

Flood Hazard Mapping Using the Maximum Entropy Model in the Darab Watershed

Reza Zakerinejad^{1*}, Zahra Ostad Hosseini², Yasmin Ghobishawi²

1. Corresponding Author, Assistant Professor, Faculty of Geographical Sciences and Planning, University of Isfahan, Isfahan, Iran

Email: r.zakerinejad@geo.ui.ac.ir ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2138-0973>

2. Master of Remote Sensing and Geographic Information Systems, University of Isfahan, Iran.

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received: ---

Revised: ---

Accepted: ---

Published: ---

Keywords:

Darab Watershed, Flood, Data Mining, Maximum Entropy.

ABSTRACT

Floods are among the most significant natural hazards, causing severe damage to lives, property, and the environment annually. The Darab watershed in Fars province, due to its specific climatic conditions, topography, and geological structure, is recognized as one of the areas at high risk of flooding. This study aims to prepare of flood risk map by using the Maximum Entropy (MaxEnt) model and analyze the factors influencing floods in the studied watershed. This is a quantitative and applied research that uses field and available data, focusing on areas with high flood risk. By utilizing data mining techniques, GIS, and remote sensing images, flood risk areas are classified. Various environmental and topographic factors were used as independent variables, including 19 environmental parameters such as precipitation, land slope, soil type, drainage density, land use, and moisture, and topographic indices and etc. These data were collected from reliable sources such as satellite imagery, Digital Elevation Models (DEM), meteorological stations, and geological maps. After data preprocessing, the models were run, and their accuracy was evaluated. Finally, the flood susceptibility map was validated using AUC, and high-risk areas were identified. Preparation of the flood risk map shows that approximately 20% of the Darab watershed is at high risk, especially in low-lying areas with poor vegetation and inappropriate land use. It was also determined that variables such as precipitation, distance from stream, and elevation have the most significant impact on flood occurrence. The results indicate that the MaxEnt model has acceptable capability in predicting high-risk areas and can play an effective role in crisis management and regional planning.

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

Flooding, as one of the most significant natural disasters, causes substantial loss of life and property annually. Globally and nationally, floods are responsible for a considerable percentage of casualties and damage resulting from natural disasters. For instance, in Iran, flood occurrences have increased by 40% in recent years. Effective flood management necessitates the identification of contributing factors and the determination of areas with high flood potential. In this regard, the utilization of Remote Sensing and GIS technologies provides powerful tools for this purpose. Creating a flood susceptibility map is a fundamental step in flood risk management. Flood susceptibility modeling can be performed using advanced statistical methods that can be integrated with R and GIS environments. Previous studies have employed various models such as Shannon Entropy, AHP, FAHP, fuzzy models, RF, and GLM Bayesian for flood risk mapping. Among these, machine learning models like MaxEnt and hybrid approaches combined with SAR data have been recognized as powerful tools for improving flood susceptibility mapping and identifying high-risk areas. Hanifinia & Abghari (2023) identified geology, distance from streams, elevation, and slope as the most critical flood factors in the Ziveh watershed, Urmia, using MaxEnt and GLM models. Aco Orchid et al. (2025) also presented a comprehensive approach to flood risk assessment by integrating machine learning and AHP. The Darab basin, due to its diverse slopes, varied vegetation, and different geological structures, plays a significant role in flood risk distribution. This research uses the MaxEnt model to evaluate its capability in predicting flood-susceptible areas within the Darab watershed and to examine the influence of each contributing index in flood generation. It is hoped that the results of this research will significantly assist in crisis management and resource conservation.

DATA AND METHODOLOGY

In this research, to model flood susceptibility and generate the flood-risk map, 19 environmental and hydrological datasets were collected from multiple sources to represent the main conditioning factors influencing flood occurrence. The following data layers were used: Topographic Data: Derived from a Digital Elevation Model (DEM) with 30 m spatial resolution (SRTM). Parameters such as elevation, slope, aspect, curvature, and flow accumulation were extracted using GIS-based analysis. Hydrological Data: Stream network density, distance to rivers, and drainage patterns were computed from the DEM using ArcGIS hydrology tools. Land-Use and Land-Cover (LULC): Acquired from Sentinel-2 products imagery. Soil and Geology Data: Soil texture and permeability maps were prepared from national soil databases. Geological formations were digitized from existing geological maps. Rainfall Data: Mean annual rainfall and extreme precipitation events were obtained from meteorological stations across the study area and interpolated using Inverse Distance Weighting (IDW). Flood Inventory (Dependent Variable): Historical flood locations (flood-affected points) over the past decade were collected through field surveys, remote sensing change detection, and reports from local disaster management agencies. These points were used as “presence” data for the MaxEnt model. By calculating the Area under the Curve (AUC), the flood susceptibility map was validated, and high-risk areas were identified.

RESULTS AND DISCUSSION

The analysis of the MaxEnt model results showed the contribution of each variable in predicting flood risk. Percent Contribution from the MaxEnt method has been used to assess variable influence. The percent contribution of the variables was as follows: Rain with 57.9%, Stream distance with 11.6%, Elevation with 10.2%, and Landuse Land cover with 8.5% had the highest scores. Conversely, Soil type and STI contributed the least, with 0.1%. The response curves indicated that the probability of flooding is high near streams and decreases with increasing distance. Furthermore, as rainfall increases from 100 to 200 mm, the flood probability sharply increases and then stabilizes at approximately one

after 200 mm. In terms of elevation, the highest contribution was observed at elevations below 1000 m, which gradually decreases with increasing elevation, reaching about 0.15 above 3000 m. For model validation, the Area Under the Curve (AUC) index for the ROC curve was used. The AUC for training data was 0.977, and for test data was 0.947, indicating the model's excellent performance in predicting flood risk mapping. The Flood susceptibility map and the percentage distribution of the different risk classes constitute the two main outputs of the present study, as presented in Figure 1 and Table 1, respectively.

Table 1. Distribution of flood risk classes in the Darab watershed.

Risk class	Area	Percentage(%)
low-risk	1872	78.35
Relatively low-risk	42.6	1.8
Relatively High-risk	81.3	3.4
High-risk	393.6	16.47

CONCLUSION

In this research, the MaxEnt model has been applied for the prediction of flood hazard in the Darab watershed in the southwest of Iran. The MaxEnt model is a validated and effective tool for flood risk mapping and identifying flood-prone areas, with studies showing high accuracy in predictions and identifying key contributing factors. In this research, the severity of flood risk in the Darab watershed in Fars province, Iran, was assessed using geographic data and the Maxent model. The results show that 3.4 % and 16.4 % of the study area is in the relatively high-risk and very high-risk classes. The analysis of variable contributions revealed that rainfall, distance from rivers, elevation, and land use were the most critical geo-environmental parameters influencing flood occurrence in the Darab watershed. Specifically, the response curves indicated that lower elevation areas, areas closer to river networks, and regions with impervious surfaces have a significantly higher probability of flooding.

ETHICAL CONSIDERATIONS

Conflict of Interest Statement: The authors declare no conflict of interest.

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

REFERENCES

References [in Persian]

- Avand, M. T., Moradi, H. R., and Ramazanzadeh, M. (2020). Flood Susceptibility Mapping Using Random Forest Machine Learning and Generalized Bayesian Linear Model. *Environment and Water Engineering*, 6(1), 83-95. doi: 10.22034/jewe.2020.220593.1351. [in Persian]
- Hanifinia, A. and Abghari, H. (2025). Predicting flood-prone areas using generalized linear and maximum entropy machine learning models. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 14(43), 19-34. doi: 10.22111/jneh.2024.47730.2021. [in Persian]
- Mir Mosavi, S. H., and Esmaili, H. (2021). Zoning of Flood-prone Areas Using Geographic Information System (GIS) and Remote Sensing (RS), (Case Study: Darab City). *Journal of Natural Environmental Hazards*, 10(27), 21-46. doi: 10.22111/jneh.2020.32986.1613. [in Persian]
- Nohani, E., darabi, F., maroofinia, E., and khosravi, K. (2016). Evaluation of Shannon entropy for flood probability and susceptibility mapping at the Haraz catchment. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 5(10), 99-116. doi: 10.22111/jneh.2017.2958. [in Persian]
- Rahimpour T, Rezaei Moghaddam M H. (2025). Modeling the Flood Hazard Potential in the Aji Chai Basin Using Data Mining Algorithms. *E.E.R.* 14 (4):19-38. <http://magazine.hormozgan.ac.ir/article-1-862-en.html>. [in Persian]
- Sharifi, F., & Nowrouzi, G. (1999). An analysis of the August 1999 flood in Mazandaran and Golestan provinces. *Journal of Forest and Rangeland*, No. 42, pp. 40-43. [in Persian]
- Tavakkoli M, Amirahmadi A, Goli Mokhtari L. (2024). Evaluation, Prediction, and Regional Analysis of Floods Using Data Mining Models (Frizi Watershed). *GeoRes*; 39 (2):161-168. <http://georesearch.ir/article-1-1585-en.html>. [in Persian]

Zakerinejad, R. "Evaluation of DEMs for the modeling of the potential of gully erosion using Maxent model (Case study: Semirom catchment in the south of Isfahan Province, Iran)." *Journal of RS and GIS for Natural Resources*, vol. 11, no. 3, 2020, pp. 106-122. 10.30495/girs.2020.674955. [in Persian]


Zakerinejad, R. and Ayash, K. (2024). Analysis of Flood Risk and Influencing Factors in Zohr-Jarhari Basin in Zohr-Jarhari in Southwest of Iran using Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP) Approach. *Physical Geography Research*, 56(2), 51-69. doi: 10.22059/jphgr.2024.376692.1007829. [in Persian]

References [in English]

- A. L. AchuORCID Icon, C. D. AjuORCID Icon, M. C. Raicy, Arun BhadransORCID Icon, Amal George, U. Surendran. (2025). Improved flood risk assessment using multi-model ensemble machine-learning techniques in a tropical river basin of Southern India. <https://doi.org/10.1080/02723646.2025>.
- Al-Hinai, H., & Abdalla, R. (2021). Mapping coastal flood susceptible areas using Shannon's entropy model: the case of Muscat governorate, Oman. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(4), 252. <https://doi.org/10.3390/ijgi10040252>
- Ali, A., Rana, I. A., Ali, A., & Najam, F. A. (2022). Flood risk perception and communication: The role of hazard proximity. *Journal of Environmental Management*, 316, 115309. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115309>
- Badri B, Zare R, Honarbakhsh A, Atashkhar, F. Prioritization of flood potential Beheshtabad Sub-watershed. *Journal of Geographical Studies*. 2016; 48(1): 143-158. <https://doi.org/10.22059/JPHGR.2016.57032>
- Bhattarai, Y., Duwal, S., Sharma, S., & Talchabhadel, R. (2024). Leveraging machine learning and open-source spatial datasets to enhance flood susceptibility mapping in a transboundary river basin. *International Journal of Digital Earth*, 17(1). <https://doi.org/10.1080/17538947.2024.2313857>
- Breugem, A. J., Wesseling, J. G., Oostindie, K., & Ritsema, C. J. (2020). Meteorological aspects of heavy precipitation in relation to floods – An overview. *Earth-Science Reviews*, 103171. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.10317>
- Chen, Y., Wang, B., Pollino, C. A., Cuddy, S. M., Merrin, L. E., & Huang, C. (2014). Estimate of flood inundation and retention on wetlands using remote sensing and GIS. *Ecology*, n/a–n/a. <https://doi.org/10.1002/eco.1467>
- Dovonce E. A. (2000). Physically based distributed hydrologic model. Master of Science Thesis, *The Pennsylvania State University*.
- Duwal, S., Liu, D., & Pradhan, P. M. (2023). Flood susceptibility modeling of the Karnali river basin of Nepal using different machine learning approaches. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 14(1). <https://doi.org/10.1080/19475705.2023.2217321>
- El-Haddad, B. A., Youssef, A. M., Pourghasemi, H. R., Pradhan, B., El-Shater, A.-H., & El-Khashab, M. H. (2020). Flood susceptibility prediction using four machine learning techniques and comparison of their performance at Wadi Qena Basin, Egypt. *Natural Hazards*. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04296-y>
- Gokceoglu, C., Sonmez, H., Nefeslioglu, H.A., Duman, T.Y., Can, T., 2005. The 17 March 2005 Kuzulu landslide (Sivas, Turkey) and landslide-susceptibility map of its vicinity. *Eng. Geol.* 81, 65–83. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2005.07.011>
- Harshasimha, A.C.; Bhatt, C.M. Flood Vulnerability Mapping Using MaxEnt Machine Learning and Analytical Hierarchy Process (AHP) of Kamrup Metropolitan District, Assam. *Environ. Sci. Proc.* 2023, 25, 73. <https://doi.org/10.3390/ECWS-7-14301>
- Hitouri S, Mohajane M, Lahsaini M, Ali SA, Setargie TA, Tripathi G, D'Antonio P, Singh SK, Varasano A. (2024). Flood Susceptibility Mapping Using SAR Data and Machine Learning Algorithms in a Small Watershed in Northwestern Morocco. *Remote Sensing*, 16(5), 858. <https://doi.org/10.3390/rs16050858>
- Huang, Chang & Wu, Jianping & Chen, Yun & Yu, Jia. (2012). Detecting floodplain inundation frequency using MODIS time-series imagery. 2012 1st International Conference on Agro-Geoinformatics, *Agro-Geoinformatics 2012*. 1-6. <https://doi.org/10.1109/Agro-Geoinformatics.2012.6311668>
- Huang, C., Chen, Y., Wu, J. (2013). GIS-based spatial zoning for flood inundation modelling in the Murray-Darling Basin. *20th International Congress on Modelling and Simulation 2013 (MODSIM2013)*.
- Huang, C., Chen, Y., & Wu, J. (2014). Mapping spatio-temporal flood inundation dynamics at large river basin scale using time-series flow data and MODIS imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 26, 350–362. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2013.09.002>
- Huang, C., Chen, Y., Wu, J., Chen, Z., Li, L., Liu, R., Yu, J., 2014c. Integration of remotely sensed inundation extent and high-precision topographic data for mapping inundation depth. In: 3rd International Conference on Agro-Geoinformatics, *Beijing, China*.
- Javidan, N., Kaviani, A., Pourghasemi, H.R. et al. (2021). Evaluation of the multi-hazard map produced using the MaxEnt machine learning technique. *Sci Rep* 11, 6496. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-85862-7>
- L., Achu & C D, Aju & MANI CHRISTY, Raicy & Bhadrans, Arun & George, Amal & Udayar Pillai, Surendran & Girishbai, Drishya & Ajayakumar, P. & Gopinath, Girish & Pradhan, Biswajeet. (2025). Improved flood risk assessment using multi-model ensemble machine-learning techniques in a tropical river basin of Southern India. *Physical Geography*. 46. 1-29. <https://doi.org/10.1080/02723646.2025.2464536>.
- McFeeters, S. K. (1996). "The use of the normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features." *International Journal of Remote Sensing*, 17(7), 1425-1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>
- Menuka M., Sachin T., Santosh A., Bikram S., Bikram M., Amir S. (2024). Flood susceptibility assessment using a machine learning approach in the Mohana-Khutiya River of Nepal, *Natural Hazards Research*, 4(1): 32-45. <https://doi.org/10.1016/j.nhres.2024.01.001>.

