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

Journal of Natural Environmental Hazards, Vol.---, Issue ----, ----- -----

Assessing the flood potential of the Khiaochay watershed using the MFFPI model and spectral indices

Sayyad Asghari Saraskanrood[1*], Mahdi Frotan[2]

1. Corresponding Author, *Professor, Department of Physical Geography, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Iran* ***Email: s.asghari@uma.ac.ir ORCID:*** ***https://orcid.org/0000-0002-5015-904X***

2. *Ph.D. Student of Climatology, Department of Physical Geography, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran*

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received: ----------
Revised: ----------
Accepted: ----------

Keywords:
Flood, MFFPI, spectral indices, Khiawchay watershed.

ABSTRACT

Flash floods are important hazards in water resource and environmental management. This study aimed to identify flash flood-prone areas in the Khiaochay watershed and investigate the relationship between spectral indices and flood risk. In this regard, the MFFPI model was used as the main tool to determine flood-prone areas. The parameters used included slope, flow density, slope curvature, rock type, soil texture, and land use, which were extracted from sources such as digital elevation models (DEM), geological maps, and remote sensing data. After classification and weighting based on the modified version of the MFFPI model, these parameters were processed in a GIS environment, and a final flood hazard map was produced. To evaluate the model's performance, two floods recorded in 2020 were examined, and ROC analysis was performed to measure the accuracy of the model. In addition, the relationship between the spectral indices MNDWI, NDMI, AWEI, and LSM and the MFFPI values was examined using Spearman's correlation test. The results showed that the northern areas, parts of the center, and some southern areas of the basin have the highest risk of flooding. The evaluation of the parameters showed that factors such as low slope, high flow density, low-permeability clay soils, concave slopes, urban land use, and hard igneous rocks are effective in increasing runoff and flooding. The analysis of the spectral indices also showed that the LSM index has a positive and significant relationship with the MFFPI model and can be effectively used to identify flood-prone areas. The AUC values for the two floods studied were 0.73 and 0.72, respectively, which indicates the acceptable performance of the model in predicting flood risk.

آماده انتشار (پیش نمایه مجله)

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: 0000000000000000000

Publisher: University of Sistan and Baluchestan

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

EXTENDED ABSTRACT

INTRODUCTION

Flooding is a phenomenon that occurs owing to a sudden increase in river water volume or rapid water flow owing to heavy rainfall, causing extensive damage to the environment and infrastructure. Iran is particularly exposed to devastating floods in its northern regions, and factors such as heavy rainfall, improper watershed management, and inadequate flood-control infrastructure increase the severity of the damage. Various methods have been proposed for flood risk assessment, including numerical and data-driven models based on GIS and remote sensing (RS). This study used the modified MFFPI index and remote sensing spectral data analysis to identify vulnerable areas in the Khiaochay watershed.

DATA AND METHODOLOGY

In this study, the MFFPI model was used to simulate flash flood-prone areas in the Khiawchay watershed. Figure 1 shows the location of the Khiawchay watershed in Bhutan.

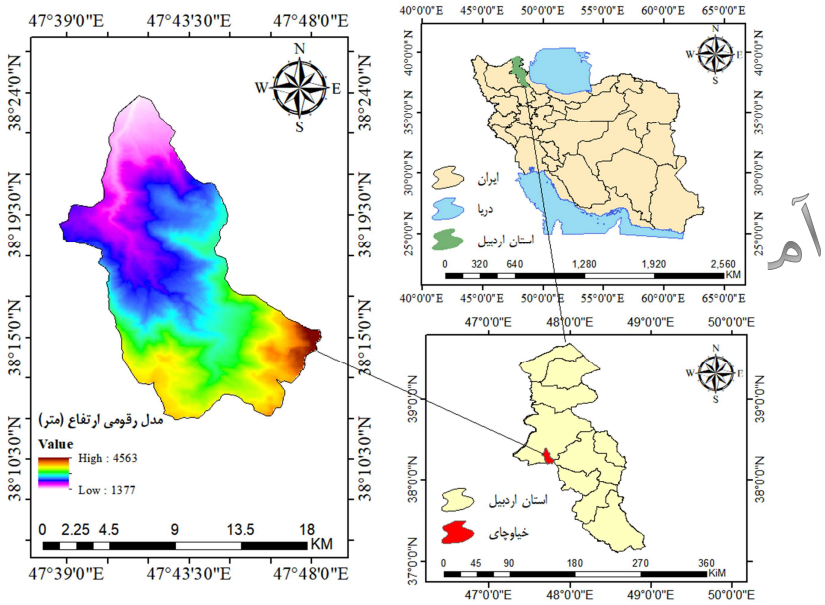


Figure 1: Location of the Khiawchay watershed in Ardabil province and Iran. Source: Authors

The key parameters of the MFFPI model, including slope, flow density, slope curvature, rock type, and land use, were extracted from various sources, such as DEM, geological maps, and remote sensing data, processed in a GIS environment, and weighted according to Table 1.

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

Table 1: How to score the parameters of the MFFPI model (Tincu et al., 2018).

Parameter	Parameter Weight	Class	Class Weight	Final Score
Slope (degrees)	3	10–60	1	3
		8–10	2	6
		6–8	3	9
		3–6	4	12
		0–3	5	15
Flow Density	2.5	0–1	1	2.5
		1–2	2	5
		2–3	3	7.5
		3–4	4	10
		4–5	5	12.5
Slope Curvature	2	(-49)–(-18)	1	2
		(-9)–(-0.5)	2	4
		(-0.5)–(0.5)	3	6
		0.5–1.5	4	8
		1.5–23	5	10
Soil Texture	1	Sand–Clay	1	1
		Sandy–Loamy–Clayey	2	2
		Various Textures	3	3
		Clay	4	4
		Clayey–Silty–Clayey Materials	5	5
Rock Permeability	1	Alluvial Deposits	1	1
		Sandstone, Conglomerate Formations	2	2
		Marly Formations	3	3
		Limestone Formations	4	4
		Igneous Rocks	5	5
Land Cover/Use	0.5	Forest	1	0.5
		Dense and Semi-Dense Pastures	2	1
		Agricultural Land	3	1.5
		Low-Density Pastures	4	2
		Water Surfaces	5	2.5

آماده انتشار (بدون شماره مجله)

The accuracy of the MFFPI model was evaluated using real flood data and an ROC curve. In addition, the relationships between the spectral indices MNDWI, NDMI, AWEI, LSM, and NDVI and the MFFPI model were investigated using the Spearman correlation test.

RESULTS AND DISCUSSION

This study investigated the factors affecting the occurrence of floods in the Khiaochay watershed using the MFFPI model. The findings show that the slope of the land plays a key role in the formation of runoff, such that low-slope areas are prone to runoff accumulation owing to their high water retention capacity, whereas in steep areas, the water flow becomes more intense. In addition, the density of flow in waterways significantly increased the volume of runoff, particularly in the northern parts of the basin, where the main waterways were concentrated. The results of the soil type study showed that clay soils with low permeability had the highest potential for flood production. In addition, the curvature of the slopes affects the runoff pattern, such that concave slopes are prone to water accumulation and increase the risk of flooding. Land cover and human activities also play an important role; urban areas and wastelands have the highest flood risk scores in the model owing to reduced infiltration. Finally, flood risk zoning showed that the northern areas and parts of the central and southern basins had the highest flood potential. Examining the accuracy of the model using the ROC curve showed that the model has a good ability to identify flood-prone areas.

CONCLUSION

The results of this study showed that flood risk in the Khiaochai watershed varies under the influence of factors such as land slope, flow density, soil type, land use, and geology. Low-slope areas with clay soils in the center and north of the basin had the highest runoff potential, whereas higher areas had a

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

lower risk owing to the high flow velocity. The spectral indices also confirmed the direct effects of soil moisture and vegetation on flood occurrence. The evaluation of the MFFPI model using the ROC curve showed that this model performed well in predicting flood-prone areas.

ETHICAL CONSIDERATIONS

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

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

REFERENCES

References [in Persian]

Abedini, M., Babaee Olam, T., & Pasban, A. (2024). Flood risk assessment and zoning using MFFPI model (Case study: Shafarood watershed, Gilan province). *Geography and Human Relationships*, 7(1), 821–871. https://doi.org/10.22034/gahr.2024.466493.2198 [In Persian]

Abedini, M., Sabouri, H., & Pasban, A. (2025). Flood hazard zoning and its relationship with land use using the Analytic Network Process model (Case study: Razi Chay Watershed, Ardabil Province). *Journal of Sustainable Urban & Regional Development Studies (JSURDS)*, 6(2), 68–84. https://www.srds.ir/article_214387.html?lang=en [In Persian]

Amiri, K., Seyed Kaboli, H., & Mahmoodi-Kohan, F. (2021). Study and monitoring of wetland area changes and their impact on wetland surface temperature using NDWI, MNDWI, and AWEI indices: Case study of Hor-alazim and Shadegan wetlands. *Irrigation Sciences and Engineering*, 44(4), 59–74. https://doi.org/10.22055/jise.2020.31854.1898 [In Persian]

Ebrahimi, L. (2020). Preparation of flood hazards management map using a new random forest algorithm (Case study: Lavasanat watershed). *Environmental Management Hazards*, 7(2), 181–196. https://doi.org/10.22059/jhsci.2020.307476.584 [In Persian]

Esmaili, R., & Taheri, M. (2022). Evaluation of flood hazard areas with fuzzy approach: Case study of the downstream of Neka catchment, Mazandaran province. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 11(34), 145–158. https://doi.org/10.22111/jneh.2022.39817.1842 [In Persian]

Falah, F., Zeinivand, H., Tahmasebipour, N., & Haghizadeh, A. (2024). Determining flood-prone areas using the Evidential Belief Function model (Case study: Silakhor Plain in Lorestan Province, Iran). *Applied Research in Water Engineering*, 1(2), 153–166. https://doi.org/10.22034/arwe.2024.2020836.1010 [In Persian]

Ghahraman, K., & Zanganeh Asadi, M. (2022). Determination of flood-prone areas using Sentinel-1 radar images (Case study: Flood in March 2019, Kashkan River, Lorestan Province). *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards*, 9(3), 103–118. https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.24237892.1401.9.3.7.7 [In Persian]

Gharakhani, M., Aghamohammadi, H., & Vahidnia, M. H. (2022). Flood hazard zonation using spatial hydrologic analysis in GIS and interpretation of satellite images: A case study on Aharchay Catchment. *Sustainability, Development & Environment*, 2, 67–86. https://sanad.iau.ir/en/Article/846656 [In Persian]

Ghiasi, S. S., Rajabzadeh, F., Najirda, S., Feiznia, S., & Nazari Samani, A. (2017). A determination of effective factors on shallow landslide occurrence in Khiov-Chai watershed. *Watershed Engineering and Management*, 9(2), 140–154. https://doi.org/10.22092/ijwmse.2017.109697 [In Persian]

Hamed, F., Bayat, A., Vakili Tajareh, F., Rahmani, M., & Rahmani, O. (2022). Zonation of flood susceptibility and determining the factors affecting it using the Maximum Entropy method. *Journal of Watershed Management Sciences and Engineering*, 16(59), 1–11. https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20089554.1401.16.59.6.9 [In Persian]

Hosseini Chamani, F., Farrokhian Firouzi, A., & Amerykhah, H. (2019). Pedotransfer function (PTF) for estimation of soil moisture using NDVI, land surface temperature (LST), and normalized moisture (NDMI) indices. *Journal of Water and Soil Conservation*, 26(4), 239–254. https://doi.org/10.22069/jwsc.2019.15306.3053 [In Persian]

Kakavand, M., Haghizadeh, A., & Soleimani-Motlagh, M. (2024). Comparison of remote sensing indices in determining the flood zoning of the Doab Vaysian watershed. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 13(40), 41–56. https://doi.org/10.22111/jneh.2023.46291.1978 [In Persian]

Moayeri, M., & Entezari, M. (2008). Floods and review of floods in the Province of Esfahan. *Journal of Studies of Human Settlements Planning*, 6, 110–124. https://sanad.iau.ir/en/Journal/jshsp/Article/1032735 [In Persian]

Parvin, M. (2019). Assessment and zoning of flash flood risks based on the MFFPI model: Case study of Islamabad Basin. *Environmental Management Hazards*, 6(2), 169–184. https://doi.org/10.22059/jhsci.2019.283544.480 [In Persian]

Parvin, M. (2020). Assessment and zoning of the risk of flash flooding based on physiographic factors and morphometric indices: Case study of Qasr-e Shirin Basin. *Geography and Environmental Planning*, 31(2), 89–104. https://doi.org/10.22108/gep.2020.119766.1221 [In Persian]

Ranjbar, S., & Kamyab, H. (2021). Assessing the spatial heterogeneity in ecological quality using remote sensing (Case study: Gharesoo Watershed). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 9(4), 145–161. https://doi.org/10.22067/geoeh.2021.67026.0 [In Persian]

آماده انتشار (پذیرفته شده مجله)

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

Rezaei Moghaddam, M. H., Karami, F., & Abazari, K. (2023). Assessment and zoning of flash flood risk in Ojan Chai basin by MFFPI model. *Journal of Hydrogeomorphology*, 10(36), 138–157. https://doi.org/10.22034/hyd.2023.57462.1701 [In Persian]

Rezaei Moghaddam, M. H., Mokhtari, D., & Shafieimehr, M. (2021). Zoning flood risk in the Shahr Chai Watershed in Miyaneh using the Vikor model. *Journal of Hydrogeomorphology*, 8(28), 19–37. https://doi.org/10.22034/hyd.2021.40169.1536 [In Persian]

References [in English]

Albertini, C., Gioia, A., Iacobellis, V., & Manfreda, S. (2022). Detection of surface water and floods with multispectral satellites. *Remote Sensing*, 14(23), 6005. https://doi.org/10.3390/rs14236005

Ali, S. A., Parvin, F., Pham, Q. B., Vojtek, M., Vojteková, J., Costache, R., Linh, N. T. T., Nguyen, H. Q., Ahmad, A., & Ghorbani, M. A. (2020). GIS-based comparative assessment of flood susceptibility mapping using a hybrid multi-criteria decision-making approach, naïve Bayes tree, bivariate statistics and logistic regression: A case of Topľa basin, *Slovakia. Ecological Indicators*, 117, Article 106620. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106620

