



Evaluation and Prediction of Flood-Prone Areas Using the Random Forest Algorithm

Narjes Dowlat abadi¹ , Leila Goli Mokhtari^{2✉} , Elahe Akbari³ 

1. MSc of Geomorphology, Faculty of Geography and Environmental sciences, Hakim sabzevari University, Sabzevar, Iran. E-mail: narjes.8428@gmail.com
2. Corresponding Author, Assistant Professor, Faculty of Geography and Environmental sciences, Hakim sabzevari University, Sabzevar, Iran E-mail: l.mokhtari@hsu.ac.ir
3. Department of Remote sensing and Geographic Information System, Faculty of Geography and Environmental sciences, Hakim sabzevari University, Sabzevar, Iran. E-mail: e.akbari@hsu.ac.ir.

Article Info

ABSTRACT

Article type:

Research Article

Article history:

Received: 27 March 2024

Revised: 1 February 2025

Accepted: 23 April 2025

Published: 4 August 2025

Keywords:

Flood,
Random Forest model,
Davarzan.

Floods, as one of the three primary natural hazards in Iran, cause significant damage annually to the environment, infrastructure, and livelihoods. This study aimed to map flood hazard zones in the Davarzan region and identify the key factors contributing to flood occurrence using the Random Forest algorithm and spatial data analysis. Sixteen environmental indicators, including elevation, slope, precipitation, geology, geomorphology, land use, plan curvature, profile curvature, topographic wetness index (TWI), proximity to stream, stream density, train ruggedness index (TRI), Normalized difference vegetation index (NDVI), Stream power index (SPI), geology and soil were included in the analysis. The Information Gain Ratio (IGR) was used to determine the importance of each factor, and less significant variables were excluded from the modeling process. The results showed that elevation, precipitation, and land use were the most influential factors in flood occurrence. According to the flood hazard mapping, approximately 67% of the study area is at high risk, 5% at very high risk, 6% at moderate risk, and 22% at low to very low risk. Additionally, it was found that about 50% of urban and rural areas are in high-risk zones, emphasizing the need for preventive measures. This research demonstrated that the Random Forest algorithm, in addition to providing precise hazard mapping, serves as an effective tool for flood management and risk mitigation. Strategies such as enhancing vegetation cover, revising land use practices, improving drainage infrastructure, and reevaluating the location of residential areas can significantly reduce flood-related damages. The study's findings offer a valuable basis for managerial decision-making and sustainable development in Davarzan and similar regions

Cite this article: Dowlat abadi, N., Goli Mokhtari, L., & Akbari, E. (2026). Evaluation and Prediction of Flood-Prone Areas Using the Random Forest Algorithm. *Journal of Remote Sensing and GIS Applications in Environmental Sciences*, 6 (18), 1-17. <http://doi.org/10.22034/rsgi.2025.61009.1069>



© The Author(s).

DOI: <http://doi.org/10.22034/rsgi.2025.61009.1069>

Publisher: University of Tabriz.



Introduction

Floods, as one of the three primary natural hazards in Iran, cause significant damage annually to the environment, infrastructure, and livelihoods. This phenomenon is among the most destructive natural hazards worldwide, causing significant socio-economic and environmental damages. In Iran, frequent floods lead to substantial losses in human lives, infrastructure, and ecosystems. This study aims to evaluate and predict flood-prone areas in the Davarzan region using the Random Forest (RF) algorithm and spatial data analysis. The study specifically focuses on identifying key environmental factors influencing flood occurrences and assessing the effectiveness of machine learning-based flood risk zoning.

Data and Method

The research methodology involved three main phases: data collection, feature selection, and flood hazard modeling. Sixteen environmental parameters, including elevation, slope, precipitation, geology, geomorphology, land use, plan curvature, profile curvature, topographic wetness index (TWI), stream proximity, stream density, terrain ruggedness index (TRI), normalized difference vegetation index (NDVI), stream power index (SPI), geology, and soil, were analyzed.

The Information Gain Ratio (IGR) was applied to determine the relative importance of each factor, and low-impact variables were excluded to improve model efficiency. Flood occurrence data were collected from satellite imagery and field surveys, and the dataset was split into training (70%) and testing (30%) sets. The RF algorithm was then employed to develop flood hazard maps, which were validated using performance metrics such as Root Mean Square Error (RMSE), Mean Absolute Error (MAE), Cohen's Kappa, and Receiver Operating Characteristic Area Under the Curve (ROC-AUC). The methodology also included spatial analysis using Geographic Information Systems (GIS) to enhance the precision of flood susceptibility mapping.

Results and Discussion

The analysis revealed that elevation (IGR = 0.77), precipitation (IGR = 0.68), and land use (IGR = 0.61) were the most influential factors in flood occurrence. The RF model classified the flood hazard zones into five categories: very high, high, moderate, low, and very low risk. According to the hazard map, approximately 67% of the study area falls within high-risk zones, 5% in very high-risk zones, 6% in moderate-risk areas, and 22% in low-risk areas. Furthermore, about 50% of urban and rural settlements were found in high-risk flood zones, highlighting the need for effective mitigation strategies.

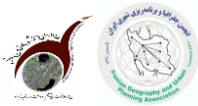
The model demonstrated high predictive accuracy, with an overall ROC-AUC of 0.99, a Kappa coefficient of 0.96, and an RMSE of 0.11, indicating its reliability in flood hazard assessment. The study also revealed that flood-prone areas are predominantly located in low-elevation zones with minimal vegetation and proximity to streams. Additionally, the incorporation of TWI and NDVI further refined the model's ability to distinguish between high- and low-risk regions.

Conclusion

The findings emphasize the importance of topographic, hydrological, and land-use factors in flood risk assessment. The Random Forest algorithm proved to be a robust tool for mapping flood-prone areas with high accuracy. The study suggests several mitigation strategies, including reforestation, improved drainage infrastructure, optimized land-use planning, and the relocation of settlements from high-risk areas.

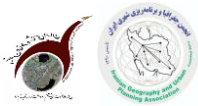
The integration of machine learning with geospatial analysis can significantly enhance flood management and disaster risk reduction efforts. Future research should explore hybrid modeling approaches that incorporate deep learning techniques and additional hydrological parameters for more precise flood predictions. Furthermore, incorporating real-time data and remote sensing techniques could improve early warning systems and facilitate rapid response to flood events.

The results of this study provide valuable insights for policymakers and urban planners in designing flood-resilient environments and sustainable water resource management strategies in the Davarzan region and other similar flood-prone areas. By implementing data-driven solutions, decision-makers can minimize flood damage, protect vulnerable communities, and enhance long-term environmental sustainability.

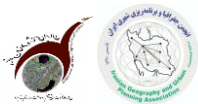


References

- Bostani, Alireza and Javani, Khadijah, (2013). *investigation and recognition of natural hazards (earthquakes and floods) and their effects on the vulnerability of villages (a case study of villages in Darab city)*. P.1800-1811. the second international conference on environmental hazards, Tehran, (In Persian).
- Bui, D. T., Hoang, N. D., Martínez-Álvarez, F., Ngo, P. T. T., Hoa, P. V., Pham, T. D., ... & Costache, R. (2020). A novel deep learning neural network approach for predicting flash flood susceptibility: A case study at a high frequency tropical storm area. *Science of the Total Environment*, 701, 134413. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134413>.
- Bui, D. T., Ngo, P. T. T., Pham, T. D., Jaafari, A., Minh, N. Q., Hoa, P. V., & Samui, P. (2019). A novel hybrid approach based on a swarm intelligence optimized extreme learning machine for flash flood susceptibility mapping. *Catena*, 179, 184-196. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.04.009>.
- Campolo, M., Andreussi, P., & Soldati, A. (1999). River flood forecasting with a neural network model. *Water resources research*, 35(4), 1191-1197. <https://doi.org/10.1029/1998WR900086>.
- Chen, W.; Zhai, G.; Fan, C.; Jin, W. and Xie, Y., (2017), A planning framework based on system Theory and GIS for urban emergency shelter system: a case of Guangzhou, China, Human and Ecological Risk Assessment, *An International Journal*, 23(3), 1-16. <https://doi.org/10.1080/10807039.2016.1185692>.
- Choubin, B., Khalighi-Sigaroodi, S., Malekian, A., & Kişi, Ö. (2016). Multiple linear regression, multi-layer perceptron network and adaptive neuro-fuzzy inference system for forecasting precipitation based on large-scale climate signals. *Hydrological sciences journal*, 61(6), 1001-1009. <https://doi.org/10.1080/02626667.-2014.966721>.
- Darabi, H., Choubin, B., Rahmati, O., Haghighi, A. T., Pradhan, B., & Kløve, B. (2019). Urban flood risk mapping using the GARP and QUEST models: A comparative study of machine learning techniques. *Journal of hydrology*, 569, 142-154. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.12.002>.
- Esfandiari Darabad, Fariba, Rahimi, Massoud, and Pourmorteza, Gholamreza. (2018). Flood zoning of Ajarlo Chai catchment area using L-THIA method and fuzzy logic. *Quantitative Geomorphology Research*, 8(2), 155-171, (in Persian with English abstract).
- Firoozishahmirzadi, P., Rahimi, S., & Esmaeili Seraji, Z. (2021). Application of Machine Learning Models for flood risk assessment and producing map to identify flood prone areas: Literature Review. *International Journal of Data Envelopment Analysis*, 9(4), 43-88. <https://doi.org/10.30495/ijdea.2022.68987.1181>.
- Florinsky, I. (2016). *Digital terrain analysis in soil science and geology*. Academic Press.
- Green, C., Diepernk, G., EK, K., Hegger, D., Pettersson, M., Priest, S., Tapsell, Ghafory, M., (2005). *Erthquak Risk management Strategies: the Iranian Experience*, Tehran UNESCO Office and International Institute of Earthquake Engineering and seismology (IIEFS). pp. 9-1.
- Hosseini, F. S., Choubin, B., Mosavi, A., Nabipour, N., Shamshirband, S., Darabi, H., & Haghighi, A. T. (2020). Flash-flood hazard assessment using ensembles and Bayesian-based machine learning models: Application of the simulated annealing feature selection method. *Science of the total environment*, 711, 135161. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135161>.
- Huang, Sha, et al. (2021). A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing. *Journal of Forestry Research*, 32(1), 1-6. <https://doi.org/10.1007/s11676-020-01155-1>.
- Lee, S., Kim, J. C., Jung, H. S., Lee, M. J., & Lee, S. (2017). Spatial prediction of flood susceptibility using random-forest and boosted-tree models in Seoul metropolitan city, Korea. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 8(2), 1185-1203. <https://doi.org/10.1080/19475705.2017.1308971>.
- Liao, Y., Wang, Z., Lai, C., & Xu, C. Y. (2023). A Framework on Fast Mapping of Urban Flood Based on a Multi-Objective Random Forest Model. *International Journal of Disaster Risk Science*, 1-16. <https://doi.org/10.1007/s13753-023-00481-2>.
- Omidfarfar, Sajjad and Hosseini, Seyedah Laila and Fakhari, Zahra and Qanbari, Samaneh, (2021), *Zoning and*