- Pandey, M., Arora, A., Arabameri, AR., Costache, RD., Kumar, Mishra, V., Nguyen, H., Mishra, J., Siddiqui, M., Ray, Y., Soni, S., Shukla, U. (2021). Flood Susceptibility Modeling in a Subtropical Humid Low-Relief <https://doi.org/10.3389/feart.2021.659296>
- Prakash Mohanty, M., Nithya, S., Nair, A. S., Indu, J., Ghosh, S., Mohan Bhatt, C., ... Karmakar, S. (2020). Sensitivity of various topographic data in flood management: Implications on inundation mapping over large data-scarce regions. *Journal of Hydrology*, 125523. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125523>
- Qasimi Abdul Baser, Isazade Vahid, Berndtsson Ronny. (2023). Flood Susceptibility Prediction Using MaxEnt and Frequency Ratio Modeling for Kokcha River in Afghanistan. *Natural Hazards*, 25 October 2023. <https://doi.org/10.1007/s11069-023-06232-2>
- Qasimi, A.B., Isazade, V. & Berndtsson, R. (2024). Flood susceptibility prediction using MaxEnt and frequency ratio modeling for Kokcha River in Afghanistan. *Nat Hazards* 120, 1367–1394. <https://doi.org/10.1007/s11069-023-06232-2>
- Rahman, M., Ningsheng, C., Islam, M.M. et al. Flood Susceptibility Assessment in Bangladesh Using Machine Learning and Multi-criteria Decision Analysis. *Earth Syst Environ* 3, 585–601 (2019). <https://doi.org/10.1007/s41748-019-00123-y>
- Razavi Termeh S. V., Kornejady A., Pourghasemi H. R., and Keesstra S.(2018). Flood susceptibility mapping using novel ensembles of adaptive neuro-fuzzy inference systems and metaheuristic algorithms. *Sci Total Environ.*, 615, 438–451. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.262>
- Sala, O.E., Chapin, F.S., Armesto, J.J., et al. (2000) Global Biodiversity Scenarios for the Year 2100. *Science*, 287, 1770–1774. <http://dx.doi.org/10.1126/science.287.5459.1770>
- Shirani, K., Zakerinejad, R. (2021). Watershed prioritization for the identification of spatial hotspots of flood risk using the combined TOPSIS-GIS-based approach: a case study of the Jarahi-Zohre catchment in Southwest Iran. *AUC Geographica* 56(1), 120–128.
- Shahabi H, Khezri S, Ahmad BB, Hashim M. (2014). Landslide susceptibility mapping at central Zab basin, Iran: A comparison between analytical hierarchy process, frequency ratio, and logistic regression models, *Catena* 115: 55-70. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2013.11.014>
- Shrestha, R.M., Di, L., Yu, G., Shao, Y., Kang, L., & Zhang, B. (2013). Detection of flood and its impact on crops using NDVI Corn case. *2013 Second International Conference on Agro-Geoinformatics (Agro-Geoinformatics)*, 200-204. <https://doi.org/10.1109/ARGO-GEOINFORMATICS.2013.6621907>
- Smith, K. (2001). Environmental hazard assessing risk and reducing disaster, Third edition, published by Routledge, 11 New Fetter Lane, London.
- Sugianto S, Deli A, Miswar E, Rusdi M, Irfham M. The effect of land use and land cover changes on flood occurrence in Teunom Watershed, Aceh Jaya. *Land*. 2022 Aug 8;11(8):1271. <https://doi.org/10.3390/land11081271>
- Taherizadeh, M., Niknam, A., Nguyen-Huy, T. et al. Flash flood-risk areas zoning using integration of decision-making trial and evaluation laboratory, GIS-based analytic network process, and satellite-derived information. *Nat Hazards* 118, 2309–2335 (2023). <https://doi.org/10.1007/s11069-023-06089-5>
- Tao, H., Al-Khafaji, Z. S., Qi, C., Zounemat-Kermani, M., Kisi, O., Tiyasha, T., ... & Yaseen, Z. M. (2021). Artificial intelligence models for suspended river sediment prediction: state-of-the-art, modeling framework appraisal, and proposed future research directions. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 15(1), 1585-1612. <https://doi.org/10.1080/19942060.2021.1984992>
- Thomas, David S.G. (2016). The Dictionary of Physical Geography, 4th Edition. *John Wiley & Sons Ltd.* <https://doi.org/10.1002/9781118782323.ch06>
- Ticehurst, C., Chen, Y., Karim, F., Dushmanta, D., 2013. Using MODIS for mapping flood events for use in hydrological and hydrodynamic models: experiences so far. In: *20th International Congress on Modelling and Simulation, Adelaide, Australia*.
- Xu, H. (2006). "Modification of normalized difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery." *International Journal of Remote Sensing*, 27(14), 3025-3033. <https://doi.org/10.1080/01431160600589179>
- Zakerinejad, R., Ayash, K. (2024). Analysis of Flood Risk and Influencing Factors in Zohr-Jarhari Basin in Zohr-Jarhari in Southwest of Iran using Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP) Approach. *Physical Geography Research Quarterly*, 56 (2), 51-69. <http://doi.org/10.22059/JPHGR.2024.376692.1007829>

تهیه نقشه خطر سیل با استفاده از مدل حداکثر آنتروپی در حوضه آبخیز داراب

رضا ذاکری نژاد^{۱*} , زهرا استاد حسینی عطا آبادی^۲، یاسمین غیبشای^۲

۱. استادیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه ریزی دانشگاه اصفهان (نویسنده مسئول)

ایمیل: r.zakerinejad@geo.ui.ac.ir ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2138-0973>

۲. کارشناسی ارشد سنجش اذدور و سیستم اطلاعات جغرافیایی دانشگاه اصفهان

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>نوع مقاله: مقاله پژوهشی</p> <p>تاریخ دریافت: ---/---/--- تاریخ ویرایش: ---/---/--- تاریخ پذیرش: ---/---/--- تاریخ انتشار: ---/---/---</p> <p>واژه‌های کلیدی: حوضه داراب، سیلاب، داده کاوی، حداکثر آنتروپی.</p>	<p>سیلاب‌ها از جمله مهم‌ترین مخاطرات طبیعی به شمار می‌آیند که سالانه خسارات جبران‌ناپذیری به جان، مال و محیط‌زیست وارد می‌کنند. حوضه آبخیز داراب در استان فارس، به دلیل شرایط خاص اقلیمی، توپوگرافی و ساختار زمین‌شناسی، به‌عنوان یکی از مناطق در معرض خطر در برابر سیلاب شناخته می‌شود. هدف این تحقیق، پهنه‌بندی مناطق سیل‌خیز با استفاده از مدل حداکثر آنتروپی (مکسنت) و تحلیل عوامل موثر بر سیلاب در حوضه مورد مطالعه است. این یک پژوهش کمی و کاربردی است که از داده‌های میدانی و کتابخانه‌ای استفاده می‌کند و بر مناطق با خطر سیل بالا تمرکز دارد. با بهره‌گیری از تکنیک داده‌کاوی، GIS و تصاویر سنجش از دور برای پهنه‌بندی خطر سیل طبقه‌بندی می‌شوند. عوامل مختلف محیطی و توپوگرافی به عنوان متغیرهای مستقل مورد استفاده شامل ۱۹ پارامترهای محیطی نظیر بارندگی، شیب زمین، نوع خاک، تراکم زهکشی، کاربری اراضی، و شاخص‌های رطوبت و توپوگرافی و غیره بودند. این داده‌ها از منابع معتبری نظیر تصاویر ماهواره‌ای، مدل‌های رقومی ارتفاعی (DEM)، ایستگاه‌های هواشناسی و نقشه‌های زمین‌شناسی جمع‌آوری شدند. پس از پیش‌پردازش داده‌ها، مدل‌ها اجرا و دقت آن‌ها با استفاده از ارزیابی گردید در نهایت، نقشه حساسیت به سیل با استفاده از AUC اعتبارسنجی و پهنه پرخطر شناسایی می‌شوند. تحلیل‌های پهنه‌بندی نشان داد که حدود ۲۰ درصد از حوضه آبخیز داراب در معرض خطر بالا قرار دارد، به‌ویژه در مناطق کم‌ارتفاع با پوشش گیاهی پایین و کاربری اراضی نامناسب است. همچنین مشخص شد که متغیرهایی نظیر بارش، فاصله از آبراهه و ارتفاع بیشترین تأثیر را در وقوع سیلاب دارند. نتایج حاکی از آن است که مدل MaxEnt توانایی قابل قبولی در پیش‌بینی مناطق پرخطر دارد و می‌تواند نقش موثری در مدیریت بحران و برنامه‌ریزی‌های منطقه‌ای ایفا کند.</p>