Costache, R., Pham, Q. B., Sharifi, E., Linh, N. T. T., Abba, S. I., Vojtek, M., Vojteková, J., Nhi, P. T. T., & Khôi, Đ. N. (2020). Flash-flood susceptibility assessment using multi-criteria decision making and machine learning supported by remote sensing and GIS techniques. *Remote Sensing*, 12(1), 106. https://doi.org/10.3390/rs12010106

Kocsis, I., Bilaşco, Ş., Irimuș, I.-A., Vasile, D., Rusu, R., & Roșca, S. (2022). Flash flood vulnerability mapping based on FFPI using GIS spatial analysis case study: Valea Rea catchment area, *Romania. Sensors*, 22(9), 3573. https://doi.org/10.3390/s22093573

Leskens, J. G., Brugnach, M., Hoekstra, A. Y., & Schuurmans, W. (2014). Why are decisions in flood disaster management so poorly supported by information from flood models?. *Environmental Modelling & Software*, 53, 53-61. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.11.003

Marković, M., Lukić, S., & Baumgerte, A. (2021). Use of Flash Flood Potential Index (FFPI) method for assessing the risk of roads to the occurrence of torrential floods - Part of the Danube Basin and PEK River Basin. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 11(4). https://doi.org/10.7708/ijtte2021.11(4).04

Mohd Yassin, N. A., Adnan, N. A., & Md Sadek, E. S. S. (2023). Analysis of flash flood potential index (FFPI) and scenarios assessment in Shah Alam using a GIS approach. *Planning Malaysia*, 21(26). https://doi.org/10.21837/pm.v21i26.1255

Popa, M. C., Simion, A. G., Peptenatu, D., Dima, C., Draghici, C. C., Florescu, M.-S., Dobrea, C. R., & Diaconu, D. C. (2020). Spatial assessment of flash-flood vulnerability in the Moldova river catchment (N Romania) using the FFPI. *Journal of Flood Risk Management*, 13(4), e12624. https://doi.org/10.1111/jfr3.12624

Shahabi, H., Shirzadi, A., Ghaderi, K., Omidvar, E., Al-Ansari, N., Clague, J. J., Geertsema, M., Khosravi, K., Amini, A., Bahrami, S., Rahmati, O., Habibi, K., Mohammadi, A., Nguyen, H., Melesse, A. M., Ahmad, B. B., & Ahmad, A. (2020). Flood detection and susceptibility mapping using Sentinel-1 remote sensing data and a machine learning approach: Hybrid intelligence of bagging ensemble based on K-nearest neighbour classifier. *Remote Sensing*, 12(2), 266; https://doi.org/10.3390/rs12020266

Shawaqfah, M., AlMomani, F., & Khatatbeh, A. (2020). Mapping flash flood potential and risk level using GIS techniques and the flash flood potential index (FFPI) in the Amman Zarqa Basin of Jordan. *Jordanian Journal of Engineering and Chemical Industries (JJECI), 3(3),* 81–90. https://doi.org/10.48103/jjeci3102020

Singha, C., Rana, V. K., Pham, Q. B., Nguyen, D. C., & Łupikasza, E. (2024). Integrating machine learning and geospatial data analysis for comprehensive flood hazard assessment. *Environmental Science and Pollution Research*, 31, 48497–48522. https://doi.org/10.1007/s11356-024-34286-7

Taloor, A. K., Sharma, S., Sharma, D., Chib, R., Jasrotia, R., Gupta, S., Kothyari, G. C., Mehta, P., & Kale, R. V. (2024). Estimation of MFFPI for flood hazards assessment using geospatial technology in the Tawi Basin, India. *Geosystems and Geoenvironment*, 3(1), Article 100233. https://doi.org/10.1016/j.geogeo.2023.100233

Tincu, R., Lazar, G., & Lazar, I. (2018). Modified flash flood potential index to estimate areas with predisposition to water accumulation. *Open Geosciences*, 8(1), 376–387. https://doi.org/10.1515/geo-2018-0047

Yagoub, M. M., Alsereidi, A. A., Mohamed, E. A., Periyasamy, P., Alameri, R., Aldarmaki, S., & Alhashmi, Y. (2020). Newspapers as a validation proxy for GIS modeling in Fujairah, United Arab Emirates: Identifying flood-prone areas. *Natural Hazards*, 104(1), 111–141. https://doi.org/10.1007/s11069-020-04161-y.

آماده انتشار (پذیرفته شده)

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

مجله علمی پژوهشی مخاطرات محیط طبیعی، دوره ----، شماره ----- ، -------- -----

ارزیابی پتانسیل سیل‌خیزی حوضه آبخیز خیاوچای با استفاده از مدل MFFPI و شاخص‌های طیفی

صیاد اصغری سراسکانرود[1]*، مهدی فروتن[2]

۱. استاد ژئومورفولوژی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران (**نویسنده مسئول**)

ایمیل: s.asghari@uma.ac.ir / ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5015-904X

۲. دانشجوی دکتری آب و هواشناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۱۸
تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۴/۲۵
تاریخ پذیرش : ۱۴۰۴/۰۵/۱۸

واژه‌های کلیدی:
سیلاب، MFFPI، شاخص‌های طیفی، حوضه آبخیز خیاوچای.

چکیده

سیلاب‌های ناگهانی از مخاطرات مهم در مدیریت منابع آب و محیط‌زیست به شمار می‌آیند. هدف این پژوهش، شناسایی نواحی مستعد سیلاب ناگهانی در حوضه آبخیز خیاوچای و بررسی ارتباط شاخص‌های طیفی با خطر وقوع سیلاب است. در این راستا، از مدل MFFPI به‌عنوان ابزار اصلی برای تعیین مناطق سیل‌خیز استفاده شد. پارامترهای مورد استفاده شامل شیب، تراکم جریان، انحنای دامنه، جنس سنگ، بافت خاک و کاربری اراضی بوده که از منابعی مانند مدل رقومی ارتفاع (DEM)، نقشه‌های زمین‌شناسی و داده‌های سنجش از دور استخراج شدند. این پارامترها پس از طبقه‌بندی و وزن‌دهی براساس نسخه اصلاح‌شده مدل MFFPI، در محیط GIS پردازش و نقشه نهایی خطر سیلاب تولید گردید. برای ارزیابی عملکرد مدل، دو سیلاب ثبت‌شده در سال ۲۰۲۰ بررسی و تحلیل ROC برای سنجش دقت مدل انجام شد. همچنین، ارتباط شاخص‌های طیفی MNDWI، NDMI، AWEI و LSM با مقادیر MFFPI از طریق آزمون همبستگی اسپیرمن بررسی گردید. نتایج نشان داد که نواحی شمالی، بخش‌هایی از مرکز و برخی مناطق جنوبی حوضه بیشترین خطر وقوع سیلاب را دارند. ارزیابی پارامترها نشان داد عواملی مانند شیب کم، تراکم بالای جریان، خاک‌های رسی کم‌نفوذ، دامنه‌های مقعر، کاربری شهری و سنگ‌های آذرین سخت در افزایش رواناب و سیلاب مؤثرند. تحلیل شاخص‌های طیفی نیز نشان داد شاخص LSM با مدل MFFPI ارتباط مثبت و معناداری دارد و می‌تواند به‌طور مؤثر در شناسایی نواحی سیل‌خیز به کار رود. مقدار AUC برای دو سیلاب بررسی‌شده به‌ترتیب ۰/۷۳ و ۰/۷۲ به‌دست آمد که بیانگر عملکرد قابل‌قبول مدل در پیش‌بینی خطر سیلاب است.

آماده انتشار (بدون شماره مجله)

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

© نویسنده/ نویسندگان

DOI: 00000000000000000000000000

ناشر: دانشگاه سیستان و بلوچستان

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

مقدمه

سیلاب به حجم زیادی از آب گفته می‌شود که با شدت جریان می‌یابد، از بستر خود سرریز کرده و مناطقی را که معمولاً خشک هستند، در بر می‌گیرد. به بیان دیگر، سیلاب به افزایش قابل توجه سطح آب در یک رودخانه اطلاق می‌شود که این افزایش معمولاً نسبت به وضعیت عادی یا میانگین معمول آن سنجیده می‌شود. برخی کارشناسان هیدرولوژی، سیلاب را به جریان‌هایی نسبت می‌دهند که برابر یا چندین برابر دبی میانگین سالانه رودخانه باشند (معیری و انتظاری، ۱۳۸۷). با این حال سیلاب ناگهانی به معنی جاری شدن سریع آب بر سطح زمین در اثر بارش‌های سنگین یا رها شدن ناگهانی آب از یک منطقه سد شده است که در این حالت، آب به‌صورت رواناب سطحی جریان می‌یابد (لسکنس و همکاران، ۲۰۱۴). این پدیده به‌عنوان یکی از مهم‌ترین و ویرانگرترین بلایا شناخته می‌شود که تأثیرات آن بر زندگی انسان‌ها و اقتصاد جهانی به‌طور گسترده در مطالعات و گزارش‌ها ثبت شده است. به‌عنوان نمونه، گزارش اخیر دفتر کاهش خطر بلایای سازمان ملل متحد (UNDRR؛ که پیش‌تر با عنوان UNISDR شناخته می‌شد) نشان می‌دهد که سیل طی سال‌های ۱۹۹۵ تا ۲۰۱۵ بر زندگی ۲/۳ میلیارد نفر تأثیر گذاشته و منجر به مرگ ۱۵۷،۰۰۰ نفر شده است (یعقوب و همکاران، ۲۰۲۰). ایران کشوری با اقلیم خشک و نیمه‌خشک است که به‌ویژه در مناطق شمالی خود به‌طور چشمگیری در معرض سیل‌های ویرانگر قرار دارد. به‌عنوان نمونه، بین ۲۵ مارس تا ۸ آوریل ۲۰۱۹، سیلی گسترده بیش از ۲۵ استان از مجموع ۳۱ استان کشور را تحت تأثیر قرار داد. شدت خسارات ناشی از عواملی همچون بارندگی شدید، مدیریت نامناسب حوزه‌های آبخیز، زیرساخت‌های ناکافی کنترل سیلاب و نبود سیستم‌های کارآمد هشدار سیل تشدید شد. نقشه‌های خطر سیل که بر اساس مدل‌های فیزیکی صرفاً دبی اوج را پیش‌بینی می‌کنند، ممکن است دچار عدم‌قطعیت و خطای قابل‌توجهی باشند. علاوه بر این، مدل‌های عددی به حجم زیادی از داده‌های متنوع نیاز دارند که تهیه آن‌ها در کشورهای در حال توسعه‌ای مانند ایران به‌سادگی امکان‌پذیر نیست (شهابی و همکاران، ۲۰۲۰). رخدادهای سیلاب نتیجه تعامل عوامل پویای مختلفی هستند، از جمله شدت بارش و رواناب، میزان نفوذپذیری خاک، فرآیندهای تبخیر و تعرق، تغییرات اقلیمی و دگرگونی در الگوهای کاربری اراضی. علاوه بر این، سیلاب‌ها از پیامدهای زیست‌محیطی گوناگونی تأثیر می‌پذیرند. بنابراین، ارزیابی و تعیین محدوده‌های دارای پتانسیل سیلاب به‌عنوان یک راهکار پیشگیرانه از اهمیت بالایی برخوردار بوده و یکی از اقدامات اساسی در مدیریت و برنامه‌ریزی پیش از بروز بحران محسوب می‌شود (علی و همکاران، ۲۰۲۰). روش‌های مختلفی برای ارزیابی و تحلیل خطر سیل ارائه شده است. روش‌های قطعی مانند HEC-HMS[1] و HEC-RAS[2] برای شبیه‌سازی سیلاب‌ها به داده‌های دقیق و هزینه‌های بالا نیاز دارند و به حوضه‌های کوچک محدود هستند. در مقابل، روش‌های پارامتریک و داده‌محور با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و GIS در مقیاس بزرگ و شرایط کمبود داده مؤثرند. علاوه بر این، بسیاری از محققان از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) مبتنی بر شاخص پتانسیل سیل ناگهانی بر اساس خصوصیات زمین و عوامل کنترل کننده توسعه سیلاب‌های ناگهانی برای ارزیابی درجه حساسیت به سیلاب‌های ناگهانی در یک سطح خاص استفاده کرده‌اند (تالور و همکاران، ۲۰۲۴). مطالعه حاضر با بهره‌گیری از شاخص اصلاح‌شده MFFPI[3] به شناسایی مناطق آسیب‌پذیر در برابر سیل در حوضه آبخیز خیاوچای می‌پردازد. با توجه به محدودیت‌های روش‌های عددی و مزایای GIS و داده‌های سنجش از دور،

آماده انتشار (بدون شماره مجله)

[1] - Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System
[2] - HEC-RAS: Hydrologic Engineering Center - River Analysis System
[3] - Modified Flash Flood Potential Index

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

استفاده از شاخص‌های ترکیبی می‌تواند دقت تحلیل‌ها را افزایش دهد. نوآوری این پژوهش در استفاده از نسخه اصلاح‌شده MFFPI و بررسی ارتباط آن با شاخص‌های طیفی سنجش از دور است که تاکنون در این زمینه کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. ترکیب این دو رویکرد، دقت شناسایی نواحی مستعد سیلاب را بهبود بخشیده و چارچوبی کارآمد برای مدیریت خطر سیلاب ارائه می‌دهد.

