



## Application of Shannon Entropy and Evidential Belief Function Models in Identifying Flood-Prone Areas Using a Spatial Integration and Statistical Comparison Approach (Kela Rud Watershed, Babol, Mazandaran Province)

Seyyed Asadollah Hejazi <sup>1</sup> | Masoumeh Rajabi <sup>2</sup> | Sabikeh Rouhani Zadeh <sup>3</sup>

1. Department of Geomorphology, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

E-mail: [s.hejazi@tabrizu.ac.ir](mailto:s.hejazi@tabrizu.ac.ir)

2. Department of Geomorphology, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

E-mail: [Mrjajabi@tabrizu.ac.ir](mailto:Mrjajabi@tabrizu.ac.ir)

3. Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran. E-mail: [sabikeruhani@gmail.com](mailto:sabikeruhani@gmail.com)

### Article Info

### ABSTRACT

**Article type:** Research Article

**Article history:**

**Received:** Nov. 9, 2025

**Revised:** Dec. 24, 2026

**Accepted:** Jan. 31, 2026

**Published online:** March, 2026

**Keywords:**

**Flood,**

**Shannon Entropy,**

**Evidential Belief Function**

**(EBF),**

**Statistical Comparison**

The present study aims to identify flood prone areas and evaluate the performance of two statistical models—Shannon Entropy and Evidential Belief Function (EBF)—for flood hazard zoning in the Kela Rud watershed, Babol County, Mazandaran Province (northern Iran). To achieve this objective, a spatial integration approach in the GIS environment was employed using data derived from nine influential factors, including elevation, slope, aspect, land use, soil type, distance from rivers, distance from roads, drainage density, and the topographic wetness index (TWI). Base information was extracted from digital elevation data (DEM, 30 m), thematic maps, and Sentinel 2 satellite imagery (2023). The Shannon Entropy model, based on the probabilistic information of flood occurrence within each spatial class, calculated the informational weights of the factors. The results indicated that elevation (0.1983), aspect (0.1517), and slope (0.1423) have the greatest impact on flood occurrence. In the Evidential Belief Function (EBF) model, by computing the indices of Belief (Bel), Disbelief (Dis), and Uncertainty (Unc), the spatial distribution of flood probability was reconstructed more accurately. Statistical comparison of model performance based on AUC, RMSE, indices showed that the EBF model (AUC = 0.83, RMSE = 0.214) has higher accuracy than the Shannon Entropy model (AUC = 0.71, RMSE = 0.293) in predicting flood susceptible zones. Areas with elevations between 700–1300 m and slopes of 30–45°, mainly within villages such as Shiadeh, Anjilak, and Lamsukola, fall into the very high flood hazard class. Based on these findings, the EBF model, owing to its capability in handling uncertain data and systematically integrating spatial evidence, exhibits greater accuracy and stability in analyzing the complex hydrological systems of northern Iran. The results of this research can serve as a scientific basis for watershed management planning, flood risk monitoring, and sustainable land management in similar forested basins.

Cite this article: Hejazi, S. A., Rajabi, M., Rouhani Zadeh, S., (2026) Application of Shannon Entropy and Evidential Belief Function Models in Identifying Flood Prone Areas Using a Spatial Integration and Statistical Comparison Approach (Kela Rud Watershed, Babol, Mazandaran Province), *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 57 (1),69-84. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.405784.670046>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.



DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.405784.670046>

## EXTENDED ABSTRACT

### Introduction

Floods are among the most destructive natural hazards, posing severe threats to lives, infrastructure, and ecosystems—particularly in northern Iran's humid forested catchments. The Kela Rud watershed in Babol County, Mazandaran Province, frequently experiences flash floods triggered by steep slopes, intense rainfall, and extensive land-use modification. In this context, accurate spatial prediction of flood-prone areas is critical for sustainable watershed management. This study integrates Geographic Information System (GIS)-based spatial modeling with two probabilistic approaches—the Shannon Entropy (SE) and Evidential Belief Function (EBF) models—to identify and compare the efficiency of both methods in delineating flood-hazard zones under complex topographic and hydrological conditions of the Hyrcanian forest region.

### Method

The research adopted a quantitative, descriptive–analytical approach based on spatial integration. A combination of remote sensing, topographic, climatic, and soil datasets was used to characterize the watershed. The modeling framework involved the extraction of nine flood-conditioning factors: elevation, slope, aspect, land use, soil type, distance from rivers, distance from roads, drainage density, and the topographic wetness index (TWI). Elevation and terrain derivatives were extracted from the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) DEM with a 30-m resolution, while land-use and vegetation cover were derived from Sentinel-2 imagery (2023) processed using the SNAP Toolbox and ArcGIS 10.8. Climatic data including annual precipitation (2011–2023) were obtained from synoptic and rain-gauge stations in Babol, Bandpey, and Sangchal. Soil and geological layers were acquired from the Natural Resources and Watershed Organization (2019). The SE model calculated information weights for each factor using the entropy value of their class-based flood frequency; EBF, based on the Dempster–Shafer theory, used belief (Bel), disbelief (Dis), and uncertainty (Unc) functions to generate the evidential flood probability surface.

### Sampling Procedures (Sample Size, Power, and Precision)

To construct and validate the models, 175 spatial points were identified, including 70 flood-occurrence points (training samples) and 105 non-flood points (validation samples). These were derived from historical flood records, field reports, and Google Earth Pro time-series interpretation over the period 2012–2023. The sample distribution was designed to maintain spatial representativeness across physiographic units—mountain, hill, and terrace zones. The power and precision of the models were evaluated using Receiver Operating Characteristic (ROC) curves and the Area Under the Curve (AUC) index, supported by Root Mean Square Error (RMSE) statistics to measure predictive accuracy and model error. This dual validation process ensured unbiased comparison and cross-validation performance assessment.

### Mixed Methods Research

Although the research is predominantly quantitative, a mixed-methods framework was applied by integrating numerical modeling with interpretive spatial analysis. Quantitative components included probabilistic computations and statistical weight assignment in SE and EBF, while qualitative interpretation drew on geomorphological expertise and visual inspection of land-use dynamics from high-resolution imagery. This hybrid integration allowed the research to not only predict flood susceptibility statistically but also interpret the environmental logic behind spatial patterns. The combination of empirical evidence and expert reasoning enhanced both analytical depth and contextual reliability.

### Results

The EBF model outperformed the SE model in both prediction precision and spatial realism. Statistical validation yielded  $AUC = 0.83$  and  $RMSE = 0.219$  for EBF, compared with  $AUC = 0.71$  and  $RMSE = 0.293$  for SE. Factor-weight comparison revealed that elevation (0.1983), aspect (0.1517), and slope (0.1423) were the dominant drivers of flood susceptibility, contributing nearly 49% of model variance. Moderate influences were found for land use, soil, and proximity to roads ( $\approx 29\%$ ), whereas drainage density, river distance, and TWI accounted for only  $\approx 22\%$ . Spatially, high-risk zones with elevations of 700–1300 m and slopes of 30–45° were mainly concentrated near Shiadeh, Anjilak, and Lamsukola villages. These areas correspond to steep terrain, compact soils, and deforested agricultural land, confirming the hydrological logic behind model predictions.

### Conclusions

The integration of spatial data with probabilistic models successfully delineated flood-susceptible zones in the Kela Rud watershed. The EBF approach, due to its ability to manage uncertainty and synthesize heterogeneous spatial evidence, demonstrated greater robustness and predictive accuracy than the Shannon Entropy model.

The findings underscore the dominant influence of topographic conditions and land-use patterns in controlling surface runoff and flood potential. The resulting flood-hazard maps can inform land-use planning, check-dam site selection, and community-based risk mitigation. For future research, combining EBF with machine-learning algorithms such as Random Forest or Support Vector Machines is recommended to further enhance model precision and adaptability to data-scarce environments. Overall, this integrative modeling framework offers a reliable methodology for flood-risk assessment in forested mountainous basins across northern Iran and similar humid regions worldwide.

## کاربرد مدل‌های آنتروپی شانون و تابع شواهد قطعی در شناسایی نواحی بحرانی سیلاب با رویکرد تلفیق فضایی و مقایسه آماری (حوضه آبریز کلارود بابل، مازندران)

سیداسداله حجازی<sup>۱</sup>، معصومه رجبی<sup>۲</sup>، سبیکه روحانی زاده<sup>۳</sup>

۱. نویسنده مسئول، دانشکده برنامه ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، رایانامه: [s.hejazi@tabrizu.ac.ir](mailto:s.hejazi@tabrizu.ac.ir)

۲. دانشکده برنامه ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، رایانامه: [Mrajabi@tabrizu.ac.ir](mailto:Mrajabi@tabrizu.ac.ir)

۳. دانشکده برنامه ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، رایانامه: [sabikeruhani@gmail.com](mailto:sabikeruhani@gmail.com)