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

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

مقدمه

سیلاب یک سطح آب بالا در امتداد یک کانال رودخانه و یا در یک ساحل که منجر به طغیان زمینی می‌شود که به طور معمول زیر آب نمی‌رود (Thomas, 2016). سیلاب از مهمترین بلاهای طبیعی است که خسارت‌های فراوانی به مناطق تحت تأثیر خود وارد می‌کند. برای مدیریت سیلاب باید عوامل تولید و ایجاد سیل شناسایی شده و سپس مناطق دارای پتانسیل زیاد در تولید سیل تعیین شود (Badei B et al. 2016). سیل یکی از مهمترین بلاهای طبیعی در بسیاری از کشورهای دنیا است، به طوری که بالاترین تلفات جانی (۴۳/۷ درصد) در بین کشورهای مختلف در فاصله سالهای ۱۹۶۷ و ۱۹۹۰ مربوط به سیلاب بوده است (شریفی و نوروزی، ۱۳۷۸). در کشور ایران، در طی چندین سال اخیر ۱۲۶۰ سیل با میانگین سالانه ۳۰ سیل رخ داده است، که این آمار حاکی از رشد وقوع سیل در سالهای اخیر به میزان ۴۰٪ می‌باشند (Dovonce, 2000). برای این منظور داده‌های سنجش از دور (RS) و سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS) ابزاری مفید و توانمند برای شناسایی عوامل مؤثر بر پتانسیل سیل‌خیزی می‌باشند. از خسارتهایی که به سختی می‌توان ارزش پولی آن‌ها را حساب کرد می‌توان به تغییرات محیطی که توسط سیل صورت می‌گیرد مانند آلودگی آب، فرسایش، پر شدن مخازن سدها از رسوب اشاره کرد (Smith, 2001). پهنه‌بندی پتانسیل سیل‌خیزی عبارت از تعیین و توصیف مناطق دارای پتانسیل از نظر رواناب‌های سطحی است. این عمل بر اساس مشابهت خصوصیات هیدرولوژیکی و هیدروژئولوژیکی مناطق مورد بررسی صورت گرفته و از این طریق امکانات استفاده از هر زون مشخص و ارزیابی می‌شود، در واقع با تعیین محل‌های دارای پتانسیل بالا به نوعی می‌توان یک ارزیابی کلی از وضعیت سیل‌خیزی منطقه این بدست آورد چرا که وجود پتانسیل بالای سیل‌خیزی در یک منطقه مقدمه‌ای بر افزایش احتمال وقوع سیل در آن منطقه می‌باشد. عوامل گوناگونی در جاری شدن سیل دخالت دارند که از جمله آن؛ شدت بارندگی، شیب حوضه، نفوذ پذیری زمین، شرایط توپوگرافی، ویژگی‌های پوشش گیاهی و درجه اشباع شدن خاک را می‌توان به عنوان عوامل مؤثر در جاری شدن سیلاب نام برد (Sala et al., 2000). دشت‌های سیلابی نقش مهمی در محیط‌های هیدرولوژیکی و اکولوژیکی رودخانه ایفا می‌کنند. مدل‌سازی سیل برای درک فرآیندهای هیدرولوژیکی و اکولوژیکی در این اکوسیستم‌ها ضروری است (Huang et al. 2013; Huang et al. 2012). تهیه نقشه حساسیت سیل یک گام ضروری در رویکردهای مدیریت خطر سیل است، که می‌تواند به عنوان یک ارزیابی کمی یا کیفی از توزیع فضایی سیل تعریف شود که در یک محیط رخ می‌دهد یا به احتمال زیاد رخ می‌دهد (Rahman et al. 2019). عوامل متعددی نقش مهمی در سیل ایفا می‌کنند و شناخت نقش این عوامل مرتبط با سیل ممکن است پیش بینی بلایای سیل و استراتژی‌های مقابله را افزایش دهد (Al-Hinai & Abdalla, 2021). فناوری سنجش از دور روشی مؤثر برای مطالعه این خصوصیات طغیان با استفاده از تصاویر سنجش از دور چندمکانی، چندزمانی و چندطیفی ارائه کرده است (Chen et al., 2014b; Huang et al., 2012; Huang et al., 2013; Huang et al., 2014c; Ticehurst et al., 2013). این مدل حساسیت سیل را می‌توان با استفاده از روش‌های آماری پیشرفته که می‌توانند در محیط R و GIS ادغام شوند، به دست آورد (El-Haddad et al. 2020). مطالعات متعددی با استفاده از مدل‌های متنوعی در زمینه پهنه‌بندی خطر سیل انجام شده است. از جمله، استفاده از مدل آنتروپی شانون، مدل سلسله مراتبی و فازی در پهنه بندی و شناسایی عوامل تاثیرگذار بر رخداد خطر سیلاب استفاده شده است (توسط هینای^۱ و عبدالله^۲؛ ۲۰۲۱؛ ذاکری نژاد و عیاش، ۱۴۰۳؛ میرموسوی و اسمعیلی،

1 Hinai

2 Abdalla

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

۱۴۰۰ نوحانی و همکاران، ۱۳۹۵). در بسیاری از مطالعات اخیر به ارزیابی و مقایسه‌ی الگوریتم‌های مختلف داده‌کاوی جهت تهیه نقشه حساسیت به سیل استفاده شده است (تقی‌آوند و همکاران، ۱۳۹۹؛ رحیم پور و رضائی مقدم، ۱۴۰۳؛ توکلی و همکاران، ۱۴۰۳؛ پاندی^۱ و همکاران، ۲۰۲۱، دووال^۲ و همکاران، ۲۰۲۳، طاهری‌زاده و همکاران، ۲۰۲۳؛ بهاتارای^۳ و همکاران، ۲۰۲۴؛ هیتوری^۴ و همکاران، ۲۰۲۴). مدل حداکثر آنتروپی (مکسنت^۵) به عنوان یکی از الگوریتم‌های داده‌کاوی به دلیل اینکه تنها نیاز به داده‌های رخداد سیلاب می‌باشد قابلیت بالای در پهنه بندی خطر سیلاب دارد. در پژوهشی در حوضه آبخیز زیوه ارومیه، به بررسی خطر سیلاب با استفاده از مدل مکسنت و GLM پرداخته شد، که شاخص‌های زمین‌شناسی، فاصله از آبراهه، ارتفاع و شیب را به عنوان مهم‌ترین عوامل مؤثر بر پهنه بندی خطر سیلاب معرفی نمودند (حنیفی نیا و عبقری، ۱۴۰۴). شاخص‌های توپوگرافی مختلف از جمله ارتفاع، شیب، جهت شیب، قدرت فرساینده‌گی آبراهه (SPI^۶) و رطوبت خاک (TWI^۷)، از عوامل اصلی در پیش بینی و پهنه بندی مخاطراتی همانند فرسایش و سیل اشاره شده‌ای (ذاکری نژاد ۱۳۹۹؛ شیرانی و ذاکری نژاد ۲۰۲۲). در یک مطالعه‌ی دیگر توسط آچو ارکید^۸ و همکاران (۲۰۲۵)، با ادغام تکنیک‌های یادگیری ماشین و روش AHP، رویکردی جامع برای ارزیابی و مدیریت خطر سیل ارائه دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که تکنیک تجمیعی ML عملکرد بهتری نسبت به مدل‌های مجزا دارد. همچنین، هارشاسیما^۹ و موهان بهات^{۱۰} (۲۰۲۳) با استفاده از مدل مکسنت و AHP، شاخص رطوبت توپوگرافیک، ارتفاع و شیب را در ارزیابی مناطق سیل‌زده مؤثر دانستند و برتری مدل مکسنت را در تولید نقشه‌های خطر سیل تأیید کردند. این مطالعات نشان می‌دهند که استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین و رویکردهای ترکیبی، می‌تواند به بهبود دقت و کارایی ارزیابی خطر سیل و مدیریت بلایا کمک کند. پژوهش‌های مختلف محققین در سال اخیر به وضوح نشان می‌دهد که مدل یادگیری ماشین مکسنت به عنوان یک ابزار استاندارد و قدرتمند برای پهنه‌بندی حساسیت به سیل در حوضه‌های مختلف ایران و جهان تثبیت شده است؛ این مدل به دلیل عملکرد بسیار قوی و نرخ موفقیت بالا شناخته می‌شود. در مطالعات داخلی، نکبیلان و مرحمت (۱۴۰۳) در چهارم بر بهینه‌سازی مدل با الگوریتم ژنتیک تأکید کردند. یوسفی و همکاران (۱۴۰۲) در مرزداران با استفاده از این مدل، موفق به شناسایی ۱۰۰ کیلومتر مربع منطقه بحرانی شدند. مهرجان^{۱۱} و همکاران (۲۰۲۴) نزدیکی به رودخانه را مهم‌ترین عامل معرفی کردند و کاظمی و همکاران (۲۰۲۳) براهمیت پارامترهایی چون بارندگی، کاربری اراضی، فاصله تا رودخانه و نوع خاک تأکید نمودند. تمامی این تحقیقات، با شناسایی دقیق عوامل کنترل‌کننده و اولویت‌بندی مناطق بحرانی، کاربردی بودن مدل مکسنت را برای مدیریت جامع بلایای طبیعی اثبات کرده‌اند. در تحقیق حاضر، از الگوریتم حداکثر آنتروپی (مدل مکسنت)، جهت پهنه بندی خطر سیلاب در حوضه آبخیز داراب در استان فارس پرداخته شده است. حوضه مورد مطالعه به دلیل شرایط خاص توپوگرافی از جمله نواحی پرشیب و همچنین پوشش گیاهی ضعیف، دارای پتانسیل بالایی از جهت رخداد سیلاب می‌باشد. استفاده از مدل مکسنت به همراه لایه‌های

1 . Pandey

2 . Duwal

3 . Bhattarai

4 . Hitouri

5 . MaxEnt

6 . Stream Power Index

7 . Topographic Witness Index

8 . Achu

9 . Harshasimha

10 . Bhatt

11 . Maharjan

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

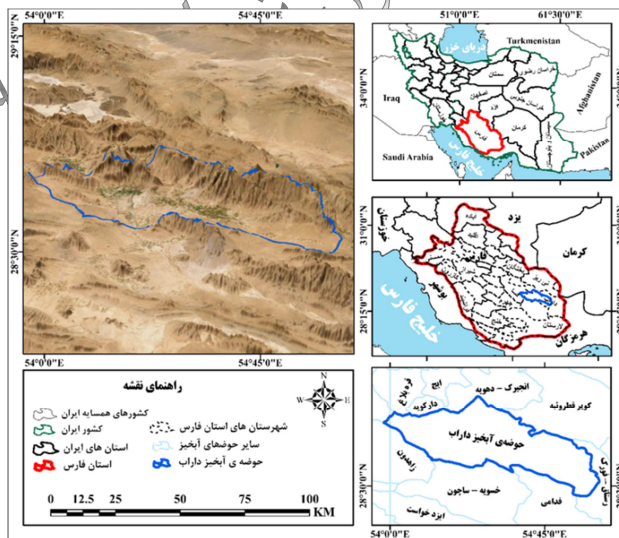
متنوع محیطی موثر بر رخداد سیل جهت شناسایی مناطق پر خطر سیلاب از اهداف اصلی این پژوهش می باشد. شایان ذکر هست استفاده از تصاویر ماهواره ای برای شناسایی رخدادهای سیل های گذشته یکی دیگر از مزیت های این پژوهش محسوب می گردد.

ایجاد شده از این تحقیق می توانند توسط دولت محلی و تصمیم گیرندگان برای اجرای طرح های مناسب کاهش خسارات سیل در آینده اتخاذ شوند.

داده ها و روش ها

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبخیز داراب در جنوب شرق استان فارس با وسعت ۲۳۷۰ کیلومتر مربع از زیرحوضه های آبخیز کل_مهران محسوب می شود و در موقعیت جغرافیایی ۲۸ درجه و ۲۷ دقیقه تا ۲۸ درجه و ۵۶ دقیقه شمالی و ۵۳ درجه و ۵۸ دقیقه تا ۵۵ درجه و یک دقیقه شرقی و ارتفاع ۱۱۱۰ متر از سطح دریا واقع شده است. حداکثر و حداقل مطلق درجه حرارت سالانه به ترتیب ۴۹ (تیرماه) و ۹- (آذرماه) درجه سانتی گراد می باشد. متوسط بارندگی سالانه در این محدوده ۲۷۵ میلی متر و متوسط تبخیر سالانه ۲۷۶۷ میلی متر است. این منطقه دارای شیب های متنوع، پوشش گیاهی مختلف و ساختارهای زمین شناسی گوناگون است که نقش مهمی در توزیع خطر سیل ایفا می کنند. اقلیم حاکم در این حوضه، نیمه خشک و گرم است، اما بارش های فصلی و ناگهانی، بستر مناسب برای وقوع سیل را فراهم می آورند (شکل (۱)).



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی مورد مطالعه

روش شناسایی

تحقیق حاضر کمی بوده و به لحاظ هدف، کاربردی است. روش جمع آوری داده های آن نیز میدانی و کتابخانه ای می باشد. نمونه گیری در پژوهش حاضر بر اساس نمونه گیری اهمیت^۱ است. در این شیوه، مناطق نمونه برداری با خطر

¹. Importance Sampling

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

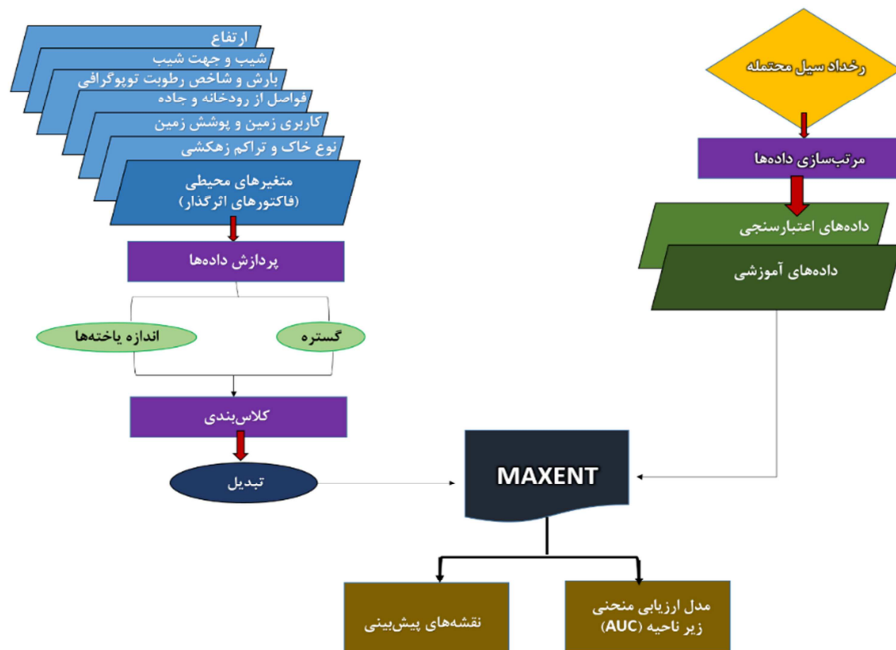
سیل بالقوه بالاتر را بر اساس دانش تخصصی یا تجزیه و تحلیل اولیه اولویت‌بندی می‌کند. در اینجا، تکنیک‌های داده‌کاوی برای کشف دانش از پایگاه داده GIS به منظور بهبود طبقه‌بندی تصاویر سنجش از دور جهت پهنه‌بندی خطر سیلاب استفاده می‌شود. ابتدا مجموعه‌ای از داده‌های فضایی مختلف (ارتفاع، بارش، کاربری اراضی و ...) باید جمع‌آوری گشته و به همراه شاخص‌های رطوبت توپوگرافی^۱ (TWI)، انحنای پلان^۲، شاخص خشکسالی استاندارد شده (SPI)^۳، تراکم زهکشی^۴، فاصله تا رودخانه، فاصله از جاده، نوع خاک، پوشش زمین، شاخص اختلاف آب نرمال شده (NDWI)^۵ و عوامل فیزیوگرافی پیش‌بینی‌کننده‌هایی^۶ را می‌سازند که به منزله متغیرهای مستقل یا مجموعه داده‌های آموزشی (training) که ۷۰ درصد تحقیق و شاخص‌ها را شامل می‌شود هستند، وارد مدل مکسنت می‌شوند. سپس پردازش‌های لازم صورت گرفته وزن تأثیر هر فاکتور با استفاده از الگوریتم مربوطه، بعنوان مجموعه داده‌های اعتبارسنجی (tasting) که ۳۰ درصد تحقیق و نقاط سیل‌خیزی را شامل می‌شود، مشخص می‌شود. در نهایت، سطح زیرمنحنی (AUC) برای اعتبارسنجی نقشه حساسیت به وقوع سیل محاسبه گشته و پهنه‌های در معرض خطر بازنمایی می‌شوند. در جدول (۱) و شکل (۲)، مراحل انجام این مدل‌ها نشان داده شده است.

