

Desertification Assessment in Narmashir Region Using Desertification Degree Index (DDI)

Mehdi Feyzolahpour^{1*} 

1. **Corresponding Author**, Assistant Professor, Department of Geography, 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: 21 January 2025 Revised: 04 October 2025 Accepted: 15 October 2025 Published: 22 December 2026 Keywords: Tasseled Cap Transformation (TCT), albedo, NDVI, TCW-TCB, Narmashir.	Desertification is one of the most destructive environmental phenomena globally. Remote sensing data and techniques offer valuable information for desertification mapping and assessment. Desertification is a particularly grave environmental threat in Iran, especially in the southeastern parts of the country. This research was conducted to map the degree of desertification in the Narmashir region of Kerman province in 2023 using Landsat 8 satellite imagery. Initially, the Tasseled Cap Transformation (TCT) method was used to extract three indices: Tasseled Cap Brightness (TCB), Tasseled Cap Greenness (TCG), and Tasseled Cap Wetness (TCW). Next, the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and albedo were estimated. Subsequently, linear regression analysis was performed on the combinations of TCG-TCB, NDVI-albedo, and TCW-TCB. The results showed a strong negative correlation between TCW and TCB and a very weak correlation between NDVI and albedo. The highest positive correlation was observed between TCW and TCG. Based on the highest correlation values and the regression relationship between TCW and TCB, a Desertification Degree Index (DDI) was created for desertification grading. The DDI was divided into five desertification classes: very low, low, medium, high, and very high. Based on this, only of the studied area exhibited very high desertification intensity, and showed high desertification intensity. The overall accuracy of this index was found to be. Due to its simplicity and high capability, this method is highly effective for managing and protecting arid and semi-arid lands.
How to Cite: Feyzolahpour, M. (2026). Desertification Assessment in Narmashir Region Using Desertification Degree Index (DDI). <i>Journal of Natural Environmental Hazards</i>, 15 (50), 1-20.	
	© The Author/Authors Publisher: University of Sistan and Baluchestan
DOI: 10.22111/jneh.2025.52306.2118	

EXTENDED ABSTRACT

INTRODUCTION

Some researchers have established a link between desertification and an increase in surface albedo. Soils with a sand and light texture dry out faster compared to soils with a clay texture that retain surface moisture. Decreasing moisture reduces the availability of water for vegetation, thus leading to desertification. However, in some research, desertification was investigated by developing quantitative relationships between biophysical indicators. These earlier models cannot effectively distinguish areas with low and high desertification intensity. Consequently, new relationships were developed to extract various degrees of desertification.

The purpose of this research is to investigate the degrees of desertification in the Narmashir region in Kerman province. For this purpose, a relationship based on various biophysical indices such as NDVI, greenness, wetness, surface albedo, and brightness was presented. The research methodology is based on comparing the regression analysis of the NDVI-albedo index with the Tasseled Cap indices (TCB, TCG, and TCW). The DDI (Desertification Degree Index) was calculated based on the regression analysis results and used to extract the degrees of desertification. The final desertification intensity map is classified into five degrees.

DATA AND METHODOLOGY

Several remote sensing techniques have been developed to map and assess desertification in arid and semi-arid regions. These methods include visual interpretation methods (Huang et al., 2006), the Spectral Mixture Analysis (SMA) method (Tram et al., 1998, Vervenci, 2016), classification algorithms (Afrasini et al., 2017, Afrasini et al., 2018), spectral indices (NDVI and albedo), and image transformations such as TCT (Zancheta et al., 2016). The proposed methods are based on the analysis of the relationship between biophysical spectral indices and the risk of desertification. The primary goal of these methods is to select the optimal combination of spectral indices that provides a high correlation. The selected methodology can be divided into three main stages: extraction of spectral and TCT indices, training and correlation analysis, and implementation of an index to extract different degrees of desertification in the study area.

RESULTS AND DISCUSSION

After performing the spectral indices, the indices were analyzed (Figure 2). High values of NDVI and TCG correspond to agricultural fields located in the study area, while low values indicate the desert areas in the Narmashir region. Low albedo values are related to vegetation and water areas, whereas high albedo and TCB values indicate light-colored, whitish soils. The TCW index provides information about soil moisture, and its values vary. High TCW values are related to water areas and vegetation, while low values indicate dry areas such as dunes and soils poor in organic matter.

The western part of the Narmashir region is located on the alluvial cone and benefits from favorable moisture conditions, making it less prone to desertification. The eastern part of the region has experienced severe desertification, and these areas are interspersed with agricultural lands. About half of the studied area had very low albedo values. However, the region has seen a lot of desertification. These areas appear in white on the satellite images. In the eastern regions, the amount of albedo was higher than in the western regions. Due to the climatic, dry, and semi-arid conditions of the region, vegetation is limited only to places with access to water sources. Therefore, the area had very little vegetation. Only of the area consists of fields, and in the rest of the areas, vegetation cover is limited. Farms and vegetation are heavily encircled by desert areas. The TCB index values correspond to albedo values and match areas with high albedo. The TCG index also has a high correlation with the NDVI index. About of the area lacks vegetation. The soil moisture index has special conditions. The

Narmashir region's location on the alluvial cone allows these regions to have more favorable moisture conditions. Eastern regions have very low moisture values.

Table 4: Pearson correlation coefficient and determination coefficient values between desertification intensity estimation indices

indices	slope	Pearson correlation	R2
TCW, TCG	1.37	0.49	0.24
TCW, TCB	-1.84	-0.77	0.61
TCW, NDVI	1.52	0.42	0.18
TCW, albedo	-1.57	-0.65	0.43
TCG, TCB	-0.008	-0.009	0.001
TCG, NDVI	1.28	0.99	0.98
TCG, albedo	0.14	0.16	0.02
TCB, NDVI	0.12	0.08	0.006
TCB, albedo	0.98	0.98	0.96
NDVI, albedo	0.17	0.25	0.06

CONCLUSION

The findings showed that the combination of TCW-TCB provides superior results compared to the NDVI-albedo combination. The DDI index uses multispectral images to estimate desertification and relies exclusively on remote sensing images for monitoring. The DDI index was used for the quantitative mapping of desertification intensity, and the applied method achieved higher accuracy. The results of the desertification map showed that and are classified as very high and high desertification, respectively. The Narmashir region is categorized as having very low desertification. The areas most affected by the desertification phenomenon are in the eastern part of the studied region. These areas are characterized by the movement of dunes, soil salinity, and low rainfall and water availability. These maps will help identify areas that require protection. These areas are generally characterized by high desertification risk and low vegetation density. Multispectral remote sensing data, such as Landsat, can be effectively used for desertification studies.

ETHICAL CONSIDERATIONS

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

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

REFERENCES

References (in Persian)

- Salehpourjam, A., & Tabatabaei, M. (2018). Investigation of the soil characteristic on desertification potential in alluvial fans using AHP-FUZZY SAW method (case study: alluvial fans surrounding Halghe Dareh and Jaroo Mountains, Eshtehard), *Journal of Natural Environmental Hazards*, 7(17), 195-212. <https://doi.org/10.22111/jneh.2019.25122.1407> [In Persian]
- Sargazi, H., Ownegh, M., & Barani, H. (2019). Investigation and ranking of Managerial factors of land degradation and desertification in the Sistan Plan. *Journal of Natural Environmental Hazards*. 8(21), 129-146. <https://doi.org/10.22111/jneh.2018.19785.1236> [In Persian]

References (in English)

- Afrasinei, G.M., Melis, M.T., Buttau, C., Arras, Zerrim, A., Guied, M., Ouassar, M., Essifi, B., Zaied, M.B., & Jlali, A. (2017). Classification Methods for Detecting and Evaluating Changes in Desertification-Related Features in Arid and Semi-arid Environments. *Euro-Mediterr. Journal for Environmental Integration*, 2(1), 14. <https://doi.org/10.1007/s41207-017-0021-1>
- Afrasinei, G.M., Melis, M.T., Buttau, C., Bradd, J.M., Arras, C., & Ghiglieri, G. (2017). Assessment of remote sensing-based classification methods for change detection of salt-affected areas (Biskra area, Algeria), *Journal of Applied Remote Sensing*, 11, 016025. <https://doi.org/10.1117/1.JRS.11.016025>

- Afrasinei, G.M., Melis, M.T., Arras, C., Pistis, M., Buttau, C., & Ghiglieri, G. (2018). Spatiotemporal and spectral analysis of sand encroachment dynamics in southern Tunisia. *Eur. Journal for Remote Sensing*, 51, 352–374. <https://doi.org/10.1080/22797254.2018.1439343>
- Ait Lamqadem, A., Saber, H., & Rahimi, A. (2017). Spatiotemporal Changes of Vegetation in the Middle Draa Valley Oasis: A Case Study of M'hamid El Ghizlane Oasis (Morocco). *European Scientific Journal*, 13, 115–132. <https://doi.org/10.19044/esj.2017.v13n24p115>
- Becerril-Piña, R., Díaz-Delgado, C., Mastachi-Loza, C.A., & González-Sosa, E. (2016). Integration of remote sensing techniques for monitoring desertification in Mexico. *Human and Ecological Risk Assessment: International Journal*, 22, 1323–1340. <https://doi.org/10.1080/10807039.2016.1169914>
- Crist, E.P., Laurin, R., & Cicone, R.C. (1986). Vegetation and Soils Information Contained in Transformed Thematic Mapper Data. *Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing 86 Symposium, Zurich, Switzerland*, 8, 1465–1470.
- Gillespie, T.W., Ostermann-Kelm, S., Dong, C., Willis, K.S., Okin, G.S., & MacDonald, G.M. (2018). Monitoring changes of NDVI in protected areas of southern California. *Ecological Indicators*, 88, 485–494. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.01.031>
- Guang, Y., Dong, C., Xinlin, H., Aihua, L., Mingjie, Y., & Xiaolong, L. (2017). Land use change characteristics affected by water saving practices in Manas River Basin, China, using Landsat satellite images. *International Journal of Agricultural Biological Engineering*, 10(6), 123–133.
- Guo, Q., Fu, B., Shi, P., Cudahy, T., Zhang, J., & Xu, H. (2017). Satellite Monitoring the Spatial-Temporal Dynamics of Desertification in Response to Climate Change and Human Activities across the Ordos Plateau, China. *Remote Sensing*, 9(6), 525–542. <https://doi.org/10.3390/rs9060525>
- Hill, J., Stellmes, M., Udelhoven, T., Röder, A., & Sommer, S. (2008). Mediterranean desertification and land degradation: Mapping related land use change syndromes based on satellite observations. *Glob. Planet Change*, 64, 146–157. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2008.10.005>
- Huang, S., & Siegert, F. (2006). Land cover classification optimized to detect areas at risk of desertification in North China based on SPOT VEGETATION imagery. *Journal of Arid Environment*, 67, 308–327. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2006.02.016>
- Jackson, R.D., Idso, S.B., & Otterman, J. (1975). Surface Albedo and Desertification. *Science*, 189, 1012–1015. <https://doi.org/10.1126/science.189.4207.1012>
- Jenks, G.F., 1963. Generalization in statistical mapping. *Annals of the Association of American Geographers*, 53, 15–26.
- Jin, S., & Sader, S.A. (2005). Comparison of time series tasseled cap wetness and the normalized difference moisture index in detecting forest disturbances. *Remote Sensing of Environment*, 94(3), 364–372. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.10.012>
- Kauth, R.J., & Thomas, G.S. (1976). The Tasseled Cap—A Graphic Description of the Spectral-Temporal Development of Agricultural Crops as Seen by LANDSAT. In *Proceedings of the Symposium on Machine Processing of Remotely Sensed Data*, West Lafayette, IN, USA, 29 June–1 July 1976; Swain, P.H., Ed.; Institute of Electrical and Electronics Engineers, Purdue University Press: West Lafayette, IN, USA, 41–51.
- Lamchin, M., Lee, J.Y., Lee, W.K., Lee, E.J., Kim, M., Lim, C.H., Choi, H.A., & Kim, S.R. (2016). Assessment of land cover change and desertification using remote sensing technology in a local region of Mongolia. *Advances in Space Research*, 57, 64–77. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2015.10.006>
- Li, S.G., Harazono, Y., Oikawa, T., Zhao, H.L., He, Z.Y., & Chang, X.L. (2000). Grassland desertification by grazing and the resulting micrometeorological changes in Inner Mongolia. *Agriculture for Meteorology*, 102, 125–137. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(00\)00101-5](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(00)00101-5)
- Liu, Q., Liu, G., Huang, C., & Xie, C. (2015). Comparison of tasseled cap transformations based on the selective bands of Landsat 8 OLI TOA reflectance images. *International Journal of Remote Sensing*, 36, 417–441. <https://doi.org/10.1080/01431161.2014.995274>
- Liu, Q., Liu, G., & Huang, C. (2018). Monitoring desertification processes in the Mongolian Plateau using MODIS tasseled cap transformation and TGSi time series. *Journal of Arid Land*, 10, 12–26.
- Ma, Z., Xie, Y., Jiao, J., Li, L., & Wang, X. (2011). The Construction and Application of an Albedo-NDVI-Based Desertification Monitoring Model. *Procedia Environmental Science*, 10, 2029–2035. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2011.09.318>
- Naegeli, K., Damm, A., Huss, M., Wulf, H., Schaepman, M., & Hoelzle, M. (2017). Cross-comparison of albedo products for glacier surfaces derived from airborne and satellite (Sentinel-2 and Landsat 8) optical data. *Remote Sensing*, 9, 110–127. <https://doi.org/10.3390/rs90201010>
- Nedkov, R. (2017). Orthogonal transformation of segmented images from the satellite Sentinel-2. *Comptes rendus l'Academie bulgare des Sciences*, 70(5), 687–692.
- Pan, J., & Quin, X. (2010). Extracting desertification from Landsat imagery using a feature space composed of vegetation index and albedo: a case study of Zhangye oasis and its adjacent areas. *Science Mapping*, 3, 193–195.
- Pan, J., & Li, T. (2013). Extracting desertification from Landsat TM imagery based on spectral mixture analysis and Albedo-Vegetation feature space. *Natural Hazards*, 68(2), 915–927. <https://doi.org/10.1007/s11069-013-0665-3>
- Tromp, M., & Epema, G.F. (1998). Spectral mixture analysis for mapping land degradation in semi-arid areas. *Geology. Mijnb.*, 77, 153–160
- UNCCD. (1994). United Nations Convention to Combat Desertification in those Countries Experiencing Serious Drought and/or Desertification, particularly in Africa; United Nations Convention to Combat Desertification: Paris, France.

- Vorovencii, I. (2016). Assessing and monitoring the risk of land degradation in Baragan Plain, Romania, using spectral mixture analysis and Landsat imagery. *Environmental Monitoring Assessment*. 188(7), 439-457. <https://doi.org/10.1007/s10661-016-5446-5>
- Wang, X., Hua, T., Lang, L., & Ma, W. (2017). Spatial differences of aeolian desertification responses to climate in arid Asia. *Glob. Planet Change*. 148, 22–28. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2016.11.008>
- Xiao, J., Shen, Y., Ryutaro, T., & Bayaer, W. (2005). Detection of land desertification and topsoil grain size using remote sensing. *International Geoscience Remote Sensing*. 1, 198–201. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2005.1526141>
- Zanchetta, A., Bitelli, G., & Karnieli, A. (2016). Monitoring desertification by remote sensing using the Tasselled Cap transform for long-term change detection. *Natural Hazards*, 83, 223–237. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2342-9>
- Zeng, Y., Xiang, N., & Feng, Z. (2006). Albedo-NDVI Space and Remote Sensing Synthesis Index Models for Desertification Monitoring. *Science Geography*. 26, 75–81. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108230>.

مجله علمی پژوهشی مخاطرات محیط طبیعی، دوره ۱۵، شماره ۵۰، شماره پیاپی ۰۴، دی ۱۴۰۵

ارزیابی مکانی شدت بیابان‌زایی نرماشیر با شاخص DDI

مهدی فیض اله پور 

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

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

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۰۲ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۷/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۲۳ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۱۰/۰۱ واژه‌های کلیدی: تبدیل کلاهی زنگوله‌ای، TCW، albedo، NDVI، TCB، نرماشیر.	بیابان‌زایی یکی از پدیده‌های مخرب زیست‌محیطی در سراسر جهان به‌شمار می‌آید. این پژوهش با هدف ترسیم درجه بیابان‌زایی در منطقه نرماشیر کرمان در سال ۲۰۲۳ با استفاده از ماهواره لندست ۸ انجام شد. در ابتدا، با استفاده از روش تبدیل کلاهی زنگوله‌ای TCT، سه شاخص روشنایی کلاهی زنگوله‌ای (TCB)، سبزی (TCG) و رطوبت (TCW) استخراج شد. در دومین مرحله، شاخص‌های تفاوت نرمال‌شده پوشش گیاهی (NDVI) و albedo برآورد گردید. در مرحله بعدی، بر اساس ترکیب TCG-TCB، NDVI-albedo و TCW-TCB، تحلیل رگرسیون خطی انجام شد. نتایج نشان داد که همبستگی بالایی به میزان ۰/۷۷- بین TCW و TCB برقرار بوده و بین NDVI با albedo همبستگی بسیار ضعیفی معادل ۰/۲۵ ایجاد شده است. بیشترین همبستگی مثبت به میزان ۰/۴۹ در بین شاخص‌های TCW و TCG دیده می‌شود. با توجه به بیشترین مقادیر همبستگی و بر اساس روابط رگرسیونی بین TCW با TCB شاخصی برای درجه‌بندی بیابان‌زایی ایجاد شده و به پنج طبقه بیابان‌زایی خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد تقسیم گردید. بر این اساس تنها ۶/۹ درصد از منطقه مورد مطالعه دارای شدت بیابان‌زایی خیلی زیاد بوده و ۱۰/۵ درصد از شدت بیابان‌زایی زیاد برخوردار هستند. دقت کلی این شاخص معادل ۹۱/۲ بوده است. این روش به‌علت سادگی و توانمندی بالا، از قابلیت بالایی در مدیریت و حفاظت از اراضی خشک و نیمه‌خشک برخوردار است.

استناد: فیض اله پور، مهدی. (۱۴۰۵). ارزیابی مکانی شدت بیابان‌زایی نرماشیر با شاخص DDI. مخاطرات محیط طبیعی، ۱۵ (۵۰)، ۱-۲۰.

ناشر: دانشگاه سیستان و بلوچستان

© نویسنده/ نویسندگان

DOI: 10.22111/jneh.2025.52306.2118



مقدمه

بیابان‌زایی نوعی تخریب زمین در مناطق خشک و نیمه‌خشک است که در اثر ترکیبی از عوامل مختلف مانند تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی ایجاد می‌شود (UNCCD^۱، ۱۹۹۴). بیش از ۳/۶ میلیون هکتار از سطح جهان تحت تاثیر این پدیده قرار دارند (لامچین^۲ و همکاران، ۲۰۱۶). یکی از مظاهر بیابان‌زایی از بین رفتن کلی یا جزئی اراضی کشاورزی است. علاوه بر این، بیابان‌زایی در مقیاس‌های مختلف مکانی و زمانی بر فرایندهای بیوفیزیکی، اجتماعی و اقتصادی تاثیر منفی می‌گذارد (گائو^۳ و همکاران، ۲۰۱۷؛ صالح‌پور چم و همکاران، ۱۳۹۷؛ سرگزی و همکاران، ۱۳۹۸). بیابان‌زایی یک تهدید زیست‌محیطی رایج است که بخش بزرگی از کشور ایران را تحت تاثیر قرار می‌دهد. از ویژگی‌های اصلی این منطقه می‌توان به شوری آب و خاک، کمبود بارش، تبخیر شدید و فعالیت‌های انسانی اشاره کرد. این عوامل منجر به پوشش گیاهی کم شده و در نتیجه به زوال اکوسیستم شکننده کمک می‌کند. در سه دهه اخیر، داده‌های سنجش‌ازدور به‌طور عمومی برای پایش و ارزیابی اکوسیستم‌ها و مخاطراتی مانند بیابان‌زایی مورد استفاده قرار گرفت (هوانگ^۴ و همکاران، ۲۰۰۶، گوانگ^۵ و همکاران، ۲۰۱۷). سنجش‌ازدور، داده‌های دقیق و اطلاعات فراوان را ارائه کرده و می‌تواند برای مبارزه و کاهش اثر بیابان‌زایی در مناطق خشک و نیمه‌خشک مورد بهره‌برداری قرار گیرد (وانگ^۶ و همکاران، ۲۰۱۷). چندین ماهواره سنجش‌ازدور مانند لندست و سنتینل برای نقشه‌برداری و درک ریشه‌های فرایند بیابان‌زایی در مقیاس محلی و منطقه‌ای مورد استفاده قرار گرفتند (زیائو^۷ و همکاران، ۲۰۰۵؛ هیل^۸ و همکاران، ۲۰۰۸). بر اساس بررسی‌ها و داده‌های تجربی، شاخص‌های خاصی برای پایش و ارزیابی بیابان‌زایی در مناطق خشک و نیمه‌خشک توسعه یافته است. خطرات بیابان‌زایی را می‌توان بر اساس تصاویر سنجش‌ازدور و با استفاده از روش‌های طبقه‌بندی سنتی و تحلیل‌های طیفی مورد بررسی قرار داد (افراسینی^۹ و همکاران، ۲۰۱۷؛ پان^{۱۰}، ۲۰۱۳). برخی از پژوهش‌ها چنین عنوان کردند که می‌توان بر اساس روابط منفی بین پوشش گیاهی و آلودگی شاخصی را برای استخراج بیابان‌زایی ارائه داد (ما^{۱۱} و همکاران، ۲۰۱۱). در نقشه‌برداری خطرات محیطی، تخمین زیست‌توده، تحقیقات کشاورزی و شناسایی مناطق بیابانی‌شده از ابزار تبدیل کلاک زنگوله‌ای TCT استفاده می‌شود (جین^{۱۲} و همکاران، ۲۰۰۵؛ لیو^{۱۳} و همکاران، ۲۰۱۵). کلاک زنگوله‌ای یک نوع مبدل برای کاهش تفسیرپذیری تصویر چندطیفی برای بازگرداندن سه شاخص موضوعی است. از بین این سه شاخص، شاخص روشنایی به پس زمینه خاک حساس است. شاخص سربیزی برای تشخیص پوشش گیاهی استفاده شده و شاخص رطوبت اطلاعاتی در مورد رطوبت آب، خاک و شرایط پوشش گیاهی فراهم می‌کند (کاس^{۱۴} و توماس، ۱۹۷۶). برخی از محققان بین بیابان‌زایی و افزایش آلودگی سطحی رابطه‌ای برقرار کردند (جکسون^{۱۵} و همکاران، ۱۹۷۵). خاک‌های با ماسه و بافت خاک

1 United nations Convention to Combat Desertification

2 Lamchin

3 Guo

4 Huang

5 Guang

6 Wang

7 Xiao

8 Hill

9 Afrasinei

10 Pan

11 Ma

12 Jin

13 Liu

14 Kauth

15 Jackson

روشن در مقایسه با خاک‌های دارای بافت رسی که رطوبت سطح را حفظ می‌کند، به سرعت خشک می‌شوند. کاهش رطوبت باعث کاهش دسترسی به آب در پوشش گیاهی شده و در نتیجه منجر به بیابانی شدن می‌گردد. با این حال، در برخی از پژوهش‌ها با ایجاد روابط کمی بین شاخص‌های بیوفیزیکی اقدام به بررسی بیابان‌زایی گردید (بسرلی پینا^۱ و همکاران، ۲۰۱۶). این مدل‌ها نمی‌توانند به استخراج اراضی با شدت بیابان‌زایی کم و زیاد یاری رسانند. این کمبودها باعث شده تا برای استخراج درجات مختلف بیابان‌زایی، روابط جدید ایجاد گردد.

برای نقشه‌برداری و ارزیابی بیابان‌زایی در نواحی خشک و نیمه‌خشک چندین فن سنجش‌ازدور توسعه داده شده است. از این روش‌ها می‌توان به روش‌های تفسیر بصری (هوانگ^۲ و همکاران، ۲۰۰۶)، روش SMA (ترام^۳ و همکاران، ۱۹۹۸؛ وروونچی^۴، ۲۰۱۶)، الگوریتم طبقه‌بندی (افراسینی و همکاران، ۲۰۱۷؛ افراسینی و همکاران، ۲۰۱۸)، شاخص طیفی (NDVI و albedo) و تبدیل تصاویر مانند TCT (زانچتا^۵ و همکاران، ۲۰۱۶) اشاره کرد. روش‌های پیشنهادی مبتنی بر تحلیل رابطه بین شاخص‌های طیفی بیوفیزیکی و خطر بیابان‌زایی است. هدف از این روش‌ها، انتخاب بهترین ترکیب از شاخص‌های طیفی است که همبستگی بالایی ارائه می‌دهند. روش‌های انتخاب‌شده را می‌توان به سه مرحله اصلی استخراج شاخص‌های طیفی و TCT، آموزش و تحلیل همبستگی و اجرای یک شاخص برای استخراج درجات مختلف بیابان‌زایی در منطقه مورد مطالعه تقسیم کرد.

هدف از این پژوهش، بررسی درجات بیابان‌زایی در منطقه نرمایش در استان کرمان بوده و به این منظور رابطه‌ای مبتنی بر شاخص‌های مختلف بیوفیزیکی از قبیل NDVI^۶، سبزی، رطوبت، آلدوی سطح و روشنایی ارائه شد. روش پژوهش بر پایه مقایسه تحلیل‌های رگرسیونی شاخص NDVI-albedo، روش کلاهدک زنگوله روشنایی (TCB^۷)، سبزی (TCG^۸) و رطوبت (TCW^۹) استوار است. شاخص درجه بیابان‌زایی DDI^{۱۰} بر اساس نتایج تحلیل رگرسیونی محاسبه شده و برای استخراج درجات بیابان‌زایی استفاده شد. نقشه نهایی شدت بیابان‌زایی به پنج درجه طبقه‌بندی شده است.

داده‌ها و روش‌ها

منطقه نرمایش در مختصات جغرافیایی ۲۸ درجه و ۴۰ دقیقه و ۸ ثانیه تا ۲۹ درجه و ۵ دقیقه و ۱۵ ثانیه عرض شمالی و ۵۸ درجه و ۲۸ دقیقه و ۴۵ ثانیه تا ۵۹ درجه و ۸ دقیقه و ۲۳ ثانیه طول شرقی در بخش شرقی استان کرمان و در حاشیه کویر لوت واقع شده است. منطقه نرمایش بر روی یک مخروط‌افکنه واقع شده و بخش شرقی آن به وسیله بیابان احاطه شده است.

¹ Becerril-Piña

² Huang

³ Tromp

⁴ Vorovencii

⁵ Zanchetta

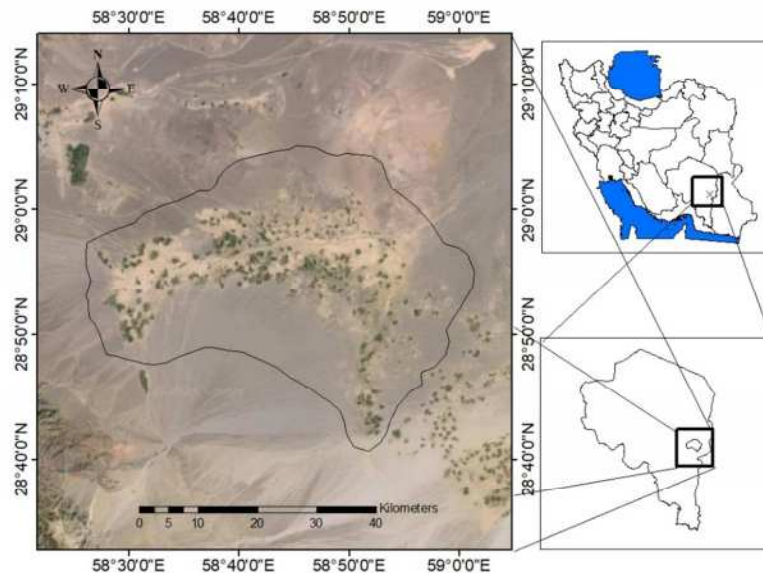
⁶ Normalized Difference vegetation Index

⁷ TASSELLED Cap Brightness

⁸ Tasseled cap greenness

⁹ Tasseled cap wetness

¹⁰ Desertification degree index



شکل ۱: موقعیت محدوده مورد مطالعه در منطقه نورماشیر. منبع: نویسندگان

برای بررسی شدت بیابان‌زایی در منطقه مورد مطالعه از تصاویر لندست ۸ استفاده شد. این تصویر در ۱۷ آگوست ۲۰۲۳ به‌دست آمد. تصاویر بدون ابر در تیرماه به این دلیل انتخاب شد که در این زمان، پوشش گیاهی به میزان حداقل رسیده و محصولات زراعی برداشت شده‌اند. در این ماهواره از ۶ باند طیفی بازتابی استفاده شده که دارای پیکسل‌های ۳۰ متری بوده و در بازه زمانی ۱۶ روزه تصویربرداری شده است.

جدول ۱: خصوصیت‌های باندهای استفاده‌شده از ماهواره لندست ۸

سنجنده	گذر	ردیف	تاریخ تصویربرداری	باند	توان تفکیک	طول موج
OLI لندست ۸	۱۵۸	۴۰	۲۰۲۳/۰۸/۱۷	باند ۱	۳۰ متر	گردوغبار، ساحل
				باند ۲	۳۰ متر	آبی
				باند ۳	۳۰ متر	سبز
				باند ۴	۳۰ متر	قرمز
				باند ۵	۳۰ متر	مادون قرمز نزدیک
				باند ۶	۳۰ متر	مادون قرمز موج کوتاه
				باند ۷	۳۰ متر	مادون قرمز موج کوتاه
				باند ۸	۱۵	پانکروماتیک
				باند ۹	۳۰	ابر سیروس
				باند ۱۰	۱۰۰	حرارتی
				باند ۱۱	۱۰۰	حرارتی

شاخص تفاوت پوشش گیاهی نرمال‌شده NDVI، یکی از متداول‌ترین روش‌ها برای استخراج پوشش گیاهی است. این شاخص بر اساس بازتاب قرمز و NIR بوده و با گرفتن نسبت باندهای قرمز و NIR از داده‌های سنجنش‌ازدور محاسبه می‌شود. مقادیر NDVI بین ۱- (آب و برف) و ۱+ (پوشش گیاهی کامل) در نوسان است. شاخص NDVI در چندین

پژوهش به‌عنوان شاخص بررسی بیابان‌زایی در مناطق خشک مورد استفاده قرار گرفت (معادله ۱) (گریسپ^۱ و همکاران، ۲۰۱۸).

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (1)$$

در این معادله R و NIR به ترتیب باندهای قرمز و مادون قرمز نزدیک در تصاویر لندست ۸ هستند. شاخص albedo تبدیل باند باریک به پهن بر اساس داده‌های ماهواره‌ای چند طیفی است که در محدوده طیفی ۰/۳۸ تا ۲/۵ میکرومتر قرار دارد (ناگلی^۲ و همکاران، ۲۰۱۷). آلبدوی سطح زمین یک شاخص مهم برای تعیین بیلان انرژی و تغییر در ریز اقلیم بوده و می‌تواند باعث بیابان‌زایی در مناطق خشک و نیمه‌خشک گردد (لی و همکاران، ۲۰۰۰). وضعیت آلبدو با بهره‌گیری از معادله لیانگ و سنجنده OLI ماهواره لندست ۸ محاسبه شده و در برآورد آلبدوی سطحی به‌کار گرفته شد (ندکو^۳، ۲۰۱۷).

$$albedo(a) = [(0.356 \cdot blue) + (0.130 \cdot red) + (0.373 \cdot nir) + (0.085 \cdot swir1) + (0.072 \cdot swir2) - 0.018] / 1.016 \quad (2)$$

روش TCT که با عنوان تبدیل KT نیز شناخته می‌شود، تبدیل خطی مقادیر پیکسل‌های تصاویر سنجش‌ازدور است که توسط کاس و توماس و با بهره‌گیری از ماهواره لندست ۵ در سال ۱۹۷۶ توسعه یافت. این شاخص از طریق همبستگی بین NIR و باند مرئی ایجاد می‌گردد. برای ایجاد این شاخص از شاخص‌های روشنایی TCB، سبزی TCG و رطوبت TCW بهره گرفته شد. شاخص TCB زمین‌های برهنه و فاقد پوشش برف را نشان می‌دهد. شاخص TCG نشان‌دهنده انواع مختلف پوشش گیاهی بوده و شاخص TCW در ارتباط با رطوبت خاک توسعه داده شده است (زانچتا^۴ و همکاران، ۲۰۱۶). روش TCT به مجموعه‌ای از ضرایب نیاز دارد که باندهای تصاویر چند طیفی را وزن دهی می‌کند. جدول ۲ ضرایب تبدیل مورد استفاده در این پژوهش را برای ماهواره لندست ۸ نشان می‌دهد (ندکو، ۲۰۱۷).

جدول ۲: ضریب انتقال تصاویر لندست ۸ در تبدیل کلاهی زنگوله‌ای TCT

شاخص	باند ۲	باند ۳	باند ۴	باند ۵	باند ۶	باند ۷
روشنایی TCB	۰/۳۰۲۹	۰/۳۷۸۶	۰/۴۷۳۳	۰/۵۵۹۹	۰/۵۰۸	۰/۱۸۷۲
سبزی TCG	-۰/۲۹۴۱	-۰/۲۴۳	-۰/۵۴۲۴	۰/۷۲۷۶	۰/۰۷۱۳	-۰/۱۶۰۸
رطوبت TCW	۰/۱۵۱۱	۰/۱۹۷۳	۰/۳۲۸۳	۰/۳۴۰۷	-۰/۷۱۱۷	-۰/۴۵۵۹

$$brightness = b2(0.3029) + b3(0.2786) + b4(0.4733) + b5(0.5599) + b6(0.508) + b7(0.1872) \quad (3)$$

$$greenness = b2(-0.2941) + b3(-0.243) + b4(-0.5424) + b5(0.7276) + b6(0.0713) + b7(-0.1608) \quad (4)$$

$$wetness = b2(0.1511) + b3(0.1973) + b4(0.3283) + b5(0.3407) + b6(-0.7117) + b7(-0.4559) \quad (5)$$

بر اساس روابط رگرسیونی بین شاخص‌ها، درجات بیابان‌زایی در منطقه مورد مطالعه مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و به پنج دسته خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد طبقه‌بندی شد. هدف از این طبقه‌بندی، تفکیک هر درجه بیابان‌زایی با استفاده از تفاوت بین شاخص‌ها و ترکیب‌های بیابان‌زایی بوده است. طبقه‌بندی فضای ویژه، فنی است

¹ Gillespie

² Naegeli

³ Nedkov

⁴ Zanchetta

که برای نقشه‌برداری و ارزیابی بیابان‌زایی در برخی مناطق خشک اقتباس شده است. برخی از محققان رابطه بین پوشش گیاهی و آلودگی را تجزیه و تحلیل کردند (پان و همکاران، ۲۰۱۰). آلودگی سطحی با کاهش پوشش گیاهی افزایش یافته و تغییرات آلودگی بر تعادل تابش سطحی تاثیر گذاشته و در نتیجه دمای سطح زمین را تحت تاثیر قرار می‌دهد. علاوه بر این، از طریق تحلیل روابط بین TCG و TCB شدت بیابان‌زایی در نواحی خشک محاسبه شد (لیو و همکاران، ۲۰۱۸). برای تعیین ترکیبی که بهترین همبستگی منفی را داشته باشد، بین شاخص‌های albedo-NDVI، TCG-TCB و TCW-TCB رابطه همبستگی انجام شد. از ضریب همبستگی پیرسون برای تحلیل همبستگی بین پنج شاخص TCG، albedo، NDVI، TCB و TCW استفاده شد. تحلیل رگرسیون خطی را می‌توان با استفاده از معادله خطی ساده انجام داد که در آن x متغیر مستقل و y متغیر وابسته می‌باشد. در این پژوهش، albedo و TCB متغیرهای مستقل هستند. شاخص‌های TCG، NDVI و TCW به ترتیب متغیرهای وابسته را تشکیل می‌دهند. با استفاده از GIS مجموعه‌ای از نقاط به صورت تصادفی استخراج شد. نقاط انتخاب‌شده کل منطقه مورد مطالعه را پوشش می‌دهند. بر این اساس مقادیر پیکسل برای هر شاخص استخراج شد. سپس همبستگی خطی برای هر طبقه از بیابان‌زایی برآورد گردید. بیابان‌زایی در این منطقه ناشی از عوامل اقلیمی و انسانی می‌باشد. در ارزیابی کمی شدت بیابان‌زایی، شاخص‌های فیزیکی و بیوفیزیکی ادغام شدند. در این ارزیابی، عوامل انسانی لحاظ نگردید.

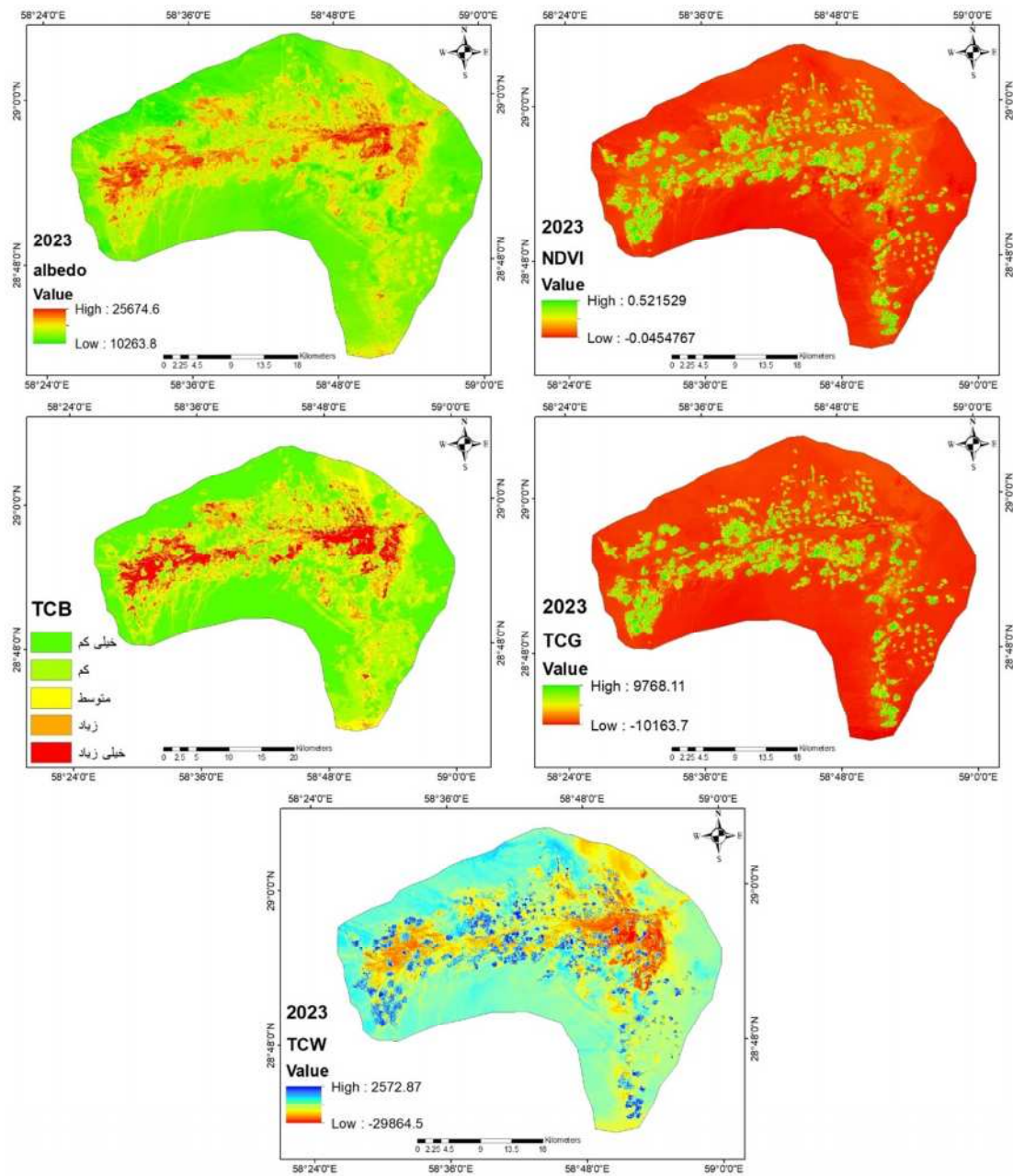
برای طبقه‌بندی مقادیر DDI به پنج طبقه، از الگوریتم طبقه‌بندی شکست طبیعی جنکز استفاده شد. این الگوریتم با موفقیت برای طبقه‌بندی بیابان‌زایی در مناطق خشک مورد استفاده قرار گرفت. شکست طبیعی جنکز، یک روش خوشه‌بندی داده است که برای تعیین بهترین آرایش مقادیر در طبقات مختلف طراحی شده است. این روش به دنبال کاهش و افزایش واریانس در طبقات می‌باشد (جنکز^۱، ۱۹۶۳). این الگوریتم داده‌ها را با توجه به شکست‌های ذاتی در داده‌ها گروه‌بندی می‌کند؛ به این معنی که این طبقه‌بندی به داده‌های آموزشی به عنوان ورودی نیاز نداشته و طبقه‌بندی را بر اساس تعداد کلاس‌ها انجام می‌دهد. نقاطی که تفاوت در آنها به حداکثر می‌رسد، شناسایی شده و به عنوان آستانه برای هر طبقه در نظر گرفته می‌شود. پس از استخراج شدت بیابان‌زایی با بهره‌گیری از شاخص DDI و شکست طبیعی جنکز، ارزیابی دقت با استفاده از ماتریس سردرگمی انجام شد (ایت لامگادام^۲ و همکاران، ۲۰۱۷). تمامی نقاط برای اعتبارسنجی استفاده شد. الگوریتم شکست طبیعی جنکز، یک روش طبقه‌بندی وابسته بوده و برای آموزش به نقاط زمین نیاز ندارد.

یافته‌های پژوهش

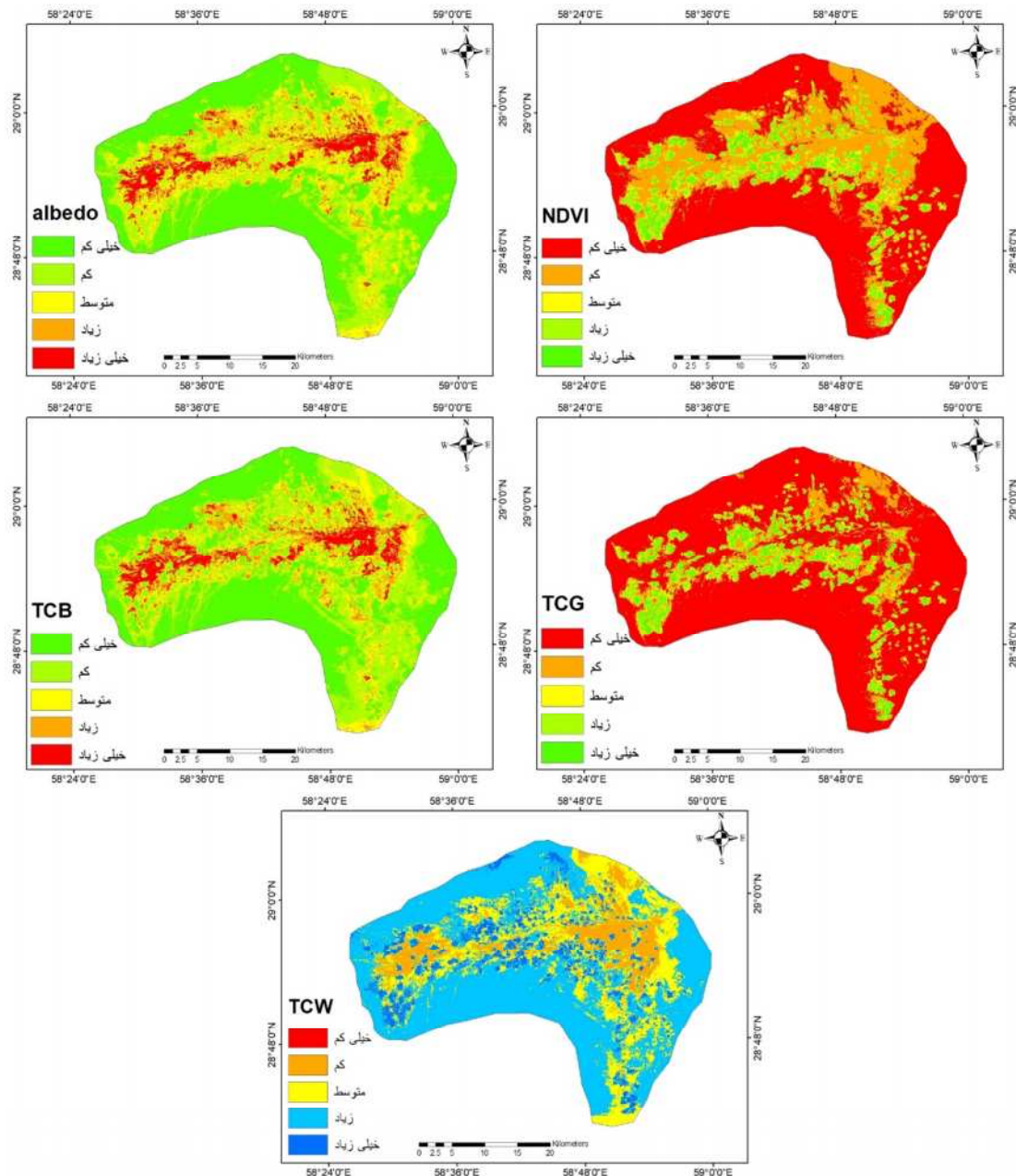
پس از اجرای شاخص‌های طیفی، اقدام به تحلیل شاخص‌ها گردید (شکل ۲). مقادیر بالای NDVI و TCG با مزارع واقع در منطقه مورد مطالعه مطابقت دارد؛ درحالی‌که مقادیر پایین نشان‌دهنده نواحی بیابانی است که در منطقه نرماشیر واقع شده‌اند. مقادیر کم albedo مربوط به پوشش گیاهی و پهنه‌های آبی است و مقادیر بالای آلودگی و TCB خاک‌های روشن را با رنگ مایل به سفید نشان می‌دهد. شاخص TCW اطلاعاتی در مورد رطوبت خاک ارائه می‌دهد و مقادیر آن متفاوت است. مقادیر بالای TCW مربوط به پهنه‌های آبی و پوشش گیاهی است؛ درحالی‌که مقادیر پایین نشان‌دهنده مناطق خشک از جمله تپه‌های شنی و خاک‌های فقیر از مواد آلی است.

¹ Jenks

² Ait Lamqadem



شکل ۲: مقادیر شاخص‌های TCB, TCW, TCG, NDVI و albedo در سال ۲۰۲۳. منبع: نویسنده



شکل ۳: مقادیر شدت شاخص‌های TCG، TCB، NDVI و albedo در سال ۲۰۲۳. منبع: نویسنده

بخش غربی منطقه نرم‌اشیر، بر روی مخروط‌افکنه آبرفتی واقع شده و از وضعیت رطوبتی مطلوبی برخوردار بوده و کمتر دست‌خوش بیابان‌زایی قرار گرفته است. بخش شرقی منطقه به‌شدت شاهد بیابان‌زایی بوده و این مناطق با زمین‌های زراعی به‌صورت توأمان قرار گرفته است. ۳۷/۶ درصد از منطقه مورد مطالعه از مقادیر آلودگی بسیار کمی برخوردار بوده‌اند (جدول ۳). ولی ۱۶/۷ درصد از منطقه شاهد بیابان‌زایی زیاد و خیلی زیاد بوده‌اند. این مناطق بر روی تصاویر ماهواره با رنگ سفید دیده می‌شوند (شکل ۳). در مناطق شرقی میزان آلودگی بیشتر از مناطق غربی بوده است. به‌علت شرایط اقلیمی و خشک و نیمه‌خشک منطقه، پوشش گیاهی تنها منحصر به نقاطی بوده است که به منابع آبی

دسترسی داشته‌اند. بنابراین ۵۳/۴ درصد از منطقه از پوشش گیاهی خیلی کم برخوردار بوده‌اند. ۵/۹ درصد از منطقه شاهد مزارع بوده و در مابقی نقاط پوشش گیاهی محدود بوده است. مزارع و پوشش‌های گیاهی به‌شدت با نواحی بیابانی احاطه شده است. میزان شاخص TCB با مقادیر albedo مطابقت داشته و با نواحی برخوردار از آلودگی بالا منطبق می‌باشد. شاخص TCG نیز با شاخص NDVI دارای هماهنگی بالایی بوده است. ۷۰/۸ درصد از منطقه فاقد پوشش گیاهی می‌باشد. استقرار منطقه نرماشیر بر روی مخروط‌افکنه‌ای باعث شده است که این مناطق از وضعیت رطوبتی مساعدتری برخوردار باشند.

جدول ۳: مساحت طبقات مختلف شاخص‌های مورد مطالعه در پژوهش

شاخص	شدت	آستانه	مساحت	درصد
albedo	خیلی کم	۱۴۱۱۶/۵	۵۱۴/۴	۳۷/۶
	کم	۱۵۳۲۰/۴	۳۵۹/۸	۲۶/۳
	متوسط	۱۶۷۰۵/۱	۲۶۲/۵	۱۹/۲
	زیاد	۱۸۳۳۰/۳	۱۴۲/۹	۱۰/۴
	خیلی زیاد	۲۵۶۷۴/۶	۸۷/۳	۶/۳
NDVI	خیلی کم	۰/۰۴	۷۳۱/۱	۵۳/۴
	کم	۰/۱	۴۱۱/۶	۳۰/۱
	متوسط	۰/۱۹	۷۸/۵	۵/۷
	زیاد	۰/۳	۶۵/۱	۴/۷
	خیلی زیاد	۰/۵۲	۸۰/۷	۵/۹
TCB	خیلی کم	۳۲۵۰۰/۱	۵۰۹/۶	۳۷/۲
	کم	۳۵۵۷۶/۵	۳۹۶/۱	۲۸/۹
	متوسط	۳۹۱۱۳/۶	۲۲۸/۶	۱۶/۷
	زیاد	۴۳۲۶۶/۱	۱۴۰/۷	۱۰/۲
	خیلی زیاد	۶۲۰۲۸/۴	۹۲/۱	۶/۷
TCG	خیلی کم	-۴۵۵۷/۸	۹۶۸/۱	۷۰/۸
	کم	-۲۸۴۴۹/۹	۱۹۰/۵	۱۳/۹
	متوسط	-۱۹۷/۷	۶۵/۴	۴/۷
	زیاد	۲۴۴۹/۴	۶۰/۲	۴/۴
	خیلی زیاد	۹۷۶۳/۱	۸۲/۵	۶/۱
TCW	خیلی کم	-۱۱۶۱۸/۴	۰/۰۲	۰/۰۱
	کم	-۴۷۷۶/۲	۱۶۱/۸	۱۱/۸
	متوسط	-۳۱۲۹/۱	۳۳۴/۸	۲۴/۵
	زیاد	-۱۳۵۵/۱	۷۵۵/۳	۵۵/۲
	خیلی زیاد	۲۵۷۲/۸	۱۱۴/۹	۸/۴

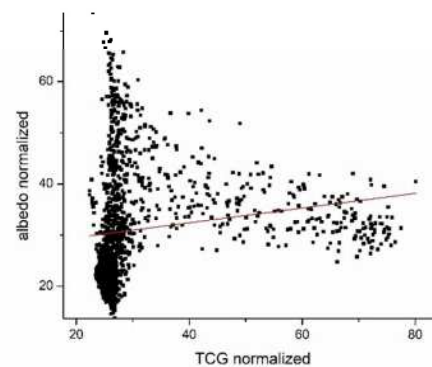
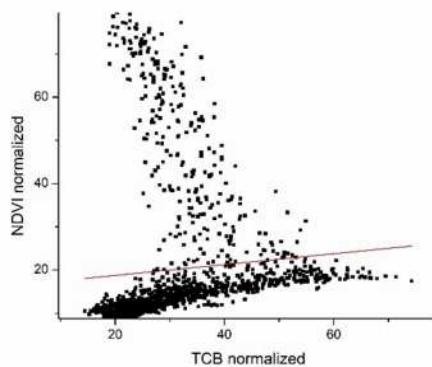
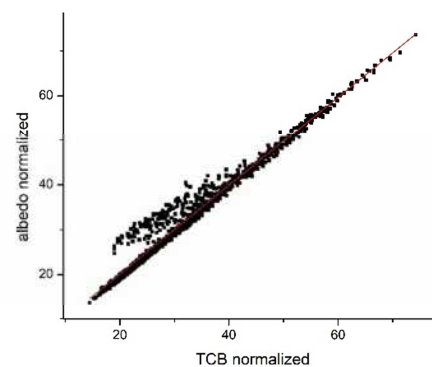
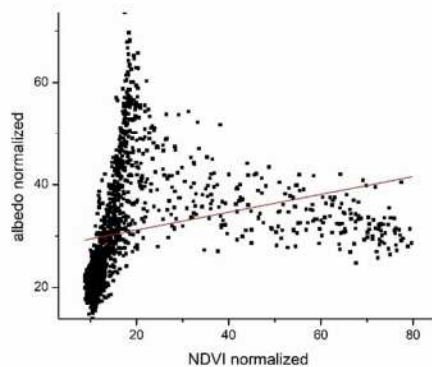
نتایج و بحث

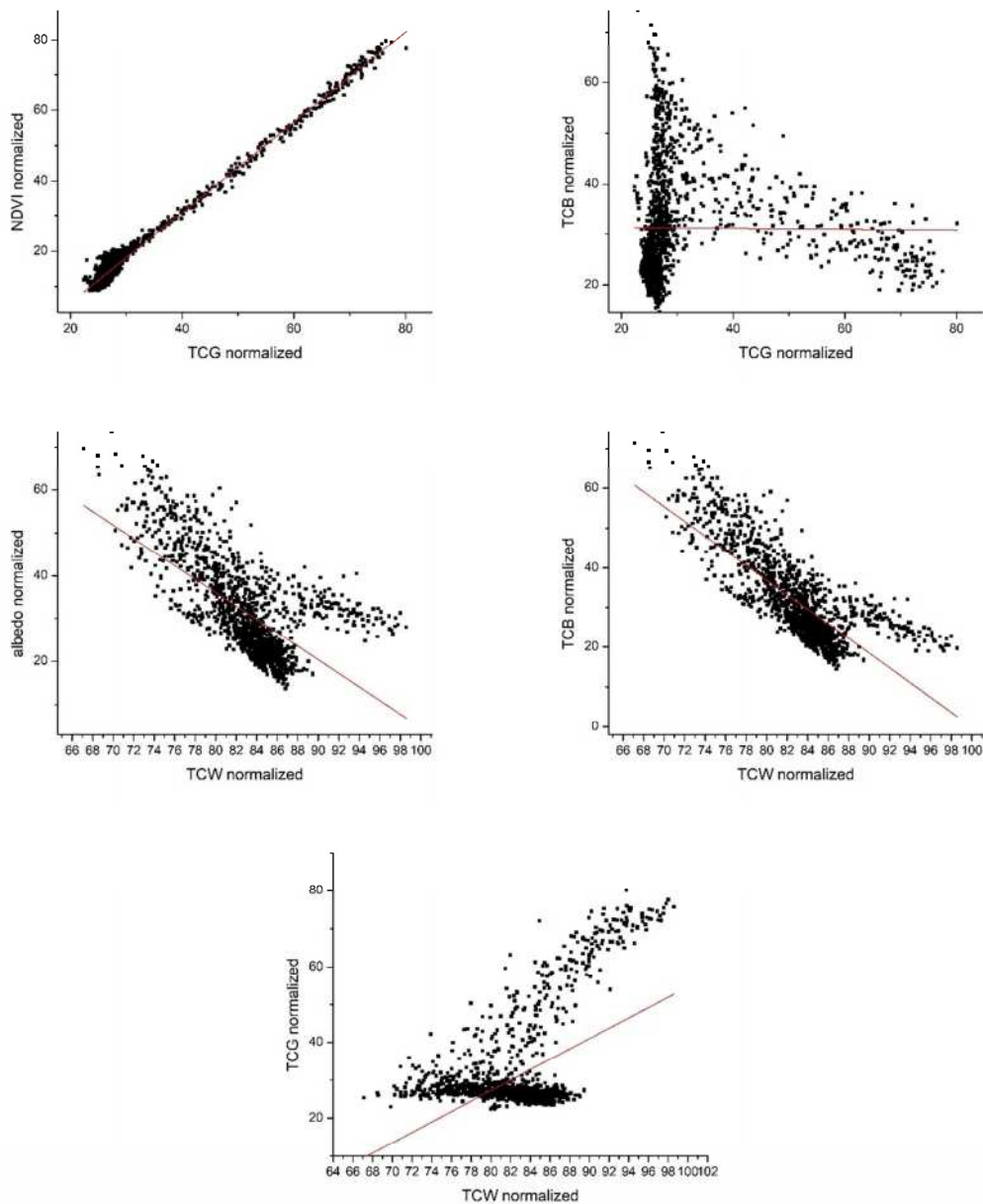
با توجه به اینکه هدف از محاسبه شاخص‌های بالا، برآورد شدت بیابان‌زایی در منطقه بوده است، بنابراین اقدام به برآورد روابط رگرسیونی بین این شاخص‌ها شد تا بدین وسیله با استفاده از مقادیر شیب خط، شاخص DDI برآورد گردد. تجزیه و تحلیل‌ها یک همبستگی منفی قوی را به میزان ۰/۷۷- بین TCW و TCB را نشان داد. پارامتر TCW ارتباط زیادی با رطوبت و بافت خاک داشته و می‌تواند اطلاعات زیادی در مورد انواع مختلف خاک ارائه دهد (زنگ و همکاران، ۲۰۰۶). در بین شاخص‌های TCB و TCG همبستگی بسیار کمی به میزان ۰/۰۰۹- مشاهده شده است. بررسی‌ها همبستگی کمی را در حد ۰/۲۵ بین NDVI و albedo نشان داد. مقادیر همبستگی برای هر شدت از

بیابان‌زایی در جدول ۴ نشان داده شده است. برای تمامی شدت‌های بیابان‌زایی، همبستگی بالایی به میزان ۰/۷۷- بین TCW و TCB برقرار گردید. همبستگی بین NDVI و آلبدو برای شدت‌های بالای بیابان‌زایی منفی بوده و در سایر طبقات، همبستگی مثبتی به دست آمد. این امر به این معنی است که همبستگی بین NDVI و albedo در شدت‌های کم و متوسط مثبت بوده است.

جدول ۴: مقادیر ضریب همبستگی پیرسون و ضریب تعیین بین شاخص‌های برآورد شدت بیابان‌زایی

شاخص‌ها	شیب خط	ضریب پیرسون	ضریب تعیین
TCW, TCG	۱/۳۷	۰/۴۹	۰/۲۴
TCW, TCB	-۱/۸۴	-۰/۷۷	۰/۶۱
TCW, NDVI	۱/۵۲	۰/۴۲	۰/۱۸
TCW, albedo	-۱/۵۷	-۰/۶۵	۰/۴۳
TCG, TCB	-۰/۰۰۸	-۰/۰۰۹	۰/۰۰۱
TCG, NDVI	۱/۲۸	۰/۹۹	۰/۹۸
TCG, albedo	۰/۱۴	۰/۱۶	۰/۰۲
TCB, NDVI	۰/۱۲	۰/۰۸	۰/۰۰۶
TCB, albedo	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۶
NDVI, albedo	۰/۱۷	۰/۲۵	۰/۰۶





شکل ۴: نمودار پراکنش بین شاخص‌های برآورد شدت بیابان‌زایی. منبع: نویسنده

پس از برآورد روابط رگرسیونی، اقدام به ساخت شاخص درجه بیابان‌زایی گردید. اولین قدم برای استخراج درجه بیابان‌زایی در منطقه مورد مطالعه بر اساس روابط بین TCW و TCB، نرمال‌سازی دو شاخص با در نظر گرفتن مقادیر حداقل و حداکثر برای هر یک بوده است. لزوم نرمال‌سازی داده‌ها در فرایند ایجاد فضای ویژگی در پژوهش‌های پیشین به تأیید رسیده است (میا و همکاران، ۲۰۱۱).

$$TCW \text{ normalized} = 100. \frac{(TCW - TCW \min)}{(TCW \min + TCW \max)} \quad (۶)$$

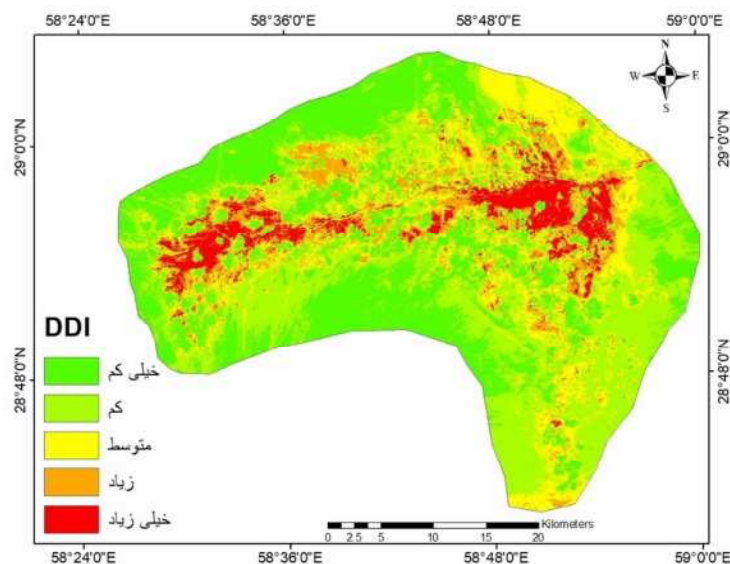
$$TCB \text{ normalized} = 100. \frac{(TCB - TCB_{min})}{(TCB_{min} + TCB_{max})} \quad (۷)$$

برای تحلیل و استخراج درجه‌های مختلف بیابان‌زایی در نمودار پراکنش TCW-TCB، نموداری بر اساس تحلیل همبستگی ترسیم شد. نمودار پراکنش NDVI-albedo همبستگی پایینی را برای نقاط استخراج‌شده نشان داد. نتایج نشان می‌دهد که همبستگی خطی منفی معنی‌داری بین TCW و TCB وجود دارد که مربوط به شدت‌های مختلف بیابان‌زایی است.

شاخص DDI با بهره‌گیری از معادله رگرسیونی NDVI-albedo و TCW-TCB برآورد می‌گردد. میا و همکاران (۲۰۱۱) بر اساس شدت بیابان‌زایی و بر اساس مدل NDVI-albedo مدلی را ارائه کردند. مقایسه روابط TCW با TCB و NDVI-albedo نشان داد که TCW با TCB همبستگی بالایی داشته و در نتیجه تمایز بهتری از پدیده‌های مختلف را ارائه می‌دهد. مدل توسعه‌یافته توسط میا و همکاران (۲۰۱۱) دارای ضعف در تمایز درجات مختلف بیابان‌زایی به‌ویژه در مناطق با بیابان‌زایی متوسط است. در این پژوهش بر اساس روابط بین TCW با TCB روش جدیدی برای استخراج درجات بیابان‌زایی پیشنهاد شد. شاخص DDI از طریق معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$DDI = a.TCW + TCB \quad (۸)$$

در این معادله a نشان‌دهنده شیب معادله است. مقادیر a معادل ۱/۸۴- به‌دست آمد. با اجرای شاخص DDI، شدت بیابان‌زایی بر اساس الگوریتم شکست طبیعی جنکز به پنج طبقه خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد تقسیم‌بندی شده است. تجزیه و تحلیل همبستگی نشان می‌دهد که مناطق با خاک روشن و خاک فقیر از مواد آلی با خشکی بالا مطابقت دارد. مناطق آبی و پوشش گیاهی متراکم به‌دلیل وجود مواد آلی، با روشنایی کم خاک مشخص می‌شوند. شکل ۵ طبقه‌بندی گرافیکی درجات مختلف بیابان‌زایی را بر اساس نمودار پراکنش TCW-TCB نشان می‌دهد. حدود ۱۷/۴ درصد از منطقه مورد مطالعه پس از اعمال شاخص DDI در سطوح بیابان‌زایی زیاد و خیلی زیاد طبقه‌بندی شدند. حدود ۳۰/۱ درصد در سطح بیابان‌زایی خیلی کم طبقه‌بندی می‌شود. بنابراین، شدت بیابان‌زایی در منطقه مورد مطالعه در سال ۲۰۲۳ در نواحی پیرامونی پوشش گیاهی قابل توجه می‌باشد.



شکل ۵: برآورد شاخص DDI با بهره‌گیری از روابط همبستگی و شیب خط TCW-TCB. منبع: نویسنده

جدول ۵: مقادیر بیابان‌زایی بر اساس شاخص DDI در سال ۲۰۲۳

شدت	آستانه	مساحت کیلومتر مربع	درصد
خیلی کم	۳۶۰۶۶/۸	۴۱۰/۸	۳۰/۱
کم	۴۰۶۶۰/۴	۴۴۷/۳	۳۲/۷
متوسط	۴۶۵۶۶/۵	۲۶۸/۶	۱۹/۶
زیاد	۵۲۸۰۰/۶	۱۴۴/۹	۱۰/۵
خیلی زیاد	۱۰۵۹۵۵	۹۵/۳	۶/۹

خطر بیابان‌زایی از غرب به شرق افزایش می‌یابد. مناطق فاقد بیابان‌زایی یا با بیابان‌زایی کم در بخش‌های غربی قرار دارند. شدت بیابان‌زایی در بخش شرقی قابل‌توجه می‌باشد. به‌طور کلی زمین‌های بیابانی که ناشی از حرکت تپه‌های ماسه‌ای و فرسایش بادی است، در اطراف پوشش‌های گیاهی یافت می‌شوند. دقت نقشه‌ها با بهره‌گیری از ماتریس سردرگمی به‌دست آمد. بر این اساس صحت کلی و ضریب کاپا به ترتیب معادل ۹۱/۲ درصد و ۰/۸۶ برآورد شد. قابلیت این شاخص‌ها در برآورد وضعیت بیابان‌زایی با توانمندی‌های ارائه‌شده در یافته‌های زانچتا و همکاران (۲۰۱۶) و لیو و همکاران (۲۰۱۸) دارای همخوانی می‌باشد.

