

## A Comparative Assessment of Site Suitability for Flood-Spreading Systems Using Sugeno FIS, Random Forest, AHP, and WLC

Ali Heshmatpour<sup>1\*</sup>, Masoumeh Farasti<sup>2</sup>, Yusuf Mohammadian<sup>3</sup>

1. **Corresponding Author**, Associate Professor, Department of Rangeland and Watershed Management, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Gonbad Kavous University, Gonbad Kavous, Golestan, Iran.

Email: [heshmatpour@gonbad.ac.ir](mailto:heshmatpour@gonbad.ac.ir) ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4503-1751>

2. Associate Professor, Department of Rangeland and Watershed Management, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Gonbad Kavous University, Gonbad Kavous, Golestan, Iran.

3. Graduate, Department of Rangeland and Watershed Management, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Gonbad Kavous University, Gonbad Kavous, Golestan, Iran.

| Article Info                                                                                                              | ABSTRACT                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Article type:</b><br><b>Research Article</b>                                                                           | <p>In Iran, floods are considered the most destructive natural disaster after earthquakes and cause extensive annual economic, social, and infrastructural losses. Flood spreading systems are one of the nature-based solutions for reducing flood peaks, controlling the destructive energy of runoff, and reducing the vulnerability of downstream infrastructure to hydrological hazards; however, their optimal location remains a methodological challenge because of the inability of common models to manage spatial uncertainty. This study used a GIS-based Sugeno FIS fuzzy inference system to investigate 14 geographic and environmental factors in the Qavijaq watershed in northern Iran. First, 14 environmental factors were weighted by nine experts, and five main factors were identified. A final map was then prepared using 32 hierarchical fuzzy rules in a GIS context. Finally, this map was validated with 125 independent field points, and its performance was compared with the AHP, WLC, and Random Forest models. The results of the weighting based on the judgment of nine experts (average consistency ratio = 0.074 CR) showed that slope (12.8%), distance from the river (11.6%), land use (10.4%), distance from the road (9.2%), and geology (9.9%) were the five main controlling factors for flood spread localization in the study area. Quantitative validation of the model using 125 independent field control points, including 70 documented flood points from the 2019 and 2022 events and 55 non-flood points, showed that the Sangofuzzy inference system performed well, with an area under the ROC curve of AUC = 0.76 (kappa coefficient = 0.53 κ, and overall accuracy of 84.3%). This model also significantly outperformed (DeLong test) the AHP (AUC=0.741), WLC (AUC=0.718), and Random Forest (AUC=0.843) methods. The findings of this study showed that the GIS-based Sango fuzzy inference system, using 14 criteria and 32 hierarchical rules, is a more efficient tool.</p> |
| <b>Article history:</b>                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| <b>Received:</b> ---                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| <b>Revised:</b> ---                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| <b>Accepted:</b> ---                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| <b>Published:</b> ---                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| <b>Keywords:</b><br>Crisis Management;<br>Environmental<br>Vulnerability; Flood;<br>Natural Disasters; Risk<br>Reduction. |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |

**How to Cite:** Last Name, Initial., Last Name, Initial., & Last Name, Initial. (2021). Title of paper. *Journal of Natural Environmental Hazards*, -- (--), ----.



© The Author/Authors

DOI: 000000000000000000

**Publisher:** University of Sistan and Baluchestan

## **EXTENDED ABSTRACT**

### **INTRODUCTION**

In Iran, floods are considered the most destructive natural disaster after earthquakes and cause extensive economic, social, and infrastructural losses. Simultaneously, the country is located in an arid and semi-arid belt and faces a water scarcity crisis and successive droughts (Velásquez-Espinoza & Alcántara-Ayala, 2025). In such circumstances, flood diversion systems that use flood flows to artificially recharge aquifers are considered an efficient approach to integrated water resource management under climate change (Karimi et al., 2024; Zarkesh, 2005). However, the optimal location of these systems remains a methodological challenge owing to the inability of common models to manage spatial uncertainty and the gradual behavior of environmental variables (Hashemi et al., 2015). This study aimed to use the Sugeno fuzzy inference system (FIS) based on a geographic information system (GIS) to identify and prioritize areas susceptible to flood diversion in the Qavijaq watershed (eastern Golestan province). The innovation of this study is the simultaneous application of 32 hierarchical rules in loess basins, the presentation of a three-level combined sensitivity analysis framework (criteria weights, membership functions, and fuzzy rules), and the quantitative comparison of the performance of this model with conventional AHP, WLC, and random forest machine learning algorithms under limited field data conditions.

### **DATA AND METHODOLOGY**

Based on the research background and geoenvironmental conditions of the region, 14 factors, including slope, slope direction, geology, distance from fault, land use type, vegetation, soil depth, soil texture, permeability, elevation classes, drainage density, distance from river, distance from road, and distance from residential areas, were selected. Precipitation was not included as an independent layer in the model because of spatial homogeneity (spatial variation coefficient of 8.2% less than the threshold of 15%) and conceptual overlap with variables such as drainage density and vegetation cover. The criteria were weighted using the judgment of nine experts (including university professors, senior engineers of the regional water organization, and local experts) and completing 14×14 pairwise comparison matrices Table 1. The average consistency ratio (CR) of the judgments was 0.074 (range: 0.052–0.089), indicating acceptable consistency. The zero-order Sango fuzzy inference model was used, in which the output of each rule was a constant value (flood spreading desirability) in the interval [0, 1]. Membership functions were defined as trapezoidal with four characteristic points (a, b, c, d), whose thresholds were adjusted based on a review of specialized literature, national guidelines of the regional water organization, and an initial sensitivity analysis using ten independent field control points. The rule base consisted of 32 hierarchical rules at three levels: (1) screening rules (slope greater than 12% or distance from the river less than 500 m → completely unsuitable category); (2) positive prioritization rules (slope less than 4%, distance from the road more than 400 m, and pasture or dryland use → desirability above 0.7); and (3) compensation rules (in the presence of an undesirable criterion, the output decreases linearly but does not reach zero). The implementation was carried out in the ArcGIS 10.8 environment with vector coding in Python using the NumPy and Rasterio libraries.

**Table 1. Statistical values and final weights of criteria (based on the opinions of 9 experts)**

| Criterion                           | Geometric Mean of Scores | Standard Deviation | CV (%) | Normalized Weight (%) |
|-------------------------------------|--------------------------|--------------------|--------|-----------------------|
| Distance from river (m)             | 8.21                     | 1.14               | 13.9   | 11.6                  |
| Distance from road (m)              | 7.03                     | 1.32               | 18.8   | 9.2                   |
| Slope (%)                           | 8.45                     | 0.98               | 11.6   | 12.8                  |
| Aspect                              | 4.16                     | 1.57               | 37.7   | 4.3                   |
| Geology                             | 7.82                     | 1.21               | 15.5   | 9.9                   |
| Distance from fault (m)             | 6.34                     | 1.48               | 23.3   | 5.7                   |
| Land use type                       | 8.03                     | 1.05               | 13.1   | 10.4                  |
| Vegetation cover                    | 7.44                     | 1.27               | 17.1   | 6.9                   |
| Soil depth (cm)                     | 5.67                     | 1.63               | 28.8   | 5.6                   |
| Soil texture                        | 5.12                     | 1.55               | 30.3   | 5.8                   |
| Infiltration rate (cm/h)            | 6.89                     | 1.39               | 20.2   | 5.6                   |
| Elevation classes (m)               | 4.45                     | 1.71               | 38.4   | 4.1                   |
| Drainage density                    | 6.21                     | 1.52               | 24.5   | 4.2                   |
| Distance from residential areas (m) | 5.03                     | 1.45               | 29.4   | 3.9                   |
| Total                               | —                        | —                  | —      | 100                   |

## RESULTS AND DISCUSSION

Based on expert judgment, the five main controlling factors were slope (12.8%), distance from the river (11.6%), land use (10.4%), geology (9.9%), and distance from the road (9.2%). The final spatial suitability map showed that only 7.4% of the catchment area (approximately 12.7 km<sup>2</sup>) fell into the “fully suitable” category, 13.2% “fairly suitable,” 1.9% “suitable,” 17% “unsuitable,” and 60.5% “completely unsuitable. The proposed model, with an area under the ROC curve of 0.862 (95% confidence interval: 0.84 0.90), a kappa coefficient of 0.72, and an overall accuracy of 84.3%, showed good performance in distinguishing flood-prone from non-flood-prone areas Figure 1

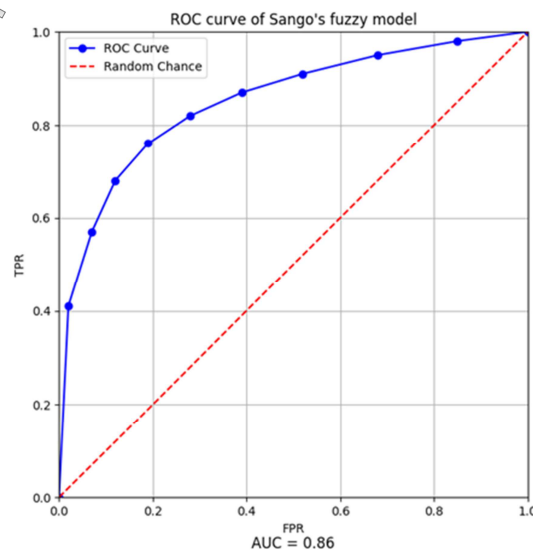


**Figure 1.** ROC curve of the performance of the Sango fuzzy inference model in distinguishing flood-prone areas (positive) from non-prone areas (negative)

Field investigations of highly suitable areas also confirmed the high agreement between the model output and the ground reality. The Sango fuzzy model significantly (based on the DeLong test with a p-value of < 0.05) outperformed the other three methods. The largest decrease in AUC (from 0.862 to

0.841) occurred when the slope weight was reduced by 20%, indicating the key role of this criterion in determining AUC. A 20% increase in distance from the river reduced AUC to 0.843. Changes in land use and geology weights had a negligible effect (less than 0.015) on AUC. Changing the membership function thresholds also resulted in a maximum decrease in the AUC of 0.015 units, indicating the relatively good robustness of the model to threshold uncertainty.

## CONCLUSION

The results showed that the widespread and uniform development of flood diversion systems in the Qavijaq Basin is not technically or economically feasible. In the face of large floods, the necessity of targeted siting and combining these systems with other flood management strategies (such as local catchments, land use modification, and vegetation restoration) is revealed. The present study emphasizes that the incorrect selection of flood diversion sites can lead to severe hydrological and socio-economic consequences. Therefore, strengthening field data collection, real-time monitoring, and interdisciplinary cooperation between water managers, urban planners, and local communities is essential to increase the accuracy of predictions and reduce the vulnerability of infrastructure to flooding. The model presented in this study, with its high interpretability and favorable numerical performance, can be used as an efficient tool in similar semi-arid loess basins after parameter adjustment based on local conditions.

## ETHICAL CONSIDERATIONS

**Conflict of Interest Statement:** The authors declare no conflicts of interest.

**Ethical Statement:** This article does not contain any studies involving human participants or animals performed by any of the authors.

## ACKNOWLEDGMENTS

The authors would like to express their endless gratitude to Ali Heshmatpour, the deceased corresponding author of this work, whose knowledge and kindness illuminated the path of this research. Collaborating with him was a great honor. May his memory be cherished and his path continue to be followed.

## REFERENCES

### References [in Persian]

- Hashemi, H., Berndtsson, R., & Persson, M. (2015). Artificial recharge by floodwater spreading estimated by water balances and groundwater modelling in arid Iran. *Hydrological Sciences Journal*, 60(2), 336–350. <https://doi.org/10.1080/02626667.2014.881485> (In Persian)
- Karimi, S. E., Yousefi, M. E., Vayskarami, I., & Vayskarami, F. (2024). Investigating the Effect of Floodwater Spreading on Soil Infiltration (Case Study: Davudrashid Kouhdasht Floodwater Spreading Station). (In Persian)

### References [in English]

- Velásquez-Espinoza, G., & Alcántara-Ayala, I. (2025). Flood risk perception and preparedness in Nicaraguan educational contexts: A study of student perspectives. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 120, 105375.
- Zarkesh, M. K. (2005). *Decision support system for floodwater spreading site selection in Iran*. Wageningen University and Research.

## ارزیابی تناسب مکانی سامانه های پخش سیلاب با استفاده از Sugeno FIS، WLC و AHP، Random forest

علی حشمت پور<sup>۱\*</sup>، معصومه فراستی<sup>۲</sup>، یوسف محمدیان<sup>۳</sup>

۱. دانشیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه گنبد کاووس، گنبد کاووس، گلستان، ایران (نویسنده مسئول)

ایمیل: [heshmatpoor@gonbad.ac.ir](mailto:heshmatpoor@gonbad.ac.ir)، [ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4503-1751](https://orcid.org/0000-0003-4503-1751)

۲. دانشیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه گنبد کاووس، گنبد کاووس، گلستان، ایران

۳. دانش آموخته گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه گنبد کاووس، گنبد کاووس، گلستان، ایران

| اطلاعات مقاله                                                                                                                                                                                                                                    | چکیده                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>نوع مقاله:</p> <p>مقاله پژوهشی</p> <p>تاریخ دریافت: /-/</p> <p>تاریخ ویرایش: -/-/-</p> <p>تاریخ پذیرش: -/-/-</p> <p>تاریخ انتشار: -/-/-</p> <p>واژه های کلیدی:</p> <p>بلاای طبیعی، سیلاب، مدیریت بحران، آسیب پذیری محیطی، تقلیل خطرپذیری.</p> | <p>در ایران، سیلاب پس از زلزله از مخرب ترین بلای طبیعی محسوب می شود و سالانه خسارات گسترده ای در ابعاد اقتصادی، اجتماعی و زیرساختی تحمیل می کند. سامانه های پخش سیلاب، یکی از راهکارهای مبتنی بر طبیعت برای کاهش پیک سیلاب، مهار انرژی مخرب روانابها و کاهش آسیب پذیری زیرساخت های پایین دست در برابر مخاطرات هیدرولوژیکی است. اما مکان یابی بهینه آن ها به دلیل ناتوانی مدل های رایج در مدیریت عدم قطعیت مکانی، چالشی روش شناختی باقی مانده است. مطالعه حاضر با استفاده از یک سیستم استنتاج فازی سانگو (Sugeno FIS) مبتنی بر GIS به بررسی ۱۴ عامل جغرافیایی و محیطی در حوضه آبخیز قویچق در شمال ایران می پردازد. ابتدا با نظر ۹ کارشناس، ۱۴ عامل محیطی وزن دهی شدند و ۵ عامل اصلی مشخص گردید. سپس با استفاده از ۳۲ قانون فازی سلسله مراتبی در بستر GIS، نقشه نهایی تهیه شد. در نهایت، این نقشه با ۱۲۵ نقطه میدانی مستقل اعتبارسنجی شده و عملکرد آن با مدل های AHP، WLC و Random Forest مقایسه گردید. نتایج وزن دهی مبتنی بر قضاوت ۹ کارشناس (میانگین نسبت سازگاری <math>CR=0.074</math>) نشان داد که به ترتیب شیب (<math>0.12/8</math>)، فاصله از رودخانه (<math>0.11/6</math>)، کاربری اراضی (<math>0.10/4</math>)، فاصله از جاده (<math>0.09/2</math>) و زمین شناسی (<math>0.09/9</math>) پنج عامل کنترل کننده اصلی مکان یابی پخش سیلاب در منطقه مورد مطالعه هستند. اعتبارسنجی کمی مدل با استفاده از ۱۲۵ نقطه کنترل میدانی مستقل شامل ۷۰ نقطه سیلاب خیز مستند از رویدادهای ۱۳۹۸ و ۱۴۰۱ و ۵۵ نقطه غیر سیلاب خیز نشان داد که سیستم استنتاج فازی سانگو با سطح زیر منحنی ROC معادل <math>AUC=0.86</math>، ضریب کاپا <math>K=0.53</math> و دقت کلی <math>0.76</math> عملکرد خوبی را نشان داد. این مدل همچنین به طور معناداری (آزمون DeLong) از روش های <math>AUC(AHP)=0.741</math>، <math>AUC(WLC)=0.718</math> و <math>AUC(Random\ Forest)=0.843</math> بهتر عمل کرد. یافته های این پژوهش نشان داد که سیستم استنتاج فازی سانگو مبتنی بر GIS با به کارگیری ۱۴ معیار و ۳۲ قانون سلسله مراتبی، ابزاری کارآمدتر برای مکان یابی پخش سیلاب است.</p> |

استناد: نام خانوادگی، نام؛ نام خانوادگی، نام؛ نام خانوادگی، نام (۱۴۰۰). عنوان مقاله. مخاطرات محیط طبیعی، --، (--)، ---

# این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

## مقدمه

در دهه های گذشته، حدود ۱/۷ میلیارد نفر تحت تأثیر بلایای مرتبط با تغییرات اقلیمی قرار گرفته اند؛ سیل، طوفان و موج های گرما از جمله شایع ترین و مخرب ترین خطرات محسوب می شوند (ولاسکز و آلكانتارا<sup>۱</sup>، ۲۰۲۵). از سویی دیگر کمبود آب به عنوان یکی از مهم ترین چالش های قرن بیست و یکم، به ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک جهان، امنیت آبی، تولید غذا و پایداری اکوسیستم ها را با تهدیدی جدی مواجه ساخته است (دوست محمدی و حسینی، ۱۴۰۵ و رامک و زیدالی<sup>۲</sup>، ۲۰۲۱). این اثرات به ویژه در کشورهایی مانند ایران که در کمربند خشک و نیمه خشک واقع شده اند، تشدید می شود. در این میان، سفره های آب زیرزمینی به عنوان اصلی ترین منبع تأمین آب شیرین در این مناطق، با برداشت بی رویه و افت شدید سطح تراز مواجه هستند که این امر منجر به عدم تعادل آبخوان و بروز پیامدهای زیست محیطی جبران ناپذیری شده است (رامک و زیدالی، ۲۰۲۱ و زرکش<sup>۳</sup>، ۲۰۰۵). در چنین شرایطی، رواناب های سطحی ناشی از سیلاب های فصلی که به طور سنتی به عنوان یک بلای طبیعی و عامل تخریب شناخته می شوند، می توانند به عنوان یک منبع ارزشمند و حیاتی برای تغذیه مجدد آبخوان ها و جبران کسری مخازن آب زیرزمینی مورد استفاده قرار گیرند (کریمی و همکاران، ۱۴۰۳ و زرکش، ۲۰۰۵). سامانه های پخش سیلاب به عنوان یکی از مؤثرترین و قدیمی ترین راهکارهای مدیریت منابع آب، با هدف بهره برداری بهینه از رواناب های سطحی و تغذیه مصنوعی سفره های آب زیرزمینی، در بسیاری از کشورهای واقع در کمربند خشک و نیمه خشک جهان از جمله ایران، اتیوپی و اریتره مورد استفاده قرار گرفته اند (هاشمی<sup>۴</sup> و همکاران، ۲۰۱۵ و رامک و زیدالی، ۲۰۲۱). این سامانه ها با شبکه ای از کانال ها و سازه های کوچک، آب سیلاب را از بستر رودخانه منحرف و به صورت کنترل شده در سطح وسیعی پخش می کنند. این روش با کاهش سرعت جریان و افزایش زمان ماندگاری آب، اجازه می دهد آب به آرامی به دل خاک نفوذ کرده و سفره های آب زیرزمینی را تغذیه کند و ضمن کاهش خطرات سیلاب و کنترل رسوب، به احیای پوشش گیاهی، افزایش حاصلخیزی خاک و مقابله با بیابان زایی کمک شایانی می کنند (زرکش، ۲۰۰۵). با وجود سابقه طولانی و مزایای متعدد، این سامانه ها با چالش های اساسی از جمله کاهش تدریجی نفوذپذیری بر اثر تجمع رسوبات ریزدانه حمل شده توسط سیلاب مواجه هستند که کارایی آن ها را در بلندمدت به شدت تحت تأثیر قرار می دهد (اسلامی و عباسی، ۱۴۰۴ و کریمی و همکاران، ۱۴۰۳).