جدول ۱: داده‌های مورد استفاده در عملیات مدل‌سازی تحقیق

منبع	نام متغیر	رده	ردیف	
مدل‌های ارتفاعی رقومی (SRTM ^۷)	ارتفاع	طبیعی (فیزیوگرافیک)	۱	
	شیب		۲	
	تنیدی شیب ^۸		۳	
	جهت‌شیبی ^۹		۴	
	قدرت آبراهه		۵	
	رطوبت توپوگرافی		۶	
	شاخص حمل رسوب		۷	
نقشه گسل‌های ایران	فاصله از گسل		۸	
نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه از نقشه زمین‌شناسی ایران	زمین‌شناسی		۹	
مشاهدات زمینی ایستگاه‌های هواشناسی - تصاویر ماهواره‌ای و مدل‌های اقلیمی از پایگاه‌های GPM ^{۱۰} و داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی درون حوضه و مجاور آن	بارش		۱۰	
داده‌های میدانی - آزمایشگاه خاک	نوع خاک	طبیعی - انسانی	۱۱	
	پوشش گیاهی		۱۲	
	تصاویر ماهواره‌ای (لندست ۹-۸ و سنتینل ۲) و پلتفرم‌های داده باز		شاخص تفاوت نرمال شده آب	۱۳
			شاخص تفاوت نرمال شده آب اصلاح شده	۱۴
شاخص نسبت آب			۱۵	
تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۲	کاربری زمین		۱۶	
	تراکم زهکشی		۱۷	
بررسی‌های میدانی و مدل‌های ارتفاعی رقومی (DEMs)	فاصله از رودخانه		۱۸	
	فاصله از جاده		۱۹	
	شیب‌فایل آبراهه و راه‌های کشور از سازمان‌های ملی			

1. Topographic Wetness Index
2. Plan Curvature
3. Standardized Precipitation Index
4. drainage density
5. Normalized Difference Water Index
6. Predictions
7. Shuttle Radar Topography Mission
8. steepness
9. Aspect
10. Global Precipitation Measurement

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



شکل ۲: فلوجارت روش تحقیق

یافته‌های تحقیق

عوامل طبیعی و انسانی متعددی در وقوع سیل نقش دارند که در زیر به بررسی آنها و چگونگی تأثیرشان پرداخته می‌شود:

بارش: بارش سنگین و مداوم می‌تواند به سرعت باعث اشباع شدن خاک و افزایش جریان سطحی آب شود که نهایتاً منجر به سیل می‌شود. (Breugem et al., 2020). نقشه بارش زیر از طریق رابطه رگرسیونی بین ارتفاع و بارش از مجموع داده‌های سازمان هواشناسی تهیه و استخراج شده است (شکل ۴-الف).

ارتفاع: ارتفاعات بالاتر معمولاً دارای شیب‌های بیشتر و جریان‌های سطحی سریع‌تر هستند که می‌تواند خطر سیل را در مناطق پایین دست افزایش دهد. (Prakash Mohanty et al., 2020). برای به دست آوردن مدل رقومی ارتفاع در منطقه مورد مطالعه از ماهواره SRTM با دقت مکانی ۳۰ متر استفاده شد (شکل ۴-ب).

شیب: هر چه شیب زمین بیشتر باشد، مقدار نفوذ رواناب کمتر و سرعت جریان آب بیشتری می‌شود. (نوحانی و همکاران، ۱۳۹۵).

جهت شیب: جهت شیب، یا سوی شیب زمین، بر حرکت و تجمع آب تأثیر دارد (شکل ۴-ت).

طول شیب (LS): این فاکتور بر روی لایه‌های خاک و فاکتورهای توپوگرافی مانند درصد و زاویه شیب تأثیر می‌گذارد که در نتیجه آن میزان فرسایش خاک افزایش می‌یابد (حنیفی نیا و عبقری، ۱۴۰۴).

تراکم زهکشی: تراکم زهکشی به طور موثری به لیتولوژی، شیب توپوگرافی و شرایط اقلیمی مربوط می‌شود و نقش اساسی در زمان تمرکز و اوج سیلاب دارد (تقی آوند و همکاران، ۱۳۹۹).

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

فاصله از آبراهه: نقاط نزدیک‌تر به آبراهه‌ها معمولاً بیشتر در معرض سیلاب قرار دارند، به خصوص در هنگام بارش‌های سنگین که آبراهه‌ها پر می‌شوند و سطح آب افزایش می‌یابد (Ali et al., 2022).

فاصله از جاده: فاصله به‌طور مستقیم بر وقوع سیل تأثیر نمی‌گذارد، اما می‌تواند بر پیامدهای سیل، به‌ویژه در مناطقی که جاده مسیر آب را تغییر می‌دهد، اثرگذار باشد (شکل ۴-ح).

زمین‌شناسی: لیتولوژی و خاک حاصل از آن تعیین‌کننده شدت و ظرفیت نفوذپذیری خاک بوده و رواناب سطحی را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد (Razavi Termeh et al. 2018).

بافت خاک: بافت خاک به اندازه ذرات آن (ماسه، سیلت، رس) بستگی دارد. خاک رس با ذرات ریز، نفوذپذیری کمتری دارد و بیشتر مستعد سیلاب است. خاک ماسه‌ای با ذرات درشت، آب را بهتر جذب می‌کند و خطر سیل را کاهش می‌دهد. نمونه‌های خاک توسط پژوهشگر برداشت و به آزمایشگاه آب و خاک تحویل شد، در ادامه براساس روش‌های هیدرومتری نوع بافت خاک تعیین و نقشه شکل ۴-د تهیه گردید.

کاربری اراضی: مناطق شهری با سطح‌های نفوذناپذیر، جریان سطحی بیشتری دارند و مستعد سیلاب هستند، در حالی که مناطق جنگلی با پوشش گیاهی متراکم، خطر سیلاب کمتری دارند (Sugianto et al., 2022). در شکل زیر کاربری اراضی را از محصولات ماهواره‌ی سنتینل ۲ و مربوط به سال ۲۰۲۳ استخراج گردیده است (شکل ۴-ذ).

فاصله از گسل: گسل‌ها می‌توانند باعث تغییر در نفوذپذیری خاک و سنگ‌ها شوند. (Thompson & Clayton, 2002).

قدرت آبراهه (SPI): شاخص (SPI) شاخص قدرت جریان می‌توان بیانگر نقاط تجمع و رسوب گذاری در حوضه آبخیز باشد (شهابی و همکاران، ۲۰۱۴). این شاخص با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی SRTM با دقت ۳۰ متر و با کدنویسی در نرم‌افزار R تولید و در شکل ۴-ز نمایش داده شده است.

$$SPI = \ln \left((Flow Accumulation + 0.001) \times \left(\frac{Slope Percent}{100} + 0.001 \right) \right) \quad (1)$$

شاخص رطوبت توپوگرافی^۲ (TWI): شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI) مقدار تجمع جریان در هر مکان در حوضه آبخیز و روند جریان به سمت پایین دست توسط نیروی ثقل تعریف می‌گردد (Gokceoglu et al, 2005). مناطق با TWI بالا بیشتر مستعد وقوع سیلاب هستند. این شاخص بر اساس رابطه ۱ و با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی SRTM با دقت ۳۰ متر در نرم‌افزار SAGA GIS مطابق شکل ۴-ژ تولید گردید.

$$TWI = \ln(a / \tan(\beta)) \quad (2)$$

a نشان دهنده مساحت حوزه آبخیز بالادست و $\tan(\beta)$ شیب محلی است.

شاخص حمل رسوب^۳ (STI): شاخص انتقال رسوب (STI) با مقادیر بالا نشان‌دهنده پتانسیل بالای انتقال رسوب در مناطق با شیب تند و جریان قوی و با مقادیر پایین نمایانگر پتانسیل کم‌تر در مناطق مسطح یا دارای پوشش گیاهی است و در برنامه‌ریزی‌های محیط‌زیستی برای شناسایی نقاط آسیب‌پذیر و مدیریت فرسایش کاربرد دارد (تائو و

¹. Stream Power Index

². The topographic wetness index

³. Sediment Transport Index

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

همکاران، ۲۰۲۱). این شاخص با استفاده از مدل رقومی ارتفاع SRTM و با استفاده از رابطه ۳ در نرم افزار ArcGIS تهیه گردید (شکل ۴-س)

$$STI = (m + 1) * (As/22.13)^m * STI = (m + 1) * (As/22.13)^m * \sin(B/0.0896)^n \quad (2)$$

As: مساحت ویژه حوضه بالادست

B: شیب محلی (درجه)

m: عدد ثابت بین ۰/۴-۰/۶

n: مقدار ثابت ۱/۳-۱/۶

شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی^۱ (NDVI): مناطق با NDVI بالا پوشش گیاهی متراکمی دارند که می‌تواند جریان سطحی آب را کاهش داده و خطر سیلاب را کم کند. (Shrestha et al. 2013).

شاخص تفاوت نرمال شده آب^۲ (NDWI): شاخص NDWI با استفاده از جذب شدید نور مادون قرمز نزدیک (NIR) و انعکاس نور سبز توسط آب، به تمایز آب از سایر ویژگی‌های زمینی کمک می‌کند. (McFeeters, 1996; Gao, 1996)

شاخص تفاوت نرمال شده آب اصلاح شده (MNDWI): شاخص تعیین محدوده توده‌های آبی را به ویژه در مناطق شهری یا مناطق با کاربری مختلط زمین که بازتابندگی NIR از سازه‌های ساخته شده می‌تواند با تشخیص آب تداخل داشته باشد، بهبود می‌بخشد (Xu, 2006; McFeeters, 1996).

شاخص نسبت آب (WRI):^۳ جداسازی طیفی آب از سایر انواع پوشش زمین را تقویت می‌کند. مناطق پوشیده از آب را در حین سیل شناسایی می‌کند. (Xu, 2006; McFeeters, 1996)

داده‌های حضور (وقوع و تکرار)^۴

داده‌های حضور به مجموعه‌ای از داده‌ها اشاره دارد که تنها مکان وقوع یک پدیده خاص (مانند سیل) را نشان می‌دهند و اطلاعاتی درباره مکان‌هایی که این پدیده رخ نداده است، ارائه نمی‌دهند. این نوع داده‌ها به‌ویژه در مطالعات محیطی و اکولوژیکی، از جمله بررسی مخاطرات طبیعی مانند سیل، رایج هستند. در این پژوهش، برای استخراج نقاط حضور یا نقاط سیل از تصویر ماهواره‌ای لندست ۸ مربوط به سال ۲۰۱۷ (زمان وقوع سیل در استان فارس) استفاده شد که نتیجه این برداشت در نقشه شکل (۳) زیر قابل مشاهده است.

