

Spectral Analysis of Forest Fire Based on the +NBR Index and its Comparison with Spectral Indices in Sentinel-2 Satellite (Case Study: Baharestan Village)

Mehdi Feyzolahpour^{1*} 

1. **Corresponding Author**, Assistant Professor of Geomorphology, Faculty of Human Sciences, University of Zanjan, Zanjan, Iran

Email: feyzolahpour@znu.ac.ir ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4126-0234>

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article Article history: Received: 22 May 2024 Revised: 12 July 2024 Accepted: 14 August 2024 Published: 22 June 2026 Keywords: Normalized burn indices, spectral index, forest fire, Sentinel 2, Heyran.	Burned areas can be easily monitored using multispectral satellite images. Indices were provided to show the difference between healthy vegetation areas and burned areas. To avoid errors and optimize the results, based on the reflective condition of the Sentinel 2 satellite bands, the normalized burn ratio index +NBR was presented. The efficiency of this index was confirmed by comparing it with four other indices in an area of 47.4 square kilometers in the downstream part of the Hiran region on the border between Iran and the Republic of Azerbaijan, around the village of Baharestan. To achieve this goal, two single- and two-time approaches were adopted. To separate the pixels of burned and non-burned areas, the differentiation method was used between the periods before and after the fire on January 8, 2021, and January 25, 2021. The NBR+ index achieved favorable results due to the removal of cloud masses and water areas that were wrongly classified in the other indices. Pearson's correlation coefficient values also showed that the NBR and NDSWIR index with values of 0.95 had the highest correlation with the NBR + index, and the MIRBI index with values of 0.16 had the lowest correlation. Meanwhile, the NBR+ index with the highest Kappa coefficient of 0.92 can detect areas affected by fire.
How to Cite: Feyzolahpour, M. (2026). Spectral Analysis of Forest Fire Based on the +NBR Index and Its Comparison with Spectral Indices in Sentinel-2 Satellite (Case Study: Baharestan Village). <i>Journal of Natural Environmental Hazards</i>, 15(48), 1-18.	
	© The Author/Authors Publisher: University of Sistan and Baluchestan
DOI: 10.22111/jneh.2024.48813.2047	

EXTENDED ABSTRACT

INTRODUCTION

One of the important research topics in the use of satellite imagery is the monitoring of fires, their impact on air quality, and the effects they leave on the environment (Saidi et al., 2021). Therefore, to preserve natural and man-made landscapes, it is essential to identify appropriate methods for monitoring burned areas and preparing intensity estimation maps using satellite data (Amos et al., 2019). In recent decades, several sensors, such as the Advanced High-Resolution Radiometer (AVHRR) and the Advanced Spatial Thermal Radiation and Reflection Radiometer (ASTER), have been installed on satellites to monitor fires (Seydi et al., 2021). Another widely used sensor is the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), which has attracted attention due to its high temporal resolution and allows for the rapid detection of active fires, identification of burned areas, or assessment of forest fire risk (Seydi et al., 2021). This research aims to improve the performance of the existing forest fire index, and for this purpose, Sentinel 2 images were used.

In this study, the NBR+ index is proposed based on Sentinel 2 multispectral images to identify burned areas and the methodological approach adopted to determine the performance level of this index is shown. First, previously presented indices in this field are introduced and a comparison between them and the NBR+ index is made. In the meantime, the reasons that determined the formulation of the proposed index are explained and finally, the method of verifying the accuracy of the results is described based on the conventional approach applied in remote sensing, including the confusion matrix (Hasmadi et al., 2009). All experiments were performed using Arc GIS software. The raster calculator tool allows the implementation of index equations using software operators. Near-infrared (NIR) and shortwave infrared (SWIR) bands are used to detect burned areas. The NIR band highlights changes in canopy cover and reflectance of burned leaves. While the SWIR band identifies changes in dryness (Silva et al., 2003). After a fire, NIR reflectance decreases sharply as vegetation cover is lost, while SWIR reflectance increases due to the removal of water-retaining vegetation (Schepers et al., 2014). Several algorithms have been developed to detect burned areas by combining NIR and SWIR bands. Although some spectral indices have been developed based on SWIR, red, and NIR bands only. Among the wide range of available spectral indices, four indices, normalized burn ratio (NBR), normalized burn ratio in SWIR band (NBRSWIR), normalized difference shortwave infrared index (NDSWIR), and mean infrared bispectral index (MIRBI), were compared.

According to the NBRSWIR index, the maximum reflectance on January 8, 2 days before the fire, was 0.08. While this value reached 0.32 on January 25, showing a significant increase. The area of this area on this day was 4.05 km², which did not show a significant change compared to the threshold of 0.08 on January 8, which was 14.4 km². However, the spectral reflectance of -0.07 on January 8 increased from 7.85 km² to 9.93 km², increasing from 16.5% to 20.9%, which was an increase of 4.4%. Accordingly, the highest values affected by the fire were in the northern part of the region, which is located within the territory of the Republic of Azerbaijan. In the NDSWIR index, the maximum threshold on January 8 was 0.16. If positive values are considered as areas with high reflectances, then at a threshold of 0.04 and above, an area of 26.86 km² has high reflectances. Positive values started at 0.12 on January 25 and covered an area of 23.99 km², but no significant changes were observed. The extent of this area indicated the area affected by the fire.

CONCLUSION

The results of this study confirm the ability to accurately map burned areas using remote sensing. Multispectral images provided by Sentinel 2 satellite sensors have a high ability to detect fire zones, but they require the appropriate selection and combination of bands. The presence of several indicators allows for the achievement of desired results. However, environmental characteristics can reduce the level of accuracy of the final map. Water bodies and clouds cause errors for some indicators, and false reflections with an unjustified increase in pixels are considered burned areas. Even if the disturbance

of water bodies and clouds can be removed using special methods, the indicators must have the ability to reduce the effect of these phenomena. The new indicator presented in this study for Sentinel 2 images makes it possible to detect the reflections of burned areas even in the presence of water bodies and cloud masses. This index has achieved high Kappa coefficient values of 0.92 compared to the MIRBI, NDSWIR, NBRSWIR, and NBR indices.

REFERENCES

References (in Persian)

- Abdi, O., Shetaei, S., Shirvani, Z., Naghavi, M. (2012). Forest management impacts on forest fires in Golestan province by GIS application, *Iranian Journal Forest and Range Protection Research*, 9(18), pp 100- 108. [In Persian]
- Abedi Gheshlaghi, H., Valizadeh, K. (2018). Evaluation and zoning of forest fire risk using multi-criteria decision-making techniques and GIS, *Journal of Natural Environmental Hazards*, 7(15), pp 49- 66. [In Persian]
- Emami, Hassan., Shahriyari, H. (2020). Quantifying environmental and human factors affecting the occurrence and spread of wildfire using RS and GIS methods protected area of Arasbaran, *Scientific- research Quarterly of Geographical Data*, 28(112), pp 35-53. [In Persian]
- Farajzadeh, M., Ghavidel, Y., Mokri, S. (2015). The analysis of forest fires with climatic approach using satellite data in Alborz area Iran, *Journal of spatial analysis environmental hazards*, 2(3), pp 83- 104. [In Persian]
- Janbazghobadi, G. (2019). Investigation of forest fire hazard areas in Golestan province based on fire risk system index (FRSI) using the technique, *Journal of Spatial Analysis environmental hazards*, 6(3), pp 89-102. [In Persian]
- Roodsarabi, Z., Sam Khaniani, A., Kiani, A. (2023), A review of remote sensing methods in identifying and monitoring forest fires, *Iranian Journal of remote sensing & GIS*, 4(56), pp 19- 52. [In Persian]

References (in English)

- Amos, C., Petropoulos, G. P., & Ferentinos, K. P. (2019). Determining the use of Sentinel-2A MSI for wildfire burning & severity detection. *International journal of remote sensing*, 40(3), 905-930.
- Hasmadi, M., Pakhriazad, H.Z., Shahrin, M.F. (2009). Evaluating supervised and unsupervised techniques for land cover mapping using remote sensing data. *Geogr. Malays. Journal of Society and Space*, 5, 1-10.
- Saidi, S., Younes, A.B., Anselme, B. (2021). A GIS-remote sensing approach for forest fire risk assessment: Case of Bizerte region, Tunisia. *Applied Geomatic*, 13, 587-603.
- Schepers, L., Haest, B., Veraverbeke, S., Spanhove, T., Vanden Borre, J., Goossens, R. (2014). Burned area detection and burn severity assessment of a heathland fire in Belgium using airborne imaging spectroscopy (APEX). *Remote Sensing*, 6, 1803-1826.
- Seydi, S.T. Akhoondzadeh, M., Amani, M., Mahdavi, S. (2021). Wildfire damage assessment over Australia using sentinel-2 imagery and MODIS land cover product within the Google Earth Engine cloud platform. *Remote Sensing*, 13, 220- 246.
- Silva, J.M.N., Pereira, J.M.C., Cabral, A.I., Sa', A.C.L., Vasconcelos, M.J.P., Mota, B., Gre'Goire, J.-M. (2003). An estimate of the area burned in southern Africa during the 2000 dry season using SPOT-VEGETATION satellite data. *Journal of Geophysical Research*, 108, 8498- 8522.

مجله علمی پژوهشی مخاطرات محیط طبیعی، دوره ۱۵، شماره ۴۸، شماره پیاپی ۰۲، تیر ۱۴۰۵

تحلیل طیفی آتش سوزی جنگل بر اساس شاخص NBR+ و مقایسه آن با شاخص های طیفی در ماهواره سنتینل ۲ (منطقه مورد مطالعه: روستای بهارستان)

مهدی فیض اله پور [✉] 

۱. استادیار گروه جغرافیا، دانشگاه زنجان (نویسنده مسئول)

ایمیل: feyzolahpour@znu.ac.ir ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4126-0234>

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۰۲ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۳/۰۴/۲۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۲۴ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۳/۱۶ واژه های کلیدی: شاخص های سوختگی نرمال شده، شاخص طیفی، آتش سوزی جنگل، سنتینل ۲، گردنه حیران.	نظارت بر مناطق سوخته را می توان به راحتی با استفاده از تصاویر چندطیفی ماهواره ای انجام داد. برای نمایش تفاوت بین مناطق پوشش گیاهی سالم و مناطق سوخته شده، شاخص هایی ارائه شده است. برای جلوگیری از خطا و بهینه سازی نتایج، بر اساس وضعیت بازتابی باندهای ماهواره سنتینل ۲، شاخص نسبت سوختگی نرمال شده NBR+ ارائه شد. کارایی این شاخص با مقایسه آن با چهار شاخص دیگر در منطقه ای با وسعت ۴۷/۴ کیلومتر مربع در قسمت پایین دست منطقه حیران در مرز بین ایران و جمهوری آذربایجان در حوالی روستای بهارستان تأیید شد. برای دستیابی به این هدف، دو رویکرد تک زمانی و دو زمانی اتخاذ شد. برای جداسازی پیکسل های نواحی سوخته شده و نواحی فاقد سوختگی، روش تفاضل گیری بین دوره های قبل و بعد از آتش سوزی در تاریخ های ۸ ژانویه ۲۰۲۱ و ۲۵ ژانویه ۲۰۲۱ به کار گرفته شد. برای ارزیابی کارایی شاخص ها، ماتریس های سردرگمی ساخته شده و با یکدیگر مقایسه شدند. شاخص NBR+ به دلیل حذف توده های ابر و پهنه آبی که در شاخص های دیگر به اشتباه طبقه بندی شده بودند، به نتایج مطلوبی دست یافته است. مقادیر ضریب همبستگی پیرسون نیز نشان داد که شاخص NBR و NDSWIR با مقادیر ۰/۹۵ از بیشترین همبستگی با شاخص NBR+ برخوردار بوده و شاخص MIRBI با مقادیر ۰/۱۶ از کمترین همبستگی برخوردار بوده است. این درحالیست که شاخص NBR+ با بیشترین ضریب کاپا به میزان ۰/۹۲ از قابلیت بالایی در تشخیص مناطق متاثر از آتش سوزی برخوردار است.

استناد: فیض اله پور، مهدی . (۱۴۰۵). تحلیل طیفی آتش سوزی جنگل بر اساس شاخص NBR+ و مقایسه آن با شاخص های طیفی در ماهواره سنتینل ۲ (منطقه مورد مطالعه: روستای بهارستان) *مخاطرات محیط طبیعی*، ۱۵ (۴۸)، ۱-۱۸.

ناشر: دانشگاه سیستان و بلوچستان

© نویسنده / نویسندگان

DOI: 10.22111/jneh.2024.48813.2047



مقدمه

یکی از مباحث تحقیقاتی مهم در زمینه استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، نظارت بر آتش‌سوزی‌ها، تاثیر آنها بر کیفیت هوا و آثاری است که بر روی محیط‌زیست بر جای می‌گذارند (سیدی^۱ و همکاران، ۲۰۲۱). بنابراین برای حفظ چشم اندازهای طبیعی و انسان‌ساخت، شناسایی روش‌های مناسب برای پایش مناطق سوخته و تهیه نقشه‌های برآورد شدت با بهره‌گیری از داده‌های ماهواره‌ای ضروری می‌باشد (آموس^۲ و همکاران، ۲۰۱۹).

در دهه‌های اخیر، چندین حسگر مانند رادیومتر پیشرفته با وضوح بالا (AVHRR) و رادیومتر تابش گرمایی و انعکاس فضایی پیشرفته (ASTER) به منظور بررسی آتش‌سوزی، بر روی ماهواره‌ها نصب شده‌اند (سیدی و همکاران، ۲۰۲۱). یکی دیگر از سنجنده‌های پرکاربرد، طیف سنج تصویربرداری با وضوح متوسط (MODIS) است که به دلیل وضوح زمانی بالای آن مورد توجه قرار گرفته و امکان تشخیص سریع آتش‌سوزی‌های فعال، شناسایی مناطق سوخته یا ارزیابی خطر آتش‌سوزی جنگل‌ها را فراهم می‌کند (سیدی و همکاران، ۲۰۲۱).

پرتاب ماهواره لندست ۸ که با همکاری ناسا و سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده صورت گرفته به همراه ماهواره سنتینل ۲ این امکان را فراهم می‌سازد تا تصاویری با وضوح فضایی بهتر از سنجنده‌های ماهواره قبلی به دست آید. به طور خاص، ماهواره سنتینل ۲ تصاویر چند طیفی سطح زمین را توسط دو ماهواره با چرخه بازبینی ۵ روزه در وضوح مکانی ۱۰، ۲۰ و ۶۰ متر جمع‌آوری می‌کند. پردازش داده‌های سنجنش‌ازدور پیش‌نیازی برای تولید اطلاعات مکانی قوی و با کیفیت بوده و برای پایش آتش در مقیاس‌های مختلف و در طول زمان مناسب می‌باشد (باربوزا^۳ و همکاران، ۲۰۲۰). در واقع، تحقق شاخص‌های عملکردی فزاینده در حوزه RS برای تشخیص و تحلیل پدیده‌هایی مانند آتش‌سوزی در حال توسعه مداوم بوده است. بنابراین افزایش وضوح مکانی و طیفی سنجنده‌های ماهواره‌ای همراه با توسعه شاخص‌ها در سنجنش‌ازدور به این معنی است که حتی آتش‌سوزی‌ها در مقیاس کوچک را می‌توان با دقت بالا تشخیص داد. تشخیص آتش‌سوزی به شدت با نظارت بر پوشش گیاهی مرتبط است. برای این منظور، چندین روش مبتنی بر استفاده از شاخص‌های طیفی پیشنهاد شده است. شاخص تفاوت نرمال‌شده پوشش گیاهی (NDVI) بر اساس روابط بین باندهای مادون قرمز نزدیک و باند قرمز این امکان را می‌سازد تا رابطه بین میزان پوشش گیاهی آسیب‌دیده و شدت آتش‌سوزی مشخص گردد (منیسس^۴، ۲۰۲۱). علاوه بر این، شاخص‌های خاصی مانند شاخص نسبت نرمال‌شده سوختگی (NBR) ایجاد شده‌اند که اثرات آتش را با کنتراست طیفی بالا ثبت می‌کنند. در این شاخص از نسبت نرمال‌شده باندهای مادون قرمز نزدیک و موج کوتاه استفاده شده است. ترکیب این باندوری پژها امکان تحلیل پدیده را در شرایط قبل و بعد از آتش‌سوزی فراهم می‌کند. در طول موج‌های NIR، جذب پوشش گیاهی کم و بازتاب عبور، قابل‌توجه می‌باشد. در مقابل در طول موج SWIR بازتاب و ضریب عبور پوشش گیاهی کم و جذب در حد بسیار بالایی بوده است. پس از آتش‌سوزی، مناطق سوخته‌شده بازتاب نسبتاً کم در باند مادون قرمز نزدیک و بازتاب بالایی در باند مادون قرمز موج کوتاه نشان می‌دهند (روی^۵ و همکاران، ۲۰۱۶). پیشرفت‌های اخیر در فناوری سنجنش‌ازدور، رویکردهای جدیدی را برای آتش‌سوزی از جنبه‌های مختلفی از قبیل تشخیص آتش‌سوزی فعال، برآورد میزان و شدت آتش‌سوزی و نظارت بر احیای پوشش گیاهی پس از آتش‌سوزی

¹ Seydi² Amos³ Barboza⁴ Meneses⁵ Roy

فراهم کرده است (سزپاکووسکی^۱ و همکاران، ۲۰۱۹). شاخص‌های خاصی بر اساس باندهای طیفی برای تشخیص آتش‌سوزی توسعه یافته‌اند. بخش بزرگی از این پژوهش مبتنی بر رویکردهای دو زمانی است که این امکان را می‌دهد تا مناطق سوخته‌شده به‌عنوان نتایج تغییرات ناشی از پوشش گیاهی در تصاویر قبل و بعد از آتش‌سوزی شناسایی گردد. با این حال سایر پدیده‌های سطح زمین ممکن است در باندهای خاصی مانند NIR و SWIR پاسخ‌های مشابهی را داده و باعث افزایش خطا گردد (لیو^۲ و همکاران، ۲۰۲۰). علاوه بر این، ویژگی‌های منطقه می‌تواند بر دقت تشخیص آتش‌سوزی تاثیر بگذارد. به‌عنوان مثال، ابر و سایه‌ها ممکن است بازتاب طیفی کاذب ایجاد کنند. بنابراین اقدامات اصلاحی خاصی لازم است (نولد^۳ و همکاران، ۲۰۲۰). با بهره‌گیری از باند SWIR، میزان این خطاها کاهش می‌یابد؛ زیرا در این باند بازتاب نواحی آتش‌گرفته نسبتاً ثابت مانده و یا رشد کمی را نشان می‌دهند (اولیورا^۴ و همکاران، ۲۰۲۱).

در ایران تحقیقات مختلفی برای بررسی نقش سنجش‌ازدور در مطالعات مربوط به آتش‌سوزی جنگل انجام گرفته است. عابدی و همکاران (۱۳۹۰) اثر مدیریت جنگل روی آتش‌سوزی جنگل‌های استان گلستان در سال ۱۳۸۹ را با استفاده از GIS مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که به‌طور کلی وجود طرح‌های جنگلداری ضمن اینکه باعث حفاظت جنگل در مقابل گسترش سطح و مدت زمان تداوم آتش‌سوزی می‌گردد، به‌کارگیری شاخص‌های مدیریتی مهم داخل طرح‌های جنگلداری مطابق با اصول علم جنگلداری، در حفاظت جنگل در مواقع بحرانی از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. فرج‌زاده و همکاران (۱۳۹۴) به تجزیه و تحلیل آتش‌سوزی جنگل با منشا آب‌وهوایی با داده‌های ماهواره‌ای در منطقه البرز پرداختند. نتایج نشان داد که در روز آتش‌سوزی در سطح زمین استیلای زبانه کم فشار و در تراز میانی فراز مانع موجب انتقال هوای گرم عرض‌های جغرافیایی بالا به منطقه مورد مطالعه شده است. عابدی قشلاقی و ولی‌زاده (۱۳۹۷) با استفاده از فن‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره و GIS اقدام به ارزیابی و پهنه‌بندی خطر آتش‌سوزی جنگل نمودند. نتایج نشان داد که روش مورد استفاده با ضریب ۰/۶۴ از دقت خوبی در پهنه‌بندی خطر آتش‌سوزی جنگل برخوردار می‌باشد. جانباز قبادی (۱۳۹۸) بر اساس شاخص خطر آتش‌سوزی (FRSI) و با بهره‌گیری از فن GIS اقدام به بررسی مناطق خطر آتش‌سوزی جنگل در استان گلستان نمود. نتایج نشان داد که ۹۰ درصد آتش‌سوزی‌های به‌وقوع پیوسته در منطقه با خطر زیاد قرار گرفته است. امامی و شهریاری (۱۳۹۸) با بهره‌گیری از GIS و RS عوامل انسانی و محیطی را در وقوع آتش‌سوزی جنگل‌های ارسباران را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که راه‌های ارتباطی و مناطق مسکونی به‌ترتیب حداقل ۳۲ درصد و حداکثر ۶۸ درصد همپوشانی با خطر وقوع آتش‌سوزی در منطقه مطالعاتی را دارا هستند. رودسرابی و همکاران (۱۴۰۱) روش‌های مبتنی بر سنجش‌ازدور را در شناسایی و پایش آتش‌سوزی جنگل مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که بر اساس بررسی‌های انجام‌شده درباره مطالعات آتش‌سوزی در کشور، حدود ۴۸ درصد از پژوهش‌ها به شناسایی و گسترش آتش‌سوزی و حدود ۵۲ درصد به احیا و بازسازی پرداختند.

هدف از این پژوهش بهبود عملکرد به‌دست‌آمده از شاخص موجود در زمینه آتش‌سوزی جنگل بوده و به این منظور از تصاویر سنتینل ۲ بهره گرفته شده است. با بهره‌گیری از شاخص NBR، شاخص جدیدی با نام NBR+ ارائه گردید.

¹ Szpakowski

² Liu

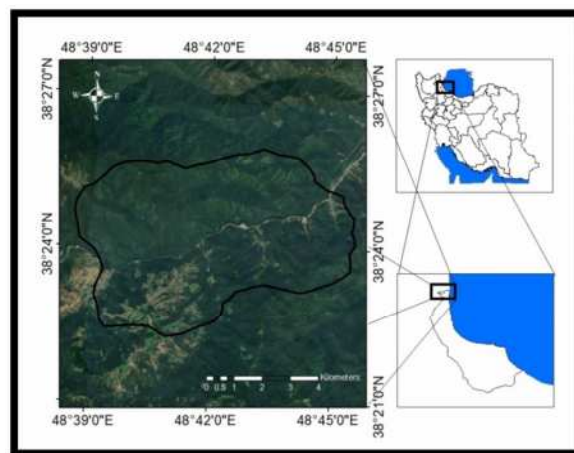
³ Nolde

⁴ Oliveira

این شاخص در منطقه‌ای واقع در پایین‌دست گردنه حیران در حوالی روستای بهارستان در مرز بین ایران و جمهوری آذربایجان و تحت تاثیر آتش‌سوزی در ۱۰ ژانویه ۲۰۲۱ آزمایش شده و عملکرد آن ارزیابی شده و با چهار شاخص دیگر مقایسه شد. برای رخدادهای قبل و بعد از آتش‌سوزی نیز از داده‌های چند طیفی سنتینل ۲ استفاده شد. نوآوری عمده این پژوهش در اولین گام، استفاده از تصاویر سنتینل ۲ بوده و در گام بعدی، استفاده از شاخص جدید +NBR می‌باشد. این شاخص برخلاف شاخص‌های دیگر توانسته است تا تفکیک دقیقی بین پهنه‌های متاثر از آتش با پهنه‌های آبی و توده‌های ابری به عمل آورد. لیکن اصلی‌ترین نوآوری، استفاده از روش تفاضل‌گیری از تصاویر قبل و بعد از وقوع آتش‌سوزی بوده است. بدین طریق، تمامی پهنه‌های تغییریافته در تصویر نمایش داده شد.

داده‌ها و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه با مختصات جغرافیایی ۴۸ درجه و ۳۹ دقیقه تا ۴۸ درجه ۴۶ دقیقه طول شرقی و ۳۸ درجه و ۲۳ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۲۶ دقیقه عرض شمالی در پایین‌دست گردنه حیران در مرز بین کشور ایران و جمهوری آذربایجان در غرب شهر آستارا و حوالی روستای بهارستان واقع شده است. در تاریخ ۲۱ دی ماه ۱۳۹۹ شمسی یا ۱۰ ژانویه ۲۰۲۱ آتش‌سوزی وسیعی در جنگل‌های هیرکانی جمهوری آذربایجان رخ داد که ۹ روز تداوم داشته و جنگل-های هیرکانی در نواحی مرزی ایران را نیز متاثر ساخت. در این پژوهش محدوده‌ای به وسعت ۴۷/۷ کیلومتر مربع مورد مطالعه قرار گرفت (شکل ۱).



شکل ۱: موقعیت منطقه مورد مطالعه در پایین دست گردنه حیران

تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲ توسط سازمان فضایی اروپا و در قالب برنامه کپرنیک به شکل ماهواره‌های سنتینل 2A و سنتینل 2B و به صورت رایگان ارائه می‌شود. برای این پژوهش از تصاویر ارائه‌شده توسط ماهواره سنتینل 2A استفاده شده است. برنامه کپرنیک از طریق استفاده از ماهواره‌های سنتینل به نظارت مستمر زمین می‌پردازد. این تصاویر کانال اصلی دریافت داده‌های کپرنیک بوده و برای بررسی مخاطرات و احیای مناطق به‌کار گرفته می‌شود. دو مجموعه داده سنتینل 2A در این پژوهش استفاده شده است. اولین مجموعه داده‌ها در ۸ ژانویه ۲۰۲۱ به‌دست آمده و سناریوی پیش از آتش‌سوزی را نشان می‌دهد. دومین سری از داده‌ها در ۲۵ ژانویه ۲۰۲۱ تهیه شده و نشان‌دهنده وضعیت پس از آتش‌سوزی است.

در این پژوهش شاخص NBR+ بر اساس تصاویر چند طیفی سنتینل ۲ برای شناسایی مناطق سوخته‌شده پیشنهاد گردیده و رویکرد روش‌شناختی اتخاذشده برای تعیین سطح عملکرد این شاخص نشان داده شده است. در ابتدا شاخص‌های ارائه‌شده قبلی در این زمینه معرفی شده و مقایسه‌ای بین آنها با شاخص NBR+ صورت گرفت. در این بین، دلایلی که فرمول‌بندی شاخص پیشنهادی را تعیین کرده است، توضیح داده شده و در نهایت، روش تأیید صحت نتایج بر اساس رویکرد متعارف اعمال‌شده در سنجش‌ازدور از جمله ماتریس سردرگمی تشریح شد (هاسمادی^۱ و همکاران، ۲۰۰۹). همه آزمایش‌ها با استفاده از نرم‌افزار Arc GIS انجام شد. ابزار محاسبه‌گر رستری امکان پیاده سازی معادلات شاخص را با استفاده از عملگرهای نرم‌افزار فراهم می‌سازد.

برای تشخیص مناطق سوخته، باندهای مادون قرمز نزدیک (NIR) و مادون قرمز موج کوتاه (SWIR) به کار گرفته شده است. باند NIR تغییرات در پوشش تاج و بازتاب برگ‌های سوخته را برجسته می‌کند. درحالی‌که باند SWIR تغییرات در میزان خشکی را شناسایی می‌کند (سیلوا^۲ و همکاران، ۲۰۰۳). پس از آتش‌سوزی، با از بین رفتن پوشش گیاهی، بازتاب NIR به شدت کاهش می‌یابد و ازسوی دیگر، بازتاب SWIR به دلیل حذف پوشش گیاهی نگهدارنده آب افزایش می‌یابد (شیپردز^۳ و همکاران، ۲۰۱۴). برای تشخیص مناطق سوخته، با ترکیب باندهای NIR و SWIR چندین الگوریتم ابداع شدند. اگرچه برخی از شاخص‌های طیفی تنها بر اساس باندهای SWIR، قرمز و NIR توسعه یافته‌اند. در میان طیف گسترده‌ای از شاخص‌های طیفی موجود، چهار شاخص نسبت نرمال‌شده سوختگی (NBR)، نسبت نرمال‌شده سوختگی در باند SWIR (NBRSWIR)، شاخص تفاوت نرمال‌شده مادون قرمز موج کوتاه (NDSWIR) و متوسط شاخص دو طیفی مادون قرمز (MIRBI) با یکدیگر مقایسه شدند. ویژگی اصلی این شاخص‌ها به همراه خصوصیت‌های شاخص اصلی در زیر شرح داده شده است.

شاخص معروفی که به‌طور گسترده برای نمایش مناطق سوخته استفاده می‌شود، نسبت نرمال‌شده سوختگی است که به‌عنوان شاخص استاندارد در ارزیابی شدت آتش‌سوزی در نظر گرفته می‌شود (گارسیا^۴ و همکاران، ۱۹۹۱). این شاخص، طول موج‌های NIR (باند 8A) و SWIR (باند ۱۲) را ترکیب می‌کند که در آن مقدار بالای NBR پوشش گیاهی سالم را نشان داده و مقدار پایین، زمین‌های خالی و سوخته را نمایش می‌دهد. شاخص NBR مشابه شاخص NDVI می‌باشد. شاخص NBR به‌عنوان نسبتی بین مقادیر NIR و SWIR محاسبه شده و می‌تواند به‌صورت زیر تعریف گردد. مناطقی که مقادیر نزدیک به صفر دارند، مناطق بدون سوختگی در نظر گرفته می‌شوند.

$$NBR = \frac{B12 - B8A}{B12 + B8A} \quad (1)$$

شاخص آتش‌سوزی جدیدی که بر اساس داده‌های لندست ۸ توسعه یافته، نسبت نرمال‌شده سوختگی در باند SWIR است که توسط لیو و همکاران (۲۰۲۰) طراحی شده است. این شاخص مشابه شاخص NBR می‌باشد؛ ولی از باندهای SWIR1 (باند ۱۱) و SWIR2 (باند ۱۲) بهره گرفته است (لیو و همکاران، ۲۰۲۰). در این معادله دو مقدار عددی ثابت در نظر گرفته می‌شود. در صورت معادله، مقدار ۰/۰۲ کم می‌شود تا تغییرات آب نزدیک به صفر یا مقادیر منفی شود و در مخرج نیز مقدار ۰/۱ اضافه شد تا از تغییرات غیر طبیعی آب و افزایش مقادیر به سمت مثبت جلوگیری شود.

¹ Hasmadi

² Silva

³ Schepers

⁴ García

$$NBR_{SWIR} = \frac{B12 - B11 - 0.02}{B12 + B11 + 0.1} \quad (2)$$

از آنجایی که باند SWIR برای تشخیص آتش‌سوزی‌های قدیمی مفید تشخیص داده شده است، جرارد و همکاران از طول موج SWIR و شاخص NDSWIR برای شناسایی آتش‌سوزی جنگل استفاده کردند (جرارد^۱ و همکاران، ۲۰۰۳). بر این اساس تشخیص مناطق آتش‌گرفته تا ۱۰ سال پس از سانحه با استفاده از بازتاب طیفی مادون قرمز نزدیک و موج کوتاه میسر بوده است.

$$NDSWIR = \frac{B11 - B8A}{B11 + B8A} \quad (3)$$

شاخص سوختگی مادون قرمز میانی (MIRBI) که توسط تریگ و فلاس در سال ۲۰۰۱ توسعه یافت، در فضای طول موج‌های کوتاه مادون قرمز میانی و طول موج بلند مادون قرمز میانی طراحی شد (تریگ^۲ و فلاس، ۲۰۰۱). این طول موج‌ها به ترتیب در ماهواره سنتینل ۲ باندهای ۱۱ و ۱۲ را در بر می‌گیرد. این شاخص نسبت به تغییرات طیفی ایجاد شده به وسیله آتش‌سوزی، حساس می‌باشد.

$$MIRBI = 10 \times B12 - 9.8 \times B11 + 2 \quad (4)$$

به منظور استفاده صحیح از شاخص‌های تشخیص سوختگی لازم است تا پهنه‌های آبی و ابرها حذف شوند. بنابراین از ماسک‌هایی برای رسیدن به این هدف استفاده می‌شود (وانگ^۳ و همکاران، ۲۰۰۸). همان‌طور که در پژوهش‌های متعددی گزارش شده است (پولویرنی^۴ و همکاران، ۲۰۲۰؛ هوانگ^۵ و همکاران، ۲۰۱۷)، پهنه‌های آبی را می‌توان با شاخص‌هایی مانند NBR با پهنه‌های سوخته اشتباه گرفت؛ زیرا مناطق سوخته، بازتابی مشابه سطوح آبی از خود نشان می‌دهند (دیندار اوغلو و همکاران، ۲۰۲۱). به‌طور کلی، برای حذف پهنه‌های آبی از شاخص تفاوت نرمال شده آب (NDWI) استفاده شد (مک فیتر^۶، ۱۹۹۶). آب به‌طور معمول در طول موج‌های سبز و آبی از بازتاب قوی برخوردار است (ایپ^۷ و همکاران، ۲۰۰۴) بنابراین، نسخه پیشرفته‌ای از شاخص NBR پیشنهاد شد که بازتاب آب را در نظر گرفته و با عنوان NBR+ شناخته می‌شود.

$$+NBR = \frac{(B12 - B8A - B3 - B2)}{(B12 + B8A + B3 + B2)} \quad (5)$$

از سوی دیگر، این معادله مقادیر منفی را برای ابرها در نظر می‌گیرد؛ زیرا بازتاب آن در باند ۱۲ به‌طور قابل‌توجهی کمتر از مجموع سه باند دیگر است. در نتیجه از آنجایی که مقادیر NBR+ می‌تواند در محدوده بین -۱ و ۱ متفاوت باشد، پیکسل‌های مربوط به ابرها در این شاخص مقادیر منفی را نشان داده و بنابراین نمی‌توان آنها را با مقادیر مناطق سوخته‌شده اشتباه گرفت. مناطق با مقادیر بالا نشان‌دهنده زمین‌های سوخته می‌باشد.

در این پژوهش از رویکرد تک زمانی و دو زمانی برای هر شاخص استفاده شد. اولین طبقه‌بندی بر روی تصاویر پس از آتش‌سوزی انجام شده و طبقه‌بندی دوم بر اساس مقایسه تصاویر قبل و بعد از آتش‌سوزی به‌دست آمد. در پژوهش‌های مختلفی از این رویکرد بهره گرفته شده است (آریلانو^۸ و همکاران، ۲۰۱۸؛ پورومانو^۹ و همکاران، ۲۰۲۲).

¹ Gerard

² Trigg

³ Wang

⁴ Pulvirenti

⁵ Huang

⁶ McFeeters

⁷ Ip

⁸ Arellano

⁹ Ponomarev

از آنجایی که رویکرد تک زمانی تنها تصاویر پس از آتش‌سوزی را بررسی می‌کند، بنابراین سریع‌تر اجرا شده و فاقد خطاهای رویکرد دو زمانی از قبیل تفاوت در فنولوژی، ثبت اشتباه تصاویر، تفاوت در کالیبره کردن سنجنده و اثرات اتمسفری می‌باشد (وراوریک^۱ و همکاران، ۲۰۱۲؛ مالینیس^۲ و همکاران، ۲۰۱۳؛ وانگ^۳ و همکاران، ۲۰۰۸). علاوه بر این، یافتن تصاویر در دو زمان مختلف که توسط پوشش ابر پوشانده نشده است، همیشه آسان نبوده و ابرها و سایه‌ها به راحتی با پهنه‌های سوخته‌شده اشتباه گرفته می‌شوند (تاناسی^۴ و همکاران، ۲۰۲۰؛ سانچز^۵ و همکاران، ۲۰۲۰). فقدان تصاویر مرجع قبل از آتش‌سوزی می‌تواند مشکلاتی را در نقشه‌برداری ایجاد کرده و در آن ممکن است که آب و پوشش گیاه کهنسال با مناطق سوخته‌شده اشتباه گرفته شود (اپتینگ^۶ و همکاران، ۲۰۰۵). تجزیه و تحلیل دو زمانی با محاسبه شاخص‌های بالا در زمان قبل و بعد از آتش‌سوزی و ایجاد تفاوت بین آنها انجام می‌شود. به این منظور از معادله زیر استفاده می‌شود:

$$\Delta index = post\ Burn\ index - Pre\ Burn\ index \quad (۶)$$

به منظور ارزیابی صحت موضوعی نتایج به دست آمده، از نقاط آزمایشی استفاده شد. این نقاط با نقاط آموزش داده شده متفاوت هستند. این نقاط بیانگر مناطق سوخته‌شده و فاقد آتش‌سوزی هستند (اپتینگ^۶ و همکاران، ۲۰۰۵). مکان‌های آزمایشی از تجزیه و تحلیل بصری تصاویر چند طیفی به دست می‌آیند. نقاط بالا این امکان را می‌دهند که مشخص شود چند پیکسل به درستی و چند پیکسل به اشتباه طبقه‌بندی شده‌اند. رویکرد بالا بیشتر بر اساس ماتریس سردرگمی اعمال می‌شود. این ماتریس ابزار ساده و قدرتمندی است که دقت طبقه‌بندی تصاویر سنجش از دور را نشان می‌دهند. ماتریس سردرگمی جدولی است که مطابقت بین نتیجه طبقه‌بندی و داده‌های زمین را نشان داده و از بازرسی بصری استخراج می‌گردد (استوری^۸ و کانگالتون، ۱۹۸۶). به جای در نظر گرفتن کل تصاویر، ماتریس‌های سردرگمی معمولاً از مقادیر گرفته شده از نقاط آموزشی ساخته شده و امکان ارزیابی دقت موضوعی روش طبقه‌بندی را فراهم می‌کند (دیبس^۹ و همکاران، ۲۰۲۰). در این پژوهش برای تصاویر قبل و بعد از آتش‌سوزی، ماتریس سردرگمی ایجاد شده و تحلیل عددی دقت موضوعی با بهره‌گیری از شاخص کاپا انجام شد (لیو و همکاران، ۲۰۰۷). در نهایت به منظور بررسی روابط همبستگی بین شاخص‌های طیفی با شاخص NBR+ از ضریب همبستگی پیرسون استفاده شده و مقادیر ضریب تعیین R^2 محاسبه گردید.

یافته‌های پژوهش

اولین ارزیابی از هر نقشه سطح سوختگی را می‌توان با استفاده از بازرسی بصری انجام داد. مقادیر طبقه‌بندی شده شاخص‌های طیفی بر اساس ضریب شکست طبیعی جنکز در شکل ۲ نشان داده شده است.

با مقایسه تصاویر در شکل ۲ مشاهده می‌شود که بازتاب مربوط به مناطق مرطوب اندکی کاهش یافته است؛ ولی همچنان باعث اختلال شده است. هنگامی که تحلیل دو زمانی انجام می‌شود اگر دو تصویر قبل و بعد از آتش‌سوزی

¹ Veraverbeke

² Mallinis

³ Wang

⁴ Tanase

⁵ Sanchez

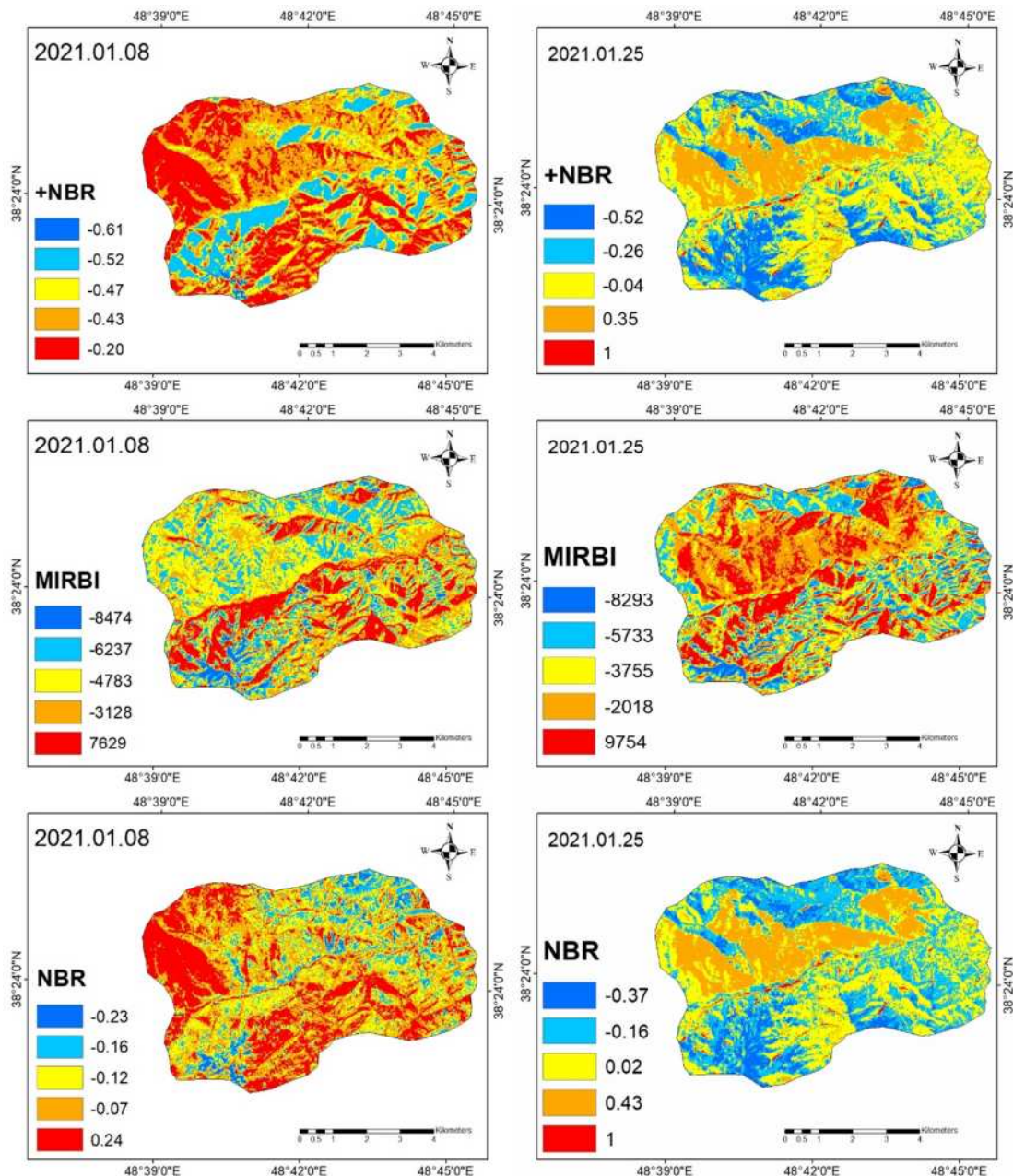
⁶ Epting

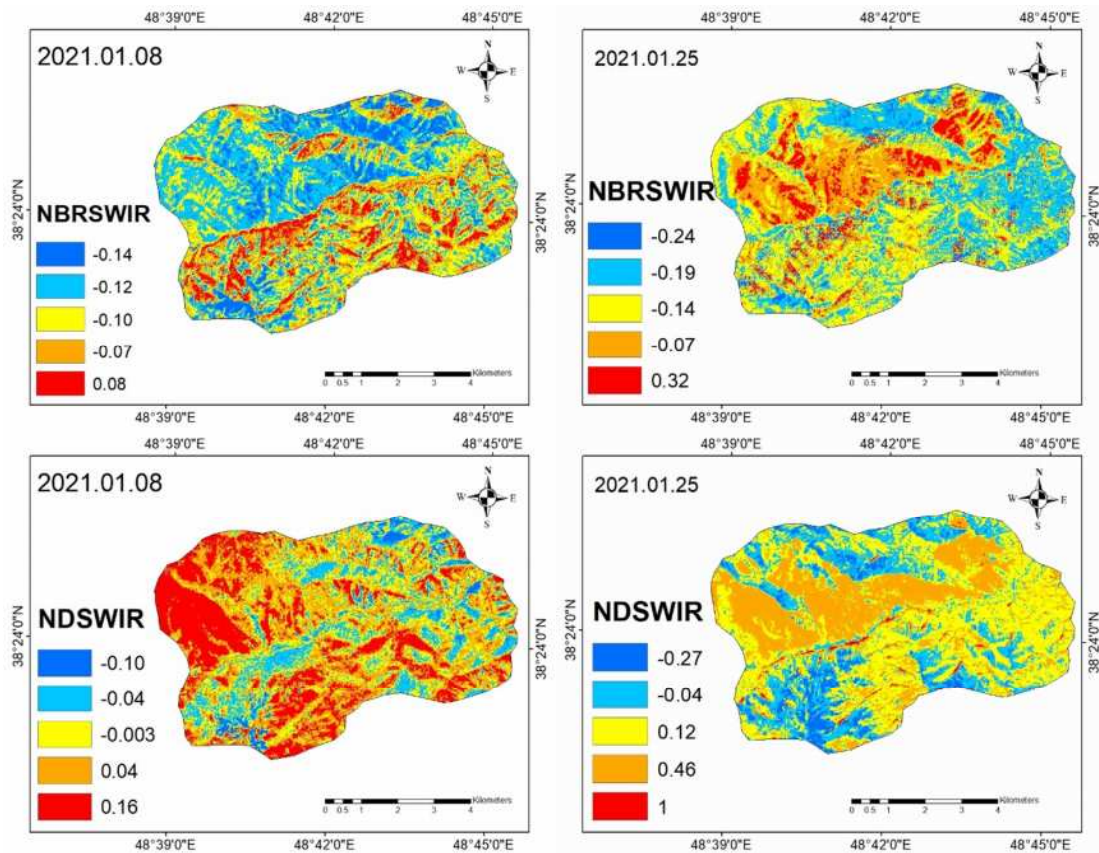
⁷ Epting

⁸ Story

⁹ Dibs

هر دو دارای پوشش ابر باشند، این موارد روی تصاویر تفاوت شاخص‌ها به روشی متفاوت نشان داده می‌شوند؛ بدین صورت که ابرها در تصاویر قبل از آتش‌سوزی با مقادیر کم درخشندگی نشان داده شده و در تصاویر پس از آتش‌سوزی با درخشندگی بالا نمایش داده می‌شوند. بنابراین در صورت استفاده از شاخص NBR، ابرها و مناطق مرطوب می‌توانند به اشتباه به عنوان نواحی سوخته‌شده طبقه‌بندی شوند. در تصاویر مربوط به شاخص +NBR، مناطق سوخته‌شده به علت بازتاب بالا جلب توجه می‌کنند و به‌ندرت با ابر اشتباه گرفته می‌شوند.





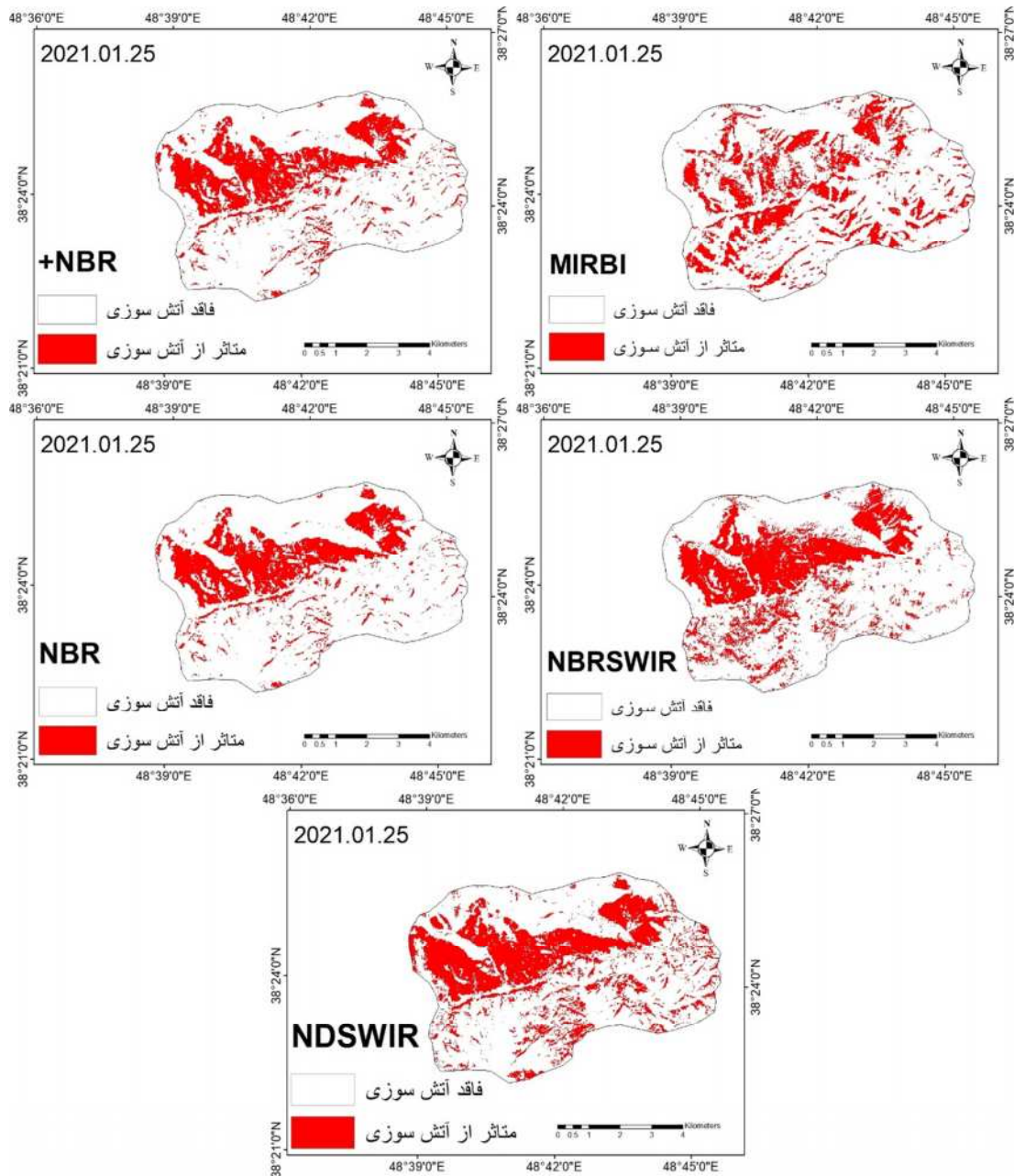
شکل ۲: مقادیر طبقه‌بندی شده شاخص‌های طیفی بر اساس میزان بازتاب طیفی در بازه زمانی قبل و بعد از آتش‌سوزی. منبع: نویسنده

بر اساس شاخص NBRSWIR حداکثر میزان بازتاب در ۸ ژانویه، یعنی ۲ روز قبل از آتش‌سوزی، معادل ۰/۰۸ بوده است. درحالی‌که این میزان در ۲۵ ژانویه به ۰/۳۲ رسیده و افزایش قابل‌توجهی را به نمایش گذاشت. وسعت این پهنه در این روز معادل ۴/۰۵ کیلومتر مربع بوده که نسبت به آستانه ۰/۰۸ در ۸ ژانویه که معادل ۴/۱۴ کیلومتر مربع بوده است، تغییر قابل‌توجهی را نشان نداد. لیکن بازتاب طیفی ۰/۰۷- در روز ۸ ژانویه از ۷/۸۵ کیلومتر مربع به ۹/۹۳ کیلومتر مربع رسیده و از ۱۶/۵ درصد به ۲۰/۹ درصد افزایش یافته و این افزایش معادل ۴/۴ درصد بوده است. بر این اساس بیشترین مقادیر متأثر از آتش در بخش شمالی ناحیه بوده که در داخل خاک جمهوری آذربایجان قرار گرفته است. در شاخص NDSWIR، حداکثر میزان آستانه در ۸ ژانویه معادل ۰/۱۶ بوده است. اگر مقادیر مثبت به‌عنوان پهنه‌هایی با بازتاب‌های بالا در نظر گرفته شود، در آستانه ۰/۰۴ به بالا پهنه‌ای به مساحت ۲۶/۸۶ کیلومتر مربع از بازتاب‌های بالا برخوردارند. مقادیر مثبت در تاریخ ۲۵ ژانویه از ۰/۱۲ شروع شده و پهنه‌ای به وسعت ۲۳/۹۹ کیلومتر مربع را در بر می‌گیرد؛ ولی تغییرات قابل‌توجهی دیده نشد. گستره این پهنه، محدوده متأثر از آتش‌سوزی را نشان داد (جدول ۱).

جدول ۱: مقادیر مساحت آستانه‌های طیفی بر اساس شاخص‌های طیفی

شاخص	۸ ژانویه ۲۰۲۱			۲۵ ژانویه ۲۰۲۱		
	آستانه	مساحت (km ²)	درصد	آستانه	مساحت (km ²)	درصد
NBRSWIR	-۰/۱۴	۵/۳۳	۱۱/۲	-۰/۲۴	۲/۰۵	۴/۳۲
	-۰/۱۲	۱۵/۸۳	۳۳/۴	-۰/۱۹	۱۳/۹۴	۲۹/۴
	-۰/۱۰	۱۴/۲۳	۳۰/۰۲	-۰/۱۴	۱۷/۴	۳۶/۷
	-۰/۰۷	۷/۸۵	۱۶/۵	-۰/۰۷	۹/۹۳	۲۰/۹
	-۰/۰۸	۴/۱۴	۸/۷۳	-۰/۳۲	۴/۰۵	۸/۵۴
NDSWIR	-۰/۱۰	۱/۳۵	۲/۸۴	-۰/۲۷	۳	۶/۳۲
	-۰/۰۴	۷/۴۵	۱۵/۷	-۰/۰۴	۱۰/۴	۲۱/۹
	-۰/۰۰۳	۱۱/۷۲	۲۴/۷	-۰/۱۲	۲۰/۱۶	۴۲/۵
	-۰/۰۴	۱۴/۸۳	۳۱/۲	-۰/۴۶	۱۳/۴۵	۲۸/۳
	-۰/۱۶	۱۲/۰۳	۲۵/۳	۱	۰/۳۸	۰/۸
+NBR	-۰/۶۱	-۰/۱۷	-۰/۳۵	-۰/۵۲	۶/۴	۱۳/۵
	-۰/۵۲	۶/۷۱	۱۴/۱۵	-۰/۲۶	۱۰/۳۴	۲۱/۸
	-۰/۴۷	۹/۰۲	۱۹/۰۲	-۰/۰۴	۱۹/۳۶	۴۰/۸
	-۰/۴۳	۱۶/۴۳	۳۴/۶	-۰/۳۵	۱۰/۹	۲۳
	-۰/۲۰	۱۵/۰۵	۳۱/۷	۱	۰/۳۵	۰/۷۳
MIRBI	-۸۴۷۴	۱/۴۳	۳/۰۱	-۸۲۹۳	۱/۹۵	۴/۱۱
	-۶۲۳۷	۹/۰۸	۱۹/۱۵	-۵۷۳۳	۸/۰۶	۱۷
	-۴۷۸۳	۱۶/۷۷	۳۵/۳	-۳۷۵۵	۱۱/۲	۲۳/۶
	-۳۱۲۸	۱۱/۸۶	۲۵/۰۲	-۲۰۱۸	۱۵/۱	۳۱/۸
	۷۶۲۹	۸/۲۴	۱۷/۳	۹۷۵۴	۱۰/۹	۲۳
NBR	-۰/۲۳	۱/۱۵	۲/۴۲	-۰/۳۷	۴/۸۹	۱۰/۳
	-۰/۱۶	۵/۲۹	۱۱/۱۶	-۰/۱۶	۱۴/۹	۳۱/۴
	-۰/۱۲	۱۲/۷۶	۲۶/۹	-۰/۰۲	۱۷/۳	۳۶/۵
	-۰/۰۷	۱۵/۴۵	۳۲/۵	-۰/۴۳	۹/۹۳	۲۰/۹۴
	-۰/۲۴	۱۲/۷۳	۲۶/۸	۱	۰/۲۸	۰/۵۹

شاخص MIRBI به تناسب معادله‌ای که برای محاسبه آن استفاده شده به مقادیری در دامنه ۱- و ۱+ دست نیافته و وضعیت بازتاب را به شکل دیگری نشان داد. بیشترین میزان آستانه در تاریخ ۸ ژانویه معادل ۷۶۲۹ بوده و وسعت آن معادل ۸/۲۴ کیلومتر مربع می‌باشد. در تاریخ ۲۵ ژانویه، حداکثر بازتاب از وسعتی معادل ۱۰/۹ کیلومتر مربع برخوردار می‌باشد که افزایشی در حد ۲/۶۶ کیلومتر مربع را نشان داد. بر اساس این شاخص نیز مناطق متأثر از آتش سوزی در قسمت شمالی منطقه در خاک جمهوری آذربایجان قرار دارد. در شاخص NBR مقادیر مثبت نشان‌دهنده مقادیر بالای بازتاب هستند. حداکثر آستانه در ۸ ژانویه معادل ۰/۲۴ بوده و وسعت آن معادل ۱۲/۷۳ کیلومتر بوده است و وسعتی معادل ۲۶/۸ درصد از محدوده مورد مطالعه را در بر گرفت. این میزان در ۲۵ ژانویه به ۵۷/۵۷ درصد محدوده رسید که افزایش قابل توجهی را نشان داده است. این امر نشان از مناطقی دارد که درگیر پدیده آتش‌سوزی شده‌اند. میزان بازتاب پس از گذشت ۱۵ روز به شکل قابل توجهی افزایش یافته و دوباره مشاهده شد که بخش شمالی از بیشترین تمرکز مناطق آسیب‌دیده برخوردار است.



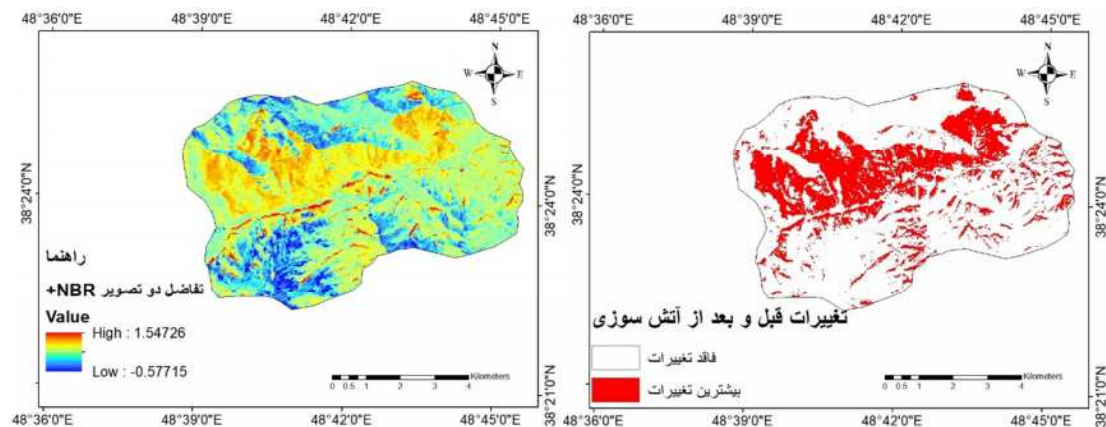
شکل ۳: پهنه متأثر از آتش‌سوزی بر اساس شاخص‌های طیفی در تاریخ ۲۵ ژانویه ۲۰۲۱. منبع: نویسنده

نتایج و بحث

در این پژوهش با توجه به اینکه پوشش ابر و پهنه‌های آبی بازتاب‌هایی را مشابه مناطق آسیب‌دیده از آتش‌سوزی نشان می‌دهند، از شاخص +NBR استفاده شد تا تاثیر این پهنه‌ها کاهش یابد. بر این اساس مشاهده شد که در روز ۸ ژانویه هیچ میزان بازتاب مثبتی در منطقه مورد مطالعه دیده نشده است؛ ولی در ۲۵ ژانویه حدود ۱۱/۲۵ کیلومتر مربع از مقادیر بازتاب مثبت برخوردار بودند که حدود ۲۳/۷۳ درصد منطقه را در بر می‌گرفت. البته لازم به یادآوری

است که در انتخاب تصویر پس از رخداد آتش‌سوزی، روزی انتخاب شد که کمترین میزان پوشش ابر را داشته است. اما آتش‌سوزی در فصل زمستان رخ داده و میزان رطوبت خاک قابل توجه بوده که می‌توانسته در میزان بازتاب و ایجاد اختلال نقش داشته باشد.

با مقایسه تصاویر در شکل ۴، واضح است که شاخص NBR بازتاب‌هایی را در مناطق مرطوب ارائه می‌دهد؛ ولی این بازتاب‌ها در شاخص +NBR مشاهده نمی‌شود. مناطق تحت تاثیر این بازتاب‌ها به اشتباه به عنوان مناطق سوخته طبقه‌بندی می‌شوند؛ زیرا دارای مقادیر درخشندگی بالایی هستند. دومین عنصر مزاحم در این مورد ابرها و سایه‌هایی است که در تصاویر وجود دارند. این پارامترها نه تنها نواحی سوخته‌شده را از سنجنده پنهان می‌کند حتی در مورد شاخص NBR ممکن است که آنها را با نواحی سوخته‌شده اشتباه گرفت. این مشکل در شاخص +NBR حل شده است. در واقع این مناطق نسبت به مناطق سوخته‌شده درخشندگی بسیار پایینی داشته‌اند.



شکل ۴: تفاضل حاصل از تصاویر شاخص +NBR در دوره قبل و بعد از آتش‌سوزی. منبع: نویسنده

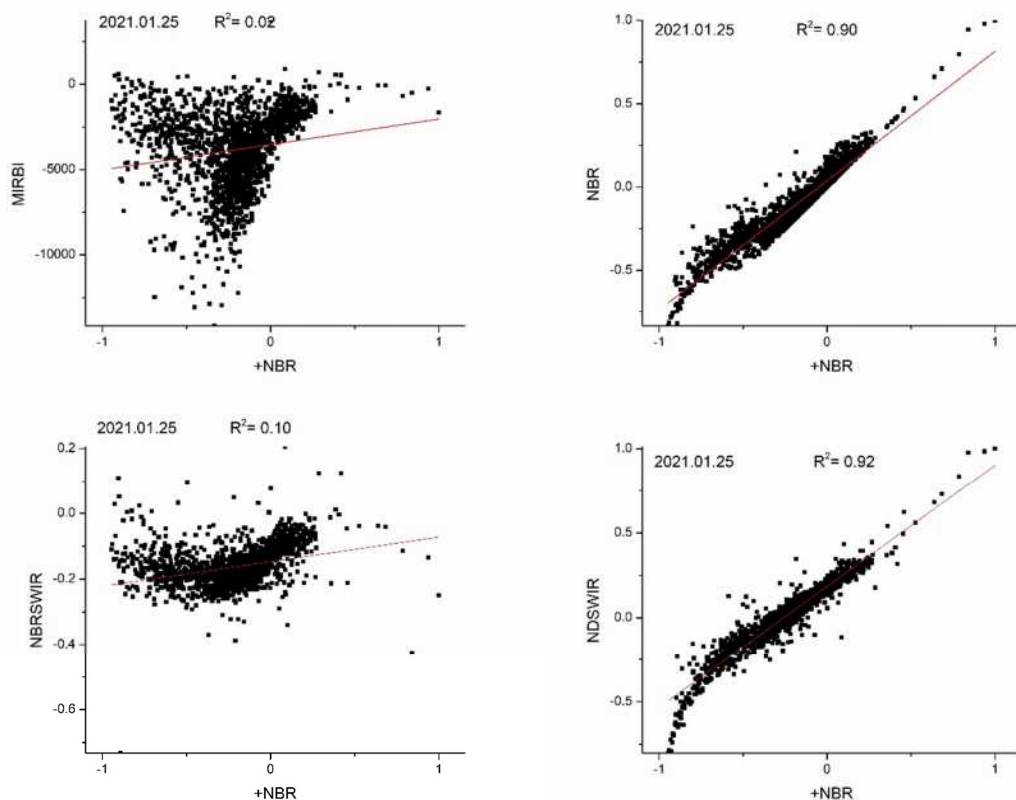
به منظور صحت‌سنجی شاخص‌ها از ضریب کاپا استفاده شد. مقادیر ضریب کاپا برای هر شاخص در جدول ۲ نمایش داده شد. مشاهده می‌شود که شاخص +NBR از بیشترین مقادیر ضریب کاپا در حدود ۰/۹۲ برخوردار است. این درحالیست که شاخص NBR با مقادیر کاپا در حد ۰/۸۶ در جایگاه دوم قرار دارد. ضعیف‌ترین ضریب کاپا به میزان ۰/۴۶ متعلق به شاخص MIRBI بوده است. این شاخص در تشخیص پهنه‌های متأثر از آتش‌سوزی بسیار ضعیف عمل کرده است.

جدول ۲: میزان ضریب کاپا برای شاخص‌های طیفی استفاده‌شده در تاریخ ۲۵ ژانویه ۲۰۲۱

شاخص طیفی	ضریب کاپا
NDSWIR	۰/۷۳
NBR	۰/۸۶
+NBR	۰/۹۲
NBRSWIR	۰/۵۲
MIRBI	۰/۴۶

در آخرین بخش از پژوهش، بین شاخص +NBR با شاخص‌های دیگر همبستگی پیرسون برقرار شد. بر این اساس مشاهده شد که شاخص‌های NDSWIR و NBR بیشترین ضریب همبستگی را به میزان ۰/۹۵ با شاخص +NBR داشته‌اند. ولی ضریب R2 برای شاخص NDSWIR به میزان ۰/۹۲ بوده و نسبت به شاخص NBR که معادل ۰/۹۰

است، بیشتر می‌باشد. کمترین میزان همبستگی به میزان ۰/۱۶ نیز متعلق به شاخص MIRBI بوده که همبستگی بسیار ضعیفی را نشان می‌دهد (شکل ۵، جدول ۳).



شکل ۵: نمودار پراکنش شاخص‌های طیفی با شاخص +NBR در تاریخ ۲۵ ژانویه ۲۰۲۱. منبع: نویسنده

جدول ۳: مقادیر ضریب همبستگی پیرسون و ضریب تعیین R^2 بین شاخص‌های طیفی با شاخص +NBR

شاخص	همبستگی پیرسون	R^2
+NBR, NDSWIR	۰/۹۵	۰/۹۲
+NBR, NBRSWIR	۰/۳۱	۰/۱۰
+NBR, NBR	۰/۹۵	۰/۹۰
+NBR, MIRBI	۰/۱۶	۰/۰۲

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش قابلیت نقشه‌برداری دقیق مناطق سوخته را با استفاده از علم سنجش‌ازدور تایید می‌کند. تصاویر چندطیفی ارائه‌شده توسط سنجنده‌های ماهواره سنتینل ۲ از قابلیت بالایی در تشخیص پهنه‌های آتش‌سوزی برخوردارند؛ ولی نیاز به انتخاب و ترکیب مناسب باندها می‌باشد. در واقع وجود چندین شاخص امکان دستیابی به نتایج مطلوب را فراهم می‌سازد. باین‌حال ویژگی‌های محیطی می‌تواند سطح دقت نقشه نهایی را کاهش دهد. توده-

های آبی و ابرها برای برخی از شاخص‌ها ایجاد خطا نموده و بازتاب‌های کاذب با افزایش غیرموجه در پیکسل‌ها، به عنوان مناطق سوخته در نظر گرفته می‌شود. حتی اگر بتوان با استفاده از روش‌های خاص اختلال توده آبی و ابرها را حذف کرد؛ اما شاخص‌ها بایستی از چنان توانایی برخوردار باشند که اثر این پدیده‌ها را کاهش دهند. شاخص جدید که در این پژوهش برای تصاویر سنتینل ۲ ارائه شده، این امکان را ایجاد می‌کند که بازتاب‌های مناطق سوخته را حتی در صورت وجود پهنه‌های آبی و توده‌ها ابر تشخیص دهد. این شاخص در مقایسه با شاخص‌های MIRBI، NDSWIR، NBR و NBRSWIR به مقادیر بالای ضریب کاپا به میزان ۰/۹۲ دست یافته است. عملکرد بالای شاخص +NBR هم در مورد رویکرد تک زمانی و هم در رویکرد دو زمانی به اثبات رسید. سایر شاخص‌ها در رویکرد تک زمانی به نتایج ضعیف‌تری نسبت به این شاخص دست یافتند؛ ولی شاخص +NBR حتی در این شرایط نیز عملکرد بهتری را به نمایش گذاشت. تنها با استفاده از باندهای ۱۲ و 8A اجسام آبی تمایل به داشتن مقادیر روشنایی بالا در پیکسل‌ها دارند. با کم کردن میزان انرژی، پیکسل‌های باند آب تمایل دارند که تاریک دیده شوند. بنابراین در نهایت مناطق سوخته روشن دیده شده و به راحتی قابل‌شناسایی هستند. علاوه بر این شاخص +NBR با ایجاد مقادیر منفی برای ابرها باعث می‌گردد که این عوارض با پیکسل سوختگی اشتباه گرفته نشود. قابلیت این شاخص توسط تحقیقات روی و همکاران (۲۰۱۶) به تایید رسیده و نتایج مشابهی به دست آمده است.

منابع

- امامی، حسن؛ شهریاری، حسن. (۱۳۹۸). کمی سازی عوامل محیطی و انسانی در وقوع آتش‌سوزی جنگل با روش‌های RS و GIS مناطق حفاظت‌شده ارسباران، فصلنامه اطلاعات جغرافیایی، دوره ۲۸، شماره ۱۱۲، ۵۳-۳۳.
- جانباز قبادی، غلامرضا. (۱۳۹۸). بررسی مناطق خطر آتش‌سوزی جنگل در استان گلستان بر اساس شاخص خطر آتش‌سوزی (FRSI) با بهره‌گیری از تکنیک (GIS)، نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، دوره ۶، شماره ۳، ۱۰۲-۸۹.
- رودسرای، زهره؛ سام خانیانی، علی؛ کیانی، عباس. (۱۴۰۱). مروری بر روش‌های مبتنی بر سنجش‌ازدور در شناسایی و پایش آتش‌سوزی جنگل، نشریه سنجش‌ازدور و GIS ایران، دوره ۱۴، شماره ۴، ۵۲-۱۹.
- عابدی قشلاقی، حسن؛ ولی‌زاده کامران، خلیل. (۱۳۹۷). ارزیابی پهنه‌بندی خطر آتش‌سوزی جنگل با استفاده از تکنیک‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره و GIS، مجله مخاطرات محیط طبیعی، دوره ۷، شماره ۱۵، ۶۶-۴۹.
- عبدی، امید؛ شتایی، شعبان؛ شیروانی، زینب؛ نقوی، محمدرضا. (۱۳۹۰). اثر مدیریت جنگل روی آتش‌سوزی جنگل‌های استان گلستان در سال ۱۳۸۹ با استفاده از GIS، نشریه تحقیقات حمایت و حفاظت جنگل‌ها و مراتع ایران، دوره ۹، شماره ۲، ۱۰۸-۱۰۰.
- فرج زاده، منوچهر؛ قویدل رحیمی، یوسف؛ مکری، ساحل. (۱۳۹۴). تجزیه و تحلیل آتش‌سوزی جنگل با منشا آب‌وهوایی با داده‌های ماهواره‌ای در منطقه البرز، نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، دوره ۲، شماره ۳، ۱۰۴-۸۳.
- Arellano-Pérez, S., Ruiz-González, A. D., Álvarez-González, J. G., Vega-Hidalgo, J. A., Díaz-Varela, R., & Alonso-Rego, C. (2018). Mapping fire severity levels of burned areas in Galicia (NW Spain) by Landsat images and the dNBR index: Preliminary results about the influence of topographical, meteorological, and fuel factors on the highest severity level. *Advances in Forest Fire Research*, 1053-1060.
- Amos, C., Petropoulos, G. P., & Ferentinos, K. P. (2019). Determining the use of Sentinel-2A MSI for wildfire burning & severity detection. *International journal of remote sensing*, 40(3), 905-930.
- Barboza Castillo, E., Turpo Cayo, E.Y., de Almeida, C.M., Salas López, R., Rojas Briceño, N.B., Silva López, J.O., Espinoza-Villar, R. (2020). Monitoring wildfires in the northeastern Peruvian Amazon using Landsat-8 and sentinel-2 imagery in the GEE platform. *International Journal of Geoinformation*, 9, 564- 576.
- Dibs, H., Hasab, H.A., Al-Rifaie, J.K., Al-Ansari, N. (2020). An optimal approach for land-use/land-cover mapping by integration and fusion of multispectral Landsat OLI images: A case study in Baghdad, Iraq. *Water Air Soil Pollution*, 231, 488- 498.
- Epting, J., Verbyla, D., Sorbel, B. (2005). Evaluation of remotely sensed indices for assessing burn severity in interior Alaska using Landsat TM and ETM+. *Remote Sensing Environment*, 96, 328-339.

- García, M.J.L., Caselles, V. (1991). Mapping burns and natural reforestation using thematic mapper data. *Geocarto International*, 6, 31–37.
- Gerard, F., Plummer, S., Wadsworth, R., Sanfeliu, A.F., Iliffe, L., Balzter, H., Wyatt, B. (2003). Forest fire scar detection in the boreal forest with multitemporal spot-vegetation data. *IEEE Trans. Geoscience. Remote Sensing*, 41, 2575–2585.
- Hasmadi, M., Pakhriazad, H.Z., Shahrin, M.F. (2009). Evaluating supervised and unsupervised techniques for land cover mapping using remote sensing data. *Geogr. Malays. Journal of Society and Space*, 5, 1–10.
- Huang, H., Chen, Y., Clinton, N., Wang, J., Wang, X., Liu, C., Zhu, Z. (2017). Mapping major land cover dynamics in Beijing using all Landsat images in Google Earth Engine. *Remote Sensing Environment*, 202, 166–176.
- Ip, F., Dohm, J.M., Baker, V.R., Doggett, T., Davies, A.G., Castano, B., Cichy, B. (2004). ASE floodwater classifier development for EO- 1 Hyperion imagery. *Lunar Planet. Sci*, 35, 1–2.
- Liu, C., Frazier, P., Kumar, L. (2007). Comparative assessment of the measures of thematic classification accuracy. *Remote Sensing Environment*, 107, 606–616.
- Liu, S., Zheng, Y., Dalponte, M., Tong, X. (2020). A novel fire index-based burned area change detection approach using Landsat-8 OLI data. *Eur. Journal of Remote Sensing*, 53, 104–112.
- Mallinis, G., Gitas, I.Z., Giannakopoulos, V., Maris, F., Tsakiri-Strati, M. (2013). An object-based approach for flood area delineation in a transboundary area using ENVISAT ASAR and LANDSAT TM data. *Journal of Digital Earth*, 6, 124–136.
- McFeeters, S.K., 1996. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal Remote Sensing*, 17, 1425–1432.
- Meneses, B.M. (2021). Vegetation recovery patterns in burned areas were assessed with Landsat 8 OLI imagery and environmental biophysical data. *Fire*, 4, 76-92.
- Nolde, M., Plank, S., Riedlinger, T. (2020). An adaptive and extensible system for satellite-based, large-scale burnt area monitoring in near-real time. *Remote Sensing*, 12, 2162- 2189.
- Oliveira, E.R., Disperati, L., Alves, F.L. (2021). A new method (MINDED-BA) for automatic detection of burned areas using remote sensing. *Remote Sensing*, 13, 5164- 5191.
- Ponomarev, E., Zabrodin, A., Ponomareva, T. (2022). Classification of fire damage to boreal forests of Siberia in 2021 based on the dNBR index. *Fire*, 5, 19- 35.
- Pulvirenti, L., Squicciarino, G., Fiori, E., Fiorucci, P., Ferraris, L., Negro, D., Puca, S. (2020). An automatic processing chain for near real-time mapping of burned forest areas using sentinel-2 data. *Remote Sensing*, 12, 674- 691.
- Roy, D.P., Zhang, H.K., Ju, J., Gomez-Dans, J.L., Lewis, P.E., Schaaf, C.B., Kovalsky, V. (2016). A general method to normalize Landsat reflectance data to nadir BRDF adjusted reflectance. *Remote Sensing Environment*, 176, 255–271.
- Saidi, S., Younes, A.B., Anselme, B. (2021). A GIS-remote sensing approach for forest fire risk assessment: Case of Bizerte region, Tunisia. *Applied Geomatic*, 13, 587–603.
- Sanchez, A.H., Picoli, M.C.A., Camara, G., Andrade, P.R., Chaves, M.E.D., Lechler, S., Queiroz, G.R. (2020). Comparison of cloud cover detection algorithms on sentinel-2-2 images of the Amazon tropical forest. *Remote Sensing*, 12, 1284- 1302.
- Schepers, L., Haest, B., Veraverbeke, S., Spanhove, T., Vanden Borre, J., Goossens, R. (2014). Burned area detection and burn severity assessment of a heathland fire in Belgium using airborne imaging spectroscopy (APEX). *Remote Sensing*, 6, 1803–1826.
- Silva, J.M.N., Pereira, J.M.C., Cabral, A.I., Sa', A.C.L., Vasconcelos, M.J.P., Mota, B., Gre'Goire, J.-M. (2003). An estimate of the area burned in southern Africa during the 2000 dry season using SPOT-VEGETATION satellite data. *Journal of Geophysical Research*, 108, 8498- 8522.
- Seydi, S.T. Akhoondzadeh, M., Amani, M., Mahdavi, S. (2021). Wildfire damage assessment over Australia using sentinel-2 imagery and MODIS land cover product within the Google Earth Engine cloud platform. *Remote Sensing*, 13, 220- 246.
- Story, M., Congalton, R.G. (1986). Accuracy assessment: A user's perspective. *Photogrammetric Engineering Remote Sensing*, 52, 397–399.
- Szpakowski, D.M., Jensen, J.L. (2019). A review of the applications of remote sensing in fire ecology. *Remote Sensing*, 11, 2638- 2652.
- Tanase, M.A., Belenguer-Plomer, M.A., Roteta, E., Bastarrika, A., Wheeler, J., Fernández-Carrillo, Á., Chuvieco, E. (2020). Burned area detection and mapping: Intercomparison of sentinel-1 and sentinel-2 based algorithms over tropical Africa. *Remote Sensing*, 12, 334- 351.
- Trigg, S., Flasse, S. (2001). An evaluation of different bi-spectral spaces for discriminating burned shrub-savannah. *International Journal of Remote Sens*, 22, 2641–2647.
- Veraverbeke, S., Hook, S., Hulley, G. (2012). An alternative spectral index for rapid fire severity assessments. *Remote Sensing Environmental*, 123, 72–80.
- Wang, L., Qu, J.J., Hao, X. (2008). Forest fire detection using the normalized multi-band drought index (NMDI) with satellite measurements. *Agricultural and forest Meteorological*, 148, 1767–1776.

Synoptic Patterns of Atmospheric Circulation Affecting Widespread Monthly Droughts in the Cold Period of Iran

Sousan Heidari¹, Mostafa Karimi^{2*} , Ghasem Azizi³, AliAkbar Shamsipour⁴

1. PhD in Climatology, Department of Physical Geography, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran
2. **Corresponding Author**, Associate Professor of Climatology, Department of Physical Geography, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran:
Email: Mostafakarimi.a@ut.ac.ir, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7820-6728>
3. Professor of Climatology, Department of Physical Geography, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran
4. Associate Professor of Climatology, Department of Physical Geography, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article Article history: Received: 18 February 2025 Revised: 05 May 2025 Accepted: 23 May 2025 Published: 22 June 2026 Keywords: Dry periods, Synoptic Patterns, Southwest Asia Cyclone, Subtropical Jet, Trough, Ridge.	Drought is among the most significant climatic challenges affecting arid and semi-arid regions such as Iran, typically triggered by specific atmospheric circulation patterns. This study aims to identify the atmospheric circulation patterns associated with widespread monthly droughts in Iran, using long-term data from 1979 to 2021 and the ZSI index. The dataset, sourced from the ERA5 reanalysis, includes geopotential height, specific humidity, meridional and zonal wind components, air temperature and monthly precipitation with a spatial resolution of 0.25 degrees. The analysis indicates that widespread droughts do not occur during September, June, July and August. Overall, nine atmospheric circulation clusters were identified with four dominant patterns accounting for over 77% of drought events, emerging as the primary synoptic systems responsible for these occurrences. These patterns include: (1) lower-level subtropical high combined with a mid-level subtropical ridge, (2) lower-level subtropical high integrated with the Siberian high-pressure system with a mid-level ridge, (3) subtropical ridge present at both lower and mid-levels, and (4) lower-level high-pressure system and anticyclone over land. The findings emphasise the significant role of anticyclonic centres, high-pressure systems, and subtropical ridges, mainly active between the Arabian Sea and the Arabian Peninsula, in driving widespread monthly droughts in Iran. The northward shift of these systems relative to the climatological mean results in a marked decrease in precipitation across Iran. Additionally, the spatial configuration of these systems interacts with broader regional and planetary circulation patterns, highlighting the necessity for further research to better understand both monthly and seasonal precipitation variability and the occurrence of extreme drought events.
Heidari, S. , Karimi, M. , Azizi, G. and Shamsipour, A. A. (2026). Synoptic Patterns of Atmospheric Circulation Affecting Widespread Monthly Droughts in the Cold Period of Iran. <i>Journal of Natural Environmental Hazards</i>, 15 (48), 19-44.	
 © The Author/Authors DOI: 10.22111/jneh.2025.50956.2105 Publisher: University of Sistan and Baluchestan	

EXTENDED ABSTRACT

INTRODUCTION

Drought is one of the most significant climatic hazards, especially in arid and semi-arid regions such as Iran. Its intensity and extent have been increasing due to climate change and atmospheric circulation patterns. This natural phenomenon is directly linked to anomalies in mid- and upper-tropospheric atmospheric conditions. Synoptic phenomena such as cyclones, anticyclones, troughs, and ridges play a crucial role in the occurrence and severity of droughts. Studies by Pary et al. (2010) and Lutka et al. (2020) have demonstrated that high-pressure ridges and low-pressure troughs in the mid-troposphere can intensify drought conditions across extensive areas in Europe and its central regions. Both global and regional research have confirmed that synoptic systems influence pressure and wind anomalies, ultimately affecting precipitation patterns and contributing to the development and persistence of prolonged and severe droughts in various regions. Furthermore, identifying atmospheric patterns associated with drought occurrence at global and regional scale enables more effective forecasting and management of this hazard.

Domestic studies have emphasised that changes in atmospheric structures, particularly in mid- and upper-tropospheric pressure systems over West Asia and the Mediterranean, have a significant impact on Iran's droughts and widespread extreme events (Khoshakhlagh et al., 2012 & 2020; Mohammadi et al., 2012; Azizi & Alizadeh, 2014; Saghaei et al., 2023; Mashaikh et al., 2023; Vaziri et al., 2023). Although numerous studies have examined this hazard from various perspectives, especially from a synoptic standpoint, comprehensive research investigating both the spatial-temporal distribution and synoptic circulation patterns has been limited. The objective of this study is not only to identify the monthly synoptic circulation patterns associated with widespread droughts in Iran but also to analyse the atmospheric structure of these patterns. The findings of this study will provide a deeper understanding of the relationship between monthly circulation patterns and the occurrence of extensive droughts across Iran.

DATA AND METHODS

Widespread monthly droughts in Iran are primarily influenced by four major synoptic circulation patterns, represented by clusters 7, 8, 1, and 5. These clusters collectively account for over 77% of widespread drought occurrences, with clusters 7 and 8 alone contributing to more than 50% of these events (Table 1).

In autumn, clusters 7 and 5 play a dominant role in the occurrence of widespread droughts, while clusters 4, 5, and 6 are particularly active in October. During winter, cluster 8 is the most influential pattern in December, January, and February, with cluster 7 also contributing significantly in February. In spring, cluster 7 is prominent in March, cluster 1 in April, and both clusters 7 and 5 are influential in May.

These findings highlight the critical impact of specific synoptic patterns on Iran's drought conditions. A better Understanding of these patterns can improve drought prediction and management, leading to more effective strategies to mitigate the impact of this climatic hazard.

Table 1: Temporal Distribution of Synoptic Circulation Clusters Related to Widespread Monthly Droughts (with an affected area greater than 80%)

Cluster	OCT	NOV	DEC	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	Total contribution	Percentage of total Frequency
1			2	1		1	8	2	14	14.4%
2		1	1	2	1	1	1		7	7.2%
3	2				1	3			6	6.2%
4	4							1	5	5.2%
5	6	2				1		3	12	12.4%
6	4								4	4.1%
7		8	2	1	5	6	3	4	29	29.9%
8		4	5	5	5	1			20	20.6%
Total Widespread Monthly Drought	16	15	10	9	12	13	12	10	97	100%

To identify the atmospheric patterns influencing widespread monthly droughts in Iran, ERA5 reanalysis data from the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) were utilized. These data include geopotential height, specific humidity, zonal and meridional wind components, and air temperature at five pressure levels (850, 700, 500, 300, and 200 hPa), as well as monthly precipitation from 1979 to 2021. These data, with a spatial resolution of 0.25 degrees and a monthly temporal resolution, cover atmospheric conditions over Iran and its surrounding regions. The accuracy of ERA5 precipitation data has been confirmed in various studies, and its use is recommended (Rahmatova et al., 2021; Taghizadeh et al., 2021; Heidari et al., 2024; Bahrami & Darand, 2024).

The ZSI index was employed to assess drought severity, categorizing drought occurrence into two distinct states: 0 (no drought) and 1 (drought). To distinguish between regional and widespread droughts, a drought event was considered widespread if more than 80% of Iran's land area was affected. The results indicated that widespread droughts occurred only in eight months of the year (October to May), with no widespread events recorded during the warm-season months. Climatologists use cluster analysis as a common method to identify homogeneous climatic regions (Masoudian & Ataei, 2005; Masoudian, 2012; Mohammadiarian et al., 2019; Gerami et al., 2023). In this study, hierarchical clustering with Ward's method and correlation distance was employed for synoptic pattern classification. Geopotential height data at the 500-hPa level were transformed into a similarity matrix, and clustering was performed on a monthly scale. The analysis identified eight circulation clusters associated with widespread droughts in Iran, each cluster representing distinct atmospheric patterns that contribute to or exacerbate drought conditions during specific periods.

The selection of key clusters for final analysis was based on the temporal distribution and frequency of drought events. This approach allows for a more precise identification of the atmospheric patterns driving droughts.

RESULTS AND DISCUSSION

Widespread droughts in Iran are primarily influenced by three key factors: the position of anticyclones at lower atmospheric levels, the presence of mid-level troughs and ridges, and the subtropical jet stream at upper levels. During drought periods, the southwest Asian (Arabian) anticyclone shifts westward and settles over the Arabian Peninsula. This displacement reduces moisture advection from southern seas, increases geopotential height, and enhances negative vorticity, ultimately intensifying drought conditions. Conversely, during wet years, the eastward shift and expansion of the anticyclone's eastern flank strengthen moisture transport and enhance precipitation.

In December, the combination of the subtropical high and the Siberian high-pressure system plays a crucial role in widespread droughts in Iran. The westward extension of the Siberian high-pressure system influences the country across the west. Variations in the Mediterranean trough and westerly winds are significant factors in determining whether droughts occur or precipitation increases. Analyses have shown that the formation of blocking patterns at mid-latitudes and changes in ridge axes, particularly their elongation, can impact drought severity.

Furthermore, the subtropical jet stream is another key factor in the development of widespread droughts. Changes in the location and speed of its core control mid-level atmospheric flow dictate the pathways of cyclones entering Iran. These findings indicate that for predicting and managing Iran's droughts, understanding the dynamics of atmospheric systems and their interactions with geographical features is essential.

CONCLUSION

Widespread monthly droughts in Iran are primarily influenced by specific atmospheric circulation structures, including subtropical anticyclones, mid-level troughs and ridges associated with westerly winds, and subtropical jet streams. During the cold season, the northwestward shift of the southwest Asian anticyclone prevents precipitation systems from entering and blocks moisture transport from southern seas, leading to drought. Conversely, its eastward movement creates favorable conditions for precipitation.

At mid-tropospheric levels (500 and 700 hPa), the establishment of an anticyclone over the Arabian Peninsula suppresses atmospheric instability and limits the deepening of Mediterranean troughs. Additionally, the presence of a lower-level (850-hPa) anticyclone can transport moisture from the Arabian Sea to Iran. The extension of ridges and the stabilization of the subtropical jet stream over southwestern Iran are other critical factors contributing to widespread droughts, as they hinder the penetration of precipitation systems into the country.