مطالعاتی در این زمینه در دنیا و ایران انجام گرفته از جمله تینکو و همکاران (۲۰۱۸) با توسعه شاخص MFFPI در حوضه رودخانه تروتوش رومانی و به‌کارگیری تحلیل رگرسیون چندگانه، سه عامل کلیدی مؤثر را شناسایی کردند که ۹۱/۶ درصد واریانس مدل را توضیح می‌داد. نتایج آن‌ها نشان داد که این شاخص تطابق بالایی با نقشه خطر سیلاب دارد و ابزاری مؤثر در پیش‌بینی مناطق سیل‌خیز است. کوستاکه و همکاران (۲۰۱۹) با ترکیب AHP[1] و الگوریتم‌های KNN[2] و K-Star و بهره‌گیری از داده‌های سنجش از دور و ۱۰ عامل مؤثر، شاخص FFPI[3] را محاسبه کردند. نتایج حاکی از برتری مدل ترکیبی KNN–AHP نسبت به مدل‌های مستقل بود که دقت آن نیز با منحنی ROC[4] و AUC[5] تأیید شد. پوپا و همکاران (۲۰۲۰) با استفاده از شاخص FFPI و مدل‌سازی عوامل مؤثر در مقیاس ۳۰ متری، آسیب‌پذیری سیلاب را در حوضه مولدووا ارزیابی کردند. آن‌ها تأثیر جنگل‌زدایی را نیز بررسی کرده و نشان دادند که FFPI با سوابق سیلاب همخوان است و می‌تواند در مناطق فاقد دفاع ساختاری، ابزاری مکمل در تهیه نقشه‌های خطر باشد. شواقفه و همکاران (۲۰۲۰) با بهره‌گیری از شاخص FFPI و GIS، مناطق بحرانی سیلاب ناگهانی را در حوضه عمان-زرقا شناسایی کردند. آن‌ها نشان دادند که افزایش وزن شیب و کاربری زمین نقش بسزایی در تشدید خطر سیلاب دارد و بخش قابل‌توجهی از منطقه در سطوح متوسط تا بسیار بالا از نظر خطر قرار دارد. مارکوویچ و همکاران (۲۰۲۱) با استفاده از شاخص FFPI و تحلیل چهار عامل کلیدی، خطر سیلاب تندری بر جاده‌های حوضه دانوب و پک را بررسی کردند. نتایج نشان داد که ۳۳/۵ درصد از مناطق در معرض خطر بسیار بالا و ۶۸ درصد در سطح خطر متوسط قرار دارند، که نشان‌دهنده آسیب‌پذیری قابل‌توجه زیرساخت‌ها است. کوچیس و همکاران (۲۰۲۲) با به‌کارگیری شاخص FFPI و ۱۵ عامل مؤثر در محیط GIS، نقشه آسیب‌پذیری سیلاب در حوضه والیارئا را تهیه کردند. نتایج نشان داد ۴۳ درصد از منطقه در سطح آسیب‌پذیری بالا تا بسیار بالا قرار دارد و روش پیشنهادی، همخوانی بالایی با داده‌های تاریخی داشته و برای مدیریت ریسک توصیه شده است. نورول و همکاران (۲۰۲۳) با استفاده از شاخص FFPI و چهار عامل کلیدی (شیب، کاربری زمین، نوع خاک و NDVI[6])، پتانسیل سیلاب ناگهانی را در شاه عالم مالزی ارزیابی کردند. آن‌ها دریافتند که منطقه عمدتاً در سطح خطر متوسط قرار دارد و سناریوی دوم با احتمال ۷۱ درصد وقوع سیلاب شدید، عملکرد بهتری نسبت به سایر سناریوها داشت. تالور و همکاران (۲۰۲۴) با بهره‌گیری از فناوری سنجش از دور و شاخص MFFPI، خطر سیلاب را در حوضه تاوی هند ارزیابی کردند. آن‌ها منطقه را در پنج سطح خطر طبقه‌بندی کرده و نتایج را با روش AHP اعتبارسنجی نمودند که همبستگی بالایی با واقعیت‌های میدانی نشان داد. پروین (۱۳۹۸) با استفاده از مدل MFFPI و پارامترهای فیزیوگرافی، خطر سیلاب ناگهانی را در حوضه اسلام‌آباد غرب پهنه‌بندی کرد. نتایج نشان داد ۴۵ درصد از منطقه در پهنه خطر زیاد قرار دارد و حتی با حذف پارامترهای کم‌اثر، دشت اسلام‌آباد غرب همچنان در معرض خطر بالا قرار دارد. ابراهیمی (۱۳۹۹) با

آماده انتشار (بدون شماره مجله)

[1] - Analytic Hierarchy Process
[2] - K-Nearest Neighbors
[3] - Flash Flood Potential Index
[4] - Receiver Operating Characteristic
[5] - Area Under the Curve
[6] - Normalized Difference Vegetation Index

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

استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی و بررسی ۹ شاخص شامل بارش، شیب، ارتفاع و کاربری اراضی، نقشهٔ مدیریت مخاطرات سیلاب را در حوضهٔ آبخیز لواسانات تهیه کرد. نتایج نشان داد بارش مهم‌ترین عامل وقوع سیلاب است و بیش از نیمی از منطقه به‌ویژه در بخش‌های شمالی و غربی در پهنه‌های خطرناک قرار دارند. پروین (۱۳۹۹) با استفاده از مدل MFFPI و روش محاسبه درجه خطر، خطر سیلاب‌های ناگهانی حوضه قصر شیرین را ارزیابی کرد. نتایج نشان داد که ۹۳ درصد از مساحت حوضه طبق روش درجه خطر در معرض خطر زیاد است، در حالی که مدل MFFPI حدود ۶۰ درصد منطقه را در پهنه‌های پرخطر قرار داد و با تمرکز بر عوامل فیزیوگرافی، دقت بالاتری در شناسایی مناطق حساس داشت. اسماعیلی و طاهری (۱۴۰۱) با بهره‌گیری از روش فازی و داده‌های ارتفاع، شیب، فاصله از رودخانه، بارش، لیتولوژی و کاربری اراضی، خطر سیلاب در پایین‌دست حوضه نکا را پهنه‌بندی کردند. نقشه نهایی با شاخص‌های ROC و کاپای کوهن اعتبارسنجی شد و نشان داد که ۱۵/۷ درصد از مساحت منطقه، شامل ۳۰ درصد از مناطق شهری و روستایی، در پهنه‌های خطر زیاد و بسیار زیاد قرار دارد. قهرمان و زنگنه اسدی (۱۴۰۱) با استفاده از تصاویر راداری Sentinel-1 و روش آستانه‌گذاری Otsu، مناطق مستعد سیلاب در رودخانه کشکان لرستان را شناسایی کردند. نتایج نشان داد بارش ۴۶/۴۷ میلی‌متر باعث وقوع سیلاب در ۵۱/۶ درصد از منطقه شد و پیچان‌رود به‌عنوان یکی از مناطق بحرانی معرفی گردید. این مطالعه، اثربخشی تصاویر راداری را در شناسایی سیلاب‌های لحظه‌ای تأیید کرد. رضایی‌مقدم و همکاران (۱۴۰۲) با استفاده از مدل MFFPI، خطر سیلاب ناگهانی را در حوضه آبریز اوجان‌چای ارزیابی کردند. آن‌ها شیب، تراکم جریان، بافت خاک و کاربری اراضی را برای وزن‌دهی لایه‌ها به‌کار بردند و دریافتند که شیب، کاربری زمین و بافت خاک بیشترین تأثیر را دارند. نتایج نشان داد مناطق با خطر زیاد عمدتاً در بستر رودخانه و دشت‌های رسوبی متمرکزند و گستره مناطق با خطر بسیار کم افزایش یافته است. فلاح و همکاران (۱۴۰۲) با استفاده از مدل EBF[1]، مناطق مستعد سیل دشت سیلاخور لرستان را شناسایی کردند. این مطالعه با به‌کارگیری داده‌های سیل‌های گذشته و عوامل مؤثر مانند ارتفاع، شیب، فاصله از رودخانه و تراکم زهکشی، نقشه استعداد سیل را تهیه نمود. نتایج با دقت ۷۶ درصد مدل، اهمیت ارتفاع، فاصله از رودخانه و تراکم زهکشی را به‌عنوان عوامل کلیدی در پیش‌بینی سیل‌خیزی تأیید کرد. عابدینی و همکاران (۱۴۰۳) با استفاده از مدل MFFPI و تحلیل ۶ پارامتر اصلی، پهنه‌بندی خطر سیلاب حوضه شفارود گیلان را در پنج کلاس تهیه کردند. نتایج نشان داد بخش‌های جنوبی و جنوب‌غربی حوضه در معرض خطر زیاد و خیلی زیاد قرار دارند، در حالی که مناطق مرکزی دارای خطر متوسط تا کم هستند.

مرور مطالعات پیشین نشان می‌دهد که شاخص MFFPI در بسیاری از حوضه‌های آبخیز به‌عنوان ابزاری کارآمد جهت شناسایی مناطق مستعد سیلاب به‌کار گرفته شده است. با وجود نقش مؤثر این شاخص در ارتقای دقت مدل‌سازی خطر سیلاب، کاستی‌هایی همچون فقدان بررسی جامع شاخص‌های طیفی در اغلب پژوهش‌ها مشهود است. پژوهش حاضر با هدف پر کردن این خلأ، به تلفیق شاخص MFFPI با شاخص‌های طیفی پرداخته و رویکردی نوین برای بهبود دقت شناسایی مناطق سیل‌خیز ارائه می‌دهد.

داده‌ها و روش‌ها

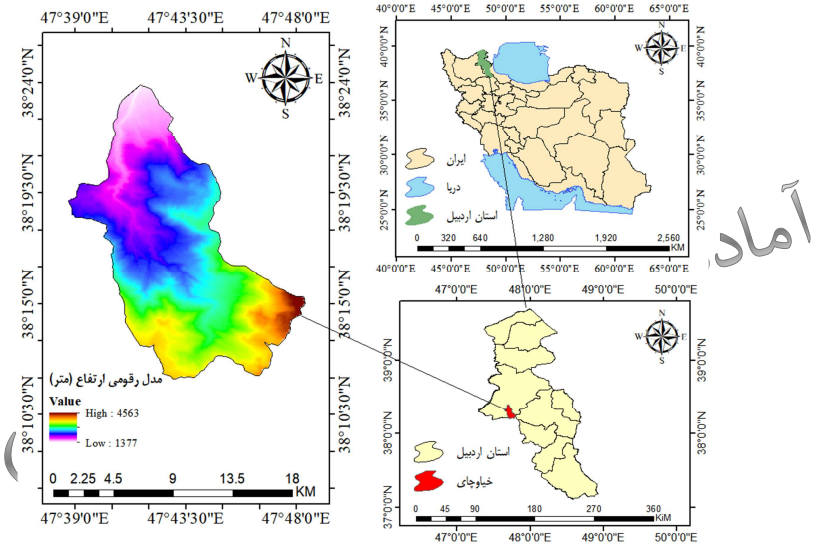
[1] - Evidence-Based Framework

آماده انتشار (بدون شماره مجله)

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

محدوده مورد مطالعه

حوضه آبخیز خیاوچای با مساحتی در حدود ۱۳۰۰۰ هکتار در حاشیه غربی کوه سبلان و جنوب شهرستان مشگین‌شهر واقع شده است. از نظر تقسیمات کشوری، این منطقه بخشی از استان اردبیل محسوب می‌شود و از دیدگاه جغرافیایی، در زمره زیرحوضه‌های آبخیز بزرگ خزر قرار دارد. این زیرحوضه در محدوده عرض جغرافیایی ۳۸ درجه و ۱۱ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۲۸ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۴۷ درجه و ۳۷ دقیقه تا ۴۷ درجه و ۴۸ دقیقه شرقی گسترده شده است. بیشترین ارتفاع این منطقه، ۴۵۶۰ متر از سطح دریا در قله کسری در ارتفاعات جنوبی حوضه، و کمترین ارتفاع آن ۱۳۷۵ متر در خروجی حوضه، در محدوده ایستگاه هیدرومتری پل سلطانی قرار دارد (غیاثی و همکاران، ۱۳۹۶). شکل ۱، موقعیت جغرافیایی حوضه آبخیز خیاوچای را در سطح استان و ایران نشان می‌دهد.



شکل ۱: موقعیت حوضه آبخیز خیاوچای در استان اردبیل و ایران. *منبع: نگارندگان پژوهش*

روش‌شناسی پژوهش

در این پژوهش، به منظور شبیه‌سازی نواحی سیلاب ناگهانی در حوضه آبخیز خیاوچای، از مدل MFFPI استفاده شد. برای این منظور، ابتدا پارامترهای اصلی مدل شامل شیب، تراکم جریان، انحنای دامنه از مدل رقومی ارتفاعی DEM[1] ۳۰ متر، جنس سنگ از نقشه‌های زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ استفاده شد. نقشه بافت خاک نیز در بستر گوگل ارث انجین از پایگاه داده USDA و همچنین از پروداکت GLC-FCS30D وضعیت کاربری اراضی حوضه مورد مطالعه به دست آمد. این پارامترها طبق نسخه اصلاح‌شده مدل MFFPI که توسط تینکو و همکاران در سال ۲۰۱۸ معرفی شده، به پنج کلاس مختلف طبقه‌بندی شدند و برای هرکدام وزن خاصی در نظر گرفته شد. سپس، با استفاده از ابزارهای Raster Calculator در نرم‌افزار GIS، مقادیر این پارامترها ترکیب و امتیاز نهایی هر لایه اطلاعاتی محاسبه گردید. در نهایت، نقشه پتانسیل خطر سیلاب در حوضه آبخیز خیاوچای با استفاده از مدل MFFPI و پارامترهای وزن‌دهی‌شده تولید شد. برای ارزیابی دقت مدل، دو مورد از سیلاب‌های رخداده در تاریخ‌های ۲۰۲۰/۰۷/۱۴ و

[1] - Digital Elevation Model

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

۲۰۲۰/۰۶/۰۶ مورد بررسی قرار گرفت و عملکرد مدل با استفاده از منحنی ROC ارزیابی شد. همچنین، شاخص‌های طیفی مانند MNDWI[1]، NDMI[2]، AWEI[3]، LSM[4] و NDVI که نشان‌دهنده منابع آبی و رطوبت خاک و گیاهان هستند، از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ در بستر گوگل ارث انجین استخراج و تحلیل شدند. از این شاخص‌ها در مطالعات سینگا و همکاران (۲۰۲۴)، آلبرتینی و همکاران (۲۰۲۲) و کاکاوند و همکاران (۱۴۰۳) برای شناسایی نواحی سیلابی استفاده شده است. پس از اطمینان از نرمال نبودن داده‌ها با استفاده از آزمون کلموگروف-اسمیرنوف، ارتباط بین هر یک از شاخص‌های طیفی و مدل MFFPI با استفاده از آزمون همبستگی اسپیرمن مورد بررسی قرار گرفت.