انتخاب مکان مناسب برای احداث این سامانه ها، یکی از حیاتی ترین مراحل در تضمین موفقیت آن هاست که مستلزم در نظر گرفتن مجموعه وسیعی از معیارهای زمین شناسی، هیدرولوژیکی، خاک شناسی و اقتصادی-اجتماعی است (دوست محمدی و حسینی<sup>۵</sup>، ۲۰۲۶ و زرکش، ۲۰۰۵). اگرچه هیچ روشی نمی تواند جای بازرسی های میدانی دقیق، جمع آوری داده های قابل اعتماد و مشارکت متخصصان باتجربه را بگیرد، استفاده از تصاویر هوایی و نقشه های موضوعی از جمله نقشه های توپوگرافی، زمین شناسی (سطحی و زیرسطحی)، تبخیر و تعرق، و بارش، و همچنین نقشه های پوشش گیاهی، زیرساخت های موجود، کاربری زمین و پتانسیل سیلاب در حوضه های بالادست می تواند به طور چشمگیری به رسیدن به این هدف کمک کند (وهابی، ۱۳۸۲). در سال های اخیر، پیشرفت های چشمگیر در سامانه های اطلاعات جغرافیایی (GIS)، سنجش از دور (RS) و روش های تصمیم گیری چندمعیاره (MCDM) مانند

<sup>1</sup>Velásquez-Espinoza & Alcántara-Ayala

<sup>2</sup>Ramak & Zeidali

<sup>3</sup>Zarkesh

<sup>4</sup>Hashemi

<sup>5</sup>Doostmohamadi & Hosseini

## این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و منطق فازی، امکان مکان‌یابی دقیق‌تر و علمی‌تر این عرصه‌ها را فراهم آورده است (دوست محمدی و حسینی، ۲۰۲۶). با این حال، علیرغم پژوهش‌های گسترده، همچنان شکاف‌های دانشی قابل توجهی در زمینه بهینه‌سازی طراحی، پیش‌بینی عملکرد بلندمدت، مدیریت رسوب و ارزیابی جامع اثرات اکولوژیک و اقتصادی این سامانه‌ها وجود دارد که نیازمند بررسی‌های نظام‌مند و فراترکیب است (هاشمی و همکاران، ۲۰۱۵).

مطالعات مبتنی بر روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره مانند AHP، TOPSIS و VIKOR در شناسایی مناطق مستعد پخش سیلاب نتایج نسبتاً همگرایی دارند، چزگی و سهیلی (۱۳۹۹) با استفاده از TOPSIS و VIKOR در شهرستان تایباد، شیب، فاصله از رودخانه و لیتولوژی را به عنوان سه عامل اصلی معرفی کردند. همچنین قادر<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۲۴) در بنگلادش و آلوئی<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۲۴) در قطر نیز به نتایج مشابهی دست یافتند. پهلوانی<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۲۲) با ارائه یک مدل ترکیبی مکان‌مبنا تأکید کردند که در نظر گرفتن خودهمبستگی مکانی در ارزیابی خطر سیلاب ضروری است. همچنین میرموسوی و اسمعیلی (۱۴۰۰) کارایی بالای ترکیب مدل‌های تصمیم‌گیری با سنجش از دور (RS) را در پهنه‌بندی مناطق سیل‌خیز اثبات نمودند. با این حال، این رویکردها در مدیریت عدم قطعیت مکانی محدودیت ذاتی دارند، زیرا مرزهای بین طبقات معیار را قطعی فرض می‌کنند، در حالی که در واقعیت این مرزها تدریجی هستند و رفتار هیدرولوژیکی به صورت پیوسته تغییر می‌کند (مالک‌زوسکی و رینر<sup>۴</sup>، ۲۰۱۵). این محدودیت به ویژه در محیط‌های نیمه‌خشک با تغییرات سریع مکانی و زمانی رواناب، می‌تواند منجر به خطای قابل توجه در اولویت‌بندی مناطق شود. در پاسخ به محدودیت رویکردهای کلاسیک، سیستم‌های استنتاج فازی توانایی بیشتری در مدل‌سازی مرزهای تدریجی و عدم قطعیت ذاتی داده‌های مکانی دارند. مطالعه‌ای در حوضه گرگانرود (عظیمی و همکاران، ۱۳۹۷) از GIS و AHP برای مکان‌یابی و اولویت‌بندی مناطق مناسب پخش سیلاب استفاده کردند. این مطالعه نشان داد که روش بولین دوارزشی برای مکان‌یابی مناطق مناسب پخش سیلاب در این حوضه مناسب نیست. نقیبی<sup>۵</sup> و همکاران (۲۰۱۹) سه الگوریتم Frequency Ratio (FR)، k-nearest Neighbours (KNN) و Random Forest (RF) را برای تعیین تناسب اراضی برای پروژه‌های پخش سیلاب در ایران به کار بردند. نتایج این مطالعه نشان داد که مدل Random Forest با AUC برابر ۹۷/۱٪ بهترین عملکرد را در تفکیک مناطق مناسب از نامناسب داشته است و پس از آن KNN با ۹۴/۶٪ و FR با ۸۹/۲٪ قرار گرفتند. همچنین متغیرهای تراکسیویتی<sup>۶</sup>، شیب، ضخامت آبخوان، فاصله از رودخانه، بارش و هدایت الکتریکی به عنوان تأثیرگذارترین عوامل در مدل‌سازی شناخته شدند. پیروزی و همکاران (۱۴۰۳) در مطالعه شهرستان خلخال نشان دادند رویکرد فازی نسبت به MCDM کلاسیک عملکرد بهتری دارد. با این حال، مقایسه مطالعات فازی نشان می‌دهد که اولویت‌بندی معیارها در حوضه‌های مختلف نتایج متناقضی دارد: در حوضه‌های کوهستانی با تنوع لیتولوژیک بالا (مانند خلخال)، زمین‌شناسی به عنوان مهم‌ترین عامل شناسایی می‌شود (پیروزی و همکاران، ۱۴۰۳)، در مطالعات انجام‌گرفته در مناطق جلگه‌ای و دشت‌های رسوبی با پوشش یکنواخت آبرفت‌های کواترنری، وزن این معیار به مراتب پایین‌تر است. به عنوان نمونه، چزگی و سهیلی (۱۳۹۹) در حوضه تایباد که عمدتاً تحت تأثیر واحدهای لسی و آبرفتی است،

<sup>1</sup> Kader

<sup>2</sup> Aloui

<sup>3</sup> Pahlavani

<sup>4</sup> Malczewski & Rinner

<sup>5</sup> Naghibi

<sup>6</sup> Transmissivity

## این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

زمین‌شناسی را جزء سه عامل اصلی (شیب، فاصله از رودخانه، لیتولوژی) گزارش کردند، در حالی که این معیار در اولویت‌بندی نهایی از دو عامل انسانی (فاصله از جاده و مناطق مسکونی) پایین‌تر قرار گرفت. یوسفی و همکاران (۱۳۹۹) نیز در مطالعه خرم‌آباد الگوی مشابهی را گزارش کردند. این تناقض ظاهری در واقع نشان‌دهنده وابستگی مکانی مدل‌های فازی است، نه ضعف روش؛ به این معنا که مدل‌های فازی قادر به انعکاس ویژگی‌های بومی هر حوضه هستند، اما این ویژگی نیازمند تفسیر منطقه‌ای و تطبیق با شرایط محلی است. همچنین در سال‌های اخیر، مطالعات متعددی به کارگیری الگوریتم‌های یادگیری ماشین مانند Random Forest و Gradient Boosting را برای پیش‌بینی مناطق سیل‌خیز پیشنهاد کرده‌اند. ملکی نیا و همکاران (۱۴۰۰) و آیت ناسور<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۲۴) نشان دادند این مدل‌ها در شرایط وجود داده‌های آموزشی کافی، دقت بالاتری نسبت به روش‌های سنتی دارند. با این حال، این برتری مشروط به وجود حجم کافی داده آموزشی است. در حوضه‌های کم‌داده که نقاط کنترل میدانی محدودی وجود دارد، این مدل‌ها به شدت دچار بیش‌برازش<sup>۲</sup> شده و قابلیت تفسیر مکانی پایینی دارند. علاوه بر این، عدم شفافیت در مکانیسم تصمیم‌گیری مدل‌های یادگیری ماشین، آن‌ها را برای کاربردهای عملی مدیریت سیلاب که نیاز به توجیه پذیری دارند، کمتر مناسب می‌سازد. در مقابل، سیستم استنتاج فازی سانگو با ترکیب دانش خبره (برای تعریف قوانین) و بهینه‌سازی مبتنی بر داده (برای تخمین پارامترهای نتیجه)، تعادل بهتری بین دقت عددی و تفسیرپذیری مکانی ایجاد می‌کند. این روش در عین حال که قادر به مدل‌سازی عدم قطعیت است، خروجی آن به وسیله قوانین فازی قابل توضیح بوده و برای حوضه‌های با داده‌های محدود مناسب می‌باشد (راس<sup>۳</sup>، ۲۰۰۵).

مرور ادبیات نشان می‌دهد که اگرچه مطالعات متعددی در زمینه مکان‌یابی پخش سیلاب انجام شده است، اما شکاف‌های پژوهشی قابل توجهی وجود دارد. اولاً، مطالعات پیشین عمدتاً بر AHP، WLC یا منطق فازی Mamdani متمرکز بوده‌اند و کاربرد سیستم استنتاج فازی Sugeno با قوانین سلسله‌مراتبی در این زمینه نادر است. زرکش (۲۰۰۵) یک سیستم پشتیبانی تصمیم مبتنی بر AHP فضایی ارائه داد، اما از مدل‌سازی عدم قطعیت با منطق فازی بهره نبرد. مطالعه‌ای در حوضه گرگانرود عظیمی و همکاران (۱۳۹۷) از GIS و AHP استفاده کرد و نقیبه و همکاران (۲۰۱۹) الگوریتم‌های Frequency Ratio، KNN و Random Forest را برای تناسب پخش سیلاب به کار بردند. ثانیاً، چارچوب تحلیل حساسیت جامعی که همزمان وزن معیارها، توابع عضویت و قوانین فازی را بررسی کند، ارائه نشده است. ثالثاً، مقایسه کمی بین Sugeno FIS و روش‌های رایج مانند AHP، WLC و Random Forest در یک چارچوب یکسان گزارش نشده است. رابعاً، حوضه‌های لسی نیمه‌خشک با شرایط هیدرومورفولوژیکی خاص (مانند حوضه‌های شمالی استان گلستان) تاکنون به‌طور اختصاصی در مکان‌یابی پخش سیلاب بررسی نشده‌اند.

مطالعه حاضر با پر کردن این شکاف‌ها، سه نوآوری اصلی را ارائه می‌دهد: نخستین کاربرد Sugeno FIS با ۳۲ قانون سلسله‌مراتبی سه‌سطحی در مکان‌یابی پخش سیلاب در یک حوضه لسی نیمه‌خشک؛ نخستین ارائه چارچوب تحلیل حساسیت ترکیبی سه‌سطحی؛ مقایسه کمی جامع بین Sugeno FIS و سه روش رایج AHP، WLC و Random Forest در یک مجموعه داده ارزیابی یکسان؛ و نخستین کاربرد در حوضه‌های نیمه خشک استان گلستان با خاک‌های لسی که نتایج آن قابلیت تعمیم به حوضه‌های مشابه در مناطق نیمه‌خشک را دارد.

<sup>1</sup> Ait Naceur

<sup>2</sup> over-fitting

<sup>3</sup> Ross

## این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

استان گلستان در جنوب شرقی دریای خزر واقع شده است. این استان به دلیل وجود سامانه های متعدد و موثر بر اقلیم همچون پرفشار سبیری، کم فشار مدیترانه ای و کم فشار سودانی موجب پیچیدگی پیش بینی وضع هوا شده است. زیرا که هر کدام از سامانه های فوق موجب بروز آب و هوای خاص خود بر روی این استان می باشد. (پژوهشکده هواشناسی، ۱۳۹۶). علاوه بر این، خشکسالی های پیاپی نیم قرن گذشته و حتی قبل از آن، خطه شمال ایران پذیرای کسانی بوده است که می توان آن ها را مهاجران اقلیمی نامید. افزایش جمعیت این خطه، تقاضای آب و مسکن را به شدت افزایش داد و بخشی از جنگل ها قطع شده و حریم رودخانه ها به اراضی شهری ملحق شد. از سوی دیگر طبق تحقیقات کارشناسان، سطح مسیر سیلاب و اراضی اطراف نهشته های ریزدانه لس با ۳۰ درصد تقریبی رس پوشانده است (رجبی زاده و همکاران، ۱۳۹۸). مجموعه این عوامل سبب شده است که این استان جزء مناطق پر خطر از نظر سیل باشد، سوابق تاریخی نیز نشان می دهند در دو دهه اخیر، استان گلستان با چندین سیلاب ویرانگر مواجه شده؛ به ویژه وقایع شدید سال های ۱۳۸۰، ۱۳۹۸ و ۱۴۰۱ که خسارات گسترده ای به اراضی کشاورزی و زیرساخت های کلیدی، به ویژه در مراکز جمعیتی و شمالی وارد کرد. یکی از بارزترین نمونه های این حوادث، سیلاب ویرانگر سال ۱۳۸۰ بود که جریان رودخانه گرگانرود به حدود ۳/۰۱۷ مترمکعب بر ثانیه رسید و عرض رودخانه از ۱۰ متر به بیش از ۴۰۰ متر گسترش یافت (گزارش اجتماعی- بررسی علل وقوع سیل گلستان، ۱۳۸۰). همچنین واقعه سیل در فروردین ماه سال ۱۳۹۸ عواقب قابل توجهی را از حیث آسیب ها و خسارات وارده به همراه داشت. ۲۵ استان از ۳۱ استان کشور دچار سیل شدند؛ بیش از ۷۸ نفر جان خود را به ویژه در اثر سیلاب های ناگهانی از دست دادند؛ ۱۰ میلیون نفر تحت تاثیر این حادثه واقع شده و پانصد هزار نفر آواره شدند که نیمی از آنان کودک بودند. بر اثر این بارندگی های شدید سدهای بوستان و گلستان در شرق استان گلستان سرریز شدند و رودخانه های چهل چای و گرگان رود در اطراف گنبدکاووس از توابع استان گلستان طغیان کنند. طبق گزارش ها مقدار جریان ذخیره شده در مخازن سد بوستان و گلستان از بیلان جریان ورودی و خروجی از مخزن سدهای بوستان و گلستان و بر اساس گزارش های اعلام شده در بازه زمانی ۱۳۹۷/۱۲/۲۷ تا ۱۳۹۸/۱/۸، حجم سیلاب ورودی به سد بوستان ۳۱ میلیون متر مکعب و حجم سیلاب خروجی ۲۱ میلیون متر مکعب و حجم سیلاب ورودی به سد گلستان ۱۵۵ میلیون متر مکعب و حجم سیلاب خروجی ۱۴۶ میلیون متر مکعب برآورد شده است. در این حادثه طبیعی، طی دو روز ۳۰۰ میلی متر بارش رخ داده که بیش از ۶۶ درصد متوسط بارش یک ساله استان گلستان (۴۵۰ میلی متر) است. گزارش ها بیان کننده آن است که در دیگر مناطق این استان نیز با بارشی بین ۵۰ تا ۷۰ درصد کل بارش سالانه در بازه زمانی کمتر از پنج روز روبرو بوده اند (رجبی زاده و همکاران، ۱۳۹۸). بلافاصله بعد از رخداد این سیلاب و زمین لغزش ها در فروردین ماه سال ۱۳۹۸ سازمان ملل به درخواست سازمان برنامه و بودجه ای دولت ایران، مسئولیت ارزیابی نیازهای بازسازی و بازتوانی پس از بلایای طبیعی در سه استان منتخب گلستان، لرستان و خوزستان را بر عهده گرفت. همچنین میزان کل صدمه های وارده ای ناشی از سیلاب ها حدود ۱۲۸۰۴۳،۰۳ میلیارد ریال برآورد شده است (گزارش ارزیابی نیازهای بازسازی و بازتوانی پس از بلایای طبیعی، مهرماه ماه ۱۳۹۸). مجموعه عوامل مذکور نشان می دهد که استان گلستان نه فقط یک پهنه ای اقلیمی متاثر از سامانه های دوردست، بلکه یک سیستم اجتماعی-اکولوژیک شکننده است که تغییرات کاربری و زمین شناسی خاص آن، شدت سیلاب های ناشی از رخدادهای همدیدی را به طور نمایی افزایش می دهد. از سوی دیگر، وقوع تاریخی سیلاب در یک مکان، به تنهایی نشان دهنده مناسب بودن آن برای احداث سامانه پخش سیلاب نیست و صرفاً می تواند وجود و دسترسی به جریان سطحی را نشان دهد. در این پژوهش، مناسب بودن مکانی به صورت ترکیبی از دسترسی به جریان سیلابی و