REFERENCES

References [in Persian]

- Azizi, G. and Alizadeh, T. (2014). The Relationship between Circulation Pattern Types in Sea Level Pressure and Precipitation in Iran. *Physical Geography Research*, pp 46(3), pp 297-310. doi: 10.22059/jphgr.2014.52133. [In Persian]
- Bahrani, A. and Darand, M. (2024). Evaluation of Temporal-Spatial Accuracy of Precipitation Estimation of ERA-5 Database over Iran. *Iranian Journal of Geophysics*, 19(1), 27-46. doi: 10.30499/ijg.2024.455625.1599. [In Persian]
- Gerami, M. S., Karimi, M., Azizi, G. and Rafati, S. (2022). Synoptic analysis of precipitation and Widespread spring thunderstorm in North-West Iran. *Physical Geography Research*, 54(1), pp 95-110. doi: 10.22059/jphgr.2022.334160.1007659. [In Persian]
- Heidari, S., Karimi, M. and Beyranvand, A. (2024). Evaluate the performance of ERA5 reanalysis data in Iran's rainfall estimation and spatial analysis of the country's precipitation regime. *Research in Earth Sciences*, 15(2), pp 1-24. doi: 10.48308/esrj.2024.104225. [In Persian]
- Khoshakhlagh, F., Karimi Ahmad Abad, M., Jasemi, S. M., & Kaki, S. (2020). Statistical-Synoptic analysis on the climatic variability of the rainfall regime in the mid-west of Iran with emphasis on the occurrence of severe droughts. *Climate Change Research*, 1(1), pp 63-82. doi:10.30488/ccr.2020.235986.1004. [In Persian]
- Khoshakhlagh, F., Azizi, Q., & Rahimi, M. (2012). Synoptic patterns of drought and wet spells in southwestern Iran during winter. *Geographical Sciences*, 12(25), pp 57-77. [In Persian]
- Mashayekh, F., Lashkari, H., Daryabari, S. and Ranjbar, M. (2022). Analysis of the effectiveness of precipitation anomalies during the occurrence of extreme and extreme droughts in the south of Iran in the last three solar cycles. *Geography*, 20(74), pp 1-20. <http://dor.net/dor/20.1001.1.27833739.1401.20.74.1.1> [In Persian]
- Masoudian, S. A. (2012). Identification of weather types in Isfahan. *Geographical Research*, 27(3), pp 65-86. [In Persian]
- Masoudian, S. A., & Ataei, H. (2005). Identification of rainy seasons in Iran using cluster analysis. *Humanities Journal of Isfahan University*, 18(1), pp 1-12. [In Persian]
- Mohamadyariyan M, Tavousi T, khosravi M, Hamidiyanpour M. Zoning of Iranian Heavy Precipitation Regime. *GeoRes* 2019; 34 (2), pp 183-192. Doi: 10.29252/geores.34.2.183. [In Persian]
- Mohammadi, H., Fattahi, E., Shamsipour, A., Akbari, M. (2012). Dynamic analysis of Sudanic systems and occurrence of heavy rainfall in southwestern Iran, *Journal of Applied Research in Geographical Sciences (JARGS)*, 12(24), pp 24-7. [In Persian]

Saghafi, M., Barati, G. R., Alijani, B., & Moradi, M. (2022). Comparative analysis of the mechanism of autumn and winter rainfalls in the southwest of Iran. *Research in Earth Sciences*, 13(2), pp 58-69. doi:[10.48308/esrj.2022.100930](https://doi.org/10.48308/esrj.2022.100930). [In Persian]

Vazirimehr, M. , Hamidianpour, M. , Khosravi, M. and Nazaripour, H. (2022). Atmospheric circulation types and winter extreme dry/wet spells in the southeast district of Iran. *Journal of the Earth and Space Physics*, 48(3), 641-656. doi:10.22059/jesphys.2022.327069.1007337. [In Persian]

References [in English]

Lhotka, O., Trnka, M., Kyselý, J., Markonis, Y., Balek, J. and Možný, M. (2020). Atmospheric circulation as a factor contributing to increasing drought severity in central Europe. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125(18), p.e2019JD032269. <https://doi.org/10.1029/2019JD032269>

Parry, S., Prudhomme, C., Hannaford, J. and Lloyd-Hughes, B. (2010). Examining the spatio-temporal evolution and characteristics of large-scale European droughts. In *Proceedings of the BHS Third International Symposium* (pp. 135-142). British Hydrological Society. <http://www.ceb.ncl.ac.uk/bhs2010/>

Rakhmatova, N.; M. Arushanov, L. Shardakova, B. Nishonov, R. Taryannikova, V. Rakhmatova, and D.A. Belikov. (2021). Evaluation of the Perspective of ERA-Interim and ERA5 Reanalyses for Calculation of Drought Indicators for Uzbekistan. *Atmosphere*, 5: 527. doi.org/10.3390/atmos12050527

Taghizadeh, E.; F. Ahmadi-Givi, L. Brocca, and E. Sharifi. (2021). Evaluation of satellite/reanalysis precipitation products over Iran. *International Journal of Remote Sensing*, 9: pp 3474-3497. doi.org/10.1080/01431161.2021.1875508.

مجله علمی پژوهشی مخاطرات محیط طبیعی، دوره ۱۵، شماره ۴۸، شماره پیاپی ۰۲، تیر ۱۴۰۵

الگوهای همدید گردش جو مؤثر بر خشکسالی‌های ماهانه فراگیر دوره سرد ایران

سوسن حیدری^۱، مصطفی کریمی^{۲*} , قاسم عزیزی^۳، علی اکبر شمسی پور^۴

۱. دانش آموخته دکتری اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، ایران

۲. دانشیار اقلیم‌شناسی گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، ایران (نویسنده مسئول)

ایمیل: Mostafakarimi.a@ut.ac.ir؛ ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7820-6728>

۳. استاد اقلیم‌شناسی گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، ایران

۴. دانشیار اقلیم‌شناسی گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، ایران

چکیده	اطلاعات مقاله
خشکسالی یکی از چالشی‌ترین پدیده‌های اقلیمی در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند ایران است که تحت تأثیر الگوهای خاص گردش جوی رخ می‌دهد. این پژوهش به‌منظور شناسایی الگوهای گردش جوی خشکسالی‌های فراگیر ماهانه در ایران با استفاده از داده‌های بلندمدت (۱۹۷۹ تا ۲۰۲۱) و شاخص ZSI انجام شده است. داده‌های مورد استفاده شامل ارتفاع ژئوپتانسیل، نم و یژه، دما، باد مداری و نصف‌النهار و بارش ماهانه از پایگاه داده ERA5 با تفکیک مکانی ۰/۲۵ درجه می‌باشند. براساس نتایج، در ماه‌های سپتامبر، ژوئن، ژوئیه و آگوست هیچ‌گونه خشکسالی فراگیری مشاهده نشد. ۸ خوشه گردش جو برای خشکسالی‌های فراگیر ماهانه شناسایی شد. از میان این ۸ خوشه، ۴ خوشه با فراوانی بیش از ۷۷ درصد، الگوهای غالب گردش جو و سامانه‌های همدید مؤثر در وقوع خشکسالی‌های فراگیر شناسایی شدند. این ۴ الگوی جوی به‌ترتیب فراوانی شامل الف) پراارتفاع جنب‌حاره تراز زیرین همراه با پشته جنب‌حاره تراز میانی، ب) پراارتفاع جنب‌حاره تراز زیرین تلفیق‌شده با پرفشار سبیری همراه با پشته تراز میانی، ج) پشته پراارتفاع جنب‌حاره تراز زیرین و میانی و د) پراارتفاع - واچرخند تراز زیرین مستقر بر خشکی می‌باشند. به‌طور کلی، مرکز واچرخندی، پراارتفاع و پشته‌های جنب‌حاره که به‌طور متوسط در محدوده‌ای از دریای عرب تا شبه‌جزیره عربستان فعال هستند، نقش اساسی در رخداد خشکسالی‌های فراگیر ماهانه ایران ایفا می‌کنند. این پدیده‌های همدید با گسترش شمال‌سو نسبت به شرایط میانگین، باعث کاهش شدید بارش در ایران می‌شوند. همچنین، الگوی استقرار این پدیده‌ها در اندرکنش با سایر ساختارهای گردش جو منطقه و سیاره‌ای است. بنابراین، بررسی چرایی این تغییرات می‌تواند به درک تغییرپذیری بارش ماهانه و فصلی و رخدادهای شدید و فراگیر خشکسالی کمک قابل‌توجهی کند.	نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۳۰ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۲/۱۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۰۲ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۳/۱۶ واژه‌های کلیدی: دوره‌های خشک، الگوهای همدید، واچرخند جنوب‌غرب آسیا، جت جنب‌حاره، ناوه و پشته.

استناد: حیدری، سوسن، کریمی، مصطفی، عزیزی، قاسم و شمسی پور، علی اکبر. (۱۴۰۵). الگوهای همدید گردش جو مؤثر بر خشکسالی‌های ماهانه فراگیر دوره سرد ایران. *مخاطرات محیط طبیعی*، ۱۵ (۴۸)، ۱۹-۴۴.

ناشر: دانشگاه سیستان و بلوچستان

© نویسنده/ نویسندگان

DOI: 10.22111/jneh.2025.50956.2105



مقدمه

خشکسالی یکی از مهم‌ترین ناهنجاری‌های جوی است که اثرات عمیقی بر اکوسیستم‌ها، کشاورزی و منابع آبی جوامع دارد. این مخاطره طبیعی در نتیجه تغییرات اقلیمی و نوسانات الگوهای گردش جو، به‌ویژه در نواحی خشک و نیمه‌خشک همچون ایران، تشدید نیز خواهد شد. تغییر در الگوهای جوی شامل چرخندها، واچرخندها و سامانه‌های همدید می‌شود، می‌تواند منجر به تغییرات شدیدی در اقلیم و بروز خشکسالی‌های طولانی و مداوم گردد. بنابراین، درک دقیق این الگوها و رابطه آن‌ها با تغییرپذیری بارش و رخداد مخاطره خشکسالی در هر منطقه‌ای، ضروری است. مطالعات جهانی نشان داده‌اند که ارتباط پیچیده‌ای میان الگوهای جوی و وقوع خشکسالی‌ها در مقیاس کلان وجود دارد؛ به‌طوری‌که این ارتباط می‌تواند به‌عنوان یک ابزار پیش‌بینی‌کننده مهم در مدیریت بحران‌های خشکسالی مورد استفاده قرار گیرد. برای مثال، پژوهش‌هایی مانند مطالعه خشکسالی‌های ایالات متحده (نامیاس^۱، ۱۹۹۱)، گردش جو و خشکسالی‌های چانگما (بیون^۲، ۱۹۹۲، a, b) و علل خشکسالی‌های آمریکای شمالی (ترنبرث و برانستاتور^۳، ۱۹۹۲) نشان داده‌اند که بسیاری از خشکسالی‌ها به‌طور مستقیم با تغییرات در الگوهای گردش جو، به‌ویژه در ترازهای میانه و بالای جو مرتبط هستند. به‌ویژه در خشکسالی‌های مناطقی نظیر هاوایی (چو و همکاران^۴، ۱۹۹۳) کره (بیون^۵، ۱۹۹۶) و اروپای مرکزی (کرویتورو و همکاران^۶، ۲۰۱۱؛ برونر و چارتیه-رسکن^۷، ۲۰۲۴) مشاهده شده است که ناهنجاری‌های جوی در این ترازها می‌توانند الگوهای خشکسالی را تقویت یا تضعیف کنند. در این راستا، پژوهش‌های مختلف نشان داده‌اند که ساختارهای خاص گردش جو، ازجمله سامانه‌های واچرخند، ناوه‌ها و پشته‌ها، به‌طور قابل‌توجهی بر شدت و مدت زمان خشکسالی‌ها در مناطق مختلف تأثیرگذارند. برای مثال، پژوهش‌های ژیراردین^۸ و همکاران (۲۰۰۶) و بونتگن^۹ و همکاران (۲۰۱۰) بر تحلیل سینوپتیکی خشکسالی‌های کانادا و آلمان تأکید دارند که در این مناطق، پشته‌های بلند در تراز بالای جو و سامانه‌های فشاری در تراز میانه جو، نقش اصلی در گسترش خشکسالی‌ها ایفا می‌کنند. در همین راستا، مطالعات پاری^{۱۰} و همکاران (۲۰۱۰) و لوتکا^{۱۱} و همکاران (۲۰۲۰) نیز نشان داده‌اند که پشته‌های فشار بالا و ناوه‌های کم‌فشار در تراز میانه جو می‌توانند الگوهای جوی خشکسالی را در سطوح وسیع‌تری در اروپا و منطقه مرکزی آن تقویت کنند. علاوه بر این، نتایج پژوهش‌هایی مانند آنچه که توسط فاولر و آدامز^{۱۲} (۲۰۰۴) انجام شده، بر اهمیت تأثیرات دورپیوندهای اقیانوسی و جوی در پیش‌بینی خشکسالی‌ها تأکید دارند. نتایج کلی این پژوهش‌ها نشان می‌دهند که خشکسالی‌ها نه‌تنها به‌واسطه ناهنجاری‌های بارشی بلکه به‌طور عمده از طریق تغییرات در گردش جو و فشار سطح زمین بروز می‌کنند. سامانه‌های فشاری، پشته‌ها، ناوه‌ها و ناهنجاری‌های گردش جو در ترازهای مختلف، به‌ویژه در تراز میانه و بالای جو، به‌عنوان عوامل کلیدی در تشدید

1 Namias

2 Byun

3 Trenberth & Branstator

4 Chu et al

5 Byun

6 Croitoru et al

7 Brunner & Chartier-Rescan

8 Girardin

9 Buntgen

10 Parry

11 Lhotka

12 Fowler and Adams

خشکسالی‌های شدید و طولانی‌مدت شناخته شده‌اند. به‌علاوه، الگوهای جوی مانند تغییرات فصلی در موقعیت‌های پشته و ناوه می‌توانند به‌طور مؤثری زمان‌بندی و شدت خشکسالی‌ها را در سطح جهانی تعیین کنند.

پژوهش‌های داخلی نشان می‌دهد که خشکسالی در ایران به‌طور پیچیده‌ای تحت تأثیر الگوهای جوی و پدیده‌های همدید قرار دارد. خسروی (۱۳۸۳) روابط میان الگوهای چرخش جوی کلان‌مقیاس نیم‌کره شمالی و خشکسالی‌های سالانه سیستان و بلوچستان را بررسی کرده است. در پژوهش دیگری، مفیدی و زرین (۱۳۸۴) تأثیر سامانه‌های کم‌فشار سودانی را در ایجاد بارش‌های سیل‌زا در ایران مورد مطالعه قرار داده‌اند. این پژوهش‌ها نشان‌دهنده ارتباط تنگاتنگ الگوهای جوی با وقوع خشکسالی‌های منطقه‌ای است. درعین‌حال، پژوهش‌های دیگری مانند اردکانی و همکاران (۱۳۸۷) و رضیئی و همکاران (۱۳۸۸) بر تحلیل دینامیک همیدیدی بارش‌های شدید در مناطق مختلف، ازجمله خراسان و خاورمیانه تأکید دارند. همچنین، جعفربیگللو و همکاران (۱۳۸۸) و خوش‌اخلاق و همکاران (۱۳۹۱) و ۱۳۹۹) به‌ویژه الگوهای همدید را که موجب ترسالی‌های غرب ایران و خشکسالی جنوب‌غرب ایران می‌شوند، مورد تحلیل قرار دادند. در این راستا، مطالعاتی مانند پژوهش‌های محمدی و همکاران (۱۳۹۱) و رنجبرسعادت‌آبادی و همکاران (۱۳۹۲) نشان می‌دهند که سامانه‌های خاص جوی نظیر سامانه‌های کم‌فشار سودانی و تغییرات فشاری می‌توانند عامل اصلی در وقوع خشکسالی‌های طولانی‌مدت و فراگیر در شمال و جنوب‌غرب ایران باشند. در مقابل، برخی پژوهش‌ها مانند پژوهش عزیزی و علیزاده (۱۳۹۳) و ثقفی و همکاران (۱۴۰۱) به تحلیل بی‌هنجاری‌های الگوهای فشاری و تأثیر آن‌ها بر بارش‌های فراگیر ایران و به‌خصوص در مناطق جنوب غرب ایران پرداخته‌اند. پژوهش‌های اخیر مانند گوهری و همکاران (۱۴۰۱)، مشایخ و همکاران (۱۴۰۱) و وزیری‌مهر و همکاران (۱۴۰۱) نیز به‌ویژه بر مکانیزم‌های جوی مؤثر بر ناهنجاری‌های شدید بارشی و ارتباط آن‌ها با خشکسالی‌های شدید و فوق‌شدید در جنوب و جنوب‌شرق ایران تأکید دارند.

پژوهش‌های انجام‌شده نشان می‌دهند که وردش گردش جو و تغییرپذیری الگوهای همدید، به‌ویژه پدیده‌های اصلی آن یعنی واچرخندها و چرخندهای فعال در منطقه، می‌توانند به‌طور قابل‌توجهی بر وقوع خشکسالی‌های شدید اثر بگذارند. به‌طور خاص، واچرخندها همان‌گونه که در شرایط تشدید بارش نقش دارند، می‌توانند شرایط خشکی را در مناطق مختلف ایران تشدید کنند و موجب گسترش و افزایش شدت خشکسالی‌های منطقه‌ای شوند. در مجموع، بررسی مجموعه این پژوهش‌ها نشان می‌دهد که الگوهای گردش جو و همدید، ازجمله نحوه قرارگیری واچرخندها، چرخندهای و تغییرات الگوهای جریان باد، نقش بسیار مهمی در شکل‌گیری خشکسالی‌های نواحی مختلف ایران دارند. این پژوهش‌ها از یک‌سو بر اثر سامانه‌های خاص جوی مانند کم‌فشارهای سودانی و واچرخندها در ایجاد بارش‌های سنگین و ناهنجاری‌های بارشی تأکید دارند و ازسوی دیگر، برخی به ارتباط تغییرات الگوهای فشاری با خشکسالی‌های مناطق مختلف ایران پرداخته‌اند.

بااین‌حال، علی‌رغم این که پژوهش‌هایی در این زمینه انجام شده است، ولی همچنان چندین شکاف علمی نیز وجود دارد که نیاز است به آن‌ها پرداخته شود. اکثر پژوهش‌ها بر دوره‌های زمانی کوتاه‌مدت متمرکز بوده و کمتر به تحلیل الگوهای جوی در سطح وسیع‌تر و در مقیاس‌های بلندمدت پرداخته‌اند. علاوه بر این، رویکردهای مطالعاتی بیشتر منطقه‌ای و حتی گاهی محلی بوده است. این پژوهش در صدد است تا با ارائه یک رویکرد جامع‌تر از نظر زمانی - مکانی و تمرکز بر خشکسالی‌های فراگیر (بر مبنای آستانه ۸۰ درصد مساحت کشور) در مقیاس ماهانه و تحلیل الگوهای همیدیدی موجب رخداد خشکسالی‌های فراگیر ملی را در سه لایه زیرین، میانی، بالا و نیم‌رخ جو، دیدی

روشن‌تر از اندک‌نش دو بخش اصلی سامانه اقلیمی، گردش جو و سطح زمین ارائه دهد. بنابراین، هدف اصلی این مطالعه، شناسایی و تحلیل الگوهای ماهانه گردش جو موجب خشکسالی‌های فراگیر ماهانه ایران است. انتظار می‌رود نتایج این پژوهش بتواند به بهبود پیش‌بینی‌های خشکسالی با استفاده از پیش‌بینی‌های فصلی داده‌های جوی که قابل استفاده در برنامه‌ریزی و مدیریت بهتر منابع آبی و مقابله با بحران‌های آبی در کشور باشد، کمک کند.

داده‌ها و روش‌ها

برای بررسی الگوهای جوی اثرگذار بر خشکسالی‌های فراگیر ماهانه در ایران، داده‌های ماهانه بارش در محدوده سرزمین ایران و متغیرهای جوی شامل ارتفاع ژئوپتانسیل، دمای هوا، بردار و سرعت باد و نم ویژه در محدوده‌ای از ۴۰ درجه غربی تا ۷۰ درجه شرقی و ۱۰ تا ۷۰ درجه شمالی مورد استفاده قرار گرفت. این داده‌ها بازه زمانی ۴۳ ساله از سال ۱۹۷۹ تا ۲۰۲۱ را در بر می‌گیرند و با تفکیک زمانی ماهانه دریافت شده‌اند. تحلیل‌ها در پنج تراز مختلف شامل ۸۵۰، ۷۰۰، ۵۰۰، ۳۰۰ و ۲۰۰ هکتوپاسکال انجام شده است. داده‌های یادشده، اطلاعات جامعی درباره شرایط جوی ارائه می‌دهند که صحت و دقت آن‌ها در مطالعات پیشین (مولایی و لشکری، ۱۳۹۹) مورد تأیید قرار گرفته است.

برای تهیه داده‌های بارش و جوی، از مجموعه داده‌های ERA5، یکی از پیشرفته‌ترین محصولات مرکز پیش‌بینی میان‌مدت هواشناسی اروپا (ECMWF) استفاده شد. این داده‌ها با تفکیک مکانی ۰/۲۵ درجه و تفکیک زمانی ماهانه، به صورت یکنواخت در فضا توزیع شده‌اند و خطاهای ناشی از درون‌یابی داده‌های ایستگاهی را کاهش می‌دهند. صحت داده‌های بارش ERA5 نیز در پژوهش‌های مختلف تأیید و استفاده از آن توصیه شده است (رحمتا و همکاران^۱، ۲۰۲۱؛ تقی زاده و همکاران^۲، ۲۰۲۱؛ حیدری و همکاران، ۱۴۰۳؛ بهرامی و دارند، ۱۴۰۳).

در مرحله نخست، داده‌های بارش ماهانه در بازه ۱۹۷۹ تا ۲۰۲۱ با استفاده از نرم‌افزار MATLAB به صورت آرایه‌ای با ابعاد ۵۹×۷۸×۵۰۴ تشکیل شدند. در این آرایه، ۵۹×۷۸ تعداد گره‌ها با تفکیک مکانی ۰/۲۵ درجه و ۵۰۴ نشان‌دهنده تعداد ماه‌ها است که در قالب ماتریسی با ساختار (S) (زمان در سطر و مکان در ستون‌ها) سازمان‌دهی و سپس برای تحلیل‌های بعدی پردازش گردیدند.

سپس برای ارزیابی شدت خشکسالی، از شاخص ZSI استفاده شد که یک شاخص بدون بُعد مبتنی بر میانگین و انحراف معیار بارش است. این شاخص از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$ZSI = \frac{X_i - \bar{X}}{\delta} \quad (1)$$

$\bar{X}$ ، X_i و δ به ترتیب مقادیر بارش، میانگین بلندمدت و انحراف معیار بارش در دوره زمانی ماهانه می‌باشد (محمدی و همکاران^۳، ۲۰۱۹) که شدت‌های خشکسالی آن شامل ۴ طبقه (خشکسالی بسیار شدید (شاخص کمتر از -۱/۲۵)، شدید (-۱/۲۵ تا -۰/۸۴)، متوسط (-۰/۸۴ تا -۰/۵۲) و ضعیف (-۰/۵۲ تا -۰/۲۵) می‌باشد (مشاری و همکاران^۴،

1 - Rakhmatova et al

2 - Taghizadeh et al

3 - Mahmoudi et al

4 - Mashari et al

۲۰۱۴؛ اکوزوو و همکاران^۱، ۲۰۲۰). در اینجا لازم است به این نکته اشاره شود که هدف اصلی پژوهش، بررسی شدت خشکسالی نبوده است. به عبارت دیگر، تمرکز بر طبقه‌بندی خشکسالی‌ها از ضعیف تا بسیار شدید مدنظر نبوده، بلکه تنها وقوع یا عدم وقوع خشکسالی به عنوان دو وضعیت متمایز (صفر و یک) مورد توجه قرار گرفته است. در این رویکرد، تمامی انواع خشکسالی، از ضعیف‌ترین تا شدیدترین، به صورت کلی به عنوان یک وضعیت برای تحلیل در نظر گرفته شده‌اند.

در گام بعد، گستره خشکسالی ماهانه محاسبه گردید. درصد مساحت تحت تأثیر خشکسالی با رابطه زیر تعیین شد:

$$PDA = \frac{\sum_{i=1}^n g_n}{n} \times 100 \quad (2)$$

که در آن: PDA درصد گستره خشکسالی، g_n تعداد گره‌های تحت شرایط خشکسالی، n کل گره‌های واقع در محدوده‌ی ایران می‌باشد.

در این پژوهش، «خشکسالی فراگیر» به عنوان وضعیتی تعریف شده است که در آن بیش از ۸۰ درصد از مساحت جغرافیایی ایران تحت تأثیر خشکسالی قرار گرفته باشد. این مفهوم بر اساس طبقه‌بندی گستره خشکسالی به پنج بازه درصدی (۰ تا ۲۰، ۲۰ تا ۴۰، ۴۰ تا ۶۰، ۶۰ تا ۸۰، و ۸۰ تا ۱۰۰) ارائه شده است. انتخاب آستانه ۸۰ درصد برای تعریف خشکسالی فراگیر، با هدف تمایز بین خشکسالی‌های منطقه‌ای و ناحیه‌ای صورت گرفته است. این آستانه نشان‌دهنده وضعیتی است که خشکسالی به شکل گسترده و همه‌جانبه، بخش عمده‌ای از پهنه کشور را در بر می‌گیرد. نتایج استخراج گستره‌های خشکسالی ماهانه نشان داد که در دوره مطالعاتی ۲۰۲۱-۱۹۷۹، ۹۷ خشکسالی ماهانه فراگیر رخ داده که توزیع آن در جدول ۱ آمده است.

بر اساس نتایج، ۴ ماه دوره گرم سال یعنی ژوئن، ژوئیه، آگوست و سپتامبر در هیچ یک از این ماه‌ها خشکسالی در بیش از ۸۰ درصد مساحت کشور رخ نداده است. بنابراین، تحلیل خوشه‌ای بر روی داده‌های ۸ ماه اکتبر الی می انجام گرفته است.

جدول ۱: فراوانی رخداد خشکسالی فراگیر (بیش از ۸۰٪ مساحت کشور) ماهانه در ایران (منبع: نویسندگان)

ماه	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	می	ژوئن	ژوئیه	آگوست
فراوانی خشکسالی فراگیر	۰	۱۶	۱۵	۱۰	۹	۱۲	۱۳	۱۲	۱۰	۰	۰	۰

در مرحله بعد، برای شناسایی خوشه‌های زمانی خشکسالی‌های فراگیر و الگوهای جوی مرتبط با آن‌ها، از تحلیل خوشه‌ای استفاده شد. تحلیل خوشه‌ای یک روش آماری است (مسعودیان، ۱۳۸۴). اقلیم‌شناسان از تحلیل خوشه‌ای برای شناسایی مناطق همگن اقلیمی استفاده می‌کنند (مسعودیان و عطایی، ۱۳۸۴؛ مسعودیان، ۱۳۹۱؛ محمدیاران و همکاران، ۱۳۹۸؛ گرامی و همکاران، ۱۴۰۱). این روش یکی از الگوریتم‌های یادگیری بدون نظارت است که داده‌ها را بر اساس شباهت به گروه‌های مختلف دسته‌بندی می‌کند. روش‌های خوشه‌بندی به دو دسته اصلی شامل فازی (سرت و همکاران^۲، ۲۰۱۵؛ بونیس و اودوت^۱، ۲۰۱۸) و قطعی (دی کاروالیو و همکاران^۲، ۲۰۱۲؛ فریرا و همکاران^۲،

1 - Ekwezuo et al

2 - Sert et al

۲۰۱۶ می‌باشد. در این پژوهش، از روش سلسله‌مراتبی با فاصله همبستگی و ادغام وارد برای استخراج خوشه‌های زمانی در مقیاس ماهانه استفاده شد. ابتدا ماتریس داده‌های ارتفاع ژئو پتانسیل تراز ۵۰۰ ه.پ به ماتریس شباهت یا فاصله تبدیل و سپس با استفاده از روش سلسله‌مراتبی، خوشه‌بندی انجام شد (حسنعلی‌زاده و همکاران، ۱۳۹۳). براساس این تحلیل، تعداد ۸ خوشه مختلف برای خشکسالی‌های فراگیر ماهانه ایران شناسایی شده است. بنابراین، فراوانی خوشه‌ها در هریک از ماه‌های دارای خشکسالی فراگیر استخراج و با در نظر گرفتن توزیع مناسب شماره خوشه و ماه مورد نظر، یکی از خوشه/ماه برای تحلیل و تفسیر گردش جو و الگوهای همدید از سطح زمین تا تراز بالا انتخاب و نقشه‌های ترکیبی متغیرهای جوی در نرم‌افزار گردس ترسیم گردید.

نتایج و بحث

توزیع ماهانه ۸ خوشه، بر اساس درصد گستره خشکسالی‌های ماهانه با گستره‌ای بیش از ۸۰ درصد، در جدول ۲ نمایش داده شده است. خوشه‌های ۷ و ۸ حدود ۵۰ درصد از الگوهای گردش جو مؤثر بر خشکسالی‌های فراگیر را توجیه می‌کنند که با خوشه‌های ۱ و ۵، این مقدار به بیش از ۷۷ درصد می‌رسد (جدول ۲). خوشه‌های ۷ و ۸ در ماه نوامبر غالب بوده‌اند، درحالی‌که خوشه‌های ۴، ۵ و ۶ در اکتبر نقش فعال‌تری داشته‌اند. به‌طور کلی، در پاییز خوشه‌های ۷ و ۵ نقش پررنگی در رخداد خشکسالی‌های فراگیر ایران دارند. در هر سه ماه فصل زمستان (دسامبر، ژانویه و فوریه)، خوشه ۸ بیشترین سهم را داشته است که در ماه فوریه علاوه بر خوشه ۸، خوشه ۷ نیز با ۵ مورد جلب توجه می‌کند. در بهار، خوشه‌های ۷ و ۱ که در مارس خوشه ۷، در آوریل خوشه ۱ و در ماه می خوشه‌های ۷ و ۵ به‌طور مشخصی برجسته‌اند.

در مجموع، دو خوشه ۷ و ۸ با فراوانی بیش از ۵۰٪ (به‌ترتیب با ۲۹،۹ و ۲۰،۶ درصد) سهم بسیار محسوسی در رخداد خشکسالی‌های فراگیر ماهانه داشته‌اند. بعد از این دو، خوشه‌های ۱ و ۵ به‌ترتیب با ۱۴،۴ و ۱۲،۴ درصد در رتبه بعدی قرار دارند. بنابراین، ۴ خوشه ۷، ۸، ۱ و ۵ در مجموع بیش از ۷۷ درصد رخداد خشکسالی‌های فراگیر ماهانه ایران را توجیه می‌کنند. به عبارتی، الگوهای گردش جو و همدید معادل آنها موجب بیش از دو سوم خشکسالی‌های ماهانه فراگیر ایران بوده‌اند.

دو ماه اکتبر و مارس پراکندگی بیشتری در انطباق خوشه‌ها نشان می‌دهند. این می‌تواند ناشی از ویژگی اقلیمی این دوماه، یعنی زمان گذار از تابستان به پاییز و زمستان به بهار که در آن گردش جو و سامانه‌های آن تغییرپذیری بالاتری دارند، باشد. همان‌طور که در بالا بیان شد، ماه‌های دوره گرم (ژوئن، ژوئیه، آگوست و سپتامبر) درصد گستره خشکسالی در آن چهار ماه کمتر از ۸۰ درصد مساحت کشور بوده است. بنابراین، ماه‌های اشاره‌شده از تحلیل خوشه‌ای و استخراج الگوهای گردش جو کنار گذاشته شدند.

1 - Bonis & Oudot

2 - De Carvalho et al

3 - Ferreira et al

جدول ۲: توزیع زمانی خوشه‌های گردش جو رخداد خشکسالی‌های ماهانه با درصد گستره خشکسالی بیش از ۸۰ درصد (منبع: نویسندگان)

خوشه	اکتبر	نوامبر	دسامبر	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	می	جمع مشارکت خوشه	درصد از فراوانی کل
۱			۲	۱		۱	۸	۲	۱۴	۱۴,۴%
۲	۱		۱	۲	۱	۱	۱		۷	۷,۲%
۳	۲			۱		۳			۶	۶,۲%
۴	۴						۱		۵	۵,۲%
۵	۶	۲				۱		۳	۱۲	۱۲,۴%
۶	۴								۴	۴,۱%
۷		۸	۲	۱	۵	۶	۳	۴	۲۹	۲۹,۹%
۸		۴	۵	۵	۵	۱			۲۰	۲۰,۶%
جمع خشکسالی‌های فراگیر ماهانه	۱۶	۱۵	۱۰	۹	۱۲	۱۳	۱۲	۱۰	۹۷	۱۰۰%

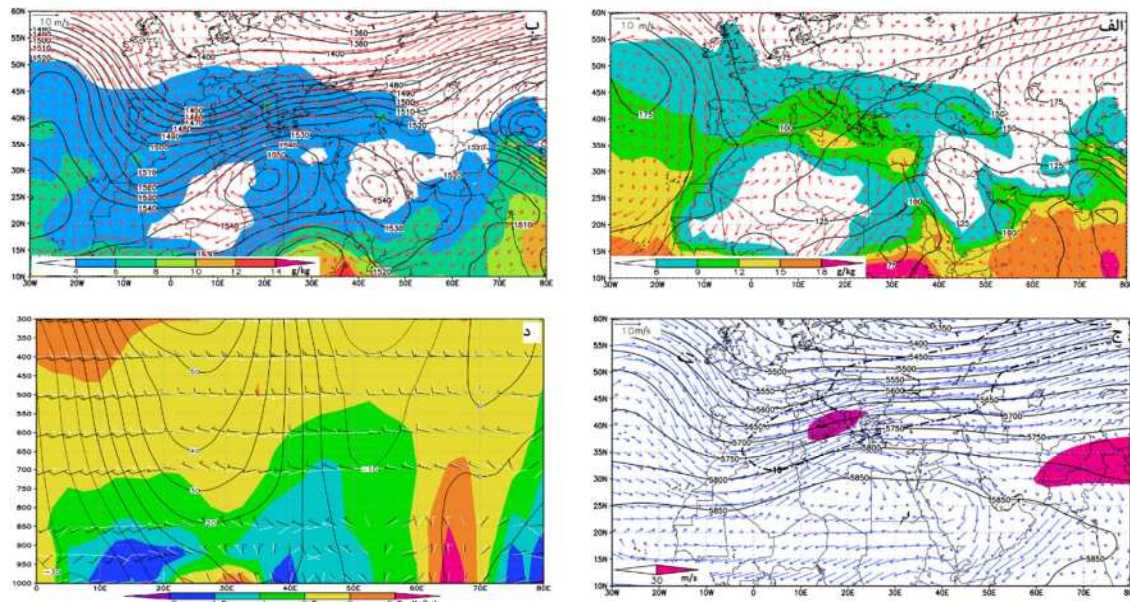
انتخاب خوشه‌ها و ماه‌های نمونه برای نمایش و تفسیر نقشه الگوهای گردش جو و سامانه همدید فعال در ماه انتخابی، بر اساس فراوانی مشارکت خوشه‌ها در رخداد خشکسالی‌های بالای ۸۰ درصد و تنوع در خوشه انتخابی ماه رخداد خشکسالی‌های فراگیر بوده است. نام‌گذاری الگوها نیز بر اساس ساختار اصلی و فعال گردش جو (مشایخ و لشکری، ۱۴۰۲) در رخداد خشکسالی در ترازهای زیرین و میانی بوده است.

در این پژوهش، به‌منظور تحلیل الگوهای جوی مرتبط با رخداد‌های خشکسالی فراگیر، نقشه ترکیبی داده‌های جوی ترازهای ۱۰۰۰، ۸۵۰، ۷۰۰، ۵۰۰، ۳۰۰ ه.پ و نیم‌رخ قائم ترسیم و تحلیل شدند. این نقشه‌ها شامل: الف) ارتفاع ژئوپتانسیل، بردار باد و نم ویژه تراز ۱۰۰۰ ه.پ، ب) ارتفاع ژئوپتانسیل، بردار باد و نم ویژه تراز ۸۵۰ ه.پ، ج) بردار باد تراز ۷۰۰ ه.پ، ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ ه.پ و سرعت باد تراز ۳۰۰ ه.پ، د) نیم‌رخ قائم بی‌هنجاری نم ویژه و ارتفاع ژئوپتانسیل در عرض جغرافیایی ۳۲ درجه شمالی به همراه مقایسه میانگین سرعت و جهت باد (رنگ سفید) با ماه خشک (رنگ تیره) می‌باشد.

اکتبر (۱۹۹۲) خوشه ۵ (پراارتفاع و واچرخند تراز زیرین مستقر برخشی)

زبانۀ پرفشار پیش‌آمده از شمال شرق ایران که تا شرق مدیترانه گسترش یافته، به‌همراه آشکار شدن واچرخند جنوب غرب آسیا بر روی شبه‌جزیره عربستان، در انتهای شرقی پراارتفاع جنب‌حاره در تراز ۸۵۰ ه.پ و واچرخند/پراارتفاع شمال آفریقا بر روی سواحل شمالی مدیترانه شرقی و ادغام آنها به شکل یک کمان شمال‌سو، باعث عدم تشکیل ناوه بر روی شرق مدیترانه شده است (شکل ۱، الف و ب). گرچه جریان باد بر روی دریای عرب شمال شرقی بوده، ولی قرارگیری واچرخند جنوب غرب آسیا بر روی خشکی در مسیر جریان‌های جنوبی انتقال‌دهنده رطوبت باعث ایجاد جریان‌ات شمالی تراز ۱۰۰۰ ه.پ و شمال غربی ۸۵۰ ه.پ و عدم تزریق رطوبت به سمت ایران شده است. این واچرخند که نقش اصلی در انتقال هوای گرم و مرطوب دریاهای جنوبی بر روی جنوب غرب آسیا و به‌ویژه ایران دارد با این موقعیت بیشتر نقش مانع در مسیر جریان‌های جنوبی داشته است. در تراز ۵۰۰ ه.پ جابه‌جایی جنوب‌سوی پراارتفاع جنب‌حاره مشهود است. اما این جابه‌جایی شرایط مساعدی در تشکیل موج مستقر بر دریای مدیترانه نداشته

است. در این ماه پشته ضعیفی در مرکز مدیترانه، جریان واچرخندی تراز ۷۰۰ در شمال غرب شبه جزیره عربستان و سرعت پایین باد و عدم مشاهده جت ترازهای بالای، باعث جریان‌های مداری غربی بر روی منطقه و ایران شده است (شکل ۱، ج). کاهش سرعت باد و رطوبت در منطقه و بر روی ایران و همچنین، افزایش ارتفاع (تشکیل پشته) در موقعیت مرکزی مدیترانه به وضوح در نقشه نیم‌رخ این ماه دیده می‌شود (شکل ۱، د). در نتیجه شرایط گردش جو گفته شده سامانه‌ها بارش‌زا فعالیت اندکی داشته و رخداد بارش ماه اکتبر سال ۱۹۹۲ ناچیز بوده است.

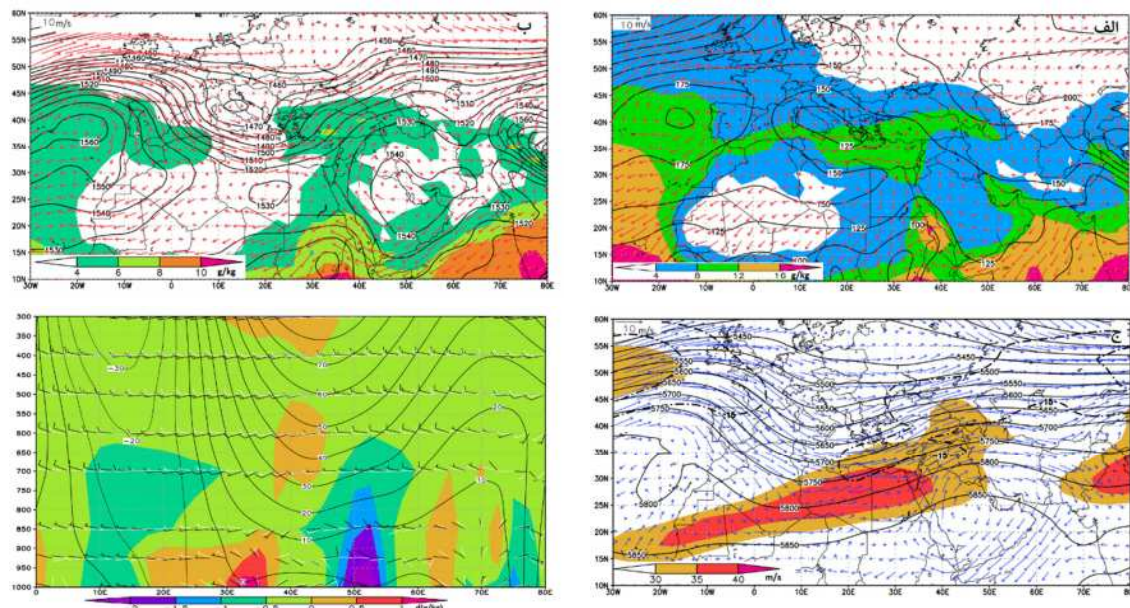


شکل ۱: الگوی گردش جو (خوشه ۵) در رخداد خشکسالی فراگیر (۸۲٪ مساحت کشور) اکتبر ۱۹۹۲، توضیحات طبق شرح داده شده در شروع بخش همدید (منبع: نویسندگان)

نوامبر (۱۹۹۸) خوشه ۷ (پراارتفاع جنب‌حاره تراز زیرین همراه با پشته پراارتفاع جنب‌حاره تراز میانی)

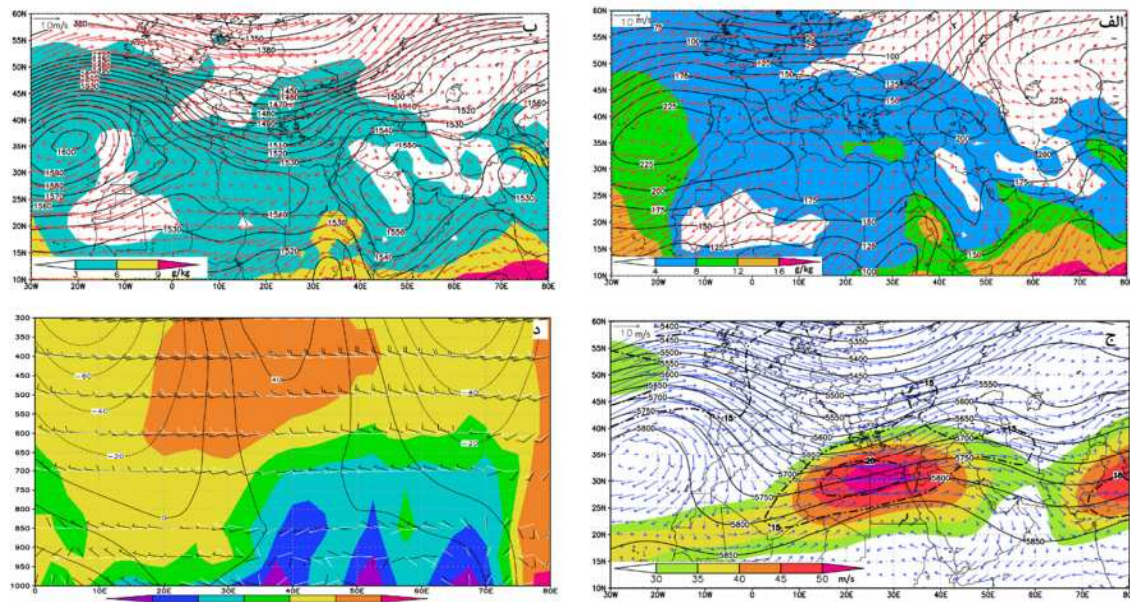
نقشه الگوی تراز ۱۰۰۰ ه.پ تاحدوی شبیه اکتبر ۱۹۹۲ است؛ با این تفاوت که پرفشار مستقر در شمال ایران به سمت شمال جابه‌جا شده و گسترش شرق‌سوی پرفشار آژورس بر روی اروپا و کم فشار/ارتفاع ضعیفی در مرکز مدیترانه تشکیل شده است (شکل ۲، الف). این شرایط جریان‌های شمال‌شرقی و جنوبی به‌ترتیب بر روی دریای عرب و شبه جزیره عربستان ایجاد نموده است. در تراز ۸۵۰ ه.پ نیز انتقال به جنوب واچرخند/پراارتفاع شمال آفریقا و تشکیل کم‌فشار بریده و ناوه در مرکز مدیترانه مشاهده می‌شود. گرچه در ترازهای زیرین جریان باد بر روی دریای عرب و دریای سرخ مناسب بوده و جریان‌های جنوبی گرم و مرطوب در غرب منطقه تا سواحل دریای سیاه امتداد داشته‌اند؛ ولی قرارگیری هسته گسترده شده پراارتفاع/واچرخند جنوب غرب آسیا بر روی خشکی‌ها از جنوب ایران تا مرکز شبه جزیره عربستان، مانع انتقال هوای گرم و مرطوب به سمت ایران شده و همچنین، گسترش شمال‌سوی این واچرخند ایجاد یک پشته نسبتاً قوی بر روی ایران نموده است (شکل ۲، ب). در ترازهای میانی ۷۰۰ و ۵۰۰ ه.پ برخلاف اکتبر ۱۹۹۲، در مرکز مدیترانه ناوه بلندی از مرکز اروپا تا شمال آفریقا استقرار یافته، استقرار این ناوه در این موقعیت و جریان واچرخندی تراز ۷۰۰ ه.پ بر روی شبه جزیره عربستان به همراه گسترش زبانه شمال‌سوی پراارتفاع جنب‌حاره همانند تراز ۸۵۰ ه.پ باعث تشکیل پشته و به‌طور عمده جریان مداری و شمال‌غربی بر روی ایران شده

است. قرارگیری سمت راست خروجی جت جنب‌حاره در غرب، شمال‌غرب ایران شرایط پایداری را تقویت نموده است (شکل ۲، ج). کاهش محسوس رطوبت جو در نیم‌رخ قائم تا تراز میانی جو و در مقابل افزایش ارتفاع ژئوپتانسیل تا ترازها بالایی در موقعیت ایران مشاهده می‌شود (شکل ۲، د).



شکل ۲: الگوی گردش جو (خوشه ۷) در رخداد خشکسالی فراگیر (۹۹٪ مساحت کشور) نوامبر ۱۹۹۸، توضیحات طبق شرح داده‌شده در شروع بخش همدید (منبع: نویسندگان)

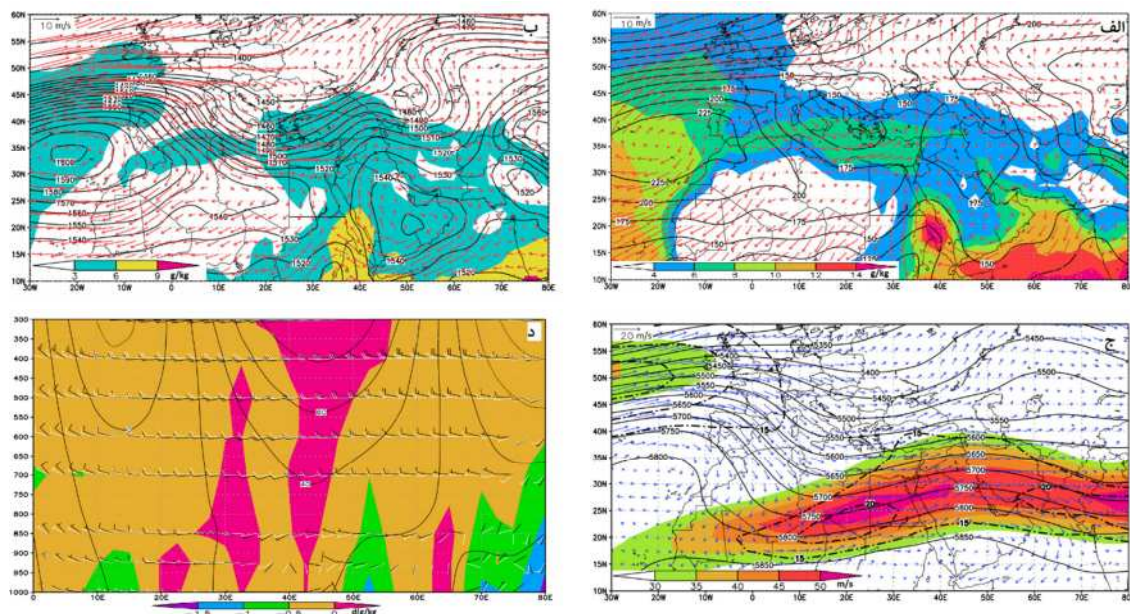
دسامبر (۲۰۱۷) خوشه ۸ (پرا ارتفاع جنب‌حاره تراز زیرین تلفیق‌شده با پرفشار سیبری همراه با پشته تراز میانی) در این ماه، در دو تراز زیرین (۱۰۰۰ و ۸۵۰ ه.پ) وجود دو پرفشار - پرا ارتفاع که در تراز ۱۰۰۰ ه.پ از سمت شمال‌شرق با مرکز بسته‌ای در شمال‌غرب بر روی کشور گسترش یافته و در تراز ۸۵۰ ه.پ همان پرا ارتفاع جنوب غرب آسیا در مرکز و شمال‌شرق شبه‌جزیره عربستان مستقر شده است. گرچه این الگو ایجاد جریان‌های شمال‌شرقی بر روی دریاهای جنوبی نموده است، ولی با قرارگیری این پرفشار/پرا ارتفاع بر روی ایران جریان‌های جنوبی سمت غربی آنها خارج محدوده جغرافیایی ایران بوده و بنابراین، کشور بارش مناسبی دریافت نکرده و در این ماه خشکسالی فراگیر ایران را در برگرفته بوده است (شکل ۳، الف و ب). در ترازهای میانی الگوی تکرار پشته - ناوه از شرق اطلس (پشته تراز ۵۰۰ و واچرخند تراز ۷۰۰ ه.پ)، ناوه مرکز مدیترانه، پشته غرب ایران و ناوه شرق ایران دیده می‌شود. این الگو به همراه قرارگیری جت جنب‌حاره تراز ۳۰۰ ه.پ بر روی مصر ولی مداری و جریان واچرخندی تراز ۷۰۰ ه.پ بر روی شبه‌جزیره عربستان (شکل ۳، ج)، باعث شده علاوه بر عدم تزریق هوای گرم مرطوب در تراز زیرین که در نقشه نیم‌رخ با کاهش قابل‌توجه رطوبت بر روی منطقه و به‌خصوص ایران دیده می‌شود (شکل ۳، د)، شرایط صعود و ناپایداری فراهم نباشد.



شکل ۳: الگوی گردش جو (خوشه ۸) در رخدادهای خشکسالی فراگیر (۹۶٪ مساحت کشور) دسامبر ۲۰۱۷، توضیحات طبق شرح داده شده در شروع بخش همدید (منبع: نویسندگان)

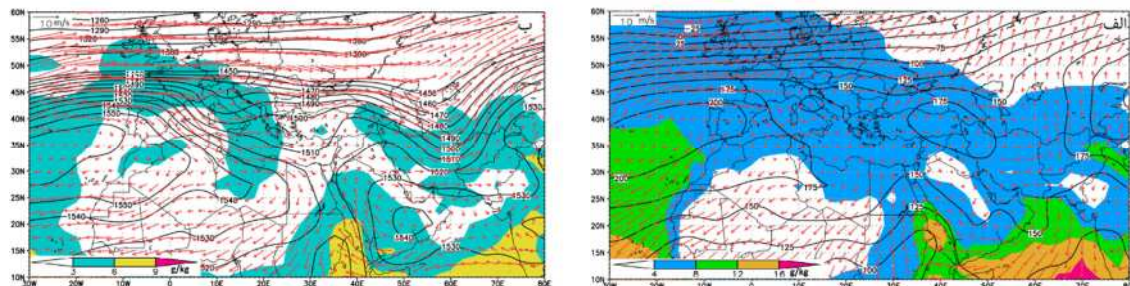
ژانویه (۱۹۹۵) خوشه ۸ (پراارتفاع جنوب حاره تراز زیرین تلفیق شده با پرفشار سیبری همراه با پشته تراز میانی)

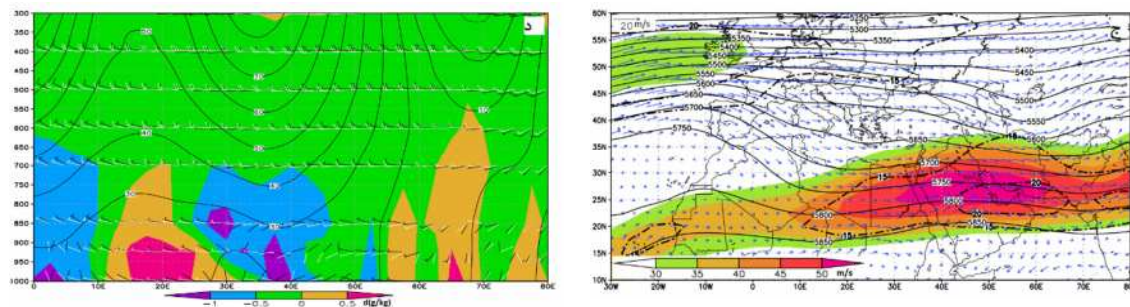
در ژانویه خشک ۱۹۹۵، در تراز ۱۰۰۰ ه.پ. پیشانی پرفشار گسترده شده از سمت شرق (زبان پرفشار سیبری) بر روی ایران، تشکیل یک مرکز بسته وسیعی تا سواحل شرق مدیترانه داده است. همانند قبل جریان شمال شرقی با رطوبت بسیار بالا بر روی دریای عرب وجود داشته که با زبان کم فشار سودانی تا عرض ۲۵ درجه همراه با جریان جنوبی تا مرکز دریای سرخ پیشروی نموده، اما این جریان مرطوب به عرضهای بالاتر و به سمت ایران نفوذی نداشته است (شکل ۴، الف). این شرایط در تراز ۸۵۰ ه.پ. کمی پیچیده تر است. در این تراز با تمایل بخش شمالی پراارتفاع جنوب غرب آسیا به سمت عرضهای بالا، مرکز بسته بیرونی آن تا ۳۰ درجه شمالی گسترش یافته که باعث تشکیل پشته در غرب ایران تا سواحل دریای سیاه گردیده است. این پشته در سمت شرقی خود ناوه موری از شمال دریای خزر تا شرق ایران ایجاد کرده است (شکل ۴، ب). اگرچه حرکات واچرخندی تراز ۷۰۰ ه.پ. به عرضهای پایین تر منتقل شده، ولی قرارگیری آن در نصف النهار ۴۵ درجه شرقی به همراه پشته تراز ۵۰۰ ه.پ. در همین موقعیت و جریان جت بسیار قوی که از شمال آفریقا تا شبه جزیره هند که البته بخش چپ خروجی هسته غربی آن در شمال شبه جزیره عربستان استقرار داشته است، باعث جریانهای مدری و شمال غربی ضعیفی بر روی ایران شده اند. مجموع شرایط از تراز زیرین تا بالای جو، شرایط مساعدی برای بارش بر روی ایران نبوده و در نتیجه ژانویه بسیار خشکی به وقوع پیوسته است.



شکل ۴: الگوی گردش جو (خوشه ۸) در رخداد خشکسالی فراگیر (۹۷٪ مساحت کشور) ژانویه ۱۹۹۵، توضیحات طبق شرح داده شده در شروع بخش همدید (منبع: نویسندگان)

فوریه (۲۰۰۲) خوشه ۸ (پرار تفاع جنب‌حاره تراز زیرین تلفیق شده با پرفشار سبیری همراه با پشته تراز میانی) با توجه به این که خوشه انتخابی فوریه ۲۰۰۲ با ماه ژانویه ۱۹۹۵ یکسان بوده است، الگوی همدید و شرایط گردش جو در تراز زیرین، میانی و بالایی شباهت زیادی به آن دارد (شکل ۵، الف و ب). در این ماه نیز پرفشار/ پرارتفاع تراز زیرین به ترتیب در شمال غرب ایران و شبه جزیره عربستان و جریان و اچرخند پشته تراز میانی به همراه جریان جت قوی در جنوب ایران دیده می‌شود. تفاوت اندک فوریه منتخب با ژانویه، بیشتر در تراز میانی و موقعیت و شکل جت جنب‌حاره قابل مشاهده است. در این ماه جت در موقعیت شرقی‌تر بر جنوب ایران و به شکل کاملاً مداری قرار گرفته است (شکل ۵، ج). همچنین، در تراز ۸۵۰ ه.پ، ناوه مستقر بر شرق کشور نیز عمیق‌تر بوده که به علت قرارگیری یال عقب آن بر روی ایران، باعث شکل‌گیری جریان‌ها شمال غربی محسوس‌تری از مرکز تا شرق کشور شده است.

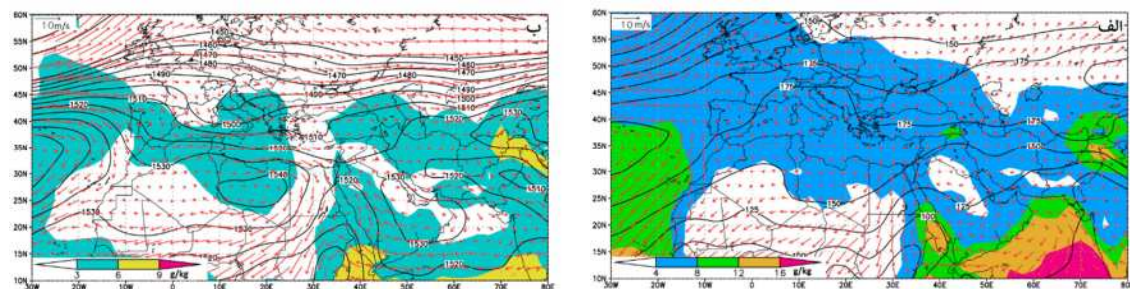


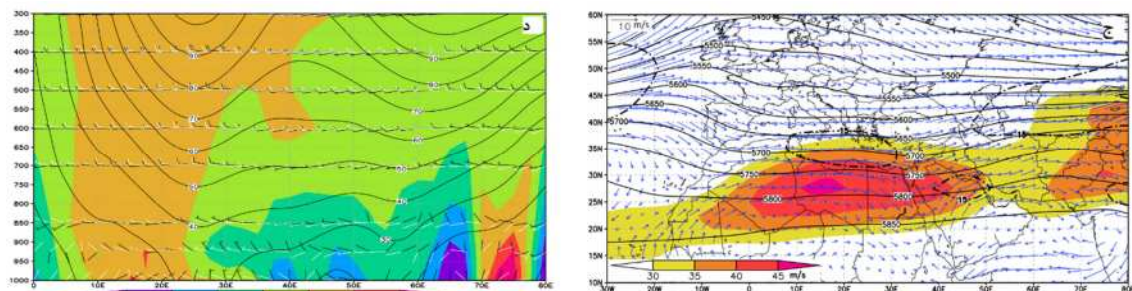


شکل ۵: الگوی گردش جو (خوشه ۸) در رخداد خشکسالی فراگیر (۸۵٪ مساحت کشور) فوریه ۲۰۰۲، توضیحات طبق شرح داده شده در شروع بخش همدید (منبع: نویسندگان)

مارس (۲۰۰۴) خوشه ۷ (پراارتفاع جنب‌حاره تراز زیرین همراه با پشته پراارتفاع جنب‌حاره تراز میانی)

در مارس ۲۰۰۴، گسترش شرق‌سوی پرفشار سیبری و غرب‌سوی پرفشار آژورس و ادغام آن‌ها، باعث شکل‌گیری حوضه پرفشاری از جنوب ایران تا عرض‌های میانه از شرق اطلس تا آسیای میانه شده است. این شرایط فشاری بادهای شمالی بر روی ایران و به‌ویژه شرق مدیترانه ایجاد کرده است (شکل ۶، الف). در تراز ۸۵۰ ه.پ نیز پراارتفاع جنوب غرب آسیا به سمت شمال تا جنوب عراق کشیده شده و شرق کشور نیز تحت پوشش زبانه پراارتفاعی از شبه-جزیره هند می‌باشد. زبانه کم‌فشار سودانی تنها تا ۲۵ درجه، فقط در جهت شمالی بر روی دریای سرخ گسترش یافته است (شکل ۶، ب). جریان باد و الگوی ژئوپتانسیل ترازهای میانی تا حدودی متفاوت‌تر از دو ماه قبل است. به‌طوری-که واچرخند تراز ۷۰۰ ه.پ در شرق نصف‌النهار ۵۰ درجه شرقی و عرض ۲۰ درجه شمالی و ناوه بسیار کم‌عمق تراز ۵۰۰ ه.پ در همسایه‌های غربی ایران قرار گرفته است. موقعیت جت جنب‌حاره نیز مناسب‌تر از دو ماه قبل است، اما شرایط نامساعد ترازهای زیرین، گردش تقریباً مناسب اما ضعیف تراز میانی و بالایی را خنثی نموده است. بنابراین، همراهی شرایط رخداد بارش در ضخامت مناسب جو وجود نداشته است (شکل ۶، ج). در نمودار نیم‌رخ نیز کاهش رطوبت و افزایش ارتفاع جو در این ماه نسبت به میانگین قابل مشاهده است (شکل ۶، د).

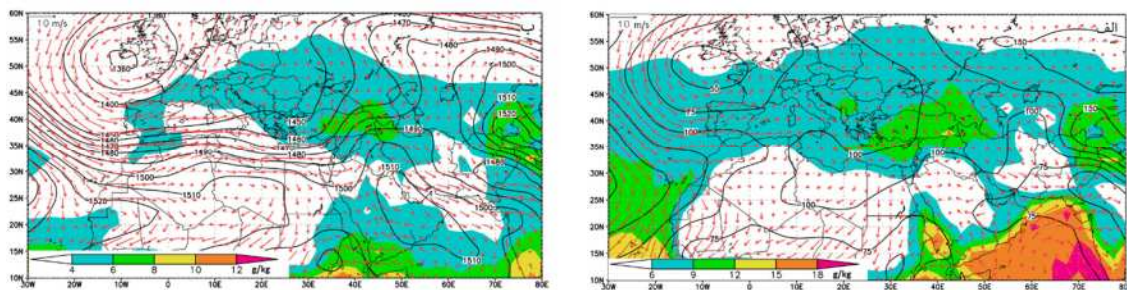


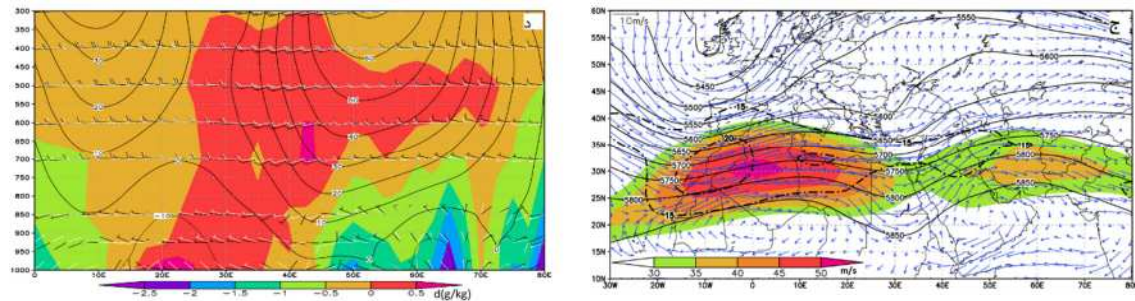


شکل ۶: الگوی گردش جو (خوشه ۷) در رخداد خشکسالی فراگیر (۷۵٪ مساحت کشور) مارس ۲۰۰۴، توضیحات طبق شرح داده شده در شروع بخش همدید (منبع: نویسندگان)

آوریل (۲۰۰۰) خوشه ۱ (پشته پرا ارتفاع جنب حاره تراز زیرین و میانی)

به طور متوسط از ماه آوریل با شروع گردشی موسمی جنوب آسیا، الگوی جریان باد بر روی دریای عرب و فشار در جنوب و نیمه جنوبی و جنوب غرب آسیا متفاوت از دروه سرد شده، به طوری که در آن ناحیه کم فشاری و جریان های جنوب غربی حاکم می شود. در آوریل ۲۰۰۱ نیز چنین شرایط باد و فشاری در آن مناطق وجود داشته است (شکل ۷، الف). اما در تراز ۸۵۰ ه. پ قرارگیری شمال غرب - جنوب شرق سوی و اچرخند/پرا ارتفاع جنوب غرب آسیا ایجاد پشته بلند که تا سواحل دریای سیاه ادامه داشته بر روی ایران نموده است. اگرچه در شرق مدیترانه ناوه موری حاصل گسترش زیانه کم ارتفاع مستقر بر شمال غرب اروپا مشاهده می شود، اما پشته یادشده مانع مهمی در حرکت شرق سوی آن به سمت ایران بوده است (شکل ۷، ب). در تراز میانی نیز ناوه تقریباً عمیقی در شرق مدیترانه تشکیل شده و جریان های جنوب غربی مساعدی بر روی منطقه تا غرب ایران مشاهده می شود. اما همان طور که در بالا بیان شد، به علت عدم حرکت شرق سوی مناسب، این الگو گردش جو، بارش مناسبی در این ماه برای ایران در پی نداشته و آوریل خشکی را شکل داده است (شکل ۷، ج). تضاد تراز زیرین و بالایی در نیم رخ جو تا حدودی قابل مشاهده است. در تراز زیرین بر روی ایران کاهش محسوس رطوبت، ولی در تراز میانی و بالا افزایش آن را مشاهده می کنیم (شکل ۷، د).

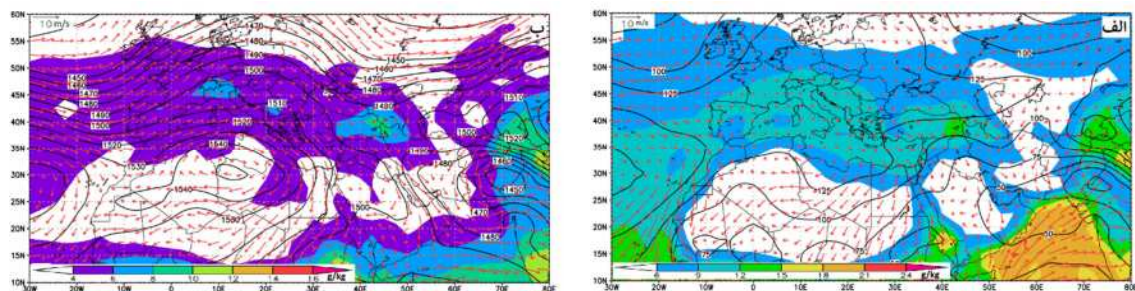


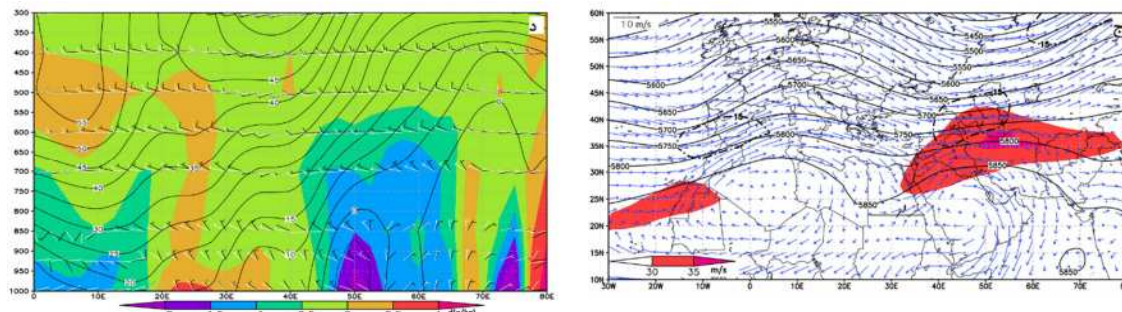


شکل ۷: الگوی گردش جو (خوشه ۱) در رخدادهای خشکسالی فراگیر (۹۹٪ مساحت کشور) آوریل ۲۰۰۰، توضیحات طبق شرح داده شده در شروع بخش همدید (منبع: نویسندگان)

می (۱۹۹۹) خوشه ۵ (پشته پراتفعا جنب حاره تراز میانی)

گسترش زبانهای کشیده به سمت شرق از پرفشار جنب حاره‌ای آژورس بر روی دریای مدیترانه که تا دریای سیاه و خزر پیش آمده و زبان کم فشار موسمی جنوب آسیا از سمت پاکستان بر روی خلیج فارس، شیب فشار شمالی - جنوبی عکس دوره سرد سال تشکیل داده و جریان‌های شمالی در منطقه و به ویژه ایران مسلط بوده‌اند. این جریان‌ها فقط در ناحیه شمال غرب و سواحل خزری می‌توانند منتقل کنند رطوبت به سمت ایران باشند که در شرایط مناسب تراز میانی منجر به تشکیل ابر و بارش شوند (شکل ۸، الف). همین شرایط در تراز ۸۵۰ ه.پ نیز دیده می‌شود با این تفاوت که مرکز پراتفعا و واچرخند مستقل بر روی شمال آفریقا که زبانهای آن تا شبه جزیره عربستان گسترش یافته، جریان‌های قوی شمال غربی در جنوب غرب آسیا و غرب ایران، خلیج فارس ایجاد کرده است (شکل ۸، ب). در تراز میانی منطبق بر مرکز پراتفعا تراز ۸۵۰ ه.پ، پشته ای در شمال آفریقا و در سمت راست آن ناوه موری که از مصر تا روسیه کشیده شده، مشاهده می‌شود. اما قرارگیری واچرخند تراز ۷۰۰ ه.پ در مرکز شبه جزیره عربستان و پشته تراز ۵۰۰ ه.پ بر روی ایران و قرارگیری محور جت بر روی سواحل جنوبی خزر که مشاهده آن در عرض جغرافیای بالا در این زمان از سال دور از انتظار است، اثر آن ناوه محدود به سواحل شرقی مدیترانه نموده و کشور شرایط مساعدی برای بارش نداشته است (شکل ۸، ج). نمودار نیمرخ جو نیز کاهش رطوبت این ماه نسبت به میانگین در محدوده جغرافیای ایران تا ترازهای بالا را نشان می‌دهد (شکل ۸، د).





شکل ۸: الگوی گردش جو (خوشه ۵) در رخداد خشکسالی فراگیر (۹۵٪ مساحت کشور) می ۱۹۹۹، توضیحات طبق شرح داده شده در شروع بخش همدید (منبع: نویسندگان)

تنوع زمانی و مکانی الگوهای گردش جوی در مقیاس منطقه‌ای، همراه با ویژگی‌های جغرافیایی در مقیاس محلی، منجر به تنوع اقلیمی چشمگیری در ایران شده است (مفیدی و همکاران، ۱۳۹۱). این تنوع اقلیمی به تغییر موقعیت سامانه‌های سینوپتیک و تغییرات سال به سال در تعداد واپرخندهای عبوری از منطقه وابسته است (مدرس و سیلوا^۱، ۲۰۰۷). در خشکسالی‌های فراگیر شدید ایران، به جز فصل تابستان، سه مؤلفه جوی در سایر فصل‌ها نقش کلیدی ایفا می‌کنند: (۱) موقعیت و شکل گسترش واپرخند در تراز زیرین، (۲) موقعیت ناوه و پشته در تراز میانی و (۳) موقعیت و شکل قرارگیری جت جنب‌حاره در تراز بالایی.

موقعیت واپرخند در تراز زیرین در خشکسالی‌های فراگیر، معمولاً با جابه‌جایی به سمت غرب و قرارگیری بر روی شبه‌جزیره عربستان همراه است که این امر منجر به افزایش ارتفاع ژئوپتانسیلی، چرخندگی منفی و نزول هوا می‌شود. به علاوه، حاکمیت جریان‌های شمالی و کاهش جریان‌های صعودی از عوامل اصلی رخداد دوره‌های خشکی هستند (کیانین و همکاران، ۱۳۹۵ و ۱۳۹۷). همان‌طور که حاج محمدی و همکاران (۱۳۹۳) نشان داده‌اند، سهم واپرخندها در وقوع خشکسالی‌ها بیشتر از سایر الگوهاست. با حرکت واپرخند به سمت شمال و استقرار آن روی شبه‌جزیره عربستان، نقش دریاهای جنوبی و غربی در فرارفت رطوبت به ایران کاهش می‌یابد. حجازی‌زاده و همکاران (۱۴۰۲) نیز به این نتیجه رسیده‌اند که شدیدترین خشکسالی‌ها در ایران زمانی رخ می‌دهد که پراتفاح جنب‌حاره تا عرض ۳۰ درجه شمالی گسترش می‌یابد.

در مقابل، در سال‌های مرطوب، جابه‌جایی مرکز پراتفاح جنوب‌غرب آسیا (عربستان) به سمت شرق و قرارگیری بیشتر بر روی دریا منجر به کشیدگی مداری و افزایش گستره بازوی شرقی آن می‌شود. این تغییرات باعث تقویت جریان‌های شرقی - شمال‌شرقی بر روی دریای عرب و ایجاد ناوه عمیق‌تر در محور شرق - غرب بین پراتفاح جنوب‌غرب آسیا و شمال آفریقا می‌شود (کریمی و جعفری، ۱۳۹۴). بنابراین، موقعیت مکانی واپرخند جنوب‌غرب آسیا در ترازهای زیرین و قرارگیری واپرخند در دریای عرب نقش کلیدی در فرارفت رطوبت به ایران و افزایش رطوبت جو دارد (پژوه و جعفری، ۱۳۹۹؛ کیانی‌پور و همکاران، ۱۴۰۱؛ کریمی و همکاران، ۱۳۹۷؛ دلدارزهی و همکاران، ۱۴۰۳). بیشتر رطوبت در گردش واپرخندی پراتفاح جنوب‌غرب آسیا از روی دریاهای گرم عرب و عمان تأمین می‌شود (فرج‌زاده اصل و همکاران، ۱۳۸۸؛ کریمی و فرج‌زاده، ۱۳۹۰؛ لشکری و محمدی، ۱۳۹۴؛ کریمی و همکاران، ۱۳۹۸). نتایج برخی مطالعات بر اهمیت موقعیت مکانی واپرخند جنوب‌غرب آسیا در ترازهای زیرین برای

تأمین رطوبت ایران تأکید دارند (کریمی و همکاران، ۱۳۹۸). تغییرات در جابه‌جایی شرقی - غربی، شمالی - جنوبی و حتی کشیدگی هسته مرکزی واچرخند جنوب‌غرب آسیا، تأثیر بسزایی بر تزریق و انتقال رطوبت و به تبع آن بارش بر ایران دارد (کریمی و همکاران، ۱۳۹۵؛ ۱۴۰۱؛ محمودی و همکاران، ۱۴۰۱).

نتایج تحلیل الگوهای خشکسالی فراگیر ماه دسامبر نشان می‌دهد که این الگوها تلفیقی از پراارتفاع جنب‌حاره در تراز زیرین و پرفشار سیبری هستند. خوش‌اخلاق (۱۳۷۶) نیز نشان داده است که در ماه‌های خشک دوره سرد سال، پرفشار سیبری تقویت شده و زبانه غربی آن با جهت شمال‌شرقی - جنوب‌غربی سرتاسر ایران را تحت سیطره خود قرار می‌دهد. موقعیت پرفشارهای جنب‌حاره‌ای آژورس و سیبری و نحوه پیکربندی آن‌ها نیز در وقوع خشکسالی‌ها مهم است (صادقی و همکاران، ۱۳۸۷؛ احمدی گیوی و همکاران، ۱۳۸۹). باین‌حال، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که این الگو تنها در ماه دسامبر مشاهده می‌شود.

تغییرات در جریان بادهای غربی نیز می‌تواند از عوامل ایجاد دوره‌های خشکسالی فراگیر در ایران باشد (علیجانی و همکاران، ۱۴۰۰). ورود سامانه بارش‌زای مدیترانه‌ای از غرب باعث بارش باران یا برف در بسیاری از مناطق مرکزی و شرقی ایران می‌شود، درحالی‌که یک سیستم کم‌فشار جنوبی می‌تواند به بارش بیشتر منجر شود (کوثری و اسدی زارچ^۱، ۲۰۱۱). واچرخند عربستان در لایه میانی وردسپهر، نقش حیاتی در تعیین مسیر ورود سامانه‌ها، الگوی گسترش ناوه مدیترانه‌ای و طول مدت فعالیت سامانه‌های بارشی بر ایران دارد (مشایخ و لشکری، ۱۴۰۲). گسترش جنوب‌سوی ناوه مدیترانه‌ای و شار قائم بخار آب از دریاهای گرم جنوبی به جلو ناوه، نقش اصلی را در شدت بارش‌های فراگیر ایفا می‌کند (کریمی و همکاران، ۱۳۹۵؛ کیخسروی و همکاران، ۱۴۰۱). در تراز میانی، غرب ایران در جلو پشته حاکم بر عراق، با افزایش پهنه زیر پوشش خشکسالی، کشیدگی پشته افزایش یافته و محور آن از حالت نسبتاً افقی به عمود تغییر می‌کند. بلاکینگ‌ها نیز می‌توانند با شکل‌گیری در طول ۵۰ تا ۹۰ درجه شرقی، باعث افزایش خشکسالی‌های فراگیر شوند (طولابی‌نژاد و همکاران، ۱۴۰۰). باین‌حال، برخی پژوهش‌ها نشان داده‌اند که جابه‌جایی شرق‌سوی پشته می‌تواند پهنه زیر پوشش بارش سنگین را افزایش دهد (عزیزی و همکاران، ۱۳۸۸؛ عساکره و همکاران، ۱۳۹۳؛ حیدری و همکاران، ۱۴۰۳).

در نهایت، رودباد جنب‌حاره‌ای نیز در الگوهای همدید و ترمودینامیکی خشکسالی‌های فراگیر ایران نقش اساسی دارد. موقعیت و سرعت هسته جت جنب‌حاره بر روی خاورمیانه و امتداد محور آن در ترازهای فوقانی وردسپهر، ضمن کنترل گردش تراز میانی، مسیرهای ورود چرخندها به ایران را نیز کنترل می‌کند (مفیدی و زرین، ۱۳۸۴).

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که رودباد جنب‌حاره‌ای نقشی اساسی در شکل‌گیری الگوهای همدید و ترمودینامیکی خشکسالی‌های فراگیر ایران ایفا می‌کند. این یافته‌ها با توجه به پژوهش‌های مفیدی و زرین (۱۳۸۴) که نشان دادند موقعیت و سرعت هسته جت جنب‌حاره‌ای در ترازهای فوقانی وردسپهر بر گردش تراز میانی و مسیرهای ورود چرخندها به ایران تأثیرگذار است، تأیید می‌شود. بنابراین، این پژوهش نشان‌دهنده اهمیت هسته جت جنب‌حاره‌ای در پیش‌بینی و تحلیل پدیده‌های خشکسالی در ایران می‌باشد.

همان‌طور که در مقدمه مطرح شد، براساس نتایج موجود و اصول حاکم بر گردش جو منطقه، فرض اصلی این بود که ساختارهای همیدی نظیر واچرخند جنب‌حاره عربستان یا جنوب‌غرب آسیا، ناوه‌های مدیترانه‌ای، پشته‌های تراز

میانی و موقعیت جت جنب‌حاره‌ای می‌توانند عناصر کلیدی در بروز خشکسالی‌های فراگیر ایران باشند. نتایج تحلیل‌های انجام‌شده در این پژوهش نشان داد که این عناصر اصلی گردش جو منطقه نقش بسیار مهمی در رخداد دوره‌های خشک ماهانه البته در درجه اول با جابه‌جایی در موقعیت و آرایش با یک‌دیگر و همچنین تغییر در شدت و مسیر جریان باد دارند. الگوی ترکیبی واچرخندهای تراز زیرین با پشته‌های تراز میانی، در بیش از ۷۷ درصد از خشکسالی‌های فراگیر ماهانه کشور مشاهده شده است. همچنین، قرارگیری جت جنب‌حاره‌ای در موقعیت‌های نامساعد مداری، نقش مهمی در سرکوب ناپایداری و کاهش فراگیر بارش ایفا کرده است. از سوی دیگر، یافته‌های پژوهش می‌تواند پتانسیل بالایی برای استفاده در کنار پیش‌بینی مدل‌های فصلی و پیش‌آگاهی رخداد شرایط آبی خشکسالی داشته باشد.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که خشکسالی‌های فراگیر ماهانه در ایران، به‌طور عمده حاصل کنش و برهم‌کنش ساختارهای کلان‌مقیاس جو، از جمله واچرخندهای جنب‌حاره، پشته‌ها و ناوه‌های تراز میانی و جریان جت در تراز فوقانی جو هستند. تحلیل‌های همدید و دینامیکی انجام‌شده در این پژوهش حاکی از آن است که موقعیت، امتداد و شدت واچرخند جنوب‌غرب آسیا (عربستان)، به‌ویژه در ترازهای ۸۵۰، ۷۰۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال، در کنار نحوه استقرار ناوه مدیترانه‌ای و محور جت تراز بالا، نقش کلیدی در وقوع یا عدم وقوع خشکسالی‌های فراگیر ایفا می‌کنند. هنگامی که پراارتفاع جنوب‌غرب آسیا (عربستان) در موقعیتی غربی میانگین خود استقرار یابد، ضمن جلوگیری از تعمیق ناوه مدیترانه‌ای، فرارفت هوای گرم‌وخشک از شبه‌جزیره عربستان به دشت‌های بین‌النهرین و ایران را تشدید کرده و این شرایط سامانه‌های بارشی را با کمبود رطوبت مواجه کرده که علاوه بر کاهش بارش، می‌تواند رخداد‌های گردوخاک در منطقه را افزایش دهد. این الگو با گسترش شمال‌سوی خود، ساختاری پایدار در جو منطقه ایجاد می‌کند که مانع نفوذ سامانه‌های بارشی می‌شود. در مقابل، جابه‌جایی شرق‌سوی این سامانه همراه با تعمیق ناوه شرق مدیترانه، افزایش جریان‌های جنوب‌غربی و مداری و تحریک صعود رطوبت، موجب تقویت بارش‌ها و شکل‌گیری شرایط متفاوت و دوره ترسالی می‌گردد. چهار الگوی همدید شناسایی‌شده در این پژوهش، بیش از ۷۷ درصد از خشکسالی‌های فراگیر ماهانه را تبیین می‌کنند که اهمیت فوق‌العاده ساختارهای همدیدی در تبیین فراوانی، گستره و شدت خشکسالی‌ها را تأیید می‌نماید. بر این اساس، یافته‌های این پژوهش با فراهم کردن درکی نظام‌مند از دینامیک جوی مرتبط با خشکسالی، ظرفیت بالایی برای توسعه مدل‌های پیش‌بینی میان‌مدت و فصلی و تدوین راهبردهای کلان مدیریت منابع آب در مواجهه با بحران‌های خشکسالی در اختیار برنامه‌ریزان قرار می‌دهد. اما با این حال، با توجه به ساختار پیچیده اما نظام‌مند گردش جو و اثرپذیری گردش جو منطقه از گردش جو سیاره‌ای، لازم است در ادامه، عامل شکل‌گیری چنین الگوهایی در ارتباط با شاخص‌های دورپیوندی چون ENSO، NAO و حتی اندرکنش‌های بزرگ مقیاس وردسپهر - پوشن سپهر به منظور شناخت دقیق‌تر سازوکارهای رخداد خشکسالی‌های فراگیر در ایران مطالعه گردد.

