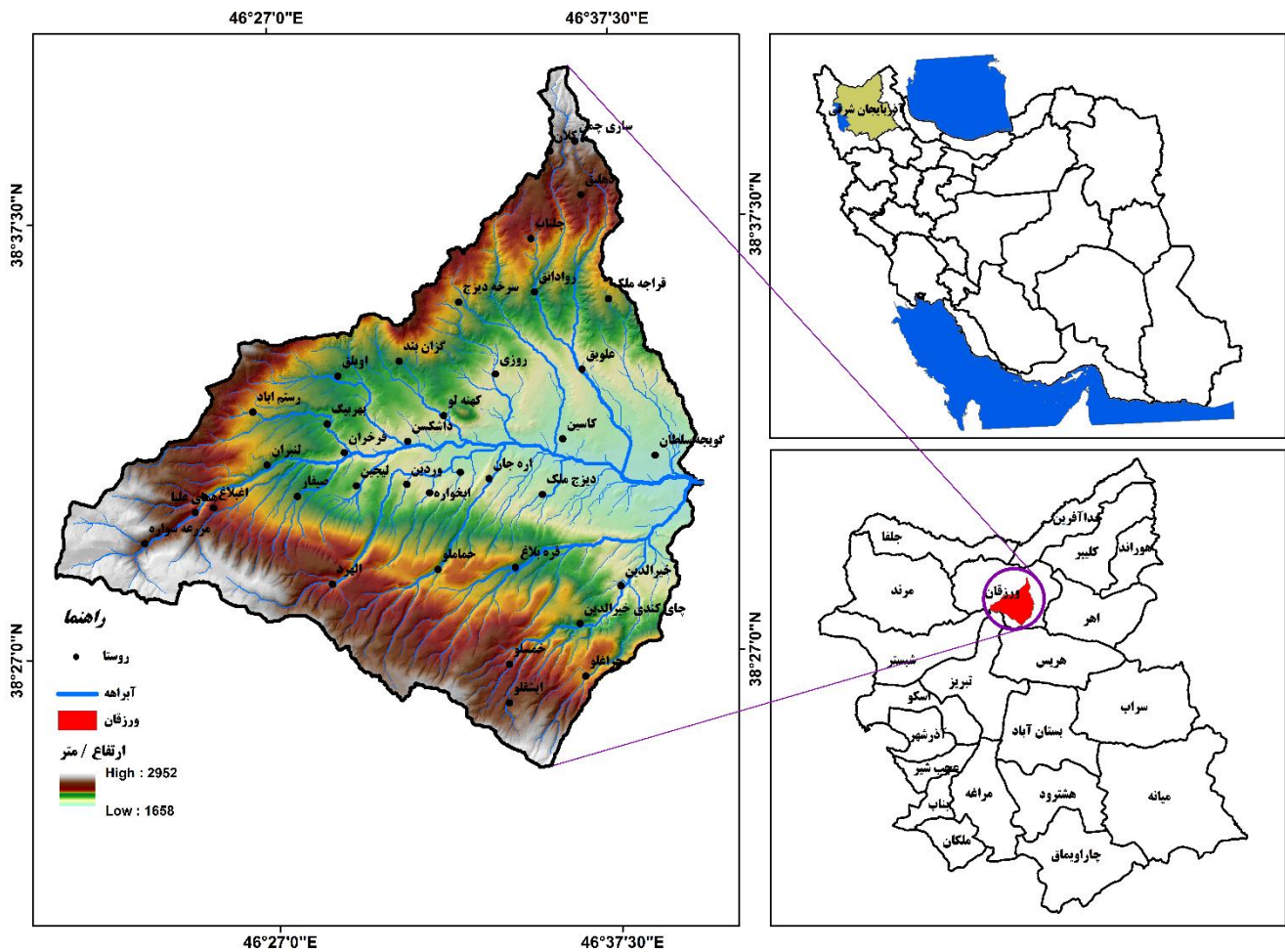
4- Towfiqul Islam et al

5- Alam et al

6- Vig et al

7- Ibrahimkhan pathan et al

8- Wahba et al



شکل ۱: موقعیت حوزه آبریز ورزقان چای
Figure 1: Location of the Varzeqan-Chai Watershed

مواد و روش

تحقیق حاضر به لحاظ روش از نوع تحلیلی و به لحاظ هدف از نوع تحقیقات کاربردی می‌باشد. در این پژوهش مجموعه‌ای از داده‌های پایه شامل نقشه‌های زمین‌شناسی تبریز، سیه‌رود، ورزقان و خواجه با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰، نقشه کاربری اراضی تهیه‌شده توسط اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری آذربایجان شرقی، داده‌های اقلیمی ایستگاه‌های تبریز، اهر، ورزقان، اویلق، کمانج و افشرد، مدل رقومی ارتفاعی ۱۰ متری منطقه تهیه شده از سازمان نقشه برداری و همچنین نتایج بازدیدهای میدانی استفاده شده است. پردازش و تحلیل داده‌ها با بهره‌گیری از نرم‌افزار ArcGIS، الحاقیه‌های Arc Hydro و Arc SWAT صورت گرفته است. برای این منظور از شاخص‌های مورفومتری و اقلیمی شامل تعداد و رتبه آبراهه‌ها، طول و تراکم زهکشی، بافت و تناوب آبراهه‌ای، شماره منحنی نفوذ، مساحت، ضریب فشردگی، نسبت مدور بودن، ضریب شکل، برجستگی، شیب و میزان بارش استفاده شد. در جدول (۱) روابط مورد استفاده برای محاسبه این شاخص‌ها ارائه شده است. نتایج حاصل از تحلیل داده‌ها مبنای تعیین حساسیت سیل‌خیزی زیرحوضه‌ها قرار گرفته و امکان ارائه راهکارهای مدیریتی و پیشگیرانه برای کاهش خطر سیل را فراهم می‌سازد. این تحلیل‌ها در قالب نقشه‌های موضوعی و شاخص‌های کمی، دیدگاهی جامع از وضعیت هیدرولوژیکی منطقه ارائه می‌کند.

جدول ۱: فرمول محاسبه پارامترهای هیدروژئومورفیک
Table 1: Formulas for Calculating Hydro-geomorphic Parameters

پارامتر	فرمول	منبع
فراوانی آبراهه	$F_s = N_u/A$ تعداد کل آبراهه‌های حوضه آبریز N_u مساحت حوضه آبریز A	هورتن (۱۹۴۵)
تراکم زهکشی	$D_d = L_u/A$ طول کل آبراهه‌های حوضه آبریز L_u	هورتن (۱۹۴۵)
بافت زهکشی	$D_t = N_u/P$ محیط حوضه آبریز P	هورتن (۱۹۴۵)
شماره نفوذ	$I_f = D_d \times F_s$	فانیران ^۱ (۱۹۶۸)
ضریب فشردگی	$C_c = 0.2812 \times P/A^{0.5}$	هورتن (۱۹۴۵)
نسبت مدور بودن	$R_c = 4 \times 3.14 A/P^2$	سینگ و سینگ ^۲ (۲۰۱۷)
ضریب شکل	$F_f = A/L_b^2$	هورتن (۱۹۴۵)
برجستگی حوضه	$B_h = h_{max} - h_{min}$ حداکثر ارتفاع حوضه آبریز h_{max} حداقل ارتفاع حوضه آبریز h_{min}	شوم (۱۹۵۶)

در مرحله‌ی بعد، جهت تعیین وزن نسبی هر یک از پارامترهای هیدروژئومورفیک و اقلیمی مورد استفاده در تحقیق، از روش جدید وزن‌دهی MACBETH استفاده شد؛ سپس وزن هر یک از پارامترها برای اولویت‌بندی زیرحوضه‌ها از نظر حساسیت سیل‌خیزی مشخص گردید.

مدل MACBETH

مدل MACBETH یا اندازه‌گیری جذابیت توسط یک تکنیک ارزیابی مبتنی بر طبقه‌بندی یک رویکرد تحلیل تصمیم‌گیری چندمعیاره است که توسط بانا کاستا و همکاران در دهه ۱۹۹۰ معرفی شده است. مدل MACBETH مدلی تعاملی است که از قضاوت‌های طبقه‌بندی شده درباره روابط جبری بین پدیده‌ها استفاده می‌کند و مهم‌ترین امتیاز آن توانایی ایجاد مقیاس‌های عددی بر اساس مقایسه‌های کیفی است که از تفاوت در جذابیت‌های گزینه‌ها به دست می‌آید (دتونی^۳، ۱۹۹۶). این روش مبتنی بر مقایسات زوجی بوده و از مقیاس فاصله‌ای استفاده می‌کند. مراحل انجام این مدل به صورت زیر است:

گام اول: تعیین معیارها و گزینه‌های ارزیابی و ایجاد درخت ارزش^۴. مدل MACBETH مسئله را به صورت یک درخت یا یک سلسله‌مراتب ارائه می‌دهد.

1- Faniran
2- Singh and Singh

3- Detoni
4- value tree

گام دوم: قرار گرفتن گزینه‌ها و معیارها در ماتریس ارزیابی طبق اهمیت‌شان. در این مرحله ماتریس ارزیابی تشکیل شده و مقایسه زوجی معیارها و گزینه‌ها طبق مقیاس‌های معنایی و عددی (جدول ۲) انجام می‌گیرد (کاراند و چاکرابورتی^۱، ۲۰۱۳).

جدول (۲): مقیاس معنایی مدل MACBETH و اهمیت‌شان

Table (2): Semantic scales of the MACBETH model and their importance

مقیاس معنایی	مقیاس عددی	میزان اهمیت
هیچ	۰	عدم تفاوت بین گزینه‌ها
بسیار ضعیف	۱	یک گزینه جذابیت خیلی ضعیفی نسبت به دیگری دارد.
ضعیف	۲	یک گزینه دارای جذابیت ضعیفی نسبت به دیگری است.
متوسط	۳	یک گزینه دارای جذابیت متوسطی نسبت به دیگری است.
قوی	۴	یک گزینه دارای جذابیت قوی نسبت به دیگری است.
بسیار قوی	۵	یک گزینه دارای جذابیت خیلی قوی نسبت به دیگری است.
بی‌نهایت	۶	یک گزینه نسبت به دیگری کاملاً جذاب‌تر است.