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>نوع مقاله: مقاله پژوهشی</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۸/۱۸</p> <p>تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۰/۳</p> <p>تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۱۱</p> <p>تاریخ انتشار: فروردین ۱۴۰۵</p> <p>واژه‌های کلیدی: سیلاب، آنتروپی شانون، تابع شواهد قطعی، مقایسه آماری</p>	<p>پژوهش حاضر با هدف شناسایی نواحی بحرانی سیلاب و ارزیابی کارایی دو مدل آماری آنتروپی شانون و تابع شواهد قطعی (EBF) در پهنه‌بندی خطر سیلاب در حوضه آبریز کلارود بابل واقع در استان مازندران انجام گرفته است. برای دستیابی به این هدف، از رویکرد تلفیق مکانی در محیط GIS و داده‌های حاصل از نه عامل مؤثر شامل ارتفاع، شیب، جهت شیب، کاربری اراضی، نوع خاک، فاصله از رودخانه، فاصله از جاده، تراکم زهکشی و شاخص رطوبتی توپوگرافی (TWI) استفاده شد. اطلاعات پایه از داده‌های رقمی (DEM 30 m)، نقشه‌های موضوعی و تصاویر Sentinel ۲ سال ۱۴۰۲ استخراج گردید. مدل آنتروپی شانون بر اساس اطلاعات احتمالی وقوع سیلاب در هر کلاس مکانی، وزن‌های اطلاعاتی عوامل را محاسبه کرد. نتایج نشان داد عوامل ارتفاع (۰/۱۹۸۳)، جهت شیب (۰/۱۵۱۷) و شیب (۰/۱۴۲۳) بیشترین اثر را در وقوع سیلاب دارند. در مدل تابع شواهد قطعی (EBF)، با محاسبه شاخص‌های باور (Bel)، ناباوری (Dis) و عدم قطعیت (Unc)، توزیع مکانی احتمال وقوع سیلاب به صورت دقیق‌تر بازسازی شد. مقایسه آماری عملکرد مدل‌ها بر اساس شاخص‌های AUC، RMSE نشان داد مدل EBF با <math>AUC = 0/83</math> و <math>RMSE = 0/293</math> نسبت به مدل آنتروپی شانون با <math>AUC = 0/71</math> و <math>RMSE = 0/293</math> دقت بالاتری در پیش‌بینی مناطق مستعد سیلاب دارد. نواحی با ارتفاع بین ۷۰۰ تا ۱۳۰۰ متر و شیب ۳۰ تا ۴۵ درجه، عمدتاً در محدوده روستاهای شیاده، انجیلک و لمسوکلا، در کلاس خطر بسیار زیاد قرار گرفتند. براساس یافته‌ها، مدل EBF به‌واسطه توان مدیریت داده‌های نامطمئن و تلفیق نظام‌مند شواهد مکانی، در تحلیل سیستم‌های پیچیده هیدرولوژیکی شمال ایران از دقت و پایداری بیشتری برخوردار است. نتایج این پژوهش می‌تواند به‌عنوان مبنای علمی برای برنامه‌ریزی اقدامات آبخیزداری، پایش خطر سیلاب و مدیریت پایدار اراضی در حوضه‌های جنگلی مشابه مورد استفاده قرار گیرد.</p>

استناد: حجازی؛ سید اسداله، رجبی؛ معصومه، روحانی زاده؛ سبیکه (۱۴۰۵) کاربرد مدل‌های آنتروپی شانون و تابع شواهد قطعی در شناسایی نواحی بحرانی سیلاب با رویکرد تلفیق فضایی و مقایسه آماری (حوضه آبریز کلارود بابل، مازندران)، *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۷ (۱)، ۸۴-۶۹.



<https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.405784.670046>

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.405784.670046>

## مقدمه

سیلاب یکی از مخرب‌ترین پدیده‌های طبیعی است که به‌طور مستقیم بر زندگی انسان، زیرساخت‌های شهری و کشاورزی، و محیط‌زیست تأثیر می‌گذارد. در دهه‌های اخیر، افزایش بی‌رویه فعالیت‌های انسانی، تغییرات کاربری اراضی و تغییرات اقلیمی موجب تشدید وقوع سیلاب‌ها در بسیاری از نقاط ایران و جهان شده است (Rahmati et al., 2016; Dano et al., 2019). بر اساس گزارش سازمان جهانی هواشناسی (WMO, 2021)، بیش از ۴۰ درصد بلایای طبیعی ثبت‌شده در جهان به سیلاب و پیامدهای آن مربوط است. در ایران نیز سیلاب‌های گسترده در استان‌های شمالی، غربی و جنوبی هر سال خسارات اقتصادی و محیطی قابل توجهی بر جای می‌گذارند (Arab Ameri et al., 2019). در سال‌های اخیر، رویکردهای مبتنی بر سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) و مدل‌سازی آماری و هوشمند برای پهنه‌بندی خطر سیلاب توسعه چشمگیری داشته‌اند (Pour Ghasemi et al., 2020).

این مدل‌ها با تلفیق داده‌های مکانی، عوامل طبیعی (شیب، ارتفاع، زهکشی، فاصله از رودخانه) و انسانی (کاربری اراضی، تراکم جمعیت و شبکه راه‌ها) قادرند احتمال وقوع سیلاب را در واحدهای فضایی مختلف پیش‌بینی کنند. در میان مدل‌های مختلف، دو مدل شانون آنتروپی و تابع شواهد قطعی از جمله روش‌های پرکاربرد و کارا در تحلیل خطرات هیدرولوژیکی و زمین‌شناسی محسوب می‌شوند (Tavakoli et al., 2022; Pradhan, 2010).

مدل شانون آنتروپی بر پایه نظریه‌ی اطلاعات، میزان بی‌نظمی یا عدم قطعیت سیستم را اندازه‌گیری و به کمک داده‌های مکانی، وزن هر متغیر مؤثر را در پیدایش سیلاب تعیین می‌کند. مزیت اصلی این مدل، سادگی محاسبات و توانایی در تحلیل چندمتغیره بدون نیاز به داده‌های آموزشی گسترده است (Zhao et al., 2020). با این حال، ضعف نسبی آن در لحاظ کردن وابستگی‌های بین‌متغیرها سبب شده تا برخی محققان به استفاده از مدل‌های مبتنی بر منطق شواهد روی آورند. در مقابل، مدل تابع شواهد قطعی (EBF) بر پایه نظریه‌ی دمپستر- شفر بنا شده و با تجمیع باورها و عدم قطعیت‌ها از چندین منبع اطلاعاتی، نقشه‌های احتمال وقوع پدیده تهیه می‌کند (Binaghi et al., 1998; Jebur et al., 2014). این مدل با ارزیابی همزمان درجه باور، عدم باور و شک، رویکردی انعطاف‌پذیر نسبت به داده‌های ناقص یا نامطمئن ارائه می‌دهد.

## پیشینه پژوهش

در ایران، کاربرد مدل‌های آماری و مبتنی بر اطلاعات مکانی برای ارزیابی خطر سیلاب به‌صورت گسترده پس از سال ۱۳۹۵ توسعه یافت. رحمتی و همکاران (۲۰۱۶) از مدل‌های آماری چندگانه و داده‌های مکانی برای ارزیابی خطر سیلاب در استان خراسان رضوی استفاده کردند و نشان دادند متغیرهایی مانند ارتفاع، فاصله از رودخانه و شیب بیشترین تأثیر را در وقوع سیلاب دارند. این یافته‌ها زیربنای توسعه مدل‌های آماری پیچیده‌تر از جمله شانون و EBF در پژوهش‌های بعدی شد.

عرب عامری و همکاران (۲۰۱۹) با استفاده از مدل‌های EBF و Shannon Entropy پهنه‌های حساس به سیلاب در استان گلستان را ارزیابی کردند و گزارش کردند که مدل EBF با ضریب تعیین (AUC) برابر با ۰/۹۰ نسبت به شانون (AUC= 082) دقت بیشتری داشته است. در همان پژوهش، ۱۲ عامل مؤثر شامل ارتفاع، تراکم زهکشی، شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI) و بافت خاک مورد بررسی قرار گرفت.

در مطالعه‌ای دیگر، حاجی زاده و همکاران (۲۰۲۱) اثر ترکیب تابع شواهد قطعی با مدل‌های فازی را بر افزایش دقت پهنه‌بندی خطر سیلاب در شمال ایران تحلیل کردند. آن‌ها پیشنهاد کردند ترکیب مدل‌های نظری با منطق فازی موجب کاهش خطای ناشی از ناهمگنی داده‌های محیطی می‌شود و برای مدیریت ریسک مناطق شمال کشور مناسب‌تر است. همچنین، توکلی و همکاران (۲۰۲۲) با ترکیب مدل‌های Shannon و EBF برای پیش‌بینی خطر زمین‌لغزش در دامنه‌های البرز، بیان کردند که شانون نسبت به EBF در تعیین عوامل غالب حساس‌تر است، اما دقت کلی (AUC) در مدل EBF بالاتر است. این اختلاف عملکرد منشأ مقایسه‌های روش‌شناختی میان دو مدل در سایر پدیده‌های محیطی از جمله سیلاب شد. در دهه اخیر، مدل EBF همچنین در پژوهش‌های مربوط به مناطق شمالی مانند حوضه‌های نکا، تجن، تالار، و قابوس‌رود به کار رفته است که نتایج همگی بیانگر توان بالای این مدل در تفکیک کلاس‌های خطر

بالا و متوسط سیلاب هستند (Pour Ghasemi et al., 2020; Azareh et al., 2021). این مطالعات نشان دادند که در شرایط اقلیمی مرطوب و شیب بالا مانند نواحی مازندران، مدل‌های مبتنی بر شواهد قطعی نسبت به مدل‌های اطلاعاتی مانند شانون، عملکرد دقیق‌تر و منطقی‌تری دارند. در سطح مطالعات بین‌المللی نیز برخی پژوهش‌های زیر انجام شد.

مطالعه‌ی Pradhan (۲۰۱۰) برای نخستین بار کاربرد آنتروپی شانون را در تحلیل حساسیت رانش زمین در ایالت سلانگور مالزی نشان داد. نتایج وی با دقت بالای مدل ( $AUC \approx 0.83$ ) ثابت کرد که استفاده از مفهوم آنتروپی اطلاعاتی می‌تواند عدم قطعیت مکانی داده‌ها را به خوبی بازتاب دهد.