منابع

- احمدگیوی، فرهنگ؛ ایران‌نژاد، پرویز؛ محمدنژاد، علیرضا. (۱۳۸۹). اثر پرفشارهای جنب‌حاره و سیبری بر خشکسالی‌های غرب ایران، چهاردهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران، ۲۱-۲۳ اردیبهشت، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران.
- اردکانی، حسین؛ زمانیان، محمدتقی؛ هاشمی دوین، مهری. (۱۳۸۷). مطالعه همدیدی و دینامیکی بیشترین بارش روی منطقه خراسان، فیزیک زمین و فضا، ۳۴(۲)، ۱۰۷-۱۲۳. Doi: [10.1001/1.2538371.1387.34.2.9.1](https://doi.org/10.1001/1.2538371.1387.34.2.9.1)
- بهرامی، اسرین؛ دارند، محمد. (۱۴۰۳). ارزیابی دقت زمانی - مکانی برآورد بارش پایگاه داده‌ی ERA5 بر روی ایران، ژئوفیزیک ایران، آماده انتشار. Doi: [10.30499/ijg.2024.455625.1599](https://doi.org/10.30499/ijg.2024.455625.1599)
- پژوه، فرشاد؛ جعفری، فرزانه. (۱۳۹۹). واکاوی همدید بارش‌های سیل آسا و مخاطره‌آمیز غرب و جنوب‌غرب ایران در دهه اول فروردین ۱۳۹۸، اطلاعات جغرافیایی «سپهر»، ۲۹(۱۱۴)، صص: ۱۶۵-۱۹۸۴. <https://doi.org/10.22131/sepehr.2020.44600>
- ثقفی، مریم؛ براتی، غلامرضا؛ علیجانی، بهلول؛ مرادی، محمد. (۱۴۰۱). تحلیل تطبیقی سازوکار بارش‌های پاییز و زمستان جنوب‌غرب ایران، پژوهش‌های دانش زمین، ۱۳(۲)، ۵۸-۶۹. Doi: [10.48308/esrj.2022.100930](https://doi.org/10.48308/esrj.2022.100930)
- جعفریگلو، منصور؛ خوش‌اخلاق، فرامرز؛ اوجی، روح‌الله. (۱۳۸۸). موقعیت و فراوانی فصلی مسیرهای چرخندی در ترسالی‌های غرب میانی ایران. پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۴۱(۶۸)، صص: ۸۴-۷۱.
- حاجی محمدی، حسن؛ راستی، فاطمه؛ کرمی، مختار. (۱۳۹۳). بررسی همدیدی سامانه‌های واچرخندی و ارتباط آن با خشکسالی‌های استان فارس، دومین همایش ملی بیابان با رویکرد مدیریت مناطق خشک و بیابانی، اقلیم‌شناسی و روند خشکسالی در مناطق خشک، سمنان.
- حجازی‌زاده، زهرا؛ علیجانی، بهلول؛ سلیقه، محمد؛ نادى، ساناز؛ میرزایی، نبی. (۱۴۰۲). بررسی تغییرات خشکسالی‌های ایران با رویکرد تغییر اقلیم. دگرگونی‌ها و مخاطرات آب‌وهوایی، ۲(۴)، صص: ۲۳-۱.
- حسنعلی‌زاده، نفسیه؛ مساعدی، ابوالفضل؛ ظهیری، عبدالرضا؛ بابانژاد، منوچهر. (۱۳۹۳). تعیین نواحی همگن توزیع بارش سالانه در سطح استان گلستان با استفاده از تحلیل خوشه‌ای و روس گشتاورهای خطی، آب‌و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، ۲۸(۵)، صص: ۱۰۶۱-۱۰۷۱. <https://doi.org/10.22067/JSW.V0I0.26319>
- حیدری، سوسن؛ کریمی احمدآباد، مصطفی؛ عزیزی، قاسم؛ شمسی‌پور، علی‌اکبر. (۱۴۰۳). اثر موقعیت ناوه و پشته بادهای غربی بر گستره خشکسالی‌های ایران، جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، ۹۵(۳)، صص: ۱۶۱-۱۸۸. Doi: [10.22108/gep.2024.142104.1655](https://doi.org/10.22108/gep.2024.142104.1655)
- حیدری، سوسن؛ کریمی، مصطفی؛ بیرانوند، آذر. (۱۴۰۳). ارزیابی عملکرد داده‌های بازتحلیل ERA5 در تخمین بارش ایران و واکاوی فضایی رژیم بارشی کشور، پژوهش‌های دانش زمین، ۱۵(۲)، صص: ۱-۲۴. <https://doi.org/10.48308/esrj.2024.104225>
- خسروی، محمود. (۱۳۸۳). بررسی روابط بین الگوهای چرخش جوی کلان مقیاس نیم‌کره شمالی با خشکسالی‌های سالانه سیستان و بلوچستان، جغرافیا و توسعه، ۲(۳)، صص: ۱۶۷-۱۸۸. Doi: [10.22111/gdij.2004.3835](https://doi.org/10.22111/gdij.2004.3835)
- خوش‌اخلاق، فرامرز؛ عزیزی، قاسم؛ رحیمی، مجتبی. (۱۳۹۱). الگوهای همدیدی خشکسالی و ترسالی زمستانه در جنوب غرب ایران، علوم جغرافیایی، ۱۲(۲۵)، صص: ۷۷-۵۷.
- خوش‌اخلاق، فرامرز؛ قائمی، هوشنگ؛ زاهدی، مجید؛ زاهدی، مجید. (۱۳۷۶). بررسی الگوهای ماهانه خشکسالی و ترسالی در ایران، تحقیقات جغرافیایی، ۱۲(۲)، صص: ۱۵۴-۱۳۶.
- خوش‌اخلاق، فرامرز؛ کریمی احمدآباد، مصطفی؛ جاسمی، سیدمیشم؛ کاکي، سیف‌الله. (۱۳۹۹). واکاوی آماری - همدید تغییرپذیری آب‌وهواشناختی رژیم بارش غرب میانی ایران با تأکید بر رخداد خشکسالی‌های شدید، پژوهش‌های تغییرات آب‌وهوایی، ۱(۱)، صص: ۸۲-۸۳. Doi: [10.30488/ccr.2020.235986.1004.63](https://doi.org/10.30488/ccr.2020.235986.1004.63)
- دلدارزهی، زاهد؛ محمودی، پیمان؛ خسروی، محمود. (۱۴۰۳). سازوکارهای انتقال رطوبت دریای عرب در خشکسالی‌ها و ترسالی‌های فراگیر ایران، جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، ۳۵(۱)، صص: ۴۵-۷۲. Doi: [10.22108/gep.2023.136560.1571](https://doi.org/10.22108/gep.2023.136560.1571)
- رضیعی، طیب؛ مفیدی، عباس؛ زرین، آذر. (۱۳۸۸). مراکز فعالیت و الگوهای گردش جو زمستانه تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال روی خاورمیانه و ارتباط آنها بارش ایران ایران، فیزیک زمین و فضا، ۳۵(۱)، صص: ۱۲۱-۱۴۱. Doi.org/10.22059/jesphys.2009.79975
- رنجبرسعادت‌آبادی، عباس؛ اسدی تلوکی، احمد؛ مرادی، محمد. (۱۳۹۳). تأثیر بی‌هنجاری‌های ماهانه الگوهای فشاری بر شرایط بارشی پاییزه در سواحل شمالی ایران. ژئوفیزیک ایران، ۸(۱)، صص: ۸۲-۱۰۱. Doi.org/10.1001/1.20080336.1393.8.1.7.8

- صادقی، سلیمان؛ علیجانی، بهلول؛ سلیقه، محمد؛ حبیبی نوخندان، مجید؛ قهرودی تالی، منیژه. (۱۳۸۷). تحلیل همدیدی و اچرخندها بر خشکسالی‌های فراگیر خراسان، جغرافیا و توسعه ناحیه‌ای، (۱۰)، صص: ۱۰۵-۱۱۸. <https://doi.org/10.22067/geography.v6i10.4272>
- طولابی‌نژاد، میثم؛ حجازی‌زاده، زهرا؛ آر لویو، آنتونی؛ سلیقه، محمد. (۱۴۰۰). پیوند بندال‌های اوراسیا - اطلس شمالی با ماه‌های تر و خشک فراگیر در ایران، جغرافیا و مخاطرات محیطی، (۳)۱۰، صص: ۱۰۴-۸۳. Doi: 10.22067/geoh.2021.70187.1054
- عزیزی، قاسم؛ علیزاده، تیمور. (۱۳۹۳). ارتباط بین تیپ الگوهای گردشی تراز دریا، با بارش‌های فراگیر در ایران. پژوهش‌های جغرافیایی طبیعی، (۳)۴۶، صص: ۳۱۰-۲۹۷. Doi: 10.22059/jphgr.2014.52133
- عزیزی، قاسم؛ نیری، معصومه؛ رستمی جلیلیان، شیما. (۱۳۸۸). تحلیل سینوپتیک بارش‌های سنگین در غرب کشور (مطالعه موردی: بارش دوره ۴-۷ مارس ۲۰۰۵، ۱۶-۲۴ اسفند ۱۳۸۵)، جغرافیایی طبیعی، (۴)۱، صص: ۱۳-۱.
- عساکره، حسین؛ ترکارانی، فاطمه؛ سلطانی. (۱۳۹۳). میانگین الگوهای گردشی نوام با بارش‌های سنگین در شمال‌غرب ایران، تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، (۱)۱، صص: ۸۵-۹۶. <http://jsaeh.khu.ac.ir/article-1-2316-fa.html>
- علیجانی، بهلول؛ سلیقه، محمد؛ دارند، محمد؛ جاهدی، آرمان. (۱۴۰۰). تغییرات میانگین مداری و نصف‌النهاری بادهای غربی در دوره‌های تر و خشک غرب ایران، نیوار، (۱۱۲-۱۱۳)، صص: ۸۱-۹۵. Doi:10.30467/nivar.2021.276760.1183
- فرج‌زاده، منوچهر؛ کریمی احمدآباد، مصطفی؛ قائمی، هوشنگ؛ مباشری، محمدرضا. (۱۳۸۸). چگونگی انتقال رطوبت در بارش زمستانه غرب ایران (مطالعه موردی بارش ۳-۷ ژانویه ۱۹۹۶). کدرس علوم انسانی، (۱)۱۳، صص: ۲۱۷-۱۹۳.
- <http://hsmmp.modares.ac.ir/article-21-7869-fa.html>
- کریمی احمدآباد، مصطفی؛ جعفری، مهناز؛ خوش‌اخلاق، فرامرز؛ بازگیر، سعید. (۱۳۹۸). نقش تغییرات رطوبت انتقال‌یافته در رخداد خشکسالی و ترسالی ایران. پژوهش‌های جغرافیایی طبیعی، (۴)۵۱، صص: ۵۶۲-۵۴۵. Doi: 10.22059/jphgr.2019.244445.1007134.545-562
- کریمی، مصطفی؛ جعفری، مهناز. (۱۳۹۴). بررسی نوسانات رطوبت ورودی به مناطق خشک ایران در رخداد‌های خشکسالی ترسالی، کاوش‌های جغرافیایی مناطق بیابانی، (۲)۳، صص: ۱۴۳-۱۲۱. Doi:20.1001.1.2345332.1394.3.2.6.8
- کریمی، مصطفی؛ جعفری، مهناز؛ خوش‌اخلاق، فرامرز؛ بازگیر، سعید. (۱۳۹۷). تغییرات رطوبت ورودی به جو ایران و ارتباط آن با دوره‌های مرطوب و خشک فصلی، تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، (۵۱)۱۸، صص: ۱۳۱-۱۱۵. Doi: 10.29252/jgs.18.51.115
- کریمی، مصطفی؛ خوش‌اخلاق، فرامرز؛ بازگیر، سعید؛ جعفری، مهناز. (۱۳۹۵). نقش گردش وردسپهر زیرین پرفشار عربستان در بارش ایران، پژوهش‌های جغرافیایی طبیعی، (۴)۴۸، صص: ۵۸۷-۵۶۹. Doi: 10.22059/jphgr.2016.60827.569-587
- کریمی، مصطفی؛ خوش‌اخلاق، فرامرز؛ شمسی‌پور، علی‌اکبر؛ نوروزی، فهیمه. (۱۳۹۸). الگوهای گردشی پارتفاع گردشی پارتفاع جنب-حاره‌ای عربستان در تراز میانی و ارتباط آن با بارش ایران، جغرافیا و برنامه‌ریزی، (۶۹)۲۳، صص: ۲۵۵-۲۳۳.
- کریمی، مصطفی؛ فرج‌زاده، منوچهر. (۱۳۹۰). شار رطوبت و الگوهای فضایی - زمانی منابع تأمین رطوبت بارش‌های ایران، تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، (۲۲)۱۱، صص: ۱۲۸-۱۰۹.
- کریمی، مصطفی؛ نوروزی، فهیمه؛ جعفری، مهناز؛ خوش‌اخلاق، فرامرز؛ شمسی‌پور، علی‌اکبر. (۱۴۰۰). هم‌زمانی تغییرات مکانی و اچرخند عربستان در تراز ۸۵۰ hPa با بارش‌های اکتبر تا مارس در ایران. پژوهش‌های جغرافیایی طبیعی، (۴)۵۳، صص: ۵۲-۵۰۹. Doi: 10.22059/jphgr.2022.330917.1007647
- کریمی، مصطفی؛ نوروزی، فهیمه؛ جعفری، مهناز؛ خوش‌اخلاق، فرامرز؛ شمسی‌پور، علی‌اکبر. (۱۴۰۱). مشخصه‌های جغرافیایی - همدیدی و اچرخند عربستان در روزهای بارش سنگین بر روی ایران، تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، (۱)۹، صص: ۱۶۸-۱۵۱. <http://jsaeh.khu.ac.ir/article-1-3279-fa.html>
- کیانین، محمدکیا؛ حاجی محمدی، حسن؛ کابلی، سیدحسن؛ مشکي، علیرضا؛ عسگری، حمیدرضا. (۱۳۹۷). مطالعه و شناسایی الگوهای دینامیکی همدیدی مؤثر بر رخداد خشکسالی‌های استان سمنان، آمایش جغرافیایی فضا، (۲۸)۸، صص: ۳۲-۱۹.
- کیانین، محمدکیا؛ صالح پورجم، امین؛ حاجی محمدی، حسن؛ رسولی، فهیمه. (۱۳۹۵). بررسی و ارتباط خشکسالی و ترسالی‌های غرب ایران با الگوهای سینوپتیکی جو، آمایش جغرافیایی فضا، (۲۲)۶، صص: ۱۹۲-۱۷۵.
- کیانی‌پور، منیژه؛ مسعودیان، ابوالفضل؛ عساکره، حسین. (۱۴۰۱). واکاوی پیوند آب بارش‌پذیر با فرارفت رطوبت در ایران زمین، جغرافیا و توسعه، (۶۶)۲۰، صص: ۱۳۰-۱۰۷. Doi: 10.22111/j10.22111.2022.6698

- کیخسروی، قاسم؛ شکبیا، علیرضا؛ حمیدپور، پگاه. (۱۴۰۱). تحلیل الگوهای همدیدی و ترمودینامیک منجر به بارش‌های ابرسنگین و برآورد پهنه آبی حاصل از بارش‌ها در حوضه آبخیز کرخه، مطالعات نواحی ساحلی، ۳(۱)، صص: ۸۳-۱۰۰. Doi: 10.22124/gscj.2022.20667.1108
- گرامی، محمدصالح؛ کریمی، مصطفی؛ عزیزی، قاسم؛ رفعتی، سمیه. (۱۴۰۱). تحلیل همدیدی بارش‌های همراه با طوفان تندی فراگیر بهار در شمال غرب ایران، پژوهش‌های جغرافیایی طبیعی، ۴۵(۱)، صص: ۹۵-۱۱۰. Doi: 10.22059/jphgr.2022.334160.10076
- گوهری، فاطمه، حاجی محمدی، حسن؛ حاجی‌وند پایداری، سمیه. (۱۴۰۱). شناسایی مکانسیم جوی حاکم بر رخداد ناهنجاری‌های شدید بارشی ایران، پژوهش‌های تغییرات آب‌وهوایی، ۳(۱۰)، صص: ۳۳-۴۶. Doi: 10.30488/ccr.2022.341170.1079
- لشکری، حسن؛ متکان، علی‌اکبر؛ آزادی، مجید؛ محمدی، زینب. (۱۳۹۶). تحلیل همدیدی نقش پرفشار جنب‌حاره‌ای عربستان و رودباد جنب‌حاره‌ای در خشکسالی‌های شدید جنوب و جنوب‌غرب ایران، پژوهش‌های دانش زمین، ۸(۳۰)، صص: ۱۶۳-۱۴۱.
- لشکری، حسن؛ محمدی، زینب. (۱۳۹۴). اثر موقعیت استقرار پرفشار جنب‌حاره‌ای عربستان بر سامانه‌های بارشی در جنوب و جنوب‌غرب ایران، پژوهش‌های جغرافیایی طبیعی، ۴۷(۱)، صص: ۷۳-۹۰. Doi: 10.22059/jphgr.2015.53679.73
- محمدی، حسین؛ فتاحی، ابراهیم؛ شمسی‌پور، علی‌اکبر؛ اکبری، مهری. (۱۳۹۱). تحلیل دینامیکی سامانه‌های سودانی و رخداد بارش‌های سنگین در جنوب‌غرب ایران، تحقیقات علوم جغرافیای (علوم جغرافیای)، ۱۲(۲۴)، صص: ۲۴-۷.
- محمدیاریان، محترم؛ طاوسی، تقی؛ خسروی، محمود؛ حمیدیان‌پور، محسن. (۱۳۹۸). ناحیه‌بندی رژیم بارش‌های حدی ایران در دوره ۲۰ ساله، تحقیقات جغرافیایی، ۳۴(۲)، صص: ۱۹۲-۱۸۳. Doi: 10.29252/geores.34.2.183
- محمودی، پیمان؛ حمیدیان‌پور، محسن؛ سنایی، مهدی. (۱۴۰۱ الف). ویژگی‌های هم‌گرایی شار رطوبتی در زمان وقوع خشکسالی‌ها و ترسالی‌های فراگیر ایران، پژوهش‌های اقلیم‌شناسی، ۱۴۰۱(۵۲)، صص: ۱۶۸-۱۴۳.
- محمودی، پیمان؛ طاوسی، تقی؛ کردی تمندانی، صابره. (۱۴۰۱ ب). شناسایی الگوهای ناهنجاری‌های همدیدی منجر به خشکسالی‌ها و ترسالی‌های فراگیر ایران، پژوهش‌های جغرافیایی، ۵۴(۱)، صص: ۱-۲۰. Doi: 10.22059/jphgr.2022.267431.1007286
- مسعودیان، سیدابوالفضل. (۱۳۸۴). شناسایی رژیم‌های بارش به روش تحلیل خوشه‌ای، پژوهش‌های جغرافیایی، ۳۷(۵۲)، صص: ۴۷-۵۹.
- مسعودیان، سیدابوالفضل. (۱۳۹۱). شناسایی گونه‌های هوای اصفهان، تحقیقات جغرافیایی، ۲۷(۳)، صص: ۸۶-۶۵.
- مسعودیان، سیدابوالفضل؛ عطایی، هوشمند. (۱۳۸۴). شناسایی فصول بارشی ایران به روش تحلیل خوشه‌ای، علوم انسانی دانشگاه اصفهان، ۱۱(۱)، صص: ۱-۱۲.
- مشایخ، فرناز؛ لشکری، حسن. (۱۴۰۲). تحلیل همدیدی ترسالی‌های شدید و فوق‌شدید در جنوب ایران، پژوهش‌های جغرافیایی طبیعی، ۵۵(۴)، صص: ۱-۲۵. Doi: 10.22059/jphgr.2024.356775.1007755
- مشایخ، فرناز؛ لشکری، حسن؛ دریاباری، سیدجمال‌الدین؛ رنجبر، محسن. (۱۴۰۱). تحلیل اثرپذیری ناهنجاری‌های بارش در زمان وقوع خشکسالی‌های شدید و فوق‌شدید در جنوب ایران در سه سیکل خورشیدی. جغرافیا، ۲۰(۷۴)، صص: ۱-۲۰. <http://dor.net/dor/20.1001.1.27833739.1401.20.74.1.1>
- مفیدی، عباس، زرین، آذر؛ جانبارقبادی، غلامرضا. (۱۳۹۱). تبیین علل کاهش یافتن مقدار و شدت بارش‌های زمستانه در قیاس با بارش‌های پاییزه در سواحل جنوبی دریای خزر، فیزیک زمین و فضا، ۳۸(۱)، صص: ۲۰۳-۱۷۷. Doi: 10.22059/jesphys.2012.24842.177
- مفیدی، عباس؛ زرین، آذر. (۱۳۸۴). بررسی سینوپتیکی تأثیر سامانه‌های کم‌فشار سودانی در وقوع بارش‌های سیل‌زا در ایران. تحقیقات جغرافیایی، ۲۰(۲)، صص: ۱۱۳-۱۳۶.
- وزیری‌مهر، محدثه؛ حمیدیان‌پور، محسن؛ خسروی، محمود؛ نظری‌پور، حمید. (۱۴۰۱). الگوهای گردشی جو و دوره‌های فرین تر و خشک فصل زمستان در جنوب‌شرق ایران، فیزیک زمین و فضا، ۴۸(۳)، صص: ۶۴۱-۶۵۶. Doi: 10.22059/jesphys.2022.327069.1007337
- Bonis, T., & Oudot, S. (2018). A fuzzy clustering algorithm for the mode-seeking framework. Pattern Recognition Letters, 102, pp 43-73. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2017.11.019>
- Brunner, M.I. and Chartier-Rescan, C., 2024. Drought spatial extent and dependence increase during drought propagation from the atmosphere to the hydrosphere. Geophysical Research Letters, 51(6), p.e2023GL107918. <https://doi.org/10.1029/2023GL107918>
- Büntgen, U., Trouet, V., Frank, D., Leuschner, H.H., Friedrichs, D., Luterbacher, J. and Esper, J. (2010). Tree-ring indicators of German summer drought over the last millennium. Quaternary Science Reviews, 29(7-8), pp.1005-1016. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2010.01.003>
- Byun, H.R. (1992a). A study on the atmospheric circulation during the dry period before the Changma. Part I: existence and characteristics. J. Kor. Meteor. Soc., 28, pp.72-85.

- Byun, H.R. (1992b). A study on the atmospheric circulation during the dry period before the Changma. Part II: compared with those before and after the period. *J. Kor. Meteor. Soc.*, 28, pp.86-102.
- Byun, H.R. (1996). On the atmospheric circulation associated with the Korean drought. *J. Korean Meteor. Soc.*, 32, pp.455-469.
- Chu, P.S., Nash, A.J. and Porter, F.Y. (1993). Diagnostic studies of two contrasting rainfall episodes in Hawaii: Dry 1981 and wet 1982. *Journal of Climate*, 6(7), pp.1457-1462. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1993\)006<1457:DSOTCR>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1993)006<1457:DSOTCR>2.0.CO;2)
- Croitoru, A.E., Toma, F.M. and Dragota, C. (2011). Meteorological drought in the central Romanian plain (between the Olt and Argeş rivers). Case study: year 2000. *Riscuri si catastrofe*, 9, pp.113-120.
- De Carvalho, F.D.A., Lechevallier, Y., & De Melo, F.M. (2012). Partitioning hard clustering algorithms based on multiple dissimilarity matrices. *Pattern Recognition*, 45(1), pp 447–464. <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2011.05.016>
- Ekwezu, C.S.; and J.C. Madu, (2020). Evaluation of Different Rainfall-based Drought Indices: Detection of Meteorological Drought Events in Imo State, Nigeria. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, 4: pp 713-717. doi: 10.4314/jasem.v24i4.25.
- Ferreira, M. R., de Carvalho, F. D. A., & Simões, E. C. (2016). Kernel-based hard clustering methods with kernelization of the metric and automatic weighting of the variables. *Pattern Recognition*, 51, pp 310-321. <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2015.09.025>
- Fowler, A. and Adams, K. (2004). Twentieth-century droughts and wet periods in Auckland (New Zealand) and their relationship to ENSO. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 24(15), pp.1947-1961. <https://doi.org/10.1002/joc.1100>
- Girardin, M.P., Tardif, J.C., Flannigan, M.D. and Bergeron, Y. (2006). Synoptic-scale atmospheric circulation and boreal Canada summer drought variability of the past three centuries. *Journal of Climate*, 19(10), pp.1922-1947. <https://doi.org/10.1175/JCLI3716.1>
- Kousari, M. and Asadi Zarch, M. (2011). Minimum, maximum, and mean annual temperatures, relative humidity, and precipitation trends in arid and semi-arid regions of Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 4. <https://doi.org/10.1007/s12517-009-0113-6>
- Lhotka, O., Trnka, M., Kyselý, J., Markonis, Y., Balek, J. and Možný, M. (2020). Atmospheric circulation as a factor contributing to increasing drought severity in central Europe. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125(18), p.e2019JD032269. <https://doi.org/10.1029/2019JD032269>
- Mahmoudi, P.; A. Rigi, and M.M. Kamak. (2019). A comparative study of precipitation-based drought indices with the aim of selecting the best index for drought monitoring in Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 3: pp 3123-3138. doi.org/10.1007/s00704-019-02778-z.
- Mashari Eshghabad, S.; E. Omidvar, and K. Solaimani. (2014). Efficiency of some meteorological drought indices in different time scales (case study: Tajan Basin, Iran). *Ecopersia*, 1: pp 441-453. doi.org/20.1001.1.23222700.2014.2.1.3.0.
- Modarres, R. and da Silva, V.D.P.R. (2007). Rainfall trends in arid and semi-arid regions of Iran. *Journal of Arid Environments*, 70(2), pp.344-355. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2006.12.024>
- Namias, J. (1991). Spring and summer 1988 drought over the contiguous United States—Causes and prediction. *Journal of Climate*, 4(1), pp.54-65. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1991\)004<0054:SASDOT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1991)004<0054:SASDOT>2.0.CO;2)
- Parry, S., Prudhomme, C., Hannaford, J. and Lloyd-Hughes, B. (2010). Examining the spatio-temporal evolution and characteristics of large-scale European droughts. In *Proceedings of the BHS Third International Symposium* (pp. 135-142). British Hydrological Society. <http://www.ceg.ncl.ac.uk/bhs2010/>
- Rakhmatova, N.; M. Arushanov, L. Shardakova, B. Nishonov, R. Taryannikova, V. Rakhmatova, and D.A. Belikov. (2021). Evaluation of the Perspective of ERA-Interim and ERA5 Reanalyses for Calculation of Drought Indicators for Uzbekistan. *Atmosphere*, 5: 527. doi.org/10.3390/atmos12050527
- Sert, S.A., Bagci, H., & Yazici, A. (2015). MOFCA: multi-objective fuzzy clustering algorithm for wireless sensor networks. *Applied Soft Computing*, 30, pp 151-165. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2014.11.063>.
- Taghizadeh, E.; F. Ahmadi-Givi, L. Brocca, and E. Sharifi. (2021). Evaluation of satellite/reanalysis precipitation products over Iran. *International Journal of Remote Sensing*, 9: pp 3474-3497. doi.org/10.1080/01431161.2021.1875508
- Trenberth, K.E. and Branstator, G.W. (1992). Issues in establishing the causes of the 1988 drought over North America. *Journal of Climate*, 5(2), pp.159-172. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1992\)005<0159:IEECOT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1992)005<0159:IEECOT>2.0.CO;2).

Community-Based Prioritization of Reactive and Proactive Desertification Control Responses Using the DPSIR Framework (Case Study: Ivanaki, Semnan Province)

Zohreh Shahriari¹, Mohammadkia Kianian^{2*} , Mohammadreza Yazdani³, Amin Salehpour Jam⁴

1. Master's graduate, Faculty of Desert Studies, Semnan University, Semnan, Iran

2. **Corresponding Author**, Assistant Professor, Faculty of Desert Studies, Semnan University, Semnan, Iran

Email: m_kianian@semnan.ac.ir ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6461-1335>

3. Associate Professor, Faculty of Desert Studies, Semnan University, Semnan, Iran

4. Associate Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Tehran Agricultural Research, Education and Extension Organization, Tehran, Iran

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article Article history: Received: 20 February 2025 Revised: 24 May 2025 Accepted: 07 June 2025 Published: 22 June 2026 Keywords: Desertification, Stakeholders, Preventive Approach, Causal Framework, Driving Force.	The expansion of deserts is a major environmental issue that poses a serious threat to the health of ecosystems. This phenomenon not only directly affects biodiversity but also has negative impacts on agriculture and the livelihoods of local communities by increasing soil erosion and reducing water resources. To address this challenge, it is essential to carefully examine the status and trends of desertification and to develop appropriate management strategies. In this context, the use of analytical models can significantly assist in identifying effective factors and prioritizing preventive and corrective actions. The DPSIR model, which examines drivers, pressures, states, impacts, and responses, is an effective approach. This study utilized this approach and distributed questionnaires in the study areas around Garmsar County (the villages of Chahdab, Hosseinabad, Kark, Cheshme Nadi, and Ahmadabad). First, the sample size for surveying the residents was calculated using Cochran's formula. The reliability and validity of the questionnaire were assessed using Cronbach's alpha. In this study, 32 responses, including 7 reactive and 25 preventive measures, were identified and prioritized for controlling desertification and reducing related effects. The results obtained from the questionnaires were analyzed using the SPSS software and the Friedman test. According to the results, from the perspective of local communities, "job creation and alternative livelihoods" and "dredging operations of the dam" were ranked the highest and lowest in terms of importance, with mean ranks of 25.42 and 8.83, respectively, among the identified responses for desertification control and mitigating its effects. Implementing reactive and preventive responses based on priorities plays a crucial role in enhancing ecosystem health and preventing further desertification.
Shahriari, Z. , Kianian, M. , Yazdani, M. and Salehpour Jam, A. (2026). Community-Based Prioritization of Reactive and Proactive Desertification Control Responses Using the DPSIR Framework (Case Study: Ivanaki, Semnan Province). <i>Journal of Natural Environmental Hazards</i>, 15 (48), 45-56.	



© The Author/Authors

DOI: 10.22111/jneh.2025.51217.2106

Publisher: University of Sistan and Baluchestan

EXTENDED ABSTRACT

INTRODUCTION

The relationship between humans and nature has never been as worrying and threatening as it is today. At the end of the twentieth century, rapid population growth in many places led to limited access to land, water, and other natural resources (Akbari, 2020). With the development of technology for various sectors, the ground was prepared for the excessive and unprincipled exploitation of natural resource reserves, which are the natural bedrock of life and economic and social activities (Mosfaei et al., 2021b. and Soleimanpour et al., 2019). Desert expansion is an important environmental issue and a serious threat to ecosystem health (Salehpour Jam et al., 2019; Qabakhlou et al., 2023). This phenomenon not only directly affects biodiversity, but also has negative effects on agriculture and the livelihoods of local communities by increasing soil erosion and reducing water resources (Karimi-Sangchini et al., 2021; Akbari et al., 2024). To address this challenge, it is essential to carefully examine the status and trends of desertification and to provide appropriate solutions for its management. In this regard, the use of analytical models can help in identifying effective factors and prioritizing preventive and corrective measures. The DPSIR model, which examines driving forces, pressures, status, impacts, and responses, is an effective approach in this field (Taliban-Fard et al., 2021; Sarbazi et al., 2021).

DATA AND METHODOLOGY

In this study, this issue was also addressed using this approach and with the help of preparing and distributing questionnaires in the study areas of the outskirts of Garmsar city (Chandab, Hossein Abad, Korak, Cheshme Nadi and Ahmad Abad villages). First, the sample size for the resident survey was calculated using Cochran's formula. To describe the different components of DPSIR, a multi-stage approach was adopted, which included reviewing environmental issues and on-site visits and interviews with experts in various fields, such as natural resources, environment, regional water and agricultural Jihad, university faculty members, local community representatives, and other stakeholders knowledgeable about the area. Participatory rural assessment (PRA) was conducted to refine and complete the DPSIR components, focusing on key issues in the area. Then, the residents' views were presented to the expert working group for a final summarization. The reliability and validity of the questionnaire were examined using Cronbach's alpha. Based on the questionnaire using a five-point Likert scale completed by the local community, a coefficient of 0.86 was obtained as Cronbach's. These results indicate that the questionnaire has good reliability. In other words, this coefficient indicates the good reliability of the measurement tool or questionnaire in this study. To determine the sample size for distributing the questionnaire using the Cochran formula, 180 questionnaires were distributed among residents. In this study, 32 responses, including 7 reactive and 25 preventive items, were identified and prioritized to control desertification and reduce the related effects. Subsequently, the results obtained from the questionnaires were analyzed using SPSS software and the Friedman test. The significance level is 0.00 (Sig = 0) in the Friedman test, which, considering that it is less than 0.01 (1 percent), indicates a significant difference in the importance of the indicators under study.

RESULTS AND DISCUSSION

According to the results, from the perspective of local communities, "employment and alternative livelihood" and "dredging operations of the dam" have the highest and lowest importance among the types of responses identified for controlling desertification and reducing the related impacts, with an average rank of 25.42 and 8.83, respectively (Table 1). Sheikh et al. (2018) also considered land planning and management strategies in the Hableh-Rud watershed, including the preparation and development of a comprehensive watershed and water resources management plan, the preparation and development of a land use plan at different scales, and the identification and training of new and

alternative jobs as the most important watershed restoration strategies, which is very consistent with the results of this study. The presence of various technical and management responses based on the DPSIR cause-and-effect approach, which is related to various stakeholders in this region, indicates the necessity for integrated management of this ecosystem based on joint strategic planning among stakeholders. The integrated resource management approach in the watershed area has been emphasized in other studies (Saleh Pourjam et al., 2021a and b; Mosafaei et al., 2020, 2021). Also, in Figure 1, the cause and effect relationships between the components of a driving force, pressure, situation, and effect in the DPSIR framework are presented.

Table 1: Ranking of effective responses to desertification control obtained from the DPSIR framework from the perspective of local communities

Priority	Index	Average Rank	Sample size	Chi-square	df	Significance level
1	Job creation and alternative livelihoods	25.42	180	884.522	31	0.000
2	Improving the living standards of residents, both economically and socially	25.25				
3	Implementing rangeland management projects in the region	22.80				
4	Education and extension in agriculture	22.42				
5	Implementing watershed and aquifer management operations	22.41				
6	Forming a non-governmental cooperative based on comprehensive watershed management plans, programs, and objectives	21.89				
7	Reconsidering grazing permits	21.86				
8	Water and soil conservation operations	21.66				
9	Development of rainwater harvesting system	21.17				
10	Development of volumetric counters in the region	21.13				
11	Establishment of a comprehensive watershed management coordination working group (watershed council)	21.06				
12	Increasing productivity in product production	21.06				
13	Strengthening the natural resources protection unit	20.66				
14	Evaluating ecological potential and establishing a basis for land planning	18.34				
15	Increasing the unit for monitoring the principled extraction of groundwater	17.81				
16	Prioritizing and eliminating factors affecting the lack of public participation in the implementation of rangeland management, desertification and watershed management plans and programs	17.56				
17	Insurance services in the field of damages	17.39				
18	Culturalization to reduce risks	17.02				
19	Review of self-sufficiency policies in agricultural and horticultural products	13.88				
20	Review of self-sufficiency policies in livestock production	13.16				
21	Identification and planting of species resistant to temperature changes and compatible with the region	12.86				
22	Amendment of land affairs laws	12.50				
23	Review of industrial development policies in the region	12.48				
24	Support packages for compensation of damages	10.58				
25	Adaptation to water shortages (revising irrigation patterns, modifying cultivation patterns, modifying water consumption patterns, etc.)	10.14				
26	Monitoring the proper implementation of mining activities in the region	9.98				

27	Designing a drought monitoring and warning system	9.64				
28	Reviewing and allocating environmental water rights	9.58				
29	Reviewing population growth policies in land use planning	9.44				
30	Implementing all natural resource plans in the form of programs resulting from the comprehensive watershed management model	9.03				
31	Designing a fire warning and extinguishing system	9.00				
32	Performing dam dredging operations	8.83				

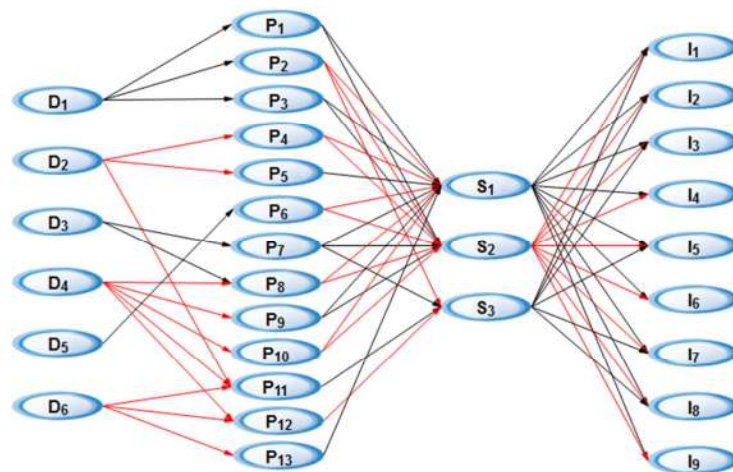


Figure 1: The cause and effect relationships between the components of driving force, pressure, situation, and effect in the DPSIR

The results of this study are in line with the findings of Abadi (2022) and Barjas et al. (2022), who emphasized the importance of education and increased public awareness to increase participation. Population growth leads to pressures such as livestock overpopulation and subsequent adverse conditions (Saleh Pourjam et al., 2020). The findings of Ningal et al. (2008) in Guinea and Saleh Pourjam et al. (2021a) also confirm that population growth has led to severe land-use change, agricultural land development, and loss of the natural environment, which is in line with the present study. The responses proposed in this study can be used to control driving forces, pressures or their effects in the study area. These responses can also help to improve the state of the system. In other words, the responses provided are corrective solutions to the situation and related effects and solutions to control or modify the driving forces and pressures, which are provided for all components of the DPSIR approach.

CONCLUSION

Therefore, following the identification of management responses obtained by this framework, it is suggested that action plans be developed that are carried out with the participation and cooperation of all stakeholders in the watershed. In addition, this framework, based on the identification of management responses, identifies a wide range of stakeholders to improve the situation of the region. Accordingly, to control desertification in the study area, the results obtained by this framework can be used in the management processes of the region. Operationalizing various reactive and preventive responses in the region based on priorities plays an important role in promoting ecosystem health and preventing the spread of desertification in the region.

ETHICAL CONSIDERATIONS

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

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

ACKNOWLEDGMENTS

The authors of the article hereby express their deepest gratitude to all those who collaborated in the completion of this thesis.

References

References [in Persian]

- Karimi Sangchini, Ebrahim, Salehpourjam, Amin, Mosfaei, Jamal, & Payamani, Kianfar. (2021). Evaluating the solutions for flood risk management in the Khorram Abad watershed using the DPSIR framework. Final Project Report, *Soil Conservation and Watershed Management Research Institute*, Tehran, 78pp. [In Persian]
- Mosafaei, Jamal., Salehpourjam, Amin, Tabatabaei, Mahmoudreza, & Kowsari, Mohammadreza. (2020). Developing resources management responses in the Gorganroud watershed using Driving Force, Pressure, State, Impact, Response (DPSIR) software. *Watershed Management Research*, 34(1): 93-11. DOI: 10.22092/WMEJ.2020.341588.1308. [In Persian]
- Qobakhlou, Pouria, Kianian, Mohammadkia, Salehpourjam, Amin, & Niko, Shima. (2025). Examining the factors affecting the lack of sustainable participation of rural communities in desertification control programs (Case study: Garmsar County). *Integrated Watershed Management*, 4(3), 1-13. doi: 10.22034/iwm.2024.2018909.1121. [In Persian]
- Salehpourjam, Amin, Mosafaei, Jamal, Tabatabaei, & Mahmoud Reza. (2021). Perspectives on barriers to people's participation in watershed management plans in south of Arad, Ray County. *Journal of Watershed Management Research*, 34 (2), 61-76. <https://doi.org/10.22092/wmej.2020.342128.1319>. [In Persian]
- Salehpourjam, Amin, Tabatabaei, Mahmoud Reza, Serashtdari, Amir, & Mosafaei, Jamal. (2019). Investigation of drought characteristics in north-west Iran using Deciles Index. *Journal of Watershed Engineering and Management*, 10(4): 552-563. <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2018.121767.1480>. [In Persian]
- Sheikh, Vahedbardi, Zarei Garizi, Arash, Alvandi, Ehsan, Asadi Nilivan, Omid, Khosravi, Gholamreza, Saadoddin, Amir, & Onag, Majid. (2018). Collaborative localization of proposed solutions for Managing the Hable River watershed. *Watershed Research*, 32 (4): 2-18. [In Persian]
- Suleimanpour, Seyed Masoud, Salehpourjam, Amin, Norouzi, Ali Akbar, Khalili, Naser, & Keshavarz, Hojatollah. (2019). Experts' Viewpoint on Prioritizing Factors Affecting Lack of Sustainable Participation of Rural Communities in Watershed Management Projects on the Moradabad Watershed, Meymand and the Province of Fars. *Watershed Management Research*, 32(3): 53-62. DOI: 10.22092/WMEJ.2019.125734.1202. [In Persian]
- Talibanfard, Ali Asghar, Akbari, Morteza, & Azami Rad, Mahmoud. (2022). Sensitivity Areas Assessment of Desertification Using ESAs Model and Prioritizing Management Strategies (Case study: Salt Desert Basin, Khorasan Razavi Province), *Desert Management*, 10 (2), pp. 1-20. [In Persian]

References [in English]

- Akbari, M., Memarian, H., Neamatollahi, E., Jafari Shalamzari, M., Alizadeh Noughani, M., & Zakeri, D. (2020). Prioritizing Policies and Strategies for Desertification Risk Management Using MCDM–DPSIR Approach in Northeastern Iran. *Environment Development and Sustainability*, 23, 2503-2523.
- Akbari, M., Sarbazi, M., Sibeveic, A., Fadaied, S. (2024). Desertification Risk Assessment and Providing Management Strategies using the DPSIR-M Model in Khorasan Razavi Province. *Scientific Journal of Geography and Environmental Hazards*, 13(2): 210-239.
- Barjas, R., Rostami, N. and Salehpour Jam, A. (2021). Prioritization analysis of effective factors in non-participation of local societies in desertification projects (Case Study: Ain Khosh region, Ilam province). *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards*, 8(3), 93-106.
- Mohammadabadi, F. and Kolahi, M. (2022). Factors affecting people's participation in natural resource projects implemented in Khorasan Razavi province. *Pasture and Watershed*, (74), 4(2), 821-835.
- Mosafaei, J., Salehpour Jam, A., Tabatabaei, M.R, & Kousari, M.R. (2021). Trend assessment of the watershed health based on the DPSIR framework. *Land Use Policy*, 100, 104911.

مجله علمی پژوهشی مخاطرات محیط طبیعی، دوره ۱۵، شماره ۴۸، شماره پیاپی ۰۲، تیر ۱۴۰۵

اولویت بندی جامعه محور انواع پاسخ های واکنشی و پیشگیرانه کنترل بیابان زایی با رویکرد DPSIR (مطالعه موردی: ایوانکی، استان سمنان)

زهره شهریاری^۱، محمدکیا کیانیان^{۲*} , محمدرضا یزدانی^۳، امین صالح پور جم^۴

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه بیابان زدایی، مدیریت و کنترل بیابان، دانشکده کویرشناسی، دانشگاه سمنان

۲. استادیار گروه بیابان زدایی، دانشکده کویرشناسی، دانشگاه سمنان (نویسنده مسئول)

ایمیل: m.kianian@semnan.ac.ir / <https://orcid.org/0000-0001-6461-1335> / [ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6461-1335](https://orcid.org/0000-0001-6461-1335)

۳. دانشیار گروه بیابان زدایی، دانشکده کویرشناسی، دانشگاه سمنان

۴. دانشیار پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی تهران، تهران

چکیده	اطلاعات مقاله
گسترش بیابان ها، یکی از مسائل مهم زیست محیطی است و تهدیدی جدی برای سلامت اکوسیستم ها به شمار می رود. این پدیده نه تنها به طور مستقیم بر تنوع زیستی تأثیر می گذارد، بلکه با افزایش فرسایش خاک و کاهش منابع آب، بر کشاورزی و معیشت جوامع محلی نیز اثرات منفی می گذارد. برای مقابله با این چالش، ضروری است که وضعیت و روند بیابان زایی به دقت بررسی شده و راه کارهای مناسبی برای مدیریت آن ارائه شود. در این راستا، استفاده از مدل های تحلیلی می تواند به شناسایی عوامل مؤثر و اولویت بندی اقدامات پیشگیرانه و اصلاحی کمک زیادی نماید. مدل DPSIR که به بررسی نیروی محرکه، فشار، وضعیت، اثرات و پاسخ ها می پردازد؛ یکی از رویکردهای مؤثر در این زمینه است. در این پژوهش نیز، این موضوع با استفاده از این رویکرد و به کمک تهیه و توزیع پرسشنامه در مناطق مورد مطالعه حومه شهرستان گرمسار (روستاهای چنداب، حسین آباد، کرک، چشمه ناد و احمدآباد) انجام گرفت. ابتدا، حجم نمونه برای نظرسنجی ساکنان با استفاده از فرمول کوکران محاسبه گردید. پایایی و روایی پرسشنامه با استفاده از روش آلفای کرونباخ بررسی شد. در این پژوهش ۳۲ پاسخ شامل ۷ مورد واکنشی و ۲۵ مورد پیشگیرانه به منظور کنترل بیابان زایی و کاهش اثرات مربوطه شناسایی و اولویت بندی شد. در ادامه، نتایج به دست آمده از پرسشنامه ها توسط نرم افزار SPSS و با آزمون فریدمن مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. با توجه به نتایج، از دیدگاه جوامع محلی، "اشتغال زایی و معیشت جایگزین" و "انجام عملیات لایروبی سد" به ترتیب با میانگین رتبه ۲۵،۴۲ و ۸،۸۳، بیشینه و کمینه اهمیت را در میان انواع پاسخ های شناسایی شده برای کنترل بیابان زایی و کاهش اثرات مربوطه دارا می باشند. عملیاتی نمودن انواع پاسخ های واکنشی و پیشگیرانه در منطقه مبتنی بر اولویت ها، نقش مهمی در ارتقا سلامت زیست بوم و جلوگیری از گسترش بیابان زایی در منطقه دارد.	نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۰۲ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۳/۰۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۱۷ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۳/۱۶ واژه های کلیدی: بیابان زدایی، دینفعان، رویکرد پیشگیرانه، چارچوب علت و معلولی، نیروهای محرکه.

استناد: شهریاری، زهره، کیانیان، محمدکیا، یزدانی، محمدرضا و صالح پور جم، امین. (۱۴۰۵). اولویت بندی جامعه محور انواع پاسخ های واکنشی و پیشگیرانه کنترل بیابان زایی با رویکرد DPSIR (مطالعه موردی: ایوانکی، استان سمنان) مخاطرات محیط طبیعی، ۱۵ (۴۸)، ۴۵-۵۶.

ناشر: دانشگاه سیستان و بلوچستان

© نویسنده / نویسندگان

DOI: 10.22111/jneh.2025.51217.2106



مقدمه

در ایران و دیگر کشورهای جهان، منابع طبیعی با آسیب‌ها و تهدیدهای جدی روبه‌رو است (قباخلو و همکاران، ۱۴۰۳؛ کمالی و همکاران، ۱۴۰۲؛ مصفایی^۱ و همکاران، ۲۰۱۹؛ الف؛ برجاس^۲ و همکاران، ۲۰۲۲؛ صالح‌پور جم و همکاران، ۲۰۱۹). تقریباً همه‌ی برنامه‌ریزان و سیاست‌گزاران بخش منابع طبیعی کشور در این نکته هم‌عقیده هستند که این منابع رو به زوال و تخریب است و این روند با شیوه‌های کنونی بهره‌برداری و مدیریت ادامه خواهد داشت (مصفایی و همکاران، ۲۰۲۱؛ سلیمان‌پور و همکاران، ۱۳۹۸). از این‌رو، کارشناسان امر بر اهمیت آموزش و افزایش آگاهی عمومی برای افزایش مشارکت در استفاده و مدیریت صحیح منابع تأکید دارند. همچنین، شناسایی و اولویت‌بندی مهم‌ترین پیشران‌ها و فشارهای مؤثر بر وضعیت تخریب منابع و تعیین و اولویت‌بندی پاسخ‌های مدیریتی مناسب جهت کنترل یا تعدیل آن اهمیت زیادی دارد. چنین ابتکاراتی به کاهش اثرات نامطلوب سیل، طوفان‌های گردوغبار و خشکسالی کمک خواهد کرد و در نتیجه رفاه کلی ساکنان را بهبود می‌بخشد (قباخلو و همکاران، ۱۴۰۳). اما، اینکه چرا مردم محلی در انجام طرح‌ها و پروژه‌های احیا و حفاظت از منابع، به‌خصوص کنترل یا کاهش بیابان‌زایی در منطقه مشارکت ندارد، دلایل متعددی دارد که از جمله می‌توان به عدم آگاهی، مسائل اقتصادی، اشتغال، عدم اعتماد به طرح‌ها و غیره اشاره نمود (قباخلو و همکاران، ۱۴۰۳؛ محمدآبادی، ۲۰۲۲؛ گری و همکاران، ۲۰۱۸).

بنابراین، ارزیابی دقیق وضعیت و روند تخریب منطقه با استفاده از شاخص‌های مربوطه و بررسی دقیق‌تر آن‌ها از نظر اهمیت، به‌همراه اولویت‌بندی مناسب با بهره‌گیری از مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، ابزار مؤثری برای اعمال مدیریت‌های صحیح و مقابله با این مشکل به‌شمار می‌آید (معماریان و اکبری، ۱۴۰۰). یکی از این مدل‌ها، مدل DPSIR است که شامل پنج جز نیروی محرکه، فشار، وضعیت، اثر و پاسخ می‌باشد و هر یک از اجزا به‌صورت پیوسته به هم مرتبط هستند. این مدل توسط آژانس محیط‌زیست اروپا به‌صورت جامع تایید گردیده است و نه تنها اثرات زیست‌محیطی، بلکه اثرات اجتماعی - اقتصادی ناشی از تغییرات اکوسیستم را نیز در بر می‌گیرد. کارشناسان و سیاست‌گذاران از اطلاعات خروجی این چارچوب، به‌عنوان پاسخ‌های احتمالی استفاده می‌کنند (طالبان‌فرد و همکاران، ۱۴۰۱؛ شائو^۳ و همکاران، ۲۰۱۴؛ سلیمان‌پور، ۱۳۹۸؛ الیوت^۴، ۲۰۱۱؛ کریمی سنگچینی و همکاران، ۱۴۰۱؛ اکبری^۵ و همکاران، ۲۰۲۴؛ توکلی‌نیا و همکاران، ۱۳۹۶؛ امین فنک و همکاران، ۱۴۰۰؛ کربلایی، ۱۳۹۵؛ اکبری، ۲۰۲۰؛ دوان^۶ و همکاران، ۲۰۲۱). آنها همچنین تأکید کردند که مدل DPSIR، در شناسایی روابط علی و ارائه راه‌حل‌های مناسب در این زمینه مؤثر است. پژوهش‌هایی در خصوص استفاده از این چارچوب در حوضه منابع طبیعی صورت گرفته است که می‌توان به پژوهش شیخ و همکاران (۱۳۹۷) در حوضه آبخیز حبله‌رود اشاره نمود که بیان کردند، راه‌کارهای "برنامه‌ریزی و مدیریت زمین" در تمامی روش‌های تصمیم‌گیری در اولویت نخست قرار دارند. همچنین، ملک محمدی و همکاران (۱۴۰۰) نشان دادند که اولین عامل نیروی محرکه مؤثر در تخریب مراتع، عامل نیاز به اشتغال و غذا می‌باشد که به‌طور مستقیم سبب ایجاد عوامل فشار، مانند مشکلات اقتصادی جوامع محلی، افزایش فرسایش و کاهش سطح مراتع می‌شوند.

¹ Mosaffaie² Barjas³ Shao⁴ Elliott⁵ Akbari⁶ Duan

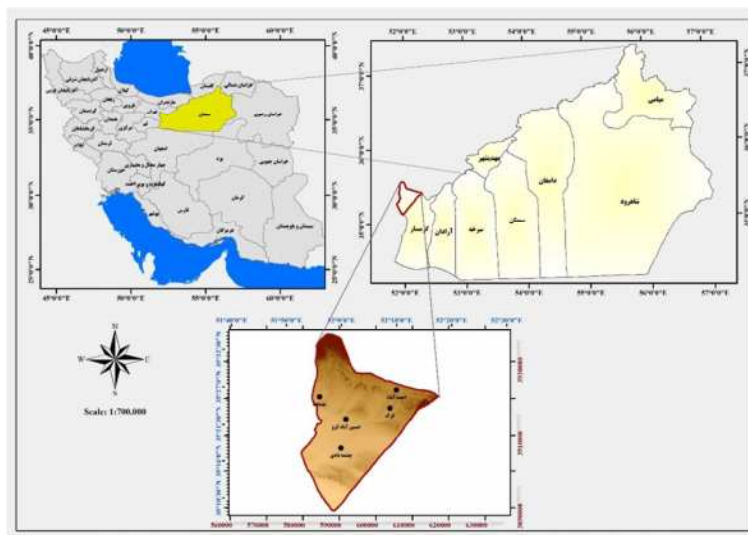
نینگال^۱ و همکاران (۲۰۰۸)، کو^۲ و همکاران (۲۰۲۰) و زوگا^۳ و همکاران (۲۰۲۰) مدل DPSIR را به کار بردند و مشخص کردند که افزایش جمعیت و کاربری زمین به عنوان عامل اصلی تأثیرگذار بر منطقه است.

این پژوهش با هدف شناسایی و اولویت بندی مهم ترین پشیران ها و فشارهای مؤثر بر وضعیت بیابان زایی در منطقه، همچنین برای تعیین و اولویت بندی پاسخ های مدیریتی مناسب جهت کنترل یا تعدیل بیابان زایی و کاهش یا حذف اثرات منفی آن انجام شده است. در این مقاله، اولویت بندی جامعه محور انواع پاسخ های واکنشی و پیشگیرانه کنترل بیابان زایی مبتنی بر چارچوب DPSIR و استفاده از آزمون ناپارامتریک آماری از جمله نوآوری های این مطالعه است. بدیهی است، شناخت اولویت انواع پاسخ های شناسایی شده از دیدگاه جامعه محلی، نقش مهمی در برنامه ریزی های متعاقب کنترل بیابان زایی توسط مدیران و برنامه ریزان و پذیرش اقدامات از دیدگاه ساکنان منطقه، ایفا خواهد نمود.

داده ها و روش ها

منطقه مورد مطالعه

ایوانکی که در غربی ترین منطقه استان سمنان واقع شده است، لقب «پیشانی استان» را به خود اختصاص داده است. این شهر با جمعیتی بالغ بر ۱۲،۴۶۲ نفر (طبق سرشماری سال ۲۰۱۵) در ۵۵ کیلومتری شرق تهران قرار دارد. از نظر جغرافیایی، ایوانکی در طول جغرافیایی ۵۲ درجه و ۰۶ دقیقه و ۳۱ ثانیه طول شرقی و عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۳۴ دقیقه و ۵۳ ثانیه عرض شمالی قرار دارد (شکل ۱). این شهر دارای آب و هوای سرد و خشک زمستانی است که در تضاد با تابستان های بسیار گرم آن می باشد. ایوانکی در ارتفاع تقریبی ۱۲۰۰ متری از سطح دریا قرار دارد و مساحتی بالغ بر ۸۲۶ کیلومتر مربع (۸،۷ درصد از کل مساحت گرمسار) را به خود اختصاص داده است. ایوانکی شامل ۱۱ روستا است که روستاهای چنداب، چشمه نادی، کرک، احمدآباد و حسین آباد کروس در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفتند.



شکل ۱: نقشه منطقه مورد مطالعه

¹ Ningal

² Qu

روش کار

در این مطالعه، فاز اولیه شامل ساختاربندی موضوع با بررسی ارتباطات علی بین عناصر مدل DPSIR می‌باشد. این مدل از یک رویکرد علت و معلولی در شناسایی روابط میان مولفه‌های خویش استفاده می‌کند؛ به‌طوری‌که در آن ابتدا وضعیت فعلی (شامل مسائل و چالش‌های زیست‌محیطی) شناسایی می‌شود، سپس با تجزیه و تحلیل عوامل مستقیم (فشارها) و غیرمستقیم (محرك‌ها) در ایجاد وضعیت نامطلوب، روابط علت و معلولی ایجاد می‌شود. چارچوب DPSIR که مخفف کلمات Driver (نیروی محرك)، Pressure (فشار)، State (وضعیت)، Impact (اثر) و Response (پاسخ) است، به‌عنوان یک ابزار ارزیابی و برنامه‌ریزی عمل می‌کند؛ به‌طوری‌که با شناسایی روابط علت و معلولی میان عوامل غیر مستقیم (نیروهای محرك) و مستقیم (فشارها) به‌وجودآورنده وضعیت کنونی و شناسایی اثرات این وضعیت، انواع پاسخ‌های مدیریتی را برای چهار مولفه یادشده (نیروهای محرك، فشارها، وضعیت و اثرات) شناسایی و معرفی می‌کند. این مدل که توسط آژانس محیط‌زیست اروپا به‌عنوان جامع‌ترین مدل مورد تایید قرار گرفته است، ادغام شاخص‌های مختلف را تسهیل می‌کند که نه تنها اثرات زیست‌محیطی بلکه اثرات اجتماعی - اقتصادی ناشی از تغییرات اکوسیستم را نیز در بر می‌گیرد (ای‌ای‌آی، ۱۹۹۵).

برای تشریح اجزای مختلف DPSIR، یک رویکرد چندمرحله‌ای اتخاذ گردید که شامل مرور منابع و بررسی مسائل زیست‌محیطی و بازدید از منطقه و نیز مصاحبه با کارشناسان حوزه‌های مختلف مانند منابع طبیعی، محیط‌زیست، آب منطقه‌ای و جهاد کشاورزی، اعضای هیئت علمی دانشگاهی، نمایندگان جامعه محلی و سایر ذینفعان آگاه به منطقه است. در این مطالعه، از پرسش‌نامه به‌عنوان ابزار اندازه‌گیری برای سنجش اهمیت شاخص‌های هر یک از مولفه‌های چارچوب DPSIR استفاده شد. به عبارت دیگر، برای سنجش اهمیت شاخص‌ها، از پرسشنامه با طیف پنج‌گانه لیکرت (از ۱ (اهمیت خیلی کم) تا ۵ (اهمیت بسیار زیاد)) استفاده شد. بدین منظور، نخست اقدام به بررسی روایی و سنجش پایایی پرسشنامه به ترتیب مبتنی بر تایید خبرگان و روش آلفای کرونباخ شد (رابطه ۱). لازم به توضیح است که در این مطالعه، روایی پرسشنامه به تایید کارگروه خبرگان متشکل از ۱۶ نفر از کارشناسان خبره یادشده در بالا و آگاه به مسایل منطقه شد. همچنین، برای سنجش پایایی از روش آلفای کرونباخ با آستانه ۰٫۷ استفاده گردید که مقادیر آلفای کرونباخ بزرگ‌تر از آن، نشان‌دهنده قابلیت اعتماد ابزار اندازه‌گیری (پرسشنامه) است (رابطه ۲) (منصورفر، ۲۰۰۶).

$$\alpha = \frac{k}{k-1} \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^k S_i^2}{S_t^2} \right) \quad (1)$$

که در آن:

K، تعداد گویه‌ها؛ S_i^2 ، واریانس نمرات مربوط به گویه شماره Zام و S_t^2 ، واریانس جمع نمره‌های هر پاسخگو (واریانس کل گویه‌ها) است.

همچنین، اقدام به تعیین حجم نمونه برای توزیع پرسشنامه مردمی با استفاده از فرمول کوکران (رابطه ۲) شد.

$$n = \frac{Nt^2s^2}{Nt^2 + t^2s^2} \quad (2)$$

که در آن:

n ، حجم نمونه (تعداد خانوار روستایی محاسبه شده از فرمول)؛ N ، جامعه آماری (تعداد خانوارهای ساکن در منطقه)؛ t ، آماره t استیودنت برای سطح اطمینان ۵ درصد ($t = 1/96$)؛ S^2 ، واریانس برآوردی جامعه مورد نظر ($S^2 = 0/25$) و d ، درجه دقت احتمالی مطلوب ($d = 0/01$).

بر این اساس، در مجموع تعداد ۱۸۰ پرسشنامه بین ساکنین توزیع شد. در جدول ۱، حجم نمونه محاسبه شده توسط فرمول کوکران برای منطقه مورد مطالعه ارائه شده است.

جدول ۱: ویژگی های جمعیتی آبادی های مورد مطالعه				
ردیف	نام آبادی	جمعیت	خانوار	حجم نمونه (کل منطقه)
۱	چنداب	۴۶۸	۹۶	۱۸۰
۲	چشمه نادی	۳۵۲	۹۲	
۳	کرک	۲۵۱	۵۵	
۴	حسین آباد	۱۹۰	۴۸	
۵	احمد آباد	۱۲۵	۴۶	

همچنین در آخرین مرحله، از آزمون فریدمن با استفاده از نرم افزار SPSS برای رتبه بندی شاخص های هر یک از مولفه های چارچوب DPSIR بر اساس دیدگاه جامعه محلی استفاده شد (رابطه ۳). سطح معنی داری کوچک تر از ۰،۰۱ یا ۰،۰۵ نشان دهنده پذیرش اهمیت یا اولویت های متفاوت در بین شاخص ها است. بر این اساس، آزمون فریدمن برای تجزیه و تحلیل سلسله مراتب اهمیت شاخص های هر یک از مولفه ها مبتنی بر رابطه ۳ استفاده شد.

$$\chi^2 = \frac{12}{Nk(k+1)} \sum_{j=1}^k R_j^2 - 3N(k+1) \quad (3)$$

که در آن:

K ، تعداد ستون ها یا سئوالات؛ N ، تعداد سطرها و R_j ، حاصل جمع رتبه ها در ستون j ام است. در این حالت، درجه آزادی به صورت $k-1$ است.

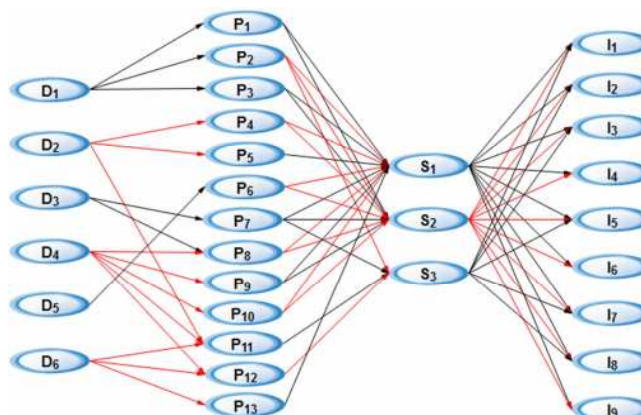
نتایج و بحث

روایی و پایایی پرسشنامه

در این پژوهش، روایی به تایید کارگروه خبره رسید. به منظور بررسی پایایی پرسشنامه های تهیه شده توسط تیم پژوهش، نمونه اولیه ۳۰ پرسشنامه پر شده به صورت تصادفی از منطقه مورد مطالعه جمع آوری شد. سپس، برای سنجش پایایی اقدام به محاسبه آلفای کرونباخ شد. مبتنی بر پرسشنامه با مقیاس پنجگانه لیکرت که توسط جامعه محلی تکمیل شد، ضریب ۰،۸۶ به عنوان ضریب آلفای کرونباخ به دست آمد. این نتایج حاکی از آن است که پرسشنامه از پایایی خوبی برخوردار است. به عبارت دیگر، این ضریب بیانگر قابلیت اعتماد خوب به ابزار اندازه گیری یا پرسشنامه در این پژوهش است. شاخص های مولفه های مختلف چارچوب DPSIR در جدول ۲ ارائه شده است. همچنین، مشخصات پاسخ دهندگان به پرسشنامه در منطقه مورد مطالعه در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۲: شاخص‌های مولفه‌های مختلف چارچوب DPSIR

نیروی محرک (D)	فشار (P)	وضعیت (S)	اثر (I)	پاسخ (R)
تغییر اقلیم (D ₁)	تغییرات شدید	افزایش فرسایش -	افزایش هزینه‌های	بازنگری در سیاست‌های رشد جمعیت در آمایش سرزمین (R ₁)
رشد جمعیت (D ₂)	حرارتی (P ₁)	پذیری (S ₁)	تولید (I ₁)	اصلاح قوانین امور اراضی (R ₂)
قوانین امور اراضی (D ₃)	کاهش مقادیر	کاهش	خسارت به اراضی و	بازنگری در سیاست‌های خودکفایی در محصولات کشاورزی و باغبانی (R ₃)
سیاست خودکفایی در محصولات کشاورزی و باغبانی (D ₄)	بارش (P ₂)	حاصلخیزی	تاسیسات (I ₂)	بازنگری در سیاست‌های خودکفایی در تولیدات دامی (R ₄)
سیاست خودکفایی در تولیدات دامی (D ₅)	تغییر در توزیع زمانی بارش (P ₃)	خاک (S ₂)	کاهش امنیت غذایی (I ₃)	بازنگری در سیاست‌های توسعه صنایع در منطقه (R ₅)
توسعه صنایع (D ₆)	آتش‌سوزی (P ₄)	فرونشست زمین (S ₃)	کاهش تولید علوفه و ظرفیت چرای مرتعی (I ₄)	فرهنگ‌سازی با هدف کاهش مخاطرات (R ₆)
	بوته کنی (P ₅)		کاهش درآمد ساکنان منطقه (I ₅)	طراحی سامانه هشدار و اطفای حریق (R ₇)
	فزون دامی (P ₆)		کاهش عمر مفید سد در پایین - دست منطقه (I ₆)	ارتقای سطح زندگی ساکنان اعم از اقتصادی و اجتماعی (R ₈)
	تغییر غیراصولی کاربری اراضی (P ₇)		افزایش مهاجرت از روستا به شهر (I ₇)	بازنگری در پروانه‌های چرا (R ₉)
	توسعه غیر اصولی باغات در اراضی شیب‌دار (P ₈)		موفقیت کمتر پروژه‌های حفاظت آب و خاک (I ₈)	اشتغال‌زایی و معیشت جایگزین (R ₁₀)
	شخم در جهت شیب (P ₉)		کاهش تنوع زیستی (I ₉)	تقویت یگان حفاظت منابع طبیعی (R ₁₁)
	کشت در اراضی شیب‌دار فاقد پتانسیل کشاورزی (P ₁₀)			ارزیابی توان اکولوژیک و مبنا قرار دادن آمایش سرزمین (R ₁₂)
	برداشت بیرویه از آب‌های زیرزمینی (P ₁₁)			عملیات حفاظت آب و خاک (R ₁₃)
	رعایت نکردن حلقه زیست - محیطی آبخوان (P ₁₂)			آموزش و ترویج در کشاورزی (R ₁₄)
	فعالیت‌های معدنی غیر اصولی (P ₁₃)			توسعه کنترهای حجمی در منطقه (R ₁₅)
				افزایش بهره‌وری در تولید محصولات (R ₁₆)
				سازگاری با کم‌آبی (اصلاح الگوی آبیاری، اصلاح الگوی کشت، اصلاح الگوی مصرف آب و...) (R ₁₇)
				افزایش یگان نظارت بر برداشت اصولی آب زیرزمینی (R ₁₈)
				بازنگری و تخصیص حق‌آبه‌های زیست‌محیطی (R ₁₉)
				نظارت بر انجام صحیح فعالیت‌های معدنی در منطقه (R ₂₀)
				اجرای عملیات آبخیزداری و آبخوان‌داری (R ₂₁)
				خدمات بیمه‌ای در زمینه خسارت‌ها (R ₂₂)
				بسته‌های حمایتی جبران خسارت‌ها (R ₂₃)
				طراحی سامانه پایش و هشدار خشکسالی (R ₂₄)
				شناسایی و کاشت گونه‌های مقاوم به تغییرات دما و سازگار با منطقه (R ₂₅)
				انجام طرح‌های مرتع‌داری در منطقه (R ₂₆)
				توسعه سامانه جمع‌آوری آب باران (R ₂₇)
				انجام عملیات لایروبی سد (R ₂₈)
				شکل‌دهی سمن‌ها مبتنی بر طرح‌ها، برنامه‌ها و اهداف مدیریت جامع حوزه آبخیز (R ₂₉)
				ایجاد کارگروه هماهنگی مدیریت جامع در حوزه آبخیز (شورای آبخیز) (R ₃₀)
				اولویت‌بندی و مرتفع نمودن عوامل موثر در عدم مشارکت مردمی در اجرای طرح‌ها و برنامه‌های مرتع‌داری، بیابان‌زدایی و آبخیزداری (R ₃₁)
				اجرای کلیه طرح‌های منابع طبیعی در قالب برنامه‌های حاصل از الگوی مدیریت جامع حوزه آبخیز (R ₃₂)



شکل ۲: روابط علت و معلولی میان مولفه های نیروی محرک، فشار، وضعیت و اثر در چارچوب DPSIR

جدول ۳: مشخصات پاسخ دهندگان به پرسشنامه در منطقه مورد مطالعه

ویژگی	تعداد	درصد
جنسیت	زن	۸/۳۳
	مرد	۹۱/۶۷
سن (سال)	≤ ۴۵	۸/۳۳
	۴۶ تا ۶۰	۷۶/۱۱
	≥ ۶۰	۱۵/۵۶
تحصیلات	بیسواد	۶/۶۷
	ابتدایی	۴۷/۲۲
	راهنمایی و دبیرستان	۱۴/۴۴
	دیپلم	۲۳/۸۹
	دانشگاهی	۷/۷۸

اولویت بندی اهمیت پاسخ های جوامع محلی با استفاده از آزمون فریدمن در روستاهای شهرستان گرمسار این پژوهش به دنبال شناسایی و اولویت بندی جامعه محور اهمیت انواع پاسخ های مدیریتی مرتبط با کنترل یا تعدیل بیابان زایی در روستاهای چنداب، چشمه نادی، کرک، احمدآباد و حسین آباد کروس است که نتایج کلی آنها در جدول ۴ آمده است. در چارچوب علت و معلولی DPSIR، نخست شاخص های وضعیت مورد بررسی قرار می گیرد و سپس آن دسته از عواملی (نیروهای محرک و فشارها) که منجر به این وضعیت شده اند، شناسایی و مشخص می گردد. همچنین، شاخص های مرتبط با اثرات نامطلوب وضعیت کنونی نیز شناسایی و معرفی می شوند. در پایان باید برای هر یک از این شاخص ها (شاخص های نیروی محرک، فشارها، وضعیت و اثرات) پاسخی داده شود. بر این اساس، در این مطالعه ۳۲ پاسخ واکنشی و پیشگیرانه در ارتباط با مولفه های پنج گانه مشخص و معرفی شدند. در ارتباط با پاسخ های واکنشی و پیشگیرانه، لازم به توضیح است که آن دسته از پاسخ هایی که سبب بهبود مستقیم وضعیت و اثرات مربوطه می شوند را پاسخ های واکنشی و آن دسته از پاسخ هایی را که سبب مرتفع شدن یا تعدیل نیروهای محرک و فشارهای به وجود آورنده وضعیت کنونی می شوند را پاسخ های پیشگیرانه می نامند. بر این اساس، در این پژوهش ۳۲ پاسخ شامل ۷ پاسخ واکنشی و ۲۵ پاسخ پیشگیرانه، شناسایی و اولویت بندی شدند. نتایج ارزیابی پرسشنامه های لیکرت تکمیل شده توسط جوامع محلی، به همراه استفاده از آزمون فریدمن برای اولویت بندی شاخص ها و تعیین

اهمیت نسبی آن‌ها (دارای میانگین رتبه ۸,۸۳ تا ۲۵,۴۲) در رابطه با مشارکت جامعه در پروژه‌های حوضه آبخیز، در جدول ۳ نشان داده شده است. علاوه بر این، سطح معنی‌داری برابر با ۰,۰۰ (Sig = 0) در آزمون فریدمن است که با توجه به کمتر بودن آن از میزان ۰,۰۱ (۱ درصد)، نشان‌دهنده وجود تفاوت معنی‌دار در اهمیت شاخص‌های مورد بررسی می‌باشد. در نتیجه، از دیدگاه جوامع محلی، شاخص «اشتغال‌زایی و معیشت جایگزین» با میانگین امتیاز ۲۵,۴۲، دارای بالاترین اولویت نسبی است، درحالی‌که شاخص «انجام عملیات لایروبی سد» کمترین اولویت نسبی ۸/۸۳ را دارد.

جدول ۴: رتبه‌بندی پاسخ‌های موثر بر کنترل بیابان‌زایی به‌دست‌آمده از چارچوب DPSIR از دیدگاه جوامع محلی

اولویت	شاخص	میانگین رتبه	تعداد نمونه	کای اسکوتر	درجه آزادی	سطح معنی‌داری
۱	اشتغال‌زایی و معیشت جایگزین	۲۵/۴۲	۱۸۰	۸۸۴/۵۲۲	۳۱	۰,۰۰۰
۲	ارتقای سطح زندگی ساکنان اعم از اقتصادی و اجتماعی	۲۵/۲۵				
۳	انجام طرح‌های مرتع‌داری در منطقه	۲۲/۸۰				
۴	آموزش و ترویج در کشاورزی	۲۲/۴۲				
۵	اجرای عملیات آبخیزداری و آبخوان‌داری	۲۲/۴۱				
۶	شکل‌دهی سمن‌ها مبتنی بر طرح‌ها، برنامه‌ها و اهداف مدیریت جامع حوضه آبخیز	۲۱/۸۹				
۷	بازنگری در پروانه‌های چرا	۲۱/۸۶				
۸	عملیات حفاظت آب و خاک	۲۱/۶۶				
۹	توسعه سامانه جمع‌آوری آب باران	۲۱/۱۷				
۱۰	توسعه کنترهای حجمی در منطقه	۲۱/۱۳				
۱۱	ایجاد کارگروه هماهنگی مدیریت جامع در حوضه آبخیز (شورای آبخیز)	۲۱/۰۶				
۱۲	افزایش بهره‌وری در تولید محصولات	۲۱/۰۶				
۱۳	تقویت یگان حفاظت منابع طبیعی	۲۰/۶۶				
۱۴	ارزیابی توان اکولوژیک و مینا قرار دادن آمایش سرزمین	۱۸/۳۴				
۱۵	افزایش یگان نظارت بر برداشت اصولی آب زیرزمینی	۱۷/۸۱				
۱۶	اولویت‌بندی و مرتفع نمودن عوامل موثر در عدم مشارکت مردمی در اجرای طرح‌ها و برنامه‌های مرتع‌داری، بیابان‌زدایی و آبخیزداری	۱۷/۵۶				
	خدمات بیمه‌ای در زمینه خسارت‌ها					
۱۷	فرهنگ‌سازی با هدف کاهش مخاطرات	۱۷/۳۹				
۱۸	بازنگری در سیاست‌های خودکفایی در محصولات کشاورزی و	۱۷/۰۲				
۱۹	باغبانی	۱۳/۸۸				
	بازنگری در سیاست‌های خودکفایی در تولیدات دامی					
۲۰	شناسایی و کاشت گونه‌های مقاوم به تغییرات دما و سازگار با منطقه	۱۳/۱۶				
۲۱	اصلاح قوانین امور اراضی	۱۲/۸۶				
	بازنگری در سیاست‌های توسعه صنایع در منطقه					
۲۲	بسته‌های حمایتی جبران خسارت‌ها	۱۲/۵۰				
۲۳	سازگاری با کم‌آبی (اصلاح الگوی آبیاری، اصلاح الگوی کشت، اصلاح	۱۲/۴۸				
۲۴	الگوی مصرف آب و...)	۱۰/۵۸				
۲۵	نظارت بر انجام صحیح فعالیت‌های معدنی در منطقه	۱۰/۱۴				
	طراحی سامانه پایش و هشدار خشکسالی					
۲۶	بازنگری و تخصیص حق‌آبه‌های زیست‌محیطی	۹/۹۸				

۷	بازنگری در سیاست های رشد جمعیت در آمایش سرزمین	۹/۶۴			
۲۸	اجرای کلیه طرح های منابع طبیعی در قالب برنامه های حاصل از	۹/۵۸			
۲۹	الگوی مدیریت جامع حوزه آبخیز	۹/۴۴			
	طراحی سامانه هشدار و اطفای حریق				
۳۰	انجام عملیات لایروبی سد	۹/۰۳			
۳۱		۹/۰۰			
۳۲		۸/۸۳			

این مطالعه با هدف شناسایی و اولویت بندی علل بیابان زایی و راه کارهای کاهش آن با استفاده از چارچوب DPSIR بر روی پنج روستای شهرستان گرمسار انجام شد. با توجه به اینکه، بیابان زایی فرآیندی چندوجهی است که تحت تأثیر عوامل مختلف انسانی و طبیعی قرار دارد و این عوامل با تعامل خود موجبات پیشرفت بیابان زایی را تشدید می کنند، شناخت این عوامل و تاثیرات آنها بر منطقه برای اجرای راهبردهای موثر در مبارزه با بیابان زایی و جلوگیری از پیشرفت بیشتر آن بسیار مهم است (صالح پورجم و همکاران، ۱۳۹۸). از جمله عوامل انسانی، افزایش جمعیت است (جدول ۲) که منجر به افزایش بهره برداری از زمین ها شده است. همچنین، تغییرات در کاربری زمین ها، مورد مهمی است که ضعف در قوانین امور اراضی و سایر پیشران ها مانند سیاست های توسعه ای به ویژه در بخش کشاورزی در منطقه به دنبال داشته است. این فشار با تغییر پوشش سطح زمین و افزایش بهره برداری از سفره ای آب زیرزمینی، تسریع و تشدید پدیده ی فرونشست زمین را در منطقه به دنبال داشته است. همچنین، افزایش جمعیت منجر به فشارهایی چون فزون دami و وضعیت نامطلوب متعاقب آن خواهد شد (صالح پورجم و همکاران، ۱۴۰۰). یافته های نینگال و همکاران (۲۰۰۸) در گینه، اکبری و همکاران (۲۰۲۱) و صالح پورجم و همکاران (۲۰۲۱) نیز تأیید کننده ی این مطلب است که افزایش جمعیت، منجر به تغییر شدید کاربری زمین ها، توسعه ی زمین های کشاورزی و از بین رفتن محیط طبیعی شده است. پاسخ های در نظر گرفته شده پیشنهاد شده در این پژوهش می توانند برای مهار کردن نیروی های محرک، فشار یا آثار ناشی از آنها در منطقه مورد مطالعه به کار برده شوند. این پاسخ ها می توانند به بهبود وضعیت سامانه نیز کمک کنند. به عبارت دیگر، پاسخ های ارائه شده، راه حل های اصلاحی وضعیت و اثرهای مربوط و راه حل های مهاري یا تعدیل کننده ی نیروهای محرک و فشارها است (جدول ۴) که برای همه ی مؤلفه های رویکرد DPSIR ارایه شده اند.

مطابق با پژوهش های انجام شده توسط مصفایی و همکاران (۲۰۲۱ الف) و صالح پورجم و همکاران (۲۰۲۱ ب)، افزایش فرسایش پذیری، کاهش حاصلخیزی خاک و فرونشست زمین به عنوان مهم ترین وضعیت های سنجش بیابان زایی و سلامت حوضه در منطقه مورد مطالعه شناسایی و معرفی شدند.

در پژوهش شیخ و همکاران (۲۰۱۸)، رتبه بندی گویه های مؤلفه ی پاسخ مبتنی بر آزمون فریدمن نشان دهنده ی تفاوت معنی دار گویه ها در رویکرد DPSIR بود. رویکرد مدیریت جامع آبخیز و ایجاد و تقویت صندوق های حمایتی، اشتغال زایی و معیشت جایگزین جزو اولویت های نخست بودند. در این پژوهش نیز، از دیدگاه جوامع محلی، مهم ترین شاخص (پاسخ) برای کنترل بیابان، اشتغال زایی و معیشت جایگزین است. از دیدگاه جوامع محلی نیز، ۱۰ مورد اول اهمیت پاسخ های موثر بر کنترل بیابان زایی شامل اشتغال زایی و معیشت جایگزین، ارتقای سطح زندگی ساکنان اعم از اقتصادی و اجتماعی، انجام طرح های مرتع داری در منطقه، آموزش و ترویج در کشاورزی، اجرای عملیات آبخیزداری و آبخوان داری، شکل دهی سمن ها مبتنی بر طرح ها، برنامه ها و اهداف مدیریت جامع

حوضه آبخیز، بازنگری در پروانه‌های چرا، عملیات حفاظت آب و خاک، توسعه سامانه جمع‌آوری آب باران و توسعه کنترهای حجمی در منطقه می‌باشند (جدول ۴). قباخلو و همکاران (۱۴۰۳) نیز در پژوهش خود بر اهمیت آموزش و افزایش آگاهی عمومی برای افزایش مشارکت تأکید دارند. ویدئوهای آموزشی مرتبط و همچنین بازدید از پروژه‌های موفق در سایر مناطق با همراهی ریش‌سفیدان و اعضای شورای روستا و به اشتراک گذاشتن تجربیات و مشاهدات میدانی خود با اهالی روستا، باعث افزایش دانش و آگاهی آنان در مورد ظرفیت‌های اشتغال در این پروژه‌ها می‌شود. علاوه بر این، چنین ابتکاراتی به کاهش اثرات نامطلوب سیل، طوفان‌های گردوغبار و خشک‌سالی کمک خواهد کرد و در نتیجه رفاه کلی ساکنان را بهبود می‌بخشد که با این پژوهش هم‌راستا می‌باشد (صابری فر و خزایی، ۲۰۱۴؛ محمد آبادی، ۲۰۲۲). با توجه به نتایج آنها، معیار "اقتصادی" از نظر کارشناسان در رتبه ۳ و شاخص "درآمد کم جامعه محلی" در رتبه ۷ از بین ۱۵ شاخص قرار گرفت. این یافته‌ها با نتایج پژوهش‌های انجام‌شده توسط برجاس و همکاران (۲۰۲۲) و صالح پورجم و همکاران (۲۰۲۱) مطابقت دارد. طبق نتایج آن‌ها، بیابان‌زایی تأثیر خاصی بر وضعیت اقتصادی دامداران داشته و منجر به کاهش تعداد دام، سطح زیرکشت زمین کشاورزی، مدفون شدن و تخریب مناطق مسکونی و درآمد کلی سالانه می‌شود. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد تا زمانی که روستاییان از سطح آگاهی کافی در مورد برنامه‌ها و پروژه‌ها، همراه با درک مثبت از فرصت‌های شغلی و اثرات مثبت پروژه‌های بیابان‌زدایی برخوردار نباشند، آن‌ها علاقه‌ای به این گونه مشارکت در این گونه طرح‌ها ندارند. در نتیجه، آن‌ها بی‌تفاوت باقی می‌مانند و یا مشارکت محدودی خواهند داشت. نتایج این پژوهش با یافته‌های محمد آبادی (۲۰۲۲)، صالح پورجم و همکاران (۲۰۲۲) و برجاس و همکاران (۲۰۲۲) همسو است که بر اهمیت آموزش و افزایش آگاهی عمومی برای افزایش مشارکت تأکید می‌کنند. مصفایی و همکاران (۲۰۱۹)، نیز برای به‌انجام رسیدن مدیریت صحیح آبخیز، تشکیل‌دادن سازمانی واحد و قدرتمند و ایجادکردن شوراهای آبخیز را ضروری دانسته‌اند. شیخ و همکاران (۱۳۹۷) نیز در آبخیز حبله‌رود، راه‌کارهای برنامه‌ریزی و مدیریت زمین از جمله تهیه و تدوین برنامه‌ی مدیریت جامع آبخیز و منابع آب، تهیه و تدوین برنامه‌ی آمایش سرزمین در مقیاس‌های مختلف و شناسایی و آموزش شغل‌های جدید و جایگزین را مهم‌ترین راه‌کارهای احیای آبخیز دانستند که همخوانی زیادی با نتیجه‌های این پژوهش دارد. حضور انواع پاسخ‌های فنی و مدیریتی مبتنی بر رویکرد علت و معلولی DPSIR که در ارتباط با انواع ذینفعان در این منطقه است، بیانگر ضرورت مدیریت یکپارچه این زیست‌بوم مبتنی بر برنامه‌ریزی راهبردی مشترک میان ذینفعان است. رویکرد مدیریت یکپارچه منابع در گستره آبخیز، از موارد مورد تأکید در دیگر پژوهش‌های انجام شده است (صالح پورجم و همکاران، ۲۰۲۱ الف و ب؛ مصفایی و همکاران، ۱۴۰۰). بر این اساس، مدیریت یکپارچه منطقه مبتنی بر سازمان کاری متشکل از انواع ذینفعان، بسیار توصیه می‌شود.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش با استفاده از چارچوب DPSIR، انواع پاسخ‌های واکنشی و پیشگیرانه کنترل و یا تعدیل بیابان‌زایی مبتنی بر شناسایی انواع نیروهای محرکه و فشارهای منتج به وضعیت کنونی بیابان‌زایی در منطقه و نیز شناسایی اثرات وضعیت کنونی، شناسایی و اولویت‌بندی شدند. طبق نتایج پژوهش، اشتغال‌زایی و معیشت جایگزین، ارتقای سطح زندگی ساکنان اعم از اقتصادی و اجتماعی و انجام طرح‌های مرتع‌داری در منطقه، مهم‌ترین پاسخ‌های مدیریتی شناخته‌شده توسط این چارچوب از دیدگاه جامعه محلی هستند.

بر این اساس، متعاقب شناسایی پاسخ های مدیریتی به دست آمده توسط این چارچوب، تدوین برنامه های اقدام که مشارکت و همکاری کلیه ذینفعان آبخیز را مد نظر قرار دهد، برای کلیه پاسخ های شناسایی شده در این پژوهش، به شدت پیشنهاد می شود. در این ارتباط، برنامه ریزی برای توسعه معیشت های جایگزین و فقرزدایی در منطقه، توجه جدی به مدیریت مراتع حوزه و اجرای طرح های مربوطه، آموزش و ترویج در حوزه کشاورزی، اجرای عملیات آبخیزداری و آبخوانداری، شکل دهی سمن ها و نیز انجام ممیزی به روز مراتع از جمله راه کارهای مهمی است که مبتنی بر اولویت بندی راه کارهای به دست آمده در این پژوهش، برای کنترل بیابان زایی و جلوگیری از تخریب اراضی، مبتنی بر چارچوب DPSIR پیشنهاد می گردد. همچنین، این چارچوب مبتنی بر شناسایی پاسخ های مدیریتی، طیف گسترده ای از ذینفعان را به منظور بهبود وضعیت منطقه، در کنترل بیابان زایی منطقه دخیل می کند که تأکیدی بر ملاحظه رویکردهای مشارکتی در کنترل بیابان زایی منطقه با مشارکت کلیه ذینفعان در منطقه مورد مطالعه است.

تقدیر و تشکر

بدین وسیله نویسندگان مقاله از همه عزیزانی که در انجام این پایان نامه همکاری نمودند، کمال سپاسگزاری را دارند.

منابع

- امین فک، داود؛ رضایی، روح الله؛ زینالزاده، کامران. (۱۴۰۰). تحلیل وضعیت بحران حوضه دریاچه ارومیه و ارائه راه کارهای مدیریت پایدار آن: کاربرد مدل DPSIR، علوم و فناوری های ترویج کشاورزی ایران، دوره ۱۷، شماره ۲، صص: ۲۹-۴۵.
- سلیمان پور، سیدمسعود؛ صالح پورجم، امین؛ نوروزی، علی اکبر؛ خلیلی، ناصر؛ کشاورز، حجت الله. (۱۳۹۸). دیدگاه های کارشناسان در خصوص اولویت بندی عوامل مؤثر بر عدم مشارکت پایدار جوامع روستایی در پروژه های مدیریت حوزه های آبخیز در حوضه مرادآباد، میمند استان فارس، پژوهش مدیریت آبخیز، دوره ۳۲، شماره ۳، صص: ۵۳-۶۲.
- شیخ، واحدبردی؛ زارعی گاریزی، آرش؛ الوندی، احسان؛ اسدی نیلیوان، امید؛ خسروی، غلامرضا؛ سعدالدین، امیر؛ اوق، مجید. (۱۳۹۷). بومی سازی راه کارهای پیشنهادی برای مدیریت حوضه رودخانه هابل. پژوهش های آبخیزداری، دوره ۳۲، شماره ۴، صص: ۲-۱۸.
- خالقی، علی. (۱۴۰۰). تعیین خسارت های ناشی از فرسایش بادی و درجه آسیب پذیری به دلیل ورود ماسه های روان در روستای قاسم زمل (مطالعه موردی: استان خوزستان، شهر حمیدیه)، کنفرانس بین المللی ششم تحقیقات کاربردی در علوم کشاورزی، منابع طبیعی و محیط-زیست، همدان.
- طالبان فرد، علی اصغر؛ اکبری، مرتضی؛ اعظمی راد، محمود. (۱۴۰۱). ارزیابی مناطق حساس به بیابان زایی با استفاده از مدل ESAs و اولویت بندی راه کارهای مدیریتی (مطالعه موردی: حوزه کویر نمک، استان خراسان رضوی)، مدیریت بیابان، دوره ۱۰، شماره ۲، صص: ۱-۲۰.
- قباخلو، پوریا؛ کیانیان، محمدکیا؛ صالح پورجم، امین؛ نیکو، شیم. (۱۴۰۳). بررسی عوامل مؤثر بر عدم مشارکت پایدار جوامع روستایی در طرح های بیابان زدایی (مطالعه موردی: شهرستان گرمسار)، مدیریت جامع حوزه های آبخیز، دوره ۴، شماره ۳، صص: ۱-۱۳.
- کربلایی، مهدی. (۱۳۹۵). بررسی استراتژی های مدیریت شهری در کاهش خسارت های بلایای طبیعی (سیل و زلزله) بر اساس مدل ارزیابی DPSIR (مطالعه موردی: تهران)، پایان نامه دریافت درجه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی.
- کریمی سنگجینی، ابراهیم؛ صالح پورجم، امین؛ مصفاei، جمال؛ پيامني، کيانفر. (۱۴۰۱). ارزیابی راه کارهای مدیریت ریسک سیل در حوضه آبخیز خرم آباد با استفاده از چارچوب DPSIR. گزارش پروژه نهایی، پژوهشکده حفاظت خاک و مدیریت آبخیز، تهران، ۷۸ صفحه.
- کمالی، مهدی؛ آذرنبوند، حسین؛ ملکيان، آرش؛ مصفاei، جمال. (۱۴۰۲). ارائه راه کارهای مدیریتی برای حوضه آبخیز آلولا در استان قزوین بر اساس رویکرد DPSIR، پژوهش مدیریت آبخیز، دوره ۱۴، شماره ۲۸، صص: ۱۴۸-۱۶۲.
- صالح پورجم، امین؛ مصفاei، جمال؛ طباطبائي، محمودرضا. (۱۴۰۰). دیدگاه ها در خصوص موانع مشارکت مردم در طرح های مدیریت حوزه های آبخیز در جنوب آران، شهرستان ری. پژوهش مدیریت آبخیز، دوره ۳۴، شماره ۲، صص: ۶۱-۷۴.

- صالح پورجم، امین؛ طباطبائی، محمودرضا؛ سرشته‌داری، امیر؛ مصفاei، جمال. (۱۳۹۸). بررسی ویژگی‌های خشکسالی در شمال غرب ایران با استفاده از شاخص دسیل. مهندسی و مدیریت حوزه‌های آبخیز، دوره ۱۰، شماره ۴، صص: ۵۵۲-۵۶۳.
- مصفاei، جمال؛ صالح پورجم، امین؛ طباطبائی، محمودرضا؛ کوثری، محمدرضا. (۱۴۰۰). توسعه پاسخ‌های مدیریت منابع در حوضه آبخیز گرگان‌رود با استفاده از نرم‌افزار مدل DPSIR. پژوهش مدیریت آبخیز، دوره ۳۴، شماره ۱، صص: ۹۳-۱۱.
- ملک محمدی، جمشید؛ سادات عظیمی، مژگان؛ بارانی، حسین؛ یگانه، حسن. (۱۴۰۰). بررسی و اولویت‌بندی عوامل مؤثر در تخریب مراتع قشلاقی با استفاده از مدل مفهومی DPSIR (مطالعه موردی شهر شاهرود - استان سمنان)، حفاظت اکوسیستم‌های گیاهی، دوره ۹، شماره ۱۸، صص: ۱۹۱-۱۷۳.
- معماریان، هادی؛ اکبری، مرتضی. (۱۴۰۰). پیش‌بینی اثرات ترکیبی تغییرات اقلیمی و کاربری اراضی بر فرسایش خاک در ایران با استفاده از داده‌های GloSEM. ایرانی اکوهیدرولوژی، دوره ۸، شماره ۲، صص: ۵۱۳-۵۳۴.
- Akbari, M., Memarian, H., Neamatollahi, E., Jafari Shalamzari, M., Alizadeh Noughani, M., & Zakeri, D. (2020). Prioritizing Policies and Strategies for Desertification Risk Management Using MCDM-DPSIR Approach in Northeastern Iran. *Environment Development and Sustainability*, 23, 2503-2523.
- Akbari, M., Sarbazi, M., Sibeveic, A., Fadaied, S. (2024). Desertification Risk Assessment and Providing Management Strategies using the DPSIR-M Model in Khorasan Razavi Province. *Scientific Journal of Geography and Environmental Hazards*, 13(2): 210-239.
- Barjas, R., Rostami, N. and Salehpour Jam, A. (2021). Prioritization analysis of effective factors in non-participation of local societies in desertification projects (Case Study: Ain Khosh region, Ilam province). *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards*, 8(3), 93-106.
- Carrascosa, I. P. (2018). Large Group Decision Making: Creating Decision Support Approaches at Scale. Springer.
- Duan, T., Feng, J., Zhou, Y., Chang, X., & Li, Y. (2021). Systematic evaluation of management measure effects on the water environment based on the DPSIR-Tapio decoupling model: A case study in the Chaohu Lake watershed, China. *Science of the total environment*, 801, 149528.
- Dzoga, M., Simatele, D. M., Munga, C., & Yonge, S. (2020). Application of the DPSIR framework to coastal and marine fisheries management in Kenya. *Ocean Science Journal*, 55, 193-201.
- EEA (1995). Europe's Environment: the Dobris Assessment. European Environmental Agency, Copenhagen, 8pp.
- Elliott, M. (2011), Marine science and management means tackling exogenic unmanaged pressures and endogenic managed pressures – a numbered guide. *Marine Pollution Bulletin*, 62, 651-655.
- Gari, S.R., Guerrero C. E. O., Uribe B., Icely J.D., Newton A. (2018). A DPSIR-analysis of water uses and related water quality issues in the Colombian Alto and Medio Dagua Community Council. *Water Science*, 32: 318-337
- Mohammadabadi, F. and Kolahi, M. (2022). Factors affecting people's participation in natural resource projects implemented in Khorasan Razavi province. *Pasture and Watershed*, (74), 4(2), 821-835.
- Mosaffaie, J., Salehpour Jam, A., Tabatabaei, M.R., & Kousari, M.R. (2021a). Trend assessment of the watershed health based on the DPSIR framework
- Mosaffaie, J., Salehpour Jam, A., Tabatabaei, M.R., & Kousari, M.R. (2021). Trend assessment of the watershed health based on the DPSIR framework. *Land Use Policy*, 100, 104911.
- Naveedh Ahmed, S., & Schneider, P. (2020). A DPSIR assessment on ecosystem services challenges in the Mekong Delta, Vietnam: Coping with the impacts of sand mining. *Sustainability*, 12(22), 1-29.
- Ningal, T., Hartemink, A.E., & Bregt, A.K. (2008). Land use change and population growth in the Morobe Province of Papua New Guinea between 1975 and 2000. *Journal of Environmental Management*, 87(1): 117-124.
- Qu, S., Hu, S., Li, W., Wang, H., Zhang, C., & Li, Q. (2020). Interaction between urban land expansion and land use policy: An analysis using the DPSIR framework. *Land Use Policy*, 99, 104856.
- Saleh pour Jam, A., Mosaffaie, J., Tabatabaei, M.R. (2021a). Assessment of comprehensiveness of soil conservation measures using the DPSIR framework. *Environmental Monitoring & Assessment*, 193(1): 1-9.
- Salehpour Jam, A., Mosaffaie, J., Tabatabaei, M.R. (2021b). Management Responses for Chehel-Chay Watershed Health Improvement Using the DPSIR Framework. *Journal of Agricultural Science & Technology*, 23(4): 797-811.
- Shao, C., Guan, Y., Chu, C., Shi, R., Ju, M., & Shi, J. (2014). Trends analysis of ecological environment security based on DPSIR model in the coastal zone: A survey study in Tianjin, China. *International Journal of Environment Research*, 8(3): 765-778.