- flood risk assessment in Tabriz city using Fuzzy AHP model*. P.3425-3438. 2nd International Conference and 5th National Conference on Protection of Natural Resources and Environment Ardabil, (In Persian).
- Patwardhan, A., (2004). The methodology for assessing natural hazard impacts. *Global and planetary change*, (47), 265-253. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2004.10.015>.
- Rad, M. R. P., Toomanian, N., Khormali, F., Brungard, C. W., Komaki, C. B., & Bogaert, P. (2014). Updating soil survey maps using random forest and conditioned Latin hypercube sampling in the loess derived soils of northern Iran. *Geoderma*, 232, 97-106. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.04.036>.
- Rahmati, O., & Pourghasemi, H. R. (2017). Identification of critical flood prone areas in data-scarce and ungauged regions: a comparison of three data mining models. *Water resources management*, 31, 1473-1487. <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1589-6>.
- Saeedi, S., & Asiaei, M. (2021). Flood Risk Zoning in Sabzevar Using Fuzzy Logic. *Quarterly Journals of Urban and Regional Development Planning*, 5(15), 27-49, (In Persian). <https://doi.org/10.22054/urdp.2021.-61580.1348>.
- Shamsipour, Ali Akbar, Alavi Panah, Seyyed Kazem, & Mohammadi, Hossein. (2010). Investigating the effectiveness of NOAA-AVHRR satellite's vegetation and thermal indices in drought analysis of Kashan region. *Iran Pasture and Desert Research*, 17 (3), 445-465. (in Persian with English abstract).
- Taha, M. M. N; Elbarbary, S. M; Naguib, D. M; El-Shamy, I. Z (2017). "Flash flood hazard zonation based on basin morphometry using remote sensing and GIS techniques: A case study of Wadi Qena basin, Eastern Desert, Egypt". *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. 8, 157-167. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2017.08.007>.
- Taherkhani, M., sojasi qeydari, H., & sadeghloo, T. (2012). Comparative Assessment of Ranking Methods for Natural Disasters in Rural Regions (Case Study: Zanjan Province). *Journal of Rural Research*, 2(7), 31-54. (In Persian with English abstract).
- Tehrany, M. S., Jones, S., & Shabani, F. (2019). Identifying the essential flood conditioning factors for flood prone area mapping using machine learning techniques. *Catena*, 175, 174-192. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.12.011>.
- Tehrany, M. S., Pradhan, B., & Jebur, M. N. (2013). Spatial prediction of flood susceptible areas using rule based decision tree (DT) and a novel ensemble bivariate and multivariate statistical models in GIS. *Journal of hydrology*, 504, 69-79. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.09.034>.
- Tehrany, M. S., Pradhan, B., & Jebur, M. N. (2014). Flood susceptibility mapping using a novel ensemble weights-of-evidence and support vector machine models in GIS. *Journal of hydrology*, 512, 332-343. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.03.008>.
- Termeh, S. V. R., Kornejady, A., Pourghasemi, H. R., & Keesstra, S. (2018). Flood susceptibility mapping using novel ensembles of adaptive neuro fuzzy inference system and metaheuristic algorithms. *Science of the Total Environment*, 615, 438-451. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.262>.
- Tierolf, L., de Moel, H., & van Vliet, J. (2021). Modeling urban development and its exposure to river flood risk in Southeast Asia. *Computers, Environment and Urban Systems*, 87, 101620. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2021.101620>.
- United Nations Climate (2015). *The human cost of weather-related disasters 1995- 2015*. pp119.



ارزیابی و پیش‌بینی پهنه‌های سیل‌گیر با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی

نرجس دولت‌آبادی^۱ | لیلی گلی مختاری^۲ | الهه اکبری^۳

۱. کارشناسی ارشد، دانشکده جغرافیا و علوم محیطی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران. ایمیل: narjes.8428@gmail.com
۲. نویسنده مسئول، استادیار، گروه ژئومورفولوژی و آب و هواشناسی، دانشکده جغرافیا و علوم محیطی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران. ایمیل: l.mokhtari@hsu.ac.ir
۳. استادیار، گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده جغرافیا و علوم محیطی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران. ایمیل: e.akbari@hsu.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

رخداد سیل به‌عنوان یکی از سه مخاطره طبیعی اصلی در ایران، هر ساله خسارات چشمگیری به محیط‌زیست، زیرساخت‌ها، و زندگی مردم وارد می‌کند. در پژوهش حاضر، با هدف پهنه‌بندی خطر سیلاب در شهرستان داورزن و شناسایی عوامل مؤثر بر وقوع آن، از الگوریتم جنگل تصادفی و تحلیل داده‌های مکانی استفاده شد. ۱۶ شاخص محیطی از جمله ارتفاع، شیب، بارش، زمین‌شناسی، ژئومورفولوژی، کاربری اراضی، انحنای زمین، شاخص رطوبت توپوگرافی، تراکم و فاصله از آبراهه‌ها در تحلیل‌ها گنجانده شدند. به‌منظور تعیین درجه اهمیت هر عامل، از شاخص ارزش اطلاعاتی (IGR) بهره گرفته شد و عوامل کم‌اهمیت از فرآیند مدل‌سازی حذف شدند. نتایج پژوهش نشان داد که ارتفاع، بارش و کاربری اراضی به‌ترتیب از مهم‌ترین عوامل در وقوع سیلاب هستند. بر اساس نقشه پهنه‌بندی خطر، حدود ۶۷ درصد منطقه مورد مطالعه در معرض خطر زیاد، ۵ درصد در معرض خطر بسیار زیاد، ۶ درصد خطر متوسط، و ۲۲ درصد در معرض خطر کم تا بسیار کم قرار دارند. همچنین، مشخص شد که حدود ۵۰ درصد از مناطق شهری و روستایی در مناطق پرخطر واقع شده‌اند که این موضوع لزوم اقدامات پیشگیرانه را برجسته می‌کند. این پژوهش نشان داد که استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی، علاوه بر ارائه پهنه‌بندی دقیق، ابزاری کارآمد برای مدیریت سیلاب و کاهش خطرات آن است. راهکارهایی مانند توسعه پوشش گیاهی، اصلاح کاربری اراضی، بهبود زیرساخت‌های زهکشی و بازنگری در جانمایی مناطق مسکونی می‌توانند نقش مؤثری در کاهش آسیب‌های ناشی از سیلاب ایفا کنند. نتایج تحقیق می‌تواند مبنای مناسبی برای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی و توسعه پایدار در منطقه داورزن و سایر مناطق مشابه باشد.

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۰۸

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۱/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۰۳

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۵/۱۳

کلیدواژه‌ها:

سیلاب،

مدل جنگل تصادفی،

داورزن.

استناد: دولت‌آبادی، نرجس؛ گلی مختاری، لیلی و اکبری، الهه (۱۴۰۵). ارزیابی و پیش‌بینی پهنه‌های سیل‌گیر با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی. کاربرد سنجش از

دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی در علوم محیطی، ۶ (۱۸)، ۱-۱۷.

<http://doi.org/10.22034/rsgi.2025.61009.1069>



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه تبریز.

مقدمه

مخاطرات ژئومورفولوژیکی، از جمله پدیده‌هایی هستند که تأثیرات مخرب بسیاری بر جوامع انسانی و محیط‌زیست می‌گذارند. یکی از مهم‌ترین این مخاطرات، سیلاب است که به‌عنوان یکی از ویرانگرترین بلاهای طبیعی شناخته می‌شود (بوستانی و همکاران، ۱۳۹۱). بر اساس گزارش سازمان ملل، بیش از دو میلیارد نفر در سراسر جهان تحت تأثیر این پدیده قرار دارند. (United Nations Climate, 2015) سیلاب به دلیل ماهیت ناگهانی خود، در مقایسه با سایر بلاهای طبیعی نظیر خشکسالی خسارات بیشتری به انسان و زیرساخت‌ها وارد می‌کند (Green, 2005).

این خسارات، علاوه بر تلفات جانی و مالی، اثرات زیست‌محیطی گسترده‌ای از جمله فرسایش خاک، تخریب اکوسیستم‌های طبیعی، آلودگی منابع آبی، و نابودی تنوع زیستی را به همراه دارد. سیلاب همچنین باعث تغییرات قابل توجهی در کاربری اراضی می‌شود و امنیت غذایی و معیشتی جوامع محلی را به خطر می‌اندازد.

در تعریف، سیل رویدادی ناگهانی است که طی آن جریان رودخانه و سطح آب به‌طور غیرمنتظره افزایش یافته و موجب خسارات جانی و مالی می‌شود (پورطاهری و همکاران، ۱۳۹۰). این پدیده علاوه بر تخریب زیرساخت‌ها و سکونتگاه‌ها و خسارات اقتصادی و اجتماعی، تأثیرات زیست‌محیطی گسترده‌ای نیز دارد که می‌تواند به صورت کوتاه‌مدت و بلندمدت بر اکوسیستم‌ها اثر بگذارد. از جمله تخریب زیستگاه‌های طبیعی حیوانات و گیاهان، اختلال در چرخه‌های اکولوژیکی، فرسایش خاک و کاهش کیفیت زمین، آلودگی آب و خاک، از بین رفتن پوشش گیاهی و تغییر الگوهای رسوب‌گذاری که می‌تواند ویژگی‌های فیزیکی رودخانه‌ها و تالاب‌ها را تغییر دهد.