نتیجه‌گیری

شاخص TCT برای ارزیابی شاخص‌های TCW و TCB و به‌دست آوردن رابطه نسبی بین پوشش گیاهی، بدنه‌های آبی و خاک با فرایند بیابان‌زایی گرفته شد. بر اساس تجزیه و تحلیل همبستگی شاخص‌های رطوبت خاک و سایر شاخص‌ها، یک مدل در فضای ویژگی TCW-TCB برای ساخت نقشه شدت بیابان‌زایی در منطقه نرمایش ساخته شد. روش TCT که روشی آسان، قدرتمند، سریع و کارآمد است، می‌تواند با استفاده از ماهواره‌ها و حسگرهای مختلف برای ارزیابی کمی و پایش درجه بیابان‌زایی در مناطق خشک و نیمه‌خشک اجرا شود. کریست^۱ و همکاران (۱۹۸۶) نتایج مشابهی را گزارش کرده‌اند که در آن همبستگی منفی بین TCW و TCB برقرار بوده و TCW می‌تواند داده‌های مناسب‌تری برای مدیریت خاک و پوشش گیاهی ارائه دهد (کریست و همکاران، ۱۹۸۶). یافته‌های این پژوهش تأیید می‌کند که TCW می‌تواند به‌عنوان یک شاخص ارزشمند برای ارزیابی پوشش گیاهی و محیط‌زیست در مناطق خشک و نیمه‌خشک استفاده شود. مشابه پژوهش‌های قبلی (پان و همکاران، ۲۰۱۳)، مدل albedo-NDVI نمی‌تواند تمایز خوبی بین پهنه‌های آبی، خاک برهنه و سایر ویژگی‌های پوشش زمین ارائه دهد. میزان NDVI و آلودگی سطحی برای آب و خاک بایر تیره رنگ مقادیر کمی را به‌دست می‌آورد. در این پژوهش بر اساس رابطه بین بیابان‌زایی و دو شاخص رطوبت خاک TCW و روشنایی خاک TCB یک شاخص پایش بیابان‌زایی پیشنهاد شد. سپس شاخص پیشنهادی با استفاده از لندست ۸ برای ارزیابی کمی بیابان‌زایی به‌کار گرفته شد. بررسی‌ها نشان داد که ترکیب TCT-TCB در مقایسه با ترکیب NDVI-albedo نتایج بهتری را ارائه می‌دهد. شاخص DDI برای برآورد بیابان‌زایی از تصاویر چندطیفی استفاده کرده و برای پایش بیابان‌زایی تنها به تصاویر سنجش‌ازدور وابسته است. شاخص DDI برای نقشه‌برداری کمی شدت بیابان‌زایی استفاده شد. روش اعمال‌شده دقت بالاتری ایجاد کرده است.

¹ Crist

نتایج حاصل از نقشه بیابان‌زایی نشان داد که به ترتیب ۶/۹ و ۱۰/۵ درصد در درجات زیاد و خیلی زیاد طبقه‌بندی می‌شوند. حدود ۳۰/۱ درصد از منطقه نرم‌اشیر در طبقه بیابان‌زایی خیلی کم قرار می‌گیرد. بیشترین مناطق آسیب‌دیده از پدیده بیابان‌زایی در شرق منطقه مورد مطالعه قرار دارند. این مناطق با حرکت تپه‌های ماسه‌ای، شوری خاک و بارندگی و آب کم مشخص می‌شوند. این نقشه‌ها مناطقی که نیاز به حفاظت دارند را شناسایی خواهد کرد. این مناطق به‌طور کلی با خطر بیابان‌زایی بالا و تراکم پوشش گیاهی کم مشخص می‌شوند. داده‌های سنجش‌ازدور چندطیفی مانند لندست می‌توانند برای مطالعات مربوط به بیابان‌زایی استفاده شوند.

منابع

- سرگزی، حسین؛ اونق، مجید؛ بارانی، حسین. (۱۳۹۸). بررسی و رتبه‌بندی عوامل مدیریت تخریب زمین و بیابان‌زایی دشت سیستان، مخاطرات محیط طبیعی، ۸(۲۱)، ۱۲۹-۱۴۶. 10.22111/jneh.2019.25122.1407
- صالح‌پور جم، امین؛ طباطبایی، محمودرضا. (۱۳۹۷). بررسی اثر خصوصیات خاک‌شناسی بر پتانسیل بیابان‌زایی مخروط‌افکنه‌ها با کاربرد روش AHP-FUZZY SAW (مطالعه موردی: مخروط‌افکنه‌های مشرف به ارتفاعات حلقه دره و جارو، منطقه اشتهارد)، مخاطرات محیط طبیعی، ۱۷(۳)، ۱۹۵-۲۱۲. 10.22111/jneh.2018.19785.1236
- Afrasinei, G.M., Melis, M.T., Buttau, C., Arras, Zerrim, A., Guied, M., Ouessar, M., Essifi, B., Zaid, M.B., & Jlali, A. (2017). Classification Methods for Detecting and Evaluating Changes in Desertification-Related Features in Arid and Semi-arid Environments. *Euro-Mediterr. Journal for Environmental Integration*, 2(1), 14. <https://doi.org/10.1007/s41207-017-0021-1>
- Afrasinei, G.M., Melis, M.T., Buttau, C., Bradd, J.M., Arras, C., & Ghiglieri, G. (2017). Assessment of remote sensing-based classification methods for change detection of salt-affected areas (Biskra area, Algeria), *Journal of Applied Remote Sensing*, 11, 016025. <https://doi.org/10.1117/1.JRS.11.016025>
- Afrasinei, G.M., Melis, M.T., Arras, C., Pistis, M., Buttau, C., & Ghiglieri, G. (2018). Spatiotemporal and spectral analysis of sand encroachment dynamics in southern Tunisia. *Eur. Journal for Remote Sensing*. 51, 352-374. <https://doi.org/10.1080/22797254.2018.1439343>
- Ait Lamqadem, A., Saber, H., & Rahimi, A. (2017). Spatiotemporal Changes of Vegetation in the Middle Draa Valley Oasis: A Case Study of M'hamid El Ghizlane Oasis (Morocco). *European Scientific Journal*. 13, 115-132. <https://doi.org/10.19044/esj.2017.v13n24p115>
- Becerril-Piña, R., Díaz-Delgado, C., Mastachi-Loza, C.A., & González-Sosa, E. (2016). Integration of remote sensing techniques for monitoring desertification in Mexico. *Human and Ecological Risk Assessment: International Journal*. 22, 1323-1340. <https://doi.org/10.1080/10807039.2016.1169914>
- Crist, E.P., Laurin, R., & Cicone, R.C. (1986). Vegetation and Soils Information Contained in Transformed Thematic Mapper Data. *Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing 86 Symposium, Zurich, Switzerland*, 8, 1465-1470.
- Gillespie, T.W., Ostermann-Kelm, S., Dong, C., Willis, K.S., Okin, G.S., & MacDonald, G.M. (2018). Monitoring changes of NDVI in protected areas of southern California. *Ecological Indicators*, 88, 485-494. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.01.031>
- Guang, Y., Dong, C., Xinlin, H., Aihua, L., Mingjie, Y., & Xiaolong, L. (2017). Land use change characteristics affected by water saving practices in Manas River Basin, China, using Landsat satellite images. *International Journal of Agricultural Biological Engineering*. 10(6), 123-133.
- Guo, Q., Fu, B., Shi, P., Cudahy, T., Zhang, J., & Xu, H. (2017). Satellite Monitoring the Spatial-Temporal Dynamics of Desertification in Response to Climate Change and Human Activities across the Ordos Plateau, China. *Remote Sensing*, 9(6), 525-542. <https://doi.org/10.3390/rs9060525>
- Hill, J., Stellmes, M., Udelhoven, T., Röder, A., & Sommer, S. (2008). Mediterranean desertification and land degradation: Mapping related land use change syndromes based on satellite observations. *Glob. Planet Change*. 64, 146-157. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2008.10.005>
- Huang, S., & Siegert, F. (2006). Land cover classification optimized to detect areas at risk of desertification in North China based on SPOT VEGETATION imagery. *Journal of Arid Environment*. 67, 308-327. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2006.02.016>
- Jackson, R.D., Idso, S.B., & Otterman, J. (1975). Surface Albedo and Desertification. *Science*, 189, 1012-1015. <https://doi.org/10.1126/science.189.4207.1012>
- Jenks, G.F., 1963. Generalization in statistical mapping. *Annals of the Association of American Geographers*. 53, 15-26.
- Jin, S., & Sader, S.A. (2005). Comparison of time series tasseled cap wetness and the normalized difference moisture index in detecting forest disturbances. *Remote Sensing of Environment*, 94(3), 364-372. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.10.012>

- Kauth, R.J., & Thomas, G.S. (1976). The Tasseled Cap—A Graphic Description of the Spectral-Temporal Development of Agricultural Crops as Seen by LANDSAT. In Proceedings of the Symposium on Machine Processing of Remotely Sensed Data, West Lafayette, IN, USA, 29 June–1 July 1976; Swain, P.H., Ed.; Institute of Electrical and Electronics Engineers, Purdue University Press: West Lafayette, IN, USA, 41–51.
- Lamchin, M., Lee, J.Y., Lee, W.K., Lee, E.J., Kim, M., Lim, C.H., Choi, H.A., & Kim, S.R. (2016). Assessment of land cover change and desertification using remote sensing technology in a local region of Mongolia. *Advances in Space Research*, 57, 64–77. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2015.10.006>
- Li, S.G., Harazono, Y., Oikawa, T., Zhao, H.L., He, Z.Y., & Chang, X.L. (2000). Grassland desertification by grazing and the resulting micrometeorological changes in Inner Mongolia. *Agriculture for Meteorology*, 102, 125–137. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(00\)00101-5](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(00)00101-5)
- Liu, Q., Liu, G., Huang, C., & Xie, C. (2015). Comparison of tasseled cap transformations based on the selective bands of Landsat 8 OLI TOA reflectance images. *International Journal of Remote Sensing*, 36, 417–441. <https://doi.org/10.1080/01431161.2014.995274>
- Liu, Q., Liu, G., & Huang, C. (2018). Monitoring desertification processes in the Mongolian Plateau using MODIS tasseled cap transformation and TGSi time series. *Journal of Arid Land*, 10, 12–26.
- Ma, Z., Xie, Y., Jiao, J., Li, L., & Wang, X. (2011). The Construction and Application of an Aledo-NDVI-Based Desertification Monitoring Model. *Procedia Environmental Science*, 10, 2029–2035. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2011.09.318>
- Naegeli, K., Damm, A., Huss, M., Wulf, H., Schaepman, M., & Hoelzle, M. (2017). Cross-comparison of albedo products for glacier surfaces derived from airborne and satellite (Sentinel-2 and Landsat 8) optical data. *Remote Sensing*, 9, 110–127. <https://doi.org/10.3390/rs90201010>
- Nedkov, R. (2017). Orthogonal transformation of segmented images from the satellite Sentinel-2. *Comptes rendus l'Academie bulgare des Sciences*, 70(5), 687–692.
- Pan, J., & Quin, X. (2010). Extracting desertification from Landsat imagery using a feature space composed of vegetation index and albedo: a case study of Zhangye oasis and its adjacent areas. *Science Mapping*, 3, 193–195.
- Pan, J., & Li, T. (2013). Extracting desertification from Landsat TM imagery based on spectral mixture analysis and Albedo-Vegetation feature space. *Natural Hazards*, 68(2), 915–927. <https://doi.org/10.1007/s11069-013-0665-3>
- Tromp, M., & Epema, G.F. (1998). Spectral mixture analysis for mapping land degradation in semi-arid areas. *Geology. Mijnb.* 77, 153–160
- UNCCD. (1994). United Nations Convention to Combat Desertification in those Countries Experiencing Serious Drought and/or Desertification, particularly in Africa; United Nations Convention to Combat Desertification: Paris, France.
- Vorovencii, I. (2016). Assessing and monitoring the risk of land degradation in Baragan Plain, Romania, using spectral mixture analysis and Landsat imagery. *Environmental Monitoring Assessment*, 188(7), 439–457. <https://doi.org/10.1007/s10661-016-5446-5>
- Wang, X., Hua, T., Lang, L., & Ma, W. (2017). Spatial differences of aeolian desertification responses to climate in arid Asia. *Glob. Planet Change*, 148, 22–28. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2016.11.008>
- Xiao, J., Shen, Y., Ryutaro, T., & Bayaer, W. (2005). Detection of land desertification and topsoil grain size using remote sensing. *International Geoscience Remote Sensing*, 1, 198–201. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2005.1526141>
- Zanchetta, A., Bitelli, G., & Karnieli, A. (2016). Monitoring desertification by remote sensing using the Tasseled Cap transform for long-term change detection. *Natural Hazards*, 83, 223–237. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2342-9>
- Zeng, Y., Xiang, N., & Feng, Z. (2006). Albedo-NDVI Space and Remote Sensing Synthesis Index Models for Desertification Monitoring. *Science Geography*, 26, 75–81. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108230>

Assessment of Grazing Exclusion as a Strategy for Reducing Physical, Chemical, and Biological Soil Risks in the Rangelands of Sarbisheh Plain, South Khorasan Province

Morteza Saberi^{1*} , Mina Behi², Vahid Karimian³

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 Graduate in Range Management, Faculty of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran

3. Assistant Professor, Nature Engineering Department, Faculty of Natural Resources, Yasouj University, Yasouj, Iran

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article Article history: Received: 04 June 2025 Revised: 23 July 2025 Accepted: 10 August 2025 Published: 22 December 2026 Keywords: Rangeland management, Soil depth, Soil porosity, Microbial biomass carbon, Soil health indicators.	This study aimed to investigate the effects of livestock exclusion (enclosure) and grazing on the physical, chemical, and biological properties of soil at three depths (0–15, 15–30, and 30–45 cm) in the Sarbisheh rangelands, located in South Khorasan Province, Iran. The study area has an arid climate with an average annual rainfall of approximately 170 mm and is dominated by shrub vegetation. Soil samples were systematically collected from two sites: one enclosed and one grazed. Physical properties (texture, bulk density, porosity, mean particle diameter), chemical properties (organic carbon, organic matter, total nitrogen, phosphorus, potassium, pH, electrical conductivity, lime content, moisture), and biological properties (microbial biomass carbon and nitrogen, basal and stimulated respiration, microbial fraction) were measured. Data were analyzed using a factorial design under a completely randomized framework. Results indicated that both grazing treatment and soil depth had significant effects ($p < 0.01$) on most measured properties. Higher levels of organic carbon, total nitrogen, phosphorus, and biological indicators were observed in the surface soil of the enclosed area, decreasing with depth and in the grazed area. Microbial indices showed strong positive correlations with other soil properties in the enclosed site. Overall, enclosure improved soil structure, fertility, and microbial activity, thereby enhancing rangeland ecosystem function. However, limitations such as the specific climatic conditions, limited sample size, and low vegetation diversity should be considered. Therefore, further studies in ecologically diverse areas are recommended.
How to Cite: Saberi, M. , Behi, M. and Karimian, V. (2026). Assessment of Grazing Exclusion as a Strategy for Reducing Physical, Chemical, and Biological Soil Risks in the Rangelands of Sarbisheh Plain, South Khorasan Province. <i>Journal of Natural Environmental Hazards</i>, 15 (50), 21-40.	
	© The Author/Authors Publisher: University of Sistan and Baluchestan
DOI: 10.22111/jneh.2025.52306.2118	

EXTENDED ABSTRACT

INTRODUCTION

In the current situation, where a large part of the country's rangelands are under the threat of destruction, adopting effective management policies to preserve and restore these valuable resources is an inevitable necessity. Enclosure, as one of the most effective methods of rangeland restoration, requires accurate scientific evaluation in various climatic and soil conditions. On the other hand, recognizing changes in soil properties can provide valuable information for assessing the sustainability and ecological health of the rangeland ecosystem. Therefore, considering the importance of soil properties in evaluating the health of rangeland ecosystems, this study aims to investigate the effect of enclosure and livestock grazing on the physical, chemical, and biological properties of the soil at three different depths in the rangelands of the Sarbisheh Plain in South Khorasan Province.

DATA AND METHODOLOGY

We selected an enclosed area to investigate the effect of enclosure on the physical, chemical, and biological properties of soil in the Sarbisheh Plain rangelands. A similar undergrazed area was considered adjacent to this site for comparison as a control area (free grazing). We attempted to select the control site in such a way that it had the highest similarity to the enclosure site in terms of general topographic conditions and physiographic features. Soil sampling was conducted at three soil depths: 0–15, 15–30, and 30–45 cm. The samples were first sieved with a 2 mm sieve and then divided into two parts. Some parts of the samples were dried in open air to measure the physical and chemical properties (percentage of sand, clay, silt, bulk density, porosity, average particle diameter, organic carbon, organic matter, total nitrogen, available phosphorus, and potassium, acidity, electrical conductivity, percentage of moisture and lime). The other part was stored in a refrigerator containing dry ice and transported to the laboratory for soil biological tests (basal microbial respiration, stimulated respiration, microbial biomass carbon, microbial biomass nitrogen, and microbial contribution) to perform microbial tests on them (Bastani et al., 2023).

RESULTS AND DISCUSSION

The results of the soil's physical properties indicated that the site had a significant effect on most of these properties at the 1% level, including bulk density, porosity, average particle diameter, sand content, and silt content. Also, soil depth had a significant effect on all the studied properties. The comparison of average soil chemical properties between fenced and grazed areas, as well as at different depths, revealed that the highest concentrations of organic carbon and organic matter were observed at the first depth in the fenced area. In contrast, the lowest values of these two indicators were obtained at the third depth of the grazed area. Total nitrogen also had the highest amount at the first depth of the fenced area and generally decreased with increasing depth. Phosphorus had higher values in the fenced area and at shallower depths. Soil acidity varied slightly across all treatments and fell within the neutral to slightly alkaline range. The analysis of variance results for soil biological properties indicated that the region had a significant effect on most biological indicators, including microbial biomass production, microbial biomass carbon, microbial biomass nitrogen, the ratio of carbon to microbial biomass nitrogen, and microbial metabolic efficiency was significant at the 1% level. However, it did not have a significant effect on the respiration rate caused by the addition of substrate. Also, soil depth significantly affected all of these indicators except SIR and MBC, indicating a decrease in microbial activity and density with increasing depth. The correlation results showed there was a strong positive correlation between all soil biological indicators. Rangeland enclosure can impact soil microbial diversity through changes in plant species composition, biomass, soil pH, carbon, and nutrient availability (Zhou et al., 2023). The highest amount of soil microbial biomass, carbon, and nitrogen was observed in the surface layer, indicating a decrease in microbial activity and population in deeper layers. This decrease was more pronounced in the grazed area and

could be due to soil structure degradation, organic matter depletion, and grazing pressure. Previous studies have shown that moderate grazing can lead to increased microbial biomass, but heavy grazing causes it to decrease (Chen et al., 2016; Northup et al., 1999).

CONCLUSION

The results of this study demonstrate that rangeland enclosure, as an effective management strategy, can play a key role in improving the physical, chemical, and biological properties of soil in arid and semi-arid regions. Rangeland enclosure has effectively enhanced the physicochemical and biological properties of soil. The application of enclosure resulted in increased porosity, reduced compaction, improved texture, and increased organic matter and nutrients such as carbon and nitrogen. Also, biological indicators such as microbial respiration, biomass, and microbial nitrogen were more favorable under enclosure conditions. Overall, enclosure serves as a cost-effective management strategy that can significantly enhance soil quality, restore physical structure, improve chemical fertility, and increase soil diversity and biological function. Consequently, it represents a crucial step toward the sustainability of rangeland ecosystems and the long-term utilization of natural resources. It is recommended that the timing, intensity, and duration of enclosure be carefully adjusted in rangeland management planning according to the climatic, soil, and biodiversity characteristics of the region to enhance the effectiveness of this strategy.

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]

- Bastani, M., Sadeghipour, A., Kamali, N., Zarafshar, M., & Bazoot, S. (2023). How does livestock grazing management affect woodland soil health? *Frontiers in Forests and Global Change*, 6, 1–8.
- Chen, J., Zhou, X., Wang, J., Hruska, T., Shi, W., Cao, J., et al. (2016). Grazing exclusion reduced soil respiration but increased its temperature sensitivity in a meadow grassland on the Tibetan Plateau. *Ecology and Evolution*, 6(3), 675–687. <https://doi.org/10.1002/ece3.1881>
- Northup, B. K., Brown, J. R., & Holt, J. A. (1999). Grazing impacts on the spatial distribution of soil microbial biomass around tussock grasses in a tropical grassland. *Applied Soil Ecology*, 13(3), 259–270. [https://doi.org/10.1016/S0929-1393\(99\)00039-6](https://doi.org/10.1016/S0929-1393(99)00039-6)
- Zhou, W., Li, C., Wang, S., Ren, Z., & Stringer, L. C. (2023). Effects of grazing and enclosure management on soil physical and chemical properties vary with aridity in China's drylands. *Science of The Total Environment*, 877, 162946. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162946>.

مجله علمی پژوهشی مخاطرات محیط طبیعی، دوره ۱۵، شماره ۵۰، شماره پیاپی ۰۴، دی ۱۴۰۵

تحلیل تأثیر قرق به عنوان راهکار کاهش مخاطرات فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک

در مراتع دشت سریش، خراسان جنوبی

مرتضی صابری^{۱*}، مینا بهی^۲، وحید کریمیان^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. دانش آموخته کارشناسی ارشد مرتعداری، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران

۳. استادیار گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۱۴ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۵/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۱۹ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۱۰/۰۱ واژه‌های کلیدی: مدیریت مرتع، عمق خاک، تخلخل خاک، کربن زی‌توده میکروبی، شاخص‌های سلامت خاک.	این مطالعه با هدف بررسی تأثیر قرق و چرای دام بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک در سه عمق (۰-۱۵، ۱۵-۳۰ و ۳۰-۴۵ سانتی‌متر) در مراتع دشت سریش، واقع در استان خراسان جنوبی انجام شد. منطقه مورد مطالعه دارای اقلیم خشک با میانگین بارندگی سالانه حدود ۱۷۰ میلی‌متر و پوشش گیاهی غالب از نوع بوته‌ای است. نمونه‌برداری از دو منطقه قرق و چرا شده به‌صورت سیستماتیک انجام گرفت و ویژگی‌های فیزیکی (بافت، چگالی ظاهری، تخلخل، میانگین قطر ذرات)، شیمیایی (کربن آلی، ماده آلی، نیتروژن کل، فسفر، پتاسیم، pH، هدایت الکتریکی، آهک، رطوبت) و زیستی (کربن و نیتروژن زی‌توده میکروبی، تنفس پایه، تنفس برانگیخته، سهم میکروبی خاک) در نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. داده‌ها با استفاده از آزمون فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. نتایج نشان داد که منطقه و عمق خاک اثر معنی‌داری (در سطح ۱ درصد) بر اکثر ویژگی‌ها دارند. در منطقه قرق، مقادیر کربن آلی، نیتروژن کل، فسفر و شاخص‌های زیستی در لایه سطحی بیشتر بود که در اعماق پایین‌تر و منطقه چرای دام کاهش یافتند. شاخص‌های میکروبی در منطقه قرق با سایر ویژگی‌های خاک همبستگی مثبت و معناداری نشان دادند. به‌طور کلی، قرق با بهبود ساختار، حاصلخیزی و فعالیت زیستی خاک، موجب ارتقاء عملکرد اکوسیستم مرتعی می‌شود و می‌تواند به‌عنوان راهکاری مؤثر و کم‌هزینه در مدیریت پایدار مراتع خشک و نیمه‌خشک مدنظر قرار گیرد. با این حال، شرایط اقلیمی خاص، تعداد محدود نمونه‌ها و تنوع کم پوشش گیاهی از محدودیت‌های این پژوهش محسوب می‌شوند. از این‌رو، انجام مطالعات تکمیلی در مناطق با شرایط اکولوژیکی متنوع‌تر توصیه می‌شود.

استناد: صابری، مرتضی، بهی، مینا و کریمیان، وحید. (۱۴۰۵). تحلیل تأثیر قرق به‌عنوان راهکار کاهش مخاطرات فیزیکی، شیمیایی و زیستی

خاک در مراتع دشت سریش، خراسان جنوبی. *مخاطرات محیط طبیعی*، ۱۵ (۵۰)، ۴۰-۲۱.

ناشر: دانشگاه سیستان و بلوچستان

© نویسنده/ نویسندگان

DOI: 10.22111/jneh.2025.52306.2118



مقدمه

مراعات با پوشش حدود ۴۰ درصد از اراضی غیر یخی زمین نقشی حیاتی در پایداری اکوسیستم‌های جهانی دارند (پترمان و بوژدیگان^۱، ۲۰۲۱). این اکوسیستم‌ها مجموعه گسترده‌ای از خدمات زیست‌محیطی از جمله حفاظت از تنوع زیستی، تشکیل و حفاظت خاک، تنظیم آب و چرخه مواد مغذی را فراهم می‌سازد (بنگسون^۲ و همکاران، ۲۰۱۹؛ سولنبرگر^۳ و همکاران، ۲۰۱۹؛ وانگ^۴ و همکاران، ۲۰۲۲). علاوه بر این اکوسیستم‌های مرتعی سهمی معادل ۳۴ درصد از ذخایر کربن خشکی را به خود اختصاص داده و در کاهش اثرات تغییر اقلیم نقش مؤثری ایفا می‌کنند (بای و کوتروفو^۵، ۲۰۲۲؛ لیو^۶ و همکاران، ۲۰۲۳). با وجود این مزایا، تخریب مراعات یکی از چالش‌های زیست‌محیطی مهم در سطح جهانی به شمار می‌رود. تخمین‌ها نشان می‌دهد که حدود ۴۹ درصد از مراعات جهان دچار درجاتی از تخریب شدید شده‌اند که این امر موجب کاهش عملکرد اکوسیستم و از بین رفتن تنوع زیستی شده است (بارگت^۷ و همکاران، ۲۰۲۱). در ایران مراعات حدود ۸۴ میلیون هکتار را در بر می‌گیرند و رویشگاه بیش از ۷۰۰۰ گونه گیاهی است (کریمیان و بارانی، ۱۴۰۳). در دهه‌های اخیر عوامل متعددی مانند تغییر کاربری اراضی، خشکسالی، مالکیت‌های غیر متمرکز و چرای بی‌رویه دام، موجبات تخریب گسترده پوشش گیاهی و خاک مراعات کشور را فراهم کرده‌اند (اکبرزاده و نیکو، ۱۴۰۲؛ جنیدی و همکاران، ۱۴۰۴).

مطالعات پیشین نشان داده‌اند که سلامت و پایداری اکوسیستم‌های مرتعی به شدت تحت تأثیر مدیریت مرتع به‌ویژه شدت چرا و اعمال قرق قرار دارد (هیو^۸ و همکاران، ۲۰۱۶). چرای مفرط یکی از مهم‌ترین عوامل تخریب مراعات است که با کاهش تنوع گیاهی و زیست‌توده، به افت کیفیت خاک و کارکردهای اکوسیستم منجر می‌شود (ویو^۹ و همکاران، ۲۰۲۱). از طرفی احیای خاک‌های تخریب‌شده امری پیچیده، زمان‌بر و پرهزینه است و گاه ممکن است بازگشت‌ناپذیر باشد (شیدای کرکچ و همکاران، ۱۳۹۸). در نتیجه اعمال سیاست‌های مدیریتی مؤثر همچون قرق مراعات به‌عنوان ابزاری برای بازسازی عملکرد اکوسیستم، بیش از پیش اهمیت یافته است (محمدی‌سامانی و همکاران، ۱۴۰۱).

قرق مراعات، با حذف چرای دام از نواحی مشخص، به‌عنوان روشی کارآمد برای بازیابی پوشش گیاهی، بهبود خواص خاک، افزایش ترسیب کربن و ارتقاء کیفیت اکولوژیکی مورد توجه قرار گرفته است (سان^{۱۰} و همکاران، ۲۰۲۱؛ کیو^{۱۱} و همکاران، ۲۰۲۴؛ ژان^{۱۲} و همکاران، ۲۰۲۰). اثربخشی این روش به شدت وابسته به شرایط بوم‌شناختی، اقلیم، ویژگی‌های خاک و مدت زمان قرق است و نمی‌توان نتایج آن را به تمامی مناطق تعمیم داد. مطالعه ویژگی‌های خاک به‌عنوان شاخصی برای ارزیابی سلامت اکوسیستم مرتعی، از اهمیت زیادی برخوردار است. با توجه به گستردگی و پیچیدگی ویژگی‌های خاک، انتخاب مجموعه‌ای از شاخص‌های کلیدی فیزیکی، شیمیایی و زیستی که نسبت به

1 Petermann & Buzhdygan

2 Bengtsson

3 Sollenberger

4 Wang

5 Bai & Cotrufo

6 Liu

7 Bardgett

8 Hu

9 Wu

10 Sun

11 Qu

12 Zhan

تنش‌های محیطی پاسخ‌گوی سریع باشند، امری ضروری است (حسن^۱ و همکاران، ۲۰۲۰؛ جنیدی و همکاران، ۱۴۰۴). قرق مراتع، در دهه‌های اخیر به طور فزاینده مورد توجه قرار گرفته است (ژان و همکاران، ۲۰۲۳؛ یو^۲ و همکاران، ۲۰۲۱). یافته‌های متناقضی در زمینه تأثیر قرق بر ویژگی‌های خاک و تنوع میکروبی گزارش شده‌اند. برخی مطالعات افزایش معنی‌دار در تنوع میکروبی (وانگ^۳ و همکاران، ۲۰۱۹؛ سو^۴ و همکاران، ۲۰۲۳)، و برخی دیگر کاهش یا تغییرات ناچیز را نشان داده‌اند (گوو^۵ و همکاران، ۲۰۲۳). در واقع، جهت و میزان پاسخ تنوع میکروبی به قرق به شدت تحت تأثیر مدت زمان قرق، گروه میکروبی مورد مطالعه، نوع مرتع، عمق خاک و شرایط آب و هوایی حاکم است (پنگ^۶ و همکاران، ۲۰۲۱). بنابراین، درک جامع از تأثیر قرق بر ویژگی‌های خاک و به ویژه تنوع میکروبی، مستلزم در نظر گرفتن این متغیرهای کلیدی و انجام تحقیقات دقیق و جامع در شرایط مختلف اکولوژیکی است.

مطالعه‌ای که توسط چن^۷ و همکاران (۲۰۲۲) انجام شد، اثرات مدیریت‌های متفاوت قرق، چرای دام دو بار در سال، و چرا در مناطق حصار شده را بر خصوصیات خاک در دو عمق (۳۰-۰ سانتی‌متر و ۱۰۰-۳۰ سانتی‌متر) بررسی نمود. یافته‌های آن‌ها نشان داد که میزان بیومس سطحی و عمقی گیاهان مرتعی و همچنین نسبت ریشه به ساقه آن‌ها، اثرات مثبت و معناداری بر کربن، نیتروژن و فسفر خاک دارد. محققان همچنین اظهار داشتند که نوع مدیریت مراتع، با تأثیرگذاری بر تنوع و درصد پوشش گیاهی، می‌تواند اثرات معناداری بر خصوصیات خاک داشته باشد. در واقع، تراکم و انبوهی پوشش گیاهی به عنوان یک عامل حفاظتی برای خاک عمل می‌کند، پوشش گیاهی متراکم از برخورد مستقیم قطرات باران با سطح خاک جلوگیری کرده و در نتیجه، فرسایش خاک را کاهش می‌دهد. محققین داخلی نیز پژوهش‌های متعددی در زمینه اثر قرق بر ویژگی‌های خاک و پوشش گیاهی انجام داده‌اند. خطیبی و فراهی (۱۴۰۳) تفاوت‌های قابل توجهی را در هدایت الکتریکی، اسیدیته، ماده آلی و پایداری خاکدانه بین مناطق قرق و چرا گزارش کردند. شیدای کرکچ و همکاران (۱۳۹۸) بهبود معنی‌دار در ساختار خاک و پایداری خاکدانه‌ها را پس از قرق مشاهده کردند. در مقابل، غنچه‌پور و همکاران (۱۴۰۲) تفاوت معنی‌داری بین مناطق قرق و چرا از نظر بسیاری از خصوصیات خاک مشاهده نکردند. همچنین در مطالعاتی دیگر، تأثیر مثبت قرق بر غلظت عناصر غذایی و بهبود کیفیت خاک در مراتع گزارش شده است (محمدی‌سامانی و همکاران، ۱۴۰۱؛ حشمتی و قیطوری، ۱۴۰۰؛ قبادی و اخگری، ۱۳۹۹).

در شرایط فعلی که بخش عمده‌ای از مراتع کشور با تهدید تخریب مواجه است، اتخاذ سیاست‌های مدیریتی مؤثر برای حفظ و بازسازی این منابع ارزشمند، ضرورتی اجتناب‌ناپذیر است. قرق به عنوان یکی از مؤثرترین روش‌های احیای مراتع، نیازمند ارزیابی علمی دقیق در شرایط اقلیمی و خاکی گوناگون است. از طرفی، شناخت تغییرات در ویژگی‌های خاک می‌تواند اطلاعات ارزشمندی برای ارزیابی پایداری و سلامت اکولوژیکی اکوسیستم مرتعی فراهم آورد. بنابراین با توجه به اهمیت ویژگی‌های خاک در ارزیابی سلامت اکوسیستم‌های مرتعی، هدف این پژوهش

1 Hasan

2 Yu

3 Wang

4 Su

5 Guo

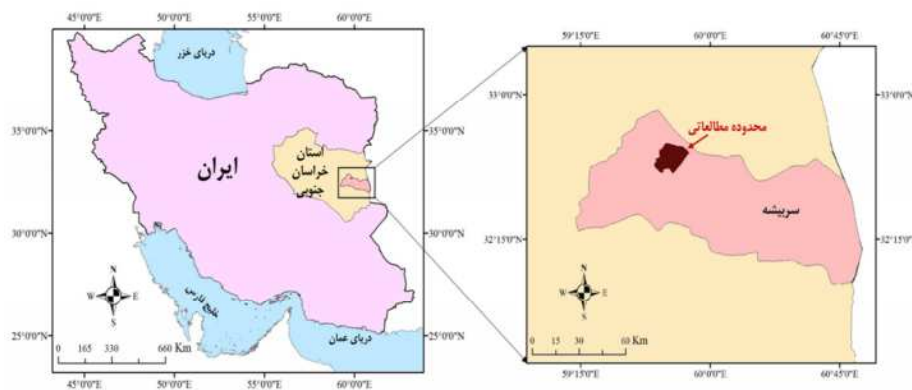
6 Peng

7 Chen

بررسی تأثیر قرق و چرای دام بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک در سه عمق مختلف در مراتع دشت سربیشه در استان خراسان جنوبی است.

داده‌ها و روش‌ها

دشت سربیشه در شمال شهرستان سربیشه واقع شده و فاصله آن تا شهرستان بیرجند مرکز استان خراسان جنوبی، حدود ۶۰ کیلومتر است. این دشت در جهت جنوب شرقی شهرستان بیرجند قرار دارد. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه، بین طول ۳۹° ۵۹' تا ۳۹° ۳۲' و ۵۰° ۵۹' تا ۴۶° ۳۲' درجه عرض جغرافیایی قرار گرفته است. از نظر اقلیمی، منطقه دارای آب و هوای سرد و خشک بوده و متوسط بارندگی سالیانه آن حدود ۱۹۴ میلی‌متر است. همچنین ارتفاع آن از سطح دریا در حدود ۱۸۳۰ متر می‌باشد.



شکل ۱: موقعیت منطقه مورد مطالعه در استان و کشور

نمونه‌برداری خاک

برای بررسی اثر قرق بر خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک محدوده‌ای قرق‌شده در مراتع دشت سربیشه انتخاب شد. به منظور مقایسه، منطقه‌ای مشابه در مجاورت این سایت که تحت چرا قرار داشت، به عنوان منطقه شاهد (چرای آزاد) در نظر گرفته شد. تلاش شد انتخاب سایت شاهد به گونه‌ای باشد که از نظر شرایط کلی توپوگرافی و ویژگی‌های فیزیوگرافی، بیشترین تشابه را با سایت قرق داشته باشد. در هر یک از دو منطقه (قرق و چرای آزاد)، چهار منطقه همگن با شرایط فیزیوگرافی مشابه شناسایی شد. در هر یک از این مناطق، پنج نمونه خاک برداشت گردید؛ به طوری که یک نمونه از مرکز و چهار نمونه دیگر به صورت الگوی بعلاوه (+) در اطراف آن برداشت شدند. نمونه‌برداری از سه عمق خاک شامل ۰-۱۵، ۱۵-۳۰ و ۳۰-۴۵ سانتی‌متر انجام گرفت. نمونه‌های خاک برداشت‌شده از مناطق همگن هر سایت با یکدیگر ترکیب شده و یک نمونه مرکب به دست آمد. این نمونه‌ها ابتدا با الک ۲ میلی‌متری غربال شده و سپس به دو بخش تقسیم شدند. بخشی از نمونه‌ها برای اندازه‌گیری خصوصیات فیزیکی و شیمیایی، در هوای آزاد خشک شدند. بخش دیگر برای انجام آزمایش‌های زیستی خاک، در یخچال حاوی یخ خشک نگهداری و به آزمایشگاه منتقل گردید تا آزمایش‌های میکروبی بر روی آن‌ها انجام شود (کمالی^۱ و همکاران، ۲۰۲۲؛ باستانی^۲ و همکاران، ۲۰۲۳).

1 Kamali

2 Bastani

نمونه‌برداری خاک در پلات‌های (سه عدد پلات برای هر درجه فرسایش) با ابعاد ۱×۱ مترمربع (با توجه به این که محدوده نمونه‌برداری عمدتاً 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 ۳۰-۰ سانتی‌متری برداشت شد. نمونه‌های خاک هر پلات با هم ترکیب شده تا یک نمونه مرکب به‌دست آمد. بخشی از نمونه‌های خاک برای اندازه‌گیری خصوصیات زیستی خاک در فریزر در دمای پایین (۲۵- درجه سانتی‌گراد) به مدت یک هفته نگهداری شدند. از ذوب نمونه‌ها قبل از اندازه‌گیری خصوصیات مدنظر جلوگیری شد. مابقی نمونه‌ها بعد از خشک شدن و عبور از الک برای اندازه‌گیری سایر پارامترهای مورد نظر آماده شدند.

خصوصیات فیزیکی-شیمیایی خاک

در این مطالعه، برای بررسی ویژگی‌های فیزیکی، بافت خاک با روش هیدرومتری تعیین شد و درصد شن، رس و سیلت با استفاده از مثلث بافت خاک (شومان^۱ و همکاران، ۲۰۰۲) محاسبه گردید. وزن مخصوص ظاهری خاک به روش کلوخه‌ای، تخلخل از طریق محاسبه بر اساس چگالی حجمی و میانگین قطر ذرات با استفاده از الک و دستگاه شیکر اندازه‌گیری شد (چن و همکاران، ۲۰۲۲). برای اندازه‌گیری خصوصیات شیمیایی، کربن آلی و ماده آلی با روش اکسیداسیون دی‌کرومات به شیوه والکی و بلاک و نیتروژن کل با استفاده از روش کج‌لدال تعیین گردید. فسفر قابل‌دسترس خاک با روش اولسن و پتاسیم قابل‌دسترس با استفاده از استات آمونیوم خنثی استخراج و توسط دستگاه جذب اتمی اندازه‌گیری شد. میزان اسیدیته و هدایت الکتریکی با روش پتانسیومتری، رطوبت خاک با روش وزنی، و میزان آهک خاک به روش تیتراسیون تعیین گردید (باستانی و همکاران، ۲۰۲۳؛ کمالی و همکاران، ۲۰۲۲؛ کیو و همکاران، ۲۰۲۰).

خصوصیات زیستی خاک

برای ارزیابی خصوصیات زیستی خاک، از روش‌های استاندارد و مرجع استفاده شد. تنفس پایه میکروبی با روش تیتراسیون و تنفس برانگیخته به روش انکوباسیون اندازه‌گیری شد. کربن زیست‌توده میکروبی با استفاده از روش تدخین-استخراج و نیتروژن زیست‌توده میکروبی از طریق روش تدخین با کلروفرم و انکوباسیون اندازه‌گیری گردید. همچنین، برای محاسبه سهم میکروبی، نسبت کربن زیست‌توده میکروبی به کربن آلی کل مورد استفاده قرار گرفت (چن و همکاران، ۲۰۲۲).

تجزیه و تحلیل داده‌ها

پس از انجام آنالیزهای آزمایشگاهی بر روی نمونه‌ها، نرمال بودن داده‌ها با استفاده از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف (Kolmogorov-Smirnov) و همگنی واریانس‌ها با آزمون لوین (Levene) بررسی شد. سپس، تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها در قالب طرح کاملاً تصادفی و با استفاده از آزمون فاکتوریل در نرم‌افزار SPSS انجام گرفت. برای بررسی روابط بین پارامترهای مورد مطالعه و ضریب همبستگی از نرم‌افزار R استفاده گردید.

نتایج و بحث

¹ Schuman

تأثیر قرق بر خصوصیات فیزیکی خاک

تجزیه واریانس خصوصیات فیزیکی خاک نشان داد که اثر منطقه بر بیشتر ویژگی‌ها از جمله جرم مخصوص ظاهری، تخلخل، میانگین قطر ذرات، شن و سیلت در سطح ۱ درصد معنی‌دار بود، اما بر میزان رس اثر معنی‌داری نداشت. همچنین، عمق خاک تأثیر معنی‌داری بر تمام ویژگی‌های مورد بررسی داشت، به‌ویژه بر تخلخل، رس، و سیلت که نشان‌دهنده تغییرات فیزیکی قابل توجه در لایه‌های مختلف خاک است. اثر متقابل منطقه و عمق نیز بر اغلب ویژگی‌ها از جمله جرم مخصوص ظاهری، میانگین قطر ذرات، شن، رس و سیلت معنی‌دار بود، در حالی که اثر آن بر تخلخل معنی‌دار نشد (جدول، ۱).

جدول ۱: تجزیه واریانس خصوصیات فیزیکی خاک

متغیر	درجه آزادی	میانگین مربعات	F
منطقه	۱	۰/۴۹	۵۱۱۵/۱**
	۱	۶۳۰/۳	۷۲۰/۴**
	۱	۲/۰۵	۲۶۵۲/۲**
	۱	۸۸/۹	۱۰۵/۴**
	۱	۰/۱۵	۰/۴ns
عمق	۱	۸۳/۶	۱۳۵/۰**
	۲	۰/۰۲	۲۹۰/۲**
	۲	۱۳۸/۷	۱۵۸/۶**
	۲	۰/۲۳	۲۹۷/۸**
	۲	۲۱۸/۸	۲۵۹/۳**
منطقه* عمق	۲	۸۶/۲	۲۳۴/۶**
	۲	۲۹/۶	۴۷/۹**
	۲	۰/۰۰۲	۲۲/۰۸**
	۲	۰/۱۲۵	۰/۱۴ns
	۲	۰/۰۰۴	۵/۲*
خطا	۲	۶/۴۳	۷/۶**
	۲	۲/۵۰	۶/۸**
	۲	۳/۳۲	۵/۳*
	۱۸	۹/۵۸	-
	۱۸	۰/۸۷	-
	۱۸	۰/۰۰۱	-
	۱۸	۰/۸۴	-
	۱۸	۰/۳۶	-
	۱۸	۰/۶۱	-
	۱۸	-	-

**وجود تفاوت معنی‌دار بین تیمارها در سطح ۱٪، *وجود تفاوت معنی‌دار بین تیمارها در سطح ۵٪، ns عدم تفاوت معنی‌دار.

نتایج مقایسه میانگین خصوصیات فیزیکی خاک در دو منطقه قرق و چراشده و در سه عمق مختلف، بیانگر تفاوت‌های معنی‌دار در ویژگی‌های مورد بررسی است. در هر دو منطقه، جرم مخصوص ظاهری با افزایش عمق افزایش یافته است؛ به‌طوری‌که بیشترین مقدار در عمق سوم منطقه چراشده (۱/۵۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب) و کمترین مقدار در عمق اول منطقه قرق (۱/۱۴) مشاهده شد. تخلخل خاک در جهت معکوس جرم مخصوص ظاهری تغییر کرد؛ یعنی با افزایش عمق کاهش یافت، که با ویژگی فیزیکی خاک‌های متراکم‌تر در عمق‌های پایین سازگار است. بیشترین تخلخل در عمق اول منطقه قرق (۴۱ درصد) و کمترین آن در عمق سوم منطقه چراشده (۲۲ درصد) مشاهده شد. میانگین قطر ذرات نیز با عمق کاهش یافت و در منطقه چراشده نسبت به منطقه قرق، در تمامی عمق‌ها کمتر بود. در مورد درصد شن، بیشترین مقدار در عمق اول منطقه چراشده (۶۴ درصد) و کمترین آن در عمق سوم منطقه قرق (۴۹ درصد) ثبت شد. در مقابل، درصد رس و سیلت در منطقه قرق به‌طور نسبی بیشتر از

چرا شده بوده و در عمق سوم قرق به بیشترین مقدار خود (رس: ۱۹ درصد، سیلت: ۳۱ درصد) رسید (جدول، ۲). بر اساس نتایج به دست آمده در مطالعه حاضر، موقعیت مکانی و عمق خاک نقش تعیین کننده ای در تغییرپذیری خصوصیات فیزیکی خاک ایفا می کنند. در هر دو منطقه قرق و چرا شده و در سه عمق مختلف، جرم مخصوص ظاهری با افزایش عمق، افزایش یافته است. این روند افزایشی، بیانگر فشردگی بیشتر خاک در لایه های زیرین به دلیل فشار لایه های بالایی و کاهش میزان مواد آلی در عمق است. مطالعه شیدای کرکچ و همکاران (۱۳۹۸) نشان داد که پایداری خاکدانه در لایه سطحی بیشتر از لایه های عمقی است. مطالعات مختلف، اثرات مستقیم و غیرمستقیم شدت چرای دام بر ویژگی های خاک را آشکار کرده اند. لگدمال شدن ناشی از فعالیت دام در طول دوره چرا می تواند منجر به فشردگی خاک شده و در نتیجه، ظرفیت نگهداری آب، میزان هوادهی و شرایط اکسایش-کاهش خاک را به طور قابل توجهی تغییر دهد (لیو و همکاران، ۲۰۱۵؛ کافمن و همکاران، ۲۰۱۳؛ لیو و همکاران، ۲۰۱۵). در مطالعه حاضر تخلخل خاک در جهت عکس جرم مخصوص ظاهری تغییر کرده است؛ به طوری که با افزایش عمق، میزان تخلخل کاهش یافته است. این ویژگی با رفتار فیزیکی خاک های تراکم تر در لایه های عمیق تر همخوانی دارد. همچنین، میانگین قطر ذرات در منطقه چرا شده در تمام عمق ها کمتر از منطقه قرق بوده است؛ که نشان دهنده وجود خاک ریزدانه تر و با بافت سنگین تر در منطقه تحت چرا می باشد. یافته ها نشان می دهند که منطقه قرق، نسبت به منطقه چرا شده، دارای خاکی با تخلخل بیشتر، ذرات ریزتر و درصد بالاتری از رس و سیلت است. در حالی که منطقه چرا شده از خاکی با بافت درشت تر، تخلخل کمتر و تراکم بالاتر برخوردار است. این تفاوت ها احتمالاً ناشی از فشار ناشی از چرای دام و تخریب فیزیکی خاک در منطقه چرا شده است که منجر به کاهش کیفیت ساختاری خاک در آن منطقه شده است. مطالعات پیشین نیز تأیید کرده اند که قرق می تواند موجب بهبود کیفیت خاک در اکوسیستم های مرتعی شود (ژانگ و همکاران، ۲۰۲۲؛ کیو و همکاران، ۲۰۲۴). (در این راستا چرای مفرط می تواند اثرات مخربی از جمله؛ فشردگی بیش از حد سطح خاک، کاهش نفوذپذیری، ایجاد شرایط نامناسب برای رشد ریشه گیاهان، اختلال در تبادلات گازی، کاهش فعالیت زیستی موجودات خاکزی، افزایش فرسایش آبی و بادی و در نهایت، از بین رفتن تدریجی خاک شود (خطیبی و فراهی، ۱۴۰۳).

جدول ۲: مقایسه میانگین خصوصیات فیزیکی

منطقه	عمق	جرم مخصوص	تخلخل	میانگین قطر	شن	رس	سیلت
قرق	اول	۱/۱۴ ^f	۴۱ ^a	۱/۴۳ ^a	۵۸ ^b	۱۴ ^c	۲۷ ^c
	دوم	۱/۲۳ ^e	۳۸ ^b	۱/۲۳ ^b	۵۲ ^d	۱۸ ^b	۲۹ ^b
	سوم	۱/۲۹ ^d	۳۳ ^c	۱/۱۳ ^c	۴۹ ^e	۱۹ ^a	۳۱ ^a
چرا شده	اول	۱/۴۶ ^c	۳۱ ^d	۰/۸۶ ^d	۶۴ ^a	۱۳ ^d	۲۲ ^d
	دوم	۱/۵۱ ^b	۲۷ ^e	۰/۶۷ ^e	۵۴ ^c	۱۸ ^b	۲۶ ^c
	سوم	۱/۵۵ ^a	۲۲ ^f	۰/۴۹ ^f	۵۳ ^d	۲۰ ^a	۲۶ ^c

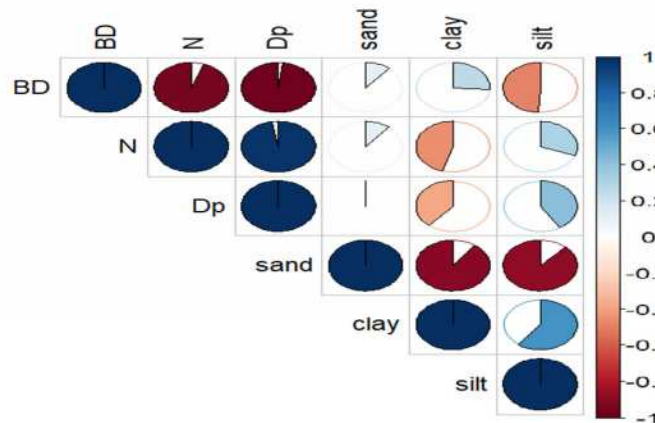
حروف متفاوت در هر ستون نشان دهنده تفاوت معنی دار در هر سایت می باشد.

نتایج تحلیل همبستگی پیرسون (جدول، ۳)، میان متغیرهای فیزیکی خاک (جدول، ۳) نشان داد که بین چگالی ظاهری (BD)، تخلخل (DP) و نیتروژن خاک (N) همبستگی های قوی و معناداری وجود دارد، به طوری که چگالی ظاهری با نیتروژن ($r = -0.94$) و با تخلخل ($r = -0.97$) همبستگی منفی قوی داشت. تخلخل و نیتروژن نیز همبستگی مثبت بالایی ($r = 0.97$) نشان دادند که بیانگر نقش ساختار فیزیکی خاک در پشتیبانی از فرآیندهای تغذیه ای است. این یافته ها بیانگر آن است که افزایش تراکم خاک می تواند به کاهش ظرفیت نگهداری هوا و مواد مغذی منجر شود.

همچنین، همبستگی مثبت بین تخلخل و نیتروژن بر نقش ساختار فیزیکی خاک در پشتیبانی از فرآیندهای تغذیه‌ای دلالت دارد. همچنین درصد رس و سیلت با درصد شن رابطه معکوس قوی داشتند (به ترتیب $r = -0/90$ و $r = -0/88$)، که این هم‌راستا با ویژگی‌های بافتی خاک است. درصد رس با نیتروژن همبستگی متوسط مثبت ($r = 0.45$) نشان داد (شکل، ۲). رابطه مثبت میان درصد رس و نیتروژن احتمالاً به دلیل ظرفیت بالاتر خاک‌های سنگین‌تر در نگهداری مواد مغذی قابل توضیح است. نتایج مطالعه خطی و فراهی (۱۴۰۳) نشان از همبستگی مثبت بین ماده آلی و پایداری خاکدانه، و نیز بین اسیدیته و هدایت الکتریکی دارد. نتایج ویژگی‌های خاک در شرایط چرا و قرق مطالعه حاضر بیانگر این مطلب است که، ساختار فیزیکی خاک نقش کلیدی در کنترل فرآیندهای بیوشیمیایی و ذخیره مواد مغذی ایفا می‌کند، و قرق می‌تواند به‌عنوان یک راهبرد مؤثر در جهت ارتقاء کیفیت خاک و پایداری اکوسیستم‌های مرتعی مورد استفاده قرار گیرد.

جدول ۳: نتایج تجزیه ضریب همبستگی بین متغیرهای فیزیکی خاک

	BD	N	DP	Sand	Clay	Silt
BD	۱					
N	-۰/۹۴	۱				
DP	-۰/۹۷	۰/۹۷	۱			
Sand	۰/۱	۰/۱۰	۰/۰۰۵	۱		
Clay	۰/۲۵	۰/۴۵	-۰/۳۸	-۰/۹۰	۱	
Silt	-۰/۴۹	۰/۳۰	۰/۴۱	-۰/۸۸	۰/۵۹	۱



شکل ۲: همبستگی بین متغیرهای فیزیکی خاک

تأثیر قرق بر خصوصیات شیمیایی خاک

نتایج تجزیه واریانس خصوصیات شیمیایی خاک نشان داد که اثر منطقه بر تمام ویژگی‌های شیمیایی به‌جز اسیدیته در سطح ۱ درصد معنی‌دار بود، به‌ویژه برای کربن آلی، ماده آلی، آهک، نیتروژن کل و فسفر. همچنین، اثر عمق خاک بر اکثر ویژگی‌ها از جمله کربن آلی، ماده آلی، آهک، نیتروژن کل، پتاسیم و هدایت الکتریکی نیز در سطح معنی‌داری بالا ظاهر شد، در حالی که تنها فسفر در عمق‌های مختلف تفاوت معنی‌داری نداشت. اثر متقابل منطقه و عمق نیز برای بیشتر ویژگی‌ها از جمله کربن آلی، نیتروژن کل، فسفر و هدایت الکتریکی معنی‌دار بود، که نشان‌دهنده

وابستگی تغییرات شیمیایی خاک به ترکیب هم زمان مکان و عمق است. اسیدیته تنها ویژگی بود که در بیشتر شرایط تفاوت معنی داری نداشت (جدول، ۴). این نتایج نشان می دهد که وضعیت شیمیایی خاک به شدت تحت تأثیر موقعیت جغرافیایی و عمق خاک قرار دارد.

جدول ۴: تجزیه واریانس خصوصیات شیمیایی خاک

متغیر	درجه آزادی	میانگین مربعات	F
منطقه	۱	۱/۱۳	۶۰۰/۰۹**
	۱	۱/۹۲	۱۹۸/۱**
	۱	۶/۹۹	۹۸/۹**
	۱	۰/۱۳	۱۵۷/۳**
	۱	۱/۱۹	۴۳۵/۷**
	۱	۱۶/۶۶	۶/۸*
	۱	۰/۰۷	۱۷۷/۲**
	۱	۰/۰۰۸	۱/۸ ^{ns}
عمق	۲	۰/۵۷	۳۰۶/۵**
	۲	۲/۱	۲۱۶/۳**
	۲	۵/۱	۷۳/۰۳**
	۲	۰/۱۵	۱۸۴/۴**
	۲	۰/۰۰۷	۲/۴ ^{ns}
	۲	۵۳۰/۱	۲۱۶/۸**
	۲	۰/۰۴	۱۱۳/۴**
	۲	۰/۰۱	۴/۶*
منطقه* عمق	۲	۰/۱۳	۷۱**
	۲	۰/۰۷	۷/۵**
	۲	۰/۶۵	۹/۲**
	۲	۰/۰۱	۲۰/۸**
	۲	۰/۰۳	۱۲/۴**
	۲	۱۱/۱	۴/۵*
	۲	۰/۰۰۴	۱۱/۱**
	۲	۰/۰۰۵	۱/۳ ^{ns}
خطا	۱۸	۰/۰۰۲	-
	۱۸	۰/۰۱	-
	۱۸	۰/۰۷	-
	۱۸	۰/۰۰۱	-
	۱۸	۰/۰۰۳	-
	۱۸	۲/۴	-
	۱۸	۰۰۰	-
	۱۸	۰/۰۰۴	۰

**وجود تفاوت معنی دار بین تیمارها در سطح ۱٪، *وجود تفاوت معنی دار بین تیمارها در سطح ۵٪، ^{ns}عدم تفاوت معنی دار.

نتایج مقایسه میانگین خصوصیات شیمیایی خاک در مناطق قرق و چرا شده و در عمق های مختلف نشان داد که بیشترین مقدار کربن آلی و ماده آلی در عمق اول منطقه قرق مشاهده شد، که بیانگر تجمع بیشتر مواد آلی در سطح خاک تحت مدیریت حفاظتی است. یافته های پژوهش های پیشین نیز مؤید این نتایج هستند (شیدای کرکچ و

همکاران، ۱۳۹۸؛ محمدی‌سامانی و همکاران، ۱۴۰۱). کاهش مقدار کربن و ماده آلی در منطقه چراشده احتمالاً به دلیل تخریب پوشش گیاهی و فعالیت‌های چرای است که با یافته‌های Chen و همکاران (۲۰۲۲) نیز همخوانی دارد. نتایج نشان داد، منطقه قرق در مقایسه با منطقه چراشده از نظر ویژگی‌های شیمیایی به‌ویژه در لایه‌های سطحی در وضعیت بهتری قرار دارد. در مقابل، کمترین مقادیر این دو شاخص در عمق سوم منطقه چراشده به دست آمد. آهک در منطقه چراشده و به‌ویژه در عمق سوم بیشترین مقدار را داشت، در حالی که در قرق مقدار آن کمتر بود. نیتروژن کل نیز در عمق اول منطقه قرق بیشترین مقدار را داشت و به‌طور کلی با افزایش عمق کاهش یافت. فسفر در منطقه قرق و در عمق‌های کمتر، مقادیر بالاتری داشت. هدایت الکتریکی و پتاسیم نیز در منطقه قرق نسبت به چرا شده کمتر بودند. اسیدیت خاک در همه تیمارها تفاوت اندکی داشت و در محدوده خنثی تا کمی قلیایی قرار داشت (جدول ۵). نتایج مطالعه‌ی قبادی و اختری (۱۳۹۹) در حوضه گنبد شهرستان همدان نشان داد که غلظت پتاسیم و روی در منطقه قرق و غلظت منیزیم در منطقه چراشده به‌طور معنی‌داری افزایش یافته است. همچنین، خاک منطقه چرا دارای pH پایین‌تری بود که با یافته‌های خطیبی و فراهی (۱۴۰۳) همخوانی دارد. به نظر می‌رسد یکی از عوامل اسیدی شدن خاک، فصولات دامی باشد. در همین زمینه، یاتس^۱ و همکاران (۲۰۲۰) گزارش کردند که pH خاک در مناطقی با شدت چرای کمتر، بالاتر از مناطقی با چراهای سنگین است. در پژوهش محمدی‌سامانی و همکاران (۱۴۰۱)، مشخص شد که بیشترین میزان کربن، نیتروژن، فسفر و پتاسیم مربوط به مناطق تحت مدیریت مرتعی بوده و کمترین مقادیر این عناصر در مناطق تحت چرای دام مشاهده شده است. همچنین، در این مطالعه افزایش اسیدیت و هدایت الکتریکی در مناطق چراشده به‌طور معناداری گزارش شد. با این حال، یافته‌های غنچه‌پور و همکاران (۱۴۰۲) در استان کرمان، که به مقایسه‌ی تنوع پوشش گیاهی و خصوصیات خاک بین دو منطقه قرق و چرا پرداختند، نشان داد که اختلاف معنی‌داری بین متغیرهایی نظیر درصد رس، سیلت، شن، هدایت الکتریکی، اسیدیت، آهک، کلسیم، منیزیم و سدیم بین دو منطقه مشاهده نشد. در حشمتی و قیطوری (۱۴۰۰) در زمینه نقش قرق بلندمدت در بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و پایداری آن در مراتع ییلاقی دالاهو (کرمانشاه) مشخص شد که اجرای پنج سال قرق مداوم منجر به بهبود قابل توجه کیفیت و پایداری خاک می‌شود. وجود برخی تفاوت‌ها و تضادها در نتایج مطالعات مختلف می‌تواند به عواملی همچون شرایط اقلیمی، نوع خاک، مدت زمان اعمال قرق، شدت چرای پیشین و تنوع گیاهی مناطق مورد بررسی نسبت داده شود. این موضوع اهمیت تحلیل‌های چند بعدی را در مطالعات منابع طبیعی و مدیریت مراتع نشان می‌دهد.

جدول ۵: مقایسه میانگین خصوصیات شیمیایی

منطقه	عمق	کربن آلی	ماده آلی	آهک	نیتروژن	فسفر	پتاسیم	هدایت	اسیدیت
قرق	اول	۲/۱۲ ^a	۲/۹۷ ^a	۱۳/۶ ^d	۰/۸ ^a	۱/۸۷ ^d	۱۵۹ ^b	۱/۳ ^e	۷/۹۴ ^b
	دوم	۱/۶۶ ^b	۲/۳۰ ^b	۱۴ ^d	۰/۶۵ ^b	۱/۸۴ ^d	۱۵۱ ^d	۱/۴۴ ^d	۸/۰۷ ^a
	سوم	۱/۳۱ ^d	۱/۸۲ ^c	۱۵/۵ ^b	۰/۴۳ ^e	۲ ^c	۱۴۵ ^e	۱/۴۸ ^c	۸/۰۴ ^{ab}
چرا شده	اول	۱/۴۰ ^c	۲/۲۰ ^b	۱۴/۷ ^c	۰/۵۷ ^c	۲/۴۱ ^a	۱۶۳ ^a	۱/۴۶ ^{cd}	۷/۹۵ ^b
	دوم	۱/۳۱ ^d	۱/۹ ^c	۱۵/۶ ^b	۰/۴۸ ^d	۲/۳۴ ^{ab}	۱۵۳ ^c	۱/۵۲ ^b	۷/۹۸ ^{ab}
	سوم	۱/۱۱ ^e	۱/۳۰ ^d	۱۶ ^a	۰/۳۸ ^f	۲/۳۰ ^b	۱۴۴ ^e	۱/۵۷ ^a	۸/۰۲ ^{ab}

حروف متفاوت در هر ستون نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار می‌باشد.

تحلیل ضرایب همبستگی پیرسون (جدول ۶)، بین ویژگی‌های شیمیایی خاک نشان داد که کربن آلی (OC) با بیشتر متغیرها، از جمله نیتروژن کل (TN)، آهک (CaCO₃) و هدایت الکتریکی (EC)، همبستگی منفی و نسبتاً قوی (به

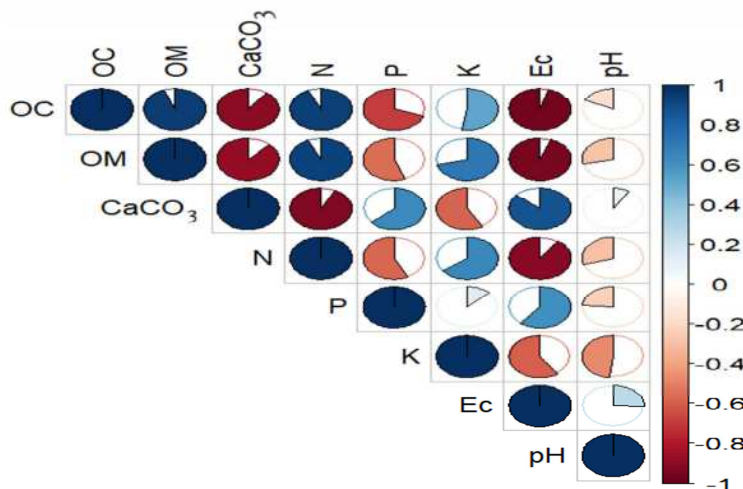
¹ Yates

ترتیب $r = -0.93$ ، $r = -0.89$ و $r = -0.95$ دارد. همچنین، بین مواد آلی (OM) و EC نیز همبستگی منفی بالا مشاهده شد ($r = -0.94$)، که نشان دهنده تأثیر منفی شوری بر محتوای آلی خاک است. در مقابل، همبستگی بین PH و سایر متغیرها عمدتاً ضعیف و غیرمعنادار بود، که نشان می‌دهد اسیدیته خاک در این نمونه‌ها تأثیر کمتری بر سایر خصوصیات شیمیایی داشته است. روابط مثبت بین TN با OM و OC نیز نشان دهنده ارتباط تنگاتنگ چرخه نیتروژن با وضعیت مواد آلی خاک است (شکل، ۳). نتایج تحلیل همبستگی نیز بیانگر آن است که افزایش شوری و کربنات کلسیم منجر به کاهش کیفیت شیمیایی خاک می‌شود. به‌طور خاص، تأثیر منفی شوری بر محتوای آلی خاک مشاهده شده است، در حالی که اسیدیته خاک نقش کمتری در تغییرات سایر ویژگی‌های شیمیایی داشته است. همچنین ارتباط قوی میان چرخه نیتروژن و وضعیت مواد آلی خاک مشاهده گردید، که اهمیت ماده آلی را در پایداری تغذیه‌ای خاک نشان می‌دهد. به‌طور کلی، این یافته‌ها تأکید دارند که افزایش شوری و کربنات کلسیم با کاهش عناصر تغذیه‌ای و کیفیت شیمیایی خاک همراه است.

جدول ۶: نتایج تجزیه ضریب همبستگی بین متغیرهای شیمیایی خاک

	OC	OM	CaCO ₃	TN	P	K	Ec	pH
OC	۱							
OM	-۰/۹۴	۱						
CaCO ₃	۰/۸۹	-۰/۸۷	۱					
TN	-۰/۹۳	۰/۹۲	-۰/۹۲	۱				
P	۰/۶۹	-۰/۵۵	۰/۶۳	-۰/۵۷	۱			
K	۰/۵۲	۰/۷۱	-۰/۵۸	۰/۶۴	۰/۱۲	۱		
Ec	-۰/۹۵	-۰/۹۴	۰/۸۶	-۰/۹۰	۰/۶۰	-۰/۵۹	۱	
pH	-۰/۱۷	-۰/۲۸	-۰/۰۸	-۰/۲۹	-۰/۲۳	-۰/۴۷	۰/۲۶	۱

کربن آلی (OC)، ماده آلی (OM)، آهک (CaCO₃)، نیتروژن کل (TN)، فسفر (P)، پتاسیم (K)، هدایت الکتریکی (EC)، اسیدیته (pH).