Investigating the Impact of Geomorphic Characteristics on Landslide Patterns Using the Random Forest Algorithm (Case Study: Shahid Abbaspour Dam Watershed)

Mahshid Moavi¹, Mojgan Entezari^{2*} , Heeva Elmizadeh³

1. PhD Student, Department of Physical Geography, Faculty of Geographical Sciences and Planning, University of Isfahan, Iran.

2. **Corresponding Author**, Professor, Department of Physical Geography, Faculty of Geographical Sciences and Planning, University of Isfahan, Iran.

Email: m.entezari@geo.ui.ac.ir ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0014-0209>

3. Associate Professor, Department of Marine Geology, Faculty of Marine Natural Resources, Khorramshahr University of Marine Sciences and Technology, Iran

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article Article history: Received: 14 March 2025 Revised: 17 October 2025 Accepted: 06 October 2025 Published: 22 June 2026 Keywords: Modeling, Machine Learning, Hazard Zonation, Natural Hazard Management, Sensitivity Analysis.	Landslides, recognized as complex natural hazards, pose significant threats to infrastructure, human communities, and fragile ecosystems. This study aims to investigate the influence of geomorphic characteristics on landslide occurrence patterns in the Shahid Abbaspour Dam watershed (Deh-Sheikh) using the advanced machine learning Random Forest algorithm. The dataset comprised 15 key layers influencing landslides, sourced from various datasets including 1:50,000 topographic maps, 1:100,000 geological maps, Landsat satellite imagery, and field observations. Initial data processing was conducted in ArcGIS, SAGA-GIS, and ENVI software environments, followed by modeling using machine learning packages in RStudio. The results indicate that geological formations (23.7%), slope (19.5%), and distance from rivers (15.2%) are the primary factors controlling landslide patterns in the region. The model output reveals that approximately 30.4% of the watershed area (75.37 km²) falls within the high-hazard class, predominantly concentrated in the southern and southeastern sectors. Model performance evaluation using statistical metrics demonstrated the algorithm's robust performance, with an overall accuracy of 0.986, a Kappa coefficient of 0.972, and a root mean square error (RMSE) of 0.0101. This study represents the first comprehensive landslide hazard assessment in this watershed using machine learning techniques, providing a scientifically rigorous framework for risk management, environmental planning, and mitigation of landslide impacts in similar mountainous regions.

How to Cite: Moavi, M. , Entezari, M. and Elmizadeh, H. (2026). Investigating the Impact of Geomorphic Characteristics on Landslide Patterns Using the Random Forest Algorithm (Case Study: Shahid Abbaspour Dam Watershed). *Journal of Natural Environmental Hazards*, 15 (48), 57-72.



© The Author/Authors

Publisher: University of Sistan and Baluchestan

DOI: 10.22111/jneh.2025.51425.2107

EXTENDED ABSTRACT

INTRODUCTION

Landslides, as one of the most complex and destructive natural hazards, pose significant threats to infrastructure, human communities, and fragile ecosystems, particularly in mountainous regions. These phenomena, characterized by the sudden or gradual displacement of soil, rock, and geological materials on slopes, can cause substantial economic and human losses (Li et al., 2024; Guzzetti et al., 2016). The increasing frequency and intensity of landslides, driven by human activities such as road construction, deforestation, and land-use changes, coupled with climate change, have made them a critical challenge for natural hazard risk management (Rohan et al., 2023). The Shahid Abbaspour Dam watershed, located in the Folded Zagros zone, is highly susceptible to landslides due to its diverse geological formations (e.g., Gachsaran and Quaternary deposits), rugged topography, and high tectonic activity (Mumipour & Moavi, 2022). These conditions underscore the need for a comprehensive study of geomorphic factors influencing landslides and the development of accurate risk zonation. Recent advancements in machine learning, particularly the Random Forest algorithm, have revolutionized the analysis of complex, multi-source geospatial data (Liu et al., 2023). Random Forest, with its ability to model non-linear relationships and mitigate overfitting, has been widely applied in landslide susceptibility mapping (Pourghasemi et al., 2020). However, few studies have utilized this approach in complex watersheds like the Shahid Abbaspour Dam, highlighting a research gap that necessitates a detailed investigation using multi-source data and advanced methods. This study aims to identify and prioritize geomorphic factors influencing landslides, produce a high-resolution hazard zonation map, and provide a scientific framework for risk management in the study area.

DATA AND METHODOLOGY

This study employed the Random Forest algorithm to investigate the influence of 15 geomorphic and environmental factors on landslide patterns in the Shahid Abbaspour Dam watershed. The selected factors included elevation, slope, aspect, distance from faults, distance from roads, distance from rivers, geological formations, land use, normalized difference vegetation index (NDVI), soil texture, seismicity, slope curvature, topographic wetness index (TWI), stream power index (SPI), and precipitation. Data were sourced from multiple platforms, including 1:50,000 topographic and 1:100,000 geological maps (Iran Mapping and Geological Organizations), a 30-meter resolution digital elevation model (DEM) from the ASTER sensor, Landsat LC09_L2SP satellite imagery (USGS, dated 4/2/2025), and field data (145 landslide points). Data processing was conducted using ArcGIS 10.8, SAGA-GIS 9.0.1, and ENVI 5.6. Slope, aspect, SPI, TWI, and curvature maps were derived from the DEM. Distance maps for faults, roads, and rivers were generated using the Euclidean distance method, and precipitation maps were created via inverse distance weighting (IDW) interpolation. NDVI was calculated from Landsat imagery. Modeling was performed in RStudio using the Random Forest algorithm, following these steps: Data Preparation: All data layers were converted to a 30-meter resolution raster format and split into training (70%) and testing (30%) datasets.

Model Optimization: The number of decision trees ($K=500$) and random predictors per node ($m=4$) were optimized using 10-fold cross-validation.

Variable Importance Analysis: The Mean Decrease Accuracy index was used to assess the contribution of each factor to landslide occurrence.

Hazard Zonation: The model output was classified into five hazard classes (very low, low, moderate, high, very high).

Model performance was evaluated using accuracy, Kappa coefficient, root mean square error (RMSE), mean absolute error (MAE), coefficient of determination (R^2), and area under the ROC curve (AUC). Sensitivity analysis and principal component analysis (PCA) were conducted to check for multicollinearity ($VIF < 5$), and bootstrapping (1000 iterations) was used to ensure model stability (Rahaman et al., 2024).

RESULTS AND DISCUSSION

The variable importance analysis revealed that geological formations (23.7%), slope (19.5%), and distance from rivers (15.2%) were the most influential factors controlling landslides. The Gachsaran and Quaternary formations, characterized by evaporitic structures and high erodibility, significantly contribute to slope instability. Steep slopes (>35 degrees) and proximity to rivers further exacerbate instability, while precipitation, SPI, and NDVI had minimal impact, likely due to uniform precipitation distribution and dense vegetation in the northern parts of the watershed (He et al., 2024).

The hazard zonation map indicated that 30.4% of the watershed area (75.37 km²) falls within the high-hazard class, primarily concentrated in the southern and southeastern regions. These areas correlate with erodible formations, steep slopes, and high drainage density. The very high-hazard class (18.4%) was observed in zones with active tectonics and fault density. Conversely, the northern and northwestern regions, with gentler slopes and dense vegetation, were classified as low or very low hazard. Model validation demonstrated the superior performance of Random Forest, with an overall accuracy of 0.9863, a Kappa coefficient of 0.9717, RMSE of 0.0101, MAE of 0.0058, R² of 0.9908, and AUC of 0.97. The high-hazard class exhibited the highest sensitivity (0.96) and negative predictive value (0.98), while the very low-hazard class had the lowest sensitivity (0.24). Bootstrapping confirmed the robustness of the results (Agboola et al., 2024). The findings highlight the dominant role of geological formations and slope in driving landslide occurrence. The Gachsaran and Quaternary formations, due to their loose structure and high sensitivity to moisture, significantly contribute to slope instability, consistent with Pourghasemi et al. (2020). Steep slopes and river erosion further amplify instability, while precipitation had a lesser role due to its uniform distribution (Gu et al., 2023). The southern and southeastern parts of the watershed, characterized by high fault density and human activities like road construction, are particularly vulnerable, aligning with Zuo & Carranza (2017).

CONCLUSION

This study identified geological formations, slope, and distance from rivers as the primary drivers of landslides in the Shahid Abbaspour Dam watershed. The hazard zonation revealed that 30.4% of the area is at high risk, concentrated in the southern and southeastern regions, necessitating urgent risk management. The Random Forest algorithm demonstrated exceptional performance, providing a reliable framework for landslide prediction. Recommendations include slope stabilization, land-use regulation, and real-time monitoring systems. This study fills a critical research gap and serves as a model for similar mountainous regions. Compared to global studies, the Random Forest model in this study (AUC=0.97) outperformed traditional statistical models, as reported by Li et al. (2024) (AUC=0.95). The minimal impact of precipitation contrasts with Mondini et al. (2023), likely due to regional climatic conditions. Practical recommendations include afforestation in high-slope areas, developing drainage systems, restricting human activities in high-risk zones, and implementing early warning systems using remote sensing data (Rodrigues Neto & Bhandary, 2024). Limitations include the lack of long-term time-series data and challenges in modeling seismically triggered landslides. Future research could leverage InSAR data and deep learning models for enhanced predictions (He et al., 2024).

ETHICAL CONSIDERATIONS

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

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

ACKNOWLEDGMENTS

This study was derived from an MSc thesis completed at Khorramshahr University of Marine Science and Technology. The authors acknowledge the university's research facilities and technical support.

REFERENCES

References [in Persian]

Moharami, M., & Jelokhani Niaraki, M. R. (2023). Mapping landslide-prone areas using statistical and machine learning models: A case study of Austria. *Journal of Mapping Sciences and Techniques*, 13(2), 79–94. [In Persian]

Mumipour, M., & Moavi, M. (2022). Analysis of tectonic and erosion conditions in the Shahid Abbaspour Dam watershed using geomorphometric techniques. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 11(1), 1–16. <https://doi.org/10.22067/geoeh.2021.70140.1053>. [In Persian]

References [in English]

Achour, Y., & Pourghasemi, H. R. (2020). How do machine learning techniques help in increasing the accuracy of landslide susceptibility maps? *Geoscience Frontiers*, 11(3), 871-883. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2019.10.001>

Agboola, G., Hashemi Beni, L., Elbayoumi, T., & Thompson, G. (2024). Optimizing landslide susceptibility mapping using machine learning and geospatial techniques. *Ecological Informatics*, 81, 102583. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2024.102583>

Li, M., Wang, H., Chen, J., & Zheng, K. (2024). Assessing landslide susceptibility based on the random forest model and multi-source heterogeneous data. *Ecological Indicators*, 158, 111600. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.111600>

Mondini, A. C., Mondini, F., Guzzetti, F., & Melillo, M. (2023). Deep learning forecast of rainfall-induced shallow landslides. *Nature Communications*, 14(1), 2446. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-38135-0>

Rodrigues Neto, J. M., & Bhandary, N. P. (2024). Landslide susceptibility assessment by machine learning and frequency ratio methods using XRAIN radar-acquired rainfall data. *Geosciences*, 14(6), 171. <https://doi.org/10.3390/geosciences14060171>.

مجله علمی پژوهشی مخاطرات محیط طبیعی، دوره ۱۵، شماره ۴۸، شماره پیاپی ۰۲، تیر ۱۴۰۵

بررسی اثر ویژگی‌های ژئومورفیکی بر الگوی زمین لغزش با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی (محدوده مورد مطالعه: حوضه آبریز سد شهید عباسپور)

مهشید معاوی^۱، مژگان انتظاری^{۲*} , هیوا علمیزاده^۳

۱. دانشجوی دکتری، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه‌ریزی، دانشگاه اصفهان

۲. استاد گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه‌ریزی، دانشگاه اصفهان (نویسنده مسئول)

ایمیل: m.entezari@geo.ui.ac.ir ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0014-0209>

۳. دانشیار گروه زمین‌شناسی دریایی، دانشکده منابع طبیعی دریا، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۲۴ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۶/۲۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۱۴ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۳/۱۶ واژه‌های کلیدی: مدل‌سازی، یادگیری ماشین، پهنه‌بندی خطر، مدیریت مخاطرات طبیعی، تحلیل حساسیت.	زمین‌لغزش‌ها به‌عنوان یکی از مخاطرات طبیعی پیچیده، تهدیدی جدی برای زیرساخت‌ها، جوامع انسانی و اکوسیستم‌های شکننده ایجاد می‌کنند. این مطالعه با هدف بررسی تأثیر ویژگی‌های ژئومورفیکی بر الگوی وقوع زمین‌لغزش در حوضه آبریز سد شهید عباسپور (ده‌شیخ) با استفاده از الگوریتم پیشرفته یادگیری ماشین جنگل تصادفی انجام شده است. داده‌های مورد استفاده شامل ۱۵ لایه اطلاعاتی مؤثر در زمین‌لغزش بوده که از منابع مختلفی همچون نقشه‌های توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰، زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰، تصاویر ماهواره‌ای لندست و داده‌های میدانی استخراج شده‌اند. پس از پردازش اولیه در محیط‌های نرم‌افزاری ArcGIS، SAGA-GIS، ENVI و مدل‌سازی با استفاده از بسته‌های یادگیری ماشین در RStudio انجام پذیرفت. نتایج نشان می‌دهد که سازندهای زمین‌شناسی (با تأثیر ۲۳٪/۷)، شیب (۱۹٪/۵) و فاصله از رودخانه (۱۵٪/۲) به‌عنوان مهم‌ترین عوامل کنترل‌کننده الگوی زمین‌لغزش در منطقه عمل می‌کنند. بر اساس خروجی مدل، حدود ۳۰٪/۴ از مساحت حوضه (۷۵/۳۷ کیلومتر مربع) در کلاس خطر زیاد قرار دارد که عمدتاً در بخش‌های جنوبی و جنوب شرقی حوضه متمرکز شده‌اند. ارزیابی دقت مدل با معیارهای آماری نشان‌دهنده عملکرد مناسب الگوریتم با دقت کلی ۰/۹۸۶، ضریب کاپای ۰/۹۷۲ و RMSE برابر ۰/۱۰۱ می‌باشد. این مطالعه نه تنها اولین ارزیابی جامع خطر زمین‌لغزش در این حوضه با روش‌های یادگیری ماشین است، بلکه چارچوبی علمی برای مدیریت ریسک، برنامه‌ریزی محیطی و کاهش اثرات زمین‌لغزش در مناطق کوهستانی مشابه ارائه می‌دهد.
استناد: معاوی، مهشید، انتظاری، مژگان و علمیزاده، هیوا. (۱۴۰۵). بررسی اثر ویژگی‌های ژئومورفیکی بر الگوی زمین لغزش با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی (محدوده مورد مطالعه: حوضه آبریز سد شهید عباسپور). <i>مخاطرات محیط طبیعی</i>، ۱۵ (۴۸)، ۵۷-۷۲.	
ناشر: دانشگاه سیستان و بلوچستان	
DOI: 10.22111/jneh.2025.51425.2107	

مقدمه

زمین لغزش‌ها به عنوان یکی از مخرب‌ترین و پیچیده‌ترین مخاطرات طبیعی در مناطق کوهستانی و نیمه‌کوهستانی، از دیرباز مورد توجه محققان و مدیران منابع طبیعی بوده‌اند (لی^۱ و همکاران، ۲۰۲۴؛ احمد^۲ و همکاران، ۲۰۲۲). این پدیده‌ها که ناشی از جابجایی ناگهانی یا تدریجی حجم‌های بزرگی از خاک، سنگ و مواد زمین‌شناسی در دامنه‌ها هستند، می‌توانند خسارات جبران‌ناپذیری به زیرساخت‌ها، محیط زیست و زندگی انسان‌ها وارد کنند (ساداتی و همکاران، ۱۴۰۴). با رشد جمعیت و گسترش فعالیت‌های انسانی در مناطق مستعد، شدت و فراوانی زمین‌لغزش‌ها افزایش یافته و به یکی از چالش‌های جدی مدیریت ریسک بلایای طبیعی تبدیل شده است. در این راستا، شناخت عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش و پیش‌بینی دقیق مناطق آسیب‌پذیر، به منظور کاهش خسارات و برنامه‌ریزی‌های پیشگیرانه، از اهمیت حیاتی برخوردار است (پناهی و همکاران، ۲۰۲۰؛ پانچال و شریواستوا^۳، ۲۰۲۲).

از منظر علمی، زمین‌لغزش‌ها پدیده‌هایی چندعاملی و پیچیده هستند که تحت تأثیر تعامل عوامل ژئومورفولوژیکی، زمین‌شناسی، هیدرولوژیکی و انسانی قرار دارند. عواملی مانند شیب دامنه، جنس و ساختار سازندهای زمین‌شناسی، پوشش گیاهی، بارش، فعالیت‌های زلزله‌ای، تغییرات کاربری اراضی و ساخت و سازهای انسانی، هر یک به نحوی در افزایش یا کاهش احتمال وقوع زمین‌لغزش نقش دارند (ذاکری‌نژاد و همکاران، ۱۴۰۲؛ داوری‌صارم و همکاران، ۱۴۰۴). این پیچیدگی‌ها باعث شده است که مدل‌سازی و پیش‌بینی زمین‌لغزش‌ها، به ویژه در مقیاس‌های بزرگ و در مناطق با شرایط زمین‌شناسی متنوع، چالشی علمی و فنی باشد. به‌علاوه، ماهیت غیرخطی و غیرقطعی این پدیده‌ها، استفاده از روش‌های آماری و مدل‌های سنتی را محدود کرده و نیاز به رویکردهای نوین و پیشرفته‌تر را افزایش داده است (آچور و پورقاسمی^۴، ۲۰۲۰؛ فن^۵ و همکاران، ۲۰۱۹).

در سال‌های اخیر، پیشرفت‌های قابل توجهی در حوزه یادگیری ماشین و هوش مصنوعی رخ داده است که امکان تحلیل داده‌های حجیم و پیچیده ژئومورفولوژیکی و زمین‌شناسی را فراهم آورده است. الگوریتم‌هایی مانند جنگل تصادفی^۶، ماشین بردار پشتیبان^۷، شبکه‌های عصبی عمیق، مدل‌های تقویت گرادیان و سایر روش‌های یادگیری گروهی، به دلیل توانایی بالا در مدل‌سازی روابط پیچیده و غیرخطی، به طور گسترده در مطالعات حساسیت و پهنه‌بندی زمین‌لغزش به کار گرفته شده‌اند (روهان^۸ و همکاران، ۲۰۲۳؛ ویت^۹ و همکاران، ۲۰۲۳). این الگوریتم‌ها با بهره‌گیری از داده‌های چندمنبعی شامل تصاویر ماهواره‌ای، نقشه‌های توپوگرافی و زمین‌شناسی، داده‌های هیدرولوژیکی و داده‌های میدانی، امکان پیش‌بینی دقیق‌تر و قابل اعتمادتر مناطق مستعد زمین‌لغزش را فراهم می‌کنند. علاوه بر این، این روش‌ها قابلیت شناسایی عوامل کلیدی و اولویت‌بندی آن‌ها را دارند که برای مدیریت ریسک و تصمیم‌گیری‌های محیطی بسیار حیاتی است (اگبوری و اگبوری^{۱۰}، ۲۰۲۳؛ دائو^{۱۱} و همکاران، ۲۰۲۰).

1 Li

2 Ahmad

3 Panchal & Shrivastava

4 Achour & Pourghasemi

5 Fan

6 Random Forest

7 SVM

8 Rohan

9 Viet

10 Egbueri & Egbueri

11 Dao

با وجود این پیشرفت‌ها، در بسیاری از مناطق با ویژگی‌های زمین‌شناسی و ژئومورفولوژیکی خاص، به ویژه در حوضه‌های آبریز پیچیده و متنوع مانند حوضه آبریز سد شهید عباسپور، مطالعات جامع و کاربردی با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین محدود است. این منطقه به دلیل قرارگیری در زون زاگرس چین‌خورده، برخورداری از سازندهای فرسایش‌پذیر و تنوع توپوگرافی، مستعد وقوع زمین‌لغزش‌های متعدد و متنوع است. همچنین، فعالیت‌های انسانی مانند احداث جاده‌ها، توسعه سکونتگاه‌های روستایی و تغییرات کاربری اراضی، پیچیدگی‌های بیشتری به الگوی زمین‌لغزش افزوده است. کمبود داده‌های دقیق و یکپارچه، پیچیدگی‌های فرآیندهای زمین‌لغزش و محدودیت در استفاده از روش‌های پیشرفته، از جمله چالش‌های موجود در این منطقه محسوب می‌شوند.

از سوی دیگر، بسیاری از مطالعات پیشین عمدتاً به بررسی عوامل منفرد یا استفاده از روش‌های آماری ساده پرداخته‌اند که نمی‌توانند به طور کامل پیچیدگی‌های تعامل عوامل مختلف را مدل‌سازی کنند. همچنین، اغلب مدل‌های یادگیری ماشین به صورت محدود و بدون اعتبارسنجی جامع در این مناطق به کار گرفته شده‌اند، که موجب کاهش قابلیت تعمیم و اعتماد به نتایج شده است. بنابراین، نیاز به یک مطالعه جامع، چندمنظوره و مبتنی بر داده‌های دقیق و به‌روز با استفاده از الگوریتم‌های پیشرفته یادگیری ماشین، به ویژه الگوریتم جنگل تصادفی که مزایای قابل توجهی در دقت و جلوگیری از بیش‌برازش دارد، احساس می‌شود.

در حوزه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش، پژوهشگران از روش‌های متنوعی بهره برده‌اند که در این میان، الگوریتم جنگل تصادفی به عنوان یکی از کارآمدترین روش‌های یادگیری ماشین مورد توجه ویژه قرار گرفته است. این الگوریتم با ترکیب چندین درخت تصمیم و استفاده از تکنیک‌های نمونه‌برداری بوتاسترپ، توانایی بالایی در مدل‌سازی روابط غیرخطی بین عوامل مؤثر بر زمین‌لغزش دارد (رودریگوئز^۱ و همکاران، ۲۰۲۴؛ شوگار^۲ و همکاران، ۲۰۲۱).

مطالعات متعددی کارایی این روش را در مناطق مختلف مورد بررسی قرار داده‌اند. به عنوان مثال، حیدری و همکاران (۱۳۹۹) در حوضه سد رئیس‌علی دلواری با استفاده از این الگوریتم به دقت قابل توجه ۹۸٪ دست یافتند. همچنین کرم و همکاران (۱۴۰۰) در حوضه تنگراه استان گلستان نشان دادند که عوامل شیب، ارتفاع و فاصله از جاده بیشترین تأثیر را در پیش‌بینی ناپایداری دامنه‌ها دارند که با سطح زیر منحنی ROC معادل ۰/۹۳ تأیید شد.

تحقیقات تطبیقی نیز انجام شده است؛ سدید و مالکی (۱۴۰۱) در مطالعه‌ای بر روی جاده مه‌باد-سردشت دریافتند که جنگل تصادفی با پوشش ۵۳٪ مناطق پرخطر، عملکرد متعادل‌تری نسبت به ماشین بردار پشتیبان (۷۱٪) و رگرسیون لجستیک (۷۷٪) دارد. این یافته‌ها با نتایج محرمی و همکاران (۱۴۰۲) در اتریش که سطح زیر منحنی ۰/۸۹۳ را برای جنگل تصادفی گزارش کردند، همخوانی دارد.

در سطح بین‌المللی، لیو^۳ و همکاران (۲۰۱۸) نشان دادند مدل‌های خطی تعمیم یافته مبتنی بر یادگیری ماشین نسبت به روش‌های آماری سنتی از دقت بالاتری برخوردارند. گئو^۴ و همکاران (۲۰۲۳) نیز به این نتیجه رسیدند که شاخص NDVI، ارتفاع و جهت شیب بیشترین تأثیر را در مدل‌سازی داشته‌اند. مطالعات جدیدتر مانند پژوهش آهیونی^۵ و همکاران (۲۰۲۳) در اندونزی و لی^۶ و همکاران (۲۰۲۴) در چین، بر اهمیت ترکیب داده‌های میدانی با

1 Rodrigues

2 Shugar

3 Lu

4 Gu

5 Ahyuni

6 Li

روش‌های یادگیری ماشین تأکید دارند. به ویژه، زینگ^۱ و همکاران (۲۰۲۴) نشان دادند که جنگل تصادفی با کاهش عدم قطعیت همراه است. آخرین یافته‌های آگبولا^۲ و همکاران (۲۰۲۴) نیز بر بهینه‌سازی نمونه‌گیری و ترکیب الگوریتم‌ها برای بهبود دقت تأکید می‌کنند.

با وجود پیشرفت‌های چشمگیر، شکاف پژوهشی در زمینه کاربرد این روش‌ها در حوضه‌های آبریز پیچیده مانند سد شهید عباسپور که از ویژگی‌های زمین‌شناسی و ژئومورفولوژیکی منحصر به فردی برخوردار است، همچنان محسوس می‌باشد. این مطالعه با ترکیب روش‌های پیشرفته یادگیری ماشین و تحلیل‌های جامع ژئومورفیک، درصدد پر کردن این خلأ پژوهشی است.

هدف اصلی این پژوهش، بررسی اثر ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی بر الگوی وقوع زمین‌لغزش در حوضه آبریز سد شهید عباسپور با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی است. این مطالعه با بهره‌گیری از داده‌های متنوع شامل نقشه‌های توپوگرافی، زمین‌شناسی، تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های میدانی، عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش را شناسایی و اولویت‌بندی می‌کند و سپس با مدل‌سازی دقیق، نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش را ارائه می‌دهد. این رویکرد، علاوه بر افزایش دقت پیش‌بینی، امکان مدیریت بهتر ریسک و برنامه‌ریزی کاربری زمین را فراهم می‌آورد (قیاسی و همکاران، ۱۴۰۱). همچنین این تحقیق به دنبال پر کردن خلأ موجود در کاربرد روش‌های یادگیری ماشین در مناطق با شرایط زمین‌شناسی و ژئومورفولوژیکی پیچیده است و با ارائه تحلیل‌های دقیق و اعتبارسنجی جامع مدل، می‌تواند به توسعه دانش علمی و فنی در حوزه پیش‌بینی زمین‌لغزش کمک شایانی نماید. با توجه به اهمیت روزافزون حفاظت از محیط زیست و کاهش خسارات ناشی از بلایای طبیعی، نتایج این پژوهش می‌تواند در سیاست‌گذاری‌های کلان ملی و منطقه‌ای در زمینه مدیریت مخاطرات طبیعی نقش مؤثری ایفا کند. در نهایت، این مطالعه با تأکید بر استفاده از فناوری‌های نوین یادگیری ماشین و تحلیل داده‌های چندمنبعی، گامی مهم در جهت بهبود دقت و قابلیت اطمینان مدل‌های پیش‌بینی زمین‌لغزش برداشته و زمینه‌ساز تحقیقات آینده در این حوزه خواهد بود. این رویکرد می‌تواند الگویی برای سایر مناطق مشابه در ایران و جهان باشد که با چالش‌های مشابه زمین‌لغزش مواجه هستند و نیازمند راهکارهای علمی و عملی برای کاهش ریسک و خسارات ناشی از این پدیده طبیعی می‌باشند.

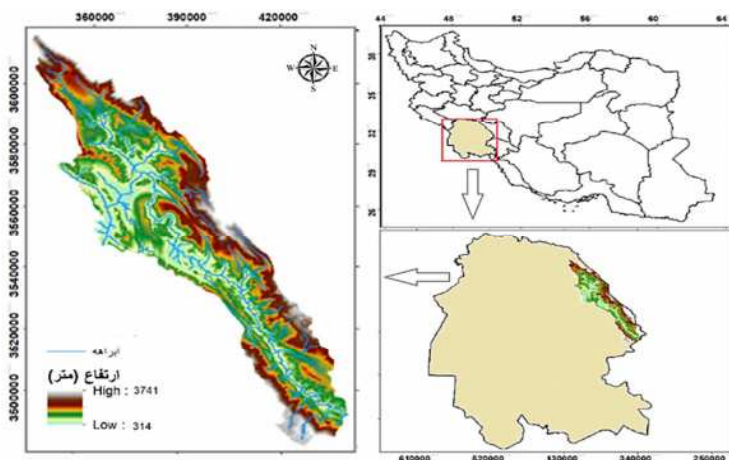
داده‌ها و روش‌ها

محدوده مورد مطالعه

حوضه آبریز سد شهید عباسپور که جزو زیرحوضه‌های کارون بزرگ می‌باشد، از چهار شاخه اصلی (خرسان، آب ونگ، آب کیار، و بازفت) تشکیل شده است که از ارتفاعات استان‌های اصفهان و چهارمحال و بختیاری سرچشمه گرفته و پس از طی ۱۴۰ کیلومتر به محل سد می‌رسد. این منطقه به دلیل تنوع سنگ‌شناسی (شامل سازندهای گچساران، آغاچاری و رسوبات کواترنری)، توپوگرافی ناهموار، و فعالیت‌های تکتونیکی بالا، مستعد زمین‌لغزش است (مومی‌پور و معاوی، ۱۴۰۱). ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی مانند شیب‌های تند و فرسایش رودخانه‌ای، این حوضه را به یک مورد مطالعه ایده‌آل برای بررسی الگوهای زمین‌لغزش تبدیل کرده است (شکل ۱).

1 Xing

2 Agboola



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی محدوده مطالعاتی. منبع: (نگارندگان)

روش تحقیق

این مطالعه با هدف بررسی اثر ویژگی‌های ژئومورفیکی بر الگوی زمین‌لغزش در حوضه آبریز سد شهید عباسپور با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی طراحی شده است. روش کار شامل مراحل زیر است: (۱) جمع‌آوری و آماده‌سازی داده‌های چندمنبعی، (۲) پردازش و تحلیل داده‌ها در محیط‌های نرم‌افزاری تخصصی، (۳) مدل‌سازی با الگوریتم جنگل تصادفی و (۴) اعتبارسنجی و ارزیابی عملکرد مدل. این فرآیند به‌گونه‌ای طراحی شده است که تعاملات پیچیده بین عوامل ژئومورفیکی و محیطی را با دقت بالا مدل‌سازی کند و چارچوبی قابل‌اعتماد برای پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش ارائه دهد.

برای مدل‌سازی زمین‌لغزش، ۱۵ لایه اطلاعاتی کلیدی شامل ارتفاع، شیب، جهت شیب، فاصله از گسل، فاصله از جاده، فاصله از آبراهه، سازندهای زمین‌شناسی، کاربری اراضی، شاخص نرمال‌شده تفاوت پوشش گیاهی (NDVI)، بافت خاک، زلزله، انحنای دامنه، شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI)، شاخص توان فرسایشی جریان (SPI)، و بارش انتخاب شدند. این متغیرها بر اساس مطالعات پیشین به‌عنوان عوامل اصلی کنترل‌کننده زمین‌لغزش شناسایی شده‌اند.

منابع داده: لایه‌های اطلاعاتی مورد نیاز از نقشه‌های پایه شامل نقشه‌های توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰ و زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ از سازمان نقشه‌برداری و سازمان زمین‌شناسی ایران استخراج شدند. داده‌های سنجش از دور مانند مدل رقومی ارتفاع (DEM) با تفکیک مکانی ۳۰ متر از سنجنده ASTER و تصاویر ماهواره‌ای لندست LC09_L2SP (تاریخ ۲۰۲۴/۲/۴، ردیف ۱۶۵، مسیر ۰۳۸) از سایت USGS تهیه شدند. داده‌های محیطی شامل نقشه‌های کاربری اراضی و بافت خاک از سازمان جهاد کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، و داده‌های بارش سالانه از سازمان هواشناسی خوزستان اخذ شدند. همچنین بازدیدهای میدانی برای شناسایی و ثبت نقاط زمین‌لغزش (۱۲۹ نقطه) و اعتبارسنجی داده‌ها انجام شد.

پردازش داده‌ها: نقشه‌های شیب، جهت شیب، SPI، TWI و انحنای دامنه با استفاده از DEM در نرم‌افزارهای ArcGIS 10.8 و SAGA-GIS 9.0.1 استخراج شدند. نقشه سازندهای زمین‌شناسی و گسل‌ها از نقشه‌های ۱:۱۰۰۰۰۰ رقومی‌سازی و به فرمت رستری تبدیل شدند. نقشه فاصله از رودخانه با استفاده از ابزار هیدرولوژی

ArcGIS و روش فاصله اقلیدسی تولید شد. نقشه بارش با روش درون‌یابی معکوس وزن فاصله (IDW) در ArcGIS تهیه شد تا توزیع مکانی بارش با دقت بالا نمایش داده شود. شاخص NDVI با استفاده از تصاویر لندست در نرم‌افزار ENVI 5.6 محاسبه شد تا پوشش گیاهی منطقه تحلیل شود.

الگوریتم جنگل تصادفی: الگوریتم جنگل تصادفی یک روش یادگیری گروهی است که از ترکیب چندین درخت تصمیم برای پیش‌بینی استفاده می‌کند (چنگ^۱ و همکاران، ۲۰۲۱؛ دارمینتو و چو^۲، ۲۰۱۹). این روش با انتخاب تصادفی زیرمجموعه‌های داده‌ها و متغیرها، از بیش‌برازش جلوگیری کرده و دقت بالایی در مدل‌سازی داده‌های پیچیده ارائه می‌دهد (لیو^۳ و همکاران، ۲۰۲۳). مراحل اجرای الگوریتم در این مطالعه به شرح زیر است:

آماده‌سازی مجموعه داده: داده‌های ۱۵ لایه اطلاعاتی به فرمت رستری با رزولوشن یکسان (۳۰ متر) تبدیل و در محیط RStudio بارگذاری شدند. مجموعه داده به دو بخش آموزش (۷۰٪) و آزمون (۳۰٪) تقسیم شد.

بهینه‌سازی مدل: تعداد درختان تصمیم (K=500) و تعداد متغیرهای پیش‌بینی تصادفی در هر گره (m=4) با استفاده از روش اعتبارسنجی متقابل ۱۰-تایی (fold cross-validation-۱۰) بهینه‌سازی شدند. این تنظیمات برای کاهش واریانس و بهبود تعمیم‌پذیری مدل انتخاب شدند (ژائو^۴ و همکاران، ۲۰۲۱).

تحلیل اهمیت متغیرها: اهمیت نسبی هر متغیر با استفاده از شاخص کاهش میانگین دقت (Mean Decrease Accuracy) محاسبه شد تا نقش هر عامل در وقوع زمین‌لغزش مشخص شود.

پهنه‌بندی خطر: خروجی مدل به صورت نقشه پهنه‌بندی خطر در پنج کلاس (خیلی کم، کم، متوسط، زیاد، خیلی زیاد) تولید شد.

اعتبار سنجی الگوریتم: برای ارزیابی عملکرد مدل، از معیارهای آماری زیر استفاده شد:

دقت کلی^۵: درصد نمونه‌های درست طبقه‌بندی شده.

ضریب کاپا^۶: معیاری برای توافق بین پیش‌بینی‌ها و مقادیر واقعی با حذف اثر توافق تصادفی.

ریشه میانگین مربعات خطا^۷: معیار خطای پیش‌بینی.

میانگین خطای مطلق^۸: میانگین اختلاف مطلق بین مقادیر پیش‌بینی شده و واقعی.

ضریب تعیین: میزان توضیح واریانس داده‌ها توسط مدل.

ماتریس معیارهای اعتبار سنجی الگوریتم جنگل تصادفی برای محاسبه معیارهای حساسیت، ویژگی، ارزش پیش‌بینی مثبت و منفی و نرخ تشخیص استفاده شد (جدول ۱). همچنین، منحنی مشخصه عملکرد گیرنده (ROC) و سطح زیر منحنی (AUC) برای ارزیابی دقت کلی مدل محاسبه شدند.

برای افزایش دقت مدل و بررسی تعاملات بین متغیرها، تحلیل حساسیت انجام شد تا تأثیر حذف هر متغیر بر عملکرد مدل ارزیابی شود. همچنین، از روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) برای شناسایی هم‌خطی احتمالی بین

1 Cheng

2 Darminto & Chu

3 Lu

4 Zhao

5 Accuracy

6 Kappa

7 RMSE

8 MAE

متغیرها استفاده شد، که نشان داد هیچ هم‌خطی قابل توجهی وجود ندارد ($VIF < 5$). این تحلیل‌ها به تأیید استقلال متغیرها و اطمینان از قابلیت تعمیم مدل کمک کردند تا اطمینان حاصل شود که نتایج مدل تحت شرایط مختلف پایدار است (رحمان و همکاران، ۲۰۲۴).

جدول ۱: معیارهای اعتبار سنجی الگوریتم جنگل تصادفی (موندینی^۱ و همکاران، ۲۰۲۳؛ نوزلیبه^۲ و همکاران، ۲۰۲۳).

معیار	رابطه
ضریب کاپا	$Kappa = (P_0 - P_x) / (1 - P_x) \times 100$ (۱)
دقت	$ACC = (TP + TN) / (TP + FN + FP + TN)$ (۲)
ریشه میانگین مربعات خطا	$RMSE = \sqrt{(1/n \sum [x_i - \hat{x}_i]^2)}$ (۳)
میانگین خطای مطلق	$MAE = 1/n \sum$ (۴)
ضریب تعیین	$R^2 = 1 - SSE/SST$ (۵)

یافته‌های تحقیق

این مطالعه با استفاده از بازدیدهای میدانی و الگوریتم جنگل تصادفی، تأثیر ویژگی‌های ژئومورفیکی بر الگوی زمین‌لغزش در حوضه آبریز سد شهید عباسپور را بررسی کرد. نتایج نشان‌دهنده نقش کلیدی عوامل زمین‌شناسی و توپوگرافی در وقوع زمین‌لغزش است. یافته‌ها در چهار بخش اصلی شامل بازدیدهای میدانی، اهمیت متغیرها، پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش و اعتبارسنجی مدل ارائه می‌شوند. (شکل ۲).



شکل ۲: لغزش در محدوده مورد مطالعه. منبع: (نگارنگاران)

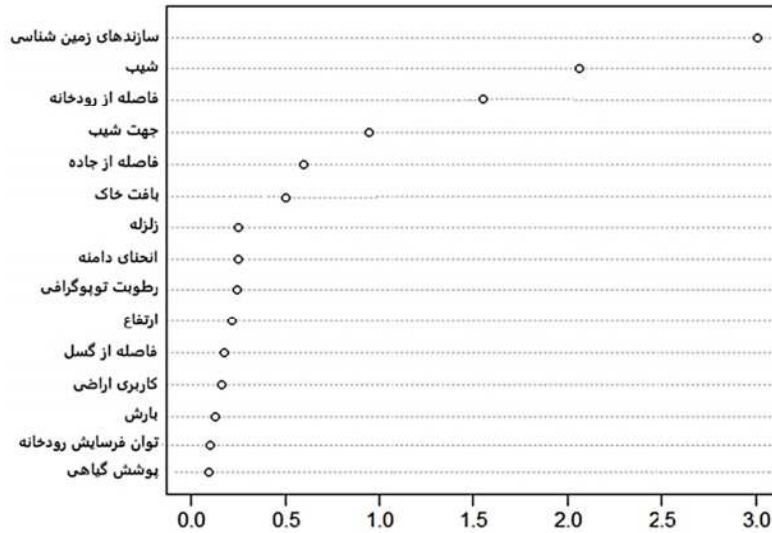
اهمیت متغیرها: تحلیل اهمیت متغیرها با استفاده از شاخص کاهش میانگین دقت^۳ نشان داد که سازندهای زمین‌شناسی با تأثیر ۲۳/۷٪، شیب با ۱۹/۵٪، و فاصله از رودخانه با ۱۵/۱۲٪ به ترتیب مهم‌ترین عوامل کنترل‌کننده زمین‌لغزش در حوضه هستند. این یافته‌ها با مطالعات قبلی مانند گئو و همکاران (۲۰۲۳) و لی و همکاران (۲۰۲۴) همخوانی دارد که بر نقش غالب ویژگی‌های زمین‌شناسی و توپوگرافی در مناطق کوهستانی تأکید کرده‌اند. سازندهای فرسایش‌پذیر مانند گچساران و کواترنری، به دلیل ساختار تبخیری و دانه‌بندی ضعیف، حساسیت بالایی به زمین‌لغزش دارند. شیب‌های تند (> ۳۵ درجه) و نزدیکی به آبراهه‌ها نیز به عنوان عوامل تشدیدکننده شناسایی شدند. در مقابل، متغیرهایی مانند بارش، شاخص توان فرسایشی جریان (SPI)، و شاخص نرمال‌شده تفاوت پوشش گیاهی (NDVI)

1 Mondini

2 Nwazelibe

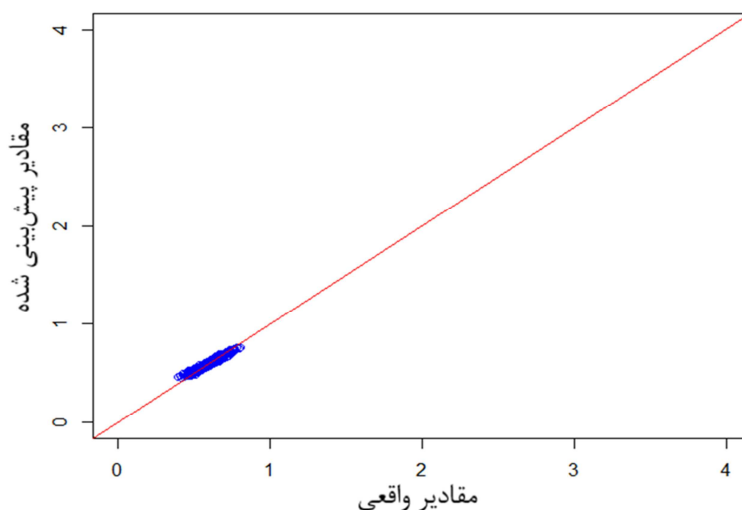
3 Mean Decrease Accuracy

کمترین تأثیر را داشتند (شکل ۳). این موضوع احتمالاً به دلیل توزیع یکنواخت بارش در منطقه و پوشش گیاهی متراکم در بخش‌های شمالی است که پایداری دامنه‌ها را افزایش می‌دهد (هی و همکاران، ۲۰۲۴).



شکل ۳: اولویت پارامترهای مؤثر در زمین لغزش. منبع: (نگارندگان)

همان‌گونه که در (شکل ۴) مشاهده می‌شود، نقاط موجود در نمودار بیانگر مقایسه بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده مدل برای نمونه‌های مختلف می‌باشد. هر نقطه در این نمودار بیانگر دو مقدار است: مقدار مشاهده‌شده واقعی و مقدار پیش‌بینی‌شده توسط مدل جنگل تصادفی. خط مورب قرمز رنگ در نمودار به عنوان خط مبنا ($y=x$) عمل می‌کند که نشان‌دهنده وضعیت ایده‌آل (پیش‌بینی کاملاً دقیق) است. نزدیکی قابل توجه نقاط به این خط مبنا، نشان‌دهنده دقت بالای مدل در پیش‌بینی می‌باشد. تراکم نقاط در اطراف خط مبنا و عدم پراکندگی قابل ملاحظه آنها، حاکی از اختلاف ناچیز بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی‌شده است. محدوده مقادیر در هر دو محور (مقادیر واقعی و پیش‌بینی‌شده) بین ۰/۵ تا ۱ قرار دارد که نشان می‌دهد مدل از ثبات عملکرد خوبی برخوردار است و پیش‌بینی‌ها از دقت بالایی برخوردارند. همچنین خطای سیستماتیک محسوسی در پیش‌بینی‌ها وجود ندارد. این الگوی توزیع نقاط، تأیید کننده کارایی بالای الگوریتم جنگل تصادفی در مدل‌سازی پدیده زمین‌لغزش در منطقه مورد مطالعه می‌باشد.

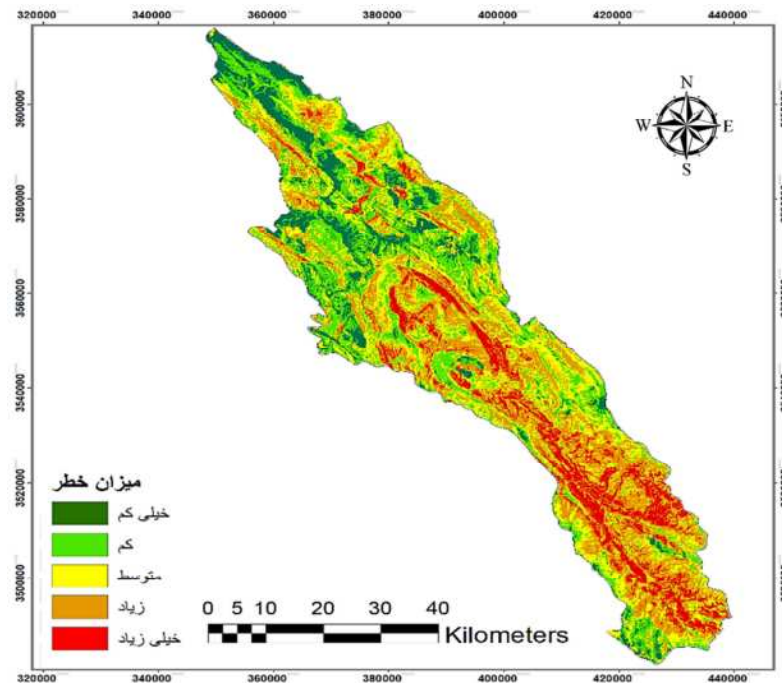


شکل ۴: نمودار ارزیابی برازش مدل جنگل تصادفی. منبع: نگارندگان

پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش: پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی در پنج کلاس (خیلی کم، کم، متوسط، زیاد، خیلی زیاد) انجام شد (شکل ۵). نتایج نشان داد که ۳۰ درصد از مساحت حوضه (۷۵/۳۷ کیلومترمربع) در کلاس خطر زیاد قرار دارد، که عمدتاً در بخش‌های جنوبی و جنوب‌شرقی متمرکز است. این مناطق با سازندهای فرسایش‌پذیر (مانند گچساران و کواترنری)، شیب‌های تند، و تراکم بالای آبراهه‌ها همبستگی دارند. کلاس خیلی زیاد با مساحت ۶۰/۴۵ کیلومترمربع (۱۸/۴۰٪) نیز در نواحی با فعالیت تکتونیکی بالا و گسل‌های فعال مشاهده شد. در مقابل، بخش‌های شمالی و شمال‌غربی حوضه به دلیل پوشش گیاهی متراکم و شیب‌های ملایم‌تر، در کلاس‌های خطر کم و خیلی کم قرار گرفتند (جدول ۲). این توزیع فضایی نشان‌دهنده تأثیر ترکیبی عوامل ژئومورفیکی و انسانی (مانند جاده‌سازی) بر الگوی زمین‌لغزش است.

جدول ۲: توزیع فضایی مساحت و درصد سطوح خطر زمین‌لغزش. منبع: نگارندگان

کلاس خطر	مساحت (کیلومترمربع)	درصد
خیلی کم	۴۲/۱۵	۱۱/۲۵
کم	۴۵/۴۳	۱۲/۹۶
متوسط	۷۲/۹۰	۲۶/۹۹
زیاد	۷۵/۳۷	۳۰/۴۰
خیلی زیاد	۶۰/۴۵	۱۸/۴۰

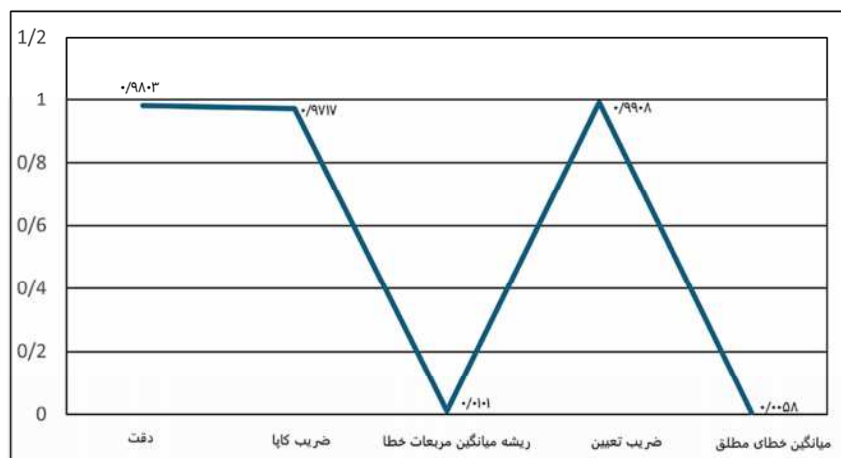


شکل ۵: پهنه‌بندی زمین‌لغزش حوضه مورد مطالعه با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی. منبع: نگارندگان

اعتبارسنجی مدل: عملکرد مدل جنگل تصادفی با استفاده از معیارهای آماری متعدد ارزیابی شد (جدول ۳). نتایج اعتبارسنجی الگوریتم جنگل تصادفی دقت بالای مدل را تأیید کرد (جدول ۳) و (شکل ۶). دقت کلی مدل ۰/۹۸۶۳ بود که نشان‌دهنده طبقه‌بندی صحیح ۹۸/۶۳٪ از نمونه‌ها است. ضریب کاپا (۰/۹۷۱۷) توافق بالای پیش‌بینی‌ها با مقادیر واقعی را تأیید کرد، در حالی که ریشه میانگین مربعات خطا ($RMSE=0.0101$) و میانگین خطای مطلق ($MAE=0.0058$) نشان‌دهنده خطای بسیار پایین مدل بودند. ضریب تعیین ($R^2=0.9908$) نیز بیانگر توانایی بالای مدل در توضیح واریانس داده‌ها است (جدول ۳) و (شکل ۴). ماتریس پهنه‌بندی نشان داد که کلاس خطر زیاد دارای بالاترین حساسیت (۰/۹۶)، ویژگی (۰/۹۲)، و ارزش پیش‌بینی منفی (۰/۹۸) است، در حالی که کلاس خیلی کم کمترین حساسیت (۰/۲۴) را داشت (جدول ۴) و (شکل ۷). تحلیل بوت‌استرپ با ۱۰۰۰ تکرار نیز پایداری نتایج را نشان داد، که با یافته‌های آگبولا و همکاران (۲۰۲۴) و ژینگ و همکاران (۲۰۲۴) همخوانی دارد.

جدول ۳: نتایج اعتبارسنجی الگوریتم جنگل تصادفی. منبع: نگارندگان

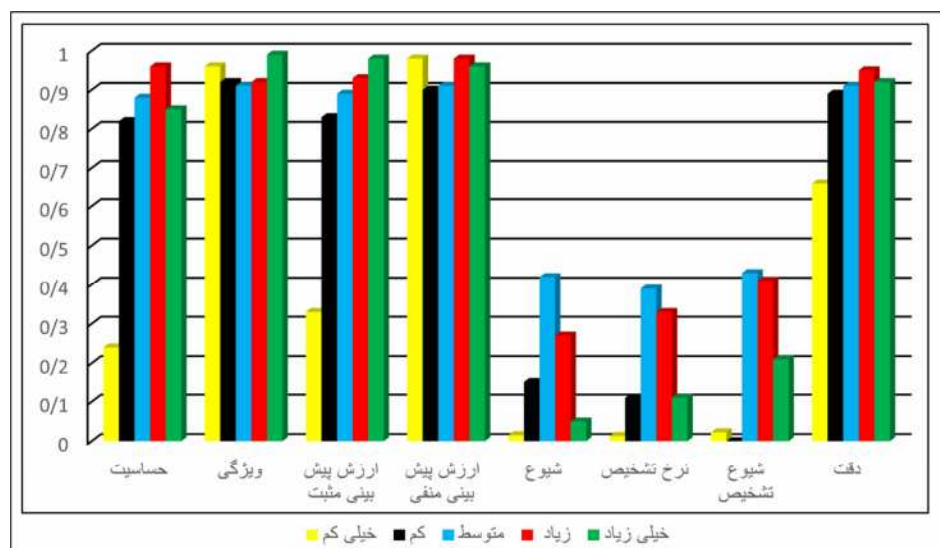
۰/۹۸۰۳	دقت
۰/۹۷۱۷	ضریب کاپا
۰/۰۱۰۱	ریشه میانگین مربعات خطا
۰/۹۹۰۸	ضریب تعیین
۰/۰۰۵۸	میانگین خطای مطلق



شکل ۶: اعتبارسنجی الگوریتم جنگل تصادفی. منبع: نگارندگان

جدول ۴: ویژگی کلاس‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش. منبع: نگارندگان

خیلی کم	کم	متوسط	زیاد	خیلی زیاد	
۰/۲۴	۰/۸۲	۰/۸۸	۰/۹۶	۰/۸۵	حساسیت
۰/۹۶	۰/۹۲	۰/۹۱	۰/۹۲	۰/۹۹	ویژگی
۰/۳۳	۰/۸۳	۰/۸۹	۰/۹۳	۰/۹۸	ارزش پیش بینی مثبت
۰/۹۸	۰/۹۰	۰/۹۱	۰/۹۸	۰/۹۶	ارزش پیش بینی منفی
۰/۰۱۵	۰/۱۵	۰/۴۲	۰/۲۷	۰/۰۵	شیوع
۰/۰۱۳	۰/۱۱	۰/۳۹	۰/۳۳	۰/۰۱۱	نرخ تشخیص
۰/۰۲۲	۰/۱۴	۰/۴۳	۰/۴۱	۰/۲۱	شیوع تشخیص
۰/۶۶	۰/۸۹	۰/۹۱	۰/۹۵	۰/۹۲	دقت



شکل ۷: ویژگی کلاس‌های پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی. منبع: نگارندگان

نتایج و بحث

نتایج این مطالعه نشان‌دهنده نقش برجسته ویژگی‌های ژئومورفیکی در الگوی زمین‌لغزش حوضه آبریز سد شهید عباسپور است. سازندهای زمین‌شناسی، به‌ویژه گچساران و کواترنری، به دلیل ماهیت تبخیری و ساختارهای سست (مانند گچ، مارن، و انیدریت)، بالاترین تأثیر را در وقوع زمین‌لغزش داشتند. این سازندها به دلیل فرسایش‌پذیری بالا و حساسیت به رطوبت، مستعد گسیختگی و ناپایداری دامنه هستند. شیب‌های تند ($>35^\circ$ درجه) و نزدیکی به آبراهه‌ها نیز به‌عنوان عوامل تشدیدکننده شناسایی شدند، که با یافته‌های پورقاسمی و همکاران (۲۰۲۰) و لیو و همکاران (۲۰۲۱) همخوانی دارد. این عوامل با فرسایش کناری رودخانه و زیرشویی دامنه‌ها، ناپایداری را تشدید می‌کنند. در مقابل، بارش و شاخص NDVI تأثیر کمتری داشتند، که احتمالاً به دلیل توزیع یکنواخت بارش در منطقه و نقش تثبیت‌کننده پوشش گیاهی در بخش‌های شمالی است. تحلیل فضایی نشان داد که بخش‌های جنوبی و جنوب‌شرقی حوضه، به دلیل تراکم بالای گسل‌ها، شیب‌های ناپایدار، و فعالیت‌های انسانی مانند جاده‌سازی و ترانشه‌برداری، در معرض خطر بیشتری هستند. این مناطق با تراکم بالای زمین‌لغزش‌های دامنه‌ای و رودخانه‌ای مشخص می‌شوند، که با مطالعات ژو و کارانزا (۲۰۱۷) در مورد تأثیر گسل‌ها بر ناپایداری دامنه‌ها هم‌راستاست. در مقابل، بخش‌های شمالی و شمال‌غربی حوضه به دلیل پوشش گیاهی متراکم و شیب‌های ملایم‌تر، پایداری بیشتری دارند. این تفاوت‌های فضایی بر اهمیت مدیریت کاربری زمین و اقدامات پیشگیرانه مانند کاشت پوشش گیاهی، ایجاد سیستم‌های زهکشی و تقویت دامنه‌ها تأکید دارد (آگبولا و همکاران، ۲۰۲۴). تفاوت معنادار تأثیر عوامل در این مطالعه با پژوهش‌های دیگر مانند گئو و همکاران (۲۰۲۳) که شاخص NDVI را مؤثرتر گزارش کرده‌اند، می‌تواند به دلیل تفاوت در شرایط اکولوژیکی و زمین‌شناسی منطقه باشد. همچنین، تمرکز مناطق پرخطر در بخش‌های جنوبی حوضه را می‌توان به ترکیب سه عامل خطرناک در این مناطق نسبت داد: ۱) وجود سازندهای حساس به فرسایش، ۲) شیب‌های تند، و ۳) تراکم بالای شبکه زهکشی.

مقایسه نتایج این مطالعه با تحقیقات جهانی نشان‌دهنده برتری نسبی الگوریتم جنگل تصادفی در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش است. برای مثال، لی و همکاران (۲۰۲۴) در مطالعه‌ای در چین گزارش دادند که جنگل تصادفی با $AUC=0.95$ عملکرد بهتری نسبت به مدل‌های آماری سنتی دارد. در مطالعه حاضر، $AUC=0.97$ نشان‌دهنده دقت بالای مدل است که می‌تواند به استفاده از داده‌های چندمنبعی و بهینه‌سازی دقیق پارامترهای مدل نسبت داده شود. که با مطالعات جهانی مانند یوسف و پورقاسمی (۲۰۲۱) و وبالم و همکاران (۲۰۲۴) همخوانی دارد. همچنین، یافته‌های این مطالعه با نتایج آهیونی و همکاران (۲۰۲۳) در اندونزی همخوانی دارد که نشان داد سازندهای زمین‌شناسی و شیب مهم‌ترین عوامل در مناطق کوهستانی هستند. با این حال، تأثیر کم بارش در این مطالعه، برخلاف مطالعات موندلینی و همکاران (۲۰۲۳) که بارش را عاملی کلیدی در زمین‌لغزش‌های ناشی از بارندگی شدید گزارش کردند، می‌تواند به شرایط اقلیمی خاص حوضه مربوط باشد.

بررسی نتایج نشان می‌دهد که اکثر زمین‌لغزش‌های مشاهده‌شده در مرکز و شمال حوضه آبریز از تراکم کمی برخوردارند و عمدتاً تحت تأثیر عوامل ناپایداری شیب، تجمع رسوبات، رانش و گسل‌شکستگی قرار دارند که با یافته‌های موندلینی و همکاران (۲۰۲۳) و تالب و همکاران (۲۰۱۸) همخوانی دارد. از سوی دیگر، عواملی همچون درصد بالای سازندهای نرم و فرسایش‌پذیر (مانند رسوبات آبرفتی، سازندهای گچساران و آغاجاری)، شیب‌های تند بیش از 35° درجه، ناپایداری شیب ناشی از فرسایش کناری و آبشویی رودخانه‌ها، احداث ترانشه‌های جاده‌ای برای

راه‌سازی و ساخت‌وساز مسکن (به‌ویژه در روستاهای ده‌حوض و ده‌ثریا)، رطوبت زیاد و تابش کمتر خورشید (خاصه در دامنه‌های شمالی و شمال‌شرقی) موجب شده است که در نواحی شرق، جنوب و جنوب‌شرق محدوده مورد مطالعه، الگوی پراکنش لغزش‌های رودخانه‌ای و دامنه‌ای غالب باشد. تجزیه و تحلیل نتایج همچنین حاکی از آن است که مناطق جنوب، جنوب‌شرق و شرق حوضه آبریز آسیب‌پذیری بیشتری در برابر رانش زمین دارند و تراکم زمین‌لغزش در این نواحی نسبتاً بالاست. در مقابل، گسترش پوشش گیاهی در شمال‌غرب، شمال‌شرق و غرب حوضه تا حدی به پایداری دامنه‌ها کمک کرده و بارش‌های جوی تأثیر کمتری در وقوع زمین‌لغزش در این مناطق داشته است. افزون بر این، توان فرسایشی رودخانه‌ها در نواحی مذکور کاهش یافته و دامنه‌ها از تعادل و پایداری نسبی برخوردارند. برای کاهش خطر زمین‌لغزش، راهکارهایی نظیر کاشت درختان و توسعه پوشش گیاهی (به‌منظور تثبیت دامنه‌ها، کاهش فرسایش خاک، جذب آب اضافی و تقویت ساختار خاک)، احداث سیستم‌های زهکشی مناسب (برای کنترل جریان آب‌های سطحی و کاهش فشار روی شیب‌ها) پیشنهاد می‌شود. در نهایت، نتایج ارزیابی معیارهای الگوریتم نشان‌دهنده دقت و عملکرد بالای مدل است که با یافته‌های رحمان و همکاران (۲۰۲۴) مطابقت دارد.

نتایج این مطالعه چارچوبی علمی برای مدیریت ریسک زمین‌لغزش در حوضه آبریز سد شهید عباسپور ارائه می‌دهد. پهنه‌بندی خطر می‌تواند به برنامه‌ریزان محیطی در شناسایی مناطق اولویت‌دار برای اقدامات پیشگیرانه کمک کند. پیشنهادات عملی شامل: (۱) کاشت پوشش گیاهی در مناطق با شیب بالا برای تثبیت دامنه‌ها، (۲) ایجاد سیستم‌های زهکشی برای کنترل جریان‌های سطحی، (۳) محدود کردن فعالیت‌های انسانی مانند جاده‌سازی در مناطق پرخطر، و (۴) توسعه سیستم‌های هشدار اولیه مبتنی بر داده‌های سنجش از دور و مدل‌های پیش‌بینی است (وو و همکاران، ۲۰۲۳؛ هاگو و همکاران، ۲۰۱۹). این اقدامات می‌توانند خسارات اقتصادی و جانی ناشی از زمین‌لغزش را به‌طور قابل‌توجهی کاهش دهند.

با وجود دقت بالای مدل جنگل تصادفی، محدودیت‌هایی در این مطالعه وجود داشت. اولاً، عدم دسترسی به داده‌های سری زمانی بلندمدت (مانند بارش‌های فصلی یا تغییرات کاربری زمین) ممکن است تحلیل دینامیک زمین‌لغزش‌های عمیق را محدود کرده باشد. ثانیاً، پیچیدگی‌های مدل‌سازی زمین‌لغزش‌های ناشی از زلزله به دلیل کمبود داده‌های لرزه‌ای دقیق به‌طور کامل بررسی نشد. تحقیقات آینده می‌توانند بر استفاده از داده‌های سری زمانی InSAR برای تحلیل تغییر شکل سطحی، مدل‌های یادگیری عمیق (مانند شبکه‌های کانولوشنی) برای پیش‌بینی‌های دقیق‌تر و تحلیل‌های چندمقیاسی برای بررسی تعاملات بین عوامل محیطی و انسانی تمرکز کنند (ژیائو و همکاران، ۲۰۱۹؛ هی و همکاران، ۲۰۲۴). همچنین، ادغام داده‌های اقلیمی بلندمدت و مدل‌های هیدرولوژیکی می‌تواند درک بهتری از تأثیرات تغییرات اقلیمی بر زمین‌لغزش فراهم کند.

نتیجه‌گیری

نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهد که ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی به‌ویژه سازندهای زمین‌شناسی (۲۳/۷ درصد)، شیب (۱۹/۵ درصد) و فاصله از رودخانه (۱۵/۲ درصد) نقش کلیدی در الگوی زمین‌لغزش حوضه آبریز سد شهید عباسپور ایفا می‌کنند. سازندهای فرسایش‌پذیر مانند گچساران و نهشته‌های کواترنری به دلیل ساختار سست و حساسیت بالا به رطوبت، ناپایداری دامنه‌ها را تشدید می‌نمایند. گسترش سازندهای تبخیری و نامقاوم گچساران همراه با نهشته‌های کواترنری منجر به فرسایش شدید آبراهه‌ها، ایجاد گسیختگی در سطوح لغزش، کاهش مقاومت برشی

دامنه‌ها و در نهایت تشدید پدیده زیرشویی در پای دامنه‌ها می‌گردد. این فرآیندها به صورت تدریجی ولی پیوسته باعث تسریع وقوع زمین‌لغزش در منطقه می‌شوند. از سوی دیگر، فعالیت‌های انسانی مانند احداث ترانشه‌های متعدد و عملیات راه‌سازی در دامنه‌های پشت به شیب، سهم قابل توجهی در افزایش ناپایداری دامنه‌ها داشته است. در مقابل، پارامترهای هیدرواقليمی مانند بارش، شاخص توان فرسایشی رودخانه (SPI) و شاخص پوشش گیاهی (NDVI) تأثیر کم‌تری در الگوی پراکنش زمین‌لغزش‌های منطقه نشان داده‌اند.

پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در منطقه مورد مطالعه نشان داد که حدود ۳۰/۴ درصد از مساحت حوضه (معادل ۷۵/۳۷ کیلومتر مربع) در کلاس خطر بالا قرار دارد. این مناطق عمدتاً در بخش‌های جنوبی و جنوب‌شرقی حوضه متمرکز شده‌اند که این پراکنش فضایی با توزیع سازندهای حساس، تراکم گسل‌های فعال، شیب‌های تند (بالای ۳۵ درجه) و همچنین گستردگی فعالیت‌های انسانی مانند عملیات راه‌سازی همخوانی کامل دارد. نتایج نشان می‌دهد این مناطق به دلیل آسیب‌پذیری بالا و پتانسیل خطر قابل توجه، نیازمند اعمال مدیریت ریسک فوری و برنامه‌ریزی‌های ویژه هستند. از جمله راهکارهای مدیریتی پیشنهادی می‌توان به اجرای عملیات پایدارسازی دامنه‌ها، کنترل فعالیت‌های عمرانی و اعمال محدودیت‌های کاربری اراضی در این پهنه‌های پرخطر اشاره نمود.

الگوریتم جنگل تصادفی با شاخص‌های ارزیابی ممتاز شامل دقت کلی ۰/۹۸۶۳، ضریب کاپا ۰/۹۷۱۷، ضریب تعیین (۰/۹۹۰۸) و سطح زیر منحنی (AUC) معادل ۰/۹۷ عملکردی برجسته در پیش‌بینی مناطق مستعد زمین‌لغزش از خود نشان داد. این سطح از دقت بالا عمدتاً مرهون دو عامل کلیدی بوده است: نخست به‌کارگیری ماتریس همبستگی پیشرفته برای بهینه‌سازی ترکیب عوامل ورودی و دوم نمونه‌برداری سیستماتیک از نقاط زمین‌لغزش. نکته قابل توجه در نتایج مدل‌سازی، غلبه واضح پارامترهای زمین‌شناسی بر عوامل اقلیمی است که این الگو با بسیاری از مطالعات مشابه در سایر مناطق تفاوت دارد. این تمایز را می‌توان به ویژگی‌های منحصر به فرد زمین‌شناسی منطقه از جمله گستردگی سازندهای حساس به فرسایش و تراکم بالای گسل‌های فعال نسبت داد.

از دیدگاه علمی، این مطالعه چندین دستاورد مهم داشته است. نخست آنکه موفق شد با رویکردی نوین، سهم و تأثیر متغیرهای مختلف در وقوع زمین‌لغزش را به دقت کمی‌سازی نماید. دوم اینکه نشان داد در مناطق با شرایط زمین‌شناسی خاص، پارامترهای ژئومورفیک می‌توانند سهم بسیار بیشتری از عوامل اقلیمی در مدل‌سازی داشته باشند. سوم آنکه تأثیر فعالیت‌های انسانی به عنوان یک عامل تشدیدکننده به خوبی در مدل مورد توجه قرار گرفته است. از منظر کاربردی نیز این مطالعه چارچوبی علمی برای برنامه‌ریزی محیطی و مدیریت ریسک زمین‌لغزش در مناطق مشابه ارائه می‌دهد.

بر اساس یافته‌های این پژوهش، پیشنهادات کاربردی زیر ارائه می‌شود:

اجرای فوری طرح‌های پایدارسازی در پهنه‌های پرخطر

اولویت‌بندی مناطق با خطر بسیار بالا در برنامه‌ریزی‌های کاربری اراضی

تلفیق یافته‌های این تحقیق با سیستم‌های پایش لحظه‌ای

انجام مطالعات مشابه در سایر حوضه‌های با ویژگی‌های زمین‌شناسی مشابه

برای تحقیقات آتی نیز بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی بر الگوی خطر زمین‌لغزش، تلفیق داده‌های InSAR برای پایش تغییرات زمانی خطر و توسعه مدل‌های ترکیبی با تلفیق روش‌های مختلف یادگیری ماشین پیشنهاد می‌شود. این

مطالعه نه تنها شکاف پژوهشی موجود در منطقه مورد مطالعه را پر نموده است، بلکه می‌تواند به عنوان الگویی برای مطالعات مشابه در سایر مناطق کوهستانی با شرایط زمین‌شناسی پیچیده مورد استفاده قرار گیرد.

تقدیر و تشکر

تیم پژوهشی مراتب قدردانی صمیمانه خود را از دانشگاه اصفهان به دلیل ارائه حمایت مالی ضروری و امکانات پژوهشی که این پژوهش را ممکن ساخت، ابراز می‌دارد. همچنین، از مشارکت سازمان‌های مختلف در ارائه داده‌ها و کمک‌های فنی با سپاسگزاری یاد می‌شود.

منابع

- حیدری، ناصر؛ حبیب‌نژاد، محمود؛ کاویان، عطاله؛ پورقاسمی، حمیدرضا (۱۳۹۹). مدل‌سازی حساسیت زمین‌لغزش با الگوریتم یادگیری ماشین جنگل تصادفی در آبخیز سد رئیس‌علی دلواری، پژوهش‌های آبخیزداری (پژوهش و سازندگی)، دوره ۳۳، شماره ۱ (پیاپی ۱۲۶)، صص ۲-۱۳.
- سدیدی، جواد؛ مالکی، رضا (۱۴۰۱). مقایسه الگوریتم‌های ماشین بردار پشتیبان، جنگل تصادفی و رگرسیون لجستیک در پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در جاده مه‌باد-سردشت، سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی در علوم محیطی، دوره ۲، شماره ۴، صص ۸۱-۱۰۰. <https://doi.org/10.22034/rsgi.2022.15839>
- ساداتی، سیدحمید؛ موسوی، سیدرمضان؛ وهاب‌زاده کبریا، قربان؛ روشن، سیدحسین (۱۴۰۴). ارزیابی مدل‌های جنگل تصادفی و ماشین بردار پشتیبان در تهیه نقشه حساسیت زمین‌لغزش (مطالعه موردی: حوضه تجن، استان مازندران)، مخاطرات محیط طبیعی، دوره ۱۴، شماره ۴۵، صص ۱۳۳-۱۵۴. <https://doi.org/10.22111/jneh.2025.50031.2071>
- قیاسی، واحد؛ شیرخانی چشمه شفیع، یوسف؛ یوسفی، مهیار (۱۴۰۱). مروری بر مطالعات انجام شده در زمینه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش (الگوریتم جنگل تصادفی)، رویکردهای نوین در مهندسی عمران، دوره ۶، شماره ۴، صص ۱-۱۰.
- کرم، امیر؛ پاک‌نژاد، فریبا؛ بهرام‌آبادی، الهام (۱۴۰۰). پهنه‌بندی ناپایداری دامنه‌ها نسبت به حرکات واریزه‌ای با استفاده از روش الگوریتم جنگل تصادفی (مطالعه موردی: حوضه تنگراه-استان گلستان)، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمتی، دوره ۹، شماره ۴، صص ۵۹-۷۴. <https://doi.org/10.22034/gmpj.2021.131011>
- داوری‌صارم، میلاد؛ حسن‌پور، جعفر؛ روشن لیاردجده، مانده (۱۴۰۴). شناسایی پهنه‌های احتمالی زمین‌لغزش با استفاده از داده‌های DInSAR و استعدادهای زمین‌لغزش: مطالعه موردی حوضه آبریز دماوند، مخاطرات محیط طبیعی، دوره ۱۴، شماره ۴۵، صص ۵۳-۷۴. <https://doi.org/10.22111/jneh.2025.49171.2058>
- ذاکری‌نژاد، رضا؛ کهرانی، عباس (۱۴۰۲). ارزیابی و مقایسه مدل‌های CART و TreeNet جهت تهیه نقشه‌های حساسیت زمین‌لغزش با استفاده از نرم‌افزار SPM و سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) (مطالعه موردی: حوضه آبخیز کمه، جنوب استان اصفهان)، مخاطرات محیط طبیعی، دوره ۱۲، شماره ۳۷، صص ۱۷-۳۸. <https://doi.org/10.22111/jneh.2023.42304.1904>
- محرمی، میثم؛ جلوخانی نیارکی، محمدرضا (۱۴۰۲). تهیه نقشه مناطق مستعد وقوع زمین‌لغزش با استفاده از مدل‌های آماری و یادگیری ماشین (مطالعه موردی: کشور اتریش)، علوم و فنون نقشه‌برداری، دوره ۱۳، شماره ۲، صص ۷۹-۹۴.
- مومی‌پور، مهدی؛ معاوی، مهشید (۱۴۰۱). تحلیل شرایط تکتونیک و فرسایش در حوضه سد شهید عباسپور با تکنیک‌های ژئومورفومتری، جغرافیا و مخاطرات محیطی، دوره ۱۱، شماره ۱، صص ۱-۱۶. [doi:10.22067/geoh.2021.70140.1053](https://doi.org/10.22067/geoh.2021.70140.1053)
- Achour, Y., & Pourghasemi, H. R. (2020). How do machine learning techniques help in increasing the accuracy of landslide susceptibility maps? *Geoscience Frontiers*, 11(3), 871-883. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2019.10.001>
- Agboola, G., Hashemi Beni, L., Elbayoumi, T., & Thompson, G. (2024). Optimizing landslide susceptibility mapping using machine learning and geospatial techniques. *Ecological Informatics*, 81, 102583. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2024.102583>
- Ahmad, M. N., Shao, Z., Aslam, R. W., Ahmad, I., Liao, M., Li, X., & Song, Y. (2022). Landslide hazard, susceptibility and risk assessment (HSRA) based on remote sensing and GIS data models: A case study of Muzaffarabad, Pakistan. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 36(8), 1-16. <https://doi.org/10.1007/s00477-022-02245-8>

- Ahyuni, R., Atthoririq, H., Endah, P., & Yurni, S. I. (2023). Hazard zonation in Lima Pulu Kota Regency. In *Proceedings of the 5th International Conference on Geoscience and Earth Resources Engineering* (pp. 45-58). EAI. <https://doi.org/10.4108/eai.19-11-2022.2332288>
- Cheng, Y.-S., Yu, T.-T., & Son, N.-T. (2021). Random forests for landslide prediction in Tsengwen River watershed, Central Taiwan. *Remote Sensing*, 13(2), 199. <https://doi.org/10.3390/rs13020199>
- Dao, A., Jaafari, M., Bayat, D., Mafi-Gholami, C., Qi, H., Moayedi, T. V., Thanh, B. T. (2020). A spatially explicit deep learning neural network model for the prediction of landslide susceptibility. *Catena*, 188, 104451. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104451>
- Davari Sarem, M., Hassanpour, J. and Roshan Liarajdameh, M. (2025). Identification of potential landslide zones using DInSAR data and landslide susceptibility: a case study of the Damavand basin. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 14(45), 53-74. doi: 10.22111/jneh.2025.49171.2058. [In Persian].
- Darminto, M. L., & Chu, H.-J. (2019). Mapping landslide release area using a random forest model. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 389(1), 012038. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/389/1/012038>
- Egbueri, J. C., & Egbueri, F. (2023). Soil erosion and landslide susceptibility insights based on hierarchical clustering and multilayer perceptron networks: A Nigerian case study. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20(10), 10763-10786. <https://doi.org/10.1007/s13762-022-04714-7>
- Fan, G., Scaringi, G., Korup, O., West, A. J., van Westen, C. J., Tanyas, H., Huang, R. (2019). Earthquake-induced chains of geologic hazards: Patterns, mechanisms, and impacts. *Reviews of Geophysics*, 57(2), 421-503. <https://doi.org/10.1029/2018RG000626>
- Karam, A., paknejad, F. and bahram abadi, E. (2021). Zonation of unstable slopes with respect to the debris flows using random forest algorithm (case study: Basin Tngrah Golestan Province). *Quantitative Geomorphological Research*, 9(4), 59-74. doi: 10.22034/gmpj.2021.131011 [In Persian]
- Gu, T., Li, J., Wang, M., Duan, P., Zhang, Y., & Cheng, L. (2023). Study on landslide susceptibility mapping with different factor screening methods and random forest models. *PLoS ONE*, 18(10), e0292897. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0292897>
- Ghiyasi, Vahed; Shirkhani Cheshme Shafi, Yousef; Yousefi, Mahyar (2012). A review of studies conducted in the field of landslide hazard zoning (random forest algorithm), *New Approaches in Civil Engineering*, Volume 6, Issue 4, pp. 1-10. [In Persian]
- Haque, U., Da Silva, P. F., Devoli, G., Pilz, J., Zhao, B., Khaloua, A., Wu, J. H. (2019). The human cost of global warming: Deadly landslides and their triggers (1995-2014). *Science of The Total Environment*, 682, 673-684. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.415>.
- Heydari, N., Habibnejad, M., Kavian, A. and Pourghasemi, H. R. (2020). Landslide Susceptibility Modelling Using the Random Forest Machine Learning Algorithm in the Watershed of Rais-Ali Delvari Reservoir. *Watershed Management Research*, 33(1), 2-13. doi: 10.22092/wmej.2019.126288.1219 [In Persian]
- He, Y., Zhao, Z., Zhu, Q., Liu, T., Zhang, Q., Yang, W., Wang, Q. (2024). An integrated neural network method for landslide susceptibility assessment based on time-series InSAR deformation dynamic features. *International Journal of Digital Earth*, 17(1), 2295408. <https://doi.org/10.1080/17538947.2023.2295408>
- Li, M., Wang, H., Chen, J., & Zheng, K. (2024). Assessing landslide susceptibility based on the random forest model and multi-source heterogeneous data. *Ecological Indicators*, 158, 111600. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.111600>
- Li, Z., Huang, L., Fan, L., Huang, J., Huang, F., Chen, J., Wang, Y. (2020). Landslide susceptibility prediction modeling based on remote sensing and a novel deep learning algorithm of a cascade-parallel recurrent neural network. *Sensors*, 20(6), 1576. <https://doi.org/10.3390/s20061576>
- Liu, Q., Pan, M., Wang, X., & An, Y. (2021). A two-layer model for landslide-generated impulse wave: Simulation of the 1958 Lituya Bay landslide impact wave from generation to long-duration transport. *Advances in Water Resources*, 154, 103989. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2021.103989>
- Lu, J., Ren, C., Yue, W., Zhou, Y., Xue, X., Liu, Y., & Ding, C. (2023). Investigation of landslide susceptibility decision mechanisms in different ensemble-based machine learning models with various types of factor data. *Sustainability*, 15(18), 13563. <https://doi.org/10.3390/su151813563>
- Lu, S., Tang, H., Zhang, Y., Gong, W., & Wang, L. (2018). Effects of the particle-size distribution on the micro and macro behavior of soils: Fractal dimension as an indicator of the spatial variability of a slip zone in a landslide. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 77(2), 665-677. <https://doi.org/10.1007/s10064-017-1028-1>
- Mondini, A. C., Mondini, F., Guzzetti, F., & Melillo, M. (2023). Deep learning forecast of rainfall-induced shallow landslides. *Nature Communications*, 14(1), 2446. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-38135-0>
- Moharrami, Meysam; Jellokhani-Niarkai, Mohammad Reza (2013). Mapping landslide-prone areas using statistical models and machine learning (case study: Austria), *Surveying Sciences and Techniques*, Volume 13, Issue 2, pp. 79-94. [In Persian]
- Mumipour, M. and Moavi, M. (2022). Tectonic and Erosion Analysis of Shahid Abbaspour Dam Catchment using Geomorphometric Techniques. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 11(1), 1-16. doi: 10.22067/geoh.2021.70140.1053. [In Persian]
- Nwazelibe, E., Nwazelibe, C. O., & Unigwe, J. C. (2023). Integration and comparison of algorithmic weight of evidence and logistic regression in landslide susceptibility mapping of the Orumba North erosion-prone region, Nigeria. *Modeling Earth Systems and Environment*, 9(1), 967-986. <https://doi.org/10.1007/s40808-022-01549-2>

- Panahi, A., Gayen, A., Pourghasemi, H. R., Rezaie, F., & Lee, S. (2020). Spatial prediction of landslide susceptibility using hybrid support vector regression (SVR) and the adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) with various metaheuristic algorithms. *Science of The Total Environment*, 741, 139937. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139937>
- Panchal, A., & Shrivastava, N. (2022). Landslide hazard assessment using analytic hierarchy process (AHP): A case study of National Highway 5 in India. *Ain Shams Engineering Journal*, 13(5), 101626. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.10.021>
- Pourghasemi, H. R., Kornejady, A., Kerle, N., & Shabani, F. (2020). Investigating the effects of different landslide positioning techniques, landslide partitioning approaches, and presence-absence balances on landslide susceptibility mapping. *Catena*, 187, 104364. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104364>
- Rahaman, A., Dondapati, S., Gupta, S., & Raj, R. (2024). Leveraging artificial neural networks for robust landslide susceptibility mapping: A geospatial modeling approach in the ecologically sensitive Nilgiri District, Tamil Nadu. *Geohazard Mechanics*, 2(4), 258-269. <https://doi.org/10.1016/j.ghm.2024.07.001>
- Rodrigues Neto, J. M., & Bhandary, N. P. (2024). Landslide susceptibility assessment by machine learning and frequency ratio methods using XRAIN radar-acquired rainfall data. *Geosciences*, 14(6), 171. <https://doi.org/10.3390/geosciences14060171>
- Rohan, E., Shelef, B., Mirus, T., & Coleman, T. (2023). Prolonged influence of urbanization on landslide susceptibility. *Landslides*, 20(5), 1023-1035. <https://doi.org/10.1007/s10346-023-02034-6>
- Sadati, S. H., Mousavi, S. R., Vahabzadeh Kebria, G. and Roshun, S. H. (2025). Evaluation of Random Forest and Support Vector Machine Models in Landslide Risk Mapping (Case study: Tajan Basin, Mazandaran Province). *Journal of Natural Environmental Hazards*, 14(45), 133-154. doi: 10.22111/jneh.2025.50031.2071. [In Persian]
- Sadidi, J. and Maliki, R. (2022). Using machine learning-based models for landslide susceptibility mapping in the Mahabad-Sardasht road. *Remote Sensing and GIS Applications in Environmental Sciences*, 2(4), 100-81. doi: 10.22034/rsgi.2022.15839. [In Persian]
- Shugar, D. H., Sharma, M., Saharia, G. V., & Ramana, P. V. (2021). High-resolution landslide susceptibility mapping using ensemble machine learning and geospatial big data. *Catena*, 235, 107653. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.107653>
- Taalab, K., Cheng, T., & Zhang, Y. (2018). Mapping landslide susceptibility and types using random forest. *Big Earth Data*, 2(2), 159-178. <https://doi.org/10.1080/20964471.2018.1472392>
- Viet, D. T., Doan, A. T., & Tran, A. I. (2023). Deep learning to assess the effects of land use/land cover and climate change on landslide susceptibility in the Tra Khuc river basin of Vietnam. *Geocarto International*, 38(1), 1-25. <https://doi.org/10.1080/10106049.2023.2198856>
- Wu, Z., Li, H., Yuan, S., Gong, Q., Wang, J., & Zhang, B. (2023). Mask R-CNN-based landslide hazard identification for 22.6 extreme rainfall-induced landslides in the Beijiag River Basin, China. *Remote Sensing*, 15(20), 4898. <https://doi.org/10.3390/rs15204898>
- Wubalem, A. (2021). Landslide susceptibility mapping using statistical methods in the Uatzau catchment area, northwestern Ethiopia. *Geoenvironmental Disasters*, 8(1), 1-21. <https://doi.org/10.1186/s40677-021-00187-x>
- Xiao, T., Yin, K., Yao, T., & Liu, S. (2019). Spatial prediction of landslide susceptibility using GIS-based statistical and machine learning models in Wanzhou County, Three Gorges Reservoir, China. *Acta Geochimica*, 38(4), 654-669. <https://doi.org/10.1007/s11631-019-00341-1>
- Xing, Y., Yang, C., Wang, P., & Huang, S. (2024). Research on landslide master control factor identification and susceptibility prediction modelling. *EGU sphere*, 2023, 1-25. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2023-3134>
- Youssef, A. M., & Pourghasemi, H. R. (2021). Landslide susceptibility mapping using machine learning algorithms and comparison of their performance at Abha Basin, Asir Region, Saudi Arabia. *Geoscience Frontiers*, 12(2), 639-655. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2020.05.010>
- zakeri nejad, R. , Kahrani, A. and Entrzari, M. (2023). Assessment of gully erosion susceptibility using the CART model and GIS (Case study: Khasyeh watershed). *Quantitative Geomorphological Research*, 12(2), 72-90. doi: 10.22034/gmpj.2023.391714.1429.[In Persian]
- Zhao, Z., Liu, Z. Y., & Xu, C. (2021). Slope unit-based landslide susceptibility mapping using certainty factor, support vector machine, random forest, CF-SVM and CF-RF models. *Frontiers in Earth Science*, 9, 589630. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.589630>
- Zuo, R., & Carranza, E. J. M. (2017). A fractal measure of spatial association between landslides and conditioning factors. *Journal of Earth Science*, 28(4), 588-594. <https://doi.org/10.1007/s12583-017-0738-4>

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

Sayyad Asghari Saraskanrood^{1*} , Mahdi Frotan²

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	ABSTRACT
Article type: Research Article Article history: Received: 07 April 2025 Revised: 16 July 2025 Accepted: 09 August 2025 Published: 22 June 2026 Keywords: Flood, MFFPI, spectral indices, Khiawchay watershed.	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.
How to Cite: Asghari Saraskanrood, S. and Frotan, M. (2026). Assessing the flood potential of the Khiaochay watershed using the MFFPI model and spectral indices. <i>Journal of Natural Environmental Hazards</i>, 15 (48), 73-92.	
	© The Author/Authors Publisher: University of Sistan and Baluchestan
DOI: 10.22111/jneh.2025.51600.2109	

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 Khiawchay 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.