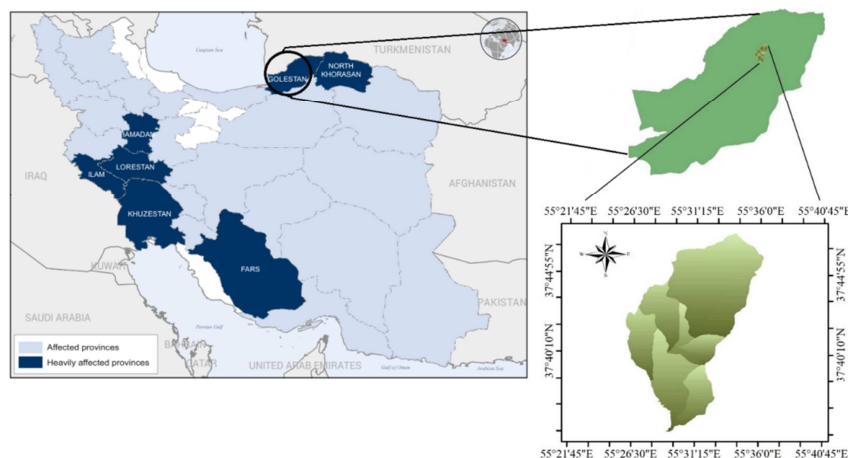
## این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفا برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

وجود شرایط هیدرومورفولوژیکی و محیطی مطلوب برای پخش و نفوذ کنترل شده آب تعریف شد. بر این اساس، سابقه وقوع سیلاب در نقاط کنترل میدانی به عنوان شاهدهی از دریافت واقعی جریان سیلابی مورد استفاده قرار گرفت، در حالی که مطلوبیت مکانی بر اساس مجموعه ای از معیارهای مکانی و قوانین فازی، شامل شیب، فاصله از رودخانه، ویژگی های خاک، کاربری اراضی و فاصله از گسل، تعیین شد. بنابراین، نقاط سیلاب خیز در این مطالعه معادل مکان های مناسب برای احداث سامانه پخش سیلاب در نظر گرفته نشدند، بلکه برای ارزیابی سازگاری خروجی مدل با مکان هایی دارای شواهد واقعی از دریافت جریان سیلابی به کار رفتند. بر این اساس، هدف پژوهش حاضر، توسعه و به کارگیری سیستم استنتاج فازی Sugeno مبتنی بر GIS برای شناسایی و اولویت بندی مناطق مناسب برای پخش سیلاب در حوضه آبخیز قویجق در شرق استان گلستان بود. نتایج این پژوهش می تواند مبنایی برای بهبود تصمیم گیری فضایی و اولویت بندی پروژه های پخش سیلاب و تغذیه مصنوعی آبخوان و در نتیجه، کاهش خسارات ناشی از سیلاب و افزایش بهره وری از منابع آب در مناطق خشک و نیمه خشک فراهم کند.

### داده ها و روش ها

#### منطقه مطالعاتی

حوضه آبخیز قویجق با مساحتی حدود ۱۷۱/۲۵ کیلومتر مربع بین عرض های جغرافیایی ۳۷ درجه و ۳۵ دقیقه و ۲۷ ثانیه تا ۳۷ درجه و ۴۷ دقیقه و ۲۵ ثانیه شمالی و طول های جغرافیایی ۵۵ درجه و ۲۵ دقیقه و ۵۷ ثانیه تا ۵۵ درجه و ۴۷ دقیقه و ۲۵ ثانیه شرقی قرار دارد (شکل ۱). این حوضه با وجود خاک های لسی با نفوذپذیری کم، شیب های تند و تغییرات اقلیمی چشمگیر، پتانسیل بالایی برای تولید رواناب دارد. این منطقه با متوسط بارندگی سالانه بین ۳۹۸ تا ۴۷۰ میلی متر است. اکثر بارندگی ها به صورت رگباری و پراکنده بوده و این مقدار از بارندگی تبدیل به رواناب شده و از دسترس خارج می گردد. متوسط دمای سالانه بین ۱۵ تا ۱۷/۵ درجه سانی گراژ و تبخیر و تعرق پتانسیل بین ۱۱۴۸ تا ۱۱۹۷ میلی متر می باشد، اقلیم این منطقه بر اساس روش دومارتن در دسته نیمه خشک قرار دارد (حشمت پور و همکاران، ۱۴۰۳).



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی حوضه مورد مطالعه و نقشه ای استان های تحت تاثیر سیلاب، منبع: UNOCHA, I.R. Iran Flood Response Plan, April 2019

### روش پژوهش

# این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

## تعیین پارامترهای موثر در مکان یابی بخش سیلاب

در این پژوهش، با استناد به توصیه های پژوهشگران پیشین (عبدو<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۲۵؛ چزگی و سهیلی، ۱۳۹۹؛ جهانی و همکاران، ۱۴۰۳؛ قادر و همکاران، ۲۰۲۴) و با توجه به شرایط ژئومحیطی خاص حوضه آبخیز قویجوق، ۱۴ عامل مهم شامل شیب، جهت شیب، زمین شناسی، فاصله از گسل، نوع کاربری اراضی، پوشش گیاهی، عمق خاک، بافت خاک، نفوذپذیری، طبقات ارتفاعی، تراکم زهکشی، فاصله از رودخانه، فاصله از شهر و روستا و فاصله از جاده تعیین و شناسایی شدند.

در مورد بارش، این پارامتر به عنوان عامل مستقل مکانی در مدل گنجانده نشد. برای ارزیابی همگنی مکانی، واریوگرام تجربی بارش با استفاده از داده های ۴ ایستگاه باران سنجی محاسبه شد و نتایج نشان داد ضریب تغییرات مکانی (CV) بارش در مقیاس ۱۷۱ کیلومترمربع حوضه برابر ۸/۲٪ است که کمتر از آستانه ۱۵٪ بود و توجیه حذف این پارامتر را فراهم می کند (عرب امیری و مسگری<sup>۲</sup>، ۲۰۱۹ و وایلدینگ<sup>۳</sup>، ۱۹۸۵). علاوه بر این، بارش به صورت غیرمستقیم بر چندین متغیر درج شده مانند تراکم زهکشی، پوشش گیاهی و رطوبت خاک تأثیر می گذارد؛ همان طور که این متغیرها به صورت ترکیبی واکنش هیدرولوژیکی حوضه را نشان می دهند. از این رو، در نظر گرفتن بارش به عنوان لایه ای جداگانه می تواند منجر به افزونگی و خودهمبستگی فضایی شود و عملکرد مدل را بهبود ندهد. این رویکرد با مطالعات مشابهی که توزیع سیلاب را در حوضه های همگن یا مقیاس کوچک بررسی کرده اند الویی و همکاران (۲۰۲۴) و رحمتی و همکاران (۱۳۹۶) سازگار است.

## سیستم استنتاج فازی سانگو (Sugeno FIS)

در این پژوهش، از مدل استنتاج فازی سانگو به عنوان هسته تصمیم گیری برای ترکیب لایه های اطلاعات مکانی در محیط GIS استفاده شد. این سیستم که توسط تاکاگی و سوگنو پیشنهاد شد، خروجی هر قانون را به صورت تابع خطی (یا ثابت) از متغیرهای ورودی تعریف می کند. برخلاف سیستم ممدانی که خروجی آن یک مجموعه فازی است، در سیستم سانگو خروجی هر قانون، یک تابع قطعی از متغیرهای ورودی می باشد (چانگ و تائو<sup>۴</sup>، ۲۰۱۷). شکل عمومی یک قانون فازی سانگو با  $n$  ورودی به صورت معادله ۱ و ۲ بیان می شود:

$$\text{If } X_1 \text{ is } A_1^{(k)} \text{ and } X_2 \text{ is } A_2^{(k)} \text{ and } \dots \text{ and } X_n \text{ is } A_n^{(k)} \quad (1)$$

$$\text{Then } f_x = P_{k0} + P_{k1}X_1 + P_{k2}X_2 + \dots + P_{kn}X_n \quad (2)$$

که در آن:

$X_j$  متغیرهای ورودی (مانند شیب، فاصله از رودخانه، کاربری اراضی و ...) می باشند.

$A_j^{(k)}$  مجموعه های فازی مرتبط با قانون  $k$  ام هستند.

$f_k$  خروجی قطعی قانون  $k$  ام که یک تابع خطی (درجه یک) از ورودی ها است.

$P_{ki}$  پارامترهای سازنده قانون (نتیجه) می باشند که معمولاً با روش حداقل مربعات تخمین زده می شوند.

<sup>1</sup> Abdo

<sup>2</sup> Arab Amiri & Mesgari

<sup>3</sup> Wilding

<sup>4</sup> Chang & Tao

## این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

خروجی نهایی سیستم سانگو، میانگین وزنی خروجی قوانین فعال شده است که با معادله ۳ بدست می آید.

$$F = \frac{\sum_{k=1}^k w_k \cdot f_k}{\sum_{k=1}^k w_k} \quad (3)$$

در این رابطه،  $w_k$  درجه فعال سازی قانون  $k$  ام است که از عملگر t-norm معمولاً  $\min$  یا  $\text{prod}$  بر روی درجات عضویت پیش شرطها حاصل می شود (سوگنو<sup>۱</sup>، ۱۹۸۶؛ تاکاگی<sup>۲</sup> و سوگنو، ۱۹۸۵).

در حالت خاص مرتبه صفر<sup>۳</sup>، خروجی قانون یک مقدار ثابت است ( $f_x = P_{k0}$ ) که این حالت از نظر محاسباتی معادل یک سیستم ممدانی با توابع عضویت کرزننده<sup>۴</sup> در خروجی خواهد بود. در مقایسه با سیستم ممدانی که نیازمند دی فازی سازی هزینه بر است، سیستم سانگو مستقیماً خروجی عددی تولید می کند و برای پیاده سازی در محیط های پیکسل پایه مانند GIS بسیار سریع تر عمل می کند (راس، ۲۰۰۵). همچنین اگرچه ANFIS نیز ساختار سانگو را به کار می گیرد، اما نیاز به حجم بالای داده های آموزشی و کاهش تفسیر پذیری مکانی دارد؛ در حالی که روش سانگو با قوانین متخصص محور و تخمین پارامترهای نتیجه به روش حداقل مربعات، توازن بهتری بین دقت عددی و شفافیت مدل در کاربردهای مکانی ایجاد می کند (جانگ<sup>۵</sup>، ۱۹۹۳).

### نرمال سازی

فرآیند وزن دهی یک ابزار کلیدی در تصمیم گیری چندمعیاره (MCDM) است، زیرا با کمی سازی اهمیت نسبی عوامل متعدد، دقت، شفافیت و استحکام تصمیمات پیچیده را افزایش می دهد. برای این منظور می توان از تکنیک های مختلف وزن دهی استفاده کرد، از جمله مقیاس گذاری عددی، مقایسه جفت به جفت، و روش های پیشرفته ای مانند تحلیل پوششی داده ها (DEA) یا فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) اما زمانی که نیاز به درک زمینه ای خاص و قضاوت تجربی است، ارزیابی مبتنی بر کارشناسان مطمئن ترین راه برای اختصاص وزن به معیارهای تصمیم گیری می باشد. براین اساس در این پژوهش، وزن های نسبی ۱۴ معیار منتخب با تکیه بر قضاوت کارشناسان (چهار استاد دانشگاه در حوضه های هیدرولوژی، ژئومورفولوژی و مدیریت حوضه آبخیز؛ سه مهندس ارشد از سازمان آب منطقه ای گلستان و بخش منابع طبیعی و دو کارشناس میدانی بومی با بیش از ۱۰ سال تجربه در پروژه های انحراف سیلاب) تعیین شد. برای هر کارشناس، ماتریس مقایسه زوجی به ابعاد  $14 \times 14$  بر اساس مقیاس نه تایی ساعتی تشکیل شد. به عبارت دیگر، به جای نمره دهی مستقیم، هر کارشناس اهمیت نسبی هر جفت معیار را در مقابل یکدیگر قضاوت کرد. پس از استخراج بردار اولویت از هر ماتریس به روش بردار ویژه، میانگین هندسی بردارهای نه کارشناس محاسبه گردید. برای سنجش سازگاری قضاوتها، نسبت سازگاری (CR) برای هر ماتریس محاسبه شد. میانگین CR در بین کارشناسان برابر  $0.074$  (با دامنه  $0.052$  تا  $0.089$ ) به دست آمد که همگی کمتر از حد آستانه  $0.1$  هستند. بنابراین، قضاوتها از سازگاری قابل قبولی برخوردار بوده و میانگین هندسی حاصل، وزن های نهایی را با اطمینان پذیری مناسب ارائه می دهد. پاسخ های فردی سپس با روش میانگین هندسی ترکیب شد تا وزن نهایی ترکیبی برای هر معیار به دست آید. مقادیر میانگین هندسی امتیازات، انحراف معیار، ضریب تغییرات (CV) و وزن نرمال شده نهایی برای هر معیار در جدول ۱ ارائه شده است.

<sup>1</sup> Sugeno

<sup>2</sup> Takagi

<sup>3</sup> Zero-order Sugeno

<sup>4</sup> Singleton

<sup>5</sup> Jang

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفا برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

جدول ۱: مقادیر آماری و وزن نهایی معیارها (بر اساس نظر ۹ کارشناس)

| معیار                     | میانگین هندسی امتیازات | CV (%) | انحراف معیار | وزن نرمال شده % |
|---------------------------|------------------------|--------|--------------|-----------------|
| فاصله از رودخانه (m)      | ۸/۲۱                   | ۱۳/۹   | ۱/۱۴         | ۱۱/۶            |
| فاصله از جاده (m)         | ۷/۰۳                   | ۱۸/۸   | ۱/۳۲         | ۹/۲             |
| شیب (%)                   | ۸/۴۵                   | ۱۱/۶   | ۰/۹۸         | ۱۲/۸            |
| جهت شیب                   | ۴/۱۶                   | ۳۷/۷   | ۱/۵۷         | ۴/۳             |
| زمین شناسی                | ۷/۸۲                   | ۱۵/۵   | ۱/۲۱         | ۹/۹             |
| فاصله از گسل (m)          | ۶/۳۴                   | ۲۳/۳   | ۱/۴۸         | ۵/۷             |
| نوع کاربری                | ۸/۰۳                   | ۱۳/۱   | ۱/۰۵         | ۱۰/۴            |
| پوشش گیاهی                | ۷/۴۴                   | ۱۷/۱   | ۱/۲۷         | ۶/۹             |
| عمق خاک (cm)              | ۵/۶۷                   | ۲۸/۸   | ۱/۶۳         | ۵/۶             |
| بافت خاک                  | ۵/۱۲                   | ۳۰/۳   | ۱/۵۵         | ۵/۸             |
| نفوذپذیری (cm/h)          | ۶/۸۹                   | ۲۰/۲   | ۱/۳۹         | ۵/۶             |
| طبقات ارتفاعی (m)         | ۴/۴۵                   | ۳۸/۴   | ۱/۷۱         | ۴/۱             |
| تراکم زهکشی               | ۶/۲۱                   | ۲۴/۵   | ۱/۵۲         | ۴/۲             |
| فاصله از مناطق مسکونی (m) | ۵/۰۳                   | ۲۹/۴   | ۱/۴۵         | ۳/۹             |
| مجموع                     | -                      | -      | -            | ۱۰۰             |

### بررسی هم خطی معیارها

به منظور اطمینان از عدم وجود هم خطی بین ۱۴ معیار انتخابی، مقادیر این معیارها در ۱۲۵ نقطه کنترل میدانی استخراج شد. برای معیارهای پیوسته، ضریب همبستگی پیرسون و برای معیارهای طبقه ای، Cramer's V محاسبه گردید. سپس عامل تورم واریانس (VIF) و شاخص تحمل (Tolerance) برای هر معیار با استفاده از رگرسیون آن معیار بر ۱۳ معیار دیگر محاسبه شد. آستانه هم خطی جدی،  $VIF > 5$  و شاخص شرایط  $Tolerance < 0.3$  در نظر گرفته شد. نتایج در جدول ۲ ارائه شده است. حداکثر VIF برابر ۲/۵۶ (برای پوشش گیاهی) و حداقل Tolerance برابر ۰/۳۹ است. از آنجا که همه VIF ها کمتر از ۵ هستند، هم خطی جدی بین معیارها وجود ندارد.

برای اطمینان بیشتر، ماتریس همبستگی  $14 \times 14$  معیارها و تحلیل مؤلفه های اصلی بر آن انجام شد. مقادیر ویژه و شاخص شرایط در جدول ۳ ارائه شده است. حداکثر شاخص شرایط برابر ۴/۱۸ (فاصله از مناطق مسکونی) است که بسیار کمتر از آستانه ۳۰ می باشد. این نتایج به طور قاطع نشان می دهد که هم خطی جدی بین معیارها وجود ندارد و وزن های AHP و قوانین فازی سانگو بر پایه معیارهای مستقل بنا شده اند. لازم به ذکر است که ضریب تغییرات و نسبت سازگاری به ترتیب پراکندگی داده ها و سازگاری قضاوت های خبرگان را می سنجند و جایگزین آزمون هم خطی نیستند.