یکی از چالش‌های اساسی در مدیریت این بحران، شناسایی مناطق در معرض خطر و تخلیه اضطراری آن‌ها در زمان وقوع سیل است (Chen et al., 2017). به همین دلیل، بسیاری از محققان در سراسر جهان به مطالعه و ارائه راهکارهایی در این زمینه پرداخته‌اند.

شناسایی و مدیریت مناطق مستعد سیل‌گیری یکی از راهبردهای اصلی در کاهش اثرات مخرب این پدیده است. این مهم نیازمند روش‌های علمی و ابزارهای دقیق برای پیش‌بینی و تحلیل خطر سیلاب است. در این راستا، سیستم اطلاعات جغرافیایی^۱ به‌عنوان ابزاری کارآمد در تحلیل داده‌های مکانی و پهنه‌بندی خطر سیلاب، نقش مهمی ایفا می‌کند. روش‌های مدل‌سازی و تحلیل در GIS امکان ترکیب و تحلیل لایه‌های اطلاعاتی مانند شیب، ارتفاع، بارش، تراکم زهکشی و کاربری اراضی را فراهم می‌کند.

در دهه‌های اخیر، روش‌های مختلفی برای ارزیابی خطر سیلاب مورد استفاده قرار گرفته‌اند. مدل‌های سنتی نظیر روش‌های فازی و تحلیل‌های هم‌پوشانی، به دلیل سادگی و در دسترس بودن، کاربرد گسترده‌ای داشته‌اند. با این حال، این روش‌ها اغلب توانایی تحلیل داده‌های پیچیده و چندبعدی را ندارند. در مقابل، مدل‌های پیشرفته‌تر نظیر تکنیک‌های یادگیری ماشین، از جمله الگوریتم جنگل تصادفی^۲ به دلیل توانایی بالا در تحلیل داده‌های چندمتغیره و غیرخطی، دقت و کارایی بیشتری در پیش‌بینی مناطق مستعد سیلاب دارند. سیستم اطلاعات جغرافیایی نیز به‌عنوان بستری برای ادغام مدل‌های یادگیری ماشین و داده‌های مکانی، فرصت‌های جدیدی برای تحلیل و پیش‌بینی خطر سیلاب فراهم کرده است. استفاده از این ابزار در کنار تکنیک‌های مدل‌سازی پیشرفته، امکان شناسایی دقیق‌تر مناطق پرخطر و ارائه راهکارهای مؤثرتر برای مدیریت بحران را مهیا می‌کند.

شناخت مناطق سیل‌گیر از نظر میزان خطر، گام اول در کاهش آثار مخرب سیلاب است. این اطلاعات می‌تواند مبنای تصمیم‌گیری اصولی برای مدیریت استفاده از اراضی، برنامه‌ریزی شهری، و مکان‌یابی سکونتگاه‌های انسانی باشد. تجارب جهانی

نشان داده است که اقداماتی مانند بهینه‌سازی کاربری اراضی، حفاظت از پوشش گیاهی و کنترل زهکشی، نقش مهمی در کاهش آسیب‌های ناشی از سیلاب دارد.

در ایران، مطالعات متعددی در زمینه پهنه‌بندی خطر سیلاب انجام شده است. برای مثال، سعیدی و آسیایی (۱۳۹۹) در تحقیقی با استفاده از منطق فازی، پهنه‌بندی خطر سیلاب در شهرستان سبزوار را با هشت معیار شامل شیب، فاصله از رودخانه، ارتفاع، زمین‌شناسی، کاربری اراضی، بارش، تراکم زهکشی و پوشش گیاهی انجام دادند. نتایج این پژوهش نشان داد که متغیرهایی مانند شیب (با ضریب وزنی ۰/۳۴۰) و بارش (با ضریب ۰/۱۸۴) تأثیر قابل‌توجهی در وقوع سیل دارند، در حالی که پوشش گیاهی تأثیر کمتری داشته است. اسفندیاری (۱۳۹۶) نیز در حوضه آبخیز آجرلوچای با استفاده از منطق فازی و ۹ معیار شامل ارتفاع، اقلیم، لیتولوژی، شیب، تراکم زهکشی، کاربری اراضی و رواناب، پهنه‌بندی سیل‌خیزی منطقه را انجام داد و مشخص کرد که بخش عمده‌ای از منطقه دارای پتانسیل سیل‌خیزی کم تا متوسط است. امیدوارفر و همکاران (۱۳۹۹) به پهنه‌بندی و ارزیابی مخاطره سیل در شهر تبریز با استفاده از مدل سلسله‌مراتبی-فازی پرداختند. نقشه نهایی آسیب‌پذیری شهر تبریز در مقابل مخاطره سیل حاکی از آن است نواحی مرکزی این شهر در برابر سیلاب آسیب‌پذیری بالایی دارند و با نزدیک شدن به قسمت‌های حاشیه تبریز آسیب‌پذیری به تدریج کمتر می‌شود. در سطح بین‌المللی نیز پژوهش‌های متعددی انجام شده است. از جمله چوبین و همکاران^۱ (۲۰۱۶) با بهره‌گیری از مدل‌های هیدرولوژیکی و سیستم اطلاعات جغرافیایی، آسیب‌پذیری سیل شهری در جنوب غربی هند را تحلیل کردند. نتایج نشان داد که مناطق با آسیب‌پذیری بسیار بالا و بالا مجموعاً ۴۶ درصد از مساحت کل را تشکیل می‌دهند. همچنین، تیرولف و همکاران^۲ (۲۰۲۱) خطر سیل رودخانه‌ای را در جنوب شرق آسیا مدل‌سازی کردند و نشان دادند که خسارات ناشی از سیلاب سالانه در این منطقه روندی افزایشی دارد و از ۸ درصد در تایلند تا ۱۱ درصد در لائوس متغیر است.

در این پژوهش، با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی و تحلیل داده‌های مکانی در محیط GIS، به پهنه‌بندی مناطق مستعد سیلاب در منطقه داورزن پرداخته شده است. این تحقیق از مجموعه‌ای از عوامل مؤثر از جمله شیب، ارتفاع، زمین‌شناسی، بارش، کاربری اراضی و تراکم زهکشی بهره گرفته است تا تحلیل دقیقی از خطر سیلاب ارائه دهد.

اهداف اصلی این پژوهش عبارتند از شناسایی عوامل مؤثر در وقوع سیلاب و تحلیل اهمیت آن‌ها، پهنه‌بندی خطر سیلاب در منطقه داورزن با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی، ارائه چارچوبی کاربردی برای بهره‌گیری از GIS و یادگیری ماشین در مدیریت مخاطرات طبیعی و کمک به کاهش خسارات زیست‌محیطی و اقتصادی ناشی از سیلاب از طریق شناسایی و مدیریت مناطق پرخطر. این پژوهش با ترکیب تکنیک‌های پیشرفته مدل‌سازی و داده‌های مکانی، گامی مهم در بهبود مدیریت خطر سیلاب و توسعه پایدار منطقه ارائه می‌کند.

مواد و روش تحقیق

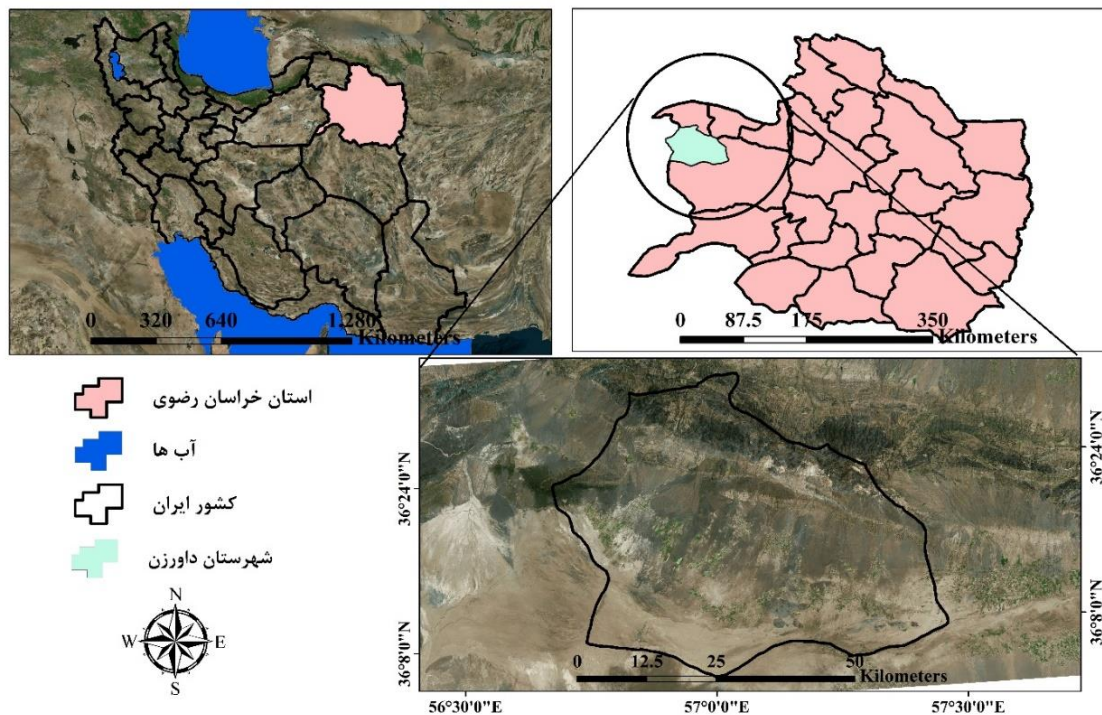
منطقه مورد مطالعه

شهرستان داورزن یکی از شهرستانهای غرب خراسان رضوی است که در ۳۱۰ کیلومتری غرب مشهد واقع شده است. مرتفع‌ترین نقطه شهرستان داورزن قله کوه گر (کوه بیزه) با ارتفاع ۲۹۴۸ متر و پست‌ترین نقطه آن دشت مهرگان و کویر مزینان با ارتفاع ۷۹۸ متر از سطح دریا می‌باش (شکل ۱). این شهرستان دارای رودخانه‌های مهمی است که مهمترین آنها رودخانه ریوند و رودخانه مهر می‌باشد.