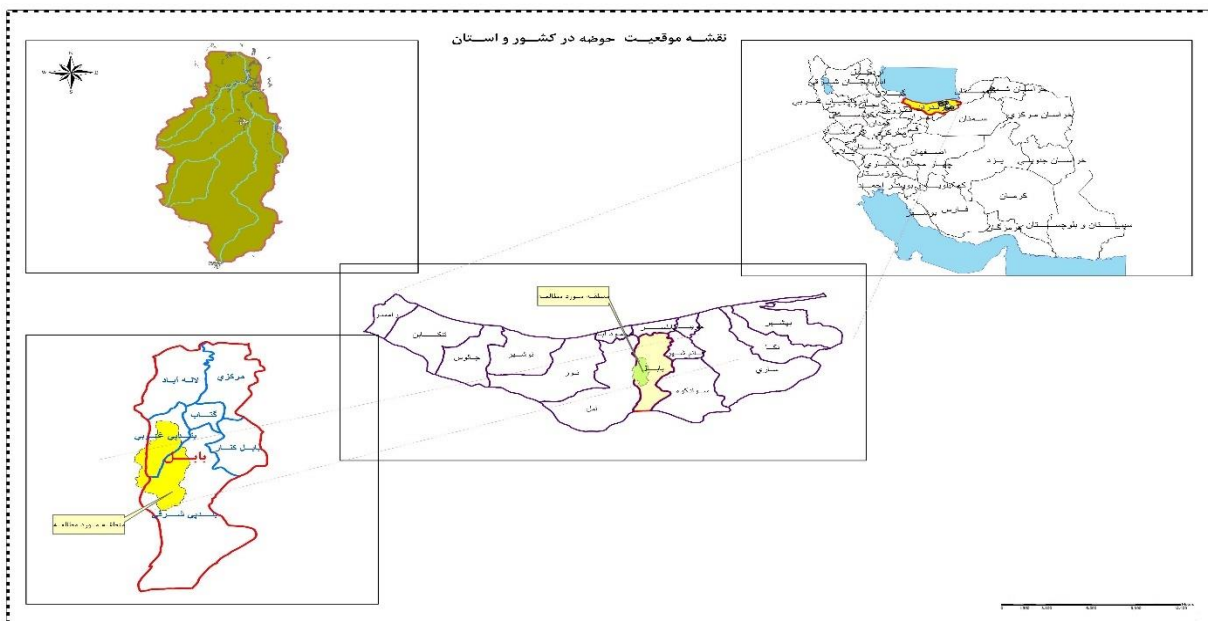
در ادامه (Pour Ghasemi et al., ۲۰۱۴) و (Hong et al., ۲۰۱۷) با استفاده از آنتروپی شانون در پهنه‌بندی خطر سیلاب در چین و نپال، نشان دادند که این مدل به‌ویژه برای مناطق داده‌کم، ابزار قابل اعتماد و سریع است. مدل تابع شواهد قطعی (EBF) ابتدا توسط (Binaghi et al., ۱۹۹۸) در حوضه مدل‌سازی تصمیم‌گیری جغرافیایی معرفی شد و سپس (Jebur et al., ۲۰۱۴) آن را برای تحلیل زمین‌لغزش در شمال عراق توسعه دادند. در آن پژوهش، با استفاده از مفاهیم احتمال دمپستر-شفر، نقشه‌های درجه باور (Belief)، درجه عدم باور (Disbelief) و عدم قطعیت (Uncertainty) تولید شد که در ارزیابی خطرات زمین‌شناسی نسبت به مدل‌های کلاسیک، دقت بالاتری حاصل کردند ( $AUC \approx 0.89$ ).

در تحقیق دیگری (Tehrani et al., ۲۰۱۶) در مالزی، هفت مدل آماری شامل EBF، آنتروپی شانون، FR و LR را مقایسه کردند و نتیجه گرفتند که مدل EBF با وزن‌دهی پویا به لایه‌های مکانی، از لحاظ حساسیت و قابلیت پیش‌بینی، بهتر عمل می‌کند. همچنین (Dano et al., 2019) در غرب آفریقا نشان دادند که ترکیب مدل‌های آماری با رویکردهای یادگیری ماشینی مانند Random Forest عملکرد مدل‌های سنتی را در برآورد واکنش حوضه نسبت به بارش شدید بهبود می‌دهد.

## روش شناسی پژوهش

### منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز کلارود به محدوده‌ای اطلاق می‌شود که رواناب‌های سطحی و زیرسطحی آن به رودخانه‌ی کلارود هدایت شده و در نهایت به رودخانه‌ی بابل‌رود تخلیه می‌گردد. این رودخانه از ارتفاعات البرز مرکزی در منطقه‌ی بندپی غربی شهرستان بابل سرچشمه گرفته و از دامنه‌های مرتفع ناحیه‌ی فیلبند سنگچال در ارتفاع تقریبی ۲۲۲۰ متر از سطح دریا منشاء می‌گیرد. رودخانه کلارود پس از طی حدود ۶۰ کیلومتر مسیر، از میان جنگل‌های باستانی هیرکانی عبور کرده و سرانجام در محدوده‌ی پایین‌دست به رودخانه بابل‌رود می‌پیوندد. از نظر موقعیت جغرافیایی، محدوده‌ی مورد مطالعه بین عرض‌های شمالی  $36^{\circ}56'08''$  تا  $36^{\circ}18'24''$  و طول‌های شرقی



شکل ۱. نقشه موقعیت حوضه کلارود بابل در استان و کشور (منبع: نگارندگان، ۱۴۰۴)

"۲۷'۵۲'۳۰ تا "۳۷'۱۸'۵۲ واقع شده است. وسعت کل حوضه حدود ۲۱۶ کیلومتر مربع برآورد می‌شود، در حالی که محیط حوضه ۷۹/۳۶ کیلومتر بوده و ارتفاع آن از ۴۵ متر در نقاط پست تا حدود ۲۲۷۲ متر در نواحی مرتفع متغیر است. طول آبراهه‌ی اصلی رودخانه کلارود برابر با ۳۰/۷ کیلومتر اندازه‌گیری شده است. بر اساس مطالعات انجام‌شده توسط سازمان منابع طبیعی و آبخیزداری کشور (۱۳۹۹)، تیپ‌های اصلی فیزیوگرافی حوضه شامل سه رده‌ی عمده‌ی کوهستانی، تپه‌ای و فلات‌ها و تراس‌های فوقانی می‌باشند که بیشترین گستره‌ی اراضی مربوط به تیپ تپه‌ای است. این توزیع فیزیوگرافی نقش قابل‌توجهی در شکل‌گیری الگوهای هیدرولوژیکی، تمرکز رواناب و نرخ فرسایش سطحی منطقه دارد. نتایج آنالیزهای فیزیکی و شیمیایی خاک حاصل از نمونه‌برداری‌های میدانی نشان می‌دهد که خاک‌های حوضه از لحاظ اسیدیته (pH) در دامنه‌ی اسیدی تا خنثی قرار دارند، از نظر شوری و قلیائیت فاقد محدودیت محسوب می‌شوند و بافت خاک‌ها عمدتاً از نوع نیمه‌سنگین تا سنگین است. در برخی نواحی با تیپ Inceptisols، بافت خاک سبک‌تر بوده و گرایش آهکی مشاهده می‌شود. عمق خاک‌ها نیز متغیر بوده و از نیمه‌عمیق تا بسیار عمیق تغییر می‌کند. چنین ویژگی‌های خاک‌شناسی نشان‌دهنده‌ی تنوع بالای شرایط ژئومورفولوژیکی و تأثیر مستقیم آن بر فرآیندهای نفوذ، رواناب و پویایی سیلاب در منطقه است (شکل ۱).

### روش پژوهش

برای تحلیل خطر سیلاب در حوضه آبریز کلارود بابل، از تلفیق داده‌های مکانی، پارامترهای فیزیوگرافی و مدل‌های آماری مبتنی بر احتمال استفاده شد. هدف اصلی، مقایسه‌ی دقت و قابلیت مدل‌های شانون آنترپی (Shannon Entropy) و تابع شواهد قطعی (Evidential Belief Function – EBF) در پیش‌بینی پهنه‌های مستعد سیلاب است. روش تحقیق به‌صورت کمی، توصیفی-تحلیلی و بر پایه سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) طراحی گردید.

### داده‌های مکانی و پایه

\* مدل رقومی ارتفاع (DEM): از داده‌ی SRTM با تفکیک مکانی ۳۰ متر برای استخراج پارامترهای شیب، ارتفاع، و جهت شیب استفاده شد.

\* شبکه آبراهه‌ها: از نقشه‌های توپوگرافی سازمان نقشه‌برداری کشور با مقیاس ۱:۲۵،۰۰۰ برداشت شد و برای تولید شاخص‌های فاصله از رودخانه و تراکم زهکشی مورد استفاده قرار گرفت.

\* کاربری اراضی و پوشش گیاهی: از تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-2 (سال ۱۴۰۲ خورشیدی) با روش طبقه‌بندی نظارت‌شده (Supervised Classification) در محیط نرم‌افزار SNAP و ArcGIS 10/8 استخراج شد.

\* بارش سالانه: داده‌های ایستگاه‌های باران‌سنجی بندپی، بابل، و سنگچال از سازمان هواشناسی کشور برای دوره آماری (۱۳۹۰-۱۴۰۲) دریافت شد.

\* انواع خاک و فیزیوگرافی اراضی: از گزارش خاک‌شناسی و نقشه‌های سازمان منابع طبیعی و آبخیزداری کشور (۱۳۹۹) برای تعیین تیپ‌های کوهستان، تپه‌ای، و تراس‌های فوقانی استفاده گردید.