جدول ۲: نتایج بررسی هم خطی معیارها

| معیار | VIF  | Tolerance | وضعیت       |
|-------|------|-----------|-------------|
| شیب   | ۱/۱۸ | ۰/۸۵      | بدون هم خطی |

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

|             |      |      |                       |
|-------------|------|------|-----------------------|
| بدون هم خطی | ۰/۶۳ | ۱/۵۹ | جهت شیب               |
| بدون هم خطی | ۰/۴۹ | ۲/۰۴ | زمین شناسی            |
| بدون هم خطی | ۰/۵۶ | ۱/۷۹ | فاصله از گسل          |
| بدون هم خطی | ۰/۴۷ | ۲/۱۳ | کاربری اراضی          |
| بدون هم خطی | ۰/۳۹ | ۲/۵۶ | پوشش گیاهی            |
| بدون هم خطی | ۰/۵۴ | ۱/۸۵ | عمق خاک               |
| بدون هم خطی | ۰/۴۰ | ۲/۵۰ | بافت خاک              |
| بدون هم خطی | ۰/۴۷ | ۲/۱۳ | نفوذپذیری             |
| بدون هم خطی | ۰/۵۱ | ۱/۹۶ | طبقات ارتفاعی         |
| بدون هم خطی | ۰/۶۳ | ۱/۵۹ | تراکم زهکشی           |
| بدون هم خطی | ۰/۴۹ | ۲/۰۴ | فاصله از رودخانه      |
| بدون هم خطی | ۰/۵۱ | ۱/۹۶ | فاصله از جاده         |
| بدون هم خطی | ۰/۴۶ | ۲/۱۷ | فاصله از مناطق مسکونی |

جدول ۳: مقادیر ویژه و شاخص شرایط (Condition Index)

| شاخص شرایط (CI) | مقدار ویژه (λ) | معیار            |
|-----------------|----------------|------------------|
| ۱/۰۰            | ۳/۵۰           | شیب              |
| ۱/۵۳            | ۱/۵۰           | جهت شیب          |
| ۱/۶۴            | ۱/۳۰           | زمین شناسی       |
| ۱/۷۱            | ۱/۲۰           | فاصله از گسل     |
| ۱/۷۸            | ۱/۱۰           | کاربری اراضی     |
| ۱/۸۷            | ۱/۰۰           | پوشش گیاهی       |
| ۱/۹۷            | ۱/۹۰           | عمق خاک          |
| ۲/۰۹            | ۰/۸۰           | بافت خاک         |
| ۲/۲۴            | ۰/۷۰           | نفوذپذیری        |
| ۲/۴۲            | ۰/۶۰           | طبقات ارتفاعی    |
| ۲/۶۵            | ۰/۵۰           | تراکم زهکشی      |
| ۲/۹۶            | ۰/۴۰           | فاصله از رودخانه |
| ۳/۴۲            | ۰/۳۰           | فاصله از جاده    |
| ۴/۱۸            | ۰/۲۰           | فاصله از مسکونی  |

پایگاه قوانین فازی به روش متخصص محور و با تلفیق دانش هیدرولوژیکی محلی و مرور نظام مند مطالعات پیشین (چزگی و سهیلی، ۱۳۹۹؛ پیروزی و همکاران، ۱۴۰۳؛ یوسفی و همکاران، ۱۳۹۹) طراحی شد. تعداد کل قوانین استنتاجی ۳۲ قانون از نوع مرتبه صفر سانگو تعریف شد که در آن خروجی هر قانون یک مقدار ثابت (مطلوبیت پخش سیلاب) در بازه [۰-۱] است. جزئیات کامل ۳۲ قانون استنتاجی سانگو در جدول ۴ ارائه شده است. همچنین از مجموعاً ۱۴ معیار محیطی و هیدرولوژیکی به عنوان لایه های ورودی اولیه فازی سازی شدند تا جامعیت مکانی حفظ شود، اما بر اساس نتایج وزن دهی خبرگان (جدول ۱)، پنج عامل برتر (شیب، فاصله از رودخانه، فاصله از جاده، نوع کاربری اراضی و زمین شناسی) به عنوان محرک های اصلی شناسایی شدند. پایگاه قوانین فازی شامل ۳۲ قانون سلسله مراتبی به گونه ای طراحی شد که قوانین پایه ای و غربالگری بر روی این عوامل کلیدی متمرکز باشند و سایر معیارها (۹ معیار دیگر) به عنوان

# این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

متغیرهای تعدیل کننده و جبرانی در سطوح بعدی قوانین برای تعیین دقیق مطلوبیت نهایی هر پیکسل نقش آفرینی کنند. منطق چیدمان قوانین به صورت سلسله مراتبی به شرح زیر است:

\* قوانین سطح اول (غربالگری): مناطقی که شیب بیشتر از ۱۲٪ یا فاصله از رودخانه کمتر از ۵۰۰ متر داشته باشند، مستقیماً در کلاس کاملاً نامناسب طبقه بندی می شوند.

\* قوانین سطح دوم (اولویت بندی مثبت): ترکیب شیب کمتر از ۴٪ و فاصله از جاده بیشتر از ۴۰۰ متر و کاربری مرتع یا کشاورزی دیم منجر به خروجی بالای ۰/۷ می شود.

\* قوانین سطح سوم (جبرانی): در مواردی که یک معیار نامطلوب است (مثلاً فاصله کم از جاده) اما سایر معیارها بسیار مطلوب هستند (شیب بسیار کم، عمق خاک زیاد)، خروجی به صورت خطی کاهش می یابد اما به صفر نمی رسد.

تعیین آستانه های توابع عضویت دوزنقه ای: برای هر معیار، توابع عضویت دوزنقه ای<sup>۱</sup> با چهار نقطه مشخصه (a, b, c, d) تعریف شدند. این آستانه ها بر اساس سه منبع تعیین گردیدند:

۱. مرور متون تخصصی: آستانه های شیب کمتر از ۲٪ بسیار مناسب، بیشتر از ۱۶٪ نامناسب (چزگی و سهیلی، ۱۳۹۹؛ گاربا و ابوبکر<sup>۲</sup>، ۲۰۲۳) اقتباس شد.

۲. دستورالعمل های ملی سازمان آب منطقه ای: فاصله از رودخانه و گسل بر اساس ضوابط حریم کیفی رودخانه ها (حداقل ۲۰۰۰ متر برای پروژه های تغذیه مصنوعی) تنظیم شد.

۳. تحلیل حساسیت اولیه<sup>۳</sup>: ۱۰ نقطه کنترل میدانی مستقل (که در اعتبارسنجی نهایی استفاده نشدند) برای تنظیم اولیه مرزهای توابع عضویت به کار رفتند. برای نمونه، آستانه فاصله از جاده بهینه در ۳۵۰ متر شناسایی شد که در آن حداکثر افتراق بین نقاط سیلاب خیز و غیرسیلاب خیز مشاهده گردید.

جدول ۴: قوانین تدوین شده (۳۲ قانون)

| ردیف | شرایط (If)                                                                                                                                                             | گروه         | مکانیزم کلیدی                                              |
|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|------------------------------------------------------------|
| ۱    | شیب=کم؛ جهت=شمال غربی؛ زمین شناسی=تراس آبرفتی؛ گسل=دور؛ کاربری=مرتع؛ پوشش=خوب؛ عمق=عمیق؛ بافت=لس-شیلی؛ نفوذ=کم؛ ارتفاع=کم؛ زهکشی=کم؛ رودخانه=دور؛ جاده=دور؛ مسکونی=دور | کاملاً مناسب | ترکیب بهینه؛ همه عوامل خطر زیرساختی در بهترین طبقه         |
| ۲    | شیب=کم؛ زمین شناسی=تراس آبرفتی؛ گسل=دور؛ کاربری=مرتع؛ عمق=عمیق؛ بافت=لس-شیلی؛ نفوذ=کم؛ ارتفاع=کم؛ زهکشی=کم؛ رودخانه=دور؛ جاده=دور؛ مسکونی=دور                          | کاملاً مناسب | رسوبات آبرفتی + نفوذپذیری کنترل شده → تغذیه ایده آل آبخوان |
| ۳    | شیب=کم؛ زمین شناسی=تراس آبرفتی؛ گسل=دور؛ کاربری=مرتع؛ پوشش=خوب؛ عمق=عمیق؛ بافت=لس-شیلی؛ نفوذ=کم؛ ارتفاع=کم؛ زهکشی=کم؛ رودخانه=دور؛ جاده=دور؛ مسکونی=دور                | کاملاً مناسب | خاک لس عمیق + پوشش خوب → بالاترین نفوذ و تغذیه             |
| ۴    | شیب=کم؛ زمین شناسی=تراس آبرفتی؛ گسل=دور؛ کاربری=مرتع؛ ارتفاع=کم؛ رودخانه=دور؛ جاده=دور؛ مسکونی=دور                                                                     | کاملاً مناسب | دشت پایین دست کم ارتفاع + ریسک زیرساختی صفر                |

<sup>1</sup> Trapezoidal membership functions

<sup>2</sup> Garba & Abubakar

<sup>3</sup> Pilot Analysis

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

|    |                                                                                                                       |      |              |                                                                |
|----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|--------------|----------------------------------------------------------------|
| ۵  | شیب=کم؛ گسل=دور؛ کاربری=مرتفع؛ پوشش=خوب؛ عمق=عمیق؛ بافت=لس-شیلی؛ نفوذ=کم؛ زهکشی=کم؛ رودخانه=دور؛ جاده=دور             | ۱    | کاملاً مناسب | شرایط ایده آل خاک و پوشش + دوری از منابع تمرکز رواناب          |
| ۶  | شیب=کم؛ جهت=شمال غربی؛ گسل=دور؛ کاربری=مرتفع؛ پوشش=خوب؛ رودخانه=دور؛ جاده=دور؛ مسکونی=دور                             | ۱    | کاملاً مناسب | جهت شمال غربی بیشترین رواناب ورودی؛ همه شرایط بهینه            |
| ۷  | شیب=کم؛ زمین شناسی=تراس آبرفتی مرتفع؛ گسل=دور؛ بافت=لس-شیلی؛ ارتفاع=کم؛ زهکشی=کم؛ رودخانه=دور؛ مسکونی=دور             | ۱    | کاملاً مناسب | تراس آبرفتی مرتفع + بافت لسی + تراکم زهکشی کم                  |
| ۸  | شیب=کم؛ گسل=دور؛ کاربری=مرتفع؛ پوشش=خوب؛ ارتفاع=کم؛ رودخانه=دور؛ جاده=متوسط؛ مسکونی=دور                               | ۰.۷۵ | مناسب        | نزدیکی متوسط جاده → کاهش جزئی از بهینه                         |
| ۹  | شیب=متوسط؛ زمین شناسی=مناسب؛ گسل=دور؛ کاربری=مرتفع؛ رودخانه=دور؛ جاده=دور؛ مسکونی=دور                                 | ۰.۷۵ | مناسب        | شیب کمی بالاتر از ایده آل → سرعت رواناب بیشتر اما قابل مدیریت  |
| ۱۰ | شیب=کم؛ گسل=دور؛ کاربری=مرتفع؛ پوشش=متوسط؛ عمق=عمیق؛ زهکشی=کم؛ رودخانه=متوسط؛ جاده=دور؛ مسکونی=دور                    | ۰.۷۵ | مناسب        | فاصله متوسط از رودخانه خطر برگشت جریان را کافی کاهش می دهد     |
| ۱۱ | شیب=کم؛ گسل=متوسط؛ کاربری=مرتفع؛ پوشش=خوب؛ نفوذ=کم؛ ارتفاع=کم؛ جاده=دور؛ مسکونی=دور                                   | ۰.۷۵ | مناسب        | فاصله متوسط از گسل: خطر piping کم اما حذف نشده                 |
| ۱۲ | شیب=متوسط؛ زمین شناسی=مناسب؛ گسل=دور؛ بافت=مناسب؛ زهکشی=کم؛ رودخانه=دور؛ جاده=دور؛ مسکونی=متوسط                       | ۰.۷۵ | مناسب        | فاصله متوسط مسکونی؛ شیب با زمین شناسی خوب جبران می شود         |
| ۱۳ | شیب=کم؛ گسل=دور؛ کاربری=کشاورزی دیم؛ ارتفاع=متوسط؛ رودخانه=دور؛ جاده=دور؛ مسکونی=دور                                  | ۰.۷۵ | مناسب        | کشاورزی دیم با فاصله های زیرساختی خوب                          |
| ۱۴ | شیب=کم؛ جهت=جنوب غربی؛ زمین شناسی=مناسب؛ گسل=دور؛ کاربری=مرتفع؛ پوشش=متوسط؛ رودخانه=دور؛ جاده=دور؛ مسکونی=دور         | ۰.۷۵ | مناسب        | جهت جنوب غربی؛ پوشش متوسط تا حدی با فاصله های خوب جبران می شود |
| ۱۵ | شیب=متوسط؛ کاربری=مرتفع؛ پوشش=متوسط؛ ارتفاع=متوسط؛ رودخانه=متوسط؛ جاده=متوسط؛ مسکونی=متوسط                            | ۰.۵  | نسبتاً مناسب | همه پارامترها در طبقه متوسط → تناسب مرزی                       |
| ۱۶ | شیب=کم؛ زمین شناسی=پادگانه/لس؛ گسل=دور؛ عمق=متوسط؛ بافت=لای سیلتی؛ زهکشی=متوسط؛ رودخانه=دور؛ جاده=متوسط؛ مسکونی=متوسط | ۰.۵  | نسبتاً مناسب | زمین شناسی متوسط تناسب را کاهش می دهد؛ نزدیکی جاده مرزی        |
| ۱۷ | شیب=متوسط؛ گسل=متوسط؛ کاربری=کشاورزی دیم؛ پوشش=ضعیف؛ ارتفاع=کم؛ رودخانه=متوسط؛ جاده=دور                               | ۰.۵  | نسبتاً مناسب | پوشش ضعیف + فاصله متوسط گسل → عملکرد مرزی                      |
| ۱۸ | شیب=کم؛ زمین شناسی=مناسب؛ گسل=دور؛ پوشش=خوب؛ زهکشی=متوسط؛ رودخانه=نزدیک؛ جاده=دور؛ مسکونی=دور                         | ۰.۵  | نسبتاً مناسب | نزدیکی رودخانه خطر برگشت جریان → انحراف آب به کانال            |
| ۱۹ | شیب=متوسط؛ گسل=دور؛ عمق=متوسط؛ بافت=لای سیلتی؛ ارتفاع=متوسط؛ جاده=متوسط؛ مسکونی=دور                                   | ۰.۵  | نسبتاً مناسب | عمق متوسط + بافت لای سیلتی → نفوذ متوسط                        |
| ۲۰ | شیب=کم؛ گسل=دور؛ کاربری=باغ؛ پوشش=متوسط؛ زهکشی=کم؛ رودخانه=دور؛ جاده=دور؛ مسکونی=متوسط                                | ۰.۵  | نسبتاً مناسب | کاربری باغ + فاصله متوسط مسکونی → حالت مرزی                    |
| ۲۱ | شیب=زیاد؛ زمین شناسی=ضعیف؛ پوشش=ضعیف؛ زهکشی=متوسط؛ رودخانه=نزدیک؛ جاده=نزدیک؛ مسکونی=متوسط                            | ۰.۲۵ | نامناسب      | شیب زیاد + نزدیکی جاده → رواناب سریع متمرکز؛ پوشش ضعیف         |

# این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

|     |                                                                                                                |      |                |                                                                       |
|-----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|----------------|-----------------------------------------------------------------------|
| ۱-۱ | شیب=زیاد؛ زمین شناسی=ضعیف (Kst/AT)؛ گسل=نزدیک؛ کاربری=ساخته شده؛ بافت=رس؛ نفوذ=زیاد؛ ارتفاع=زیاد؛ جاده=نزدیک   | ۰.۲۵ | نامناسب        | نزدیکی گسل + لس = خطر piping؛ ساخته شده ≈ ۹۸CN رواناب را تشدید می‌کند |
| ۱-۲ | شیب=متوسط؛ زمین شناسی=ضعیف (Kst)؛ پوشش=ضعیف؛ زهکشی=زیاد؛ رودخانه=نزدیک؛ جاده=نزدیک؛ مسکونی=نزدیک               | ۰.۲۵ | نامناسب        | تراکم زهکشی بالا + نزدیکی رودخانه + سکونتگاه → جریان کنترل نشده       |
| ۱-۳ | شیب=زیاد؛ گسل=دور؛ کاربری=مرتفع؛ ارتفاع=زیاد؛ جاده=نزدیک؛ مسکونی=متوسط                                         | ۰.۲۵ | نامناسب        | زمین مرتفع شیب دار؛ رواناب سریع، اثر کانال سازی جاده                  |
| ۵-۱ | شیب=متوسط؛ گسل=نزدیک؛ عمق=کم عمق؛ بافت=رس؛ زهکشی=زیاد؛ رودخانه=نزدیک؛ جاده=متوسط                               | ۰.۲۵ | نامناسب        | خاک رس کم عمق نزدیک گسل + زهکشی بالا = نفوذ ضعیف + piping             |
| ۵-۲ | شیب=زیاد؛ کاربری=ساخته شده؛ پوشش=ضعیف؛ نفوذ=زیاد؛ ارتفاع=زیاد؛ رودخانه=نزدیک؛ مسکونی=نزدیک                     | ۰.۲۵ | نامناسب        | شیب تند نزدیک سکونتگاه + نفوذ زیاد (آب از سیستم عبور می‌کند)          |
| ۸-۱ | شیب=زیاد؛ زمین شناسی=ضعیف؛ گسل=نزدیک؛ کاربری=ساخته شده؛ پوشش=ضعیف؛ رودخانه=نزدیک؛ جاده=نزدیک؛ مسکونی=نزدیک     | ۰    | کاملاً نامناسب | بدترین حالت: همه عوامل خطر همزمان در طبقه بحرانی                      |
| ۷-۱ | شیب=زیاد؛ زمین شناسی=ضعیف (Kst/AT)؛ بافت=رس؛ ارتفاع=زیاد؛ زهکشی=زیاد؛ جاده=نزدیک؛ مسکونی=نزدیک                 | ۰    | کاملاً نامناسب | زمین شناسی ضعیف + خاک رس + ارتفاع زیاد + زهکشی متراکم                 |
| ۵-۳ | شیب=زیاد؛ گسل=نزدیک؛ کاربری=ساخته شده؛ پوشش=ضعیف؛ عمق=کم عمق؛ نفوذ=زیاد؛ رودخانه=نزدیک                         | ۰    | کاملاً نامناسب | گسل + لس کم عمق = خطر فروریزش و piping                                |
| ۱-۴ | شیب=زیاد؛ جهت=شمال شرقی؛ ارتفاع=زیاد؛ زهکشی=زیاد؛ رودخانه=نزدیک؛ جاده=نزدیک؛ مسکونی=نزدیک                      | ۰    | کاملاً نامناسب | جهت شمال شرقی (رواناب کم) + شیب تند + همه خطرات زیرساختی بحرانی       |
| ۱-۵ | شیب=زیاد؛ زمین شناسی=ضعیف (Kst/AT)؛ گسل=نزدیک؛ کاربری=ساخته شده؛ عمق=کم عمق؛ بافت=رس؛ جاده=نزدیک؛ مسکونی=نزدیک | ۰    | کاملاً نامناسب | زمین شناسی ضعیف + گسل piping؛ ساخته شده + رس کم عمق = ناایمن ساختاری  |
| ۱-۶ | شیب=زیاد؛ گسل=نزدیک؛ پوشش=ضعیف؛ زهکشی=زیاد؛ رودخانه=نزدیک؛ جاده=نزدیک؛ مسکونی=نزدیک                            | ۰    | کاملاً نامناسب | چهار خطر مجاورتی همزمان بحرانی → حذف کامل                             |

\*تمام قوانین با عملگر min برای ترکیب مقدمات (T-norm) و عملگر max برای تجميع قوانین (در دی‌فازی سازی ضمنی سانگو) پیاده سازی شدند.