این منطقه به دلیل موقعیت جغرافیایی، ویژگی‌های توپوگرافی، و شرایط اقلیمی، مستعد وقوع سیلاب است. این محدوده در

حاشیه کویر قرار دارد و عمدتاً تحت تأثیر بارش‌های شدید و ناگهانی قرار می‌گیرد که به صورت رواناب‌های سطحی و سیلاب‌های موقت ظاهر می‌شوند. عواملی همچون توپوگرافی و شیب زمین و وجود دامنه‌های کوهستانی موجب تسریع در حرکت رواناب و کاهش زمان تمرکز آب می‌شود. همچنین بارش‌های ناگهانی و پراکنده و پوشش گیاهی ضعیف ناشی از تخریب مراتع ظرفیت نفوذ آب به خاک را کاهش داده و رواناب را افزایش می‌دهد. سایر عوامل از جمله ساختار زمین‌شناسی و وجود خاک‌های نفوذناپذیر و یا نیمه‌نفوذپذیر، به ویژه در نزدیکی مسیل‌ها و حوضه‌های آبریز و نیز عوامل انسانی احتمال وقوع سیلاب را در این منطقه بیشتر می‌کند.

این محدوده در سال‌های گذشته شاهد وقوع سیلاب‌های متعددی بوده که علاوه بر خسارات جانی و مالی، زیرساخت‌های محلی نظیر جاده‌ها و پل‌ها را نیز تخریب کرده است. بارزترین سیلاب‌ها در فصل بهار و اوایل تابستان، در اثر ذوب برف‌ها یا بارش‌های فصلی رخ داده‌اند. بارش‌های شدید و رگباری در برخی از سال‌های دهه ۱۳۷۰ و ۱۳۸۰ باعث وقوع سیلاب‌هایی شد که خسارات زیادی به اراضی کشاورزی و زیرساخت‌های منطقه وارد کرد. در سال‌های ۱۳۹۶ و ۱۳۹۸ نیز بارش‌های ناگهانی و شدید سبب وقوع سیلاب در برخی مناطق مختلف خراسان رضوی، از جمله داورزن شدند. همچنین در فروردین ۱۴۰۱ بارش‌های شدید بهاری منجر به جاری شدن سیلاب در داورزن گردید.



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه

Fig 1. Location of the study area

داده‌های مورد استفاده

جدول ۱ داده‌های مورد استفاده این تحقیق و منابع آنها را نشان می‌دهد.

جدول ۱. داده‌ها و منابع مورد استفاده این تحقیق

Table 1. Data and sources used in this study

منبع	لایه
مدل رقومی ارتفاع ۳۰ متری	توپوگرافی
مدل رقومی ارتفاع ۳۰ متری	شیب
مدل رقومی ارتفاع ۳۰ متری	جهت شیب
مدل رقومی ارتفاع ۳۰ متری	تراکم آبراهه
مدل رقومی ارتفاع ۳۰ متری	فاصله از آبراهه
نقشه خاک از سازمان نقشه‌برداری	نوع خاک
تصاویر سنتینل ۲	کاربری اراضی
نقشه ژئومورفولوژی از سازمان نقشه‌برداری	ژئومورفولوژی
نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ از سازمان نقشه‌برداری	زمین‌شناسی
مدل رقومی ارتفاع ۳۰ متری	توان جریان
مدل رقومی ارتفاع ۳۰ متری	انحنای پروفیل
مدل رقومی ارتفاع ۳۰ متری	انحنای پلن
مدل رقومی ارتفاع ۳۰ متری	شاخص رطوبت توپوگرافی
مدل رقومی ارتفاع ۳۰ متری	شاخص انحنای زمین
تصاویر سنتینل ۲	شاخص نرمال شده اختلاف پوشش گیاهی

روش اجرای پژوهش

این پژوهش یک تحقیق کاربردی است و در آن از روشهای کتابخانه‌ای، بازدیدهای میدانی و مدلسازی استفاده شده است. در این پژوهش فرایند تحقیق به سه بخش اصلی تقسیم می‌شود: تهیه داده‌ها، تعیین عوامل موثر در وقوع سیلاب منطقه و مدل‌سازی با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی. جزئیات هر بخش به شرح زیر است:

تهیه داده‌ها

• نقاط سیلابی و غیر سیلابی

جمع‌آوری داده‌های نمونه هنگام نقشه‌برداری خطر سیل برای ارزیابی عملکرد مجموعه‌های آزمایشی و آموزشی از اهمیت بالایی برخوردار است که تأثیر قابل توجهی بر کیفیت و قابلیت اطمینان نقشه خروجی دارد. در مطالعه حاضر، با توجه به سیل‌های اخیر رخ داده در منطقه مورد مطالعه، ۴۰۰ داده نمونه از تصاویر ماهواره‌ای با وضوح بالا و مشاهدات میدانی برای توسعه مدل RF جمع‌آوری شد. این نمونه‌ها از مناطق سیل زده و مناطق غیر سیلابی گرفته شده است. متغیر خروجی دارای دو برچسب است: مناطق غیرسیل‌گیر (۰) و مناطق سیل‌گیر (۱). در واقع، ۴۰۰ داده نمونه به طور مساوی از منطقه انتخاب شدند. از کل داده‌های نمونه، ۷۰ و ۳۰ درصد از داده‌های نمونه به ترتیب برای مراحل آموزشی و تست در نظر گرفته شد.

• استخراج عوامل موثر و محاسبه شاخص‌ها

در ابتدا عوامل موثر در وقوع سیلاب منطقه با بررسی منابع مختلف و مطالعات میدانی انتخاب شدند و سپس لایه‌های مربوط به آنها تهیه شد. این عوامل و روش محاسبه آنها به شرح زیر است:

ارتفاع: ارتفاع یکی از مهمترین عوامل موثر بر وقوع سیل است. ارتفاع و شیب متغیرهای توپوگرافی هستند که اغلب برای

مدل‌سازی خطر سیل استفاده می‌شوند (Lee et al., 2017; Tehrany et al., 2019; Bui et al., 2019; Darabi et al., 2019; Hosseini et al., 2020; Patwardhan, 2004; Rad et al., 2014;). مناطق کم ارتفاع معمولاً به عنوان مسیرهای زهکشی طبیعی عمل می‌کنند و آنها را در برابر سیل و ریزش در هنگام بارندگی مستعدتر می‌کند. به طور کلی بین سیل‌گیری و ارتفاع رابطه معکوس وجود دارد. فرکانس سیل با کاهش ارتفاع افزایش می‌یابد و در نتیجه ارتفاعات پایین‌تر مستعد سیل هستند (Tehrany et al., 2014). ارتفاع منطقه بر اساس مدل رقومی ارتفاع بین ۷۸۰ متر تا ۲۹۴۸ متر از سطح دریا متغیر است. بیشترین ارتفاع منطقه در شمال و کمترین ارتفاع نیز در جنوب منطقه واقع شده است. بیشتر منطقه در ارتفاع بین ۷۸۰ تا ۱۰۰۹ متر از سطح دریا واقع شده است. در منطقه مورد مطالعه همانطور که ذکر شد ارتفاعات بالا دارای ریسک کمتری برای سیل‌گیری می‌باشد، اما مناطق پایین دست و هموار منطقه که بخش بزرگی از منطق را تشکیل داده دارای ریسک زیادی برای وقوع سیلاب می‌باشد (شکل ۲ الف)).

شیب: سیل به طور مستقیم با شیب منطقه ارتباط دارد و یک ویژگی فیزیوگرافی مهم است. شیب مستقیماً به سرعت رواناب سطحی و نفوذ عمودی کمک می‌کند و در نتیجه بر حساسیت سیل تأثیر می‌گذارد (Bui et al., 2020). این شاخص میزان تغییرات توپوگرافی را نشان می‌دهد. مناطق کوهستانی به طور کلی دارای شیب‌های شدید هستند که مانع از جمع‌آوری آب می‌شوند، در حالی که مناطق پست یا هموار دارای شیب ملایمی هستند که منعکس کننده خطر سیل‌گیری است. با توجه به مکانیسم‌های آب و جریان آن در مناطق با شیب تند و ملایم بودن آن در مناطق هموار، این شاخص نقش بسزایی در پایش سیلاب‌ها ایفا می‌کند. برای منطقه مورد مطالعه مقادیر شیب بین ۰ تا ۶۷ درصد می‌باشد. در نقشه شیب همانطور که در شکل ۲ (ب) مشاهده می‌گردد، بیشتر منطقه دارای شیب کمتر از ۲۰ درصد هستند. همانند ارتفاع بیشترین مقدار شیب در شمال و کمترین مقدار آن نیز در جنوب منطقه مواقع شده است.

بارش: بارندگی به‌عنوان یک عامل مهم در وقوع سیلاب است، زیرا سیل‌ها اغلب توسط طوفان‌های شدید و کوتاه و باران‌های رگباری ایجاد می‌شوند. بین بارندگی و وقوع سیلاب رابطه قوی وجود دارد به این معنی زمانی که بارندگی شدید و زیادی رخ می‌دهد باعث ایجاد سیلاب در یک منطقه می‌شود (Rahmati et al., 2017). شکل ۲ (ج) بارش سطح منطقه را نشان می‌دهد، این نقشه با استفاده از یک سری زمانی از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲ رسم شده است. طبق این نقشه بارش منطقه سالانه میانگین بین ۵۰ تا ۳۲۲ میلی‌متر متغیر بوده است. بیشترین میزان بارش در مرکز و جنوب منطقه مورد مطالعه رخ داده است.

جهت شیب: جهت شیب به عنوان جهت حداکثر شیب سطح زمین تعریف می‌شود که در اکثر مطالعات سیلاب به عنوان یک پارامتر مهم حساسیت به سیل در نظر گرفته شده است. این شاخص همچنین مشتقی از مدل رقومی ارتفاع است که جهت پیکسل‌ها را در واحد درجه تعیین می‌کند و منجر به تصمیم‌گیری‌های دقیق‌تری در نقشه‌برداری خطر سیل می‌شود (Taha et al., 2017). شکل ۲ (د) جهت شیب را برای شهرستان داورزن نشان می‌دهد. برطبق این نقشه بیشتر وسعت منطقه دارای جهت جنوب و جنوب غرب می‌باشد.