شکل ۳: همبستگی بین متغیرهای شیمیایی خاک

تأثیر قرق بر خصوصیات زیستی خاک

نتایج تجزیه واریانس خصوصیات زیستی خاک نشان داد که اثر منطقه بر بیشتر شاخص‌های زیستی از جمله تولید بیوماس میکروبی (MP)، کربن میکروبی خاک (MBC)، نیتروژن میکروبی خاک (MBN)، نسبت C/N میکروبی (MBC/MBN) و کارایی متابولیک میکروبی (MQ) در سطح یک درصد معنی‌دار بود، اما بر سرعت تنفس ناشی از افزودن سوبسترا (SIR) تأثیر معنی‌داری نداشت. همچنین، عمق خاک اثر معنی‌داری بر همه این شاخص‌ها به‌جز SIR و MBC داشت، که بیانگر کاهش فعالیت و تراکم میکروبی با افزایش عمق است. اثر متقابل منطقه و عمق نیز تنها بر MBC، MBN و MQ معنی‌دار بود (جدول، ۷).

جدول ۷: تجزیه واریانس خصوصیات زیستی خاک

متغیر	درجه آزادی	میانگین مربعات	F
منطقه	۱	۰/۰۸	۲۵۶/۳**
	۱	۴/۹۷	۱/۴ ^{ns}
	۱	۹۱۲۶	۲۴۱۵/۷**
	۱	۴/۰۳	۵۲۰/۶**
	۱	۲۸/۲	۱۰/۷**
عمق	۱	۴۳۶/۳	۹۵/۰**
	۲	۰/۰۸	۲۵۳/۴**
	۲	۳/۷	۱/۱ ^{ns}
	۲	۳۳۴۷/۱	۸۸۶/۰**
	۲	۱۰/۷	۱۳۸۷/۳**
منطقه* عمق	۲	۱۷۲۵/۶	۶۵۴/۳**
	۲	۸۹/۹	۱۹/۵**
	۲	۰/۰۰	۰/۴۷ ^{ns}
	۲	۳/۳۵	۰/۹۸ ^{ns}
	۲	۶۶/۵	۱۷/۶**
خطا	۲	۰/۱۱	۱۴/۶**
	۲	۲/۴۹	۰/۹۴ ^{ns}
	۲	۳۲۴/۸	۷۰/۷**
	۱۸	۰/۰۰	-
	۱۸	۳/۳	-
	۱۸	۳/۷	-
	۱۸	۰/۰۰	-
	۱۸	۲/۶	-
	۱۸	۴/۵	-

**وجود تفاوت معنی‌دار بین تیمارها در سطح ۱٪، *وجود تفاوت معنی‌دار بین تیمارها در سطح ۵٪، ^{ns}عدم تفاوت معنی‌دار

نتایج مقایسه میانگین خصوصیات زیستی خاک نشان داد که منطقه قرق در تمامی عمق‌ها از نظر شاخص‌های زیستی وضعیت بهتری نسبت به منطقه چراشده دارد. در منطقه قرق، بالاترین میزان تولید بیوماس میکروبی (MP)، کربن میکروبی خاک (MBC) و نیتروژن میکروبی خاک (MBN) در عمق اول مشاهده شد و این مقادیر با افزایش عمق به‌طور معنی‌داری کاهش یافتند. در مقابل، منطقه چراشده در همه عمق‌ها مقادیر به‌مقاربت پایین‌تری از MBC و MBN داشت و کمترین میزان این شاخص‌ها در عمق سوم دیده شد. نسبت MBC/MBN در منطقه چراشده و به‌ویژه در عمق سوم بالاتر بود. کارایی متابولیک میکروبی (MQ) در منطقه قرق و عمق دوم بیشترین مقدار را نشان داد، در حالی که در منطقه چراشده به‌ویژه در عمق سوم، به کمترین حد خود رسید (جدول، ۸). برای ارزیابی کیفیت خاک، بررسی ویژگی‌هایی ضروری است که در مدت زمان کوتاهی به تنش‌های محیطی پاسخ دهند (حسن و همکاران، ۲۰۲۰). در این میان، ویژگی‌های بیولوژیکی مانند تنفس پایه، پتانسیل معدنی شدن کربن، تنفس میکروبی، سهم میکروبی، ضریب متابولیکی و کربن زیست‌توده میکروبی به تغییرات محیطی در کوتاه

مدت واکنش نشان می‌دهند (جنیدی و همکاران، ۱۴۰۴). نتایج تحلیل خصوصیات زیستی خاک نشان داد که شرایط مدیریتی منطقه و عمق خاک نقش تعیین کننده‌ای در وضعیت زیستی دارند، و ویژگی‌های زیستی نسبت به این عوامل واکنش‌پذیری بالایی از خود نشان می‌دهند. در مطالعه حاضر، ویژگی‌های زیستی خاک در منطقه قرق در تمامی اعماق نسبت به منطقه چراشده وضعیت بهتری داشتند. قرق مراتع می‌تواند از طریق تغییر در ترکیب گونه‌های گیاهی، زیست‌توده، pH خاک، در دسترس بودن کربن و مواد مغذی، بر تنوع میکروبی خاک اثرگذار باشد (ژائو^۱ و همکاران، ۲۰۲۳). بیشترین میزان بیوماس، کربن و نیتروژن میکروبی خاک در لایه سطحی مشاهده شد که نشان‌دهنده کاهش فعالیت و جمعیت میکروبی در لایه‌های عمیق‌تر است. این کاهش در منطقه چراشده بیشتر مشهود بود و می‌تواند ناشی از تخریب ساختار خاک، کاهش مواد آلی و فشار ناشی از چرا باشد. مطالعات پیشین نشان داده‌اند که چرا با شدت متوسط می‌تواند به افزایش زیست‌توده میکروبی منجر شود، اما چرا سنگین باعث کاهش آن می‌شود (چن و همکاران، ۲۰۱۶؛ نورثوپ^۲ و همکاران، ۱۹۹۹). با این حال تحقیقات دیگر به تأثیرات گوناگون شدت چرا بر ترکیب، تنوع و ساختار جامعه میکروبی اشاره کرده‌اند (الیورا^۳ و همکاران، ۲۰۱۶؛ دلگادو-بارکیوریزو^۴ و همکاران، ۲۰۱۶). تغییرات ناشی از چرا می‌تواند عملکردهای خاک را به‌ویژه در اکوسیستم‌های تحت تنش شدید مانند مناطق خشک تحت تأثیر قرار دهد. افزایش تنوع گیاهی ناشی از قرق، با افزایش ترشحات ریشه‌ای و در دسترس بودن مواد مغذی، می‌تواند تنوع میکروبی خاک را ارتقاء دهد. بازخوردهای مثبت بین میکروارگانیسم‌های خاک و جوامع گیاهی نیز در این افزایش مؤثر هستند. مطالعات اخیر تغییرات متنوعی در تنوع میکروبی گزارش کرده‌اند (سو و همکاران، ۲۰۲۳؛ گوو و همکاران، ۲۰۲۳). نسبت نیتروژن زیست‌توده میکروبی به کربن زیست‌توده میکروبی در منطقه چراشده، به‌ویژه در عمق سوم، بالاتر بود؛ که می‌تواند نشان‌دهنده تنش زیستی یا عدم تعادل در ساختار جامعه میکروبی باشد. پژوهشگران معتقدند جهت و شدت پاسخ تنوع میکروبی به قرق به‌طور عمده به مدت‌زمان قرق بستگی دارد و تحت تأثیر نوع میکروارگانیسم، نوع مرتع، عمق خاک و شرایط اقلیمی قرار دارد (آلدسابل^۵ و همکاران، ۲۰۱۵؛ پنگ و همکاران، ۲۰۲۱؛ ویو^۶ و همکاران، ۲۰۲۲).

جدول ۸: مقایسه میانگین خصوصیات زیستی

عمق	MP	SIR	MBC	MBN	MBC/MBN	MQ
قرق						
اول	۰/۶۸ ^a	۰/۸۷ ^a	۱۳۴/۲ ^a	۴/۰۲ ^a	۳۳/۳ ^d	۶۳/۳ ^c
دوم	۰/۵۹ ^b	۰/۸۸ ^a	۱۲۳/۲ ^b	۳/۱۲ ^b	۳۹/۴ ^b	۷۳/۹ ^a
سوم	۰/۴۸ ^d	۰/۵۳ ^a	۹۲/۵ ^d	۱/۵۲ ^d	۶۰/۸ ^a	۶۹/۲ ^b
چرا شده						
اول	۰/۵۶ ^c	۰/۶۸ ^a	۹۷/۲ ^c	۳/۰۷ ^b	۳۱/۷ ^d	۶۹/۴ ^b
دوم	۰/۴۸ ^d	۰/۵۷ ^a	۷۷/۷ ^e	۲/۱۶ ^c	۳۶/۰۱ ^c	۵۹/۳ ^d
سوم	۰/۳۵ ^e	۰/۵۶ ^a	۵۸/۰ ^f	۰/۹۷ ^e	۵۹/۴ ^a	۵۲/۱ ^e

حروف متفاوت در هر ستون نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار می‌باشد.

نتایج تجزیه ضریب همبستگی پیرسون (جدول ۹)، بین شاخص‌های زیستی خاک نشان داد که میان تمامی متغیرهای میکروبی شامل جمعیت میکروبی (MP)، تنفس میکروبی پایه (SIR)، کربن و نیتروژن زی‌توده میکروبی (MBC و MBN)، نسبت MBC/MBN و سهم میکروبی (MQ) همبستگی مثبت و بسیار قوی وجود دارد ($r = -0.94$).

¹ Zhou

² Northup

³ Olivera

⁴ Delgado-Baquerizo

⁵ Aldezabal

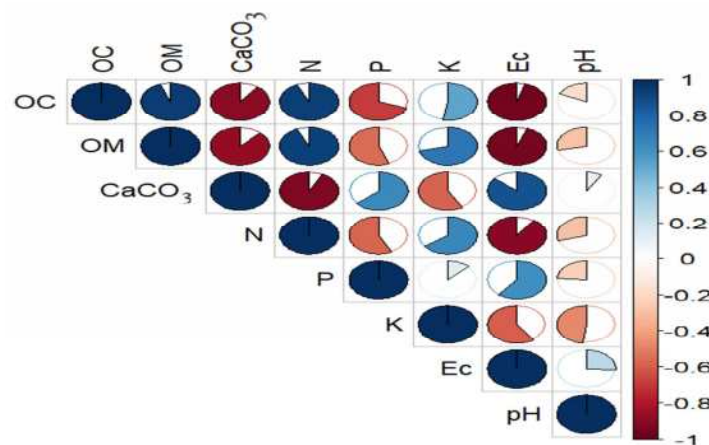
⁶ Wu

۰/۰۱ < P). بیشترین همبستگی بین MBN و SIR ($r = -0/99$) مشاهده شد. همچنین MQ با تمامی شاخص‌های دیگر همبستگی بالایی داشت ($r = -0/93$ تا $r = -0/98$) (شکل، ۴). نتایج همبستگی حاکی از ارتباط نزدیک بین فعالیت تنفسی و میزان نیتروژن میکروبی است. سهم میکروبی نیز با تمامی شاخص‌ها همبستگی بالایی داشت که نقش آن را به عنوان شاخص تلفیقی برای سلامت زیستی خاک برجسته می‌سازد. این روابط نشان می‌دهند که تغییر در یک شاخص می‌تواند به طور همزمان سایر ویژگی‌های میکروبی را تحت تأثیر قرار دهد. بنابراین، تحلیل یکپارچه این شاخص‌ها برای ارزیابی دقیق کیفیت زیستی خاک ضروری است. به طور کلی، نتایج ویژگی‌های زیستی خاک متأثر از چرای دام و قرق در مطالعه حاضر نشان داد، قرق و کاهش فشار چرای دام موجب بهبود فعالیت و سلامت زیستی خاک شده است.

جدول ۹: نتایج تجزیه ضریب همبستگی بین متغیرهای زیستی خاک

	MP	SIR	MBC	MBN	MBC/MBN	MQ
MP	۱					
SIR	۱/۰۰	۱				
MBC	۰/۹۹	۰/۹۷	۱			
MBN	۰/۹۸	۰/۹۹	۰/۹۵	۱		
MBC/MBN	۰/۹۷	۰/۹۸	۰/۹۳	۰/۹۷	۱	
MQ	۰/۹۷	۰/۹۸	۰/۹۳	۰/۹۷	۰/۹۷	1

تنفس میکروبی پایه (MP)، تنفس بر انگیخته (SIR)، کربن زیتوده میکروبی (MBC)، نیتروژن زیتوده میکروبی (MBC)، نسبت کربن بر نیتروژن زیتوده میکروبی (MBC/MBN)، سهم میکروبی (MQ)



شکل ۴: همبستگی بین متغیرهای زیستی خاک

نتیجه‌گیری

مطالعه اثرات قرق بر ویژگی‌های خاک، به‌ویژه در شرایط اقلیمی خشک و نیمه‌خشک که مراتع به شدت تحت فشار دام قرار دارند، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این اطلاعات می‌تواند به مدیران منابع طبیعی کمک کند تا تصمیمات علمی‌تری در راستای مدیریت پایدار منابع مرتعی اتخاذ کنند. در این تحقیق، تأثیر قرق بر برخی ویژگی‌های کلیدی خاک مورد بررسی قرار گرفت تا نقش این روش مدیریتی در بهبود کیفیت خاک مراتع به صورت دقیق‌تری تبیین شود. محققان بر این باورند که برنامه‌های قرق با هدف مقابله با اثرات نامطلوب چرای بیش از حد و

تسهیل احیای مراتع از طریق حذف چرای دام در مناطق هدف نتایج مطلوبی را در پی دارد (سان^۱ و همکاران، ۲۰۲۱). نتایج این پژوهش به روشنی نشان داد که قرق مراتع، به عنوان یک راهبرد مدیریتی مؤثر، می تواند در بهبود ویژگی های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک در مناطق خشک و نیمه خشک نقش کلیدی ایفا کند. قرق مراتع به طور مؤثری موجب بهبود خصوصیات فیزیکوشیمیایی و زیستی خاک شده است. اعمال قرق افزایش تخلخل، کاهش فشردگی، بهبود بافت و افزایش مواد آلی و عناصر غذایی مانند کربن و نیتروژن را همراه داشته است. همچنین، شاخص های زیستی از جمله تنفس میکروبی، بیوماس و نیتروژن میکروبی در شرایط قرق وضعیت مطلوب تری داشتند. در مجموع، قرق به عنوان یک اقدام مدیریتی و کم هزینه می تواند در ارتقاء کیفیت خاک، بازسازی ساختار فیزیکی، بهبود حاصلخیزی شیمیایی و ارتقاء تنوع و عملکرد زیستی خاک مؤثر باشد و در نتیجه، گامی مهم در جهت پایداری اکوسیستم های مرتعی و بهره برداری بلندمدت از منابع طبیعی به شمار آید. توصیه می شود در برنامه ریزی مدیریت مراتع، زمان بندی، شدت و مدت قرق با توجه دقیق به ویژگی های اقلیمی، خاک شناسی و تنوع زیستی منطقه تنظیم شود تا اثربخشی این استراتژی افزایش یابد.

تقدیر و تشکر

بدین وسیله از حمایت مالی دانشگاه زابل (Grant code: IR-UOZ-GR-8721) برای انجام این پژوهش تشکر و قدردانی می گردد.

منابع

- اکبرزاده، پیمان، و نیکو، شیمیا. (۱۴۰۱). اثر تغییر کاربری اراضی بر کیفیت آب زیرزمینی (مطالعه موردی: حوضه آبخیز دامغان). (مجله /کوهیدرولوژی، ۹(۲)، ۴۳۷-۴۵۹. <https://doi.org/10.22059/ije.2022.340711.1622>
- جنیدی، حامد، بازگیر، الهام، و کمالی، نادیا. (۱۴۰۴). اثرپذیری ویژگی های بیولوژیک خاک مرتع در مواجهه با تغییر کاربری به دیمزار (مطالعه موردی: مراتع کرمانشاه). (پژوهش های فرسایش محیطی، ۱۵(۱)، ۲۵-۴۴.
- حشمتی، مسیب، و قیطوری، محمد. (۱۴۰۰). نقش قرق طولانی مدت مرتع بر بهبود برخی ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاک و پایداری آن. (پژوهش های خاک، ۳۵(۱)، ۱۵-۲۶. <https://doi.org/10.22092/ijrsr.2021.352965.573>
- خطیبی، رسول، و فراهی، محسن. (۱۴۰۳). بررسی اثر قرق بر خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک مراتع (مطالعه موردی: شمال استان گلستان، مراتع صوفیکم). (فصلنامه علوم محیطی، ۲۲(۳)، ۴۸۳-۴۹۴. <https://doi.org/10.48308/envs.2024.1360>
- شیدای کرکج، اسماعیل، رضائی، حسین، نیک نهاده قره ماخر، حمید، جعفری فوتمی، عیسی، و شریفیان، ابوالفضل. (۱۳۹۸). نقش قرق در تغییر پایداری خاکدانه و ساختمان خاک های مرتعی استان گلستان. (تحقیقات مرتع و بیابان ایران، ۲۶(۴)، ۹۰۴-۹۱۷. <https://doi.org/10.22092/ijrdr.2019.120682>
- غنچه پور، ماشالله، صادقی نیا، مجید، باغستانی، ناصر، پور میرزایی، احمد، و کدوری، محمدرضا. (۱۴۰۲). مقایسه تنوع پوشش گیاهی و خاک در دو عرصه قرق و چرا (مطالعه موردی: درمنه زارهای منطقه دهنو، بردسیر، کرمان). (تحقیقات مرتع و بیابان ایران، ۳۰(۱)، ۱۵۲-۱۶۳. <https://doi.org/10.22092/ijrdr.2023.128952>
- قبادی، عیسی، و اختری، داوود. (۱۳۹۹). تأثیر قرق بر برخی خصوصیات شیمیایی و آلی خاک (مطالعه موردی: حوضه گنبد شهر همدان). (علوم و تکنولوژی محیط زیست، ۱۰(۲۲)، ۲۳۱-۲۳۳.

¹ Sun

- کریمیان، وحید، و بارانی، حسین. (۱۴۰۳). شناسایی گیاهان دارویی-صنعتی پرکاربرد مراتع بیابانی و بررسی میزان آگاهی جامعه محلی نسبت به آنها (مطالعه موردی: شهرستان خواف، خراسان رضوی). مدیریت بیابان، ۱۲(۴)، ۴۱-۶۲.
<https://doi.org/10.22034/jdmal.2025.2045459.1490>
- محمدی سمانی، کیومرث، جنیدی جعفری، حامد، و مرادی، پریا. (۱۴۰۱). تغییرپذیری برخی خصوصیات شیمیایی خاک در شرایط مختلف مدیریتی مرتع. تحقیقات مرتع و بیابان/ایران، ۲۹(۲)، ۱۲۶-۱۳۰.
<https://doi.org/10.22092/ijdr.2022.126760>
- Aldezabal, A., Moragues, L., Odriozola, I., Mijangos, I. (2015). Impact of grazing abandonment on plant and soil microbial communities in an Atlantic mountain grassland. *Appl. Soil Ecol.* 96, 251–260. doi: 10.1016/j.apsoil.2015.08.013.
- Bai, Y., & Cotrufo, M. F. (2022). Grassland soil carbon sequestration: Current understanding, challenges, and solutions. *Science*, 377, 603–608. <https://doi.org/10.1126/science.abo2380>
- Bardgett, R. D., Bullock, J. M., Lavorel, S., Manning, P., Schaffner, U., Ostle, N., et al. (2021). Combatting global grassland degradation. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2, 720–735. <https://doi.org/10.1038/s43017-021-00207-2>
- Bengtsson, J., Bullock, J. M., Egoh, B., Everson, C., Everson, T., O'Connor, T., et al. (2019). Grasslands—More important for ecosystem services than you might think. *Ecosphere*, 10(2), e02582. <https://doi.org/10.1002/ecs2.2582>
- Chen, J., Zhou, X., Wang, J., Hruska, T., Shi, W., Cao, J., et al., 2016. Grazing exclusion reduced soil respiration but increased its temperature sensitivity in a Meadow Grassland on the Tibetan Plateau. *Ecol. Evol.* 6, 675–687.
- Chen, L., Baoyin, T., & Xia, F. (2022). Grassland management strategies influence soil C, N, and P sequestration through shifting plant community composition in semi-arid grasslands of northern China. *Ecological Indicators*, 34, 1–12.
- Delgado-Baquerizo, M., Maestre, F.T., Reich, P.B., Jeffries, T.C., Gaitan, J.J., Encinar, D., et al., 2016. Microbial diversity drives multifunctionality in terrestrial ecosystems. *Nat. Commun.* 7, 10541.
- Guo, Q., Wen, Z., Ghanizadeh, H., Fan, Y., Zheng, C., Yang, X., et al. (2023). Stochastic processes dominate the assembly of the soil fungal community in grazing-excluded grasslands in northwestern China. *Journal of Soils and Sediments*, 23, 156–171. <https://doi.org/10.1007/s11368-022-03315-8>
- Hasan, S. S., Zhen, L., Miah, M. G., Ahamed, T., & Samie, A. (2020). Impact of land use change on ecosystem services: A review. *Environmental Development*, 34, 100527.
- Hu, Z., Li, S., Guo, Q., Niu, S., He, N., Li, L., et al. (2016). A synthesis of the effect of grazing exclusion on carbon dynamics in grasslands in China. *Global Change Biology*, 22, 1385–1393. <https://doi.org/10.1111/gcb.13133>
- Kauffman, J.B., Thorpe, A.S., Brookshire, E.N.J., 2004. Livestock exclusion and belowground ecosystem responses in riparian meadows of eastern Oregon. *Ecol. Appl.* 14, 1671–1679.
- Liu, L., Sayer, E. J., Deng, M., Li, P., Liu, W., Wang, X., et al. (2023). The grassland carbon cycle: Mechanisms, responses to global changes, and potential contribution to carbon neutrality. *Fundamental Research*, 3, 209–218. <https://doi.org/10.1016/j.fmre.2022.09.028>
- Liu, N., Kan, H.M., Yang, G.W., Zhang, Y.J., 2015. Changes in plant, soil, and microbes in a typical steppe from simulated grazing: explaining potential change in soil C. *Ecol. Monogr.* 85, 269–286.
- Northup, B.K., Brown, J.R., Holt, J.A., 1999. Grazing impacts on the spatial distribution of soil microbial biomass around tussock grasses in a tropical grassland. *Appl. Soil Ecol.* 13, 259–270.
- Olivera, N.L., Prieto, L., Bertiller, M.B., Ferrero, M.A., 2016. Sheep grazing and soil bacterial diversity in shrublands of the Patagonian Monte, Argentina. *J. Arid Environ.* 125, 16–20.
- Peng, W., Shazhou, A., Mei, K., Chao, L., Yurong, H., Jiyong, L., et al. (2021). Effects of enclosure on plant and soil restoration in the Junggar Desert. *Journal of Resources and Ecology*, 12, 840–848. <https://doi.org/10.5814/j.issn.1674-764x.2021.06.012>
- Petermann, J. S., & Buzhdygan, O. Y. (2021). Grassland biodiversity. *Current Biology*, 31, R1195–R1201. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2021.06.060>
- Qobadi, A., Akhgari, S. and Davood, V., 2020. The Impact of enclosure on some chemical and organic soil properties (Case Study: Gonbad Shahar watershed, Hamadan). *Environmental Science and Technology Quarterly*. 22(10), 221-233. <https://doi.org/10.22034/jest.2021.32769.4059>.
- Qu, Q., Deng, L., Shangguan, Z., Sun, J., He, J., Wang, K., et al. (2024). Belowground C sequestrations response to grazing exclusion in global grasslands: Dynamics and mechanisms. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 360, 108771. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108771>
- Sollenberger, L. E., Kohmann, M. M., Dubeux, J. C. B., & Silveira, M. L. (2019). Grassland management affects the delivery of regulating and supporting ecosystem services. *Crop Science*, 59, 441–459. <https://doi.org/10.2135/cropsci2018.09.0594>
- Su, J., Ji, W., Sun, X., Wang, H., Kang, Y., & Yao, B. (2023). Effects of different management practices on soil microbial community structure and function in alpine grassland. *Journal of Environmental Management*, 327, 116859. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116859>
- Sun, J., Fu, B., Zhao, W., Liu, S., Liu, G., Zhou, H., et al. (2021). Optimising grazing exclusion practices to achieve Goal 15 of the Sustainable Development Goals in the Tibetan Plateau. *Science Bulletin*, 66, 1493–1496. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2021.03.014>
- Wang, Y., Lv, W., Xue, K., Wang, S., Zhang, L., Hu, R., et al. (2022). Grassland changes and adaptive management on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Nature Reviews Earth & Environment*, 3, 668–683. <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00330-8>
- Wang, Z., Zhang, Q., Staley, C., Gao, H., Ishii, S., Wei, X., et al. (2019). Impact of long-term grazing exclusion on soil microbial community composition and nutrient availability. *Biology and Fertility of Soils*, 55, 121–134. <https://doi.org/10.1007/s00374-018-01336-5>

- Wu, Y., Chen, D., Delgado-Baquerizo, M., Liu, S., Wang, B., Wu, J., et al. (2022). Long-term regional evidence of the effects of livestock grazing on soil microbial community structure and functions in surface and deep soil layers. *Soil Biology and Biochemistry*, 168, 108629. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.108629>
- Yang, Y., Wu, L., Lin, Q., Yuan, M., Xu, D., Yu, H., et al., 2013. Responses of the functional structure of soil microbial community to livestock grazing in the Tibetan alpine grassland. *Glob. Change Biol.* 19, 637–648.
- Zhan, T., Zhao, W., Feng, S., & Hua, T. (2022). Plant community traits respond to grazing exclusion duration in alpine meadow and alpine steppe on the Tibetan plateau. *Frontiers in Plant Science*, 13, 863246. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.863246>
- Zhou, W., Li, C., Wang, S., Ren, Z. and Stringer, L. C., 2023. Effects of grazing and enclosure management on soil physical and chemical properties vary with aridity in China's drylands. *Science of The Total Environment*, 877, 162946. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162946>.

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

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

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

Email: r.zakerinejad@geo.ui.ac.ir

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2138-0973>

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

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article Article history: Received: 19 August 2025 Revised: 11 December 2025 Accepted: 31 December 2025 Published: 22 December 2026 Keywords: Darab Watershed, Flood, Data Mining, Maximum Entropy.	Floods are among the most significant natural hazards, causing severe damage to lives, property, and the environment annually. The Darab watershed in Fars province, due to its specific climatic conditions, topography, and geological structure, is recognized as one of the areas at high risk of flooding. This study aims to prepare of flood risk map by using the Maximum Entropy (MaxEnt) model and analyze the factors influencing floods in the studied watershed. This is a quantitative and applied research that uses field and available data, focusing on areas with high flood risk. By utilizing data mining techniques, GIS, and remote sensing images, flood risk areas are classified. Various environmental and topographic factors were used as independent variables, including 19 environmental parameters such as precipitation, land slope, soil type, drainage density, land use, and moisture, and topographic indices and etc. These data were collected from reliable sources such as satellite imagery, Digital Elevation Models (DEM), meteorological stations, and geological maps. After data preprocessing, the models were run, and their accuracy was evaluated. Finally, the flood susceptibility map was validated using AUC, and high-risk areas were identified. Preparation of the flood risk map shows that approximately 20% of the Darab watershed is at high risk, especially in low-lying areas with poor vegetation and inappropriate land use. It was also determined that variables such as precipitation, distance from stream, and elevation have the most significant impact on flood occurrence. The results indicate that the MaxEnt model has acceptable capability in predicting high-risk areas and can play an effective role in crisis management and regional planning.
How to Cite: Zakerinejad, R. , Ostad Hosseini, Z. and Ghobishawi, Y. (2026). Darab Watershed, Flood, Data Mining, Maximum Entropy. <i>Journal of Natural Environmental Hazards</i>, 15 (50), 41-66.	
	© The Author/Authors Publisher: University of Sistan and Baluchestan
DOI: 10.22111/jneh.2025.52982.2136	

EXTENDED ABSTRACT

INTRODUCTION

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

DATA AND METHODOLOGY

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

RESULTS AND DISCUSSION

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

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

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

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

CONCLUSION

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

ETHICAL CONSIDERATIONS

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

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

REFERENCES

References [in Persian]

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

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

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

References [in English]

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

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

مجله علمی پژوهشی مخاطرات محیط طبیعی، دوره ۱۵، شماره ۵۰، شماره پیاپی ۰۴، دی ۱۴۰۵

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

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

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

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

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

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۲۸ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۹/۲۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۱۰ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۱۰/۰۱ واژه‌های کلیدی: حوضه داراب، سیلاب، داده کاوی، حداکثر آنتروپی.	سیلاب‌ها از جمله مهم‌ترین مخاطرات طبیعی به شمار می‌آیند که سالانه خسارت‌های جبران‌ناپذیری به جان، مال و محیط زیست وارد می‌کنند. حوضه آبخیز داراب در استان فارس، به‌دلیل شرایط خاص اقلیمی، توپوگرافی و ساختار زمین‌شناسی، به‌عنوان یکی از مناطق در معرض خطر در برابر سیلاب شناخته می‌شود. هدف این پژوهش، پهنه‌بندی مناطق سیل‌خیز با استفاده از مدل حداکثر آنتروپی (مکسنت) و تحلیل عوامل موثر بر سیلاب در حوضه مورد مطالعه است. این یک پژوهش کمی و کاربردی است که از داده‌های میدانی و کتابخانه‌ای استفاده می‌کند و بر مناطق با خطر سیل بالا تمرکز دارد. با بهره‌گیری از فن داده‌کاوی، GIS و تصاویر سنجش‌ازدور برای پهنه‌بندی خطر سیل طبقه‌بندی می‌شوند. عوامل مختلف محیطی و توپوگرافی به‌عنوان متغیرهای مستقل مورد استفاده شامل ۱۹ تا از پارامترهای محیطی نظیر بارندگی، شیب زمین، نوع خاک، تراکم زهکشی، کاربری اراضی و شاخص‌های رطوبت و توپوگرافی و غیره بودند. این داده‌ها از منابع معتبری نظیر تصاویر ماهواره‌ای، مدل‌های رقومی ارتفاعی (DEM)، ایستگاه‌های هواشناسی و نقشه‌های زمین‌شناسی جمع‌آوری شدند. پس از پیش‌پردازش داده‌ها، مدل‌ها اجرا و دقت آن‌ها ارزیابی گردید. در نهایت، نقشه حساسیت به سیل با استفاده از AUC اعتبارسنجی و پهنه پرخطر شناسایی می‌شوند. تحلیل‌های پهنه‌بندی نشان داد که حدود ۲۰ درصد از حوضه آبخیز داراب در معرض خطر بالا قرار دارد، به‌ویژه در مناطق کم‌ارتفاع با پوشش گیاهی پایین و کاربری اراضی نامناسب است. همچنین، مشخص شد که متغیرهایی نظیر بارش، فاصله از آبراهه و ارتفاع بیشترین تأثیر را در وقوع سیلاب دارند. نتایج حاکی از آن است که مدل MaxEnt توانایی قابل‌قبولی در پیش‌بینی مناطق پرخطر دارد و می‌تواند نقش موثری در مدیریت بحران و برنامه‌ریزی‌های منطقه‌ای ایفا کند.
استناد: ذاکری نژاد، رضا، استاد حسینی، زهرا و غبیشاوی، یاسمین. (۱۴۰۵). تهیه نقشه خطر سیل با استفاده از مدل حداکثر آنتروپی در حوضه آبخیز داراب. <i>مخاطرات محیط طبیعی</i>، ۱۵ (۵۰)، ۶۶-۴۱.	
نویسنده/ نویسندگان ناشر: دانشگاه سیستان و بلوچستان	
DOI: 10.22111/jneh.2025.52982.2136	

مقدمه

سیلاب، یک سطح آب بالا در امتداد یک کانال رودخانه و یا در یک ساحل که منجر به طغیان زمینی می‌شود و به‌طور معمول زیر آب نمی‌رود (Thomas, 2016). سیلاب از مهم‌ترین بلایای طبیعی است که خسارت‌های فراوانی به مناطق تحت تأثیر خود وارد می‌کند. برای مدیریت سیلاب باید عوامل تولید و ایجاد سیل شناسایی شده و سپس مناطق دارای پتانسیل زیاد در تولید سیل تعیین شود (Badei B et al. 2016). سیل یکی از مهم‌ترین بلایای طبیعی در بسیاری از کشورهای دنیا است، به‌طوری‌که بالاترین تلفات جانی (۴۳/۷ درصد) در بین کشورهای مختلف در فاصله سال‌های ۱۹۶۷ و ۱۹۹۰ مربوط به سیلاب بوده است (شریفی و نوروزی، ۱۳۷۸). در کشور ایران، در طی چندین سال اخیر ۱۲۶۰ سیل با میانگین سالانه ۳۰ سیل رخ داده است که این آمار حاکی از رشد وقوع سیل در سال‌های اخیر به میزان ۴۰٪ می‌باشند (Dovonce, 2000). برای این منظور داده‌های سنجش‌ازدور (RS) و سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS) ابزاری مفید و توانمند برای شناسایی عوامل مؤثر بر پتانسیل سیل‌خیزی می‌باشند. از خسارت‌هایی که به سختی می‌توان ارزش پولی آن‌ها را حساب کرد، می‌توان به تغییرات محیطی مانند آلودگی آب، فرسایش، پر شدن مخازن سدها از رسوب که توسط سیل صورت می‌گیرد، اشاره کرد (Smith, 2001). پهنه‌بندی پتانسیل سیل‌خیزی عبارت از تعیین و توصیف مناطق دارای پتانسیل از نظر رواناب‌های سطحی است. این عمل بر اساس مشابهت خصوصیت‌های هیدرولوژیکی و هیدروژئولوژیکی مناطق مورد بررسی صورت گرفته و از این طریق امکانات استفاده از هر زون مشخص و ارزیابی می‌شود. در واقع با تعیین محل‌های دارای پتانسیل بالا به نوعی می‌توان یک ارزیابی کلی از وضعیت سیل‌خیزی منطقه نیز به‌دست آورد؛ چرا که وجود پتانسیل بالای سیل‌خیزی در یک منطقه، مقدمه‌ای بر افزایش احتمال وقوع سیل در آن منطقه می‌باشد. عوامل گوناگونی در جاری شدن سیل دخالت دارند که از جمله آن شدت بارندگی، شیب حوضه، نفوذپذیری زمین، شرایط توپوگرافی، ویژگی‌های پوشش گیاهی و درجه اشباع شدن خاک را می‌توان به‌عنوان عوامل مؤثر در جاری شدن سیلاب نام برد (Sala et al., 2000). دشت‌های سیلابی نقش مهمی در محیط‌های هیدرولوژیکی و اکولوژیکی رودخانه ایفا می‌کنند. مدل‌سازی سیل برای درک فرآیندهای هیدرولوژیکی و اکولوژیکی در این اکوسیستم‌ها ضروری است (Huang et al. 2012; Huang et al. 2013). تهیه نقشه حساسیت سیل یک گام ضروری در رویکردهای مدیریت خطر سیل است که می‌تواند به‌عنوان یک ارزیابی کمی یا کیفی از توزیع فضایی سیل تعریف شود که در یک محیط رخ می‌دهد یا به احتمال زیاد رخ می‌دهد (Rahman et al. 2019). عوامل متعدد نقش مهمی در سیل ایفا می‌کنند و شناخت نقش این عوامل مرتبط با سیل ممکن است پیش‌بینی بلایای سیل و استراتژی‌های مقابله را افزایش دهد (Al-Hinai & Abdalla, 2021). فناوری سنجش‌ازدور روشی مؤثر برای مطالعه این خصوصیت‌های طغیان با استفاده از تصاویر سنجش‌ازدور چندمکانی، چندزمانی و چندطیفی ارائه کرده است (Chen et al., 2014b; Huang et al., 2012; Huang et al., 2013; Huang et al., 2014c; Ticehurst et al., 2013). این مدل حساسیت سیل را می‌توان با استفاده از روش‌های آماری پیشرفته که می‌توانند در محیط R و GIS ادغام شوند، به‌دست آورد (El-Haddad et al. 2020). مطالعات متعددی با استفاده از مدل‌های متنوعی در زمینه پهنه‌بندی خطر سیل انجام شده است. از جمله، استفاده از مدل آنتروپی شانون، مدل سلسله‌مراتبی و فازی در پهنه‌بندی و شناسایی عوامل تأثیرگذار بر رخداد خطر سیلاب استفاده شده است (توسط هینای^۱ و عبدالله^۲ ۲۰۲۱؛ ذاکری نژاد و عیاش، ۱۴۰۳؛ میرموسوی و اسمعیلی، ۱۴۰۰؛

1 Hinai

2 Abdalla

نوحانی و همکاران، ۱۳۹۵). در بسیاری از مطالعات اخیر به ارزیابی و مقایسه‌ی الگوریتم‌های مختلف داده‌کاوی جهت تهیه نقشه حساسیت به سیل استفاده شده است (تقی‌آوند و همکاران، ۱۳۹۹؛ رحیم پور و رضائی مقدم، ۱۴۰۳؛ توکلی و همکاران، ۱۴۰۳؛ پاندی^۱ و همکاران، ۲۰۲۱؛ دووال^۲ و همکاران، ۲۰۲۳؛ طاهری‌زاده و همکاران، ۲۰۲۳؛ بهاتارای^۳ و همکاران، ۲۰۲۴؛ هیتوری^۴ و همکاران، ۲۰۲۴). مدل حداکثر آنتروپی (مکسنت^۵) به‌عنوان یکی از الگوریتم‌های داده‌کاوی به‌دلیل اینکه تنها نیاز به داده‌های رخداد سیلاب می‌باشد، قابلیت بالای در پهنه‌بندی خطر سیلاب دارد. در پژوهشی در حوضه آبخیز زیوه ارومیه، به بررسی خطر سیلاب با استفاده از مدل مکسنت و GLM پرداخته شد که شاخص‌های زمین‌شناسی، فاصله از آبراهه، ارتفاع و شیب را به‌عنوان مهم‌ترین عوامل مؤثر بر پهنه‌بندی خطر سیلاب معرفی نمودند (حنیفی نیا و عبقری، ۱۴۰۴). شاخص‌های توپوگرافی مختلف از جمله ارتفاع، شیب، جهت شیب، قدرت فرساینده‌گی آبراهه (SPi^6) و رطوبت خاک (TwI^7)، از عوامل اصلی در پیش‌بینی و پهنه‌بندی مخاطراتی همانند فرسایش و سیل اشاره شده است (ذاکری نژاد ۱۳۹۹؛ شیرانی و ذاکری نژاد ۲۰۲۲). در یک مطالعه‌ی دیگر توسط آچو ارکید^۸ و همکاران (۲۰۲۵)، با ادغام فن‌های یادگیری ماشین و روش AHP، رویکردی جامع برای ارزیابی و مدیریت خطر سیل ارائه دادند. نتایج این پژوهش نشان داد که فن تجمیعی ML عملکرد بهتری نسبت به مدل‌های مجزا دارد. همچنین، هارشاسیمها^۹ و موهان بهات^{۱۰} (۲۰۲۳) با استفاده از مدل مکسنت و AHP، شاخص رطوبت توپوگرافیک، ارتفاع و شیب را در ارزیابی مناطق سیل‌زده مؤثر دانستند و برتری مدل مکسنت را در تولید نقشه‌های خطر سیل تأیید کردند. این مطالعات نشان می‌دهند که استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین و رویکردهای ترکیبی، می‌تواند به بهبود دقت و کارایی ارزیابی خطر سیل و مدیریت بلایا کمک کند. پژوهش‌های مختلف محققین در سال اخیر به وضوح نشان می‌دهد که مدل یادگیری ماشین مکسنت به‌عنوان یک ابزار استاندارد و قدرتمند برای پهنه‌بندی حساسیت به سیل در حوضه‌های مختلف ایران و جهان تثبیت شده است. این مدل به‌دلیل عملکرد بسیار قوی و نرخ موفقیت بالا شناخته می‌شود. در مطالعات داخلی، نگهبان و مرحمت (۱۴۰۳) در چهارم بر بهینه‌سازی مدل با الگوریتم ژنتیک تأکید کردند. یوسفی و همکاران (۱۴۰۲) در مرزداران با استفاده از این مدل، موفق به شناسایی ۱۰۰ کیلومتر مربع منطقه بحرانی شدند. مهرجان^{۱۱} و همکاران (۲۰۲۴) نزدیکی به رودخانه را مهم‌ترین عامل معرفی کردند و کاظمی و همکاران (۲۰۲۳) براهمیت پارامترهایی چون بارندگی، کاربری اراضی، فاصله تا رودخانه و نوع خاک تأکید نمودند. تمامی این تحقیقات، با شناسایی دقیق عوامل کنترل‌کننده و اولویت‌بندی مناطق بحرانی، کاربردی بودن مدل مکسنت را برای مدیریت جامع بلایای طبیعی اثبات کرده‌اند. در این پژوهش، از الگوریتم حداکثر آنتروپی (مدل مکسنت)، جهت پهنه‌بندی خطر سیلاب در حوضه آبخیز داراب در استان فارس پرداخته شده است. حوضه مورد مطالعه به‌دلیل شرایط خاص توپوگرافی از جمله نواحی پرشیب و همچنین پوشش گیاهی ضعیف، دارای پتانسیل بالایی از جهت رخداد سیلاب می‌باشد. استفاده از مدل مکسنت به‌همراه لایه‌های

1 . Pandey

2 . Duwal

3 . Bhattacharai

4 . Hitouri

5 . MaxEnt

6 . Stream Power Index

7 . Topographic Witness Index

8 . Achu

9 . Harshasimha

10 . Bhatt

11 . Maharjan

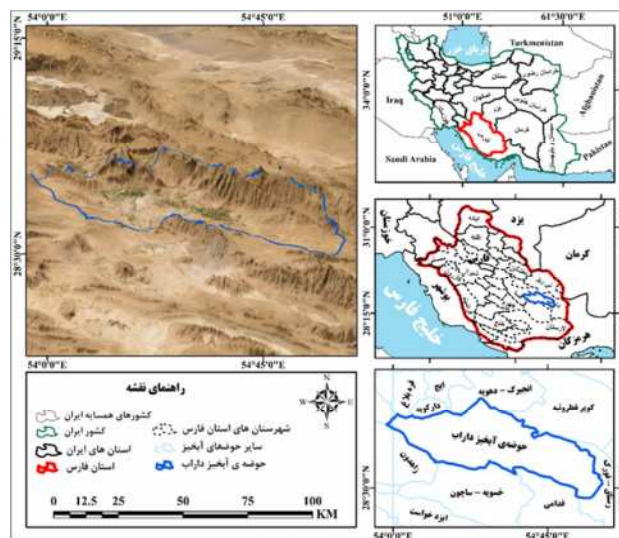
متنوع محیطی موثر بر رخداد سیل جهت شناسایی مناطق پر خطر سیلاب از اهداف اصلی این پژوهش می‌باشد. قابل‌یادآوری است، استفاده از تصاویر ماهوره‌ای برای شناسایی رخداد‌های سیل‌های گذشته یکی دیگر از مزیت‌های این پژوهش محسوب می‌گردد.

بحث‌های ایجادشده از این پژوهش می‌توانند توسط دولت محلی و تصمیم‌گیرندگان برای اجرای طرح‌های مناسب کاهش خسارت‌های سیل در آینده اتخاذ شوند.

داده‌ها و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبخیز داراب در جنوب شرق استان فارس با وسعت ۲۳۷۰ کیلومتر مربع از زیرحوضه‌های آبخیز کل-مهران محسوب می‌شود و در موقعیت جغرافیایی ۲۸ درجه و ۲۷ دقیقه تا ۲۸ درجه و ۵۶ دقیقه شمالی و ۵۳ درجه و ۵۸ دقیقه تا ۵۵ درجه و یک دقیقه شرقی و ارتفاع ۱۱۱۰ متر از سطح دریا واقع شده است. حداکثر و حداقل مطلق درجه حرارت سالانه به ترتیب ۴۹ (تیرماه) و ۹- (آذرماه) درجه سانتی‌گراد می‌باشد. متوسط بارندگی سالانه در این محدوده ۲۷۵ میلی‌متر و متوسط تبخیر سالانه ۲۷۶۷ میلی‌متر است. این منطقه دارای شیب‌های متنوع، پوشش گیاهی مختلف، و ساختارهای زمین‌شناسی گوناگون است که نقش مهمی در توزیع خطر سیل ایفا می‌کنند. اقلیم حاکم در این حوضه، نیمه‌خشک و گرم است؛ اما بارش‌های فصلی و ناگهانی، بستر مناسب برای وقوع سیل را فراهم می‌آورند (شکل (۱)).



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی مورد مطالعه

روش‌شناسی

این پژوهش کمی بوده و و به لحاظ هدف، کاربردی است. روش جمع‌آوری داده‌های آن نیز میدانی و کتابخانه‌ای می‌باشد. نمونه‌گیری در این پژوهش بر اساس نمونه‌گیری اهمیت^۱ است. در این شیوه، مناطق نمونه‌برداری با خطر

¹. Importance Sampling

سیل بالقوه بالاتر را بر اساس دانش تخصصی یا تجزیه و تحلیل اولیه اولویت بندی می کند. در اینجا، فن های داده کاوی برای کشف دانش از پایگاه داده GIS به منظور بهبود طبقه بندی تصاویر سنجش از دور جهت پهنه بندی خطر سیلاب استفاده می شود. ابتدا، مجموعه ای از داده های فضایی مختلف (ارتفاع، بارش، کاربری اراضی و ...) باید جمع آوری گشته و به همراه شاخص های رطوبت توپوگرافی^۱ (TWI)، انحنا^۲، شاخص خشکسالی استاندارد شده (SPI^۳)، تراکم زهکشی^۴، فاصله تا رودخانه، فاصله از جاده، نوع خاک، پوشش زمین، شاخص اختلاف آب نرمال شده (NDWI)^۵ و عوامل فیزیوگرافی پیش بینی کننده هایی^۶ را می سازند که به منزله متغیرهای مستقل یا مجموعه داده های آموزشی (training) که ۷۰ درصد پژوهش و شاخص ها را شامل می شود، وارد مدل مکسنت می شوند. سپس پردازش های لازم صورت گرفته، وزن تأثیر هر فاکتور با استفاده از الگوریتم مربوطه، به عنوان مجموعه داده های اعتبارسنجی (tasting) که ۳۰ درصد پژوهش و نقاط سیل خیزی را شامل می شود، مشخص می شود. در نهایت، سطح زیرمنحنی (AUC) برای اعتبارسنجی نقشه حساسیت به وقوع سیل محاسبه گشته و پهنه های در معرض خطر بازنمایی می شوند. در جدول (۱) و شکل (۲)، مراحل انجام این مدل ها نشان داده شده است.

جدول ۱: داده های مورد استفاده در عملیات مدل سازی پژوهش

ردیف	رده	نام متغیر	منبع
۱	طبیعی (فیزیوگرافیک)	ارتفاع	مدل های ارتفاعی رقومی (SRTM ^۷)
۲		شیب	
۳		تندی شیب ^۸	
۴		جهت شیب ^۹	
۵		قدرت آبراهه	
۶		رطوبت توپوگرافی	
۷		شاخص حمل رسوب	
۸		فاصله از گسل	نقشه گسل های ایران
۹		زمین شناسی	نقشه زمین شناسی منطقه مورد مطالعه از نقشه زمین شناسی ایران
۱۰		بارش	مشاهدات زمینی ایستگاه های هواشناسی - تصاویر ماهواره ای و مدل های اقلیمی از پایگاه های GPM ^{۱۰} ، و داده های ایستگاه های هواشناسی درون حوضه و مجاور آن
۱۱	طبیعی - انسانی	نوع خاک	داده های میدانی - آزمایشگاه خاک
۱۲		پوشش گیاهی	تصاویر ماهواره ای (لندست ۹_۸ و سنتینل ۲) و پلتفرم های داده باز
۱۳		شاخص تفاوت نرمال شده آب	
۱۴		شاخص تفاوت نرمال شده آب اصلاح شده	
۱۵		شاخص نسبت آب	
۱۶		کاربری زمین	تصاویر ماهواره ای سنتینل ۲
۱۷		تراکم زهکشی	بررسی های میدانی و مدل های ارتفاعی رقومی (DEMs)
۱۸		فاصله از رودخانه	شیب فایل آبراهه و راه های کشور از سازمان های ملی
۱۹		فاصله از جاده	

^۱. Topographic Wetness Index

^۲. Plan Curvature

^۳. Standardized Precipitation Index

^۴. drainage density

^۵. Normalized Difference Water Index

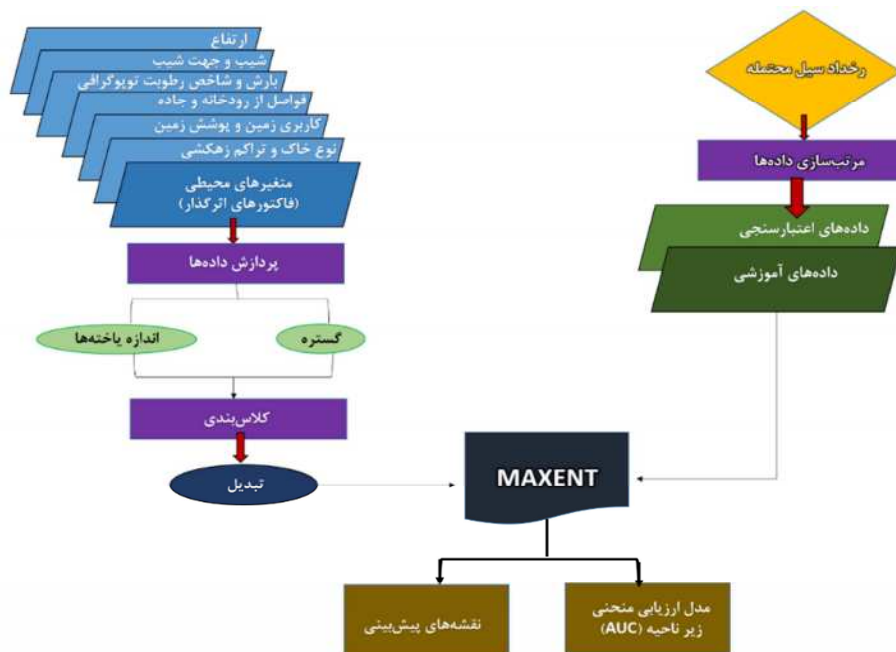
^۶. Predictions

^۷. Shuttle Radar Topography Mission

^۸. steepness

^۹. Aspect

^{۱۰}. Global Precipitation Measurement



شکل ۲: فلوچارت روش تحقیق

یافته‌های پژوهش

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

قدرت آبراهه^۱ (SPI): شاخص (SPI)، شاخص قدرت جریان می‌تواند بیانگر نقاط تجمع و رسوب‌گذاری در حوضه آبخیز باشد (شهابی و همکاران، ۲۰۱۴). این شاخص با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی SRTM با دقت ۳۰ متر و با کدنویسی در نرم‌افزار R تولید و در شکل ۴-ز نمایش داده شده است.

$$SPI = \ln \left((Flow Accumulation + 0.001) \times \left(\frac{Slope Percent}{100} + 0.001 \right) \right) \quad (۱)$$

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

$$TWI = \ln(a / \tan(\beta)) \quad (۲)$$

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

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

^۱. Stream Power Index

^۲. The topographic wetness index

^۳. Sediment Transport Index

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

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

As: مساحت ویژه حوضه بالادست

B: شیب محلی (درجه)

m: عدد ثابت بین ۰/۴-۰/۶

n: مقدار ثابت ۱/۳-۱/۶

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

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

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

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

داده های حضور (وقوع و تکرار)^۴

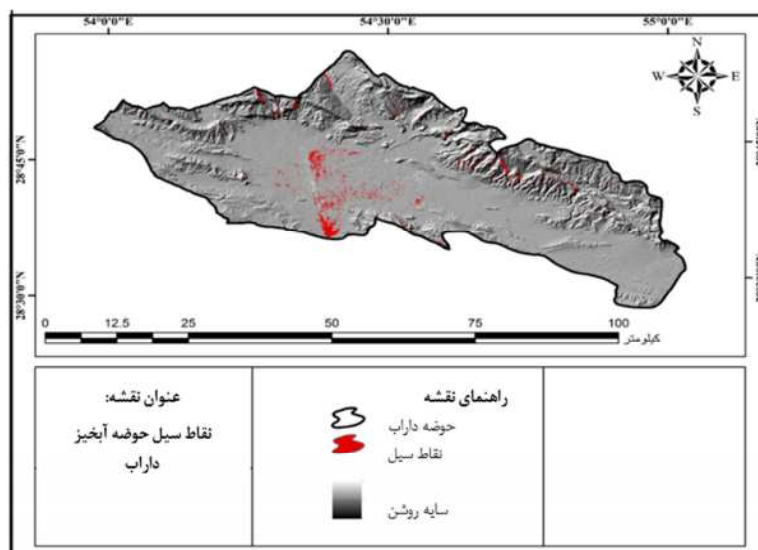
داده های حضور به مجموعه ای از داده ها اشاره دارد که تنها مکان وقوع یک پدیده خاص (مانند سیل) را نشان می دهند و اطلاعاتی درباره مکان هایی که این پدیده رخ نداده است، ارائه نمی دهند. این نوع داده ها به ویژه در مطالعات محیطی و اکولوژیکی، از جمله بررسی مخاطرات طبیعی مانند سیل، رایج هستند. در این پژوهش، برای استخراج نقاط حضور یا نقاط سیل از تصویر ماهواره ای لندست ۸ مربوط به سال ۲۰۱۷ (زمان وقوع سیل در استان فارس) استفاده شد که نتیجه این برداشت در نقشه شکل (۳) زیر قابل مشاهده است.

¹. Normalized Difference Vegetation Index

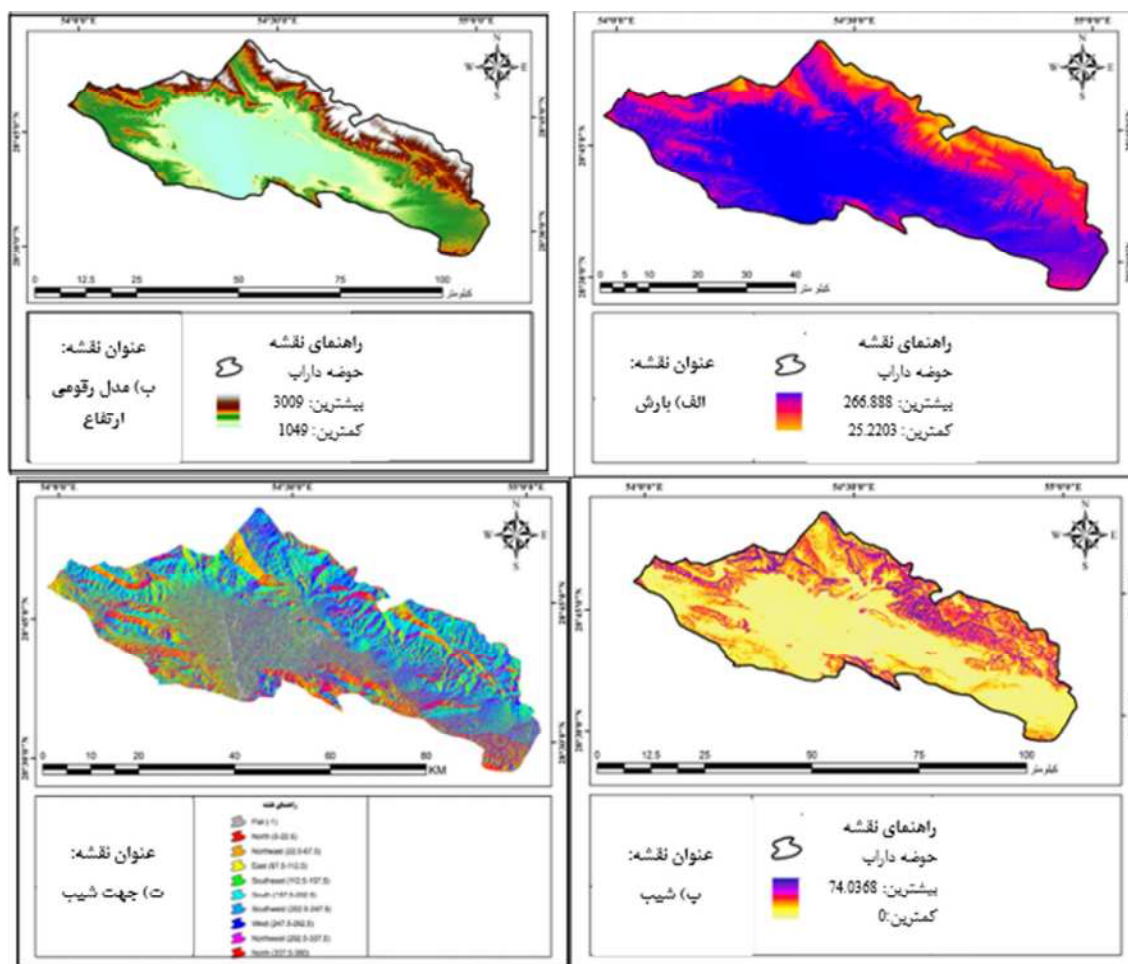
². Normal Difference Water Index

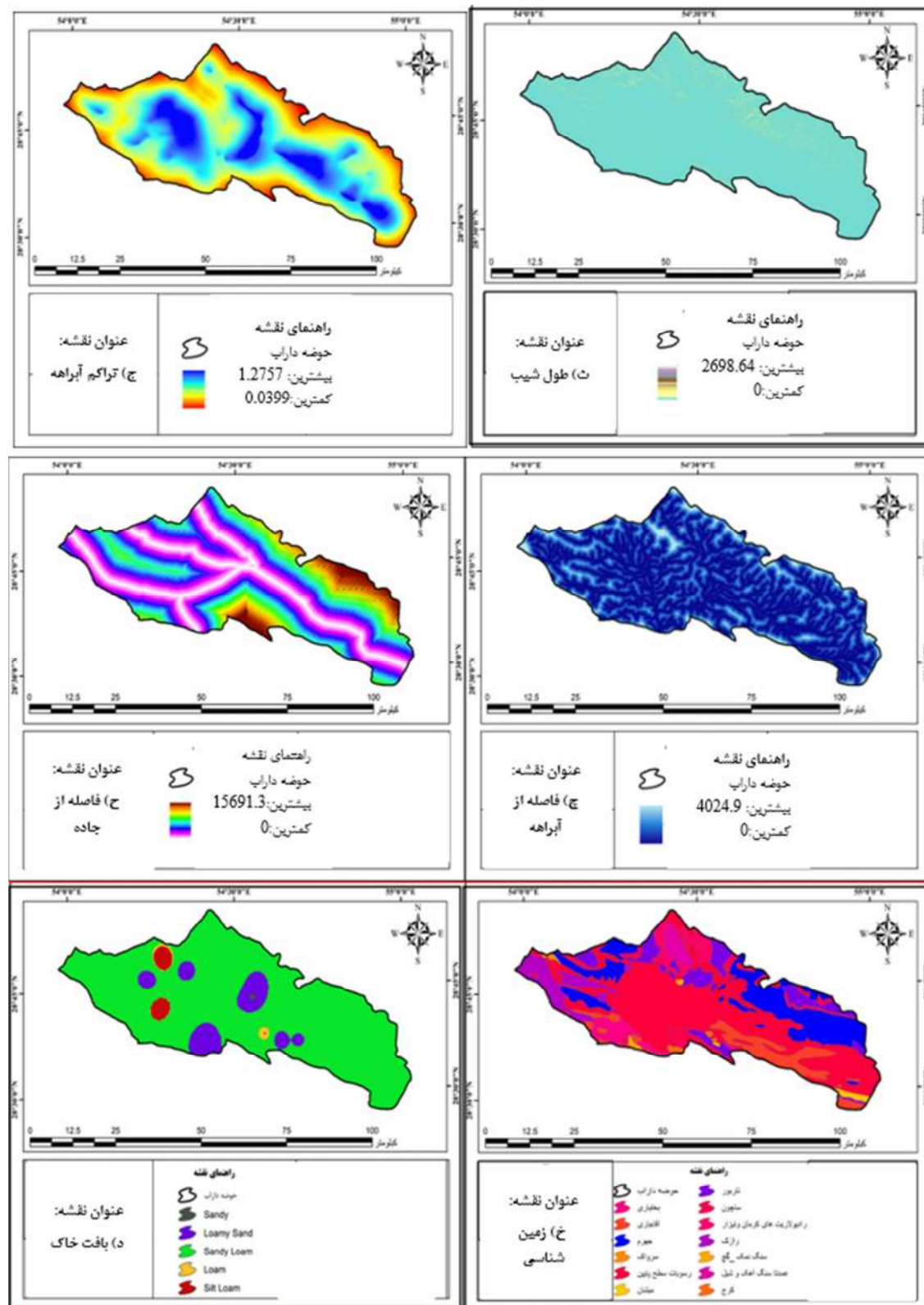
³. Water Ratio Index

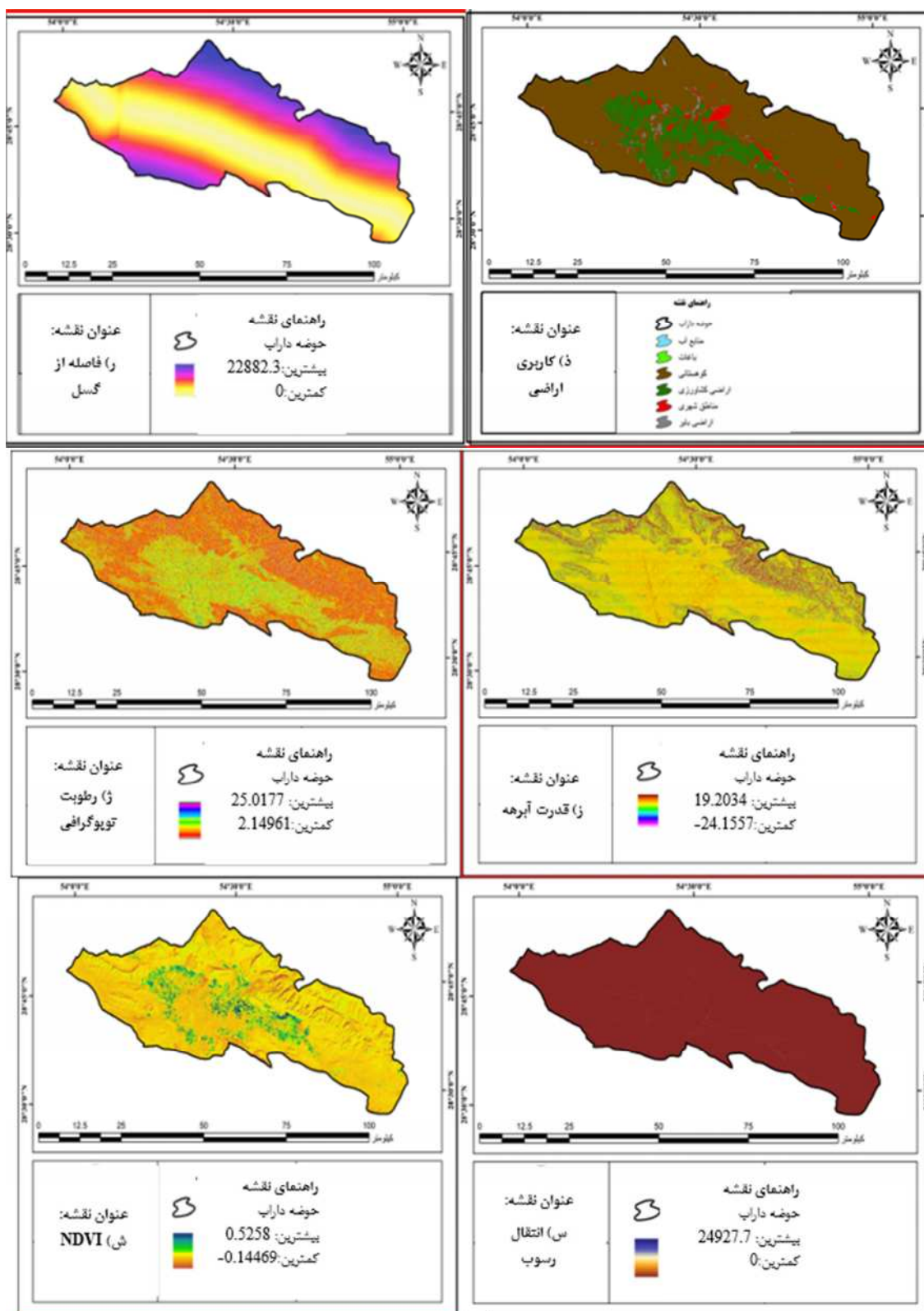
⁴. presence-only data

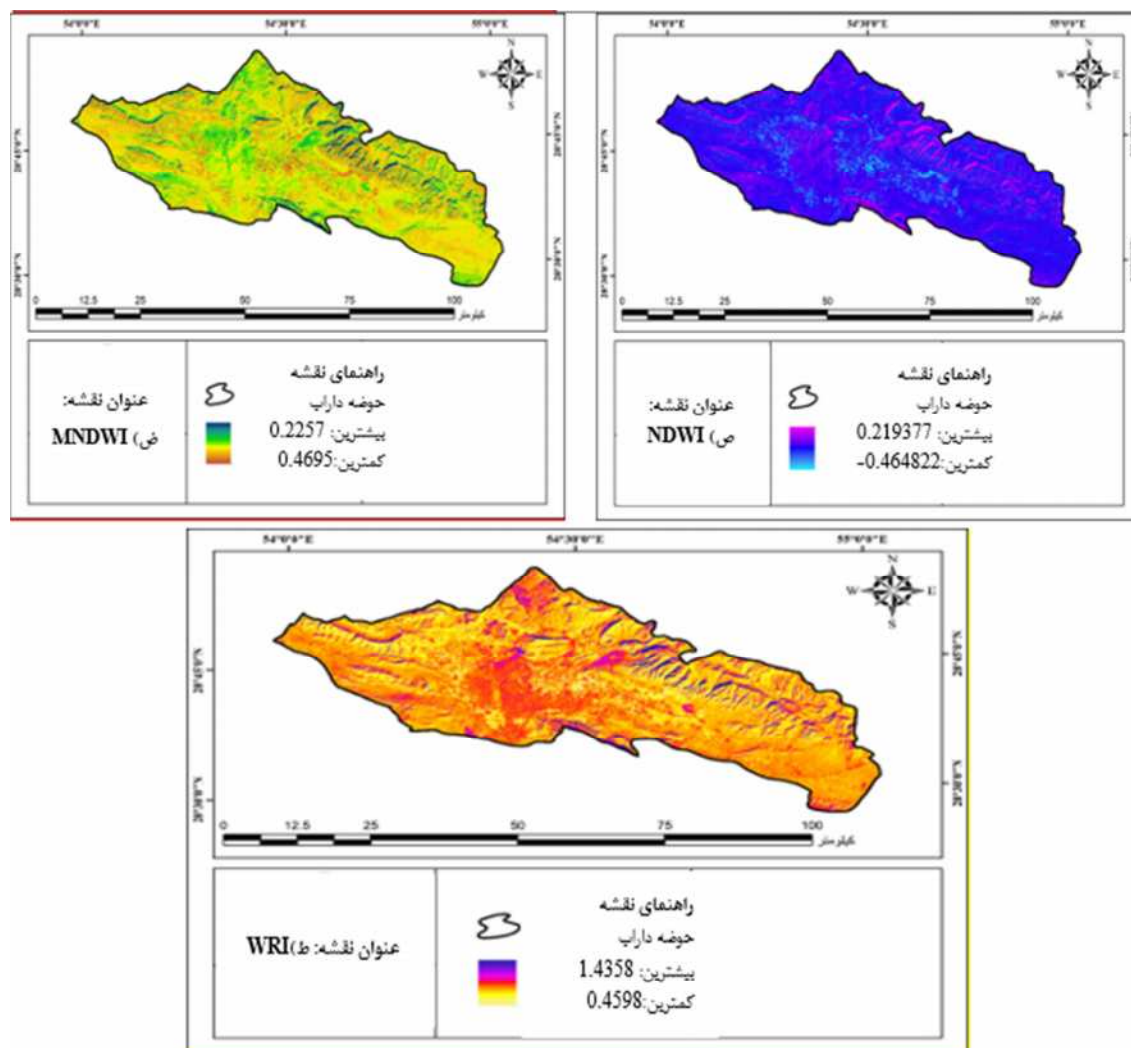


شکل ۳) نقشه موقعیت نقاط سیل حوضه آبخیز داراب









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

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

نتایج و بحث

در این پژوهش بعد از تهیه‌ی لایه‌های موثر و تاثیرگذار بر رخداد سیلاب در حوزه‌ی آبخیز داراب (۱۹ شاخص)، به-عنوان متغیرهای مستقل در مدل مکسنت به‌کار برده شد. قابل یادآوری است، تمامی لایه‌ها به‌صورت رستری و با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر در محیط Arc GIS10.8 جهت آماده‌سازی استفاده گردید. در ادامه به بررسی اهمیت شاخص‌های مختلف و همچنین نقشه نهایی خطر سیلاب در منطقه مورد مطالعه پرداخته شده است.