پیاده سازی سیستم سانگو در محیط نرم افزار ArcGIS نسخه ۱۰/۸ طی چهار مرحله انجام شد: (۱) فازی سازی هر لایه ورودی با توابع عضویت ذوزنقه ای با استفاده از ابزار Fuzzy Membership؛ (۲) تعریف پایگاه قوانین اگر-آنگاه خطی بر اساس دانش تخصصی؛ (۳) محاسبه به ازای هر سلول (پیکسل) مقدار با عملگر min و سپس  $F_K$  و در نهایت F با استفاده از کدنویسی برداری با کتابخانه های numpy و rasterio در پایتون (راس، ۲۰۰۵)؛ (۴) تولید نقشه نهایی خروجی و ارزیابی با نقاط کنترل مستقل. این رویکرد به دلیل حذف دی‌فازی سازی تکراری و سازگاری با محاسبات برداری، قادر به پردازش میلیون ها سلول در کمترین زمان است و به طور گسترده در پهنه بندی خطر، ارزیابی تناسب اراضی و مدل سازی محیطی به کار رفته است (مالچفسکی و رینر<sup>۱</sup>، ۲۰۱۵). در خصوص پیاده سازی مدل WLC، لایه های اطلاعاتی پیش از اعمال وزن ها، با استفاده از روش نرمال سازی خطی (Min-Max) به بازه یکسان [۰،۱] مقیاس گذاری شدند تا همگنی واحدها حفظ شود. همچنین در اجرای الگوریتم یادگیری ماشین

<sup>1</sup> Malczewski & Rinner

## این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

Random Forest، برای برقراری ساختار استاندارد داده‌ها، مجموعه داده‌ی نقاط کنترل میدانی با نسبت ۷۰٪ برای آموزش و ۳۰٪ برای آزمون مستقل تقسیم شد. مدل با پارامترهای بهینه شده شامل تعداد درختان  $n\_estimators = 200$ ، معیار ناخالصی جینی و اعتبارسنجی متقابل ۵ بخشی (۵-Fold Cross-Validation) بر روی داده‌های آموزشی اجرا گردید تا از بروز بیش‌برازش جلوگیری شده و قابلیت اطمینان خروجی‌ها به حداکثر برسد.

### اعتبارسنجی کمی مدل

به منظور ارزیابی عملکرد مدل استنتاج فازی سانگو پیش از اجرای نهایی، اعتبارسنجی کمی طراحی گردید. ابتدا کل منطقه مطالعاتی به دو بخش مستقل تقسیم نشد؛ بلکه از ۱۲۵ نقطه کنترل میدانی مستقل که در فرآیند فازی سازی و وزن دهی شرکت نداشتند، استفاده شد. این نقاط شامل ۷۰ نقطه در مناطق با سابقه سیلاب (بر اساس رویدادهای ۱۳۹۸ و ۱۴۰۱) و ۵۵ نقطه در مناطق بدون سیلاب که براساس بازدیدهای میدانی و سوابق تاریخی توسط کارشناسان محلی تایید شده بود. برای ارزیابی تطابق خروجی مدل (مقادیر پیوسته مطلوبیت در بازه ۰ تا ۱) با کلاس‌های دودویی واقعیت (سیلاب خیز / غیر سیلاب خیز)، از منحنی مشخصه عملکرد سیستم (ROC) و سطح زیر منحنی (AUC) استفاده شد. به منظور برابری آماری در مقایسه عملکرد مدل‌ها، تمامی چهار مدل بررسی شده بر روی یک مجموعه داده‌ی ارزیابی کاملاً یکسان و مستقل شامل همان ۱۲۵ نقطه کنترل میدانی (۷۰ نقطه سیلابی و ۵۵ نقطه غیرسیلابی) مورد آزمون قرار گرفتند. در خصوص مدل یادگیری ماشین، اگرچه ۷۰ درصد از نقاط کل منطقه برای فرآیند آموزش الگوریتم به کار رفت، اما قسمت نهایی و استخراج مقادیر منحنی ROC برای تمام مدل‌ها بر روی ۱۲۵ نقطه‌ی آزمون یکسان انجام شد تا مقایسه عملکرد مدل‌ها با هیچ گونه ناهمگنی در حجم نمونه مواجه نباشد. لازم به ذکر است که اگرچه وقوع سیلاب در یک نقطه الزاماً به معنای مناسب بودن آن برای احداث سامانه پخش سیلاب نیست، اما در این پژوهش برای حل این چالش، نقاط کنترل میدانی با فیلترهای قوانین سلسله مراتبی مدل سانگو تطبیق داده شدند. در سیستم استنتاج فازی سانگو، نقاطی به عنوان کلاس کاملاً مناسب تأیید شدند که هم‌زمان دارای پتانسیل دریافت جریان (نزدیکی منطقی به مسیرهای سیلابی) و شرایط پایدار هیدرومورفولوژیکی (شیب کمتر از ۴ درصد، فاصله امن از رودخانه و گسل، و بافت خاک نفوذپذیر) بودند. بنابراین، استفاده از ۷۰ نقطه مستند سیلاب‌های سال‌های ۱۳۹۸ و ۱۴۰۱ به عنوان داده‌های اعتبارسنجی، نشان‌دهنده انطباق مکان‌های پیشنهادی با حوضه‌هایی است که جریان آب واقعی در آن‌ها وجود داشته و شرایط فیزیکی خاک و شیب اجازه پهنه‌بندی و مهار کنترل شده را در آن‌ها می‌دهد (هاشمی و همکاران، ۲۰۱۵؛ زرکش، ۲۰۰۵). همچنین ماتریس درهم‌ریختگی پس از بهینه‌سازی آستانه طبقه‌بندی با روش Youden's Index محاسبه گردید. شاخص‌های دقت (Accuracy)، حساسیت (Sensitivity)، ویژگی (Specificity) و ضریب کاپا ( $\kappa$ ) به عنوان معیارهای اصلی قابلیت اطمینان مدل گزارش شدند. کلیه مراحل آماری با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۶ و کتابخانه scikit-learn پایتون انجام شد. همچنین به منظور تعیین میزان عملی تغذیه آب زیرزمینی و ارزیابی کارایی مکانی سیستم پخش سیلاب در مناطق بسیار مناسب شناسایی شده، ظرفیت ذخیره‌سازی سطحی محاسبه گردید. مدل رقومی ارتفاع (DEM) مورد استفاده از ترکیب نقشه‌های توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ سازمان نقشه‌برداری کشور و داده‌های ماهواره‌ای ALOS PALSAR با قدرت تفکیک مکانی ۱۲/۵ متر تهیه شد. پس از بازسازی و تصحیح، حجم ذخیره‌سازی با استفاده از روش توده‌های منشوری و رابطه زیر برآورد شد:

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

$$V = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{A_i + A_{i+1}}{2} \times \Delta h$$

که در آن:

V: حجم ذخیره‌سازی مؤثر (متر مکعب) است

$A_i$ : مساحت سطح آب در تراز ارتفاعی  $i$  (متر مربع) است

$\Delta h$ : فاصله قائم بین ترازهای متوالی (متر) است

n: تعداد کل ترازهای ارتفاعی است

عمق مؤثر ذخیره‌سازی بر اساس شیب بستر و ارتفاع سازه انحرافی فرضی، ۳ متر در نظر گرفته شد. نرم‌افزار مورد استفاده برای استخراج منحنی‌های ارتفاع-مساحت-حجم، ArcGIS 10.8 و افزونه Surface Volume در جعبه ابزار ۳ D Analyst بود.

#### تحلیل حساسیت ترکیبی مدل: وزن معیارها، توابع عضویت و قوانین فازی

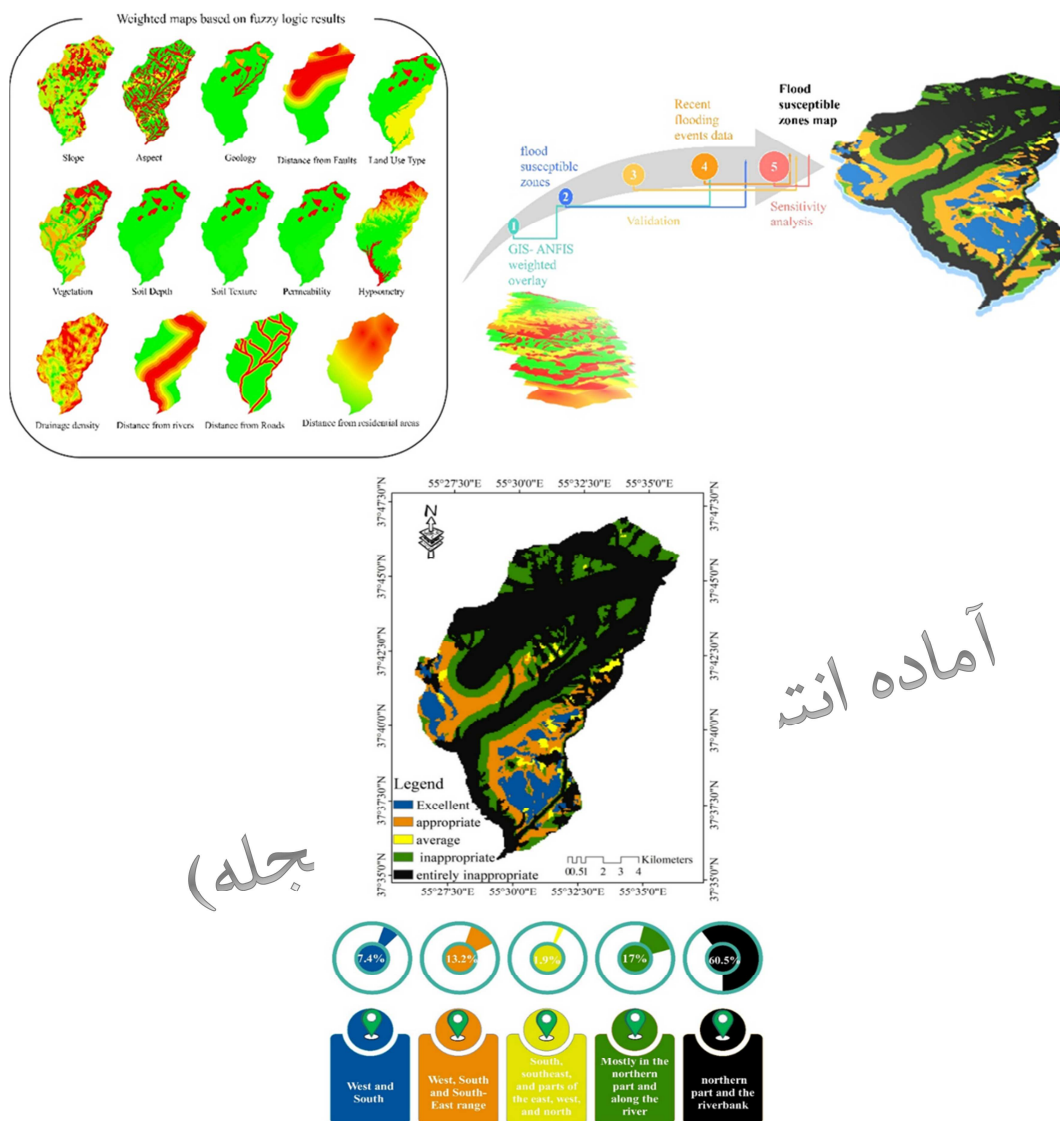
به منظور ارزیابی پایداری مدل استنتاج فازی سانگو در برابر تغییرات پارامترهای طراحی، یک تحلیل حساسیت ترکیبی در سه سطح انجام شد: ۱) تغییرات یک‌طرفه در وزن معیارهای کلیدی، (۲) تغییر در آستانه‌های توابع عضویت دوزنقه‌ای، و (۳) غیرفعال‌سازی قانون غربالگری اصلی. تمامی سناریوها با استفاده از ۱۲۵ نقطه کنترل میدانی مستقل ارزیابی شده و شاخص AUC سطح زیر منحنی ROC و نیز درصد مساحت کلاس کاملاً نامناسب به عنوان معیارهای پاسخ ثبت گردید. وزن پنج معیار پوتر (شیب، فاصله از رودخانه، کاربری اراضی، زمین‌شناسی و فاصله از جاده) به میزان  $\pm 10\%$  و  $\pm 20\%$  نسبت به مقدار پایه (جدول ۱) تغییر داده شد. سایر وزن‌ها به طور نسبی تعدیل شدند تا مجموع وزن‌ها برابر ۱ باقی بماند.

#### یافته‌های تحقیق

##### نتایج وزن دهی معیارها

نتایج حاصل از فرآیند وزن دهی به پنج کلاس بسیار مناسب (۷/۴ درصد)، نسبتاً مناسب (۱۳/۲ درصد)، مناسب (۱/۹ درصد)، نامناسب (۱۷ درصد) و کاملاً نامناسب (۶۰/۵ درصد) طبقه‌بندی شد (شکل ۲).

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفا برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.



شکل ۲: نقشه‌های وزن‌دار و خروجی همپوشانی فاز (EdrawMax)

### اعتبار سنجی کمی مدل و میدانی

اعتبارسنجی کمی نقشه نهایی با استفاده از ۱۲۵ نقطه کنترل میدانی مستقل انجام شد که به صورت تصادفی طبقه‌بندی شده بودند. داده‌های رویدادهای سیلاب سال‌های ۱۳۹۸ و ۱۴۰۱ از ترکیب گزارش‌های سازمان آب منطقه‌ای گلستان، تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-1 با تداخل‌سنجی راداری و بازدیدهای میدانی مستند تهیه گردید. ارزیابی عملکرد مدل با استفاده از منحنی ROC و محاسبه سطح زیر منحنی (AUC) و همچنین ضریب کاپا ( $\kappa$ ) و دقت کلی انجام شد. مقادیر به‌دست‌آمده جدول ۵ عبارتند از:  $AUC = 0/۸۶$ ، ضریب کاپا  $\kappa = 0/۵۳$  و دقت کلی

## این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

Accuracy = ۰/۷۶. این نتایج نشان دهنده تطابق مناسب مدل با واقعیت زمینی و عملکرد خوب بر اساس طبقه بندی سوتس<sup>۱</sup> (۱۹۸۸) می باشد.

جدول ۵: ماتریس درهم ریختگی ارزیابی مدل فازی نسبت به نقاط کنترل میدانی

| واقعیت \ پیش بینی     | پیش بینی: سیلاب خیز | پیش بینی: غیر سیلاب خیز |
|-----------------------|---------------------|-------------------------|
| واقعیت: سیلاب خیز     | TP = ۴۸             | FN = ۲۲                 |
| واقعیت: غیر سیلاب خیز | FP = ۸              | TN = ۴۷                 |

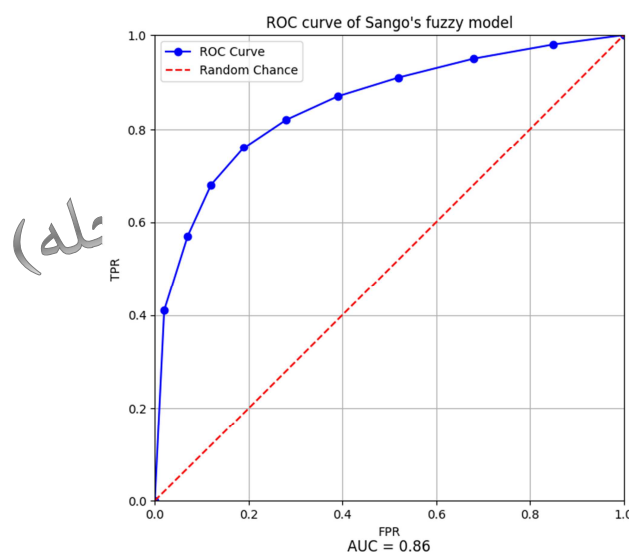
مقادیر شاخص ها:

$$\text{Accuracy} = (TP+TN)/(\text{Total}) = (48+47)/125 = 95/125 = 0.76$$

$$\text{AUC} = 0.86 \text{ محاسبه شده از منحنی ROC - شکل ۳}$$

$$(\text{Cohen's Kappa}) = 0.53$$

منحنی ROC (شکل ۳) بر اساس حساسیت در مقابل ویژگی False Positive Rate برای مقادیر آستانه مختلف طبقه بندی ترسیم شد. سطح زیر منحنی (AUC) برابر ۰/۸۶ به دست آمد که نشان دهنده قدرت تفکیک خوب مدل در تشخیص مناطق مستعد سیلاب از مناطق غیرمستعد است.