فاصله از رودخانه و تراکم رودخانه: نزدیکی به رودخانه‌ها از مهمترین عوامل موثر بر آسیب‌پذیری ناشی از سیلاب‌ها است چرا که در فصول پربارش، با طغیان رودخانه‌ها جریان‌های آب جاری شده، پهنه‌های آغازین وقوع سیلاب‌ها هستند. تراکم رودخانه طول کانالها را در واحد سطح اندازه‌گیری می‌نماید. در شکل‌های ۲ (ه) و ۲ (و) فاصله و تراکم رودخانه را نشان می‌دهد.

جنس خاک: یکی دیگر از عواملی که می‌تواند در سیل و رخداد آن تأثیر گذار باشد، انواع خاک‌ها می‌باشد. نوع خاک‌ها می‌تواند با توجه به نفوذپذیری در رخداد سیلاب اثر گذار باشند. شکل ۲ (ز) خاک‌های مختلف منطقه را نشان می‌دهد.

کاربری اراضی: برای تهیه نقشه کاربری اراضی از روش طبقه‌بندی حداکثر احتمال استفاده شد. از میان روش‌های طبقه‌بندی نظارت شده، روش حداکثر احتمال تاکنون به عنوان دقیق‌ترین و پراستفاده‌ترین روش‌ها شناخته شده است (شمسی‌پور و

همکاران، ۱۳۸۸). در این روش، طبقه‌بندی براساس واریانس و کوواریانس انجام می‌شود. در روش مذکور فرض بر این است که همه مناطق آموزشی دارای پراکنش نرمال هستند. در حقیقت نمونه‌های کلاس‌های آموزشی باید معرف آن کلاس باشند، بنابراین تا حد امکان باید از تعداد نمونه‌های بیشتری استفاده شود تا تغییرات بسیاری از ویژگی‌های طیفی در این گستره پیوسته قرار گیرد. در طبقه‌بندی حداکثر احتمال، پیکسل موردنظر به کلاسی نسبت داده می‌شود که بیشترین احتمال تعلق پیکسل به آن کلاس وجود دارد.

کاربری اراضی نقش بسزایی در سرعت رواناب، رهگیری، نفوذ و انتقال تبخیر دارد. نقشه کاربری اراضی برای تعیین مناطق مستعد سیل ضروری است (Campolo et al., 1999). وقوع سیل در مناطق با ویژگی‌های متفاوت عملکرد متفاوتی را نشان می‌دهد. به عنوان مثال، مکانیسم سیل در مناطق شهری، مناطق دارای پوشش گیاهی و مناطقی با بافت خاک و سنگ بسیار متفاوت است. بنابراین، هر یک از ویژگی‌ها نقش مهمی در نقشه‌برداری خطر سیل خواهد داشت.

در مطالعه حاضر، منطقه مورد مطالعه دارای کاربری‌های متفاوتی از جمله، آب، زمین‌های زارعی، مرتع و غیره می‌باشد. همانطور که در شکل ۲ (ح) مشاهده می‌شود، بیشتر منطقه را مرتع و بعد از آن اراضی بایر و مناطق کوهستانی تشکیل داده‌اند. طبق این نقشه فقط درصد کمی از غرب و مرکز منطقه دارای پوشش گیاهی متراکم شامل مناطق جنگلی و باغات می‌باشد.

زمین‌شناسی: وضعیت زمین‌شناسی به دلیل تأثیر مستقیم بر میزان نفوذپذیری و رواناب سطحی، یکی از عوامل مهم در پدیده سیل حوضه‌های آبخیز است. سنگ‌شناسی تأثیر قابل توجهی بر فرآیندهای هیدرولوژیکی در یک حوضه آبخیز دارد زیرا واحدهای سنگ‌شناسی مختلف حساسیت‌های متفاوتی نسبت به سیل دارند (Firoozishahmirzadi et al., 2021; Tehrany et al., 2013). شکل ۲ (ط) وضعیت زمین‌شناسی منطقه را نشان می‌دهد.

ژئومورفولوژی: همانطور که در شکل ۲ (ی) مشاهده می‌گردد شمال منطقه مناطق کوهستانی و جنوب منطقه هم منطقه پلایا می‌باشد که در آن فرورفتگی‌های چاله مانند وسیع بر روی زمین سبب جمع شدن روان آب‌های فصلی می‌شود. این فاکتور نقش مهمی در ویژگی‌های سیلگیری منطقه دارد.

شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی (NDVI): شاخص‌های گیاهی تبدیلات محاسباتی هستند که براساس رفتار طیفی گیاهان تعریف می‌شوند و برای بررسی و ارزیابی گیاهان در مشاهدات ماهواره‌ای چند طیفی طراحی شده‌اند (Huang, 2021). بیشترین باندهایی که در محاسبات شاخص‌های گیاهی مورد استفاده قرار می‌گیرد در محدوده باندهای قرمز و مادون قرمز نزدیک هستند. دلیل این امر خاصیت جذب نور قرمز توسط رنگدانه‌های موجود در کرووفیل (که باعث می‌شود گیاهان انعکاس کمتری در این باند داشته باشند) و انعکاس شدید در بخش مادون قرمز طیف الکترومغناطیس است.

در رابطه ۱ نحوه محاسبه شاخص پوشش گیاهی مورد استفاده در این تحقیق آورده شده است.

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad \text{رابطه ۱}$$

NIR: باند مادون قرمز نزدیک، R: باند قرمز.

مقدار شاخص NDVI بین منفی یک و یک متغیر است. برای مثال، وقتی مقادیر منفی وجود دارد، به احتمال زیاد آب و یخ در منطقه وجود دارد. از طرف دیگر، اگر مقدار پوشش گیاهی نزدیک به ۱ باشد، احتمال اینکه برگ‌های سبز متراکم باشد، زیاد است. اما وقتی پوشش گیاهی نزدیک به صفر است، احتمالاً هیچ برگ سبزی وجود ندارد و حتی می‌تواند یک منطقه شهری باشد. همانطور که در شکل ۲ (ک) مشخص است، در شمال منطقه کمترین میزان پوشش گیاهی و بیشترین پوشش گیاهی نیز در مرکز و متمایل به جنوب منطقه وجود دارد.

شاخص توان آبراهه^۱: این شاخص فرسایش جریان بالقوه را در یک نقطه معین از سطح توپوگرافی توصیف می‌کند. با افزایش ارتفاع حوضه آبریز و شیب، مقدار آب حاصل از نواحی شیب‌دار و سرعت جریان آب افزایش می‌یابد. بنابراین شاخص توان جریان و خطر فرسایش افزایش می‌یابد (Florinsky, 2016). شکل ۲ (ل) توان آبراهه را برای منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد. طبق این نقشه بیشترین توان آبراهه در شمال منطقه وجود دارد.

این شاخص نسبت بین مساحت بالادست یک نقطه و شیب زمین در بالادست آن را به گونه‌های نشان می‌دهد که نیمرخ عرضی و نیمرخ طولی آبراهه را منعکس می‌کند. شاخص مذکور از طریق توابع موجود در سیستم اطلاعات جغرافیایی طبق رابطه ۲ محاسبه می‌شود.

$$SPI = A_s \tan \beta \quad \text{رابطه ۲}$$

A_s مساحت حوضه آبخیز بالادست و β : گرادیان شیب بر حسب درجه است.

شاخص رطوبت توپوگرافی^۲: این شاخص ترکیب پستی و بلندی بوده که نسبت بین شیب‌ها را در حوضه به نمایش می‌گذارد و به شاخص خیزی نیز معروف است (شکل ۲ م). این پارامتر نشان‌دهنده تغییرات مکانی رطوبت در یک حوضه است. به عبارت دیگر، این شاخص میزان تجمع آب را در هر اندازه پیکسلی از حوضه نشان می‌دهد. شاخص رطوبت توپوگرافی در ارتباط نزدیک با شیب و بالادست است و به ازای هر واحد عرض، مساحتی را ایجاد می‌کند که همسو با جهت جریان است (Taha et al., 2017). شاخص مذکور با استفاده از مدل رقومی ارتفاع طبق رابطه ۳ و در نرم افزار GIS-SAGA محاسبه می‌شود.

$$TWI = \ln(A_s / \tan(\beta)) \quad \text{رابطه ۳}$$

A_s مساحت حوضه آبخیز و β : گرادیان شیب بر حسب درجه است.

زبری زمین^۳: ناهمواری زمین تعریف‌های مختلفی مثل ناهمواری توپوگرافی، شکستگی، یا صخره‌ای و شیب دار بودن دارد. به طور کلی خصوصیات قوس ژئومتری سطح، پارامترهای زبری سطح نامیده می‌شود. نمایش گرافیکی شاخص ناهمواری زمین با محاسبه اختلاف ارتفاع یک پیکسل با هشت اطراف خود و ناهمواری سطح زمین LSRI با استفاده از چگالی خطوط کانتور در یک منطقه نشان داده شده است. شکل ۲ (ن) شاخص زبری را برای منطقه نشان می‌دهد. شاخص زبری زمین با استفاده از DEM و از طریق رابطه ۴ محاسبه می‌شود.

$$TRT = \sqrt{\sum_{p=1}^8 ZMd} \quad \text{رابطه ۴}$$

P تعداد پیکسل اطراف و ZMd میانگین تفاضل ۸ پیکسل اطراف هر پیکسل می‌باشد.