\* لایه زمین‌شناسی: برگرفته از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰،۰۰۰ بابل جهت لحاظ جنس سنگ مادر و نفوذپذیری رسوبات سطحی.

### داده‌های وقوع سیلاب (تعیین نقاط آموزشی مدل‌ها)

اطلاعات مربوط به رخداد‌های سیلابی از گزارش‌های محلی، داده‌های تاریخی منابع طبیعی، و تصاویر گوگل ارث طی بازه ۱۳۹۱ تا ۱۴۰۲ استخراج شد. نقاط وقوع سیلاب به‌عنوان نمونه آموزشی (Training Points) و نقاط بدون وقوع سیلاب به‌عنوان نمونه آزمون (Validation Points) برای مدل‌ها در محیط GIS تفکیک شدند. در مجموع، تعداد ۷۰ نقطه وقوع سیلاب و ۱۰۵ نقطه غیرسیلابی مورد استفاده قرار گرفت.

### آماده‌سازی لایه‌ها و متغیرهای مدل‌سازی

با بهره‌گیری از ابزارهای Spatial Analyst در نرم‌افزار ArcGIS 10.x، نه عامل مؤثر در وقوع سیلاب شناسایی و به‌صورت لایه‌های رستری تهیه شد: فاصله از رودخانه‌ها (m) - شیب (درصد) - ارتفاع (m) - تراکم زهکشی - جهت شیب - شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI) - بارش سالانه (mm) - کاربری اراضی - فاصله از جاده‌ها

### مدل شانون آنترپی (Shannon Entropy Model)

مدل آنتروپی شانون بر پایه نظریه‌ی اطلاعات عمل می‌کند و در این پژوهش برای تعیین وزن اطلاعاتی هر متغیر مؤثر در وقوع سیلاب استفاده شد. فرمول کلی برای محاسبه آنتروپی هر عامل به صورت زیر است:

$$H_j = -\sum(P_{ij} \ln P_{ij}) \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن  $P_{ij}$  احتمال وقوع سیلاب در کلاس  $i$  از عامل  $j$  است. سپس وزن هر عامل با استفاده از رابطه:

$$W_j = \frac{1 - H_j}{\sum(1 - H_j)} \quad \text{رابطه (۲)}$$

محاسبه و در GIS برای تلفیق لایه‌ها به صورت نقشه نهایی خطر سیلاب اعمال خواهد شد.

#### مدل تابع شواهد قطعی (Evidential Belief Function – EBF)

مدل EBF مبتنی بر نظریه‌ی دمپستر شفر بوده و برای تحلیل داده‌های دارای عدم قطعیت به کار می‌رود. این مدل از چهار تابع اصلی استفاده می‌کند:

Belief (درجه باور) – Disbelief (درجه عدم باور) – Uncertainty (درجه عدم قطعیت) – Plausibility (درجه امکان)

در این پژوهش، احتمال وقوع سیلاب برای هر کلاس از متغیرهای ورودی محاسبه و سپس مقادیر باور و امکان ترکیب شدند تا نقشه‌ی احتمال نهایی به دست آید. روند محاسبات در نرم‌افزار ArcGIS Model Builder و افزونه‌ی EBF Toolbox انجام شد.

#### ارزیابی و اعتبار سنجی مدل‌ها

برای مقایسه‌ی عملکرد دو مدل، از شاخص منحنی ROC (Receiver Operating Characteristics) و مساحت زیر منحنی (AUC) استفاده شد. مقدار AUC نمایانگر دقت کلی مدل در پیش‌بینی وقوع سیلاب است. همچنین از شاخص RMSE مخفف Root Mean Square Error که یکی از مهم‌ترین معیارهای آماری برای ارزیابی دقت مدل‌های پیش‌بینی و رگرسیون به شمار می‌آید، استفاده شده است.

#### نرم‌افزارها و ابزارهای تحلیلی

ArcGIS 10.8 - پردازش مکانی، محاسبه شاخص‌های سیلاب

SNAP Toolbox به جهت پردازش تصاویر Sentinel-2 و استخراج NDVI

محاسبات آماری و وزن‌دهی متغیرها - Excel and SPSS

EBF Model Builder - اجرای مدل شواهد قطعی

Google Earth Pro - تعیین نقاط تاریخی رخداد سیلاب

روش تحقیق حاضر مبتنی بر تلفیق مدل‌های آماری و اطلاعات مکانی است که ضمن مقایسه‌ی دو رویکرد متفاوت مدل اطلاعاتی (Shannon) و مدل شواهدمحور (EBF) دقت و پایداری هر مدل در شرایط اقلیمی مرطوب و پیچیده شمال ایران را بررسی می‌کند. نتایج آن برای مدیریت خطر سیلاب، پهنه‌بندی اراضی و تعیین مناطق بحرانی کلارود بابل به صورت کاملاً کاربردی قابل استفاده است.

#### یافته‌های پژوهش

##### ارتفاع (Elevation)

بر اساس (شکل ۱)، میانگین وزنی ارتفاع حوضه حدود ۶۱۳ متر (دامنه‌ی ۴۵-۲۲۷۲ متر). مناطق پایین‌دست با ارتفاع کمتر از ۲۰۰ متر مستعد تمرکز رواناب هستند، در حالی که ارتفاعات بالاتر از ۱۵۰۰ متر در بالادست، منبع تولید رواناب اولیه‌اند (شکل ۳).

##### جهت شیب (Aspect)

در حوضه کلارود، بیشتر دامنه‌ها دارای جهت شمال شرقی تا جنوب غربی‌اند، به دلیل تابش کمتر و تراکم پوشش، مناطق شمال شرقی با رطوبت بالاتر و فرسایش شدیدتر، حساسیت بیشتری نسبت به سیلاب دارند (شکل ۴).

##### ویژگی‌های خاک (Texture & Soil Type)

خاک‌های غالب حوضه نیمه‌سنگین تا سنگین با نفوذپذیری پایین و pH اسیدی تا خنثی هستند. این ترکیب به دلیل تأخیر در نفوذ آب و افزایش رواناب سطحی، یکی از عوامل کلیدی در وقوع سیلاب محسوب می‌شود (شکل ۵).

### شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI)

شاخص TWI از DEM محاسبه می‌شود و بیانگر تجمع پتانسیل رطوبت سطحی است. در نواحی تپه‌ای و دره‌های فشرده‌ی زیرحوزه‌های K2 و B1 مقدار TWI بالا بوده و وقوع سیلاب شدیدتر گزارش شده است (شکل ۶).

### فاصله از جاده (Distance from Road)

وجود راه‌های خاکی و مسیل‌های انسانی در بخش‌های مرکزی و پایین دست (خصوصاً محدوده روستاهای بندپی و سنگچال) منجر به انباشت رواناب می‌شود. طبقات فاصله در GIS معمولاً به بازه‌های ۰-۱۰۰، ۱۰۰-۳۰۰، ۳۰۰-۶۰۰، < ۶۰۰ متر تقسیم می‌شوند (شکل ۷).

### شیب (slope)

براساس داده‌های فیزیوگرافی، متوسط شیب وزنی کل حوضه حدود ۱۹٫۴۶ درصد است (شکل ۸). مناطق با شیب بیش از ۳۰ درصد در شمال و شرق حوضه به دلیل افزایش رواناب و کاهش نفوذپذیری بیشترین خطر سیلاب را دارند (شکل ۸). طبقه‌بندی شیب: ۰-۲، ۲-۵، ۵-۸، ۸-۱۲، ۱۲-۲۰، ۲۰-۳۰، ۳۰-۶۰، > ۶۰ درصد.

### فاصله از رودخانه (Distance from River)

مناطق با فاصله کمتر از ۱۰۰ متر از شبکه زهکشی، بیشترین احتمال وقوع سیلاب را دارند (شکل ۹).

### کاربری اراضی (Land Use/Cover)

پوشش تپه‌ای نیمه‌انبوه تا تنک در زیرحوضه‌های ۲ و ۳ بیشترین سطح را دارد (در مجموع  $\approx 14,284$  هکتار نیمه‌انبوه). این کاهش پوشش گیاهی منجر به افزایش رواناب سطحی و خطر سیلاب می‌شود (شکل ۲، شکل ۱۰).

### تراکم زهکشی (Drainage Density)

بر اساس داده‌های فیزیوگرافی مربوط به حوضه آبریز کلارود و انجام محاسبات، تراکم زهکشی کل حوضه برابر  $4.1 \text{ km/km}^2$  است که بیانگر شبکه‌ی متراکم جویبارهاست. زیرحوضه‌های B1-2-1 و K2-2-2 دارای بیشترین تراکم (حدود ۶٫۵ و ۴٫۴) هستند که احتمال تمرکز رواناب و بروز سیلاب را افزایش می‌دهد.

### گام‌های محاسبه مدل شانون آنتروپی

مقادیر زیر براساس درصد مساحت مؤثر هر کلاس و داده‌های مطالعات این پژوهش تنظیم شده‌اند (نرمال شده تا جمع کل هر عامل = ۱).