گام سوم: در این مرحله قضاوت‌های کارشناسی که از مقایسه زوجی حاصل شده است وارد مقیاس MACBETH شده و مدل برنامه‌ریزی خطی با استفاده از رابطه‌های زیر اجرا می‌شود. در این مدل $V(X)$ امتیاز اختصاص داده شده به گزینه X است. X^+ نشان می‌دهد که حداقل به اندازه گزینه دیگر X جذاب است. X^- نیز نشان می‌دهد که به همان اندازه برای هر گزینه دیگری از X جذابیت دارد (بانا کاستا^۲ و همکاران، ۲۰۱۲).

$$\text{Min}[V(X^+) - V(X^-)]$$

$$V(X^-) = 0 \text{ (Arbitrary assignment)} \quad (۱)$$

$$\forall (X,Y) \in C_0: V(X) - V(Y) = 0 \quad (۲)$$

$$\forall (X,Y) \in C_i \cup \dots \cup C_s \text{ with } i,s \in \{1,2,3,4,5,6\} \text{ and } i \leq s: V(X) - V(Y) \geq I \quad (۳)$$

$$\forall (X,Y) \in C_i \cup \dots \cup C_s \text{ and } \forall (W,Z) \in C_{\hat{i}} \cup \dots \cup C_{\hat{s}} \quad (۴)$$

$$\text{With } i,s,\hat{i},\hat{s} \in \{1,2,3,4,5,6\}$$

$$i \leq s, \hat{i} \leq \hat{s} \text{ and } i > \hat{s}: V(X) - V(Y) \geq V(W) - V(Z) + i - \hat{s}$$

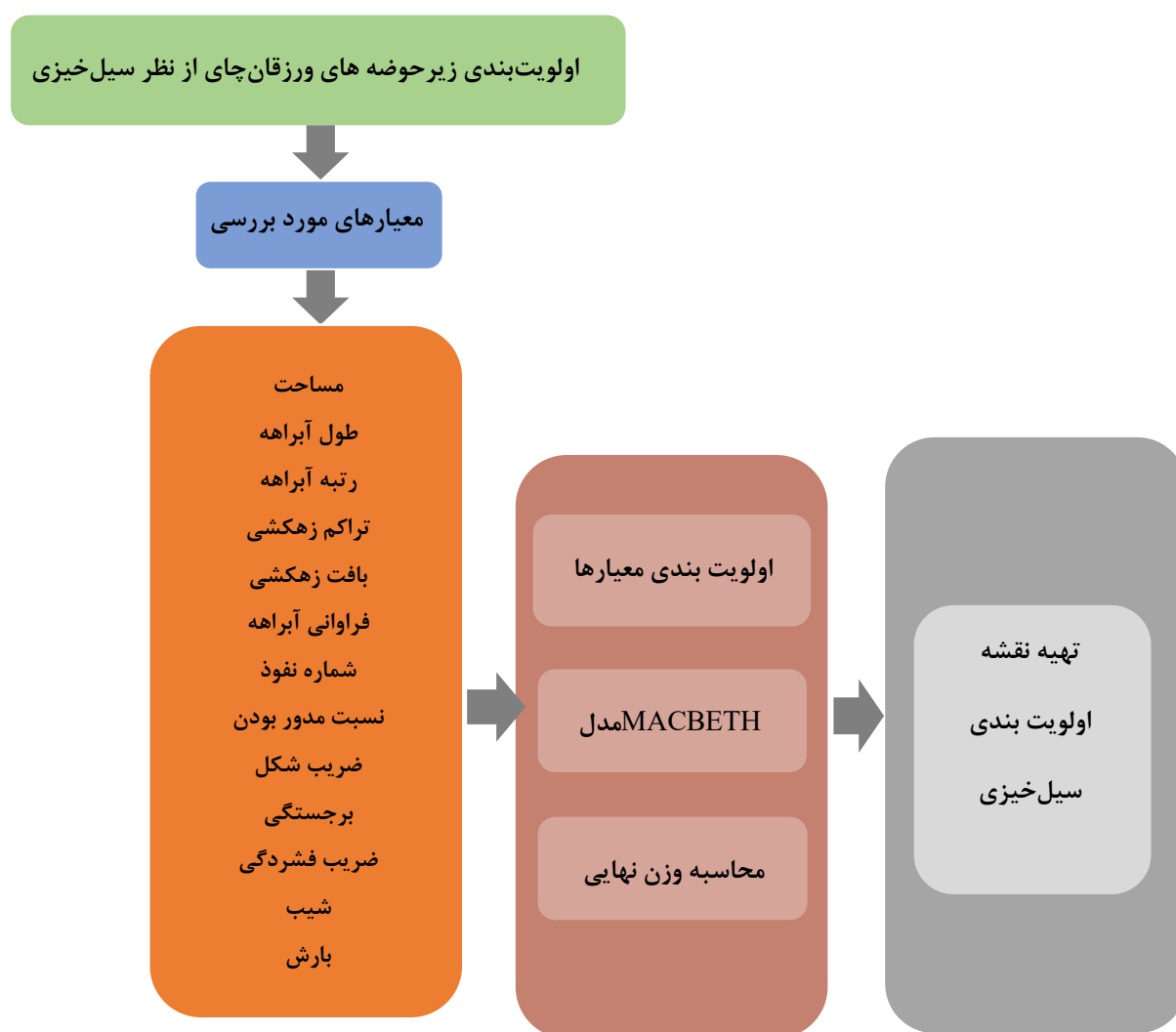
در صورتی که برنامه خطی به درستی اجرا نشود قضاوت‌ها ناسازگار خواهند بود. اگر برنامه اجرا شود نشان‌دهنده سازگاری قضاوت‌ها می‌باشد. در این موارد میانگین‌شان به عنوان مقیاس MACBETH در نظر گرفته می‌شود (بانا کاستا و همکاران، ۲۰۰۵).

گام چهارم: تعیین امتیاز کلی گزینه‌ها با استفاده از روابط زیر:

$$V(A_i) = \sum_{j=1}^n W_j (V_j) \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^n W_j = 1, \quad W_j > 0 \quad \text{and} \quad \begin{cases} V_j(A_i^{\text{upper reference level}}) = 100 \\ V_j(A_i^{\text{lower reference level}}) = 0 \end{cases} \quad (6)$$

که در آن W_j نشان دهنده وزن معیار j^{th} می باشد. در نهایت گزینه ها طبق مقادیر $V(A_i)$ به ترتیب نزولی، رتبه بندی می شوند که در آن مرجع بالا ۱۰۰ و مرجع پایین صفر می باشد (بانا کاستا و همکاران، ۲۰۰۵؛ کراند و چاکرابورتی، ۲۰۱۴). در این تحقیق از نرم افزار M-MACBETH جهت وزن دهی پارامترها با بر اساس مدل MACBETH استفاده شده است. روش انجام این مراحل در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۲: مراحل اولویت بندی زیرحوضه ها از نظر پتانسیل سیل خیزی با استفاده از مدل MACBETH
Figure 2: Steps for Prioritizing Sub-basins in Terms of Flood Potential Using the MACBETH Model

بحث و نتایج

تحلیل پارامترهای مورد استفاده در تحقیق

مساحت: مساحت حوضه آبریز یکی از پارامترهای تعیین کننده در ارزیابی سیل خیزی مناطق است. حوضه‌های با مساحت بزرگ‌تر به دلیل وجود تعداد بیشتری آبراهه، توانایی تولید رواناب بیشتری دارند (بیشتر و همکاران^۱، ۲۰۱۸). این ویژگی باعث می‌شود که احتمال وقوع سیل در این حوضه‌ها افزایش یابد. مدیریت صحیح منابع آب و برنامه‌ریزی برای کاهش خطرات سیل نیازمند توجه ویژه به مساحت حوضه است (اسمیت و وارد^۲، ۱۹۹۸). تحلیل دقیق این پارامتر می‌تواند به پیش‌بینی بهتر رفتار هیدرولوژیکی حوضه کمک کند. در حوضه آبریز ورزقان چای، زیر حوضه پنج، با مساحت ۱۳۰/۹ کیلومتر مربع بیشترین و زیر حوضه ۱۰ با مساحت ۴/۹ کیلومتر مربع، کمترین مساحت را دارند شکل (۳).

تعداد آبراهه: زیرحوضه‌هایی با تعداد آبراهه‌های بیشتر، به دلیل تراکم بالای شبکه زهکشی، پتانسیل بیشتری برای تولید رواناب و افزایش خطر سیل دارند. این موضوع به این دلیل است که تراکم آبراهه‌ها سرعت انتقال آب را افزایش داده و زمان تمرکز رواناب را کاهش می‌دهد. مطالعات هیدرولوژیکی نشان می‌دهند که ساختار و چیدمان آبراهه‌ها تأثیر مستقیمی بر پاسخ هیدرولوژیکی حوضه به بارش‌های شدید دارد (ساکر و لیتا^۳، ۲۰۲۵). زیرحوضه شماره ۵ با ۴۸۱ آبراهه، بیشترین تعداد آبراهه‌ها را در میان تمامی زیرحوضه‌ها به خود اختصاص داده است که بیانگر پتانسیل بالای آن در وقوع سیلاب است. در مقابل، زیرحوضه شماره ۸ با تنها ۱۵ آبراهه، کمترین تعداد را دارا بوده و در نتیجه، پتانسیل سیل خیزی آن پایین ارزیابی می‌شود شکل (۳).