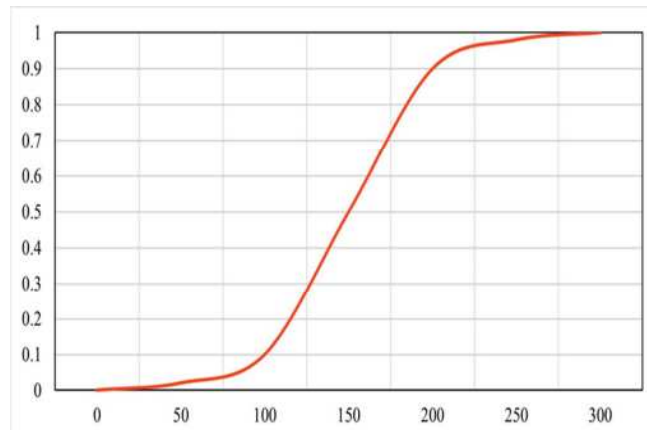
اهمیت متغیرهای (شاخص‌های) مدل مکسنت

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

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

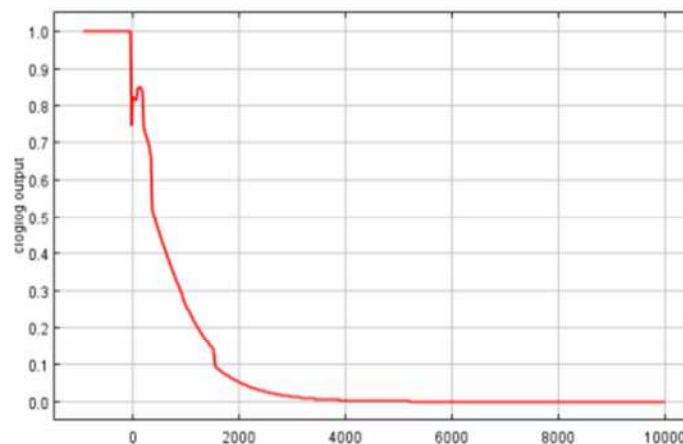
شاخص	اهمیت
بارش	۵۷/۹
فاصله از آبراهه	۱۱/۶
ارتفاع	۱۰/۲
کاربری اراضی	۸/۵
شاخص نرمال‌شده تفاوت پوشش گیاهی (NDVI)	۰/۱
شیب	۴
رطوبت توپوگرافی	۱/۳
جهت شیب	۱/۳
بافت خاک	۱/۲
تفاوت نرمال‌شده آب (NDWI)	۱/۲
قدرت آبراهه (SPI)	۰/۷
تراکم زهکشی	۰/۶
اصلاح‌شده نرمال‌شده آب (MNDWI)	۰/۴
طول شیب	۰/۳
فاصله از گسل	۰/۲
شاخص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

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



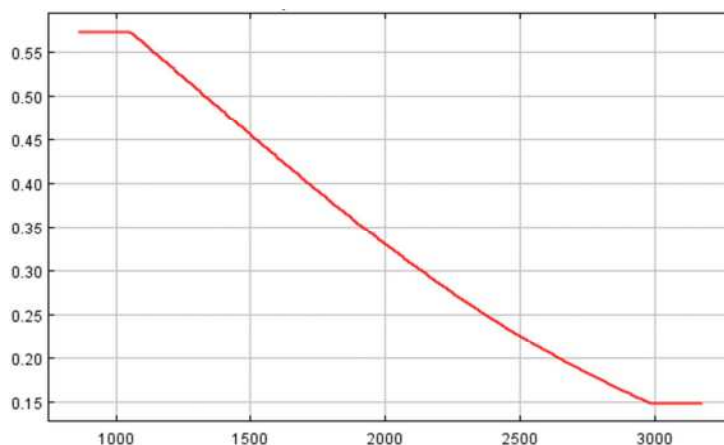
شکل ۵: نمودار سهم شاخص بارش در پیش‌بینی مدل مکسنت

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



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

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



شکل ۷) نمودار سهم شاخص ارتفاع در پیش‌بینی مدل مکسنت

ارزیابی دقت مدل مکسنت

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

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

^۱. Area Under Curve

^۲. Receiver Operating Characteristic

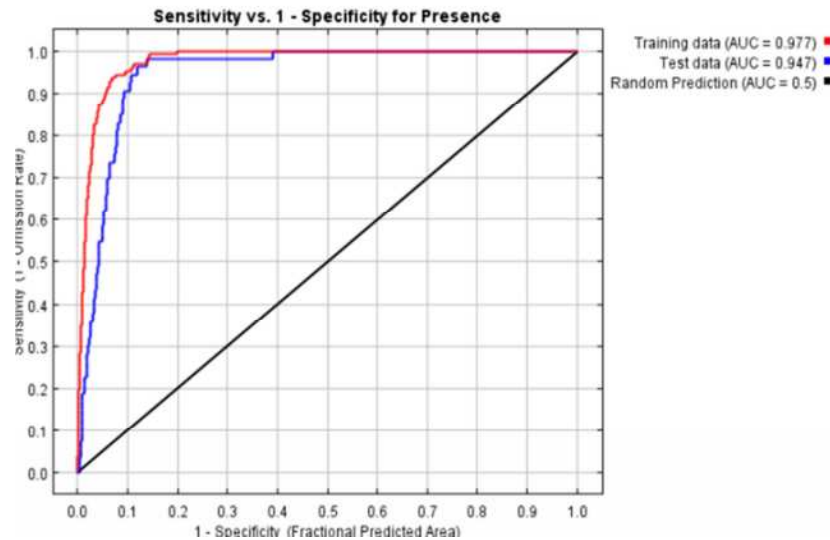
^۳. False Positive Rate

^۵. True Positive Rate

^۷. Area Under Curve

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

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

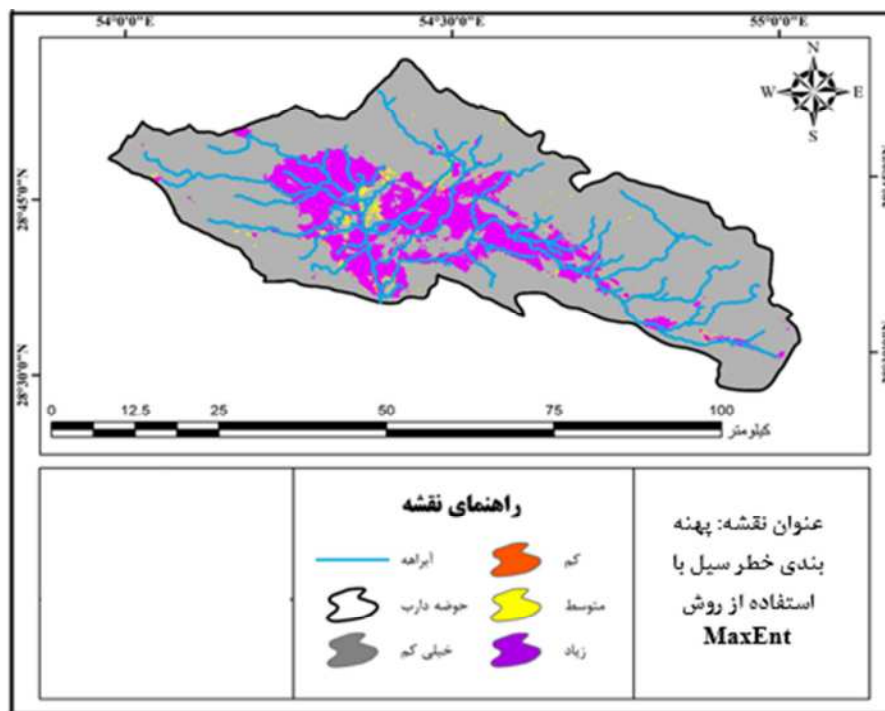


شکل ۸) منحنی ROC برای اعتبارسنجی مدل مکسنت

بر اساس نمودار شکل ۸، مقدار شاخص ROC برای مدلسازی خط سیل با استفاده از مدل مکسنت در حوضه مورد مطالعه برای داده‌های آموزشی و تعلیمی به ترتیب شامل مقدار ۰/۹۷۷ و ۰/۹۴۷ می‌باشند. مقدار بالای این اعداد و نزدیک به ۱ نشان از عملکرد و دقت بالای نتایج حاصله از مدلسازی نقشه تهیه‌شده خطر سیل با استفاده از مدل مکسنت در محدوده‌ی مورد مطالعه دارد. قابل‌یادآوری است، اختلاف ناچیز مقدار شاخص AUC بین داده‌های آموزشی و تعلیمی دلالت بر تعمیم‌پذیری خوب مدل به کار برده‌شده دارد و همچنین نبود برآزش در داده‌ها می‌باشد.

نقشه نهایی خطر سیل

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



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

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از نقشه نهایی خطر سیلاب در منطقه مورد مطالعه، بیشترین مساحت حوضه (۷۸/۳۴٪) در رده کم‌خطر قرار دارد (جدول ۳). اگرچه مساحت مناطق پرخطر نسبت به مناطق کم‌خطر بسیار کمتر است (۱۶/۴۷٪)، اما این مناطق به‌دلیل پتانسیل بالای وقوع سیل، نیازمند توجه ویژه هستند. مناطق با خطر متوسط (نسبتاً کم‌خطر و نسبتاً پرخطر) نیز سهم قابل‌توجهی از مساحت حوضه را به خود اختصاص داده‌اند. این مناطق نیازمند پایش مستمر و اقدامات پیشگیرانه هستند. با توجه به نتایج حاصل مدل مکسنت با دقت قابل‌توجهی توانسته خطر سیلاب را پیش‌بینی کند. عملکرد مدل روی داده‌های آزمایشی نشان می‌دهد که این مدل می‌تواند در پیش‌بینی‌های آینده نیز عملکرد خوبی را از خود نشان دهد.

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

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

نتیجه‌گیری

در حوضه‌ی آبخیز داراب در استان فارس، در طی سال‌های اخیر سیلاب‌های زیادی رخ داده است. همین مسئله ضرورت مطالعه در خصوص عوامل مؤثر در بروز سیل و همچنین شناسایی نواحی پرخطر را آشکار می‌سازد. این پژوهش به منظور شناسایی اهمیت شاخص‌های مختلف در رخداد‌های سیل و همچنین تهیه نقشه خطر سیلاب با

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

منابع

- تقی آوند، محمد؛ مرادی، حمیدرضا؛ رمضان‌زاده لسبویی، مهدی. (۱۳۹۹). تهیه نقشه حساسیت سیل با استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین جنگل تصادفی و خطی تعمیم‌یافته بیزین. محیط زیست و مهندسی آب، دوره ۱۶(۱)، صص: ۸۳-۹۵.
10.22034/jewe.2020.220593.1351
- توکلی، مهدی؛ امیراحمدی، ابوالقاسم؛ گلی مختاری، لیلی. (۱۴۰۳). ارزیابی، پیش‌بینی و تحلیل منطقه‌ای سیلاب با استفاده از مدل‌های داده‌کاوی در حوضه آبریز فریزی. فصل‌نامه تحقیقات جغرافیایی، دوره ۳۹(۲)، صص: ۱۶۱-۱۶۸.
- حنیفی نیا، عبدالعزیز؛ عبقری، هیراد. (۱۴۰۴). پیش‌بینی مناطق مستعد سیل با استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین خطی تعمیم‌یافته و پیشینه آنتروپی. مخاطرات محیط طبیعی، دوره ۱۴(۴۳)، صص: ۱۹-۳۴. Jneh.2024.47730.2021. ۱۰,۲۲۱۱۱
- شریفی، فرود؛ غلامرضا، نوروزی. (۱۳۷۸). تحلیلی بر سیل مرداد ۷۸ مازندران و گلستان. نشریه جنگل و مرتع، شماره ۴۲، صص: ۴۰-۴۳.
- رحیم‌پور، توحید؛ رضائی‌مقدم، محمدحسین. (۱۴۰۳). مدل‌سازی پتانسیل خطر وقوع سیلاب در حوضه آبریز آجی‌چای با استفاده از الگوریتم‌های داده‌کاوی. پژوهش‌های فرسایش محیطی. دوره ۱۴(۴)، صص: ۱۹-۳۸.
- ذاکری نژاد، رضا؛ عیاش، کمال. (۱۴۰۳). ارزیابی خطر سیل و عوامل مؤثر بر آن در حوضه آبخیز زهر-جراحی در جنوب غرب ایران با استفاده از روش سلسله‌مراتبی فازی. پژوهش‌های جغرافیایی طبیعی، دوره ۵۶(۲)، صص: ۵۱-۶۹. doi: 10.22059/jphgr.2024.376692.1007829
- ذاکری‌نژاد، رضا. (۱۳۹۹). ارزیابی مدل‌های رقمی ارتفاع جهت تهیه نقشه پتانسیل فرسایش خندقی با استفاده از مدل مکسنت و سامانه اطلاعات جغرافیایی (مطالعه موردی: حوزه آبخیز سمیرم، جنوب استان اصفهان). سنجش‌ازدور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی (کاربرد سنجش‌ازدور و GIS در علوم منابع طبیعی)، دوره ۱۱(۳) (پیاپی ۴۰)، صص: ۲۱-۲۲. SID. <https://sid.ir/paper/359585/fa>
- میرموسوی، سیدحسین؛ حسین اسمعیلی. (۱۴۰۰). پهنه‌بندی نواحی سیل‌خیز با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) و سنجش-ازدور (RS). مطالعه موردی: شهرستان داراب. مخاطرات محیط طبیعی، دوره ۱۰(۲۷)، صص: ۲۱-۴۶.
<https://doi.org/10.22111/jneh.2020.32986.1613>

- نوحانی، ابراهیم؛ دارابی، فریبا؛ معروفی‌نیا، ادریس؛ خسروی، خه بات. (۱۳۹۵). ارزیابی مدل آنتروپی شانون در تهیه نقشه حساسیت و احتمال به وقوع سیل در حوضه آبخیز هراز. مخاطرات محیط طبیعی، سال پنجم، شماره دهم. ۱۰,۲۲۱۱۱/Jneh.2017.2958
- A. L. AchuORCID Icon, C. D AjuORCID Icon, M. C. Raicy, Arun BhadrnORCID Icon, Amal George, U. Surendran. (2025). Improved flood risk assessment using multi-model ensemble machine-learning techniques in a tropical river basin of Southern India. <https://doi.org/10.1080/02723646.2025>.
- Al-Hinai, H., & Abdalla, R. (2021). Mapping coastal flood susceptible areas using Shannon's entropy model: the case of Muscat governorate, Oman. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(4), 252. <https://doi.org/10.3390/ijgi10040252>
- Ali, A., Rana, I. A., Ali, A., & Najam, F. A. (2022). Flood risk perception and communication: The role of hazard proximity. *Journal of Environmental Management*, 316, 115309. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115309>
- Badri B, Zare R, Honarbakhsh A, Atashkhar, F. Prioritization of flood potential Beheshtabad Sub-watershed. *Journal of Geographical Studies*. 2016; 48(1): 143-158. <https://doi.org/10.22059/JPHGR.2016.57032>
- Bhattarai, Y., Duwal, S., Sharma, S., & Talchabhadel, R. (2024). Leveraging machine learning and open-source spatial datasets to enhance flood susceptibility mapping in a transboundary river basin. *International Journal of Digital Earth*, 17(1). <https://doi.org/10.1080/17538947.2024.2313857>
- Breugem, A. J., Wesseling, J. G., Oostindie, K., & Ritsema, C. J. (2020). Meteorological aspects of heavy precipitation in relation to floods – An overview. *Earth-Science Reviews*, 103171. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103171>
- Chen, Y., Wang, B., Pollino, C. A., Cuddy, S. M., Merrin, L. E., & Huang, C. (2014). Estimate of flood inundation and retention on wetlands using remote sensing and GIS. *Ecohydrology*, n/a–n/a. <https://doi.org/10.1002/eco.1467>
- Dovonce E. A. (2000). Physically based distributed hydrologic model. Master of Science Thesis, *The Pennsylvania State University*.
- Duwal, S., Liu, D., & Pradhan, P. M. (2023). Flood susceptibility modeling of the Karnali river basin of Nepal using different machine learning approaches. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 14(1). <https://doi.org/10.1080/19475705.2023.2217321>
- El-Haddad, B. A., Youssef, A. M., Pourghasemi, H. R., Pradhan, B., El-Shater, A.-H., & El-Khashab, M. H. (2020). Flood susceptibility prediction using four machine learning techniques and comparison of their performance at Wadi Qena Basin, Egypt. *Natural Hazards*. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04296-y>
- Gokceoglu, C., Sonmez, H., Nefeslioglu, H.A., Duman, T.Y., Can, T., 2005. The 17 March 2005 Kuzulu landslide (Sivas, Turkey) and landslide-susceptibility map of its vicinity. *Eng. Geol.* 81, 65–83. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2005.07.011>
- Harshasimha, A.C.; Bhatt, C.M. Flood Vulnerability Mapping Using MaxEnt Machine Learning and Analytical Hierarchy Process (AHP) of Kamrup Metropolitan District, Assam. *Environ. Sci. Proc.* 2023, 25, 73. <https://doi.org/10.3390/ECWS-7-14301>
- Hitouri S, Mohajane M, Lahsaini M, Ali SA, Setargie TA, Tripathi G, D'Antonio P, Singh SK, Varasano A. (2024). Flood Susceptibility Mapping Using SAR Data and Machine Learning Algorithms in a Small Watershed in Northwestern Morocco. *Remote Sensing*, 16(5):858. <https://doi.org/10.3390/rs16050858>
- Huang, Chang & Wu, Jianping & Chen, Yun & Yu, Jia. (2012). Detecting floodplain inundation frequency using MODIS time-series imagery. 2012 1st International Conference on Agro-Geoinformatics, *Agro-Geoinformatics* 2012. 1-6. <https://doi.org/10.1109/Agro-Geoinformatics.2012.6311668>
- Huang, C., Chen, Y., Wu, J. (2013). GIS-based spatial zoning for flood inundation modelling in the Murray-Darling Basin. *20th International Congress on Modelling and Simulation* 2013 (MODSIM2013).
- Huang, C., Chen, Y., & Wu, J. (2014). Mapping spatio-temporal flood inundation dynamics at large river basin scale using time-series flow data and MODIS imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 26, 350–362. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2013.09.002>
- Huang, C., Chen, Y., Wu, J., Chen, Z., Li, L., Liu, R., Yu, J., 2014c. Integration of remotely sensed inundation extent and high-precision topographic data for mapping inundation depth. In: 3rd International Conference on Agro-Geoinformatics, *Beijing, China*.
- Javidan, N., Kaviani, A., Pourghasemi, H.R. et al. (2021). Evaluation of the multi-hazard map produced using the MaxEnt machine learning technique. *Sci Rep* 11, 6496. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-85862-7>
- L., Achu & C D, Aju & MANI CHRISTY, Raicy & Bhadrn, Arun & George, Amal & Udayar Pillai, Surendran & Girishbai, Drishya & Ajayakumar, P. & Gopinath, Girish & Pradhan, Biswajeet. (2025). Improved flood risk assessment using multi-model ensemble machine-learning techniques in a tropical river basin of Southern India. *Physical Geography*. 46. 1-29. <https://doi.org/10.1080/02723646.2025.2464536>.
- McFeeters, S. K. (1996). "The use of the normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features." *International Journal of Remote Sensing*, 17(7), 1425-1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>

- Menuka M., Sachin T., Santosh A., Bikram S., Bikram M., Amir S. (2024). Flood susceptibility assessment using a machine learning approach in the Mohana-Khutiya River of Nepal, *Natural Hazards Research*, 4(1): 32-45. doi.org/10.1016/j.nhres.2024.01.001.
- Pandey, M., Arora, A., Arabameri, A.R., Costache, R.D., Kumar, Mishra, V., Nguyen, H., Mishra, J., Siddiqui, M., Ray, Y., Soni, S., Shukla, U. (2021). Flood Susceptibility Modeling in a Subtropical Humid Low-Relief <https://doi.org/10.3389/feart.2021.659296>
- Prakash Mohanty, M., Nithya, S., Nair, A. S., Indu, J., Ghosh, S., Mohan Bhatt, C., ... Karmakar, S. (2020). Sensitivity of various topographic data in flood management: Implications on inundation mapping over large data-scarce regions. *Journal of Hydrology*, 125523. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125523>
- Qasimi Abdul Baser, Isazade Vahid, Berndtsson Ronny. (2023). Flood Susceptibility Prediction Using MaxEnt and Frequency Ratio Modeling for Kokcha River in Afghanistan. *Natural Hazards*, 25 October 2023. <https://doi.org/10.1007/s11069-023-06232-2>
- Qasimi, A.B., Isazade, V. & Berndtsson, R. (2024). Flood susceptibility prediction using MaxEnt and frequency ratio modeling for Kokcha River in Afghanistan. *Nat Hazards* 120, 1367–1394. <https://doi.org/10.1007/s11069-023-06232-2>.
- Rahman, M., Ningsheng, C., Islam, M.M. et al. Flood Susceptibility Assessment in Bangladesh Using Machine Learning and Multi-criteria Decision Analysis. *Earth Syst Environ* 3, 585–601 (2019). <https://doi.org/10.1007/s41748-019-00123-y>
- Razavi Termeh S. V., Kornejady A., Pourghasemi H. R., and Keesstra S.(2018). Flood susceptibility mapping using novel ensembles of adaptive neuro-fuzzy inference systems and metaheuristic algorithms. *Sci Total Environ.*, 615, 438–451. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.262>
- Sala, O.E., Chapin, F.S., Armesto, J.J., et al. (2000) Global Biodiversity Scenarios for the Year 2100. *Science*, 287, 1770-1774. <http://dx.doi.org/10.1126/science.287.5459.1770>
- Shirani, K., Zakerinejad, R. (2021). Watershed prioritization for the identification of spatial hotspots of flood risk using the combined TOPSIS-GIS-based approach: a case study of the Jarahi-Zohre catchment in Southwest Iran. *AUC Geographica* 56(1), 120–128.
- Shahabi H, Khezri S, Ahmad BB, Hashim M. (2014). Landslide susceptibility mapping at central Zab basin, Iran: A comparison between analytical hierarchy process, frequency ratio, and logistic regression models, *Catena* 115: 55-70. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2013.11.014>
- Shrestha, R.M., Di, L., Yu, G., Shao, Y., Kang, L., & Zhang, B. (2013). Detection of flood and its impact on crops using NDVI Corn case. *2013 Second International Conference on Agro-Geoinformatics (Agro-Geoinformatics)*, 200-204. <https://doi.org/10.1109/ARGO-GEOINFORMATICS.2013.6621907>
- Smith, K. (2001). Environmental hazard assessing risk and reducing disaster, Third edition, published by Routledge, 11 New Fetter Lane, London.
- Sugianto S, Deli A, Miswar E, Rusdi M, Irham M. The effect of land use and land cover changes on flood occurrence in Teunom Watershed, Aceh Jaya. *Land*. 2022 Aug 8;11(8):1271. <https://doi.org/10.3390/land11081271>
- Taherizadeh, M., Niknam, A., Nguyen-Huy, T. et al. Flash flood-risk areas zoning using integration of decision-making trial and evaluation laboratory, GIS-based analytic network process, and satellite-derived information. *Nat Hazards* 118, 2309–2335 (2023). <https://doi.org/10.1007/s11069-023-06089-5>
- Tao, H., Al-Khafaji, Z. S., Qi, C., Zounemat-Kermani, M., Kisi, O., Tiyasha, T., ... & Yaseen, Z. M. (2021). Artificial intelligence models for suspended river sediment prediction: state-of-the-art, modeling framework appraisal, and proposed future research directions. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 15(1), 1585-1612. <https://doi.org/10.1080/19942060.2021.1984992>
- Thomas, David S.G. (2016). The Dictionary of Physical Geography, 4th Edition. John Wiley & Sons Ltd <https://doi.org/10.1002/9781118782323.ch06>
- Ticehurst, C., Chen, Y., Karim, F., Dushmanta, D., 2013. Using MODIS for mapping flood events for use in hydrological and hydrodynamic models: experiences so far. In: *20th International Congress on Modelling and Simulation, Adelaide, Australia*.
- Xu, H. (2006). "Modification of normalized difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery." *International Journal of Remote Sensing*, 27(14), 3025-3033. <https://doi.org/10.1080/01431160600589179>
- Zakerinejad, R., Ayash, K. (2024). Analysis of Flood Risk and Influencing Factors in Zohr-Jarhari Basin in Zohr-Jarhari in Southwest of Iran using Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP) Approach. *Physical Geography Research Quarterly*, 56 (2), 51-69. <http://doi.org/10.22059/JPHGR.2024.376692.1007829>.

Investigating the Factors Influencing Farmers' Resilience to Water Scarcity Crisis (A Case Study of Rural Settlements in the Central District of Ardabil County, Iran)

Kiomars Khodapanah^{1*} , Arasto Yari², Saadi Mohammadi³

1. **Corresponding Author**, Assistant Professor, Department of Geography, Payame Noor University, Tehran, Iran.

Email: k.khodapanah@pnu.ac.ir ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3834-2335>

2. Professor of the Department of Geography and Urban and Rural Planning, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

3. Associate Professor, Department of Geography, Payame Noor University, Tehran, Iran.

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article Article history: Received: 19 August 2025 Revised: 20 February 2026 Accepted: 06 March 2026 Published: 22 December 2026 Keywords: Water scarcity crisis, Natural hazards, Resilience, Drought, Sustainable development.	Water crisis in Iran is one of the most complex and challenging issues of recent decades, posing a serious threat to agricultural security, environmental sustainability, and even socio-economic stability. Accordingly, the present study aims to investigate the factors influencing the resilience of rural farmers to water scarcity in the Central District of Ardabil County. The statistical population of the study consists of 30 villages with more than 50 farming households. Based on Cochran's formula, the sample size was estimated at 366 respondents and increased to 380 to improve the reliability of the results. A total of six main factors and 72 indicators were employed to analyze farmers' resilience. Data analysis was conducted using SmartPLS 3 software. The findings indicate that six indicators with factor loadings below the threshold value of 0.40 were removed from the model. Among the remaining 66 standardized indicators, the existence of transparent regulations for the sustainable use and protection of water resources, flexibility of government programs in response to climate change, and the development of appropriate infrastructure for water scarcity management showed the highest factor loadings. The results also demonstrate a significant relationship between the exogenous and endogenous variables of the model, with a relatively acceptable predictive power. Overall, the economic factor exerted the strongest influence on farmers' resilience to water scarcity. The study concludes that resilience to water scarcity in the Central District of Ardabil County is a multidimensional and integrated phenomenon. Without adopting a comprehensive approach and simultaneously utilizing economic, social, infrastructural, institutional, and technological capacities, sustainable protection of rural livelihoods cannot be achieved. The findings further reveal that despite the provision of financial resources, the existing planning system has not yet continuously strengthened rural resilience due to its fragmented, short-term, and locally misaligned nature.
How to Cite: Khodapanah, K. , Yari, A. and Mohammadi, S. (2026). Investigating the Factors Influencing Farmers' Resilience to Water Scarcity Crisis (A Case Study of Rural Settlements in the Central District of Ardabil County, Iran). <i>Journal of Natural Environmental Hazards</i>, 15 (50), 67-90.	



© The Author/Authors

DOI: 10.22111/jneh.2026.53000.2137

Publisher: University of Sistan and Baluchestan

EXTENDED ABSTRACT

INTRODUCTION

The water crisis in Iran stands as one of the most intricate and pressing challenges facing the country in recent decades, posing a serious threat to agricultural productivity, environmental sustainability, and even social and economic stability. In this context, enhancing the resilience of rural communities in across economic, social, cultural, and other dimensions can play a crucial role in preventing the deepening of the crisis and mitigating the severity of water scarcity. Accordingly, this study aims to explore the key factors influencing the resilience of rural farmers in the face of the water shortage crisis in the central district of Ardabil County. This area is predominantly reliant on agriculture, and a substantial portion of its water resources is consumed through traditional irrigation methods practices that could be significantly improved through increased awareness and capacity-building among local farmers. In recent years, the pursuit of sustainable water resource development has become closely intertwined with the concept of resilience. Within this framework, a sustainable water system is understood as one that possesses the adaptive capacity to absorb and mitigate the adverse impacts of disturbances such as climate change, droughts, and floods. According to various scholars, four critical factors contribute to diminishing resilience in the face of water scarcity: the unequal distribution of water resources among neighboring nations, the intensifying effects of climate change, demographic pressures arising from population growth and migration, and inherent geological and climatic constraints particularly in arid regions with naturally low precipitation levels. Three primary models have been proposed for conceptualizing resilience. The first is the cognitive-structural model, which highlights the importance of structural reforms within institutions and society, as well as individual, environmental, and cognitive factors. The second is the recovery model, which assumes that environmental shocks can be fully reversed, restoring systems to their original state. The third is the risk-reduction model, which focuses on minimizing exposure to risks and hazards. Key components underpinning resilience include social cohesion, mutual trust, shared values, and interactive communication within communities. Broadly, resilience approaches can be categorized into three paradigms. The first views resilience as synonymous with sustainability, rooted in ecological theory, where resilience denotes a system's capacity to revert to its previous state after disturbance. The second treats resilience as recovery, emphasizing a society's ability to bounce back from stressors and regain its original functionality. The third approach centers on adaptive capacity, prioritizing a community's ability to proactively respond to and accommodate change. Despite their differences, all three perspectives share a common emphasis on resistance the capacity to endure and positively respond to external pressures.

DATA AND METHODOLOGY

The present study is applied in terms of its objective and is descriptive-analytical in nature. The statistical population of this research consists of farming households in the villages of the central district of Ardabil County. The statistical population includes 30 villages with a population of over 50 farming households, totaling 7,947 households, which were randomly selected for the study. The sample size was estimated at 366 individuals based on Cochran's formula, and to achieve better results, the sample size was increased to 380 individuals. Six factors and 72 components were utilized for the analysis. To analyze the findings obtained from the questionnaire, the structural equation modeling software Smart PLS 3 was employed.

RESULTS AND DISCUSSION

The analysis revealed that six out of the initial 72 components were excluded from the model due to factor loadings falling below the accepted threshold of 0.40. Among the remaining 66 standardized components, the following three exhibited the highest factor loadings: the presence of transparent laws and regulations regarding the sustainable use and protection of water resources; the adaptability of government programs in response to climate change; and the development of appropriate

infrastructure for managing water scarcity. The results further indicated that the t-values associated with economic, social, physical-infrastructure, and institutional-political factors all exceeded 1.96. This suggests that the relationships between the model's exogenous and endogenous variables are statistically significant, and that the model demonstrates a relatively strong predictive capacity. Notably, the highest t-value estimated at 10.102 was observed in the structural path linking economic factors to resilience to water scarcity. Additionally, the Q^2 value was calculated to be 0.225, a positive figure exceeding the average, which indicates a moderate-to-strong predictive relevance of the model. This finding supports the overall adequacy of the model fit and confirms its capacity to explain and predict the variance in resilience outcomes. The coefficient of determination (R^2) for the key endogenous constructs varied across the model. In line with commonly accepted benchmarks where R^2 values of 0.67, 0.33, and 0.19 are interpreted as strong, moderate, and weak, respectively this study found R^2 values exceeding 0.67, thereby reflecting a robust explanatory power of the model.

CONCLUSION

The statistical and qualitative findings of this study underscore the complexity and multidimensional nature of resilience to water scarcity, highlighting the need for a holistic and integrated approach. Achieving a desirable level of resilience cannot be accomplished through isolated efforts such as infrastructure development or economic empowerment alone. Rather, a coordinated strategy-encompassing public participation, institutional engagement, equitable access to resources, and the incorporation of technological and educational initiatives is essential for building resilience to water scarcity in the central region of Ardabil. The results suggest that when participatory decision-making mechanisms, active local institutions, and effective awareness-raising systems are embedded within rural communities, those communities tend to demonstrate greater resilience in the face of water-related crises. Therefore, the design of effective interventions in this area must adopt an integrated approach one that not only invests in physical infrastructure and economic support but also enhances water governance, raises public awareness, strengthens local engagement, and fosters institutional coherence. It is also important to note that the environmental factor's lack of statistical significance in the model does not imply its irrelevance. Instead, it should be interpreted as an indication of the insufficient attention paid to the potential of environmental assets in the current water crisis management framework. Accordingly, policymakers and planners should prioritize economic and institutional dimensions while simultaneously taking more proactive measures to enhance environmental capital. Based on the findings, it can be concluded that resilience to water crises encompasses the community's capacity to adapt to water scarcity conditions, recover from drought-induced shocks and damages, and effectively manage available resources in a sustainable manner.

ETHICAL CONSIDERATIONS

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

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

REFERENCES

References (in Persian)

- Akhgari, M., & Ghasemian Moghaddam, A. (2023). Prioritization of the effective factors on increasing the economic resilience of rural households against drought (Case study: Dastgerdan District, Tabas County). *Journal of Village and Space Sustainable Development*, 4(2), 112–129. <https://doi.org/10.22077/vssd.2023.5530.1121> [In Persian]
- Bakhtar, S; Shafiei, A; Azami, A. (2024). Analysis of Factors Affecting the Optimal Management of Agricultural Water Resources: A Case Study of Hassanabad District, Islamabad Gharb County. *Journal of Geography and Environmental Sustainability*, Volume 14, Issue 2, pp. 19-32. <https://doi.org/10.22126/ges.2024.10349.2742> [In Persian]
- Barghi, H; Hashemi, S; Jafari, N. (2017). Assessing Environmental Resilience of Villages at Risk of Earthquakes: A Case Study of the Mojazat District, Zanjan County. *Rural Research and Planning*, Volume 6, Issue 1, pp. 81-97. <https://www.magiran.com/p1701042> [In Persian]

- Barzegarpir, S; Oloumi, Matin, Y; Mahmoudzadeh, M; Bafandeh Zandeh, A. (2025). Designing a Model of Relationships Between Factors Influencing Community Resilience Enhancement in Tabriz City. *Scientific Journal of Strategic Cultural Studies*, Volume 5, Issue 1, pp. 175-207. <https://doi.org/10.22083/scsj.2024.479249.1217> [In Persian]
- Damavandi, A; Saadi, H; Naderi Mahdavi, K. (2024). Measuring and Analyzing the Resilience of Rural Households in Hamadan Province Against Agricultural Water Poverty. *Journal of Geography and Development*, Volume 22, Issue 74, pp. 111-138. <https://doi.org/10.22111/gdij.2024.8148> [In Persian]
- Darban Astane, A., & Ghasemi, F. (2022). Assessing the resilience of rural farmers to drought and identifying livelihood strategies (Case study: Central part of Shazand County). *Journal of Village and Development*, 25(2), 1–22. <https://doi.org/10.30490/rvt.2020.265393.1018> [In Persian]
- Ebrahimi, S; Rahmani Fazli, S; Azizpour, F. (2022). Factors Influencing the Adaptation of Rural Settlements to the Water Crisis of Lake Urmia: A Case Study of Miyandoab County. *Journal of Spatial Analysis of Environmental Hazards*, Volume 9, Issue 3, pp. 37-56. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.24237892.1401.9.3.3.3> [In Persian]
- Ghasemi, M; Alizadeh Dolat Abadi, L; Sohailifar, H. (2021). Identifying Effective Strategies for Proper Management of Agricultural Water Resources from the Perspective of Smallholder Farmers: A Case Study of the Darz Ab District, Mashhad County. *Journal of Agricultural Economics Research*, Volume 13, Issue 2, pp. 81-108. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.20086407.1400.13.2.5.6> [In Persian]
- Gholami, M J; Talachian, M; Shahriari, S K. (2022). Providing a Conceptual Framework for the Effects of Population Density on Security and Coping with the Drinking Water Crisis in Tehran. *Journal of Geographic Research*, Volume 10, Issue 37, pp. 139-180. <https://www.magiran.com/p2490512> [In Persian]
- Iran Meteorological Organization. (2023). Climatic report of Ardabil Province (long-term data, 1991–2020). [In Persian]
- Khodapanah, K. (2023). Analyzing the Economic and Social Resilience of Rural Communities Against Earthquake Hazards: A Case Study of the Central Villages of Ardabil County. *Journal of Human Settlement Planning Studies*, Volume 18, Issue 3, pp. 187-197. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.25385968.1402.18.3.21.2> [In Persian]
- Leis, N., Rostami, F., & Alibaygi, A. (2022). Strategies to improve farmers' resilience to drought from the perspective of experts: A study in Miandoab County. *Journal of Geography and Development*, 19(65), 77–98. <https://doi.org/10.22111/j10.22111.2021.6540> [In Persian]
- Montazeri, A; Sahneh, B; Qanqarmeh, A. (2021). The Role of Water Resource Management in the Sustainable Livelihoods of Rural Households: A Case Study of the Northern and Southern Farm Districts of Agh Qala County. *Journal of Spatial Planning*, Volume 11, Issue 1, pp. 67-86. <https://doi.org/10.22108/sppl.2020.122008.1478> [In Persian]
- Saljoughi, I; Ghadrati, H; Zaarei, M. (2023). Semantic Analysis of the Coping Strategies of Rural Livestock Farmers with Drought and Water Crisis in the Musiabad Region of Torbat Jam County Based on Grounded Theory. *Journal of Geographical Studies of Arid Regions*, Volume 14, Issue 54, pp. 39-60. <https://doi.org/10.22034/jargs.2023.406722.1048> [In Persian]
- Sargazi, A. R., Ghavidel, M., Salarpour, M., Ziaie, S., & Keikha, A. R. (2024). Factors affecting the resilience (economic–environmental) of rural households in the Sistan region against drought and the absence of the Hirmand River water. *Journal of Village and Development*, 27(2), 1–22. <https://doi.org/10.30490/rvt.2024.361851.1562> [In Persian]
- Statistical Center of Iran. (2016). Results of the 2016 National Population and Housing Census. [In Persian]
- Talayi Hour, V; Zahedi, M; Bakhtar, S; Shafiei, A. (2022). Measuring and Prioritizing Resilience Against Earthquakes: A Case Study of the Southern and Central Vilki Sections of Namin County. *Journal of Regional Planning of Marvdasht*, Volume 12, Issue 46, pp. 245-260. <https://doi.org/10.30495/jzpm.2022.5366> [In Persian]
- Yadgari Far, F; Poudineh, M R; Esmaeilzadeh, M. (2023). Assessing the Resilience of Zahedan County Against Water and Drought Crises. *Journal of Applied Geographic Sciences Research*, Volume 23, Issue 68, pp. 345-364. <http://dx.doi.org/10.52547/jgs.23.68.345> [In Persian]
- Yazdanpanah, M; Rahimi, F. (2019). Reasons for the Failure of Agricultural Extension Using Grounded Theory: A Case Study of Agricultural Jihad in Lorestan Province. *Journal of Agricultural Economics and Development Research in Iran*, Volume 50, Issue 3, pp. 459-575. <https://doi.org/10.22059/ijaedr.2019.269598.668674> [In Persian]

References (in English)

- Arimi, V., Karami, E., & Keshavarz, M. (2018). *Climate change and agriculture: Impacts and adaptive responses in Iran. Journal of Integrative Agriculture*, 17(1), 1–15. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(17\)61794-5](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(17)61794-5)
- Beilin, R., & Wilkinson, C. (2015). Introduction: Governing for urban resilience. *Urban Studies Journal Limited*, 52(7), 38-51.
- Boston, M., Bernie, D., Brogden, L., Forster, A., Galbrun, L., Hepburn, L. A., Morkel, J. (2024). Community resilience: A multidisciplinary exploration for inclusive strategies and scalable solutions, *Resilient Cities and Structures*, 3(1), 114-130.
- Cantillana, R., Molina, J. L., Iniesta-Arandia, I. (2024). Bringing water values into play in the Atacama desert water crisis, *Journal of Arid Environments*, 225, , 105256.
- Dessy, S., Tiberti, L., Tiberti, M., & Zoundi, D. (2025). Polygyny and drought resilience in village economies: Evidence from rural Mali. *The World Bank Economic Review*, lhaf020. <https://doi.org/10.1093/wber/lhaf020>
- Devincentis, A. (2020). Scale of sustainable agriculture water management. Phd. Dissertation. *Hydrologic Sciences in the Office of Graduate Studies, University of California, Davis*.

- Fletcher, A. J., Akwen, N. S., Hurlbert, M., & Diaz, H. P. (2020), You relied on God and your neighbour to get through it, social capital and climate change adaptation in the rural Canadian Prairies, *Regional Environmental Change*, 20, 1-15.
- Hussein, H. (2018), Lifting the veil: unpacking the discourse of water scarcity in Jordan, *Environmental Science & Policy*, 89, 385–392.
- Hair, J. F., Hult, G. T. M., Ringle, C. M. & Sarstedt, M. (2017). A Primer on Partial Least Squares Structural Equation Modeling (PLS-SEM). 2nd Edition, Sage Publications Inc., Thousand Oaks, CA. <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=2297757>
- Isukuru, E. J., Opha, J. O., Isaiah, O. W., Orovwighose, B., Emmanuel, S. S. (2023), Nigeria's water crisis: Abundant water, polluted reality, *Cleaner Water*, 2, 100026.
- Lee, S.H., Choi, J.Y., Hur, S.O., & Taniguchi, M. (2020), Food-centric interlinkages in agricultural food-energy-water nexus under climate change and irrigation management. *Resources, Conservation and Recycling*, 163, 105099.
- Logan, T. M., Aven, T., Guikema, S. D., & Flage, R. (2022), *Risk science offers an integrated approach to resilience*. *Nature Sustainability*, 5(9), 741-748
- Madani, K. (2014). *Water management in Iran: what is causing the looming crisis?* *Journal of Environmental Studies and Sciences*, 4(4), 315–328. <https://doi.org/10.1007/s13412-014-0182-z>
- Mancosu, N., Richard, L. S., Gavril, K., Donatella, S. (2015), Water scarcity and future challenges for food production, *Journal of Water*, (7):975-992.
- Nosha, N., Lashgarara, F., Hosseini, S. J. F., Mirdamadi, S. M., & Rezaei-Moghaddam, K. (2021). Determining the resilience of rural households to food insecurity during drought conditions in Fars Province, Iran. *Sustainability*, 13(15), 8384. <https://doi.org/10.3390/su13158384>
- Paiva, A.C.E., Nath'alia, N., Rodriguez, D.A., Tomasella, J., Carriello, F., Rezende, F.S. (2020), Urban expansion and its impact on water security: the case of the Paraíba do Sul River Basin, S'ao Paulo, Brazil, *The Science of The Total Environment*, 720, 137509.
- Pereira, L. S., Cordery, I., Iacovides, I. (2019), Coping with water scarcity: Addressing the challenges. *Springer Science & Business Media*.
- Rose, A. (2009), Analyzing terrorist threats to the economy: A computable general equilibrium approach. In H. Richardson, P. Gordon, & J. Moore (Eds.), *Economic Impacts of Terrorist Attacks*, Edward Elgar. pp. 196–217.
- Rutter, M., Anita, T., Daniel, S., Pine, J., Leckman, F., Stephen, S., Margaret, J., Eric T. (2015), Resilience: concepts, findings, and clinical implications, *Rutter's Child and Adolescent Psychiatry*, 29, 341-351.
- Savari, M., Eskandari Damaneh, H., & Eskandari Damaneh, H. (2023). Effective factors to increase rural households' resilience under drought conditions in Iran. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 90, 103644. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2023.103644>
- Schouten, M., Vander Heide, M., Heijman, W. (2009), Resilience of Social-Ecological systems in European Rural Areas :Theory and Prospects, 113th EAAE Seminar The Role of Knowledge, *Innovation and Human Capital in Multifunctional Agriculture And /Territorial Rural Development*.
- Shah, A. A., Khan, A., Ullah, A., Khan, N. A., & Alotaibi, B. A. (2024), The role of social capital as a key player in disaster risk comprehension and dissemination: lived experience of rural communities in Pakistan, *Natural Hazards*, 120, 4131-4157.
- Shrum, T. R., Travis, W. R., Williams, T. M., & Lih, E. (2018), Managing climate risks on the ranch with limited drought information, *Climate Risk Management*, 20, 11-26.
- Stone, M. (1974). Cross-validatory choice and assessment of statistical predictions. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, 36(2), 111–147. <https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1974.tb00994.x>
- Tang, Y., Zhang, F., Engel, B. A., Liu, X., Yue, Q., & Guo, P. (2020), Grid-scale agricultural land and water management: A remote-sensing-based multiobjective approach, *Journal of Cleaner Production*, 265, 121792.
- Tumini, I., Villagra-Islas, P., & Herrmann-Lunecke, G. J. N. H. (2017), Evaluating reconstruction effects on urban resilience: a comparison between two Chilean tsunami- prone cities, *natural hazards*, 85, 1363-1392.
- UN-Water (2020). *Policy brief on drought and water management*.
- van Aalst, M. A., Koomen, E., & de Groot, H. L. F. (2023). Vulnerability and resilience to drought and saltwater intrusion of rice farming households in the Mekong Delta, Vietnam. *Economics of Disasters and Climate Change*, 7, 407–430. <https://doi.org/10.1007/s41885-023-00133-1>
- Wang, C H., Blackmore, J., Wang, X., Yum K.K., Zhou, M., Diaper, C., mcgregor, G., Anticev, J. (2009), Overview of resilience concepts with application to water resource systems. *Ewater Technical Report*. September 2009.
- Wang, X., Chen, Y., Fang, G., Li, Z., Liu, Y. (2022), The growing water crisis in Central Asia and the driving forces behind it, *Journal of Cleaner Production*, 378, 134574.
- Zhang, Ch-Y ., Oki, T. (2022), Water pricing reform for sustainable water resources management in China's agricultural sector, *Agricultural Water Management*, 275, 108045.

مجله علمی پژوهشی مخاطرات محیط طبیعی، دوره ۱۵، شماره ۵۰، شماره پیاپی ۰۴، دی ۱۴۰۵

واکاوی عوامل اثرگذار بر تاب آوری کشاورزان در برابر بحران کم آبی (مورد مطالعه روستاهای بخش مرکزی شهرستان اردبیل)

کیومرث خداپناه^{۱*} ID، ارسطو یاری^۲، سعدی محمدی^۳

۱. استادیار گروه جغرافیا و برنامه ریزی روستایی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران (نویسنده مسئول)

ایمیل: k_khodapanah@pnu.ac.ir ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3834-2335>

۲. استاد گروه جغرافیا، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

۳. دانشیار گروه جغرافیا، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۲۸ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۱۲/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۱۵ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۱۰/۰۱ واژه‌های کلیدی: بحران کم آبی، بلایای طبیعی، تاب آوری، خشکسالی، توسعه پایدار.	بحران آب در ایران، یکی از پیچیده‌ترین و پرچالش‌ترین مسائل است. این موضوع در دهه‌های اخیر، تبدیل به تهدیدی جدی برای امنیت کشاورزی، زیست‌محیطی و حتی ثبات اجتماعی و اقتصادی شده است. از این رو، این پژوهش با هدف بررسی عوامل مؤثر بر تاب آوری کشاورزان روستایی در برابر بحران کم آبی در بخش مرکزی شهرستان اردبیل انجام شده است. جامعه آماری این پژوهش شامل ۳۰ روستای با جمعیت بالای ۵۰ خانوار کشاورز است. حجم نمونه بر اساس فرمول کوکران ۳۶۶ نفر برآورد گردید و برای دستیابی به نتایج بهتر به ۳۸۰ نفر افزایش یافت. جهت تحلیل موضوع، از شش عامل و ۷۲ مؤلفه استفاده شد. به منظور تحلیل یافته‌ها از نرم‌افزار 3 smart PLS استفاده گردید. یافته‌ها نشان داد از ۷۲ مؤلفه، شش مؤلفه با دارا بودن بارهای عاملی کمتر از مقدار تعیین‌شده (۰/۴) از مدل حذف شدند. همچنین از بین ۶۶ مؤلفه استاندارد، سه مؤلفه وجود قوانین و مقررات شفاف در زمینه استفاده و حفاظت پایدار از منابع آب، انعطاف‌پذیری برنامه‌های دولت در برابر تغییرات آب‌وهوایی و ایجاد زیرساخت‌های مناسب برای مدیریت کم آبی دارای بالاترین بار عاملی بودند. همچنین، یافته‌ها بیانگر این است که ارتباط بین متغیرهای برون‌زا و درون‌زای مدل معنی‌دار است و قدرت مدل در پیش‌بینی نسبتاً قابل‌قبول است. بنابراین، عامل اقتصادی بیشترین اثر را در تاب آوری کشاورزان روستایی در برابر بحران کم آبی دارد. تاب آوری در برابر کم آبی در بخش مرکزی شهرستان اردبیل یک پدیده تلفیقی است که بدون نگاه چندبعدی و بهره‌گیری همزمان از ظرفیت‌های اقتصادی، اجتماعی، زیرساختی، نهادی و فناوری، توان محافظت از معیشت روستاییان به‌طور پایدار فراهم نمی‌شود. این یافته‌ها نشان می‌دهد که نظام برنامه‌ریزی موجود، هرچند منابع مالی و اعتبارات ارائه می‌دهد، اما به‌دلیل پراکندگی، کوتاه‌مدت بودن و عدم هم‌راستایی با ویژگی‌های محلی، هنوز تاب آوری جامعه روستایی را به‌صورت مستمر تقویت نکرده است.

استناد: خداپناه، کیومرث، یاری، ارسطو و محمدی، سعدی. (۱۴۰۵). واکاوی عوامل اثرگذار بر تاب آوری کشاورزان در برابر بحران کم آبی

(مورد مطالعه روستاهای بخش مرکزی شهرستان اردبیل). مخاطرات محیط طبیعی، ۱۰ (۵۰)، ۶۷-۹۰.

ناشر: دانشگاه سیستان و بلوچستان

© نویسنده / نویسندگان

DOI: 10.22111/jneh.2026.53000.2137



مقدمه

آب، عنصری حیاتی برای وجود و پایداری همه اشکال حیات روی زمین است و آن را به یک جزء مهم زیست‌محیطی تبدیل می‌کند. نیاز به آب به دلیل تأثیرات مختلف انسانی، نرخ سریع گسترش جمعیت و رشد شهرنشینی رو به افزایش است (Paiva et al., 2020). محدودیت ذاتی منابع آب و وقوع خشکسالی و آثار تخریبی فعالیت انسان بر محیط، زمینه‌ساز چالش‌های سنگین در امر بهره‌گیری از منابع آب شیرین است. کمبود این عنصر حیاتی یکی از معضلاتی است که بسیاری از جوامع در قرن حاضر با آن مواجه هستند و مشکلات فراوانی را برای آنها ایجاد نموده است. هنگامی که آب برای کاهش گرسنگی و فقر و تولید غذا در مناطقی که اغلب رشد جمعیت در آنها بیشتر از توانایی استفاده پایدار از منابع طبیعی است، دچار کمبود می‌شود؛ توسعه صنعتی، شهری، روستایی، کشاورزی و گردشگری را که لازمه پیشرفت جوامع است را با چالش مواجه می‌نماید (Pereira et al., 2019). در واقع خشکسالی و بحران آب، بر خلاف زلزله و سیل، دارای گستره عملکرد وسیع است و به صورت مستقیم زندگی جوامع انسانی و رفاه و توسعه ملت‌ها را مورد تهدید قرار می‌دهد (سلجوقی و همکاران، ۱۴۰۲). به گونه‌ای که بحران آب، رضایت اجتماعی و امنیت غذایی را به خطر انداخته و به صورت خشونت، تعارضات اجتماعی و مهاجرت‌ها پدیدار می‌شود و در نهایت به نارضایتی عمومی منجر می‌شود. به گونه‌ای که امروزه، افزایش تقاضا و کمبود آب، دسترسی به آب جهت مصارف را به رقابت تبدیل کرده و نبود تعادل بین عرضه و تقاضا، به درگیری بین ذی‌نفعان منجر شده است (یزدان‌پناه و رحیمی، ۱۳۹۸). بنابراین، می‌توان بیان نمود که بحران آب روند توسعه و پیشرفت را با مشکلات اساسی مواجه می‌سازد؛ زیرا میزان تقاضا برای منابع آبی از سالی به سال دیگر افزایش می‌یابد و دو عامل تغییرات اقلیمی و افزایش جمعیت، رقابت را شدیدتر می‌کند (Mancosu et al., 2015).

ایران به عنوان یکی از کشورهای واقع در کمربند خشک، با مشکل کم‌آبی مواجه می‌باشد. رشد فزاینده جمعیت و نیاز به محصولات دامی و کشاورزی و محدودیت منابع خاک و آب، به عنوان بستر اصلی تولیدات کشاورزی، موضوع کم‌آبی را به گونه بسیار جدی فراوری کشور قرار داده است (یادگاری‌فر و همکاران، ۱۴۰۲). بحران‌های ناشی از کمبود آب، تهدیدی برای محیط زیست، رفاه و سلامت انسان‌ها و در واقع تهدیدی برای توسعه پایدار است. در حال حاضر افزایش مصرف آب از لحاظ رشد جمعیت و ظهور نیازهای جدید، روند کاهش سرانه آب را به دنبال داشته است و تأمین پایدار منابع آب را با چالش مواجه نموده است. بررسی وضعیت مصرف آب در نقاط مختلف بیانگر این است که کشاورزی بیشترین سهم آب مصرفی را به خود اختصاص می‌دهد. در سال‌های اخیر شمار افزایش چاه‌های غیر مجاز و مدیریت نامطلوب آب، منجر به کاهش سطح آب‌های زیرزمینی شده است و خشک شدن میزان زیادی از چشمه‌ها و رودخانه‌ها را به دنبال داشته است (باختر و همکاران، ۱۴۰۳). این موضوع، در نتیجه شهروندان بسیاری از مناطق، به خصوص مناطق روستایی که زندگی و ادامه حیات آنها وابسته به کشاورزی و آب است را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در ایران مناطق روستایی از کمبودهای بیشتری نسبت به شهرها رنج می‌برند که سبب کاهش تاب‌آوری آنها در برابر بلایای طبیعی و آسیب‌پذیری بیشتری شده است و تأثیرات مخربی نیز بر جای می‌گذارد؛ زیرا تخریب منابع درآمدی و امکانات زیستی، سلامت روستاییان را به خطر می‌اندازد و تهدیدی برای توسعه شناخته می‌شود. این امر لزوم توجه به تاب‌آوری را در سطح روستاها خاطرنشان می‌سازد (طالعی حور و همکاران، ۱۴۰۱). به گونه‌ای که بر اساس شاخص سازمان ملل و مؤسسه بین‌المللی مدیریت آب، کشور ایران برای حفظ منابع موجود خود باید بتواند ۱۱۲ درصد منابع آب قابل‌استحصال خود را افزایش دهد که این مقدار با توجه به امکانات و منابع موجود آب غیر ممکن است (غلامی و

همکاران، ۱۴۰۱). بنابراین، بحران آب در ایران، یکی از پیچیده‌ترین و پرچالش‌ترین مسائلی است که در دهه‌های اخیر، گریبان‌گیر کشور شده و تهدیدی برای امنیت کشاورزی، زیست‌محیطی و حتی ثبات اجتماعی و اقتصادی تبدیل شده است.

در سال‌های اخیر، استان اردبیل و به‌خصوص شهرستان اردبیل با کاهش قابل‌توجه میزان بارندگی سالانه مواجه شده است. بر اساس داده‌های سازمان هواشناسی برای دوره آماری ۱۹۹۱-۲۰۲۰، میانگین بارش سالانه در این منطقه حدود ۳۴۰ میلی‌متر برآورد شده است، به‌طوری‌که بیشترین میزان بارش در فصل‌های زمستان و بهار و کمترین آن در تابستان رخ می‌دهد. این الگوی نامتقارن بارش، نمایانگر شرایط نیمه‌خشک اقلیمی منطقه است و موجب می‌شود تأمین منابع آب سطحی و زیرزمینی با نوسانات فصلی و نامتوازن همراه شود، به‌ویژه در دوره‌های کم‌بارشی و خشکسالی فشار بر منابع آب افزایش می‌یابد (سازمان هواشناسی کشور، ۱۴۰۲). کاهش بارش و محدودیت منابع آب، تأثیر مستقیمی بر سطح آب‌های زیرزمینی و جریان رودخانه‌ها دارد و دسترسی به آب برای مصارف شرب و کشاورزی را دشوارتر می‌کند (Karimi et al., 2020). این مسئله به‌ویژه در بخش کشاورزی که آب یکی از نهاده‌های اصلی تولید است، فشار مضاعفی بر فعالیت‌های معیشتی خانوارها وارد می‌کند و در برخی مناطق، نبود دسترسی پایدار به منابع آب موجب مهاجرت روستاییان به شهرها شده و تغییرات جمعیتی و روند حاشیه‌نشینی را تشدید کرده است (Madani, 2014). با توجه به این چالش‌ها، درک شهروندان از محدودیت‌های منابع آبی و چشم‌اندازهای پیش‌رو اهمیت ویژه‌ای دارد؛ زیرا افزایش آگاهی عمومی و مشارکت اجتماعی می‌تواند سیاست‌گذاری‌های مدیریت منابع آب و سازگاری با خشکسالی را تسهیل کرده و تاب‌آوری جوامع محلی را ارتقا دهد (UN-Water, 2020). از این‌رو، محدودیت منابع آب و نوسانات بارش به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین عوامل تهدیدکننده توان معیشتی و ظرفیت سازگاری خانوارهای روستایی در استان اردبیل مطرح می‌شوند و نیازمند برنامه‌ریزی دقیق و مبتنی بر شواهد برای مقابله با خشکسالی هستند. بنابراین، تاب‌آوری در برابر کم‌آبی، نیازمند تلاش مضاعفی در قالب عوامل متعدد و همکاری گروه‌های مختلف است. این پژوهش با شناسایی سنجه‌های مؤلفه‌های تاب‌آوری، چارچوبی را برای تجزیه‌و-تحلیل تاب‌آوری در برابر بحران کم‌آبی امکان‌پذیر می‌سازد. در این راستا افزایش تاب‌آوری روستاییان منطقه مورد مطالعه در ابعاد مختلف اقتصادی، اجتماعی، فرهنگی و ... می‌تواند از تشدید بحران و حاد شدن وضعیت کم‌آبی جلوگیری نماید. بنابراین، با توجه به آنچه بیان گردید، این پژوهش با هدف بررسی عوامل مؤثر بر تاب‌آوری کشاورزان روستایی در برابر بحران کم‌آبی در بخش مرکزی شهرستان اردبیل انجام شده است؛ زیرا در این منطقه اقتصاد غالب فعالیت‌های کشاورزی است که بخش عمده‌ای از منابع آب به شیوه آبیاری سنتی استفاده می‌شود و با آگاهی کشاورزان می‌توان آن را بهبود بخشید. بر این اساس این پژوهش در راستای پاسخگویی به سوالات زیر انجام شده است:

* عوامل اثرگذار بر تاب‌آوری کشاورزان در برابر بحران کم‌آبی در بخش مرکزی شهرستان اردبیل در برگیرنده چه مواردی است؟

* هر یک از این عوامل تا چه میزان در تقویت ظرفیت تاب‌آوری کشاورزان مؤثر هستند؟

در دهه‌های اخیر، تحقیقات در مورد بُعد اجتماعی-اقتصادی، فرهنگی آب به طرز چشمگیری افزایش یافته است و این امر نشان می‌دهد که حکمرانی و مدیریت آب، علاوه بر زیرساخت‌ها و دانش علمی، با ارزش‌ها، رفتارها و سازمان‌های انسانی نیز مرتبط است (Cantillana et al., 2024). امروزه نیز به شکل گسترده‌ای، دستیابی به توسعه

پایدار منابع آب با مفهوم تاب‌آوری گره خورده است. بر اساس مفهوم تاب‌آوری، منابع پایدار آب، سیستمی است که دارای ظرفیت کافی به منظور کاهش آثار نامطلوب اختلال مانند تغییر اقلیم، خشکسالی و سیلاب باشد (Wang et al., 2009). به‌زعم برخی از محققین، چهار عامل مهم در کاهش تاب‌آوری در برابر کمبود آب قابل‌شناسایی است و شامل توزیع ناعادلانه منابع در بین کشورهای همسایه، فشارهای اضافی ناشی از تغییرات اقلیمی، رشد جمعیت و مهاجرت، سازندهای زمین‌شناسی طبیعی و مناطقی با خشکی طبیعی و بارندگی کم است (Hussein, 2018).