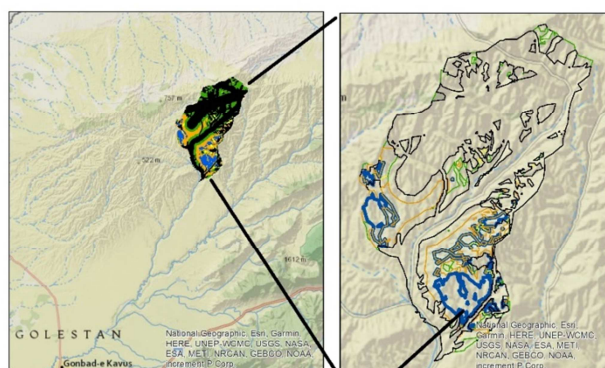
شکل ۳: منحنی ROC عملکرد مدل استنتاج فازی سانگو در تفکیک مناطق مستعد سیلاب (مثبت) از مناطق غیرمستعد (منفی)

بررسی های می دانی انجام شده در مناطق بسیار مناسب، تایید مستقیم مطلوبیت مدل انتخابی برای سیستم های پخش سیلاب را تایید کرد ( شکل ۴ ). شیب های کم، خاک های با بافت ریزدانه و نزدیکی به کانال های زه کشی طبیعی با معیارهای نظری تعریف شده از طریق تحلیل مکانی مبتنی بر فازی مطابقت دارد. توافق قوی بین خروجی های مدل و شرایط می دانی، قدرت رویکرد منطق فازی را در تلفیق داده های توصیفی و کمی، حتی در مجموعه داده های نامشخص یا ناقص نشان می دهد.

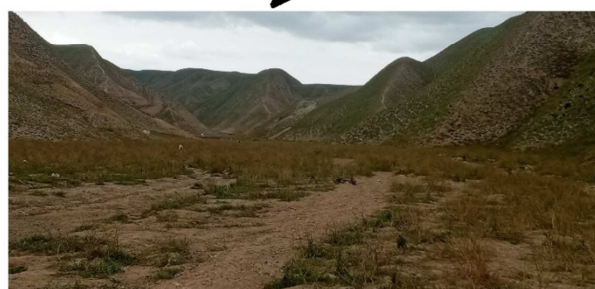
<sup>1</sup> Swets

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

به منظور ارزیابی کمی توان سامانه های پخش سیلاب در مدیریت سیلاب های بزرگ، تحلیل تراز حجمی برای رخداد ۱۳۹۸ (بارش ۳۰۰ میلی متر در دو روز) انجام شد. حجم کل رواناب با ضریب رواناب ۰/۳۵ و مساحت حوضه ۱۷۱/۲۵ کیلومتر مربع، حدود ۱۷/۹۸ میلیون متر مکعب برآورد شد. در مقابل، حجم قابل مدیریت توسط سامانه های پخش سیلاب با مساحت مؤثر ۲۵/۴ هکتار، تراز طراحی ۳ متر و نفوذپذیری ۰/۲۲ سانتی متر بر ساعت در مدت ۷ روز، حدود ۰/۸۵۶ میلیون متر مکعب (۴/۸٪ از حجم سیلاب) محاسبه شد. حتی در سناریوی خوش بینانه با استفاده از ۲۰٪ از کل پهنه کاملاً مناسب (۲۵۵/۳ هکتار) و تراز طراحی ۰/۵ متر، حجم قابل مدیریت به ۲/۲۲ میلیون متر مکعب (۱۲/۳٪) افزایش می یابد. این نتایج به وضوح نشان می دهد که سامانه های پخش سیلاب به تنهایی برای مدیریت سیلاب های بزرگ کافی نیستند و باید با سایر راهکارها مانند سدهای اصلاحی بالادست، مخازن ذخیره، اصلاح کاربری اراضی و احیای پوشش گیاهی ترکیب شوند.



آماده



شکل ۴: مکان تعیین شده بسیار مناسب پخش سیلاب در بازدید میدانی

### نتایج تحلیل حساسیت ترکیبی

به منظور ارزیابی پایداری مدل Sugeno FIS، تحلیل حساسیت در سه سطح انجام شد: (۱) تغییر وزن پنج معیار برتر در بازه  $\pm 10\%$  و  $\pm 20\%$ ، (۲) تغییر آستانه های توابع عضویت دو معیار حساس (شیب و فاصله از جاده)، و (۳) غیرفعال سازی قوانین غربالگری. همه تحلیل ها با استفاده از ۱۲۵ نقطه کنترل مستقل ارزیابی شدند نتایج کامل در جداول ۶ الی ۸ ارائه شده است.

بیشترین کاهش AUC هنگام کاهش  $-20\%$  وزن شیب رخ داد  $\Delta AUC = -0.021$  و پس از آن افزایش  $20\%$  وزن فاصله از رودخانه، تغییرات وزن کاربری اراضی و زمین شناسی تأثیر ناچیزی داشتند. تغییر آستانه شیب از  $4\%$  به  $2\%$

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

موجب کاهش AUC به ۰/۸۵۰ شد. تغییر آستانه فاصله از جاده از ۲۰۰ متر به ۴۰۰ متر، AUC را به ۰/۸۵۵ کاهش داد. در هر دو مورد، کاهش کمتر از ۰/۰۱۵ واحد بود که نشان دهنده پایداری نسبتاً خوب مدل نسبت به انتخاب آستانه هاست.

غیرفعال سازی قانون ۱ (شیب < ۱۲٪ یا فاصله از رودخانه > ۵۰۰ متر) موجب کاهش AUC به ۰/۸۴۰ شد. غیرفعال سازی همزمان قوانین ۱، ۲ و ۳، AUC را به ۰/۸۱۵ کاهش داد.

جدول ۶: تأثیر تغییرات یک طرفه وزن معیارها بر AUC

| تغییر نسبت به پایه | AUC   | تغییر وزن | معیار             |
|--------------------|-------|-----------|-------------------|
| —                  | ۰/۸۶۲ | —         | پایه (بدون تغییر) |
| -۰/۰۲۱             | ۰/۸۴۱ | -۲۰٪      | شیب               |
| -۰/۰۱۶             | ۰/۸۴۶ | -۱۰٪      | شیب               |
| -۰/۰۰۸             | ۰/۸۵۴ | +۱۰٪      | شیب               |
| -۰/۰۱۴             | ۰/۸۴۸ | +۲۰٪      | شیب               |
| -۰/۰۰۹             | ۰/۸۵۳ | -۲۰٪      | فاصله از رودخانه  |
| -۰/۰۰۴             | ۰/۸۵۸ | -۱۰٪      | فاصله از رودخانه  |
| -۰/۰۱۳             | ۰/۸۴۹ | +۱۰٪      | فاصله از رودخانه  |
| -۰/۰۱۹             | ۰/۸۴۳ | +۲۰٪      | فاصله از رودخانه  |
| -۰/۰۰۴             | ۰/۸۵۸ | -۲۰٪      | فاصله از جاده     |
| -۰/۰۰۲             | ۰/۸۶۰ | -۱۰٪      | فاصله از جاده     |
| -۰/۰۰۸             | ۰/۸۵۴ | +۱۰٪      | فاصله از جاده     |
| -۰/۰۱۲             | ۰/۸۵۰ | +۲۰٪      | فاصله از جاده     |
| -۰/۰۰۲             | ۰/۸۶۰ | -۲۰٪      | کاربری اراضی      |
| -۰/۰۰۱             | ۰/۸۶۱ | -۱۰٪      | کاربری اراضی      |
| -۰/۰۰۲             | ۰/۸۶۰ | +۱۰٪      | کاربری اراضی      |
| -۰/۰۰۳             | ۰/۸۵۹ | +۲۰٪      | کاربری اراضی      |
| -۰/۰۰۲             | ۰/۸۶۰ | -۲۰٪      | زمین شناسی        |
| -۰/۰۰۱             | ۰/۸۶۱ | -۱۰٪      | زمین شناسی        |
| -۰/۰۰۱             | ۰/۸۶۱ | +۱۰٪      | زمین شناسی        |
| -۰/۰۰۲             | ۰/۸۶۱ | +۲۰٪      | زمین شناسی        |

تغییرات کمتر از ۰/۰۲ قابل قبول تلقی شده و مدل در برابر وزن ها دارای پایداری نسبتاً خوب است.

جدول ۷: تحلیل حساسیت آستانه های توابع عضویت دوزنقه ای

| ΔAUC   | AUC   | آستانه جدید | آستانه پایه       | معیار         |
|--------|-------|-------------|-------------------|---------------|
| -۰/۰۱۲ | ۰/۸۵۰ | ۲٪          | (مناسب) ۴٪        | شیب           |
| -۰/۰۰۸ | ۰/۸۵۴ | ۶٪          | ۴٪                | شیب           |
| -۰/۰۰۶ | ۰/۸۵۶ | ۸٪          | ۴٪                | شیب           |
| -۰/۰۰۲ | ۰/۸۶۰ | متر ۱۵۰     | متر (نامناسب) ۲۰۰ | فاصله از جاده |
| -۰/۰۰۴ | ۰/۸۵۸ | متر ۳۰۰     | متر ۲۰۰           | فاصله از جاده |
| -۰/۰۰۷ | ۰/۸۵۵ | متر ۴۰۰     | متر ۲۰۰           | فاصله از جاده |

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

جدول ۸: تحلیل حساسیت غیرفعال سازی قوانین غربالگری

| سناریو | قوانین غیرفعال شده                                     | $\Delta AUC$ | AUC   |
|--------|--------------------------------------------------------|--------------|-------|
| پایه   | —                                                      | —            | ۰/۸۶۲ |
| ۱      | قانون ۱ (شیب $< ۱۲\%$ یا فاصله از رودخانه $> ۵۰۰$ متر) | -۰/۰۲۲       | ۰/۸۴۰ |
| ۲      | قانون ۲ (فاصله از گسل $< ۵۰۰$ متر)                     | -۰/۰۱۴       | ۰/۸۴۸ |
| ۳      | قانون ۳ (شیب $< ۱۲\%$ )                                | -۰/۰۱۷       | ۰/۸۴۵ |
| ۴      | قوانین ۱ و ۲                                           | -۰/۰۳۲       | ۰/۸۳۰ |
| ۵      | قوانین ۱، ۲ و ۳                                        | -۰/۰۴۷       | ۰/۸۱۵ |

ارزیابی اهمیت نسبی عوامل انتخابی در شایستگی گسترش سیلاب با استفاده از منطق فازی جدول ۷ امتیاز فازی طبقات مختلف درون یک معیار را ارائه می کند. در محاسبه نهایی مطلوبیت هر پیکسل، حاصلضرب وزن معیار از جدول ۱ در امتیاز طبقه از جدول ۹ به کار رفته است. بنابراین این دو جدول مکمل یکدیگرند و مقادیر عددی آن ها نباید مستقیماً با هم مقایسه شود.

جدول ۹: وزن مخصوص معیارها بر اساس منطق فازی

| میزان مشارکت (درصد) | معیارها                   |
|---------------------|---------------------------|
| ۸/۴                 | شیب (%)                   |
| ۵/۶                 | جهت شیب                   |
| ۶/۱                 | زمین شناسی                |
| ۱۰/۱                | فاصله از گسل (m)          |
| ۵/۶                 | نوع کاربری                |
| ۸/۹                 | پوشش گیاهی                |
| ۳/۶                 | عمق خاک (cm)              |
| ۳/۶                 | بافت خاک                  |
| ۳/۶                 | نفوذپذیری (cm/h)          |
| ۸/۹                 | طبقات ارتفاعی (m)         |
| ۵                   | تراکم زهکشی               |
| ۱۰/۱                | فاصله از رودخانه (m)      |
| ۱۰/۳                | فاصله از جاده (m)         |
| ۱۰/۲                | فاصله از مناطق مسکونی (m) |

مقایسه عملکرد (Sugeno FIS) با روش های AHP, WLC و Random Forest

به منظور ارزیابی کمی روش پیشنهادی (سیستم استنتاج فازی سانگو) نسبت به رویکردهای رایج در مکان یابی پخش سیلاب، سه مدل جایگزین بر روی همان پایگاه داده (۱۴ لایه اطلاعاتی و ۱۲۵ نقطه کنترل میدانی) پیاده سازی و عملکرد آن ها با استفاده از شاخص های AUC، Accuracy و ضریب کاپا (K) مقایسه گردید.

مدل های مقایسه به شرح زیر انتخاب شدند:

# این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

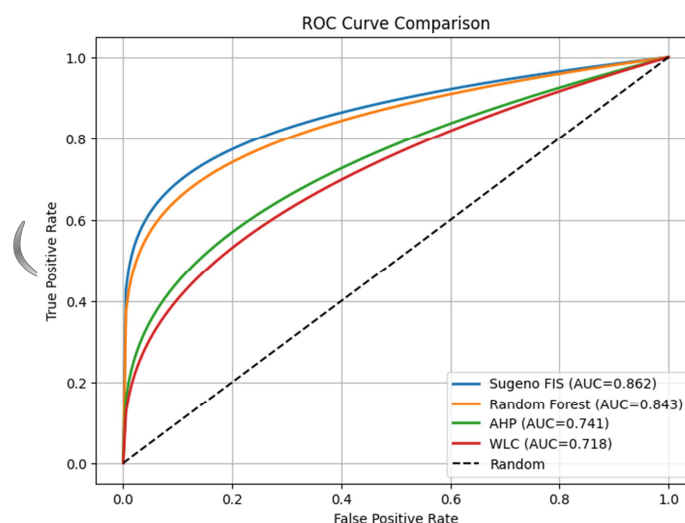
۱. روش AHP: وزن معیارها از همان ماتریس‌های مقایسه زوجی ۹ کارشناس (جدول ۱) استخراج شد. سپس با استفاده از ترکیب خطی وزنی (WLC) نقشه نهایی تولید گردید (بدون هیچ گونه فازی‌سازی).

۲. روش WLC: همان وزن‌های نهایی جدول ۱ مستقیماً روی لایه‌های نرمال شده (نه فازی شده) اعمال شد.

۳. مدل Random Forest: یک الگوریتم یادگیری ماشین پرکاربرد در پهنه‌بندی سیلاب با استفاده از ۷۰٪ نقاط کنترل برای آموزش و ۳۰٪ برای آزمون، و بهینه‌سازی تعداد درختان ( $n_{estimators}=200$ ) اجرا شد (رحمتی و همکاران، ۱۳۹۶).

تمام مدل‌ها با استفاده از همان ۱۲۵ نقطه کنترل میدانی (۷۰ نقطه سیلابی و ۵۵ نقطه غیرسیلابی) ارزیابی شدند. برای مدل‌های قطعی AHP و WLC، AUC مستقیماً از روی مقادیر مطلوبیت خروجی محاسبه گردید. برای Random Forest، میانگین AUC حاصل از ۵ بار اجرای تصادفی گزارش شد.

نتایج مقایسه در شکل ۵ ارائه شده است. مدل پیشنهادی (Sugeno FIS) با AUC معادل ۰/۸۶۲، دقت ۷۶٪ و کاپای ۰/۵۳ به طور قابل توجهی بهتر از روش AHP، WLC و Random Forest عمل کرده است. آزمون آماری DeLong برای مقایسه منحنی‌های ROC نشان داد که تفاوت بین Sugeno FIS و Random Forest از نظر آماری معنی‌دار است ( $p\text{-value} < 0.05$ ) جدول ۱۰.



شکل ۵: مقایسه منحنی ROC مدل‌های ارزیابی شده حساسیت به سیل

جدول ۱۰: مقایسه آماری معناداری تفاوت میان عملکرد مدل‌ها

| جفت مقایسه مدل‌ها            | تفاوت سطح زیر منحنی ( $\Delta AUC$ ) | مقدار دقیق آزمون ( $p\text{-value}$ ) |
|------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|
| Sugeno FIS vs. Random Forest | ۰/۰۱۹                                | $p=۰/۰۳۸$                             |
| Sugeno FIS vs. AHP           | ۰/۱۲۱                                | $p<۰/۰۰۱$                             |
| Sugeno FIS vs. WLC           | ۰/۱۴۴                                | $p<۰/۰۰۱$                             |
| Random Forest vs. AHP        | ۰/۱۰۲                                | $p=۰/۰۰۱$                             |
| Random Forest vs. WLC        | ۰/۱۲۵                                | $p<۰/۰۰۱$                             |
| AHP vs. WLC                  | ۰/۰۲۳                                | $p=۰/۴۱۲$                             |

## این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

برتری مدل فازی سانگو عمدتاً ناشی از دو ویژگی است: توابع عضویت دوزنقه‌ای که امکان مدل‌سازی مرزهای تدریجی بین طبقات (مثلاً شیب ۴٪ تا ۸٪) را فراهم می‌کند و قوانین اگر-آنگاه غیرخطی که تعامل بین معیارها (مثلاً شیب کم همراه با فاصله زیاد از جاده) را بهتر از ترکیب خطی ساده منعکس می‌سازد. روش Random Forest علیرغم دقت نسبتاً خوب، نتوانست از مدل فازی پیشنهادی فراتر رود که این امر به محدودیت داده‌های آموزشی (تنها ۱۲۵ نقطه در یک حوضه ۱۷۱ کیلومترمربعی) نسبت داده می‌شود. در شرایط کم‌داده، مدل‌های مبتنی بر دانش خبره مانند Sugeno FIS بر مدل‌های داده-محور برتری دارند (جانگ، ۱۹۹۳). از سوی دیگر، عملکرد ضعیف AHP و WLC نشان می‌دهد که صرفاً استفاده از وزن‌های کارشناسی بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت درون-معیاری (که در توابع عضویت فازی لحاظ می‌شود) برای مکان‌یابی پخش سیلاب در محیط‌های نیمه-خشک کافی نیست. بنابراین، یافته‌های این مطالعه تأکید می‌کند که تلفیق منطق فازی با قوانین خبره می‌تواند دقت و قابلیت اطمینان مدل‌های تصمیم‌گیری مکانی را به طور معنی‌داری افزایش دهد.