رتبه آبراهه: رتبه آبراهه روشی استاندارد برای طبقه‌بندی سلسله‌مراتبی شبکه‌های رودخانه‌ای است که نخستین بار توسط (هورتن^۴، ۱۹۴۵) معرفی و سپس توسط (استرال^۵، ۱۹۵۲) اصلاح شد. در این روش، کوچک‌ترین جویبارهای بدون انشعاب، رتبه ۱ را دریافت می‌کنند و با اتصال دو آبراهه هم‌رتبه، رتبه‌ای بالاتر ایجاد می‌شود، در حالی که اتصال یک آبراهه با رتبه بالاتر به یک آبراهه با رتبه پایین‌تر، رتبه را تغییر نمی‌دهد (استرال^۶، ۱۹۵۲). بررسی رتبه آبراهه در زیرحوضه‌های منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد که زیرحوضه شماره ۱۱ با داشتن آبراهه رتبه ۵، بالاترین مقدار را در میان تمامی زیرحوضه‌ها داراست شکل (۳). که این امر بیانگر پتانسیل بالای آن از نظر سیل خیزی است. در مقابل، زیرحوضه‌های شماره ۸ و ۱۲ با آبراهه رتبه ۲، پایین‌ترین مقدار را نشان می‌دهند.

طول آبراهه: تحلیل طول آبراهه‌ها در مقیاس‌های مختلف می‌تواند برای شناسایی تفاوت‌های ساختاری حوضه‌ها، ارزیابی شدت فرسایش و پیش‌بینی رفتار هیدرولوژیک آنها به کار رود (گرگوری و والینگ^۷، ۱۹۷۳). در حوضه آبریز ورزقان چای، زیرحوضه شماره ۵ با طول ۲۲/۸ کیلومتر، بیشترین طول آبراهه را به خود اختصاص داده است. در مقابل، زیرحوضه شماره ۱۲ با طول ۴/۰۱ کیلومتر، کمترین مقدار را در میان سایر زیرحوضه‌ها دارد شکل (۳).

تراکم زهکشی: تراکم زهکشی در مدل‌سازی هیدرولوژیکی نقش مهمی دارد، زیرا بر شکل هیدروگراف، پاسخ به سیل و پتانسیل فرسایش تأثیر می‌گذارد، به طوری که حوضه‌های با تراکم بالا، جریان‌های اوج سریع‌تر و جریان پایه کمتری دارند (پاتون و بیکر^۸، ۱۹۷۶). بررسی نتایج محاسبه تراکم زهکشی زیرحوضه‌های منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد که زیرحوضه شماره ۸ با مقدار ۱/۹۶ بالاترین میزان این شاخص را دارا است و از نظر هیدرولوژیکی در طبقه‌بندی زیرحوضه‌های با پتانسیل بالای وقوع سیلاب قرار می‌گیرد. در مقابل، زیرحوضه شماره ۳ با مقدار ۱/۲ کمترین میزان تراکم زهکشی را داشته و از نظر این پارامتر، در گروه حوضه‌های با پتانسیل پایین‌تر وقوع سیلاب طبقه‌بندی می‌شود.

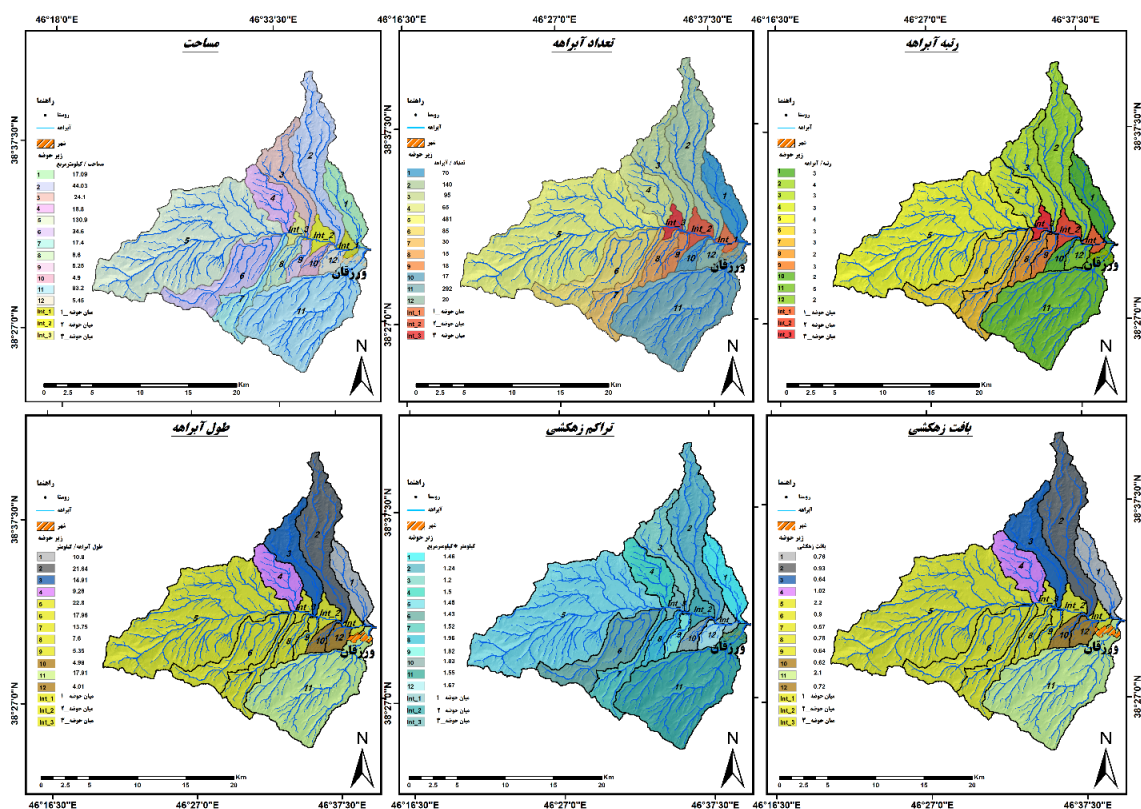
بافت زهکشی: بررسی بافت زهکشی می‌تواند اطلاعات ارزشمندی درباره تاریخچه تکامل ژئومورفولوژیک یک حوضه و حساسیت آن نسبت به فرسایش و سیلاب ارائه دهد. نتایج حاصل از اندازه‌گیری این پارامتر در زیرحوضه‌های منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد که زیرحوضه

1- Bisht et al
2- Smith & Ward
3- Sarker & Leta

4- Horton
5- Strahler
6- Strahler

7- Gregory & Walling
8- Patton & Baker

شماره ۵ با مقدار ۲/۲ بالاترین میزان را به خود اختصاص داده است، در حالی که زیرحوضه شماره ۷ با ۰/۵۷ کمترین مقدار را در میان تمامی زیرحوضه‌ها به خود اختصاص داده است.



شکل ۳: نقشه مساحت، تعداد آبراهه، رتبه آبراهه، طول آبراهه، تراکم زهکشی و بافت زهکشی در حوضه ورزقان چای

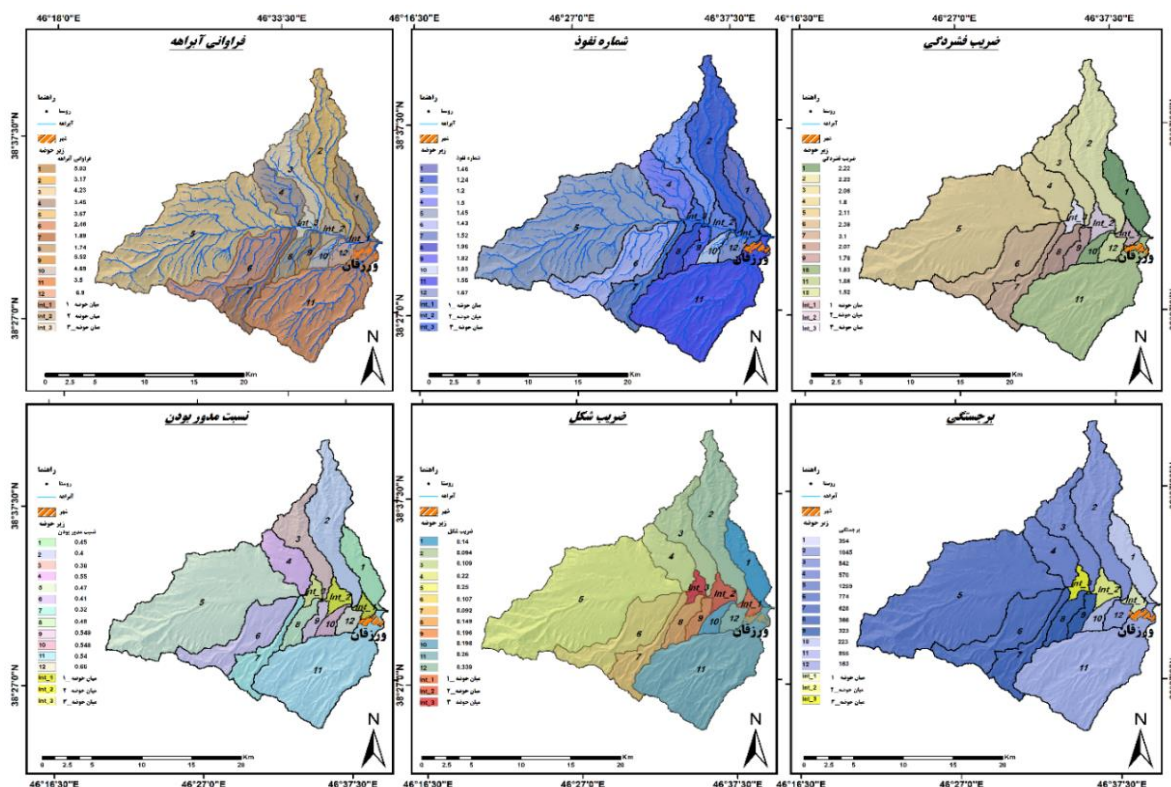
Figure 3: Maps of Area, Stream Number, Stream Order, Stream Length, Drainage Density, and Drainage Texture in the Varzeqan-Chai Watershed

فراوانی آبراهه: فراوانی آبراهه در تحلیل حوضه‌های آبریز برای پیش‌بینی سیل، مدیریت رواناب و ارزیابی پاسخ‌های هیدرولوژیکی به تغییرات محیطی، نقش کلیدی دارد (چورلی^۱، ۱۹۶۹). بررسی مقادیر این پارامتر در زیرحوضه‌های ورزقان چای نشان می‌دهد که دامنه تغییرات آن بین ۱/۷۴ تا ۶/۹۷ متغیر است، به گونه‌ای که بیشترین مقدار در زیرحوضه شماره ۱۲ مشاهده می‌شود و کمترین میزان تناوب آبراهه به زیرحوضه شماره ۱ اختصاص دارد.