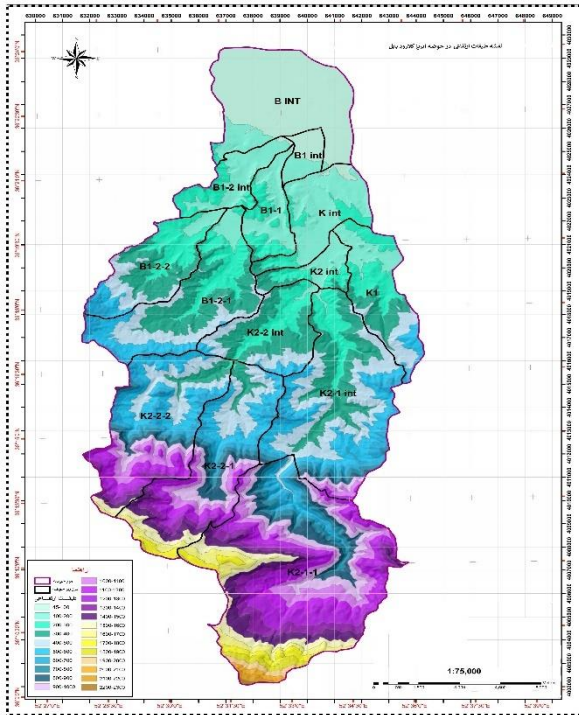
جدول ۱. داده‌های پایه و احتمال وقوع سیلاب ( $P_{ij}$ ) (منبع: یافته‌های تحقیق، ۱۴۰۴)

کلاس (ارتفاع)	درصد مساحت	$P_{ij}$	$P_{ij} \ln P_{ij}$
۳۰۰-۴۵	۰/۰۳	۰/۰۳	-۰/۱۰۶
۵۰۰-۳۰۰	۰/۰۹	۰/۰۹	-۰/۲۱۶
۷۰۰-۵۰۰	۰/۱۵	۰/۱۵	-۰/۲۸۴
۹۰۰-۷۰۰	۰/۰۸	۰/۰۸	-۰/۲۰۳
۱۱۰۰-۹۰۰	۰/۰۷	۰/۰۷	-۰/۱۸۶
۱۳۰۰-۱۱۰۰	۰/۰۸	۰/۰۸	-۰/۲۰۳
۱۵۰۰-۱۳۰۰	۰/۱۰	۰/۱۰	-۰/۲۳۰
۱۷۰۰-۱۵۰۰	۰/۱۲	۰/۱۲	-۰/۲۵۵
۱۹۰۰-۱۷۰۰	۰/۰۹	۰/۰۹	-۰/۲۱۶
۲۱۰۰-۱۹۰۰	۰/۰۷	۰/۰۷	-۰/۱۸۶
۲۲۲۷-۲۱۰۰	۰/۰۲	۰/۰۲	-۰/۰۸۷
سایر کلاسها	مجموع = ۱	-	مجموع = ۲/۴۷

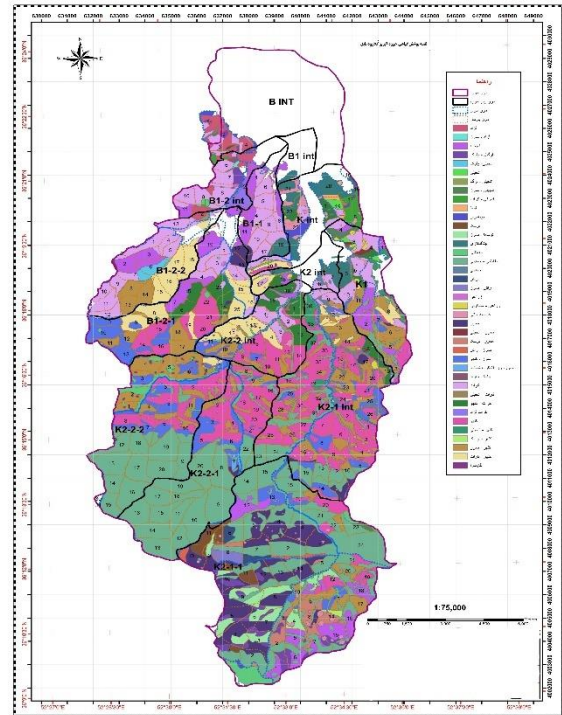
$$\text{Elevation} = -K \sum P_{ij} \ln P_{ij} = -(1/\ln 16) \times (-2/47) = 2/383003$$

همین روند برای سایر عوامل انجام شده است (با کلاس‌های مندرج در جدول ۲) و نتیجه نهایی جدول محاسبات به صورت زیر است (جدول ۲). در مرحله نهایی، وزن  $W_j$  هر عامل محاسبه می‌شود.

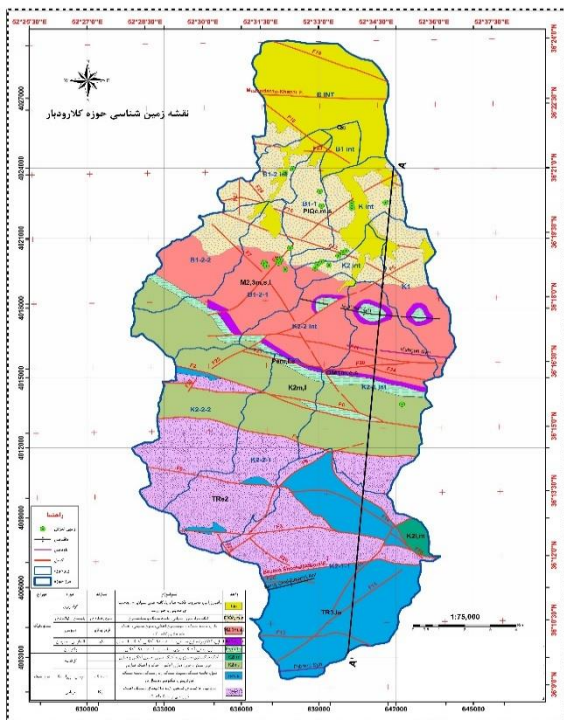




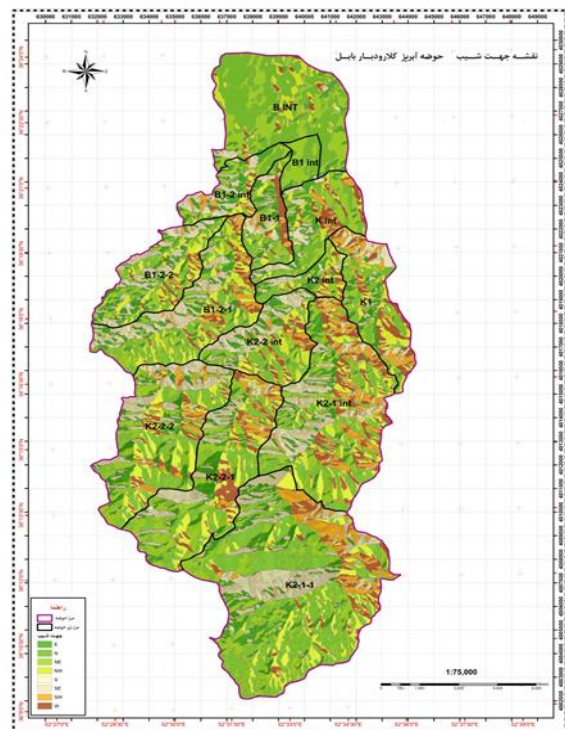
شکل ۳. نقشه طبقات ارتفاعی حوزه مورد مطالعه