انحنا، پلن و پروفیل: انحنا به‌عنوان یکی دیگر از پارامترهای تأثیرگذار تعیین شد و از نقشه مدل رقومی ارتفاع در SAGA GIS استخراج شد. انحنا به سه دسته تقسیم شده است: سطح مقعر، محدب و صاف و عامل مهمی در جریان رواناب است و می‌تواند در تشخیص حساسیت به سیل مفید باشد (Termeh et al., 2018). شاخص انحنا پلن و پروفیل این دو شاخص، شکل یا انحنا شیب زمین را نشان می‌دهند، که بخشی از سطح زمین می‌تواند محدب یا مقعر باشد. خروجی انحنا می‌تواند برای توصیف ویژگی‌های فیزیکی یک حوضه زهکشی یا درک فرآیندهای فرسایش و رواناب استفاده شود. از مقدار انحنا می‌توان برای برآورد فرسایش خاک یا توزیع آب در خشکی استفاده کرد. انحنا پروفیل بیانگر محدب یا مقعر بودن سطح در راستای شیب است و بر شتاب و کاهش جریان تأثیر دارد و همچنین باعث تأثیر بر فرسایش و رسوب نیز می‌شود.

$$Info(S) = -\sum_{i=1}^2 \frac{n(L_i, S)}{|S|} \log_2 \frac{n(L_i, S)}{|S|} \quad (\text{رابطه ۵})$$

با توجه به عوامل موثر بر وقوع سیلاب مقدار اطلاعات مورد نیاز برای تقسیم S به مجموعه‌های S_1, S_2, S_n از رابطه ۶ برآورد شد:

$$Info(S, A) = \sum_{j=1}^m \frac{S_j}{|S|} Info(S) \quad (\text{رابطه ۶})$$

شاخص IGR برای تاثیر عوامل از رابطه ۷ برآورد می‌شود:

$$Information\ Gain\ Ratio(S, A) = \frac{Info(S) - Info(S, A)}{SplitInfo(S, A)} \quad (\text{رابطه ۷})$$

در رابطه ۸ $SplitInfo$ نشان دهنده اطلاعات تولید شده توسط تقسیم S داده‌های آموزشی m زیر مجموعه $SplitInfo$ است.

$$SplitInfo(S, A) = -\sum_{j=1}^m \frac{S_j}{|S|} \log_2 \frac{|S_j|}{|S|} \quad (\text{رابطه ۸})$$

مدل‌سازی

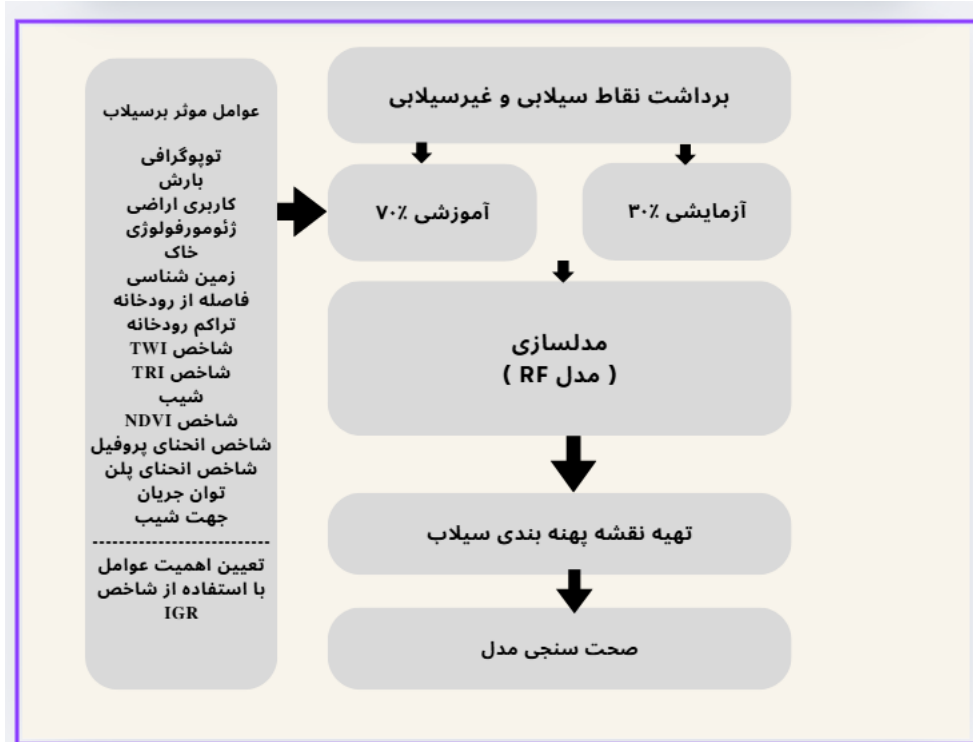
الگوریتم جنگل تصادفی^۱

مدل جنگل تصادفی برای بسیاری از مجموعه داده‌ها، دسته‌بندی را با سرعت بالایی انجام می‌دهد. این الگوریتم از جمله دسته بندی‌هایی است که روش Bagging را به کار می‌گیرد. این روش ترکیبی از چند درخت تصمیم است که در ساخت آن چندین نمونه بوت استرپ از داده‌ها شرکت دارند در ساخت هر درخت به طور تصادفی تعدادی از متغیرهای ورودی شرکت می‌کنند. با استفاده از روش بوت استرپ تعداد زیادی نمونه n تایی از مجموعه داده‌های مشاهداتی اولیه، نمونه‌برداری می‌شوند. هدف از اجرای بوت استرپ پیدا کردن خطای واریانس برآوردگر با استفاده از تکرار مراحل نمونه‌گیری و برآورد یابی است. در طی فرآیند ساخت درخت در هر شاخه، از بین تمام M متغیر مستقل به صورت تصادفی m متغیر برای تقسیم شدن انتخاب می‌شوند.

برای حالت رگرسیونی نسبت $\frac{m}{M}$ برابر با یک سوم است و برای کلاس بندی برابر با $m = \sqrt{M}$ پیشنهاد شده است. پس از ساخت تمام درخت‌ها داده‌های تست به تعداد درخت‌ها برای بردار ورودی به درخت معرفی شده و یک خروجی به دست می‌آید. با میانگین‌گیری این خروجی‌ها، خروجی نهایی مدل و با در نظر گرفتن توزیع تجربی خروجی‌ها مقادیر صدکها و دامنه عدم قطعیت محاسبه می‌شود (پهلوان و همکاران، ۲۰۱۴).

مزایای جنگل تصادفی

- مقاومت در برابر بیش‌برازش، به خصوص در مجموعه داده‌های بزرگ.
 - توانایی مدیریت متغیرهای متعدد و پیچیدگی بالا.
 - ارائه مقادیر عدم قطعیت در پیش‌بینی‌ها
- فلوچارت پژوهش (شکل ۳) مسیر گام‌به‌گام پژوهش را به صورت گرافیکی نشان می‌دهد.



شکل ۳. فلوجارت روش شناسی

Fig 3. Methodology flowchart

نتایج

درجه اهمیت عوامل موثر در سیلاب

برای تعیین میزان اهمیت هر کدام از عوامل از شاخص IGR استفاده شد. جدول ۲ نتایج شاخص را نشان می‌دهد. همانطور که در جدول مشاهده می‌شود اثر جهت شیب در وقوع سیلاب در منطقه مورد مطالعه صفر بوده که به همین دلیل از مدل‌سازی حذف گردید.

جدول ۲. میزان اهمیت عوامل موثر

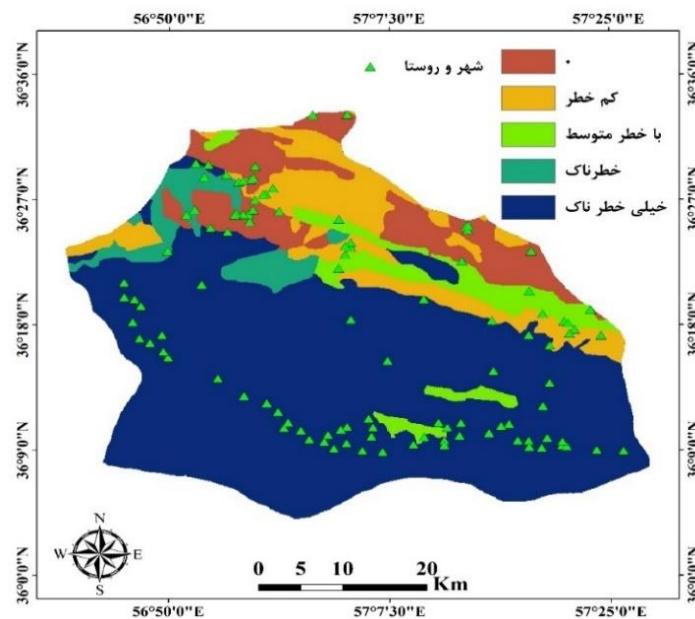
Table 2. The importance of influencing factors

ردیف	شاخص	درجه اهمیت
۱	ارتفاع	۰/۷۷
۲	بارش	۰/۶۸
۳	کاربری اراضی	۰/۶۱
۴	ژئومورفولوژی	۰/۵۵
۵	خاک	۰/۵۱
۶	زمین شناسی	۰/۵۰
۷	فاصله از رودخانه	۰/۴۹
۸	تراکم رودخانه	۰/۴۲
۹	شاخص TWI	۰/۳۴
۱۰	شاخص TRI	۰/۳۱

۰/۲۸	شیب	۱۱
۰/۱۷	شاخص NDVI	۱۲
۰/۱۰	شاخص انحنای پروفیل	۱۳
۰/۰۸	شاخص انحنای پلن	۱۴
۰/۰۳	توان جریان	۱۵
۰	جهت شیب	۱۶

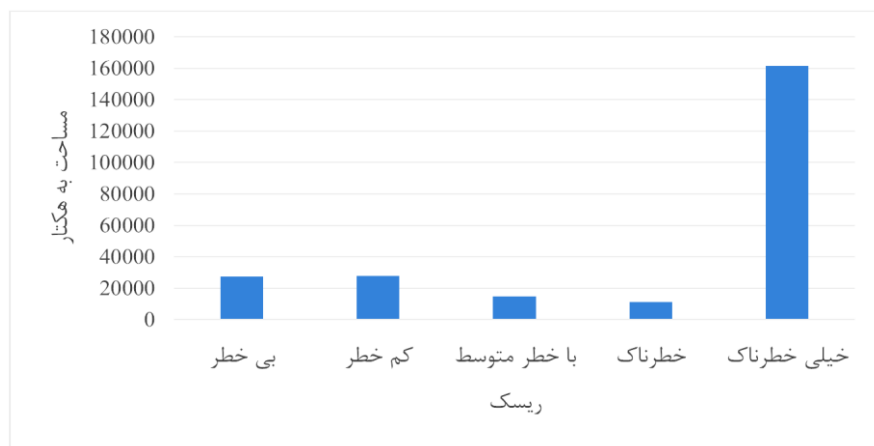
نتایج مدل‌سازی

پس از انتخاب عوامل موثر و حذف فاکتوری که در سیلاب منطقه نقش نداشت داده‌ها وارد مدل شدند و پس از آموزش مدل با نقاط سیلابی و غیرسیلابی خروجی مدل تهیه شد. خروجی‌های مدل با استفاده از شاخص‌های صحت سنجی مورد بررسی قرار گرفتند و سپس مدل آموزش داده شده بر روی داده‌های کل منطقه اجرا گردید. خروجی مدل به نرم افزار ArcMap منتقل گردید و نقشه پهنه بندی وقوع سیلاب منطقه تهیه شد (شکل ۴). با کمک روش طبقه‌بندی در نرم‌افزار ArcMap 10.8 پنج کلاس خطر برای نقشه پهنه بندی احتمال سیل اختصاص داده شد (شکل ۵): بی‌خطر (۰)، کم‌خطر (۰/۴-۰)، با خطر متوسط (۰/۴-۰/۶)، پرخطر (۰/۶-۰/۸)، بسیار پرخطر (۰/۸-۱/۰).