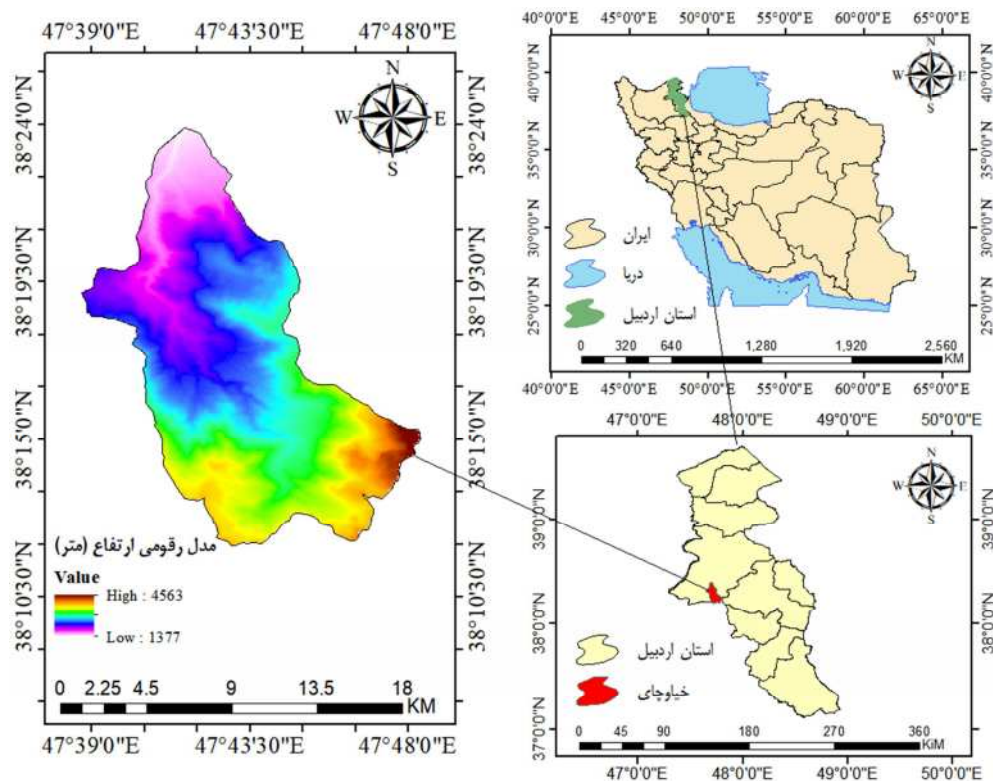


Figure 1: Location of the Khiawchay watershed in Ardabil province and Iran. Source: Authors

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.

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

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, AWEL, 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

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., Babaei 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., Farrokhan 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]

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., Irimuş, I.-A., Vasile, D., Rusu, R., & Roşca, 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](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., Kothiyari, 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>

مجله علمی پژوهشی مخاطرات محیط طبیعی، دوره ۱۵، شماره ۴۸، شماره پیاپی ۰۲، تیر ۱۴۰۵

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

صیاد اصغری سراسکانرود^{۱*}، مهدی فروتن^۲

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	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۱۸ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۴/۲۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۱۸ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۳/۱۶ واژه‌های کلیدی: سیلاب، MFFPI، شاخص‌های طیفی، حوضه آبخیز خیاوچای.	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، انحنا، دامن، جنس سنگ، بافت خاک و کاربری اراضی بوده که از منابعی مانند مدل رقومی ارتفاع (DEM)، نقشه‌های زمین‌شناسی و داده‌های سنجنده‌های دور-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 سنجنده دقت مدل انجام شد. همچنین، ارتباط شاخص‌های طیفی AWEI، NDMI، MNDWI 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 به‌کار رود. مقدار AUC برای دو سیلاب بررسی‌شده به‌ترتیب ۰/۷۳ و ۰/۷۲ به‌دست آمد که بیانگر عملکرد قابل قبول مدل در پیش‌بینی خطر سیلاب است.
استناد: اصغری سراسکانرود، صیاد و فروتن، مهدی. (۱۴۰۵). ارزیابی پتانسیل سیل خیزی حوضه آبخیز خیاوچای با استفاده از مدل MFFPI و شاخص‌های طیفی. <i>مخاطرات محیط طبیعی</i>، ۱۵ (۴۸)، ۹۲-۷۳.	
ناشر: دانشگاه سیستان و بلوچستان	
DOI: 10.22111/jneh.2025.51600.2109	

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). باین حال، سیلاب ناگهانی به معنی جاری شدن سریع آب بر سطح زمین در اثر بارش‌های سنگین یا رها شدن ناگهانی آب از یک منطقه سدشده است که در این حالت، آب به صورت رواناب سطحی جریان می‌یابد (لسکنس و همکاران، ۲۰۱۴). این پدیده به عنوان یکی از مهم ترین و ویرانگرترین بلایا شناخته می‌شود که تأثیرات آن بر زندگی انسان‌ها و اقتصاد جهانی به طور گسترده در مطالعات و گزارش‌ها ثبت شده است. به عنوان نمونه، گزارش اخیر دفتر کاهش خطر بلایای سازمان ملل متحد (UNDRR) که پیش تر 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 نیمه خشک است که به ویژه در مناطق شمالی خود به طور چشمگیری در معرض سیل‌های ویرانگر قرار دارد. به عنوان 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 خسارت‌های 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 فقط دبی اوج را پیش‌بینی می‌کنند، ممکن است دچار عدم قطعیت و خطای قابل توجهی باشند. علاوه بر این، مدل‌های عددی به حجم زیادی از داده‌های متنوع نیاز دارند که تهیه آن‌ها در کشورهای در حال توسعه‌ای مانند ایران به سادگی امکان پذیر 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 زیست محیطی گوناگونی تأثیر می‌پذیرند. بنابراین، ارزیابی و تعیین محدوده‌های دارای پتانسیل سیلاب به عنوان یک راه کار پیشگیرانه از اهمیت بالایی برخوردار بوده و یکی از اقدام‌های اساسی در مدیریت و برنامه ریزی پیش از بروز بحران محسوب می‌شود (علی و همکاران، ۲۰۲۰). روش‌های مختلفی برای ارزیابی و تحلیل خطر سیل ارائه شده است. روش‌های قطعی مانند ^۱HEC-HMS و ^۲HEC-RAS برای شبیه سازی سیلاب‌ها به داده‌های دقیق و هزینه‌های بالا نیاز دارند و به حوضه‌های کوچک محدود هستند. در مقابل، روش‌های پارامتریک و داده محور 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 خصوصیت‌های 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). این مطالعه با بهره گیری از شاخص اصلاح شده ^۳MFFPI، به شناسایی مناطق آسیب پذیر در برابر سیل در حوضه آبخیز خیاوچای می‌پردازد. با توجه به محدودیت‌های روش‌های عددی و مزایای GIS و داده‌های سنجش از دور، استفاده از شاخص‌های

^۱ - Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System

^۲ - HEC-RAS: Hydrologic Engineering Center - River Analysis System

^۳ - Modified Flash Flood Potential Index

ترکیبی می‌تواند دقت تحلیل‌ها را افزایش دهد. نوآوری این پژوهش در استفاده از نسخه اصلاح‌شده MFFPI و بررسی ارتباط آن با شاخص‌های طیفی سنجش‌ازدور 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^۱ AHP و الگوریتم‌های K-NN^۲ و K-Star و بهره‌گیری از داده‌های سنجش‌ازدور و ۱۰ عامل مؤثر، شاخص^۳ FFPI را محاسبه کردند. نتایج حاکی از برتری مدل ترکیبی KNN-AHP نسبت به مدل‌های مستقل بود که دقت آن نیز با منحنی^۴ ROC و^۵ AUC 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. شوافه 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 به‌سزایی 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 والیارثا 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^۶)، پتانسیل سیلاب ناگهانی را در شاه عالم مالزی ارزیابی کردند. آن‌ها دریافتند که منطقه بیشتر 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 سنجش‌ازدور 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

^۱ - Analytic Hierarchy Process

^۲ - K-Nearest Neighbors

^۳ - Flash Flood Potential Index

^۴ - Receiver Operating Characteristic

^۵ - Area Under the Curve

^۶ - Normalized Difference Vegetation Index

حتی با حذف پارامترهای کم‌اثر، دشت اسلام‌آباد غرب همچنان در معرض خطر بالا قرار دارد. ابراهیمی (۱۳۹۹) با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی و بررسی ۹ شاخص شامل بارش، شیب، ارتفاع و کاربری اراضی، نقشه مدیریت مخاطرات سیلاب را در حوضه 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، درحالی‌که 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 بیشتر 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^۱، 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 سفارود گیلان را در پنج کلاس تهیه کردند. نتایج نشان داد بخش‌های جنوبی و جنوب‌غربی حوضه در معرض خطر زیاد و خیلی زیاد قرار دارند، درحالی‌که مناطق مرکزی دارای خطر متوسط تا کم هستند.

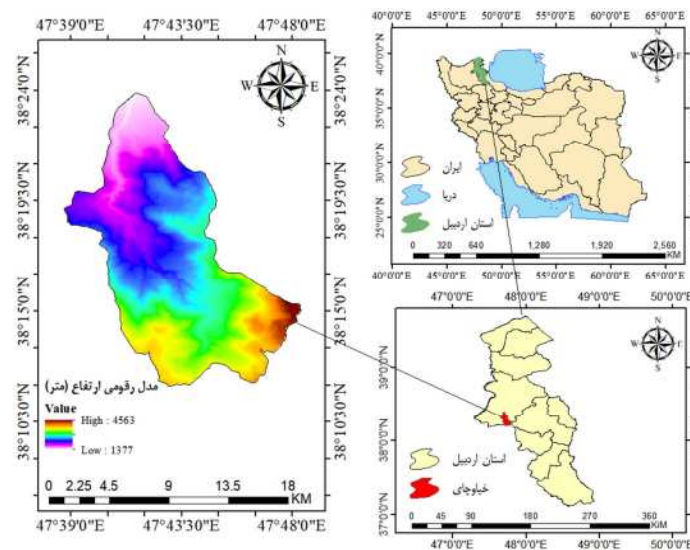
مرور مطالعات پیشین نشان می‌دهد که شاخص MFFPI در بسیاری از حوضه‌های آبخیز به‌عنوان ابزاری کارآمد جهت شناسایی مناطق مستعد سیلاب به‌کار گرفته شده است. با وجود نقش مؤثر این شاخص در ارتقای دقت مدل‌سازی هر سیلاب، کاستی‌هایی همچون فقدان بررسی جامع شاخص‌های طیفی در اغلب پژوهش‌ها مشهود است. این پژوهش با هدف پر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

¹ - Evidence-Based Framework

داده‌ها و روش‌ها

محدوده مورد مطالعه

حوضه آبخیز خیابچای 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 (غیائی و همکاران، ۱۳۹۶). شکل ۱، موقعیت جغرافیایی حوضه آبخیز خیابچای را در سطح استان و ایران نشان می‌دهد.



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

روش‌شناسی پژوهش

در این پژوهش، به منظور شبیه‌سازی نواحی سیلاب ناگهانی در حوضه آبخیز خیابچای، از مدل MFFPI استفاده شد. برای این منظور، ابتدا پارامترهای اصلی مدل شامل شیب، تراکم جریان، انحنای دامنه از مدل رقومی ارتفاعی^۱ DEM^۱ ۳۰ متر، جنس سنگ از نقشه‌های زمین‌شناسی 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 خیابچای با استفاده از مدل MFFPI و پارامترهای

^۱ - Digital Elevation Model

وزن‌دهی شده تولید شد. برای ارزیابی دقت مدل، دو مورد از سیلاب‌های رخ داده در تاریخ‌های ۲۰۲۰/۰۷/۱۴ و ۲۰۲۰/۰۶/۰۶ مورد بررسی قرار گرفت و عملکرد مدل با استفاده از منحنی ROC ارزیابی شد. همچنین، شاخص‌های طیفی مانند ^۱MNDWI، ^۲NDMI، ^۳AWEI، ^۴LSM 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، انحنا، دامن، بافت خاک، نفوذپذیری سنگ و پوشش زمین/کاربری اراضی می‌باشد که به‌عنوان 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.

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

پارامتر	وزن پارامتر	طبقه	وزن هر طبقه	امتیاز نهایی
شیب (درجه)	۳	۶۰-۱۰	۱	۳
		۱۰-۸	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	(-۱۸)-(-۴۹)	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
			۵	۵

^۱ - Modified Normalized Difference Water Index

^۲ - Normalized Difference Moisture Index

^۳ - Automated Wetland Ecosystem Index

^۴ - Land Surface Model

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

شاخص MNDWI

شاخص اصلاح شده آب تفاضلی نرمال شده (MNDWI) با جایگزینی باند مادون قرمز میانی به جای 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 ($MNDWI > 0$) به عنوان مناطق آبی شناسایی می‌شوند. اصلاحات انجام شده 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.

$$MNDWI = \frac{Green - MIR}{Green + MIR} \quad (1)$$

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

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 به عنوان غیرآب در نظر گرفته می‌شود، درحالی‌که در مناطقی که $AWEI > 0$ باشد، نشان دهنده حضور پهنه‌های آبی است (امیری و همکاران، ۱۴۰۰). این شاخص به صورت رابطه ۲، محاسبه می‌شود.

$$AWEI = 4 * (Green - MIR) - ((0.25 * NIR) + (2.75 * SWIR)) \quad (2)$$

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

شاخص اختلاف رطوبتی نرمال شده (NDMI) با استفاده از داده‌های باند مادون قرمز نزدیک (NIR) و مادون قرمز میانی (MIR) محاسبه می‌شود و به صورت 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 (حسینی چمنی 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).

شاخص NDVI

شاخص‌های پوشش گیاهی به‌طور گسترده به‌عنوان معیارهایی برای تجزیه و تحلیل 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 نرمال شده پوشش گیاهی (NDVI)، یکی از پرکاربردترین شاخص‌ها برای پایش تغییرات پوشش گیاهی است که از نسبت گیری باند قرمز (Red) و باند مادون قرمز نزدیک (NIR) به‌دست می‌آید. این شاخص بر اساس رابطه ۵، محاسبه می‌شود.

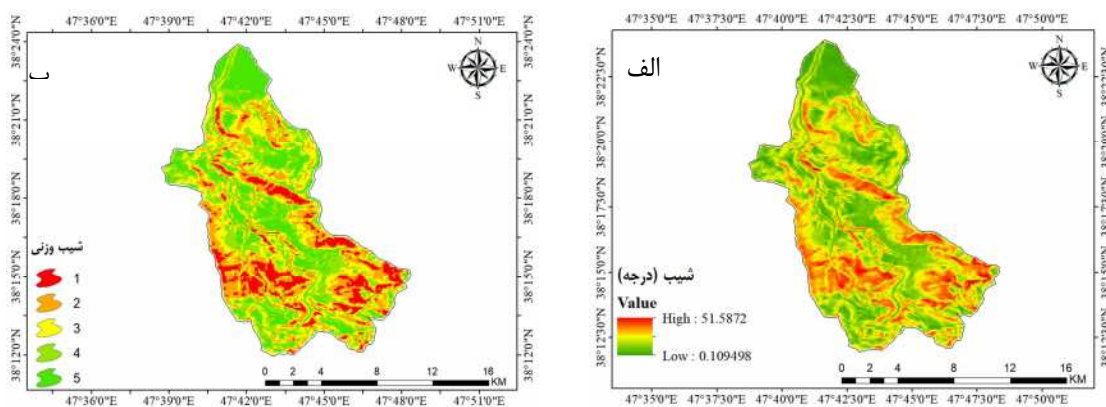
$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \quad (۵)$$

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

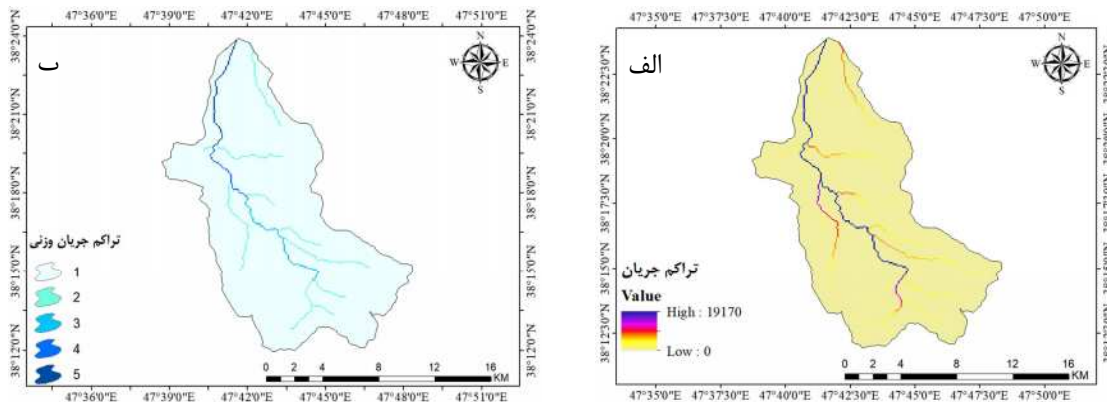
شیب، یکی از عوامل کلیدی در جریان سیلاب محسوب می‌شود. در مناطق مرتفع و پرشیب، آب با سرعت بیشتری حرکت می‌کند، درحالی‌که در نواحی کم‌شیب، بسته به نوع خاک، احتمال تجمع آب افزایش می‌یابد. به همین دلیل، بر اساس نظر تینکو و همکاران (۲۰۱۸)، مناطق کم‌شیب در مدل MFFPI وزن بیشتری دارند. در شکل (۲-الف)، وضعیت شیب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



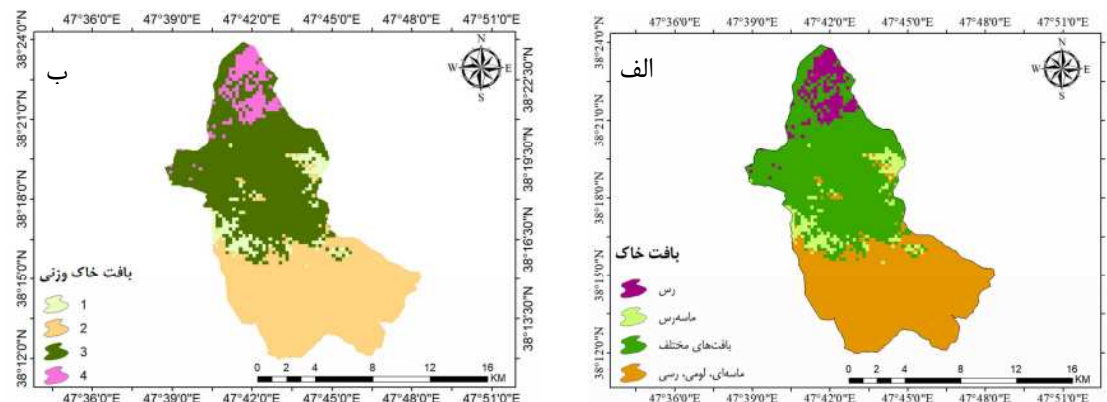
شکل ۲: الف) نقشه شیب حوضه آبخیز خیابچای، ب) نقشه وزنی شیب حوضه آبخیز خیابچای. منبع: یافته‌های پژوهش

تراکم جریان در آبراهه‌ها و فاصله از آن‌ها تأثیر قابل‌توجهی بر وقوع سیلاب و حجم رواناب دارد. مطابق شکل (۳)، وضعیت این پارامتر برای حوضه آبخیز خیابچای نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با کاهش ارتفاع از جنوب به شمال حوضه، پراکندگی آبراهه‌های فرعی در ارتفاعات جنوبی منجر به تجمع 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.



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

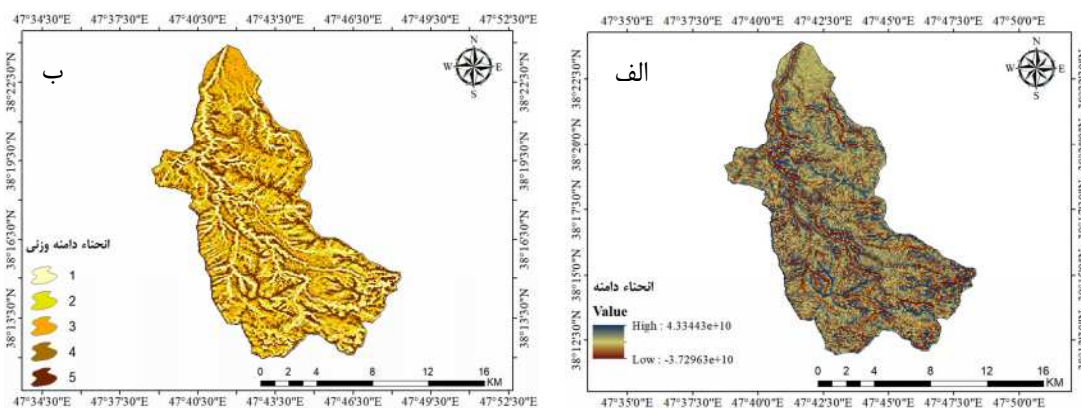
نوع خاک تأثیر بسزایی در وقوع سیلاب دارد؛ زیرا ویژگی‌های فیزیکی آن مانند نفوذپذیری، ظرفیت نگهداری آب و سرعت جریان آب را تعیین می‌کند. بر اساس نقشه خاک استخراج‌شده از پایگاه داده USDA، چهار نوع خاک عمده در حوضه آبخیز خیاوچای شناسایی شده است (شکل ۴، الف). طبق امتیازدهی جدول ۱، در شکل (ب) مشاهده می‌شود که 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. باین‌حال، 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 به صورت 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 ماسه‌ای رسی، ماسه‌ای لومی رسی، بافت‌های متنوع و خاک‌های رسی را به ترتیب در کلاس‌های ۱ تا ۴ دسته‌بندی کرده‌اند.



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

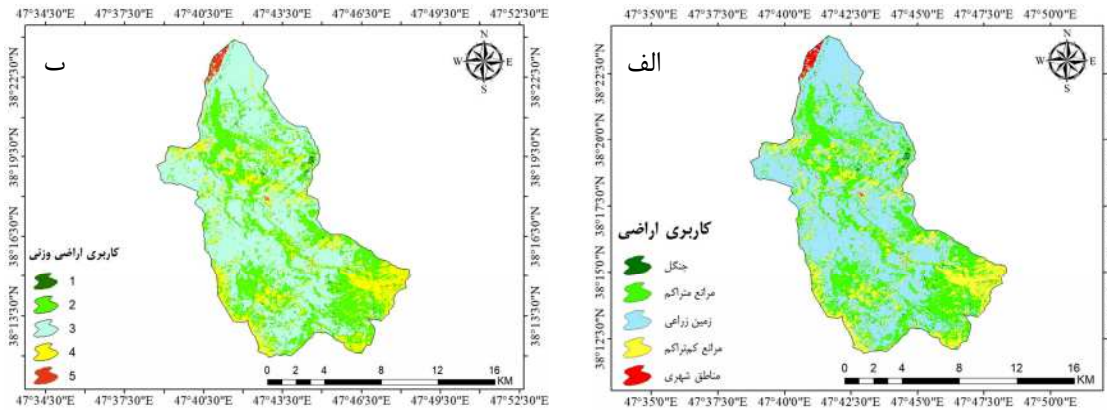
انحنای دامنه تأثیر قابل توجهی بر جریان آب، تجمع رواناب و میزان نفوذ آن به خاک دارد. دامنه‌های محدب که به صورت قله‌ای شکل هستند، رواناب زیادی تولید می‌کنند؛ اما مستعد تجمع آب نیستند. در مقابل، دامنه‌های مقعر

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 خیابوچای 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.



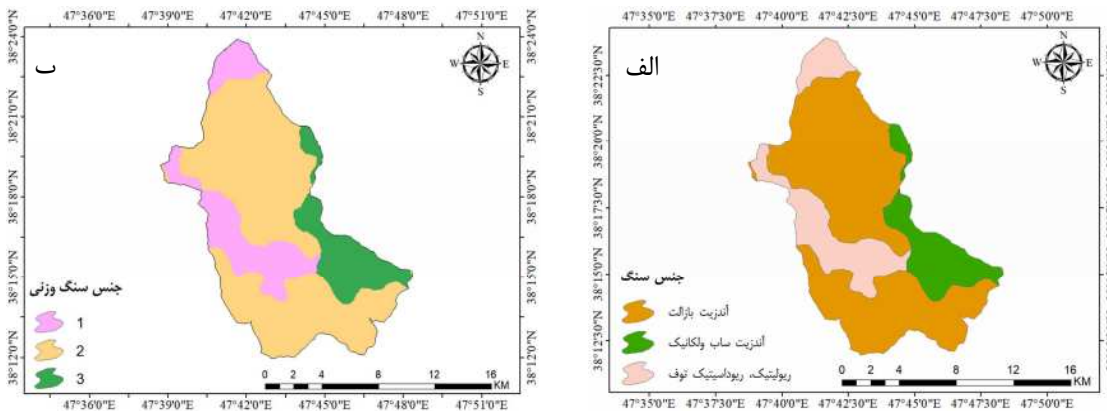
شکل ۵: الف) نقشه انحناء دامنه حوضه آبخیز خیابوچای، ب) نقشه وزنی انحناء دامنه حوضه آبخیز خیابوچای. منبع: یافته‌های پژوهش

نوع پوشش زمین و فعالیت‌های انسانی نقش مهمی در وقوع و کنترل سیلاب ایفا می‌کنند. وضعیت کاربری اراضی حوضه آبخیز خیابوچای، 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 به ترتیب برابر با (۱/۳۸، ۴۸/۱۶، ۷۷/۸۷، ۲۲/۶۴، ۱/۳۳) کیلومتر مربع 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، به‌دلیل سطوح نفوذناپذیری مانند آسفالت و بتن، بیشترین تأثیر را بر وقوع سیلاب دارند. پس از آن، مناطق کم‌تراکم، به‌ویژه در مرکز و جنوب حوضه، به‌دلیل 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، درحالی‌که نواحی شهری، رخنمون‌های سنگی و زمین‌های بایر بیشترین امتیاز را به خود اختصاص داده‌اند.



شکل ۶: نقشه کاربری اراضی حوضه آبخیز خیاوچای، (ب) نقشه وزنی کاربری اراضی حوضه آبخیز خیاوچای. منبع: یافته‌های پژوهش

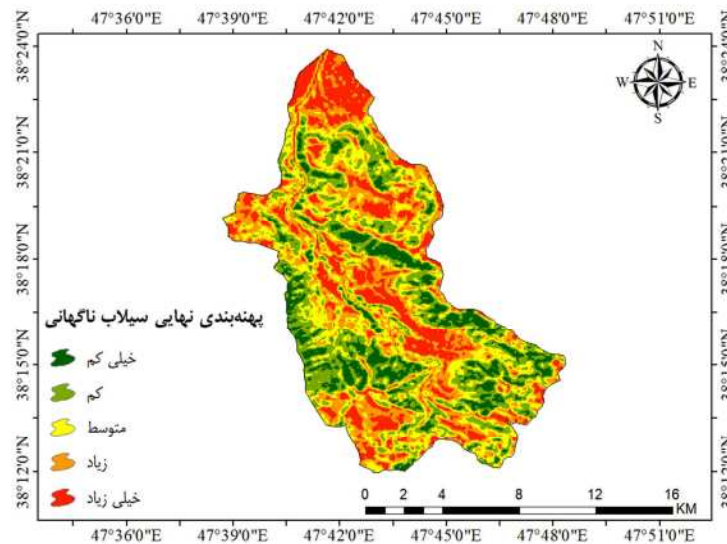
نوع سنگ تأثیر مستقیمی بر نفوذپذیری، مقاومت در برابر فرسایش و جریان آب دارد. مطابق (شکل ۷، الف)، در حوضه آبخیز خیاوچای سه نوع سنگ شامل اندزیت بازالت، اندزیت ساب‌ولکانیک و ریولیتیک ریوداسیتیک توف شناسایی شده است. این سنگ‌ها بیشتر از نوع آذرین سخت تا اسیدی هستند و بخش غالب سازند زمین‌شناسی منطقه را تشکیل 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.



شکل ۷: نقشه جنس سنگ حوضه آبخیز خیاوچای، (ب) نقشه وزنی جنس سنگ حوضه آبخیز خیاوچای. منبع: یافته‌های پژوهش

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 کیلومتر مربع، 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

قرار دارند، به ترتیب دارای مساحت ۳۳/۶۰، ۳۳/۹۳ و ۳۴/۱۸ کیلومتر مربع هستند. در مقابل، نواحی با خطر سیلابی بسیار کم بیشتر در نوارهای غربی، شرقی، جنوب شرقی و برخی بخش‌های نیمه شمالی حوضه به صورت پراکنده دیده می‌شوند. این مناطق که حدود ۱۷/۳۶ کیلومتر مربع (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.



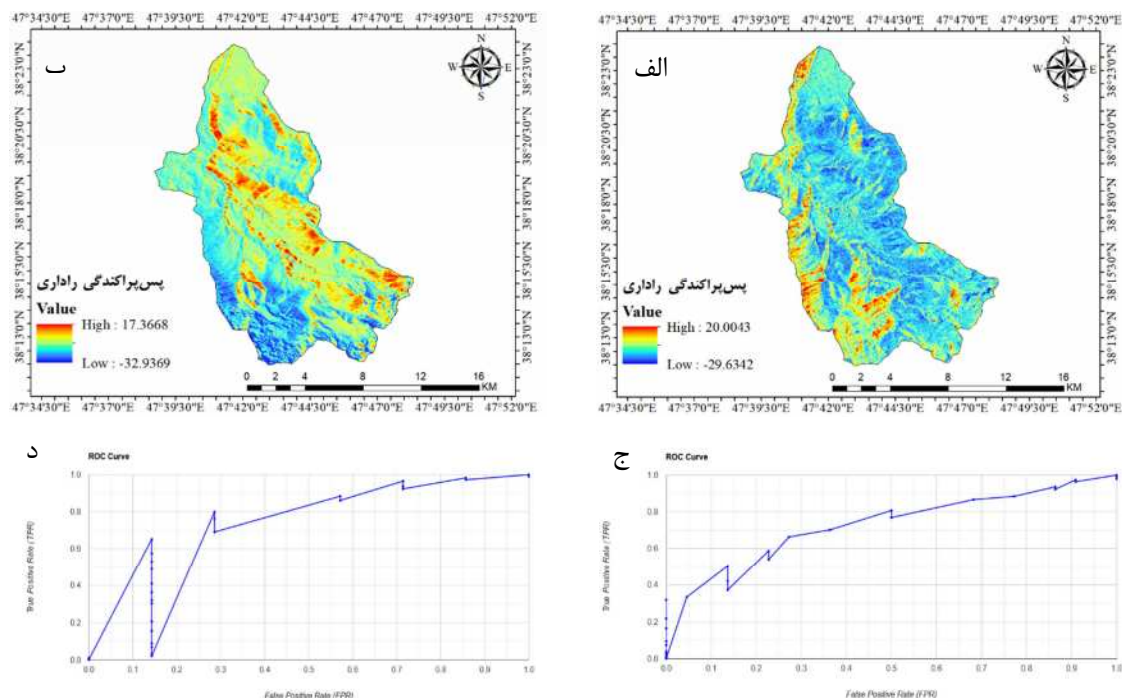
شکل ۸: نقشه نهایی سیلاب ناگهانی حوضه آبخیز خیاوچای. منبع: یافته‌های پژوهش

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

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 رخ داده 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 شمال غرب و جنوب غرب 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 دوباره از ۴ مترمکعب بر ثانیه فراتر رفته بود، الگوی تأثیر سیلاب تغییر کرد. در این دوره، مناطق جنوب غربی بیشترین تأثیر را از سیلاب

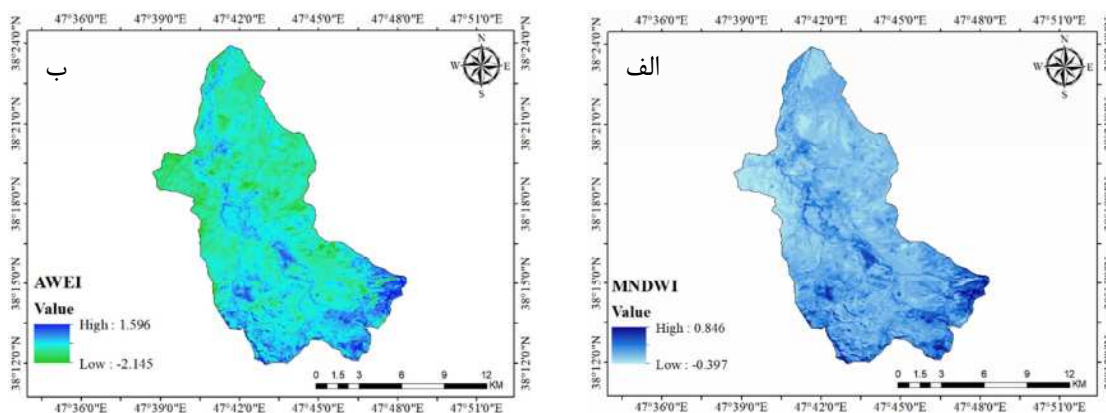
پذیرفتند و مقدار بازتاب راداری برای این نواحی به $32/93$ - دسی بل کاهش یافت که نشان‌دهنده پوشش آبی در این منطقه بود. برعکس، مناطق مرکزی این بار جزو نواحی خشک محسوب شده و مقدار بازتاب انرژی در آن‌ها به $17/36$ دسی بل افزایش یافت. در اشکال (ج) و (د)، عملکرد مدل MFFPI با استفاده از منحنی ROC بررسی شده است. نتایج این تحلیل نشان داد که مدل توانایی نسبتاً خوبی در تفکیک مناطق سیلابی از نواحی خشک دارد، به‌طوری‌که مقدار AUC برای دوره اول $0/738$ و برای دوره دوم $0/725$ به‌دست آمد. این مقادیر نشان‌دهنده دقت قابل‌قبول مدل در پیش‌بینی نواحی مستعد سیلاب است.

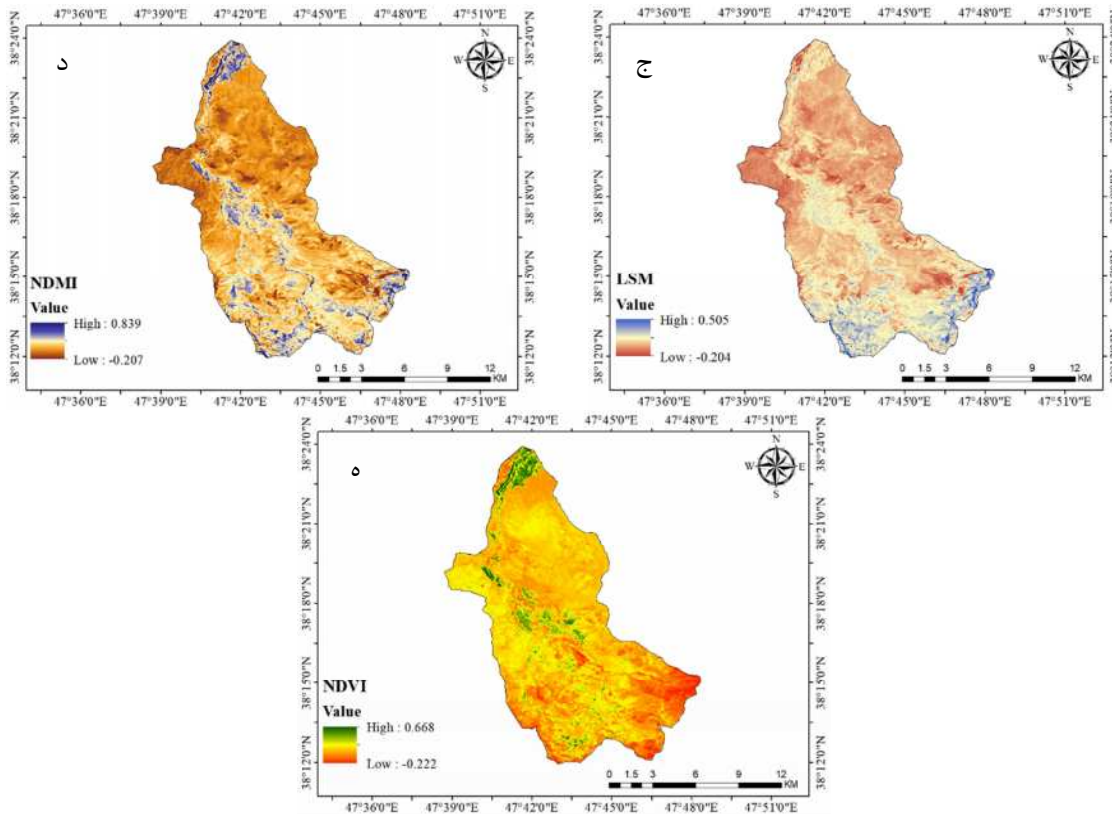


شکل ۹: نقشه الف) وضعیت سیلاب مؤرخه $2020/07/14$ ، ب) سیلاب مؤرخه $2020/06/06$ ، ج) منحنی ROC برای مقایسه مدل MFFPI با سیلاب مؤرخه $2020/07/14$ ، د) منحنی ROC برای مقایسه مدل MFFPI با سیلاب مؤرخه $2020/06/06$. منبع: یافته‌های پژوهش

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 $2023-2013$ 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 $0/846$ 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 یادشده 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 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 خیابچای 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 قابل‌توجهی برای تولید رواناب در هنگام بارش‌های شدید دارند. در مقابل، در نیمه شرقی و غربی حوضه، رطوبت خاک و پوشش گیاهی به‌طور 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 به‌طور قابل‌توجهی 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، به‌ویژه 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.





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

تحلیل هم‌بستگی MFFPI با شاخص‌های طیفی در جدول ۳، نشان می‌دهد که این شاخص با MNDWI و AWEI به ترتیب با مقدار $-0/089$ و $-0/036$ 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 $0/075$ ، $0/094$ و $0/156$ 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.

جدول ۳: همبستگی مقادیر شاخص‌های طیفی مورد مطالعه با میزان سیلاب ناگهانی در حوضه آبخیز خیابچای. منبع: یافته‌های پژوهش

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

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که حوضه آبخیز خیابچای تحت تأثیر عواملی چون شیب زمین، تراکم جریان، نوع خاک، انحنا، 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 انحنا، 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، به دلیل 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 به‌دست 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.

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، لیل. (۱۳۹۹). تهیه نقشه مدیریت مخاطرات سیلاب با استفاده از الگوریتم نوین جنگل تصادفی (مطالعه موردی: حوضه آبخیز لواسانات). مدیریت مخاطرات محیطی، ۷(۲)، صص: ۱۸۱-۱۹۶. <https://doi.org/10.22059/jhsci.2020.307476.584>
- اسماعیلی، رضا؛ طاهری، محمد. (۱۴۰۱). ارزیابی مناطق مستعد خطر سیلاب با نگرش فازی، مطالعه موردی: پایین‌دست حوضه آبریز نکا، استان مازندران. مخاطرات محیط طبیعی، ۱۱(۳۴)، صص: 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)، صص: 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: حوضه اسلام‌آباد غرب). مدیریت مخاطرات محیطی، ۶(۲)، صص: 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: حوضه قصرشیرین). جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، ۳۱(۲)، صص: 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)، صص: ۲۳۹-۲۵۴. <https://doi.org/10.22069/jwsc.2019.15306.3053>
- رضایی مقدم، محمد حسین؛ کرمی، فریبا، ابادری، کلثوم. (۱۴۰۲). ارزیابی و پهنه‌بندی خطر سیلاب ناگهانی در حوضه 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؛ شفیع مهر، مجید. (۱۴۰۰). پهنه‌بندی خطر سیلاب در حوضه آبریز شهر چای میانه با استفاده از مدل ویکور. هیدروژئومورفولوژی، ۸(۲۸)، صص: 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: حوضه آبخیز قره‌سو). جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۹(۴)، ۱۴۵-۱۶۱. <https://doi.org/10.22067/geoh.2021.67026.0>
- عابدینی، موسی؛ بابایی اولم، طیبه؛ پاسبان، امیرحسام. (۱۴۰۳). ارزیابی و پهنه‌بندی خطر وقوع سیلاب با استفاده از مدل MFFPI (مطالعه موردی: حوضه آبخیز شفارود، استان گیلان). جغرافیا و روابط انسانی، ۷(۱)، صص: 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)، صص: ۶۸-۸۴. https://www.srds.ir/article_214387.html
- غیاثی، سیدسعید؛ 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)، صص: ۱۴۰-۱۵۴. <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2017.109697>
- فرضی، حامد؛ بیات، اصغر؛ وکیلی‌تجره، فرزانه؛ رحمانی، مجید؛ اسدی‌نلیوان، 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)، صص: ۱-۱۱. <http://jwmsei.ir/article-1-1029-fa.html>
- فلاح، فاطمه؛ زینی‌وند، 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)، صص: ۱۵۳-۱۶۶. https://arwe.lu.ac.ir/article_711979.html
- قره‌خانی، مهدی؛ آقامحمدی، حسین؛ وحیدنیا، محمدحسن. (۱۴۰۱). تعیین محدوده خطر سیلاب با استفاده از تحلیل مکانی هیدرولوژیک در GIS و تفسیر تصاویر ماهواره‌ای: مطالعه موردی حوضه آبریز اهرچای. پایدار، توسعه و محیط زیست، ۲(۳)، ۶۷-۸۶. <https://sanad.iau.ir/fa/Article/846656>
- قهرمان، کاوه؛ زنگنه‌اسدی، 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)، صص: ۱۰۳-۱۱۸. <http://dori.net/dor/20.1001.1.24237892.1401.9.3.7.7>
- کاکاوند، مانده؛ حقی‌زاده، علی؛ سلیمانی‌مطلق، مهدی. (۱۴۰۳). مقایسه شاخص‌های سنجش‌ازدور در تعیین پهنه سیل حوضه آبخیز دواب و یسیان. مخاطرات محیط طبیعی، ۱۳(۴۰)، صص: ۴۱-۵۶. <https://doi.org/10.22111/jneh.2023.46291.1978>
- معیری، مسعود؛ انتظاری، مژگان. (۱۳۸۷). سیلاب و مروری بر سیلاب‌های استان اصفهان. مطالعات برنامه‌ریزی سکونتگاه‌های انسانی (چشم‌انداز جغرافیایی)، ۳(۶)، صص: 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 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., Irimuş, I.-A., Vasile, D., Rusu, R., & Roşca, 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](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., Kothiyari, 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>

Microbial diversity response to changes in physical and chemical properties of soil caused by water erosion in the Dehbakari watershed, Kerman province

Morteza Saberi^{1*} , Mostafa Nori², Mahdieh Ebrahimi³

1. **Corresponding Author**, Associate Professor, Rangeland and Watershed Management Department, Faculty of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran **Email:** Mortezasaberi@uoz.ac.ir **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-1596-9714>
2. MSc of Watershed Management, Department of Range and Watershed Management, Faculty of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran
3. Associate Professor, Rangeland and Watershed Management Department, Faculty of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article Article history: Received: 19 April 2025 Revised: 31 May 2025 Accepted: 07 June 2025 Published: 22 June 2025 Keywords: Soil multifunctional properties, Soil erosion , Enzyme activity, Soil microbial diversity.	The lack of sufficient data in this field poses a major challenge in assessing the true effects of erosion on natural ecosystem services and the restoration of degraded environments. In this study, the relationship between microbial diversity and water erosion-induced changes in soil physical and chemical properties was investigated in the Gavor rangeland-forest land in Kerman province. Soil sampling (0-30 cm depth) was conducted based on a factorial experiment in a completely randomized design using two transects in four conditions including no erosion, low erosion, moderate erosion and severe erosion in three plots. The experimental factors included working unit (2 units), slope direction (2 directions) and erosion degree (4 degrees). Three replicate plots with specific dimensions were established for each condition. Soil physical and chemical factors were measured to evaluate the overall soil performance including bulk density, soil moisture content, acidity, dissolved organic carbon and nitrogen, total nitrogen and phosphorus, ammonium (NH₄⁺), nitrate (NO₃⁻), available phosphorus and potassium, net mineralized carbon, and net mineralized nitrogen. Soil biological indicators were measured including soil enzymatic activity, microbial biomass carbon and nitrogen, microbial population, soil microbial quotient, and basal microbial respiration. The results of the analysis of variance indicated significant differences in most of the physical, chemical, and biological properties of the soil. With increasing soil erosion intensity, no significant differences were observed in soil acidity, inorganic-organic carbon, nitrate, and ammonium ($p > 0.01$). Soil erosion caused significant changes in the edaphic properties of the working unit and reduced the soil's multifunctional properties. The maximum soil moisture content, organic nitrogen, organic carbon, total phosphorus, available potassium, and ammonium were related to plots without erosion. With increasing erosion degree, the values of these parameters showed a significant decrease ($p < 0.01$). Soil erosion has a significant effect on soil net mineralized nitrogen ($p > 0.01$), so the highest amount of net mineralized nitrogen was measured in plots without erosion, and the lowest amount was related to plots with severe erosion. The results showed that the values of all biological parameters measured in soils with severe erosion degrees were significantly lower than those in soils without erosion and with low erosion. The highest correlation of biological indicators was with the values of carbon and inorganic nitrogen, phosphorus, and total potassium. Overall, changes in soil microbiota characteristics were strongly correlated with erosion-induced changes in some of the soil's physical and chemical properties. These results indicate that soil erosion has a significant negative impact on soil microbial and functional properties.

How to Cite: Saberi, M. , Nori, M. and Ebrahimi, M. (2026). Microbial diversity response to changes in physical and chemical properties of soil caused by water erosion in the Dehbakari watershed, Kerman province. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 15 (48), 93-116.



© The Author/Authors

DOI: 10.22111/jneh.2025.51723.2110

Publisher: University of Sistan and Baluchestan

EXTENDED ABSTRACT

INTRODUCTION

An important indicator for evaluating the health and sustainability of natural ecosystems is the condition of soil nutrients. Understanding changes in soil physical, chemical, and biological properties caused by various processes is crucial for assessing their roles in nutrient cycling and mitigating the adverse effects of ecosystem mismanagement (Ai et al., 2018). One of the most evident consequences of erosion in rangeland ecosystems is soil degradation, which significantly reduces the land's productivity (Zeng et al., 2017), disrupts ecosystems and their services and hinders economic development (Calvo de Anta et al., 2020). As a result, many United Nations Sustainable Development Goals (SDGs) are directly linked to soil functionality (Yan et al., 2015).

This underscores the need to understand soil quality and its underlying processes for sustainable development and in addressing challenges such as climate change mitigation, water management, vegetation loss, and biodiversity conservation (Ferreira et al., 2018; Grilli et al., 2021).

In this study, the relationship between microbial diversity and water erosion-induced changes in soil physical and chemical properties was investigated in the Gavor rangeland–forestland as a working unit to test the following hypotheses:

- * Water erosion significantly affects the biological characteristics and biodiversity of soil in the Dehbakari Watershed by altering its physical and chemical properties.
- * Dissolved organic carbon shows the highest correlation with biological characteristics at erosion-affected sites in the study area.

DATA AND METHODS

Soil samples (0–30 cm depth) were collected using a completely randomized design along the main slope, with two transects covering four erosion conditions: no erosion, low erosion, moderate erosion, and severe erosion. Three replicate plots with specific dimensions were established for each condition. Furrow erosion was identified as the dominant form of erosion in the basin.

To assess soil performance, physical and chemical properties were measured, including bulk density, soil moisture content, pH, organic carbon, total nitrogen and phosphorus, ammonium (NH_4^+), nitrate (NO_3^-), available phosphorus and potassium, net mineralized carbon, and net mineralized nitrogen. Biological indicators included soil enzymatic activity, microbial biomass carbon and nitrogen, microbial population, microbial quotient, and basal microbial respiration.

All data were analyzed using one-way ANOVA in SPSS software, with three replicates per treatment.

RESULTS AND DISCUSSION

Soil samples (0–30 cm depth) were collected using a completely randomized design along the main slope, with two transects covering four erosion conditions: no erosion, low erosion, moderate erosion, and severe erosion. Three replicate plots with specific dimensions were established for each condition. Furrow erosion was identified as the dominant form of erosion in the basin.

To assess soil performance, physical and chemical properties were measured, including bulk density, soil moisture content, pH, organic carbon, total nitrogen and phosphorus, ammonium (NH_4^+), nitrate (NO_3^-), available phosphorus and potassium, net mineralized carbon, and net mineralized nitrogen. Biological indicators included soil enzymatic activity, microbial biomass carbon and nitrogen, microbial population, microbial quotient, and basal microbial respiration.

All data were analyzed using one-way ANOVA in SPSS software, with three replicates per treatment.

RESULTS AND DISCUSSION

The analysis of variance indicated significant differences in most soil physical, chemical, and biological properties. As erosion intensity increased, no significant differences were observed in soil pH, inorganic carbon, nitrate, and ammonium ($P > 0.01$). However, erosion significantly altered edaphic properties and reduced overall soil multifunctionality. Maximum values of soil moisture, organic nitrogen, organic carbon, total phosphorus, available potassium, and ammonium were found in non-eroded plots. These values declined significantly as erosion intensity increased ($P < 0.01$). Although soil erosion did not have a statistically significant effect on net mineralized nitrogen ($P > 0.01$), its highest values were measured in plots without erosion and the lowest in plots with severe erosion. Biological parameters, including microbial biomass, enzymatic activity, and population, were significantly reduced in severely eroded soils compared to non-eroded and slightly eroded sites. These biological parameters were most strongly correlated with the levels of organic carbon, inorganic nitrogen, phosphorus, and total potassium. The results confirm that erosion significantly affects the structure and function of soil microbial communities. Increased erosion intensity negatively impacts all categories of soil quality, leading to a decline in soil biodiversity and function. Previous studies have shown that erosion contributes to structural degradation, nutrient depletion, reduced water retention, and decreased yield (Li et al., 2015).

Despite this, the impact of erosion on microbial communities has received less attention (Qiu et al., 2021). The loss of organic matter, nutrients, and moisture observed in the study area appears to directly contribute to the decline in microbial diversity and function. Limited access to these resources restricts bacterial metabolism and alters community composition (Banerjee et al., 2020), disrupting essential soil microbial functions (Chen et al., 2020). These findings are consistent with those of Qiu et al. (2021) and Li et al. (2015).

CONCLUSION

Overall, the findings of this study demonstrate that soil biological parameters are strongly influenced by land use and slope. These factors affect microbial community structure and, in turn, influence soil properties and development. Improper ecosystem management and erosion lead to a decline in available nutrients, which plays a key role in reducing microbial biomass, enzyme activity, and microbial populations. To prevent further degradation in erosion-prone areas, the implementation of effective conservation and soil management strategies is highly recommended.

ETHICAL CONSIDERATIONS

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

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

ACKNOWLEDGMENTS

The authors gratefully acknowledge the financial support provided by the University of Zabol (Grant code: IR-UOZ-GR-8721) for this research.

REFERENCES

References [in English]

- Ai, M., Sun, Y., Yan, B., & Wei, Y. (2018). A summary of the impact of land degradation on soil carbon sequestration. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 394(5), 052028. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/394/5/052028>.
- Banerjee, S., Misra, A., Sar, A., Pal, S., Chaudhury, S., & Dam, B. (2020). Poor nutrient availability in opencast coalmines influences microbial community composition and diversity in exposed and underground soil profiles. *Applied Soil Ecology*, 152, 103544. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103544>.

- Calvo de Anta, R., Luísa, E., Febrero-Bande, M., Galiñanes, J., Macías, F., Ortíz, R., & Casas, F. (2020). Soil organic carbon in peninsular Spain: Influence of environmental factors and spatial distribution. *Geoderma*, 370, 114365. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114365>
- Chen, Q., Dong, J., Zhu, D., Hu, H., Delgado-Baquerizo, M., Ma, Y., He, J.-Z., & Zhu, Y.-G. (2020). Rare microbial taxa as the major drivers of ecosystem multifunctionality in long-term fertilized soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 141, 107686. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2019.107686>
- Grilli, E., Carvalho, S. C. P., Chiti, T., Coppola, E., Ascoli, R. D., La Mantia, T., Marzaioli, R., Mastrocicco, M., Pulido, F., Rutigliano, F. A., Quatrini, P., & Castaldi, S. (2021). Critical range of soil organic carbon in southern Europe lands under desertification risk. *Journal of Environmental Management*, 287, 112285. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112285>
- Li, Z., Xiao, H., Tang, Z., Huang, J., Nie, X., Huang, B., Ma, W., Lu, Y., & Zeng, G. (2015). Microbial responses to erosion-induced soil physico-chemical property changes in the hilly red soil region of southern China. *European Journal of Soil Biology*, 71, 37–44.
- Qiu, L., Zhang, Q., Zhu, H., Reich, P. B., Banerjee, S., van der Heijden, M. G., Sadowsky, M. J., Ishii, S., Jia, X., Shao, M., & Liu, B. (2021). Erosion reduces soil microbial diversity, network complexity and multifunctionality. *The ISME Journal*, 15(8), 2474–2489.
- Yan, X., & Cai, Y. L. (2015). Multi-scale anthropogenic driving forces of karst rocky desertification in southwest China. *Land Degradation & Development*, 26, 193–200.

مجله علمی پژوهشی مخاطرات محیط طبیعی، دوره ۱۵، شماره ۴۸، شماره پیاپی ۰۲، تیر ۱۴۰۵

پاسخ تنوع میکروبی به تغییرات خصوصیت‌های فیزیکی و شیمیایی خاک ناشی از فرسایش آبی در حوضه آبخیز دهبکری، استان کرمان

مرتضی صابری^{۱*}، مصطفی نوری^۲، مهدیه ابراهیمی^۳

۱. دانشیار، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران (نویسنده مسئول)

ایمیل: Mortezasaberi@uoz.ac.ir / ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1596-9714>

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد آبخیزداری، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران

۳. دانشیار، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۳۰ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۳/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۱۷ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۳/۱۶ واژه‌های کلیدی: خصوصیت‌های چند عملکردی خاک، فرسایش خاک، فعالیت آنزیمی، تنوع میکروبی خاک.	نبود اطلاعات کافی در زمینه تأثیر فرسایش بر عملکرد خاک و جوامع میکروبی موجود در آن مانع بزرگی در ارزیابی تأثیر واقعی فرسایش بر خدمات اکوسیستم‌های طبیعی و احیاء محیط‌های فرسوده می‌باشد. در این مطالعه رابطه تنوع میکروبی و تغییرات خصوصیت‌های فیزیکی و شیمیایی خاک ناشی از فرسایش آبی در اراضی مرتعی - جنگلی گوور استان کرمان بررسی شد. نمونه‌برداری خاک (عمق ۰-۳۰ سانتی‌متر) برپایه آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با استفاده از دو ترانسکت در چهار وضعیت شامل بدون فرسایش، فرسایش کم، فرسایش متوسط و شدید در سه پلات انجام شد. فاکتورهای آزمایش شامل واحدکاری (۲ واحد)، جهت شیب (۲ جهت) و درجه فرسایش (۴ درجه) بودند. پارامترهای فیزیکی و شیمیایی خاک شامل وزن مخصوص ظاهری، محتوی رطوبت خاک، اسیدیته، کربن و نیتروژن آلی محلول، نیتروژن و فسفر کل، آمونیوم (NH_4^+)، نترات (NO_3^-)، فسفر و پتاسیم قابل‌دسترس، کربن و نیتروژن کل برای ارزیابی عملکرد کلی خاک اندازه‌گیری شد. شاخص‌های زیستی خاک شامل فعالیت آنزیمی خاک، کربن و نیتروژن زیتوده میکروبی، جمعیت میکروارگانیسم‌ها، سهم میکروبی خاک و تنفس میکروبی پایه اندازه‌گیری گردید. نتایج تجزیه واریانس داده‌ها حاکی از تفاوت معنی‌دار اکثر خصوصیت‌های فیزیکی و شیمیایی و زیستی خاک بود. با افزایش شدت فرسایش خاک تنها در اسیدیته خاک، کربن آلی محلول، نترات و آمونیوم تفاوت معنی‌دار مشاهده نشد ($p > 0.01$). فرسایش خاک باعث تغییرات آماری معنی‌دار در خصوصیت‌های خاک و کاهش خصوصیت‌های چند عملکردی خاک شد ($p > 0.01$). بیشترین محتوی رطوبت خاک، نیتروژن آلی، کربن آلی، فسفر کل، پتاسیم قابل‌دسترس و آمونیوم مربوط به پلات‌های بدون فرسایش بود و با افزایش درجه فرسایش مقادیر این پارامترها کاهش معنی‌دار را نشان داد ($p < 0.01$). فرسایش خاک اثر معنی‌داری در نیتروژن آلی محلول خاک داشت ($p > 0.01$)، به‌طوری‌که بیشترین میزان نیتروژن آلی محلول در پلات‌های بدون فرسایش اندازه‌گیری شد و کمترین مقدار مربوط به پلات‌های با فرسایش شدید بود. نتایج نشان داد که مقدار تمام پارامترهای زیستی اندازه‌گیری‌شده در خاک‌های با درجه فرسایش شدید به‌طور معنی‌داری کمتر از خاک‌های بدون فرسایش و فرسایش کم بود. به‌طورکلی، تغییرات در ویژگی‌های میکروبیوتای خاک به شدت با تغییرات ناشی از فرسایش در چند خصوصیت - فیزیکی و شیمیایی خاک مرتبط بود. این نتایج با هم نشان می‌دهد که فرسایش خاک تأثیر منفی قابل‌توجهی بر ویژگی‌های میکروبی و عملکردی خاک دارد.

استناد: صابری، مرتضی، نوری، مصطفی و ابراهیمی، مهدیه. (۱۴۰۵). پاسخ تنوع میکروبی به تغییرات خصوصیت‌های فیزیکی و شیمیایی خاک ناشی از فرسایش آبی در حوضه آبخیز دهبکری، استان کرمان. *مخاطرات محیط طبیعی*، ۱۵ (۴۸)، ۹۳-۱۱۶.

ناشر: دانشگاه سیستان و بلوچستان

© نویسنده/ نویسندگان

DOI: 10.22111/jneh.2025.51723.2110



مقدمه

یکی از اثرات بارز فرسایش در اکوسیستم‌های مرتعی، تخریب کیفیت خاک است که بهره‌وری بالقوه زمین را بیش از ۸۰ درصد کاهش می‌دهد (بورلی^۱ و همکاران، ۲۰۱۹؛ زنگ^۲ و همکاران، ۲۰۱۷) و باعث تخریب بالغ بر درصد خاک این اکوسیستم‌ها و خدمات مربوط به آن می‌شود، به‌طوری‌که توسعه اقتصادی را در این مناطق دچار مشکل می‌سازد (کالوو ده آنتا^۳ و همکاران، ۲۰۲۰). پیش‌بینی می‌شود تخریب خاک اکوسیستم‌های طبیعی تا سال ۲۰۵۰ به ۹۰ درصد برسد (سازمان ملل متحد^۴، ۲۰۱۹). به همین دلیل در سال ۲۰۱۵، سازمان ملل متحد اهداف توسعه پایدار^۵ (SDGs) را تصویب کرد و بسیاری از این اهداف به عملکردهای خاک مرتبط هستند (یان^۶ و همکاران، ۲۰۱۵). این موضوع اهمیت درک کیفیت خاک و فرآیندهای موثر بر آن برای توسعه اقتصادی پایدار و موضوعاتی مانند کاهش تغییرات آب‌وهوایی، مدیریت منابع آب، پوشش گیاهی و تنوع زیستی را نشان می‌دهد (گریلی^۷ و همکاران، ۲۰۲۱).

رابطه بین فرسایش خاک و تنوع زیستی موجود در آن یک رابطه چندوجهی است. فرسایش خاک به شکل وسیعی به‌عنوان یکی از تهدیدات اصلی خاک شناخته شده است. در سطح جهانی، در هر هکتار سالانه حدود ۲/۸ تن خاک از دست می‌رود (اورجیاتزی^۸ و همکاران، ۲۰۱۸)، درحالی‌که نرخ تشکیل خاک بسیار کمتر از این مقدار می‌باشد. هدررفت خاک، جمعیت و فعالیت میکروارگانیسم‌های ساکن خاک را به‌شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. درعین‌حال، تنوع عظیم گونه‌هایی که در خاک زندگی می‌کنند بر پایداری خاک و همچنین نفوذ آب از طریق فعالیت‌های حرکتی و تغذیه‌ای تأثیر می‌گذارد. بنابراین، تنوع زیستی خاک قطعا در فرآیند فرسایش و هدررفت خاک نقش دارد. در حال حاضر ارزیابی‌های متعددی از فرسایش خاک و توزیع تنوع زیستی خاک موجود است (ده وریس^۹ و همکاران، ۲۰۱۸). با این وجود، روابط علمی بین تنوع زیستی خاک و فرسایش، در هر دو جهت، ضعیف مورد بررسی قرار گرفته است. باتوجه به این که فرسایش آبی یک فرایند انتخابی است و باعث انتقال کربن آلی و ذرات ریزدانه خاک از مناطق فرسایش‌یافته به سمت مناطق کم‌شیب و رسوبی می‌شود (وو^{۱۰} و همکاران، ۲۰۲۴). بنابراین باعث تغییر بافت خاک در مناطق فرسایش‌یافته و رسوبی خواهد شد و به‌دنبال آن مقدار کربن در مناطق رسوبی افزایش خواهد داشت (سلطانی طولارود و اصغری، ۱۴۰۰). تغییر در بافت خاک و قابلیت دسترسی به عناصر مغذی منجر به تغییرات قابل‌ملاحظه‌ای در فراوانی و ترکیب جوامع میکروبی خاک و همچنین فعالیت آنزیم‌ها در مکان‌های فرسایش‌یافته و رسوبی خواهد شد (سالم^{۱۱} و ژوسِت، ۲۰۱۹). میکروارگانیسم‌های موجود در خاک نقش اساسی در فرایندهای بیوشیمیایی مانند تجزیه مواد آلی و معدنی شدن مواد غذایی در خاک دارند؛ بنابراین، در میزان دی‌اکسیدکربن ورودی و خروجی و پایداری اکوسیستم تأثیرگذار هستند. میکروارگانیسم‌های موجود در خاک آنزیم‌های زیادی آزاد می‌کنند که در مقایسه با خصوصیت‌های فیزیکی و شیمیایی خاک به تغییرات محیطی بسیار حساس می‌باشند و

¹ Borrelli² Zeng³ Calvo de Anta⁴ UN⁵ Sustainable Development Goals⁶ Yan⁷ Grilli⁸ Orgiazzi⁹ De Vries¹⁰ Wu¹¹ Saleem & Jousset

شاخص مناسبی برای مطالعه پایداری اکوسیستم‌ها در برابر تغییرات و آشوب‌های محیطی می‌باشند (لی^۱ و همکاران، ۲۰۱۹؛ کیو^۲ و همکاران، ۲۰۲۱) و در این زمینه، فرسایش خاک یکی از رایج‌ترین آشوب‌ها در اکوسیستم‌های خشک است که بر دینامیک میکروارگانیسم‌های خاک و به‌دنبال آن پایداری کربن تاثیر می‌گذارد (کیو و همکاران، ۲۰۲۱).

لی و همکاران (۲۰۱۵) در مطالعه‌ای پاسخ میکروبی خاک به تغییرات خواص فیزیکی و شیمیایی خاک ناشی از فرسایش آبی در جنوب چین گزارش نمودند که محل رسوب‌گذاری دارای فعالیت زیتوده میکروبی و آنزیمی بیشتری نسبت به سایر مکان‌های فرسایشی است. آنها نتیجه گرفتند که تمام پارامترهای فیزیکی و شیمیایی باهم ۷۹/۶ درصد تغییرات در جامعه باکتریایی را تشکیل می‌دهند. در میان این پارامترها، کربن آلی محلول اثر غالب بر تغییرات را نشان داد، درحالی‌که کربن آلی خاک و نیتروژن کل به‌صورت جداگانه به‌ترتیب تنها ۳ و ۲/۵ درصد از تغییرات در جامعه باکتریایی را تشکیل دادند. کیو و همکاران (۲۰۲۱) در بررسی تاثیر فرسایش آبی بر تنوع میکروبی خاک در استان هیلونگجیانگ^۳ چین گزارش کردند که پلات‌های فرسایش‌یافته دارای پیچیدگی شبکه میکروبی کمتر، گونه‌های میکروبی کمتر و همبستگی کمتری در میان گونه‌های میکروبی نسبت به پلات‌های بدون فرسایش بودند. فرسایش خاک همچنین ترکیب جامعه میکروبی را با کاهش فراوانی نسبی فیلاهای غالب مانند *Proteobacteria*، *Bacteroidetes* و *Gemmatimonadetes* تغییر داد. در مقابل، فرسایش منجر به افزایش فراوانی نسبی برخی از خانواده‌های باکتریایی درگیر در چرخه N، مانند *Acetobacteraceae* و *Beijerinckiaceae* شد. نتایج این محققان نشان داد که فرسایش خاک تأثیر منفی قابل‌توجهی بر تنوع میکروبی و عملکرد خاک دارد. سلطانی طولارود و اصغری (۲۰۲۱) در مطالعه خود اثر شیب و جهت بر شاخص‌های میکروبی خاک در دو کاربری مرتع و جنگل در شهرستان آستار در استان گیلان را بررسی نمودند که کلیه پارامترهای زیستی مورد مطالعه در اراضی جنگلی به‌طور معنی‌داری بیشتر از اراضی مرتعی بود. در شیب‌های شمالی در مقایسه با شیب‌های جنوبی سهم میکروبی خاک حداکثر مقدار بود. آنها گزارش کردند که تنفس میکروبی پایه خاک بیشترین همبستگی را با کربن زیتوده میکروبی داشت.

بالعکس مطالعات فراوان، در خصوص تاثیر فرسایش آبی بر خصوصیت‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، اما در زمینه رابطه میان فرسایش و فرایندهای زیستی خاک و تاثیر آنها بر معدنی شدن کربن، اطلاعات زیادی موجود نیست. بدین منظور ضروری است تاثیر تغییرات خصوصیت‌های خاک ناشی از پدیده‌هایی چون فرسایش بر تنوع میکروبی خاک مورد بررسی قرار گیرد. این مطالعه با هدف بررسی خواص بیولوژیکی خاک در مکان‌های فرسایش‌یافته و کمی کردن روابط بین پارامترهای فیزیکی و شیمیایی خاک و جوامع میکروبی در مکان‌های فرسایش‌یافته واحد کاری گورو استان کرمان انجام گردید.

داده‌ها و روش‌ها

محدوده مطالعاتی در حوضه آبخیز ده‌بکری (۵۷ درجه و ۵۶ دقیقه طول شرقی و ۲۹ درجه و ۵ دقیقه عرض شمالی) واقع گردیده که در جنوب شرقی استان کرمان و حد فاصل شهرهای بم و جیرفت قرار دارد. منطقه مورد مطالعه

¹ Li

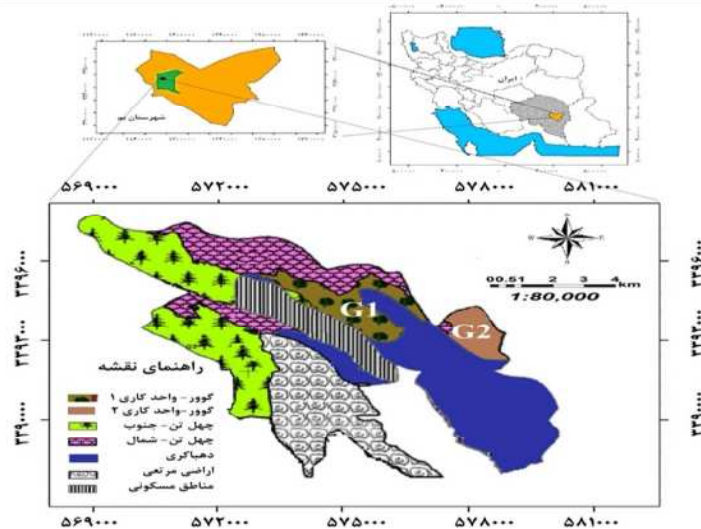
² Qiu

³ Heilongjiang

دارای اقلیم نیمه‌خشک (طبق روش دومارتن) با متوسط بارش ۲۲۰ میلی‌متر در سال است. خاک‌های حوزه دهبکری بیشتر مربوط به رده آلفی سول و آلتی سول هستند. برای مطالعه تاثیر فرسایش در متغیرهای خاک و تاثیر این تغییرات در خواص میکروبیولوژیکی خاک، سایت مرتعی - جنگلی گور که یکی از کانون‌های مهم فرسایش خاک در این حوزه آبخیز هستند، انتخاب شد. موقعیت جغرافیایی و مشخصات کلی واحد کاری مورد مطالعه در جدول ۱ و شکل ۱ نشان داده شده است. منطقه گور (مرتعی - جنگل) در شمال غربی حوزه آبخیز قرار دارد. اراضی مرتعی (مراعی بیلاقی) این منطقه بیشتر تحت مالکیت عشایر بوده و خصوصی بودن زمین‌ها مانعی برای چرای بی‌رویه در این منطقه شده است. اما وجود تپه‌های مارنی و فاقد پوشش گیاهی به‌خصوص در بخش‌هایی که نزدیک جاده‌های خاکی است، باعث فرسایش خاک در بعضی مناطق در این سایت شده است. برای بررسی بهتر تاثیر فرسایش خاک بر خصوصیت‌های زیستی سایت مورد مطالعه، ابتدا نقشه واحد کاری تهیه شد (شکل ۱). هر واحد در این نقشه، پهنه‌هایی تا حد امکان همگن را نشان می‌دهد که با استفاده از تلفیق نقشه‌های ارتفاع، جهت و شیب مستخرج از لایه DEM ۳۰ متری SRTM در نرم‌افزار Arc GIS ۱۰ به‌دست آمده‌اند. در محدوده مورد مطالعه ۱۷ واحد کاری تشخیص داده شد. برای سهولت کار و افزایش دقت نمونه‌برداری در دو واحد کاری (G1 و G2) نزدیک به هم که از نظر جهت شیب شرایط یکسان داشتند، انجام شد.

جدول ۱. مشخصات کلی واحدهای کاری مطالعاتی

درصد مساحت	مساحت (هکتار)	طبقه ارتفاع	جهت	طبقه شیب	واحد کاری
۳/۲۷	۲۴۸/۹۲۷	۱۶۰۰-۲۴۰۰	North	۱۰-۲۵٪	G1
۳/۵۴	۲۶۹/۵۱۱	۲۴۰۰-۲۷۰۰	North	۲۵-۶۵٪	G2



شکل ۱: موقعیت حوزه آبخیز دهبکری، سایت گور و واحدهای کاری (CH1 و CH2). منبع: یافته‌های پژوهش

نمونه‌برداری خاک

این پژوهش به‌صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی انجام شد. فاکتورهای آزمایش شامل واحد کاری (۲ واحد)، جهت شیب (۲ شیب) و درجه فرسایش (۴ درجه) بودند. طول دو شیب انتخاب‌شده زیاد نبود. این دو

شیب به ترتیب ۱۰ متر عرض، ۱۶۰ و ۱۴۸ متر طول داشتند که برای انجام پژوهش‌های علمی قرق شده بودند. طول ترانسکت‌ها با توجه به طول شیب‌های مورد مطالعه ۱۰۰ متر تعیین شد. باتوجه به آن که فرسایش معمولاً در شیب‌ها رخ می‌دهد و شدت آن معمولاً با درجه شیب و فاصله از بالای شیب افزایش می‌یابد (کیو^۱ و همکاران، ۲۰۲۰)، چهار درجه فرسایش در امتداد هر یک از دو شیب/ترانسکت برای نشان دادن شدت‌های مختلف فرسایش خاک تعیین شد. این درجات عبارت از بدون فرسایش، فرسایش خفیف، فرسایش متوسط و فرسایش شدید بودند. از مدول فرسایش محاسبه شده در منطقه براساس مدل RULSE^۲ (معادله جهانی اصلاح شده فرسایش خاک) برای طبقه‌بندی شدت‌های فرسایش استفاده شد. مدول فرسایش در مدل RULSE از داده‌های بارندگی، داده‌های خاک، داده‌های DEM^۳ (مدل ارتفاعی رقومی)، داده‌های NDVI^۴ (شاخص پوشش گیاهی نرمال شده) و داده‌های پوشش زمین محاسبه شده بود. با توجه به مدول فرسایش منطقه، مقدار فرسایش در درجه بدون فرسایش کمتر از $3 \text{ t ha}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ، در فرسایش خفیف $3-5 \text{ t ha a}^{-1}$ ، در فرسایش متوسط $5-15 \text{ t ha a}^{-1}$ و در فرسایش شدید بیشتر از 15 t ha a^{-1} بود. رویشگاه گور به علت قرارگیری در ارتفاعات و وجود قسمت‌های صعب‌العبور از قطع و تخریب توسط مردم در امان مانده است (عباس نژاد، ۱۳۸۵). اراضی این منطقه بیشتر تحت مالکیت خصوصی عشایر بوده و خصوصی بودن زمین‌ها مانعی برای چرای بی‌رویه در این منطقه شده است. بنابراین، فرض بر این شد که شرایط خاک در تمام پلات‌های نمونه‌برداری در هر شیب قبل از فرسایش یکسان بوده و هرگونه تغییر در خواص خاک و پارامترهای میکروبیوتای آن در بین تیمارهای فرسایش را می‌توان به فرسایش خاک نسبت داد.

نمونه‌برداری خاک در پلات‌های (سه عدد پلات برای هر درجه فرسایش) با ابعاد ۱×۱ متر مربع (با توجه به این که محدوده نمونه‌برداری بیشتر با گونه‌های گراس Hordum.sp به شکل مترکم پوشیده شده بودند، این ابعاد در نظر گرفته شد) در طول هر ترانسکت و در هر کدام از چهار وضعیت فرسایش انجام گرفت. تعداد پلات‌ها ۲۴ عدد بود (۲ شیب (ترانسکت) × ۴ درجه فرسایش × ۳ پلات). در هر پلات سه نمونه خاک از عمق ۰-۳۰ سانتی‌متری برداشت شد. نمونه‌های خاک هر پلات با هم ترکیب شده تا یک نمونه مرکب به دست آمد. بخشی از نمونه‌های خاک برای اندازه‌گیری خصوصیت‌های زیستی خاک در فریزر در دمای پایین (۲۵- درجه سانتی‌گراد) به مدت یک هفته نگهداری شدند (محسنی، ۱۳۹۸). از ذوب نمونه‌ها قبل از اندازه‌گیری خصوصیت‌های مدنظر جلوگیری شد. مابقی نمونه‌ها بعد از خشک شدن و عبور از الک برای اندازه‌گیری سایر پارامترهای مورد نظر آماده شدند.

خصوصیت‌های فیزیکی و شیمیایی خاک

در این مطالعه، ۱۳ پارامتر به عنوان خصوصیت‌های چندعملکردی خاک مورد استفاده قرار گرفت. ابتدا نمونه‌های خاک از الک ۰/۲۵ میلی‌متر عبور داده شدند. خصوصیت‌های خاک شامل بافت خاک، وزن مخصوص ظاهری، محتوی رطوبت، اسیدیته، کربن آلی، نیتروژن کل، فسفر کل، آمونیوم (NH_4^+)، نیترات (NO_3^-)، فسفر قابل دسترس، پتاسیم قابل دسترس، کربن آلی محلول و نیتروژن آلی محلول بودند. تمامی این متغیرها اطلاعاتی در مورد طیف وسیعی از فرآیندهای خاک از جمله در دسترس بودن مواد مغذی، چرخه‌های بیوژئوشیمیایی و بهره‌وری میکروبی ارائه می‌دهند.

¹ Qu

² Revised Universal Soil Loess Equation

³ Digital Elevation Model

⁴ Normalized Difference Vegetation Index

درصد ذرات شن، سیلت و رس به روش آنالیز پراش لیزر (وانگ^۱ و همکاران، ۲۰۱۲) تعیین شد. وزن مخصوص ظاهری خاک به عنوان پارامتر موثر در توزیع محتوای کربن با استفاده از مغزه های خاک دست نخورده با به کارگیری سیلندره های با قطر و ارتفاع ۱۵ سانتی متر اندازه گیری شد (بلک^۲ و هارتر^۳، ۱۹۸۶). رطوبت خاک با استفاده از روش وزنی با خشک کردن نمونه های خاک تازه در دمای ۱۰۵ درجه سانتی گراد تا رسیدن نمونه ها به وزن ثابت اندازه گیری شد (کیو و همکاران، ۲۰۲۰).

با توجه به این که خاک های منطقه بیشتر از نوع شور - قلیا بودند، اسیدیته خاک در عصاره خاک: آب (۱:۵) با pH متر اندازه گیری شد (اسپارکز^۳ و همکاران، ۱۹۹۶). کربن کل (TC) و نیتروژن کل (TN) به ترتیب با روش اکسیداسیون دی کرومات والکی^۴ و بلاک (۱۹۳۴) و روش کجلدال^۵ (۱۸۸۳) تعیین شدند. فسفر کل (TP) خاک پس از هضم با اسید سولفوریک و اسید پرکلریک با آنالیز رنگ سنجی اندازه گیری شد (کیو و همکاران، ۲۰۲۰).

آمونیم (NH_4^+) و نیترات (NO_3^-)، با استفاده از یک آنالیزر جریان پیوسته با دستگاه AutoAnalyzer پس از استخراج با ۲ مول بر لیتر KCL اندازه گیری شد (کیو و همکاران، ۲۰۲۰). فسفر قابل دسترس (AP) خاک با روش اولسن تعیین شد. پتاسیم قابل دسترس (AK) با استات آمونیوم خنثی استخراج شد و توسط طیفسنجی جذب اتمی اندازه گیری شد (بروکز^۶ و همکاران، ۱۹۸۵). برای تعیین کربن آلی محلول^۷ (DOC)، نمونه های خاک مرطوب (معادل ۱۵ گرم خاک خشک شده در آون) با ۶۰ میلی لیتر K_2SO_4 نیم مولار (نسبت خاک به محلول ۱:۴) به مدت یک ساعت عصاره گیری شد. پس از سانتریفیوژ کردن در ۴۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۲۵ دقیقه، مایع رویی از طریق یک فیلتر غشایی ۰/۴۵ میلی متری فیلتر شد و در دستگاه آنالیزر، مقدار کربن آلی کل اندازه گیری شد (تیان^۸ و همکاران، ۲۰۱۵). از کسر نمودن مقدار کربن معدنی محلول^۹ (DIC) از کربن محلول کل^{۱۰} (TDC) مقدار کربن آلی محلول (DOC) به دست آمد. برای تعیین نیتروژن آلی محلول^{۱۱} (DON)، ابتدا ۲۰ گرم از خاک مرطوب و کاملاً همگن شده با ۱۰۰ سی سی آب مقطر (نسبت ۱:۵) مخلوط و سوسپانسیون حاصل به مدت ۴ ساعت در شیکر با سرعت ۲۰۰ دور در دقیقه تکان داده شد. بعد از سانتریفیوژ کردن با دور ۸۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۱۰ دقیقه، مایع رویی حاصل از کاغذ صافی عبور و عصاره ها برای اندازه نیتروژن محلول کل^{۱۲} (TDN) استفاده شدند (جونز^{۱۳} و همکاران، ۲۰۰۶). مقدار TDN با استفاده از دستگاه کجلدال اندازه گیری شد (کابریرا^{۱۴} و بی، ۱۹۹۳). میزان نیتروژن معدنی محلول^{۱۵} (DIN) با روش تقطیر با استفاده از دستگاه کجلدال اندازه گیری شدند (کینی^{۱۶} و نلسون، ۱۹۸۲). با کسر نمودن مقادیر DIN از TDN مقادیر DON به دست آمد (جونز و همکاران، ۲۰۰۴).

¹ Wang

² Blake & Hartge

³ Sparks

⁴ Walkley & Black

⁵ Kjeldahl

⁶ Brookes

⁷ Dissolved Organic Carbon

⁸ Tian

⁹ Dissolved Inorganic Carbon

¹⁰ Total Dissolved Carbon

¹¹ Dissolved Organic Nitrogen

¹² Total Dissolved Nitrogen

¹³ Jones

¹⁴ Cabrera & Beare

¹⁵ Dissolved Inorganic Nitrogen

¹⁶ Keeney & Nelson

خصوصیت‌های زیستی خاک

خصوصیت‌های زیستی مورد مطالعه در این پژوهش شامل فعالیت آنزیمی خاک (آنزیم کاتالاز)، کربن زیتوده میکروبی (MBC)، نیتروژن زیتوده میکروبی (MBN)، جمعیت میکروارگانیسم‌ها، سهم میکروبی خاک و تنفس میکروبی پایه بودند. به منظور مطالعه تاثیر فرسایش خاک بر فعالیت‌های آنزیمی خاک، آنزیم کاتالاز خاک با نمونه‌های ۲ گرمی خاک با اضافه کردن ۵ میلی‌لیتر هیدروژن پراکسید ۰/۳ درصد و ۴۰ میلی‌لیتر آب فوق خالص در یک بالن مخروطی ۱۰۰ میلی‌لیتری اصلاح شدند. پس از ۲۰ دقیقه انکوباسیون در دمای ۳۷ درجه سانتی‌گراد، یک میلی‌لیتر محلول آلوم پتاسیم اشباع‌شده به بالن اضافه و سپس فیلتر شد. محلول رویی به وسیله اسپکتروفتومتر در طول موج ۲۴۰ نانومتر تجزیه و تحلیل شد و فعالیت آن به صورت میلی‌مول KMnO_4 گرم بر لیتر خاک خشک بیان شد. در این آزمایش ۲ میلی لیتر از بافر حاوی هیدروژن پراکسید فاقد عصاره آنزیمی به عنوان نمونه شاهد به منظور صفر کردن دستگاه اسپکتروفتومتر استفاده شد. میزان فعالیت آنزیم با استفاده از ضریب خاموشی ۳۹/۴ میلی مولار بر سانتی‌متر بر اساس سرعت مصرف هیدروژن پراکسید در دقیقه محاسبه گردید (فعالیت آنزیم کاتالاز برابر است با اختلاف جذب تقسیم بر ۳۹/۵ ضرب در عدد ۱۰۰)

کربن زیتوده میکروبی^۱ (MBC) به روش گازدهی با کلروفرم استخراج اندازه‌گیری شد (بروکز^۲ و همکاران، ۱۹۸۵). نمونه‌های خاک مرطوب (۱۰ گرم خاک خشک در آون) به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد در شرایط تاریکی با کلروفرم بدون اتانول تدخین شدند و نمونه‌های کنترل با وزن برابر تدخین نشدند. هر دو نمونه تدخین‌شده و تدخین‌نشده با ۴۰ میلی لیتر محلول ۰/۵ مولار K_2SO_4 (نسبت خاک به محلول ۱:۴) استخراج و به مدت ۳۰ دقیقه با سرعت ۳۰۰ دور در دقیقه تکان داده شدند. عصاره از طریق غشای ۰/۴۵ میلی‌متر فیلتر شد و سپس در آنالایزر کربن آلی کل اندازه‌گیری شد. برای محاسبه این خصوصیت زیستی از فرمول (۱) استفاده گردید (کیو و همکاران، ۲۰۲۰):

$$\text{MBC} = \text{Ec} / \text{K}_{\text{Ec}} \quad (1)$$

در این فرمول Ec از تفاوت کربن آلی تدخین‌شده به کربن آلی نمونه‌های تدخین‌نشده محاسبه می‌شود. K_{Ec} ضریب تبدیل Ec به MBC است که ۰/۴۵ در نظر گرفته شد (کیو و همکاران، ۲۰۲۰). این فرمول برای محاسبه نیتروژن زیتوده میکروبی نیز صادق است با این تفاوت که نیتروژن آلی تدخین‌شده و نیتروژن آلی نمونه‌های تدخین‌نشده در این فرمول مدنظر بود و ضریب تبدیل ۰/۵۴ است (کیو و همکاران، ۲۰۲۰). جهت اندازه‌گیری زیتوده میکروبی نیتروژن خاک، به روش تدخین - استخراج، نمونه‌های خاک پس از تدخین با کلروفرم، با محلول K_2SO_4 عصاره‌گیری و عصاره‌ها تا موقع اندازه‌گیری در دمای تقریباً ۴ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند. در نهایت مقدار نیتروژن زیتوده میکروبی به روش ایندوفنل بر حسب میلی‌گرم بر کیلوگرم اندازه‌گیری شد.

جمعیت میکروارگانیسم‌ها با روش بیشترین تعداد احتمالی^۳ (MPN) محاسبه شد. برای شمارش باکتری‌ها با استفاده از روش بیشینه تعداد احتمالی (MPN)، سوسپانسیون خاک با سری رقت ۱۰ دهی با آب تهیه شد و مقدار ۱۰۰ میکرولیتر از آن را به پتری دیش‌های حاوی نوترینت آگار و نیستاتین اضافه گردید و درون انکوباتور در

¹ Microbial Biomass Carbon

² Brookes

³ Most Probable Number

دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد. بعد از ۲۴ ساعت تعداد کلنی‌های باکتری‌ها شمرده شدند. برای شمارش جمعیت قارچ‌ها ۱۰۰ میکرولیتر از رقت‌های تهیه‌شده را به پتری‌های حاوی مقادیر مشخصی از پپتون، دکستروز، رزبنگال، استرپتومایسین و آگار اضافه شد. نمونه‌ها در انکوباتور در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد به‌مدت پنج روز نگهداری شدند و روش شمارش مستقیم شمرده شدند. کشت میکروبی به دو شیوهی کشت سطحی در پتری‌دیش برای شمارش میکروارگانیسم‌های هوازی و کشت زیرسطحی که در آن محلول خاک زیر محیط کشت قرار داده می‌شود، برای شمارش میکروارگانیسم‌های بی‌هوازی اجباری و اختیاری انجام شد (علی‌اصغرزاده، ۱۳۸۵). نتایج مربوط به نوع میکروارگانیسم‌ها در این مقاله آورده نشده است.

همچنین با تقسیم کربن آلی زیتوده میکروبی به کربن آلی خاک، سهم میکروبی خاک تعیین شد (مارتینز^۱، ۱۹۹۵). تنفس میکروبی پایه با روش تیتراسیون اندازه‌گیری شد. بدین منظور ۱۰ گرم خاک مرطوب درون ظرف شیشه‌ای تیره اضافه شد. ۱۰ میلی‌لیتر محلول هیدروکسیدسدیم ۵/۰ نرمال در بالن ۵۰ میلی‌لیتری ریخته شد. سپس درون ظرف شیشه‌ای قرار داده شد و به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد حرارت داده شد. پس از اتمام انکوباسیون، بالن برداشته و محلول هیدروکسیدسدیم درون ارلن مایر ریخته شد و محتویات بالن دو مرتبه با آب مقطر شستشو داده شد و سپس به ارلن اضافه شد. در ادامه ۲ میلی‌لیتر محلول کلریدباریم ۰/۵ مولار اضافه شد. ۴ قطره شناساگر فنل فتالین به محلول اضافه و با اسید کلریدریک ۰/۵ نرمال تیتراژ شد. برای تهیه شاهد، این روش بدون خاک انجام شد. مقدار تنفس پایه ($\text{mg CO}_2 \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$) از فرمول (۲) محاسبه شد (اندرسو^۲، ۱۹۸۲).

$$(B-S) N \times 22 \times 100 / (SW \times \%dm) = \text{تنفس میکروبی}$$

$$S = \text{حجم اسید کلریدریک مصرفی در خاک (میلی‌لیتر)}$$

$$B = \text{حجم اسید کلریدریک مصرفی در شاهد (میلی‌لیتر)}$$

$$SW = \text{وزن اولیه نمونه خاک (گرم)}$$

$$dm = \text{فاکتور تبدیل خاک خشک،}$$

$$N = \text{نرمالیتة اسید، ۲۲ وزن اکی‌والانی دی‌اکسیدکربن (میلی‌گرم)}$$

تجزیه و تحلیل داده‌ها

برای تعیین تاثیر مکان و شدت فرسایش در متغیرهای اندازه‌گیری‌شده، داده‌ها مورد آنالیز واریانس یک‌طرفه (ANOVA) با سه تکرار توسط نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۰ قرار گرفتند. قبل از محاسبات آماری، نرمال بودن توزیع داده‌ها و همگنی واریانس‌ها بررسی شد. میانگین‌ها با کمک آزمون چنددامنه‌ای توکی در سطح احتمال ۹۵ درصد مقایسه شد. باتوجه به درجات فرسایش مورد مطالعه، به‌منظور تعیین مهم‌ترین عوامل مؤثر بر شدت فرسایش و بررسی ارتباط بین فاکتورهای فیزیکی- شیمیایی و زیستی خاک موجود از روش تجزیه مؤلفه‌های اصلی^۳ (PCA) با کمک نرم‌افزار PCORD نسخه ۴ استفاده شد.