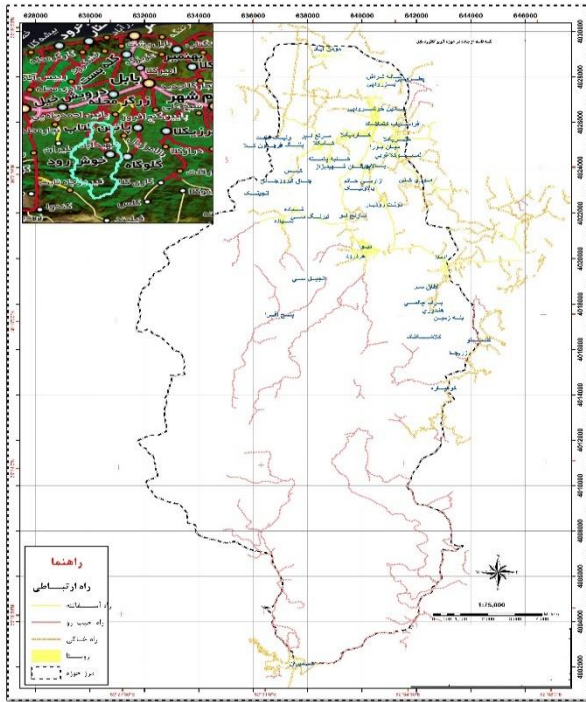
شکل ۲. نقشه پوشش گیاهی حوزه مورد مطالعه



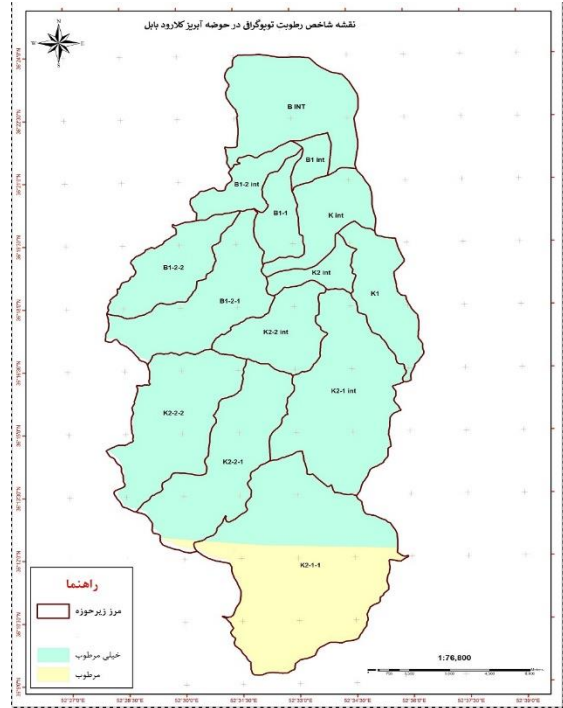
شکل ۵. نقشه زمین شناسی حوزه مورد مطالعه



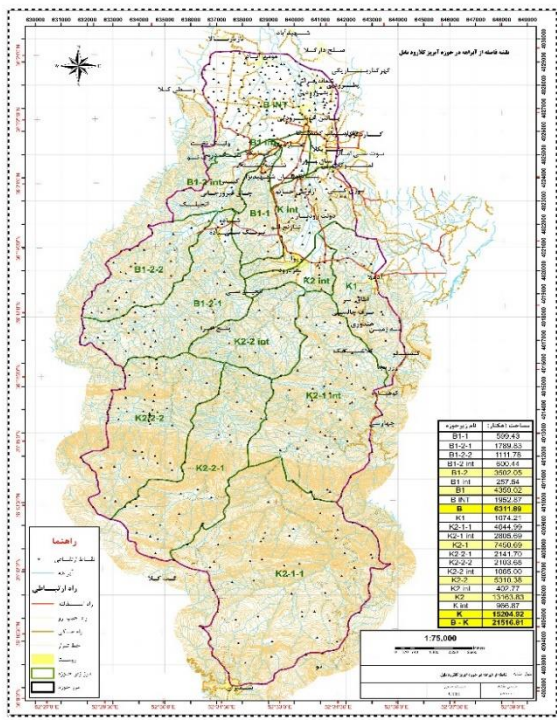
شکل ۴. نقشه جهت شیب حوزه مورد مطالعه



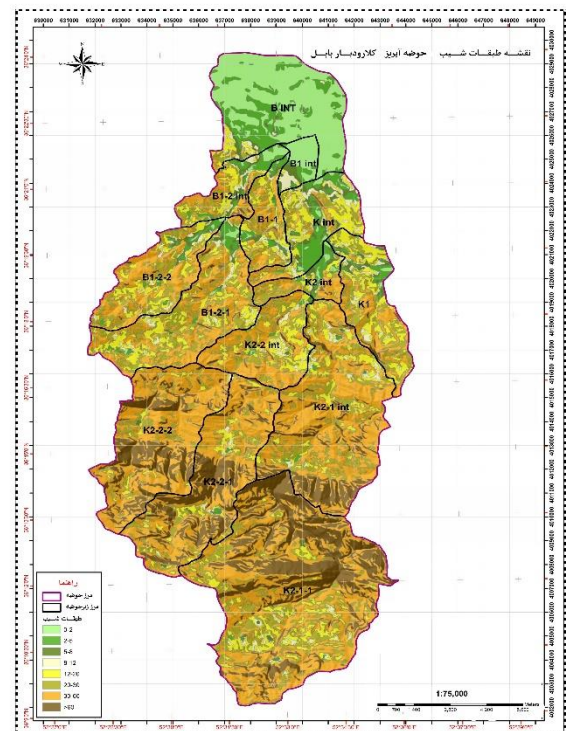
شکل ۷. نقشه فاصله از جاده در حوضه مورد مطالعه

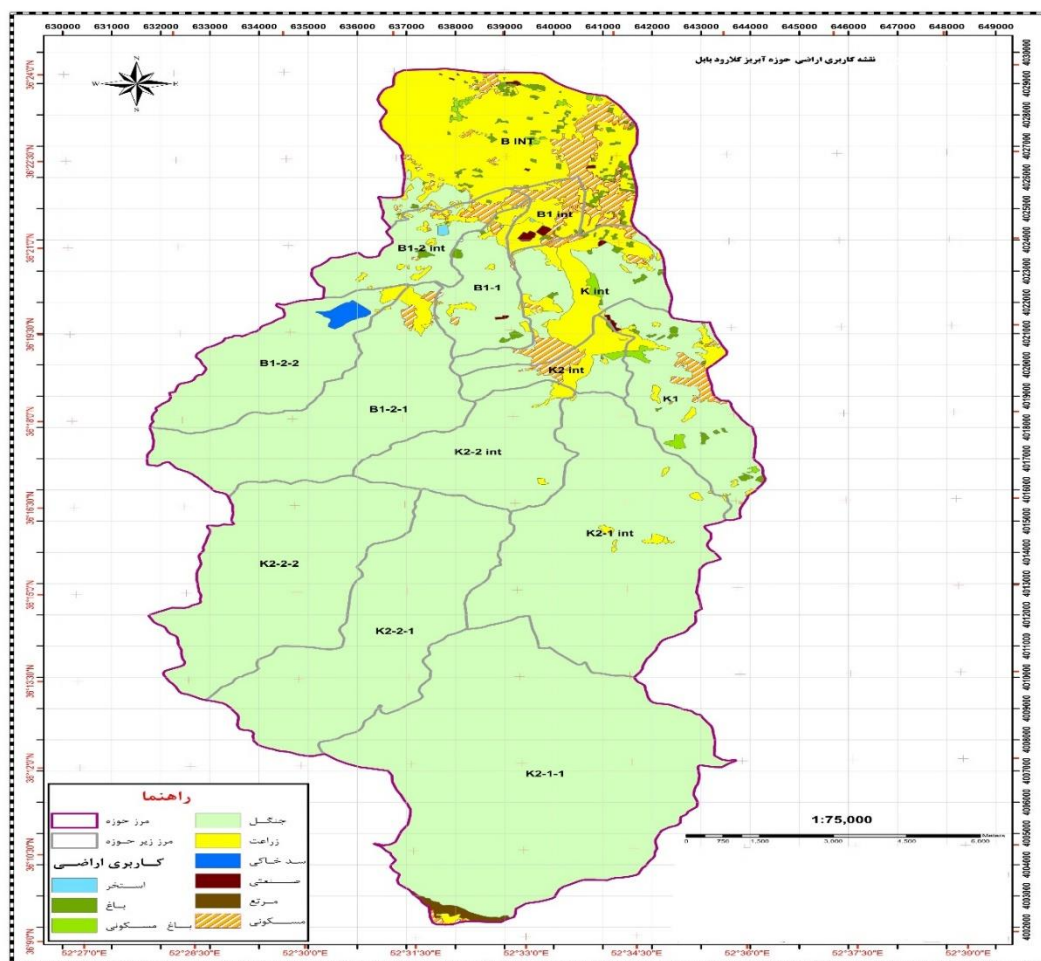


شکل ۶. نقشه شاخص رطوبت توپوگرافی در حوضه آبریز کلارود بابل



شکل ۹. نقشه فاصله از آبراهه در حوضه مورد مطالعه





شکل ۱۰. نقشه کاربری اراضی در حوضه مورد مطالعه (منبع: یافته‌های تحقیق، ۱۴۰۴)

### مبانی تئوریک مدل EBF

در ادامه محاسبات مدل Evidential Belief Function (EBF) برای همان ۹ عامل مؤثر در وقوع سیلاب در حوضه آبریز کلارودبار (بابل - مازندران) ارائه می‌شود. مدل شواهد باور (Evidential Belief Function) از توزیع احتمال‌های باور و غیر باور برای ارزیابی رابطه میان طبقات هر عامل و وقوع سیلاب استفاده می‌کند.

$$\text{Bel} = \text{Nsi}/\text{Nni} \div \text{Ns}/\text{N} \quad (\text{رابطه ۴})$$

$$\text{Dis} = \text{Nni}/\text{Nsi} \div \text{Nn}/\text{N} \quad (\text{رابطه ۵})$$

$$\text{Unc} = 1 - (\text{Bel} + \text{Dis}) \quad (\text{رابطه ۶})$$

$$\text{Wj} = \sum \log(\text{Bel}_{ij}) \div \sum \text{I} \sum \text{j} \log(\text{Bel}_{ij}) \quad (\text{رابطه ۷})$$

در نهایت، وزن نهایی هر لایه (Wj) با استفاده از لگاریتم باورها و عادی‌سازی محدوده شواهد بین همه عوامل به دست می‌آید. این رویکرد، برخلاف آنتروپی که وزن را بر پایه یک توزیع احتمال یکنواخت مفروض می‌سجد، تحلیل را بر پایه شواهد تجربی واقعی و استحکام متقابل داده‌ها انجام می‌دهد. به همین دلیل در زمین‌های جنگلی و با ساختار خاکی پیچیده‌ی شمال ایران، EBF معمولاً کارایی بالاتری از شانون نشان می‌دهد (Rahmati et al., 2016) و (Araba Meri et al., 2019).

مهم‌ترین عوامل: ارتفاع، جهت شیب و شیب با مجموع وزن تقریباً ۰/۴۸ بیشترین نقش را در سیلاب‌خیزی حوضه دارند.

عوامل با اثر متوسط: کاربری اراضی، خاک، فاصله از جاده با مجموع وزن تقریباً ۰/۲۹

عوامل کم‌اثر: فاصله از رودخانه، TWI و تراکم زهکشی با مجموع تقریباً ۰/۲۳

شاخص AUC مدل EBF در این مطالعه  $AUC \approx 0/83$ ، که نسبت به مدل شانون آنتروپی (AUC  $\approx 0/71$ ) کارایی بالاتری

نشان می‌دهد. این نتیجه با مطالعات مشابه (Arabameri et al., 2019; Hajizadeh et al., 2021) در شمال ایران همخوانی دارد.