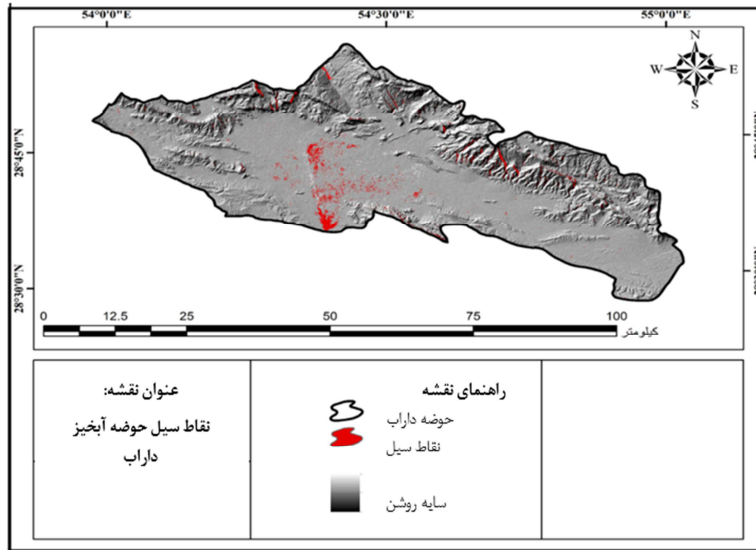
¹. Normalized Difference Vegetation Index

². Normal Difference Water Index

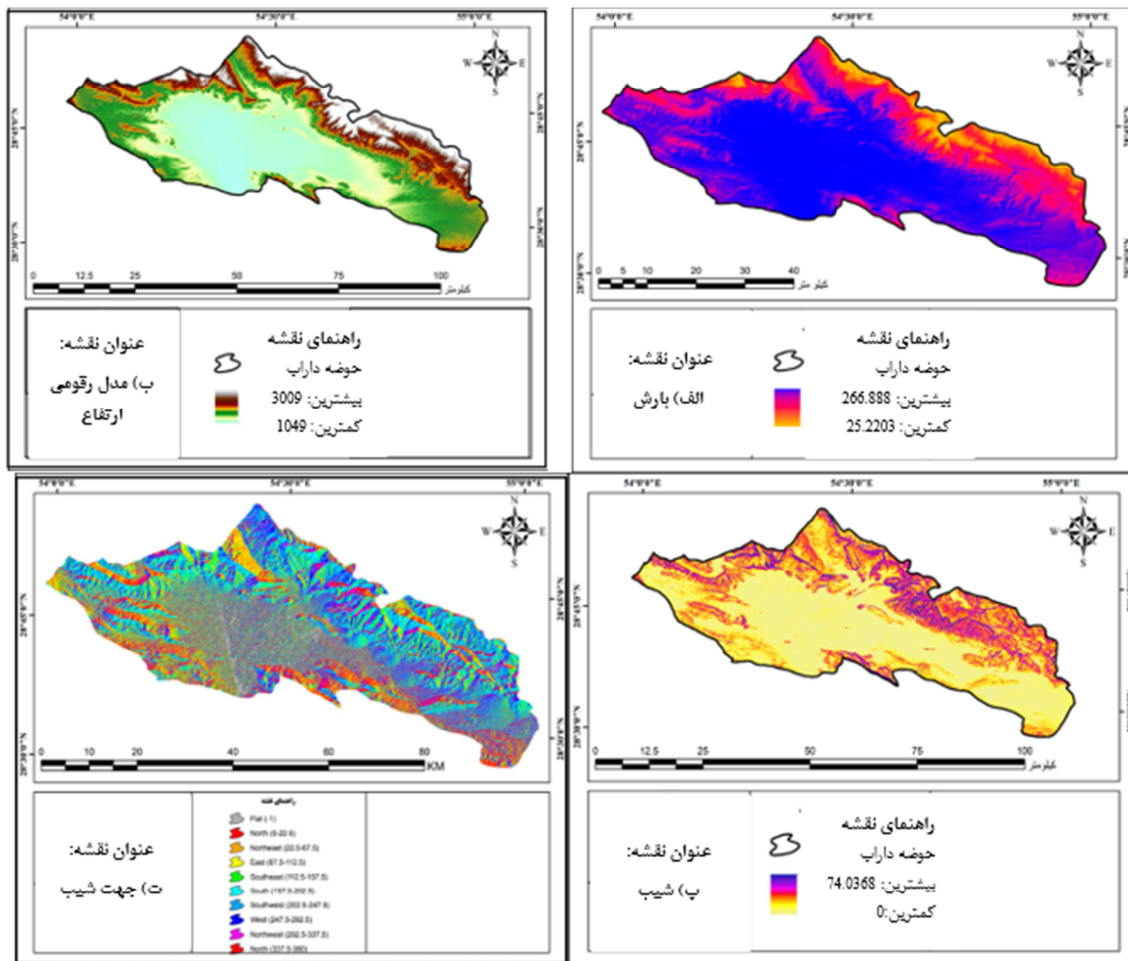
³. Water Ratio Index

⁴. presence-only data

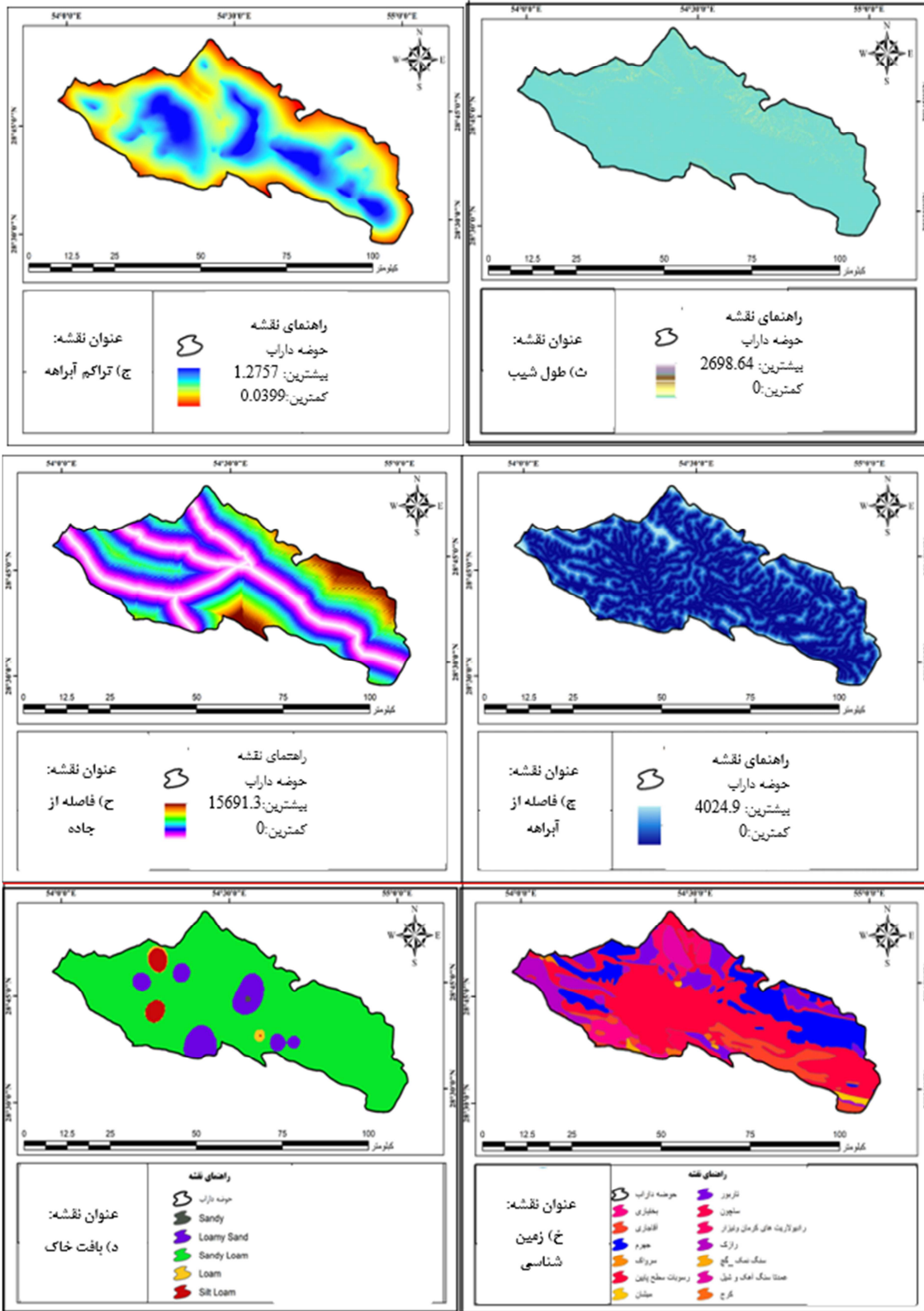
این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفا برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.



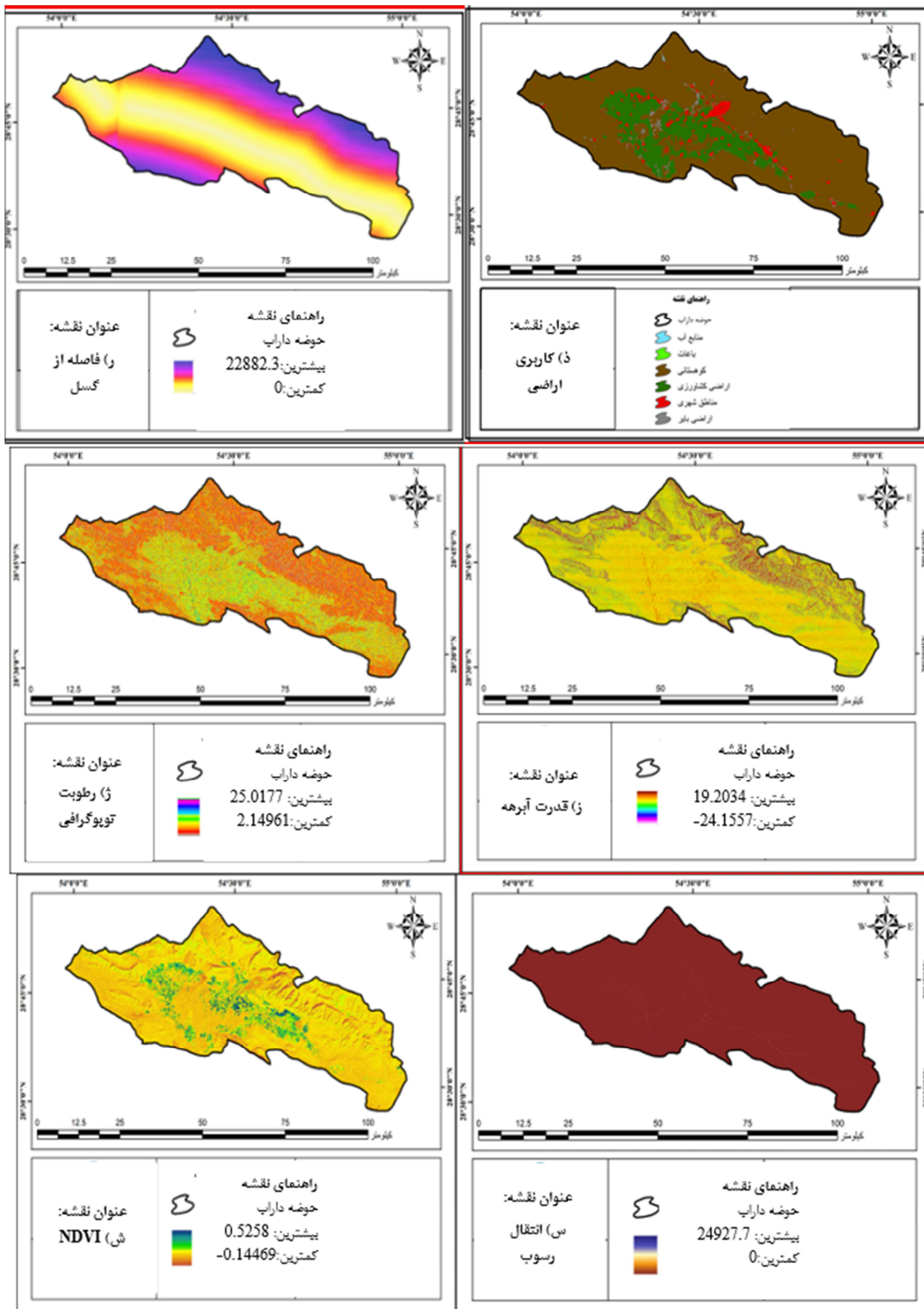
شکل ۳: نقشه موقعیت نقاط سیل حوضه آبخیز داراب