مدل MFFPI

مدل MFFPI، نسخه اصلاح‌شده مدل FFPI است که توسط تینکو و همکاران (۲۰۱۸) توسعه یافته است. این مدل شامل شش پارامتر کلیدی شیب، تراکم جریان، انحنای دامنه، بافت خاک، نفوذپذیری سنگ، و پوشش زمین/کاربری اراضی می‌باشد که به عنوان شاخصی برای ارزیابی پتانسیل سیلاب ناگهانی به کار می‌رود. در نسخه نهایی اصلاح‌شده، هر پارامتر دارای وزن مخصوص خود بوده و در پنج کلاس طبقه‌بندی می‌شود. وزن‌های ۱ و ۵ به ترتیب نشان‌دهنده کمترین و بیشترین تأثیر بر انباشت آب و در نتیجه پتانسیل وقوع سیلاب ناگهانی هستند (تینکو و همکاران، ۲۰۱۸). در جدول ۱، نحوه امتیازدهی پارامترهای مدل MFFPI ارائه شده است.

آماده انتشار (بدون شماره مجله)

جدول ۱: نحوه امتیازدهی پارامترهای مدل MFFPI (تینکو و همکاران، ۲۰۱۸).

پارامتر	وزن پارامتر	طبقه	وزن هر طبقه	امتیاز نهایی
شیب (درجه)	۳	۱۰-۶	۱	۳
		۸-۱۰	۲	۶
		۸-۶	۳	۹
		۶-۳	۴	۱۲
		۳-۰	۵	۱۵
تراکم جریان	۲/۵	۰-۱	۱	۲/۵
		۱-۲	۲	۵
		۲-۳	۳	۷/۵
		۳-۴	۴	۱۰
		۴-۵	۵	۱۲/۵
انحناء دامنه	۲	(-۴۹)-(-۱۸)	۱	۲
		(-۹)-(-۰/۵)	۲	۴
		(-۰/۵)-(-۰/۵)	۳	۶
		-۰/۵-۱/۵	۴	۸
		۱/۵-۲۳	۵	۱۰
بافت خاک	۱	ماسه-رس	۱	۱
		ماسه‌ای-لومی-رسی	۲	۲
		بافت‌های مختلف رسی	۳	۳
		رسی-سیلتی- مواد رس دار	۴	۴

[1] - Modified Normalized Difference Water Index
[2] - Normalized Difference Moisture Index
[3] - Automated Wetland Ecosystem Index
[4] - Land Surface Model

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

			۵	۵
نفوذپذیری سنگ	۱	نهشته آبرفتی	۱	۱
		سازندهای ماسه سنگ، کنگلومرا	۲	۲
		سازندهای مارنی	۳	۳
		سازندهای آهکی	۴	۴
		سنگ‌های آذرین	۵	۵
پوشش/کاربری زمین	۰/۵	جنگل	۱	۰/۵
		مراتع متراکم و نیمه متراکم	۲	۱
		زمین زراعی	۳	۱/۵
		مراتع کم تراکم	۴	۲
		سطوح آبی	۵	۲/۵

شاخص MNDWI

شاخص اصلاح‌شده آب تفاضلی نرمال‌شده (MNDWI) با جایگزینی باند مادون قرمز میانی به‌جای باند مادون قرمز نزدیک در شاخص NDWI معرفی شد. این شاخص در شناسایی پهنه‌های آبی و ویژگی‌های خاک عملکرد مطلوبی دارد. مقدار این شاخص برای پیکسل‌های غیرآبی مانند زمین، پوشش گیاهی و مناطق مسکونی کمتر از صفر (MNDWI<0) است، درحالی‌که پیکسل‌های دارای مقدار بیشتر از صفر (MNDWI>0) به‌عنوان مناطق آبی شناسایی می‌شوند. اصلاحات انجام‌شده در این شاخص باعث افزایش پایداری آستانه‌ها در مقایسه با NDWI شده و دقت بالاتری را در تشخیص تغییرات کیفیت آب ارائه می‌دهد (امیری و همکاران، ۱۴۰۰). فرمول این شاخص بر اساس رابطه ۱، به دست می‌آید.

$$\mathrm{MNDWI} = \frac{\mathrm{Green}+\mathrm{MIR}}{\mathrm{Green}+\mathrm{MIR}} \quad (۱)$$

در این رابطه، Green نشان‌دهنده بازتاب باند سبز و MIR بیانگر بازتاب باند مادون قرمز با طول موج کوتاه است.

آماده انتشار (بدون شماره مجله)

شاخص AWEI

Feyisa و همکاران (۲۰۱۴) شاخص استخراج خودکار آب (AWEI) را برای بهبود شناسایی سطوح آبی و حذف پیکسل‌های تیره معرفی کردند. هدف اصلی این شاخص، تفکیک حداکثری پیکسل‌های آب از غیرآب با استفاده از تفاضل باندهای طیفی است. بر اساس این شاخص، در مناطقی که مقدار AWEI<0 باشد، پیکسل به‌عنوان غیرآب در نظر گرفته می‌شود، درحالی‌که در مناطقی که AWEI>0 باشد، نشان‌دهنده حضور پهنه‌های آبی است (امیری و همکاران، ۱۴۰۰). این شاخص به‌صورت رابطه ۲، محاسبه می‌شود.

$$\mathrm{AWEI} = 4 * (\mathrm{Green} - \mathrm{MIR}) - ((0.25 * \mathrm{NIR}) + (2.75 * \mathrm{SWIR})) \quad (۲)$$

که در آن، Green بازتاب باند سبز؛ MIR بازتاب باند مادون قرمز با طول موج متوسط؛ NIR بازتاب باند مادون قرمز نزدیک و SWIR بازتاب باند مادون قرمز با طول موج کوتاه است. برای شناسایی پهنه‌های آبی و تفکیک سایر عوارض از آب، استفاده از شاخص‌های سنجش از دور نیازمند تعیین حد آستانه مناسب است.

شاخص NDMI

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

شاخص اختلاف رطوبتی نرمال‌شده (NDMI) با استفاده از داده‌های باند مادون قرمز نزدیک (NIR) و مادون قرمز میانی (MIR) محاسبه می‌شود و به‌صورت رابطه ۳، تعریف می‌گردد.

$$NDMI = \frac{NIR-MIR}{NIR+MIR} \quad (۳)$$

در سنجنده لندست ۸، باندهای مربوط به طول موج مادون قرمز نزدیک و مادون قرمز میانی به ترتیب باند ۵ و باند ۶ هستند (حسینی‌چمنی و همکاران، ۱۳۹۸).

شاخص LSM

تحول اجزای محیطی به‌طور گسترده در مطالعات پایش محیط‌زیستی مورد استفاده قرار گرفته است. یکی از این مؤلفه‌ها رطوبت است که برای استخراج آن، شاخص‌های متعددی مانند NDMI (معیار رطوبت پوشش گیاهی)، NMDI (معیار رطوبت خاک) و LSM (رطوبت سطح زمین) ایجاد شده‌اند. در این پژوهش، برای استخراج رطوبت سطح زمین (LSM) از رابطه ۴، استفاده شده است.

(۴)

$$LSM = 0.1511\ \rho BLUE + 0.1973\ \rho Green + 0.3283\ \rho Red + 0.3407\ \rho NIR - 0.7117\ \rho SWIR1 - 0.4559 - \rho SWIR2$$

که در آن، Blue باند آبی، Green باند سبز، Red باند قرمز، NIR باند مادون قرمز نزدیک، SWIR1 و SWIR2 باندهای مادون قرمز میانی هستند (رنجبر و کامیاب، ۱۳۹۹).

آماده انتشار (بدون شماره مجله)

شاخص NDVI

شاخص‌های پوشش گیاهی به‌طور گسترده به‌عنوان معیارهایی برای تجزیه‌وتحلیل پوشش گیاهی مورد استفاده قرار می‌گیرند. شاخص‌های مختلفی مانند RVI، NDVI، SAVI، EVI و سایر شاخص‌های مشابه برای مطالعه ویژگی‌های پوشش گیاهی معرفی شده‌اند. شاخص تفاضل نرمال‌شده پوشش گیاهی (NDVI) یکی از پرکاربردترین شاخص‌ها برای پایش تغییرات پوشش گیاهی است که از نسبت‌گیری باند قرمز (Red) و باند مادون قرمز نزدیک (NIR) به دست می‌آید. این شاخص بر اساس رابطه ۵، محاسبه می‌شود.

$$NDVI = \frac{NIR-Red}{NIR+Red} \quad (۵)$$

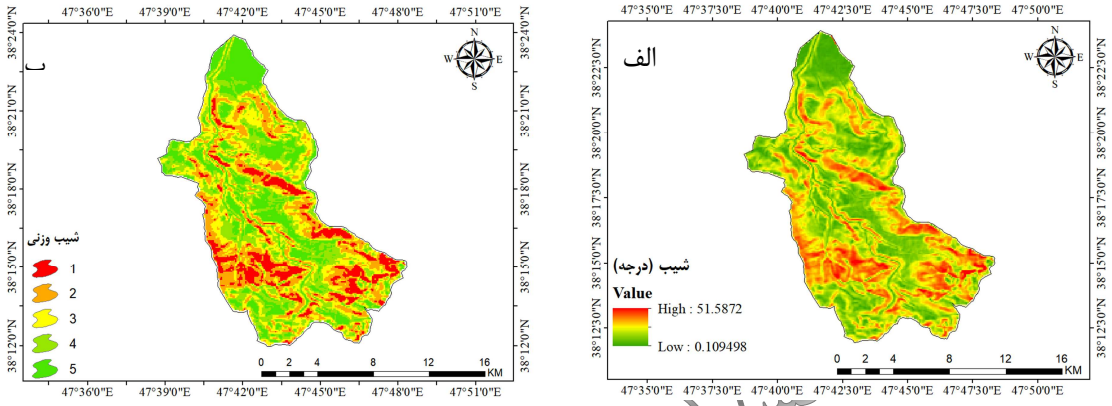
که در آن، NIR باند مادون قرمز نزدیک و Red باند قرمز است. بازه عددی این شاخص بین -۱ تا +۱ متغیر است (رنجبر و کامیاب، ۱۳۹۹).

نتایج و بحث

شیب یکی از عوامل کلیدی در جریان سیلاب محسوب می‌شود. در مناطق مرتفع و پرشیب، آب با سرعت بیشتری حرکت می‌کند، در حالی که در نواحی کم‌شیب، بسته به نوع خاک، احتمال تجمع آب افزایش می‌یابد. به همین دلیل، بر اساس نظر تینکو و همکاران (۲۰۱۸)، مناطق کم‌شیب در مدل MFFPI وزن بیشتری دارند. در شکل (۲-الف)، وضعیت شیب زمین برحسب درجه برای حوضه آبخیز خیاوچای نشان داده شده است. در این تصویر، نواحی

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

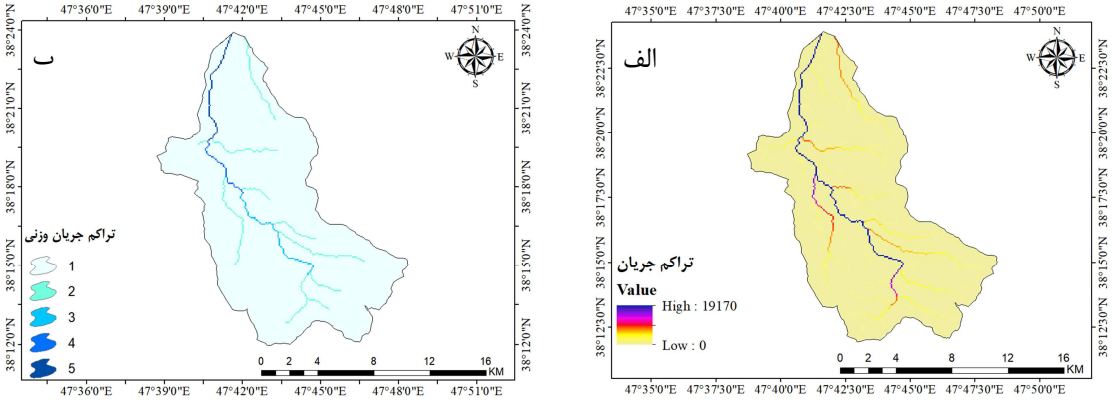
مرتفع‌تر که در غرب و جنوب‌شرق منطقه قرار دارند، شیبی بیش از ۵۱ درجه دارند، درحالی‌که بخش‌های مرکزی و شمالی حوضه هموارتر شده‌اند. نقشه وزن‌دهی این پارامتر در شکل (۲-ب) در پنج کلاس ارائه شده است. در این نقشه، مناطق هموار در شمال و مرکز حوضه بالاترین امتیاز را دریافت کرده‌اند، که نشان‌دهنده ظرفیت بالای نگهداشت آب در این نواحی است. در مقابل، با حرکت به سمت مناطق مرتفع‌تر، امتیاز این کلاس‌ها کاهش یافته است. نتایج به‌دست‌آمده با یافته‌های پژوهشگرانی مانند عابدینی و همکاران (۱۴۰۴) و رضایی‌مقدم و همکاران (۱۴۰۰) هم‌راستاست. این پژوهشگران بیان کرده‌اند که در مناطق ناهموار و مرتفع، شدت رواناب افزایش می‌یابد، در حالی که در نواحی هموار، تجمع آب بیشتر می‌شود.