شکل ۴. نقشه پهنه بندی خطر سیلاب توسط مدل RF

Fig 4. Flood risk zonation map using RF model



شکل ۵. درصد اراضی با ریسک کم تا زیاد سیلاب در مدل RF

Fig 5. Percentage of lands with low to high flood risk in the RF model

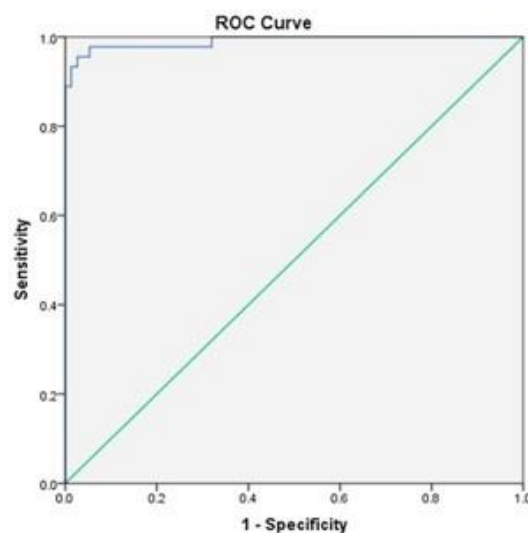
ارزیابی عملکرد مدل RF

در این مطالعه، عملکرد مدل RF با استفاده از معیارهای مختلف مانند RMSE، MAE، OA، و ROC-AUC مورد ارزیابی قرار گرفت. همانطور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، طبق این نتایج خروجی و نتایج دارای دقت خوبی بود است، همانطور که مشاهده می‌شود ضریب کاپا ۰/۹۶ و خطای مربعات ۰/۱۱ بوده است. همچنین سطح زیر منحنی ROC ۰/۹۹ می‌باشد که همگی این نتایج حاکی از دقت خوب خروجی کار است.

جدول ۳. دقت پیش‌بینی و عملکرد مدل RF

Table 3. Performance and prediction accuracy of the RF algorithm

مقدار	شاخص ارزیابی
۰/۹۶	kappa
۰/۰۵	MAE
۰/۱۱	RMSE
۰/۹۹	ROC Area



شکل ۶. منحنی ROC برای مدل RF

Fig 6. Roc curve for RF model

بحث

نتایج این پژوهش نشان داد که عوامل توپوگرافی، بارش و کاربری اراضی بیشترین تأثیر را در وقوع سیلاب دارند. توپوگرافی، به دلیل نقش آن در سرعت جریان و تجمع رواناب، تأثیر قابل‌توجهی بر توزیع سیلاب داشته و بارش به‌عنوان عامل کلیدی تولید رواناب، ارتباط مستقیمی با وقوع سیلاب دارد. همچنین، کاربری اراضی با تأثیر بر میزان نفوذپذیری خاک و هدایت رواناب، نقش تعیین‌کننده‌ای در سیل‌خیزی منطقه ایفا می‌کند. در مقابل، عواملی مانند جهت شیب به دلیل تأثیر کمتر، از فرآیند مدل‌سازی حذف شدند.

بر اساس شکل ۴، خطرناک‌ترین مناطق در جنوب شبکه آبراه و در نواحی کم‌ارتفاع با جهت شرقی به غربی قرار دارند. همچنین، تعدادی از نقاط جمعیتی در این مناطق پرخطر واقع شده‌اند. نقشه‌های پهنه‌بندی نشان دادند که مناطق نزدیک به رودخانه، با ارتفاع کم و پوشش گیاهی محدود، بیشترین خطر سیلاب و آب‌گرفتگی را دارند. در مقابل، مناطقی با پوشش گیاهی متراکم، بارش کم، ارتفاع زیاد، شیب ملایم و خاک با نفوذپذیری بالا، کمترین خطر سیلاب را نشان می‌دهند.

در منطقه مورد مطالعه، نواحی جنوب و مرکز با ارتفاع کم، شیب ملایم تا متوسط، پوشش گیاهی کم و خاکی با تراوایی پایین، بیشترین تأثیر در وقوع سیلاب را داشته‌اند. طبق تحلیل‌ها و شکل ۵، حدود ۶۷ درصد از منطقه مورد مطالعه در معرض خطر بسیار بالا، ۵ درصد در معرض خطر بالا، ۶ درصد در معرض خطر متوسط، ۱۱ درصد در معرض خطر کمتر و ۱۱ درصد در معرض کمترین خطر قرار دارد. حدود ۵۰ درصد از مناطق مسکونی در مناطق پرخطر واقع شده‌اند، که در صورت وقوع سیلاب می‌تواند منجر به خسارات جانی و مالی قابل‌توجهی شود. نتایج همچنین مشخص کرد روستاهای همچون بهانگر، باقرآباد، اسدآباد، رفعت‌آباد، علی‌آباد و جلال‌آباد و غیره در معرض خطر زیاد سیل هستند. با توجه به نتایج تحقیق مبنی بر این که در منطقه پوشش گیاهی مناسبی وجود ندارد بهتر است پوشش گیاهی طبیعی منطقه احیا شود. همچنین از ساخت و سازها در حریم و اطراف رودخانه‌ها جلوگیری شود.

مدل جنگل تصادفی، با توانایی تحلیل داده‌های پیچیده و چندمتغیره، عملکرد مؤثری در شناسایی عوامل کلیدی و پهنه‌بندی مناطق پرخطر با دقت بالا از خود نشان داد. علاوه بر این، استفاده از شاخص IGR به‌عنوان ابزار انتخاب ویژگی، باعث حذف عوامل کم‌اهمیت و بهبود دقت مدل گردید. یافته‌های این تحقیق با مطالعات پیشین نظیر سعیدی و آسیایی (۱۳۹۹) و اسفندیاری (۱۳۹۶)، که تأثیر شیب و بارش در وقوع سیلاب را تأیید کرده‌اند و نیز Liao et al (2023) همخوانی دارد.

در مقایسه با روش‌های سنتی، بهره‌گیری از تکنیک‌های یادگیری ماشین مانند جنگل تصادفی امکان تحلیل غیرخطی و پیچیده‌تر داده‌ها را فراهم کرده و دقت نقشه‌های پهنه‌بندی خطر سیلاب را افزایش داده است. به‌ویژه در مناطقی با ویژگی‌های متنوع توپوگرافی و اقلیمی نظیر داورزن، این مدل توانست ترکیب بهینه‌ای از عوامل مکانی و محیطی را مورد تحلیل قرار دهد. این نتایج نشان می‌دهد که با استفاده از روش‌های ارائه‌شده، می‌توان در زمان کوتاه‌تری مناطق مناسب و نامناسب برای ساخت‌وساز را شناسایی کرده و اقدامات پیشگیرانه مؤثری را طراحی کرد.

نتیجه‌گیری

بلاياي طبيعي مانند زمین‌لغزش، زلزله، و سیلاب هر ساله خسارات قابل‌توجه جانی و مالی در سراسر جهان ایجاد می‌کنند، که در این میان، سیلاب به‌عنوان یکی از مخرب‌ترین این پدیده‌ها شناخته می‌شود. وقوع سیل، با شدت و مدت‌های متغیر در فصول مختلف، آسیب‌های جدی به محیط‌زیست، زیرساخت‌ها، اقتصاد، کشاورزی و زندگی مردم وارد می‌کند. از این‌رو، شناسایی مناطق حساس به وقوع سیلاب برای مدیریت و کاهش خسارات آن امری ضروری است.

این پژوهش با هدف پهنه‌بندی خطر سیلاب در منطقه داورزن و شناسایی عوامل مؤثر بر وقوع سیلاب، با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی و ابزار GIS انجام شد. یافته‌ها نشان داد که تحلیل داده‌های مکانی و استفاده از مدل‌های پیشرفته یادگیری

ماشین، ارزیابی دقیق‌تری از خطر سیلاب فراهم می‌کند و ابزارهای مؤثرتری برای مدیریت این مخاطره طبیعی ارائه می‌دهد.

نتایج این پژوهش بر ضرورت پهنه‌بندی خطر سیلاب به‌عنوان گامی مهم در مدیریت مؤثر مخاطرات طبیعی تأکید دارد. مدل جنگل تصادفی به‌عنوان یک ابزار کارآمد، امکان پیش‌بینی خطر سیلاب و اولویت‌بندی مناطق پرخطر را فراهم کرد. نقشه‌های پهنه‌بندی تولیدشده می‌توانند به تصمیم‌گیران و مدیران محلی در اتخاذ اقدامات مؤثرتری برای کاهش خطر سیلاب کمک کنند. این اقدامات شامل تقویت پوشش گیاهی، مدیریت تراکم آبراهه‌ها، بهینه‌سازی کاربری اراضی، و اصلاح زیرساخت‌ها می‌شود.