مطالعه در زمینه تاب‌آوری از سال ۱۹۷۳ و توسط هولینگ^۱ با دیدگاه محیط زیست شروع شد و سپس این مفهوم به‌طور گسترده‌ای در اقتصاد، علوم اجتماعی و روان‌شناسی وارد شد (Schouten et al., 2009). ادبیات تاب‌آوری مملو از نظرات و تعاریف گوناگون است. این ایده با دانش و مهارت‌های مختلف، فرارشته‌ای و بین رشته‌ای شکل می‌گیرد. این نحوه درک، اندازه‌گیری و اعمال تاب‌آوری را شکل می‌دهد (Boston et al., 2024). تاب‌آوری توانایی یک سیستم جهت پایداری و انطباق با یک اختلال خاص و بازبایی عملکرد طبیعی به حالت تعادل است و این امکان را فراهم می‌آورد تا یک وضعیت جدید و یا پایه اولیه را تعیین کند (Tumini et al., 2017). به‌زعم برخی دیگر از محققین، تاب‌آوری رویکردی اجتماع محور است که بر ارتقای آمادگی اجتماعات در مقابل ناپایداری‌های ایجادشده از مخاطرات، به قصد زیست‌پذیری سکونتگاه‌ها تأکید دارد (Rutter et al., 2015). در علوم مهندسی و پایه، تاب‌آوری به مفهوم سرعت بازگشت به حالت تعادل اولیه پس از بروز تنش تعریف می‌شود. در روان‌شناسی نیز به مفهوم توانایی افراد در انطباق با شرایط دشوار و تنش‌زا بیان شده است تا با مشکلات به طرز صحیح مقابله نماید (Beilin & Wilkinson, 2015). در مباحث رفتار سازمانی و مدیریتی، تاب‌آوری یک فرآیند محسوب می‌شود و آن را زیر عنوان مدیریت بحران و تداون در نظر می‌گیرد. تاب‌آوری در اقتصاد به دو صورت پویا و ایستا تعریف می‌شود (Rose, 2009). هیئت بین دولت‌های تغییر اقلیم، تاب‌آوری را توانایی یک سیستم و اجزای آن برای تطبیق، پیش‌بینی، بازبایی و جذب اثرات یک رویداد خطرناک تعریف می‌کند. به‌گونه‌ای دیگر، تاب‌آوری، ظرفیت یک سیستم به منظور جذب آشفتگی‌ها و سازماندهی مجدد در حین تغییر است که اصولاً ساختار، عملکرد، بازخورد و هویت را حفظ کند (Logan et al., 2022). در ادبیات بوم‌شناختی، دو تعریف از تاب‌آوری مورد توجه است. اولین تعریف، تغییر، تداوم و غیر قابل-پیش‌بینی بودن را در یک سیستم غیرمتعادلی و غیرخطی در بر می‌گیرد. دومین تعریف بر ثبات، کارایی و پیش‌بینی‌پذیری در یک سیستم تک تعادلی تمرکز دارد که پیوسته نزدیک به یک حالت پایدار است (برزگرپیر و همکاران، ۱۴۰۴). جهت بررسی عوامل اثرگذار بر تاب‌آوری افراد در سیستم‌های مختلف، یکی از مهم‌ترین شاخص‌ها، شاخص طبقه‌بندی پنج‌گانه امنیتی، اقتصادی، اجتماعی، سیاسی و محیطی است. شاخص دیگر، گروه تحقیقاتی سنتینتال است که به منظور بررسی توانایی کشورهای در حال توسعه و بازارهای نوظهور برای مقابله با شوک‌ها، با اندازه‌گیری تاب‌آوری کشورها در مقابل شوک‌ها، مقدار تاب‌آوری این کشورها را بررسی می‌کند (دماوندی و همکاران، ۱۴۰۳). در اتخاذ تاب‌آوری سه مدل وجود دارد و شامل ۱- مدل شناختی-ساختاری که بر تغییرات ساختاری در نهادها و جامعه، شرایط فردی، محیطی و شناختی تأکید دارد، ۲- مدل بهبود که تأکید دارد تمام ضربات و شوک‌ها به محیط می‌تواند حذف شود و ۳- مدل کاهشی که بر کاهش مواجهه و خطرات تأکید دارد (برقی و همکاران، ۱۳۹۶). مؤلفه‌های کلیدی تاب‌آوری دربرگیرنده موارد متعددی مانند همبستگی، اعتماد، ارزش‌های مشترک و تعامل متقابل است (Fletcher et al., 2020). رویکردهای تاب‌آوری در سه دسته، قابل تقسیم هستند. در رویکرد اول،

¹ - Holling

تاب‌آوری به مثابه پایداری است؛ این رویکرد، از مطالعات اکولوژیکی که تاب‌آوری را به‌عنوان توانایی بازگشت به قبل تعریف می‌کند، گرفته شده است. در رویکرد دوم، تاب‌آوری به‌عنوان بازیابی مورد توجه است و بر ارتباط با توانایی جامعه جهت بازگشت به گذشته از عامل فشار و برگشت به حالت اولیه تأکید دارد. در سومین رویکرد بیشتر به ظرفیت جامعه برای واکنش به تغییر و سازگاری تأکید می‌شود. ویژگی مشترک این سه دسته، مقاومت، توانایی ایستادگی و واکنش مثبت به فشار است (خدایانه، ۱۴۰۲)

موضوع آب، یکی از مباحث مهم در مطالعات داخلی و خارجی است که با توجه به مسائل و مشکلاتی که به واسطه کمبود این ماده حیاتی ایجاد شده است، بحران‌هایی گریبان‌گیر کیفیت زندگی مردم روستایی گردیده و تاب‌آوری آنها را تحت تأثیر قرار داده است. در این پژوهش اقدام به بررسی عوامل مؤثر بر تاب‌آوری در برابر بحران کم آبی در مناطق روستایی شهرستان اردبیل گردید. مرور مطالعات نشان داد که پژوهشی در رابطه بحران آب در شهرستان اردبیل انجام نشده است. بر این اساس، با مرور پژوهش‌های انجام‌شده، سعی گردید که مرتبط‌ترین و بروزترین مقالات مورد بررسی قرار گیرد. از جمله این پژوهش‌ها، مطالعه لیث و همکاران (۱۴۰۰) است که راه‌کارهای بهبود تاب‌آوری کشاورزی در برابر خشکسالی از دیدگاه کارشناسان را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که راه‌کارهای ارتقای تاب‌آوری از نظر کارشناسان شامل مدیریت آب اقلیم سازگار، مدیریت خاک اقلیم سازگار، مدیریت زراعی اقلیم سازگار، مدیریت اطلاعات اقلیم سازگار، مدیریت معیشت اقلیم سازگار و مدیریت اجتماع اقلیم سازگار است. صاحب نظران و کارشناسان بیشترین اجماع را در محور مدیریت معیشت اقلیم سازگار داشتند که نشان می‌دهد مؤثرترین راه‌کار ارتقای تاب‌آوری از نظر آنان می‌باشد. ابراهیمی و همکاران (۱۴۰۱) عوامل مؤثر بر سازگاری سکونتگاه‌های روستایی با بحران آب دریاچه ارومیه را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج بررسی آنها بیانگر این است استفاده از منابع طبیعی و افزایش سرمایه اقتصادی، مهم‌ترین عامل مؤثر بر افزایش ظرفیت سازگاری روستاهای مورد مطالعه است. دربان آستانه و قاسمی (۱۴۰۱) در پژوهشی به بررسی و ارزیابی ابعاد تاب‌آوری کشاورزان روستایی در برابر خشکسالی و شناسایی راهبردهای معیشتی پرداختند. این پژوهشگران دریافتند تاب‌آوری کشاورزان در شرایط خشکسالی در ابعاد اقتصادی و نهادی، ناپایدار و در شاخص‌های کالبدی-زیست‌محیطی و اجتماعی در وضعیت پایدار قرار دارد. اخگری و قاسمیان مقدم (۱۴۰۲) اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر تاب‌آوری اقتصادی خانوارهای روستایی در برابر خشکسالی را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد بیشترین عوامل اثرگذار در تاب‌آوری در برابر خشکسالی و افزایش قدرت سازگاری آنها، شامل تقویت مشارکت محلی روستاییان، توجه به دانش بومی، توسعه بیمه محصولات و توسعه بذرها و گونه‌های مقاوم است. سرگزی و همکاران (۱۴۰۳) عوامل مؤثر بر تاب‌آوری خانوارهای روستایی منطقه سیستان در برابر خشکسالی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که تاب‌آوری کشاورزان در برابر خشکسالی پایین بوده و متغیرهایی مانند تعلق مکانی، توانمندسازی، عوامل جمعیتی و اقتصادی بر تاب‌آوری کل، اثر مثبت و معنی‌دار و متغیرهایی مانند تحصیلات کشاورزان اثر منفی و معنی‌دار بر احتمال قرارگرفتن خانوار در سطوح بالاتر از میزان تاب‌آوری را داشتند. جهانسوزی و همکاران (۱۴۰۳) نقش سرمایه اجتماعی در بهبود تاب‌آوری خانوارهای روستایی در مقابل خشکسالی را مورد مطالعه قرار دادند. خانوارهای مورد مطالعه از نظر سرمایه اجتماعی در وضع مناسبی قرار دارند، ولی از لحاظ تاب‌آوری در وضعیت مطلوبی قرار ندارند. همچنین، نتایج نشان داد، عامل شبکه‌های اجتماعی بیشترین نقش را در بهبود تاب‌آوری خانوارهای روستایی در برابر خشکسالی دارد. از سوی دیگر، بیشترین اثر سرمایه اجتماعی بر بعد اقتصادی و کمترین اثر مربوط به بعد تاب‌آوری خانوارهای روستایی بود.

شروم و همکاران^۱ (۲۰۱۸) مدیریت خطرات آب‌وهوایی در مزرعه با استفاده از اطلاعات موجود را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این بررسی نشان داد که سودآوری و پایداری دامداری به‌شدت به بارندگی به موقع و کافی برای تولید علوفه مرتعی وابسته است. همچنین، فاصله زیادی بین اطلاعات موجود و نیازهای اطلاعاتی دامدارانی که به‌دنبال سازگاری پویا با خشکسالی هستند، وجود داشت. تعیین میزان تاب‌آوری خانوارهای روستایی در برابر ناامنی غذایی در شرایط خشکسالی عنوان پژوهشی است که توسط نوشا و همکاران^۲ (۲۰۲۱) انجام گردید. نتایج این پژوهش نشان داد بیش از نیمی از خانوارهای روستایی از سطح پایینی از تاب‌آوری در برابر ناامنی غذایی برخوردار بوده‌اند؛ درحالی‌که کمتر از ۴۵ درصد از خانوارهای روستایی مورد مطالعه دارای تاب‌آوری بالاتر بودند که این وضعیت با مجموعه‌ای از ویژگی‌های مشخص همراه بوده است. مدل تأییدشده در این پژوهش، چارچوبی استاندارد برای سنجش تاب‌آوری خانوارها در مواجهه با ناامنی غذایی و توان بازیابی آنها از شوک‌های مرتبط با خشکسالی ارائه می‌دهد.

وانگ و همکاران^۳ (۲۰۲۲) بحران فزاینده آب و عوامل مؤثر بر آن در آسیای مرکزی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که بحران آب در آسیای مرکزی در حال تشدید است. ازبکستان، تاجیکستان و ترکمنستان در دسته تنش شدید آب قرار دارند و شاخص‌های آب در هر دو کشور در حال افزایش است. قرقیزستان و قزاقستان هر دو تنش متوسط آب را نشان دادند. علاوه بر این، نسبت جمعیت روستایی که به آب آشامیدنی سالم دسترسی دارند، به‌طور قابل توجهی کمتر از جمعیت شهری در تمام کشورهای آسیای مرکزی است. تأثیر فعالیت‌های انسانی بر بحران آب در آسیای مرکزی نسبت به عوامل اقلیمی بیشتر بود. همچنین مساحت زمین‌های کشت‌شده و جمعیت، عوامل مهمی هستند که بر بحران آب در آسیای مرکزی تأثیرگذار بوده است. سواری و همکاران^۴ (۲۰۲۳) در پژوهشی عوامل مؤثر بر افزایش تاب‌آوری خانوارهای روستایی در برابر شرایط خشکسالی در ایران را مورد بررسی قرار دادند. نتایج پژوهش همچنین نشان داد که بین شدت خشکسالی و میزان تاب‌آوری خانوارهای کشاورز روستایی، رابطه‌ای منفی و معنادار وجود دارد. همچنین، نتایج تحلیل رگرسیون سلسله‌مراتبی بیانگر آن بود که از ۲۴ شاخص مربوط به دارایی‌های معیشتی شامل سرمایه‌های مالی، اجتماعی، انسانی، طبیعی و فیزیکی، در مجموع توانسته‌اند ۸۴ درصد از واریانس بهبود تاب‌آوری خانوارهای روستایی در شرایط خشکسالی را تبیین نمایند. ون آلت و همکاران^۵ (۲۰۲۳) نیز در پژوهشی که به بررسی آسیب‌پذیری و تاب‌آوری خانوارهای برنج‌کار در برابر خشکسالی و نفوذ آب شور در دلتای مکنونگ، ویتنام پرداختند، دریافتند خانوارهایی با دارایی‌های کم، قطعات کوچک زمین و تحصیلات پایین، بیشترین آسیب‌پذیری را داشتند. با این حال، آسیب‌پذیری بالا لزوماً به معنای تاب‌آوری پایین نبود و برخی فعالیت‌ها و ویژگی‌ها می‌توانستند پیامدهای غیرمستقیم خشکسالی را کاهش دهند. کم‌تاب‌آورترین گروه شامل بهره‌برداران خرد بود که توان تنوع‌بخشی به فعالیت‌های غیرکشاورزی یا اشتغال خارج از مزرعه را نداشتند و سیاست‌های حمایتی هدفمند می‌تواند تاب‌آوری آن‌ها را به‌طور قابل توجهی افزایش دهد. شاه و همکاران (۲۰۲۴) در پژوهشی نقش سرمایه اجتماعی را در درک و انتشار خطر بالایا در جوامع روستایی پاکستان مورد مطالعه قرار دادند. نتایج پژوهش بر چهار موضوع اصلی نقش ارتباطات خدمات اجتماعی جامعه در دسترسی به سرمایه اجتماعی، انتشار و تفسیر پیام‌های ریسک از طریق شبکه‌های اجتماعی، پیامدهای منفی توزیع نادرست سرمایه اجتماعی و محدودیت‌های ارتباط

¹ - Shrum et al

² - Nosha et al

³ - wang et al

⁴ - Savari et al

⁵ - van Aalst et al

اجتماعی متمرکز است. دسی و همکاران^۱ (۲۰۲۵) آسیب‌پذیری و تاب‌آوری خانوارهای برنج‌کار در برابر خشکسالی و نفوذ آب شور در دلتای مکنونگ، ویتنام مورد مطالعه قرار دادند. یافته‌ها نشان داد خشکسالی عملکرد محصول را در جوامعی که شبکه‌های خانوادگی گسترده ندارند به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌دهد، درحالی‌که جوامع با چنین شبکه‌هایی اثرات منفی کمتری تجربه می‌کنند. شبکه‌های خانوادگی گسترده امکان اشتراک منابع و پشتیبانی متقابل را فراهم کرده و تولید کشاورزی و فعالیت‌های غیرکشاورزی را پایدار نگه می‌دارند. کم‌تاب‌آورترین گروه خانوارها، بهره‌برداران کوچک و با دارایی کم هستند که توان تنوع‌بخشی به فعالیت‌های غیرکشاورزی را ندارند. سیاست‌های حمایتی هدفمند که شبکه‌های اجتماعی و خانوادگی را تقویت کنند، می‌توانند تاب‌آوری این خانوارها در برابر خشکسالی‌های آینده را به‌طور معناداری افزایش دهند.

نوآوری این پژوهش در رویکرد تلفیقی آن به تاب‌آوری کشاورزان در برابر بحران کم‌آبی نهفته است؛ به‌گونه‌ای که برخلاف اغلب مطالعات پیشین که بر یک یا دو بعد خاص تمرکز داشته‌اند. این پژوهش همزمان ابعاد اقتصادی، اجتماعی، نهادی، زیرساختی و فناورانه را در سطح محلی تحلیل می‌کند. علاوه بر این، این مطالعه با تمرکز بر روستاهای بخش مرکزی شهرستان اردبیل، خلأ جدی پژوهشی موجود در این منطقه را پوشش می‌دهد. استفاده از مدلیابی معادلات ساختاری امکان سنجش وزن و سهم نسبی هر عامل در شکل‌دهی تاب‌آوری را فراهم کرده و پژوهش را از سطح توصیفی به تحلیل تبیینی ارتقا داده است.

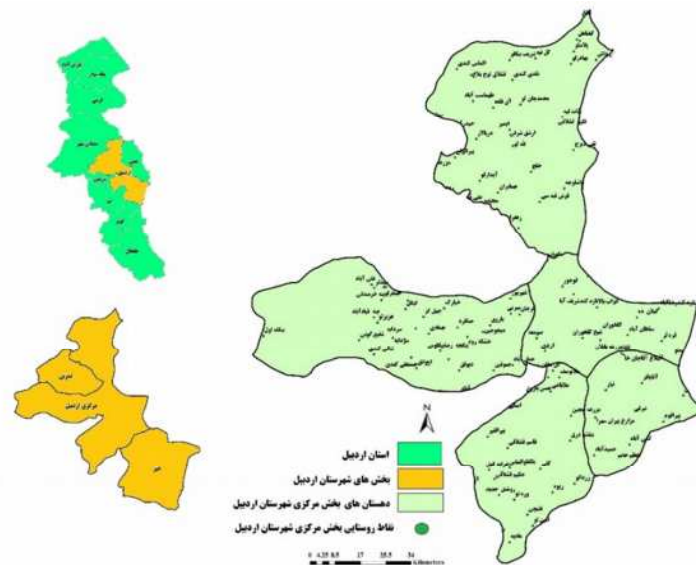
داده‌ها و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

بخش مرکزی شهرستان اردبیل، یکی از بخش‌های شهرستان اردبیل در استان اردبیل است. بر اساس این سرشماری سال ۱۳۹۵، جمعیت این بخش برابر با ۵۷۸۲۳۷ نفر در ۱۷۲۸۶۲ خانوار شهری و روستایی بوده است. از این میزان جمعیت ۵۲۹۳۷۴ نفر ساکن شهر اردبیل و به‌طوری‌که جمعیت شهر اردبیل و ۴۸۸۶۳ در نقاط روستایی این بخش سکونت داشتند. همچنین، تعداد سکونتگاه‌های روستایی در بخش مرکزی شهرستان اردبیل ۴۱ روستا می‌باشد. در تقسیمات کشوری، بخش مرکزی شهرستان اردبیل شامل دهستان‌های بالغلو، سردابه، کلخوران، ارشق شرقی و غربی می‌باشد. بر اساس داده‌های اقلیمی، استان اردبیل در شمال‌غرب کشور دارای اقلیم نیمه‌خشک سرد است و میانگین بارش سالانه حدود ۳۴۰ میلی‌متر برآورد گردیده است. بیشترین میزان بارش در اردبیل معمولاً در فصل بهار اتفاق می‌افتد (حدود ۶۰-۶۷ میلی‌متر در ماه‌های بهار) و تابستان به‌طور چشمگیری خشک است (حدود ۲۲ میلی‌متر در ماه مرداد)؛ این الگوی بارش نشان‌دهنده تمرکز بارندگی در فصول سرد و بهار است و کاهش آن در تابستان موجب فشار بر منابع آب می‌شود (گزارش جامع آب و هوا، استان اردبیل، ۱۴۰۴). بخش مرکزی شهرستان اردبیل دارای منابع آب متنوعی شامل منابع زیرزمینی و آب‌های سطحی است که نقش اساسی در تأمین آب شرب و کشاورزی روستاها دارند. بر اساس آمار شرکت آب منطقه‌ای اردبیل، حجم ذخایر آب زیرزمینی استان حدود ۳۵۵ میلیون مترمکعب تخمین زده شده و در دشت اردبیل حدود ۴۹۸ حلقه چاه مجاز و ۵۸ حلقه چاه غیرمجاز ثبت شده است که برداشت از این چاه‌ها فشار زیادی بر منابع زیرزمینی وارد می‌کند و نیازمند مدیریت دقیق می‌باشد. همچنین، در سطح استان ۲۶۲ رشته قنات شناسایی شده که بخشی از آنها هنوز فعال‌اند و ۵۰ قنات در سال‌های اخیر مرمت

¹ - Dessy et al

شده‌اند؛ اما بیش از ۹۰ درصد قنات‌ها کاهش آب‌دهی نشان داده‌اند که ناشی از افت منابع زیرزمینی و کاهش بارش‌ها است. از سوی دیگر، رودخانه بالی‌خلو با میانگین جریان سالانه حدود ۱۱۶/۵ میلیون مترمکعب یکی از منابع آب سطحی مهم در منطقه محسوب می‌شود، اما در دوره‌های خشکسالی دبی آن کاهش می‌یابد و دسترسی به آب سطحی را محدود می‌کند. این الگوی نابرابر منابع آب، به‌ویژه در شرایط کم‌بارشی، فشار قابل‌توجهی بر دسترسی به آب برای سکونتگاه‌های روستایی ایجاد کرده و تأثیر مستقیمی بر توان تاب‌آوری خانوارهای روستایی در برابر خشکسالی دارد (جهاد کشاورزی شهرستان اردبیل، ۱۴۰۳) (شکل ۱).



شکل ۱: موقعیت محدوده و روستاهای نمونه منبع: نگارندگان، ۱۴۰۴

داده‌ها و روش

جامعه آماری پژوهش شامل خانوارهای کشاورز ساکن در روستاهای بخش مرکزی شهرستان اردبیل می‌باشد. در مرحله نخست، با استفاده از اطلاعات موجود در آمارهای ثانویه و منابع محلی مرتبط با بخش کشاورزی منطقه، تعداد ۳۰ روستا که هر یک دارای بیش از ۵۰ خانوار کشاورز فعال بوده‌اند، شناسایی و به‌صورت تصادفی برای مطالعه انتخاب شدند. بر اساس این اطلاعات، مجموع خانوارهای کشاورز ساکن در این ۳۰ روستا برابر با ۷۹۴۷ خانوار برآورد گردید که این تعداد، مبنای محاسبه حجم جامعه آماری پژوهش قرار گرفت. در هر یک از روستاهای مورد مطالعه، ترکیب جمعیتی شامل خانوارهای کشاورز و غیرکشاورز بوده است. با این حال، جامعه آماری پژوهش به‌طور مشخص خانوارهای کشاورز ساکن در روستاهای بخش مرکزی شهرستان اردبیل را دربر می‌گیرد. اطلاعات مربوط به کل خانوارهای ساکن در سطح روستاها تنها در سطح توصیفی مدنظر بوده و در فرآیند نمونه‌گیری و محاسبه حجم نمونه وارد نشده است، چرا که تمرکز پژوهش بر جامعه هدف یعنی خانوارهای کشاورز بوده است. حجم نمونه مورد مطالعه با استفاده از فرمول کوکران ۳۶۶ سرپرست خانوار برآورد گردید. توزیع نمونه‌ها در سطح روستاهای منتخب به‌صورت طبقه‌ای و متناسب با تعداد خانوارهای کشاورز هر روستا انجام شد. با توجه به اینکه در برخی از روستاها، حجم نمونه محاسبه‌شده به یک یا دو خانوار محدود می‌شد، به‌منظور افزایش دقت برآوردها و بهبود قابلیت تعمیم نتایج، حجم نمونه نهایی افزایش یافته و برابر با ۳۸۰ سرپرست خانوار درنظر گرفته شد (جدول ۱).

جدول ۱: جامعه آماری و حجم نمونه مورد مطالعه

روستا	خانوار	نمونه	روستا	خانوار	نمونه	روستا	خانوار	نمونه
اردی	۵۰	۱۰	قلعه جوق	۲۱۳	۱۰	گرجان	۲۶۸	۱۲
حسنعلی کندی	۵۱	۱۰	وکیل آباد	۲۳۸	۱۰	عموقین	۳۸۷	۱۲
گلی	۵۳	۱۰	خشکه رود	۲۳۸	۱۰	طالب قشلاقی	۴۰۰	۱۶
اروانق	۵۵	۱۰	سامیان	۲۵۵	۱۰	کرکرک	۴۰۹	۱۷
خواجه بلاغی	۷۶	۱۰	قره تپه	۲۵۶	۱۰	حکیم قشلاقی	۴۱۰	۱۷
شهریور	۹۴	۱۰	نوران	۲۵۸	۱۱	آقبلاغ آقاجان خان	۴۱۲	۱۷
جمادی	۹۵	۱۰	حمل آباد	۲۶۵	۱۱	انزاب علیا	۵۰۲	۱۹
پیر آفر	۹۷	۱۰	بنفشه درق	۱۰۸	۱۱	امیدچه	۵۰۳	۱۹
ینگجه	۱۰۷	۱۰	رضی آباد	۱۲۲	۱۲	شام اسی	۸۲۰	۱۹
تپراقلو	۱۹۲	۱۰	آقچه کندی	۱۲۶	۱۲	خیارک	۸۸۶	۲۵

منبع: سرشماری سال ۱۳۹۵، محاسبات نگارندگان، ۱۴۰۴

به منظور بررسی دیدگاه جامعه آماری، جهت تعیین عوامل تأثیرگذار بر تاب‌آوری در برابر کم آبی، از دو شیوه مطالعات کتابخانه‌ای و میدانی بهره گرفته شد. در بخش مطالعات کتابخانه‌ای، با مراجعه به نشریات معتبر علمی داخلی و خارجی و پایانامه‌ها، اقدام به گردآوری شاخص‌ها و معرف‌های مورد نیاز شد. بنابراین به منظور دستیابی به هدف پژوهش، پرسشنامه‌ای در قالب شش عامل و ۷۲ مؤلفه تنظیم شد (جدول ۲). طراحی پرسشنامه اساساً با سوال‌های بسته و در قالب طیف پنج گزینه‌ای لیکرت (خیلی زیاد، زیاد، متوسط، کم، خیلی کم) انجام گردید.

جدول ۲: فهرست عامل‌ها و مؤلفه‌های مورد مطالعه جهت بررسی موضوع

عامل	مؤلفه	منبع
اقتصادی	e1-درآمد خانوار از منابع متعدد، e2-میزان دسترسی به تسهیلات مالی، e3-اختصاص اعتبار به سرمایه‌گذاری در تکنولوژی صرفه‌جویانه در زمینه مصرف آب، e4-اعطای تسهیلات و اعتبارات جهت ایجاد نوسازی شبکه‌های آبیاری، e5-استفاده از بیمه محصولات کشاورزی، e6-توان مالی کشاورز در تأمین سرمایه برای استفاده از آبیاری نوین، e7-خرید تضمینی محصولات از کشاورزان، e8-میزان سرمایه‌گذاری دولتی و خصوصی در تأسیسات آبی، e9-کاهش بروکراسی اداری و سهولت ضمانت‌های بانکی، e10-استفاده از نوآوری و ایجاد مشاغل در زمینه صنعت و خدمات، e11-سهامیه‌بندی تولید محصولات بر اساس میزان آب در دسترس.	Lee et al (2020), Tang et al (2020), Zhang & Oki (2022)
اجتماعی	s1-سطح تحصيلات کشاورزان و بهره‌برداران، s2-دسترسی به اطلاعات مربوط به منابع آب، s3-میزان مشارکت در مدیریت منابع آب، s4-تشکیل گروه‌های مردمی مانند تعاونی آب‌بران، s5-آگاهی در انتخاب الگوی کشت مناسب با منابع آب، s6-میزان اعتماد به نهادهای مدیریتی، s7-کاهش درگیری و اختلاف بر سر منابع آب، s8-مشارکت با مأموران دولتی در کنترل چاه‌های غیرمجاز، s9-هماهنگی و همکاری سازمان‌های دولتی و تشکلهای مردمی در زمینه آب، s10-افزایش آگاهی در زمینه روش‌های نوین آبیاری، s11-همبستگی اجتماعی و شبکه‌های حمایتی، s12-انعطاف‌پذیری در تغییر الگوی مصرف آب، s13-سهم زنان در تصمیم‌گیری مربوط به آب.	Cantillana et al(2024), Isukuru et al (2024)
کالبدی-زیرساختی	f1-استخرهای جمع‌آوری و ذخیره آب، f2-تراکم محیط ساخته‌شده، f3-استفاده از انرژی تجدیدپذیر مانند خورشید برای پمپ‌ها، f4-دسترسی به خدمات عمومی، f5-سیستم دفع فاضلاب مناسب، f6-ایجاد زیرساخت‌های مناسب برای مدیریت کم آبی، f7-احداث ایستگاه‌های پخش سیلاب جهت تغذیه آبخوان‌ها و سفره‌های زیرزمینی، f8-خطوط لوله آب و فاضلاب، f9-استفاده از سامانه‌های سنجش آب، f10-مخازن ذخیره آب، f11-ایجاد راه‌های ارتباطی مناسب.	Maharjan et al (2025), Devinentis (2020)
نهادی-سیاسی	g1-مسئولیت‌پذیری مدیران روستایی، g2-انتخاب افراد توانمند و آشنا به مسائل آب، g3-وجود قوانین و مقررات شفاف در زمینه استفاده و حفاظت پایدار از منابع آب، g4-برگزاری دوره‌ها و کارگاه‌های آموزشی در زمینه مصرف صحیح منابع آب، g5-مدیریت مصرف بهینه منابع آب، g6-تکنولوژی و امکانات جدید در کشاورزی، g7-وجود	قاسمی و همکاران (۱۴۰۰)، منتظری و همکاران

منبع	مؤلفه	عامل
باختر و همکاران (۱۴۰۰)، (۱۴۰۳)	نهادهای محلی مدیریت آب مانند شورای آب، g8-برنامه‌های دولت به منظور مقابله با خشکسالی، g9-انعطاف‌پذیری برنامه‌های دولت در برابر تغییرات آب‌وهوایی، g10-هوشمندسازی مدیریت منابع آب، g11-وجود نیروی انسانی متخصص.	
ابراهیمی و همکاران (۱۴۰۱)، دماوندی و همکاران (۱۴۰۱)	n1-ترویج فرهنگ زیست‌محیطی و حفاظت از آن، n2-شیب زمین‌های زراعی در روستا، n3-میزان بارندگی، n4-تنوع گونه‌های گیاهی جانوری، n5-استفاده از اطلاعات مکانی در برنامه‌ریزی منابع آب، n6-حاصلخیزی خاک، n7-تغییر الگوی کشت، n8-کشت سبزی و صیفی در فضای بسته، n9-جمع‌آوری و هدایت سیلاب‌های شهری و روستایی به سمت محل‌های ذخیره، n10-کشت محصولات کم آب، n11-فرسایش خاک و تأثیر کم آبی بر آن، n12-میزان پوشش گیاهی طبیعی، n13-مسدود شدن چاه‌های غیر مجاز.	محیطی
جهانسوزی و همکاران (۱۴۰۳)، یادگاری‌فر و همکاران (۱۴۰۲)	w1-ترویج آبیاری تحت فشار و مکانیزه، w2-وجود دانش و نوآوری در مقابله با بحران، w3-آگاهی از نیاز آبی گیاهان، w4-رعایت تناسب بین آب و میزان سطح زیر کشت، w5-توسعه کشت ارقام و محصولات با نیاز آبی کم، w6-بازیافت فاضلاب برای اراضی کشاورزی، w7-استخر جمع‌آوری و ذخیره آب، w8-امنیت منابع آب، w9-صرفه جویی در مصرف آب، w10-مشارکت داوطلبانه در طرح‌های مربوط به صرفه‌جویی در آب، w11-کشت گروهی و یکپارچه‌سازی اراضی، w12-استفاده از کانال‌های مناسب و سیمانی جهت جلوگیری از هدر رفت آب، w13-کاهش هزینه‌های استفاده از روش‌های آبیاری مدرن	کم آبی

به منظور تحلیل داده‌های حاصل از پرسشنامه، از نرم‌افزار معادلات ساختاری اسمارت 3 smart PLS استفاده گردید. در این پژوهش به منظور میزان اثرگذاری هر گویه و انجام مدل اندازه‌گیری، از بارهای عاملی و انجام مدل ساختاری، از t و q بهره گرفته شد. از شاخص‌های برازش مدل به منظور تعیین قابل قبول بودن مدل بهره گرفته شد. بر این اساس، جهت بررسی روایی مدل، از ضرایب میانگین واریانس استخراجی (AVE) و بارهای عاملی استفاده گردید. جهت تعیین میزان پایایی مدل، از ضریب پایایی ترکیبی (CR) و آلفای کرونباخ استفاده شد. بر این اساس، اگر میزان پایایی ترکیبی نیز بیشتر از $0/7$ باشد و میزان آلفا بیشتر از $0/7$ ، مقدار پایایی قابل قبول است. از سوی دیگر، در صورتی که مقدار AVE (میانگین واریانس استخراجی) نیز بیشتر از $0/5$ باشد و مقادیر بارهای عاملی برابر و یا بیشتر از $0/5$ باشد، روایی مدل اندازه‌گیری قابل قبول است.

یافته‌ها و بحث

نتایج یافته‌های پژوهش نشان داد از ۳۸۰ پرسشنامه توزیع شده در بین پاسخگویان، بیشترین تعداد پاسخگویان را آقایان تشکیل می‌دادند که تعداد آنها ۳۱۱ نفر برآورد گردید و ۷۹ نفر را نیز زنان تشکیل می‌دادند. از لحاظ توزیع سنی پاسخگویان، نتایج نشان داد از بین چهار رده سنی در نظر گرفته شده، بیشترین فراوانی یعنی ۱۳۸ نفر در رده سنی ۴۰-۳۱ سال قرار داشتند. از سوی دیگر، میزان تحصیلات بیشتر پاسخگویان در مقطع دیپلم و زیر دیپلم قرار داشت که تعداد آنها ۲۰۳ نفر برآورده گردید. از لحاظ وضعیت تأهل نیز ۲۹۳ نفر متأهل، ۱۱ نفر مطلقه، ۲۷ نفر دارای همسر فوت شده و ۴۹ نفر نیز مجرد بودند. تحلیل نتایج نشان می‌دهد که ویژگی‌های فردی پاسخگویان از جمله جنسیت، سن، تحصیلات و وضعیت تأهل، می‌تواند با میزان تاب‌آوری و نگرش آنان نسبت به مدیریت کم‌آبی ارتباط داشته باشد. برای نمونه، غالب بودن پاسخگویان مرد و میانسال با تحصیلات دیپلم ممکن است تجربه، نگرش و راهبردهای آنان در مواجهه با محدودیت‌های آب را شکل دهد.

نتایج پس از وارد کردن داده‌ها به نرم‌افزار، نشان داد از ۷۲ مؤلفه، شش مؤلفه به‌علت دارا بودن بارهای عاملی کمتر از مقدار تعیین‌شده (۰/۴) از مدل حذف شدند. این شش مؤلفه شامل خطوط لوله آب و فاضلاب (f8) با بارعاملی ۰/۳۴۰، مؤلفه ایجاد راه‌های ارتباطی مناسب (f11) با بار عاملی ۰/۳۶۱، مؤلفه حاصلخیزی خاک (n6) با بار عاملی ۰/۳۰۷، مؤلفه سهم زنان در تصمیم‌گیری مربوط به آب (s13) با بار عاملی ۰/۳۳۴، مؤلفه تنوع گونه‌های گیاهی جانوری (n4) با بار عاملی ۰/۳۹۹ و در نهایت مؤلفه میزان بارندگی (n3) با بار عاملی ۰/۳۲۴ بودند. بنابراین، این سؤالات از مجموعه حذف گردید. نتایج اجرای مجدد مدل اندازه‌گیری نشان داد، بار عاملی تمام ۶۶ مؤلفه باقیمانده بیشتر از ۰/۴ بود. بنابراین، می‌توان بیان نمود در گروه عامل اقتصاد، مؤلفه اختصاص اعتبار به سرمایه‌گذاری در تکنولوژی صرفه‌جویانه در زمینه مصرف آب با بار عاملی ۰/۶۷۷ دارای بیشترین میزان اثرگذاری و مؤلفه کاهش بروکراسی اداری و سهولت ضمانت‌های بانکی با مقدار ۰/۴۸۸ دارای کمترین بار عاملی بود. در عامل اجتماعی، بیشترین بار عاملی مربوط به مؤلفه هماهنگی و همکاری سازمان‌های دولتی و تشکل‌های مردمی در زمینه آب (۰/۶۷۰) و کمترین بار عاملی برای مؤلفه انعطاف‌پذیری در تغییر الگوی مصرف آب با مقدار ۰/۴۳۱ برآورد شد. نتایج بررسی‌ها نشان داد در عامل کالبدی- زیرساختی بیشترین و کمترین بار عاملی به ترتیب متعلق به دو مؤلفه ایجاد زیرساخت‌های مناسب برای مدیریت کم آبی با مقدار ۰/۷۰۳ و احداث ایستگاه‌های پخش سیلاب جهت تغذیه آبخوان‌ها و سفره‌های زیرزمینی با مقدار ۰/۴۳۹ شناسایی گردید. مؤلفه احداث ایستگاه‌های پخش سیلاب، جهت تغذیه آبخوان‌ها و سفره‌های زیرزمینی، با بار عاملی ۰/۷۱۲ در عامل نهادی- سیاسی، دارای بیشترین بار عاملی بود. یکی دیگر از شاخص‌های مورد مطالعه جهت بررسی موضوع، عامل محیطی است. این عامل دارای ۱۰ معرف با بار عاملی بیشتر از ۰/۴ بود و بیشترین بار عاملی آن با مقدار ۰/۶۹۸ مربوط به مؤلفه کشت محصولات کم آب بود و کمترین بار عاملی آن نیز با مقدار ۰/۴۱۸ برای مؤلفه ترویج فرهنگ زیست‌محیطی و حفاظت از آن محاسبه شد (جدول ۳).

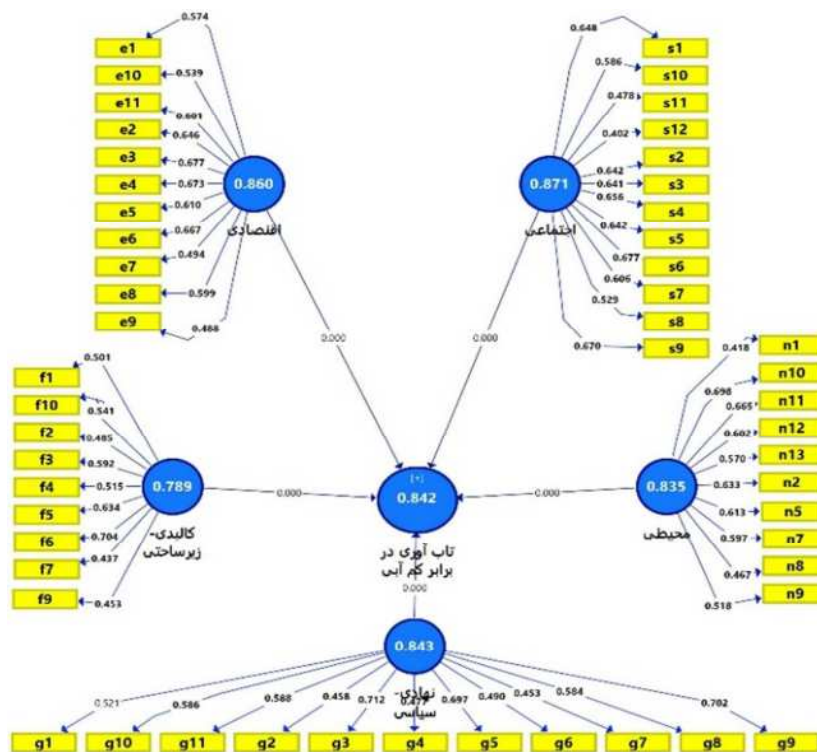
جدول ۳: بار عاملی مؤلفه‌های پژوهش

بعد	کد	بار عاملی	T-value	p-value	بعد	کد	بار عاملی	T-value	p-value
اقتصادی	e1	۰/۵۷۴	۱۴/۱۹۹	۰/۰۰۰	محیطی	n12	۰/۶۰۲	۱۶/۲۳۳	۰/۰۰۰
	e10	۰/۵۳۹	۱۱/۵۱۹	۰/۰۰۰		n13	۰/۵۷۰	۱۲/۴۶۶	۰/۰۰۰
	e11	۰/۶۰۱	۱۴/۶۶۱	۰/۰۰۰		n2	۰/۶۳۳	۱۵/۸۸۰	۰/۰۰۰
	e2	۰/۶۴۶	۱۸/۸۴۸	۰/۰۰۰		n5	۰/۶۱۳	۱۶/۲۵۰	۰/۰۰۰
	e3	۰/۶۷۷	۲۲/۶۶۲	۰/۰۰۰		n7	۰/۵۹۷	۱۴/۷۲۶	۰/۰۰۰
	e4	۰/۶۷۲	۲۶/۴۱۶	۰/۰۰۰		n8	۰/۴۶۷	۹/۳۷۷	۰/۰۰۰
	e5	۰/۶۰۹	۱۵/۹۹۲	۰/۰۰۰		n9	۰/۵۱۸	۱۳/۲۰۰	۰/۰۰۰
	e6	۰/۶۶۷	۱۸/۰۳۶	۰/۰۰۰		n11	۰/۶۶۵	۲۰/۵۵۸	۰/۰۰۰
	e7	۰/۴۹۵	۹/۵۴۶	۰/۰۰۰		s1	۰/۶۳۴	۱۶/۳۴۳	۰/۰۰۰
	e8	۰/۵۹۹	۱۴/۱۲۱	۰/۰۰۰		s10	۰/۵۹۰	۱۳/۳۴۱	۰/۰۰۰
	e9	۰/۴۸۸	۹/۱۶۸	۰/۰۰۰	اجتماعی	s11	۰/۵۰۴	۸/۷۳۴	۰/۰۰۰
کالبدی- زیرساختی	f1	۰/۵۰۱	۸/۸۳۳	۰/۰۰۰		s12	۰/۴۳۱	۷/۶۴۸	۰/۰۰۰
	f10	۰/۵۴۰	۱۲/۱۲۲	۰/۰۰۰		s2	۰/۶۲۵	۱۹/۵۱۸	۰/۰۰۰
	f2	۰/۴۸۶	۸/۶۳۸	۰/۰۰۰		s3	۰/۶۲۸	۱۶/۷۷۵	۰/۰۰۰
	f3	۰/۵۹۱	۱۱/۹۷۵	۰/۰۰۰		s4	۰/۶۴۸	۱۷/۹۹۶	۰/۰۰۰
	f4	۰/۵۱۵	۸/۸۰۷	۰/۰۰۰		s5	۰/۶۳۴	۱۷/۱۲۹	۰/۰۰۰

بعد	کد	بار عاملی	T-value	p-value	بعد	کد	بار عاملی	T-value	p-value
	s6	۰/۶۷۰	۲۰/۰۷۳	۰/۰۰۰		f5	۰/۶۳۴	۱۶/۳۴۸	۰/۰۰۰
	s7	۰/۶۰۳	۱۶/۵۹۹	۰/۰۰۰		f6	۰/۷۰۳	۲۰/۸۴۸	۰/۰۰۰
	s8	۰/۵۲۶	۱۱/۱۰۱	۰/۰۰۰		f7	۰/۴۳۹	۶/۵۸۲	۰/۰۰۰
	s9	۰/۶۷۰	۲۱/۹۳۴	۰/۰۰۰		f9	۰/۴۵۵	۶/۷۴۲	۰/۰۰۰
تاب‌آوری در برابر کم آبی	w1	۰/۵۵۹	۱۱/۲۱۳	۰/۰۰۰	نهادهی - سیاسی	g1	۰/۵۲۲	۱۱/۶۹۹	۰/۰۰۰
	w10	۰/۶۰۵	۱۶/۲۱۴	۰/۰۰۰		g10	۰/۵۸۶	۱۵/۷۶۷	۰/۰۰۰
	w11	۰/۶۴۰	۱۹/۸۳۰	۰/۰۰۰		g11	۰/۵۸۸	۱۳/۵۰۳	۰/۰۰۰
	w12	۰/۶۷۴	۲۳/۳۱۳	۰/۰۰۰		g2	۰/۴۵۹	۹/۰۶۶	۰/۰۰۰
	w13	۰/۵۶۲	۱۳/۴۱۰	۰/۰۰۰		g3	۰/۷۱۲	۲۲/۰۸۰	۰/۰۰۰
	w2	۰/۵۶۲	۱۲/۸۸۴	۰/۰۰۰		g4	۰/۴۷۸	۱۰/۴۸۷	۰/۰۰۰
	w3	۰/۵۹۴	۱۲/۵۹۱	۰/۰۰۰		g5	۰/۶۹۷	۲۶/۰۵۵	۰/۰۰۰
	w4	۰/۵۲۷	۹/۲۶۳	۰/۰۰۰		g6	۰/۴۹۲	۱۰/۷۷۰	۰/۰۰۰
	w5	۰/۴۴۲	۶/۵۸۱	۰/۰۰۰		g7	۰/۴۵۴	۹/۴۶۶	۰/۰۰۰
	w6	۰/۴۹۸	۷/۵۶۰	۰/۰۰۰		g8	۰/۵۸۳	۱۳/۲۸۴	۰/۰۰۰
	w7	۰/۴۳۰	۶/۲۹۹	۰/۰۰۰		g9	۰/۷۰۱	۲۱/۹۶۶	۰/۰۰۰
	w8	۰/۴۰۷	۵/۹۶۷	۰/۰۰۰	محیطی	n1	۰/۴۱۸	۷/۳۸۶	۰/۰۰۰
	w9	۰/۵۰۰	۱۱/۸۱۳	۰/۰۰۰		n10	۰/۶۹۸	۲۰/۸۲۵	۰/۰۰۰

منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۴

در بخش مدل اندازه‌گیری، بر اساس بارهای عاملی و ضریب پایایی، اقدام به ارائه و ترسیم الگوی مورد نظر براساس روابط بین عوامل و میزان اثرگذاری آنها گردید. شکل ۲ این روابط را نشان می‌دهد.



شکل ۲: بارهای عاملی و ضریب پایایی (منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۴)

یکی دیگر از عواملی که بر اعتبار پژوهش می‌افزاید، استفاده از معیار ارزیابی همگرا، در کنار بارهای عاملی استاندارد شده است. حد مطلوب برای مقدار این سازه بیشتر از ۰/۵ است. نتایج نشان می‌دهد در تمام عوامل، این مقدار از حد مطلوب بیشتر است و همبستگی میان سازه‌های مشابه را نشان می‌دهد. این موضوع بیانگر بالا بودن میزان همبستگی هر عامل با سؤالاتش است. در مفهومی دیگر، ضرایب واریانس استخراجی در هر شش عامل، بیشتر از ۰/۵ برآورد گردید و این مقادیر بیانگر قابل قبول بودن روایی مدل اندازه‌گیری است. بیشترین مقدار آن نیز برای عامل کالبدی- زیرساختی برآورد گردید و مقدار آن ۰/۵۹۹ محاسبه شد. بنابراین، اعتبار همگرا زمانی ایجاد می‌شود که یک سازه پنهان کمتر از نیمی از واریانس در شاخص‌های مرتبط با آن را به خود اختصاص دهد. همچنین، بررسی پایایی مقادیر آلفای کرونباخ و پایایی ترکیبی بیشتر از ۰/۷ است و این مقادیر بیانگر قابل قبول بودن پایایی مدل است. از سوی دیگر، بررسی مقادیر آلفای کرونباخ و پایایی ترکیبی، نیز نشان می‌دهد عامل اجتماعی با مقدار پایایی ترکیبی ۰/۸۷۱ و آلفای کرونباخ با مقدار ۰/۸۳۶۸، دارای بیشترین میزان پایایی بوده است.

جدول ۴: روایی و پایایی مدل

بعد	آلفای کرونباخ (ca)	پایایی ترکیبی (CR)	میانگین واریانس استخراج شده (AVE)
اقتصادی	۰/۸۲۳	۰/۸۶۰	۰/۵۶۱
اجتماعی	۰/۸۳۸	۰/۸۷۱	۰/۵۴۲
کالبدی- زیرساختی	۰/۷۱۶	۰/۷۸۹	۰/۵۹۹
نهادی- سیاسی	۰/۷۹۵	۰/۸۴۳	۰/۵۳۴
محیطی	۰/۷۸۰	۰/۸۳۵	۰/۵۰۰
کم آبی	۰/۸۰۰	۰/۸۴۲	۰/۵۹۶

منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۴

به‌طور کلی، چندین مشخصه برازندگی برای ارزیابی مدل تحلیل عامل تأییدی وجود دارد. در این پژوهش جهت بررسی برازش مدل ساختاری، از معیار آماره t و Q^2 بهره گرفته شد. نتایج به‌دست‌آمده از جدول ۵، مقدار t به‌دست‌آمده برای عامل‌های اقتصادی، اجتماعی، کالبدی- زیرساختی و نهادی- سیاسی، بیشتر از ۱/۹۶ است. بنابراین، بر اساس مقادیر به‌دست‌آمده، می‌توان دریافت ارتباط بین متغیرهای برون‌زا و درون‌زای مدل معنی‌دار است و قدرت مدل در پیش‌بینی نسبتاً قابل قبول است. بنابراین می‌توان بیان نمود، بیشترین مقدار t با ۱۰/۱۰۲ در مدل ساختاری بین متغیرها، مربوط به بعد اقتصادی و اثرات آن بر تاب‌آوری در برابر کم آبی برآورد گردید. این نتیجه نشان می‌دهد که عوامل اقتصادی مانند تأمین منابع مالی، تنوع اشتغال، درآمد پایدار، دسترسی به تسهیلات مالی و دسترسی به نهاده‌های تولیدی متعدد، به شکل معناداری بر ظرفیت تاب‌آوری جوامع در برابر کم‌آبی اثرگذارند. از سوی دیگر، مقدار t برای اثرات عامل محیطی بر تاب‌آوری در برابر کم آبی پایین‌تر از مقدار تعیین‌شده یعنی ۱/۹۶ ارزیابی گردید. این موضوع بیانگر این است ارتباط بین مؤلفه‌های عامل محیطی و عامل درون‌زای مدل معنی‌دار نیست و عامل محیطی تأثیر چندانی در تاب‌آوری در برابر کم‌آبی ندارد.

ضرایب مسیر بیانگر چگونگی ارتباط بین متغیرهای پژوهش است. بر این اساس، اگر مثبت باشند روابط مستقیم و اگر منفی باشد، روابط معکوس بین آنها حاکم است. با توجه به این اصول و بررسی نتایج حاصل در جدول، می‌توان بیان نمود، اعداد ضریب مسیر مثبت برای تمام مسیرها بجز اثرات محیطی بر تاب‌آوری در برابر کم آبی مثبت است و بنابراین ارتباط مستقیم آنها وجود دارد؛ ولی در اثرات مسیر محیطی بر تاب‌آوری در برابر کم آبی، ارتباط معکوس

بین عامل‌ها وجود دارد (جدول ۵). این موضوع بیانگر آن است که در مدل حاضر، عوامل زیست‌محیطی نه تنها تأثیر معناداری بر تاب‌آوری نداشته‌اند، بلکه حتی ارتباطی ضعیف و معکوس از خود نشان داده‌اند. این نتیجه ممکن است ناشی از ضعف در دسترسی به داده‌های محیطی دقیق، ضعف در ترویج فرهنگ زیست‌محیطی و حفاظت از آن، عدم مسدود شدن چاه‌های غیر مجاز و حفر بیشتر آنها، کمبود ادراک جوامع محلی نسبت به اهمیت مؤلفه‌های محیط‌زیستی و استفاده از اطلاعات مکانی در برنامه‌ریزی منابع آب در مواجهه با بحران آب بیان نمود.

جدول ۵: برازش مدل ساختاری

مسیر	ضریب مسیر	مقدار آماره تی (T-value)	مقدار احتمال (P-value)
اجتماعی ← تاب‌آوری در برابر کم‌آبی	۰/۱۴۶	۲/۶۴۶	۰/۰۰۸
اقتصادی ← تاب‌آوری در برابر کم‌آبی	۰/۴۹۷	۱۰/۱۰۲	۰/۰۰۰
محیطی ← تاب‌آوری در برابر کم‌آبی	-۰/۰۶۸	۰/۸۷۱	۰/۰۳۸۴
نهادی-سیاسی ← تاب‌آوری در برابر کم‌آبی	۰/۲۰۲	۲/۳۴۰	۰/۰۲۰
کلیدی-زیرساختی ← تاب‌آوری در برابر کم‌آبی	۰/۲۴۴	۶/۶۷۴	۰/۰۰۰

منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۴

شاخص Q2 (معرف توان پیش‌بینی) مدل جهت بررسی برازش ساختاری مدل می‌باشد و قدرت پیش‌بینی مدل در سازه‌های درون‌زا را تعیین می‌نماید و مقدار آن اگر برابر با ۰/۰۲ باشد، ضعیف است، اگر ۰/۱۵ باشد، متوسط است و اگر ۰/۳۵ باشد قوی می‌باشد (Hair et al., 2017; Stone, 1974). در این پژوهش مقدار Q2 ۰/۲۲۵ به دست آمد و مقدار آن مثبت است و از سوی دیگر نیز مقدار آن از حد متوسط بیشتر و به سمت قوی گرایش دارد. این مقدار بیانگر این است که برازش مدل مطلوب است و مدل مورد نظر از قدرت پیش‌بینی‌کنندگی مطلوبی برخوردار است. از سوی دیگر، شاخص ضریب تعیین اسکوتر متغیرهای مکنون، نشان می‌دهد که چند درصد از تغییرات متغیر درون‌زا توسط متغیر برون‌زا انجام می‌شود. شاخص ضریب تعیین اسکوتر متغیرهای پنهان درون‌زا در این پژوهش دارای مقادیر متفاوتی بود. برای ضرایب R^2 (ضریب تعیین) که در منابع مختلف میزان‌های متفاوتی برای آن در نظر گرفته شده، در این پژوهش ضرایب ۰/۶۷ قوی، ۰/۳۳ معیار متوسط و ۰/۱۹ به عنوان معیار ضعیف در نظر گرفته شد. بر این اساس و با توجه به نتایج جدول ۶، می‌توان بیان نمود که ضریب تعیین اسکوتر از ۰/۶۷ بالاتر است و بیانگر قوی بودن آن است. این مقادیر، نشان‌دهنده قابل توجه بودن شاخص‌ها و بیش از حد آستانه بودن مقدار آنها می‌باشد. در مجموع، ترکیب این سه شاخص بیانگر این است که مدل ساختاری پژوهش، هم از منظر پیش‌بینی‌کنندگی و هم از منظر قدرت تبیینی، در وضعیت مناسبی قرار دارد. این نتایج، پشتیبان نظریه پژوهش هستند و گویای این است که متغیرهای برون‌زای تعریف شده در مدل، توانسته‌اند به خوبی نقش مؤثری در تبیین سازه تاب‌آوری در برابر کم‌آبی ایفا کنند.

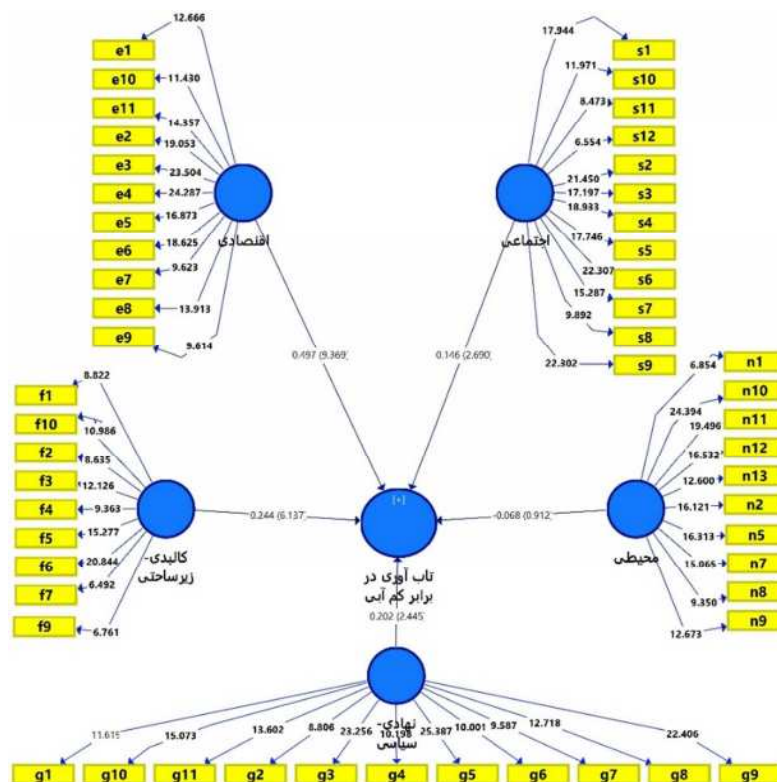
جدول ۶: بعد ضریب تعیین و پیش‌بینی مدل

بعد	تاب‌آوری در برابر کم‌آبی
Q2	۰/۲۲۵
R	۰/۸۳۰
R ²	۰/۸۲۸

^۱ - ضریب تعیین نشان‌دهنده درصد واریانس متغیر وابسته است که توسط متغیرهای مستقل توضیح داده می‌شود.

شکل ۳ بر اساس مقادیر T-value در مدل ساختاری ترسیم گردیده است. بررسی شکل نشان می‌دهد تمامی مقادیر بیشتر از ۱/۹۶ برآورد گردیده است. همچنین، سطح معنی‌داری تمام معرف‌ها نیز کمتر از ۰/۰۵ می‌باشد. این مقادیر بیانگر این موضوع است، تمام معرف‌ها در سطح مطلوب قرار دارند. در عامل اقتصادی، بیشترین مقدار t برای مؤلفه اعطای تسهیلات و اعتبارات جهت ایجاد نوسازی شبکه‌های آبیاری (e4) بود که مقدار آن ۲۴/۲۸۷ برآورد گردید. در بین مؤلفه‌های عامل اجتماعی نیز بیشترین مقدار t برای مؤلفه هماهنگی و همکاری سازمان‌های دولتی و تشکل‌های مردمی در زمینه آب (s9) بود که مقدار آن ۲۲/۳۰۹ محاسبه شد. در عامل کالبدی-زیرساختی نیز بیشترین مقدار t با میزان ۲۰/۸۴۴ برای مؤلفه ایجاد زیرساخت‌های مناسب برای مدیریت کم آبی (f6) به‌دست آمد. مؤلفه وجود قوانین و مقررات شفاف در زمینه استفاده و حفاظت پایدار از منابع آب (g5) در عامل نهادی-سیاسی، با مقدار ۲۵/۳۸۷ دارای بالاترین مقدار t در بین تمام مؤلفه‌های این عامل بود. در نهایت در بین مؤلفه‌های عامل محیطی، مؤلفه کشت محصولات کم آب (n10) بالاترین مقدار t را دارا بود.

این یافته‌ها نشان می‌دهد تقویت تاب‌آوری نیازمند رویکردی چند بعدی است. از جمله این ابعاد ارتقای زیرساخت‌های مدیریت آب و بهره‌گیری از فناوری‌های نوین است که با توجه به یافته‌ها می‌تواند در افزایش کارایی مصرف نقش‌آفرین باشد. از سوی دیگر، آموزش و توانمندسازی جوامع محلی، هماهنگی و همکاری سازمان‌های دولتی و تشکل‌های مردمی، اختصاص اعتبار به سرمایه‌گذاری در تکنولوژی صرفه‌جویانه در زمینه مصرف آب، اصلاح الگوهای مصرف و تقویت سرمایه اجتماعی، اعطای تسهیلات و اعتبارات جهت ایجاد نوسازی شبکه‌های آبیاری و ... بستر مناسبی برای ایجاد پاسخ‌های سازگار فراهم می‌سازد.



شکل ۳: مقدار T-value (منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۴)

نتیجه‌گیری

در سال‌های اخیر، بحران آب به یکی از چالش‌های اساسی جوامع انسانی، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک تبدیل شده است. بهره‌برداری بی‌رویه از منابع زیرزمینی، کاهش منابع آبی، رشد جمعیت و تغییرات اقلیمی، مجموعه‌ای از تهدیدهای جدی را پدید آورده‌اند که توان زیستی، اقتصادی و اجتماعی مناطق را به‌طور مستقیم تحت تأثیر قرار داده‌اند. در چنین شرایطی، مفهوم تاب‌آوری به‌عنوان یکی از راهبردهای کلیدی در مواجهه با این بحران، بیش‌ازپیش اهمیت یافته است. بنابراین، با توجه به اهمیت موضوع این پژوهش، با هدف بررسی و واکاوی عوامل مؤثر بر تاب‌آوری در برابر بحران کم‌آبی در روستاهای بخش مرکزی شهرستان اردبیل انجام شده است. جهت تحلیل موضوع، از ۷۲ مؤلفه در قالب شش شاخص استفاده گردید. نتایج بعد از اجرای مدل اندازه‌گیری نشان داد، شش عامل به‌علت نداشتن کفایت لازم و پایین بودن بارهای عاملی کمتر از حد استاندارد، از مجموعه حذف شدند. اجرای مجدد مدل با ۶۶ مؤلفه نشان داد، هر یک از آنها به میزان‌های متفاوتی بر تاب‌آوری در برابر کم‌آبی تأثیرگذار هستند و این عوامل تنها به بعد مهندسی فنی محدود نمی‌شود و شامل ابعاد نهادی، اجتماعی، اقتصادی و سیاسی نیز می‌گردد.

تاب‌آوری خانوارهای روستایی در بخش مرکزی شهرستان اردبیل در مواجهه با بحران کم‌آبی، یک فرآیند پیچیده و چندبعدی است که تحت تأثیر همزمان عوامل اقتصادی، اجتماعی، نهادی، زیرساختی، محیطی و فناوری قرار دارد. نتایج تحلیل داده‌های منطقه نشان می‌دهد تمرکز صرف بر یک بعد، حتی اگر اقتصادی یا زیرساختی باشد، قادر به پاسخگویی به چالش‌های کم‌آبی و حفاظت از معیشت روستاییان نیست و تنها رویکرد تلفیقی و چندجانبه می‌تواند ظرفیت تاب‌آوری واقعی را آشکار کند. در بعد اقتصادی، شاخص‌هایی همچون تنوع درآمد خانوار، دسترسی به تسهیلات مالی، اختصاص سرمایه به فناوری‌های صرفه‌جوی آب، استفاده از بیمه محصولات کشاورزی، توسعه شبکه‌های آبیاری و کاهش بروکراسی اداری نقش محوری در توانمندسازی کشاورزان دارند. یافته‌ها نشان می‌دهند که تخصیص منابع مالی بدون توجه به سطح توان مالی بهره‌برداران، دانش فنی آنان و ظرفیت نگهداری سیستم‌ها، اثربخشی برنامه‌ها را محدود می‌کند. به عبارت دیگر، موفقیت مداخلات اقتصادی و سرمایه‌گذاری‌ها مشروط به هم‌راستایی با ظرفیت‌های محلی و ویژگی‌های جغرافیایی منطقه است، موضوعی که مطالعات ابراهیمی و همکاران (۱۴۰۱) نیز آن را به‌عنوان مهم‌ترین عامل افزایش توان سازگاری سکونتگاه‌های روستایی با بحران آب تأیید کرده‌اند.

ابعاد اجتماعی نیز نقش تعیین‌کننده‌ای در تاب‌آوری دارند. شاخص‌هایی مانند سطح تحصیلات بهره‌برداران، دسترسی به اطلاعات منابع آب، مشارکت در مدیریت منابع، تشکیل گروه‌های مردمی، اعتماد به نهادهای مدیریتی و سهم زنان در تصمیم‌گیری‌های مرتبط با آب، بر توان پاسخگویی جامعه محلی تأثیر مستقیم دارند. در بخش مرکزی اردبیل، ضعف هماهنگی میان نهادهای دولتی و تشکلهای محلی، محدودیت آموزش‌های هدفمند و مشارکت ناکافی زنان و گروه‌های اجتماعی، تاب‌آوری را محدود کرده است. بررسی میدانی تعاونی‌های آب‌بران نشان می‌دهد که فقدان حمایت مستمر و آموزش‌های فنی، در دوره‌های خشکسالی مدیریت منابع آب را ناکارآمد می‌کند و اثرگذاری برنامه‌های اقتصادی و زیرساختی بدون سرمایه اجتماعی محدود می‌ماند، نکته‌ای که با یافته‌های جهانسوزی و همکاران (۱۴۰۳) همخوانی دارد.

بررسی یافته‌ها نشان می‌دهد که بعد نهادی و سیاسی نیز اهمیت ویژه‌ای دارد. شفافیت قوانین، مسئولیت‌پذیری مدیران محلی، وجود نهادهای محلی مدیریت آب، انعطاف‌پذیری برنامه‌های دولت در شرایط تغییرات اقلیمی و

آموزش کاربران محلی، پایه‌های مهم تاب‌آوری محسوب می‌شوند. تجربه بخش مرکزی اردبیل نشان می‌دهد که توان پاسخگویی خانوارها به بحران آب بیش از هر زمان دیگری وابسته به ظرفیت نهادی و حکمرانی محلی است و بدون آن، مداخلات اقتصادی و فنی اثرگذار نخواهند بود. در بخش مرکزی اردبیل، مدیریت منابع آب بدون درک عمیق از ویژگی‌های محیطی و توجه به ظرفیت‌های اکوسیستمی نمی‌تواند پایدار باشد. بنابراین شامل میزان بارندگی، شیب زمین، حاصلخیزی خاک و پوشش گیاهی، محدودیت‌هایی هستند که خارج از کنترل مستقیم جامعه محلی می‌باشند؛ اما تعامل آنها با سایر ابعاد اجتماعی، اقتصادی و نهادی، اثرات قابل توجهی بر تاب‌آوری دارد. علاوه بر این، شاخص‌های مرتبط با نوآوری و فناوری، همچون ترویج آبیاری تحت فشار، استفاده از دانش نوین، کشت ارقام کم‌آب، بازیافت فاضلاب و مشارکت داوطلبانه در صرفه‌جویی آب، نقش راهبردی در تقویت تاب‌آوری دارند و نشان می‌دهند که ترکیب توانمندی‌های اقتصادی، اجتماعی و نهادی با فناوری و نوآوری، ظرفیت پاسخگویی روستاییان به کم‌آبی را به‌طور ملموس افزایش می‌دهد.

در نهایت با توجه به نتایج پژوهش، بیان پیشنهادات زیر ضروری به‌نظر می‌رسد:

- * طراحی بسته‌های حمایتی بلندمدت که همزمان به توانمندسازی اقتصادی خانوارها، آموزش فنی و مشارکت اجتماعی توجه کند.
- * ایجاد و تقویت شوراهای محلی مدیریت آب با اختیار واقعی در تصمیم‌گیری‌ها، شفاف‌سازی قوانین و ایجاد سازوکارهای نظارت مشارکتی بر منابع آب، تا از این طریق، برنامه‌ها پاسخگو و انعطاف‌پذیر باشند.
- * اجرای پروژه‌های سرمایه‌گذاری در تکنولوژی‌های صرفه‌جویانه آب و مدیریت خاک، همراه با آموزش کشاورزان در استفاده بهینه از این فناوری‌ها، تا بدین‌وسیله کاهش مصرف آب و حفظ خاک به‌طور همزمان محقق گردد.
- * استفاده از سامانه‌های اندازه‌گیری و پایش مصرف آب و ایجاد بانک اطلاعات محلی برای تحلیل کارایی برنامه‌ها و اصلاح سیاست‌ها به‌صورت مبتنی بر شواهد.
- * تشویق به تشکیل گروه‌های داوطلب محلی، افزایش نقش زنان در تصمیم‌گیری‌های آبی و توسعه شبکه‌های حمایتی برای مقابله با فشارهای خشکسالی.

منابع

- ابراهیمی، ثریا؛ رحمانی فضلی، ثریا؛ عزیزپور، فرهاد. (۱۴۰۱). عوامل مؤثر بر سازگاری سکونتگاه‌های روستایی با بحران آب دریاچه ارومیه، مطالعه موردی: شهرستان میاندوآب، فصلنامه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، سال نهم، شماره سوم، صص: ۳۷-۵۶.
- اخگری، مهدی؛ قاسمیان مقدم، علیرضا. (۱۴۰۲). اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر تاب‌آوری اقتصادی خانوارهای روستایی در برابر خشکسالی، مورد مطالعه: بخش دستگردان شهرستان طبس، فصلنامه روستا و توسعه پایدار فضا، دوره چهارم، شماره دوم، صص: ۱۱۲-۱۲۹.
- <https://doi.org/10.22077/vssd.2023.5530.1121>
- باختر، سهیلا؛ شفیعی، اشکان؛ عزمی، آئیز. (۱۴۰۳). تحلیل عوامل مؤثر بر مدیریت بهینه منابع آب کشاورزی، مطالعه موردی: دهستان حسن آباد، شهرستان اسلام آباد غرب، فصلنامه جغرافیا و پایداری محیط، دوره ۱۴، شماره دوم، صص: ۱۹-۳۲.
- برزگرپیر، سعید؛ علومی متین، یعقوب؛ محمودزاده، مرتضی؛ بافنده‌زنده، علیرضا. (۱۴۰۴). طراحی الگوی روابط بین عوامل مؤثر بر ارتقاء تاب‌آوری جامعه در شهر تبریز، فصلنامه علمی مطالعات راهبردی فرهنگ، سال ۵، شماره اول، صص: ۱۷۵-۲۰۷.
- برقی، حمید؛ هاشمی، صدیقه؛ جعفری، نسرين. (۱۳۹۶). سنجش تاب‌آوری محیطی رستاهای در معرض خطر زلزله، مورد مطالعه: دهستان معجزات شهرستان زنجان، پژوهش و برنامه‌ریزی روستایی، سال شش، شماره یک، صص: ۸۱-۹۷.