¹ Martens

² Anderso

³ Principal component analysis

نتایج و بحث

تأثیر فرسایش بر خصوصیت‌های فیزیکی خاک

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۲) حاکی از تفاوت معنی‌دار اثر اصلی درجات فرسایش بر خصوصیت‌های فیزیکی خاک بود $p < 0.01$. اثرات اصلی واحد کاری و اثرات متقابل واحد کاری و شدت فرسایش به لحاظ آماری تفاوت معنی‌دار نداشت ($p > 0.05$). مقایسه میانگین اثر اصلی شدت‌های فرسایش نشان داد با افزایش شدت فرسایش در طول شیب، مقدار وزن مخصوص ظاهری خاک کاهش حداکثری داشت و بیشترین مقدار وزن مخصوص ظاهری خاک در پلات‌های بدون فرسایش و فرسایش کم اندازه‌گیری شد. پلات‌های بدون فرسایش و فرسایش کم حداقل درصد ذرات شن را در مقایسه با پلات‌های با شدت فرسایش زیاد داشتند. درصد رس در پلات‌های با شدت فرسایش زیاد کمترین مقدار را نشان داد (جدول ۳). مطالعه رازی^۱ و کی (۱۹۹۴) نیز بر این نکته صحت گذاشته و گزارش داده‌اند که افزایش میزان رس در خاک، با افزایش پایداری خاکدانه‌ها همراه است. در این مطالعه، شدت فرسایش باعث افزایش شن و کاهش رس، سیلت و میزان تخلخل شد. افزایش بخش درشت خاک در اثر فرسایش توسط محققان نیز گزارش شده است (مندل^۲ و ددوال، ۲۰۱۲). گزارش کردند که کاهش سیلت و رس رابطه مستقیمی با شدت فرسایش دارد (هلاذکی^۳ و همکاران، ۲۰۱۶). تغییر در بافت خاک می‌تواند ناشی از حذف انتخابی ذرات توسط عامل فرساینده (آب) باشد. در این فرآیند، ذرات درشت‌تر شن به دلیل وزن بیشتر، مقاومت بالاتری از خود نشان داده و در سطح خاک باقی می‌مانند. این تغییر در بافت خاک به‌طور مستقیم بر تخلخل آن نیز تأثیرگذار است. از سوی دیگر، وزن مخصوص ظاهری در خاک‌های با فرسایش کم و متوسط بیشتر از خاک‌های فاقد فرسایش و فرسایش شدید شد. این تفاوت می‌تواند به اثرات متقابل ساختار خاک، میزان مواد آلی و فرآیندهای فشرده‌گی ناشی از فرسایش مرتبط باشد.

جدول ۲: تجزیه واریانس خصوصیت‌های فیزیکی خاک در شدت‌های متفاوت فرسایش

میانگین مربعات					
منابع تغییرات	درجه آزادی	درصد رس	درصد شن	درصد سیلت	وزن مخصوص ظاهری
واحدکاری	۱	۰/۰۸ ^{n.s}	۰/۷۷ ^{n.s}	۱/۷۳ ^{n.s}	۰/۸۱ ^{n.s}
درجه فرسایش	۳	۰/۰۳ ^{**}	۰/۰۱ ^{**}	۵/۱۷ ^{**}	۱/۳۵ ^{**}
واحدکاری × درجه فرسایش	۳	۰/۰۱ ^{ns}	۰/۰۱ ^{n.s}	۰/۵۸ ^{n.s}	۰/۲۱ ^{n.s}
خطای آزمایش	۱۶	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۲	۰/۰۱
ضریب تغییرات (درصد)		۶/۰۷	۰/۵۲	۶/۶۶	۵/۲۸

n.s و ** به ترتیب: عدم تفاوت معنی‌دار، تفاوت معنی‌دار در سطح یک درصد

جدول ۳: مقایسه میانگین اثرات اصلی خصوصیت‌های فیزیکی خاک در شدت‌های متفاوت فرسایش

درجه فرسایش	درصد رس	درصد شن	درصد سیلت	وزن مخصوص ظاهری (g cm ⁻³)
بدون فرسایش	۳۶±۰/۰۳ ^a	۳۵±۰/۰۳ ^d	۲۹±۰/۰۳ ^b	۲/۷۰±۰/۰۱ ^a
کم	۲۶±۰/۰۲ ^b	۴۱±۰/۰۳ ^c	۳۳±۰/۰۳ ^a	۲/۱۵±۰/۰۲ ^b
متوسط	۲۶±۰/۰۲ ^b	۵۴±۰/۰۳ ^a	۲۰±۰/۰۳ ^c	۲/۱۵±۰/۰۲ ^b
شدید	۲۴±۰/۰۳ ^c	۴۸±۰/۰۲ ^b	۲۸±۰/۰۲ ^b	۱/۸۴±۰/۰۳ ^c

حروف متفاوت در هر ستون نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار میان درجات فرسایش می‌باشد ($p < 0.01$). داده‌ها ± اشتباه از معیار

¹ Rasiah & Kay

² Mandal & Dadhwal

³ Hladký

تأثیر فرسایش بر خصوصیت‌های شیمیایی خاک

نتایج تجزیه واریانس خصوصیت‌های شیمیایی خاک (جدول ۴) نشان داد که اثر اصلی درجات فرسایش بر خصوصیت‌های شیمیایی مورد نظر معنی‌دار بود ($p < 0.01$). درحالی‌که اثرات اصلی واحد کاری و اثرات متقابل واحد کاری و شدت فرسایش بر خصوصیت‌های فیزیکی خاک به لحاظ آماری تفاوت معنی‌دار نداشت ($p > 0.05$). در سایت مورد مطالعه حداکثر نیتروژن آلی، کربن آلی، نیتروژن کل، فسفر کل و پتاسیم قابل‌دسترس مربوط به پلات‌های بدون فرسایش بود و با افزایش درجه فرسایش نیتروژن آلی ($p = 0.00$)، کربن آلی ($p = 0.00$)، نیتروژن کل ($p = 0.00$)، فسفر کل ($p = 0.00$) و پتاسیم قابل‌دسترس ($p = 0.00$) کاهش معنی‌دار نشان داد ($p < 0.01$). رطوبت خاک ($p = 0.04$) و فسفر قابل‌دسترس ($p = 0.03$) میان پلات‌های بدون فرسایش و فرسایش کم، تفاوت معنی‌داری داشت ($p < 0.05$). کاهش معنی‌دار این پارامترها با افزایش درجه فرسایش، نشان‌دهنده تأثیر منفی فرسایش خاک بر حاصلخیزی خاک است. درصد رطوبت خاک و فسفر قابل‌دسترس در پلات‌های بدون فرسایش بیشترین میزان را نشان داد و با افزایش شدت فرسایش مقدار رطوبت خاک کاهش نشان داد. تفاوت معنی‌دار رطوبت خاک ($p = 0.02$) و فسفر قابل‌دسترس ($p = 0.04$) میان پلات‌های بدون فرسایش و فرسایش کم، نشان‌دهنده تأثیر منفی فرسایش خاک بر این پارامترها است. فرسایش خاک اثر معنی‌داری بر مقدار اسیدیته ($p = 0.718$)، نیتروژن آلی محلول ($p = 0.267$)، آمونیوم ($p = 0.772$) و نترات ($p = 0.821$) خاک نداشت ($p > 0.05$). عدم تأثیر معنی‌دار فرسایش بر این خصوصیت‌ها می‌تواند ناشی از تأثیر سایر عوامل ناشناخته یا خطای آزمایش باشد. با این وجود، بیشترین مقدار این خصوصیت‌ها در پلات‌های بدون فرسایش اندازه‌گیری شد و کمترین مقدار مربوط به پلات‌های با فرسایش شدید بود (جدول ۴ و ۵).

جدول ۴: تجزیه واریانس خصوصیت‌های شیمیایی خاک در شدت‌های متفاوت فرسایش

منابع تغییرات	درجه آزادی	اسیدیته	درصد رطوبت	کربن آلی محلول	نیتروژن آلی محلول	کربن کل	نیتروژن کل	فسفر کل	فسفر قابل دسترس	پتاسیم قابل دسترس	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	میانگین مربعات
واحدکاری	۱	۰/۰۰ ^{ns}	۰/۰۰ ^{ns}	۰/۰۰ ^{ns}	۰/۰۰ ^{ns}	۰/۰۸ ^{ns}	۰/۷۷ ^{ns}	۱/۷۳ ^{ns}	۰/۸۱ ^{ns}	۰/۳۵ ^{ns}	۰/۰۷ ^{ns}	۰/۲۹ ^{ns}	
درجه فرسایش	۳	۰/۰۲ ^{ns}	۱۲/۳۲ ^{**}	۳۴/۰۰ ^{ns}	۰/۰۵ ^{**}	۰/۱۰ ^{**}	۲۲ ^{**}	۱۶/۲۵ ^{**}	۵/۴۳ ^{**}	۵/۸۶ ^{**}	۴۲/۲۱ ^{ns}	۱۸/۰۰ ^{**}	
واحدکاری×درجه فرسایش	۳	۰/۰۱ ^{ns}	۰/۰۱ ^{ns}	۰/۰۱ ^{ns}	۰/۰۱ ^{ns}	۰/۰۰ ^{ns}	۰/۰۱ ^{ns}	۰/۰۰ ^{ns}	۰/۰۰ ^{ns}	۰/۰۲ ^{ns}	۰/۰۱ ^{ns}	۰/۰۰ ^{ns}	
خطای آزمایش	۱۶	۰/۰۴	۰/۰۳	۰/۰۵	۰/۰۲	۰/۰۴	۰/۰۳	۰/۰۴	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۰	
ضریب تغییرات (درصد)		۳/۴۰	۴/۹۹	۵/۵۵	۵/۱۳	۴/۹۱	۶/۴۰	۱/۵۷	۴/۰۶	۱/۵۷	۲/۰۱	۱/۵۸	

ns و ** به ترتیب: عدم تفاوت معنی‌دار، تفاوت معنی‌دار در سطح یک درصد

جدول ۵: مقایسه میانگین خصوصیت‌های شیمیایی خاک در شدت‌های متفاوت فرسایش

درجه فرسایش	اسیدیته	درصد رطوبت	کربن آلی محلول (mg kg ⁻¹)	نیتروژن آلی محلول (mg kg ⁻¹)	کربن کل (g kg ⁻¹)	نیتروژن کل (g kg ⁻¹)
بدون فرسایش	۸/۵۰±۰/۰۳ ^a	۱۷/۳۰±۰/۰۳ ^a	۳/۴۰±۰/۰۱ ^a	۸/۳۰±۰/۰۱ ^a	۱۵/۳۰±۰/۰۵ ^a	۰/۹۷±۰/۰۱ ^a
کم	۸/۱۶±۰/۰۳ ^a	۱۶/۸۴±۰/۰۲ ^{ab}	۳/۱۶±۰/۰۲ ^a	۷/۱۰±۰/۰۱ ^a	۱۴/۱۶±۰/۰۵ ^a	۰/۷۶±۰/۰۱ ^b
متوسط	۸/۲۲±۰/۰۳ ^a	۱۵/۲۴±۰/۰۲ ^b	۳/۲۴±۰/۰۲ ^a	۶/۲۲±۰/۰۱ ^b	۱۰/۲۴±۰/۰۵ ^b	۰/۶۴±۰/۰۱ ^c
شدید	۸/۲۱±۰/۰۳ ^a	۱۵/۲۱±۰/۰۳ ^b	۳/۱۱±۰/۰۳ ^a	۴/۱۱±۰/۰۳ ^c	۸/۲۱±۰/۰۵ ^c	۰/۵۱±۰/۰۱ ^d

حروف متفاوت در هر ستون نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار میان درجات فرسایش می‌باشد ($p < 0.01$). داده‌ها± اشتباه از معیار

ادامه جدول ۵: مقایسه میانگین خصوصیت‌های شیمیایی خاک در شدت‌های متفاوت فرسایش					
درجه فرسایش	فسفر کل (g kg^{-1})	فسفر قابل‌دسترس (g kg^{-1}) ^۱	پتاسیم قابل‌دسترس (g kg^{-1})	NH_4^+ (mg kg^{-1})	NO_3^- (mg kg^{-1})
بدون فرسایش	$1/90 \pm 0/01^a$	$0/30 \pm 0/01^a$	$194/40 \pm 0/43^a$	$7/30 \pm 0/05^a$	$2/44 \pm 0/03^a$
کم	$1/60 \pm 0/01^a$	$0/28 \pm 0/01^a$	$180/36 \pm 9/12^b$	$7/11 \pm 0/05^a$	$2/11 \pm 0/02^a$
متوسط	$1/04 \pm 0/01^b$	$0/24 \pm 0/01^b$	$145/84 \pm 8/63^c$	$6/20 \pm 0/05^a$	$1/92 \pm 0/02^a$
شدید	$0/90 \pm 0/01^c$	$0/21 \pm 0/01^b$	$90/31 \pm 7/43^d$	$5/21 \pm 0/05^a$	$1/71 \pm 0/03^a$
حروف متفاوت در هر ستون نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار میان درجات فرسایش می‌باشد ($p < 0.01$). داده‌ها $\pm$ اشتباه از معیار					

در این مطالعه حداکثر نیتروژن و کربن آلی محلول، فسفر کل و پتاسیم قابل‌دسترس مربوط به پلات‌های بدون فرسایش بود و با افزایش درجه فرسایش مقادیر این پارامترها کاهش معنی‌دار نشان داد. کمترین مقادیر آمونیوم در شدت فرسایش زیاد اندازه‌گیری شد و بیشترین مقادیر نیز مربوط به پلات‌های بدون فرسایش بود. کاهش ماده آلی، مواد مغذی و رطوبت خاک در اثر فرسایش در منطقه مورد مطالعه می‌تواند به‌طور مستقیم باعث از بین رفتن تنوع و عملکرد باکتری‌های خاک شود؛ زیرا کاهش دسترسی به منابع غذایی، متابولیسم و ترکیب باکتری‌ها را محدود می‌کند (بانجری^۱ و همکاران، ۲۰۲۰) و در نتیجه کارکرد میکروارگانیسم‌های خاک و نقش آنها در عملکرد خاک مختل خواهد شد (چن^۲ و همکاران، ۲۰۲۰).

با افزایش شدت فرسایش آبی، مقدار ماده آلی، عناصر غذایی، کربن و نیتروژن خاک‌های سطحی دچار آشوب شده، به‌طوری‌که ذرات ریز بافت خاک و عناصر غذایی همراه با این ذرات در مکان‌های فرسایش‌یافته حذف شده و در مکان‌های رسوبی ته‌نشست خواهند شد. بنابراین، سایت‌های بدون فرسایش و فرسایش کم در مقایسه با بخش‌های با فرسایش شدید از نظر ذخیره کربن و نیتروژن و عناصر غذایی غنی‌تر خواهند بود (هوانگ^۳ و همکاران، ۲۰۱۳). از آنجایی‌که فرسایش پدیده انتخابی است، بنابراین با جابه‌جایی انتخابی رسوبات طی جریان آب، ذرات نیتروژن و کربن آلی خاک به‌همراه رواناب در مکان‌های رسوبی ته‌نشست می‌کنند (لال^۴ و همکاران، ۲۰۰۳). نتایج به‌دست‌آمده از این مطالعه نیز حاکی از افزایش کاهش معنی‌دار کربن و نیتروژن کل، فسفر و پتاسیم قابل‌دسترس، فسفر و نیتروژن کل در پلات‌های با فرسایش شدید و متوسط در مقایسه با پلات‌های با فرسایش کم و بدون فرسایش بود. لازم به یادآوری است که در اراضی فرسایش‌یافته خاک سطحی با گذشت زمان حذف می‌شود و خاک زیرسطحی در معرض سطح قرار خواهد گرفت. میزان کربن آلی در خاک زیرین کم و تا حدودی پایدار است (محسنی، ۱۳۹۸). نبی‌الهی^۵ (۲۰۱۸) در ارزیابی اثرات شیب و تغییر کاربری اراضی بر تخریب کیفیت خاک از طریق نقشه‌برداری دیجیتالی و شاخص‌های کیفیت خاک در منطقه کردستان گزارش کردند که دامنه‌های با شیب زیاد به‌علت فرسایش‌پذیری زیاد و جایی که کاربری زمین از مرتع به کشاورزی تغییر یافته است، دارای مقادیر پایین کیفیت خاک هستند. همچنین در مقایسه با درجات با فرسایش شدید و متوسط بیشترین مقدار ذرات ریزدانه (ذرات رس) خاک نیز در پلات‌های بدون فرسایش و درجه فرسایش کم اندازه‌گیری شد. فرسایش آبی باعث تجزیه خاکدانه‌ها، تسريع انتقال رسوب و

¹ Banerjee

² Chen

³ Huang

⁴ Lal

⁵ Nabelahi

کاهش ظرفیت نگهداری آب در خاک می‌شود (واگ^۱ و همکاران، ۲۰۱۹). وجود ذرات رس خاک سبب اتصال بین میکروارگانیسم‌ها موجود در خاک با ذرات رسوبی شده و اهمیت به‌سزایی در نگهداری و حفاظت از تنوع میکروبی خاک دارند (لی^۲ و همکاران، ۲۰۱۵). این موضوع سبب افزایش عناصر مغذی خاک در مکان‌های بدون فرسایش در مقایسه با مکان‌های با فرسایش شدید می‌شود. افزایش دسترسی بالا به عناصر غذایی و کربن در خاک می‌تواند باعث افزایش سطح جمعیت میکروبی خاک و تنفس میکروبی در پلات‌های بدون فرسایش باشد (کیو^۳ و همکاران، ۲۰۲۱).

تأثیر فرسایش بر خصوصیت‌های زیستی خاک

نتایج تجزیه واریانس خصوصیت‌های زیستی خاک (جدول ۶) نشان داد که اثر اصلی درجات فرسایش بر خصوصیت‌های زیستی معنی‌دار بود ($p < 0.01$). درحالی‌که اثرات اصلی واحد کاری و اثرات متقابل واحد کاری و شدت فرسایش بر خصوصیت‌های زیستی خاک به لحاظ آماری تفاوت معنی‌دار نداشت ($p > 0.05$). مقایسه میانگین اثرات اصلی شدت فرسایش نشان داد که با افزایش شدت فرسایش مقدار آنزیم کاتالاز کاهش معنی‌داری داشت ($p = 0.00$). بیشترین و کمترین میزان آنزیم کاتالاز به‌ترتیب مربوط به پلات‌های بدون فرسایش و فرسایش شدید بود. مقادیر این آنزیم در پلات‌های بدون فرسایش و با فرسایش کم تفاوت معنی‌داری نداشت ($p = 0.436$) (شکل ۲). کاهش معنی‌دار آنزیم کاتالاز با افزایش شدت فرسایش، نشان‌دهنده تأثیر منفی فرسایش خاک بر فعالیت بیولوژیکی خاک است. فرسایش منجر به کاهش معنی‌داری در کربن زیتوده میکروبی ($p = 0.001$) و نیتروژن زیتوده میکروبی ($p = 0.00$) خاک شد. کمترین کربن و نیتروژن زیتوده میکروبی مربوط به پلات‌های با فرسایش شدید بود. کاهش معنی‌دار کربن و نیتروژن زیتوده میکروبی با فرسایش، نشان‌دهنده تأثیر منفی فرسایش خاک بر جمعیت و فعالیت میکروارگانیسم‌های خاک است. نتایج مقایسه میانگین داده‌های تنفس میکروبی پایه، جمعیت میکروارگانیسم‌ها در خاک خشک در منطقه مورد مطالعه نشان داد که با افزایش شدت فرسایش جمعیت میکروارگانیسم‌ها ($p = 0.00$) و تنفس میکروبی پایه کاهش معنی‌دار داشتند ($p = 0.00$). کاهش جمعیت میکروارگانیسم‌ها و تنفس میکروبی پایه با افزایش شدت فرسایش، نشان‌دهنده تأثیر منفی فرسایش خاک بر فعالیت بیولوژیکی خاک است. بیشترین و کمترین جمعیت میکروارگانیسم‌ها و تنفس میکروبی پایه به‌ترتیب در پلات‌های بدون فرسایش و پلات‌های با فرسایش شدید اندازه‌گیری شد. نتایج تجزیه واریانس سهم میکروبی خاک نشان داد بین شدت‌های فرسایش کم و بدون فرسایش تفاوت معنی‌دار وجود دارد (جدول ۶). به‌طوری‌که سهم میکروبی خاک از پلات‌های بدون فرسایش به سمت پلات‌های با درجه فرسایش شدید روند کاهش داشت. کمترین مقدار سهم میکروبی در درجه فرسایش شدید مشاهده شد که تفاوت معنی‌دار با سایر درجات فرسایش داشت (شکل ۲).

¹ Wagg

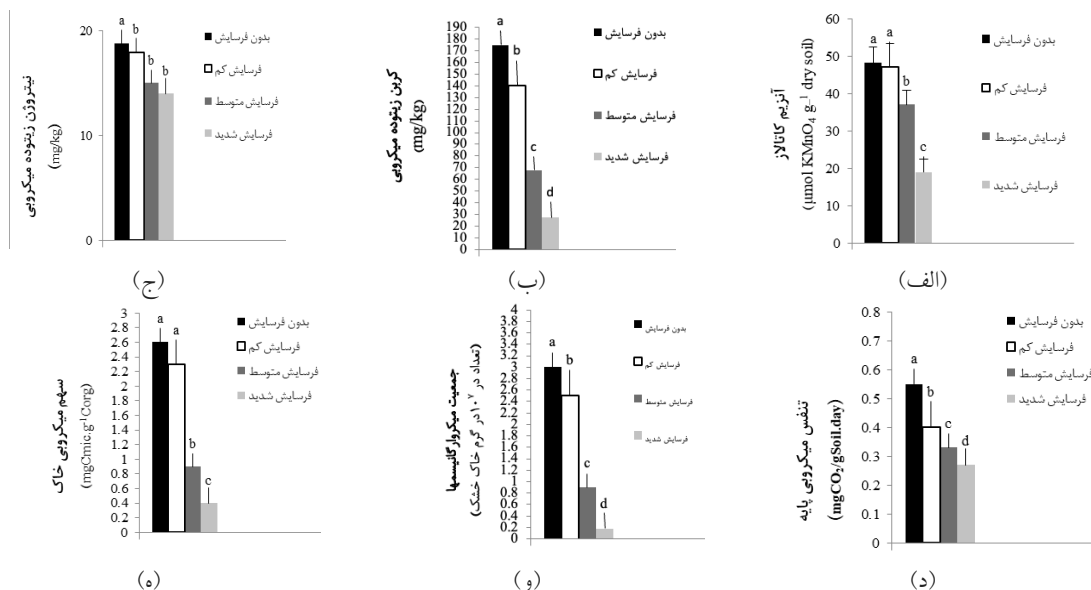
² Li

³ Qiu

جدول ۶: تجزیه واریانس خصوصیت‌های زیستی در شدت‌های متفاوت فرسایش

منابع تغییرات	درجه آزادی	آنزیم کاتالاز ($\mu\text{mol KMnO}_4 \text{ g}^{-1} \text{ dry soil}$)	کربن زیتوده میکروبی (mg kg^{-1})	نیتروژن زیتوده میکروبی (mg kg^{-1})	تنفس میکروبی پایه ($\text{mgCO}_2/\text{gSoil.day}$)	جمعیت میکروارگانیسم‌ها (تعداد در گرم خاک خشک)	سهم میکروبی خاک ($\text{mgCmic.g}^{-1}\text{Corg}$)
واحدکاری	۱	۱۰۹/۹۴ ^{n.s}	۱۳۳/۲۱ ^{n.s}	۴۶/۵۲ ^{n.s}	۲۷۸/۷۸ ^{n.s}	۲۷۵۲۳۱ ^{n.s}	۱/۲۳ ^{n.s}
درجه فرسایش	۳	۱۱/۶۵ ^{**}	۰/۳۵ ^{**}	۰/۰۷ ^{**}	۰/۲۹ ^{**}	۳۰۰۰۸/۹ ^{**}	۰/۳۶ ^{**}
واحدکاری×درجه فرسایش	۳	۵۶/۴۰ ^{n.s}	۵۵/۴ ^{n.s}	۱۵/۸ ^{n.s}	۳/۱۰ ^{n.s}	۵۴۹/۱ ^{n.s}	۳۲/۲۴ ^{n.s}
خطای آزمایش	۱۶	۰/۰۴	۴/۵۰	۳/۳۹	۰/۰۱	۱۲/۴۱	۱/۲۳
ضریب تغییرات (درصد)		۰/۸۷	۰/۴۳	۱/۴۷	۲/۹۳	۴/۳۲	۱/۵۶

n.s و ** به ترتیب: عدم تفاوت معنی‌دار، تفاوت معنی‌دار در سطح یک درصد



شکل ۲: تاثیر شدت‌های متفاوت فرسایش بر خصوصیت‌های زیستی خاک (حروف متفاوت نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار در هر شدت فرسایش می‌باشد ($p < 0.01$). میله‌ها ± اشتباه از معیار).

در این پژوهش، بیشترین میزان آنزیم کاتالاز در پلات‌های بدون فرسایش و فرسایش کم مشاهده شد. لازم به یادآوری است که آنزیم‌ها اهمیت زیادی در عملکرد بیوشیمیایی خاک دارند (لی^۱ و همکاران، ۲۰۱۵). وجود مواد آلی و عناصر غذایی در مناطق بدون فرسایش و یا با فرسایش کمتر باعث افزایش معنی‌دار فعالیت آنزیم کاتالاز می‌شود (ماکویی^۲ و نداکیدمی، ۲۰۰۸). برای آن که مواد آلی خاک توسط میکروارگانیسم‌های خاک معدنی شوند، باید توسط آنزیم‌هایی مانند کاتالاز هیدرولیز شوند (کالدول^۳، ۲۰۰۵). به همین دلیل مناطق بدون فرسایش و مناطق رسوبی نقش مهمی در پروسه معدنی شدن کربن آلی دارند (کیرکلس^۴ و همکاران، ۲۰۱۴). وزن مخصوص کمتر خاک و

¹ Li

² Makoi & Ndakidemi

³ Caldwell

⁴ Kirkels

در نتیجه تخلخل تهویه‌ای مناسب‌تر در خاک سایت مورد مطالعه باعث بهبود شرایط تهویه خاک و تبادل گازها به-خصوص اکسیژن می‌شود. تهویه مناسب خاک باعث ایجاد شرایط فعالیت، رشد و تکثیر جمعیت میکروارگانیسم‌های هوازی می‌شود (اصغری^۱ و ارخزلو، ۲۰۲۰). لازم به یادآوری است افزایش وزن مخصوص ظاهری خاک و کاهش ماده آلی در خاک‌های فرسایش‌یافته می‌تواند منجر به افزایش هدایت حرارتی خاک و کاهش ظرفیت گرمایی خاک شود (ابو حمده^۲ و ریدر، ۲۰۰۰) و در نهایت تغییرات روزانه و فصلی بیشتر دمای خاک شود (کیو^۳ و همکاران، ۲۰۰۱). هرچند در این مطالعه تاثیر فرسایش بر ظرفیت گرمایی خاک بررسی نشد، اما مطالعات انجام‌شده درخصوص تاثیر فرسایش بر خصوصیت‌های زیستی خاک حاکی از تغییرات زیاد دمای خاک در اراضی فرسایش‌یافته است (لیانگ^۴ و همکاران، ۲۰۱۸). بنابراین، از دست دادن تنوع و عملکرد جوامع خاکی را می‌توان به‌طور غیرمستقیم به افزایش تغییرات حرارت خاک نسبت داد؛ زیرا اکثر میکروب‌های خاک به تغییرات موضعی دما حساس هستند (گوئو^۵ و همکاران، ۲۰۱۸). لی و همکاران (۲۰۱۵) در بررسی پاسخ میکروبی خاک به تغییرات ناشی از فرسایش آبی در جنوب چین گزارش نمودند که محل رسوب‌گذاری دارای فعالیت زیستوده میکروبی و آنزیمی بیشتری نسبت به سایر مکان‌های فرسایشی است. خصوصیت انتخابی فرسایش آبی باعث انتقال ذرات ریزدانه رس و همچنین مواد آلی می‌شود. بنابراین پلات‌های بدون فرسایش دارای خاک‌هایی با بافت ریزدانه و مواد آلی بیشتر هستند. در مقایسه با این پلات‌ها، مناطق فرسایش‌یافته مقدار کمتری از این مواد را دارند.

عوامل موثر در فرسایش آنالیز مؤلفه‌های اصلی (PCA)

نتایج حاصل از تجزیه مؤلفه‌های (PCA) اصلی برای ۲۱ ویژگی فیزیکی-شیمیایی و زیستی خاک در جدول ۷ آورده شده است. برای تعیین ارتباط تنوع میکروبی و خصوصیت‌های فیزیکی-شیمیایی و زیستی خاک از روش PCA استفاده شد. نتایج این روش شامل مقادیر ویژه، درصد واریانس هر یک از متغیرها و مقدار BSE^۶ است. برای انتخاب مؤلفه‌های اصلی از مقایسه‌ی مقادیر ویژه استفاده می‌شود. همچنین با استفاده از مقادیر BSE، می‌توان مؤلفه‌های اصلی را انتخاب کرد و مؤلفه‌ای که مقدار ویژه آن از مقدار BSE بیشتر باشد، مدنظر قرار می‌گیرد و مؤلفه‌هایی انتخاب خواهند شد که مقدار ویژه آنها از مقدار BSE بیشتر باشند. روش PCA یک روش آماری برای تعریف متغیرهای جدید برحسب ترکیب خطی از متغیرهای اولیه است. هدف روش PCA، استخراج مؤلفه‌های اصلی یک مجموعه از متغیرهای اولیه است که مؤلفه‌های جدید نسبت به هم مستقل بوده و واریانس آنها دارای روند نزولی است. اولین مؤلفه استخراجی دارای بیشترین واریانس مجموعه اولیه داده‌ها است و مؤلفه‌های استخراجی بعدی، واریانس کمتری از مجموعه اولیه داده‌ها را لحاظ می‌کند و مجموع واریانس مؤلفه‌های استخراجی مساوی واریانس کل داده است (مصادقی، ۱۳۸۴).

نتایج حاصل نشان داد که محورهای اول ۸۵/۰۱ درصد، محور دوم ۹/۷۴ درصد و محور سوم ۵/۲۴ درصد را توجیه می‌کند. به‌طورکلی دو محور اول و دوم روی هم ۹۴/۷۵ درصد تغییرات را توجیه می‌کنند. جدول ۸ همبستگی متغیرهای مورد مطالعه خاک با مؤلفه‌های اصلی در آنالیز PCA و در واقع میزان اهمیت عوامل فیزیکی-شیمیایی و

¹ Asghari & Arkhazloo

² Abu-Hamdeh & Reeder

³ Qiu

⁴ Liang

⁵ Guo

⁶ Broken Stick Eigenvalue

زیستی مختلف در هر درجه فرسایش آبی را نشان می‌دهد. طبق این جدول مؤلفه‌ی اول شامل متغیرهای نیتروژن آلی معدنی، کربن آلی، نیتروژن کل، فسفر کل، فسفر قابل‌دسترس، پتاسیم قابل‌دسترس، درصد آمونیوم، درصد نیترات، کربن زیتوده میکروبی، نیتروژن ریتوده میکروبی، جمعیت میکروارگانیسم‌ها، تنفس میکروبی پایه و سهم میکروبی بود. در محور دوم اسیدیته، کربن آلی محلول و درصد سیلت توجیه‌کننده شدت‌های مختلف فرسایش در سایت مورد مطالعه بود.

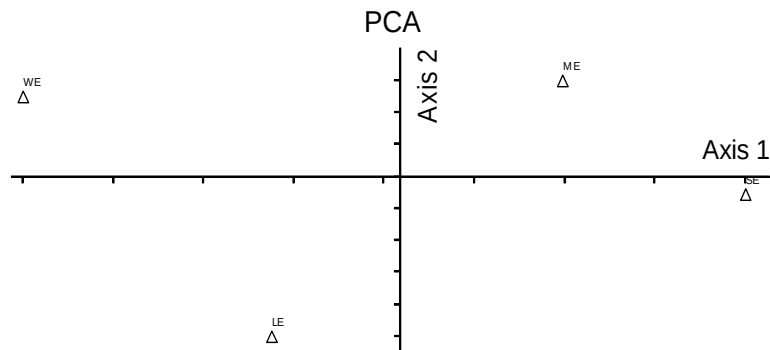
جدول ۷: عوامل موثر در فرسایش در سایت گوور-آنالیز مؤلفه‌های اصلی (PCA)

مؤلفه	مقدار ویژه	واریانس (درصد)	واریانس تجمعی (درصد)	Broken-stick Eigenvalue
۱	۱۷/۸۵۳	۸۵/۰۱۷	۸۵/۰۱۷	۳/۶۴۵
۲	۲/۰۴۵	۹/۷۴۰	۹۴/۷۵۷	۲/۶۴۵
۳	۱/۱۰۱	۵/۲۴۳	۱۰۰	۲/۱۴۵
۴	۰/۰۰	۰/۰۰	۱۰۰	۱/۸۱۲
۵	۰/۰۰	۰/۰۰	۱۰۰	۱/۵۶۲
۶	۰/۰۰	۰/۰۰	۱۰۰	۱/۳۶۲
۷	۰/۰۰	۰/۰۰	۱۰۰	۱/۱۹۵
۸	۰/۰۰	۰/۰۰	۱۰۰	۱/۰۵۳
۹	۰/۰۰	۰/۰۰	۱۰۰	۰/۹۲۸
۱۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۱۰۰	۰/۸۱۶

نمودار حاصل از تجزیه مؤلفه‌های اصلی در شکل ۳ نشان داده شده است. در تجزیه و تحلیل نمودار و توجیه علت قرارگیری درجات مختلف فرسایش در هر مکان باید توجه شود که میزان فاصله نقاط معرف فرسایش از محورهای مختصات بیان‌گر شدت یا ضعف رابطه است. باتوجه به این که در بین مؤلفه اصلی معنی‌دار شده‌ی محور اول، نیتروژن آلی معدنی، کربن آلی محلول، نیتروژن کل، فسفر کل، فسفر قابل‌دسترس، پتاسیم قابل‌دسترس، درصد آمونیوم، درصد نیترات، کربن زیتوده میکروبی، نیتروژن زیتوده میکروبی، جمعیت میکروارگانیسم‌ها، تنفس میکروبی پایه و سهم میکروبی منفی هستند، بنابراین شدت‌هایی از فرسایش که در جهت مثبت محور قرار دارند با فاکتورهای یادشده رابطه معکوس و در جهت منفی محور رابطه مستقیم دارند. همچنین، به دلیل این که در بین مؤلفه معنی‌دار شده، محور دوم اسیدیته و کربن آلی محلول مثبت و درصد سیلت منفی است؛ بنابراین، شدت‌هایی از فرسایش که در جهت مثبت محور قرار داشته باشند با اسیدیته و کربن آلی محلول رابطه‌ی مستقیم و با درصد سیلت رابطه معکوس دارند. اما در جهت منفی محور اسیدیته و کربن آلی محلول رابطه معکوس و با درصد سیلت مستقیم دارند (جدول ۸). آنزیم‌ها همبستگی قوی با ذرات معدنی رس و مواد آلی دارند؛ بنابراین، وجود رس و ماده آلی بیشتر در مکان‌های بدون فرسایش

نقش اساسی در تشکیل مواد آلی آنزیمی دارند. متعاقباً، وجود مواد آلی در سایت‌های بدون فرسایش با افزایش آنزیم‌ها از طریق فعالیت میکروارگانیسم‌ها، باعث ایجاد شرایط لازم به منظور معدنی شدن و تثبیت کربن خواهد شد (شی^۱ و همکاران، ۲۰۱۱).

¹ Shi



شکل ۳: تجزیه و تحلیل مولفه‌های اصلی با استفاده از مؤلفه‌های محور اول و دوم

جدول ۸: همبستگی متغیرهای محیطی با مؤلفه‌های اصلی در آنالیز PCA

متغیر	مؤلفه (محور)		
	اول	دوم	سوم
pH	-۰/۱۶۳	۰/۴۱۴	۰/۳۹۵
Moisture	-۰/۲۲۷	-۰/۱۶۴	۰/۱۳۰
DOC	-۰/۱۸۵	۰/۴۳۴	۰/۰۱۱
DON	-۰/۲۳۰	۰/۰۹۷	-۰/۱۷۹
TC	-۰/۲۳۲	-۰/۱۱۱	-۰/۰۸۷
TN	-۰/۲۳۴	۰/۰۹۶	۰/۰۱۶
TP	-۰/۲۳۴	-۰/۰۷۶۴	۰/۰۷۲
AP	-۰/۲۳۴	-۰/۰۵۲۵	-۰/۱۰۸
AK	-۰/۲۲۴	-۰/۰۲۸	-۰/۳۰۳
NH ₄ ⁺	-۰/۲۲۵	-۰/۰۸۳	-۰/۲۶۲
NO ₃ ⁻	-۰/۲۳۴	-۰/۰۷۹	۰/۰۵۴
Clay	-۰/۲۰۴	۰/۳۰۵	۰/۲۴۰
Sand	-۰/۲۰۳	۰/۱۵۷	-۰/۴۳۹
Silt	-۰/۱۰۵	-۰/۵۴۲	۰/۴۲۷
BD	-۰/۲۱۷	۰/۳۷۳	۰/۰۱۷
Catalase	-۰/۲۱۵	-۰/۰۵۷	-۰/۳۸۹
MBC	-۰/۲۳۵	-۰/۰۶۵	-۰/۰۵۶
MBN	-۰/۲۲۲	-۰/۱۲۶	-۰/۰۲۱
MP	-۰/۲۳۳	-۰/۱۱۲	-۰/۰۵۷
BR	-۰/۲۳۱	۰/۱۲۲	۰/۱۰۲
MQ	-۰/۲۳۱	-۰/۱۴۶	-۰/۰۴۸

AP=Available phosphorus (فسفر قابل دسترس), AK= Available potassium (پتاسیم قابل دسترس), Moisture (رطوبت خاک), DON= Dissolved Organic Nitrogen (نیتروژن آلی محلول), DOC= Dissolved Organic Carbon (کربن آلی محلول), TC= Total carbon (کربن کل), TN=Total Nitrogen (نیتروژن کل), TP= Total phosphorus (فسفر کل), BD=Bulk Density (وزن مخصوص ظاهری), MP= microbial population (جمعیت میکروبی), MBN= microbial nitrogen (نیتروژن زیتوده میکروبی), MBC= microbial carbo (کربن زیتوده میکروبی), MR= microbial respiration (تنفس میکروبی), MQ= microbial quotient (نسبت میکروبی)

نتیجه گیری

در این پژوهش، پاسخ تنوع میکروبی به تغییرات خصوصیات‌های فیزیکی و شیمیایی خاک ناشی از فرسایش آبی در حوضه آبخیز دهبکری، استان کرمان مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد افزایش شدت فرسایش کلیه خصوصیات‌های فیزیکی- شیمیایی و زیستی خاک را تحت تاثیر قرار می‌دهد. به‌طوری‌که کاهش تنوع زیستی و عملکردی خاک تحت فرسایش شدید صورت گرفت. مطالعات انجام‌شده بیانگر این است که فرسایش خاک منجر به زوال ساختار خاک، ازدست‌رفتن عناصر غذایی، کاهش در دسترس بودن عناصر غذایی، کاهش دسترسی به آب و کاهش عملکرد خاک می‌شود (لی^۱ و همکاران، ۲۰۱۵). بااین‌حال، تأثیر فرسایش خاک بر جوامع میکروبی خاک کمتر مورد توجه قرار گرفته است (کیو^۲ و همکاران، ۲۰۲۱). به‌طورکلی با توجه به نتایج، شاخص‌های زیستی خاک به نوع بهره‌برداری از اراضی و شیب زمین وابسته هستند. کاربری اراضی و شیب با تأثیری که بر ساختار جامعه میکروبی خاک می‌گذارند، سبب می‌شوند تا ویژگی‌های خاک و متعاقباً تکامل آن را تحت تأثیر قرار دهند. نتایج نشان داد که عدم مدیریت صحیح اکوسیستم و فرسایش خاک منجر به کاهش منابع مواد مغذی در دسترس شده و این موضوع عامل مهمی برای کاهش زیستوده میکروبی و فعالیت آنزیمی در بیشتر مکان‌های فرسایشی و کاهش رشد و جمعیت میکروارگانیسم‌های خاک شده بود. بنابراین، انجام اقدامات حفاظتی و مدیریتی مؤثر قبل از تخریب بیشتر در مناطق فرسایشی توصیه می‌شود. لازم به یادآوری است که شرایط زمانی متفاوت ممکن است تأثیرات متفاوتی بر نتایج فرسایش و خصوصیات‌های خاک داشته باشد. داده‌ها در این مطالعه در یک دوره زمانی خاص جمع‌آوری شدند و احتمال این که تغییرات زمانی (فصلی یا سالیانه) بر نتایج ما تاثیر بگذارند، وجود دارد. با توجه به نقش خیلی مهم میکروارگانیسم‌ها به‌عنوان جزئی جدایی‌ناپذیر در اکوسیستم خاک و تأثیر این جزء بر خواص فیزیکی، شیمیایی و تغذیه‌ای این اکوسیستم، می‌توان با فراهم کردن شرایط مناسب برای فعالیت خوب این موجودات زنده، به افزایش هرچه بیشتر کیفیت خاک و کاهش فرسایش و هدر رفت آن کمک بسیاری کرد.

منابع

- عباس‌نژاد، علی. (۱۳۸۵). بررسی جاذبه‌های طبیعی و اکوتوریسم در مناطق تحت مدیریت سازمان محیط زیست در استان کرمان. کرمان: اداره کل محیط زیست استان کرمان.
- علی‌اصغرزاد، ناصر. (۱۳۸۵). روش‌های آزمایشگاهی در زیست‌شناسی خاک (ترجمه). تبریز: انتشارات دانشگاه تبریز. ۲۹۲ ص.
- مصدقی، محمد. (۱۳۸۴). اکولوژی گیاهی. مشهد: انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد. ۱۸۷ ص.
- محسنی، ناهید. (۱۳۹۸). تأثیر فرسایش آبی بر تنوع زیستی خاک در اکوسیستم‌های خشک. پژوهش‌های علوم زمین، ۱۰(۲)، صص: ۳۳-۲۱.
- سلطانی طولارود، علی؛ عسگری، سمیه. (۱۴۰۰). ارزیابی تأثیر جهت و موقعیت شیب بر برخی شاخص‌های میکروبی خاک در مراتع و جنگل. پژوهش‌های فرسایش محیطی، ۱۱(۱)، صص: ۷۴-۵۸.
- Abu-Hamdeh, N. H., & Reeder, R. C. (2000). Soil thermal conductivity: Effects of density, moisture, salt concentration, and organic matter. *Soil Science Society of America Journal*, 64(4), 1285-1290.
- Asghari, S. H., & Arkhazloo, H. S. (2020). Effects of land use and slope on soil physical, mechanical, and hydraulic quality in Heyran neck, Ardabil Province. *Journal of Environmental Erosion Research*, 37, 79-91.

¹ Li

² Qiu

- Banerjee, S., Misra, A., Sar, A., Pal, S., Chaudhury, S., & Dam, B. (2020). Poor nutrient availability in opencast coalmines influences microbial community composition and diversity in exposed and underground soil profiles. *Applied Soil Ecology*, 152, 103544. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103544>
- Blake, G. R., & Hartge, K. H. (1986). Methods of soil analysis: Part 1—Physical and mineralogical methods (Vol. 5, pp. 363–375). ASA and SSSA.
- Borrelli, P., Robinson, D. A., Fleischer, L. R., Lugato, E., Ballabio, C., Alewell, C., ... & Panagos, P. (2017). An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion. *Nature Communications*, 8, 1–13. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02142-7>
- Brookes, P. C., Landman, A., Pruden, G., & Jenkinson, D. S. (1985). Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen: A rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 17(6), 837–842.
- Cabrera, M. L., & Beare, M. H. (1993). Alkaline persulfate oxidation for determining total nitrogen in microbial biomass extracts. *Soil Science Society of America Journal*, 57, 1007–1012.
- Caldwell, B. A. (2005). Enzyme activities as a component of soil biodiversity: A review. *Pedobiologia*, 49, 637–644.
- Calvo de Anta, R., Luísa, E., Febrero-Bande, M., Galiñanes, J., Macías, F., Ortíz, R., & Casas, F. (2020). Soil organic carbon in peninsular Spain: Influence of environmental factors and spatial distribution. *Geoderma*, 370, 114365. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114365>
- Chen, Q., Dong, J., Zhu, D., Hu, H., Delgado-Baquerizo, M., Ma, Y., He, J.-Z., & Zhu, Y.-G. (2020). Rare microbial taxa as the major drivers of ecosystem multifunctionality in long-term fertilized soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 141, 107686. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2019.107686>
- De Vries, F. T., Griffiths, R. I., Bailey, M., Craig, H., Girlanda, M., Gweon, H. S., ... & Bardgett, R. D. (2018). Soil bacterial networks are less stable under drought than fungal networks. *Nature Communications*, 9(1), 3033. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-05516-7>
- Grilli, E., Carvalho, S. C. P., Chiti, T., Coppola, E., Ascoli, R. D., La Mantia, T., ... & Castaldi, S. (2021). Critical range of soil organic carbon in southern Europe lands under desertification risk. *Journal of Environmental Management*, 287, 112285. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112285>
- Guo, X., Feng, J., Shi, Z., Zhou, X., Yuan, M., Tao, X., ... & Zhou, Y. (2018). Climate warming leads to a divergent succession of grassland microbial communities. *Nature Climate Change*, 8, 813–818. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0254-2>
- Hladký, J., Novotná, J., Elbl, J., Kynický, J., Jiříčka, D., Novotná, J., & Brtnický, M. (2016). Impacts of water erosion on soil physical properties. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, 64(5), 1523–1527.
- Huang, J., Li, Z., Zeng, G., Zhang, J., Li, J., Nie, X., Ma, W., & Zhang, X. (2013). Microbial responses to simulated water erosion in relation to organic carbon dynamics on hilly cropland in subtropical China. *Ecological Engineering*, 60, 67–75.
- Jones, D. L., & Willett, V. B. (2006). Experimental evaluation of methods to quantify dissolved organic nitrogen (DON) and dissolved organic carbon (DOC) in soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 38(5), 991–999.
- Jones, D. L., Shannon, D., Murphy, D. V., & Farrar, J. (2004). Role of dissolved organic nitrogen (DON) in soil N cycling in grassland soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 36(5), 749–756.
- Keeney, D. R., & Nelson, D. W. (1982). Steam distillation methods for exchangeable ammonium, nitrate, and nitrite. In A. L. Page (Ed.), *Methods of Soil Analysis: Part 2. Chemical and Microbiological Properties* (2nd ed., pp. 649–654). ASA and SSSA.
- Kirkels, F. M. S. A., Cammeraat, L. H. N., & Kuhn, J. (2014). The fate of soil organic carbon upon erosion, transport and deposition in agricultural landscapes – A review of different concepts. *Geomorphology*, 226, 94–105.
- Kjeldahl, J. (1883). Neue Methode zur Bestimmung des Stickstoffs in organischen Körpern. *Zeitschrift für Analytische Chemie*, 22(1), 366–382.
- Lal, R. (2003). Soil erosion and the global carbon budget. *Environment International*, 29(4), 437–450.
- Li, Z., Tian, D., Wang, B., Wang, J., Wang, S., Chen, H., Xu, X., Wang, C., He, N., & Niu, S. (2019). Microbes drive global soil nitrogen mineralization and availability. *Global Change Biology*, 25(3), 1078–1088.
- Li, Z., Xiao, H., Tang, Z., Huang, J., Nie, X., Huang, B., Ma, W., Lu, Y., & Zeng, G. (2015). Microbial responses to erosion-induced soil physico-chemical property changes in the hilly red soil region of southern China. *European Journal of Soil Biology*, 71, 37–44.
- Liang, Y., Lal, R., Guo, S., Liu, R., & Hu, Y. (2018). Impacts of simulated erosion and soil amendments on greenhouse gas fluxes and maize yield in Miamian soil of central Ohio. *Scientific Reports*, 8, 520. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-18922-6>
- Makoi, J. H., & Ndakidemi, P. A. (2008). Selected soil enzymes: Examples of their potential roles in the ecosystem. *African Journal of Biotechnology*, 7(3), 181–191.
- Mandal, D., & Dadhwal, K. S. (2012). *Land evaluation and soil assessment for conservation planning and enhanced productivity* (p. 90). Central Soil and Water Conservation Research and Training Institute.
- Martens, R. (1995). Current methods for measuring microbial biomass C in soil: Potentials and limitations. *Biology and Fertility of Soils*, 19(2–3), 87–99.
- Nabiollahi, K., Golmohamadi, F., Taghizadeh-Mehrjardi, R., Kerry, R., & Davari, M. (2018). Assessing the effects of slope gradient and land use change on soil quality degradation through digital mapping of soil quality indices and soil loss rate. *Geoderma*, 318, 16–28.

- Orgiazzi, A., Ballabio, C., Panagos, P., Jones, A., & Fernández-Ugalde, O. (2018). LUCAS Soil, the largest expandable soil dataset for Europe: A review. *European Journal of Soil Science*, 69(1), 140–153.
- Qiu, L., Zhang, Q., Zhu, H., Reich, P. B., Banerjee, S., van der Heijden, M. G., Sadowsky, M. J., Ishii, S., Jia, X., Shao, M., & Liu, B. (2021). Erosion reduces soil microbial diversity, network complexity and multifunctionality. *The ISME Journal*, 15(8), 2474–2489.
- Qu, Y., Tang, J., Li, Z., Zhou, Z., Wang, J., Wang, S., & Cao, Y. (2020). Soil enzyme activity and microbial metabolic function diversity in soda saline-alkali rice paddy fields of northeast China. *Sustainability*, 12(23), 10095. <https://doi.org/10.3390/su122310095>
- Rasiah, V., & Kay, B. D. (1994). Characterizing changes in aggregate stability subsequent to introduction of forages. *Soil Science Society of America Journal*, 58(3), 935–942.
- Rasiah, V., & Kay, B. D. (1994). Characterizing changes in aggregate stability subsequent to introduction of forages. *Soil Science Society of America Journal*, 58(3), 935–942.
- Saleem, M., Hu, J., & Jousset, A. (2019). More than the sum of its parts: Microbiome biodiversity as a driver of plant growth and soil health. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 50(1), 145–168. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-110617-062605>
- Shi, W. (2011). Agricultural and ecological significance of soil enzymes: Soil carbon sequestration and nutrient cycling. In G. Shukla & A. Varma (Eds.), *Soil Enzymology* (pp. 43–60). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-14225-3_3
- Tian, J., McCormack, L., Wang, J., Guo, D., Wang, Q., Zhang, X., Yu, G., Blagodatskaya, E., & Kuzyakov, Y. (2015). Linkages between the soil organic matter fractions and the microbial metabolic functional diversity within a broad-leaved Korean pine forest. *European Journal of Soil Biology*, 66, 57–64.
- United Nations. (2019). *World Soil Day* [online]. <https://www.un.org/en/observances/world-soil-day>
- Wagg, C., Schlaeppi, K., Banerjee, S., Kuramae, E. E., & van der Heijden, M. G. A. (2019). Fungal-bacterial diversity and microbiome complexity predict ecosystem functioning. *Nature Communications*, 10, 4841. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-12798-y>
- Walkley, A., & Black, I. A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37(1), 29–38.
- Wang, A., Luo, C., Yang, R., Chen, Y., Shen, Z., & Li, X. (2012). Metal leaching along soil profiles after the EDDS application – A field study. *Environmental Pollution*, 164, 204–210. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2012.01.020>
- Wu, X., Zhang, Z., Cai, C., Zhou, J., & Zhang, W. (2024). Soil type regulates the divergent loss characteristics of sediment-associated carbon and nitrogen in different size classes during rainfall erosion on cultivated lands. *Journal of Environmental Management*, 354, 120479. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.120479>
- Yan, X., & Cai, Y. L. (2015). Multi-scale anthropogenic driving forces of karst rocky desertification in southwest China. *Land Degradation & Development*, 26(2), 193–200. <https://doi.org/10.1002/ldr.2209>
- Zeng, Y., Fang, X., Xiang, W., Deng, X., & Peng, C. (2017). Stoichiometric and nutrient resorption characteristics of dominant tree species in subtropical Chinese forests. *Ecology and Evolution*, 7(24), 11033–11043. <https://doi.org/10.1002/ece3.3590>.

Flood Hazard Mapping in the Keshkanrud Basin Using a Hybrid Model of Fuzzy-Analytical Hierarchy Process, TOPSIS, and Weighted Overlay Methods

Ahad Nazarpour^{1*} , Susan Andik²

1. **Corresponding Author**, Associate Prof, Department of Geology, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran

Email: Ahad.Nazarpour@iau.ac.ir ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1616-5278>

2. MSc. Student, Department of RS&GIS, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article Article history: Received: 05 May 2025 Revised: 16 August 2025 Accepted: 02 September 2025 Published: 22 June 2026 Keywords: Flood hazard mapping, Fuzzy Analytical Hierarchy Process, TOPSIS, Geographic Information System (GIS), Kashkanroud.	Floods, as one of the most destructive natural hazards, cause extensive damage worldwide, particularly in mountainous regions of Iran such as the Keshkanrud Basin. This study aimed to map flood hazard zones in the Keshkanrud Basin using a combination of Fuzzy Analytical Hierarchy Process (Fuzzy AHP), Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS), and Weighted Overlay methods within a Geographic Information System (GIS) framework. Multiple criteria, including elevation, slope, rainfall, distance from rivers, Topographic Wetness Index (TWI), land use/land cover (LULC), soil type, Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), and erosion rate, were evaluated. The results revealed that areas such as Pol-e Dokhtar, Khorramabad, Shiravand, and parts of Kuhdasht are at the highest risk of flooding due to their topographic, hydrologic, and land cover characteristics, while northern regions like Alashtar were identified as low-risk zones. These findings align with historical flood data from 2019, which reported a peak discharge of 7,000 m³/s and economic losses of 26 million USD in Pol-e Dokhtar. The Fuzzy AHP method, with a correlation coefficient of 0.92, proved to be the most accurate model, classifying 8.2% of the basin as very high-risk and 28.1% as high-risk. The TOPSIS and Weighted Overlay methods also yielded comparable results, with correlation coefficients of 0.89 and 0.87, respectively. This study provides a scientific basis for flood risk management in the Keshkanrud Basin by presenting flood hazard maps and recommending measures such as designing drainage systems, restoring vegetation cover, and implementing urban development management strategies.
How to Cite: Nazarpour, A. and Andik, S. (2026). Flood Hazard Mapping in the Keshkanrud Basin Using a Hybrid Model of Fuzzy-Analytical Hierarchy Process, TOPSIS, and Weighted Overlay Methods. <i>Journal of Natural Environmental Hazards</i>, 15 (48), 117-142.	
	© The Author/Authors Publisher: University of Sistan and Baluchestan
DOI: 10.22111/jneh.2025.51912.2112	

EXTENDED ABSTRACT

INTRODUCTION

Floods, as one of the most common natural hazards, annually cause significant financial and human losses worldwide. In Iran, mountainous regions like the Kashkanrud Basin are prone to destructive floods due to topographic characteristics, intense rainfall, and land use changes. Located in Lorestan Province, the Kashkanrud Basin, due to its position along high-flow rivers and a history of devastating floods (such as the 2019 flood with a discharge of 7,000 m³/s and damages of 26 million USD), requires a thorough flood risk assessment. Previous studies have shown that combining multi-criteria decision-making methods, such as Analytical Hierarchy Process, Fuzzy logic, and TOPSIS, with Geographic Information Systems provides a powerful tool for flood hazard zoning. This research aims to provide a comprehensive approach to identify flood-prone areas in the Kashkanrud Basin and propose management strategies.

RESULTS AND DISCUSSION

In this study, flood risk in the Kashkanrud Basin was assessed using topographic, hydrological, and environmental data through raster layers of elevation, slope, rainfall, distance from rivers, topographic wetness index, land use, soil type, normalized difference vegetation index, and soil erosion rate in a Geographic Information System environment. The results indicated that areas with elevations below 500 meters, equivalent to 42.3% of the basin's total area, particularly Pol-e Dokhtar and Khorramabad, are high-risk due to runoff accumulation in low-lying zones, while areas above 1,500 meters (15.7% of the area; Alashtar) were identified as low-risk. Additionally, slopes less than 5 degrees, covering 38.5% of the area, showed a strong correlation of 0.87 with historical floods, providing a robust indicator of high flood risk; these zones were primarily located near rivers and flat plains. Annual rainfall exceeding 800 mm, covering 45.2% of the area in the southern and central parts, showed a significant correlation of 0.85 with flood occurrences. Moreover, areas within 500 meters of riverbeds (33.6% of the area), mainly in Pol-e Dokhtar, were identified as high-risk with a correlation of 0.83. A high topographic wetness index (above 12), covering 29.4% of the area, indicated a risk of runoff accumulation due to water pooling in topographic depressions, with a correlation of 0.81. The analysis of land use revealed that urban areas and bare plains (15.8% of the area) exhibited the highest vulnerability with a correlation of 0.79, while forests and pastures (42.3%) played a mitigating role in flood flow. Regarding soil type, badlands with low permeability (28.4% of the area) were considered high-risk, while entisols (19.6%) were deemed low-risk. Additionally, areas with a normalized difference vegetation index below 0.11 (35.7% of the area) were high-risk with a correlation of 0.80, while areas with vegetation cover above 0.4 (18.9%) were low-risk. Finally, high erosion rates, calculated based on the Universal Soil Loss Equation in Kuhdasht and Pol-e Dokhtar, increased runoff and exacerbated flood risk.

The three multi-criteria decision-making methods—Fuzzy Analytical Hierarchy Process, TOPSIS, and Weighted Overlay—consistently identified Pol-e Dokhtar, Khorramabad, and Kuhdasht as high-risk zones and Alashtar as low-risk. The most accurate results were obtained with the Fuzzy AHP method, which reported 8.2% of the area as very high-risk and 28.1% as high-risk, with a correlation coefficient of 0.92 with the spring 2019 flood (discharge of 7,000 m³/s, damages of 26 million USD). The TOPSIS method, with a correlation of 0.89, and the Weighted Overlay method, with a correlation of 0.87, also showed high agreement with historical data.

CONCLUSION

This study demonstrated that the Kashkanrud Basin, particularly Pol-e Dokhtar, Khorramabad, and Kuhdasht, is at high flood risk due to its topographic, hydrological, and land cover characteristics. The Fuzzy Analytical Hierarchy Process, with a high accuracy (correlation coefficient of 0.92), performed

best in identifying high-risk zones (8.2% very high-risk, 28.1% high-risk). TOPSIS and Weighted Overlay, with acceptable accuracies (0.89 and 0.87, respectively), provided similar results. Incorporating erosion rate as an independent criterion improved the model's accuracy, particularly in erosion-prone areas like Kuhdasht. This study provides a scientific basis for flood risk management in the Kashkanrud Basin and suggests measures such as drainage system design, vegetation restoration, and urban development management to mitigate flood damage.

ETHICAL CONSIDERATIONS

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

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

REFERENCES

- Hartemink, A. E., & Bockheim, J. G. (2017). Anthrosols and Technosols. In *The Soils of the USA* (pp. 173–187). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-41870-4_11
- Jia, J., Wang, X., Hersi, N. A., Zhao, W., & Liu, Y. (2019). Flood-risk zoning based on analytic hierarchy process and fuzzy variable set theory. *Natural Hazards Review*, 20(3), 04019006. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)NH.1527-6996.0000324](https://doi.org/10.1061/(ASCE)NH.1527-6996.0000324)
- Kanani-Sadat, Y., Arabsheibani, R., Karimipour, F., & Nasser, M. (2019). A new approach to flood susceptibility assessment in data-scarce and ungauged regions based on a GIS-based hybrid multi-criteria decision-making method. *Journal of Hydrology*, 572, 17–31. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.02.034>
- Li, K., Wu, S., Dai, E., & Xu, Z. (2012). Flood loss analysis and quantitative risk assessment in China. *Natural Hazards*, 63, 737–760. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0180-y>
- Msabi, M. M., & Makonyo, M. (2021). Flood susceptibility mapping using GIS and multi-criteria decision analysis: A case of Dodoma region, central Tanzania. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 21, 100445. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100445>
- Mikhailov, L. (2003). Deriving priorities from fuzzy pairwise comparison judgements. *Fuzzy Sets and Systems*, 134(3), 365–385. [https://doi.org/10.1016/S0165-0114\(02\)00383-4](https://doi.org/10.1016/S0165-0114(02)00383-4)
- Kulimushi, L. C., Choudhari, P., Maniragaba, A., Elbeltagi, A., Mugabowindekwe, M., Rwanyiziri, G., & Singh, S. K. (2021). Erosion risk assessment through prioritization of sub-watersheds in Nyabarongo river catchment, Rwanda. *Environmental Challenges*, 5, 100260. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100260>
- Nedkov, S., & Burkhard, B. (2012). Flood regulating ecosystem services—Mapping supply and demand, in the Etropole municipality, Bulgaria. *Ecological Indicators*, 21, 67–79. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.06.022>
- Ouma, Y. O., & Tateishi, R. (2014). Urban flood vulnerability and risk mapping using integrated multi-parametric AHP and GIS: Methodological overview and case study assessment. *Water*, 6(6), 1515–1545. <https://doi.org/10.3390/w6061515>
- Pathan, S., Pradhan, B., & Alamri, A. (2022). Flood susceptibility mapping using geospatial-based TOPSIS and frequency ratio models: A case study of the Thamirabarani River basin, India. *Geocarto International*, 37(10), 2694–2721. <https://doi.org/10.1080/10106049.2020.1844300>
- Pourali, S. H., Arrowsmith, C., Chrisman, N., et al. (2016). Topography Wetness Index application in flood-risk-based land use planning. *Applied Spatial Analysis*, 9, 39–54. <https://doi.org/10.1007/s12061-014-9130-2>

مجله علمی پژوهشی مخاطرات محیط طبیعی، دوره ۱۵، شماره ۴۸، شماره پیاپی ۰۲، تیر ۱۴۰۵

پهنه‌بندی خطر سیل در حوضه آبریز کشکان رود با استفاده از مدل ترکیبی تحلیل سلسله‌مراتبی فازی، تاپسیس و روش وزن‌دهی همپوشانی

احد نظریور^{۱*} ID، سوسن اندیک^۲

۱. دانشیار گروه زمین‌شناسی، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران (نویسنده مسئول)

ایمیل: Ahad.Nazarpour@iau.ac.ir / ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1616-5278>

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد گروه سنجش‌ازدور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۱۵ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۵/۲۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۱۱ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۳/۱۶ واژه‌های کلیدی: پهنه‌بندی خطر سیلاب، تحلیل سلسله‌مراتبی فازی، تاپسیس، کشکان‌رود.	سیلاب به‌عنوان یکی از مخرب‌ترین مخاطرات طبیعی، سالانه خسارت‌های گسترده‌ای در جهان به‌ویژه در مناطق کوهستانی ایران مانند حوضه آبریز کشکان‌رود به‌بار می‌آورد. این پژوهش با هدف پهنه‌بندی خطر سیل در حوضه آبریز کشکان‌رود، با استفاده از مدل‌های ترکیبی تحلیل سلسله‌مراتبی فازی، تاپسیس در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی انجام شده است. معیارهای متعددی شامل ارتفاع، شیب، بارندگی، فاصله از رودخانه، شاخص رطوبت توپوگرافی، کاربری اراضی، نوع خاک، شاخص پوشش گیاهی نرمال شده و نرخ فرسایش مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مناطق پل‌دختر، خرم‌آباد، شیراوند و بخش‌هایی از کوه‌دشت به‌دلیل شرایط توپوگرافی، هیدرولوژیکی و پوشش زمین، در معرض بیشترین خطر سیل قرار دارند، درحالی‌که نواحی شمالی مانند الشتر کم‌خطر هستند. این یافته‌ها با داده‌های تاریخی سیل ۱۳۹۸ (دبی ۷۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه و خسارت‌های ۲۶ میلیون دلاری) هم‌خوانی دارد. روش وزن‌دهی همپوشانی با ضریب همبستگی ۰/۹۲، دقیق‌ترین مدل بود و ۸/۲٪ از مساحت حوضه را در محدوده خطر بسیار بالا و ۲۸/۱٪ را در محدوده خطر بالا طبقه‌بندی کرد. روش‌های تاپسیس و تحلیل سلسله‌مراتبی فازی نیز به ترتیب با ضرایب همبستگی ۰/۸۹ و ۰/۸۷، نتایج مشابهی ارائه دادند. این مطالعه با ارائه نقشه‌های خطر سیل و پیشنهاد اقداماتی نظیر طراحی سیستم‌های زهکشی، احیای پوشش گیاهی و مدیریت توسعه شهری، مبنایی علمی برای کاهش خسارت‌های سیل در حوضه آبریز کشکان‌رود فراهم می‌کند.
استناد: نظریور، احد و اندیک، سوسن. (۱۴۰۵). پهنه‌بندی خطر سیل در حوضه آبریز کشکان‌رود با استفاده از مدل ترکیبی تحلیل سلسله‌مراتبی فازی، تاپسیس و روش وزن‌دهی همپوشانی. <i>مخاطرات محیط طبیعی</i>، ۱۵ (۴۸)، ۱۱۷-۱۴۲.	
© نویسنده/ نویسندگان DOI: 10.22111/jneh.2025.51912.2112 ناشر: دانشگاه سیستان و بلوچستان	

مقدمه

مطالعات بسیاری در زمینه خطرات سیل انجام شده است و هدف اصلی کلیه این مطالعات، کاهش مؤلفه‌های تأثیرگذار بر خطر وقوع سیلاب بوده است (Hooijer et al., 2004). عوامل مختلفی مانند تغییرات کاربری اراضی، تخریب پوشش گیاهی، درجه اشباع خاک، تجاوز به حریم رودخانه‌ها، شدت بارندگی، شیب و نفوذپذیری حوضه نقش مهمی در افزایش احتمال وقوع سیلاب دارند (Yamani & Enayati, 2006). در سنجش شرایط سیل‌خیزی، می‌بایستی کلیه عوامل و فاکتورهای شهری را مورد بررسی قرار داد و توجه صرف به وضعیت سیل‌خیزی بدون توجه به سایر عوامل و پارامترهای شهری، کارگشا نخواهد بود (غلامی و همکاران، ۱۳۹۸). این پدیده یکی از رایج‌ترین و مخرب‌ترین بلایای طبیعی محسوب می‌شود که خسارت‌های مالی و جانی قابل‌توجهی در سراسر جهان به همراه دارد (Kourgialas & Karatzas, 2011).

روش‌های مختلفی برای بررسی و محاسبه پتانسیل بروز سیل ارائه شده است که هر یک بر اساس ویژگی‌ها و داده‌های اطلاعاتی منطقه مورد نظر می‌باشد (موسوی و همکاران، ۱۴۰۰). ترکیب روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره^۱ و سیستم اطلاعات جغرافیایی^۲ می‌تواند به‌عنوان ابزاری قدرتمند برای تحلیل و کنترل بلایای طبیعی مورد استفاده قرار گیرد (Fernández & Lutz, 2010). به‌طور هم‌زمان، اپراتورهای فازی برای لحاظ کردن محدودیت‌های تصمیم‌گیری در توزیع مجدد منابع آب در حوضه‌های رودخانه‌ای توسعه داده شده‌اند (Chen & Chang, 2010).

استفاده از ترکیب روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره و سیستم اطلاعات جغرافیایی به پهنه‌بندی مناطق مستعد سیلاب کمک می‌کند (Sepelri et al., 2019; Rahmati et al., 2015). از فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی و مجموعه متغیرهای فازی برای تعیین مناطق در معرض بیشترین خطر سیل استفاده شده است (Jia, J et al., 2019). همچنین، مطالعات سیل‌خیزی انجام‌شده در تایلند نشان داده‌اند که مناطقی که در نزدیک زهکش‌ها، در معرض خطر بیشتری قرار دارند (Yodying et al., 2019). روش‌های تحلیل سلسله‌مراتبی^۳، منطق فازی^۴، رگرسیون لجستیک^۵، درخت تصمیم^۶، یادگیری ماشین^۷ و شبکه عصبی مصنوعی^۸ از جمله روش‌هایی هستند که دقت بالایی در پیش‌بینی سیل دارند (Kanani-Sadat et al., 2019; Malik et al., 2020). همچنین، روش منطق فازی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین و پیشرفته‌ترین روش‌های آماری برای تعیین حساسیت سیل مطرح شده است (Wang et al., 2020). امروزه رشد بی‌رویه جمعیت، تسطیح زمین و اشغال حریم رودخانه‌ها و مسیل‌ها در کنار عوامل اقلیمی و فیزیوگرافی در شهرهای بزرگ سبب گسترش سیلاب‌های شهری شده است (موسوی و همکاران، ۱۳۹۵). تصمیم‌گیری چندمعیاره با ارزیابی گزینه‌های مختلف بر اساس معیارهای متعدد، می‌تواند موجب کاهش سوگیری در تصمیم‌گیری‌های پیچیده شود (Kulimushi, L. et al., 2021).

در تانزانیا، تهیه نقشه حساسیت سیل با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی نشان داده است که ۴۰/۲۷ درصد از محدوده مطالعاتی در محدوده خطر سیل بسیار زیاد و ۵۹/۷۳ درصد در محدوده خطر زیاد قرار دارد (Makony &

¹ Multiple Criteria Decision Analysis (MCDA)

² Geographical Information system (GIS)

³ AHP

⁴ Fuzzy Logic

⁵ Logistic Regression

⁶ Decision Trees

⁷ Machine Learning

⁸ Artificial Neural Network

(Msabi, 2021). در ایران، بررسی پهنه‌بندی خطر سیل در منطقه یک کلان‌شهر تهران با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی و مدل ترکیبی تحلیل سلسله‌مراتبی نشان داد که پهنه‌های خطر بسیار زیاد و زیاد بیشتر منطبق بر نقاط خروجی حوضه‌ها و مناطق شهری هستند (نجفی و همکاران، ۱۳۹۹). همچنین، در شهر ایلام، پهنه‌بندی با استفاده از رویکرد تلفیقی تحلیل سلسله‌مراتبی و منطق فازی نشان داد که مناطق شمال و شمال غربی این شهر دارای احتمال خطر سیل بالاتری هستند (زیاری و همکاران، ۱۴۰۰).

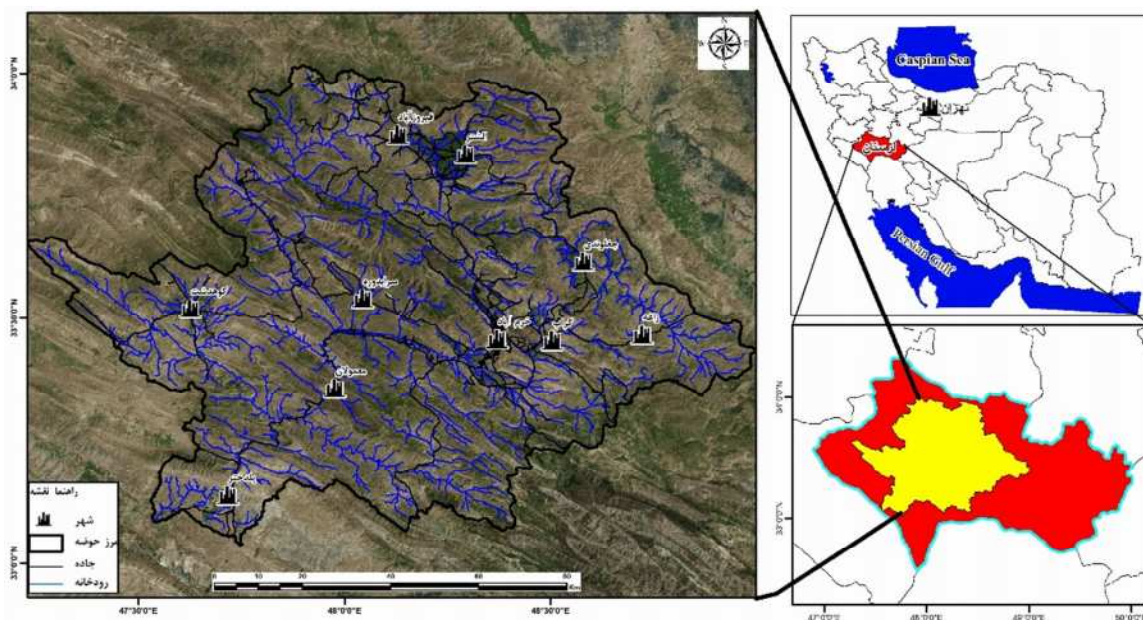
هدف اصلی این پژوهش، ارائه یک رویکرد جامع و دقیق برای ارزیابی پتانسیل سیل‌خیزی در منطقه کشکانرود است. با توجه به افزایش فراوانی و شدت سیلاب‌ها در این منطقه، شناسایی پهنه‌های مستعد سیل و ارائه راه‌کارهای کارآمد برای کاهش خطرات ناشی از آن ضروری است. در این راستا، این مطالعه از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره تحلیل سلسله‌مراتبی، تاپسیس و تحلیل وزن‌دهی همپوشانی بهره می‌برد تا دقت ارزیابی‌های مکانی را افزایش داده و تصویری شفاف‌تر از خطرات احتمالی ارائه دهد. نتایج این پژوهش می‌تواند مبنایی علمی برای سیاست‌گذاران و برنامه‌ریزان شهری و محیط‌زیستی فراهم آورد تا اقدامات پیشگیرانه و مدیریت بهینه منابع در برابر سیلاب‌های آتی اتخاذ شود.

داده‌ها و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

کشکانرود یکی از مهم‌ترین رودخانه‌های غرب ایران است که در استان لرستان جریان دارد و از شاخه‌های اصلی رودخانه کرخه محسوب می‌شود (شکل ۱). این رودخانه پس از عبور از مناطق مختلف، به رودخانه سیمره و سپس به کرخه می‌ریزد. حوضه آبریز کشکان شامل چندین زیرحوضه است که پلدختر، کوه‌دشت، خرم‌آباد، شیراوند، الشتر و چغلوندی از مهم‌ترین آن‌ها می‌باشند. پلدختر، به دلیل قرارگیری در حوضه آبریز کشکان و سیمره، یکی از مستعدترین مناطق سیل‌خیز استان محسوب می‌شود. عرض زیاد رودخانه، شیب کم در پایین‌دست و بارش‌های ناگهانی از عوامل اصلی وقوع سیلاب‌های مخرب در این منطقه است. سیل بهار سال ۱۳۹۸ خسارت‌های زیادی به این شهر وارد کرد.

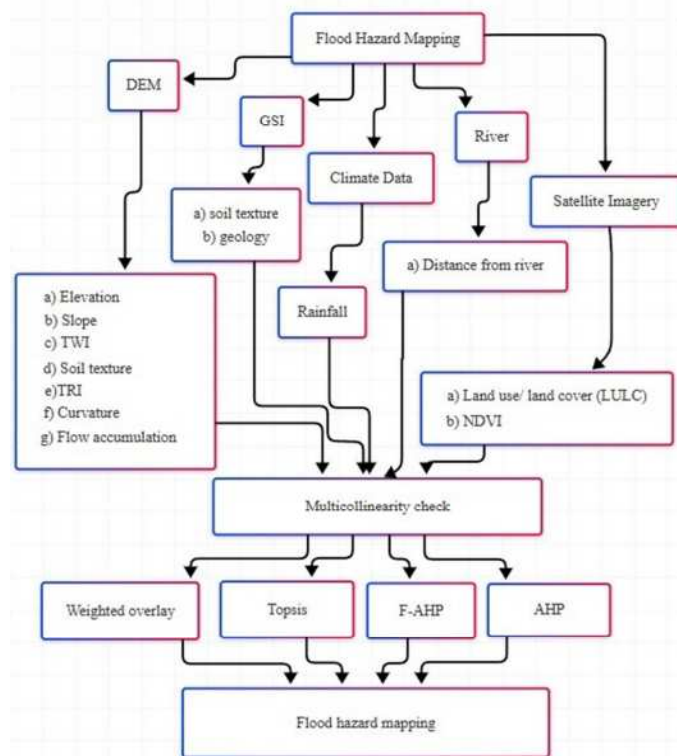
بر اساس گزارش‌های ارائه‌شده توسط تیم کشوری سازمان ملل متحد در ایران، بارش‌های شدید و پی‌درپی بر روی حوضه آبریز پلدختر در فروردین ماه سال ۱۳۹۸، باعث سیل ویرانگری در امتداد رودخانه کشکان و شاخه‌های فرعی آن با دبی بیش از ۷۰۰۰ متر مکعب بر ثانیه شد (Parsian et al., 2021). میانگین بلندمدت دبی رودخانه کشکان ۳۰ متر مکعب بر ثانیه است. در بهار ۱۳۹۸، سیل در پلدختر خسارت‌های اقتصادی سنگینی به بار آورد. ارزش خسارت‌های واردشده به تأسیسات تولیدی، ساختمان‌ها و دارایی‌های کشاورزی حدود ۲۶ میلیون دلار آمریکا برآورد شده است (Parsian et al., 2021). حدود ۵۷ پل و پل‌آبرو و ۲۵۰ کیلومتر از جاده‌های اصلی در این استان آسیب دیده است. علاوه بر خسارت‌های مالی در استان لرستان، بیش از ۴۶۰۰۰ خانوار تحت تأثیر منفی قرار گرفته‌اند و بسیاری از مردم مجبور شده‌اند اموال و دارایی‌های خود را رها کنند (Parsian et al., 2021).



شکل ۱: موقعیت منطقه مورد مطالعه و آبراهه‌های حوضه آبریز کشکان رود

داده‌ها

در این پژوهش، با هدف تهیه نقشه خطر سیل، از ترکیبی از داده‌های مختلف استفاده شده است. این داده‌ها شامل اطلاعاتی در مورد توپوگرافی منطقه (مانند ارتفاع، شیب)، پوشش زمین (کاربری اراضی، نوع خاک، پوشش گیاهی)، آب و هوا (بارندگی) و فاصله از رودخانه است. همچنین برای انجام این پژوهش، از روش‌های مختلفی مانند مطالعه اسناد و گزارش‌های موجود، استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و بازدیدهای میدانی بهره گرفته شده است. اطلاعات جمع‌آوری شده در قالب لایه‌های اطلاعاتی مختلفی سازماندهی شده و سپس با استفاده از فن‌های فازی با یکدیگر ترکیب شده‌اند. فن‌های فازی به محققان اجازه می‌دهد تا داده‌های کیفی و کمی را با هم ترکیب کرده و به نتایج دقیق‌تری دست یابند. هر یک از این معیارها به صورت یک لایه اطلاعاتی مجزا نمایش داده شده و سپس با استفاده از توابع فازی، به یکدیگر ترکیب شده‌اند. در نهایت، با ترکیب تمام این لایه‌ها، نقشه نهایی خطر سیل تهیه شده است (شکل ۲).



شکل ۲: مدل سلسله‌مراتبی تحلیل خطر سیل در حوضه کشکانرود

روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP):

توماس ال. ساعتی روش تحلیل سلسله‌مراتبی را در اواخر دهه ۱۹۷۰ میلادی ایجاد کرد. این مدل در ابتدا در بخش بازاریابی مورد استفاده قرار گرفت (Saaty, 1987). این روش، یک روش کارآمد برای حل مسائل پیچیده است (Sowissi et al., 2022). با توجه به تأثیر هر لایه در ایجاد نقشه‌ی مستعد سیلاب، وزن هر لایه متفاوت است. روش تحلیل سلسله‌مراتبی از ماتریس‌های مقایسه‌ی زوجی^۱ برای مقایسه وزن هر کلاس در یک لایه موضوعی و همچنین بین لایه‌های موضوعی مختلف استفاده می‌کند. بنابراین، وزن نسبی هر عامل با استفاده از مقیاس ساعتی (Saaty, 1980) که بین ۱ تا ۹ متغیر است، محاسبه شد (جدول ۱). این روش به‌عنوان فن دانش‌محور شناخته می‌شود و مرحله اساسی و ضروری این فن است (Mitra et al., 2022).

جدول ۱: مقیاس مقایسات زوجی ساعتی

مقدار	تعریف	توضیح
۱	اهمیت یکسان	دو معیار اهمیت یکسانی دارند
۳	اهمیت متوسط	یک معیار کمی مهم‌تر از معیار دیگر است
۵	اهمیت زیاد	یک معیار به‌طور قابل‌توجهی مهم‌تر از معیار دیگر است
۷	اهمیت بسیار زیاد	یک معیار خیلی مهم‌تر از معیار دیگر است
۹	اهمیت فوق‌العاده زیاد	یک معیار به‌طور مطلق مهم‌تر از معیار دیگر است
۲ و ۴ و ۶ و ۸	مقادیر میانی	زمانی استفاده می‌شود که نیاز به سطحی بین دو مقدار اصلی باشد.

¹ Pairwise Comparison Matrices

بررسی سازگاری قضاوت‌ها برای تأیید قابلیت اطمینان و پذیرش تصمیمات کارشناسان در مقایسات زوجی هر عامل شرطی، بسیار مهم است (Mitra et al., 2022). این سازگاری با استفاده از نسبت سازگاری^۱ (CR) ارزیابی می‌شود که به شاخص تصادفی^۲ (RI) وابسته است (جدول ۲). این شاخص‌ها به‌عنوان معیاری ثابت برای ارزیابی دقت مقایسه‌ها استفاده می‌شوند (Saaty, 1980).

جدول ۲: شاخص سازگاری تصادفی (Saaty, 1988).

Number of Criteria (n)	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.12	1.24	1.32

نسبت سازگاری (CR) با استفاده از معادله (۱) محاسبه شده است:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (1)$$

در اینجا، CR نسبت سازگاری، CI شاخص سازگاری و RI شاخص تصادفی ثابت شده است (جدول ۲). مقدار CI با استفاده از معادله (۶) محاسبه می‌شود:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (2)$$

نتایج محاسبات سازگاری برای این مطالعه در جدول (۳) ارائه شده است. با توجه به اینکه $CR=0.05$ کمتر از ۰/۱ است، مدل از نظر سازگاری مورد قبول است (Mitra et al., 2021).

جدول ۳: شاخص سازگاری تصادفی (Saaty, 1988).

λ_{max}	n	CI	CR
9.682742	9	0.085343	0.058857

در روش روش تحلیل سلسله‌مراتبی، یک ماتریس مربعی $A = (a_{ij})$ ایجاد شد که در آن n معیار برای پارامترهای مستعد سیلاب نیاز به مقایسه داشتند. معادله (۳) برای محاسبه a_{ij} از عناصر ماتریس اعمال شد:

$$a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}} \quad (3)$$

در مورد ماتریس‌های مقایسه زوجی (PCM)، a_{ij} از تساوی $a_{ij} = \frac{P_i}{P_j}$ ، پیروی می‌کند. پس از تشکیل ماتریس مقایسات زوجی، مقیاس نسبی^۳ از این ماتریس محاسبه می‌شود تا وزن‌ها یا رتبه‌ها به معیارها یا گزینه‌ها اختصاص داده شوند. این فرآیند شامل مراحل زیر است (Mikhailov, 2003):

مرحله ۱: تمام عناصر ستون j از ماتریس A را با استفاده از معادله (۴) جمع می‌شوند.

$$\frac{P_1}{P_j} + \dots + \frac{P_1}{P_j} + \dots + \frac{P_n}{P_n} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{P_j} \quad (4)$$

مرحله ۲: مقادیر نرمال‌شده با استفاده از معادله (۵) محاسبه شدند (جدول ۴).

$$\frac{\frac{P_i}{P_j}}{\frac{\sum_{i=1}^n P_i}{P_j}} = \frac{P_i}{P_j} \times \frac{P_j}{\sum_{i=1}^n P_i} = \frac{P_i}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad (5)$$

¹ Consistency Ratio

² Random Index

³ Relative Ratio Scale

مرحله ۳: در این مرحله، وزن یا رتبه هر معیار W_i با محاسبه میانگین عناصر سطر مربوطه از ماتریس نرمال شده تعیین می‌شود (جدول ۵) (معادله ۶).

$$W_i = \left(\frac{P_i}{\sum_{i=1}^n P_i} + \dots + \frac{P_i}{\sum_{i=1}^n P_i} \right) \times \frac{1}{n} \quad (6)$$

در نهایت وزن نهایی معیارها بر اساس میانگین سطرها در جدول (۵) ارائه گردیده است.

جدول ۴: ماتریس مقایسات نرمال شده

	DEM	Rainfall	Distance from River	LULC	TWI	Slope	Soil Type	NDVI	erosion rate
DEM	0.32732	0.3999	0.28571	0.29847	0.38997	0.23622	0.24138	0.20253	0.2
Rainfall	0.16366	0.19995	0.28571	0.29847	0.11142	0.23622	0.17241	0.17722	0.17778
Distance from River	0.16366	0.09998	0.14286	0.19898	0.11142	0.09449	0.2069	0.1519	0.13333
LULC	0.10911	0.06665	0.07143	0.09949	0.27855	0.18898	0.10345	+0.17722	0.17778
TWI	0.04676	0.09998	0.07143	0.0199	0.05571	0.14173	0.13793	0.12658	0.13333
Slope	0.06546	0.03999	0.07143	0.02487	0.01857	0.04724	0.06897	0.07595	0.06667
Soil Type	0.04676	0.03999	0.02381	0.03316	0.01393	0.02362	0.03448	0.05063	0.04444
NDVI	0.04091	0.02856	0.02381	0.01421	0.01114	0.01575	0.01724	0.02532	0.04444
erosion rate	0.03637	0.02499	0.02381	0.01244	0.00929	0.01575	0.01724	0.01266	0.02222

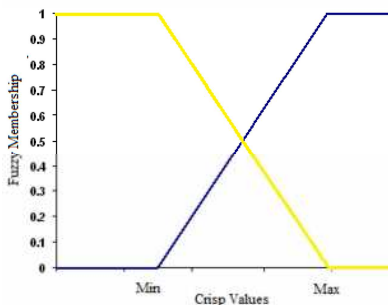
جدول ۵: مقدار وزن هر پارامتر ورودی که با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی تعیین شده است.

	DEM	Rainfall	Distance from River	LULC	TWI	Slope	Soil Type	NDVI	erosion rate
وزن معیارها	0.287	0.203	0.145	0.141	0.093	0.053	0.035	0.025	0.019

تمامی مجموعه داده‌های ورودی با استفاده از یک تابع عضویت فازی خطی به مقادیر فازی تبدیل شدند. همان‌طور که در شکل (۳) نشان داده شده است، یک تابع عضویت فازی خطی، مقادیر ورودی هر مجموعه داده را بر اساس معادله (۷) به بازه ۰ تا ۱ تبدیل می‌کند (Parsian et al., 2021). در این تبدیل، مقدار صفر و یک به ترتیب نشان‌دهنده پیکسل‌هایی با پتانسیل بسیار کم و بسیار زیاد برای خطر سیلاب هستند. بر این اساس، برای دو پارامتر ورودی یعنی بارش و شاخص رطوبت توپوگرافی از یک تابع خطی با شیب مثبت استفاده شده است. درحالی‌که برای سایر پارامترها یعنی مدل ارتفاع رقومی، شیب، فاصله از رودخانه اصلی، کاربری اراضی و پوشش زمین، نوع خاک، شاخص پوشش گیاهی نرمال شده و نرخ فرسایش، یک تابع خطی با شیب منفی در نظر گرفته شده است (Parsian et al., 2021).

$$f(x) = \begin{cases} 1 & \text{or } 0 \quad x > \text{Max} \\ 0 & \text{or } 1 \quad x < \text{Min} \\ \frac{x - \text{Min}}{\text{Max} - \text{Min}} & \text{Min} < x < \text{Max} \end{cases} \quad (7)$$

در اینجا، Max و Min به ترتیب نشان‌دهنده مقادیر حداکثر و حداقل هر پارامتر هستند، و x مقدار پیکسل مربوط به هر پارامتر است.



شکل ۳: توابع عضویت فازی خطی با شیب مثبت (آبی) و شیب منفی (زرد) که در مرحله فازی سازی استفاده شده‌اند

فن رتبه‌بندی بر اساس شباهت به مدل راه‌حل ایده‌آل تاپسیس

روش تاپسیس^۱ که اولین بار توسط هوانگ^۲ و یوون^۳ در سال (۱۹۸۱) مطرح شد، یک رویکرد رتبه‌بندی بر اساس مفهوم راه‌حل ایده‌آل مثبت^۴ و منفی^۵ است که از فاصله اقلیدسی برای ارزیابی نزدیکی نسبی گزینه‌ها به این نقاط استفاده کرده است (Hwang, Yoon & 1981). در این روش، گزینه‌ای بهینه است که نزدیک‌ترین فاصله را به راه‌حل ایده‌آل مثبت و بیشترین فاصله را از راه‌حل ایده‌آل منفی داشته باشد. برخلاف روش ترکیب خطی وزن‌دار^۶ که مقادیر مطلق شاخص‌ها را محاسبه می‌کند، تاپسیس تغییرات حدی شاخص‌ها را نیز در اولویت‌بندی لحاظ می‌کند و برای تحلیل داده‌های رستری و ارزیابی ریسک در سیستم اطلاعات جغرافیایی مناسب است (Rao, 2007).