شکل ۲: الف) نقشه شیب حوضه آبخیز خیاوچای، ب)نقشه وزنی شیب حوضه آبخیز خیاوچای. *منبع: یافته‌های تحقیق*

تراکم جریان در آبراهه‌ها و فاصله از آن‌ها تأثیر قابل‌توجهی بر وقوع سیلاب و حجم رواناب دارد. مطابق شکل (۳، الف)، وضعیت این پارامتر برای حوضه آبخیز خیاوچای نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با کاهش ارتفاع از جنوب به شمال حوضه، پراکندگی آبراهه‌های فرعی در ارتفاعات جنوبی منجر به تجمیع جریان و شکل‌گیری آبراهه اصلی در بخش شمالی شده است. نتایج وزن‌دهی نشان می‌دهد که آبراهه‌های فرعی کمترین امتیاز را در وقوع سیلاب دارند، درحالی‌که آبراهه اصلی در شمال حوضه بیشترین تأثیر را دارد. انتظار می‌رود که در هنگام بارش‌های شدید، نواحی با تراکم بالای آبراهه‌ها حجم بیشتری از رواناب را جمع‌آوری و هدایت کنند که ممکن است حتی منجر به سرریز شدن جریان شود. این وضعیت همچنین می‌تواند به فرسایش بیشتر خاک دامن بزند. در مقابل، در مناطق جنوبی، شرقی و غربی حوضه که فاقد آبراهه هستند، آب فرصت بیشتری برای نفوذ در خاک دارد و در نتیجه، خطر وقوع سیلاب در این بخش‌ها کاهش می‌یابد. نتایج به‌دست‌آمده با یافته‌های فرضی و همکاران (۱۴۰۱) هم‌راستاست. آن‌ها بیان کرده‌اند که تراکم بیشتر آبراهه‌ها با افزایش رواناب همراه است و این امر از طریق تقویت قدرت جریان در آبراهه‌های پایین‌دست، به افزایش فرسایش منجر می‌شود.

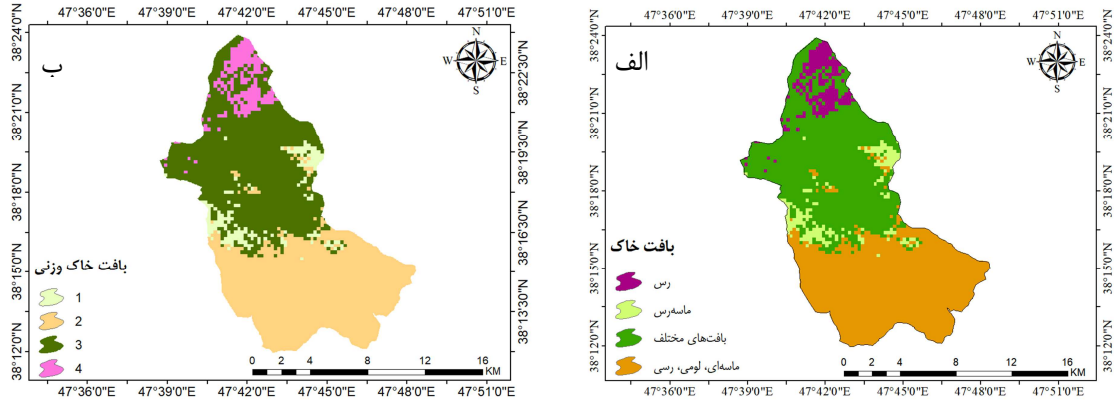
این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفا برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.



شکل ۳: الف) نقشه تراکم جریان حوضه آبخیز خیاوچای، ب) نقشه وزنی تراکم جریان حوضه آبخیز خیاوچای. *منبع: یافته‌های تحقیق*

نوع خاک تأثیر بسزایی در وقوع سیلاب دارد، زیرا ویژگی‌های فیزیکی آن مانند نفوذپذیری، ظرفیت نگهداری آب و سرعت جریان آب را تعیین می‌کند. بر اساس نقشه خاک استخراج‌شده از پایگاه داده USDA، چهار نوع خاک عمده در حوضه آبخیز خیاوچای شناسایی شده است (شکل ۴، الف). طبق امتیازدهی جدول ۱، در شکل (ب) مشاهده می‌شود که خاک‌های رسی، که در بخش شمالی حوضه غالب هستند، به دلیل داشتن ذرات ریز و ساختار فشرده، بالاترین امتیاز را در ارزیابی کسب کرده‌اند. در بخش مرکزی حوضه، ترکیبی از بافت‌های متنوع خاک مشاهده می‌شود که بر اساس نظام امتیازدهی، پس از خاک‌های رسی در رتبه دوم قرار گرفته‌اند. با این حال، در نواحی جنوبی حوضه، خاک‌های ماسه‌ای، لومی و رسی از گستردگی بیشتری برخوردارند؛ این خاک‌ها به دلیل ویژگی‌های ساختاری خود، پس از بافت‌های متنوع مرکزی، امتیاز بالایی را به خود اختصاص داده‌اند. در مقابل، خاک‌های ماسه‌رسی، به دلیل ظرفیت متوسط نگهداری آب و تأثیر کمتر بر جریان سطحی، کمترین امتیاز را به دست آورده‌اند و به‌صورت پراکنده در مناطق غربی و شرقی حوضه دیده می‌شوند. بر این اساس، می‌توان استنباط کرد که بخش شمالی حوضه آبخیز خیاوچای، به دلیل ویژگی‌های خاک غالب، مستعد تولید رواناب و وقوع سیلاب است. این نتایج با یافته‌های رضایی‌مقدم و همکاران (۱۴۰۲) هم‌راستاست؛ ایشان نیز خاک‌های ماسه‌ای‌رسی، ماسه‌ای‌لومی‌رسی، بافت‌های متنوع و خاک‌های رسی را به ترتیب در کلاس‌های ۱ تا ۴ دسته‌بندی کرده‌اند.

آماده انتشار (بدون شماره مجله)

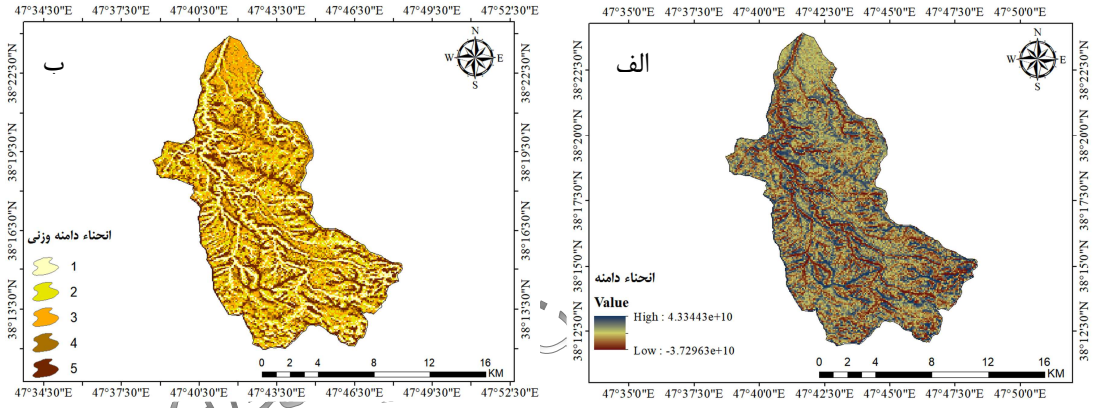


شکل ۴: الف) نقشه بافت خاک حوضه آبخیز خیاوچای، ب) نقشه وزنی بافت خاک حوضه آبخیز خیاوچای. *منبع: یافته‌های تحقیق*

انحنای دامنه تأثیر قابل‌توجهی بر جریان آب، تجمع رواناب و میزان نفوذ آن به خاک دارد. دامنه‌های محدب که به‌صورت قله‌ای شکل هستند، رواناب زیادی تولید می‌کنند اما مستعد تجمع آب نیستند. در مقابل، دامنه‌های مقعر

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

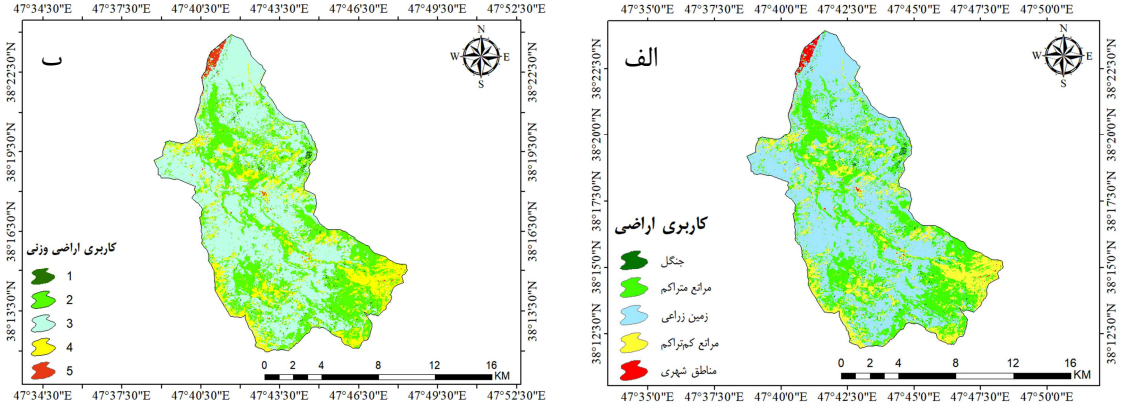
که به شکل فرورفتگی‌هایی مانند دره‌ها هستند، شرایط مساعدتری برای تجمع آب دارند. بر این اساس، در مدل MFFPI بیشترین امتیاز به انحنای مقعر (مقادیر مثبت) و کمترین امتیاز به انحنای محدب (مقادیر منفی) اختصاص داده می‌شود. شکل (۵، الف) وضعیت انحنای دامنه در حوضه آبخیز خیاوچای را نمایش می‌دهد. همچنین، مطابق نقشه وزن‌دهی این پارامتر در شکل (ب)، دامنه‌های مقعر که با رنگ قهوه‌ای تیره مشخص شده‌اند، به‌عنوان نواحی مستعد تجمع آب شناخته می‌شوند، به‌ویژه در بخش‌هایی که در مجاورت آبراهه اصلی قرار گرفته‌اند. در هنگام بارش‌های سنگین و جریان شدید رواناب، این دامنه‌ها می‌توانند محل تجمع حجم قابل‌توجهی از آب شوند. در چنین شرایطی، اگر خاک این مناطق نیز نفوذپذیری پایینی داشته باشد، نقش مضاعفی در نگهداشت آب ایفا خواهد کرد و احتمال وقوع سیلاب را افزایش می‌دهد. این یافته با نتایج پژوهش پروین (۱۳۹۹) هم‌راستاست. وی بیان کرده است که در نواحی محدب، سرعت رواناب افزایش می‌یابد و این امر به کاهش انباشت آب منجر می‌شود؛ در مقابل، در نواحی مقعر، سرعت رواناب کاهش می‌یابد و در نتیجه، انباشت آب و احتمال وقوع سیل افزایش می‌یابد.



شکل ۵: الف) نقشه انحناء دامنه حوضه آبخیز خیاوچای، ب) نقشه وزنی انحناء دامنه حوضه آبخیز خیاوچای. *منبع: یافته‌های تحقیق*

نوع پوشش زمین و فعالیت‌های انسانی نقش مهمی در وقوع و کنترل سیلاب ایفا می‌کنند. وضعیت کاربری اراضی حوضه آبخیز خیاوچای، با دقت کلی ۸۲ درصد، در شکل (۶، الف) نمایش داده شده است. بر اساس این نقشه، پنج کلاس کاربری شامل جنگل، مراتع متراکم، زمین زراعی، مراتع کم‌تراکم و مناطق شهری تفکیک شده‌اند که مساحت هر یک به‌ترتیب برابر با (۱/۳۸، ۴۸/۱۶، ۷۷/۸۷، ۲۲/۶۴، ۱/۳۳) کیلومترمربع است. در این میان، زمین‌های زراعی بیشترین مساحت را داشته، درحالی‌که کمترین مساحت مربوط به مناطق شهری است. پس از امتیازدهی کاربری اراضی (شکل ب)، مشخص شد که مناطق شهری در شمال حوضه، به دلیل سطوح نفوذناپذیری مانند آسفالت و بتن، بیشترین تأثیر را بر وقوع سیلاب دارند. پس از آن، مناطق کم‌تراکم، به‌ویژه در مرکز و جنوب حوضه، به دلیل فقدان پوشش گیاهی و ماهیت بایر زمین، شرایط مساعدی برای تشدید سیلاب دارند و امتیاز بالایی در مدل MFFPI دریافت کرده‌اند. در مقابل، مناطقی که پوشش جنگلی و گیاهی متراکم دارند، با جذب آب و کاهش رواناب، نقش مؤثری در کنترل سیلاب ایفا می‌کنند. به همین دلیل، این مناطق کمترین امتیاز را در مدل MFFPI کسب کرده‌اند. نتایج به‌دست‌آمده با یافته‌های پروین (۱۳۹۸) هم‌راستاست که بیان کرده است نواحی جنگلی کمترین امتیاز را دارند، در حالی که نواحی شهری، رخنمون‌های سنگی و زمین‌های بایر بیشترین امتیاز را به خود اختصاص داده‌اند.

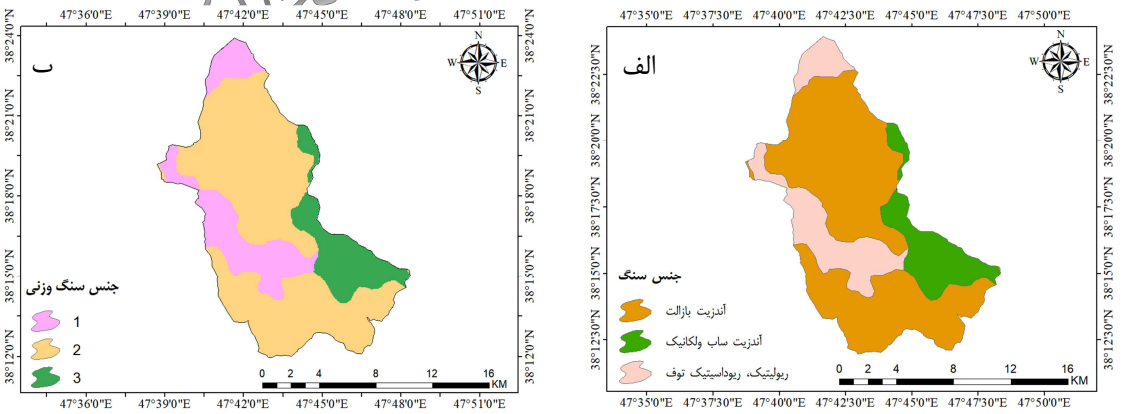
این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفا برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.