### نتایج و بحث

نتایج این پژوهش نشان داد که سیستم استنتاج فازی سانگو مبتنی بر GIS، با بهره‌گیری از ۱۴ معیار منتخب و ۳۲ قانون سلسله‌مراتبی در شناسایی مناطق مستعد پخش سیلاب در حوضه مورد مطالعه عملکرد بالایی دارد. مدل پیشنهادی با قدرت تفکیک خوب ( $AUC = 0.86$ )، توافق معنی‌دار با واقعیت زمینی ( $\kappa = 0.53$ ) و دقت کلی ۷۶٪، به‌طور معنی‌داری از روش‌های AHP، WLC و Random Forest بهتر عمل کرد. در میان ۱۴ معیار بررسی‌شده، شیب زمین (۱۲/۸٪)، فاصله از رودخانه (۱۱/۶٪)، نوع کاربری اراضی (۱۰/۴٪)، فاصله از جاده (۹/۲٪) و زمین‌شناسی (۹/۹٪) پنج عامل کنترل‌کننده اصلی مکان‌یابی را تشکیل دادند. تنها ۷/۴٪ از مساحت حوضه (حدود ۲۵ هکتار در کل حوضه) واجد شرایط کاملاً مناسب شناخته شد، نکته محوری این است که تنها بخش محدودی از حوضه واجد شرایط بهینه است و مکان‌یابی هدفمند، پیش‌شرط توجیه‌پذیری اقتصادی سرمایه‌گذاری در این سامانه‌ها است.

بر این اساس امتیازات اختصاص‌یافته به طبقات مختلف در جدول ۴ (که نشان‌دهنده حساسیت درون-معیاری است)، فاصله از جاده با امتیاز تجمعی بالاتر (۱۰/۳٪) نسبت به شیب (۸/۴٪) ظاهر می‌شود. جاده‌ها به ویژه از نوع آسفالت، با ایجاد سطح نفوذناپذیر و شیب طولی، به عنوان کانال‌های هدایت رواناب عمل می‌کنند. بر اساس جداول استاندارد NRCS (USDA-NRCS TR-55, 1986)، ضریب رواناب جاده‌های آسفالت  $CN = 98$  به‌طور قابل توجهی بیشتر از مراتع با وضعیت متوسط در گروه خاکی ( $CN \approx 74$ ) است. این تفاوت CN بر اساس فرمول SCS Lag منجر به کاهش زمان تمرکز به میزان ۶۰ تا ۷۰٪ و در نتیجه افزایش ۲.۵ تا ۳ برابری سرعت تجمع جریان می‌شود (آرنولد و جونیور و گیونز<sup>۱</sup>، ۱۹۹۶؛ دان و لئوپولد<sup>۲</sup>، ۱۹۷۸؛ NRCS، ۲۰۱۰). در حوضه قویجق که با خاک‌های لسی با نفوذپذیری کم پوشیده شده است، این اثر تشدید می‌شود. بنابراین، نزدیکی به جاده یعنی نزدیکی به یک منبع تولید رواناب با شدت حدود ۲/۷ برابر بیشتر از زمین مرتعی طبیعی است. این مکانیسم توضیح می‌دهد که چرا فاصله از جاده در تعیین مناطق مناسب پخش سیلاب از شیب مهم‌تر است، شیب بر سرعت جریان تأثیر می‌گذارد، اما جاده حجم جریان ورودی را اساساً تغییر می‌دهد. جاده نه تنها رواناب تولید می‌کند، بلکه به عنوان یک مانع فیزیکی برای

<sup>1</sup> Arnold Jr & Gibbons

<sup>2</sup> Dunne & Leopold

## این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

توزیع یکنواخت آب در سطح پخش عمل می کند. عبدو و همکاران (۲۰۲۵) در مطالعه‌ای در حوضه مدیترانه شرقی با رویکرد تحلیل چندمعیاره، تأکید اصلی را بر عوامل فیزیوگرافیک (ارتفاع، شیب، تراکم زهکشی) قرار دادند و نقش کمتری برای عوامل زیرساختی مانند جاده در نظر گرفتند. یافته‌های حوضه قویجق نشان می‌دهد که در حوضه‌های نیمه‌خشک با توسعه زیرساختی متوسط و خاک‌های لسی، نادیده گرفتن اثر جاده‌ها می‌تواند منجر به خطای قابل توجه در مکان‌یابی شود. زیرا جاده‌ها در این محیط‌ها عملاً به کانال‌های هدایت رواناب تبدیل می‌شوند. یوسفی و همکاران (۱۳۹۹) در مطالعه مکان‌یابی پخش سیلاب در خرم‌آباد با ترکیب مدل‌های AHP و Fuzzy-WLC، فاصله از جاده را به عنوان یکی از سه عامل اول در اولویت‌بندی معرفی کردند. این همسویی تأیید می‌کند که در حوضه‌های نیمه‌خشک ایران، توسعه زیرساخت راه به اندازه شیب یا بیشتر بر رفتار هیدرولوژیکی حوضه تأثیر می‌گذارد.

وزن بالای فاصله از رودخانه (۱/۱۰٪) در مدل فازی نیز ریشه در سه مکانیسم فیزیکی مجزا دارد که مناطق مجاور رودخانه را برای پخش سیلاب نامناسب می‌سازد. خاک‌های حاشیه رودخانه‌ها به دلیل تغذیه دائمی از جریان پایه، معمولاً رطوبت اولیه بالایی دارند. در حوضه قویجق با سطح آب زیرزمینی نسبتاً کم عمق، ظرفیت نفوذ باقیمانده خاک به شدت کاهش می‌یابد. در نتیجه، حتی در زمان وقوع سیلاب، خاک حاشیه رودخانه توانایی جذب حجم اضافی آب را نداشته و رواناب سطحی غالب خواهد بود. این وضعیت با هدف اصلی پخش سیلاب در تضاد است. احداث سازه‌های پخش سیلاب در فاصله کم از بستر اصلی رودخانه، خطر برگشت جریان در هنگام سیلاب‌های بزرگ را افزایش می‌دهد. زمانی که دبی رودخانه از ظرفیت کانال اصلی فراتر رود، آب به سمت دشت سیلابی و از جمله مکان‌های پخش سیلاب بازمی‌گردد. این پدیده می‌تواند باعث آب‌گرفتگی مجدد، فرسایش کانال‌های توزیع و در مواردی تخریب کامل سازه شود. مطالعات قبلی آکوتیون<sup>۱</sup> (۲۰۲۲) نشان داده‌اند که پهنه‌های با فاصله کمتر از ۵۰۰ متر از رودخانه اصلی، بالاترین ریسک برگشت جریان را دارند. رسوبات آبرفتی حاشیه رودخانه در حوضه قویجق عمدتاً از لس و لوم سیلتی با چسبندگی کم تشکیل شده‌اند. این مواد در اثر اشباع شدن مقاومت برشی خود را به شدت از دست می‌دهند. احداث هرگونه سازه انحرافی یا حوضچه پخش بر روی چنین بستری، خطر نشست، ترک خوردگی و در موارد شدید گسیختگی هیدرولیکی را به همراه دارد. از این رو، کارشناسان محلی نیز فاصله بیش از ۲۰۰۰ متر از رودخانه را به عنوان طبقه بسیار مناسب تعریف کرده‌اند. چزگی و سهیلی (۱۳۹۹) در مطالعه تایید نیز فاصله از رودخانه را با وزن بیش از ۱۰٪ به عنوان یکی از چهار معیار اصلی مکان‌یابی پخش سیلاب معرفی کردند که با یافته‌های این پژوهش همسویی کامل دارد.

یکی از تفاوت‌های قابل توجه بین یافته‌های این پژوهش و مطالعه پیروزی و همکاران (۱۴۰۳) در حوضه خلخال، جایگاه معیار لیتولوژی (زمین‌شناسی) در اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر پخش سیلاب است. در مطالعه خلخال، لیتولوژی به عنوان اولین عامل تعیین‌کننده معرفی شد، در حالی که در حوضه قویجق، لیتولوژی با وزن ۶/۱٪ در رتبه پنجم قرار گرفت. این تضاد ظاهری، نه به دلیل نقص روش‌شناسی، بلکه ریشه در تفاوت بنیادین ساختار زمین‌شناسی دو حوضه دارد و این تفاوت بنیادین نشان می‌دهد که مدل‌های فازی در حوضه‌های لسی همگن رفتار متفاوتی دارند و نمی‌توان یافته‌های حوضه‌های کوهستانی متنوع را مستقیماً به آن‌ها تعمیم داد. در مطالعه پیروزی و همکاران (۱۴۰۳) تنوع لیتولوژیک بسیار بالایی وجود دارد. این منطقه شامل سنگ‌های آذرین (مانند آندزیت و بازالت)، سنگ‌های رسوبی (ماسه‌سنگ، شیل، کنگلومرا) و سنگ‌های دگرگونی (شیست، مرمر) با نفوذپذیری‌های

<sup>1</sup> Akoteyon

## این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

بسیار متفاوت (از کمتر از ۰/۱ تا بیش از ۱۰۰ میلی‌متر بر ساعت) است. چنین تنوعی باعث می‌شود که لیتولوژی به عنوان قوی‌ترین عامل کنترل‌کننده نفوذ و رواناب ظاهر شود. در مقابل، حوضه قویجق از نظر لیتولوژیک به طور قابل توجهی همگن‌تر است: بر اساس نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ منطقه، بیش از ۸۵٪ از مساحت حوضه قویجق از لس (L) و رسوبات آبرفتی کواترنری TRL و TRH پوشیده شده است. این واحدها دارای رفتار هیدرولیکی تقریباً یکسان هستند: نفوذپذیری نسبتاً کم (به دلیل بافت سیلتی-رسی)، واکنش مشابه به اشباع، و پتانسیل تقریباً برابر برای تولید رواناب. دو واحد دیگر (سازند سنگانه و سازند سرچشمه) تنها در بخش‌های محدود جنوب شرقی حوضه رخنمون دارند و از نظر مساحت ناچیز هستند. در نتیجه، تمایز لیتولوژیک قادر به ایجاد تفاوت معنادار در مطلوبیت پخش سیلاب در سطح حوضه نیست و وزن این معیار به طور طبیعی کاهش می‌یابد. یافته‌های این پژوهش با قاعده کلی در مطالعات مکان‌یابی پخش سیلاب همخوانی دارد، اهمیت لیتولوژی با افزایش تنوع زمین‌شناسی حوضه، افزایش می‌یابد (عبدو و همکاران، ۲۰۲۴ و چزگی و سهیلی، ۱۳۹۹). در حوضه‌های با پوشش یکنواخت رسوبی کواترنری مانند دشت‌های شمالی ایران، نقش لیتولوژی معمولاً در رتبه‌های دوم تا پنجم قرار می‌گیرد در حالی که در مناطق کوهستانی با ساختارهای پیچیده زمین‌شناسی مانند خلخال، لیتولوژی به عنوان اصلی‌ترین عامل ظاهر می‌شود. بنابراین، تضاد مشاهده‌شده نه تنها نقص مدل نیست، بلکه تأییدی بر قابلیت روش فازی در انعکاس ویژگی‌های بومی هر حوضه است.

اولویت شیب زمین در اولویت‌بندی عوامل (۱۲,۸٪) با مکانیسم‌های هیدرولوژیکی شناخته‌شده همخوانی دارد: در حوضه‌های لسی، شیب کمتر زمان ماند آب بر سطح خاک را افزایش داده و فرصت بیشتری برای نفوذ اولیه فراهم می‌آورد. اما وجه متمایز این پژوهش آن است که خاک‌های لسی حوضه قویجق رفتار هیدرولوژیکی متناقضی دارند که در ادبیات کمتر به آن توجه شده است. لس به دلیل ساختار متخلخل، نفوذپذیری اولیه نسبتاً بالایی دارد. به محض اشباع شدن، ذرات رسی سطح حفرات را مسدود می‌کنند و نفوذپذیری به کمتر از  $0.02 \text{ cm/h}$  کاهش می‌یابد (رجبی‌زاده و همکاران، ۱۳۹۸). این بدان معناست که در اغلب رویدادهای سیلابی، لایه لسی به سرعت اشباع می‌شود و پس از آن هیچ ظرفیت جذب اضافی ندارد. بنابراین، شیب کم بدون همراهی عمق خاک مناسب و دوری از مناطق با رطوبت اولیه بالا، به تنهایی برای مناسب بودن یک مکان کافی نیست، این تعامل غیرخطی بین معیارها دقیقاً همان چیزی است که منطق فازی در قالب قوانین سلسله‌مراتبی آن را بازنمایی می‌کند. چزگی و سهیلی (۱۳۹۹) در مطالعه شهرستان تایباد با استفاده از مدل‌های TOPSIS و VIKOR نشان دادند که شیب، فاصله از رودخانه و لیتولوژی مهم‌ترین عوامل کنترل‌کننده پخش سیلاب در مناطق نیمه‌خشک ایران هستند. همسویی این اولویت‌بندی با اولویت شیب زمین در اولویت‌بندی عوامل در حوضه قویجق نشان می‌دهد که نقش کلیدی عوامل فیزیوگرافیک، مستقل از روش‌شناسی مورد استفاده است. آلوئی و همکاران (۲۰۲۴) در مطالعه‌ای مبتنی بر MCDM-GIS در قطر، شیب زمین و فاصله از آبراهه‌ها را به عنوان عوامل اصلی مناطق مناسب تغذیه آبخوان در مناطق خشک شناسایی کردند. همچنین قادر و همکاران (۲۰۲۴) در بنگلادش با رویکرد AHP-GIS به همگرایی مشابهی در اولویت‌بندی عوامل توپوگرافی و هیدرولوژیکی دست یافتند. این همسویی اعتبار قابل تعمیمی به یافته‌های این پژوهش می‌بخشد.

مطالعه پیروزی و همکاران (۱۴۰۳) در حوضه خلخال نشان داد که رویکرد فازی نسبت به روش‌های کلاسیک MCDM عملکرد بهتری ارائه می‌دهد. این یافته در کنار نتایج ارزیابی مقایسه‌ای این پژوهش، که برتری معنی‌دار

## این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

Sugeno FIS بر AHP و WLC را به اثبات کرد، تصویر منسجمی از کارایی منطق فازی در مسائل مکان‌یابی چندمعیاره ارائه می‌دهد. مالکی نیا و همکاران (۲۰۲۵) و آیت ناسیور و همکاران (۲۰۲۴) نیز نشان دادند که الگوریتم‌های یادگیری ماشین مانند Random Forest و Gradient Boosting در وجود داده‌های آموزشی کافی، دقت بالاتری نسبت به روش‌های سنتی ارائه می‌دهند. این برتری در پژوهش حاضر تکرار نشد، چرا که در حوضه‌ای با تنها ۱۲۵ نقطه کنترل در ۱۷۱ کیلومترمربع، الگوریتم دچار بیش‌برازش شد و AUC آن (۰/۸۴۳) در مقابل مدل فازی (۰/۸۶۲) پایین‌تر ماند. این یافته تأیید می‌کند که برتری روش‌های داده محور مشروط به وجود حجم کافی داده آموزشی است و در حوضه‌های کم‌داده، مدل‌های خبره محور مانند Sugeno FIS کارایی بهتری دارند.

### نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از ظرفیت ذخیره‌سازی سطحی برآورد شده در مقیاس محدود پهنه‌های کاملاً مناسب نشان می‌دهد که توسعه گسترده سامانه‌های پخش سیلاب در کل سطح حوضه قویجق از نظر فنی و هیدرولوژیکی پاسخگوی مدیریت سیلاب‌های کلان نیست. اما این امر به معنای ناکارآمدی آن‌ها نیست. هدف اصلی این سامانه‌ها ایجاد مخازن ذخیره کلان نبوده، بلکه عملکرد آن‌ها مبتنی بر پخش کنترل‌شده جریان، افزایش زمان تمرکز، رسوب‌گذاری تدریجی و تغذیه مصنوعی سفره‌های آب زیرزمینی در مناطق نیمه‌خشک است. بنابراین، توسعه این سامانه‌ها باید در قالب یک رویکرد مدیریت جامع و ترکیبی حوضه آبخیز (تلفیق سامانه‌های پخش سیلاب در بالادست برای تعدیل پیک جریان با سازه‌های ذخیره‌ای در پایین‌دست) تفسیر شود تا کارایی اکولوژیکی و اقتصادی آن‌ها به طور هم‌زمان محقق گردد. همچنین نتایج مقایسه مدل‌ها نشان داد که الگوریتم Random Forest دقت قابل قبولی در تفکیک مناطق ارائه داد، اما تفاوت ظریف عملکرد آن با مدل Sugeno FIS نشان‌دهنده تفاوت ماهوی در رویکرد این دو مدل است. مدل‌های یادگیری ماشین داده‌محور به شدت وابسته به توزیع و تراکم نمونه‌های آموزشی در سطح حوضه هستند و در مقیاس‌های محلی یا حوضه‌های کوچک‌تر (مانند منطقه مورد مطالعاتی)، عملکرد آن‌ها تحت تأثیر محدودیت نمونه‌های مستند قرار می‌گیرد؛ در حالی که سیستم‌های استنتاج فازی مبتنی بر دانش خبره (Sugeno FIS) به دلیل بهره‌گیری از قواعد منطقی و ساختار توابع عضویت، وابستگی کمتری به حجم انبوه داده‌های آموزشی دارند (جانگ، ۱۹۹۳). این تفاوت رفتاری حاکی از برتری ذاتی مطلق نبوده، بلکه نشان‌دهنده انطباق بهتر مدل‌های دانش‌محور با شرایط داده‌ای حوضه‌های نیمه‌خشک است. شایان‌ذکر است که تأثیر عوامل متعددی بر پراکنش سیلاب که به طور قابل توجهی مشروط به ویژگی‌های منحصر به فرد هر مکان است. تعامل بین ویژگی‌های طبیعی، اقلیمی، زمین‌شناسی و انسانی در هر حوضه می‌تواند عوامل خاصی را در تولید سیلاب و کنترل آن نقش غالب داشته باشد. به طور خلاصه انتخاب موثرترین معیارها به تحلیل با شرایط و الزامات محلی بستگی دارد. مدل‌سازی علمی داده‌های تجربی و دانش محلی و تخصص به طور ایده‌آل این فرآیند را آگاه می‌کنند. انتخاب نادرست یا سو مدیریت محل‌های انحرافی سیل می‌تواند منجر به پیامدهای شدید هیدرولوژیکی و اقتصادی اجتماعی شود. وقتی سازه‌های انحرافی سیل در مناطق نامناسب ساخته می‌شوند نتیجه می‌تواند رسوبگذاری کنترل‌نشده، آسیب به زیرساخت‌ها و از دست دادن سرمایه اکولوژیکی و انسانی باشد. بنابراین تقویت جمع‌آوری داده‌ها، مدل‌سازی چند معیاره و پایش بلادرنگ با همکاری مقامات مدیریت آب و برنامه ریزان شهری ضروری است. بهترین راهکار برای مهار سیلاب‌های ویرانگر در منطقه، ترکیب سامانه‌های پخش سیلاب و سد های خاکی در قالب یک مدیریت جامع حوضه آبخیز است. از سامانه های

# این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفا برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

پخش سیلاب در بالادست برای مهار بخشی از جریان سیلاب های بزرگ استفاده کرد و همزمان، در پایین دست، از سدهای خاکی برای مدیریت جریان های اضافی بهره برد. تکیه بر سدهای خاکی می تواند ریسک فاجعه بار شکست (بر اثر سیلابی بزرگتر از ظرفیت طراحی)، حجم عظیم آب به یکباره رها شده و سیلابی بسیار ویرانگرتر از حالت طبیعی ایجاد کند. برای عبور از پیچیدگی پیش بینی ناشی از سیلاب ها، پیاده سازی سیستم پیش بینی احتمالاتی گروهی<sup>۱</sup> با استفاده از خروجی مدل های جهانی نظیر ECMWF و GFS و ریزمقیاس نمایی دینامیکی با مدل WRF، می تواند پنجره هشدار سیلاب را از ۲۴ ساعت به ۷۲ ساعت افزایش دهد. در راستای گزارش ارزیابی سازمان ملل (UNDP) و با استناد به چارچوب سندای (Sendai Framework 2015-2030)، راهبردهای سازگاری شامل: احیای اکولوژیک بالادست از طریق بذریاشتی هوایی گونه های مقاوم به خشکی و احداث بندهای سنگ ملاتی (گابیونی) جهت کاهش سرعت رواناب، پهنه بندی خطر دینامیک با تلفیق مدل های هیدرولیکی دو بُعدی و داده های لیدار (LiDAR) برای تفکیک طبقات خطر A، B و C در حریم رودخانه ها و ایجاد سامانه های هشدار چندمعیاره (Multi-Criteria EWS) که نه تنها داده های هواشناسی، بلکه رطوبت پیشین خاک و وضعیت برفاب را به صورت لحظه ای با استفاده از شبکه های عصبی عمیق (LSTM) پردازش کند پیشنهاد می گردد. تلفیق این تلاش ها نه تنها آسیب پذیری زیرساخت را کاهش می دهد بلکه قابلیت های پیش بینی برای روندیابی سیل و ارزیابی ریسک را افزایش می دهد. علاوه بر این حمایت از تحقیقات منطقه ای در زمینه دینامیک سیل، بینش مهمی را در مورد مسیرهای انتشار سیلاب و شدت آن فراهم خواهد کرد که این امر پیش بینی دقیق تر و مدیریت پیشگیرانه را ممکن می سازد.

## تقدیر و تشکر

سپاس و قدردانی بی پایان از علی حشمت پور، نویسنده مسئول فقید این اثر، که با دانش و مهریانی خود چراغ راه این پژوهش بودند. همکاری با ایشان افتخاری بزرگ بود. یادش گرامی، نامش ماندگار و راهش پررهرو باد.

## بیانیه دسترسی به داده ها

داده های تکمیلی این مقاله در نسخه آنلاین آن به نشانی <https://doi.org/10.5281/zenodo.22761768> قابل دسترسی است.

## منابع

- اسلامی، علیرضا؛ عباسی، علی اکبر. (۱۴۰۴). رویکردها و تجارب در کنترل سیلاب رودخانه های فصلی و عملکرد سامانه های پخش سیلاب بر آبخوارها، نشریه سامانه های سطوح آبگیر باران، ۱۳(۳)، ۵۵-۷۲. <http://jircsa.ir/article-1-594-en.html>
- پهلوانی، پرهام؛ حسنلو، محمد؛ بیگدلی، بهناز؛ اسلامی نژاد، سید احمد. (۱۴۰۱). ارائه مدل ترکیبی مکان مبنا جهت پهنه بندی خطر سیلاب (منطقه مورد مطالعه: شهرستان مانه و سملقان). مخاطرات محیط طبیعی، ۱۱(۳۱)، ۱۷۳-۱۹۲. doi: 10.22111/jneh.2021.36392.1724
- پیروزی، الناز؛ اصغری سراسکانرود، صیاداسغر؛ زینالی، بتول. (۱۴۰۳). شناسایی و پهنه بندی مناطق مستعد سیلاب در شهرستان خلخال. تحقیقات منابع آب ایران، ۲۰(۲)، ۱۵-۳۲. <https://doi.org/10.22034/iwrr.2024.437377.2739>

<sup>1</sup> Probabilistic Ensemble Prediction System

## این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفا برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

- جهانی، محمد؛ دستورانی، محمد تقی؛ راشکی، علیرضا. (۱۴۰۳). پیش بینی جریان های سیلابی بر اساس حل ترکیبی داده های Google Earth Engine و مدل های هوش مصنوعی [پژوهشی]. نشریه سامانه های سطوح آبگیر باران، ۱۲(۴)، ۵۱-۷۲. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.24235970.1403.12.4.6.5>
- چزگی، جواد و سهیلی، اسماعیل. (۱۳۹۹). کاربرد مدل های تصمیم گیری TOPSIS و VIKOR در مکان یابی پخش سیلاب در مناطق خشک و نیمه خشک (مطالعه موردی: شهرستان تایباد). مدیریت بیابان، ۱۶(۸)، ۱۶۹-۱۸۲. doi: 10.22034/jdmal.2021.243145
- حشمت پور، علی؛ سجادی، سیدجواد؛ محمدیان، یوسف. (۱۴۰۳). مدیریت بارش با استفاده از سطوح جمع آوری باران در مناطق نیمه خشک (مطالعه موردی: حوضه آبخیز قویچق). نشریه مرتع و آبخیزداری، ۷۷(۳)، ۳۷۱-۳۸۷. <https://doi.org/10.22059/jrwm.2024.373203.1750>
- رامک، زهره؛ زیدعلی نژاد، نجات. (۱۴۰۰). مروری بر تغذیه مصنوعی آبخوان ها به عنوان فرآیندی در مقابل تنش های وارد بر آب های زیرزمینی. سامانه های سطوح آبگیر باران. ۱۴۰۰؛ ۹(۲): ۳۵-۵۶
- رجبی زاده، یوسف؛ ایوب زاده، سیدعلی؛ ظهیری، عبدالرضا. (۱۳۹۸). بررسی سیلاب استان گلستان در سال ۱۳۹۷-۱۳۹۸ و ارائه راهکارهای کنترل و مدیریت آن در آینده. اکوهیدرولوژی، ۶(۴)، ۹۲۱-۹۴۲. <https://doi.org/10.22059/ije.2019.283004.1137>
- رحمتی، امید؛ نظری سامانی، علی اکبر؛ محمودی، نریمان؛ چوبین، بهرام. (۱۳۹۶). ارزیابی کاربرد تکنیک گردیدنگ و روش AHP در پهنه بندی تغذیه مصنوعی (مطالعه موردی: حوضه چمشور، کردستان). نشریه مرتع و آبخیزداری، ۷۰(۳)، ۶۸۱-۶۹۳. <https://doi.org/10.22059/jrwm.2017.23048>
- عظیمی، مژگان السادات؛ رهبر، غلامرضا؛ منصوری، شهرزاد. (۱۳۹۷). مکانیابی و اولویت بندی مناطق مناسب پخش سیلاب با استفاده از GIS و تحلیل تصمیم چند معیاره) AHP مطالعه موردی: حوضه آبخیز گرگانرود، گلستان. نشریه علوم و تکنولوژی محیط زیست، ۲۰(۴)، ۱۷۹-۱۹۲.
- غلامی، فرزانه؛ انتظاری، مژگان؛ داگری نژاد، رضا؛ کریمی، حاجی. (۱۴۰۴). تحلیل حساسیت سیلاب با استفاده از الگوریتم Random Forest و شبکه عصبی مصنوعی. مطالعه موردی استان ایلام. مجله مخاطرات محیط طبیعی، ۱۰(۱)، ۱-۱۰. doi: 10.22111/jneh.2025.51893.2111
- غلامی، محمد؛ احمدی، مهدی. (۱۳۹۸). ریزپهنه بندی خطر سیلاب در شهر لامرد با استفاده از روش AHP، GIS و Fuzzy. مجله مخاطرات محیط طبیعی، ۸(۲۰)، ۱۰۱-۱۱۴. doi: 10.22111/jneh.2018.22505.1334
- کریمی، سنگچینی ابراهیم؛ یوسفی میرهن، ابراهیم؛ ویسکرمی، ایرج؛ ویسکرمی، فیروزه. (۱۴۰۳). بررسی اثر پخش سیلاب بر نفوذپذیری خاک (مطالعه موردی: پخش سیلاب داوودرشد کوه دشت). مجله علوم ومهندسی آبخیزداری ایران. ۱۸ (۶۶): ۴۹-۵۸. <http://jwmsei.ir/article-1-1163-fa.html>
- گزارش اجتماعی- بررسی علل وقوع سیل گلستان. (۱۳۸۰). علل وقوع سیلاب های گلستان و اقدامات انجام شده برای پیشگیری از سیلاب های ویرانگر آینده. ایسنا، خبرگزاری دانشجویان ایران.
- ملکی نیا، مهران؛ جاوید، امیرحسین؛ رحمتی، سیده هدی؛ جهانگیر، علیرضا. (۱۴۰۴). مقایسه مدل های عددی و الگوریتم های یادگیری ماشین با رویکرد پیش بینی تراز آب زیرزمینی: مطالعه ای موردی در دشت بیرجند. آبخوان و قنات، ۲۶(۲)، ۲۵۷-۲۸۱. doi: 10.22077/jaaq.2026.10568.1133
- میر موسوی، سید حسین؛ اسماعیلی، حسین. (۱۴۰۰). پهنه بندی مناطق سیل خیز با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) و سنجش از دور (RS)، (مطالعه موردی: شهرستان داراب). مجله مخاطرات محیط طبیعی، ۱۰(۲۷)، ۲۱-۴۶. doi: 10.22111/jneh.2020.32986.1613
- وهایی، جلیل. (۱۳۸۲). تحلیل سامانه های پخش سیلاب و معرفی نیازهای تحقیقاتی. پژوهش و سازندگی، ۱۶(۳)، ۲۲-۲۹.
- یوسفی، حسین؛ یونسی، حجت اله؛ شاهی نژاد، بابک؛ ارشیا، آزاده؛ میرزاپور، حافظ؛ یاراحمدی، یزدان. (۱۳۹۹). مکان یابی پخش سیلاب با تلفیق مدل های AHP و Fuzzy با استفاده از روش WLC در GIS (مطالعه موردی: حوضه آبخیز خرم آباد). مجله اکوهیدرولوژی، ۱۷(۱)، ۲۵۱-۲۶۱. doi: 10.22059/ije.2020.293199.1244
- Abdo, H. G., Zeng, T., Alshayeb, M. J., Prasad, P., Ahmed, M. F. M., Albanai, J. A., Alharbi, M. M., & Mallick, J. (2025). Multi-criteria analysis and geospatial applications-based mapping of flood-vulnerable areas: a case study from the eastern Mediterranean. *Natural Hazards*, 121(1), 1003–1031. <https://doi.org/10.1007/s11069-024-06864-y>
- Ait Naceur, H., Abdo, H. G., Igmoullan, B., Namous, M., Alshehri, F., & Albanai, J. (2024). Implementation of random forest, adaptive boosting, and gradient boosting decision trees algorithms for gully erosion susceptibility mapping using remote sensing and GIS. *Environmental Earth Sciences*, 83(3), 121. <https://doi.org/10.1007/s12665-024-11424-5>

- Akoteyon, I. S. (2022). Factors influencing the occurrence of flooding, risk and management strategies in Lagos, Nigeria. *Sustainable Water Resources Management*, 8(3), 68. <https://doi.org/10.1007/s40899-022-00651-y>
- Aloui, S., Zghibi, A., Mazzoni, A., Elomri, A., & Al-Ansari, T. (2024). Identifying suitable zones for integrated aquifer recharge and flood control in arid Qatar using GIS-based multi-criteria decision-making. *Groundwater for Sustainable Development*, 25, 101137. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2024.101137>
- Arab Amiri, M., & Mesgari, M. S. (2019). Spatial variability analysis of precipitation and its concentration in Chaharmahal and Bakhtiari province, Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 137(3), 2905–2914. <https://doi.org/10.1007/s00704-019-02787-y>
- Arnold Jr., C. L., & Gibbons, C. J. (1996). Impervious surface coverage: the emergence of a key environmental indicator. *Journal of the American Planning Association*, 62(2), 243–258. <https://doi.org/10.1080/01944369608975688>
- Chang, C.-W., & Tao, C.-W. (2017). A novel approach to implement Takagi-Sugeno fuzzy models. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 47(9), 2353–2361. <https://doi.org/10.1109/TCYB.2017.2701900>
- Doostmohamadi, M., & Hosseini, K. (2026). Enhancing artificial groundwater recharge site selection via flood spreading with remote sensing and FAHP in the Semnan plain. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 23(6), 470. <https://doi.org/10.1007/s13762-026-07193-2>
- Dunne, T., & Leopold, L. B. (1978). *Water in environmental planning*. Macmillan.
- Garba, H., & Abubakar, Z. (2023). Effect of slope and runoff trends on the hydrological response of River Kaduna. *ABUAD Journal of Engineering Research and Development*, 6(2), 183–191. <https://doi.org/10.53982/ajerd.2023.0602.18-j>
- Hashemi, H., Berndtsson, R., & Persson, M. (2015). Artificial recharge by floodwater spreading estimated by water balances and groundwater modelling in arid Iran. *Hydrological Sciences Journal*, 60(2), 336–350. <https://doi.org/10.1080/02626667.2014.881485>
- Jang, J.-S. (1993). ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 23(3), 665–685. <https://doi.org/10.1109/21.256541>
- Kader, Z., Islam, M. R., Aziz, M. T., Hossain, M. M., Islam, M. R., Miah, M., & Jaafar, W. Z. W. (2024). GIS and AHP-based flood susceptibility mapping: a case study of Bangladesh. *Sustainable Water Resources Management*, 10(5), 170. <https://doi.org/10.1007/s40899-024-01150-y>
- Malczewski, J., & Rinner, C. (2015). *Multicriteria decision analysis in geographic information science* (Vol. 1). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-74757-4>
- Naghibi, Amir & Vafakhah, Mehdi & Hashemi, Hossein & Pradhan, Biswajeet & Alavi, Seyed Jalil. (2019). Water Resources Management Through Flood Spreading Project Suitability Mapping Using Frequency Ratio, k-nearest Neighbours, and Random Forest Algorithms. *Natural Resources Research*. 29, 1915–1933. <https://doi.org/10.1007/s11053-019-09530-4>
- NRCS (Natural Resources Conservation Service). (2010). *National Engineering Handbook: Part 630—Hydrology*. Chapter 15: Hydrologic. United States Department of Agriculture.
- Ross, T. J. (2005). *Fuzzy logic with engineering applications*. John Wiley & Sons.
- Sugeno, M. (1986). Structure identification of fuzzy model. *Fuzzy Sets and Systems*, 28(1), 329–346.
- Swets, J. A. (1988). Measuring the accuracy of diagnostic systems. *Science*, 240(4857), 1285–1293. <https://doi.org/10.1126/science.3287615>
- Takagi, T., & Sugeno, M. (1985). Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, (1), 116–132. <https://doi.org/10.1109/TSMC.1985.6313399>
- UNOCHA. (2019). *Iran Flood Response Plan* (April 2019). United Nations Office for the Coordination of Humanitarian Affairs (UNOCHA). <https://www.unocha.org/publications/report/iran-islamic-republic/islamic-republic-iran-floods-response-plan-april-2019>
- Velásquez-Espinoza, G., & Alcántara-Ayala, I. (2025). Flood risk perception and preparedness in Nicaraguan educational contexts: A study of student perspectives. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 120, 105375.
- Wilding, L. P. (1985). Spatial variability: Its documentation, accommodation, and implication to soil surveys. In D. R. Nielsen & J. Bouma (Eds.), *Soil spatial variability* (pp. 166–194). Pudoc.
- Zarkesh, M. K. (2005). *Decision support system for floodwater spreading site selection in Iran*. Wageningen University and Research.