شماره نفوذ: مقادیر بالای شماره نفوذ نشان‌دهنده خاک‌های با نفوذپذیری بالا و رواناب کمتر است، در حالی که مقادیر پایین به خاک‌های مترکام و رواناب بیشتر اشاره دارد (دان و لئوپولد^۲، ۱۹۷۸). این شاخص در مطالعات مورفومتریک حوضه‌های آبریز برای ارزیابی پاسخ هیدرولوژیکی و برنامه‌ریزی آبیاری استفاده می‌شود. در میان زیرحوضه‌های محدوده مورد مطالعه، زیرحوضه شماره ۸ با مقدار ۱/۹۶ بالاترین میزان شماره نفوذ را به خود اختصاص داده است، در حالی که زیرحوضه شماره ۳ با مقدار ۱/۲ کمترین مقدار را در بین تمامی زیرحوضه‌ها دارا می‌باشد.

ضریب فشردگی: این پارامتر در تحلیل پاسخ هیدرولوژیکی حوضه و برنامه ریزی منابع آب، مانند طراحی سیستم های زهکشی، استفاده می شود (ناگ^۱، ۱۹۹۸). نتایج محاسبه این شاخص برای زیرحوضه های ورزقان چای نشان می دهد که زیرحوضه شماره ۵ با ضریب ۲/۵۹ بیشترین مقدار را دارد، در حالی که زیرحوضه شماره ۱۲ با ضریب ۰/۹ کمترین مقدار را به خود اختصاص داده است نسبت مدور بودن: این پارامتر در کنار سایر شاخص های مورفومتریک، مانند ضریب فشردگی، به درک بهتر ویژگی های هیدرولوژیکی حوضه کمک می کند (سینگ و همکاران^۲، ۲۰۱۴). بررسی مقادیر این پارامتر در زیرحوضه های منطقه نشان می دهد که دامنه تغییرات آن بین ۰/۳۲ تا ۰/۶۶ متغیر بوده است؛ به طوری که زیرحوضه شماره ۷ کمترین مقدار و زیرحوضه شماره ۱۲ بیشترین مقدار را به خود اختصاص داده اند

ضریب شکل: این پارامتر می تواند برای پیش بینی رفتار هیدرولوژیکی حوضه در رویدادهای بارش و سیلاب مورد استفاده قرار گیرد. علاوه بر این، شناخت ضریب شکل به برنامه ریزان منابع آب کمک می کند تا الگوهای زهکشی و مدیریت سیلاب را بهینه سازی کنند. بررسی مقادیر این پارامتر در زیرحوضه های منطقه نشان می دهد که دامنه تغییرات آن بین ۰/۰۳ تا ۰/۰۶۵ متغیر است؛ به گونه ای که زیرحوضه شماره ۱۲ بیشترین مقدار و زیرحوضه شماره ۵ کمترین مقدار را به خود اختصاص داده اند برجستگی: حوضه هایی با نسبت برجستگی بزرگ تر، زمان تأخیر کمتر، اوج زیاد و سرعت جریان بیشتری را تجربه می کنند و از این رو حساسیت بیشتری نسبت به سیل دارند (ابوزید و همکاران^۳، ۲۰۱۶). در منطقه مورد مطالعه، بیشترین مقدار این پارامتر به زیرحوضه شماره ۵ با ارتفاع ۱۲۵۹ متر اختصاص دارد، در حالی که کمترین مقدار مربوط به زیرحوضه شماره ۱۲ با ارتفاع ۱۶۳ متر است. این اختلاف قابل توجه بیانگر تنوع توپوگرافی و تغییرات بارز در ویژگی های ژئومورفولوژیکی منطقه می باشد.

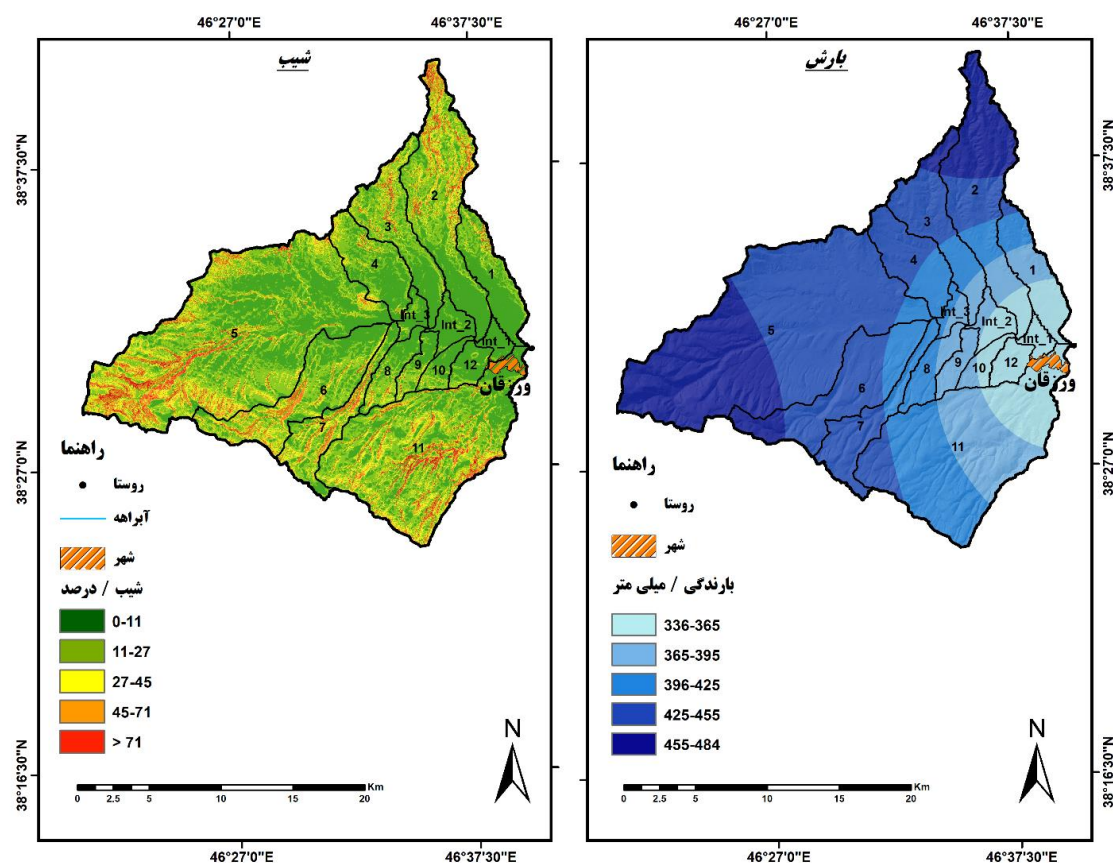


شکل ۴: نقشه فراوانی آبراهه، شماره نفوذ، ضریب فشردگی، نسبت مدور بودن، ضریب شکل و برجستگی در حوضه ورزقان چای

Figure 4: Maps of Stream Frequency, Infiltration Number, Compactness Coefficient, Circularity Ratio, Form Factor, and Relief in the Varzeqan-Chai Watershed

شیب: پارامتر شیب به عنوان یکی از عوامل مورفومتریک بنیادی، تأثیر چشمگیری بر فرآیندهای هیدرولوژیکی و خاک‌شناختی، شامل رواناب سطحی، نفوذ آب، شدت سیلاب و میزان فرسایش دارد (ممون و همکاران^۱، ۲۰۲۴). تحلیل نقشه شیب نشان می‌دهد که زیرحوضه‌های شماره ۵، ۲ و ۶ دارای شیب‌های نسبتاً تند هستند که این ویژگی بیانگر پتانسیل بالای آن‌ها در بروز سیل خیزی است. در مقابل، مقادیر کمتر پارامتر شیب عمدتاً در زیرحوضه‌های پایین دست منطقه مشاهده می‌شود. این توزیع مکانی شیب نه تنها بر سرعت رواناب و شدت فرسایش خاک اثرگذار است، بلکه می‌تواند الگوهای رسوب‌گذاری و پایداری سازه‌های هیدرولیکی را نیز تحت تأثیر قرار دهد و در برنامه‌ریزی مدیریت منابع آب و کنترل سیلاب اهمیت ویژه‌ای داشته باشد (شکل ۵).