شکل ۶: الف) نقشه کاربری اراضی حوضه آبخیز خیاوچای، ب) نقشه وزنی کاربری اراضی حوضه آبخیز خیاوچای. *منبع: یافته‌های تحقیق*

نوع سنگ تأثیر مستقیمی بر نفوذپذیری، مقاومت در برابر فرسایش و جریان آب دارد. مطابق (شکل ۷، الف)، در حوضه آبخیز خیاوچای سه نوع سنگ شامل اندزیت بازالت، اندزیت ساب‌ولکانیک و ریولیتیک ریوداسیتیک توف شناسایی شده است. این سنگ‌ها عمدتاً از نوع آذرین سخت تا اسیدی هستند و بخش غالب سازند زمین‌شناسی منطقه را تشکیل می‌دهند. در مدل MFFPI، این نوع سنگ‌ها بالاترین وزن را در مقایسه با دیگر انواع سنگ دریافت کرده‌اند. به دلیل ساختار نفوذپذیری پایین آن‌ها، آب به‌سختی در این سازندها نفوذ می‌کند که این امر موجب افزایش رواناب سطحی و در نتیجه مستعد شدن کل منطقه حوضه آبخیز خیاوچای برای وقوع سیلاب می‌شود. این یافته‌ها با نتایج قره‌خانی و همکاران (۱۴۰۱)، هم‌راستا است؛ آن‌ها نیز بیان کرده‌اند که سنگ‌ها یا سازندهای با نفوذپذیری پایین، به‌ویژه انواع آذرین، رواناب سطحی را افزایش می‌دهند و در نتیجه، پتانسیل وقوع سیلاب را در حوضه‌های آبخیز تشدید می‌کنند.

آماده انتشار (بدون شماره مجله)

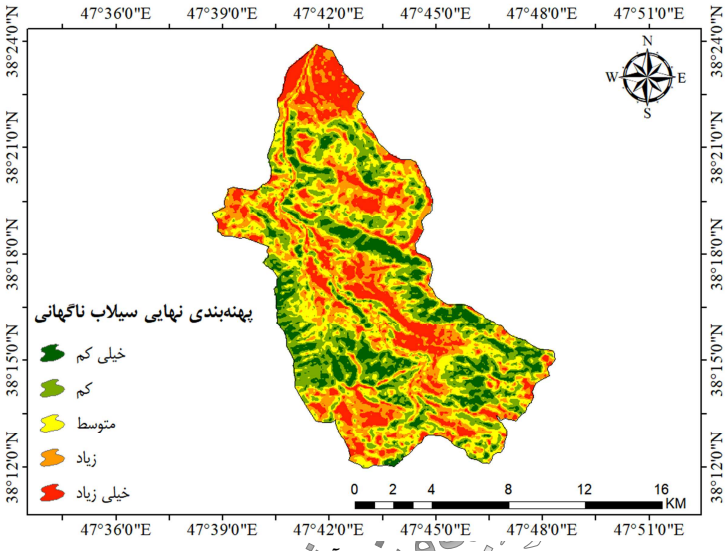


شکل ۷: الف) نقشه جنس سنگ حوضه آبخیز خیاوچای، ب) نقشه وزنی جنس سنگ حوضه آبخیز خیاوچای. *منبع: یافته‌های تحقیق*

پهنه‌بندی نهایی خطر سیلاب ناگهانی در حوضه آبخیز خیاوچای با استفاده از مدل MFFPI در شکل ۸، نمایش داده شده است. این پهنه‌بندی شامل پنج طبقه از پتانسیل خطر بسیار کم تا بسیار زیاد است. بر اساس این نقشه، مناطق شمالی و بخش‌هایی از مرکز و جنوب حوضه، به‌صورت پراکنده، در معرض خطر سیلاب با شدت بسیار زیاد قرار دارند. طبق جدول ۲، این کلاس ۱۷/۳۳ کیلومترمربع، معادل ۱۲/۶۱ درصد از کل منطقه را پوشش می‌دهد. در این نواحی، عواملی مانند شیب کم، اراضی مسکونی شهری و روستایی و دامنه‌های مقعر، که در مدل MFFPI بالاترین امتیاز را داشته‌اند، باعث افزایش احتمال وقوع سیلاب شده‌اند. علاوه بر این، مناطقی که در طبقات خطر زیاد، متوسط و کم

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

قرار دارند، به ترتیب دارای مساحت ۳۳/۶۰، ۳۳/۹۳ و ۳۴/۱۸ کیلومترمربع هستند. در مقابل، نواحی با خطر سیلابی بسیار کم عمدتاً در نوارهای غربی، شرقی، جنوب‌شرقی و برخی بخش‌های نیمه شمالی حوضه به‌صورت پراکنده دیده می‌شوند. این مناطق، که حدود ۱۷/۳۶ کیلومترمربع (۱۲/۶۳ درصد از منطقه) را شامل می‌شوند، معمولاً دارای شیب زیاد، پوشش جنگلی متراکم و خاک ماسه‌رسی بوده و به دلیل نفوذپذیری بالاتر، پتانسیل کمتری برای وقوع سیلاب دارند.



شکل ۸: نقشه نهایی سیلاب ناگهانی حوضه آبخیز خیاوچای. *منبع: یافته‌های تحقیق*

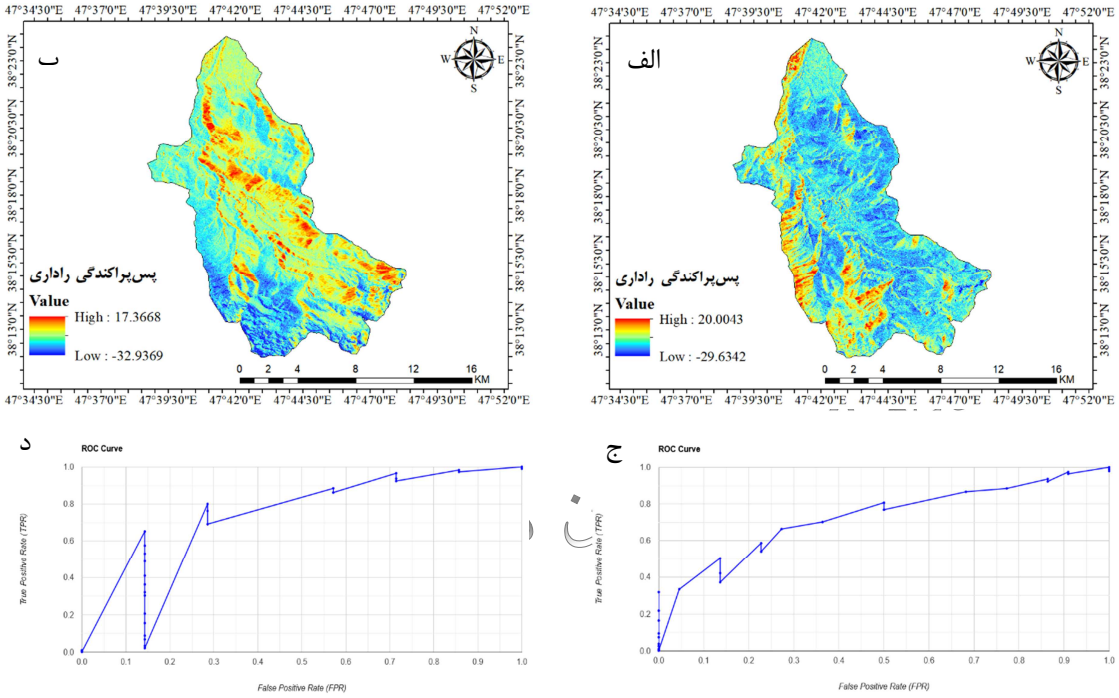
جدول ۲: مساحت و درصد پهنه‌های سیلابی در حوضه آبخیز خیاوچای. *منبع: یافته‌های تحقیق*

پهنه سیلاب	مساحت (کیلومتر مربع)	درصد
خیلی کم	۱۷/۳۶	۱۲/۶۳
کم	۳۴/۱۶	۲۴/۸۶
متوسط	۳۳/۹۳	۲۴/۶۹
زیاد	۳۴/۶۰	۲۵/۱۸
خیلی زیاد	۱۷/۳۳	۱۲/۶۱

به منظور ارزیابی دقت مدل MFFPI در شناسایی نواحی سیلابی، دو مورد از سیلاب‌های رخ‌داده در منطقه که باعث افزایش دبی جریان به بیش از ۴ مترمکعب بر ثانیه شده بودند، مورد بررسی قرار گرفتند. برای این منظور، از منحنی ROC جهت سنجش عملکرد مدل استفاده شد. شکل (۹، الف) بازتاب انرژی از سطح زمین را که توسط ماهواره سنتینل ۱ در روزهای ۱۴ تا ۱۹ جولای ۲۰۲۰ ثبت شده است، نمایش می‌دهد. در این دوره، مناطق خشک که دارای مقادیر بازتاب مثبت بودند، بیشینه ۲۰ دسی‌بل را در شمال‌غرب و جنوب‌غرب حوضه نشان دادند. در مقابل، نیمه شرقی حوضه که بیشتر در معرض سیلاب قرار گرفته بود، کمترین بازتاب انرژی را با مقدار ۲۹/۶۳- دسی‌بل ثبت کرد. در سیلاب دوم (شکل، ب)، که در بازه ۶ تا ۱۰ ژوئن ۲۰۲۰ رخ داده و دبی جریان مجدداً از ۴ مترمکعب بر ثانیه فراتر رفته بود، الگوی تأثیر سیلاب تغییر کرد. در این دوره، مناطق جنوب‌غربی بیشترین تأثیر را از سیلاب

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

پذیرفتند و مقدار بازتاب راداری برای این نواحی به ۳۲/۹۳- دسی‌بل کاهش یافت که نشان‌دهنده پوشش آبی در این منطقه بود. برعکس، مناطق مرکزی این بار جزو نواحی خشک محسوب شده و مقدار بازتاب انرژی در آن‌ها به ۱۷/۳۶ دسی‌بل افزایش یافت. در اشکال (ج) و (د)، عملکرد مدل MFFPI با استفاده از منحنی ROC بررسی شده است. نتایج این تحلیل نشان داد که مدل توانایی نسبتاً خوبی در تفکیک مناطق سیلابی از نواحی خشک دارد، به‌طوری که مقدار AUC برای دوره اول ۰/۷۳۸ و برای دوره دوم ۰/۷۲۵ به دست آمد. این مقادیر نشان‌دهنده دقت قابل قبول مدل در پیش‌بینی نواحی مستعد سیلاب است.



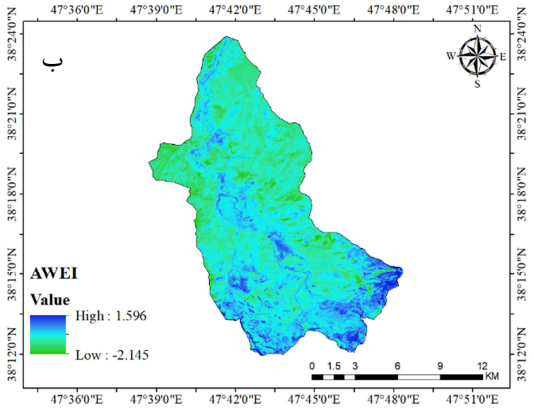
شکل ۹: نقشه الف) وضعیت سیلاب مؤرخه ۲۰۲۰/۰۷/۱۴، ب) سیلاب مؤرخه ۲۰۲۰/۰۶/۰۶، ج) منحنی ROC برای مقایسه مدل MFFPI با سیلاب مؤرخه ۲۰۲۰/۰۷/۱۴، د) منحنی ROC برای مقایسه مدل MFFPI با سیلاب مؤرخه ۲۰۲۰/۰۶/۰۶. *منبع: یافته‌های تحقیق*

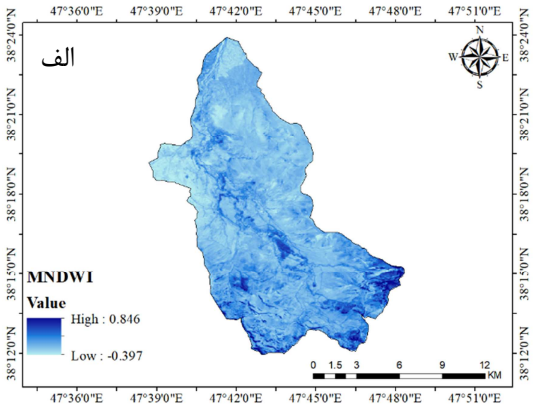
در شکل ۱۰، وضعیت شاخص‌های طیفی مختلف که برای شناسایی سطوح آبی مانند رودخانه‌ها، دریاچه‌ها و مناطق رطوبتی کاربرد دارند، نمایش داده شده است. یکی از این شاخص‌ها، MNDWI، به‌عنوان شاخصی موثر در شناسایی آب‌های سطحی شناخته می‌شود. وضعیت این شاخص در شکل (۱۰، الف) برای دوره ۲۰۲۳-۲۰۱۳ نشان داده شده است. بر اساس نتایج، مقدار MNDWI در مناطق جنوب‌شرق، جنوب‌غرب و جنوب حوضه، همچنین در نواحی نزدیک به آبراهه اصلی، به حداکثر مقدار خود یعنی ۰/۸۴۶ رسیده است که نشان‌دهنده حضور منابع آبی در این بخش‌ها است. در مقابل، در نیمه غربی و شرقی حوضه، شاخص مقدار کمتری را نشان می‌دهد که بیانگر فقدان منابع آبی در این مناطق است. شاخص طیفی دیگر که برای شناسایی آب در محیط‌های پیچیده به‌ویژه در مناطقی با پوشش گیاهی و ویژگی‌های متفاوت استفاده می‌شود، AWEI است. وضعیت این شاخص برای حوضه آبخیز خیاوچای در شکل (ب) برای دوره مذکور نشان داده شده است. شاخص AWEI مشابه با MNDWI، مناطق با سطوح آبی جمع شده را به‌طور واضح‌تری نشان می‌دهد و در این مورد، بیشینه آن در نزدیکی آبراهه اصلی و در نیمه جنوبی حوضه با