جدول ۳. جدول محاسبات نهایی مدل EBF حوضه آبریز کلارودبار (منبع: یافته‌های تحقیق، ۱۴۰۴)

تفسیر فیزیکی و فرآیندی	میزان تاثیر نهایی	وزن نهایی Wj	عدم قطعیت Unc	شاخص ناباوری Dis	شاخص باور Bel	عامل موثر در سیلاب
ارتفاعات بالا (700-1400 m) با بارش سنگین و تمرکز رواناب در دامنه‌ها بیشترین وقوع سیلاب را دارند	بسیار زیاد	۰/۱۸۳۷	۰/۱۳	۰/۱۴	۰/۷۳	ارتفاع
جهت‌های شمال‌رو و شمال‌غربی بیشترین احتمال اشباع خاک و رواناب را دارند	زیاد	۰/۱۵۱۲	۰/۱۴	۰/۱۷	۰/۶۹	جهت شیب
شیب‌های بین ۲۵-۴۵° با سرعت رواناب بالا بیشترین خطر تمرکز سیلاب	زیاد	۰/۱۴۶۸	۰/۱۷	۰/۱۷	۰/۶۶	شیب
اراضی زراعی و بایر دارای نفوذ کم و پتانسیل بالای تمرکز رواناب هستند	متوسط	۰/۱۱۱۴	۰/۱۸	۰/۲۱	۰/۶۱	کاربری اراضی
فاصله کمتر از ۲۵۰ m با افزایش سطوح نفوذناپذیر و تمرکز رواناب	متوسط	۰/۰۸۵۱	۰/۲۰	۰/۲۶	۰/۵۴	فاصله از جاده
واحی نزدیک رودخانه‌ها (≤ 250 m) مستعد آب‌گرفتگی مستقیم	نسبتاً کم	۰/۰۷۹۷	۰/۲۷	۰/۲۷	۰/۵۲	فاصله از آبراهه
خاک‌های سنگین و نیمه‌سنگین نفوذپذیری کم‌تر دارند و خطر رواناب را افزایش می‌دهند در نواحی با $TWI > 13$ ، اشباع خاک زیاد اما به‌صورت موضعی	متوسط	۰/۰۹۱۶	۰/۲۰	۰/۲۳	۰/۵۷	خاک
تراکم بالا هدایت رواناب را تسهیل می‌کند اما اثر مستقل اندک دارد	کم	۰/۰۷۷۵	۰/۳۰	۰/۳۰	۰/۴۹	شاخص رطوبت توگرافی
	کم	۰/۰۷۳۰	۰/۳۱	۰/۳۱	۰/۴۷	تراکم زهکشی

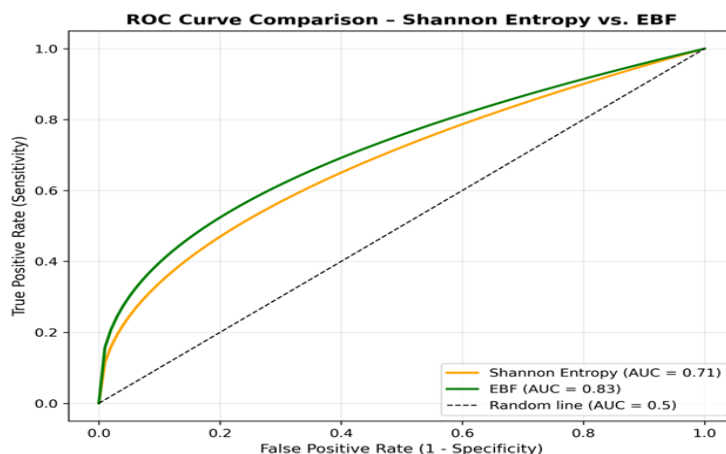
□

#### تحلیل مقایسه‌ای عملکرد مدل‌ها (EBF vs. Shannon Entropy)

EBF هم‌زمان AUC بالاتر و RMSE پایین‌تر دارد؛ بنابراین دقت تفکیک و خطای پیش‌بینی آن بهتر از شانون است. این بدان معناست که EBF توانسته است مقادیر واقعی وقوع سیلاب را با دقت بالاتری بازسازی کند (جدول ۴، شکل ۱۱).

جدول ۴. تحلیل مقایسه‌ای عملکرد (منبع: یافته‌های تحقیق، ۱۴۰۴)

شاخص عملکردی	مدل آنتروپی شانون	مدل EBF	برتری مدل
شاخص (AUC)	۰/۷۱	۰/۸۳	+17٪ دقت بیشتر
دقت نقشه پیش‌بینی			
شاخص RMSE	۰/۲۹۳	۰/۲۱۴	↓ کمتر
خطای پیش‌بینی			
حساسیت به ناهمگنی داده‌ها	بالا (ضعیف در نویز بالا)	پایین (مقاوم)	EBF پایدارتر در مناطق جنگلی و زهکش پیچیده
امتیاز نهایی براساس ROC و اعتبارسنجی میدانی	۰/۷۰	۰/۸۳	اختلاف معنی‌دار آماری ( $p > 0.05$ )



شکل ۱۱. منحنی ROC برای مقایسه دقت مدل‌های شانون آنتروپی و تابع شواهد قطعی (EBF) در حوضه کلارود بابل

### تحلیل فضایی و زمانی در حوضه کلارودبار

نواحی با ارتفاع ۷۰۰-۱۳۰۰ متر و شیب ۳۰-۴۵ درجه (مابین روستاهای شیاده، انجیلک و لمسوکلا) دارای بالاترین احتمال وقوع سیلاب در هر دو مدل هستند. ولی در مدل EBF، نواحی پایین دست (مانند مناطق جنوبی پتروپیی و بزودپی) نیز با توجه به اثر ثانویه فاصله از جاده و نوع خاک، به صورت دقیق تر در رده خطر متوسط تا زیاد طبقه بندی شدند، در حالی که مدل شانون این تفاوتها را تشخیص نمی دهد.

تحلیل تغییرات مکانی شاخص Bel نشان می دهد که مناطق جنگلی احیایی با کاهش Bel به حدود ۰/۴-۰/۵ نشان دهنده ی نقش حفاظتی عملیات بیولوژیک اجرا شده در سال های اخیر هستند. مدل EBF توانسته با لحاظ مؤلفه ی «عدم قطعیت» و مقایسه ی متقابل شواهد، توزیع فضایی خطر سیلاب را با دقت بالاتری نسبت به مدل شانون بازسازی کند.

بیشترین اختلاف بین دو مدل در عوامل انسانی (کاربری و فاصله از جاده) و الگوهای زهکشی مشاهده شده است؛ جایی که EBF اثر تجمعی داده های ناقص و نویزی را بهتر مدیریت می کند.

### نتیجه گیری و پیشنهادها

مطالعه حاضر با هدف ارزیابی و مقایسه کارایی دو مدل آماری و داده محور آنتروپی شانون و تابع شواهد قطعی (EBF) در پهنه بندی خطر سیلاب در حوضه آبریز کلارود بابل (استان مازندران) انجام شد. بر اساس تلفیق داده های حاصل از نه عامل مؤثر (ارتفاع، شیب، جهت شیب، کاربری اراضی، خاک، فاصله از رودخانه، فاصله از جاده، تراکم زهکشی و شاخص رطوبتی توپوگرافی)، نتایج کمی و کیفی نشان دادند:

مدل تابع شواهد قطعی (EBF) با در نظر گرفتن سه مؤلفه ی اساسی باور (Bel)، نابوری (Dis) و عدم قطعیت (Unc) توانست پراکندگی خطر سیلاب را با دقت بالاتری نسبت به آنتروپی شانون مدل سازی کند. مقدار شاخص AUC مدل EBF برابر با ۰/۸۳ به دست آمد، در حالی که برای مدل شانون آنتروپی AUC تقریباً ۰/۷۱ محاسبه شد؛ این اختلاف نشان دهنده ی معناداری برتری روش EBF در شرایط داده های ناهمگن و دارای عدم قطعیت است.

نتایج تحلیل وزنی عوامل نشان داد که مؤلفه های ارتفاع، جهت شیب و شیب با مجموع وزنی حدود ۰/۴۸ از کل وزن ها مهم ترین عوامل در فرآیند سیلاب خیزی منطقه هستند، به دلیل تأثیر مستقیم بر تمرکز رواناب، شدت جریان و رژیم بارش های کوهستانی. در مقابل، عوامل هیدرولوژیکی نظیر TWI، فاصله از رودخانه و تراکم زهکشی تأثیری متوسط تا کم در مقیاس حوضه دارند.

تحلیل مکانی نقشه ها بیانگر این است که بخش های میانی تا جنوبی حوضه (مناطق لمسوکلا ی غربی، انجیلک، پتروپیی و بزودپی) دارای بیشترین احتمال وقوع سیلاب بوده و در کلاس خطر زیاد تا بسیار زیاد قرار دارند. نقش متقابل کاربری اراضی و ساختار خاک در این نواحی، اهمیت مدیریت کاربری و اصلاح بیولوژیکی را برجسته می سازد.

مدل آنتروپی شانون با وجود سادگی و قابلیت محاسبات سریع، نسبت به نویز داده ها و عدم قطعیت مکانی حساس است و در نتیجه در مناطق جنگلی و شیب دار شمال کشور نمی تواند روابط چندگانه میان متغیرها را به خوبی مدلسازی کند. مدل EBF به واسطه لحاظ مؤلفه عدم قطعیت در سامانه شواهد، توانسته هم پوشانی دقیق تر بین مناطق بحرانی واقعی و پیش بینی شده را ایجاد کند. ارزیابی عملکرد آماری مدل ها (ROC) نشان داد مدل EBF از سازگاری و اعتبار فضایی بیشتری برخوردار است و به ویژه در هم پوشانی نقشه نواحی بحرانی با مشاهدات میدانی (تطابق حدود ۸۳ درصد) بهترین عملکرد را دارد. این نتیجه کاملاً منطبق با یافته های پژوهشگران قبلی نظیر (Rahmati et al, 2016 و Arabameri et al, 2019 و Pour Ghasemi et al, 2020) در محیط های جنگلی شمال ایران است.