بارش: بارش سالانه یکی از عوامل اقلیمی اساسی و غیرقابل انکار در شکل‌گیری رواناب در حوضه‌های آبریز محسوب می‌شود و حجم و شدت آن تأثیر مستقیمی بر وقوع سیلاب دارد (اوه و همکاران^۲، ۲۰۲۴). به منظور تهیه نقشه بارندگی منطقه، از داده‌های بارش سالانه ایستگاه‌های باران‌سنجی واقع در داخل حوضه آبریز و نواحی مجاور، شامل ایستگاه‌های ورزقان، اوپلق، افشرد و گمانج، استفاده شد. برای تبدیل داده‌های نقطه‌ای این ایستگاه‌ها به نقشه رستری، از روش درون‌یابی IDW بهره گرفته شد که به دلیل دقت بالاتر آن نسبت به سایر روش‌های درون‌یابی انتخاب گردید. نتایج حاصل از نقشه بارندگی نشان می‌دهد که زیرحوضه‌های شماره ۵، ۲ و ۶ در مقایسه با سایر زیرحوضه‌ها از مقادیر بالاتری از بارش سالانه برخوردار هستند (شکل ۵).



شکل ۵: نقشه شیب و بارندگی در حوضه ورزقان چای

Figure 5: Slope and Precipitation Maps of the Varzeqan-Chai Watershed

رتبه‌بندی پارامترها بر اساس اهمیت‌شان

پس از محاسبه مقادیر پارامترهای ژئومورفومتریکی مربوط به هر یک از زیرحوضه‌ها، فرآیند وزن‌دهی آن‌ها با بهره‌گیری از مدل MACBETH انجام شد. در گام نخست این روش، معیارها شناسایی و بر اساس میزان تأثیر آن‌ها بر حساسیت سیل‌خیزی، اولویت‌بندی گردیدند. جدول (۳) رتبه‌بندی پارامترها را برای هر یک از زیرحوضه‌ها متناسب با اهمیت آن‌ها نشان می‌دهد. این رویکرد امکان می‌دهد تا سهم نسبی هر پارامتر در بروز یا تشدید سیلاب مشخص شود و تصمیم‌گیری‌های مدیریتی دقیق‌تری اتخاذ گردد. نتایج وزن‌دهی به عنوان ورودی مراحل بعدی مدل‌سازی خطر سیلاب به کار گرفته شده و مبنای تهیه نقشه نهایی پهنه‌بندی خطر خواهد بود. علاوه بر این، مقایسه وزن‌ها می‌تواند نقش عوامل مورفومتریکی مختلف را در مناطق با شرایط مشابه روشن‌تر سازد.

جدول ۳: رتبه‌بندی پارامترها در حوضه آبریز ورزقان چای

Table 3: Ranking of Parameters in the Varzeqan-Chai Watershed

شماره زیر حوضه	۵	۱۱	۲	۶	۳	۴	۷	۱	۸	۱۲	۹	۱۰
مساحت / کیلومتر مربع	۱۳۰/۹	۸۳/۲	۴۴/۰۳	۳۴/۶	۲۴/۱	۱۸/۸	۱۷/۴	۱۷/۰۹	۸/۶	۵/۴۵	۵/۲۵	۴/۹
شماره زیر حوضه	۵	۱۱	۲	۳	۱	۶	۴	۱۲	۷	۹	۱۰	۸
تعداد آبراهه	۴۸۱	۲۹۲	۱۴۰	۱۰۲	۸۶	۸۵	۶۵	۳۸	۳۳	۲۹	۲۳	۱۵
شماره زیر حوضه	۵	۲	۶	۱۱	۳	۷	۱	۴	۸	۹	۱۰	۱۲
طول آبراهه	۲۲/۸	۲۱/۶۴	۱۷/۹۶	۱۷/۹۱	۱۴/۹۱	۱۳/۷۵	۱۰/۸	۹/۲۸	۷/۶	۵/۳۵	۴/۹۸	۴/۰۱
شماره زیر حوضه	۱۱	۲	۵	۱	۳	۴	۶	۷	۹	۸	۱۰	۱۲
رتبه	۵	۴	۴	۳	۳	۳	۳	۳	۳	۲	۲	۲
شماره زیر حوضه	۸	۱۰	۹	۱۲	۱۱	۷	۴	۱	۵	۶	۲	۳
تراکم زهکشی	۱/۹۶	۱/۸۳	۱/۸۲	۱/۶۷	۱/۵۵	۱/۵۲	۱/۵	۱/۴۶	۱/۴۵	۱/۴۳	۱/۲۴	۱/۲
شماره زیر حوضه	۵	۱۱	۴	۲	۶	۸	۱	۱۲	۳	۹	۱۰	۷
بافت زهکشی	۲/۲	۲/۱	۱/۰۲	۰/۹۳	۰/۹	۰/۷۸	۰/۷۶	۰/۷۲	۰/۶۴	۰/۶۴	۰/۶۲	۰/۵۷
شماره زیر حوضه	۸	۱۰	۹	۱۲	۱۱	۷	۴	۱	۵	۶	۲	۳
شماره نفوذ	۱/۹۶	۱/۸۳	۱/۸۲	۱/۶۷	۱/۵۵	۱/۵۲	۱/۵	۱/۴۶	۱/۴۵	۱/۴۳	۱/۲۴	۱/۲
شماره زیر حوضه	۵	۱۱	۲	۶	۷	۳	۱	۴	۸	۹	۱۰	۱۲
ضریب فشردگی	۲/۵۹	۲/۱۶	۲/۱۴	۱/۹۸	۱/۸۹	۱/۸	۱/۵۹	۱/۴۷	۱/۲۹	۱/۰۸	۱/۰۶	۰/۹
شماره زیر حوضه	۱۲	۴	۹	۱۰	۱۱	۸	۵	۱	۶	۲	۳	۷
نسبت مدور بودن	۰/۶۶	۰/۵۵	۰/۵۴۹	۰/۵۴۸	۰/۵۴	۰/۴۸	۰/۴۷	۰/۴۵	۰/۴۱	۰/۴	۰/۳۸	۰/۳۲
شماره زیر حوضه	۱۲	۱۰	۹	۸	۳	۱	۷	۴	۲	۶	۱۱	۵
ضریب شکل	۰/۰۶۵	۰/۰۶	۰/۰۵۶	۰/۰۳	۰/۰۲۸	۰/۰۲۷	۰/۰۲۴	۰/۰۲۳	۰/۰۱۴	۰/۰۱۴	۰/۰۰۴	۰/۰۰۳
شماره زیر حوضه	۵	۲	۱۱	۶	۷	۴	۳	۸	۱	۹	۱۰	۱۲
برجستگی / متر	۱۲۵۹	۱۰۴۵	۸۵۵	۷۷۴	۶۲۸	۵۷۰	۵۴۲	۳۶۶	۳۵۴	۳۲۳	۲۲۳	۱۶۳
شماره زیر حوضه	۱۲	۹	۱	۱۰	۳	۵	۱۱	۴	۲	۶	۷	۸
فراوانی آبراهه	۶/۹۷	۵/۵۲	۵/۰۳	۴/۶۹	۴/۲۳	۳/۶۷	۳/۵	۳/۴۵	۳/۱۷	۲/۴۵	۱/۸۹	۱/۷۴
شماره زیر حوضه	۵	۱۱	۷	۲	۶	۳	۴	۸	۹	۱	۱۰	۱۲
شیب / درصد	۲۴/۳	۲۳/۴	۲۲/۸۶	۲۲/۸	۲۰/۶	۱۷/۷	۱۴/۸	۱۴/۵	۱۳/۵	۱۱/۳۸	۹/۹	۷/۱۱
شماره زیر حوضه	۵	۲	۱۱	۷	۳	۸	۱	۴	۹	۶	۱۰	۱۲
بارش / میلی متر	۴۲۱/۱	۴۱۶/۶	۴۰۸	۴۰۲/۷	۳۹۰/۳	۳۷۱/۰۳	۳۶۵/۹	۳۶۳/۵۹	۳۶۱/۹	۳۶۰/۷	۳۵۲/۲	۳۴۲/۱

تحلیل نتایج مدل MACBETH

برای بررسی تأثیر پارامترهای هیدروژئومورفیک و اقلیمی بر میزان حساسیت سیل خیزی این حوضه، این پارامترها برای فرایند وزن‌دهی به نرم‌افزار M-MACBETH وارد شدند. در نخستین گام به‌منظور وزن‌دهی پارامترها، درخت ارزش طراحی می‌شود. درخت ارزش بر اساس پارامترهای به‌کاررفته در پژوهش در محیط نرم‌افزار ایجاد می‌گردد. با تشکیل درخت ارزش و تعیین معیارها، فرایند مقایسه زوجی بر اساس روش وزن‌دهی ارائه‌شده در جدول (۲) انجام شد. سپس نقش و میزان تأثیر هر پارامتر در زیرحوضه‌های ورزقان‌چای مشخص گردید جدول (۴).