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

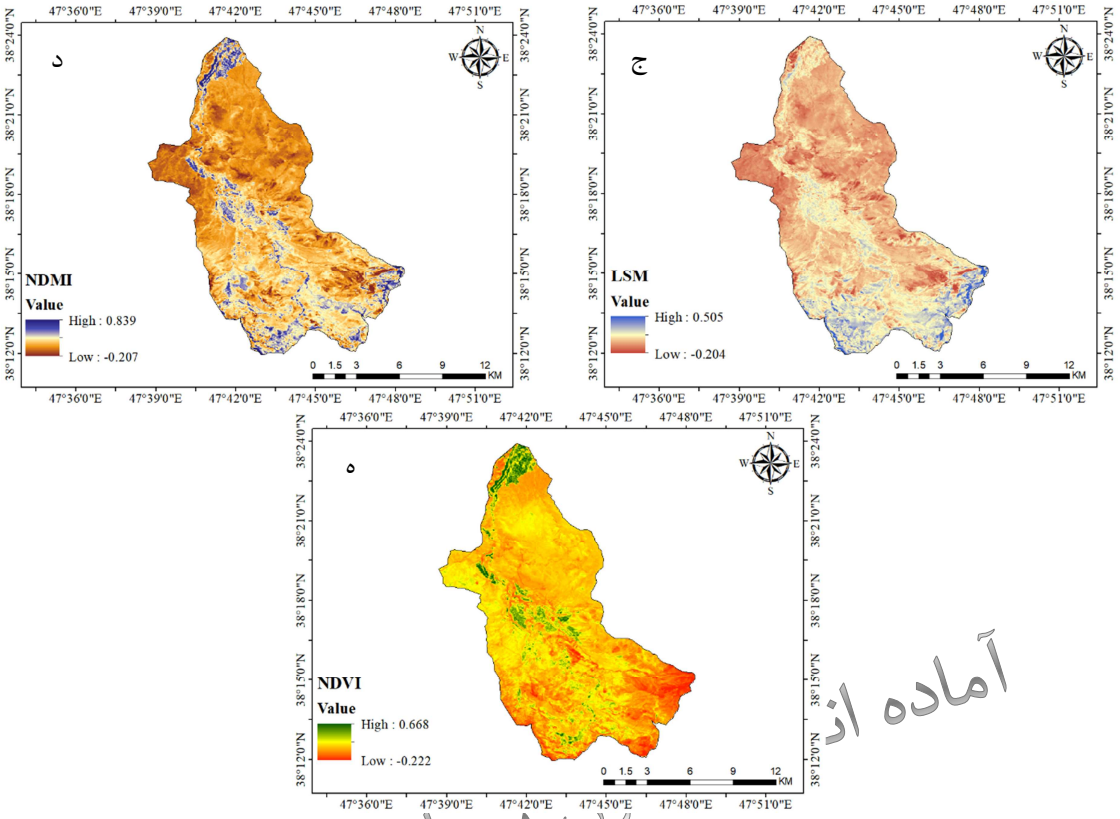
مقدار ۱/۵۹۶ مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده حضور آب در این نواحی است. در مقابل، در نیمه غربی و شرقی حوضه، مقدار این شاخص به کمترین مقدار خود یعنی ۲/۱۴۵- رسیده است، که نشان‌دهنده عدم وجود منابع آبی در این مناطق است. برای اندازه‌گیری رطوبت سطح زمین از شاخص LSM استفاده شده است که وضعیت آن در شکل (ج) قابل مشاهده است. بیشینه این شاخص با مقدار ۰/۵۰۵ در جنوب حوضه نشان‌دهنده رطوبت بالای خاک در این منطقه است. در صورتی که بارش‌های شدید رخ دهد، این مناطق سریع‌تر اشباع شده و به تبع آن رواناب ایجاد می‌شود. بنابراین، این بخش از حوضه می‌تواند مستعد سیلاب باشد. این وضعیت همچنین در نواحی نزدیک به آبراهه اصلی حوضه آبخیز خیاوچای نیز مشاهده می‌شود، هرچند که به مقدار کمتری در این نواحی وجود دارد. در مقابل، به سمت نیمه غربی و شرقی حوضه، خاک مناطق خشک‌تر شده و مقدار شاخص به مقادیر منفی (۰/۲۰۴-) کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده خشکی خاک در این مناطق است. در این نواحی، در صورت وقوع بارش‌های شدید، خاک دیرتر اشباع شده و رواناب کمتری تولید می‌شود. برای اندازه‌گیری رطوبت خاک و محتوای آب در پوشش گیاهی از شاخص NDMI استفاده شده است که وضعیت آن در شکل (د) قابل مشاهده است. این شاخص در نواحی شمالی، جایی که تراکم پوشش گیاهی بالاست، و همچنین در مرکز و جنوب حوضه، رطوبت بالای خاک و گیاهان را نشان می‌دهد و پتانسیل قابل توجهی برای تولید رواناب در هنگام بارش‌های شدید دارند. در مقابل، در نیمه شرقی و غربی حوضه، رطوبت خاک و پوشش گیاهی به طور چشمگیری کاهش یافته و مقدار شاخص به ۰/۲۰۷- رسیده است، که این کاهش رطوبت در این نواحی را به وضوح نشان داده است. در شکل (ه)، برای ارزیابی تراکم پوشش گیاهی حوضه مورد مطالعه از شاخص NDVI استفاده شده است. همانطور که از شکل مشخص است، در بخش شمالی حوضه، که شامل زمین‌های زراعی و نزدیکی به آبراهه اصلی است، تراکم پوشش گیاهی به طور قابل توجهی افزایش یافته است. در این مناطق، شاخص NDVI سبزینگی گیاهان را با مقدار بیشینه ۰/۶۶۸ نمایش می‌دهد که نشان‌دهنده پوشش گیاهی غنی و سالم است. در مقابل، در نیمه شرقی و غربی حوضه، به ویژه در جنوب حوضه، که به ارتفاعات نزدیک‌تر است و به دلیل شرایط اقلیمی و توپوگرافی، پوشش گیاهی کاهش یافته، شاخص NDVI کمینه خود را به مقدار ۰/۲۲۲- نشان می‌دهد. این مقادیر نشان‌دهنده فقدان پوشش گیاهی و شرایط خشک‌تر در این نواحی است.

آماده انتشار (بدون شماره مجله)





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



شکل ۱۰: نقشه‌های شاخص طیفی، الف) MNDWI، ب) AWEI، ج) LSM، د) NDMI، ه) NDVI حوضه آبخیز خیاوچای. *منبع: یافته‌های تحقیق*

آماده از
(در شماره مجله)

تحلیل هم‌بستگی MFFPI با شاخص‌های طیفی در جدول ۳، نشان می‌دهد که این شاخص با MNDWI و AWEI به ترتیب با مقدار ۰/۰۸۹- و ۰/۰۳۶- هم‌بستگی منفی و معنادار در سطح ۹۹ درصد اطمینان دارد. این امر نشان می‌دهد که با افزایش مقدار این دو شاخص که نشان‌دهنده سطوح آبی سطحی پایدار مانند رودخانه‌ها و دریاچه‌ها هستند، مقدار MFFPI کاهش می‌یابد. دلیل این رابطه منفی آن است که مناطق دارای منابع آبی سطحی پایدار، به دلیل امکان ذخیره‌سازی و جذب آب، کمتر در معرض خطر سیلاب ناگهانی قرار دارند. در مقابل، MFFPI با شاخص‌های LSM، NDMI و NDVI به ترتیب با مقادیر ۰/۰۷۵، ۰/۰۹۴ و ۰/۱۵۶ هم‌بستگی مثبت و معنادار در سطح ۹۹ درصد اطمینان دارد. این رابطه مثبت نشان می‌دهد که افزایش رطوبت خاک (LSM) و رطوبت پوشش گیاهی (NDMI) باعث افزایش پتانسیل رواناب و سیلاب‌های ناگهانی می‌شود، زیرا در شرایط اشباع، خاک دیگر قادر به جذب آب اضافی نبوده و رواناب سطحی تشدید می‌شود. همچنین، رابطه مثبت با NDVI نشان می‌دهد که در برخی مناطق، پوشش گیاهی متراکم می‌تواند منجر به اشباع بیشتر خاک و در نتیجه افزایش خطر سیلاب ناگهانی شود.

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

جدول ۳: هم‌بستگی مقادیر شاخص‌های طیفی مورد مطالعه با میزان سیلاب ناگهانی در حوضه آبخیز خیاوچای. *منبع: یافته‌های تحقیق*

	NDVI	NDMI	LSM	AWEI	MNDWI	MFFPI
	۰/۱۵۶**	۰/۰۹۴**	۰/۰۷۵**	-۰/۰۳۶**	-۰/۰۸۹**	
* اطمینان در سطح ۹۵ درصد ** اطمینان در سطح ۹۹ درصد						

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که حوضه آبخیز خیاوچای تحت تأثیر عواملی چون شیب زمین، تراکم جریان، نوع خاک، انحنای دامنه، کاربری اراضی و نوع سنگ، سطوح متفاوتی از خطر سیلاب را تجربه می‌کند. تحلیل فاکتورهای مدل MFFPI نشان می‌دهد که مناطق کم‌شیب در مرکز و شمال حوضه به دلیل ظرفیت بالای نگهداشت آب، پتانسیل بیشتری برای ایجاد رواناب دارند، در حالی که نواحی مرتفع‌تر در شرق و غرب حوضه به دلیل سرعت بالای جریان کمتر مستعد تجمع آب هستند. بررسی تأثیر تراکم جریان نشان داد که آبراهه اصلی در بخش شمالی حوضه بیشترین تأثیر را در وقوع سیلاب دارد. خاک‌های رسی و بافت‌های مختلف در نیمه شمالی حوضه به دلیل نفوذپذیری پایین، مستعد ایجاد رواناب بوده و خطر سیلاب را افزایش می‌دهند. در مقابل، خاک‌های ماسه‌رسی در غرب و شرق حوضه با توانایی بیشتر در جذب آب، پتانسیل کمتری برای تشدید رواناب دارند. در تحلیل انحنای دامنه، دامنه‌های مقعر به‌ویژه در مجاورت آبراهه‌های اصلی به‌عنوان مناطق مستعد تجمع رواناب شناسایی شدند. همچنین، در مناطقی با کاربری‌های اراضی نفوذناپذیر، به‌ویژه در نواحی شهری شمال حوضه، خطر وقوع سیلاب افزایش می‌یابد. در عین حال، پوشش جنگلی و مراتع متراکم نقش مؤثری در کاهش رواناب و کنترل سیلاب دارند. تحلیل زمین‌شناسی نیز نشان داد که وجود سنگ‌های آذرین سخت در کل منطقه، به‌دلیل نفوذپذیری پایین، مانع جذب آب شده و رواناب سطحی را افزایش می‌دهند. در نهایت، نقشه نهایی سیلاب ناگهانی نشان داد که مناطق شمالی و برخی نواحی مرکزی و جنوبی حوضه بالاترین خطر وقوع سیلاب را دارند. این نواحی به دلیل ترکیب عواملی مانند شیب کم، تراکم بالای آبراهه‌ها و کاربری‌های نفوذناپذیر، بیشترین استعداد برای وقوع رواناب و تشدید سیلاب دارند. نتایج حاصل از ارزیابی دقت مدل MFFPI نشان می‌دهد که این مدل توانایی مطلوبی در شناسایی و تفکیک نواحی سیلابی از مناطق خشک دارد. مقدار AUC در منحنی ROC برای دو دوره سیلابی مورد بررسی، به ترتیب ۰/۷۳۸ و ۰/۷۲۵ به دست آمد که نشان‌دهنده عملکرد نسبتاً قابل قبول مدل در پیش‌بینی نواحی مستعد سیلاب بوده است. نتایج تحلیل شاخص‌های طیفی (MNDWI, AWEI, LSM, NDMI, NDVI) نشان داد که پراکنش منابع آبی، میزان رطوبت خاک و پوشش گیاهی تأثیر مستقیمی بر پتانسیل وقوع سیلاب دارند. شاخص‌های MNDWI و AWEI، که نشان‌دهنده حضور منابع آبی سطحی هستند، در مناطق جنوبی، و نواحی نزدیک به آبراهه اصلی بیشینه مقدار خود را نشان دادند، در حالی که در نیمه غربی و شرقی حوضه مقادیر این شاخص‌ها کاهش یافته است. شاخص LSM، که میزان رطوبت خاک را نمایش می‌دهد، در بخش‌های جنوبی حوضه بیشترین مقدار را داشته که نشان‌دهنده احتمال بالاتر اشباع خاک و افزایش خطر سیلاب است. تحلیل شاخص NDMI نشان داد که مناطق شمالی و بخش‌هایی از مرکز و جنوب حوضه دارای رطوبت بالای خاک و پتانسیل بالا برای تولید رواناب در هنگام بارش‌های شدید هستند. همچنین، شاخص NDVI بیانگر پوشش گیاهی متراکم‌تر در بخش‌های شمالی است، در حالی که در نواحی مرتفع‌تر جنوب حوضه، مقدار این شاخص کاهش یافته و نشان‌دهنده کاهش تراکم پوشش گیاهی و خشکی بیشتر خاک است.

آماده انتشار (بدون شماره صفحه)

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

نتایج تحلیل همبستگی شاخص‌های طیفی با مدل MFFPI نشان داد که شاخص‌های MNDWI و AWEI با مقدار MFFPI همبستگی منفی دارند، به این معنی که نواحی دارای منابع آبی پایدار کمتر در معرض خطر سیلاب قرار دارند. در مقابل، شاخص‌های LSM، NDMI و NDVI همبستگی مثبت با مقدار MFFPI دارند، که نشان می‌دهد افزایش رطوبت خاک و پوشش گیاهی می‌تواند منجر به افزایش رواناب سطحی و تشدید سیلاب‌های ناگهانی شود.