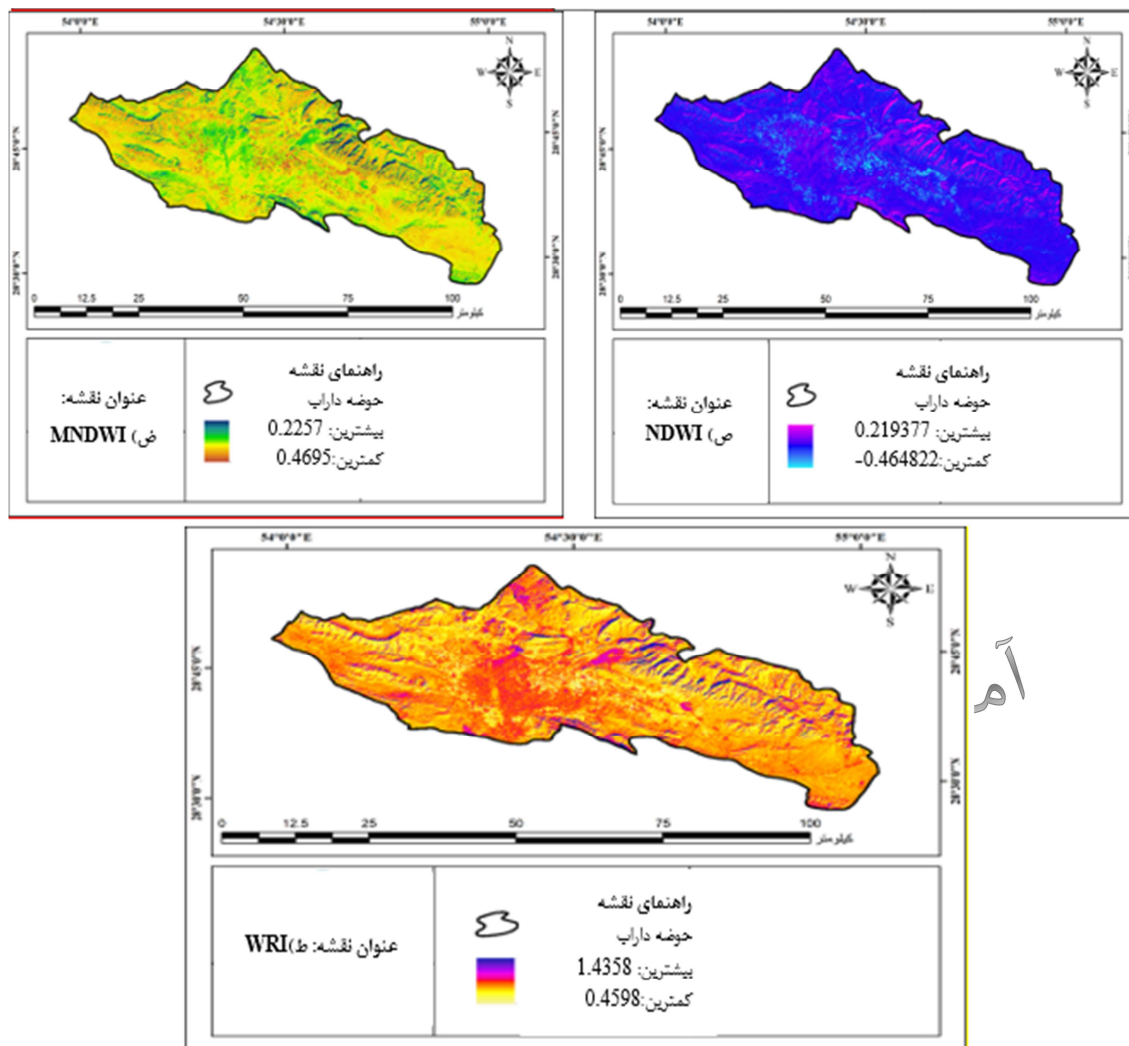
این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.



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



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



شکل ۴: نقشه شاخص‌های حوضه آبخیز میان‌آب الف (بارش، ب) ارتفاع، پ) شیب، ت) جهت شیب، ث) طول شیب، ج) تراکم آبراهه، چ) فاصله از آبراهه، ح) فاصله از جاده، خ) زمین‌شناسی، د) نوع بافت خاک، ذ) کاربری اراضی، ر) فاصله از غسل، ز) قدرت آبراهه، ژ) رطوبت توپوگرافی، س) انتقال رسوب، ش) NDVI، ص) NDWI، ض) MNDWI، ط) WRI.

بعد از تهیه نقشه‌های مربوط به شاخص‌های مختلف، از مدل مکسنت برای پهنه‌بندی سیلاب حوضه استفاده شده است.

نتایج و بحث

در این پژوهش بعد از تهیه‌ی لایه‌های موثر و تاثیرگذار بر رخداد سیلاب در حوضه‌ی آبخیز داراب (۱۹ شاخص)، به عنوان متغیرهای مستقل در مدل مکسنت به کار برده شد. شایان ذکر هست، تمامی لایه‌ها به صورت رستری و با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر در محیط Arc GIS 10.8 جهت آماده‌سازی استفاده گردید. در ادامه به بررسی اهمیت شاخص‌های مختلف و همچنین نقشه نهایی خطر سیلاب در منطقه مورد مطالعه پرداخته شده است.

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

اهمیت متغیرهای (شاخص‌های) مدل مکسنت

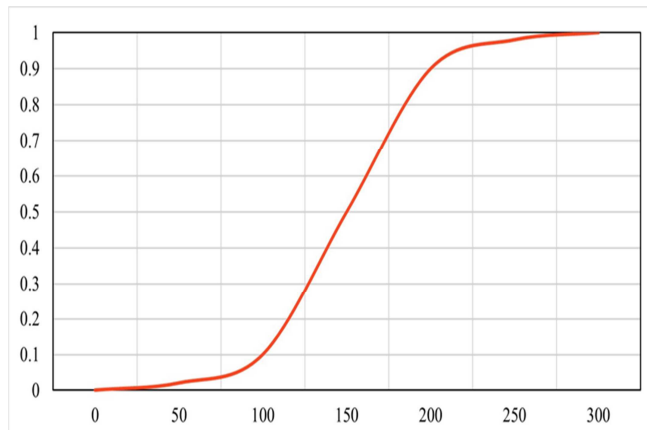
در این پژوهش، میزان تأثیر هر شاخص بر خطر سیل حوضه آبخیز داراب در استان فارس بر اساس مدل مکسنت مورد بررسی قرار گرفت. شاخص‌هایی با درصد مشارکت بالا نشان‌دهنده اثرگذاری بیشتری روی توزیع نقشه حساسیت سیل منطقه مورد مطالعه می‌باشند. بر اساس نتایج بدست آمده، سه شاخص مهم تأثیرگذار در مدل‌سازی خطر سیل در این تحقیق شامل، شاخص بارش (۵۷/۹)، شاخص فاصله از آبراهه (۱۱/۶) و شاخص ارتفاع (۱۰/۲۰) مهمترین شاخص‌های تأثیرگذار در حوضه مورد مطالعه می‌باشند. همچنین کمترین پارامترهای تأثیرگذار شاخص نوع خاک و انتقال رسوب می‌باشند (جدول ۲).

جدول ۲: اهمیت ویژگی‌ها در پهنه‌بندی خطر سیل با مدل مکسنت

اهمیت	شاخص
۵۷/۹	بارش
۱۱/۶	فاصله از آبراهه
۱۰/۲	ارتفاع
۸/۵	کاربری اراضی
۰/۱	شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی (NDVI)
۴	شیب
۱/۳	رطوبت توپوگرافی
۱/۳	جهت شیب
۱/۲	بافت خاک
۱/۲	تفاوت نرمال شده آب (NDWI)
۰/۷	قدرت آبراهه (SPI)
۰/۶	تراکم زهکشی
۰/۴	اصلاح شده نرمال شده آب (MNDWI)
۰/۳	طول شیب
۰/۲	فاصله از گسل
۰/۲	شاخص نسبت آب
۰/۱	فاصله از جاده
۰/۱	زمین شناسی
۰/۱	شاخص حمل رسوب

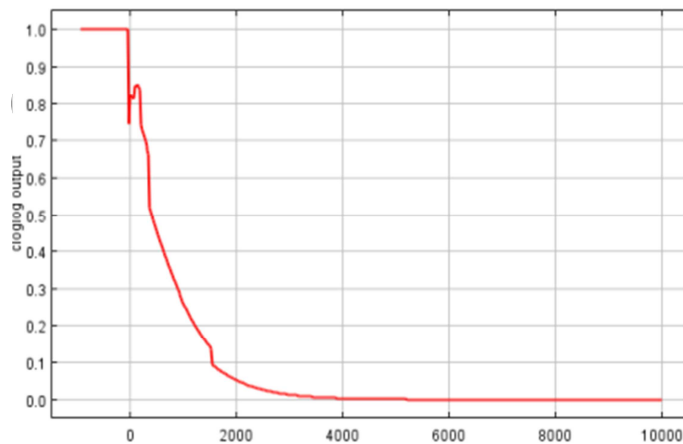
شاخص بارش اولین متغیر تأثیرگذار در این تحقیق است، بطوریکه بر اساس منحنی پاسخ احتمال وقوع سیل، در مقادیر بارش کم (کمتر از ۱۰۰ میلی‌متر) تقریباً ناچیز است در حالی که با افزایش بارش به سمت مقادیر متوسط (۱۰۰ تا ۲۰۰ میلی‌متر)، احتمال وقوع سیل به سرعت افزایش می‌یابد. برای مقادیر بالاتر از حدود ۲۰۰-۲۵۰ میلی‌متر بارش، احتمال وقوع سیل بسیار افزایش می‌یابد. این نتایج می‌تواند دلالت بر اینکه با رسیدن به یک سطح بحرانی بارش، شرایط سیل کاملاً محتمل خواهد بود (شکل ۵). شاخص فاصله از آبراهه‌ها نیز به عنوان دومین شاخص اثرگذار در مدل‌سازی خطر سیل دارای اهمیت زیادی در تهیه نقشه‌ی حساسیت سیل در حوضه‌ی مورد مطالعه می‌باشد. محور افقی منحنی پاسخ در این نمودار نشان‌دهنده مقدار فاصله از آبراهه‌ها است و محور عمودی احتمال وقوع سیل یا سهم این متغیر در پیش‌بینی خطر سیل را نشان می‌دهد (شکل ۶).

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



شکل ۵: نمودار سهم شاخص بارش در پیش‌بینی مدل مکسنت

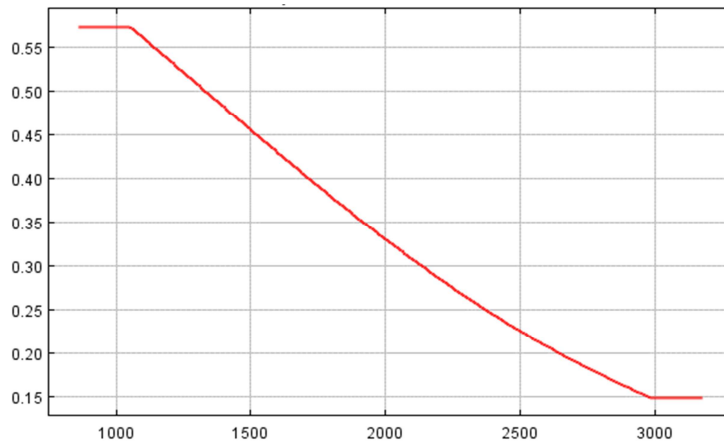
در ابتدای نمودار سهم شاخص فاصله از آبراهه (فاصله نزدیک به صفر)، مقدار احتمال خطر رخداد سیل بالا است، که دلالت بر اینکه مناطق نزدیک به آبراهه‌ها بیشترین خطر وقوع سیلاب را دارند زیرا آبراهه‌ها مسیر اصلی جریان آب در هنگام بارش سنگین یا سیلاب هستند. با افزایش فاصله از آبراهه‌ها، احتمال وقوع سیلاب به شدت کاهش می‌یابد. این موضوع نشان می‌دهد که با دور شدن از آبراهه‌ها، تأثیر این شاخص بر خطر سیل کم می‌شود. در فواصل بسیار زیاد (حدوداً بالای ۴۰۰ متر)، احتمال وقوع سیل تقریباً به صفر می‌رسد. این نشان می‌دهد که فاصله از آبراهه‌ها دیگر نقشی در خطر سیل ایفا نمی‌کند.



شکل ۶: نمودار سهم شاخص فاصله از آبراهه در پیش‌بینی مدل مکسنت

همچنین بر اساس منحنی پاسخ شاخص ارتفاع، در مقادیر کمتر از ۱۰۰۰ متر، تأثیر این شاخص بسیار بالا بوده (حدود ۰/۵۵). که این امر بیانگر تأثیر بالای ارتفاعات پایین‌تر در پتانسیل خطر سیل در این نواحی می باشد (شکل ۷). در واقع می توان بیان کرد که با افزایش ارتفاع در این حوضه آبخیز مورد مطالعه، سهم متغیر به صورت تدریجی و تقریباً خطی کاهش می‌یابد. این روند نشان می‌دهد که اهمیت این شاخص در مدل‌سازی حساسیت سیل در حوضه آبخیز داراب با بالا رفتن مقدار ارتفاع کاهش می‌یابد. در مقادیر بیش از ۳۰۰۰ متر، سهم متغیر به حدود ۰/۱۵ می‌رسد. این مقدار نشان‌دهنده کاهش قابل توجه تأثیر ارتفاع در این بازه‌ها است.