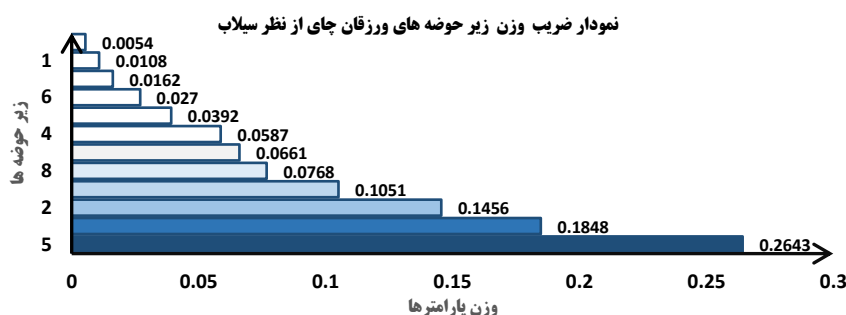
جدول ۴: میزان تأثیر هر پارامتر در زیرحوضه‌های ورزقان‌چای

Table 4: Influence of Each Parameter in the Sub-basins of the Varzeqan-Chai Watershed

وزن نسبی	بارش	شیب	فراوانی آبراهه	برجستگی	ضریب شکل	میلور بودن	ضریب فشردگی	شماره نفوذ	بافت زهکشی	تراکم زهکشی	رتبه آبراهه	طول آبراهه	تعداد آبراهه	مساحت	زیر حوضه
۲۴۰/۲	۱۴/۹۴	۳/۴۵	۵۱/۷۲	۶/۹	۱۸/۳۹	۱۱/۴۹	۱۴/۹۴	۱۱/۴۹	۱۴/۹۴	۱۱/۴۹	۳۳/۳۳	۱۴/۹۴	۲۵/۲۹	۶/۹	۱
۵۰۱/۷	۶۶/۶۷	۳۳/۳۳	۶/۹	۶۶/۶۷	۶/۹	۳/۴۵	۵۱/۷۲	۱/۱۵	۳۳/۳۳	۱/۱۵	۶۶/۶۷	۶۶/۶۷	۵۱/۷۲	۴۵/۴۵	۲
۲۳۵/۱	۲۵/۲۹	۱۸/۳۹	۲۵/۲۹	۱۴/۹۴	۲۵/۲۹	۱/۱۵	۱۸/۳۹	۰	۶/۹	۰	۲۵/۲۹	۲۵/۲۹	۳۳/۳۳	۱۵/۵۸	۳
۲۸۰/۱	۱۱/۴۹	۱۴/۹۴	۱۱/۴۹	۱۸/۳۹	۱۱/۴۹	۶۶/۶۷	۱۱/۴۹	۱۴/۹۴	۵۱/۷۲	۱۴/۹۴	۱۸/۳۹	۱۱/۴۹	۱۴/۹۴	۷/۷۹	۴
۸۹۸/۸	۱۰۰	۱۰۰	۱۸/۳۹	۱۰۰	۰	۱۴/۹۴	۱۰۰	۶/۹	۱۰۰	۶/۹	۵۱/۷۲	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۵
۲۵۱/۱	۳/۴۵	۲۵/۲۹	۳/۴۵	۳۳/۳۳	۳/۴۵	۶/۹	۳۳/۳۳	۳/۴۵	۲۵/۲۹	۳/۴۵	۱۴/۹۴	۵۱/۷۲	۱۸/۳۹	۲۴/۶۸	۶
۲۲۹/۱	۳۳/۳۳	۵۱/۷۲	۳۳/۳۳	۲۵/۲۹	۱۴/۹۴	۰	۲۵/۲۹	۱۸/۳۹	۰	۱۸/۳۹	۱۱/۴۹	۱۸/۳۹	۶/۹	۳/۹	۷
۳۳۵/۶	۱۸/۳۹	۱۱/۴۹	۰	۱۱/۴۹	۳۳/۳۳	۱۸/۳۹	۶/۹	۱۰۰	۱۸/۳۹	۱۰۰	۳/۴۵	۶/۹	۰	۶/۹	۸
۳۴۵/۹	۶/۹	۶/۹	۶/۹	۳/۴۵	۱۰۰	۵۱/۷۲	۳/۴۵	۵۱/۷۲	۳/۴۵	۵۱/۷۲	۶/۹	۳/۴۵	۳/۴۵	۱/۱۵	۹
۲۷۹/۳	۱/۱۵	۱/۱۵	۳۳/۳۳	۱/۱۵	۶۶/۶۷	۳۳/۳۳	۱/۱۵	۶۶/۶۷	۱/۱۵	۶۶/۶۷	۱/۱۵	۱/۱۵	۱/۱۵	۳/۴۵	۱۰
۶۵۷/۷	۵۱/۷۲	۶۶/۶۷	۱۴/۹۴	۵۱/۷۲	۱/۱۵	۲۵/۲۹	۶۶/۶۷	۲۵/۲۹	۶۶/۶۷	۲۵/۲۹	۱۰۰	۳۳/۳۳	۶۶/۶۷	۶۲/۳۴	۱۱
۳۵۶/۳	۰	۰	۶۹/۷	۰	۱۰۰	۱۰۰	۰	۳۳/۳۳	۱۱/۴۹	۳۳/۳۳	۰	۰	۱۱/۴۹	۰	۱۲

تعیین وزن نهایی پارامترها و اولویت‌بندی زیرحوضه

پس از تعیین میزان تأثیر هر یک از پارامترها در زیرحوضه‌های منطقه، وزن نهایی هر زیرحوضه بر اساس مجموع ۱۴ پارامتر به‌کاررفته در پژوهش محاسبه و زیرحوضه‌ها براین اساس اولویت‌بندی شدند. شکل (۶) وزن نهایی پارامترها را برای ۱۲ زیرحوضه مورد مطالعه نشان می‌دهد. نتایج نهایی وزن‌دهی پارامترها حاکی از آن است که زیرحوضه‌های شماره ۵ و ۱۱ و ۲ به ترتیب با ضرایب ۰/۲۶۴ و ۰/۱۸۴ و ۰/۱۴۵ بیشترین وزن را داشته و در نتیجه از بالاترین حساسیت سیل خیزی برخوردارند. در مقابل، زیرحوضه شماره ۷ با ضریب ۰/۰۵۴ کمترین وزن را به خود اختصاص داده و کمترین میزان حساسیت به سیل را نشان می‌دهد.

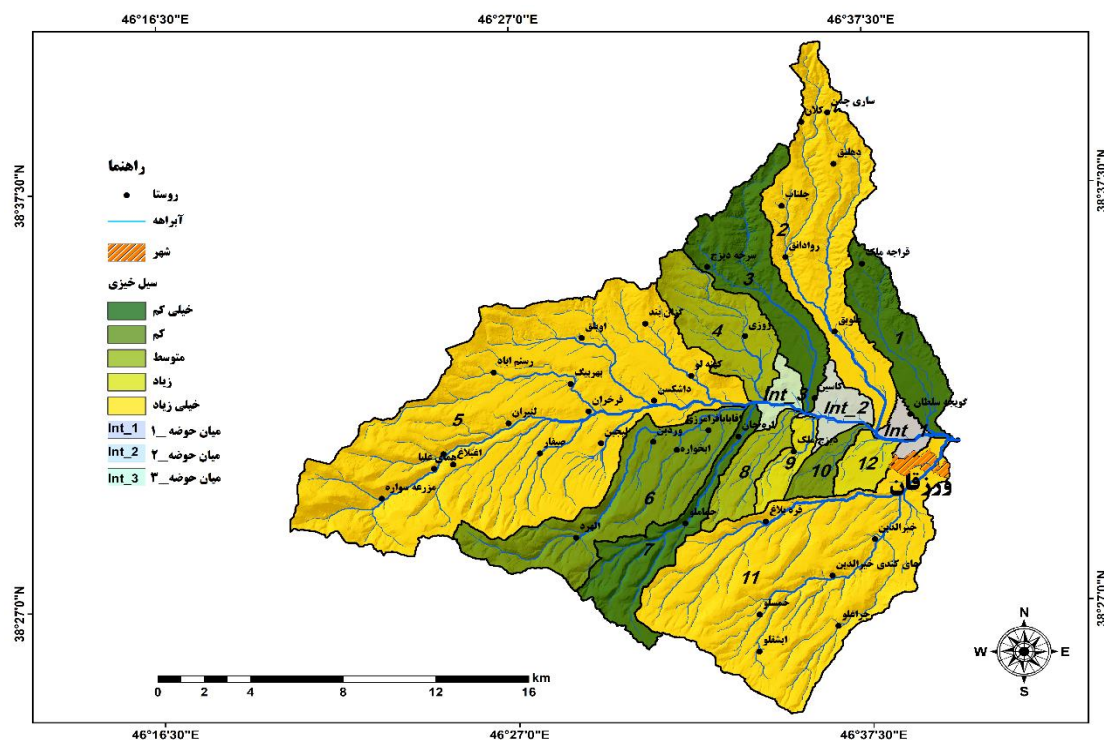


شکل ۶: نمودار ضریب وزن زیر حوضه‌های ورزقان‌چای از نظر سیلاب

Figure 6: Weight Coefficient Diagram of the Varzeqan-Chai Sub-basins in Terms of Flooding

تهیه نقشه اولویت بندی زیرحوضه ها از نظر حساسیت سیل خیزی

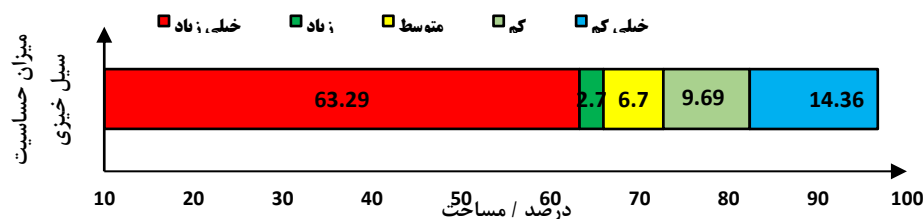
پس از تعیین وزن نهایی پارامترها، به منظور اولویت بندی زیرحوضه های ورزقان چای از نظر حساسیت به سیل خیزی، با اعمال اوزان به دست آمده بر هر یک از لایه ها، نقشه نهایی تهیه گردید شکل (۷). این نقشه علاوه بر نمایش میزان آسیب پذیری هر زیرحوضه، امکان شناسایی مناطق بحرانی را نیز فراهم می کند.



شکل ۷: نقشه اولویت بندی زیرحوضه ها از نظر حساسیت سیل خیزی ورزقان چای

Figure 7: Sub-basin Prioritization Map of Flood Susceptibility in the Varzeqan-Chai Watershed

همان گونه که مشاهده می شود، از مجموع ۱۲ زیرحوضه مورد بررسی، به ترتیب ۳ زیرحوضه در طبقه «خیلی زیاد»، ۲ زیرحوضه در طبقه «زیاد»، ۲ زیرحوضه در طبقه «متوسط»، ۲ زیرحوضه در طبقه «کم» و ۳ زیرحوضه در طبقه «خیلی کم» از نظر حساسیت به سیل خیزی قرار دارند. یافته های مکانی نشان می دهد که در حدود ۲۶۸/۸۳ کیلومترمربع از سطح حوضه در طبقات «زیاد» و «خیلی زیاد» قرار گرفته است که معادل ۶۶ درصد کل مساحت حوضه می باشد. همچنین، ۲۷/۴ کیلومتر مربع از اراضی حوضه در طبقه «متوسط» قرار دارد که برابر با ۶/۷ درصد مساحت کل حوضه است. در مقابل، حدود ۹۸/۰۹ کیلومترمربع در طبقات «کم» و «خیلی کم» واقع شده که در مجموع ۲۴/۰۶ درصد منطقه مورد مطالعه را شامل می شود شکل (۸).