برای استفاده از مدل تاپسیس، باید مراحل زیر طی شوند:

مرحله ۱: ساخت ماتریس تصمیم نرمال‌شده وزنی

ماتریس تصمیم نرمال‌شده وزنی D از معادله (۸) زیر به‌دست می‌آید.

$$D = (V_{ij})_{m \times n} = (W_{ij}X_{ij})_{m \times n}, \quad i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n \quad (8)$$

که در آن X_{ij} مقادیر ویژگی استاندارد شده گزینه i -ام در معیار j -ام است و وزن نرمال‌شده معیار j -ام است که باید از سایر روش‌های وزن‌دهی استخراج شود یا توسط تصمیم‌گیرندگان تعیین گردد. جهت درک بهتر این مرحله، نمایش گرافیکی مقایسه‌ی دو عدد فازی مثلثی در شکل (۴) ارائه شده است (Rao, 2007).

مرحله ۲: ساخت راه‌حل ایده‌آل مثبت و منفی

راه‌حل‌های ایده‌آل مثبت و منفی به‌صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$PIS = \{v_1^+, \dots, v_n^+\}, \quad v_i^+ = \{\max(v_{ij}), j \in J; \min(v_{ij}), j \in J'\} \quad (9)$$

$$NIS = \{v_1^-, \dots, v_n^-\}, \quad v_i^- = \{\max(v_{ij}), j \in J; \min(v_{ij}), j \in J'\} \quad (10)$$

که در آن J و J' زیرمجموعه‌ای از معیارهای سود (مثبت) و هزینه (منفی) هستند.

¹ TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution)

² Hwang

³ Yoon

⁴ PIS (Positive Ideal Solution)

⁵ NIS (Negative Ideal Solution)

⁶ Weighted Linear Combination (WLC)

مرحله ۳: محاسبه فاصله هر گزینه راه حل ایده آل مثبت و منفی است:

فاصله گزینه‌ها از راه حل ایده آل مثبت و منفی از طریق فاصله اقلیدسی به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$di^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2}, i = 1, \dots, m \quad (11)$$

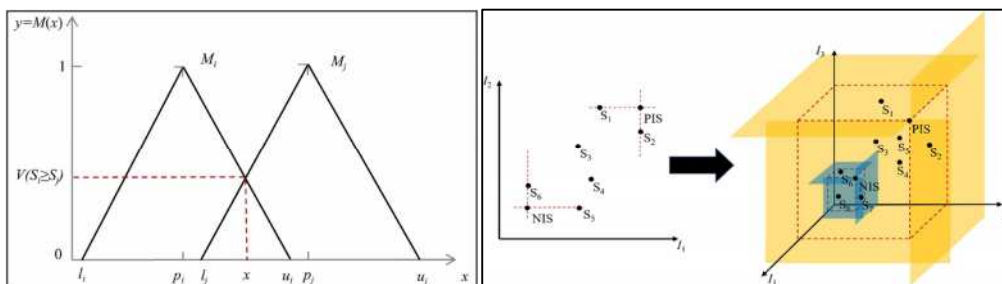
$$di^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2}, i = 1, \dots, m \quad (12)$$

مرحله ۴: محاسبه نزدیکی نسبی گزینه i -ام به راه حل ایده آل C_i

نزدیکی نسبی هر گزینه C_i به راه حل ایده آل مثبت، با رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$C_i = \frac{di^-}{di^+ + di^-}, 0 \leq C_i \leq 1, i = 1, \dots, m \quad (13)$$

در نهایت، گزینه‌ها بر اساس مقدار C_i رتبه‌بندی می‌شوند. اگر $C_i = 1$ باشد، گزینه با راه حل ایده آل مثبت برابر است. بنابراین، هرچه C_i بزرگ‌تر باشد، آن گزینه به راه حل ایده آل مثبت نزدیک‌تر بوده و به عنوان گزینه بهتر در نظر گرفته می‌شود. نمودار شماتیک اصلی روش تاپسیس در دو و سه بُعد در شکل (۵) ارائه داده شده است (Sun et al., 2024).



شکل ۵: نمودار شماتیک اصلی روش تاپسیس در دو و سه بُعد

شکل ۴: نمایش گرافیکی مقایسه‌ی دو عدد فازی مثلثی

روش وزن دهی همپوشانی

روش وزن دهی همپوشانی یک روش ساده برای پهنه‌بندی خطر در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی است که لایه‌های مختلف را با وزن‌های مشخص ترکیب می‌کند (جدول ۴). در این پژوهش، معیارهایی مانند ارتفاع، شیب، بارندگی و نرخ فرسایش به صورت لایه‌های رستری آماده و در بازه $[0, 1]$ نرمال‌سازی شدند (۰ کم‌خطر و ۱ پرخطر). هر معیار یک وزن (W_i) دریافت می‌کند که نشان‌دهنده اهمیت آن در خطر سیل است. این وزن‌ها در این مطالعه بر اساس نظرات کارشناسی تعیین شدند (نه با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی) و مجموع آنها برابر ۱ است (قیصری، ۱۳۹۴).

سپس لایه‌ها با فرمول زیر ترکیب می‌شوند تا نقشه خطر سیلاب‌خیزی تولید شود:

$$S = \sum_{i=1}^n R_i \times W_i \quad (14)$$

که در آن S امتیاز خطر هر پیکسل، W_i وزن معیار i ، R_i مقدار نرمال‌شده معیار i است. خروجی به ۵ کلاس خطر بسیار کم تا بسیار زیاد تقسیم می‌شود.

نتایج پژوهش

برای ارزیابی دقیق پتانسیل خطر سیل در حوضه آبریز کشکان رود، معیارهای متعددی شامل ارتفاع، شیب، بارندگی، فاصله از رودخانه، شاخص رطوبت توپوگرافی، کاربری اراضی، نوع خاک، شاخص پوشش گیاهی نرمال شده و نرخ فرسایش مورد بررسی قرار گرفتند. به منظور سنجش ارتباط این معیارها با وقوع سیل، ضرایب همبستگی پیرسون بین مقادیر فازی شده هر معیار و داده‌های تاریخی سیلاب سال ۱۳۹۸ محاسبه شد. این ضرایب با استفاده از رابطه همبستگی پیرسون که میزان ارتباط خطی بین مقادیر فازی شده معیارها و شدت خسارت‌های سیل (بر اساس دبی ۷۰۰۰ متر مکعب بر ثانیه) را می‌سنجد، به دست آمدند. همچنین، تحلیل‌های ترکیبی برخی معیارها (مانند تعامل شیب با نوع خاک یا فاصله از رودخانه با بارندگی) انجام شد تا تأثیرات متقابل آن‌ها بر خطر سیل مشخص شود. جدول (۶)، ضرایب همبستگی پیرسون را برای هر معیار و ترکیب‌های منتخب ارائه می‌دهد که نشان‌دهنده ارتباط قوی این عوامل با پتانسیل وقوع سیل است. در ادامه، هر یک از این معیارها به صورت جداگانه شرح داده می‌شوند تا نقش آن‌ها در پهنه‌بندی خطر سیل به طور دقیق‌تر بررسی شود.

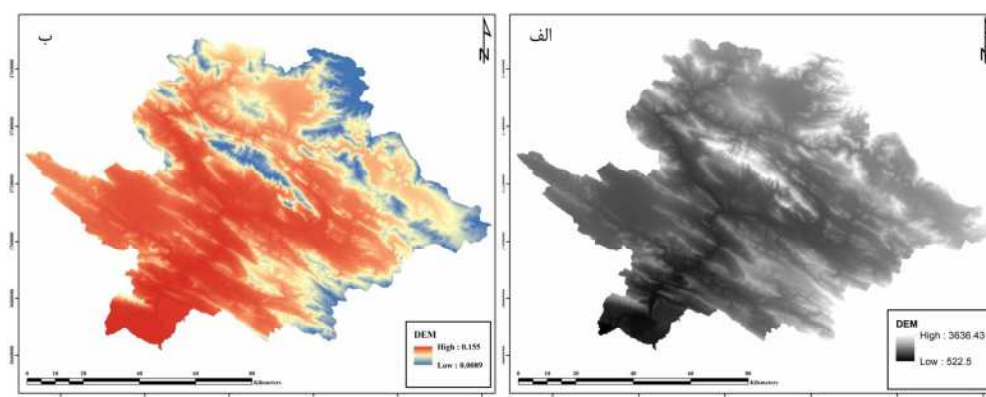
جدول ۶: ضرایب همبستگی پیرسون معیارهای پهنه‌بندی خطر سیل با داده‌های تاریخی سیلاب ۱۳۹۸ در حوضه آبریز کشکان رود

توضیحات	ضریب همبستگی پیرسون با داده‌های تاریخی سیلاب ۱۳۹۸	معیار
همبستگی قوی بین ارتفاع کم و وقوع سیل (مناطق با ارتفاع کمتر از ۵۰۰ متر).	۰/۸۷	ارتفاع
شیب‌های کم (کمتر از ۵ درجه) با خطر بالای سیل همبستگی دارند.	۰/۸۷	شیب
بارندگی بالای ۸۰۰ میلی‌متر در سال با خطر بالای سیل مرتبط است.	۰/۸۵	بارندگی
فاصله کمتر از ۵۰۰ متر از رودخانه با خطر بالای سیل همبستگی دارد.	۰/۸۳	فاصله از رودخانه
مقادیر شاخص رطوبت توپوگرافی بالاتر از ۱۲ با خطر بالای سیل مرتبط است.	۰/۸۱	شاخص رطوبت توپوگرافی
مناطق شهری و دشت‌های بدون پوشش با خطر بالای سیل همبستگی دارند.	۰/۷۹	کاربری اراضی
خاک‌های بایر (بدلندها) با خطر بالای سیل همبستگی دارند.	۰/۸۲	نوع خاک
شاخص پوشش گیاهی کمتر از ۰/۱۱ با خطر بالای سیل همبستگی دارند.	۰/۸۰	شاخص پوشش گیاهی
فرسایش بالا با افزایش رواناب و خطر سیل همبستگی دارد.	۰/۸۰	نرخ فرسایش
ترکیب معیارها		
مناطق با شیب کم و خاک‌های نفوذناپذیر (بدلندها) دارای افزایش خطر سیل دارند.	۰/۹۲	شیب و نوع خاک
مناطق نزدیک به رودخانه با شیب کم و بارندگی بالا خطر سیل بیشتری دارند.	۰/۸۹	فاصله از رودخانه، شیب و بارندگی
مناطق شهری با شیب کم و بارندگی بالا خطر سیل بیشتری دارند.	۰/۸۶	کاربری اراضی، شیب و بارندگی

مدل رقومی ارتفاع

ارتفاع یکی از مهم‌ترین پارامترها در مطالعات ریسک سیل است؛ زیرا به طور مستقیم بر الگوهای هیدرولوژیکی و توزیع جریان آب در حوضه آبریز تأثیر می‌گذارد. مناطق با ارتفاع کمتر به دلیل قرار گرفتن در نقاط پست‌تر، به عنوان نواحی تجمع آب شناخته می‌شوند و بنابراین، نسبت به مناطق مرتفع‌تر، مستعدتر به وقوع سیلاب هستند (Li et al.,

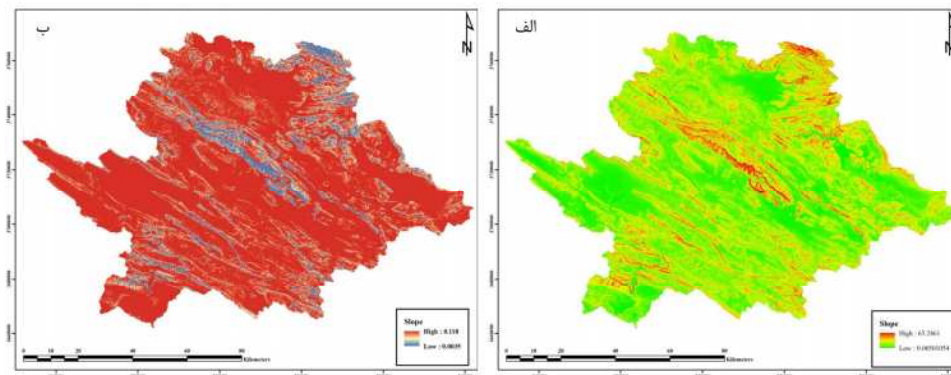
(Nedkoy et al., 2012; Nedkoy et al., 2012). این رفتار به دلیل تفاوت در پتانسیل گرانشی جریان آب است، به طوری که در مناطق کم ارتفاع، سرعت تخلیه آب کاهش یافته و احتمال آب گرفتگی افزایش می یابد (Ouma & Tateishi, 2014). نقشه فازی حاصل از این فرآیند نشان داد که ۴۲/۳٪ از مساحت حوضه آبریز کشکانرود در محدوده ارتفاعی کمتر از ۵۰۰ متر قرار دارد و به عنوان مناطق با خطر بالای سیل شناسایی شده است. این مناطق بیشتر در بخش های جنوبی و مرکزی حوضه، به ویژه در نزدیکی پل دختر و خرم آباد، واقع شده اند که با داده های تاریخی سیلاب، از جمله سیل ویرانگر فروردین ۱۳۹۸، هم خوانی دارد. در مقابل، نواحی مرتفع تر (بیش از ۱۵۰۰ متر) که بیشتر در بخش های شمالی حوضه (مانند الشتر) قرار دارند، تنها ۱۵/۷٪ از مساحت را تشکیل داده و به عنوان مناطق کم خطر طبقه بندی شده اند (شکل ۶).



شکل ۶: نقشه های مدل رقومی ارتفاع (الف) و فازی شده (ب) حوضه آبریز کشکانرود

شیب

شیب زمین به طور مستقیم بر جریان سطحی، نفوذ آب و تجمع رواناب تأثیر دارد. شیب های کم با کاهش سرعت آب، باعث افزایش نفوذ و تجمع رواناب و در نتیجه افزایش خطر سیل می شوند، در حالی که شیب های تند (ارتفاعات) به تخلیه سریع تر و کاهش تجمع آب منجر می شوند (Kazakis et al., 2015; Ouma & Tateishi, 2014). در حوضه کشکانرود، میانگین شیب ۱۲/۷ درجه و دامنه آن ۰ تا ۲۴۱/۳۶ درجه است. حدود ۳۸/۵٪ منطقه دارای شیب کمتر از ۵ درجه (خطر بالای سیل) و ۱۲/۴٪ منطقه شیب بیش از ۲۰ درجه (خطر پایین) دارد. ضریب همبستگی پیرسون (۰/۸۷) بین شیب کم و داده های تاریخی سیلاب، رابطه قوی آنها را تأیید کرد. مناطق مستعد سیل (مانند پل دختر و خرم آباد) در بخش های جنوبی و مرکزی حوضه واقع اند که با داده های تاریخی سیلاب منطبق است. تحلیل ترکیبی نیز نشان داد که در مناطق کم شیب با خاک های نفوذپذیری کم، خطر سیل به طور قابل توجهی افزایش می یابد (ضریب همبستگی ۰/۹۲). با این وجود، دقت داده ها در مناطق پرتراکم یا شیب های تند ممکن است محدودیت هایی داشته باشد.

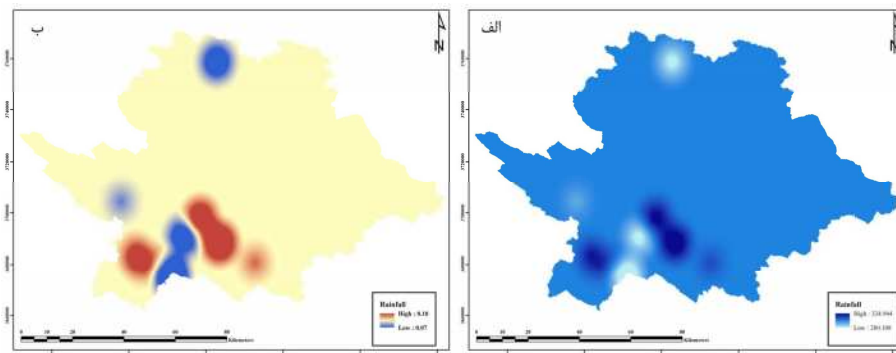


شکل ۷: نقشه‌های شیب (الف) و فازی شده (ب) حوضه آبریز کشکان رود

بارندگی

بارندگی یکی از پارامترهای کلیدی و اساسی در نگاشت خطر و حساسیت سیل محسوب می‌شود؛ زیرا به‌طور مستقیم بر حجم رواناب و پتانسیل وقوع سیلاب تأثیر می‌گذارد (Kay et al., 2006; Wang et al., 2019). در این مطالعه، داده‌های جمع‌آوری شده از ۱۵ ایستگاه سینوپتیک محلی در حوضه آبریز کشکان رود مورد استفاده قرار گرفته است. تحلیل این داده‌ها نشان داد که میانگین بارندگی سالانه در منطقه بین ۳۰۰ تا ۱۲۰۰ میلی‌متر متغیر است و با حداکثر بارش در بخش‌های جنوبی و مرکزی حوضه، به‌ویژه در پل‌دختر که با وقوع سیلاب‌های تاریخی، مانند سیل فروردین ۱۳۹۸، همراه است. این الگو با داده‌های ثبت‌شده از سیل ۱۳۹۸ که دبی بیش از ۷۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه را به همراه داشت، تطابق دارد و نشان‌دهنده رابطه مستقیم بین شدت بارندگی و خطر سیل است.

نقشه فازی شده بارندگی که با استفاده از تابع خطی افزایشی تهیه شده، نشان می‌دهد که ۴۵/۲٪ از مساحت حوضه در محدوده بارندگی بالای ۸۰۰ میلی‌متر در سال قرار دارد و به‌عنوان مناطق با خطر بالای سیل طبقه‌بندی شده است. در مقابل، نواحی با بارندگی کمتر از ۵۰۰ میلی‌متر در سال که ۱۸/۳٪ از مساحت را شامل می‌شوند، در دسته کم‌خطر قرار دارند. ضریب همبستگی پیرسون بین مقادیر فازی شده بارندگی و داده‌های تاریخی سیلاب برابر با ۰/۸۵ محاسبه شد که ارتباط قوی بین شدت بارش و وقوع سیل را تأیید می‌کند. نقشه ارائه‌شده، با مقیاس رنگی از آبی (خطر کم) به قرمز (خطر زیاد)، این توزیع را به وضوح نشان می‌دهد، به‌طوری‌که مناطق جنوبی و مرکزی (مانند پل‌دختر) با رنگ‌های قرمز غالب، مستعدترین نواحی برای سیل شناخته شده‌اند، درحالی‌که بخش‌های شمالی (مانند الشتر) با رنگ‌های آبی، خطر کمتری را نشان می‌دهند (شکل ۸).



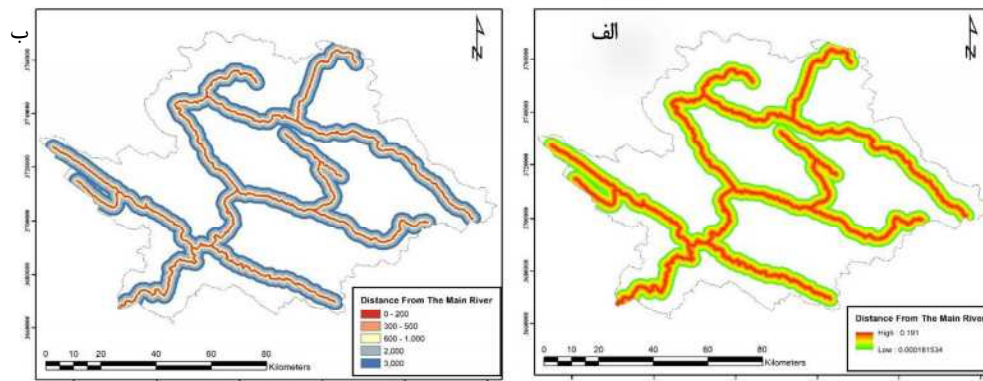
شکل ۸: نقشه‌های بارندگی (الف) و فازی شده (ب) حوضه آبریز کشکان رود

فاصله از رودخانه‌های اصلی

فاصله از رودخانه‌های اصلی یکی از عوامل تعیین‌کننده در توزیع و شدت سیلاب محسوب می‌شود؛ زیرا مناطق نزدیک‌تر به رودخانه‌ها به دلیل قرار گرفتن در مسیر مستقیم جریان آب، بیشتر در معرض سیلاب‌های مخرب قرار دارند (Glenn et al., 2012; Peucker & Douglas, 1975). این ویژگی به‌ویژه در حوضه‌های آبریز با رودخانه‌های پرآب مانند کشکان‌رود اهمیت بیشتری پیدا می‌کند، جایی که نزدیکی به آبراهه‌ها می‌تواند خطر آب‌گرفتگی و خسارت‌های ناشی از سیل را به‌طور قابل‌توجهی افزایش دهد.

در این مطالعه، تحلیل فاصله از رودخانه‌های اصلی نشان داد که ۳۳/۶٪ از مساحت حوضه آبریز کشکان‌رود در فاصله کمتر از ۵۰۰ متری رودخانه‌ها قرار دارد و به‌عنوان مناطق با خطر بالای سیل طبقه‌بندی شده است. در مقابل، نواحی با فاصله بیش از ۲۰۰۰ متر که ۲۵/۸٪ از مساحت را شامل می‌شوند، در دسته کم‌خطر قرار دارند. ضریب همبستگی پیرسون بین مقادیر فازی‌شده فاصله از رودخانه و داده‌های تاریخی سیلاب (سیل ۱۳۹۸) برابر با ۰/۸۳ محاسبه شد که نشان‌دهنده ارتباط قوی بین نزدیکی به رودخانه‌ها و وقوع سیل است. این یافته با داده‌های تاریخی سیل ۱۳۹۸ که مناطق نزدیک به رودخانه کشکان (مانند پلدختر) بیشترین خسارت‌ها را متحمل شدند، هم‌خوانی دارد (شکل ۹). نقشه‌های ارائه‌شده که فاصله از رودخانه‌های اصلی را به‌صورت خام و فازی‌شده نمایش می‌دهند، این الگو را تأیید می‌کنند. نقشه خام (سمت چپ) با مقیاس رنگی از آبی (فاصله کم: ۰ متر) تا قرمز (فاصله زیاد: ۳۰۰۰ متر)، توزیع فاصله‌ها را نشان می‌دهد، درحالی‌که نقشه فازی‌شده (سمت راست) با مقیاس رنگی از زرد (خطر کم: ۰/۰۰۰۷۸۵۴۴۱۶) تا قرمز (خطر زیاد: ۰/۱۹۱)، پتانسیل خطر سیل را بر اساس این معیار ارزیابی می‌کند. مناطق نزدیک به رودخانه‌ها (مانند پلدختر و بخش‌هایی از خرم‌آباد) با رنگ قرمز در نقشه فازی‌شده، به‌عنوان نواحی پرخطر شناسایی شده‌اند، در حالی که نواحی دورتر (مانند بخش‌های شمالی حوضه) با رنگ زرد، خطر کمتری را نشان می‌دهند (شکل ۹).

تحلیل تأثیرات متقابل فاصله از رودخانه با سایر پارامترها (مانند شیب و بارندگی) نشان داد که در مناطقی با فاصله کم از رودخانه، شیب کم و بارندگی بالا، خطر سیل به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌یابد (ضریب همبستگی ترکیبی ۰/۸۹). با این حال، این تحلیل با برخی محدودیت‌ها مواجه است. دقت استخراج شبکه آبراهه‌ها ممکن است به دلیل محدودیت‌های مدل رقومی ارتفاع در مناطق با پوشش گیاهی متراکم یا شیب‌های تند تحت تأثیر قرار گیرد (Fernández & Lutz, 2010). همچنین، تغییرات فصلی در مسیر رودخانه‌ها یا انحراف جریان به دلیل فعالیت‌های انسانی (مانند سدسازی) ممکن است بر دقت نتایج اثر بگذارد.



شکل ۹: نقشه‌های فاصله از رودخانه‌های اصلی (الف) و فازی شده (ب) حوضه آبریز کشکان رود

شاخص رطوبت توپوگرافی^۱

شاخص رطوبت توپوگرافی، ابزاری کلیدی برای ارزیابی فرآیندهای هیدرولوژیکی است؛ زیرا نشان می‌دهد که چگونه شیب و توپوگرافی بر تجمع آب در یک مکان خاص تأثیر می‌گذارد. این شاخص تمایل یک منطقه به تجمع آب را توصیف می‌کند و به‌طور گسترده برای پیش‌بینی رطوبت خاک و شناسایی نواحی مستعد رواناب و سیلاب استفاده می‌شود (Beven & Kirkby, 1979; Pourali et al., 2014; Fernández & Lutz, 2010). در حوضه‌های آبریز با توپوگرافی متنوع مانند کشکان رود، شاخص رطوبت توپوگرافی، می‌تواند به شناسایی مناطقی که به دلیل تجمع آب در معرض خطر سیل قرار دارند، کمک کند.

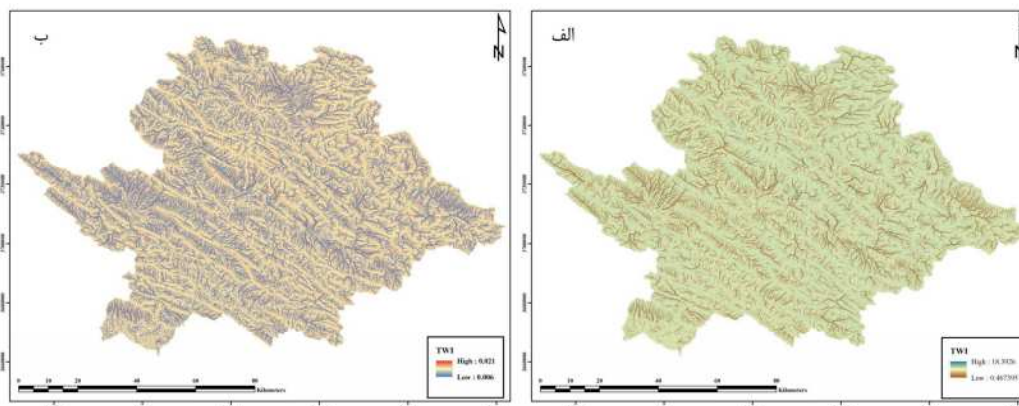
$$TWI = \ln\left(\frac{AS}{\tan\beta}\right) \quad (17)$$

در این مطالعه، تحلیل شاخص رطوبت توپوگرافی نشان داد که مقادیر این شاخص در حوضه آبریز کشکان رود بین ۰/۴۶۷۳۹۵ تا ۱۸/۳۰۷۳۹۵ متغیر است، با میانگین ۸/۲ و انحراف معیار ۳/۱ که نشان‌دهنده تنوع هیدرولوژیکی منطقه است. نقشه فازی شده شاخص رطوبت توپوگرافی که با استفاده از تابع خطی افزایشی تهیه شده، نشان می‌دهد که ۲۹/۴٪ از مساحت حوضه دارای مقادیر شاخص رطوبت توپوگرافی بالاتر از ۱۲ است و به‌عنوان مناطق با خطر بالای سیل طبقه‌بندی شده است. در مقابل، نواحی با شاخص رطوبت توپوگرافی کمتر از ۶ که ۲۲/۷٪ از مساحت را شامل می‌شوند، در دسته کم‌خطر قرار دارند. ضریب همبستگی پیرسون بین مقادیر فازی شده شاخص رطوبت توپوگرافی و داده‌های تاریخی سیلاب (سیل ۱۳۹۸)، برابر با ۰/۸۱ محاسبه شد که ارتباط قوی بین تجمع آب و وقوع سیل را تأیید می‌کند. این یافته با داده‌های تاریخی سیل ۱۳۹۸ که مناطق با تجمع بالای آب (مانند پلدختر) بیشترین خسارت‌ها را متحمل شدند، هم‌خوانی دارد (شکل ۱۰).

نقشه‌های ارائه شده که شاخص رطوبت توپوگرافی را به‌صورت خام و فازی شده نمایش می‌دهند، این الگو را تأیید می‌کنند. نقشه خام (سمت چپ) با مقیاس رنگی از سبز روشن (شاخص رطوبت توپوگرافی کم: ۰/۴۶۷۳۹۵) تا سبز تیره (شاخص رطوبت توپوگرافی زیاد: ۱۸/۳۰۷۳۹۵)، توزیع شاخص را نشان می‌دهد، درحالی‌که نقشه فازی شده (سمت راست) با مقیاس رنگی از زرد (خطر کم: ۰/۱۸۶۶) تا قرمز (خطر زیاد: ۰/۸۴۲۱)، پتانسیل خطر سیل را بر اساس این معیار ارزیابی می‌کند. مناطق با شاخص رطوبت توپوگرافی بالا (مانند پلدختر و بخش‌هایی از خرم‌آباد) با

¹ Topographic Wetness Index (TWI)

رنگ قرمز در نقشه فازی شده، به عنوان نواحی پرخطر شناسایی شده‌اند، درحالی که نواحی با شاخص رطوبت توپوگرافی پایین (مانند بخش‌های شمالی حوضه) با رنگ زرد، خطر کمتری را نشان می‌دهند (شکل ۱۰).

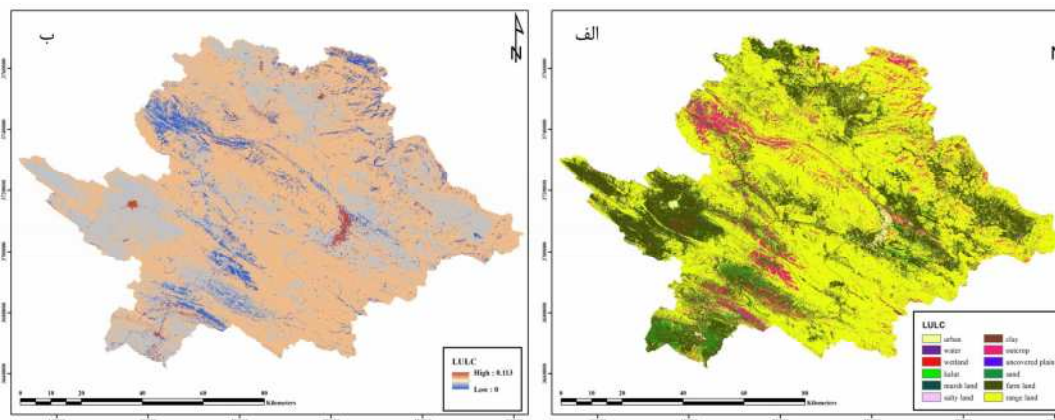


شکل ۱۰: نقشه‌های شاخص رطوبت توپوگرافی خام (الف) و فازی شده (ب) حوضه آبریز کشکانرود

کاربری اراضی

کاربری اراضی و پوشش زمین به دلیل تأثیر بر نفوذ آب و رواناب سطحی، نقش مهمی در پهنه‌بندی خطر سیل دارند. مناطق شهری با سطوح نفوذناپذیر خطر سیل را افزایش می‌دهند، درحالی که جنگل‌ها و مراتع، به دلیل نفوذپذیری بالا، خطر را کاهش می‌دهند (Kazakis et al., 2015; Tha et al., 2012).

در این پژوهش از نقشه کاربری اراضی ایران شامل ۱۳ کلاس استفاده شده است (Ghorbanian et al., 2020). تحلیل داده‌ها نشان داد که مناطق شهری و دشت‌های بدون پوشش (۱۵/۸٪ مساحت حوضه کشکانرود) به دلیل نفوذپذیری پایین، پرخطر محسوب می‌شوند، درحالی که نواحی جنگلی و مرتعی (۴۲/۳٪) خطر کمتری دارند. ضریب همبستگی بین کاربری اراضی فازی شده و سیل تاریخی ۱۳۹۸ برابر ۰/۷۹ به دست آمد که با آسیب شدید مناطق شهری مانند پلدختر و خرم‌آباد در آن سیل مطابقت دارد. نقشه فازی شده نیز مناطق شهری و بدون پوشش را با رنگ قرمز (پرخطر) و نواحی جنگلی و مرتعی را با رنگ آبی (کم‌خطر) نشان داد. تحلیل ترکیبی نشان داد که خطر سیل در مناطق شهری با شیب کم و بارندگی زیاد به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد (ضریب همبستگی ۰/۸۶). با این حال، تغییرات زمانی در کاربری اراضی می‌تواند بر دقت این نتایج تأثیر بگذارد (Tenzin & Bhaskar, 2020).



شکل ۱۱: نقشه‌های کاربری اراضی خام (الف) و فازی شده (ب) حوضه آبریز کشکانرود

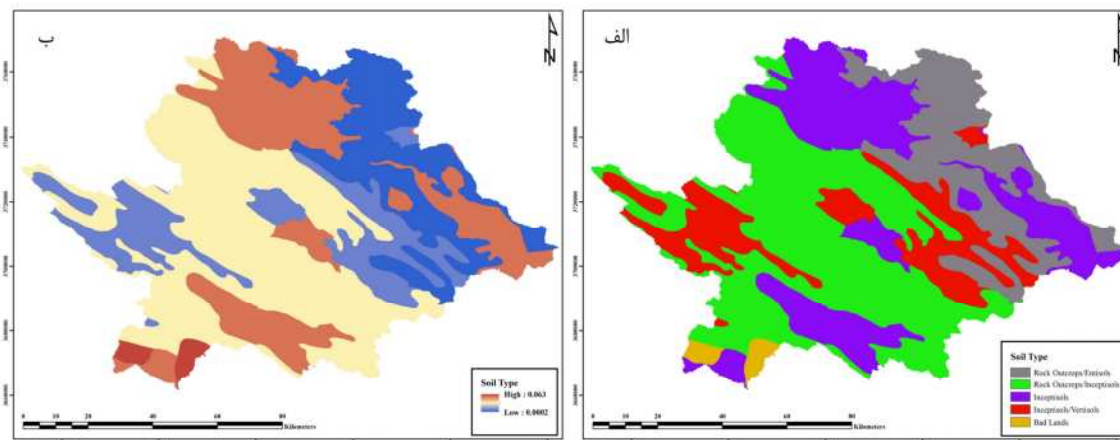
نوع خاک

نوع خاک، یکی از عوامل کلیدی در تعیین خطر سیلاب است؛ زیرا بافت و ویژگی‌های فیزیک و شیمیایی خاک به‌طور مستقیم بر نرخ نفوذ آب و تولید رواناب سطحی تأثیر می‌گذارد (Ouma & Tateishi, 2014). خاک‌های با سنگ بیرون‌زده یا آنتی‌سول‌ها خطر سیلاب بسیار کم، اینسپتی‌سول‌ها یا ورتی‌سول‌ها خطر کم و سنگ‌های بیرون‌زده با اینسپتی‌سول‌ها خطر متوسط دارند. اینسپتی‌سول‌ها خطر زیاد و بدلندها خطر بسیار زیاد سیلاب دارند. خاک‌هایی با نفوذپذیری پایین مانند بدلندها، به‌دلیل ناتوانی در جذب آب، رواناب سطحی را افزایش داده و خطر سیل را تشدید می‌کنند، درحالی‌که خاک‌هایی با ظرفیت نگهداری آب بالا، مانند آنتی‌سول‌ها، این خطر را کاهش می‌دهند. این تفاوت‌ها، نقش مؤثر نوع خاک را در نگاشت خطر سیل برجسته می‌کند (Hartemink & Bockheim, 2017).

در حوضه کشکان‌رود، زمین‌های بایر (بدلندها) با پوشش گیاهی کم و نفوذپذیری پایین، ۲۸/۴٪ مساحت را تشکیل داده و به‌عنوان مناطق بسیار پرخطر سیل شناخته شدند. در مقابل، خاک‌های آنتی‌سول و برون‌زدهای سنگی/آنتی‌سول با ۱۹/۶٪ مساحت، به‌دلیل ظرفیت نگهداری آب بالا، در دسته بسیار کم‌خطر قرار گرفتند. ضریب همبستگی ۰/۸۲ بین داده‌های فازی‌شده نوع خاک و سیلاب ۱۳۹۸، نشان‌دهنده ارتباط قوی این پارامتر با وقوع سیل است (شکل ۱۲).

نقشه خام (سمت چپ) با مقیاس رنگی متنوع، توزیع پنج کلاس نوع خاک را نشان می‌دهد، درحالی‌که نقشه فازی‌شده (سمت راست) با مقیاس رنگی از زرد (خطر کم: ۰/۰۴۸۲) تا قرمز (خطر زیاد: ۰/۸۴۶۲)، پتانسیل خطر سیل را بر اساس نفوذپذیری هر کلاس ارزیابی می‌کند. مناطق با خاک‌های بایر (مانند بخش‌های جنوبی و مرکزی حوضه، از جمله پلدختر) با رنگ قرمز در نقشه فازی‌شده، به‌عنوان نواحی پرخطر شناسایی شده‌اند، درحالی‌که نواحی با خاک‌های آنتی‌سول (مانند بخش‌های شمالی حوضه) با رنگ زرد، خطر کمتری را نشان می‌دهند (شکل ۱۲).

تحلیل تأثیرات متقابل نوع خاک با سایر پارامترها (مانند شیب و بارندگی) نشان داد که در مناطق با خاک‌های بایر، شیب کم و بارندگی بالا، خطر سیل به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌یابد (ضریب همبستگی ترکیبی ۰/۸۸). بااین‌حال، این تحلیل با برخی محدودیت‌ها مواجه است. تغییرات فصلی در ویژگی‌های خاک، مانند افزایش غلظت سدیم و کلر در بدلندها طی فصل خشک، ممکن است بر نفوذپذیری و در نتیجه دقت نتایج اثر بگذارد (Ouma & Tateishi, 2014). همچنین، عدم در نظر گرفتن اثرات فرسایش خاک در مناطق بایر، می‌تواند بر ارزیابی خطر سیل تأثیر بگذارد.



شکل ۱۲: نقشه نوع خاک و نقشه باز طبقه‌بندی‌شده (الف) و فازی‌شده (ب) بر اساس پتانسیل سیل‌خیزی در حوضه کشکان‌رود

شاخص پوشش گیاهی نرمال شده^۱

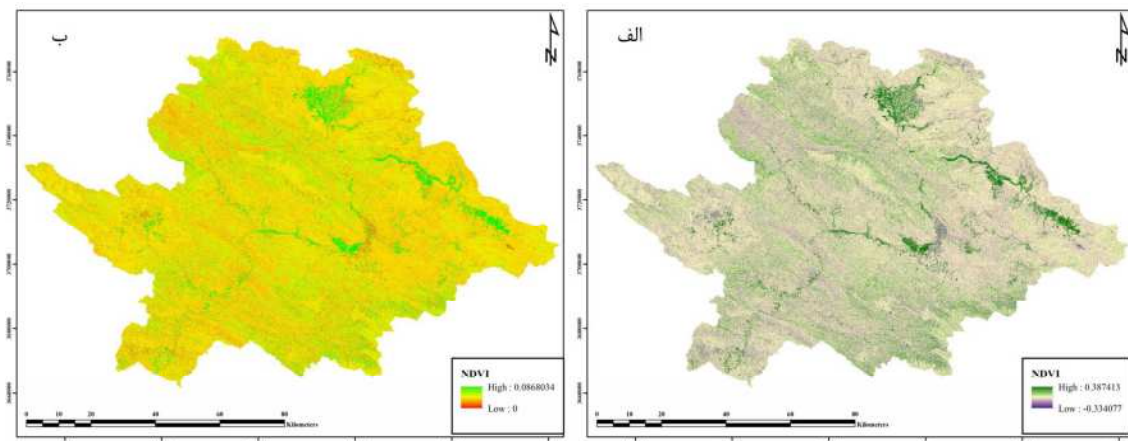
شاخص پوشش گیاهی با کاهش سرعت حرکت آب و افزایش نفوذ آن به خاک، نقش کلیدی در کاهش رواناب سطحی و شدت سیلاب ایفا می‌کند (Zhao et al., 2019). تبدیل مناطق با پوشش گیاهی متراکم به مناطق شهری یا بایر، با کاهش نفوذپذیری و افزایش رواناب، خطر سیل را به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌دهد (Vaghefi et al., 2019).

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}} \quad (۱۸)$$

که در آن ρ_{NIR} و ρ_{RED} به ترتیب مقادیر بازتاب سطحی باندهای مادون قرمز نزدیک و قرمز هستند. کلاس‌هایی با مقادیر کمتر از ۰/۴ و بیشتر از ۰/۱۱- به ترتیب کمتر آسیب‌پذیر و بیشتر مستعد سیلاب در نظر گرفته شدند. در نتیجه فازی‌سازی به وسیله تابع خطی کاهش می‌باشد.

در این مطالعه، مقادیر شاخص پوشش گیاهی نرمال‌شده در حوضه آبریز کشکانرود بین ۰/۱۱۲۷۳۷- تا ۰/۴۶۷۲۱۷ متغیر است، با میانگین ۰/۱۸ و انحراف معیار ۰/۰۹ که نشان‌دهنده تنوع پوشش گیاهی از مناطق کم‌تراکم (مانند دشت‌های بدون پوشش) تا نواحی با پوشش متراکم (مانند جنگل‌ها و مراتع) است. تحلیل نقشه فازی‌شده شاخص پوشش گیاهی نرمال‌شده نشان داد که ۳۵/۷٪ از مساحت حوضه دارای مقادیر شاخص پوشش گیاهی نرمال‌شده کمتر از ۰/۱۱ است و به‌دلیل پوشش گیاهی کم و نفوذپذیری پایین، به‌عنوان مناطق با خطر بالای سیل طبقه‌بندی شده است. در مقابل، نواحی با شاخص پوشش گیاهی نرمال‌شده بیشتر از ۰/۴ که ۱۸/۹٪ از مساحت را شامل می‌شوند، به دلیل تراکم بالای پوشش گیاهی و نفوذپذیری بیشتر، در دسته کم‌خطر قرار دارند. ضریب همبستگی پیرسون بین مقادیر فازی‌شده شاخص پوشش گیاهی نرمال‌شده و داده‌های تاریخی سیلاب (سیل ۱۳۹۸) برابر با ۰/۸ محاسبه شد که نشان‌دهنده ارتباط قوی بین کمبود پوشش گیاهی و وقوع سیل است. این یافته با داده‌های تاریخی سیل ۱۳۹۸ که مناطق با پوشش گیاهی کم (مانند پلدختر) بیشترین خسارت‌ها را متحمل شدند، هم‌خوانی دارد (شکل ۱۳). نقشه خام پوشش گیاهی نرمال‌شده با طیف سبز تیره (مقدار بالا: ۰/۴۶۷۲۱۷) تا سبز روشن (مقدار پایین: ۰/۱۱)، توزیع پوشش گیاهی حوضه را نشان می‌دهد. نقشه فازی‌شده با طیف زرد (خطر کم: ۰) تا قرمز (خطر زیاد: ۰/۶۲)، نواحی مستعد سیل را بر اساس پوشش گیاهی برجسته می‌کند.

^۱ Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)



شکل ۱۳: نقشه‌های شاخص پوشش گیاهی نرمال شده خام (الف) و فاز شده (ب) حوضه آبریز کشکان رود

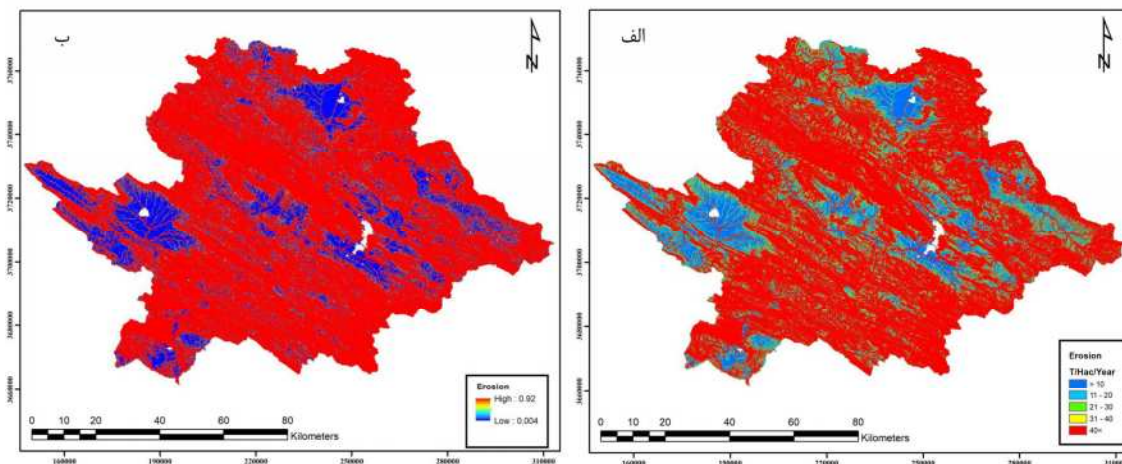
نرخ فرسایش

نرخ فرسایش خاک با افزایش حجم رواناب در بارش‌های شدید، تأثیر مستقیمی بر احتمال وقوع سیل دارد. در این پژوهش، از معادله جهانی فرسایش خاک^۱ برای برآورد میزان سالانه از دست رفتن خاک استفاده شده است (Renata, 2020). داده‌های بانک خاک ایران بر اساس شدت فرسایش در کلاس‌های III تا VII طبقه‌بندی شده و سپس با به‌کارگیری تابع عضویت خطی افزایشی فاز، برای تحلیل بهتر به مقادیر [۰،۱] نگاشت شدند.

$$A = R \times K \times (L \times S) \times C \times P \quad (19)$$

در این معادله، A مقدار سالانه خاک از دست رفته (تن در سال)، R میانگین ماهانه شدت فرساینده‌گی بارندگی، K شاخص فرسایش‌پذیری خاک، L و S به ترتیب ضریب‌های مربوط به طول و شیب توپوگرافی، C عامل مدیریت پوشش گیاهی و P شاخص اقدامات حفاظتی خاک است. بررسی‌های علمی نشان داده‌اند که فرسایش نقش مهمی در تشدید سیلاب دارد. بسیاری از پژوهش‌ها مستقیماً نرخ فرسایش را به‌عنوان یک متغیر در تهیه نقشه‌های خطر سیلاب لحاظ نکرده‌اند و به‌جای آن از ویژگی‌هایی مانند نوع خاک و شاخص پوشش گیاهی استفاده کرده‌اند. اما این مطالعه به‌منظور افزایش دقت در شناسایی مناطق مستعد سیلاب، نرخ فرسایش خاک را به‌طور مستقیم در مدل‌سازی خود مورد استفاده قرار داده است (شکل ۱۲). خاک‌هایی که مستعد فرسایش هستند، نه‌تنها باعث افزایش حجم رواناب می‌شوند، بلکه با انتقال ذرات ریز و رسوبات به رودخانه‌ها، در طول زمان موجب انباشته شدن مواد در بستر و کناره‌های رودخانه و در نتیجه کاهش ظرفیت عبور جریان آب خواهند شد (Parsian et al., 2021).

¹ Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)



شکل ۱۴: نقشه طبقه‌بندی نوع خاک و نرخ فرسایش (الف) و فازی شده (ب) در حوضه آبریز کشکانرود

بحث

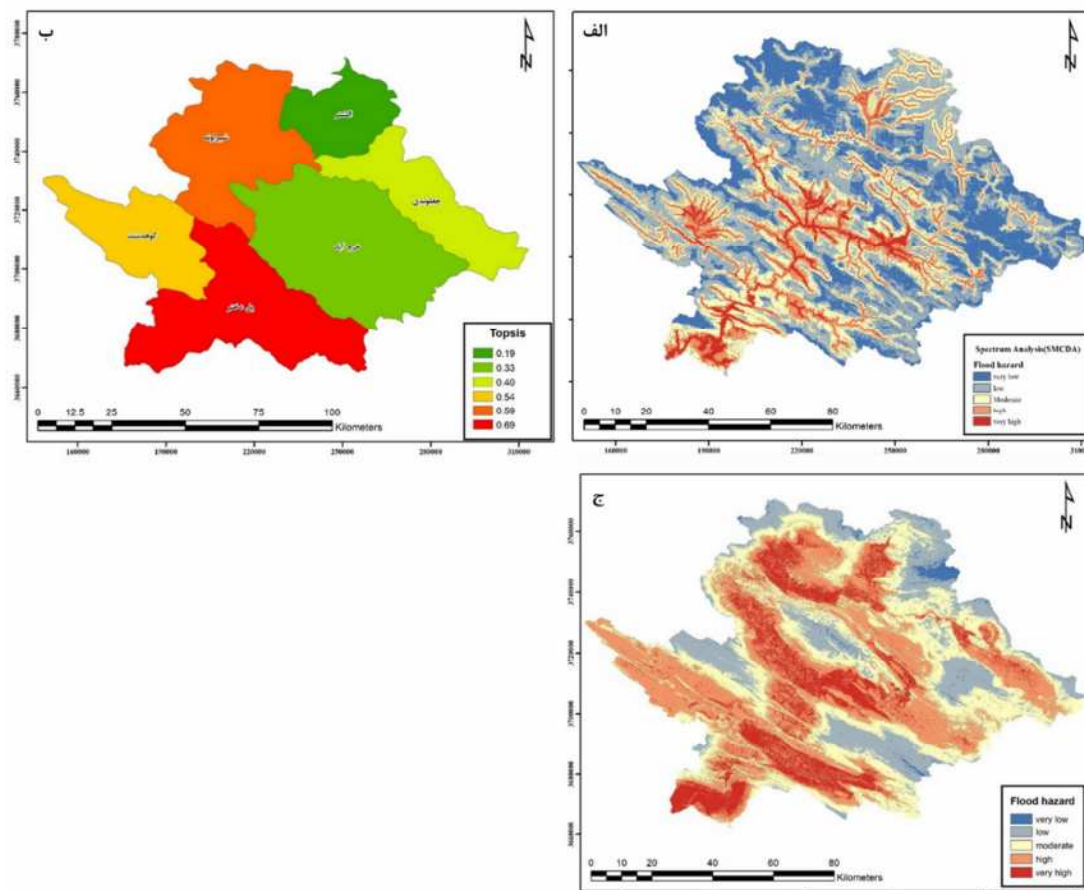
این پژوهش با استفاده از روش‌های چندمعیاره وزن‌دهی همپوشانی، تحلیل سلسله‌مراتبی فازی و تاپسیس، خطر سیل را در حوضه کشکانرود بررسی کرده است. این روش‌ها با تلفیق معیارهای توپوگرافی، هیدرولوژیکی و زیست‌محیطی در سیستم اطلاعات جغرافیایی، نتایج دقیقی ارائه داده و تطابق بالایی با داده‌های سیل ۱۳۹۸ دارند. در این پژوهش تحلیل تطبیقی روش‌ها و نقاط قوت و ضعف هرکدام بررسی شده است. روش وزن‌دهی همپوشانی از طریق تخصیص وزن‌های نسبی به معیارها و روی هم‌گذاری وزن‌دار لایه‌ها در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی عمل می‌کند. این روش با فرض خطی بودن روابط میان معیارها، وزن هر پارامتر را بر اساس روشی غیر از روش تحلیل سلسله‌مراتبی تعیین کرده و نقشه نهایی خطر را تولید می‌کند. در این مطالعه، روش وزن‌دهی همپوشانی با ضریب همبستگی ۰/۸۷، توانایی قابل‌قبولی در شناسایی الگوهای کلی خطر سیل نشان داد (شکل ۱۵ الف). نقشه حاصل از این روش، مناطق جنوبی و مرکزی حوضه (پلدختر، خرم‌آباد و شیراوند) را به‌عنوان نواحی پرخطر (۷/۸٪) در پهنه بسیار پرخطر و (۲۷/۵٪) در پهنه پرخطر و مناطق شمالی (الشتر) را به‌عنوان نواحی کم‌خطر شناسایی کرد. این الگو با داده‌های تاریخی سیل ۱۳۹۸ که پلدختر را به‌عنوان یکی از مناطق به‌شدت آسیب‌دیده با دبی ۷۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه و خسارت‌های ۲۶ میلیون دلاری گزارش کرده است، هم‌خوانی دارد. با این حال، روش وزن‌دهی همپوشانی به دلیل وابستگی به وزن‌دهی ثابت و عدم توانایی در مدل‌سازی عدم قطعیت‌های ذاتی داده‌های محیطی، محدودیت‌هایی را نشان می‌دهد. این روش نمی‌تواند پیچیدگی‌های غیرخطی تعاملات میان معیارها (مانند تأثیر متقابل شیب و نوع خاک) را به‌طور کامل پوشش دهد. این محدودیت در مناطقی مانند کوه‌دشت که دارای خاک‌های بایر و مستعد فرسایش است، ممکن است به تخمین محافظه‌کارانه‌تر خطر منجر شده باشد (Fernández & Lutz, 2010).

روش تاپسیس که مبتنی بر مفاهیم راه‌حل ایده‌آل مثبت و منفی است (Hwang & Yoon, 1981)، از منظر رتبه‌بندی نسبی گزینه‌ها به پهنه‌بندی خطر سیل پرداخته است. این روش با محاسبه فاصله اقلیدسی هر پیکسل از راه‌حل ایده‌آل مثبت و منفی، نزدیکی نسبی را در بازه [۰، ۱] تعیین می‌کند و گزینه‌های بهینه را بر اساس این معیار رتبه‌بندی می‌کند. در این پژوهش، تاپسیس با ضریب همبستگی ۰/۸۹، کارایی بالایی در شناسایی مناطق پرخطر نشان داد و ۸٪ از مساحت را در پهنه بسیار پرخطر قرار داد (شکل ۱۵-ب). نقشه تاپسیس که مقادیر CI را از ۰/۱۹

(کم خطر) تا ۰/۶۹ (بسیار پرخطر) نشان می‌دهد، مناطق پلدختر، خرم‌آباد و کوهدشت را به‌عنوان نواحی پرخطر و الشتر را به‌عنوان کم خطر شناسایی کرد. مزیت اصلی تاپسیس در مقایسه با روش وزن‌دهی همپوشانی، توانایی آن در ارائه رتبه‌بندی پویا و وابسته به مقادیر حدی معیارها است که به انعکاس تغییرات نسبی در شرایط محیطی کمک می‌کند (Pathan et al., 2022). به‌عنوان مثال، در مناطقی با شاخص رطوبت توپوگرافی بالا و شاخص پوشش گیاهی نرمال‌شده پایین، این روش توانسته است با تعادل میان معیارها، پتانسیل سیل را به‌طور مؤثری ارزیابی کند. بااین‌حال، وابستگی تاپسیس به انتخاب صحیح معیارهای مثبت و منفی و حساسیت آن به ناهمگنی داده‌ها، ممکن است در برخی موارد به نوسانات جزئی در نتایج منجر شود. این موضوع در مقایسه با تحلیل سلسله‌مراتبی که عدم قطعیت‌ها را به‌طور صریح مدل‌سازی می‌کند، به‌عنوان یک محدودیت نسبی مطرح است (Solaimani et al., 2023).

روش تحلیل سلسله‌مراتبی با بهره‌گیری از نظریه مجموعه‌های فازی (Zadeh, 1965)، رویکردی پیشرفته‌تر برای مدیریت عدم قطعیت‌ها ارائه می‌دهد. این روش با تبدیل داده‌های ورودی به مقادیر فازی در بازه $[0, 1]$ و استفاده از توابع عضویت خطی افزایشی برای پارامترهایی مانند بارندگی و شاخص رطوبت توپوگرافی و کاهشی برای ارتفاع و شاخص پوشش گیاهی نرمال‌شده، امکان مدل‌سازی پیوستگی و انعطاف‌پذیری بیشتری در تحلیل معیارها فراهم می‌کند. در این مطالعه، تحلیل سلسله‌مراتبی با ضریب همبستگی ۰/۹۲، دقیق‌ترین نتایج را ارائه داد و ۸/۲٪ از مساحت حوضه را در پهنه بسیار پرخطر و ۲۸/۱٪ را در پهنه پرخطر طبقه‌بندی کرد (شکل ۱۵ ج). این دقت بالا به توانایی روش در تلفیق اثرات غیرخطی و عدم قطعیت‌های مرتبط با پارامترهایی مانند نرخ فرسایش و شاخص رطوبت توپوگرافی نسبت داده می‌شود. به‌عنوان مثال، در مناطق جنوبی حوضه (پلدختر و خرم‌آباد) که با خاک‌های بایر (بدلندها)، بارندگی شدید و شیب کم مواجه هستند، تحلیل سلسله‌مراتبی با فازی‌سازی معیارها، حساسیت بالای این نواحی به سیل را به‌طور دقیق‌تری منعکس کرده است. این برتری نسبت به روش وزن‌دهی همپوشانی، به‌دلیل استفاده از رویکرد فازی در کاهش سوگیری‌های ناشی از وزن‌دهی ثابت و افزایش انطباق با واقعیت‌های محیطی است (Sepehri et al., 2020). بااین‌حال، پیچیدگی محاسباتی این روش و نیاز به تنظیم دقیق توابع عضویت، ممکن است کاربرد آن را در شرایط کمبود داده یا منابع محاسباتی محدود کند.

تحلیل تطبیقی نتایج سه روش نشان می‌دهد که هر سه رویکرد، مناطق جنوبی و مرکزی حوضه (پلدختر، خرم‌آباد و شیراوند) را به‌عنوان نواحی پرخطر و مناطق شمالی (الشتر) را به‌عنوان نواحی کم خطر شناسایی کرده‌اند که با داده‌های تاریخی سیل ۱۳۹۸ هم‌راستا است. بااین‌حال، تفاوت‌های ظریف در درصد مساحت پهنه‌های پرخطر ۸/۲٪ در تحلیل سلسله‌مراتبی، ۸٪ در تاپسیس و ۷/۸٪ در روش وزن‌دهی همپوشانی (توزیع مکانی خطر)، نشان‌دهنده تأثیر ساختار ریاضی هر روش بر خروجی‌هاست. یکی از جنبه‌های نوآورانه این مطالعه، گنجاندن نرخ فرسایش به‌عنوان معیاری مستقل در کنار پارامترهای متداول مانند شاخص پوشش گیاهی نرمال‌شده و شاخص رطوبت توپوگرافی است. استفاده از معادله جهانی فرسایش خاک برای محاسبه فرسایش، تأثیر این عامل بر افزایش رواناب و کاهش ظرفیت بستر رودخانه‌ها را به خوبی نشان داده و دقت مدل‌سازی را در مناطق مستعد فرسایش (مانند کوهدشت) بهبود بخشیده است. این رویکرد که کمتر در مطالعات مشابه مورد توجه قرار گرفته، به‌عنوان یک مزیت رقابتی این پژوهش برجسته می‌شود و قابلیت تعمیم آن به سایر حوضه‌های کوهستانی با شرایط مشابه را تقویت می‌کند (Parsian et al., 2021).



شکل ۱۵: خطر سیل خیزی منطقه کشکانرود به روش وزن دهی همپوشانی (الف)، تاپسیس (ب) و تحلیل سلسله مراتبی فازی (ج)

نتیجه گیری

این پژوهش با هدف پهنه بندی خطر سیل در حوضه کشکانرود، از سه روش تصمیم گیری چندمعیاره شامل روش های وزن دهی همپوشانی، تاپسیس و تحلیل سلسله مراتبی فازی استفاده کرده است. نتایج نشان داد که مناطق پل دختر، خرم آباد و کوهدشت به علت ارتفاع کم، شیب ملایم، بارش شدید، نزدیکی به رودخانه ها و خاک های نفوذناپذیر (زمین های بایر)، بالاترین خطر سیل را دارند، در حالی که نواحی شمالی مانند الشتر به دلیل شرایط توپوگرافی و پوشش گیاهی، کم خطر هستند. مقایسه نتایج با داده های سیل تاریخی ۱۳۹۸ با ضریب همبستگی ۰/۹ دقت بالای مدل ترکیبی را تأیید کرد. در بین روش ها، تحلیل سلسله مراتبی فازی با ضریب همبستگی ۰/۹۲ بهترین عملکرد را داشت و ۸/۲٪ منطقه را بسیار پرخطر و ۱/۲۸٪ را پرخطر شناسایی کرد. روش تاپسیس نیز با ضریب همبستگی ۰/۸۹ عملکرد مطلوبی داشت، در حالی که روش وزن دهی همپوشانی (ضریب همبستگی ۰/۸۷) به دلیل عدم لحاظ عدم قطعیت های محیطی، دقت کمتری ارائه کرد. موفقیت تحلیل سلسله مراتبی فازی ناشی از توانایی آن در مدیریت داده های پیچیده و ناهمگن بود.

منابع

- غلامی، محمد؛ احمدی، مهدی. (۱۳۹۸). ریز پهنه‌بندی خطر سیلاب در شهر لامرد با استفاده از AHP، GIS و منطق فازی، مخاطرات محیط طبیعی، ۸ (۲۰)، ۱۱۴-۱۰۱. <https://doi.org/10.22111/jneh.2018.22505.1334>
- موسوی، سیده معصومه؛ نگهبان، سعید؛ رخشانی مقدم، حیدر؛ حسین زاده، سید محسن. (۱۳۹۵). ارزیابی و پهنه‌بندی خطر سیل‌خیزی با استفاده از منطق فازی TOPSIS در محیط GIS (مطالعه موردی: حوضه آبخیز شهر باغملک)، مخاطرات محیط طبیعی، ۵ (۱۰)، ۷۹-۹۸. <https://doi.org/10.22111/jneh.2017.2960>
- میرموسوی، سیدحسین؛ اسمعیلی، حسین. (۱۴۰۰). پهنه‌بندی نواحی سیل‌خیز با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) و سنجش‌ازدور (RS)، مطالعه موردی: شهرستان داراب. مخاطرات محیط طبیعی، ۱۰ (۲۷)، ۴۶-۲۱. <https://doi.org/10.22111/jneh.2020.32986>
- اسماعیل، نجفی؛ کریمی کردآبادی، مرتضی. (۱۳۹۹). ارزیابی و پهنه‌بندی خطر سیلاب با استفاده از مدل ترکیبی AHP-FUZZY با تأکید بر امنیت شهری (مطالعه موردی: منطقه یک کلان‌شهر تهران)، جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۹ (۲)، ۴۳-۶۰. <https://doi.org/10.22067/geo.v9i2.86110>
- زیاری، کرامت اله؛ رجایی، سیدعباس؛ داراب خانی، رسول. (۱۴۰۰). پهنه‌بندی ظرفیت سیل‌خیزی با استفاده از تحلیل سلسه‌مراتبی و منطق فازی در محیط GIS نمونه موردی: شهر ایلام. مدیریت بحران، ۱۰ (۱)، ۳۰-۲۱. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23453915.1400.10.1.2.2>
- قیصری، حدیثه؛ احدنژاد، محسن؛ آهار، حسن. (۱۳۹۴). مکان‌یابی فضاهای شهری چندمنظوره ایمن در مواقع بروز بحران با به‌کارگیری روش شاخص همپوشانی وزنی (نمونه موردی: بافت قدیم شهر کرمانشاه). امداد و نجات، ۷ (۱)، ۳۵-۵. <https://sid.ir/paper/190769/fa>
- Beven, K. J., & Kirkby, M. J. (1979). A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Bulletin*, 24(1), 43-69. <https://doi.org/10.1080/02626667909491834>
- Chen, H. W., & Chang, N. B. (2010). Using fuzzy operators to address the complexity in decision-making of water resources redistribution in two neighbouring river basins. *Advances in water resources*, 33(6), 652-666. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2010.03.007>
- Duchemin, M., & Hogue, R. (2009). Reduction in agricultural non-point source pollution in the first year following establishment of an integrated grass/tree filter strip system in southern Quebec (Canada). *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 131(1-2), 85-97. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2008.10.005>
- Fernández, D. S., & Lutz, M. A. (2010). Urban flood hazard zoning in Tucumán Province, Argentina, using GIS and multicriteria decision analysis. *Engineering Geology*, 111(1-4), 90-98. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2009.12.006>
- Ghorbanian, A., Mohammadzadeh, A., Jamali, S., & Duan, Z. (2022). Performance evaluation of six gridded precipitation products throughout Iran using ground observations over the last two decades (2000-2020). *Remote Sensing*, 14(15), 3783. <https://doi.org/10.3390/rs14153783>
- Glenn, E. P., Nagler, P. L., & Huete, A. R. (2012). Vegetation index methods for estimating evapotranspiration by remote sensing. *Surveys in Geophysics*, 33(3-4), 531-555. <https://doi.org/10.1007/s10712-011-9165-2>
- Hartemink, A. E., & Bockheim, J. G. (2017). Anthrosols and Technosols. In *The Soils of the USA* (pp. 173-187). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-41870-4_11
- Hooijer, A., Klijn, F., Pedrolí, G. B. M., & van Os, A. G. (2004). Towards sustainable flood risk management in the Rhine and Meuse river basins: synopsis of the findings of IRMA-SPONGE. *River Research and Applications*, 20(3), 343-357. <https://doi.org/10.1002/rra.781>
- Hwang, C. L., & Yoon, K. (1981). Multiple attribute decision making: Methods and applications. Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-48318-9>
- Jia, J., Wang, X., Hersi, N. A., Zhao, W., & Liu, Y. (2019). Flood-risk zoning based on analytic hierarchy process and fuzzy variable set theory. *Natural Hazards Review*, 20(3), 04019006. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)NH.1527-6996.000003](https://doi.org/10.1061/(ASCE)NH.1527-6996.000003)
- Kanani-Sadat, Y., Arabsheibani, R., Karimipour, F., & Nasser, M. (2019). A new approach to flood susceptibility assessment in data-scarce and ungauged regions based on a GIS-based hybrid multi-criteria decision-making method. *Journal of Hydrology*, 572, 17-31. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.02.034>
- Kazakis, N., Kougiass, I., & Patsialis, T. (2015). Assessment of flood hazard areas at a regional scale using an index-based approach and Analytical Hierarchy Process: Application in Rhodope-Evros region, Greece. *Science of the Total Environment*, 538, 555-563. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.08.055>
- Kay, A. L., Jones, R. G., & Reynard, N. S. (2006). RCM rainfall for UK flood frequency estimation. I. Method and validation. *Journal of Hydrology*, 318(1-4), 151-162. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.06.012>
- Li, K., Wu, S., Dai, E., & Xu, Z. (2012). Flood loss analysis and quantitative risk assessment in China. *Natural hazards*, 63, 737-760. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0180-y>
- Msabi, M. M., & Makonyo, M. (2021). Flood susceptibility mapping using GIS and multi-criteria decision analysis: A case of Dodoma region, central Tanzania. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 21, 100445. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100445>

- Malik, S., Pal, S. C., Chowdhuri, I., Chakraborty, R., Roy, P., & Das, B. (2020). Prediction of highly flood-prone areas by GIS-based heuristic and statistical model in a monsoon-dominated region of the Bengal Basin. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 19, 100343. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100343>
- Mikhailov, L. (2003). Deriving priorities from fuzzy pairwise comparison judgements. *Fuzzy Sets and Systems*, 134(3), 365–385. [https://doi.org/10.1016/S0165-0114\(02\)00383-4](https://doi.org/10.1016/S0165-0114(02)00383-4)
- Kulimushi, L. C., Choudhari, P., Maniragaba, A., Elbeltagi, A., Mugabowindekwe, M., Rwanyiziri, G., and Singh, S. K. (2021). Erosion risk assessment through prioritization of sub-watersheds in Nyabarongo river catchment, Rwanda. *Environmental Challenges*, 5, 100260. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100260>
- Nedkov, S., & Burkhard, B. (2012). Flood regulating ecosystem services—Mapping supply and demand, in the Etropole municipality, Bulgaria. *Ecological Indicators*, 21, 67–79. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.06.022>
- Ouma, Y. O., & Tateishi, R. (2014). Urban flood vulnerability and risk mapping using integrated multi-parametric AHP and GIS: Methodological overview and case study assessment. *Water*, 6(6), 1515–1545. <https://doi.org/10.3390/w6061515>
- Pathan, S., Pradhan, B., & Alamri, A. (2022). Flood susceptibility mapping using geospatial-based TOPSIS and frequency ratio models: A case study of the Thamarabarani River basin, India. *Geocarto International*, 37(10), 2694–2721. <https://doi.org/10.1080/10106049.2020.1844300>
- Parsian, S., Amani, M., Moghimi, A., Ghorbanian, A., & Mahdavi, S. (2021). Flood hazard mapping using fuzzy logic, analytical hierarchy process, and multi-source geospatial datasets. *Remote Sensing*, 13(23), 4761. <https://doi.org/10.3390/rs13234761>
- Pourali, S.H., Arrowsmith, C., Chrisman, N. et al. Topography Wetness Index Application in Flood-Risk-Based Land Use Planning. *Appl. Spatial Analysis* 9, 39–54 (2016). <https://doi.org/10.1007/s12061-014-9130-2>
- Rahmati, O., Zeinivand, H., & Besharat, M. (2015). Flood hazard zoning in Yasooj region, Iran, using GIS and multi-criteria decision analysis. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 7(3), 1000–1017. <https://doi.org/10.1080/19475705.2015.1045043>
- Rao, R. V. (2007). Decision making in the manufacturing environment: using graph theory and fuzzy multiple attribute decision making methods (Vol. 2, p. 294). London: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-84628-819-7>
- Saaty, T. L. (1980). The analytic hierarchy process (AHP). *The Journal of the Operational Research Society*, 41(11), 1073–1076.
- Saaty, T. L. (1987). The analytic hierarchy process—what it is and how it is used. *Mathematical Modelling*, 9(3-5), 161–176. [https://doi.org/10.1016/0270-0255\(87\)90473-8](https://doi.org/10.1016/0270-0255(87)90473-8)
- Saaty, T. L. (1990). How to make a decision: the analytic hierarchy process. *European journal of operational research*, 48(1), 9–26. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90057-I](https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90057-I)
- Sepehri M, Malekinezhad H, Hosseini SZ, Ildoromi AR (2019). Assessment of flood hazard mapping in urban areas using the entropy weighting method: a case study in Hamadan city, Iran. *Acta Geophys* 67(5):1435–1449 <https://doi.org/10.1007/s11600-019-00342-x>
- Sepehri M, Malekinezhad H, Hosseini SZ, Ildoromi AR (2020). Suburban flood hazard mapping in Hamadan city, Iran. Paper presented at the proceedings of the Institution of Civil Municipal Engineers <https://doi.org/10.1680/jmuen.17.00029>
- Solaimani, K., Bararkhanpour, S. Spatiotemporal changes of climatic parameters, extreme quantiles and their role on evaporation in N. Iran (Golestan province). *Arab J Geosci* 15, 68 (2022). <https://doi.org/10.1007/s12517-021-09300-8>
- Sowissi, A., Hassoune, M., El Machkouri, M., & El Ghachtoul, Y. (2020). Flood susceptibility mapping using GIS and analytical hierarchy process (AHP): A case study in Oued Laoou Basin (Northern Morocco). *International Journal of River Basin Management*, 18(4), 529–540. <https://doi.org/10.1080/15715124.2019.1598306>
- Sun, H., Yu, Q., Wang, X., Zhang, X., & Ruan, X. (2024). Exploring sustainable watershed flood risks management: An innovative TFAHP-TOPSIS methodology in the Georges River Basin, Australia. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 110, 104626. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2024.104626>
- Tenzin, J., & Bhaskar, A. S. (2020). Flash flood Hazard zone mapping using GIS: Sarpang. *International Journal of New Innovations in Engineering and Technology*, 13(1), 7–20.
- Vaghefi, S. A., Keykhai, M., Jahanbakhshi, F., Sheikholeslami, J., Ahmadi, A., Yang, H., & Abbaspour, K. C. (2019). The future of extreme climate in Iran. *Scientific reports*, 9(1), 1464. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-38071-8>
- Wang, Y., Fang, Z., Hong, H., Peng, L., & Yang, L. (2019). Flood susceptibility mapping using convolutional neural network frameworks. *Journal of Hydrology*, 575, 1152–1164. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.06.003>
- Wang, G., Liu, Y., Hu, Z., Lyu, Y., Zhang, G., Liu, J., & Zheng, H. (2020). Flood risk assessment based on fuzzy synthetic evaluation method in the Beijing-Tianjin-Hebei metropolitan area, China. *Sustainability*, 12(4), 1–30. <https://doi.org/10.3390/su12041451>
- Yamani, M., & Enayati, M. (2006). The Analyses Of Flood Data In Relation To The Geomorphologic Specification Of Fashand And Behjatabad Basins. *Geographical Research Quarterly*, 37(54), 4–4. Sid. <https://sid.ir/paper/538814/en>
- Yodying, A., Seejata, K., Chatsudarat, S., Chidburee, P., Mahavik, N., Kongmuang, C., & Tantane, S. (2019, October). Flood hazard assessment using fuzzy analytic hierarchy process: A case study of Bang Rakam model in Thailand. In *Proceedings of the 40th Asian Conference on Remote Sensing*, Daejeon Convention Center (DCC), Daejeon, KR (pp. 14–18).
- Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8(3), 338–353. [https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X)
- Zhao, G., Pang, B., Xu, Z., Yue, J., & Tu, T. (2019). Mapping flood susceptibility in mountainous areas on a national scale in China. *Science of the Total Environment*, 615, 1133–1142. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.232>

Synoptic Examination of Thunderstorm-Inducing Atmospheric Patterns and Their Temporal Association with Sunspot Activity across Three Recent Climatic Cycles (1986–2018) in Southwestern Iran

Hasan Lashkari^{1*} , Mohammad Naji², Zainab Mohammadi³, Alireza Fadaei Bash⁴

1. **Corresponding Author**, Professor of Climatology, Department of Physical Geography, Faculty of Earth Sciences, University of Shahid Beheshti, Tehran, Iran

Email: h-lashkari@sbu.ac.ir ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6007-7275>

2. PhD Candidate in Climatology, Department of Physical Geography, Faculty of Earth Sciences, University of Shahid Beheshti, Tehran, Iran

3. Postdoctoral Synoptic Climatology. Department of Physical Geography, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

4. Master of Science in Climatology, Department of Physical Geography, Faculty of Earth Sciences, University of Shahid Beheshti, Tehran, Iran

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article Article history: Received: 06 May 2025 Revised: 16 November 2025 Accepted: 10 December 2025 Published: 22 June 2026 Keywords: Factor Analysis, Southwest Iran, Sudanese–Mediterranean System, Sunspots, Atmospheric Instability.	Thunderstorms, due to their dynamic and thermodynamic characteristics, can both replenish water resources and cause substantial infrastructural and human losses. This study aims to identify the synoptic patterns influencing thunderstorms in southwestern Iran, where convection is the dominant precipitation mechanism. Given that the statistical period under investigation coincides with the three most recent solar cycles, special attention was paid to variations in thunderstorm occurrence across different phases of each cycle, as well as inter-cycle differences. In this regard, the frequency of thunderstorms during the last three solar cycles and their relationship with sunspot activity were examined, and 178 events were analyzed using factor analysis and qualitative interpretation of synoptic charts. The results indicate that thunderstorm frequency undergoes significant fluctuations during solar cycles, with the changes being more pronounced in years corresponding to peak sunspot activity. For instance, in 1990, despite recording 2,296 sunspots, the number of documented thunderstorms in the region dropped to 24 events. During these periods, combined Sudan–Mediterranean systems had the greatest influence on thunderstorm development, whereas independent Sudanese, Mediterranean, and monsoonal systems played a more limited role. In the combined Sudan–Mediterranean pattern, due to the merging of ridges from the African and migratory anticyclones, the Sudan low-pressure system shifts further eastward, in contrast to the general pattern in which it travels eastward from the western Arabian Peninsula. In this pattern, after passing over the southern Red Sea via the Bab-el-Mandeb Strait, it enters the Arabian Peninsula. When the low-pressure core is positioned between Riyadh and the southern Persian Gulf, thunderstorms intensify due to substantial moisture advection from the southern seas. At mid-tropospheric levels, the Mediterranean trough exhibits a marked southward extension, and a cut-off low with a strong southward displacement settles over southern Iraq.
How to Cite: Lashkari, H. , Naji, M. , Mohammadi, Z. and Fadaei Bash, A. (2026). Synoptic Examination of Thunderstorm-Inducing Atmospheric Patterns and Their Temporal Association with Sunspot Activity across Three Recent Climatic Cycles (1986–2018) in Southwestern Iran. <i>Journal of Natural Environmental Hazards</i>, 15 (48), 143-166.	
 © The Author/Authors DOI: 10.22111/jneh.2025.51935.2113 Publisher: University of Sistan and Baluchestan	

EXTENDED ABSTRACT

INTRODUCTION

Thunderstorms are significant and destructive climatological hazards that occur due to the intense release of energy and torrential rainfall within a short time frame, causing substantial damage. Southwestern Iran, particularly its eastern regions, exhibits a high susceptibility to this phenomenon due to its topographic characteristics, proximity to moisture sources, and influence from large-scale climate systems. This region is affected by Sudanese, Mediterranean, combined, and to some extent, monsoonal systems, which play a crucial role in the formation of convective precipitation. Given that the intensity and frequency of these systems are influenced by climatic fluctuations and variable solar cycles, the present research aims to analyze the effect of the three recent solar cycles (numbers 22 to 24) on the frequency and activity of synoptic systems effective in generating thunderstorms in southwestern Iran. To this end, a combination of statistical, synoptic, and thermodynamic analyses has been employed to identify the relationship between variations in solar radiation and influential atmospheric patterns. The findings of this research can contribute to the improvement of forecasting and climate risk management systems in the region.

DATA AND METHODOLOGY

In this research, to investigate the role of solar cycles in the temporal variations of thunderstorms in southwestern Iran, recorded data from 24 meteorological stations during the period of 1986 to 2018, concurrent with three complete solar cycles (cycles 22 to 24), were utilized. The thunderstorm occurrence data were extracted from 6-hourly synoptic reports of the Iran Meteorological Organization and organized in Microsoft Excel. Additionally, data about the sunspot number were collected from the Royal Observatory of Belgium database. Only stations with complete and continuous data across all three solar cycles were included in the analysis. For synoptic analysis, 178 significant events, in which thunderstorms were recorded at more than half of the stations, were identified. These events were examined using two complementary methods: visual analysis and factor analysis. In the visual analysis, indices such as the maximum number of lightning strikes and daily precipitation were considered in sample selection. In the factor analysis method, sea level pressure (SLP) data were extracted from the NCEP/NCAR database and analyzed in SPSS software using varimax orthogonal rotation. Fifteen principal factors explained more than 91% of the total data variance. The Kaiser-Meyer-Olkin (KMO = 0.918) and Bartlett's test of sphericity (sig = 0.000) also confirmed the adequacy and significance of the factor analysis. Finally, two events on November 29, 1986, and December 13, 2010, were identified as selected case studies for synoptic chart analysis.

RESULTS AND DISCUSSION

The results indicated that thunderstorm occurrences in southwestern Iran exhibit a distinct periodic pattern in relation to solar cycles. Statistical and synoptic analyses of data recorded at seven selected stations during the three recent solar cycles (cycles 22, 23, and 24) reveal that the frequency of thunderstorms in most cases increased with decreasing solar activity (reduction in the number of sunspots), particularly in the final years of each cycle. This inverse relationship between solar activity and the frequency of thunderstorm phenomena is more clearly evident in cycles 22 and 23, and a similar pattern, despite minor fluctuations, was repeated in cycle 24. Specifically, the highest frequency of thunderstorms during the entire 33-year period was recorded in 2007 (minimum solar activity in cycle 23) with over 320 events. From the perspective of synoptic systems, Sudanese systems and combined Sudanese-Mediterranean systems played the most effective role in the formation of thunderstorms in the region. These systems, benefiting from tropical moisture and convective instabilities, possess the greatest potential for the development of thunderclouds and severe weather events in the region. The results showed that in years with reduced solar activity, the frequency and intensity of Sudanese and combined systems also increased, leading to the

intensification of thunderstorm occurrences. Conversely, coinciding with peak solar activity, a relative decrease in the penetration and influence of these systems was observed; this may indicate the reflective effects of solar radiation on changes in the general atmospheric circulation patterns and the weakening of the influence of tropical systems. Analysis of surface pressure and mid-tropospheric charts during thunderstorm events in southwestern Iran showed that these phenomena mainly occurred under the influence of the intrusion of Sudanese and Mediterranean systems, or a combination thereof. At the surface, the expansion of the Sudanese low-pressure system and the advection of tropical moisture from the Red Sea and the Persian Gulf intensified instability. At the mid-level (500 hPa), the establishment of the Mediterranean trough and upper-level divergence associated with the subtropical jet stream facilitated air ascent and the development of thunderclouds. This triple coincidence – moisture, trough, and jet – played a key role in the formation and intensity of thunderstorms.

CONCLUSION

The findings of this research demonstrate a significant correlation between the occurrence of thunderstorms in southwestern Iran and the fluctuations in solar activity, particularly the variations in the number of sunspots during solar cycles 22 to 24. Specifically, the maximum frequency of these phenomena is often observed in the declining and minimum years of each solar cycle. Synoptic analyses also indicate that Sudanese systems and their combination with Mediterranean systems play a more prominent role in the occurrence of these phenomena compared to other systems. In selected case studies, the interaction of high-pressure and low-pressure systems at different atmospheric levels, particularly the confluence of the Siberian High, the Sudanese Low, and Mediterranean troughs, has led to effective moisture transport, increased instability, and the intensification of convective uplift. These results emphasize the mesoscale role of solar fluctuations in modulating synoptic patterns and thermodynamic conditions effective in the formation of thunderstorms, and highlight the importance of considering solar indices in climatological analyses and forecasts.

REFERENCES

References (in Persian)

- Azizi, G., Garami, M. S., & Sharifi, L. (2017). Spatial Analysis of Thunderstorms in Iran. *Journal of Applied Research in Geographical Sciences*, 17(47), 243–259. <http://jgs.khu.ac.ir/article-1-2914-fa.html>. [In Persian]
- Lashkari, H., Yarmoradi, Z., & Mousavi, H. (2016). Statistical and synoptic analysis of thunderstorm events in Kohgiluyeh and Boyer-Ahmad province. *Quarterly Journal of Geography and Environmental Studies*, 5(18), 135–151. [In Persian]
- Lashkari, H., & Jafari, M. (2021). Synoptic Patterns that Determine the Trajectory of Precipitation Systems of Sudanese Origin. *Spatial Analysis of Environmental Hazards*, 8(1), 55–78. <http://jsaeh.khu.ac.ir/article-1-3104-fa.html>. [In Persian]
- Masoompour Samakosh, J., Taheri, F., Koushki, S., and Taszarek, M. (2022). The Effect of Large-scale Synoptic Systems on the Widespread Occurrence of Thunderstorms in the West and Northwest of Iran. *Journal of Climate Research*, 1401(51), 147-162. [In Persian]
- Mohammadi, Z. and Lashkari, H. (2018). Effects of Spatial Movement of Arabian Subtropical High Pressure and Subtropical Jet on Synoptic and Thermodynamic Patterns of Intense Wet Years in the South and South West Iran. *Physical Geography Research*, 50(3), 491-509. doi: 10.22059/jphgr.2018.249422.1007165. [In Persian]
- Mohammadi, H., Khazaei, M., Mahoutchi, M. H. and Abasi, E. (2016). Synoptic analysis of thermodynamic destructive thunderstorms, Ahvaz. *Environmental Management Hazards*, 3(2), 155-170. doi: 10.22059/jhsci.2016.60744. [In Persian]
- Qavidel Rahimi, Y., Baghbanan, P., & Farajzadeh Asl, M. (2014). The Spatial Analysis of Hazard of Spring Thunderstorms in Iran. *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards*, 1(3), 59–70. <http://jsaeh.khu.ac.ir/article-1-2348-fa.html>. [In Persian]

References (in English)

- Adelekan, I. O. 1998. Spatio-temporal variations in thunderstorm rainfall over Nigeria. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 18(11), 1273-1284. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0088\(199809\)18:11<1273::AID-JOC298>3.0.CO;2-4](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0088(199809)18:11<1273::AID-JOC298>3.0.CO;2-4)
- Barry, R. G., & Hall-McKim, E. A. 2014. Essentials of the Earth's climate system. Cambridge University Press.

مجله علمی پژوهشی مخاطرات محیط طبیعی، دوره ۱۵، شماره ۴۸، شماره پیاپی ۰۲، تیر ۱۴۰۵

واکاوی الگوهای همدیدی ایجادکننده طوفان‌های تندری و انطباق زمانی آن‌ها با لکه‌های خورشیدی در سه چرخه اقلیمی اخیر (۲۰۱۸-۱۹۸۶) در جنوب غرب

حسن لشکری^{۱*}، محمد ناجی^۲، زینب محمدی^۳، علیرضا فدایی^۴ باش

۱. استاد آب‌وهواشناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران (نویسنده مسئول)

ایمیل: h-Lashkari@sbu.ac.ir ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6007-7275>

۲. دانشجوی دکتری آب‌وهواشناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

۳. پسادکتری آب‌وهواشناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

۴. کارشناس ارشد آب‌وهواشناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۱۶ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۸/۲۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۱۹ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۳/۱۶ واژه‌های کلیدی: تحلیل عاملی، جنوب غرب ایران، سامانه سودانی-مدیترانه‌ای، لکه‌های خورشیدی، ناپایداری.	طوفان‌های تندری با ویژگی‌های دینامیکی و ترمودینامیکی خود، علاوه بر تأمین منابع آبی، می‌توانند خسارت‌های زیربنایی و انسانی قابل‌توجهی ایجاد کنند. این پژوهش با هدف شناسایی الگوهای همدیدی مؤثر بر طوفان‌های تندری جنوب‌غرب ایران که همرفت سازوکار غالب بارش‌های آن است، انجام شده است. با توجه به همزمانی دوره آماری موردبررسی با سه چرخه خورشیدی اخیر، تلاش شده است تا تغییرات فراوانی وقوع طوفان‌های تندری در مراحل مختلف هر چرخه و همچنین تفاوت‌های آن از یک چرخه به چرخه دیگر، مورد دقت قرار بگیرد. در این راستا، فراوانی طوفان‌های تندری در سه چرخه اخیر خورشیدی و ارتباط آن با لکه‌های خورشیدی بررسی و ۱۷۸ رخداد با روش‌های تحلیل عاملی و تحلیل کیفی نقشه‌های همدیدی تحلیل شد. نتایج نشان داد که فراوانی طوفان‌های تندری در طول چرخه‌های خورشیدی دستخوش نوسانات معنادار بوده و این تغییرات به‌ویژه در سال‌های متناظر با اوج فعالیت لکه‌های خورشیدی بارزتر است. به‌طور خاص، در سال ۱۹۹۰ با وجود ثبت ۲۲۹۶ لکه خورشیدی، تعداد رخدادهای طوفان تندری به ۲۴ مورد کاهش یافت. در این دوره‌ها، سامانه‌های ترکیبی سودانی - مدیترانه‌ای بیشترین نقش را در شکل‌گیری طوفان‌ها داشته‌اند؛ درحالی‌که سامانه‌های سودانی، مدیترانه‌ای و جریانات مونسونی به‌طور مستقل نقش محدودتری داشته‌اند. در الگوی ترکیبی سودان - مدیترانه به‌دلیل ادغام زبانه‌های دو سامانه واچرخندی آفریقا و مهاجر، کم‌فشار سودانی جابه‌جایی شرق‌سوتر داشته و بر خلاف الگوی کلی که از سمت غرب شبه جزیره عربستان حرکت می‌کند. در این الگو، پس از عبور از بخش‌های جنوبی دریای سرخ در محدوده تنگه باب‌المندب وارد شبه‌جزیره عربستان می‌شود. وقتی هسته مرکزی کم‌فشار در محدوده‌ای بین ریاض و جنوب خلیج فارس قرار دارد، طوفان‌های تندری به‌دلیل فرارفت رطوبتی فراوان از دریاهای جنوبی تشدید می‌شوند. در ترازهای میانی و ردسپهر ناوه مدیترانه‌ای، ضمن گسترش جنوب‌سوی قابل‌توجه، مرکز کم‌ارتفاع بریده با جابه‌جایی جنوب‌سوی شدید در جنوب عراق استقرار پیدا می‌کند.

استناد: لشکری، حسن، ناجی، محمد، محمدی، زینب و فدایی، علیرضا. (۱۴۰۵). واکاوی الگوهای همدیدی ایجادکننده طوفان‌های تندری و انطباق زمانی آن‌ها با لکه‌های خورشیدی در سه چرخه اقلیمی اخیر (۲۰۱۸-۱۹۸۶) در جنوب غرب. *مخاطرات محیط طبیعی*، ۱۵ (۴۸)، ۱۶۶-۱۴۳.