علاوه بر این، پژوهش حاضر نشان داد که تحلیل داده‌های مکانی در محیط GIS، با کاهش زمان و هزینه، دقت تصمیم‌گیری را بهبود می‌بخشد. با این حال، محدودیت‌هایی نظیر کمبود داده‌های دقیق و زمان‌بر بودن پردازش داده‌ها باید مدنظر قرار گیرد. در پژوهش‌های آتی، ترکیب داده‌های ماهواره‌ای با داده‌های هیدرولوژیکی می‌تواند دقت و جامعیت نتایج را افزایش دهد. همچنین استفاده از مدل‌های پیشرفته‌تر نظیر شبکه‌های عصبی عمیق یا مدل‌های ترکیبی می‌تواند چشم‌اندازهای جدیدی برای مدیریت و کاهش خطرات سیلاب ارائه دهد.

برای کاهش خطر سیلاب در منطقه داورزن، می‌توان از راهکارهایی نظیر افزایش پوشش گیاهی از طریق توسعه جنگل‌کاری و حفاظت از مراتع بهره برد. این اقدام می‌تواند با کاهش سرعت رواناب و افزایش نفوذپذیری خاک، نقش مؤثری در کاهش خطر سیلاب ایفا کند. مدیریت کاربری اراضی نیز یکی دیگر از راهکارهای مهم است که با اصلاح برنامه‌ریزی‌ها، می‌توان ساخت‌وساز در مناطق پرخطر را محدود کرد و نفوذپذیری خاک را بهبود بخشید. بهبود زیرساخت‌ها از جمله ساخت و تقویت سدها، بندهای تأخیری، و کانال‌های هدایت رواناب نیز به‌عنوان راهکارهای عملی، در کنترل و مدیریت سیلاب نقش بسزایی دارد.

علاوه بر این، آموزش و آگاهی‌رسانی عمومی به جامعه محلی درباره خطرات سیلاب و اقدامات پیشگیرانه، به ارتقای آمادگی عمومی و کاهش آسیب‌پذیری مناطق مسکونی کمک می‌کند. اجرای این اقدامات به‌صورت هم‌زمان و هماهنگ می‌تواند به کاهش خطرات سیلاب و ارتقای پایداری زیست‌محیطی و اقتصادی منطقه کمک کند. در نهایت، این پژوهش بر اهمیت رویکرد پیشگیرانه در مدیریت بحران تأکید کرده و می‌تواند به‌عنوان مبنایی برای توسعه پایدار در منطقه داورزن و سایر مناطق مشابه مورد استفاده قرار گیرد.

References

- Bostani, Alireza and Javani, Khadijah, (2013). *investigation and recognition of natural hazards (earthquakes and floods) and their effects on the vulnerability of villages (a case study of villages in Darab city)*. P.1800-1811. the second international conference on environmental hazards, Tehran, (In Persian).
- Bui, D. T., Hoang, N. D., Martínez-Álvarez, F., Ngo, P. T. T., Hoa, P. V., Pham, T. D., ... & Costache, R. (2020). A novel deep learning neural network approach for predicting flash flood susceptibility: A case study at a high frequency tropical storm area. *Science of the Total Environment*, 701, 134413. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134413>.
- Bui, D. T., Ngo, P. T. T., Pham, T. D., Jaafari, A., Minh, N. Q., Hoa, P. V., & Samui, P. (2019). A novel hybrid approach based on a swarm intelligence optimized extreme learning machine for flash flood susceptibility mapping. *Catena*, 179, 184-196. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.04.009>.
- Campolo, M., Andreussi, P., & Soldati, A. (1999). River flood forecasting with a neural network model. *Water resources research*, 35(4), 1191-1197. <https://doi.org/10.1029/1998WR900086>.
- Chen, W.; Zhai, G.; Fan, C.; Jin, W. and Xie, Y., (2017), A planning framework based on system Theory and GIS for urban emergency shelter system: a case of Guangzhou, China, Human and Ecological Risk Assessment, *An International Journal*, 23(3), 1-16. - <https://doi.org/10.1080/10807039.2016.1185692>.
- Choubin, B., Khalighi-Sigaroodi, S., Malekian, A., & Kişi, Ö. (2016). Multiple linear regression,

- multi-layer perceptron network and adaptive neuro-fuzzy inference system for forecasting precipitation based on large-scale climate signals. *Hydrological sciences journal*, 61(6), 1001-1009. <https://doi.org/10.1080/02626667.2014.966721>.
- Darabi, H., Choubin, B., Rahmati, O., Haghghi, A. T., Pradhan, B., & Kløve, B. (2019). Urban flood risk mapping using the GARP and QUEST models: A comparative study of machine learning techniques. *Journal of hydrology*, 569, 142-154. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.12.002>.
- Esfandiari Darabad, Fariba, Rahimi, Massoud, and Pourmorteza, Gholamreza. (2018). Flood zoning of Ajarlo Chai catchment area using L-THIA method and fuzzy logic. *Quantitative Geomorphology Research*, 8(2), 155-171, (in Persian with English abstract).
- Firoozishahmirzadi, P., Rahimi, S., & Esmaeili Seraji, Z. (2021). Application of Machine Learning Models for flood risk assessment and producing map to identify flood prone areas: Literature Review. *International Journal of Data Envelopment Analysis*, 9(4), 43-88. <https://doi.org/10.30495/ijdea.2022.68987.1181>.
- Florinsky, I. (2016). *Digital terrain analysis in soil science and geology*. Academic Press.
- Green, C., Diepernk, G., EK, K., Hegger, D., Pettersson, M., Priest, S., Tapsell, Ghafory, M., (2005). *Erthquak Risk management Strategies: the Iranian Experience*, Tehran UNESCO Office and International Institute of Erthquake Engineering and seismology (IIEFS). pp. 9-1.
- Hosseini, F. S., Choubin, B., Mosavi, A., Nabipour, N., Shamshirband, S., Darabi, H., & Haghghi, A. T. (2020). Flash-flood hazard assessment using ensembles and Bayesian-based machine learning models: Application of the simulated annealing feature selection method. *Science of the total environment*, 711, 135161. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135161>.
- Huang, Sha, et al. (2021). A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing. *Journal of Forestry Research*, 32(1), 1-6. - <https://doi.org/10.1007/s11676-020-01155-1>.
- Lee, S., Kim, J. C., Jung, H. S., Lee, M. J., & Lee, S. (2017). Spatial prediction of flood susceptibility using random-forest and boosted-tree models in Seoul metropolitan city, Korea. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 8(2), 1185-1203. <https://doi.org/10.1080/19475705.2017.1308971>.
- Liao, Y., Wang, Z., Lai, C., & Xu, C. Y. (2023). A Framework on Fast Mapping of Urban Flood Based on a Multi-Objective Random Forest Model. *International Journal of Disaster Risk Science*, 1-16. <https://doi.org/10.1007/s13753-023-00481-2>.
- Omidfarfar, Sajjad and Hosseini, Seyedah Laila and Fakhari, Zahra and Qanbari, Samaneh, (2021), *Zoning and flood risk assessment in Tabriz city using Fuzzy AHP model*. P.3425-3438. 2nd International Conference and 5th National Conference on Protection of Natural Resources and Environment Ardabil, (In Persian).
- Patwardhan, A., (2004). The methodology for assessing natural hazard impacts. *Global and planetary change*, (47), 265 253. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2004.10.015>.
- Rad, M. R. P., Toomanian, N., Khormali, F., Brungard, C. W., Komaki, C. B., & Bogaert, P. (2014). Updating soil survey maps using random forest and conditioned Latin hypercube sampling in the loess derived soils of northern Iran. *Geoderma*, 232, 97-106. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.04.036>.
- Rahmati, O., & Pourghasemi, H. R. (2017). Identification of critical flood prone areas in data-scarce and ungauged regions: a comparison of three data mining models. *Water resources management*, 31, 1473-1487. <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1589-6>.
- Saeedi, S., & Asiaei, M. (2021). Flood Risk Zoning in Sabzevar Using Fuzzy Logic. *Quarterly Journals of Urban and Regional Development Planning*, 5(15), 27-49, (In Persian). <https://doi.org/10.22054/urdp.2021.61580.1348>.

- Shamsipour, Ali Akbar, Alavi Panah, Seyyed Kazem, & Mohammadi, Hossein. (2010). Investigating the effectiveness of NOAA-AVHRR satellite's vegetation and thermal indices in drought analysis of Kashan region. *Iran Pasture and Desert Research*, 17 (3), 445-465. (in Persian with English abstract).
- Taha, M. M. N.; Elbarbary, S. M.; Naguib, D. M.; El-Shamy, I. Z. (2017). "Flash flood hazard zonation based on basin morphometry using remote sensing and GIS techniques: A case study of Wadi Qena basin, Eastern Desert, Egypt". *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. 8, 157-167. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2017.08.007>.
- Taherkhani, M., sojasi qeydari, H., & sadeghloo, T. (2012). Comparative Assessment of Ranking Methods for Natural Disasters in Rural Regions (Case Study: Zanjan Province). *Journal of Rural Research*, 2(7), 31-54. (In Persian with English abstract).
- Tehrany, M. S., Jones, S., & Shabani, F. (2019). Identifying the essential flood conditioning factors for flood prone area mapping using machine learning techniques. *Catena*, 175, 174-192. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.12.011>.
- Tehrany, M. S., Pradhan, B., & Jebur, M. N. (2013). Spatial prediction of flood susceptible areas using rule based decision tree (DT) and a novel ensemble bivariate and multivariate statistical models in GIS. *Journal of hydrology*, 504, 69-79. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.09.034>.
- Tehrany, M. S., Pradhan, B., & Jebur, M. N. (2014). Flood susceptibility mapping using a novel ensemble weights-of-evidence and support vector machine models in GIS. *Journal of hydrology*, 512, 332-343. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.03.008>.
- Termeh, S. V. R., Kornejady, A., Pourghasemi, H. R., & Keesstra, S. (2018). Flood susceptibility mapping using novel ensembles of adaptive neuro fuzzy inference system and metaheuristic algorithms. *Science of the Total Environment*, 615, 438-451. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.262>.
- Tierolf, L., de Moel, H., & van Vliet, J. (2021). Modeling urban development and its exposure to river flood risk in Southeast Asia. *Computers, Environment and Urban Systems*, 87, 101620. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2021.101620>.
- United Nations Climate (2015). *The human cost of weather-related disasters 1995- 2015*. pp119.