- خداپناه، کیومرث. (۱۴۰۲). تحلیل میزان تاب‌آوری اقتصادی و اجتماعی جوامع روستایی در برابر مخاطره زلزله، مطالعه موردی: روستاهای بخش مرکزی شهرستان اردبیل، فصلنامه مطالعات برنامه‌ریزی سکونتگاه‌های انسانی، دوره ۱۸، شماره سوم، صص: ۱۸۷-۱۹۷.
- دربان آستانه، علیرضا؛ قاسمی، فرزانه. (۱۴۰۱). ارزیابی ابعاد تاب‌آوری کشاورزی روستایی در برابر خشکسالی و شناسایی راهبردهای معیشتی، مطالعه موردی: بخش مرکزی شهرستان شازند، فصلنامه روستا و توسعه، سال ۲۵، شماره ۹۸، صص: ۱-۲۲.
<https://doi.org/10.30490/rvt.2020.265393.1018>
- دماوندی، عاطفه؛ سعدی، حشمت‌اله؛ نادری مهدی، کریم. (۱۴۰۳). سنجش و تحلیل تاب‌آوری خانوارهای روستایی استان همدان در برابر فقر آب کشاورزی، فصلنامه جغرافیا و توسعه، سال ۲۲، شماره ۷۴، صص: ۱۱۱-۱۳۸.
- سازمان هواشناسی کشور. (۱۴۰۲). گزارش اقلیم استان اردبیل (داده‌های بلندمدت ۱۹۹۱-۲۰۲۰).
- سرگزی، علیرضا؛ قویدل، مهدیه؛ سالارپور، ماشاله؛ ضیایی، سامان؛ کیخا، علیرضا. (۱۴۰۳). بررسی عوامل مؤثر بر تاب‌آوری خانوارهای روستایی منطقه سیستان در برابر خشکسالی و عدم آورد رودخانه هیرمند، فصلنامه روستا و توسعه، سال ۲۷، شماره ۱۰۶، صص: ۱-۲۲.
<https://doi.org/10.30490/rvt.2024.361851.1562>
- سلجوقی، ایرج؛ قدرتی، حسین؛ زارعی، مهدی. (۱۴۰۲). بارسازی معنایی شیوه مواجهه دامداران روستایی با پدیده خشکسالی و بحران آب در منطقه موسی آباد از توابع شهرستان تربت‌جام بر اساس نظریه زمینه‌ای، فصلنامه مطالعات جغرافیایی مناطق خشک، دوره ۱۴، شماره ۵۴، صص: ۳۹-۶۰.
- طالعی حور، وحید؛ ظاهری، محمد؛ باختر، سهیلا؛ شفیع، اشکان. (۱۴۰۱). سنجش و اولویت‌بندی تاب‌آوری در برابر زلزله، مطالعه موردی: بخش ویلکیج جنوبی و مرکزی شهرستان نمین، فصلنامه برنامه‌ریزی منطقه‌ای مرودشت، دوره ۱۲، شماره ۴۶، صص: ۲۴۵-۲۶۰.
- غلامی، محمدجواد؛ طلاچیان، مرتضی؛ شهریاری، سیدکمال. (۱۴۰۱). ارائه چارچوب مفهومی اثرات تراکم جمعیتی در تأمین امنیت و مقابله با بحران آب شرب تهران، فصلنامه پژوهشنامه جغرافیای انتظامی، سال ۱۰، شماره ۳۷، صص: ۱۸۰-۱۳۹.
- قاسمی، مریم؛ عزیزاده دولت‌آبادی، لیدا؛ سهیلی‌فر، حسین. (۱۴۰۰). شناسایی راهبردهای مطلوبی مدیریت صحیح منابع آب کشاورزی از دیدگاه بهره‌برداران خرده‌پا، مطالعه موردی: دهستان درز آب، شهرستان مشهد، فصلنامه تحقیقات اقتصاد کشاورزی، دوره ۱۳، شماره ۲، صص: ۸۱-۱۰۸.
- لیث، نادر؛ رستمی، فرحناز؛ علی‌بیگی، امیرحسین. (۱۴۰۰). راه‌کارهای بهبود تاب‌آوری کشاورزان در برابر خشکسالی از دیدگاه کارشناسان مطالعه‌ای در شهرستان میاندوآب، فصلنامه جغرافیا و توسعه، دوره ۱۹، شماره ۶۵، صص: ۷۷-۹۸.
<https://www.doi.org/10.22111/j.10.22111.2021.6540>
- مرکز آمار ایران. (۱۳۹۵). نتایج سرشماری عمومی نفوس و مسکن ۱۳۹۵.
- منظری، عبدالقیوم؛ صحنه، بهمن؛ قانقرمه، عبدالعظیم. (۱۴۰۰). نقش مدیریت منابع آب در معیشت پایدار خانوارهای نواحی روستایی، نمونه موردی: دهستان مزرعه شمالی و جنوبی شهرستان آق قلا، فصلنامه برنامه‌ریزی فضایی، شماره ۱۱، دوره ۱، صص: ۶۷-۸۶.
- یادگاری‌فر، فاطمه؛ پودینه، محمدرضا؛ اسمعیل‌نژاد، مرتضی. (۱۴۰۲). ارزیابی تاب‌آوری شهرستان زاهدان در برابر بحران آب و خشکسالی، فصلنامه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، سال ۲۳، شماره ۶۸، صص: ۳۴۴-۳۴۵.
- یزدان‌پناه، مسعود؛ رحیمی، فاطمه. (۱۳۹۸). دلایل عدم موفقیت ترویج کشاورزی با استفاده از تئوری بنیانی، مطالعه موردی: جهاد کشاورزی استان لرستان، فصلنامه تحقیقات اقتصاد و توسعه کشاورزی ایران، دوره ۵۰، شماره سوم، صص: ۴۵۹-۵۷۵.
- Arimi, V., Karami, E., & Keshavarz, M. (2018). Climate change and agriculture: Impacts and adaptive responses in Iran. *Journal of Integrative Agriculture*, 17(1), 1-15. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(17\)61794-5](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(17)61794-5)
- Beilin, R., & Wilkinson, C. (2015). Introduction: Governing for urban resilience. *Urban Studies Journal Limited*, 52(7), 38-51.
- Boston, M., Bernie, D., Brogden, L., Forster, A., Galbrun, L., Hepburn, L. A., Morkel, J. (2024), Community resilience: A multidisciplinary exploration for inclusive strategies and scalable solutions, *Resilient Cities and Structures*, 3(1), 114-130.
- Cantillana, R., Molina, J. L., Iniesta-Arandia, I. (2024), Bringing water values into play in the Atacama desert water crisis, *Journal of Arid Environments*, 225, , 105256.
- Dessy, S., Tiberti, L., Tiberti, M., & Zoundi, D. (2025). Polygyny and drought resilience in village economies: Evidence from rural Mali. *The World Bank Economic Review*, lhaf020. <https://doi.org/10.1093/wber/lhaf020>
- Devincentis, A. (2020), Scale of sustainable agriculture water management. Phd. Dissertation. Hydrologic Sciences in the Office of Graduate Studies, University of California, Davis.
- Fletcher, A. J., Akwen, N. S., Hurlbert, M., & Diaz, H. P. (2020), You relied on God and your neighbour to get through it, social capital and climate change adaptation in the rural Canadian Prairies, *Regional Environmental Change*, 20, 1-15.

- Hussein, H. (2018), Lifting the veil: unpacking the discourse of water scarcity in Jordan, *Environmental Science & Policy*, 89, 385–392.
- Hair, J. F., Hult, G. T. M., Ringle, C. M. & Sarstedt, M. (2017). *A Primer on Partial Least Squares Structural Equation Modeling (PLS-SEM)*. 2nd Edition, Sage Publications Inc., Thousand Oaks, CA. <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=2297757>
- Isukuru, E. J., Opha, J. O., Isaiah, O. W., Orovwighose, B., Emmanuel, S. S. (2023), Nigeria's water crisis: Abundant water, polluted reality, *Cleaner Water*, 2, 100026.
- Lee, S.H., Choi, J.Y., Hur, S.O., & Taniguchi, M. (2020), Food-centric interlinkages in agricultural food-energy-water nexus under climate change and irrigation management. *Resources, Conservation and Recycling*, 163, 105099.
- Logan, T. M., Aven, T., Guikema, S. D., & Flage, R. (2022), Risk science offers an integrated approach to resilience. *Nature Sustainability*, 5(9), 741-748
- Madani, K. (2014). Water management in Iran: what is causing the looming crisis? *Journal of Environmental Studies and Sciences*, 4(4), 315–328. <https://doi.org/10.1007/s13412-014-0182-z>
- Mancosu, N., Richard, L. S., Gavriil, K., Donatella, S. (2015), Water scarcity and future challenges for food production, *Journal of Water*, (7):975-992.
- Nosha, N., Lashgarara, F., Hosseini, S. J. F., Mirdamadi, S. M., & Rezaei-Moghaddam, K. (2021). Determining the resilience of rural households to food insecurity during drought conditions in Fars Province, Iran. *Sustainability*, 13(15), 8384. <https://doi.org/10.3390/su13158384>
- Paiva, A.C.E., Nath'alia, N., Rodriguez, D.A., Tomasella, J., Carriello, F., Rezende, F.S. (2020), Urban expansion and its impact on water security: the case of the Paraíba do Sul River Basin, São Paulo, Brazil, *The Science of The Total Environment*, 720, 137509.
- Pereira, L. S., Cordery, I., Iacovides, I. (2019), *Coping with water scarcity: Addressing the challenges*. Springer Science & Business Media.
- Rose, A. (2009), Analyzing terrorist threats to the economy: A computable general equilibrium approach. In H. Richardson, P. Gordon, & J. Moore (Eds.), *Economic Impacts of Terrorist Attacks*, Edward Elgar. pp. 196–217.
- Rutter, M., Anita, T., Daniel, S., Pine, J., Leckman, F., Stephen, S., Margaret, J., Eric T. (2015), Resilience: concepts, findings, and clinical implications, *Rutter's Child and Adolescent Psychiatry*, 29, 341-351.
- Savari, M., Eskandari Damaneh, H., & Eskandari Damaneh, H. (2023). Effective factors to increase rural households' resilience under drought conditions in Iran. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 90, 103644. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2023.103644>
- Schouten, M., Vander Heide, M., Heijman, W. (2009), Resilience of Social-Ecological systems in European Rural Areas :Theory and Prospects, 113th EAAE Seminar The Role of Knowledge, Innovation and Human Capital in Multifunctional Agriculture And /Territorial Rural Development.
- Shah, A. A., Khan, A., Ullah, A., Khan, N. A., & Alotaibi, B. A. (2024), The role of social capital as a key player in disaster risk comprehension and dissemination: lived experience of rural communities in Pakistan, *Natural Hazards*, 120, 4131-4157.
- Shrum, T. R., Travis, W. R., Williams, T. M., & Lih, E. (2018), Managing climate risks on the ranch with limited drought information, *Climate Risk Management*, 20, 11-26.
- Stone, M. (1974). Cross-validated choice and assessment of statistical predictions. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, 36(2), 111–147. <https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1974.tb00994.x>
- Tang, Y., Zhang, F., Engel, B. A., Liu, X., Yue, Q., & Guo, P. (2020), Grid-scale agricultural land and water management: A remote-sensing-based multiobjective approach, *Journal of Cleaner Production*, 265, 121792.
- Tumini, I., Villagra-Islas, P., & Herrmann-Lunecke, G. J. N. H. (2017), Evaluating reconstruction effects on urban resilience: a comparison between two Chilean tsunami- prone cities, natural hazards, 85, 1363-1392.
- UN-Water (2020). Policy brief on drought and water management.
- van Aalst, M. A., Koomen, E., & de Groot, H. L. F. (2023). Vulnerability and resilience to drought and saltwater intrusion of rice farming households in the Mekong Delta, Vietnam. *Economics of Disasters and Climate Change*, 7, 407–430. <https://doi.org/10.1007/s41885-023-00133-1>
- Wang, C H., Blackmore, J., Wang, X., Yum K.K., Zhou, M., Diaper, C., mcgregor, G., Anticev, J. (2009), Overview of resilience concepts with application to water resource systems. Ewater Technical Report. September 2009.
- Wang, X., Chen, Y., Fang, G., Li, Z., Liu, Y. (2022), The growing water crisis in Central Asia and the driving forces behind it, *Journal of Cleaner Production*, 378, 134574.
- Zhang, Ch-Y ., Oki, T. (2022), Water pricing reform for sustainable water resources management in China's agricultural sector, *Agricultural Water Management*, 275, 108045.

Assessment of Neotectonic Activity in the Zanjan-Rud Basin Using Fibonacci Golden Ratios

Gholam Hassan Jafari^{1*} 

1. **Corresponding Author**, Associate Professor, Department of Geography, University of Yasouj, Yasouj, Iran
Email: jafarihas@yu.ac.ir ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8901-6855>

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article Article history: Received: 24 September 2025 Revised: 02 December 2025 Accepted: 25 December 2025 Published: 22 December 2026 Keywords: Morphotectonics, Fibonacci ratios, Slope analysis, Sultaneih Fault, Zanjan-Rud Basin.	The Zanjan-Rud Basin, located in northwestern Iran, is a tectonically active region influenced by major faults such as the Sultaneih and Northern Zanjan faults. This study aimed to evaluate the morphotectonic status of the basin using digital elevation model (DEM) data and the application of Fibonacci golden ratios (0.236, 0.382, 0.5, 0.618, 0.764, and 1) for slope classification. The results revealed that over 84.6% of the basin lies within a slope range of 7–23%, indicating generally weak to moderate tectonic activity. However, areas with slopes exceeding 76% (Fibonacci ratio 0.764) and above 76% (ratio 1) were identified along structural lineaments, particularly near the Sultaneih and Northern Zanjan faults. These zones exhibit steep topography, deep valleys, and abrupt changes in drainage patterns, suggesting potential neotectonic influence. Lithological resistance was also found to play a significant role in shaping high-slope features, especially in areas dominated by andesitic and metamorphic rocks. Comparative analysis with previous studies indicates that while some geomorphic features may be attributed to erosional processes and base-level adjustments during the Quaternary, others reflect recent tectonic activity. The use of Fibonacci ratios proved effective in identifying critical thresholds in topographic variation, offering a novel quantitative approach for neotectonic assessments in similar geological settings.
How to Cite: Jafari, G. H. (2026). Assessment of Neotectonic Activity in the Zanjan-Rud Basin Using Fibonacci Golden Ratios. <i>Journal of Natural Environmental Hazards</i>, 15 (50), 91-110.	
	© The Author/Authors Publisher: University of Sistan and Baluchestan DOI: 10.22111/jneh.2025.53330.2139

EXTENDED ABSTRACT

INTRODUCTION

Drainage basins serve as key natural units in geomorphological, hydrological, and tectonic studies, preserving records of dynamic tectonic processes through topographic formation, drainage network patterns, lithological distribution, and erosional evolution. These units are influenced by a range of factors, including structural features, neotectonic activity, erosion, and sedimentation, with the interaction of these elements shaping distinct morphological patterns. Therefore, integrated approaches to studying such basins can provide deep insights into regional tectonic conditions.

The Zanjan-Rud Basin, located in northwestern Iran, holds a strategically significant tectonic position at the junction of the Central Iranian structural block and the Alborz-Zagros zone. Throughout various geological periods, this region has been shaped by extensive tectonic processes that have led to the formation of structures such as the Zanjan-Abhar graben, compressional faults, and uplifted blocks (horsts) in both the northern and southern highlands. The presence of major faults, particularly the Northern Zanjan Fault and the Sultaneih Fault, plays a crucial role in defining the basin's topographic and structural characteristics.

In recent years, there has been a growing interest in using morphotectonic indices to identify areas affected by recent tectonic activity. Commonly used indices include the stream length gradient index (SL), the valley floor width-to-height ratio (VF), the asymmetry factor (AF), and the topographic position index (TPI) — all of which provide quantitative tools for assessing tectonic influence. However, more recently, mathematical and geometric patterns found in nature — such as the Fibonacci golden ratios (0.236, 0.382, 0.5, 0.618, and 0.764) — have also gained attention in morphotectonic research. These ratios, derived from natural patterns observed in plant structures, animal forms, and even cosmic geometries, are increasingly being applied in geomorphological studies as powerful tools for identifying critical thresholds and abrupt changes in topography.

DATA AND METHODOLOGY

This study aims to assess the morphotectonic status of the Zanjan-Rud Basin in northwestern Iran and to identify zones potentially affected by neotectonic activity based on natural mathematical patterns — specifically, the Fibonacci golden ratios. Employing an integrative approach, the research utilizes spatial, lithological, structural, and topographic data within a morphotectonic analytical framework.

Data collection and preprocessing, including the use of Digital Elevation Models (DEM), lithological maps, land-use maps, and structural/fault maps.

1. Slope layer extraction from the DEM.
2. Classification of slope values according to the Fibonacci golden ratios.
3. Morphotectonic interpretation of high-slope zones.
4. Spatial and structural analysis of selected sub-basins to identify factors influencing neotectonic development.

All datasets were integrated and aligned within a Geographic Information System (GIS) environment. Structural and fault maps were updated based on the latest field and geophysical studies. Slope layers were extracted from the DEM and classified according to the Fibonacci ratios (0.236, 0.382, 0.5, 0.618, 0.764, and 1). Areas with slopes exceeding 0.764 and 1 were identified and further analyzed in relation to structural positioning, lithology, and morphological evidence. Sub-basins such as Arpachay, Sarmsaghlu, Armaghan-Khaneh, and Sohrin were selected as representative samples exhibiting prominent slope anomalies and unique morphotectonic conditions.

RESULTS AND DISCUSSION

Analysis of the slope layer revealed that over 84.6% of the basin falls within the 7–23° slope range, indicating generally weak to moderate tectonic conditions. However, areas with slopes exceeding 76°

(Fibonacci threshold of 0.764) and beyond 76° (threshold of 1) were of particular significance. These regions are predominantly located in mountainous parts of the basin and exhibit intense erosion, sinuous river systems, and abrupt topographic transitions.

These zones are largely aligned with the Sultaneih Fault and the Northern Zanzan Fault, where steep slopes, deep valleys, waterfalls, and sudden shifts in drainage networks suggest recent tectonic activity. Nevertheless, some of these features may also be attributed to Quaternary erosional processes and base-level adjustments. Such as andesites of the Karaj Formation and metamorphic-granitic rocks tend to preserve steeper gradients, thereby amplifying tectonic signatures in these areas (Tab. 1).

Table 1: Descriptive Statistical Parameters of the Main Basin, Sub-basins, and Landform Types

Parameter	Zanzanrou d	Armaghan Khaneh	Sohrin	Sarmashag lu	Arpachay	Mountaino us Areas	Alluvial Fans	Marl Areas	Grasslands
Mean	0.148	0.373	0.329	0.212	0.214	0.276	0.083	0.077	0.068
Standard Deviation	0.025	0.292	0.122	0.178	0.193	0.199	0.055	0.059	0.048
Median	0.088	0.247	0.128	0.154	0.177	0.219	0.071	0.061	0.057
Range of Variation	1.075	0.888	0.623	0.722	0.641	1.075	0.294	0.436	0.238

The application of Fibonacci golden ratios enabled the identification of critical thresholds in topographic variation. This method demonstrated higher accuracy in delineating active tectonic zones compared to traditional morphometric techniques, offering a novel perspective in neotectonic assessment.

CONCLUSION

Due to its unique tectonic setting at the intersection of the Central Iranian structural block and the Alborz-Zagros belt, the Zanzan-Rud Basin has experienced extensive tectonic transformations throughout its geological history. The presence of major faults such as the Northern Zanzan Fault and the Sultaneih Fault, combined with lithological diversity and complex topography, positions the area as a focal point for morphotectonic investigations.

Using Fibonacci golden ratios, this study analyzed the slope distribution pattern across the Zanzan-Rud Basin. Results indicate that more than 84.6% of the basin lies within the 7–23° slope range, reflecting generally weak to moderate tectonic conditions. However, areas with slopes exceeding 0.764 and 1 (>76°) were identified as potential zones of neotectonic influence.

These zones are primarily located along the Sultaneih and Northern Zanzan Faults. Their pronounced topographic anomalies — including deep valleys, waterfalls, and abrupt drainage changes — are indicative of recent tectonic uplift. Nonetheless, comparisons with prior studies reveal that some of these morphological features may also result from post-glacial erosion and base-level adjustments during the Quaternary period.

Lithology significantly influences slope development. Resistant rock types such as andesite and granitic-gneissic units tend to maintain steeper gradients, thereby enhancing the visibility of tectonic effects. This highlights the importance of incorporating lithological controls in morphotectonic analyses.

The application of Fibonacci golden ratios in this study successfully identified critical thresholds in topographic variation. As a natural mathematical tool, it offers a robust framework for detecting zones of abrupt topographic change and distinguishing between tectonically induced and erosionally driven landforms. The 0.764 ratio, interpreted as a turning point in slope behavior, proved particularly effective in identifying boundaries between tectonic and neotectonic domains.

ETHICAL CONSIDERATIONS

Conflict of Interest Statement: The authors declare no conflicts of interest related to this study.

Ethical Statement: All data were collected and analyzed in accordance with ethical guidelines and with appropriate permissions from relevant authorities.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors sincerely thank all individuals who have contributed to this paper in any capacity.

REFERENCES

References (in Persian)

- Abbasi, M. (2015). Geomorphological monitoring of alluvial deposits of Iranian rivers, case study: Ghezel Ozan Basin, Master's thesis, Department of Geography, Faculty of Literature and Humanities, University of Zanjan, p. 141. [In Persian]
- Alai Taleghani, M. (2009). Geomorphology of Iran. Qoms Publishing, p. 404. [In Persian]
- Bakhtiari, F. (2015). Study of geomorphological thresholds (case study: Ghezel Ozan Basin), Master's thesis, Department of Geography, Faculty of Literature and Humanities, University of Zanjan, p. 153. [In Persian]
- Eliasi, M., Mohajal, M., & Mesbahi, F. (2008). Paleostress analysis of horizontal Plio-Quaternary deposits in the NW of Zanjan. *Journal of the Earth and Space Physics*, 34(2), 27-42. [20.1001.1.2538371.1387.34.2.3.5](https://doi.org/10.1001.1.2538371.1387.34.2.3.5) [In Persian]
- Jafari, Gh. H. & Bakhtiyari, F. (2016). Analyze of hydro-geoneurons of the Ghezelozan basin. *Geography and Development*, 14(45), 221-242. doi: 10.22111/gdj.2016.2930 [In Persian]
- Jafari, Gh. H., & Rostamkhani, A. (2017). The scrutiny of the geomorphological effects of Armaghankhane and Taham faults. *Geography and Environmental Planning*, 149-173. [In Persian]
- Rostamkhani, A. (2013). *Monitoring the geoclimatic structure of alluvial cones of the Qezel Ozen River*. University of Zanjan. [In Persian]
- Shafeie, A., Ebaadi, N., and Naimi, A. (2008). Investigating the tectonic-sedimentary conditions of the Vir region, southeast of Soltanieh. *Applied Geology and Environment Conference*. 1-13. [In Persian]
- Thobuti, F., Hesami, Kh., Ghods, R., & Asgari, R. (2008). Seismicity and active faulting in Zanjan and adjacent areas. 13th Geophysics Conference of Iran-Tehran-<https://civilica.com/doc/71507>. [In Persian]

References (in English)

- Allen, M., Jackson, J., & Walker, R. (2004). Late Cenozoic reorganization of the Arabia-Eurasia collision and the comparison of short-term and long-term deformation rates. *Tectonics*, 23(2). <https://doi.org/10.1029/2003TC001530>
- Babatunde, S., & Abiola, O. (2024). *The Golden Ratio and Fibonacci sequence in Nature*.
- Berberian, F., & Berberian, M. J. (1981). *Tectono-plutonic episodes in Iran. Zagros Hindu Kush Himalaya Geodynamic Evolution*, 3, 5-32. <https://doi.org/10.1139/e81-019>
- Doornkamp, J. C. (1986). Geomorphological approaches to the study of neotectonics. *Journal of the Geological Society*, 143(2), 335-342. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.143.2.0335>
- El Hamdouni, R., Irigaray, C., Fernandez, T., Chacón, J., & Keller, E. A. (2008). Assessment of relative active tectonics, southwest border of the Sierra Nevada (southern Spain). *Geomorphology*, 96(1-2), 150-173.
- Ghosh, S., & Sivakumar, R. (2018). Assessment of morphometric parameters for the development of the Relative Active Tectonic Index and its significance for seismic hazard study: an integrated geoinformatic approach. *Environmental Earth Sciences*, 77(17), 600.
- Gopinath, G., Nalukudiparambil, J., Bhadrar, A., Girishbai, D., & Pillai, S. U. (2022). Geomorphological analysis of tropical river basins in southern Kerala using hypsometric indices and neotectonic proxies. *Journal of Earth System Science*, 131(4), 246.
- Gutiérrez, A. A. (2023). *Morphotectonic Processes in Seismic Zones of Moderate Intensity*, Argentina.
- Hancock, P. L., & Williams, G. D. (1986). Neotectonics. *Journal of the Geological Society*, 143(2), 325-326. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.143.2.0323>
- Kalman, D., & Mena, R. (2003). The Fibonacci numbers—exposed. *Mathematics magazine* 76(3), 167-181. <https://doi.org/10.1080/0025570X.2003.11953176>
- Kirby, E., & Whipple, K. X. (2012). Expression of active tectonics in erosional landscapes. *Journal of Structural Geology*, 44, 54-75.
- Kothyari, G. C., & Rastogi, B. K. (2013). Tectonic control on drainage network evolution in the Upper Narmada Valley: implications to neotectonics. *Geography Journal*, 2013(1), 325808.
- Mahala, A. (2020). The significance of morphometric analysis to understand the hydrological and morphological characteristics in two different morpho-climatic settings. *Applied Water Science*, 10(1), 1-16. <https://doi.org/10.1007/s13201-019-1118-2>

- Miccadei, E., Carabella, C., & Paglia, G. (2021). Morphoneotectonics of the Abruzzo Periadriatic area (central Italy): Morphometric analysis and morphological evidence of tectonic features. *Geosciences*, 11(9), 397. <https://doi.org/10.3390/geosciences11090397>
- Peitgen, H. O., Jürgens, H., Saupe, D., & Feigenbaum, M. J. (2004). *Chaos and fractals: new frontiers of science* (Vol. 106, pp. 560-604). New York: Springer.
- Różycka, M., Jancewicz, K., Migoń, P., & Szymanowski, M. (2021). Tectonic versus rock-controlled mountain fronts–Geomorphometric and geostatistical approach (Sowie Mts., Central Europe). *Geomorphology*, 373, 107485.
- Sharma, V. (2009). Deterministic chaos and fractal complexity in the dynamics of cardiovascular behavior: perspectives on a new frontier. *The Open Cardiovascular Medicine Journal*, 3, 110. <https://doi.org/10.2174/1874192400903010110>
- Solaimani Azad, S., Dominguez, S., Philip, H., Hessami, K., Forutan, M. R., Zadeh, M. S., & Ritz, J. F. (2011). The Zandjan fault system: Morphological and tectonic evidence of a new active fault network in the NW of Iran. *Tectonophysics*, 506(1–4), 73–85. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2011.04.012>
- Turcotte, D. L. (1997). *Fractals and chaos in geology and geophysics*. Cambridge University Press.
- Zali, Z., & Yazdanfar, A. (2020). *Evaluation of Active Tectonics of the Sohrein Fault Zone Using Morphometry and Geomagnetic Survey*. *Evaluation of Active Tectonics of the Sohrein Fault Zone Using Morphometry and Geomagnetic Survey*. May 2015, 0–8.
- Zali, Z., Shabaniyan, E., Sobouti, F., & Yazdanfar, A. (2015). *Evaluation of Active Tectonics of the Sohrein Fault Zone Using Morphometry and Geomagnetic Survey*. 7th International Conference on Seismology and Earthquake Engineering, Tehran. <https://civilica.com/doc/1132552>.

مجله علمی پژوهشی مخاطرات محیط طبیعی، دوره ۱۵، شماره ۵۰، شماره پیاپی ۰۴، دی ۱۴۰۵

ارزیابی وضعیت مورفوتکتونیک حوضه زنجانرود با استفاده از نسبت‌های طلایی فیوناچی

غلام حسن جعفری 

۱. دانشیار ژئومورفولوژی، گروه جغرافیا، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران (نویسنده مسئول)

ایمیل: jafarihas@yu.ac.ir ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8901-6855>

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۰۲ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۹/۱۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۰۴ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۱۰/۰۱ واژه‌های کلیدی: مورفوتکتونیک، نسبت‌های فیوناچی، شیب، گسل سلطانی، حوضه زنجانرود.	حوضه زنجانرود در شمال باختری ایران دارای موقعیت زمین‌ساختی پویایی است که تحت تأثیر فعالیت‌های نئوتکتونیک قرار گرفته است. این مطالعه با هدف ارزیابی وضعیت مورفوتکتونیک این حوضه با استفاده از نسبت‌های طلایی فیوناچی و تحلیل کمی زیرحوضه‌ها و انواع اراضی انجام شد. ابتدا لایه شیب از مدل رقومی ارتفاع (DEM) استخراج شد و سپس مقادیر شیب بر اساس نسبت‌های فیوناچی شامل ۰/۲۳۶، ۰/۳۸۲، ۰/۶۱۸، ۰/۷۶۴ و ۱ طبقه‌بندی گردید. نتایج نشان داد که بیش از ۸۴/۶٪ از سطح حوضه در محدوده شیب ۷ تا ۲۳٪ قرار دارد که بیانگر شرایط عمومی مورفوتکتونیک ضعیف تا متوسط است. با اینحال، مناطقی با شیب‌های بالای ۰/۷۶۴ (۷۶٪)، بیشتر در امتداد گسل سلطانی و گسل شمالی زنجان مشاهده شدند که می‌توانند نشانه‌هایی از فعالیت‌های نئوتکتونیک شدید باشند. تحلیل آمار توصیفی زیرحوضه‌های منتخب (آرپاچای، سارمساقلو، ارمغانخانه و سهرین) نشان داد که این مناطق از الگوهای مورفوتکتونیک مستقل یا شبه‌مستقل نسبت به حوضه اصلی برخوردارند. زیرحوضه‌های ارمغانخانه و سهرین با داشتن میانگین بالاتر و انحراف معیارهای متفاوت، نشان‌دهنده فعالیت‌های شدیدتر و تفاوت‌های داخلی در الگوی تکتونیک خود هستند. در مقابل، زیرحوضه‌های سارمساقلو و آرپاچای با وضعیت ضعیف تا متوسط، شباهت بیشتری به حالت عمومی حوضه دارند. همچنین، تحلیل انواع اراضی نشان داد که کوهستان‌ها بیشترین واکنش را به فعالیت‌های نئوتکتونیک نشان می‌دهند، درحالی‌که لندفرم‌های مخروط-افکنه‌ای، مارنی و چمنی با مقادیر کمتر، ثبات توپوگرافیکی بیشتری دارند. نتایج این مطالعه نشان داد که استفاده از نسبت‌های طلایی فیوناچی به همراه تحلیل آماری زیرحوضه‌ها و انواع اراضی می‌تواند به عنوان یک ابزار کمی مؤثر در شناسایی مناطق تحت تأثیر نئوتکتونیک عمل کند و الگویی علمی برای مطالعات مشابه در مناطق دیگر باشد.

استناد: جعفری، غلام حسن. (۱۴۰۵). ارزیابی وضعیت مورفوتکتونیک حوضه زنجانرود با استفاده از نسبت‌های طلایی فیوناچی. مخاطرات

محیط طبیعی، ۱۵ (۵۰)، ۹۱-۱۱۰.

ناشر: دانشگاه سیستان و بلوچستان

© نویسنده/ نویسندگان

DOI: 10.22111/jneh.2025.53330.2139



مقدمه

حوضه‌های آبریز به‌عنوان واحدهای طبیعی کلیدی در مطالعات ژئومورفولوژی، هیدرولوژی و تکتونیک، سوابق پویایی‌های زمین‌ساختی را در قالب شکل‌گیری توپوگرافی، الگوهای شبکه زهکشی، توزیع لیتولوژی و تحولات فرسایشی حفظ کرده‌اند (کربای و ویپل^۱، ۲۰۱۲؛ ال همدونی و همکاران^۲، ۲۰۰۸). این واحدها تحت تأثیر عوامل مختلفی از جمله ساختارهای زمین‌ساختی، نفوختکتونیک، فرسایش و رسوبگذاری قرار دارند که برهمکنش این عوامل منجر به شکل‌گیری الگوهای مورفولوژیک خاصی می‌شود (کوتیاری و راستگوی^۳، ۲۰۱۳). بنابراین، مطالعه این حوضه‌ها از طریق رویکردهای تلفیقی می‌تواند بینش عمیقی از وضعیت تکتونیکی منطقه ارائه دهد.

در سال‌های اخیر، استفاده از شاخص‌های مورفوتکتونیکی به منظور تشخیص مناطق تحت تأثیر فعالیت‌های تکتونیکی اخیر، مورد توجه زیادی قرار گرفته است. این شاخص‌ها شامل شاخص گرادیان طولی رودخانه (SL)، شاخص عرض دره به ارتفاع (VF)، شاخص عدم تقارن حوضه (AF)، شاخص تقارن توپوگرافی عرضی (TPI)، شاخص گرادیان طولی رودخانه (Smf) و سایر شاخص‌های کمی مرتبط هستند (روزیکا و همکاران^۴، ۲۰۲۱؛ قوش و سیواکومار^۵، ۲۰۱۸) (جدول ۱). با این حال، این شاخص‌ها اغلب وابسته به موقعیت مکانی، شبکه زهکشی، اقلیم، نوع سنگ و توپوگرافی محلی هستند و ممکن است در مناطقی با پوشش ناهمگون یا شبکه زهکشی پیچیده، دقت کمتری داشته باشند.

جدول ۱: شاخص‌های مورفوتکتونیک و کاربرد آن‌ها

شاخص	نام کامل	هدف و کاربرد
Smf	شاخص گرادیان طولی رودخانه	شناسایی ناهمواری‌های طولی رودخانه و ارزیابی بالآمدگی تکتونیکی
VF	نسبت عرض دره به ارتفاع	اندازه‌گیری شکل دره، مقادیر پایین نشانه فرسایش عمودی و فعالیت تکتونیکی
SL	گرادیان طولی رودخانه	شناسایی نقاط شکست در راستای رودخانه ناشی از بالآمدگی تکتونیکی
AF	عدم تقارن حوضه زهکشی	تشخیص کج‌شدگی جانبی حوضه ناشی از حرکات تکتونیکی نامتقارن
TPI	شاخص تقارن توپوگرافی عرضی	ارزیابی تقارن حوضه؛ عدم تقارن نشانه تغییر شکل نفوختکتونیکی

در مقابل، نسبت‌های طولی فیبوناچی که از الگوهای ریاضی موجود در ساختارهای طبیعی (مانند گیاهان، صدف‌ها و کهکشان‌ها) گرفته شده‌اند، به‌عنوان ابزاری کمی، بی‌طرفانه و قابل‌تعمیم در تحلیل‌های مورفوتکتونیکی مطرح شده‌اند (باباتوند و آبیولا^۶، ۲۰۲۴). این نسبت‌ها قادرند نقاط بحرانی در تغییرات توپوگرافی را شناسایی کنند بدون آنکه تحت تأثیر مستقیم فاکتورهای محلی مانند جهت زهکشی یا نوع سنگ قرار گیرند.

به همین دلیل، در این مطالعه از نسبت‌های فیبوناچی به‌عنوان یک چارچوب تحلیلی جهانی استفاده شده است که می‌تواند هر جا و هر زمان در حوضه‌های آبریز مختلف، بدون وابستگی به موقعیت مکانی خاص به کار گرفته شود. این رویکرد، ضمن افزایش دقت تشخیص مناطق فعال تکتونیکی، امکان مقایسه بین مناطق مختلف را فراهم می‌کند و به‌عنوان یک ابزار نوین و قابل‌تعمیم در مطالعات مورفوتکتونیک عمل می‌کند.

¹ Kirby, & Whipple

² El Hamdouni et al.,

³ Kothyari & Rastogi

⁴ Różycka et al.,

⁵ Ghosh & Sivakumar

⁶ Babatunde & Abiola

عباسی (۱۳۹۴)، بختیاری (۱۳۹۵) و رستم‌خانی (۱۳۹۳) تغییرات سطح اساس دوره کواترنری قزل اوزن را مسئول اصلی تسلط فرسایش خطی و قهقریایی در دشت‌های اطراف زنجانرود و ایجاد لندفرم‌های مورفوتکتونیک منطقه دانستند. یافته‌های سلیمانی آزاد و همکاران (۲۰۱۱) و زالی و یزدانفر (۲۰۲۰)، نقش پایین افتادن سطح اساس و فرسایش قهقریایی را در ایجاد بسیاری از عوارض مورفولوژیکی این منطقه تایید کردند. زالی و یزدانفر (۲۰۲۰)، با استفاده از شاخص‌های SL و VF به این نتیجه رسیدند که تغییرات منظمی ناشی از فعالیت‌های تکتونیک در طول گسل سهرین دیده نمی‌شود و لبه‌ها و پرتگاه‌های مشاهده‌شده، اثر فرسایش در پادگانه‌های آبرفتی هستند. در مقابل، شیب‌های تند، دره‌های عمیق، آبشارهای بلند و تغییرات ناگهانی در شبکه زهکشی در ارتفاعات شمالی زنجان، نشانه‌هایی از فعالیت‌های تکتونیک اخیر هستند. این منطقه به‌عنوان یک هورست بین گسل شمالی زنجان و گسل قزل‌اوزن قرار دارد و شواهد متعددی از فعالیت تکتونیک شدید در آن وجود دارد (جعفری و رستم‌خانی، ۱۳۹۳). میانگین شاخص فعالیت تکتونیک نسبی (IAT) برای حوضه‌های منتخب ارتفاعات شمالی زنجان، برابر با ۱/۸ محاسبه شده است که نشان‌دهنده وضعیت تکتونیک زیاد این منطقه است.

باین‌حال، استفاده از الگوهای ریاضی و هندسی طبیعی مانند نسبت‌های طلایی فیبوناچی که در مطالعات مورفوتکتونیک در سال‌های اخیر مطرح شده‌اند (گوپیناث و همکاران^۱، ۲۰۲۲)، در این منطقه و حتی در ایران کمتر مورد توجه قرار گرفته است. این مقاله به بررسی این روش نوین در حوضه زنجانرود می‌پردازد.

نسبت‌های فیبوناچی (۰/۲۳۶، ۰/۳۸۲، ۰/۶۱۸، ۰/۷۶۴) که از الگوهای طبیعی موجود در ساختارهای گیاهی، حیوانی و حتی سازه‌های کیهانی گرفته شده‌اند (باباتوند و آبیولا، ۲۰۲۴)، امروزه در زمینه‌های مختلف علمی از جمله ژئومورفولوژی و برنامه‌ریزی سرزمینی به‌عنوان ابزاری تشخیصی و تحلیلی شناخته شده‌اند. این نسبت‌ها به‌ویژه در شناسایی الگوهای طبیعی و ارزیابی تأثیرات محیطی عملکرد دارند (کالمن و منا^۲، ۲۰۰۳؛ شارما^۳، ۲۰۰۳). پژوهش‌های مختلف نشان داده‌اند که نسبت‌های فیبوناچی می‌توانند به تحلیل پیچیدگی‌های طبیعی کمک کنند و همچنین در ارائه راه‌کارهای مؤثر برای مدیریت و برنامه‌ریزی سرزمینی مؤثر باشند.

مورفوکلیماتیک شاخه‌ای از ژئومورفولوژی است که به بررسی نقش اقلیم در شکل‌گیری، تحول و توزیع زمین‌فرم‌ها می‌پردازد. این مفهوم تأکید دارد که چگونه عوامل مختلف اقلیمی مانند دما، بارش و باد بر توسعه و تغییر زمین تأثیر می‌گذارند (میکادی و همکاران^۴، ۲۰۲۱). فرآیندهای مورفوکلیمایی برای درک تکامل شکل زمین جدایی‌ناپذیر هستند و به دسته‌بندی مناطق مورفوکلیمایی کمک می‌کنند (گوتیریز^۵، ۲۰۲۳؛ ماهالا^۶، ۲۰۲۰).

نئوتکتونیک به مطالعه فرآیندهای تکتونیک از دوره پلیستوسن به بعد اشاره دارد و مورفوتکتونیک به بررسی شکل‌گیری و تغییرات سطح زمین بر اساس فرآیندهای تکتونیک می‌پردازد (هانکوک و ویلیامز^۷، ۱۹۸۶؛ دورنکامپ^۸، ۱۹۸۶).

¹ Gopinath et al.,

² Kalman & Mena

³ Sharma

⁴ Miccadei et al.,

⁵ Gutiérrez

⁶ Mahala

⁷ Hancock & Williams

⁸ Doornkamp

حوضه زنجانرود با وجود موقعیت زمین‌ساختی حساس در برخورد بلوک ایران مرکزی و پهنه البرز - طالش، فاقد یک روش سیستماتیک و قابل تعمیم برای شناسایی مناطق فعال تکتونیکی است. روش‌های متداول مانند شاخص‌های SL، VF و AF اغلب وابسته به شبکه زهکشی و لیتولوژی هستند و در مناطق بدون زهکشی منظم یا با پوشش ناهمگون، دقت کمتری دارند. بنابراین، ضرورت توسعه یک چارچوب کمی، بی‌طرف و قابل تعمیم، مانند استفاده از نسبت‌های تلای فیبوناچی، برای شناسایی عوارض نئوتکتونیکی امری ضروری است. وجود گسل‌های بزرگی چون گسل شمالی زنجان و گسل سلطانیه، نقش اصلی را در تعیین الگوی توپوگرافی و ساختاری حوضه ایفا کرده‌اند. این گسل‌ها ضمن ایجاد اختلاف ارتفاع قابل توجه، منجر به شکل‌گیری دامنه‌های شدید و دره‌های عمیقی شده‌اند که اغلب نشانه‌هایی از فعالیت‌های نئوتکتونیکی را در خود حفظ کرده‌اند (شافعی و همکاران، ۱۳۸۷).

تفسیر وضعیت مورفوتکتونیکی حوضه زنجانرود در مطالعات پیشین دارای دو رویکرد متضاد بوده است: گروهی از پژوهشگران از جمله عباسی (۱۳۹۵) و رستم‌خانی (۱۳۹۳) بر اساس شاخص‌های مورفوتکتونیکی مانند Smf، VF و SL، فعالیت تکتونیکی شدید را در ارتفاعات شمالی و جنوبی زنجان تأیید کرده‌اند. در مقابل، زالی و یزدانفر (۲۰۲۰) در بررسی گسل فرضی سهرین، با استفاده از شاخص‌های SL و VF و داده‌های ژئوفیزیکی، نتیجه گرفتند که هیچ الگوی منظمی از فعالیت تکتونیکی در طول این ساختار مشاهده نمی‌شود. آن‌ها تغییرات توپوگرافیکی مانند لبه‌ها و پرتگاه‌ها را ناشی از فرسایش قهقرایی در پادگانه‌های آبرفتی و نه فعالیت گسلی دانسته و این ساختار را غیرفعال یا حداقل غیرتکتونیکی ارزیابی کردند.

این تناقض ظاهری، در واقع نشان‌دهنده تفاوت در مقیاس مکانی، واحد سنگی و نوع فرآیند غالب است. در واقع، فعالیت تکتونیکی در مناطق مرتفع و دارای سنگ‌های مقاوم (مانند آندزیت و گرانیت) (مانند زیرحوضه‌های ارمغانخانه و سهرین) به وضوح قابل تشخیص است و با یافته‌های عباسی و رستم‌خانی همخوانی دارد. در مقابل، در دشت‌های آبرفتی و مناطق دارای لیتولوژی نرم، فعالیت‌های فرسایشی قهقرایی، بر اثر تغییر سطح اساس قزل اوزن، توانسته است الگوهایی شبیه به عوارض تکتونیکی ایجاد کند که بدون تحلیل تلفیقی، به اشتباه به فعالیت تکتونیکی نسبت داده می‌شوند. بنابراین، تناقض بین مطالعات قبلی نه در سطح علمی، بلکه در سطح مقیاس و واحد فضایی است. در این پژوهش، با استفاده از تحلیل تفکیک‌شده زیرحوضه‌ها و انواع اراضی، نشان داده شد که فعالیت تکتونیکی در برخی بخش‌ها (به‌ویژه کوهستان) قوی و مستقل است، درحالی‌که در مناطق آبرفتی و مخروط‌افکنه، فرسایش قهقرایی نقش غالب دارد.

این رویکرد تفکیکی، از یک‌سو به تأیید یافته‌های عباسی و رستم‌خانی در مناطق فعال تکتونیکی منجر می‌شود و از سوی دیگر، توجیهی منطقی برای یافته‌های زالی و یزدانفر در مناطق آبرفتی ارائه می‌دهد. در نتیجه، هیچ تناقض اساسی وجود ندارد؛ بلکه تنوع در فرآیند غالب در واحدهای مختلف فضایی است که باید به آن توجه شود.

استفاده از نسبت‌های تلای فیبوناچی به‌عنوان یک چارچوب کمی و قابل تعمیم برای شناسایی نقاط بحرانی توپوگرافیکی، به‌ویژه در مناطق فاقد شبکه زهکشی منظم یا داده‌های ژئوفیزیکی مستقیم، نوآوری اصلی این پژوهش است. این روش، ضمن حفظ سادگی و دسترسی بالا، می‌تواند به‌عنوان ابزاری مکمل یا جایگزین در مقایسه با شاخص‌های مورفوتکتونیکی سنتی (SL، VF و AF) به‌کار گرفته شود و به تشخیص مناطق با فعالیت نئوتکتونیکی شدید کمک کند.

در این پژوهش، برای اولین بار، این نسبت‌ها به صورت سیستماتیک و کمی به عنوان یک چارچوب تحلیلی برای طبقه‌بندی شیب و شناسایی نقاط بحرانی توپوگرافیکی تحت تأثیر نئوتکتونیک به کار گرفته شده‌اند. انتخاب این نسبت‌ها می‌تواند به عنوان یک ابزار مکمل در مقایسه با شاخص‌های سنتی (AF، VF، SL) عمل کند. اگرچه استفاده صریح و نظام‌مند از این نسبت‌ها به عنوان شاخصی در مطالعات مورفوتکتونیک تاکنون محدود بوده است؛ اما مفاهیم مرتبط با آن، از جمله فرکتال‌ها و الگوهای هندسی در شبکه زهکشی، در ژئومورفولوژی کاربرد داشته‌اند (تورکوت^۱، ۱۹۹۷؛ پیتگن و همکاران^۲، ۲۰۰۴).

داده‌ها و روش‌ها

روش پژوهش

این پژوهش با هدف ارزیابی وضعیت مورفوتکتونیک حوضه زنجانرود در شمال باختری ایران و شناسایی مناطق تحت تأثیر نئوتکتونیک بر اساس الگوهای طبیعی ریاضی (نسبت‌های تلای فیوناچی) انجام شده است. این مطالعه با رویکردی تلفیقی، داده‌های مکانی، لیتولوژیکی، ساختاری و توپوگرافیکی را در قالب یک چارچوب تحلیلی مورفوتکتونیک مورد استفاده قرار داده است.

روش کار شامل چندین مرحله کلیدی است: جمع‌آوری و پیش‌پردازش داده‌های مکانی، استخراج لایه شیب از مدل رقومی ارتفاع (DEM)، طبقه‌بندی شیب بر اساس نسبت‌های تلای فیوناچی، تفسیر مورفوتکتونیک مناطق با شیب بالا و در نهایت تحلیل مکانی و ساختاری این مناطق در راستای شناسایی عوامل مؤثر بر تحولات نئوتکتونیک.

بر این اساس، داده‌های این پژوهش از روش‌های مختلفی جمع‌آوری گردید: الف) مدل رقومی ارتفاع (DEM) با دقت ۳۰ متری از سنجنده (SRTM؛ ب) نقشه لیتولوژی زنجان با مقیاس ۱:۱۰۰،۰۰۰ (پ) لایه تیپ اراضی از لایه DEM و نقشه لیتولوژی؛ ت) لایه گسل‌ها و ساختارهای زمین‌ساختی منطقه از منابع موجود (بربریان، ۱۹۷۶؛ سلیمانی آزاد و همکاران، ۲۰۱۱؛ شافی و همکاران، ۲۰۰۸؛ زالی و یزدانفر، ۲۰۲۰؛ ث) داده‌های آمار توصیفی شیب حوضه زنجانرود به عنوان حوضه اصلی و زیرحوضه‌های آریاچای، ارمغانخانه، سهرین و سارمساقلو به عنوان زیرحوضه‌های فرعی؛ ج) داده‌های توپوگرافیکی و میدانی از منطقه. تمامی داده‌ها در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی GIS تلفیق و تطبیق داده شد. نقشه‌های ساختاری و گسلی نیز با توجه به آخرین مطالعات صحرایی به‌روزرسانی شدند.

نسبت‌های تلای فیوناچی، به عنوان ابزاری برای شناسایی نقاط بحرانی در سیستم‌های پیچیده مورد استفاده قرار می‌گیرند. این نسبت‌ها بر اساس دنباله فیوناچی و عدد تلای (۱/۶۱۸) شکل گرفته و نشان‌دهنده تعادل در ساختارهای طبیعی هستند.

شیب به عنوان یکی از مهم‌ترین شاخص‌های مورفوتکتونیک، تحت تأثیر عوامل تکتونیک، لیتولوژی و فرسایش قرار دارد. بنابراین، تحلیل الگوی شیب می‌تواند به شناسایی مناطق فعال تکتونیک کمک کند. لایه شیب به عنوان پایه‌ای برای طبقه‌بندی مورفوتکتونیک منطقه با استفاده از نسبت‌های تلای فیوناچی (به عنوان معیاری برای طبقه‌بندی شیب) به کار گرفته شد. نسبت‌های مورد استفاده شامل: ۰/۲۳۶ (۲۳/۶٪)، ۰/۳۸۲ (۳۸/۲٪)، ۰/۶۱۸ (۶۱/۸٪)، ۰/۷۶۴ (۷۶/۴٪) و ۱ (۱۰۰٪) می‌باشند.

¹ Turcotte

² Peitgen et al.,

در مطالعات ژئومورفولوژی، روش‌های رایج طبقه‌بندی داده‌های شیب شامل روش فواصل مساوی، چارک‌ها و طبقه‌بندی طبیعی جینکس است. در مقابل، استفاده از نسبت‌های طلایی فیوناچی به‌عنوان معیاری برای طبقه‌بندی شیب، بر اساس الگوهای ریاضی - طبیعی است که در سیستم‌های پیچیده زمینی، به‌صورت خودبه‌خودی ظاهر می‌شوند. این رویکرد قادر است تغییرات غیرخطی و ناگهانی در توپوگرافی را شناسایی کند. نسبت 0.764 (معادل شیب $\sim 76\%$) به‌عنوان یک مرز طبیعی در تغییر وضعیت از تکتونیک به نئوتکتونیک عمل می‌کند که با شواهد میدانی و موقعیت ساختاری همخوانی دارد. همچنین، نسبت $1 (100\%)$ ، به‌عنوان شاخص فعالیت نئوتکتونیک شدید در نظر گرفته شد.

در این راستا: الف) موقعیت چنین شیب‌هایی در ارتباط با گسل‌های شناخته‌شده (گسل سلطانیه، گسل شمالی زنجان و گسل فرضی سهرین) مورد بررسی قرار گرفت؛ ب) نوع سنگ و مقاومت لیتولوژیکی در شکل‌گیری شیب‌های تند بررسی گردید؛ ج) شواهد مورفولوژیکی (مانند دره‌های عمیق، آبشارها، تغییرات شبکه زهکشی و...) بررسی شد؛ د) زیرحوضه‌های آراچای، سارمساقلو، ارمغانخانه و سهرین به‌عنوان نمونه‌هایی از مناطق با شیب‌های برجسته و شرایط مورفوتکتونیک خاص انتخاب شدند. این مناطق با توجه به موقعیت ساختاری، نوع سنگ و شواهد مورفولوژیکی، مورد تحلیل قرار گرفت و سرانجام داده‌های برآوردشده از تحلیل آمار توصیفی شیب (میانگین، انحراف معیار، میانه و دامنه تغییرات) در زیرحوضه‌ها و انواع مختلف سطوح اراضی تجزیه و تحلیل گردید (شکل ۱).



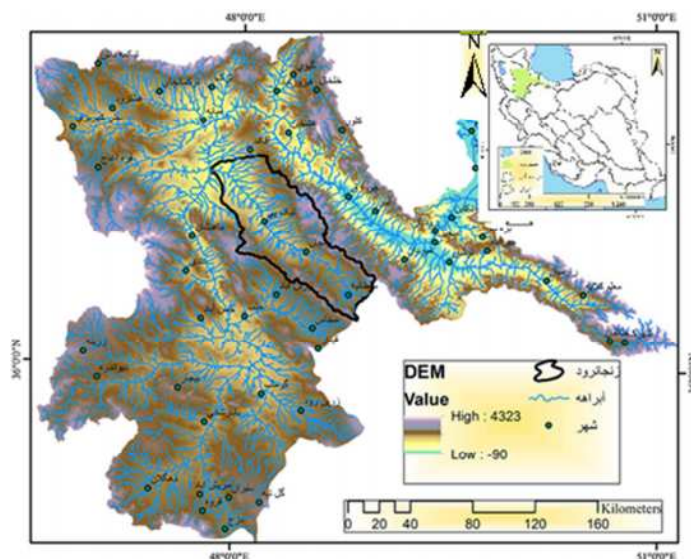
شکل ۱: فلوچارت پژوهش به‌صورت گرافیکی

منطقه مورد مطالعه

فلات ایران مجموعه‌ای از چندین قطعه خرده قاره است که در امتداد مناطق بخیه اقیانوسی به هم متصل شده‌اند (آلن و همکاران، ۲۰۰۴). در تکامل ژئومورفولوژیکی مناظر حوضه زنجانرود، به‌دلیل موقعیت خاص زمین‌شناسی (محل برخورد زون‌های مختلف تکتونیک)، تنوع بسیار زیادی وجود دارد. آب‌وهوای متنوع و اقلیم‌های دیرینه که بر روی لوح‌های تکتونیک، بسترها و نقش برجسته‌های مختلف باقیمانده‌اند، مناظر طبیعی بسیار متنوعی را ایجاد کرده‌اند. ناحیه زنجان شامل یک بلوک پوسته بزرگ است که از سنگ‌های دگرگونی، توده‌های گرانیتی و لایه‌های رسوبی پروتروزیوئیک - کامبرین پسین تا سنوزوئیک شکل گرفته است. سازندهای پیش از ترشیاری کمربند سلطانیه چین‌خورده و تا حدی رانده شده‌اند، سازندهای ترشیاری فرورفتگی زنجان را در امتداد گسل سلطانیه پر می‌کنند (بربریان و بربریان، ۱۹۸۱؛ سلیمانی آزاد و همکاران، ۲۰۱۱). فرورفتگی زنجان در شمال غربی بلوک ساختاری ایران مرکزی قرار دارد و دارای یک روند عمومی شمال باختری - جنوب شرقی است که توسط تکتونیک پس از میوسن کنترل می‌شود (زالی و همکاران، ۲۰۱۵).

حوضه زنجانرود در مختصات جغرافیایی ۳۶/۳ تا ۳۷/۲۵ درجه شمالی و ۴۷/۸ تا ۴۹ درجه شرقی واقع شده است. طول آن نزدیک به ۱۳۰ و عرض حداکثر ۶۰ کیلومتر است (شکل ۲). این حوضه در بین بخشی از ارتفاعات البرز غربی (از رشته کوه‌های تالش جنوبی) و ارتفاعات سلطانیه (از ارتفاعات ایران مرکزی) قرار دارد. حوضه زنجانرود بخشی از حوضه آبریز بزرگ قزل اوزن است (علایی طالقانی، ۱۳۸۸: ۹۶).

فرونش زنگان، حوضه باریک و ممتدی در راستای شمال غرب - جنوب شرق است که پهنه‌های کوهستانی طارم (ارتفاعات شمالی زنگان) و سلطانیه (ارتفاعات جنوبی زنگان) در شمال شرقی و جنوب غربی را از هم جدا می‌کند (الیاسی و همکاران، ۱۳۸۷: ۲۸). ارتفاع کف حوضه زنجانرود از سطح دریا به کمتر از ۱۱۰۰ متر (در دهانه‌ی ورودی به قزل اوزن) و فراز برخی قله‌های پیرامون آن، به بیش از ۲۸۹۰ متر می‌رسد.



شکل ۲: موقعیت جغرافیایی حوضه زنجانرود در ایران و حوضه سفیدرود

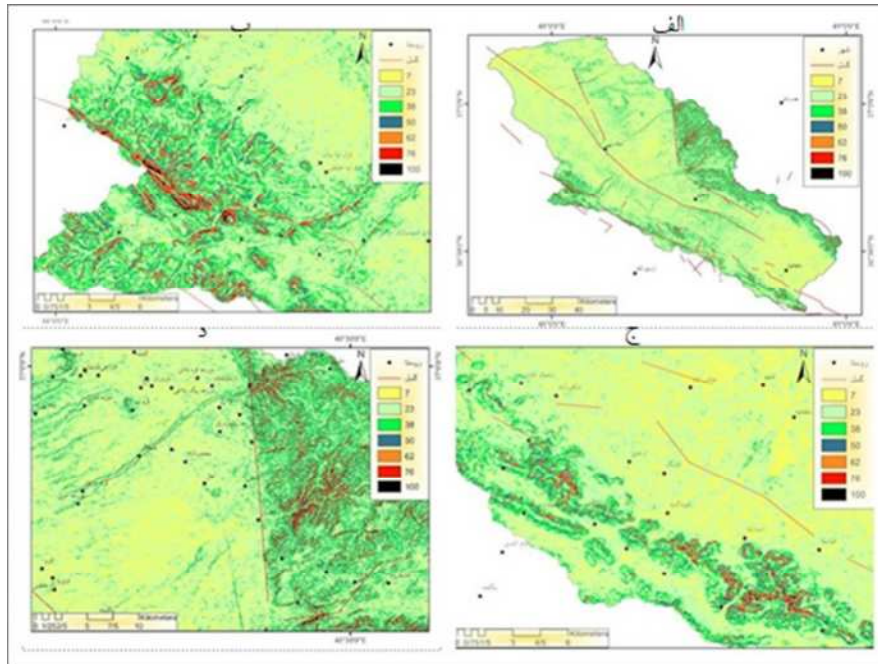
یافته‌های پژوهش

تحلیل شیب حوضه زنجانرود بر اساس لایه DEM و طبقه‌بندی آن بر اساس نسبت‌های طلایی فیبوناچی، نشان داد که ۸۴/۶٪ از سطح حوضه در محدوده شیب ۷ تا ۲۳ درصد، ۱۰/۶٪ در محدوده ۲۳ تا ۳۸ درصد، ۴/۵٪ در محدوده ۳۸ تا ۶۲ درصد، ۰/۳٪ در محدوده ۶۲ تا ۷۶ درصد و ۰/۰۵٪ در محدوده بالاتر از ۷۶ درصد قرار دارد (جدول ۲).

جدول ۲: توزیع شیب حوضه زنجانرود بر اساس نسبت‌های فیبوناچی

ردیف	شیب (٪)	مساحت Km ²	٪ از کل	وضعیت مورفوتکتونیک
۱	۷-۰	۰/۱۶۵	۰/۰۳۵	بسیار ضعیف (فعالیت تکتونیک بسیار کم)
۲	۲۳-۷	۳۹۳۰/۵۱۸	۸۴/۶۱	ضعیف (فعالیت تکتونیک کم)
۳	۳۸-۲۳	۴۹۰/۹۷۵	۱۰/۵۷	متوسط (فعالیت تکتونیک متوسط)
۴	۶۲-۳۸	۲۰۸/۱۶۴	۴/۴۸	شدید (فعالیت تکتونیک زیاد)
۵	۷۶-۶۲	۱۳/۴۹۲	۰/۲۹	تکتونیک
۶	<۷۶	۲/۳۳۹	۰/۰۵	نئوتکتونیک
جمع		۴۶۴۵/۶۵	۱۰۰٪	-

مناطق با شیب بیشتر از ۰/۷۶۴ (معادل ۰/۷۶٪) بیشتر در امتداد گسل سلطانیه و گسل شمالی زنجان متمرکز هستند. نسبت ۰/۷۶۴ به عنوان مرز تغییر وضعیت از شرایط تکتونیکی به نفوتکتونیک در نظر گرفته شد. این مناطق با تراکم آبشارها، تنگه‌ها و تندآب‌ها همخوانی دارند (شکل ۳).



شکل ۳: وضعیت شیب با توجه به نسبت‌های فیبوناچی: الف) حوضه زنجانود با مقیاس: ۱:۱۰۰,۰۰۰، بخشی از ارتفاعات جنوبی زنجانود با تاکید بر زیرحوضه آریاچای، ج) امتداد گسل سلطانیه در جنوب، د) ارتفاعات و دشت‌های شمالی زنجانود، بامقیاس: ۱:۵۰,۰۰۰. تمامی نقشه‌ها بر اساس لایه شیب استخراج شده از DEM با دقت ۱۲/۵ متری و طبقه‌بندی شده بر اساس نسبت‌های طلایی فیبوناچی تهیه شده‌اند. مناطق با شیب بالاتر از ۰/۷۶۴ (۰/۶۲-۰/۷۶٪) و (بزرگ‌تر از ۷۶ درصد) به عنوان مناطق مشکوک به فعالیت نفوتکتونیک شناسایی شده‌اند. رنگ زرد (کمتر از ۰/۷٪): فعالیت تکتونیک بسیار کم، سبز کم رنگ (۲۳-۰/۷٪): فعالیت تکتونیک کم، سبز تیره (۳۸-۰/۲۳٪): بافعالیت تکتونیک متوسط، آبی تیره (۵۰-۰/۳۸٪): فعالیت تکتونیک زیاد، نارنجی (۶۲-۰/۵۰٪): با فعالیت تکتونیک زیاد، قرمز (۷۶-۰/۶۲٪): مناطق تکتونیک و مشکوک (۱۰۰-۰/۷۶٪): فعالیت نفوتکتونیک.

نسبت یک (۰/۱۰۰٪) به عنوان شاخص فعالیت نفوتکتونیک شدید در نظر گرفته شد. مناطق با شیب بیشتر از ۰/۷۶٪ در زیرحوضه آریاچای در ارتفاعات جنوبی، در امتداد گسل سلطانیه مشاهده شدند. گسل سلطانیه، گسلی فشاری با راستای شمال باختر - جنوب خاوری است و طول آن بیش از ۱۴۰ کیلومتر است. این گسل در لبه شمالی کوهستان سلطانیه قرار دارد و در بخش‌های شمالی ارتفاعات سلطانیه سطوح ارضی با شیب‌های تند ایجاد کرده است. نوع گسل: وارونه با مؤلفه امتدادلغز جانبی معکوس (سلیمانی آزاد و همکاران، ۲۰۱۱). دیواره‌های گسلی در بیشتر طول گسل سلطانیه و در مرز کوه و دشت به وضوح قابل تشخیص است. در محل گسل سلطانیه، یک پهنه خردشدگی با پهنای ۳۹ تا ۴۹ متر وجود دارد که شامل توده گرانیتی دوران و توده‌های کربناتی ضخیم (دولومیت) است. زیرحوضه‌های ارمغانخانه، سهرین و سارمساقلو در امتداد گسل شمالی زنجان قرار دارند. در این منطقه شیب‌های تند بیشتر از ۰/۷۶٪، دره‌های عمیق و آبشارهای متعدد مشاهده شد. مقادیر ارائه شده جدول (۳) به صورت نسبت بدون بعد هستند و واحد فیزیکی ندارند. این شاخص‌ها از طبقه‌بندی لایه شیب به دست آمده‌اند.