شکل ۸: درصد مساحت پهنه های حساس به سیل خیزی در ورزقان چای

Figure 8: Percentage of Area Classified as Flood-Prone Zones in the Varzeqan-Chai Watershed

نتایج به دست آمده بیانگر آن است که بخش قابل توجهی از اراضی حوضه آبریز ورزقان چای در محدوده‌ای با پتانسیل بالای وقوع سیلاب قرار دارد. تمرکز ۶۶ درصد از مساحت حوضه در طبقات «زیاد» و «خیلی زیاد» نشان دهنده آن است که این حوضه از نظر مخاطرات هیدرولوژیکی در وضعیت نسبتاً بحرانی قرار دارد. این امر می‌تواند ناشی از عوامل متعددی همچون شیب تند اراضی، تراکم بالای زهکشی، کاربری‌های ناپایدار اراضی و یا کمبود پوشش گیاهی در برخی زیرحوضه‌ها باشد. در مقابل، سهم طبقات «کم» و «خیلی کم» که ۲۴/۰۶ درصد از مساحت کل حوضه را شامل می‌شوند، نشان می‌دهد که بخش‌های محدودی از حوضه دارای شرایط نسبتاً ایمن‌تری در برابر خطر سیلاب هستند. این مناطق می‌توانند به عنوان پهنه‌های کم‌خطر برای توسعه‌های آتی در نظر گرفته شوند، به شرط آنکه تغییرات کاربری اراضی و فعالیت‌های انسانی سبب تغییر در شرایط هیدرولوژیکی آن‌ها نشود. از سوی دیگر، قرارگیری تنها ۶/۷ درصد از مساحت حوضه در طبقه «متوسط» نشان می‌دهد که توزیع حساسیت به سیل در این حوضه نسبتاً قطبی بوده و بیشتر اراضی در دو سوی طیف خطر (خیلی زیاد-خیلی کم) قرار گرفته‌اند.

نتیجه گیری

در تحقیق حاضر تلاش شد تا نقش شاخص‌های هیدروژئومورفیک و اقلیمی در حساسیت سیل‌خیزی زیرحوضه‌های حوضه آبریز ورزقان چای مورد بررسی قرار گیرد. جهت بررسی زیرحوضه‌ها از ۱۴ پارامتر هیدروژئومورفیک و اقلیمی، استفاده شد. نتایج وزن‌دهی پارامترها برای زیرحوضه‌های مورد مطالعه نشان داد که زیرحوضه‌های شماره ۵، ۱۱ و ۲ به ترتیب با ضرایب ۰/۲۶۴، ۰/۱۸۴ و ۰/۱۴۵ بیشترین حساسیت سیل‌خیزی را دارا هستند، در حالی که زیرحوضه شماره ۷ با ضریب ۰/۰۵۴ کمترین حساسیت به سیل را نشان می‌دهد. از مجموع ۱۲ زیرحوضه مورد بررسی، ۳ زیرحوضه در طبقه «خیلی زیاد»، ۲ زیرحوضه در طبقه «زیاد»، ۲ زیرحوضه در طبقه «متوسط»، ۲ زیرحوضه در طبقه «کم» و ۳ زیرحوضه در طبقه «خیلی کم» از نظر حساسیت به سیل‌خیزی قرار دارند. نتایج پهنه‌بندی حاکی از آن است که حدود ۶۶ درصد از سطح حوضه در طبقات «زیاد» و «خیلی زیاد»، حدود ۶/۷ درصد در طبقه «متوسط» و حدود ۲۴/۰۶ درصد در طبقات «کم» و «خیلی کم» قرار می‌گیرد. این توزیع بیانگر غالب بودن پهنه‌های با خطر بالا در منطقه و ضرورت توجه ویژه به مدیریت سیلاب در بخش‌های بسیار حساس حوضه است. به طور کلی، الگوی فضایی سیل‌خیزی در حوضه مورد مطالعه نشان می‌دهد که بخش قابل توجهی از اراضی در معرض مخاطرات هیدرولوژیک قرار دارد و ضرورت اتخاذ راهبردهای پیشگیرانه نظیر بهبود پوشش گیاهی، کنترل فرسایش و بهینه‌سازی سامانه‌های آبخیزداری را برجسته می‌سازد. علاوه بر این، توزیع نامتوازن حساسیت در زیرحوضه‌ها می‌تواند در اولویت‌بندی اقدامات مدیریتی و تخصیص منابع نقش مؤثری ایفا کند. بررسی نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که یافته‌ها با نتایج تحقیقات پیشین، از جمله مطالعات رضایی‌مقدم و همکاران (۱۳۹۹) در حوضه الندچای، باویل و همکاران (۱۴۰۴)، پرساد و پانی^۱ (۲۰۱۷) در حوضه آبریز رودخانه یوهی در هند، و همچنین پژوهش‌های محمود و رحمان (۲۰۱۹) در حوضه‌های آبریز پنجکورا و یوشایری واقع در شرق هندوکش، همخوانی دارد. در تمامی این مطالعات، استفاده از ویژگی‌های ژئومورفومتریک حوضه‌های آبریز و رتبه‌بندی آن‌ها بر اساس میزان اثرگذاری بر پتانسیل سیل‌خیزی، به عنوان رویکردی کارآمد در تهیه نقشه‌های حساسیت سیلاب معرفی شده است. نتایج پژوهش حاضر نیز این کارآمدی را تأیید می‌کند. علاوه بر این، در مطالعه حاضر از مدل MACBETH برای وزن‌دهی شاخص‌ها و اولویت‌بندی زیرحوضه‌ها بهره گرفته شد؛ مدلی که پیش از این در ارزیابی سیلاب و رتبه‌بندی حوضه‌ها در داخل کشور به کار نرفته بود. از این رو، استفاده از این مدل به همراه ترکیب آن با پارامترهای هیدروژئومورفیک، پژوهش حاضر را از نظر روش‌شناختی متمایز و دارای جنبه‌های نوآورانه می‌سازد. در نهایت می‌توان نتیجه گرفت که به کارگیری این چارچوب تحلیلی نه تنها امکان شناسایی

دقیق تر مناطق مستعد سیلاب را فراهم می آورد، بلکه می تواند به عنوان الگویی قابل تعمیم برای مدیریت ریسک سیلاب در سایر حوضه های آبریز کشور نیز مورد استفاده قرار گیرد.

References

- Akbari Babil, A., Erfanian, M., & Beigi Heydarloo, H. (2025). Prioritizing Anjard sub-basins using principal component analysis based on morphometric parameters. *Hydrogeomorphology*, 12(44), 18–35. <https://doi.org/10.22034/hyd.2025.65404.1773>.
- Akrami Moghadam, B., Ilkhani Pourzinali, R., & Nik Mehr, S. (2014). Zoning of flood potential using the analytic hierarchy process in Kurdistan Province. *Journal of Environment and Water Engineering*, 10(1), 55–68.
- Aksoy, H., Kirca, V. S. O., Burgan, H. I., & Kellecioglu, D. (2016). Hydrological and hydraulic models for determination of flood-prone and flood inundation areas. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 373, 137–141. <https://doi.org/10.5194/piahs-373-137-2016>.
- Alam, A., Ahmed, B., & Sammonds, P. (2021). Flash flood susceptibility assessment using the parameters of drainage basin morphometry in SE Bangladesh. *Quaternary International*, 575, 295–307. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2020.11.039>.
- Alizadeh, A. (2006). *Principles of applied hydrology* (26th ed.). Imam Reza University Press.
- Azami Babani, B., Momipour, M., & Azari, A. (2018). Flood prioritization of hydrological units: Case study Pol Shah watershed. *Geography and Development*, 16(53), 69–84. <https://doi.org/10.22111/gaij.2018.4157>.
- Bana e Costa, C. A., De Corte, J. M., & Vansnick, J. C. (2005). On the mathematical foundations of MACBETH. In J. Figueira, S. Greco, & M. Ehrgott (Eds.), *Multiple criteria decision analysis: State of the art surveys* (pp. 409–437). Springer.
- Bana e Costa, C. A., De Corte, J. M., & Vansnick, J. C. (2012). MACBETH. *International Journal of Information Technology & Decision Making*, 11(2), 359–387. <https://doi.org/10.1142/S0219622012400068>.
- Bana e Costa, C. A., & Vansnick, J. C. (1994). MACBETH—An interactive path towards the construction of cardinal value functions. *International Transactions in Operational Research*, 1(4), 489–500. <https://doi.org/10.1111/j.1475-3995.1994.tb00075.x>.
- Bisht, S., Chaudhry, S., Sharma, S., & Soni, S. (2018). Assessment of flash flood vulnerability zonation through geospatial technique in high altitude Himalayan watershed, Himachal Pradesh, India. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 12, 35–47. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2018.08.001>.
- Chorley, R. J. (1969). *Introduction to fluvial processes*. Methuen.
- Chowdary, V. M., Chakraborty, D., Jeyaram, A., Murthy, Y. K., Sharma, J. R., & Dadhwal, V. K. (2013). Multi-criteria decision making approach for watershed prioritization using analytic hierarchy process technique and GIS. *Water Resources Management*, 27(10), 3555–3571. <https://doi.org/10.1007/s11269-013-0365-6>.
- Das, S. (2018). Geomorphic characteristics of a bedrock river inferred from drainage quantification, longitudinal profile, knickzone identification and concavity analysis: A DEM-based study. *Arabian Journal of Geosciences*, 11(21), Article 680-695. <https://doi.org/10.1007/s12517-018-4039-8>.
- Detoni, M. (1996). *Application of multi-criteria methodology for decision support in defining features construction projects* [Master's thesis, Federal University of Santa Catarina]. Florianópolis, Brazil.