یافته‌های این پژوهش با نتایج تینکو و همکاران (۲۰۱۸) در اولویت‌بندی مناطق کم‌شیب، تحلیل عابدینی و همکاران (۱۴۰۴) و فرضی و همکاران (۱۴۰۱) در خصوص نقش تراکم آبراهه‌ها، و طبقه‌بندی خاک در مطالعه رضایی‌مقدم و همکاران (۱۴۰۲) هم‌راستا است. همچنین، اثر مثبت انحنای مقعر و پوشش‌های نفوذناپذیر در افزایش پتانسیل وقوع سیلاب، با نتایج مطالعات پروین (۱۳۹۸، ۱۳۹۹) مطابقت دارد. نقش سازندهای زمین‌شناسی نفوذناپذیر نیز در افزایش خطر سیل، مطابق یافته‌های قره‌خانی و همکاران (۱۴۰۱) تأیید شده است. این هم‌سویی نتایج، اعتبار مدل MFFPI را در ارزیابی خطر سیلاب تقویت می‌کند.

منابع

ابراهیمی، لیلا. (۱۳۹۹). تهیهٔ نقشهٔ مدیریت مخاطرات سیلاب با استفاده از الگوریتم نوین جنگل تصادفی (مطالعهٔ موردی: حوضهٔ آبخیز لواسانات). *مدیریت مخاطرات محیطی*، ۷(۲)، ۱۸۱-۱۹۶. https://doi.org/10.22059/jhsci.2020.307476.584

اسماعیلی، رضا، طاهری، مجید. (۱۴۰۱). ارزیابی مناطق مستعد خطر سیلاب با نگرش فازی، مطالعه موردی: پایین‌دست حوضهٔ آبریز نکا، استان مازندران. *مخاطرات محیط طبیعی*، ۱۱(۳۴)، ۱۴۵-۱۵۸. https://doi.org/10.22111/jneh.2022.39817.1842

امیری، خدیجه، سیدکابلی، حسام، محمودی کهن، فرهاد. (۱۴۰۰). مطالعه و پایش تغییرات سطح آب و تأثیر آن بر دمای سطح تالاب با استفاده از شاخص‌های NDWI، MNDWI و AWEI (مطالعه موردی: تالاب‌های شادگان و هورالعظیم). *علوم و مهندسی آبیاری*، ۴۴(۴)، ۵۹-۷۴. https://doi.org/10.22055/jise.2020.31854.1898

پروین، منصور. (۱۳۹۸). ارزیابی و پهنه‌بندی خطر سیلاب‌های ناگهانی براساس مدل MFFPI (مطالعه موردی: حوضهٔ اسلام‌آباد غرب). *مدیریت مخاطرات محیطی*، ۶(۲)، ۱۶۹–۱۸۴. https://doi.org/10.22059/jhsci.2019.283544.480

پروین، منصور. (۱۳۹۹). ارزیابی و پهنه‌بندی خطر سیلاب‌های ناگهانی بر اساس عوامل فیزیوگرافی و شاخص‌های مورفومتریک (مطالعه موردی: حوضهٔ قصرشیرین). *جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی*، ۳۱(۲)، ۸۹-۱۰۴. https://doi.org/10.22108/gep.2020.119766.1221

حسینی چمنی، فرشید، فرخیان فیروزی، احمد، عامری خواه، هادی. (۱۳۹۸). تابع انتقالی به منظور برآورد رطوبت خاک به کمک شاخص‌های پوشش گیاهی، دمای سطح خاک و شاخص نرمال شده رطوبت. *مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*، ۲۶(۴)، ۲۳۹-۲۵۴. https://doi.org/10.22069/jwsc.2019.15306.3053

رضایی مقدم، محمد حسین، کرمی، فریبا، اباذری، کلثوم. (۱۴۰۲). ارزیابی و پهنه‌بندی خطر سیلاب ناگهانی در حوضهٔ آبریز اوجان چای با استفاده از مدل MFFPI. *هیدروژئومورفولوژی*، ۱۰(۳۶)، ۱۵۷-۱۳۸. https://doi.org/10.22034/hyd.2023.57462.1701

رضائی مقدم، محمدحسین، مختاری، داود، شفیعی مهر، مجید (۱۴۰۰). پهنه‌بندی خطر سیلاب در حوضه آبریز شهر چای میانه با استفاده از مدل ویکور. هیدروژئومورفولوژی، ۸(۲۸)، ۱۹-۳۷. https://doi.org/10.22034/hyd.2021.40169.1536

رنجبر، سعیده، کامیاب، حمیدرضا. (۱۳۹۹). ارزیابی ناهمگونی مکانی در کیفیت بوم‌شناختی با استفاده از فن‌آوری سنجش‌ازدور (مطالعه موردی: حوضهٔ آبخیز قره‌سو). *جغرافیا و مخاطرات محیطی*، ۹(۴)، ۱۴۵-۱۶۱. https://doi.org/10.22067/geoeh.2021.67026.0

عابدینی، موسی، بابایی اولم، طیبه، پاسبان، امیرحسام. (۱۴۰۳). ارزیابی و پهنه‌بندی خطر وقوع سیلاب با استفاده از مدل MFFPI (مطالعه موردی: حوضهٔ آبخیز شفارود، استان گیلان). *جغرافیا و روابط انسانی*، ۷(۱)، ۸۷۱-۸۲۱. https://doi.org/10.22034/gahr.2024.466493.2198

عابدینی، موسی، صبوری، حمیرا، پاسبان، امیرحسام. (۱۴۰۴). پهنه‌بندی خطر سیلاب و ارتباط آن با کاربری اراضی با استفاده از مدل فرایند تحلیل شبکه (مطالعه موردی: حوضه آبخیز رضی‌چای، استان اردبیل). *فصلنامه مطالعات توسعه پایدار شهری و منطقه‌ای*، ۶(۲)، ۶۸-۸۴. https://www.srds.ir/article_214387.html

آماده انتشار (پس از شماره مجله)

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

غیاثی، سید سعید، رجب‌زاده، فائزه، ناجی‌راد، سمیه، فیض‌نیا، سادات، نظری‌سامانی، علی‌اکبر. (۱۳۹۶). تعیین عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش‌های کم‌عمق در حوزه آبخیز خیاوچای. *مهندسی و مدیریت آبخیز*، ۹(۲)، ۱۴۰-۱۵۴. https://doi.org/10.22092/ijwmse.2017.109697

فرضی، حامد، بیات، اصغر، وکیلی تجره، فرزانه، رحمانی، مجید، اسدی نلیوان، امید. (۱۴۰۱). پهنه‌بندی حساسیت سیل در حوزه آبخیز سد کرج و تعیین عوامل مؤثر بر آن با استفاده از روش حداکثر آنتروپی. *مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران*، ۱۶(۵۹)، ۱-۱۱. http://jwmsei.ir/article-1-1029-fa.html

فلاح، فاطمه، زینی وند، حسین، طهماسبی‌پور، ناصر، حقی‌زاده، علی. (۱۴۰۲). تعیین مناطق مستعد سیل با استفاده از مدل تابع شواهد قطعی (مطالعه موردی: دشت سیلاخور در استان لرستان). *پژوهش‌های کاربردی مهندسی آب*، ۱(۲)، ۱۵۳-۱۶۶. https://arwe.lu.ac.ir/article_711979.html

قره‌خانی، مهدی، آقامحمدی، حسین، وحیدنیا، محمد حسن. (۱۴۰۱). تعیین محدوده خطر سیلاب با استفاده از تحلیل مکانی هیدرولوژیک در GIS و تفسیر تصاویر ماهواره‌ای: مطالعه موردی حوضه آبریز اهرچای. *پایداری، توسعه و محیط زیست*، ۲(۳)، ۶۷-۸۶. https://sanad.iau.ir/fa/Article/846656

قهرمان کاوه، زنگنه اسدی، محمدعلی. (۱۴۰۱). تعیین مناطق مستعد سیلاب با استفاده از تصاویر راداری Sentinel-1 (مطالعه موردی: سیلاب فروردین ۱۳۹۸، رودخانه کشکان، استان لرستان). *تحلیل فضایی مخاطرات محیطی*، ۹(۳)، ۱۰۳-۱۱۸. http://dorl.net/dor/20.1001.1.24237892.1401.9.3.7.7

کاکاوند، مائده، حقی‌زاده، علی، سلیمانی مطلق، مهدی. (۱۴۰۳). مقایسه شاخص‌های سنجش از دور در تعیین پهنه سیل حوضهٔ آبخیز دوآب ویسیان. *مخاطرات محیط طبیعی*، ۱۳(۴۰)، ۴۱-۵۶. https://doi.org/10.22111/jneh.2023.46291.1978

معیری، مسعود، آئتظاری، مژگان. (۱۳۸۷). سیلاب و مروری بر سیلاب‌های استان اصفهان. *مطالعات برنامه‌ریزی سکونتگاه‌های انسانی (چشم‌انداز جغرافیایی)*، ۳(۶)، ۱۰۹-۱۲۳. https://sanad.iau.ir/Journal/jshsp/Article/1032735

Albertini, C., Gioia, A., Iacobellis, V., & Manfreda, S. (2022). Detection of surface water and floods with multispectral satellites. *Remote Sensing*, 14(23), 6005. https://doi.org/10.3390/rs14236005

Ali, S. A., Parvin, F., Pham, Q. B., Vojtek, M., Vojteková, J., Costache, R., Linh, N. T. T., Nguyen, H. Q., Ahmad, A., & Ghorbani, M. A. (2020). GIS-based comparative assessment of flood susceptibility mapping using a hybrid multi-criteria decision-making approach, naïve Bayes tree, bivariate statistics and logistic regression: A case of Topl'a basin, *Slovakia*. *Ecological Indicators*, 117, Article 106620. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106620

Costache, R., Pham, Q. B., Sharifi, E., Linh, N. T. T., Abba, S. I., Vojtek, M., Vojteková, J., Nhi, P. T. T., & Khôi, Đ. N. (2020). Flash-flood susceptibility assessment using multi-criteria decision making and machine learning supported by remote sensing and GIS techniques. *Remote Sensing*, 12(1), 106. https://doi.org/10.3390/rs12010106

Kocsis, I., Bilașco, Ș., Irimuș, I.-A., Vasile, D., Rusu, R., & Roșca, S. (2022). Flash flood vulnerability mapping based on FFPI using GIS spatial analysis case study: Valea Rea catchment area, *Romania*. *Sensors*, 22(9), 3573. https://doi.org/10.3390/s22093573

Leskens, J. G., Brugnach, M., Hoekstra, A. Y., & Schuurmans, W. (2014). Why are decisions in flood disaster management so poorly supported by information from flood models?. *Environmental Modelling & Software*, 53, 53-61. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.11.003

Marković, M., Lukić, S., & Baumgerte, A. (2021). Use of Flash Flood Potential Index (FFPI) method for assessing the risk of roads to the occurrence of torrential floods - Part of the Danube Basin and PEK River Basin. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 11(4). https://doi.org/10.7708/ijtte2021.11(4).04

Mohd Yassin, N. A., Adnan, N. A., & Md Sadek, E. S. S. (2023). Analysis of flash flood potential index (FFPI) and scenarios assessment in Shah Alam using a GIS approach. *Planning Malaysia*, 21(26). https://doi.org/10.21837/pm.v21i26.1255

Popa, M. C., Simion, A. G., Peptenatu, D., Dima, C., Draghici, C. C., Florescu, M.-S., Dobrea, C. R., & Diaconu, D. C. (2020). Spatial assessment of flash-flood vulnerability in the Moldova river catchment (N Romania) using the FFPI. *Journal of Flood Risk Management*, 13(4), e12624. https://doi.org/10.1111/jfr3.12624

Shahabi, H., Shirzadi, A., Ghaderi, K., Omidvar, E., Al-Ansari, N., Clague, J. J., Geertsema, M., Khosravi, K., Amini, A., Bahrami, S., Rahmati, O., Habibi, K., Mohammadi, A., Nguyen, H., Melesse, A. M., Ahmad, B. B., & Ahmad, A. (2020). Flood detection and susceptibility mapping using Sentinel-1 remote sensing data and a machine learning approach: Hybrid intelligence of bagging ensemble based on K-nearest neighbour classifier. *Remote Sensing*, 12(2), 266; https://doi.org/10.3390/rs12020266

Shawaqfah, M., AlMomani, F., & Khatatbeh, A. (2020). Mapping flash flood potential and risk level using GIS techniques and the flash flood potential index (FFPI) in the Amman Zarqa Basin of Jordan. *Jordanian Journal of Engineering and Chemical Industries (JJECI), 3(3)*, 81–90. https://doi.org/10.48103/jjeci3102020

Singha, C., Rana, V. K., Pham, Q. B., Nguyen, D. C., & Łupikasza, E. (2024). Integrating machine learning and geospatial data analysis for comprehensive flood hazard assessment. *Environmental Science and Pollution Research*, 31, 48497–48522. https://doi.org/10.1007/s11356-024-34286-7

آماده انتشار (بدون شماره و جلد)

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

Taloor, A. K., Sharma, S., Sharma, D., Chib, R., Jasrotia, R., Gupta, S., Kothyari, G. C., Mehta, P., & Kale, R. V. (2024). Estimation of MFFPI for flood hazards assessment using geospatial technology in the Tawi Basin, India. *Geosystems and Geoenvironment*, 3(1), Article 100233. https://doi.org/10.1016/j.geogeo.2023.100233

Tincu, R., Lazar, G., & Lazar, I. (2018). Modified flash flood potential index to estimate areas with predisposition to water accumulation. *Open Geosciences*, 8(1), 376–387. https://doi.org/10.1515/geo-2018-0047

Yagoub, M. M., Alsereidi, A. A., Mohamed, E. A., Periyasamy, P., Alameri, R., Aldarmaki, S., & Alhashmi, Y. (2020). Newspapers as a validation proxy for GIS modeling in Fujairah, United Arab Emirates: Identifying flood-prone areas. *Natural Hazards*, 104(1), 111–141. https://doi.org/10.1007/s11069-020-04161-y.

آماده انتشار (بدون شماره مجله)