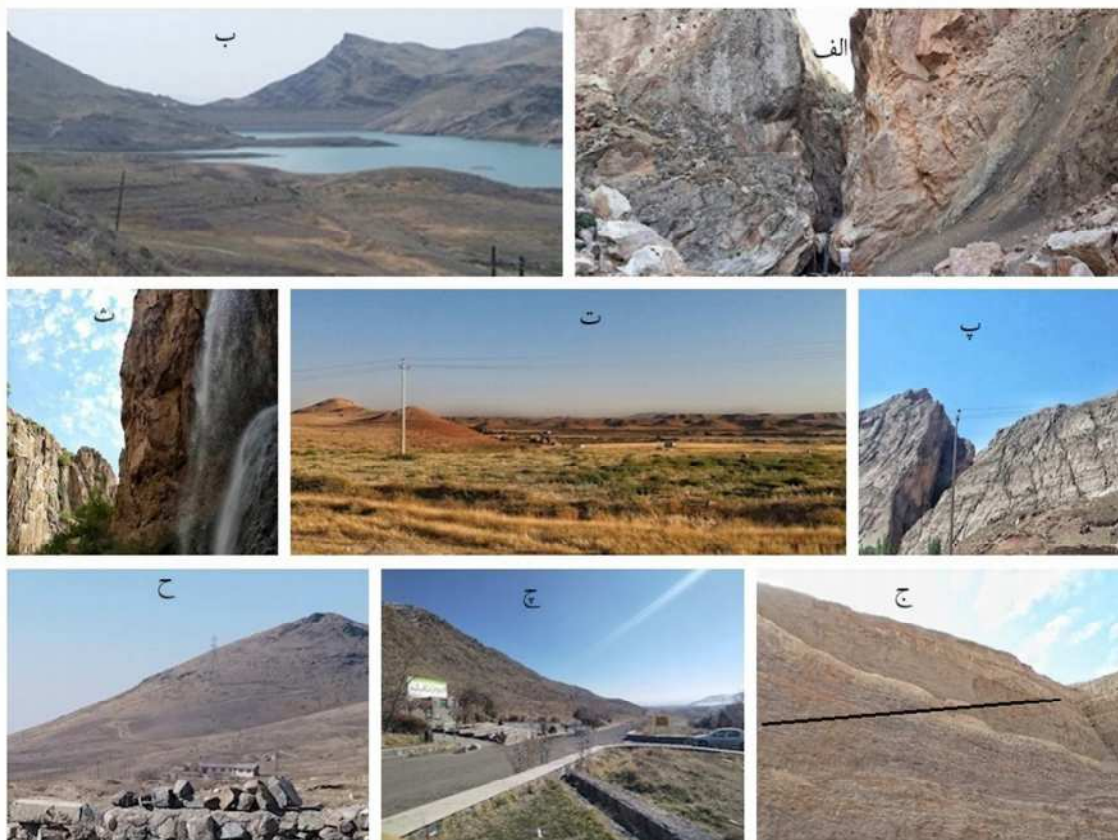
جدول ۳: پارامترهای آمار توصیفی شیب در زیرحوضه‌های منتخب زنجانرود و نوع سطوح ارضی در کل زنجانرود

پارامتر	زنجانرود	ارمغانخانه	سهرین	سارمساقلو	آرپاجای	کوهستان	مخروط افکنه	مارن	چمن
میانگین	۰/۱۴۸	۰/۳۷۳	۰/۳۲۹	۰/۲۱۲	۰/۲۱۴	۰/۲۷۶	۰/۰۸۳	۰/۰۷۷	۰/۰۶۸
انحراف معیار	۰/۰۲۵	۰/۲۹۲	۰/۱۲۲	۰/۱۷۸	۰/۱۹۳	۰/۱۹۹	۰/۰۵۵	۰/۰۵۹	۰/۰۴۸
میانه	۰/۰۸۸	۰/۲۴۷	۰/۱۲۸	۰/۱۵۴	۰/۱۷۷	۰/۲۱۹	۰/۰۷۱	۰/۰۶۱	۰/۰۵۷
دامنه تغییرات	۱/۰۷۵	۰/۸۸۸	۰/۶۲۳	۰/۷۲۲	۰/۶۴۱	۱/۰۷۵	۰/۲۹۴	۰/۴۳۶	۰/۲۳۸

بر اساس تحلیل آمار توصیفی شیب (جدول ۳): میانگین شیب در زیرحوضه ارمغانخانه (۰/۳۷۳) (بالاترین مقدار را در بین زیرحوضه‌ها را دارد)، میانگین شیب در زیرحوضه سارمساقلو (۰/۲۱۲) و آرپاجای (۰/۲۱۴) (نزدیک به میانگین کل حوضه است)، بیشترین انحراف معیار شیب در زیرحوضه ارمغانخانه (۰/۲۹۲) مشاهده شد و کمترین انحراف معیار شیب در زیرحوضه سهرین (۰/۱۲۲) ثبت شد. دامنه تغییرات شیب در ارمغانخانه (۰/۸۸۸) و کل حوضه زنجانرود (۱/۰۷۵) بالاست. دامنه تغییرات شیب در سهرین (۰/۶۲۳) پایین‌تر از سایر زیرحوضه‌ها است. میانه شیب در ارمغانخانه (۰/۲۴۷) بالاتر از سایر زیرحوضه‌ها است. میانگین شیب در کوهستان (۰/۲۷۶) بیشتر از سایر تیپ اراضی است. میانگین شیب در مخروط افکنه (۰/۰۸۳)، مارن (۰/۰۷۷) و چمن (۰/۰۶۸) پایین است. انحراف معیار شیب در کوهستان (۰/۱۹۹) و مارن (۰/۰۵۹) به ترتیب بیشتر و کمتر از سایر تیپ‌هاست.

شواهد میدانی نشان می‌دهد که:

- * در زیرحوضه آرپاجای، تنگ و آبشار آرپاجای در امتداد گسل سلطانیه قرار دارد (شکل ۴ الف).
- * در زیرحوضه سارمساقلو، خروجی سد تهم دارای دیواره‌های تند و منظم است (شکل ۴ ب).
- * ترکیبی از تکتونیک و همجواری رسوبات مقاوم و سست، اشکال بارز نفوتکتونیک را شکل داده است (شکل ۴ پ).
- * در زیرحوضه سهرین، ناتعادلی فرمیک در بخش عقب عکس مشاهده می‌شود (شکل ۴ ت).
- * آبشار البین در امتداد گسل فرعی شمالی زنجان قرار دارد (شکل ۴ ث).
- * جابه‌جایی و کج‌شدگی رسوبات کواترنری در امتداد گسل شمالی زنجان مشاهده شد (شکل ۴ ج).
- * مناطقی با شیب بین ۴۰ تا ۶۰ درصد در امتداد گسل شمالی زنجان وجود دارند (شکل ۴ چ، ح).



شکل ۴: شواهد میدانی از فعالیت نئوتکتونیک در حوضه زنجارود

الف) تنگ و آبشار آرپاجای در زیرحوضه آرپاجای، این ساختار خطی با شیب تند و آبشار دائمی نشانه‌ای از بالآمدگی نئوتکتونیک است که منجر به تشکیل پله ارتفاعی و اختلال در رژیم زهکشی شده است. موقعیت این ساختار در امتداد گسل سلطانی، حاکی از نقش فعالیت تکتونیک در شکل‌گیری آن است.

ب) خروجی سد تهم در زیرحوضه سارمساقلو، این دره با دیواره‌هایی با شیب تند، نشان‌دهنده تأثیر بالآمدگی تکتونیک است. شکل هندسی منظم و خطی این تنگ، همخوانی بالایی با جهت‌گیری گسل شمالی زنجان دارد و نشانه‌ای از کنترل ساختاری بر توپوگرافی است.

پ) تنگ و آبشار اندآباد، این لندفرم شامل یک پله ارتفاعی واضح و آبشار است که ناشی از اختلال در پایه فرسایش ناشی از جنبش گسلی است. وجود سنگ‌های مقاوم (آهکی) در این بخش، از تخریب سریع این ساختار جلوگیری کرده و آن را به شاهدی پایدار از فعالیت نئوتکتونیک تبدیل کرده است.

ت) ناتعادلی فرمیک در زیرحوضه سهرین، عدم تقارن در توپوگرافی، به‌ویژه در بخش عقب عکس، نشان‌دهنده ناتعادلی جانبی ناشی از فرسایش قهقراپی زنجارود بر اثر تغییر سطح اساس فزل‌اوزن است. این الگو، یکی از شاخص‌های کلاسیک فعالیت مورفوکلیماتیک در حوضه‌های آبریز است. ث) آبشار البین، این آبشار با ارتفاع قابل توجه، بر روی یک سطح شکست نئوتکتونیک تشکیل شده است. موقعیت آن در امتداد گسل فرعی شمالی زنجان و همپوشانی آن با مناطقی با شیب بیشتر از ۷۶ درصد، تأییدی بر منشأ تکتونیک این لندفرم است.

ج) تأثیر گسل شمالی زنجان بر رسوبات سطحی، این تصویر شواهدی از جابه‌جایی و کج‌شدگی رسوبات کواترنری را نشان می‌دهد که ناشی از حرکت افقی و عمودی گسل شمالی زنجان است. این ساختار، یکی از مهم‌ترین شواهد مستقیم از فعالیت اخیر گسلی در منطقه محسوب می‌شود.

چ، ح) مناطقی با شیب بین بیش از ۶۰ درصد در امتداد گسل شمالی زنجان، این شیب تند در واحدهای مقاوم (سنگ‌های سازند کرج)، نشان‌دهنده فعالیت تکتونیک شدید و بالآمدگی است. این منطقه با شیب نزدیک به آستانه ۰/۷۶۴، در محدوده انتقالی از تکتونیک قدیمی به نئوتکتونیک قرار دارد و نشانه‌ای از تحولات اخیر زمین‌ساختی است.

برای تمایز بین لندفرم‌های ناشی از فعالیت‌های نئوتکتونیک و آن‌هایی که بیشتر حاصل فرسایش قهقراپی یا تکتونیک قدیمی هستند، از چارچوبی چندمعیاره استفاده شد. این معیارها بر اساس شواهد توپوگرافیکی، زمین‌ساختی و مورفولوژیکی تعیین گردیدند (جدول ۴).

جدول ۴: معیارهای تشخیص منشأ لندفرم‌ها: تکتونیک در مقابل فرسایشی

معیار	لندفرم تکتونیک	لندفرم فرسایشی
موقعیت ساختاری	در امتداد گسل‌های فعال (مثل گسل سلطانیه و شمالی زنجان)	دور از گسل‌های شناخته شده فعال
شکل هندسی	خطی، متقارن، با لبه‌های تیز و ناهمواری ناگهانی	منحنی، نامتقارن، با ادامه طبیعی دره
شبکه زهکشی	اختلال در الگو (مثل انحراف رودخانه، آبشار، کنجی شدن)	شبکه منظم و بدون اختلال واضح
تفاوت ارتفاع و شیب	شیب‌های تند ($> ۶۲\%$) با تغییر ناگهانی ارتفاع	شیب‌های تدریجی و تغییرات آرام
سن سنگ‌ها	در امتداد واحدهای مقاوم (آندزیت، گرانیت)	در مناطق با سنگ‌های نرم (مارن، رسوبات کواترنری)
همپوشانی با شاخص‌های نئوتکتونیک	منطبق با مناطق با شیب $> ۷۶\%$ و بالای IAT	فاقد همپوشانی با شاخص‌های تکتونیک

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که توزیع شیب در حوضه زنجانرود الگویی ناهمگون و وابسته به موقعیت ساختاری و لیتولوژیکی دارد. اگرچه بیش از $۸۴/۶\%$ از سطح حوضه در محدوده شیب ۷ تا ۲۳ درصد قرار دارد که نشان‌دهنده شرایط عمومی مورفوتکتونیک ضعیف تا متوسط است؛ اما وجود مناطق بسیار محدود ($۰/۰۵\%$) با شیب بیش از ۷۶ درصد، به‌ویژه در امتداد گسل‌های سلطانیه و شمالی زنجان، نشانه‌ای از فعالیت نئوتکتونیک شدید محلی است.

انتخاب نسبت $۰/۷۶۴$ ($۰/۷۶$) به‌عنوان آستانه تغییر وضعیت از تکتونیک قدیمی به نئوتکتونیک، بر اساس همخوانی بالای این مرز با:

* تراکم آبشارها و تنگه‌ها

* موقعیت ساختاری در امتداد گسل‌های فعال

* مقاومت سنگ‌های تشکیل‌دهنده (آندزیت، گرانیت) توجیه می‌شود. این مرز، نه تنها یک تقسیم‌بندی عددی است، بلکه مرز انتقالی در توپوگرافی ناشی از تغییر نرخ بالآآمدگی تکتونیک محسوب می‌شود.

در زیرحوضه آراپاجای، شیب‌های بالاتر از $۰/۷۶۴$ در امتداد گسل سلطانیه مشاهده شدند. این گسل به‌عنوان یک گسل وارونه با مؤلفه امتدادلغز جانبی معکوس، با طول بیش از ۱۴۰ کیلومتر، نقش تعیین‌کننده‌ای در شکل‌گیری دیواره‌های گسلی و دره‌های عمیق داشته است. پهنه خردشدگی با پهنای ۳۹ تا ۴۹ متر در محل این گسل، همراه با دگرسانی عمیق، شواهدی از فعالیت‌های زمین‌ساختی چندمرحله‌ای را ارائه می‌دهد که از دوران مزوزوئیک تا کواترنری ادامه داشته است.

در مقابل، در زیرحوضه‌های ارمغانخانه، سهرین و سارمساقلو که در امتداد گسل شمالی زنجان قرار دارند، شیب‌های تند (بیشتر از $۰/۷۶$)، دره‌های عمیق و آبشارهای متعدد، نشانه‌هایی از حرکات عمودی اخیر هستند. این منطقه به‌عنوان یک هورست بین گسل شمالی زنجان و گسل قزل‌اوزن، تحت تأثیر بالآآمدگی نسبی قرار دارد که با شاخص‌های مورفوتکتونیک قبلی (مانند Smf و IAT) نیز تأیید شده است.

تحلیل آمار توصیفی شیب زیرحوضه‌ها نشان می‌دهد که:

* زیرحوضه ارمغانخانه با میانگین شیب $0/373$ و انحراف معیار $0/292$ بالاترین مقدار را در بین زیرحوضه‌ها دارد. این نشان‌دهنده فعالیت نئوتکتونیک شدید و ناهمگون داخلی است.

* زیرحوضه سهرین با میانگین $0/329$ و انحراف معیار $0/122$ ، الگوی یکنواخت‌تر و پایداری دارد که نشان‌دهنده فعالیت تکتونیک مستمر و همگن است.

* زیرحوضه‌های سارمساقلو ($0/212$) و آراچای ($0/214$)، با میانگین نزدیک به کل حوضه ($0/148$)، شباهت بیشتری به وضعیت عمومی حوضه دارند.

این تفاوت‌ها حاکی از آن است که زیرحوضه‌ها نه تنها تحت تأثیر حوضه اصلی هستند، بلکه واکنش مستقلى به فرآیندهای تکتونیک نشان می‌دهند. این استقلال، ناشی از ترکیبی از عوامل ساختاری، لیتولوژی و موقعیت نسبی درون حوضه است.

تحلیل تیپ اراضی نیز نشان می‌دهد که:

* کوهستان‌ها با میانگین شیب $0/276$ ، بیشترین واکنش را به فعالیت نئوتکتونیک نشان می‌دهند.

* مخروط‌افکنه ($0/083$)، مارن ($0/077$) و چمن ($0/068$)، با مقادیر پایین، ثبات توپوگرافیکی بیشتری دارند.

اما باید توجه داشت که مقاومت لیتولوژیکی نقش مهمی در این تفاوت‌ها دارد. سنگ‌های مقاوم (مانند آندزیت و گرانیت) در کوهستان‌ها، از فرسایش سریع جلوگیری کرده و اثرات تکتونیک را به وضوح حفظ می‌کنند. در مقابل، در مخروط‌افکنه و رسوبات نرم، فرسایش قهقراپی می‌تواند الگوهای شبیه به عوارض تکتونیک ایجاد کند که بدون تحلیل تلفیقی، به اشتباه تفسیر می‌شوند.

برای تمایز بین لندفرم‌های ناشی از نئوتکتونیک و فرسایش قهقراپی، از چارچوب چندمعیاره استفاده شد:

* لندفرم‌هایی با شکل خطی، تقارن، اختلال در شبکه زهکشی و موقعیت ساختاری روی گسل‌های فعال، به‌عنوان نشانه‌های تکتونیک تفسیر شدند.

* لندفرم‌هایی با شیب تند اما بدون ارتباط ساختاری واضح، به‌ویژه در مخروط‌افکنه، بیشتر به فرسایش قهقراپی ناشی از تغییر سطح اساس قزل اوزن نسبت داده شدند.

این تحلیل، تناقض ظاهری میان مطالعات قبلی (تأیید فعالیت تکتونیک توسط عباسی و رستم‌خانی در مقابل رد آن توسط زالی و یزدانفر) را حل می‌کند: تفاوت در نتیجه‌گیری، نه در علم، بلکه در واحد فضایی و نوع سنگ است.

استفاده از نسبت‌های طلایی فیبوناچی به‌عنوان یک چارچوب کمی و قابل تعمیم، مزایایی دارد:

* عدم وابستگی به شبکه زهکشی

* قابلیت تعمیم به مناطق مختلف

* شناسایی نقاط بحرانی غیرخطی در توپوگرافی

* سادگی محاسبه و دسترسی بالا

این روش، ضمن حفظ سادگی، می‌تواند به‌عنوان ابزاری مکمل یا جایگزین در مقایسه با شاخص‌های سنتی (VF، SL، AF) عمل کند.

رابطه مثبت بین میانگین شیب و انحراف معیار شیب در زیرحوضه‌ها (به‌ویژه در ارمغانخانه) نشان می‌دهد که مناطق با فعالیت تکتونیکی شدید، دارای ناهمگونی داخلی بالاتری هستند. در مقابل، زیرحوضه‌هایی با میانگین متوسط (مثل سهرین)، انحراف معیار کمتری دارند و نشان‌دهنده الگوی یکنواخت‌تری هستند.

در این پژوهش، ضمن بررسی مستقل پارامترهای آمار توصیفی، تحلیل روابط میان متغیرها نیز انجام شد. مشخص گردید که بین میانگین شیب و انحراف معیار شیب رابطه مثبت و معناداری وجود دارد. به‌طور خاص، زیرحوضه‌هایی با میانگین بالاتر شیب، مانند ارمغانخانه (۰/۳۷۳) دارای انحراف معیار بزرگ‌تری (۰/۲۹۲) نیز هستند که نشان‌دهنده ناهمگونی داخلی بالا و تغییرات شدید در توپوگرافی در این مناطق است. در مقابل، زیرحوضه‌هایی با میانگین متوسط شیب، مانند سهرین (۰/۳۲۹)، انحراف معیار کمتری (۰/۱۲۲) دارد و نشان‌دهنده الگوی یکنواخت‌تر و پایدارتری از فعالیت مورفوتکتونیکی هستند. همچنین، تحلیل مقایسه‌ای نشان داد که زیرحوضه‌های با شیب بالاتر (ارمغانخانه و سهرین) بیشتر در واحدهای کوهستانی با سنگ‌های مقاوم (آندزیت، گرانیت) قرار دارند، درحالی‌که قسمت‌های عمده‌ای از زیرحوضه‌های با شیب پایین‌تر (سارمساقلو و آریاچای) بیشتر در مناطق مخروط‌افکنه و رسوبات نرم واقع شده‌اند.

این همبستگی مکانی نشان می‌دهد که تفاوت در وضعیت مورفوتکتونیکی زیرحوضه‌ها تنها ناشی از عوامل تکتونیکی نیست، بلکه تحت تأثیر ترکیبی از ساختار زمین‌ساختی و مقاومت لیتولوژیکی است. بنابراین، واحدهای کوهستانی نه تنها دارای شیب بالاتری هستند، بلکه به‌دلیل مقاومت بیشتر سنگ‌ها، اثرات فعالیت‌های نئوتکتونیکی را به وضوح حفظ کرده‌اند. ارمغانخانه با بیشترین میانگین و انحراف معیار، نشان‌دهنده تفاوت‌های شدید داخلی و شرایط ناهمگون است، درحالی‌که سهرین با همگونی بیشتر و تغییرات کمتر، دارای الگوی پایدارتری از فعالیت تکتونیکی است. این تفاوت‌ها حاکی از آن است که زیرحوضه‌ها نه تنها تحت تأثیر حوضه اصلی قرار دارند، بلکه مستقل از آن نیز واکنش‌های متفاوتی به عوامل تکتونیکی نشان می‌دهند.

در نهایت، این مطالعه نشان می‌دهد که تحلیل تلفیقی داده‌های مکانی، لیتولوژی، ساختار و شیب می‌تواند به درک بهتر از تحولات نئوتکتونیکی منطقه کمک کند. البته، برای تأیید قطعی نقش تکتونیک در شکل‌گیری عوارض، نیاز به مطالعات صحرایی دقیق، تجزیه‌های ژئوفیزیکی و داده‌های سنگ‌شناسی عمیق‌تر است.

نتیجه‌گیری

نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که حوضه زنجانرود از نظر مورفوتکتونیکی دارای الگویی ناهمگون است که تحت تأثیر ترکیبی از عوامل ساختاری، لیتولوژیکی و فرسایشی شکل گرفته است. بیش از ۸۴/۶٪ از سطح حوضه در محدوده شیب ۷ تا ۲۳ درصد قرار دارد که نشان‌دهنده وضعیت عمومی مورفوتکتونیک ضعیف تا متوسط است. با این حال، مناطق بسیار محدودی با شیب بیش از ۷۶ درصد (بیشتر از ۰/۷۶۴) در امتداد گسل‌های سلطانی و شمالی زنجان شناسایی شدند که نشانه‌هایی از فعالیت نئوتکتونیکی شدید محلی هستند.

تحلیل آمار توصیفی زیرحوضه‌ها نشان داد که زیرحوضه‌های ارمغانخانه و سهرین با میانگین شیب بالاتر و انحراف معیار متفاوت، از الگوهای مورفوتکتونیکی شدید و ناهمگونی داخلی بالایی برخوردارند، درحالی‌که زیرحوضه‌های سارمساقلو و آریاچای با وضعیت تاحدودی پایدارتر، شباهت بیشتری به حالت عمومی حوضه دارند. این تفاوت‌ها

حاکمی از آن است که زیرحوضه‌ها نه تنها تحت تأثیر حوضه اصلی هستند، بلکه واکنش مستقلی به فرآیندهای تکتونیکی نشان می‌دهند.

تحلیل تیپ اراضی نیز نشان داد که کوهستان‌ها با میانگین شیب ۰/۲۷۶ بیشترین واکنش را به فعالیت نئوتکتونیکی داشته‌اند، درحالی‌که مخروط‌افکنه، مارن و چمن با مقادیر پایین شیب (کمتر از ۰/۱)، ثبات توپوگرافیکی بیشتری دارند. این تفاوت‌ها بیشتر ناشی از مقاومت لیتولوژیکی سنگ‌هاست: سنگ‌های مقاوم (آندزیت، گرانیت) اثرات تکتونیکی را به وضوح حفظ می‌کنند، درحالی‌که در رسوبات نرم، فرسایش قهقرایی می‌تواند عوارضی شبیه به تکتونیکی ایجاد کند.

این مطالعه با مقایسه یافته‌ها با مطالعات قبلی، تناقض ظاهری میان آن‌ها را حل می‌کند:

* عباسی (۱۳۹۵) و رستم‌خانی (۱۳۹۳) که فعالیت تکتونیکی را تأیید می‌کنند، در مناطق کوهستانی مقاوم تمرکز داشتند.

* زالی و یزدانفر (۲۰۲۰) که فعالیت تکتونیکی را رد می‌کنند، در مناطق آبرفتی و مخروط‌افکنه تحلیل کردند. بنابراین، تفاوت در نتیجه‌گیری، نه در علم، بلکه در واحد فضایی و فرآیند غالب است.

استفاده از نسبت‌های طولی فیبوناچی به‌عنوان یک چارچوب کمی و قابل‌تعمیم، اثربخشی این روش را در شناسایی نقاط بحرانی توپوگرافیکی نشان داد. این روش، ضمن سادگی و عدم وابستگی به شبکه زهکشی، می‌تواند به‌عنوان ابزاری مکمل در مطالعات مورفوتکتونیکی مورد استفاده قرار گیرد.

در نهایت، این پژوهش تأکید می‌کند که برای درک صحیح از تحولات نئوتکتونیکی، تحلیل تلفیقی داده‌های مکانی، لیتولوژی، ساختار و شیب ضروری است. همچنین، برای تأیید قطعی نقش تکتونیک در شکل‌گیری عوارض، نیاز به مطالعات صحرایی دقیق، تجزیه‌های ژئوفیزیکی و داده‌های سنگ‌شناسی عمیق‌تر است.

منابع

- بختیاری، فاطمه. (۱۳۹۴). بررسی آستانه‌های ژئومورفولوژیکی (مطالعه موردی: حوضه آبریز قزل‌اوزن)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، گروه جغرافیای دانشکده علوم ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه زنجان، ص ۱۵۳.
- ثبوتی، فرهاد؛ حسامی، خالد؛ قدس، رضا؛ طبسی، هادی؛ عسگری، روح اله. (۱۳۸۷). لرزه‌خیزی و گسلش فعال در زنجان و مناطق مجاور، سیزدهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران، صص: ۱۸۷-۱۸۹.
- جعفری، غلامحسین؛ رستم‌خانی اصغر. (۱۳۹۵). شواهد ژئومورفولوژیکی گسل‌های ارمغانخانه و تهم تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی. ۱۶ (۴۳)، صص: ۱۷۲-۱۴۹ <http://jgs.khu.ac.ir/article-1-2716-fa.html>
- جعفری، غلامحسین؛ بختیاری، فاطمه. (۱۳۹۵). بررسی هیدرو-ژئوتونیک حوضه آبی قزل‌اوزن. مجله جغرافیا و توسعه، ۱۴(۴۵)، صص: ۲۲۱-۲۴۲. doi: 10.22111/gdij.2016.2930
- رستم‌خانی، اصغر. (۱۳۹۳). پایش ساختار ژئوکلیماتیک مخروط‌افکنه‌های بستر قزل‌اوزن، پایان‌نامه گروه جغرافیای دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه زنجان، ص: ۱۲۶.
- شافعی، علیرضا؛ عبادتی، ناصر؛ نعیمی، امیر. (۱۳۸۷). بررسی شرایط زمین‌ساختی، رسوبی منطقه ویر، جنوب شرق سلطانیه، چهارمین همایش زمین‌شناسی و محیط زیست، اسلامشهر، صص: ۱-۱۳. <https://civilica.com/doc/58542>
- عباسی، مهدی. (۱۳۹۴). پایش ژئومورفولوژیکی پادگانه‌های آبرفتی رودخانه‌های ایران مطالعه موردی: رودخانه قزل‌اوزن، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، گروه جغرافیای دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه زنجان، ص: ۱۴۱.

- علایی طالقانی، محمود. (۱۳۸۸). ژئومورفولوژی ایران. نشر قومس ص: ۴۰۴.
- الیاسی، محسن؛ محجل، محمد؛ مصباحی، فاطمه. (۱۳۸۷). تحلیل تنش دیرین در رسوب‌های پلیوسن - کواترنری شمال باختر زنجان، مجله فیزیک زمین و فضا، دوره ۳۴، شماره ۲، صص: ۲۷-۴۲. [20.1001.1.2538371.1387.34.2.3.5](https://doi.org/10.1001.1.2538371.1387.34.2.3.5)
- Allen, M., Jackson, J., & Walker, R. (2004). Late Cenozoic reorganization of the Arabia-Eurasia collision and the comparison of short-term and long-term deformation rates. *Tectonics*, 23(2). <https://doi.org/10.1029/2003TC001530>
- Babatunde, S., & Abiola, O. (2024). *The Golden Ratio and Fibonacci sequence in Nature*.
- Berberian, F., & Berberian, M. J. (1981). *Tectono-plutonic episodes in Iran. Zagros Hindu Kush Himalaya Geodynamic Evolution*, 3, 5-32. <https://doi.org/10.1139/e81-019>
- Doornkamp, J. C. (1986). Geomorphological approaches to the study of neotectonics. *Journal of the Geological Society*, 143(2), 335-342. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.143.2.0335>
- El Hamdouni, R., Irigaray, C., Fernandez, T., Chacón, J., & Keller, E. A. (2008). Assessment of relative active tectonics, southwest border of the Sierra Nevada (southern Spain). *Geomorphology*, 96(1-2), 150-173.
- Ghosh, S., & Sivakumar, R. (2018). Assessment of morphometric parameters for the development of the Relative Active Tectonic Index and its significance for seismic hazard study: an integrated geoinformatic approach. *Environmental Earth Sciences*, 77(17), 600.
- Gopinath, G., Nalukudiparambil, J., Bhadrar, A., Girishbai, D., & Pillai, S. U. (2022). Geomorphological analysis of tropical river basins in southern Kerala using hypsometric indices and neotectonic proxies. *Journal of Earth System Science*, 131(4), 246.
- Gutiérrez, A. A. (2023). *Morphotectonic Processes in Seismic Zones of Moderate Intensity*, Argentina.
- Hancock, P. L., & Williams, G. D. (1986). Neotectonics. *Journal of the Geological Society*, 143(2), 325-326. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.143.2.0323>
- Kalman, D., & Mena, R. (2003). The Fibonacci numbers—exposed. *Mathematics magazine* 76(3), 167-181. <https://doi.org/10.1080/0025570X.2003.11953176>
- Kirby, E., & Whipple, K. X. (2012). Expression of active tectonics in erosional landscapes. *Journal of Structural Geology*, 44, 54-75.
- Kothyari, G. C., & Rastogi, B. K. (2013). Tectonic control on drainage network evolution in the Upper Narmada Valley: implications to neotectonics. *Geography Journal*, 2013(1), 325808.
- Mahala, A. (2020). The significance of morphometric analysis to understand the hydrological and morphological characteristics in two different morpho-climatic settings. *Applied Water Science*, 10(1), 1-16. <https://doi.org/10.1007/s13201-019-1118-2>
- Miccadei, E., Carabella, C., & Paglia, G. (2021). Morphoneotectonics of the Abruzzo Periadriatic area (central Italy): Morphometric analysis and morphological evidence of tectonic features. *Geosciences*, 11(9), 397. <https://doi.org/10.3390/geosciences11090397>
- Peitgen, H. O., Jürgens, H., Saupe, D., & Feigenbaum, M. J. (2004). *Chaos and fractals: new frontiers of science* (Vol. 106, pp. 560-604). New York: Springer.
- Różycka, M., Janciewicz, K., Migoń, P., & Szymanowski, M. (2021). Tectonic versus rock-controlled mountain fronts—Geomorphometric and geostatistical approach (Sowie Mts., Central Europe). *Geomorphology*, 373, 107485.
- Sharma, V. (2009). Deterministic chaos and fractal complexity in the dynamics of cardiovascular behavior: perspectives on a new frontier. *The Open Cardiovascular Medicine Journal*, 3, 110. <https://doi.org/10.2174/1874192400903010110>
- Solaimani Azad, S., Dominguez, S., Philip, H., Hessami, K., Forutan, M. R., Zadeh, M. S., & Ritz, J. F. (2011). The Zandjan fault system: Morphological and tectonic evidence of a new active fault network in the NW of Iran. *Tectonophysics*, 506(1-4), 73-85. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2011.04.012>
- Turcotte, D. L. (1997). *Fractals and chaos in geology and geophysics*. Cambridge University Press.
- Zali, Z., & Yazdanfar, A. (2020). *Evaluation of Active Tectonics of the Sohrein Fault Zone Using Morphometry and Geomagnetic Survey Evaluation of Active Tectonics of the Sohrein Fault Zone Using Morphometry and Geomagnetic Survey*. May 2015, 0-8.
- Zali, Z., Shabanian, E., Sobouti, F., & Yazdanfar, A. (2015). *Evaluation of Active Tectonics of the Sohrein Fault Zone Using Morphometry and Geomagnetic Survey*. 7th International Conference on Seismology and Earthquake Engineering, Tehran. <https://civilica.com/doc/1132552>.

Biodiversity, History, and Ecological Risks of Iranian Artemia (with Emphasis on Urmia Lake Artemia)

Fereidun Mohebbi^{1*} , Alireza Asem²

1. Corresponding Author, Assistant Professor, Department of Forest and Rangeland, Research and Agriculture Education Center of West Azarbaijan, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Urmia, Iran

Email: f.mohebbi@areeo.ac.ir **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-0677-6857>

2. Assistant professor, College of Fisheries and Life Science, Hainan Tropical Ocean University, Sanya 572022, China

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article Article history: Received: 05 October 2025 Revised: 16 December 2025 Accepted: 28 December 2025 Published: 22 December 2026 Keywords: Artemia urmiana, Artemia franciscana, parthenogenic Artemia, invasive species, regional red list.	Lake Urmia, the largest natural habitat of Artemia in Iran, is on the verge of extinction. About 125 years ago, British biologist Robert Günther named the Lake Urmia brine shrimp under the species Artemia urmiana. According to the latest checklist, there are 59 locations across Iran where Artemia has been scientifically recorded or reported. This study aims to review the ecological hazards of Artemia in Iran, with an emphasis on Lake Urmia brine shrimp. The research methodology is based on studies conducted by the authors of the article and searches in the most important search systems on the Internet. Based on the findings of this study, as the water level of Lake Urmia continued to decline over the past two decades, the egg density decreased from 339 eggs per liter in 1994 to less than 1 egg per liter between 2007 and 2011 and 0.012 eggs per liter in October 2014, and no adult nauplii or Artemia were observed in the lake. Accordingly, in the latest Artemia checklist in 2024, it was suggested that the species Artemia urmiana should be listed as a “Critically Endangered” species in the “Regional Red List” of Iran. The results of the study show that all natural Artemia habitats, especially Lake Urmia, are in critical ecological conditions. On the other hand, the lack of studies on hermaphrodite Artemia and the presence of the invasive Artemia Franciscana as a non-native species from North America in these habitats have complicated the data related to Artemia biodiversity in Iran. The lack of new data and the heterogeneity of the methodology for assessing Artemia populations, especially in Lake Urmia, have made accurate analysis of biodiversity data challenging. Overall, it is necessary to fundamentally revise the management of water resources in these habitats.
How to Cite: Mohebbi, F. and Asem, A. (2026). Biodiversity, History, and Ecological Risks of Iranian Artemia (with Emphasis on Urmia Lake Artemia). <i>Journal of Natural Environmental Hazards</i>, 15 (50), 111-132.	
	© The Author/Authors Publisher: University of Sistan and Baluchestan DOI: 10.22111/jneh.2025.53441.2140

EXTENDED ABSTRACT

INTRODUCTION

The small crustacean brine shrimp of the genus *Artemia* Leach, 1819, are mainly adapted to live in highly saline environments, including saline or alkaline lakes, salt production ponds, coastal wetlands, and brackish river margins. *Artemia* has nine species with populations of endemic regional distribution, which is consistent with the principles of “island biogeography.” One species is found in the Mediterranean region, five in Asia, and three in the Americas. *Artemia franciscana* has been introduced to Africa, Australia, and Eurasia by human intervention through aquaculture and salt production activities. The genus *Artemia* also includes monogamous specimens distinguished by different ploidy levels (di-, tri-, tetra-, and penta-ploidy). Despite the economic importance of *Artemia* in aquaculture, which has stimulated laboratory research, its commercial value has limited field studies. This trend continues, and the contribution of field studies to the taxonomy, ecology, and biodiversity of this genus remains negligible. Given the pivotal role of *Artemia* as live food in aquaculture, it is essential to continuously and systematically assess its stocks and deepen our understanding of its species diversity. Here, we present a comprehensive review of historical documents dating back to the 10th century and contemporary scientific literature.

DATA AND METHODOLOGY

The findings indicate that *Artemia* has been recorded or reported in 59 locations (natural habitats and farms) across Iran, where *Artemia* has been recorded or reported (Fig. 1). This represents a significant increase from the 23 locations reported in the last checklist in 2016.

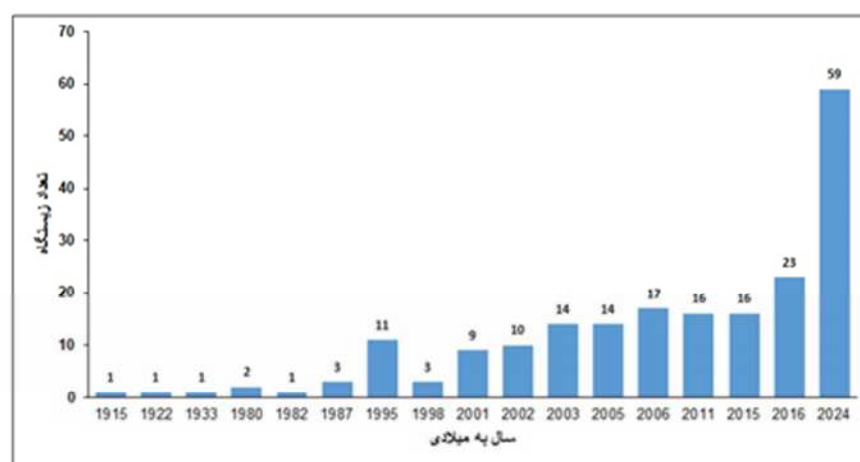


Figure 1: Number of recorded *Artemia* habitats in Iran based on global and regional checklists

(Global checklists: Abouni, 1915; Artum, 1922; Stella, 1933; Persone and Sorgelos, 1980; Brown and McDonald, 1982; Vanhake et al., 1987; Triantaphylidis et al., 1998; Van Stoppen, 2002)(Regional checklists: Nouri, 1995; Agh et al., 2001; Hafezieh, 2003; Jafari and Vatandoost 2005, Abatzopoulos et al., 2006; Jafari and Astani, 2011; Hafezieh et al., 2015; Agh, 2016; Asem et al., 2024)

Lake Urmia Habitat of *Artemia urmiana*

Lake Urmia is the largest natural habitat of *Artemia urmiana*, known as the only native bisexual species of *Artemia* in Iran. Over the past 20 years, Lake Urmia has experienced a significant decline in water level, primarily attributed to a combination of environmental disturbances and human activities. The Iranian geographer Abu Ishaq Estakhri recorded the first scientific record of *Artemia* from the lake between 930 and 933. About a thousand years later, the British biologist Robert Gunter named the *Artemia* species of Lake Urmia *Artemia urmiana*. However, as the water level continued to decline

and Lake Urmia dried up over the past two decades, *Artemia* stocks have also declined. The egg density has dropped from 339 eggs per liter in 1995 to less than 1 egg per liter between 2008 and 2012, and 0.012 eggs per liter in September 2024, and no adult Neapolitan or *Artemia* species have been observed in the lake since. According to the latest NASA image taken on September 16, 2025, Lake Urmia (Fig. 2), once the largest inland lake in Iran and the 20th largest lake in the world, has completely dried up. Accordingly, in the latest *Artemia* checklist in 2024, it was suggested that *Artemia urmiana* should be listed as a “Critically Endangered” species on the “Regional Red List” of Iran. Given the environmental hazards and successive droughts that threaten *Artemia* habitats worldwide, as well as the small number of *Artemia* species, the importance of this study becomes even more apparent.

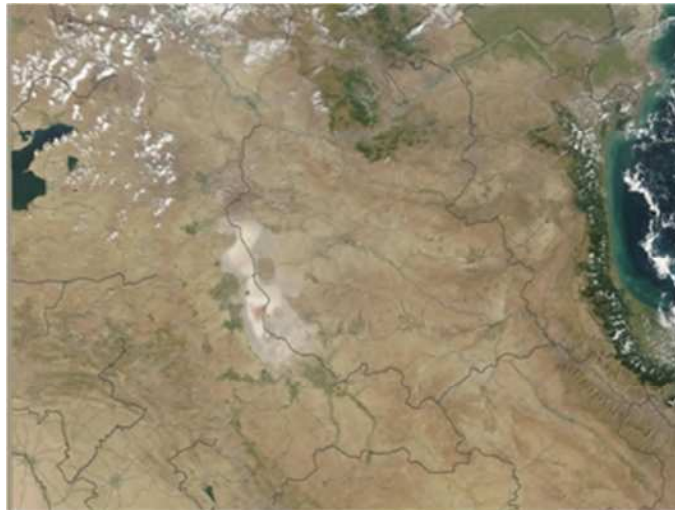


Figure 2: NASA image of Lake Urmia on September 7, 2025.

RESULTS AND DISCUSSION

Asexual forms of *Artemia* cannot be classified as members of a single taxon. Eimanifer et al. (2014) cautiously used the term “Eurasian haplotype complex” for this group of species. The title “parthenogenetic *Artemia* lineages” was proposed for those groups of *Artemia* that reproduce exclusively by asexual means.

Invasive *Artemia franciscana*

The introduction and proliferation of the non-native species *Artemia franciscana* on all continents since the late 1970s has posed a significant threat to native species. The first report of the presence of the non-native species *Artemia franciscana* in Iran was in 2006 from Lake Noq. In the latest checklist in 2024, the presence of *Artemia franciscana* was reported in 12 habitats, three of which include the natural lakes of Maharloo, Tashk, and Bakhtegan, which are the natural habitats of *Artemia*. The significant increase in habitats occupied by this non-native species over the past 20 years is a serious threat to the biodiversity of natural habitats in Iran. Therefore, continuous monitoring of *Artemia* habitats should be included in conservation management strategies, and at the same time, the development of the aquaculture industry and the preservation of native *Artemia* biodiversity should be prioritized.

Human encroachment and occupation have led to the destruction of *Artemia* habitats in many parts of the country. In addition, climate change has caused Lake Bazengan in North Khorasan Province to transform from a brackish to a hypersaline environment, which now hosts *Artemia*. The origin of *Artemia* in Lake Bazengan is still unknown; however, owing to the lack of human intervention in

introducing *Artemia* to the lake, the presence of parthenogenetic *Artemia* seems more likely to have been introduced by migratory waterfowl or wind from nearby areas. The high competitiveness of *Artemia franciscana* has caused it to outcompete native *Artemia* species in the habitats it occupies and become the dominant species in these habitats. Preliminary studies indicate that native parthenogenetic *Artemia* lineages in Iran have a higher production potential than native *Artemia urmiana* and non-native *Artemia franciscana*. Considering these findings, priority should be given to using native parthenogenetic *Artemia* in aquaculture to preserve *Artemia* biodiversity.

CONCLUSION

The lack of new biodiversity data and the methodological heterogeneity of *Artemia* population assessments conducted to date in natural habitats, especially in Lake Urmia, have made biodiversity data analysis challenging. Therefore, it is essential to adopt a specific protocol in accordance with standard methods for the continuous data collection and analysis.

ETHICAL CONSIDERATIONS

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

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

REFERENCES

References [in Persian]

- Hafezieh, M. (2003). *Artemia*, Brine Shrimp. Iranian Fisheries Science Research Institute Press, Tehran, 214 pages. [In Persian]
- Hafezieh, M; Sharifian, Mansour; Hosseinpour, Homeira. (2015). Cysts and nauplius biometrical comparison of Iranian *Artemia*. *Journal of Aquaculture Development*, 9, 11–24. [In Persian]
- Jafari, A.; Vatandoost, S. (2005). Geographical distribution of *Artemia*. Congress of Marine Science and Technology, 22 December 2005, Tehran: Iran. [In Persian]
- Jafari, M, Astani, S. (2011). Studying and investigating the different usages of *Artemia* and its distribution in the country. The first national conference on economic resolutions in the field of Agriculture and Natural Resources, 15 December 2011, Qom, Iran. [In Persian]
- Keramati, E; Armon, F; Khatami, S. Y. (2016). Beauty at the edge of the development, the encounterment of Ardabil City and the Shorabil Lake. *Manzar*, 37, 30–37. [In Persian]
- Sabak Ara, J; Makaremi, M. (2011). Surveying the density and distribution of plankton and their role in Shorabil (Ardabil) Lake. *Journal of Biology Science*, 5, 31–46. [In Persian]
- Noori, F. (1996). Study the morphology, reproduction, and life cycle of *Artemia urmiana* of Urmia Lake. Urmia University, 60 pages. [In Persian]

References [in English]

- Asem, A., Yang, C., Eimanifar, A., Hontoria, F., Varó, I., Mahmoudi, F., Fu, C., Shen, C., Rastegar-Pouyani, N., Wang, P., Li, W., Yao, L., Meng, X., Dan, Y., Rogers, C. & Gajardo, G. (2023). Phylogenetic analysis of problematic Asian species of *Artemia* Leach, 1819 (Crustacea: Anostraca), with the descriptions of two new species. *Journal of Crustacean Biology*, 43, 1–25. <http://doi.org/10.1093/icbiol/ruad002>
- Asem, A.; Eimanifar, A.; Wink, M. (2024a). Species diversity and distribution of *Artemia* (Crustacea, Anostraca) in Iran: Historical contexts and updated review. *Zoodiversity*, 58, 269–298.
- Asem, A., Gajardo, G., Hontoria, F., Yang, C., Shen, C., Rastegar-Pouyani, N., Padhye, S. M. & Sorgeloos, P. (2024 b). The species problem in *Artemia* Leach, 1819 (Crustacea: Anostraca), a genus with sexual species and obligate parthenogenetic lineages. *Zoological Journal of the Linnean Society*, zlad192. <http://doi.org/10.1093/zoolinnean/zlad192>
- Collins, N. C. (1977). Ecological studies of terminal lakes-their relevance to problems in limnology and population biology. In: Greer, D. C., ed. *Desertic Terminal Lakes*. Utah Water Resources Laboratory, Utah, 411–420.
- Rogers, D. C. (2015). A conceptual model for anostracan biogeography. *Journal of Crustacean Biology*, 35, 686–99. <http://doi.org/10.1163/1937240X-00002369>
- Eimanifar, A., Van Stappen, G., Marden, B. & Wink, M. (2014). *Artemia* biodiversity in Asia with the focus on the phylogeography of the introduced American species *Artemia franciscana* Kellogg, 1906. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 79, 392–403. <http://doi.org/10.1016/j.ympev.2014.06.027>.

مجله علمی پژوهشی مخاطرات محیط طبیعی، دوره ۱۵، شماره ۵۰، شماره پیاپی ۰۴، دی ۱۴۰۵

تاریخچه تنوع زیستی و مخاطرات بوم شناختی آرتمیای ایران (با تاکید بر آرتمیای دریاچه ارومیه)

فریدون محبی^{۱*}، علیرضا عاصم^۲

۱. استادیار پژوهشی، بخش جنگل و مرتع، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی آذربایجان غربی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج

کشاورزی، ارومیه، ایران (نویسنده مسئول)

ایمیل: f.mohebbi@areeo.ac.ir ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0677-6857>

۲. استادیار، کالج شیلات و علوم زیستی، دانشگاه اقیانوس شناسی هانین، سن یا ۵۷۲۰۲۲، چین

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۱۳ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۹/۲۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۰۷ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۱۰/۰۱ واژه‌های کلیدی: <i>Artemia urmiana</i> <i>Artemia franciscana</i> آرتمیای بکرزا، گونه مهاجم، فهرست قرمز منطقه‌ای.	دریاچه ارومیه، بزرگ‌ترین زیستگاه طبیعی آرتمیا در ایران در شرف نابودی است. حدود ۱۲۵ سال پیش، رابرت گانتز زیست‌شناس بریتانیایی، آرتمیای دریاچه ارومیه را تحت گونه <i>Artemia urmiana</i> نام-گذاری کرد. طبق آخرین چک لیست، ۵۹ مکان در سراسر ایران وجود دارد که آرتمیا در آنها به‌طور علمی ثبت یا گزارش شده است. هدف از این مطالعه، مروری بر مخاطرات بوم‌شناختی آرتمیا در ایران و بررسی تاریخچه این مخاطرات با تاکید بر آرتمیای دریاچه ارومیه می‌باشد. روش پژوهش بر پایه مطالعات انجام‌شده توسط نویسندگان مقاله و جستجو در مهم‌ترین سامانه‌های جستجوی منابع در اینترنت استوار می‌باشد. بر پایه یافته‌های این مطالعه، با ادامه کاهش سطح آب دریاچه ارومیه طی دو دهه گذشته، تراکم تخم از ۳۳۹ تخم در لیتر در سال ۱۳۷۳، به کمتر از ۱ تخم در لیتر بین سال‌های ۱۳۸۶ تا ۱۳۹۰ و ۰/۰۱۲ تخم بر لیتر در مهر ماه ۱۴۰۳ کاهش یافته و هیچ‌گونه ناپلی یا آرتمیای بالغ در دریاچه مشاهده نشده است. بر همین اساس در آخرین چک لیست آرتمیا در سال ۲۰۲۴ میلادی، پیشنهاد شد که گونه <i>Artemia urmiana</i> می‌بایستی به‌عنوان یک گونه «به‌شدت در معرض خطر» (<i>Critically Endangered</i>) در «فهرست قرمز منطقه‌ای» ایران قرار گیرد. نتایج پژوهش نشان می‌دهد که تمام زیستگاه‌های طبیعی آرتمیا به‌ویژه دریاچه ارومیه از نظر اکولوژیکی در شرایط بحرانی قرار دارند. از طرف دیگر، کمبود مطالعه درباره آرتمیای بکرزا و وجود <i>Artemia Franciscana</i> مهاجم به‌عنوان یک گونه غیربومی از آمریکای شمالی در این زیستگاه‌ها، داده‌های مربوط به تنوع زیستی آرتمیا در ایران را پیچیده‌تر کرده است. فقدان داده‌های جدید و ناهمگونی روش‌شناسی ارزیابی جمعیت آرتمیا به‌ویژه در دریاچه ارومیه، تجزیه و تحلیل دقیق داده‌های تنوع زیستی را چالش‌برانگیز کرده است. در کل، لازم است در شیوه مدیریت منابع آب در این زیستگاه‌ها بازنگری اساسی صورت گیرد.
استناد: محبی، فریدون و عاصم، علیرضا. (۱۴۰۵). تاریخچه تنوع زیستی و مخاطرات بوم شناختی آرتمیای ایران (با تاکید بر آرتمیای دریاچه ارومیه). <i>مخاطرات محیط طبیعی</i>، ۱۵ (۵۰)، ۱۱۱-۱۳۲.	
ناشر: دانشگاه سیستان و بلوچستان	
© نویسنده/ نویسندگان	
DOI: 10.22111/jneh.2025.53441.2140	

مقدمه

جنس *Artemia* Leach, 1819 (راسته Anostraca، خانواده Artemiidae)، شامل سخت‌پوستان شاخصی است که در زیستگاه‌های فوق شور در سراسر جهان پراکنش دارند. این جنس دارای ویژگی‌های ریخت‌شناختی و زیستی منحصربه‌فردی همچون فقدان کاراپاس، حضور ۱۱ جفت پای شناگر برگ‌پا، توانایی تحمل دامنه‌های بسیار بالای شوری با قابلیت تولید تخم مقاوم است. آرتمیا به دلیل مقاومت بالا در برابر شرایط محیطی سخت، نقش کلیدی در ساختار جوامع زیستی تالاب‌های شور داشته و از نظر اقتصادی نیز به عنوان منبع مهم غذای زنده در صنعت آبزی پروری اهمیت فراوانی دارد. اهمیت اقتصادی آرتمیا و به تبع آن تلاش برای پرورش آن در زیستگاه‌های غیربومی، ضرورت انجام بررسی‌های دقیق زیست‌جغرافیایی و بوم‌شناختی را دوچندان می‌سازد (گاجاردو و بیردمور، 2012).

آرتمیا، دارای نه گونه با جمعیت‌هایی با پراکندگی بومی-منطقه ای است (عاصم^۱ و همکاران، 2023) که با اصول «جغرافیای زیستی جزیره‌ای» (راجرز^۲، 2015؛ عاصم^۳ و همکاران 2024 الف) همسو است و شامل:

یک گونه در منطقه مدیترانه:

Artemia salina (Linnaeus, 1758)

پنج گونه در آسیا:

Artemia urmiana Günther, 1899 (ایران)

Artemia sinica Cai, 1989 (چین و مغولستان)

Artemia tibetiana Abatzopoulos, Zhang & Sorgeloos, 1998 (فلات تبت)

Artemia sorgeloosi Asem, Eimanifar, Hontoria, Rogers & Gajardo, 2023 (فلات تبت)

Artemia amati Asem, Eimanifar, Hontoria, Rogers & Gajardo, 2023 (فلات تبت)

و سه گونه در آمریکاست:

Artemia monica Verrill, 1869 (اندمیک در دریاچه مونو واقع ایالت کالیفرنیا)

Artemia franciscana Kellogg, 1909 (دارای پراکندگی گسترده سراسر قاره آمریکا)

Artemia persimilis Piccinelli & Prosdocimi, 1968 (شیلی و آرژانتین)

آرتمیا فرانسیسکانا از طریق فعالیت‌های آبزی پروری و تولید نمک به آفریقا، استرالیا و اوراسیا معرفی شده است (عاصم^۴ و همکاران، 2018؛ هوروات^۵ و همکاران، 2018؛ ساجی^۶ و همکاران، 2019؛ شن^۷ و همکاران، 2021؛ عاصم^۸ و همکاران، 2021؛ وو^۹ و همکاران، 2022).

جنس آرتمیا شامل نمونه‌های بکرزا اجباری است که در آن ماده‌ها بدون نیاز به جنس نر، زادآوری می‌کنند. نمونه‌های بکرزا در آرتمیا با سطوح پلوئیدی متفاوت (دی، تری، تترا و پنتاپلوئیدی) متمایز می‌شوند. باریگوزی^{۱۰} (1974)

1 - Asem et al

2 - Rogers

3 - Asem et al

4 - Asem et al

5 - Horváth et al

6 - Saji et al

7 - Shen et al

8 - Asem et al

9 - Wu et al

10 - Barigozzi

اشکال آرتمیا که دارای تولید مثل غیرجنسی بودند را به‌عنوان "A. parthenogenetica" توصیف کرد. عاصم^۱ و همکاران (۲۰۲۴ ب) نتیجه‌گیری کردند با توجه به شیوه بکرزایی اجباری در نمونه‌های بکرزا، عنوان "A. parthenogenetica" نامگذاری غیر معتبر است که با مفهوم گونه زیستی ارنست مایر همخوانی ندارد. همچنین با توجه به اینکه لفظ «جمعیت» در بیوسیسستماتیک مدرن و ژنتیک جمعیت اشاره به افرادی با قابلیت تولید مثل جنسی دارد (مایر، ۱۹۷۰)، استفاده از عنوان «جمعیت» برای گروه‌های بکرزای آرتمیا که تولید مثل غیر جنسی دارند جایز نمی‌باشد. از این‌رو، پیشنهاد شد که نمونه‌های بکرزا تحت عنوان "دودمان (های) بکرزای آرتمیا" خوانده شوند (عاصم و همکاران، ۲۰۲۴ ب).

علی‌رغم اهمیت اقتصادی آرتمیا در آبی‌پروری که تحقیقات علمی آزمایشگاهی را برانگیخته است، ارزش تجاری آن، سبب گردید تا مطالعات، بیشتر بر روی تحقیقات آزمایشگاهی برای معرفی بهترین گونه‌ها با پتانسیل تولید مثلی بالا به منظور بهره‌برداری اقتصادی در صنعت آبی‌پروری متمرکز شود. از این‌رو، تحقیقات میدانی و بوم‌شناختی بر روی گونه‌ها و جمعیت‌های آرتمیا کمتر مورد توجه واقع شده است (کولینز^۲، ۱۹۷۷). این روند همچنان ادامه دارد و سهم مطالعات میدانی در طبقه‌بندی، بوم‌شناسی و تنوع زیستی آرتمیا ناچیز است.

با وجود اهمیت اکولوژیکی و اقتصادی آرتمیا در ایران، به‌ویژه آرتمیای دریاچه ارومیه، شکاف پژوهشی قابل‌توجهی در حوزه مطالعات میدانی، پایش مداوم و ارزیابی ذخایر این موجود در زیستگاه‌های طبیعی مشاهده می‌شود. بیشتر تحقیقات انجام‌شده بر روی جنبه‌های آزمایشگاهی و پرورشی آرتمیا متمرکز بوده و داده‌های جامع و به‌روزی درباره وضعیت جمعیتی، تنوع ژنتیکی و روند تغییرات اکولوژیکی آرتمیا در زیستگاه‌های طبیعی ایران وجود ندارد. همچنین، روش‌شناسی ناهمگون در ارزیابی ذخایر (به‌ویژه در مورد آرتمیای دریاچه ارومیه) (محبی، ۱۴۰۰؛ محبی و همکاران، ۱۴۰۰ الف؛ محبی و همکاران، ۱۴۰۰ ب؛ محبی و همکاران، ۱۴۰۱)، فقدان برنامه‌های پایش منظم و کمبود مطالعات در مورد دودمان‌های بکرزای بومی و تأثیرات گونه مهاجم *Artemia franciscana*، تحلیل دقیق وضعیت تنوع زیستی آرتمیا در ایران را با چالش مواجه کرده است. این خلأ اطلاعاتی، تدوین راهبردهای حفاظتی مؤثر و مدیریت پایدار ذخایر آرتمیا را دشوار ساخته است. در این مقاله، هدف نخست آن است که با اتکا به چک‌لیست‌های جهانی و منطقه‌ای، برآوردی تاریخی-بوم‌شناختی از وضعیت آرتمیای بومی ایران به‌ویژه آرتمیا اورمیا در دریاچه ارومیه-ارائه شود. در نهایت، وضعیت گونه غیربومی آرتمیا فرانسیسکانا در ایران نیز مورد بررسی و تحلیل قرار خواهد گرفت.

روش‌شناسی

پایگاه داده‌ی مقالات مرتبط با تنوع زیستی آرتمیا در ایران تا تاریخ خرداد ۱۴۰۴ با استفاده از اطلاعات چهار گروه منبع اصلی گردآوری شده است:

(۱) جستجوی مقالات منتشرشده به زبان انگلیسی در نشریات بین‌المللی که در پایگاه داده‌ی الکترونیکی "گوگل محقق" (www.scholar.google.com) نمایه شده‌اند.

1 - Asem et al

2 - Collins

- (۲) جستجوی مقالات منتشرشده به زبان فارسی در نشریات و کنفرانس های داخلی که در پایگاه های داده ای الکترونیکی "مرکز اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی" (www.sid.ir)، "بانک اطلاعات نشریات کشور" (www.magiran.com) و "پایگاه سیویلیکا" (www.civilica.com) نمایه شده اند.
- (۳) جستجوی پایان نامه های تحصیلی دانشگاه های ایران و گزارش طرح های سازمان های اجرایی-پژوهشی کشور در پایگاه داده ای الکترونیکی "وبسایت پژوهشکده علوم و فناوری اطلاعات ایران" (www.irandoc.ac.ir) نمایه شده اند.
- (۴) جستجوهای در "سایت گوگل" (www.google.com) جهت تهیه فهرست کتاب شناختی مقالات منتشرشده به زبان انگلیسی و فارسی که در پایگاه های داده ای الکترونیکی نمایه شده اند.

تاریخچه مطالعات تنوع زیستی آرتمیا در ایران

با توجه به نقش محوری آرتمیا به عنوان غذای زنده در آبی پروری، ارزیابی پیوسته و سیستمیک ذخایر آن و تعمیق درک ما از تنوع گونه ای آن ضروری است. چنین تلاش هایی برای مدیریت مؤثر بهره برداری تجاری از آرتمیا و ترویج فعالیت های آبی پروری پایدار ضروری است. در اینجا ما مروری جامع بر اسناد تاریخی مربوط به قرن دهم میلادی و مقالات علمی معاصر ارائه می دهیم.

ایران با خشکسالی های طولانی مدت در مناطق مرکزی و شمالی و گسترش سریع آبی پروری در سواحل جنوبی که تأثیر معنا داری بر تولید تجاری، تنوع زیستی و توزیع آرتمیا دارد، به عنوان یک مطالعه موردی آموزنده عمل می کند. از سال ۱۹۱۵ تا ۲۰۲۴ میلادی، ۱۷ چک لیست شامل هشت فهرست جهانی (آبونی^۱، ۱۹۱۵؛ آرتوم^۲، ۱۹۲۲؛ استلا^۳، ۱۹۳۳؛ پرسونه و سورگلوس^۴، ۱۹۸۰؛ براون و مک دونالد^۵، ۱۹۸۲؛ ونهاکه^۶ و همکاران، ۱۹۸۷؛ تریانتافیلیدیس^۷ و همکاران، ۱۹۹۸؛ ون استاپن^۸، ۲۰۰۲) و نه مطالعه منطقه ای (نوری، ۱۳۷۵؛ آق و همکاران، ۲۰۰۱؛ حافظیه، ۱۳۸۱؛ جعفری و وطن دوست ۱۳۸۴، آباتزوپولوس^۹ و همکاران، ۲۰۰۶؛ جعفری و آستانی، ۱۳۹۰؛ حافظیه و همکاران، ۱۳۹۴؛ آق^{۱۰}، ۲۰۱۶؛ عاصم^{۱۱} و همکاران ۲۰۲۴ج) بر تنوع زیستی آرتمیای ایران تمرکز داشته است. شکل ۱، شامل اطلاعات مربوط به سال های گزارش تنوع زیستی آرتمیا در ایران که تعداد زیستگاه ها معرفی شده می باشد. یافته ها نشان می دهد که ۵۹ مکان (زیستگاه های طبیعی و مزارع پرورشی) در سراسر ایران وجود دارد که آرتمیا در آنها ثبت و یا گزارش شده است (عاصم^{۱۲} و همکاران، ۲۰۲۴ج). این آمار افزایش قابل توجهی نسبت به ۲۳ مکان گزارش شده در آخرین چک لیست ارائه شده در سال ۲۰۱۶ را نشان می دهد.

1 - Abonyi

2 - Artom

3 - Stella

4 - Persoone & Sorgeloos

5 - Browne & McDonald

6 - Vanhaecke et al

7 - Triantaphyllidis et al

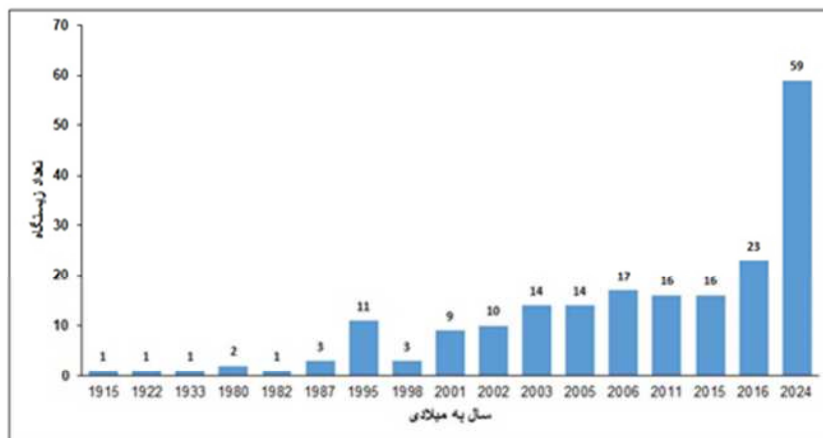
8 - Van Stappen et al

9 - Abatzopoulos

10 - Agh

11 - Asem et al

12 - Asem et al



شکل ۱: تعداد زیستگاه‌های ثبت‌شده آرتمیا در ایران بر اساس چک لیست‌های جهانی و منطقه‌ای (چک لیست‌های جهانی: آبونی، ۱۹۱۵؛ آرتوم، ۱۹۲۲؛ استلا، ۱۹۳۳؛ پرسونه و سورگلوس، ۱۹۸۰؛ براون و مک دونالد، ۱۹۸۲؛ ونهاکه و همکاران، ۱۹۸۷؛ ترانتافیلیدیس و همکاران، ۱۹۹۸؛ ون استاپن، ۲۰۰۲) (چک لیست‌های منطقه‌ای: نوری، ۱۹۹۵؛ آق و همکاران، ۲۰۰۱؛ حافظیه، ۲۰۰۳؛ جعفری و وطن‌دوست، ۲۰۰۵؛ آباتزوپولوس و همکاران، ۲۰۰۶؛ جعفری و آستانی، ۲۰۱۱؛ حافظیه و همکاران، ۲۰۱۵؛ آق، ۲۰۱۶؛ عاصم و همکاران، ۲۰۲۴ ج)

دریاچه ارومیه زیستگاه آرتمیا اورمیا

دریاچه ارومیه، زیستگاه طبیعی آرتمیا اورمیا، به‌عنوان تنها گونه بومی دوجنسی آرتمیا در ایران شناخته می‌شود. دریاچه ارومیه (شرق شهر ارومیه، استان آذربایجان غربی) پیش از این به‌عنوان بیستمین دریاچه بزرگ جهان با مساحتی بین ۴۷۵۰ تا ۶۱۰۰ کیلومتر مربع رتبه‌بندی شده بود (ایمانی‌فر و محبی^۱، ۲۰۰۷)، هرچند اکنون با چالش زیست‌محیطی دست‌به‌گریبان است. ویژگی‌های متنوع زیستی و بوم‌شناسی این دریاچه منجر به گنجاندن آن در کنوانسیون رامسر در سال ۱۹۷۵ میلادی (<https://rsis Ramsar.org>) شد و سپس در سال ۱۹۷۶ میلادی توسط یونسکو به‌عنوان یکی از ۵۹ ذخیره‌گاه زیست‌کره جهان تعیین شد (عاصم^۲ و همکاران، ۲۰۱۴، ۲۰۱۶ الف). با این حال، در طول بیست سال گذشته، دریاچه ارومیه کاهش قابل توجهی در سطح آب خود را تجربه کرده است که در درجه اول به مجموعه‌ای از اختلالات زیست‌محیطی و فعالیت‌های انسانی نسبت داده می‌شود (کریمی^۳ و همکاران، ۲۰۱۶؛ گلابیان^۴، ۲۰۱۱؛ عاصم و همکاران، ۲۰۱۲؛ وورتسبا^۵ و همکاران، ۲۰۱۷؛ سیم^۶ و همکاران، ۲۰۲۱). پس از سال ۱۳۸۵، افزایش قابل توجهی در شوری دریاچه مشاهده شده است تا جایی که به شوری اشباع تا ۳۰۰ g/L رسیده است (عاصم و همکاران، ۲۰۱۹). دریاچه در بین سال‌های ۱۳۷۳ تا ۱۳۹۱ شاهد از دست دادن نزدیک به ۶۰ درصد از مساحت سطح و بیش از ۹۰ درصد از حجم خود بود (شولز^۷ و همکاران، ۲۰۲۰).

آرتمیا اورمیا به‌عنوان تنها ماکروژئوپلانکتون بومی دریاچه ارومیه، نقشی بنیادین در ساختار و پویایی بوم‌سازگان و زنجیره غذایی این دریاچه ایفا می‌کند. این گونه منبع اصلی تغذیه پرندگان آبی مهاجر، به‌ویژه فلاینگوها، به‌شمار می‌رود و تداوم جمعیت این پرندگان وابستگی شدیدی به فراوانی و چرخه فصلی آن دارد. همچنین، آرتمیا اورمیا با

1 - Eimanifar & Mohebbi

2 - Asem et al

3 - Karimi et al

4 - Golabian et al

5 - Wurtsbaugh et al

6 - Sima et al

7 - Schulz et al

کنترل زیست‌توده فیتوپلانکتون‌ها و باکتری‌ها و مشارکت در چرخه مواد غذایی، نقشی کلیدی در حفظ تعادل اکولوژیکی دریاچه بر عهده دارد. از این‌رو، هرگونه تغییر در جمعیت آن می‌تواند پیامدهای گسترده‌ای بر شبکه غذایی و پایداری بوم‌سازگان دریاچه ارومیه برجای گذارد (محبی و همکاران، ۱۴۰۱). همزمان، چندین ارزیابی ذخایر، نوساناتی را در جمعیت آرتمیا اورمیاننا نشان داده‌اند، به‌طوری‌که تراکم تخم از ۳۳۹ تخم در لیتر در سال ۱۳۷۳، به کمتر از ۱ تخم در لیتر بین سال‌های ۱۳۸۶ تا ۱۳۹۰ و سپس افزایش به ۴/۶ تخم در لیتر در طول سال‌های ۱۳۹۶ تا ۱۳۹۸ رسیده است (عاصم^۱ و همکاران، ۲۰۱۲؛ محبی^۲ و همکاران، ۱۴۰۱). این بحران زیست‌محیطی باعث کاهش شدید تولید سالانه تخم آرتمیا شده است و از حداقل ۴۲۴۳ تن وزن خشک (در نیم متر بلایی آب) در سال ۱۳۷۳ (سورگلووس^۳، ۱۹۹۷) به تقریباً ۵۵ تن وزن خشک (در کل حجم دریاچه) در سال ۱۳۹۶ کاهش یافته است (محبی^۴ و همکاران، ۱۴۰۱). قبل از خشکسالی، کل تخم آرتمیا که بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۲ برداشت شده بود، حدود ۲۰۴۰۰۰ تن (وزن تر) تخمین زده می‌شد (محبی^۵ و همکاران، ۱۴۰۱).