- Doocy, S., Daniels, A., Packer, C., Dick, A., & Kirsch, T. D. (2013). The human impact of earthquakes: A historical review of events 1980–2009 and systematic literature review. *PLoS Currents Disasters*, 15–26. <https://doi.org/10.1371/currents.dis.67bd0a30b8032c5f00b9104f3bc99b5>.
- Dunne, T., & Leopold, L. B. (1978). *Water in environmental planning*. W. H. Freeman.
- Faramarzi, H., Hosseini, S. M., Pourghasemi, H. R., & Farnaghi, M. (2019). Assessment and zoning of flood risk in Golestan National Park. *Journal of Ecohydrology*, 6(4), 1055–1068.
- Gharib, M., Motamed Vaziri, B., & Ahmadi, H. (2018). A method for determining flood-prone areas based on the relationship between flood index and morphometric parameters. *Soil and Water Resources Conservation*, 7(4), 87–101.
- Gregory, K. J., & Walling, D. E. (1973). *Drainage basin form and process: A geomorphological approach*. Edward Arnold.
- Guhathakurta, P., Sreejith, O. P., & Menon, P. A. (2011). Impact of climate change on extreme rainfall events and flood risk in India. *Journal of Earth System Science*, 120(3), 359–373. <https://doi.org/10.1007/s12040-011-0084-5>.
- Hejazi, S. A., & Lohmannia, K. (2013). Temporal and spatial zoning of flood risk in the Karganroud watershed using the AWBM model and the Fuzzy-ANP method. *Quarterly Journal of Physical Geography Research*, 45(3), 83–102.
- Horton, R. E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geological Society of America Bulletin*, 56(3), 275–370. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1945\)56\[275:EDOSAT\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1945)56[275:EDOSAT]2.0.CO;2).
- Islam, A. R. M. T., Talukdar, S., Mahato, S., Kundu, S., Eibek, K. U., Pham, Q. B., ... & Linh, N. T. T. (2021). Flood susceptibility modelling using advanced ensemble machine learning models. *Geoscience Frontiers*, 12(3), Article 101075. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2020.10.013>.
- Karande, P., & Chakraborty, S. (2013). Using MACBETH method for supplier selection in manufacturing environment. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 4(2), 259–272. <https://doi.org/10.5267/j.ijiec.2013.01.002>.
- Karande, P., & Chakraborty, S. (2014). A facility layout selection model using MACBETH method [Paper presentation]. 2014 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, Bali, Indonesia.
- Mahmood, Sh., & Rahman, A. (2019). Flash flood susceptibility modeling using geomorphometric and hydrological approaches in Panjkora Basin, Eastern Hindu Kush, Pakistan. *Environmental Earth Sciences*, 78(1), Article 43. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-8041-y>.
- Mahmoudzadeh, H., Yari, F., & Vahedi, A. (2017). Application of remote sensing and GIS techniques for flood risk classification in Urmia city using a multi-criteria analysis approach. *Physical Geography Research Quarterly*, 49(3), 719–730.
- Mohammadi, A., Gemini, D., & Atash Bahar, R. (2025). Identification and analysis of flood-prone areas in the informal settlement of Naysar, Sanandaj city. *Journal of Urban Planning and Development*, 5(17), 45–60.
- Nag, S. K. (1998). Morphometric analysis using remote sensing techniques in the Chaka sub-basin, Purulia district, West Bengal. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 26(1–2), 69–76. <https://doi.org/10.1007/BF03007335>.
- Natarajan, S., & Radhakrishnan, N. (2020). An integrated hydrologic and hydraulic flood modeling study for a medium-sized ungauged urban catchment area: A case study of Tiruchirappalli city using HEC-HMS

- and HEC-RAS. *Journal of the Institution of Engineers (India): Series A*, 101(2), 381–398. <https://doi.org/10.1007/s40030-020-00441-5>.
- Negahban, S., & Marhamat, M. (2024). Flood hazard zoning in the urban watershed of Jahrom using the MaxEnt machine learning algorithm. *Hydrogeomorphology*, 11(41), 26–47. <https://doi.org/10.22034/hyd.2024.62069.1742>.
- Obeidat, M., Awawdeh, M., & Al-Hantouli, F. (2021). Morphometric analysis and prioritisation of watersheds for flood risk management in Wadi Easal Basin (WEB), Jordan, using geospatial technologies. *Journal of Flood Risk Management*, 14(2), Article e12711. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12711>.
- Pathan, A. I., Agnihotri, P. G., Said, S., & Patel, D. (2022). AHP and TOPSIS based flood risk assessment—A case study of the Navsari City, Gujarat, India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194(7), Article 509. <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10170-9>.
- Patton, P. C., & Baker, V. R. (1976). Morphometry and floods in small drainage basins subject to diverse hydrogeomorphic controls. *Water Resources Research*, 12(5), 941–952. <https://doi.org/10.1029/WR012i005p00941>.
- Prasad, R. N., & Pani, P. (2017). Geo-hydrological analysis and sub watershed prioritization for flash flood risk using weighted sum model and Snyder's synthetic unit hydrograph. *Modeling Earth Systems and Environment*, 3(4), 1491–1502.
- Qanavati, E., Karam, A., & Aghaalikhani, M. (2012). Assessment and zoning of flood risk in Farahzad Basin (Tehran) using fuzzy model. *Geography and Environmental Planning*, 23(4), 121–138.
- Rahimpour, T. (2017). *Analysis of spatial changes in flood and soil erosion risk sensitivity based on hydrogeomorphic approaches (Case study: Alandchai watershed, northwest Iran)* [Doctoral dissertation, University of Tabriz]. Tabriz, Iran.
- Rajabi, M., Roustaei, Sh., & Barzekar, M. (2012). Measuring the flood potential of sub-basins based on morphometric parameters and correlation test (Case study: Zab to Mirabad watershed). *Geography and Planning*, 26(79), 155–178.
- Razavi, A. (2008). *Principles of determining water resources privileges* (1st ed.). Water and Electricity Industry University Press.
- Rezaei Moghaddam, M. H., Hejazi, S. A., Valizadeh Kamran, Kh., & Rahimpour, T. (2019). Analyzing the hydrogeomorphic characteristics of the Alandchai watershed in order to prioritize sub-basins in terms of flood susceptibility. *Geography and Environmental Hazards*, 9(1), 61–83. <https://doi.org/10.22067/geo.v9i1.84675>.
- Roustaei, Sh., Mousavi, R., & Alizadeh Gorji, Gh. (2017). Preparing a flood map of the Nekarood watershed using the SCS-CN and GIS/RS models. *Quantitative Geomorphological Research*, 6(1), 108–118.
- Saeedi, A. (2021). Zoning of flood risk in Fariman County using fuzzy logic. *Human Settlement Planning Studies*, 16(3), 567–582.
- Sarai, B., Talebi, A., Mazedi, A., & Parvizi, S. (2019). Prioritization of the Sardabrood River Basin in terms of flooding using the SWAT model. *Natural Environmental Hazards*, 9(23), 85–98.
- Sarker, S., & Leta, O. T. (2025). Review of watershed hydrology and mathematical models. *Eng*, 6(6), 129. <https://doi.org/10.3390/eng6060129>.
- Singh, P., Gupta, A., & Singh, M. (2014). Hydrological inferences from watershed analysis for water resource management using remote sensing and GIS techniques. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, 17(2), 111–121. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2014.02.001>.
- Smith, K., & Ward, R. (1998). *Floods: Physical processes and human impacts*. Wiley.
- Strahler, A. N. (1952). Hypsometric (area–altitude) analysis of erosional topography. *Geological Society of America Bulletin*, 63(11), 1117–1142.

[https://doi.org/10.1130/0016_7606\(1952\)63\[1117:HAAOET\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016_7606(1952)63[1117:HAAOET]2.0.CO;2).

Termeh, S. V. R., Kornejady, A., Pourghasemi, H. R., & Keesstra, S. (2018). Flood susceptibility mapping using novel ensembles of adaptive neuro fuzzy inference system and metaheuristic algorithms. *Science of the Total Environment*, 615, 438–451. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.262>.

Víg, B., Fábian, S. Á., Czigány, S., Pirkhoffer, E., Halmai, Á., Kovács, I. P., ... & Lóczy, D. (2022). Morphometric analysis of low mountains for mapping flash flood susceptibility in headwaters. *Natural Hazards*, 114(3), 3235–3254. <https://doi.org/10.1007/s11069-022-05507-5>.

Wahba, M., Essam, R., El-Rawy, M., Al-Arifi, N., Abdalla, F., & Elsadek, W. M. (2024). Forecasting of flash flood susceptibility mapping using random forest regression model and geographic information systems. *Heliyon*, 10(13), Article e33456. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e33456>.

Wang, L., Cui, Sh., Tang, J., Fang, L., Fang, X., Shrestha, S., Manandhar, B., Huang, J., & Nitivattananon, V. (2023). Riverine flood risk assessment with a combined model chain in Southeastern China. *Ecological Indicators*, 154, Article 185-198. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110789>.

Zali, M., Soleimani, K., Habibnejad Roshan, M., & Miriaghoubzadeh, M. H. (2012). Comparison and prioritization of flooding in Nekarud sub-basins using morphometric method in geographic information system. *Journal of Watershed Management Research*, 3(5), 45–60.