ناشر: دانشگاه سیستان و بلوچستان

DOI: 10.22111/jneh.2025.51935.2113

© نویسنده/ نویسندگان



مقدمه

پدیده‌های طبیعی به واسطه ماهیت دوسویه خود، علاوه بر نقش آفرینی در پویایی‌های زیست‌محیطی، می‌توانند منجر به بروز پیامدهای شدید و گاه فاجعه‌بار شوند (عزیزی و همکاران، ۱۳۹۶). در این میان، مخاطرات طبیعی سالانه جان هزاران نفر را در سراسر جهان تهدید می‌کنند که سهم قابل‌توجهی از این تلفات به مخاطرات آب‌وهوایی ازجمله طوفان‌های تندری، سیلاب‌ها و سایر رویدادهای حدی جوی اختصاص دارد (لشکری و همکاران، ۱۳۹۵). طوفان‌های تندری و پدیده‌های همبسته‌ای چون تگرگ، بادهای شدید، صاعقه و بارش‌های سیل‌آسا، ازجمله مخاطرات اقلیمی مهم به شمار می‌روند که به‌دلیل آزادسازی سریع و شدید انرژی و ریزش شدید بارش در بازه زمانی کوتاه، همواره مورد توجه پژوهش‌های آب‌وهوایی قرار گرفته‌اند (قویدل رحیمی و همکاران، ۱۳۹۳؛ محمدی و همکاران، ۱۳۹۵). این سامانه‌ها که در مقیاس محلی تا میان‌مقیاس با گستره‌ای بین ۲۰ تا ۵۰ کیلومتر شکل می‌گیرند، شدت فعالیت‌شان به ارتفاع و رشد ابرهای جوششی وابسته است (آدکان، ۱۹۹۸؛ بری و هال - مک‌کیم، ۲۰۱۴). در نتیجه، این طوفان‌ها به‌عنوان یکی از مخرب‌ترین پدیده‌های اقلیمی، سالانه خسارت‌های قابل‌توجهی به زیرساخت‌های شهری، اراضی کشاورزی و واحدهای مسکونی وارد می‌سازند (لشکری و آقاسی، ۱۳۹۲؛ معصوم‌پور سماکوش و همکاران، ۱۴۰۱).

منطقه جنوب‌غربی ایران، به‌ویژه نواحی شرقی این پهنه شامل استان کهگیلویه و بویراحمد و چهارمحال بختیاری، به‌دلیل ویژگی‌های توپوگرافی خاص، تأثیرپذیری از سامانه‌های اقلیمی بزرگ‌مقیاس و دسترسی به منابع رطوبتی ناشی از مجاورت با دریاهای گرم جنوبی، از استعداد بالایی در شکل‌گیری طوفان‌های تندری برخوردار است (لشکری و حجتی، ۱۳۹۱). این منطقه، به‌خصوص در نیمه جنوب‌غربی کشور، با تنوع اقلیمی و شرایط جغرافیایی ویژه، نوسانات بارشی چشمگیری را تجربه می‌کند. در این راستا، سامانه‌های جوی متعددی در روند شکل‌گیری و توزیع بارش‌ها نقش دارند؛ به‌گونه‌ای که توزیع زمانی و مکانی بارش‌ها به شدت تابع جایگاه و تغییرات مراکز فشار جوی است. نوع، موقعیت و پویایی این مراکز، نقشی کلیدی در تنظیم رژیم بارشی منطقه ایفا می‌کنند (لشکری و جعفری، ۱۴۰۰). الگوهای اقلیمی غالب در جنوب‌غرب ایران که استان‌هایی چون خوزستان، کهگیلویه و بویراحمد و چهارمحال و بختیاری را شامل می‌شود، متأثر از سامانه‌های مونسونی، سودانی، مدیترانه‌ای و ترکیبی از سامانه‌های سودانی - مدیترانه‌ای هستند. در این میان، سامانه‌های سودانی بیشترین سهم را در تولید بارش‌ها بر عهده دارند، درحالی‌که سامانه‌های ترکیبی سودانی - مدیترانه‌ای در رتبه دوم و سامانه‌های مدیترانه‌ای در جایگاه سوم اهمیت قرار دارند (محمدی و لشکری، ۱۳۹۸). با توجه به موقعیت جغرافیایی این منطقه در طول جغرافیایی غربی‌تر، نفوذ و فعالیت مستقل سامانه‌های مونسونی در این نواحی محدود و کم‌اثر است (فدایی‌باش، ۱۴۰۳).

در سال‌های مختلف، شدت و فراوانی سامانه‌های جوی مؤثر در شکل‌گیری طوفان‌های تندری به‌صورت یکنواخت نبوده و تحت تأثیر تغییرپذیری‌های اقلیمی و نوسانات تابشی خورشید، دچار نوسان شده‌اند (لشکری و همکاران، ۱۴۰۳). بر این اساس، هدف اصلی این پژوهش، تحلیل جامع و علمی تأثیر چرخه‌های خورشیدی شماره ۲۲، ۲۳ و ۲۴ بر فراوانی و فعالیت سامانه‌های سینوپتیکی مؤثر در رخداد طوفان‌های تندری در جنوب‌غرب ایران است. در این راستا، سامانه‌های جوی مؤثر نظیر سامانه‌های سودانی، مدیترانه‌ای، ترکیبی (سودانی - مدیترانه‌ای) و مونسونی مورد ارزیابی قرار گرفته و بسامد وقوع آن‌ها در ارتباط با تغییرات تابش خورشیدی بررسی می‌گردد. به‌منظور افزایش دقت تحلیل، علاوه بر مطالعات آماری، از تحلیل‌های همدیدی و ترمودینامیکی نیز بهره‌گیری شده است. این تحلیل‌ها با

هدف شناسایی ویژگی‌های دینامیکی و فیزیکی جو در زمان رخداد طوفان‌های تندری انجام می‌شود. بررسی پیوند میان چرخه‌های خورشیدی و بسامد سامانه‌های مؤثر بر طوفان‌های تندری از اهمیت بسزایی برخوردار است، چراکه نوسانات تابش خورشیدی قادر است به تغییرات ساختاری در الگوهای جوی و اقلیمی منجر شود. این پژوهش با ارائه شناختی عمیق‌تر از فرآیندهای دینامیکی و ترمودینامیکی حاکم بر این سامانه‌ها، می‌تواند در جهت بهبود سامانه‌های پیش‌بینی جوی، ارتقاء مدیریت مخاطرات اقلیمی و تدوین راهبردهای سازگار با تغییرات اقلیمی در جنوب غرب ایران مؤثر واقع شود.

طوفان‌های تندری به‌عنوان یکی از پدیده‌های مهم و تأثیرگذار جوی، همواره در کانون توجه مطالعات علوم جوی و اقلیم‌شناسی قرار داشته‌اند. در این راستا، دای^۱ (۲۰۰۱) در پژوهشی با هدف بررسی تغییرات روزانه فراوانی وقوع انواع بارش و طوفان‌های تندری در مقیاس جهانی طی سال‌های ۱۹۷۵ تا ۱۹۹۷، به این نتیجه دست یافت که رگبارهای همرفتی و طوفان‌های تندری بیشتر در ساعات بعدازظهر و در مناطق خشک و نیمه‌خشک، در تمامی فصول سال از بیشترین فراوانی برخوردار هستند. همچنین، تافرنر و همکاران^۲ (۲۰۰۸) با تمرکز بر فرایند رشد و گسترش طوفان‌های تندری شدید در حوضه آبریز بالادست رودخانه دانوب، نشان دادند که شکل‌گیری سریع این سامانه‌ها در محل پیدایش، نقش مؤثری در وقوع بارش‌های سنگین و افزایش سرعت بادهای شدید در نواحی مرکزی اروپا ایفا می‌کند. در راستای بررسی رفتار اقلیمی طوفان‌های تندری در مناطق مختلف جهان، لوگینوف و همکاران^۳ (۲۰۱۰) به مطالعه تغییرات زمانی و مکانی این پدیده و ویژگی‌های شکل‌گیری آن در کشور بلاروس پرداختند. یافته‌های آن‌ها نشان داد که فراوانی وقوع طوفان‌های تندری در مناطق کوهستانی به‌طور معناداری بیش از نواحی هموار است. پینتو و همکاران^۴ (۲۰۱۳) تغییرات بلندمدت روزهای همراه با رعدوبرق را در جنوب شرقی برزیل مورد بررسی قرار دادند. نتایج این پژوهش حاکی از افزایش فعالیت طوفان‌های تندری در این منطقه طی سال‌های اخیر و ارتباط آن با فازهای مختلف پدیده‌های اقیانوسی - جوی نظیر ال‌نینو و لانینا بود. همچنین، گالاناکي و همکاران^۵ (۲۰۱۸) با استفاده از داده‌های مشاهده‌ای ابرها و وقوع رعدوبرق در منطقه مدیترانه، دریافتند که شرایط توپوگرافی محلی و چرخه روزانه تابش خورشید نقش تعیین‌کننده‌ای در شکل‌گیری و گسترش طوفان‌های تندری ایفا می‌کنند. تازارک و همکاران^۶ (۲۰۲۰) در پژوهشی تطبیقی، بیان کردند که در صورت توسعه یافتن یک طوفان تندری، احتمال تبدیل آن به سامانه‌ای شدید در ایالات متحده آمریکا به‌مراتب بیشتر از اروپاست. افزون بر این، پیتزوتی و همکاران^۷ (۲۰۲۰) با بهره‌گیری از شاخص‌های ترمودینامیکی، به تحلیل آماری رخداد طوفان‌های تندری در نواحی شمالی اروپا پرداختند و نقش پارامترهای ناپایداری جو در تبیین فراوانی و شدت این پدیده را مورد تأکید قرار دادند.

در ایران، لشکری و همکاران (۱۳۹۵) با بررسی طوفان‌های تندری در استان کهگیلویه، نشان دادند که سامانه‌های سودانی با جذب رطوبت از دریای عرب، عمان و سرخ و برخورداری از انرژی پتانسیل بالا، عامل اصلی شکل‌گیری این پدیده هستند. در مطالعه‌ای دیگر لشکری و همکاران (۱۴۰۳) به واکاوی پراکنش طوفان‌های تندری جنوب ایران در سه چرخه خورشیدی اخیر پرداختند. نتایج نشان داد که از چرخه خورشیدی ۲۲ الی ۲۴ فراوانی رخداد طوفان‌های

^۱ - Dai

^۲ - Tafferner et al

^۳ - Loginov et al

^۴ - Pinto et al

^۵ - Galanaki et al

^۶ - Taszarek et al

^۷ - Pizzuti et al

تندری از الگوی منظمی پیروی نمی‌کند و چرخه ۲۳ بالاترین رخداد را داشته است. فرجی و همکاران (۱۳۹۴) به تحلیل الگوهای زمانی و مکانی بارش‌های استان زنجان پرداختند و نتایج نشان داد که زبانه‌های کم‌فشارهای مدیترانه‌ای و سودانی، با تأثیر دریای مدیترانه، سیاه و سرخ، به سمت شمال غرب ایران و استان زنجان گسترش یافته‌اند. معصوم پور سماکوش و همکاران (۱۳۹۵) در پژوهش خود به بررسی همدیدی طوفان‌های تندری سواحل جنوبی ایران پرداخته و نتایج نشان داد که نفوذ بادهای غربی و قرارگیری ناحیه واگرایی و منطقه فرارفت تاوایی مثبت در این منطقه شرایط ناپایداری و صعود هوا را ایجاد می‌کند. برنا (۱۳۹۷) در مطالعه‌ای مشابه بر طوفان‌های تندری استان خوزستان تأکید کرده و نتیجه گرفت که گسترش سامانه‌های کم‌فشار واقع در شرق دریای سرخ و عربستان عامل اصلی شکل‌گیری این پدیده است. دانانیان و همکاران (۱۴۰۲) طوفان‌های تندری در ایران را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند و نشان دادند که این پدیده در تمام نقاط کشور رخ می‌دهد؛ ولی بیشترین فراوانی در شمال غرب، جنوب غرب و جنوب شرق ایران مشاهده می‌شود. همچنین، مجرد و همکاران (۱۳۹۸) به تحلیل زمانی و مکانی طوفان‌های تندری در ایران پرداخته و نشان دادند که بیشترین فراوانی طوفان‌ها در شمال غرب و غرب کشور، به‌ویژه در ایستگاه‌های ارومیه، تبریز، خوی، خرم‌آباد و بوشهر رخ می‌دهد.

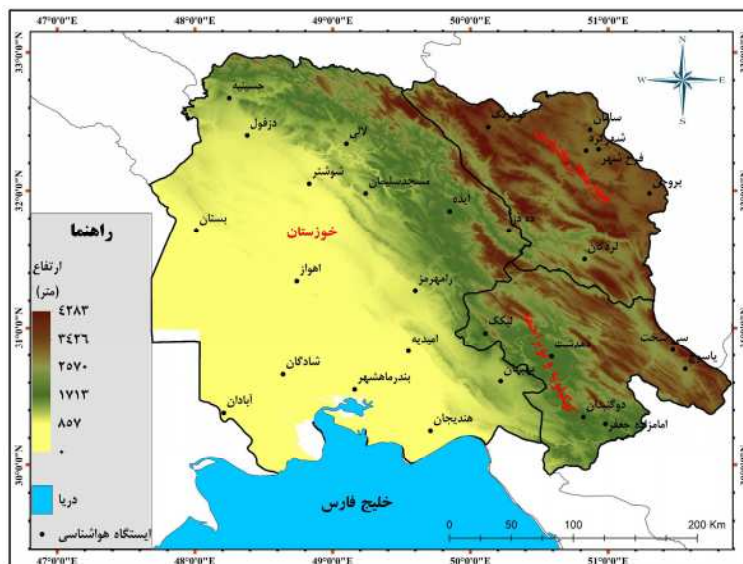
بررسی پیشینه پژوهش‌ها نشان می‌دهد که طوفان‌های تندری، به‌عنوان پدیده‌های جوی پیچیده و متغیر، در بسیاری از مناطق جهان و به‌ویژه ایران، تأثیرات قابل‌توجهی بر محیط و فعالیت‌های انسانی دارند. این پدیده‌ها تحت تأثیر عواملی چون ویژگی‌های توپوگرافی، تابش خورشیدی و ساختار سامانه‌های جوی شکل می‌گیرند. مطالعات نشان داد، در ایران، بیشترین فراوانی وقوع طوفان‌های تندری در مناطق شمال‌غرب، جنوب‌غرب و جنوب مشاهده شده و بیشتر در فصل‌های پاییز و زمستان رخ می‌دهند. با توجه به اهمیت این پدیده در جنوب‌غرب کشور و نبود مطالعات جامع که هم‌زمان به تحلیل همدیدی و ترمودینامیکی آن همراه با نقش چرخه‌های خورشیدی پرداخته باشند، این پژوهش با اهداف زیر انجام می‌شود:

- * شناسایی و تحلیل الگوهای همدیدی مؤثر بر شکل‌گیری طوفان‌های تندری در جنوب‌غرب ایران،
- * بررسی ویژگی‌های ترمودینامیکی این پدیده‌ها،
- * ارزیابی تغییرات فراوانی وقوع آن‌ها در ارتباط با مراحل مختلف چرخه‌های خورشیدی،
- * مقایسه یافته‌ها در بازه سه چرخه خورشیدی اخیر.

منطقه مورد مطالعه

پهنه مطالعاتی این پژوهش شامل استان‌های خوزستان، چهارمحال و بختیاری و کهگیلویه و بویراحمد است. این منطقه جغرافیایی بخشی از جنوب غربی ایران را در بر می‌گیرد و از ارتفاعات زاگرس مرکزی تا سواحل خلیج فارس گسترش یافته است (شکل ۱). این سه استان در مجموع مساحتی معادل ۹۶،۴۹۸ کیلومتر مربع را پوشش می‌دهند و از نظر موقعیت جغرافیایی در محدوده عرض‌های جغرافیایی ۲۹ درجه و ۹۲ دقیقه تا ۳۲ درجه و ۹۸ دقیقه شمالی و طول‌های جغرافیایی ۴۷ درجه و ۶۸ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۸۸ دقیقه شرقی قرار دارند. بر اساس آخرین سرشماری نفوس و مسکن (مرکز آمار ایران، ۱۳۹۵)، جمعیت ساکن در این سه استان برابر با ۶،۳۷۱،۳۲۴ نفر گزارش شده است. این منطقه علاوه بر تنوع جمعیتی، دارای ویژگی‌های متنوع توپوگرافی است که آن را از نظر اقلیمی و محیطی

به یک منطقه منحصربه‌فرد تبدیل می‌کند. اختلاف ارتفاع در این پهنه به ۴۲۸۳ متر می‌رسد که از نواحی کم‌ارتفاع حاشیه خلیج فارس تا ارتفاعات مرتفع زاگرس مرکزی را شامل می‌شود. شرایط اقلیمی این منطقه به شدت تحت تأثیر ارتفاعات زاگرس و جریانات جوی مختلف است که به ایجاد تنوع در الگوهای بارشی و دمایی منجر شده است. اقلیم این ناحیه تحت تأثیر سه توده هوایی عمده شامل توده هوای مرطوب مدیترانه‌ای، سامانه کم‌فشار سودانی و سامانه پرفشار عربستان قرار دارد. هر یک از این توده‌های هوایی با ویژگی‌های منحصربه‌فرد دمایی و رطوبتی، نقش مهمی در شکل‌دهی الگوهای جوی منطقه ایفا می‌کنند (محمدی و لشکری، ۱۳۹۵؛ علیجانی، ۱۳۸۲؛ لشکری، ۱۳۸۲).



شکل ۱: منطقه مورد مطالعه و موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی انتخابی منطبق با دوره آماری

داده‌ها و روش پژوهش

برای انجام این پژوهش، داده‌های مربوط به رخداد طوفان‌های تندری از گزارش‌های دیدبانی ۲۴ ساعته ایستگاه‌های سازمان هواشناسی کشور طی یک دوره‌ی بلندمدت از سال ۱۹۸۶ تا ۲۰۱۸ گردآوری و استانداردسازی شدند. بازه‌ی زمانی انتخاب‌شده به‌گونه‌ای تعیین شده که با سه چرخه‌ی کامل ۱۱ ساله‌ی خورشیدی (چرخه‌های ۲۲ تا ۲۴) هم‌پوشانی داشته باشد. این انتخاب، علاوه بر پوشش تغییرات اقلیمی بلندمدت، امکان بررسی تأثیرات احتمالی نوسانات فعالیت خورشیدی بر فراوانی و شدت طوفان‌های تندری را نیز فراهم می‌کند. چرخه‌ی خورشیدی ۲۲ شامل سال‌های ۱۹۸۶ تا ۱۹۹۶، چرخه‌ی ۲۳ شامل سال‌های ۱۹۹۷ تا ۲۰۰۷ و چرخه‌ی ۲۴ بازه‌ی ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۸ را در بر می‌گیرد. همچنین، داده‌های مربوط به شمار لکه‌های خورشیدی از پایگاه داده‌ی 'Royal Observatory of Belgium' استخراج شده‌اند. با توجه به اینکه هدف اصلی این پژوهش، شناسایی و تبیین الگوهای همدیدی مؤثر در شکل‌گیری طوفان‌های تندری در مناطق جنوب‌غربی ایران است، برای بهره‌برداری حداکثری از داده‌های ایستگاه‌های دیدبانی و تعیین دقیق‌تر گستره‌ی اثر این پدیده، تنها ایستگاه‌هایی در تحلیل وارد شدند که در هر چرخه‌ی خورشیدی دارای

داده‌های کامل و پیوسته بودند. بر این اساس، تعداد ایستگاه‌های مورد استفاده در هر سیکل با سیکل دیگر متفاوت است؛ به گونه‌ای که در چرخه‌ی اول ۸ ایستگاه، در چرخه‌ی دوم ۱۷ ایستگاه و در چرخه‌ی سوم ۲۶ ایستگاه دارای داده‌های کامل شناسایی و در فرایند تحلیل لحاظ شدند. از این‌رو، در این مطالعه ضمن تحلیل تأثیرپذیری طوفان‌های تندری از سامانه‌های جوی، تغییرات این پدیده در میان سه چرخه‌ی خورشیدی نیز مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفته است. در گام بعدی، داده‌های استخراج‌شده از پایگاه سازمان هواشناسی کشور، بر اساس ایستگاه‌های منتخب و مناطق مربوطه، در محیط نرم‌افزار Excel سامان‌دهی و طبقه‌بندی شدند. به منظور دستیابی به تحلیلی دقیق‌تر، روزهایی که وقوع طوفان تندری در گزارش‌های دیدبانی ۶ ساعته ثبت شده بود، به تفکیک هر ایستگاه و برای هر ماه از سال استخراج گردید. به عبارت دیگر، هر گزارش ۶ ساعته تندر در هر ایستگاه، به عنوان یک تندر تلقی شده و در شمارش تعداد تندرهای در هر روز ماه و سال محاسبه شده است. ولی برای انتخاب نمونه‌ها برای تحلیل همیدی روزهایی به عنوان روز تندری انتخاب شده است که پدیده تندر حداقل در یک نوبت ۶ ساعته و در یک سوم ایستگاه-های همان سیکل گزارش شده باشد. در ادامه، فراوانی رخداد طوفان‌های تندری برای هر سال طی دوره‌ی آماری ۳۳ ساله (۱۹۸۶ تا ۲۰۱۸)، بر اساس گزارش‌های ۶ ساعته، محاسبه و ثبت شد.

به این ترتیب، تمام سامانه‌هایی که در آن حداقل یک سوم ایستگاه‌های هر سیکل و حداقل در یک گزارش ۶ ساعته درگیر پدیده طوفان تندری بوده است، در هر سال و به تفکیک هر سیکل استخراج شد. سپس داده‌های جوی مربوط به ترازهای دریا، ۱۰۰۰ و ۹۲۵ هکتوپاسکال برای این نمونه‌ها ترسیم گردید. آنگاه با بررسی چشمی چندین باره، الگوهای همیدی مشابه جداسازی گردید. این سامانه‌های بارشی همراه با تندر به چهار دسته‌ی اصلی طبقه‌بندی شدند: سامانه‌ی سودانی، سامانه‌ی مدیترانه‌ای، سامانه‌ی مونسونی و سامانه‌ی ترکیبی (حاصل ادغام همزمان سامانه‌های سودانی و مدیترانه‌ای). این طبقه‌بندی برای هر یک از سه چرخه‌ی خورشیدی مورد مطالعه، بر پایه‌ی داده‌های ثبت‌شده در بازه‌های ۶ ساعته و با توجه به ایستگاه‌های دارای داده‌ی کامل، به صورت منظم و دقیق انجام شده است.

در نهایت و پس از طی مراحل پیشین، نمونه‌های شاخص جهت انجام تحلیل همیدی انتخاب شدند. برای شناسایی این نمونه‌ها، از دو رویکرد مکمل شامل تحلیل چشمی و تحلیل عاملی استفاده گردید. در فاصله زمانی بین سال‌های ۱۹۸۶ تا ۲۰۱۸، در مجموع ۱۷۸ مورد بارش تندری شناسایی شد که در آن‌ها وقوع تندر در بیش از نیمی از ایستگاه‌های مورد بررسی ثبت شده بود. در این موارد، با بهره‌گیری از تحلیل چشمی و تحلیل عاملی، نمونه‌های منتخب برای تحلیل‌های همیدی تعیین شدند. در روش تحلیل چشمی، نمونه‌ها بر پایه شاخص‌هایی نظیر بیشترین فراوانی روزانه تندر در سطح ایستگاه‌ها، بیشترین تعداد وقوع همزمان تندر، مجموع بارش روزانه و بیشینه‌ی بارش ثبت‌شده در هر روز، انتخاب گردیدند. به عنوان نمونه، جدول (۱)، نتایج تحلیل چشمی مربوط به سامانه‌های ترکیبی را نشان می‌دهد. باین‌حال، به منظور ارتقاء دقت در انتخاب نمونه‌ها، از تحلیل عاملی نیز استفاده شد. در این روش، داده‌های فشار سطح دریا که از پایگاه داده‌ی NCEP/NCAR استخراج شده بودند، برای روزهایی که در بیش از نیمی از ایستگاه‌ها وقوع طوفان تندری گزارش شده بود، به صورت عددی در محیط نرم‌افزار GrADS پردازش و سامان‌دهی شدند. این داده‌ها در قالب ماتریسی با ابعاد ۱۷۸×۱۷۸ سازمان‌دهی گردیدند و سپس در محیط نرم‌افزار SPSS و با بهره‌گیری از روش تحلیل عاملی و چرخش متعامد واریماکس^۱، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. برای تعیین تعداد

عوامل معنادار، از نمودار سنگ‌ریزه‌ای بهره گرفته شد. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، از مجموع ۱۷۸ متغیر اولیه، تعداد ۱۵ عامل اصلی استخراج گردید و سایر عوامل با مقدار ویژه کمتر از یک حذف شدند. این ۱۵ عامل توانستند در مجموع ۹۱٫۸ درصد از واریانس کل داده‌ها را تبیین نمایند. به عبارت دیگر، بیش از ۹۱ درصد از واریانس متغیرهای اولیه توسط عوامل استخراج‌شده تبیین گردیده است که این امر نشان‌دهنده‌ی دقت و کارایی بالای روش تحلیل عاملی در خلاصه‌سازی داده‌ها و شناسایی الگوهای غالب در مجموعه داده‌ی مورد بررسی است. در راستای ارزیابی کفایت نمونه و بررسی مناسب بودن داده‌ها برای تحلیل عاملی، خروجی آزمون KMO و آزمون بارتلت نیز گزارش شده است. مقدار آماره KMO برابر با ۰٫۹۱۸، به‌دست آمد که نشان‌دهنده‌ی کفایت مناسب حجم نمونه برای انجام تحلیل عاملی است. همچنین، مقدار معناداری آزمون بارتلت برابر با ۰٫۰۰۰ محاسبه شد که نشان‌دهنده‌ی معنادار بودن همبستگی بین متغیرها و مناسب بودن داده‌ها برای اجرای تحلیل عاملی می‌باشد.

با مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل‌های چشمی و تحلیل عاملی، تاریخ‌های ۲۹ نوامبر ۱۹۸۶ و ۱۳ دسامبر ۲۰۱۰ به‌عنوان نمونه‌های منتخب برای تحلیل همدیدی شناسایی شدند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، این دو سامانه علاوه بر کسب بالاترین امتیاز در هر دو شاخص تحلیل چشمی و تحلیل عاملی، در تمامی معیارهای انتخابی نظیر بیشترین بارش ایستگاهی، مجموع بارش روزانه، بیشترین تعداد تندر روزانه و بیشترین تعداد تندر در سطح ایستگاه‌ها، رتبه‌های بالایی را به خود اختصاص داده‌اند. این تحلیل‌ها با استفاده از داده‌های جوی شامل نقشه‌های فشار سطح دریا، ارتفاع ژئوپتانسیل در ترازهای ۸۵۰، ۷۰۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال، میدان باد و نم ویژه که از پایگاه داده‌ی NCEP/NCAR استخراج شده‌اند، انجام پذیرفته است.

جدول ۱: تحلیل چشمی برای سامانه‌های ادغامی (۱۹۸۶ الی ۲۰۱۸)

بیشترین تندر روزانه ایستگاهی	بیشترین تندر روزانه	بارش کلی روزانه	بیشترین بارش ایستگاهی	تاریخ
✓	✓	✓	✓	۲۹ نوامبر ۱۹۸۶
×	×	×	✓	۲۶ آوریل ۱۹۹۲
✓	×	×	×	۱۱ اکتبر ۱۹۹۸
×	×	✓	×	۱۸ نوامبر ۲۰۰۱
×	×	×	✓	۱۲ آوریل ۲۰۰۶
×	×	×	✓	۲۹ آوریل ۲۰۰۶
×	✓	✓	×	۳ نوامبر ۲۰۰۹
✓	✓	✓	✓	۱۳ دسامبر ۲۰۱۰
✓	✓	×	×	۲۰ نوامبر ۲۰۱۱
✓	✓	✓	×	۲۲ مارس ۲۰۱۵
✓	✓	×	×	۳۰ اکتبر ۲۰۱۵
✓	✓	✓	×	۱۳ فوریه ۲۰۱۷
×	×	×	✓	۲۰ اکتبر ۲۰۱۷
×	✓	×	×	۱۲ آوریل ۲۰۱۸
×	✓	✓	✓	۲۳ آوریل ۲۰۱۸
×	✓	✓	✓	۶ نوامبر ۲۰۱۸

نتایج و بحث

در این بخش، ابتدا فراوانی رخداد طوفان‌های تندری بر اساس تأثیر سامانه‌ها و الگوهای همدیدی مؤثر مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرد. سامانه‌های مورد مطالعه شامل سامانه سودانی، سامانه مدیترانه‌ای، سامانه مونسونی و سامانه ترکیبی (که ناشی از ادغام سامانه‌های سودانی و مدیترانه‌ای است) می‌باشند. تحلیل‌ها بر اساس داده‌های مربوط به

سه چرخه خورشیدی اخیر انجام گرفته و فراوانی هر یک از این سامانه‌ها در ایجاد طوفان‌های تندری در دوره‌های مختلف ارزیابی می‌شود. در ادامه، به‌منظور درک دقیق‌تر سازوکارهای فیزیکی و ترمودینامیکی مؤثر بر شکل‌گیری طوفان‌های تندری، تحلیل‌های همدیدی بر روی دو نمونه منتخب از رخداد‌های برجسته انجام خواهد شد.

فراوانی چرخه‌ای طوفان تندری

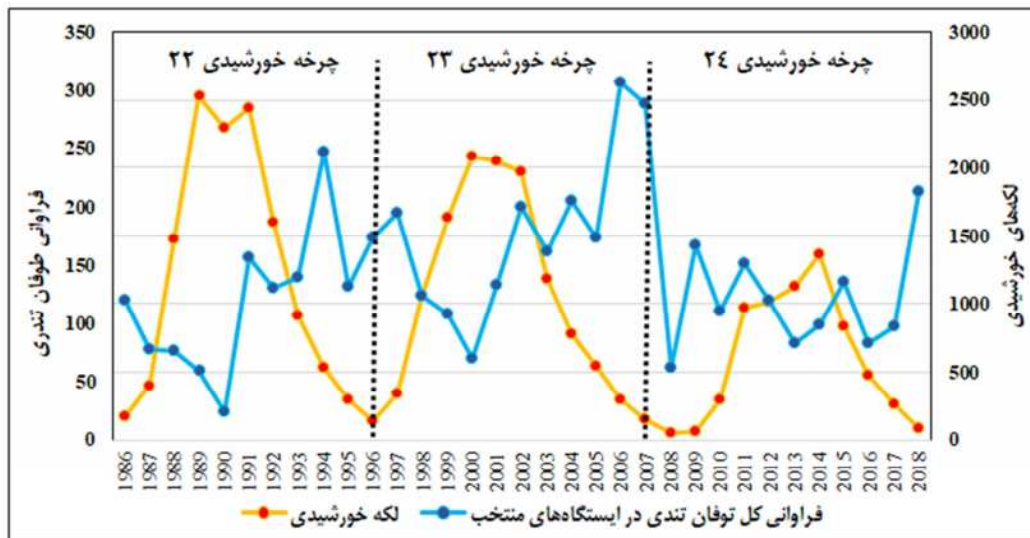
شکل ۲، نحوه پراکنش تعداد لکه‌های خورشیدی را طی سه چرخه خورشیدی اخیر (چرخه‌های ۲۲ تا ۲۴) به تصویر می‌کشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با وجود نظم نسبی در تکرار حدوداً ۱۱ ساله این چرخه‌ها، روند تغییرات تعداد لکه‌های خورشیدی در آغاز، میانه و پایان هر چرخه، یکنواخت و مشابه نیست. از چرخه ۲۲ به بعد، به‌تدریج از ارتفاع قله‌های فعالیت خورشیدی کاسته شده و چرخه‌ها از منظر تعداد لکه‌های خورشیدی کم‌رنگ‌تر ظاهر شده‌اند. در این میان، چرخه ۲۴ به‌عنوان کم‌فعال‌ترین و ضعیف‌ترین چرخه خورشیدی در بازه‌ی یک قرن اخیر شناخته می‌شود. همچنین، این شکل تقارن نسبی در توزیع سالانه فراوانی رخداد‌های طوفان تندری را در ایستگاه‌های منتخب طی بازه‌ی زمانی ۱۹۸۶ تا ۲۰۱۸، در ارتباط با نوسانات تعداد لکه‌های خورشیدی، به تصویر می‌کشد. این تحلیل مبتنی بر داده‌های ثبت‌شده در هفت ایستگاه شامل آبادان، اهواز، بستان، دوگنبدان، مسجدسلیمان، امیدیه و شهرکرد انجام شده است. در چرخه خورشیدی شماره ۲۲، یک رابطه‌ی کاملاً معکوس بین تعداد لکه‌های خورشیدی و فراوانی وقوع طوفان‌های تندری مشاهده می‌شود؛ به‌گونه‌ای که بیشینه‌ی رخداد‌های طوفان تندری در سال‌های پایانی این چرخه گزارش شده است. این چرخه یکی از فعال‌ترین و قدرتمندترین چرخه‌های خورشیدی در چند دهه‌ی اخیر محسوب می‌شود (ابراهیم^۱ و همکاران، ۲۰۲۵)؛ به‌طوری‌که شمار لکه‌های خورشیدی از حدود ۲۵۰ لکه در سال‌های ابتدایی چرخه، به بیش از ۲۵۰۰ لکه در سال‌های میانی آن افزایش یافته است. با این حال، روند وقوع طوفان‌های تندری در خلاف جهت افزایش فعالیت خورشیدی حرکت کرده؛ به نحوی که تعداد این رخدادها از ۷۸ مورد در ابتدای چرخه به تنها ۲۴ مورد در میانه‌ی آن کاهش یافته است (Solar Influences Data Analysis Center, n.d^۲).

در ادامه و در سال‌های انتهایی چرخه، بار دیگر فراوانی این پدیده روندی افزایشی به خود گرفته و در سال ماقبل پایانی چرخه، تعداد گزارش‌شده‌ی طوفان‌های تندری به بیش از ۲۶۰ مورد رسیده است. الگویی مشابه نیز در چرخه خورشیدی شماره ۲۳ قابل مشاهده است. با وجود آن‌که چرخه خورشیدی شماره ۲۳ نسبت به چرخه‌ی ۲۲ از نظر ارتفاع قله‌های فعالیت خورشیدی (تعداد لکه‌ها) ضعیف‌تر و کوتاه‌قدتر ظاهر شده است؛ اما الگوی کلی پراکنش لکه‌های خورشیدی و رخداد‌های طوفان تندری در آن، شباهت قابل‌توجهی با چرخه‌ی پیشین دارد. در این چرخه نیز، حداقل تعداد طوفان‌های تندری در میانه‌ی چرخه ثبت شده است. حال آن‌که در نیمه‌ی دوم چرخه، روندی صعودی و چشمگیر در تعداد این پدیده‌ها مشاهده می‌شود. به‌طور مشخص، در سال ۲۰۰۷ که هم‌زمان با کمینه‌ی فعالیت خورشیدی و کاهش تعداد لکه‌ها به پایین‌ترین سطح ممکن است، بیشترین تعداد طوفان‌های تندری به ثبت رسیده است؛ به‌طوری‌که شمار این رخدادها از مرز ۳۲۰ مورد فراتر رفته و به‌عنوان بالاترین فراوانی ثبت‌شده در کل دوره‌ی آماری ۳۳ ساله برای منطقه‌ی جنوب‌غرب کشور شناخته می‌شود. در چرخه‌ی ۲۴ که ضعیف‌ترین کم‌فعال‌ترین چرخه خورشیدی در یک قرن اخیر محسوب می‌شود، الگوی کاهش تعداد طوفان‌های تندری در میانه‌ی چرخه (هرچند با یک سال تقدم زمانی) بار دیگر تکرار شده است. در این چرخه نیز، بیشینه‌ی رخداد‌های طوفان

1 - Ibrahim et al

2 - www.sidc.be

تندری در سال‌های ابتدایی و انتهایی ثبت شده است. در یک جمع‌بندی کلی می‌توان اظهار داشت که طوفان‌های تندری در تقارن زمانی با فعالیت خورشیدی، الگویی معکوس را دنبال می‌کنند؛ به این معنا که بیشترین فراوانی آن‌ها در سال‌های پایانی هر چرخه خورشیدی، یعنی هم‌زمان با کاهش تعداد لکه‌ها، رخ داده است. به‌عنوان نمونه، تعداد لکه‌های خورشیدی که در دوره اوج به ۲۰۸۵ مورد رسیده بود، تا سال ۲۰۰۷ به ۱۵۷ مورد کاهش یافت. هم‌زمان با این افت شدید فعالیت خورشیدی، در سال یادشده افزایش قابل‌ملاحظه‌ای در فراوانی رخداد تندرهای مشاهده شد، به‌طوری‌که ۲۸۸ مورد گزارش ثبت گردید.

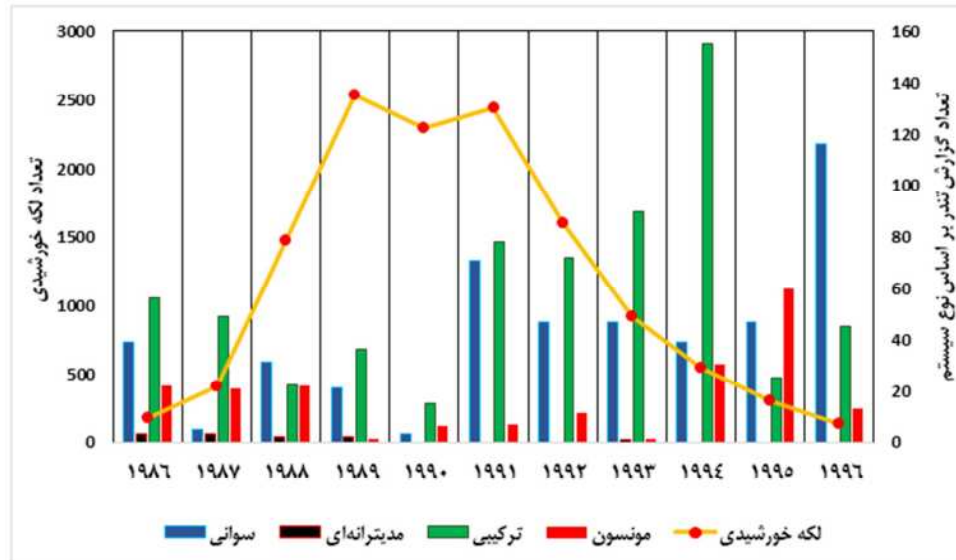


شکل ۲: روند تغییرات فراوانی طوفان تندری طی بازه زمانی ۱۹۸۶ تا ۲۰۱۸ و تعداد لکه‌های خورشیدی (سه چرخه خورشیدی ۲۲، ۲۳، ۲۴)

فراوانی رخداد طوفان‌های تندری براساس سامانه‌ها و الگوهای همدیدی موثر در چرخه خورشیدی ۲۲

بر اساس داده‌های ارائه‌شده در شکل ۳ و با درنظرگرفتن موقعیت جغرافیایی منطقه‌ی مورد مطالعه، چهار الگوی همدیدی غالب شامل سامانه‌های مونسونی، سودانی، مدیترانه‌ای و ترکیبی سودانی - مدیترانه‌ای جنوب‌غرب کشور را تحت تأثیر قرار می‌دهند. بااین‌حال، شدت و فراوانی هر یک از این الگوها در طول سال‌های مختلف ثابت نبوده و به‌عنوان تابعی از تغییرات اقلیمی و نوسانات در گردش عمومی جو قابل‌تبیین هستند. تحلیل توزیع فراوانی این سامانه‌ها نشان می‌دهد که الگوهای ترکیبی سودانی - مدیترانه‌ای به‌دلیل سازگاری با عرض جغرافیایی منطقه و نیز بهره‌مندی از منابع رطوبتی گرمسیری، بیشترین اثرگذاری را بر منطقه دارند. پس از آن، سامانه‌های سودانی نقش قابل‌توجهی ایفا کرده و سامانه‌های مونسونی در رتبه‌ی بعدی قرار می‌گیرند. ازسوی‌دیگر، با توجه به استقرار منطقه در عرض‌های جغرافیایی میانی، نفوذ مستقل سامانه‌های مدیترانه‌ای به این ناحیه محدود بوده و معمولاً این سامانه‌ها به‌صورت ترکیبی و هم‌زمان با سامانه‌های سودانی در منطقه فعال می‌شوند. در میان سال‌های بررسی‌شده، بیشینه‌ی فعالیت خورشیدی و تعداد لکه‌های خورشیدی در بازه‌ی ۱۹۸۹ تا ۱۹۹۱ ثبت شده است. هم‌زمان با این اوج خورشیدی، کاهش فراوانی سامانه‌های سودانی و سامانه‌های ترکیبی سودانی - مدیترانه‌ای مشاهده می‌شود که می‌تواند گویای تأثیرپذیری سامانه‌های همدیدی منطقه از تغییرات ناشی از افزایش تابش خورشیدی باشد. در مقابل، در سال‌های پایانی چرخه‌ی ۲۲ که با کاهش تعداد لکه‌های خورشیدی همراه است، افزایشی در فراوانی سامانه‌های همدیدی به‌ویژه سامانه‌های سودانی و ترکیبی مشاهده شده است. به‌عبارت دیگر، افزایش تابش خورشیدی و

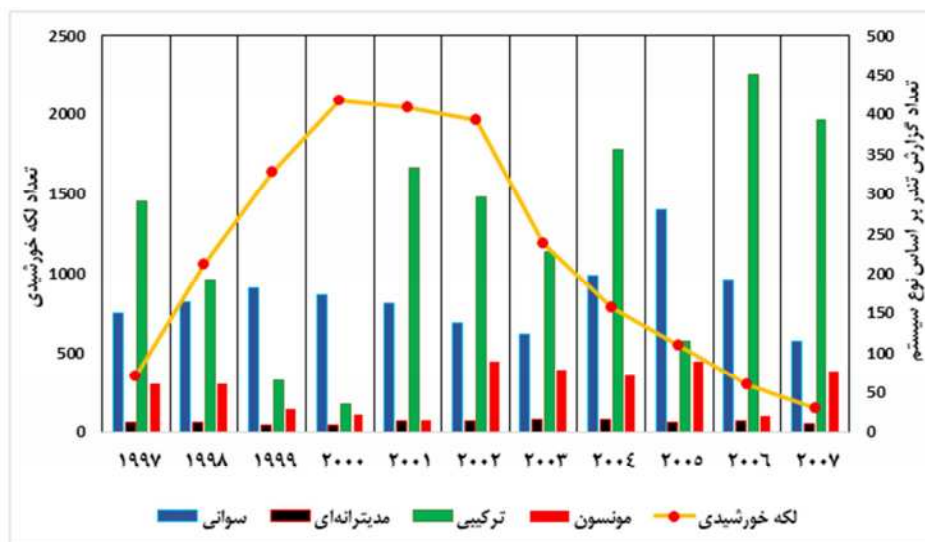
پیامدهای آن بر الگوی گردش عمومی جو می‌تواند زمینه‌ساز تضعیف فعالیت سامانه‌های گرمسیری، به‌ویژه سودانی‌ها و در نتیجه کاهش فراوانی و دامنه‌ی نفوذ آن‌ها باشد.



شکل ۳: فراوانی رخداد و تعداد گزارشات تندر جنوب غرب براساس الگوهای همدید موثر و تعداد لکه خورشیدی در چرخه ۲۲ (۱۹۸۶-۱۹۹۶)

فراوانی رخداد طوفان‌های تندری براساس سامانه‌ها و الگوهای همدیدی موثر در چرخه خورشیدی ۲۳

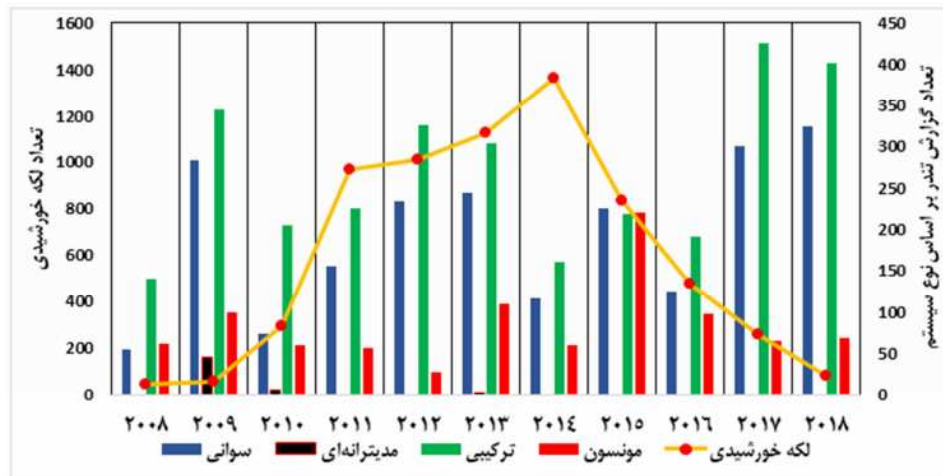
بر اساس اطلاعات ارائه‌شده در شکل ۴ و در چارچوب تحلیل‌های همدیدی مرتبط با چرخه خورشیدی شماره ۲۳، مشخص می‌شود که سامانه‌های ترکیبی سودانی - مدیترانه‌ای بیشترین تأثیرگذاری را بر نواحی جنوب‌غربی کشور طی این دوره داشته‌اند. در رتبه‌ی دوم، سامانه‌های سودانی با اختلافی اندک ایفای نقش کرده‌اند و پس از آن، الگوهای مونسونی در جایگاه سوم قرار دارند. این توزیع فراوانی، بیانگر آن است که سامانه‌های سودانی و ترکیبی، به‌دلیل سازگاری با شرایط دینامیکی و ترمودینامیکی منطقه، از انسجام و نفوذپذیری بالاتری برخوردار بوده‌اند. درحالی‌که سامانه‌های مدیترانه‌ای، به‌دلیل موقعیت جغرافیایی منطقه‌ی مورد مطالعه که در عرض‌های پایین‌تری نسبت به نواحی شمالی‌تر واقع شده است، کمتر قادر به نفوذ مستقل در منطقه بوده و بیشتر در قالب الگوهای ترکیبی با سامانه‌های سودانی فعال شده‌اند. تحلیل هم‌زمان تغییرات تعداد لکه‌های خورشیدی با فراوانی سامانه‌های جوی نشان می‌دهد که با کاهش تعداد لکه‌های خورشیدی در سال‌های پایانی چرخه که نمایانگر کاهش فعالیت خورشیدی است، شدت و فراوانی سامانه‌های جوی وابسته به منابع انرژی خورشیدی افزایش یافته است. به‌طور مشخص، در چرخه‌ی بیست‌وسوم خورشیدی (۱۹۹۷-۲۰۰۷)، تعداد لکه‌ها در آغاز چرخه (۱۹۹۷) در پایین‌ترین سطح قرار داشته و در فاصله‌ی زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۲ به اوج خود رسیده است. با این حال، برخلاف انتظار مبتنی بر رابطه‌ی معکوس میان فعالیت خورشیدی و فراوانی سامانه‌ها، در همین دوره‌ی اوج خورشیدی، افزایشی در فراوانی سامانه‌های ترکیبی سودانی - مدیترانه‌ای مشاهده شده است.



شکل ۴: فراوانی رخداد و تعداد گزارشات تندر جنوب غرب براساس الگوهای همدید موثر و تعداد لکه خورشیدی در چرخه ۲۳ (۱۹۹۷-۲۰۰۷)

فراوانی رخداد طوفان‌های تندری براساس سامانه‌ها و الگوهای همدیدی موثر در چرخه ۲۴ خورشیدی

در شکل ۵، تأثیرات تغییرات همدیدی در طی چرخه ۲۴ خورشیدی بر منطقه مورد مطالعه نمایش داده شده است. در این دوره، سامانه‌های ترکیبی سودانی - مدیترانه‌ای همچنان بالاترین میزان نفوذ را در جنوب منطقه دارند. سامانه‌های مدیترانه‌ای در عمده سال‌ها، پایین‌ترین فراوانی را به خود اختصاص داده‌اند. تعداد لکه‌های خورشیدی در این چرخه از حدود مقادیر پایین در ابتدای دوره (۲۰۰۸-۲۰۱۰) به اوج خود در بازه ۲۰۱۳-۲۰۱۴ می‌رسد و پس از آن، روندی برگشتی تا سال ۲۰۱۸ را تجربه می‌کند. روند تغییرات لکه‌های خورشیدی هرچند می‌تواند با تغییراتی در شدت و فراوانی فعالیت سامانه‌های همدیدی مرتبط باشد، اما این ارتباط همواره رابطه‌ای مستقیم و یکنواخت نمی‌باشد. در واقع ارتباطات غیرمستقیم بین تغییرات خورشیدی و فراوانی سامانه‌ها، بیانگر پیچیدگی‌های دوجانبه‌ای است که از هم‌تأثیرگذاری تابش خورشیدی، برهم‌کنش با ویژگی‌های جغرافیایی منطقه و تغییرات اقلیمی در مقیاس بزرگ‌مقیاس حاصل می‌شود. باین‌حال، باید توجه داشت که علاوه بر چرخه‌های خورشیدی، عوامل متعددی نیز می‌توانند در شکل‌گیری و تغییرات فراوانی طوفان‌های تندری نقش داشته باشند که بررسی هم‌زمان آن‌ها برای دستیابی به تحلیل دقیق‌تر ضروری است.



شکل ۵: فراوانی رخداد و تعداد گزارشات تندر جنوب غرب براساس الگوهای همدید مؤثر و تعداد لکه خورشیدی در چرخه ۲۴ (۲۰۱۸-۲۰۰۸)

تحلیل همدیدی الگوهای پرتکرار در ایجاد طوفان‌های تندری جنوب غرب ایران

در این بخش از پژوهش، الگوهای همدیدی مؤثر در شکل‌گیری طوفان‌های تندری در نواحی جنوب غربی ایران مورد بررسی قرار گرفته‌اند. تحلیل انجام‌شده بر روی ۱۷۸ سامانه منجر به طوفان تندری طی بازه زمانی سه چرخه خورشیدی اخیر (سیکل‌های ۲۲، ۲۳ و ۲۴، معادل سال‌های ۱۹۸۶ تا ۲۰۱۸)، نشان می‌دهد که طوفان‌های تندری در این منطقه بیشتر از سه الگوی همدیدی مشخص تبعیت می‌کنند. این الگوها بر پایه ویژگی‌های سامانه‌های چرخندی تأثیرگذار و نحوه استقرار آن‌ها در منطقه استخراج شده‌اند. بر اساس نتایج حاصل، سه نوع سامانه‌ی عمده در تکوین طوفان‌های تندری شناسایی شدند که شامل سامانه‌ی کم‌فشار سودانی، سامانه‌ی کم‌فشار مونسونی و الگوی ترکیبی حاصل از ادغام سامانه‌ی سودانی با سیکلون‌های مدیترانه‌ای است. در این میان، دو الگوی نخست یعنی سامانه‌ی سودانی و الگوی ترکیبی سودانی - مدیترانه‌ای، از بیشترین فراوانی در میان سامانه‌های بررسی‌شده برخوردار بوده‌اند. به نظر می‌رسد حضور هم‌زمان رطوبت گرمسیری، ناپایداری همرفتی و ویژگی‌های دینامیکی ناشی از ادغام این سامانه‌ها، زمینه‌ساز بیشترین رخدادهای تندری در منطقه شده است. این موضوع اهمیت نقش سامانه‌های سودانی (چه به صورت مستقل و چه در قالب تعامل با الگوهای مدیترانه‌ای) را در تحریک و توسعه‌ی شرایط همرفتی مؤثر بر طوفان‌های تندری در جنوب غرب ایران برجسته می‌سازد.

تحلیل سه نمودار مربوط به سه چرخه خورشیدی که در آن‌ها فراوانی الگوهای همدیدی با تعداد لکه‌های خورشیدی مقایسه شده است، دو نتیجه کلیدی را آشکار می‌سازد. نخست، در هر سه چرخه، تعداد سامانه‌های همراه با طوفان تندری در نیمه نخست چرخه (پنج سال ابتدایی)، به‌ویژه در سال‌های نزدیک به اوج فعالیت لکه‌های خورشیدی، کاهش معناداری را نشان می‌دهد؛ در مقابل، در نیمه دوم چرخه (پنج سال پایانی) این فراوانی به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافته است. دوم، سهم چشمگیر سامانه‌های ترکیبی در میان سایر الگوهای همدیدی حاکی از نقش برجسته آن‌ها در بروز این پدیده‌هاست. به‌طور خاص، شکل‌گیری یک طوفان تندری نیازمند وجود رطوبت فراوان انتقال‌یافته به درون سامانه سودانی و جابه‌جایی این رطوبت به سمت شمال است. هم‌زمان، ادغام سامانه مدیترانه‌ای با این ساختار، انرژی دینامیکی لازم برای تشدید جریانات صعودی و در نهایت تکوین طوفان‌های تندری را فراهم می‌سازد.

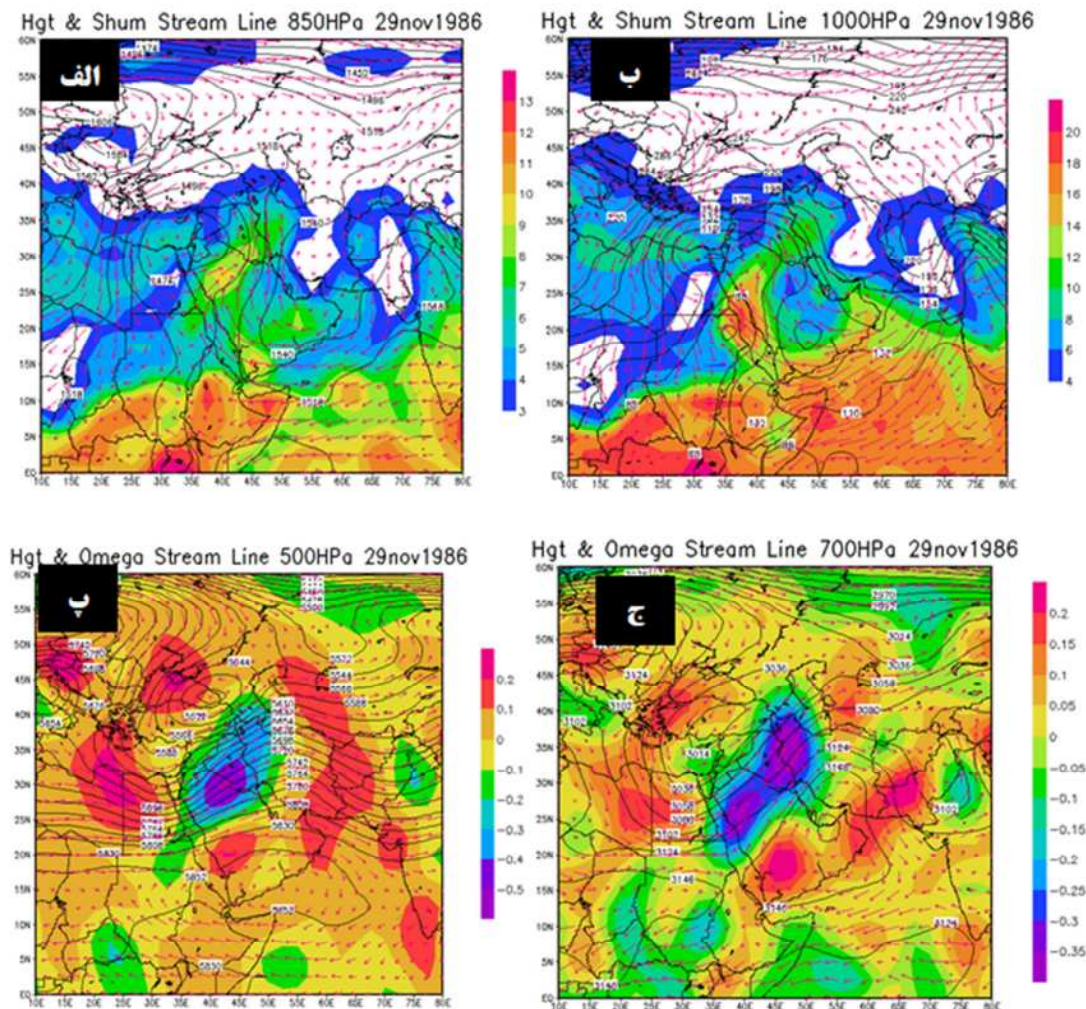
الگوی کم‌فشار سودانی (الگوی نماینده سامانه ۲۹ نوامبر ۱۹۸۶)

شکل ۶ - الف، نحوه‌ی آرایش و استقرار سامانه‌های جوی مؤثر بر شکل‌گیری یکی از رخداد‌های قوی طوفان تندری در نواحی جنوب‌غربی ایران را نشان می‌دهد. در این روز پدیده‌ی تندر و رعد و برق در بازه‌ی زمانی دو نوبت دیده‌بانی و در پنج ایستگاه از ایستگاه‌های منتخب منطقه ثبت شده است. بیشترین تعداد وقوع تندر از ایستگاه دزفول گزارش شده که بیانگر شدت ناپایداری همرفتی و تمرکز فعالیت سامانه‌ی عامل در این ناحیه بوده است. در این الگو سامانه‌های اصلی مؤثر در شکل‌گیری تندر بر روی منطقه در تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال (به‌عنوان نماینده تراز زیرین وردسپهر) کم‌فشار سودان و زبانه توسعه‌یافته آن بر روی خلیج فارس و منطقه جنوب غرب و غرب ایران می‌باشد. تندباد‌های ایجاد‌شده بر روی دریاهای عمان و عرب به‌وسیله مرکز واپرخندی عربستان، در گردشی واپرخندی رطوبت این دریاهای گرم را در دو بخش به درون سامانه‌های کم‌فشاری مستقر بر روی سودان و زبانه شمالی آن بر روی عربستان فرارفت نموده است. تندی این بادها بر روی دریاهای عرب و عمان و در ادامه بر روی تمام پهنه شبه-جزیره عربستان به بیش از ۲۰ نات بر ثانیه می‌رسد. این تندی بیانگر شیو فشاری و ژئوپتانسیلی شدید بر روی منطقه می‌باشد. همان‌طورکه در نقشه مشهود است، بخشی از رطوبت ورودی به منطقه از طریق جریانات شرقی - جنوب‌شرقی بر روی سواحل شرقی شبه‌جزیره عربستان فرارفت شده و بخش دیگری نیز به واسطه جریانات شرقی به درون خلیج عدن و در ادامه به درون منطقه همگرایی ایجاد‌شده بر روی دریای سرخ فرارفت شده است. میدان‌های رطوبتی شکل‌گرفته بر روی این دو منطقه حاصل فرارفت رطوبتی از طریق این جریان واپرخندی می‌باشد. به‌طوری-که مقادیر نم ویژه بر روی منطقه همگرایی دریای سرخ به بیش از ۱۸ تا ۲۲ گرم بر کیلوگرم و بر روی استان خوزستان به بیش از ۱۰ تا ۱۴ گرم بر کیلو گرم رسیده است. این مقدار نم ویژه در لایه زیرین وردسپهر انرژی ترمودینامیکی لازم برای شکل‌گیری جریانات همرفتی قوی و در نهایت طوفان‌های تندری فراهم شده است.

شکل شماره ۶ - ب، شرایط همدیدی حاکم در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال یا حد بالایی لایه مرزی را در این روز نشان می‌دهد. در این تراز با دور شدن از واداشتهای سطحی سامانه‌های با ماهیت دینامیکی تقویت است. در انطباق با الگوی تراز زیرین، همچنان زبانه‌ای با راستای شمالی - جنوبی پس از عبور از نیمه شرقی ایران بر روی آب‌های گرم دریاهای عمان و عرب گسترش یافته و تا خلیج عدن امتداد می‌یابد. همچنان تندباد‌های حاکم بر روی این دریاها رطوبت قابل‌توجهی را در گردشی واپرخند به جلو زبانه کم‌فشار سودانی فرارفت می‌نماید. میدان رطوبتی شکل‌گرفته بر روی شبه‌جزیره عربستان حاصل این گردش واپرخندی است. این رطوبت در امتداد جریانات جلو ناوه بر روی بخش جنوب غربی ایران فرارفت شده است.

شکل شماره ۶ - پ، نقشه ترکیبی بردار باد و جریانات بالاسوی حاکم در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال را بر روی منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد. انرژی ترمودینامیکی ایجاد‌شده در ترازهای زیرین وردسپهر نیازمند جریانات بالاسوی قوی می‌باشد تا بتواند جریانات همرفتی ایجادکننده تندر را تقویت نماید. همان‌طورکه مشاهده می‌شود، میدانی از امگای منفی گسترده با راستایی جنوب غربی - شمال شرقی از دریای سرخ تا جنوب غرب ایران شکل گرفته است. میدانی از امگای منفی با بزرگای منفی ۰,۳۵ پاسکال بر ثانیه بر روی منطقه مطالعاتی ایجاد شده است که بیانگر حاکمیت جریانات بالاسوی قوی در این منطقه است. این جریانات بالاسوی قوی شرایط ایجاد تندرهای قوی را بر روی منطقه فراهم نموده است. شکل شماره ۶ - ج، شرایط همدیدی حاکم در تراز میانی وردسپهر (تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال) را نمایش می‌دهد. در انطباق با جریانات بالاسوی قوی حاکم در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال در تراز میانی

نیز ناوه عمیقی در شرق مدیترانه که دامنه آن در امتداد جنوبی تا جنوب عربستان و دریای سرخ و دامنه شرقی آن تا نیمه غربی ایران را در بر می‌گیرد، تکوین پیدا کرده است. در یال شرقی ناوه میدانی با امگای منفی با بزرگای منفی ۰.۵ پاسکال بر ثانیه بر روی جنوب غرب ایران تکوین پیدا کرده است. به این ترتیب در ضخامت قابل‌توجهی از وردسپهر جریانات بالاسوی قوی شرایط همرفتی قوی را برای شکل‌گیری تندرهای قوی بر روی بخش جنوب غربی ایران فراهم نموده است.



شکل ۶: الف: نقشه ارتفاع ژئوپتانسیل (کنتور) میدان باد و نم و یژه (سایه‌های رنگی) تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال ب: نقشه ارتفاع ژئوپتانسیل (کنتور) میدان باد و نم و یژه (سایه‌های رنگی) تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال ب: نقشه ارتفاع ژئوپتانسیل (کنتور) میدان باد و نم و یژه (سایه‌های رنگی) تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال پ: نقشه ارتفاع ژئوپتانسیل (کنتور) میدان باد و امگا (سایه‌های رنگی) تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال ج: نقشه ارتفاع ژئوپتانسیل (کنتور) میدان باد و امگا (سایه‌های رنگی) تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال

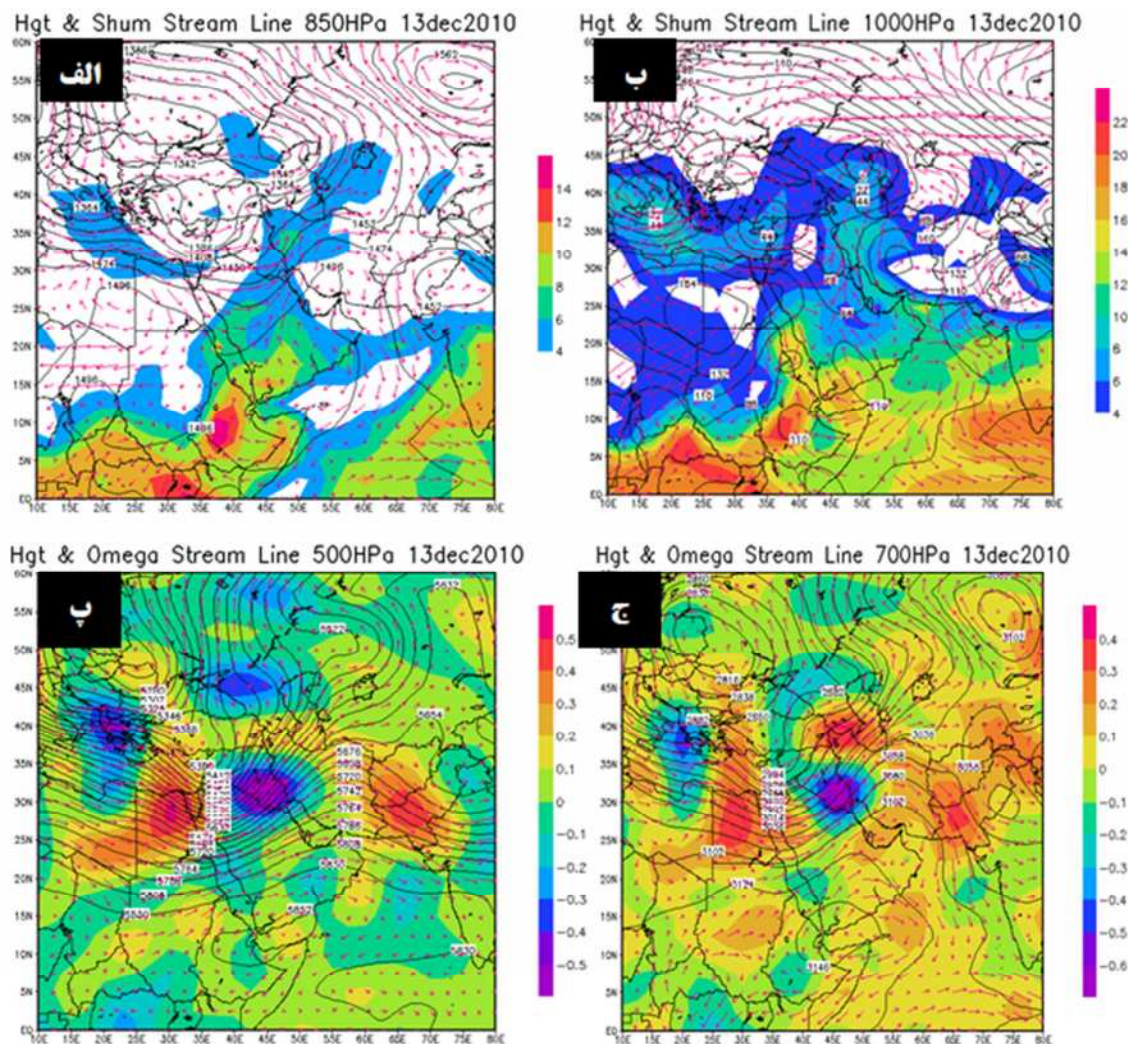
الگوی ترکیبی سودانی - مدیترانه‌ای (الگوی نماینده سامانه ۱۰ دسامبر ۲۰۱۰)

شکل ۷ - الف، الگوی استقرار سامانه‌های جوی مؤثر در شکل‌گیری یکی دیگر از رخداد‌های شدید طوفان تندری در جنوب‌غربی ایران را نمایش می‌دهد. طی این روز، پدیده‌ی تندر و رعدوبرق طی سه نوبت دیده‌بانی در سیزده ایستگاه از ایستگاه‌های منتخب منطقه ثبت شده است. بیشترین تعداد وقوع تندر از سوی ایستگاه کوه‌رنگ گزارش شده است.

در این الگو، سامانه جوی اصلی مؤثر در شکل‌گیری پدیده‌ی تندری در تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال به‌عنوان نماینده‌ی لایه‌ی زیرین وردسپهر، سیکلون مدیترانه‌ای می‌باشد. ولی همان‌طور که مشاهده می‌شود، آرایش همدیدی سامانه‌های مؤثر به گونه‌ای است که رطوبت مورد نیاز سامانه از دریا‌های گرم جنوبی تامین شده است. در این روز مرکز و اچرخندی در امتداد زبانه پرفشار سیبری با پربند ۱۳۲ ژئوپتانسیل متر در مرکز ایران بسته شده است. گردش و اچرخندی ایجاد شده به‌وسیله این مرکز و اچرخندی سبب فرارفت رطوبت دریای عمان و خلیج فارس بر روی جنوب غرب ایران در تراز زیرین وردسپهر را فراهم نموده است. تندبادهای ایجاد شده بر روی دریا‌های عمان در اطراف مرکز و اچرخندی عربستان که هم اکنون بر روی شرق خلیج عدن استقرار دارد، در گردشی و اچرخندی رطوبت دریا‌های گرم عرب و عمان را بر روی شبه‌جزیره عربستان فرارفت نموده است.

شکل شماره ۷ - ب، شرایط همدیدی حاکم در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال را در این روز نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در این تراز با دور شدن از واداشتهای سطحی سامانه‌ها با ماهیت دینامیکی تقویت شده و ناوه عمیقی با راستای شمالی - جنوبی تمام پهنه غربی ایران تا جنوب شبه‌جزیره عربستان را فرا گرفته است. در نتیجه، جریان‌ات جنوب - جنوب غربی جلو ناوه رطوبت انباشته شده بر روی شبه‌جزیره عربستان را در لایه زیرین وردسپهر بر روی منطقه فرارفت شده بود، بر روی منطقه جنوب غرب و غرب ایران فرارفت نموده است.

شکل شماره ۷- پ و ج، نقشه ترکیبی بردار باد و جریان‌ات بالاسوی حاکم بر روی منطقه مورد مطالعه را در تراز ۷۰۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال نشان می‌دهد. در ترازهای بالایی به دلیل فرارت سرد عرض‌های جنب قطبی از طریق جریان‌ات شمالی پشت ناوه و فرارت هوای گرم و مرطوب از عرض‌های جنوبی در جلو ناوه و ترمودینامیک قوی حاصل از آن ناوه شرق مدیترانه بیش از پیش تقویت شده است. به‌طوری که دامنه جنوبی ناوه تا جنوب دریای سرخ گسترش یافته است. فرارفت رطوبتی قوی در ترازهای زیرین و میانی جو و تامین انرژی ترمودینامیکی قوی برای ایجاد جریان‌ات همرفتی در جنوب غرب و غرب ایران، میدان امگای منفی قوی در ترازهای ۷۰۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال فراهم شده است. این نشان‌دهنده شکل‌گیری جریان‌ات همرفتی قوی و در نهایت طوفان‌های تندری بر روی منطقه است. بزرگای مقادیر امگای منفی در هر دو تراز به بیش از منفی ۰٫۵ پاسکال بر ثانیه افزایش یافته است که برای ایجاد تندرها رعد و برق قوی انرژی مناسبی می‌باشد.



شکل ۷: الف: نقشه ارتفاع ژئوپتانسیل (کنتور) میدان باد و نم و بزه (سایه‌های رنگی) تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال ب: نقشه ارتفاع ژئوپتانسیل (کنتور) میدان باد و نم و بزه (سایه‌های رنگی) تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال ب: نقشه ارتفاع ژئوپتانسیل (کنتور) میدان باد و نم و بزه (سایه‌های رنگی) تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال ب: نقشه ارتفاع ژئوپتانسیل (کنتور) میدان باد و امگا (سایه‌های رنگی) تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال ج: نقشه ارتفاع ژئوپتانسیل (کنتور) میدان باد و امگا (سایه‌های رنگی) تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال

نتیجه‌گیری

مخاطرات طبیعی، سالانه جان هزاران نفر را در سراسر جهان تهدید می‌کنند و بخش قابل‌توجهی از این تلفات ناشی از پدیده‌های اقلیمی است. در این میان، طوفان‌های تندری به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مخاطرات جوی، نقش چشمگیری در ایجاد خسارت‌های گسترده به زیرساخت‌های حمل‌ونقل هوایی، زمینی و دریایی دارند. جنوب‌غرب ایران، به‌دلیل ساختار توپوگرافی ویژه، تأثیرپذیری از سامانه‌های جوی با منشاء حاره‌ای و دسترسی به منابع عظیم رطوبتی ناشی از دریاهای گرم جنوبی، از استعداد بالایی برای شکل‌گیری این پدیده برخوردار است. این پژوهش با هدف بررسی پیوندهای میان‌مقیاسی بین چرخه‌های خورشیدی و الگوهای همدیدی مؤثر بر پتانسیل تندری در این

منطقه انجام شد. یافته‌ها نشان می‌دهد که نوسانات فعالیت خورشیدی، به‌ویژه تغییرات در تعداد لکه‌های خورشیدی طی چرخه‌های ۲۲ تا ۲۴، با تغییرپذیری زمانی طوفان‌های تندری ارتباط آشکاری دارند. تحلیل‌ها حاکی از آن است که بیشینه وقوع این پدیده‌ها بیشتر در سال‌های پایانی هر چرخه و هم‌زمان با کمینه‌های خورشیدی رخ داده است؛ الگویی که در چرخه‌های ۲۲ و ۲۳ به وضوح مشاهده و در چرخه ۲۴ نیز با وجود کاهش کلی فعالیت خورشیدی تکرار شد. از دیدگاه همدیدی، نتایج نشان داد سامانه‌های ترکیبی سودانی - مدیترانه‌ای و سامانه‌های سودانی، به دلیل انطباق با ویژگی‌های جغرافیایی منطقه، بیشترین نقش را در شکل‌گیری طوفان‌های تندری ایفا می‌کنند، درحالی‌که نقش سامانه‌های مونسونی محدود بوده و سامانه‌های مدیترانه‌ای بیشتر به صورت ترکیبی با سایر الگوها ظاهر شده‌اند. مقایسه چرخه‌های خورشیدی با فراوانی این سامانه‌ها، بیانگر کاهش فعالیت سامانه‌های گرمسیری در دوره‌های اوج خورشیدی و افزایش آن‌ها در کمینه‌های خورشیدی است. این الگوها مؤید آن است که تابش خورشیدی از طریق سازوکارهای غیرمستقیم و چندوجهی، بر گردش عمومی جو و سامانه‌های اقلیمی اثر می‌گذارد و می‌تواند با تعدیل ساختارهای دینامیکی و ترمودینامیکی جو، در بروز و فراوانی پدیده‌های همرفتی نقش‌آفرینی کند. در نتیجه، ادغام شاخص‌های خورشیدی در مدل‌های اقلیمی و پیش‌بینی‌های میان‌مدت و بلندمدت پدیده‌های حدی، می‌تواند موجب ارتقاء دقت سامانه‌های هشدار زودهنگام و بهبود تصمیم‌گیری در مدیریت مخاطرات اقلیمی در مناطق نیمه‌خشک و آسیب‌پذیر شود.

تحلیل‌های همدیدی و ترمودینامیکی مرتبط با رخداد‌های ۲۹ نوامبر ۱۹۸۶ و ۱۳ دسامبر ۲۰۱۰ نشان می‌دهد که طوفان‌های تندری شدید در جنوب غرب ایران در نتیجه تعامل پیچیده سامانه کم‌فشار مدیترانه‌ای در تراز میانی و پرفشار عربستان در ترازهای پایین شکل گرفته‌اند. این برهم‌کنش موجب انتقال رطوبت مؤثر، افزایش ناپایداری جو و تقویت صعود همرفتی شده و زمینه‌ساز وقوع این طوفان‌ها شده است. این یافته‌ها با نتایج فلک و همکاران (۱۴۰۰) در زمینه تحلیل ترمودینامیکی طوفان‌های تندری جنوب کشور هم‌راستا بوده و اهمیت شناسایی الگوهای ترکیبی جوی را در پیش‌بینی دقیق‌تر چنین پدیده‌هایی برجسته می‌سازد.

در تاریخ ۱۳ دسامبر ۲۰۱۰، تحلیل‌های همدیدی و ترمودینامیکی نشان داد که شکل‌گیری و تقویت طوفان‌های تندری در جنوب غرب ایران تحت تأثیر هم‌زمان سه سامانه عمده شامل پرفشار سیری، کم‌فشار سودانی و سیکلون مدیترانه‌ای رخ داده است. این سامانه‌ها با برقراری جریان‌های واچرخندی در ترازهای پایین، نقش مهمی در انتقال رطوبت از دریای عرب و دریای عمان به عرض‌های بالاتر ایفا کرده و موجب فراهم شدن انرژی ناپایدارساز مورد نیاز برای توسعه همرفت عمیق شدند. مطابق با نتایج ایران‌پور و همکاران (۱۳۹۴)، ورود هوای سرد به لایه‌های میانی جو، در کنار نفوذ جریان‌های گرم و مرطوب از جنوب، به تشدید فرآیندهای صعودی و افزایش ناپایداری ترمودینامیکی منجر شده است. علاوه بر این، در ترازهای میانی وردسپهر (۷۰۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال)، وجود جریانات قوی بالارونده، ناوهای عمیق در شرق مدیترانه و جنوب شبه‌جزیره عربستان، به همراه میدان‌های امگای منفی، محیط مناسبی برای رشد ابرهای کومولونیمبوس و وقوع طوفان‌های تندری فراهم کرده است. این تحلیل‌ها با یافته‌های گرامی و همکاران (۱۴۰۱) نیز هم‌راستا بوده و تأییدکننده نقش هم‌زمان سامانه‌های دینامیکی و شرایط ترمودینامیکی در تقویت این پدیده‌ها هستند.

در تاریخ ۲۹ نوامبر ۱۹۸۶، شکل‌گیری و گسترش سامانه کم‌فشار سودانی، نقش تعیین‌کننده‌ای در وقوع طوفان‌های تندری شدید در جنوب غرب ایران ایفا کرد. این سامانه که در ابتدا بر فراز شبه‌جزیره عربستان توسعه یافت، با حرکت

به سوی عرض‌های بالاتر، به‌ویژه مناطق جنوبی ایران، شرایط دینامیکی و ترمودینامیکی مساعدی برای رشد ناپایداری‌های همرفتی فراهم آورد. در تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال، ساختار چرخندی سامانه با دو تا سه کنتور بسته در نواحی ریاض و جنوب خلیج فارس مستقر شده بود که در ادامه، استان‌های بوشهر، فارس، چهارمحال و بختیاری و جنوب خوزستان را تحت تأثیر قرار داد. برخورد زبانه‌های کم‌فشار سودانی با زبانه‌های پرفشار سیبری، منجر به انتقال مؤثر رطوبت از دریای عرب و دریای عمان به درون سامانه شد، به‌گونه‌ای که همگرایی حاصل از این تقابل، با یافته‌های خوش‌اخلاق و ماهوتچی (۱۳۹۸) و شمسی‌پور و همکاران (۱۳۹۷) هم‌راستا ارزیابی می‌شود. در لایه‌های میانی و بالایی وردسپهر، حضور سامانه‌های چرخندی عمیق، همراه با جریان‌های بالاسو و میدان‌های گسترده امگا و همچنین افزایش سرعت باد، موجب تقویت فرایند فرارفت رطوبت و تأمین انرژی بالقوه مورد نیاز برای توسعه طوفان‌های تندری شد. این شرایط درنهایت به شکل‌گیری طوفان‌های شدید و وقوع گسترده پدیده رعد و برق در مناطق جنوبی ایران انجامید.

منابع

- ایران پور، فخرالدین؛ یزدان‌پناه، حجت‌اله؛ حنفی، علی. (۱۳۹۴). تحلیل همدیدی و ترمودینامیکی طوفان‌های تندری در ایستگاه‌های هواشناسی همدان. جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۴(۱)، صص: ۱۱۵-۱۳۱. doi: 10.22067/geo.v4i1.27949
- برنا، رضا. (۱۳۹۷). بررسی آماری - همدیدی طوفان‌های تندری استان خوزستان. آمایش فضا و ژئوماتیک، ۲۲(۳)، ۲۵-۱. <http://hsmmp.modares.ac.ir/article-21-16524-fa.html>
- شمسی پور، علی اکبر؛ کاکي، سيف‌اله؛ جاسمی، سیدمیثم؛ جعفری، ایوب. (۱۳۹۷). واکاوی همدیدی- ترمودینامیکی بارش‌های سنگین غرب و جنوب غرب ایران (مطالعه موردی ۱۲ تا ۱۵ آوریل ۲۰۱۶). جغرافیا و برنامه‌ریزی، ۲۲(۶۴)، صص: ۱۴۹-۱۶۷.
- خوش‌اخلاق، فرامرز؛ ماهوتچی، محمدحسن. (۱۳۹۸). واکاوی همدیدی بارش‌های تندری مخرب مشهد. علوم و تکنولوژی محیط زیست، ۲۱(۱۲)، صص: ۲۳۵-۲۴۹. <https://sanad.iau.ir/Journal/jest/Article/837359>
- دانانیانی، پوپک؛ سوره، احسان؛ محمدی، بختیار. (۱۴۰۲). بررسی طوفان‌های تندری در ایران. تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، ۱۰(۲)، ۱۱۴-۹۲. <http://jsaeh.khu.ac.ir/article-1-3418-fa.html>
- علیچانی، بهلول. (۱۳۸۲). آب‌وهوای ایران، انتشارات دانشگاه پیام نور، چاپ پنجم.
- عزیزی، قاسم؛ گرامی، محمدصالح؛ شریفی، لیلا. (۱۳۹۶). تحلیل فضایی طوفان‌های تندری در گستره کشور ایران. نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، ۱۷(۴۷)، صص: ۲۴۳-۲۵۹. <http://jgs.khu.ac.ir/article-1-2914-fa.html>
- قویدل رحیمی یوسف، باغبانان پرستو، فرج‌زاده اصل منوچهر. (۱۳۹۳). تحلیل فضایی مخاطره‌ی طوفان‌های تندری بهاره‌ی ایران. تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، ۱(۳)، صص: ۵۹-۷۰. <http://jsaeh.khu.ac.ir/article-1-2348-fa.html>
- فدایی‌باش، علیرضا. (۱۴۰۳). تحلیل همدیدی و ترمودینامیکی طوفان‌های تندری در جنوب و جنوب غرب ایران در ۳ دهه اخیر (۱۹۸۶-۲۰۱۸). پایان‌نامه کارشناسی ارشد، استاد راهنما حسن لشکری، رشته آب‌وهواشناسی سینوپتیک، دانشگاه شهید بهشتی.
- فرجی، عبدالله؛ دوستکامیان، مهدی؛ صفری، زهرا. (۱۳۹۴). واکاوی همدیدی الگوهای زمانی و مکانی بارش‌های تندری (مطالعه موردی: استان زنجان)، جغرافیا و مطالعات محیطی، ۴(۱۴)، صص: ۴۶-۴۱.
- فلک، عسل؛ برنا، رضا؛ اسدیان، فریده. (۱۴۰۰). بررسی ترمودینامیک طوفان‌های تندری در جنوب غربی ایران. تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی (علوم جغرافیایی)، ۲۱(۶۲)، صص: ۴۳۵-۴۵۷. <http://jgs.khu.ac.ir/article-1-3615-fa.html>
- گرامی، محمدصالح؛ کریمی، مصطفی؛ عزیزی، قاسم؛ رفعتی، سمیه. (۱۴۰۱). تحلیل همدیدی بارش‌های همراه با طوفان تندری فراگیر بهاره در شمال غرب ایران. پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۵۴(۱)، صص: ۹۵-۱۱۰. doi: 10.22059/jphgr.2022.334160.1007659

- لشکری، حسن؛ محمدی، زینب؛ ناجی، محمد؛ فدایی، باش، علیرضا. (۱۴۰۳). واکاوی پراکنش و تغییرات زمانی - مکانی طوفان‌های تندری در جنوب ایران در سه چرخه خورشیدی اخیر. پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۵۶(۴)، صص: ۸۹-۱۰۶. doi: 10.22059/jphgr.2025.387701.1007864
- لشکری، حسن؛ یارمرادی، زهرا؛ موسوی، حسن. (۱۳۹۵). تحلیل آماری و سینوپتیکی طوفان‌های تندری استان کهگیلویه و بویراحمد. فصلنامه جغرافیا و مطالعات محیطی، ۵(۱۸)، صص: ۱۵۱-۱۳۵.
- لشکری، حسن؛ جنتی، زهرا. (۱۳۹۱). تحلیل سینوپتیکی- دینامیکی طوفان‌های تندری در جنوب غرب کشور. فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی «سپهر»، ۲۱(۸۲)، صص: ۱۴-۲۱.
- لشکری حسن، جعفری مهناز. (۱۴۰۰). الگوهای همدید تعیین‌کننده مسیر حرکت سامانه‌های بارشی با منشاء سودانی. تحلیل فضایی مخاطرات محیطی. ۸(۱)، صص: ۷۸-۵۵. <http://jsaeh.khu.ac.ir/article-1-3104-fa.html>
- لشکری، حسن. (۱۳۸۲). مکانیسم تکوین - تقویت و توسعه مرکز کم فشار سودان و نقش آن بر روی بارش‌های جنوب و جنوب غرب ایران. پژوهش‌های جغرافیایی، ۳۵(۳).
- لشکری، حسن؛ آقاسی، نوشین. (۱۳۹۲). تحلیل سینوپتیکی طوفان‌های تندری تبریز در فاصله زمانی (۱۹۹۶-۲۰۰۵). جغرافیا و برنامه‌ریزی، ۱۷(۴۵)، صص: ۲۰۳-۲۳۴.
- مرکز آمار ایران. (۱۳۹۵). داده‌ها و اطلاعات آماری، برگرفته از: www.amar.org.ir
- معصوم‌پور سماکوش، جعفر؛ طاهری، فاطمه؛ کوشکی، سمیرا؛ تازارک، ماتیوز. (۱۴۰۱). تأثیر سامانه‌های سینوپتیکی بزرگ مقیاس بر وقوع فراگیر طوفان تندری غرب و شمال غرب ایران. پژوهش‌های اقلیم‌شناسی، ۱۴۰۱(۵۱)، صص: ۱۴۷-۱۶۲.
- معصوم‌پور سماکوش، جعفر؛ میری، مرتضی؛ رحیمی، مجتبی. (۱۳۹۵). واکاوی آماری - همدیدی طوفان‌های تندری سواحل جنوبی ایران. فیزیک زمین و فضا، ۴۲(۳)، صص: ۶۹۷-۷۰۸. doi: 10.22059/jesphys.2016.58912
- مجرد، فیروز؛ معصوم‌پور، جعفر؛ کوشکی، سمیرا؛ میری، مرتضی. (۱۳۹۸). تحلیل زمانی - مکانی طوفان‌های تندری در ایران. مجله آمایش جغرافیایی فضا، ۹(۳۲)، صص: ۲۱۳-۲۳۲. doi: 10.30488/gps.2019.91873
- محمدی، زینب؛ لشکری، حسن. (۱۳۹۷). نقش جابه‌جایی مکانی پرفشار عربستان و رودباد جنب‌حاره‌ای در الگوهای همدیدی و ترمودینامیکی ترسالی‌های شدید جنوب و جنوب غرب ایران. پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۵۰(۳)، صص: ۴۹۱-۵۰۹. doi: 10.22059/jphgr.2018.249422.1007165
- محمدی، فهیمه؛ لشکری، حسن. (۱۳۹۸). بررسی تغییرات بارش سامانه کم‌فشار سودان طی روند تاریخی در منطقه جنوب غرب ایران. پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۵۱(۲)، صص: ۳۷۳-۳۸۷. doi: 10.22059/jphgr.2019.272706.1007323
- محمدی، حسین؛ خزایی، مهدی؛ ماهوتچی، محمدحسن؛ عباسی، اسماعیل. (۱۳۹۵). تحلیل همدیدی طوفان‌های تندری مخرب اهواز. مدیریت مخاطرات محیطی، ۳(۲)، صص: ۱۵۵-۱۷۰. doi: 10.22059/jhsci.2016.60744
- Adekan, I. O. 1998. Spatio-temporal variations in thunderstorm rainfall over Nigeria. International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society, 18(11), 1273-1284. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0088\(199809\)18:11<1273::AID-JOC298>3.0.CO;2-4](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0088(199809)18:11<1273::AID-JOC298>3.0.CO;2-4)
- Barry, R. G., & Hall-McKim, E. A. 2014. Essentials of the Earth's climate system. Cambridge University Press.
- Dai, A. 2001. Global precipitation and thunderstorm frequencies. Part I: Seasonal and interannual variations. Journal of Climate, 14(6), 1092-1111. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2001\)014<1092:GPATFP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2001)014<1092:GPATFP>2.0.CO;2)
- Ibrahim, S. F., Hafez, N. K., El-Borie, M. A., Bishara, A. A., & El-Taher, A. M. (2025). NS Asymmetry and Periodicity of Solar Activity from Solar Cycles 21–24. Solar Physics, 300(3), 1-27. <https://doi.org/10.1007/s11207-025-02442-y>
- Loginov, V. F., Volchek, A. A., & Shpoka, I. N. (2010). Estimation of the role of various factors in the thunderstorm formation on the territory of Belarus. Russian Meteorology and Hydrology, 35, 175-181. <https://doi.org/10.3103/S1068373910030039>
- Pinto Jr, O., Pinto, I. R. C. A., & Ferro, M. A. S. (2013). A study of the long-term variability of thunderstorm days in southeast Brazil. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 118(11), 5231-5246. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50282>
- Pizzuti, A., Soula, S., Mlynarczyk, J., Bennett, A., & Fullekrug, M. (2020, March). Analysis of sprite events during small-scale winter thunderstorms in northern Europe. In EGU General Assembly Conference Abstracts (p. 20065).
- Taszarek, M., Allen, J. T., Groenemeijer, P., Edwards, R., Brooks, H. E., Chmielewski, V., & Enno, S. E. (2020). Severe convective storms across Europe and the United States. Part I: Climatology of lightning, large hail, severe wind, and tornadoes. Journal of Climate, 33(23), 10239-10261. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0345.1>

Tafferner, A., Forster, C., Hagen, M., Keil, C., Zinner, T., & Volkert, H. (2008). Development and propagation of severe thunderstorms in the Upper Danube catchment area: Towards an integrated nowcasting and forecasting system using real-time data and high-resolution simulations. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 101, 211-227.

<https://doi.org/10.1007/s00703-008-0322-7>

Galanaki, E., Lagouvardos, K., Kotroni, V., Flaounas, E., & Argiriou, A. (2018). Thunderstorm climatology in the Mediterranean using cloud-to-ground lightning observations. *Atmospheric Research*, 207, 136-144.

<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.03.004>.