### پیشنهاد های علمی و مدیریتی

**مدل ترکیبی EBF-Entropy (Hybrid Model):** توصیه می شود در مطالعات بعدی، تلفیق مدل EBF با شانون آنتروپی در قالب مدل هیبریدی به منظور بهره گیری هم زمان از قدرت طبقه بندی آماری شانون و توانایی مدیریت عدم قطعیت در EBF انجام گیرد. این ترکیب باعث افزایش هم پوشانی مکانی (Spatial Coherence) و کاهش خطای نوع دوم در نقشه های خطر می شود.

**به کارگیری مدل ها در سیستم GIS و تحلیل چندمقیاسی:** در ادامه، توسعه مدل به صورت لایه محور در محیط GIS جهت تلفیق با داده های بارش های آینده، برای ارزیابی خطرات سیلاب در سناریوهای تغییر اقلیم پیشنهاد می شود.

**توسعه شاخص مدیریت خطر سیلاب (FHRI):** با استفاده از وزن های EBF و ترکیب آنها در تحلیل چندزمانه (Temporal

(Overlay)، می‌توان شاخص خطر سیلابی برای پایش نواحی بحرانی در مقاطع ۵ تا ۱۰ ساله تدوین کرد؛ این شاخص مبنای علمی تصمیم‌گیری‌های اجرایی در مازندران خواهد بود.

**بهبود داده‌های پایه:** توصیه می‌شود از مدل رقومی ارتفاع (DEM) با دقت بالاتر ( $m \geq 10$ ) و داده‌های Sentinel-2 سالانه جهت استخراج دقیق‌تر پارامترهای شیب، TWI و تراکم زهکشی استفاده شود تا خطای محلی مدل کاهش یابد.

**کاربرد مدیریتی و اجرایی:** نتایج این پژوهش می‌تواند به عنوان مبنای علمی برای تعیین مناطق اولویت‌دار اجرای عملیات مکانیکی (مانند پخش سیلاب، بند سنگ و ملاتی) و عملیات بیولوژیکی (احیای جنگل و اصلاح پوشش گیاهی) در حوضه کلارودبار مورد استفاده قرار گیرد.

مدل تابع شواهد قطعی (EBF) در محیط‌های طبیعی پیچیده مانند جنگل‌های هیرکانی شمال ایران، ابزاری هوشمند و کارا برای تحلیل خطر سیلاب است. این مدل با لحاظ آماری عدم قطعیت و توانایی تشخیص اثرات توپوگرافی، عملکردی بسیار مطلوب‌تر از مدل آنتروپی شانون نشان داده و می‌تواند در برنامه‌ریزی مدیریتی حوزه‌های آبریز کشور به عنوان معیار علمی تصمیم‌سازی خطر سیلاب مورد استفاده قرار گیرد.

## منابع

- آذر، علیرضا؛ رحمتی، علیرضا؛ و پورقاسمی، حمیدرضا. (۲۰۲۱). مدل‌سازی خطر سیلاب ناگهانی با استفاده از مدل‌های تابع شواهد قطعی (EBF) و رگرسیون لجستیک در شمال ایران. *فصلنامه تحقیقات آب و محیط‌زیست (Journal of Water and Environment)*، ۳۴(۴)، ۲۲۵-۲۳۹.
- پورقاسمی، حمیدرضا؛ عرب‌عامری، علیرضا؛ و رحمتی، علیرضا (۱۳۹۹). ارزیابی کارایی مدل‌های یادگیری ماشین در پهنه‌بندی خطر سیلاب در ایران. *مجله Geomatics, Natural Hazards and Risk*، ۱۱(۱)، ۱-۲۴.
- توکلی، علی؛ عرب‌عامری، علیرضا؛ و پورقاسمی، حمیدرضا. (۲۰۲۲). ارزیابی مقایسه‌ای مدل‌های آنتروپی شانون و تابع شواهد قطعی (EBF) در برآورد حساسیت به مخاطرات زمین‌شناختی. *نشریه ایرانی سنجش‌ازدور و علوم زمین (Iranian Journal of Remote Sensing)*، ۱۴(۲)، ۹۰-۱۰۸.
- حاجی‌زاده، فاطمه؛ رحمانی، علیرضا؛ و عرب‌عامری، علیرضا. (۲۰۲۱). تلفیق منطق فازی و مدل تابع شواهد قطعی (EBF) برای ارزیابی خطرات هیدرولوژیکی در شمال ایران. *مجله علوم زمین و محیط‌زیست (Environmental Earth Sciences)*، ۸۰(۶)، ۱-۱۵.
- رحمتی، علیرضا؛ رضوی، جلیل؛ حکیمی، اسماعیل؛ و احمدی، سیداحمد (۱۳۹۵). پهنه‌بندی حساسیت به سیلاب با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) و تحلیل تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDA). *مجله علوم هیدرولوژی (Journal of Hydrology)*، ۵۴۴، ۹۱۱-۹۲۳.
- سازمان منابع طبیعی و آبخیزداری مازندران. (۱۳۹۹). گزارش عملکرد سال ۱۳۹۹ اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان مازندران [به زبان فارسی]. (گزارش منتشر نشده). ساری و نوشهر: ادارات کل منابع طبیعی و آبخیزداری مازندران.
- طهرانی، محمدسعید؛ جلیل‌زاده، محمد؛ و فرهانی، سمانه. (۲۰۱۶). مقایسه مدل‌های رگرسیون لجستیک، تابع شواهد قطعی (EBF) و آنتروپی شانون در پهنه‌بندی خطر سیلاب. *مجله علوم هیدرولوژی (Journal of Hydrology)*، ۵۴۰، ۴۶-۵۸.
- عرب‌عامری، علیرضا؛ رحمانی، علیرضا؛ و پورقاسمی، حمیدرضا (۱۳۹۸). پهنه‌بندی خطر سیلاب با استفاده از مدل‌های تابع شواهد قطعی (EBF) و آنتروپی شانون (Shannon Entropy). *مجله CATENA*، ۱۸۰، ۳۵۲-۳۷۳.

## REFERENCE

- Araba Meri, A., Rahmani, A., & Pour Ghasemi, H. R. (2019). Flood hazard zonation using Evidential Belief Function (EBF) and Shannon Entropy models. *CATENA*, 180, 352-373. (In Persian).
- Azareh, A., Rahmati, A., & Pour Ghasemi, H. R. (2021). Flash flood hazard modeling using Evidential Belief Function (EBF) and logistic regression in Northern Iran. *Journal of Water and Environment*, 34(4), 225-239. (In Persian).
- Binaghi, E., Madella, S., & Giampaolo, F. (1998). An evidential reasoning approach in GIS: flood and landslide hazards modeling. *International Journal of Geographical Information Science (Int. J. GIS)*, 12(2), 119-135.

- Dano, U., Gholam Nia, K., R. H. J. Al-Abadi, A. M., & A. Al-Mousawi, A. M. (2019). Flood risk assessment frameworks: a review. *Natural Hazards*, 95, 1–28.
- Hong, H., Li, Y., Liu, J., And Shan, Z. (2017). Flood susceptibility mapping using Shannon Entropy model and Geographic Information System (GIS). *Environmental Earth Sciences*, 76(6), 1–15.
- Hajizadeh, F., Rahmani, A., & Araba Meri, A. (2021). Integrating fuzzy logic and Evidential Belief Function (EBF) for hydrological risk assessment in Northern Iran. *Environmental Earth Sciences*, 80(6), 1-15. (In Persian).
- Jebur, M. N., Pradhan, B., & Tehrani, M. S. (2014). Landslide susceptibility mapping using a novel ensemble-based neuro-fuzzy model in GIS. *Landslides: Journal of the International Consortium on Landslides*, 11(2), 317–331.
- Mazandaran Natural Resources and Watershed Management Organization. (2020/2021). *Performance report for 2020/2021*. (Unpublished report). Mazandaran Natural Resources and Watershed Management Organization. (In Persian).
- Pour Ghasemi, H. R., Pradhan, B., Gokceoglu, C., & Moein, J. P. (2014). Application of fuzzy logic and analytical hierarchy process (AHP) for landslide susceptibility mapping in the Kerman area, Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 7(11), 4785–4799. (In Persian).
- Pour Ghasemi, H. R., Araba Meri, A., & Rahmati, A. (2020). Efficiency assessment of machine learning models for flood hazard zonation in Iran. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 11(1), 1–24. (In Persian).
- Pradhan, B. (2010). Application of Shannon Entropy model for landslide susceptibility mapping. *Landslides: Journal of the International Consortium on Landslides*, 7(4), 317–325.
- Rahmati, A., Razavi, J., Hakimi, E., & Ahmadi, S. (2016). Flood susceptibility zonation using Geographic Information System (GIS) and Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA). *Journal of Hydrology*, 544, 911–923. (In Persian).
- Tavakoli, A., Araba Meri, A., & Pour Ghasemi, H. R. (2022). Comparative evaluation of Shannon Entropy and Evidential Belief Function (EBF) models for geo-hazard susceptibility. *Iranian Journal of Remote Sensing*, 14(2), 90–108. (In Persian).
- Tehrani, M. S., Jalal Zadeh, M., & Farahani, S. (2016). Comparing logistic regression, Evidential Belief Function (EBF), and Shannon Entropy models for flood hazard mapping. *Journal of Hydrology*, 540, 46–58. (In Persian).
- World Meteorological Organization (WMO). (2021). *The state of climate services 2021: Water* (WMO-No. 1278).
- Zhao, G., Pang, B., Xu, Z., Peng, D., Li, Y., & Cui, X. (2020). Flood susceptibility mapping using a novel deep learning model (CNN-LSTM) in a mountainous area. *Journal of Hydrology*, 590, 125345.