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



شکل ۷: نمودار سهم شاخص ارتفاع در پیش‌بینی مدل مکسنت

ارزیابی دقت مدل مکسنت

در این پژوهش، برای اعتبارسنجی مدل بکار برده شده برای حساسیت خطر سیل در حوضه آبخیز داراب از شاخص سطح زیر منحنی (AUC)^۱ نمودار منحنی ویژگی عملیاتی گیرنده^۲ (ROC)، استفاده شده است. این شاخص آماری ابزاری قدرتمند برای ارزیابی عملکرد مدل‌های طبقه‌بندی است. محور افقی (1 - Specificity) در این نمودار نشان‌دهنده نرخ مثبت کاذب^۳ است. به عبارتی، این محور نشان می‌دهد که مدل چقدر اشتباه مثبت پیش‌بینی کرده است.^۴ هرچه مقدار به سمت راست بیشتر باشد، مدل پیش‌بینی‌های مثبت بیشتری اشتباه کرده است. محور عمودی (Sensitivity) نشان‌دهنده نرخ مثبت صحیح^۵ یا به عبارت دیگر درصد پیش‌بینی‌های درست برای موارد مثبت واقعی است.^۶ مقدار بالاتر یعنی مدل پیش‌بینی دقیق‌تری برای موارد مثبت دارد. ناحیه زیر منحنی^۷ (AUC) نیز معیاری عددی بین ۰ تا ۱ است که از روی نمودار ROC به دست می‌آید و نشان‌دهنده توانایی کلی مدل در تشخیص صحیح نمونه‌ها (تمایز بین کلاس‌های مثبت و منفی) است. خطی تصادفی با زاویه ۴۵ درجه که نشان‌دهنده عملکرد یک مدل تصادفی است نیز وجود دارد. اگر مدل عملکردی بهتر از یک مدل تصادفی داشته باشد، منحنی آن باید بالای این خط قرار گیرد.

هرچه منحنی به گوشه سمت چپ بالای نمودار نزدیک‌تر باشد، عملکرد مدل بهتر است. این نشان می‌دهد که مدل هم در شناسایی نمونه‌های مثبت و هم در رد کردن نمونه‌های منفی عملکرد خوبی دارد.

^۱ Area Under Curve

^۲ Receiver Operating Characteristic

^۳ False Positive Rate

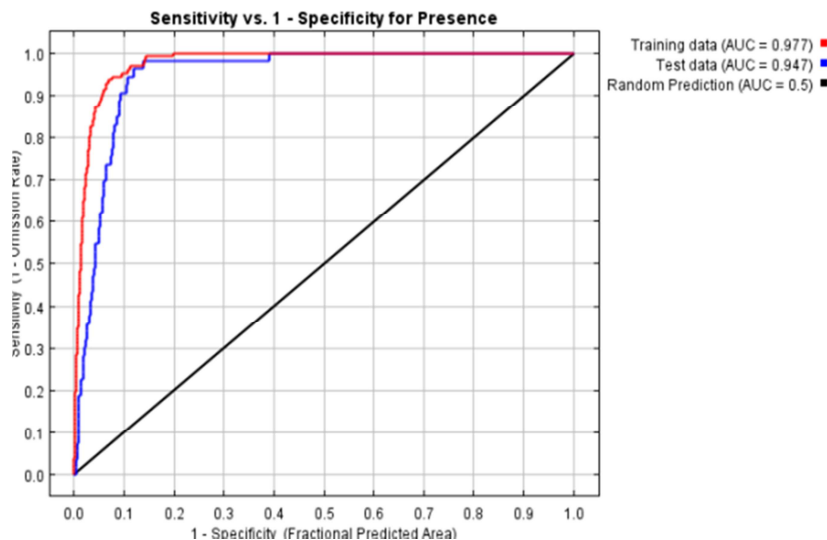
^۵ True Positive Rate

^۷ Area Under Curve

^۴ احتمال اینکه یک نمونه منفی به اشتباه به عنوان مثبت طبقه‌بندی شود.

^۶ احتمال اینکه یک نمونه مثبت به درستی به عنوان مثبت طبقه‌بندی شود.

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



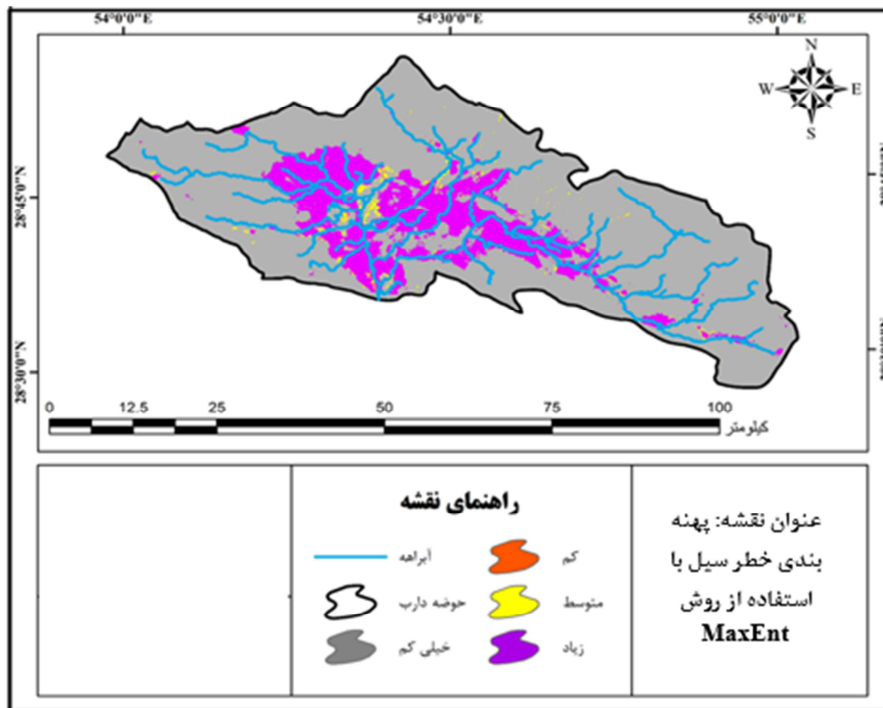
شکل ۸: منحنی ROC برای اعتبارسنجی مدل مکسنت

بر اساس نمودار شکل ۸ مقدار شاخص ROC برای مدلسازی خط سیل با استفاده از مدل مکسنت در حوضه مورد مطالعه برای داده‌های آموزشی و تعلیمی به ترتیب شامل مقدار ۰/۹۷۷ و ۰/۹۴۷ می‌باشند. مقدار بالای این اعداد و نزدیک به ۱ نشان از عملکرد و دقت بالای نتایج حاصله از مدلسازی نقشه تهیه شده خطر سیل با استفاده از مدل مکسنت در محدوده مورد مطالعه دارد. شایان ذکر هست اختلاف ناچیز مقدار شاخص AUC بین داده‌های آموزشی و تعلیمی دلالت بر که تعمیم پذیری خوب مدل بکار برده شده دارد و همچنین نبود برازش در داده‌ها می‌باشد.

نقشه نهایی خطر سیل

زمانی که مدل از نظر عملکرد رضایت‌بخش تلقی شد، می‌توان از آن برای پیش‌بینی خطر سیل برای مکان‌های مختلف در منطقه مورد مطالعه استفاده کرد. در این پژوهش با استفاده از مدل مکسنت و شاخص‌های تاثیرگذار بر رخداد سیل نقشه‌ی پهنه‌بندی رستری از نواحی پرخطر در حوضه آبخیز داراب تهیه گردید (شکل ۹). بدین ترتیب، مناطقی را که به استراتژی‌های کاهش، سیستم‌های هشدار اولیه یا برنامه‌ریزی تخلیه نیاز دارند، شناسایی می‌شوند. همچنین، این را می‌توان از طریق نقشه‌ها، نمودارها یا سایر نمایش‌های بصری انجام داد تا به دینفعان کمک کند تا توزیع فضایی خطر سیل را درک کنند و در مورد برنامه‌ریزی کاربری زمین، واکنش اضطراری یا توسعه زیرساخت تصمیم‌گیری آگاهانه بگیرند.

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



شکل ۹: نقشه پهنه بندی خطر سیل در حوضه آبخیز داراب با استفاده از مدل مکسنت

بر اساس نتایج بدست آمده از نقشه نهائی خطر سیلاب در منطقه مورد مطالعه، بیشترین مساحت حوضه (۷۸/۳۴٪) در رده کم خطر قرار دارد (جدول ۳). اگرچه مساحت مناطق پرخطر نسبت به مناطق کم خطر بسیار کمتر است (۱۶/۴۷٪)، اما این مناطق به دلیل پتانسیل بالای وقوع سیل، نیازمند توجه ویژه هستند. مناطق با خطر متوسط (نسبتاً کم خطر و نسبتاً پرخطر) نیز سهم قابل توجهی از مساحت حوضه را به خود اختصاص داده اند. این مناطق نیازمند پایش مستمر و اقدامات پیشگیرانه هستند. با توجه به نتایج حاصل مدل مکسنت با دقت قابل توجهی توانسته خطر سیلاب را پیش بینی کند. عملکرد مدل روی داده های آزمایشی نشان می دهد که این مدل می تواند در پیش بینی های آینده نیز عملکرد خوبی را از خود نشان داده است.

جدول ۳: توزیع خطر سیل در حوضه آبخیز داراب بر اساس مدل مکسنت

رده	مساحت	درصد
کم خطر	۱۸۷۲/۱۴	۷۸/۳۵
نسبتاً کم خطر	۴۲/۶	۱/۷۸
نسبتاً پرخطر	۸۱/۳	۳/۴
پرخطر	۳۹۳/۶	۱۶/۴۷

نتیجه گیری

در حوضه آبخیز داراب در استان فارس، در طی سال های اخیر سیلاب های زیادی رخ داده است. همین مسئله ضرورت مطالعه در خصوص عوامل مؤثر در بروز سیل و همچنین شناسایی نواحی پر خطر را آشکار می سازد. این پژوهش به منظور شناسایی اهمیت شاخص های مختلف در رخداد های سیل و همچنین تهیه نقشه خطر سیلاب با

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

استفاده از مدل حداکثر آنتروپی (مکسنت) انجام گرفت. با توجه به نتایج تحقیق، شاخص‌های بارش، فاصله از آبراهه و همچنین ارتفاع از مهمترین عوامل در وقوع سیلاب در حوضه مورد مطالعه می‌باشند. نتایج این بررسی نشان داد که نواحی کم ارتفاع، کم شیب و همچنین نواحی نزدیک رودخانه‌ها در کلاس پر خطر وقوع سیل می‌باشند. ارزیابی دقت نقشه‌های نهایی با استفاده از شاخص‌های آماری و منحنی ROC نشان داد، که مدل مکسنت از دقت خوبی جهت تهیه نقشه خطر سیل در حوضه آبخیز مورد مطالعه را دارد. بررسی نتایج تحقیق حاضر با سایر مطالعات که مدل مکسنت را جهت پهنه‌بندی خطر سیل مناسب دانسته اند انطباق دارد (Qasimi et al., 2024; Menuka et al., 2024; Javidan et al., 2021). انتخاب مدل مناسب برای پهنه‌بندی خطر سیلاب به عوامل مختلفی مانند حجم داده‌ها، پیچیدگی روابط بین متغیرها، هدف از پهنه‌بندی و تجربه کاربر بستگی دارد. در برخی موارد، ممکن است مدل‌های یادگیری ماشین ترکیبی (Ensemble Machine Learning) برای بهبود دقت نتایج مفید باشد. بنابراین می‌توان گفت تهیه نقشه حساسیت یا خطر سیلاب با استفاده از الگوریتم داده کاوی و GIS ابزار مهمی برای کمک به سیاست‌گذاران، طراحان و مهندسان برای کاهش خسارات ناشی از وقوع آن است. لذا جهت مدیریت هر چه بهتر سیلاب در این حوضه آبخیز، پیشنهادات همانند، تقویت پوشش گیاهی، اجرای طرح‌های مناسب آبخیزداری، جلوگیری از دست اندازی به حریم و بستر آبراهه‌های اصلی و همچنین آموزش‌های لازم به جوامع محلی می‌تواند در جهت مدیریت سیلاب موثر باشند. این اقدامات، همراه با ایجاد سیستم هشدار سریع و توجه به سازگاری با تغییرات اقلیمی، می‌توانند به کاهش خسارات ناشی از سیل کمک کنند.

منابع

- تقی آوند محمد، مرادی حمیدرضا، و رمضان زاده لسبویی مهدی. (۱۳۹۹). تهیه نقشه حساسیت سیل با استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین جنگل تصادفی و خطی تعمیم یافته بیزین. محیط زیست و مهندسی آب، دوره ۶، شماره ۱، صفحات: ۸۳-۹۵. [10.22034/jewe.2020.220593.1351](https://doi.org/10.22034/jewe.2020.220593.1351)
- توکلی مهدی، امیراحمدی ابوالقاسم، گلی مختاری لیلی. (۱۴۰۳). ارزیابی، پیش‌بینی و تحلیل منطقه‌ای سیلاب با استفاده از مدل‌های داده‌کاوی در حوضه آبریز فریزی. فصل‌نامه تحقیقات جغرافیایی، ۳۹ (۲): ۱۶۱-۱۶۸
- حنیفی نیا، عبدالعزیز. عبقری، هیراد. (۱۴۰۴). پیش‌بینی مناطق مستعد سیل با استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین خطی تعمیم یافته و پیشینه آنتروپی. مخاطرات محیط طبیعی، ۱۴ (۴۳)، ۳۴-۱۹. [10.22111/Jneh.2024.47730.2021](https://doi.org/10.22111/Jneh.2024.47730.2021)
- شریفی، فرود و غلامرضا نوروزی. (۱۳۷۸). تحلیلی بر سیل مرداد ۷۸ مازندران و گلستان. نشریه جنگل و مرتع، شماره ۴۲، صص ۴۳-۴۰.
- رحیم پور توحید، رضائی مقدم محمدحسین. (۱۴۰۳). مدل‌سازی پتانسیل خطر وقوع سیلاب در حوضه آبریز آجی‌چای با استفاده از الگوریتم‌های داده‌کاوی. پژوهش‌های فرسایش محیطی، ۱۴ (۴): ۱۹-۳۸
- ذاکری نژاد، رضا و عیاش، کمال. (۱۴۰۳). ارزیابی خطر سیل و عوامل مؤثر بر آن در حوضه آبخیز زهر-جراحی در جنوب غرب ایران با استفاده از روش سلسله‌مراتبی فازی. پژوهش‌های جغرافیایی طبیعی، ۵۶ (۲)، ۵۱-۶۹. [doi: 10.22059/jphgr.2024.376692.1007829](https://doi.org/10.22059/jphgr.2024.376692.1007829)
- ذاکری نژاد، رضا. (۱۳۹۹). ارزیابی مدل‌های رقومی ارتفاع جهت تهیه نقشه پتانسیل فرسایش خندقی با استفاده از مدل مکسنت و سامانه اطلاعات جغرافیایی (مطالعه موردی: حوزه آبخیز سمیرم، جنوب استان اصفهان). سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی (کاربرد سنجش از دور و GIS در علوم منابع طبیعی)، ۱۱ (۳) (پیاپی ۴۰)، ۲۱-۲۲. [SID. https://sid.ir/paper/359585/fa](https://sid.ir/paper/359585/fa)
- میرموسوی، سید حسین و حسین اسمعیلی. (۱۴۰۰). پهنه‌بندی نواحی سیل‌خیز با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) و سنجش از دور (RS)، مطالعه موردی: شهرستان داراب. مخاطرات محیط طبیعی، دوره ۱۰، شماره ۲۷، صص ۲۱-۴۶. <https://doi.org/10.22111/jneh.2020.32986.1613>
- نوحانی، ابراهیم. دارابی، فریبا. معروفی نیا، ادريس. خسروی، خه بات. (۱۳۹۵). ارزیابی مدل آنتروپی شانون در تهیه نقشه حساسیت و احتمال به وقوع سیل در حوضه آبخیز هراز. مخاطرات محیط طبیعی، سال پنجم، شماره دهم، ۱۰، ۲۲۱۱۱/Jneh.2017.2958

- A. L. AchuORCID Icon, C. D AjuORCID Icon, M. C. Raicy, Arun BhadransORCID Icon, Amal George, U. Surendran. (2025). Improved flood risk assessment using multi-model ensemble machine-learning techniques in a tropical river basin of Southern India. <https://doi.org/10.1080/02723646.2025>.
- Al-Hinai, H., & Abdalla, R. (2021). Mapping coastal flood susceptible areas using Shannon's entropy model: the case of Muscat governorate, Oman. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(4), 252. <https://doi.org/10.3390/ijgi10040252>
- Ali, A., Rana, I. A., Ali, A., & Najam, F. A. (2022). Flood risk perception and communication: The role of hazard proximity. *Journal of Environmental Management*, 316, 115309. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115309>
- Badri B, Zare R, Honarbakhsh A, Atashkhar, F. Prioritization of flood potential Beheshtabad Sub-watershed. *Journal of Geographical Studies*. 2016; 48(1): 143-158. <https://doi.org/10.22059/JPHGR.2016.57032>
- Bhattarai, Y., Duwal, S., Sharma, S., & Talchabhadel, R. (2024). Leveraging machine learning and open-source spatial datasets to enhance flood susceptibility mapping in a transboundary river basin. *International Journal of Digital Earth*, 17(1). <https://doi.org/10.1080/17538947.2024.2313857>
- Breugem, A. J., Wesseling, J. G., Oostindie, K., & Ritsema, C. J. (2020). Meteorological aspects of heavy precipitation in relation to floods – An overview. *Earth-Science Reviews*, 103171. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103171>
- Chen, Y., Wang, B., Pollino, C. A., Cuddy, S. M., Merrin, L. E., & Huang, C. (2014). Estimate of flood inundation and retention on wetlands using remote sensing and GIS. *Ecohydrology*, n/a–n/a. <https://doi.org/10.1002/eco.1467>
- Dovonce E. A. (2000). Physically based distributed hydrologic model. Master of Science Thesis, *The Pennsylvania State University*.
- Duwal, S., Liu, D., & Pradhan, P. M. (2023). Flood susceptibility modeling of the Karnali river basin of Nepal using different machine learning approaches. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 14(1). <https://doi.org/10.1080/19475705.2023.2217321>
- El-Haddad, B. A., Youssef, A. M., Pourghasemi, H. R., Pradhan, B., El-Shater, A.-H., & El-Khashab, M. H. (2020). Flood susceptibility prediction using four machine learning techniques and comparison of their performance at Wadi Qena Basin, Egypt. *Natural Hazards*. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04296-y>
- Gokceoglu, C., Sonmez, H., Nefeslioglu, H.A., Duman, T.Y., Can, T., 2005. The 17 March 2005 Kuzulu landslide (Sivas, Turkey) and landslide-susceptibility map of its vicinity. *Eng. Geol.* 81, 65–83. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2005.07.011>
- Harshasimha, A.C.; Bhatt, C.M. Flood Vulnerability Mapping Using MaxEnt Machine Learning and Analytical Hierarchy Process (AHP) of Kamrup Metropolitan District, Assam. *Environ. Sci. Proc.* 2023, 25, 73. <https://doi.org/10.3390/ECWS-7-14301>
- Hitouri S, Mohajane M, Lahsaini M, Ali SA, Setargie TA, Tripathi G, D'Antonio P, Singh SK, Varasano A. (2024). Flood Susceptibility Mapping Using SAR Data and Machine Learning Algorithms in a Small Watershed in Northwestern Morocco. *Remote Sensing*, 16(5):858. <https://doi.org/10.3390/rs16050858>
- Huang, Chang & Wu, Jianping & Chen, Yun & Yu, Jia. (2012). Detecting floodplain inundation frequency using MODIS time-series imagery. 2012 1st International Conference on Agro-Geoinformatics, *Agro-Geoinformatics 2012*. 1-6. <https://doi.org/10.1109/Agro-Geoinformatics.2012.6311668>
- Huang, C., Chen, Y., Wu, J. (2013). GIS-based spatial zoning for flood inundation modelling in the Murray-Darling Basin. *20th International Congress on Modelling and Simulation 2013 (MODSIM2013)*.
- Huang, C., Chen, Y., & Wu, J. (2014). Mapping spatio-temporal flood inundation dynamics at large river basin scale using time-series flow data and MODIS imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 26, 350–362. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2013.09.002>
- Huang, C., Chen, Y., Wu, J., Chen, Z., Li, L., Liu, R., Yu, J., 2014c. Integration of remotely sensed inundation extent and high-precision topographic data for mapping inundation depth. In: 3rd International Conference on Agro-Geoinformatics, Beijing, China.
- Javidan, N., Kaviani, A., Pourghasemi, H.R. et al. (2021). Evaluation of the multi-hazard map produced using the MaxEnt machine learning technique. *Sci Rep 11*, 6496. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-85862-7>
- L., Achu & C D, Aju & MANI CHRISTY, Raicy & Bhadrans, Arun & George, Amal & Udayar Pillai, Surendran & Girishbai, Drishya & Ajayakumar, P. & Gopinath, Girish & Pradhan, Biswajeet. (2025). Improved flood risk assessment using multi-model ensemble machine-learning techniques in a tropical river basin of Southern India. *Physical Geography*. 46. 1-29. <https://doi.org/10.1080/02723646.2025.2464536>.
- McFeeters, S. K. (1996). "The use of the normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features." *International Journal of Remote Sensing*, 17(7), 1425-1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>
- Menuka M., Sachin T., Santosh A., Bikram S., Bikram M., Amir S. (2024). Flood susceptibility assessment using a machine learning approach in the Mohana-Khutiya River of Nepal, *Natural Hazards Research*, 4(1): 32-45. <https://doi.org/10.1016/j.nhres.2024.01.001>.
- Pandey, M., Arora, A., Arabameri, A.R., Costache, R.D., Kumar, Mishra, V., Nguyen, H., Mishra, J., Siddiqui, M., Ray, Y., Soni, S., Shukla, U. (2021). Flood Susceptibility Modeling in a Subtropical Humid Low-Relief <https://doi.org/10.3389/feart.2021.659296>

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

- Prakash Mohanty, M., Nithya, S., Nair, A. S., Indu, J., Ghosh, S., Mohan Bhatt, C., ... Karmakar, S. (2020). Sensitivity of various topographic data in flood management: Implications on inundation mapping over large data-scarce regions. *Journal of Hydrology*, 125523. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125523>
- Qasimi Abdul Baser, Isazade Vahid, Berndtsson Ronny. (2023). Flood Susceptibility Prediction Using MaxEnt and Frequency Ratio Modeling for Kokcha River in Afghanistan. *Natural Hazards*, 25 October 2023. <https://doi.org/10.1007/s11069-023-06232-2>
- Qasimi, A.B., Isazade, V. & Berndtsson, R. (2024). Flood susceptibility prediction using MaxEnt and frequency ratio modeling for Kokcha River in Afghanistan. *Nat Hazards* 120, 1367–1394. <https://doi.org/10.1007/s11069-023-06232-2>.
- Rahman, M., Ningsheng, C., Islam, M.M. et al. Flood Susceptibility Assessment in Bangladesh Using Machine Learning and Multi-criteria Decision Analysis. *Earth Syst Environ* 3, 585–601 (2019). <https://doi.org/10.1007/s41748-019-00123-y>
- Razavi Termeh S. V., Kornejady A., Pourghasemi H. R., and Keesstra S.(2018). Flood susceptibility mapping using novel ensembles of adaptive neuro-fuzzy inference systems and metaheuristic algorithms. *Sci Total Environ.*, 615, 438–451. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.262>
- Sala, O.E., Chapin, F.S., Armesto, J.J., et al. (2000) Global Biodiversity Scenarios for the Year 2100. *Science*, 287, 1770-1774. <http://dx.doi.org/10.1126/science.287.5459.1770>
- Shirani, K., Zakerinejad, R. (2021). Watershed prioritization for the identification of spatial hotspots of flood risk using the combined TOPSIS-GIS-based approach: a case study of the Jarahi-Zohre catchment in Southwest Iran. *AUC Geographica* 56(1), 120–128.
- Shahabi H, Khezri S, Ahmad BB, Hashim M. (2014). Landslide susceptibility mapping at central Zab basin, Iran: A comparison between analytical hierarchy process, frequency ratio, and logistic regression models, *Catena* 115: 55-70. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2013.11.014>
- Shrestha, R.M., Di, L., Yu, G., Shao, Y., Kang, L., & Zhang, B. (2013). Detection of flood and its impact on crops using NDVI Corn case. *2013 Second International Conference on Agro-Geoinformatics (Agro-Geoinformatics)*, 200-204. <https://doi.org/10.1109/ARGO-GEOINFORMATICS.2013.6621907>
- Smith, K. (2001). Environmental hazard assessing risk and reducing disaster, Third edition, published by Routledge, 11 New Fetter Lane, London.
- Sugianto S, Deli A, Miswar E, Rusdi M, Irham M. The effect of land use and land cover changes on flood occurrence in Teunom Watershed, Aceh Jaya. *Land*. 2022 Aug 8;11(8):1271. <https://doi.org/10.3390/land11081271>
- Taherizadeh, M., Niknam, A., Nguyen-Huy, T. et al. Flash flood-risk areas zoning using integration of decision-making trial and evaluation laboratory, GIS-based analytic network process, and satellite-derived information. *Nat Hazards* 118, 2309–2335 (2023). <https://doi.org/10.1007/s11069-023-06089-5>
- Tao, H., Al-Khafaji, Z. S., Qi, C., Zounemat-Kermani, M., Kisi, O., Tiyasha, T., ... & Yaseen, Z. M. (2021). Artificial intelligence models for suspended river sediment prediction: state-of-the-art, modeling framework appraisal, and proposed future research directions. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 15(1), 1585-1612. <https://doi.org/10.1080/19942060.2021.1984992>
- Thomas, David S.G. (2016). The Dictionary of Physical Geography, 4th Edition. *John Wiley & Sons Ltd*. <https://doi.org/10.1002/9781118782323.ch06>
- Ticehurst, C., Chen, Y., Karim, F., Dushmanta, D., 2013. Using MODIS for mapping flood events for use in hydrological and hydrodynamic models: experiences so far. In: *20th International Congress on Modelling and Simulation, Adelaide, Australia*.
- Xu, H. (2006). "Modification of normalized difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery." *International Journal of Remote Sensing*, 27(14), 3025-3033. <https://doi.org/10.1080/01431160600589179>
- Zakerinejad, R., Ayash, K. (2024). Analysis of Flood Risk and Influencing Factors in Zohr-Jarhari Basin in Zohr-Jarhari in Southwest of Iran using Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP) Approach. *Physical Geography Research Quarterly*, 56 (2), 51-69. <http://doi.org/10.22059/JPHGR.2024.376692.1007829>.