اولین سند علمی در مورد آرتمیا، به نیمه اول قرن دهم میلادی برمی‌گردد که جغرافیدان ایرانی، ابواسحاق استخری، وجود آرتمیا در دریاچه ارومیه را گزارش کرده است. استخری در کتاب خود، «المسالک و الممالک» (که با عنوان «راه‌ها و کشورها» نیز شناخته می‌شود)، از آرتمیا به‌عنوان «سگ آبی» یاد کرده است. این نسخه خطی بین سال‌های ۹۳۰ تا ۹۳۳ میلادی (قرن دهم میلادی) نوشته شده است (عاصم و ایمانی‌فر^۶، ۲۰۱۶).

پس از روایت استخری، یک جغرافیدان ناشناس ایرانی در نسخه خطی «حدود العالم من المشرق الی المغرب» (ترجمه‌شده با عنوان «محدوده‌های جهان از شرق تا غرب» و همچنین معروف به «مناطق جهان: یک جغرافیای فارسی») در سال ۹۸۲ میلادی (قرن دهم میلادی) به آرتمیا اشاره می‌کند. این نسخه خطی، آرتمیا را به‌عنوان «کرم» توصیف کرده که قادر به زنده ماندن در آب‌های شور دریاچه ارومیه است (عاصم^۷، ۲۰۰۸). بعدها در سال ۱۲۷۵ میلادی، یکی دیگر از جغرافیدانان ایرانی به نام زکریای قزوینی «سگ آبی» را به‌عنوان تنها موجود زنده دریاچه ارومیه در اثر خود «آثار البلدان و اخبار العباد» (همچنین به‌عنوان «یادگارهای سرزمین و تاریخ مردم» شناخته می‌شود) (عاصم و ایمانی‌فر، ۲۰۱۶؛ عاصم و همکاران ۲۰۲۴ ج) گزارش داده است که اشاره به آرتمیا دارد.

علاوه بر این، در سال ۱۸۷۷ میلادی، محمد اعتمادالسلطنه، سیاستمدار ایرانی، حضور آرتمیا را در دریاچه ارومیه مستند کرد و آن را به‌عنوان یک «حیوان نباتی الشكل» در کتاب خود «مرآت البلدان» (یا «آینه شهرها») توصیف نمود (عاصم و همکاران ۲۰۲۴ ج). در روایت بعدی جورج کرزن، دیپلمات بریتانیایی، در کتاب خود در سال ۱۸۹۲ میلادی با عنوان «ایران و مسئله ایران»، از آرتمیای دریاچه ارومیه به‌عنوان گونه‌ای شبیه به «عروس دریایی» نام برده است (کرزن^۸، ۱۸۹۲؛ اسکلاتر^۹، ۱۸۹۳). این مجموعه از روایت‌های تاریخی، شناخت و اهمیت دیرینه آرتمیا در مطالعات اکولوژیکی دریاچه ارومیه و مناطق اطراف آن را تأیید می‌کند.

1 - Asem et al

2 - Mohebbi et al

3 - Sorgeloos

4 - Mohebbi et al

5 - Mohebbi et al

6 - Asem & Eimanifar

7 - Asem

8 - Curzon

9 - Sclater

در اواخر قرن نوزدهم میلادی، رابرت گانتز، جانورشناس بریتانیایی، از کمیته انجمن سلطنتی بریتانیا کمک هزینه تحقیقاتی برای مطالعه جانوران و گیاهان دریاچه ارومیه دریافت کرد (گانتز و مانلی^۱، ۱۸۹۹). او در مراحل اولیه تحقیقات خود، با همکاری پدرش آلبرت گانتز که سمت «مسئول جانورشناسی» در موزه بریتانیا در لندن را بر عهده داشت، گونه آرتمیا در دریاچه ارومیه را در ابتدا به عنوان «مدوسا» و سپس گونه‌ای از «برانچیپوس» معرفی کردند (گانتز^۲، ۱۸۹۸ الف) و بعداً در «گروه آرتمیا از گونه‌های برنچیپوس» طبقه‌بندی نمودند (گانتز^۳، ۱۸۹۸ ب). با این حال، تحقیقات بعدی رابرت گانتز را به این نتیجه رساند که نمونه‌های مشاهده شده در دریاچه ارومیه در واقع متعلق به جنس آرتمیا هستند (گانتز، ۱۸۹۹ الف). سرانجام در سال ۱۸۹۹ میلادی، گانتز آرتمیا اورمیا را از دریاچه ارومیه توصیف و به دنیای علم معرفی کرد (گانتز، ۱۸۹۹ ب).

نکته قابل توجه این است که در مورد نامگذاری آرتمیا اورمیا سردرگمی‌هایی وجود داشته است. در برخی منابع، نام علمی آرتمیا اورمیا به اشتباه به کلارک و بوون^۴ (۱۹۷۶) ارجاع داده شده است، این درحالیست که کلارک و بوون تنها عنوان «میگوهای دریاچه ارومیه» را بدون اشاره به نام علمی آن به کار برده‌اند. علاوه بر این، در مقالات متعدد تاریخ نامگذاری آرتمیا اورمیا توسط گانتز تحت سال‌های مختلف (۱۸۹۰، ۱۸۹۹ و ۱۹۰۰) بیان شده است، اما بعداً تاریخ صحیح توصیف این گونه سال ۱۸۹۹ میلادی بیان شده است (عاصم و راجرز^۵، ۲۰۱۲).

در تعداد قابل توجهی از مطالعات انجام شده از اوایل دهه ۱۹۵۰ تا اواخر دهه ۱۹۸۰، آرتمیا اورمیا به اشتباه به عنوان «*Artemia salina*» گزارش شده است (به عنوان مثال، پلاتنر^۶، ۱۹۵۵؛ لافلر^۷، ۱۹۵۶، ۱۹۵۹، ۱۹۶۱؛ مک‌کارا^۸، ۱۹۷۲). نام آرتمیا سالینا به نادرست برای گونه‌ها و جمعیت‌های مختلف، صرف نظر از وضعیت طبقه‌بندی آنها، به کار رفته است (آبرو-گروبو یس و بیردمور^۹، ۱۹۸۲؛ گاجاردو^{۱۰} و همکاران، ۲۰۰۲؛ عاصم^{۱۱} و همکاران، ۲۰۱۰ الف). این مشکل در مطالعات معاصر، به ویژه آنهایی که از آرتمیا به عنوان مدل در مطالعات سم‌شناسی استفاده می‌کنند، تکرار شده است که برای تمام گونه‌ها و جمعیت‌های استفاده شده در تحقیقات سم‌شناسی عنوان آرتمیا سالینا به کار رفته است.

در سال ۱۹۸۷ میلادی، یک سوال اساسی در مورد وضعیت طبقه‌بندی آرتمیای دریاچه ارومیه توسط باریگوزی^{۱۲} و همکاران (۱۹۸۷) مطرح شد که آیا آرتمیای دریاچه گونه *Artemia urmiana* است یا دودمان‌های بکرزا هستند. مطالعه آنها بر روی روش‌های تولیدمثل تقریباً ۵۰۰ فرد در یک محیط آزمایشگاهی متمرکز بود و منحصراً دودمان‌های بکرزا را شناسایی کردند. آنها از طریق تهیه کاربوتایپ و بررسی ۲۴ ناپلی برای تعیین تعداد کروموزوم‌ها، سه دودمان بکرزای متمایز را تشخیص دادند: دیپلوئید (۱۵ نمونه)، تتراپلوئید (۱ نمونه) و پنتاپلوئید (۸ نمونه). آنها پیشنهاد کردند که هم آرتمیای بکرزا و هم آرتمیای دوجنسی ممکن است در دریاچه ارومیه وجود داشته باشند؛ اما

1 - Günther & Manley

2 - Günther

3 - Günther

4 - Clark & Bowen

5 - Asem & Rogers

6 - Plattner

7 - Löffler

8 - McCarraher

9 - Abreu-Grobois & Beardmore

10 - Gajardo et al

11 - Asem et al

12 - Barigozzi et al

به دلیل تمایز اکولوژیکی، در مکان‌های جداگانه‌ای قرار دارند. علاوه بر این، آنها نتیجه گرفتند که بعید به نظر می‌رسد که مشاهده آنها نتیجه جایگزینی آرتمیای بکرزا با انقراض آرتمیا اورمیانا باشد (باریگوزی و همکاران، ۱۹۸۷). همزمان با این یافته‌ها، آذری تاکامی^۱ (۱۹۸۹) مشاهده آرتمیای جنسی و بکرزا را در دریاچه ارومیه گزارش کرد که نشان‌دهنده همزیستی آرتمیای جنسی آرتمیا اورمیانا و آرتمیای بکرزا در یک زیستگاه است (همچنین مراجعه کنید به باریگوزی و بارتلی^۲، ۱۹۸۹؛ براون و بوون^۳، ۱۹۹۱). احمدی^۴ و همکاران (۱۹۹۰) با تکیه بر نمونه‌های جمع‌آوری‌شده در سال ۱۹۸۷، همزیستی آرتمیا اورمیانا و آرتمیای بکرزا را در امتداد خط ساحلی غربی دریاچه مستند کردند.

در مطالعه‌ای در سال ۲۰۰۵ میلادی، آق^۵ و همکاران (۲۰۰۷) گزارش دادند، درحالی‌که فقط آرتمیای بکرزا در سه تالاب اطراف مشاهده شد، آرتمیا اورمیانا و آرتمیای بکرزا به صورت همزیست در دریاچه ارومیه همزمان حضور داشتند که آرتمیا اورمیانا جمعیت غالب بوده است. علاوه بر این، عاصم^۶ و همکاران (۲۰۰۹) مشاهده کردند که آرتمیای بکرزا از دریاچه ارومیه و یک تالاب مجاور در منطقه رشکان از نظر مورفولوژیکی در دو زیرگروه مجزا قرار گرفتند. نسل‌های بعدی آرتمیای بکرزا جدا شده از دریاچه ارومیه در آزمایشگاه، حضور نرهای نادری را تایید کرد که نشان‌دهنده یک دودمان دیپلوئید است (عاصم^۷ و همکاران، ۲۰۱۰ ب؛ برای اطلاعات بیشتر به سلیم و همکاران، ۲۰۱۹ مراجعه کنید).

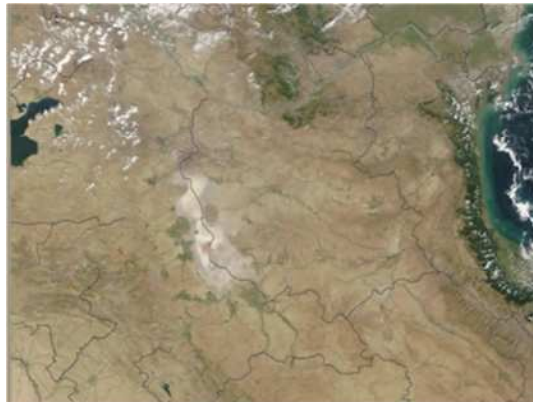
بر اساس آخرین آمار در ۱۱ مردادماه ۱۴۰۴، تراز دریاچه ۱۲۶۹/۷۴ متر، وسعت آن ۵۸۱ کیلومتر و حجم آب آن نیم میلیارد مترمکعب است، این درحالی است که یک سال قبل از آن در ۱۱ مردادماه سال ۱۴۰۳، حجم آب دریاچه چهار برابر یعنی ۲ میلیارد مترمکعب بوده است.

در حال حاضر آب دریاچه ارومیه آنقدر پایین آمده که تراز آن «غیرقابل اعلام» می‌باشد.

طبق بررسی‌های به عمل آمده و آخرین نمونه‌برداری‌ها در ۲۵ مهر ماه ۱۴۰۳، هیچگونه ناپلی یا آرتمیای بالغ در دریاچه مشاهده نشده و تراکم تخم آرتمیا در دریاچه به ۰/۰۱۲ عدد بر لیتر کاهش یافته است (محبی، ۱۴۰۳). همچنین در آخرین ارزیابی ذخایر، تعداد ناپلی و آرتمیای بالغ از دریاچه ارومیه در مرداد ماه ۱۴۰۳ به ترتیب با تراکم ۰/۰۰۱ و ۰/۰۰۱ عدد بر لیتر گزارش شده است.

بر اساس جدیدترین تصویر ناسا از دریاچه ارومیه (شکل ۲)، بزرگ‌ترین دریاچه داخلی ایران به طور کامل خشک شده و دیگر اثری از یک دریاچه در تصویر هوایی دیده نمی‌شود (<https://www.faraz.ir/fa/news/101252>). البته این وضعیت مطابق با هشدارهای پیشین سازمان حفاظت محیط‌زیست درباره‌ی خشک شدن کامل دریاچه تا پایان تابستان است، چرا که در ابتدای تابستان نیز مدیران کل محیط زیست درباره خشکی کامل و ۱۰۰ درصدی دریاچه ارومیه تا پایان تابستان هشدار داده بودند.

1 - Azari Takami
2 - Barigozzi & Bartelli
3 - Browne & Bowen
4 - Ahmadi et al
5 - Agh et al
6 - Asem et al
7 - Asem et al



شکل ۲: تصویر ناسا از دریاچه ارومیه در تاریخ 16/6/2025.

بر همین اساس، عاصم^۱ و همکاران (2024 ج) پیشنهاد دادند که گونه آرتمیا اورمیا می‌بایستی به‌عنوان یک گونه «به‌شدت در معرض خطر» (Critically Endangered) در «فهرست قرمز منطقه‌ای» ایران قرار گیرد.

نکته مهم در خصوص مخاطرات بوم‌شناختی گونه‌های آرتمیا این است که گونه‌هایی مانند آرتمیا مونیکا و آرتمیا آماتی به‌عنوان «گونه‌های در معرض تهدید» طبقه‌بندی شده‌اند که به ترتیب در وضعیت «وابسته به حفاظت» (CD) و «منقرض‌شده در طبیعت» (EW) قرار دارند (عاصم و همکاران، 2023). چندین زیستگاه آرتمیا نیز با تخریب مواجه شده‌اند که نمونه‌هایی از آنها عبارتند از لیمینگتون در بریتانیا و کاپودیستریا در اسلوونی (ونهاکه^۲ و همکاران، 1987). این موضوع با توجه به تعداد گونه محدود آرتمیا نسبت به سایر گونه‌های آبشش، پایان اهمیت شناخت مخاطرات و عوامل تهدید کننده تنوع زیستی آرتمیا در سطح جهانی و منطقه‌ای را برجسته‌تر می‌کند.

بر همین اساس عاصم^۳ و همکاران (2024 ج) پیشنهاد دادند که گونه آرتمیا اورمیا می‌بایستی به‌عنوان یک گونه «به‌شدت در معرض خطر» (Critically Endangered) در «فهرست قرمز منطقه‌ای» ایران قرار گیرد.

نکته مهم در خصوص مخاطرات بوم‌شناختی گونه‌های آرتمیا این است که گونه‌هایی مانند آرتمیا مونیکا و آرتمیا آماتی به‌عنوان «گونه‌های در معرض تهدید» طبقه‌بندی شده‌اند که به ترتیب در وضعیت «وابسته به حفاظت» (CD) و «منقرض‌شده در طبیعت» (EW) قرار دارند (عاصم و همکاران، 2023). چندین زیستگاه آرتمیا نیز با تخریب مواجه شده‌اند که نمونه‌هایی از آنها عبارتند از لیمینگتون در بریتانیا و کاپودیستریا در اسلوونی (ونهاکه^۴ و همکاران، 1987). این موضوع با توجه به تعداد گونه محدود آرتمیا نسبت به سایر گونه‌های آبشش، پایان اهمیت شناخت مخاطرات و عوامل تهدید کننده تنوع زیستی آرتمیا در سطح جهانی و منطقه‌ای را برجسته‌تر می‌کند.

دودمان‌های آرتمیای بکرزا

علی‌رغم اینکه دلایل بیولوژیکی پیدایش آرتمیای بکرزا هنوز کاملاً مشخص نشده است، روابط تکاملی آن به‌طور گسترده مورد بررسی قرار گرفته است (عاصم و همکاران، 2024 ب). برخلاف طبقه‌بندی آن به‌عنوان یک گروه تک

1 - Asem et al

2 - Vanhaecke et al

3 - Asem et al

4 - Vanhaecke et al

نیایی، بر اساس نشانگرهای ژنومی هسته‌ای (نوگوه^۱ و همکاران، ۲۰۱۵؛ عاصم و همکاران، ۲۰۱۶ ب؛ روده^۲ و همکاران، ۲۰۲۲)، تجزیه و تحلیل نشانگرهای ژنومی میتوکندری، آرتمیای بکرزا را به عنوان یک گروه چندنیایی (مانیاتیسی^۳ و همکاران، ۲۰۱۱؛ عاصم^۴ و همکاران، ۲۰۱۶ ب؛ عاصم و همکاران، ۲۰۲۵ الف) نشان می‌دهد. در نتیجه، اشکال غیرجنسی آرتمیا را نمی‌توان به عنوان اعضای یک تاکسون واحد طبقه‌بندی کرد. ایمانی‌فر^۵ و همکاران (۲۰۱۴) با احتیاط از اصطلاح «مجموعه هاپلوتیپ اوراسیایی» برای این گروه استفاده کردند. عاصم و همکاران (۲۰۲۴ ب) عنوان «دودمان‌های آرتمیای بکرزا» را برای آن دسته از گروه‌های آرتمیا که منحصراً از طریق روش‌های غیرجنسی تولیدمثل می‌کنند، پیشنهاد کردند. متأسفانه به غیر از مطالعات محدود در مورد تبارهای آرتمیای بکرزا در دریاچه ارومیه و تالاب‌های اطراف آن هیچ مطالعه‌ای در مورد درجه پلوئیدی آنها انجام نگرفته است. این درحالی است که به استثنای دریاچه ارومیه، سایر زیست‌بوم‌های طبیعی ایران، زیستگاه آرتمیاهای بکرزا هستند و از طرفی بخش قابل-توجهی از این زیست‌بوم‌ها توسط گونه غیر بومی آرتمیا فرانسیسکانا اشغال شده است که تنوع زیستی بکرزاهای بومی ایران را پیش از آنکه مستنداتی در خصوص درجه پلوئیدی آنها وجود داشته باشد، می‌تواند موجب کاهش تنوع ژنتیکی یا حذف دودمان‌های بومی شود. چنین مطالعاتی برای افزایش بینش‌های فیلوجغرافیایی و حمایت از تلاش‌های نظارت بر تنوع زیستی در جنس آرتمیا بسیار مهم هستند.

گونه مهاجم آرتمیا فرانسیسکانا

از دهه ۱۹۷۰ میلادی، معرفی و تکثیر آرتمیا فرانسیسکانا غیر بومی در سراسر اوراسیا، آفریقا و استرالیا برای اهداف آبی‌پروری تهدیدهای قابل توجهی برای تنوع زیستی جمعیت‌های بومی آرتمیا ایجاد کرده‌اند (جنگ^۶ و همکاران، ۲۰۰۴؛ آمات^۷ و همکاران، ۲۰۰۵؛ هونتوریا^۸ و همکاران، ۲۰۲۱؛ ایمانی‌فر و همکاران، ۲۰۲۰؛ اسکالون و رابت^۹، ۲۰۱۳؛ عاصم و همکاران، ۲۰۱۸؛ هوروات^{۱۰} و همکاران، ۲۰۱۸؛ ساجی^{۱۱} و همکاران، ۲۰۱۹؛ شن^{۱۲} و همکاران، ۲۰۲۱؛ عاصم و همکاران، ۲۰۲۱؛ وو^{۱۳} و همکاران، ۲۰۲۲).

در سال ۲۰۰۶ میلادی اولین حضور گونه غیر بومی آرتمیا فرانسیسکانا در ایران از دریاچه نوق گزارش شد (آبازتوپولوس^{۱۴} و همکاران، ۲۰۰۶). در چک لیست سال ۲۰۱۶ میلادی، تعداد زیستگاه‌هایی که توسط آرتمیا فرانسیسکانا اشغال شده بود، به ۷ زیست‌بوم افزایش یافت (آق^{۱۵}، ۲۰۱۶). در آخرین چک لیست در سال ۲۰۲۴ میلادی حضور آرتمیا فرانسیسکانا از ۱۲ زیستگاه گزارش گردید که ۳ زیست‌بوم از آنها شامل دریاچه‌های طبیعی مهارلو، تشک و بختگان است که زیستگاه طبیعی آرتمیای بکرزا هستند. افزایش قابل توجه زیستگاه‌های اشغال شده

1 - Nougé et al

2 - Rode et al

3 - Maniatsi et al

4 - Asem et al

5 - Eimanifar et al

6 - Zheng et al

7 - Amat et al

8 - Hontoria et al

9 - Scalone, & Rabet

10 - Horváth et al

11 - Saji et al

12 - Shen

13 - Wu et al

14 - Abatzopoulos et al

15 - Agh

توسط این گونه غیر بومی در طی بیست سال گذشته، زنگ خطری جدی از تهدید تنوع زیستی زیستگاه‌های طبیعی ایران است.

وجود یک چک لیست به‌روزشده، برای تدوین برنامه‌های کارآمد و موثر در حفاظت از تنوع زیستی بسیار مهم است (فرانکهام^۱ و همکاران، ۲۰۰۲؛ ماکه^۲ و همکاران، ۲۰۰۶؛ عاصم و همکاران، ۲۰۲۳). در نتیجه، پایش مستمر زیستگاه‌های *Artemia* باید در چارچوب استراتژی‌های حفاظت تنوع زیستی ادغام شود تا تعادل میان توسعه آبی‌پروری و حفاظت از گونه‌های بومی برقرار گردد.

نتایج و بحث

در مطالعه انجام‌شده توسط عاصم و همکاران (۲۰۲۴ ج)، ۵۹ منطقه به‌عنوان زیستگاه آرتمیا در سراسر ایران شناسایی و گزارش شد که شامل پنج منطقه با وضعیت نامشخص (آق‌گل، برکه‌ی آق‌قلا، علی‌آباد، مسیله، رودخانه ایاق-شعار) می‌شود. نکته‌ی قابل‌توجه این است که دریاچه‌ی شورابیل در استان اردبیل به‌دلیل انتقال آب رودخانه «بالیکلو چای» در سال ۱۳۷۴ و بعدها هدایت بخشی از آب دریاچه سد «یامچی» در سال ۱۳۸۲، از شرایط شور به آب شیرین تغییر یافت (سبک آرا و مکارمی، ۱۳۹۰؛ کرامتی و همکاران، ۱۳۹۵) که این موضوع سبب ناپدید شدن آرتمیا در دریاچه شورابیل شده است (عاصم و همکاران، ۲۰۲۴ ج). علاوه بر این، دخل و تصرف‌های انسانی سبب نابود شدن زیستگاه آرتمیا در دریاچه شورابیل شده است. محمدیاری و همکاران (۲۰۱۵) برای اولین بار حضور آرتمیای بکرزا در دریاچه بزنگان را گزارش دادند. این دریاچه پیشتر یک دریاچه لب شور و فاقد آرتمیا بود که به‌دلیل تغییرات اقلیمی منجر به افزایش شوری و فراهم شدن شرایط مناسب برای استقرار آرتمیای بکرزا شده است. منشا دودمان آرتمیای گزارش‌شده در دریاچه بزنگان هنوز مشخص نیست. با توجه به عدم شواهد از معرفی عمدی آرتمیا توسط انسان (از جمله فعالیت‌های شیلانی)، حضور آرتمیای بکرزا در آن، از طریق پرندگان آبی مهاجر یا باد از مناطق مجاور محتمل‌تر به‌نظر می‌رسد (عاصم و همکاران، ۲۰۲۴ ج). بر این اساس، دریاچه بزنگان نشان‌دهنده یک زیستگاه طبیعی است که در آن تغییرات اقلیمی در این دریاچه، به‌عنوان نمونه‌ای از تأثیرات غیرمستقیم اقلیم بر تنوع زیستی آب‌شور، بدون مداخله انسانی مستقیم، قابل‌بررسی است.

از اولین حضور ثبت‌شده گونه مهاجم آمریکایی آرتمیا فرانسیسکانا در سال ۲۰۰۶ (آباتزوپولوس و همکاران، ۲۰۰۶) تا آخرین چک لیست ارائه‌شده در سال ۲۰۲۴، تعداد زیستگاه‌های اشغال‌شده توسط این گونه به ۱۲ منطقه رسیده است (عاصم و همکاران، ۲۰۲۴ ج). افزایش رو به رشد تعداد زیستگاه‌هایی که توسط آرتمیای آمریکای شمالی اشغال شده است، تهدیدی قابل‌توجه برای تنوع زیستی آرتمیای بومی در دریاچه‌های طبیعی داخلی محسوب می‌شود. آرتمیا فرانسیسکانا به‌عنوان یک گونه مهاجم غالب در اکوسیستم‌های آب شور شناخته می‌شود که دارای ظرفیت تولید مثلی بالا، سازگاری برتر و سرعت تغذیه فیلتری سریع در مقایسه با سایر گونه‌ها و دودمان‌های بکرزا است (آما^۳ و همکاران، ۲۰۰۷؛ سانچز^۴ و همکاران، ۲۰۱۶). این موضوع سبب می‌شود که با ورود آرتمیا فرانسیسکانا به زیستگاه‌های طبیعی، روند رقابت‌های بین‌گونه‌ای ممکن است منجر به کاهش جمعیت یا حذف اکولوژیکی گونه‌های بومی شود.

1 - Frankham et al

2 - Mace et al

3 - Amat et al

4 - Sánchez et al

متأسفانه به دلیل عدم وجود مطالعات ارزیابی ذخایر در بیش از یک دهه اخیر (به غیر از دریاچه ارومیه)، وضعیت فعلی ترکیب گونه‌ای و جمعیتی آرتمیاهای بومی در زیستگاه‌های طبیعی که حضور گونه مهاجم آرتمیا فرانسیسکانا پیشتر در آنها گزارش شده، نامشخص است.

علی‌رغم متروکه شدن اکثر سایت‌های پرورش آرتمیا در ایران که اساساً گونه غیر بومی آرتمیا فرانسیسکانا در آن پرورش یافته است، وجود تخم‌های مقاوم در رسوبات، امکان ایجاد جمعیت‌های محدود را در فصول بارانی فراهم می‌کند. علاوه بر این، این تخم‌های مقاوم می‌توانند توسط باد یا پرندگان آبی در طول دوره پرورش منتقل شوند و پس از آن به‌طور بالقوه می‌توانند سبب پراکندگی بیشتر آرتمیا فرانسیسکانا در زیستگاه‌های جدید شوند. بنابراین، مزارع متروکه باید به‌طور محافظه‌کارانه‌ای به‌عنوان زیستگاه‌های آرتمیا در چک لیست‌ها گنجانده شوند.

مطالعات اولیه نشان می‌دهد که دودمان‌های بومی آرتمیای بکرزا در ایران، در مقایسه با گونه بومی آرتمیا اورمیانا و گونه غیر بومی آرتمیا فرانسیسکانا، پتانسیل تولید بالاتری دارند. با توجه به این یافته‌ها، اولویت استفاده از آرتمیای بکرزای بومی در آبی‌پروری برای حفظ تنوع زیستی آرتمیا توصیه می‌شود (عاصم^۱ و همکاران ۲۰۲۴ ج). به‌عنوان یک برنامه مدیریتی برای حفظ تنوع زیستی آرتمیا، عاصم^۲ و همکاران (۲۰۲۴ ج) استفاده از فن‌های غنی‌سازی را برای افزایش ارزش غذایی به‌عنوان روشی برای بهره‌برداری و تولید آرتمیا از منابع بومی (آرتمیای بکرزا) پیشنهاد کردند.

سطوح پلوئیدی مختلف در دودمان‌های آرتمیای بکرزا، ناشی از ریشه‌های تکاملی چندنیایی (مانیاتیسی^۳ و همکاران، ۲۰۱۱؛ عاصم^۴ و همکاران، ۲۰۱۶ ب؛ عاصم^۵ و همکاران، ۲۰۲۵ الف) است که می‌تواند بر ویژگی‌های بیولوژیکی آنها تأثیر بگذارد (عاصم^۶ و همکاران، ۲۰۲۵ ب). بنابراین، بررسی کامل توزیع و ارزش غذایی آرتمیای بکرزا، با در نظر گرفتن سطوح پلوئیدی، برای درک تنوع زیستی و پتانسیل آبی‌پروری این موجودات در ایران ضروری است. علی‌رغم فقدان داده‌های بروز شده در مورد وضعیت جوامع آرتمیای بکرزای ایران پس از معرفی آرتمیا فرانسیسکانا، مورد اخیر باید به‌عنوان یک تهدید بالقوه زیست‌محیطی در نظر گرفته شود.

بتازگی، نکوئی‌فرد^۷ و همکاران (۲۰۲۳) محل جدیدی برای گونه چینی آرتمیا سینیکا در «بهشهر» در استان مازندران گزارش کردند و دو منطقه برای آرتمیا اورمیانا خارج از حوضه زیستگاه طبیعی آن در دریاچه ارومیه در «دوز داغی» در استان آذربایجان غربی و «بشاریان» در استان فزوین گزارش کرده‌اند. تحقیقات آنها فقط بر توالی‌های نشانگر COI میتوکندریایی و $\text{Na}^+/\text{K}^+\text{ATPase}$ هسته‌ای متکی بود، بدون اینکه توالی‌ها در بانک ژنی ثبت شوند. در ضمن، حالت تولید مثلی نمونه‌ها (بکرزایی یا دوجنسی) بررسی نشده است. درحالی‌که آنها نشانگر $\text{Na}^+/\text{K}^+\text{ATPase}$ را توالی‌یابی کردند، نتایج منتشر شده شواهد کافی برای تأیید اینکه آیا نمونه‌های مورد مطالعه الگوی هموزیگوت یا هتروزیگوت در کدون والین نشان می‌دهند را شامل نمی‌شود (مراجعة کنید به مناف فر^۸ و همکاران، ۲۰۱۱). بنابراین، شواهدی بر اینکه آیا نمونه‌های زیستگاه‌های جدید دوجنسی یا بکرزا هستند، ارائه نشده است. با این حال،

1 - Asem et al

2 - Asem et al

3 - Maniatsi et al

4 - Asem et al

5 - Asem et al

6 - Asem et al

7 - Nekouefard et al

8 - Manaffar et al

قابل یادآوری است که اعتبار الگوی هتروزیگوت در کدون والین آرتمیای بکرزا توسط ماکاری^۱ و همکاران (۲۰۱۳) مورد تردید قرار گرفته است. علاوه بر این، نویسندگان اشاره کرده‌اند که آرتمیا سینیکا در زیستگاه بهشهر ۱۷/۷۶٪ شباهت با توالی‌های موجود در پایگاه داده NCBI نشان داده است که این نتیجه نشان‌دهنده یک مشکل بالقوه با کیفیت پایین توالی و وجود توالی‌های پلی پیک است (مراجعه کنید به عاصم^۲ و همکاران، ۲۰۲۲). علاوه بر این، آرتمیا اورمیا و دودمان دیپلوئید/تریپلوئید بکرزا و همچنین آرتمیا سینیکا و دودمان‌های تترا/پنتاپلوئید بکرزا، شباهت‌های ژنتیکی نزدیکی را نشان دادند که نشان می‌دهد تکیه صرف بر «درصد همسانی نوکلئوتیدی» برای تعیین وضعیت طبقه‌بندی آنها کافی نیست. با توجه به وجود این چالش‌ها، وضعیت طبقه‌بندی آرتمیا در این سه منطقه جدید قابل تأیید نیست. برای رفع این عدم قطعیت‌ها، مطالعات آینده باید تعداد بیشتری از توالی‌ها و حالت تولید مثلی را در نظر بگیرند که می‌تواند به تأیید وضعیت طبقه‌بندی آنها کمک کند.

نتیجه‌گیری

فقدان داده‌های تنوع زیستی به‌روز، یکی از چالش‌های عمده در توسعه و اجرای راهبردهای مؤثر حفاظتی است. داده‌های ارزیابی از زیستگاه‌های طبیعی برای نظارت بر تنوع زیستی و توزیع گونه‌ها اهمیت زیادی دارند. با این حال، بسیاری از مطالعات مربوط به زیستگاه‌های آرتمیا در ایران به‌روز نشده‌اند. علاوه بر این، داده‌های ارزیابی ذخایر آرتمیا به‌ویژه در مورد دریاچه ارومیه، از روش‌های مختلفی محاسبه شده‌اند که شامل معیارهای متفاوتی مانند تعداد افراد، تعداد تخم‌ها، زیست‌توده (شامل مجموع نمونه بالغ و ناپلی) و وزن خشک و تر تخم‌ها می‌شود. این ناهمگونی روش‌شناختی، تجزیه و تحلیل مقایسه‌ای ارزیابی ذخایر آرتمیا را در زیستگاه‌ها و بازه‌های زمانی مختلف چالش برانگیز می‌کند. بنابراین، اتخاذ یک پروتکل خاص مطابق با روش‌های استاندارد برای جمع‌آوری و تجزیه و تحلیل مداوم داده‌ها ضروری است. افزایش زیستگاه‌های اشغال‌شده توسط گونه غیربومی آرتمیا فرانسیسکانا، در کنار تداوم خشکسالی، زنگ خطر دیگری برای تنوع زیستی آرتمیا می‌باشد. یافته‌های این مقاله مروری می‌تواند مبنایی برای تدوین برنامه‌های مدیریتی و حفاظتی زیستگاه‌های آرتمیا، به‌ویژه در زمینه پایش ژنتیکی و بوم‌شناختی جمعیت‌های آرتمیا، تعیین ظرفیت‌های پرورشی در زیستگاه‌های غیربومی و حمایت از تصمیم‌گیری‌های مبتنی بر شواهد برای حفاظت و احیای بوم‌سازگان حساس علی‌الخصوص دریاچه ارومیه باشد.

منابع

- جعفری، عباس؛ وطن دوست، صابر. (۱۳۸۴). بررسی پراکنش جغرافیایی آرتمیا. ششمین همایش علوم و فنون دریایی، تهران.
- جعفری، مهدی؛ آستانی، سجاد. (۱۳۹۰). مطالعه و بررسی کاربردهای مختلف آرتمیا و نحوه پراکنش آن در کشور. نخستین همایش ملی جهاد اقتصادی در عرصه کشاورزی و منابع طبیعی، قم.
- حافظیه، محمود. (۱۳۸۱). آرتمیا میگوی آب شور. موسسه تحقیقات شیلات ایران. ۲۱۴ صفحه.
- حافظیه، محمود؛ شریفیان، منصور؛ حسین پور، حمیرا. (۱۳۹۴). مقایسه زیست‌سنجی سیست و ناپلیوس آرتمیای ایران. توسعه آبرزی پروری، ۹ (۱)، صص: ۱۱-۲۴.

1 - McCarraher et al

2 - Asem et al

- سبک آرا، جلیل؛ مکارمی، مرضیه. (1390). پراکنش و فراوانی پلانکتونی و نقش آن‌ها در دریاچه شورابیل اردبیل. علوم زیستی، 16 (5)، صص: 31-46.
- کرامتی، احسان؛ آرمون، فیروز؛ خاتمی، سید یحیی. (1395). مواجهه شهر اردبیل با دریاچه شورابیل. منظر، 37 (8)، صص: 32-39.
- محبی، فریدون؛ عباسپور، اسد؛ صیدگر، مسعود. (۱۴۰۰ الف). تأثیر پسروری آب در یایچه ارومیه بر اجتماعات میگوی آب شور (آرتیمیا). مجله ترویجی بوم‌شناسی منابع آبی، ۴ (۲)، صص: ۸-۱.
- محبی، فریدون؛ داداشپور، بایرامعلی؛ صیدگر، مسعود؛ علیزاده اوصالو، ژاله؛ روحدادگلمانخانه، یاور. (۱۴۰۰ ب). اثر کاهش سطح آب دریاچه ارومیه بر ترکیب جمعیتی *A. urmiana*. فصلنامه علمی محیط زیست جانوری، ۱۳ (۴)، صص: ۳۳۶-۳۲۹.
- محبی، فریدون؛ صیدگر، مسعود؛ حافظیه، محمود؛ داداشپور، بایرامعلی؛ علیزاده اوصالو، ژاله. (۱۴۰۱). مروری بر ذخایر آرتیمیا در دریاچه ارومیه (۱۴۰۰-۱۳۷۷). مجله علمی شیلات ایران، ۳۱ (۵)، صص: ۹۵-۱۱۰. URL: <http://isfj.ir/article-۱۱۰-۹۵-fa.html>
- محبی، فریدون. (۱۴۰۳). پیامدهای کاهش سطح آب دریاچه ارومیه (اثر بر آرتیمیا ارومیا و فیتوپلانکتون‌های دریاچه). موسسه تحقیقات علوم شیلاتی کشور. ۱۷۸ صفحه.
- نوری، فرزانه. (1375) بررسی مورفولوژی، تولیدمثل و مراحل رشد آرتیمای دریاچه ارومیه. دانشگاه ارومیه، 60 صفحه.
- Abatzopoulos, T. J., Agh, N., Van Stappen, G., Rouhani Razavi, S. M. & Sorgeloos, P. (2006). *Artemia* sites in Iran. *Journal of the Marine Biological Association of the UK*, 86, 299–307. <http://doi.org/10.1017/S0025315406013154>
- Abonyi, A. (1915). Experimentelle Daten zum Erkennen der *Artemia*-Gattung. *Zeitschrift für wissenschaftliche Zoologie*, 114, 95–168.
- Abreu-Grobois, F. A. & Beardmore, J. A. (1982). Genetic differentiation of the brine shrimp *Artemia*. In: Barigozzi, C., ed. *Mechanisms of Speciation*. Alan R. Liss, New York, 345–376.
- Agh, N. (2016). *Artemia* resources in Iran, Azerbaijan and Turkmenistan. *FAO Expert Workshop on Sustainable Use and Management of Artemia Resources in Asia*, 7–9 November 2016, Tianjin: China.
- Agh, N., Abatzopoulos, T. J., Kappas, I., Van Stappen, G., Razavi-Rouhani, S. M. & Sorgeloos, P. (2007). Coexistence of Sexual and Parthenogenetic *Artemia* Populations in Lake Urmia and Neighbouring Lagoons. *International Review of Hydrobiology*, 92, 48–60 <http://doi.org/10.1002/iroh.200610909>
- Agh, N., Sorgeloos, P., Abatzopoulos, T., Razavi-Ruhani, S. M. & Lotfi, V. G. (2001). *Artemia* resources in Iran. *International Workshop on Artemia*, 12–15 May 2001, Urmia: Iran.
- Ahmadi, M. R., Leibovitz, H. & Simpson, K. L. (1990). Characterization of Uromiah Lake *Artemia* (*Artemia uromiana*) by isoelectrofocusing of isozyme patterns. *Comparative Biochemistry and Physiology Part B*, 95, 115–118. [http://doi.org/10.1016/0305-0491\(90\)90256-S](http://doi.org/10.1016/0305-0491(90)90256-S)
- Amat, F., Hontoria, F., Navarro, J. C., Vieira, N. & Mura, G. (2007). Biodiversity loss in the genus *Artemia* in the western Mediterranean region. *Limnetica*, 26, 387–404. <http://doi.org/10.23818/limn.26.33>
- Amat, F., Hontoria, F., Ruiz, O., Green, A., Sanchez, M. I., Figuerola, J. & Hortas, F. (2005). The American brine shrimp as an exotic invasive species in the western Mediterranean. *Biological Invasions*, 7, 37–47. <http://doi.org/10.1007/s10530-004-9634-9>
- Artom, E. (1922). Nuovi dati sulla distribuzione geografica e sulla biologia delle due specie (*microperenica* e *macroperenica*) del genere *Artemia*. *Atti della Accademia Nazionale dei Lincei Rendiconti*, 31, 529–532.
- Asem, A. & Eimanifar, A. (2016). Updating historical record on brine shrimp *Artemia* (Crustacea: Anostraca) from Urmia Lake (Iran) in the first half of the 10th century AD. *International Journal of Aquatic Science*, 7, 3–5.
- Asem, A. & Rogers, D. C. (2012). Clarification of the publication date for *Artemia urmiana* Günther (Crustacea: Anostraca): 1890, 1899 or 1900? *International Journal of Artemia Biology*, 2, 3–6.
- Asem, A. (2008). Historical record on brine shrimp *Artemia* more than one thousand years ago from Urmia Lake, Iran. *Journal of Biological Research-Thessaloniki*, 9, 113–114.
- Asem, A., Atashbar, B., Rastegar-Pouyani, N. & Agh, N. (2009). Biometric comparison of two parthenogenetic populations of *Artemia* Leach, 1819 from the Urmia Lake basin, Iran (Anostraca: Artemiidae). *Zoology in the Middle East*, 47, 117–120. <http://doi.org/10.1080/09397140.2009.10638358>
- Asem, A., Atashbar, B., Rastegar-Pouyani, N. & Agh, N. (2010 b). Morphological and biometric characterization of rare male and sexual dimorphism in parthenogenetic *Artemia* (Crustacea: Anostraca). *Zoology in the Middle East*, 49, 115–117. <http://doi.org/10.1080/09397140.2010.10638402>
- Asem, A., Eimanifar, A. & Sun, S. C. (2016 b). Genetic variation and evolutionary origins of parthenogenetic *Artemia* (Crustacea: Anostraca) with different ploidies. *Zoologica Scripta*, 45, 421–436. <http://doi.org/10.1111/zsc.12162>
- Asem, A., Eimanifar, A. & Wink, M. (2016 a). Update of “Biodiversity of the Hypersaline Urmia Lake National Park (NW Iran)”. *Diversity*, 8, 6. <http://doi.org/10.3390/d8010006>

- Asem, A., Eimanifar, A., Djamali, M., De los Rios, P. & Wink, M. (2014). Biodiversity of the Hypersaline Urmia Lake National Park (NW Iran). *Diversity*, 6, 102–132. <http://doi.org/10.3390/d6010102>
- Asem, A., Eimanifar, A., Li, W., Wang, P., Brooks, S. A. & Wink, M. (2018). Phylogeography and population genetic structure of an exotic invasive brine shrimp *Artemia* Leach, 1819 (Crustacea: Anostraca) in Australia. *Australian Journal of Zoology*, 66, 307–316. <http://doi.org/http://doi.org/10.1071/ZO18077>
- Asem, A., Eimanifar, A., Van Stappen, G. & Sun, S. C. (2019). The impact of one-decade ecological disturbance on genetic changes: a study on the brine shrimp *Artemia urmiana* from Urmia Lake, Iran. *PeerJ*, 7, e7190. <http://doi.org/10.7717/peerj.7190>
- Asem, A., Fu, C., Yang, N., Eimanifar, A., Cao, Y., Wang, P. & Shen, C. (2022). Validation of two novel primers for the promising amplification of the mitogenomic Cytochrome c Oxidase subunit I (COI) barcoding region in *Artemia* aff. *sinica* (Branchiopoda, Anostraca). *Crustaceana*, 95, 585–592. <http://doi.org/10.1163/15685403-bja10207>
- Asem, A., Gajardo, G., Hontoria, F., Yang, C., Shen, C., Rastegar-Pouyani, N., Padhye, S. M. & Sorgeloos, P. (2024 b). The species problem in *Artemia* Leach, 1819 (Crustacea: Anostraca), a genus with sexual species and obligate parthenogenetic lineages. *Zoological Journal of the Linnean Society*, zlad192. <http://doi.org/10.1093/zoolinnean/zlad192>
- Asem, A., Mohebbi, F. & Ahmadi, R. (2012). Drought in Urmia Lake, the largest natural habitat of brine shrimp *Artemia*. *World Aquaculture*, 43, 36–38.
- Asem, A., Rastegar-Pouyani, N. & De los Rios, P. (2010 a). The genus *Artemia* Leach, 1819 (Crustacea: Branchiopoda): true and false taxonomical descriptions. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 38, 501–506. <http://doi.org/10.3856/vol38-issue3-fulltext-14>
- Asem, A., Schuster, R., Eimanifar, A., Lu, H., Liu, C., Wu, X., Yao, L., Meng, X., Li, W. & Wang, P. (2021 a). Impact of colonization of an invasive species on genetic differentiation in new environments: A study on American *Artemia franciscana* (Crustacea: Anostraca) in the United Arab Emirates. *Journal of Ocean University of China*, 20, 911–920. <http://doi.org/10.1007/s11802-021-4675-6>
- Asem, A., Yang, C., De Vos, S. et al. (2025a). Mitogenomic phylogeny and divergence time estimation of *Artemia* Leach, 1819 (Branchiopoda: Anostraca) with emphasis on parthenogenetic lineages. *BMC Genomics* 26, 228 <http://doi.org/10.1186/s12864-025-11391-6>
- Asem, A., Yang, C., Eimanifar, A., Hontoria, F., Varó, I., Mahmoudi, F., Fu, C., Shen, C., Rastegar-Pouyani, N., Wang, P., Li, W., Yao, L., Meng, X., Dan, Y., Rogers, C. & Gajardo, G. (2023). Phylogenetic analysis of problematic Asian species of *Artemia* Leach, 1819 (Crustacea, Anostraca), with the descriptions of two new species. *Journal of Crustacean Biology*, 43, 1–25. <http://doi.org/10.1093/jcobiol/ruad002>
- Asem, A., Yang, C., Mahmoudi, F., Chen, S., Long, B., Wang, B., Fu, C., Hontoria, F., Rogers, D. C. & Gajardo, G. (2024 a). Tibetan *Artemia* (Crustacea: Anostraca) mitogenomic biodiversity and population demographics. *Zoological Journal of the Linnean Society*, 201 (1), 32–56. <http://doi.org/10.1093/zoolinnean/zlad114>
- Asem, A.; Eimanifar, A.; Wink, M. (2024 c). Species diversity and distribution of *Artemia* (Crustacea, Anostraca) in Iran: Historical contexts and updated review. *Zoodiversity*, 58, 269–298.
- Asem, A.; Li, Y.; Yan, X.; Zhang, Y.; Zhu, Y.; Kangarloei, B.A.; Yang, C. (2025b). Effects of Salinity on the Reproductive and Lifespan Traits of *Artemia* Parthenogenetic Lineages with Different Ploidy Levels. *Biology* 14, 1055. <https://doi.org/10.3390/biology14081055>
- Azari Takami, G. (1989). Two strains of *Artemia* in Urmia Lake (Iran). *Artemia Newsletter*, 13, 5.
- Barigozzi, C. & Baratelli, L. (1989). The problem of *Artemia urmiana*. *Artemia Newsletter*, 14, 14.
- Barigozzi, C. (1974). *Artemia*: A Survey of Its Significance in Genetic Problems. In: Dobzhansky, T., Hecht, M. K., Steere, W. C., eds. *Evolutionary Biology*. Springer, Boston, 221–252.
- Barigozzi, C., Varotto, V., Baratelli, L. & Giarrizzo, R. (1987). The *Artemia* of Urmia Lake (Iran): Mode of reproduction and chromosome numbers. *Atti della Accademia Nazionale dei Lincei*, 81, 87–90.
- Browne, R. A. & Bowen, S. T. (1991). Taxonomy and population genetics of *Artemia*. In: Brown, R. A., Sorgeloos, P., Troten, C. N. A., eds. *Artemia Biology*. CRC Press, Florida, 221–235.
- Browne, R. A. & MacDonald, G. H. (1982). Biogeography of the brine shrimp, *Artemia*: distribution of parthenogenetic and sexual populations. *Journal of Biogeography*, 9, 331–338. <http://doi.org/10.2307/2844719>
- Clark, L. S. & Bowen, S. T. (1976). The genetics of *Artemia salina*: VII. Reproductive isolation. *Journal of Heredity*, 67, 385–388. <http://doi.org/10.1093/oxfordjournals.jhered.a108758>
- Collins, N. C. (1977). Ecological studies of terminal lakes-their relevance to problems in limnology and population biology. In: Greer, D. C., ed. *Desertic Terminal Lakes*. Utah Water Resources Laboratory, Utah, 411–420.
- Curzon, G. N. (1892). *Persia and the Persian Question (Vol. 1)*. Longmans, Green & Company, London.
- Eimanifar, A. & Mohebbi, F. 2007. Urmia Lake (Northwest Iran): a brief review. *Saline Systems*, 3, 5. <http://doi.org/10.1186/1746-1448-3-5>

- Eimanifar, A., Asem, A., Wang, P., Li, W. & Wink, M. (2020). Using ISSR genomic fingerprinting to study the genetic differentiation of *Artemia* Leach, 1819 (Crustacea: Anostraca) from Iran and neighbor regions with the focus on the invasive American *Artemia franciscana*. *Diversity*, 12, 132. <http://doi.org/10.3390/d12040132>
- Eimanifar, A., Van Stappen, G., Marden, B. & Wink M. (2014). *Artemia* biodiversity in Asia with the focus on the phylogeography of the introduced American species *Artemia franciscana* Kellogg, 1906. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 79, 392–403. <http://doi.org/10.1016/j.ympev.2014.06.027>
- Frankham, R., Briscoe, D. A. & Ballou, J. D. (2002). Introduction to conservation genetics. Cambridge University Press Cambridge, UK, 1–617.
- Gajardo, G., Abatzopoulos, T. J., Kappas, I. & Beardmore, J. A. (2002). Evolution and speciation. In: Abatzopoulos, T. J., Beardmore, J. A., Clegg, J. S., Sorgeloos, P., eds. *Artemia Basic and Applied Biology*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 225–250.
- Golabian, H. (2011). Urumia Lake: Hydro-Ecological Stabilization and Permanence. In: Badescu, V., Cathcart, R. B., eds. *Macro-engineering Seawater in Unique Environments*. Springer-Verlag, Berlin, 365–397.
- Günther, A. (1898 a). The medusa of Lake Urumiah. *Nature*, 58, 319. <http://doi.org/10.1038/058319d0>
- Günther, R. T. & Manley J. J. (1899). On the Waters of the Salt Lake of Urmi. *Proceedings of the Royal Society of London*, 65, 312–318. <http://doi.org/10.1098/rspl.1899.0040>
- Günther, R. T. (1898 b). The jelly-fish of Lake Urumiah. *Nature*, 58, 345. <http://doi.org/http://doi.org/10.1038/048294c0>
- Günther, R. T. (1899 a). Contributions to the geography of Lake Urmi and its neighbourhood. *Geographical Journal*, 14, 504–523. <http://doi.org/10.2307/1774539>
- Günther, R. T. (1899 b). Contributions to the Natural History of Lake Urmi, N.W-Persia, and its Neighbourhood. *Zoological Journal of the Linnean Society*, 27, 414–416. <http://doi.org/10.1111/j.1096-3642.1899.tb00414.x>
- Hontoria, F., Redón, S., Maccari, M., Varó, I., Navarro, J. C., Ballell, L. & Amat, F. (2012). A revision of *Artemia* biodiversity in Macaronesia. *Aquatic Biosystems*, 8, 25. <http://doi.org/10.1186/2046-9063-8-25>
- Horváth, Z., Lejeusne, C., Amat, F., Sánchez-Fontenla, J., Vad, C. F. & Green, A. J. (2018). Eastern spread of the invasive *Artemia franciscana* in the Mediterranean Basin, with the first record from the Balkan Peninsula. *Hydrobiologia*, 822, 229–235. <http://doi.org/10.1007/s10750-018-3683-z>
- Karimi, N., Bagheri, M. H., Hooshyaripor, F., Farokhnia, A. & Sheshangosht, S. (2016). Deriving and Evaluating Bathymetry Maps and Stage Curves for Shallow Lakes Using Remote Sensing Data. *Water Resources Management*, 30, 5003–5020. <http://doi.org/10.1007/s11269-016-1465-9>
- Löffler, H. (1956). Limnologische beobachtungen an Iranischen binnengewässern. *Hydrobiologia*, 8, 239–278.
- Löffler, H. (1959). Beiträge zur Kenntnis Der Iranischen Binnengewässer I Der Niriz-See und Sein Einzugsgebiet. *Internationale Revue der gesamten Hydrobiologie und Hydrographie*, 44, 227–276.
- Löffler, H. (1961). Beiträge zur Kenntnis der Iranischen Binnengewässer II Regional-limnologische Studie mit besonderer Berücksichtigung der Crustaceenfauna. *Internationale Revue der gesamten Hydrobiologie und Hydrographie*, 46, 309–406.
- Maccari, M., Amat, F. & Gómez, A. (2013). Origin and genetic diversity of diploid parthenogenetic *Artemia* in Eurasia. *PLoS One*, 8, e83348. <http://doi.org/10.1371/journal.pone.0083348>
- Mace, G. M., Possingham, H. P. & Leader-Williams, N. (2006). Prioritizing choices in conservation. In: Macdonald, D., Service, K., eds. *Key Topics in Conservation Biology*. Blackwell Publishers, Oxford, 17–34.
- Manaffar, R.; Zare, S.; Agh, N.; Abdolazadeh, N.; Soltanian, S.; Sorgeloos, P.; Bossier, P.; Van Stappen, G. (2011). SNP detection in Na/K ATP-ase gene $\alpha 1$ subunit of bisexual and parthenogenetic *Artemia* strains by RFLP screening. *Mol. Ecol. Resour.* 11, 211–214.
- Maniatsi, S., Baxevanis, A.D., Kappas, I., Deligiannidis, P., Triantafyllidis, A., Papakostas, S., Bougiouklis, D. & Abatzopoulos, T. J. (2011). Is polyploidy a persevering accident or an adaptive evolutionary pattern? The case of the brine shrimp *Artemia*. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 58, 353–364. <http://doi.org/10.1016/j.ympev.2010.11.029>
- McCarraher, D. B. (1972). *A Preliminary Bibliography and Lake Index of the Inland Mineral Waters of the World*. Roma: FAO Fisheries Circular.
- Nekouefard, A., Hafezieh, M., Manaffar, R. & Khezri, M. (2023). New geographic site records for *Artemia* in Iran. *International Journal of Aquatic Research and Environmental Studies*, 3, 117–127.
- Nougué, O., Flaven, E., Jabbour-Zahab, R., Rode, N. O., Dubois, M. & Lenormand, T. (2015). Characterization of nine new polymorphic microsatellite markers in *Artemia parthenogenetica*. *Biochemical Systematics and Ecology*, 58, 59–63. <http://doi.org/10.1016/j.bse.2014.10.014>
- Persoone, G. & Sorgeloos, P. (1980). General aspects of the ecology and biogeography of *Artemia*. In: Persoone, G., Sorgeloos, P., Roels, O., Jaspers, E., eds. *The Brine Shrimp Artemia*, Vol. 3. Universa Press, Wetteren, 3–24.
- Plattner, F. 1955. Der osmotische Druck von *Artemia salina*. *Pflügers Archiv*, 261, 172–182. <http://doi.org/10.1007/BF00369788>

- Rode, N.O., Jabbour-Zahab, R., Boyer, L., Flaven, É., Hontoria, F., Van Stappen, G. & Lenormand, T. (2022). The origin of asexual brine shrimps. *The American Naturalist*, 200, E52–E76. <http://doi.org/10.1086/720268>
- Rogers, D. C. (2015). A conceptual model for anostracan biogeography. *Journal of Crustacean Biology*, 35, 686–99. <http://doi.org/10.1163/1937240X-00002369>
- Saji, A., Eimanifar, A., Soorae, P. S., Al Dhaheri, S., Li, W., Wang, P. & Asem, A. (2019). Phylogenetic analysis of exotic invasive species of Brine Shrimp *Artemia* Leach, 1819 (Branchiopoda, Anostraca) in Al Wathba Wetland Reserve (UAE; Abu Dhabi). *Crustaceana*, 92, 495–503. <http://dx.doi.org/10.1163/15685403-00003884>
- Saleem, C.M., Asem, A. & Sun, S. C. (2019). Morphological abnormality in *Artemia* Leach, 1819 (Crustacea: Anostraca): a specimen with three compound eyes. *Acta Zoologica Bulgarica*, 71, 143–144.
- Sánchez, M. I., Paredes, I., Lebouvier, M. & Green, A. J. (2016). Functional role of native and invasive filter feeders, and the effect of parasites: learning from hypersaline ecosystems. *PloS One*, 11, e0161478. <http://doi.org/10.1371/journal.pone.0161478>
- Scalone, R. & Rabet, N. (2013). Presence of *Artemia franciscana* (Branchiopoda, Anostraca) in France: morphological, genetic, and biometric evidence. *Aquatic Invasions*, 8, 67–76. <http://dx.doi.org/10.3391/ai.2013.8.1.08>
- Schulz, S., Darehshouri, S., Hassanzadeh, E., Tajrishy, M. & Schüth, C. (2020). Climate change or irrigated agriculture—what drives the water level decline of Lake Urmia. *Scientific Report*, 10, 236. <http://doi.org/10.1038/s41598-019-57150-y>
- Sclater, P. L. (1893). The jelly-fish of Lake Urmiah. *Nature*, 48, 294. <http://doi.org/10.1038/048294c0>
- Shen, C., Liu, C., Wu, X., Yao, L., Meng, X., Xia, L., Wang, P., Li, W., Eimanifar, A. & Asem, A. (2021). First record of the invasive American *Artemia franciscana* Kellogg, 1906 (Branchiopoda, Anostraca) at the South China Sea coast of China. *Crustaceana*, 94, 647–650. <http://dx.doi.org/10.1163/15685403-bja10113>
- Sima, S., Rosenberg, D. E., Wurtsbaugh, W. A., Null, S. E. & Kettenring, K. M. (2021). Managing Lake Urmia, Iran for diverse restoration objectives: Moving beyond a uniform target lake level. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 35, 100812. <http://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100812>
- Sorgeloos, P. (1997). *Lake Urmia cooperation project – contract item A, Report on the 'Resource assessment of Urmiah Lake Artemia cysts and biomass*. Ghent University, Ghent.
- Stella, E. (1933). Phenotypical characteristics and geographical distribution of several biotypes of *Artemia salina* L. *Zeitschrift für Induktive Abstammungs und Vererbungslehre*, 65, 412–446.
- Triantaphyllidis, G. V., Abatzopoulos, T. J. & Sorgeloos, P., (1998). Review of the biogeography of the genus *Artemia* (Crustacea, Anostraca). *Journal of Biogeography*, 25, 213–226. <http://doi.org/10.1046/j.1365-2699.1998.252190.x>
- Van Stappen, G. (2002). Zoogeography. In: Abatzopoulos, T. J., Beardmore, J. A., Clegg, J. S., Sorgeloos, P., eds. *Artemia Basic and Applied Biology*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 171–224.
- Vanhaecke, P., Tackaert, W. & Sorgeloos, P. (1987). The biogeography of *Artemia*: an updated review. In: Sorgeloos, P., Bengtson, D. A., Declair, W., Jaspers, E., eds. *Artemia Research and its Applications*, Vol. 1. Universa Press, Wetteren, 129–155.
- Wu, X., Shen, C., Fu, C., Yang, N., Wang, P., Eimanifar, A. & Asem, A. (2022). Cyst size variability in invasive American *Artemia franciscana* Kellogg, 1906 (Branchiopoda: Anostraca) in Asia: a commercial approach. *Crustaceana*, 94, 573–584. <http://dx.doi.org/10.1101/2022.05.07.491002>
- Wurtsbaugh, W. A., Miller, C., Null, S. E., DeRose, R. J., Wilcock, P., Hahnenberger, M., Howe, F. & Moore, J. (2017). Decline of the world's saline lakes. *Nature Geoscience*, 10, 816–821. <http://doi.org/10.1038/ngeo3052>
- Zheng, B., Sun, C. S. & Ma, L. (2004). The occurrence of an exotic bisexual *Artemia* species, *Artemia franciscana*, in two coastal salterns of Shandong Province, China. *Journal of Ocean University of China*, 3, 171–174. <http://doi.org/10.1007/s11802-004-0030-y>

Assessing Land Subsidence Triggered by the 28 January 2023 Khoy Earthquake in Salmas Plain Using InSAR

Sana Gholami¹, Mahdi Behyari^{2*} , Ali Abedini³

1. MSc. Student of Geology, Geology Department, Urmia University, Urmia, Iran
 2. **Corresponding Author**, Associate Professor, Department of Geology, Urmia University, Urmia, Iran
 Email: m.behyari@urmia.ac.ir ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4944-5161>
 3. Professor, Department of Geology, Urmia University, Urmia, Iran

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article Article history: Received: 14 October 2025 Revised: 24 December 2025 Accepted: 31 December 2025 Published: 22 December 2026 Keywords: Land subsidence, Earthquake, Interferometry, Salmas Plain.	Land subsidence is a geomorphological and environmental phenomenon with significant economic and social consequences, driven by both natural and anthropogenic factors such as excessive groundwater extraction and seismic activity. The Salmas Plain in northwestern Iran, characterized by severe groundwater-level decline and its location within a seismically active zone, is considered a critical area affected by land subsidence. In this study, Sentinel-1 satellite data and Synthetic Aperture Radar Interferometry (InSAR) techniques were employed to investigate ground surface deformation over the period 2021–2024. Geological, hydrological, and soil datasets were integrated with a Digital Elevation Model (DEM), slope and aspect maps, land-use information, and seismic records to identify and analyze the main controlling factors of subsidence. The results indicate that subsidence rates generally reach their maximum during periods of intensive groundwater extraction and decrease during the cold season, highlighting the dominant role of human activities in surface deformation. However, the Khoy earthquake of 28 January 2023 (8 Bahman 1401), despite occurring in the cold season, resulted in a nearly threefold increase in subsidence rates, demonstrating the direct impact of seismic loading on both surficial and subsurface sediments. Low-slope areas underlain by fine-grained and highly compressible deposits were identified as the most vulnerable zones, while slope orientation and active faults significantly influenced the spatial distribution of subsidence. These findings emphasize that in seismically active regions, land subsidence rates may increase abruptly following seismic events, posing serious risks to infrastructure, and therefore, continuous groundwater monitoring, controlled extraction, and the integration of InSAR observations with hydrogeological modeling are essential for identifying vulnerable areas and mitigating subsidence-related hazards.
How to Cite: Gholami, S. , Behyari, M. and Abedini, A. (2026). Assessing Land Subsidence Triggered by the 28 January 2023 Khoy Earthquake in Salmas Plain Using InSAR. <i>Journal of Natural Environmental Hazards</i>, 15 (50), 133-156.	
 © The Author/Authors DOI: 10.22111/jneh.2025.53484.2141 Publisher: University of Sistan and Baluchestan	

EXTENDED ABSTRACT

INTRODUCTION

Land subsidence is a critical geomorphological and environmental phenomenon that may occur gradually or suddenly, causing a significant lowering of the Earth's surface. It results primarily from compaction of subsurface layers and the extraction of fluids from voids. Human activities, such as excessive groundwater withdrawal, intensive agriculture, and land use change, often exacerbate natural geological processes, while tectonic and seismic activities can induce abrupt subsidence events. In areas with active faults and high seismicity, earthquakes can rapidly alter subsurface stress regimes, trigger soil compaction, and induce vertical displacement, significantly increasing the risk to infrastructure and human settlements.

The Salmas Plain, located in northwestern Iran, represents a highly vulnerable region where anthropogenic groundwater exploitation combines with active tectonics to create complex subsidence patterns. The plain exhibits widespread alluvial deposits, low-relief terrain, and extensive agricultural activity, making it susceptible to both seasonal and sudden changes in surface elevation. Before the 28 January 2023 earthquake in Khoy, seasonal groundwater extraction had already caused measurable subsidence across the plain, with average annual rates approaching several centimeters. The occurrence of the earthquake provided a unique opportunity to evaluate the interplay between human-induced and seismic-driven deformation, allowing for a comprehensive assessment of subsidence dynamics over four years from 2021 to 2024.

This study employs Synthetic Aperture Radar Interferometry (InSAR) using Sentinel-1 satellite imagery to quantify and map land subsidence. The method provides millimeter-scale measurements over wide areas, independent of weather conditions, and is particularly suitable for monitoring both slow and rapid surface deformations. By integrating geological, hydrogeological, soil, topographic, and land use data with InSAR results, this study identifies controlling factors, evaluates spatial and temporal patterns of subsidence, and assesses the direct impacts of the 28 January 2023 Khoy earthquake on the Salmas Plain.

DATA AND METHODOLOGY

The study area extends from the east toward the Iran–Turkey border in the west. The central and eastern parts of the plain are relatively flat and intensively cultivated, whereas the western sectors are characterized by mountainous terrain. The geological units of the area include metamorphic rocks, Quaternary alluvial and terrace deposits, evaporitic formations along the lake margins, travertine layers, and volcanic deposits. These units were classified based on their susceptibility to compaction and land subsidence.

Topographic data were derived from a digital elevation model (DEM) with a spatial resolution of 13.9 m, obtained from Sentinel-1 imagery. Slope maps were classified into four categories (0–5°, 5–15°, 15–30°, >30°) to identify low-gradient areas prone to subsidence. Aspect maps were generated to examine the influence of slope orientation on subsidence distribution. Soil data, including depth, texture, permeability, and compressibility, were compiled, identifying Lithosols, Haplic Xerosols, and Calcaric Regosols as the main soil classes. Land use data were extracted from high-resolution maps and categorized into agriculture, wetland, urban, and other types.

Groundwater information was obtained from 41 piezometer wells covering 2019–2024. Water table levels were interpolated in GIS to produce spatially continuous maps for analysis. Earthquake data and fault maps were integrated to assess tectonic influences and to derive a seismic hazard index.

Sentinel-1 SLC images with VV polarization were selected to minimize atmospheric noise and ensure high coherence. Images were co-registered, interferograms were formed, and phase unwrapping was performed to convert phase changes into vertical displacement along the satellite line-of-sight. Multilooking and Goldstein filtering reduced noise, and terrain correction aligned results with

geographic coordinates. Processing emphasized dry-season image pairs to focus on human-induced subsidence while capturing earthquake effects.

RESULTS AND DISCUSSION

InSAR analysis reveals a strong seasonal pattern of subsidence modulated by human activity and amplified by the 2023 earthquake.

Annual and seasonal observations indicate that:

- * 2021–2022: Average subsidence ranged from 4.6 to 5.2 cm/year, with the highest rates in southern and southeastern alluvial zones.
- * Pre-earthquake 2023: Rates declined to 1.5 cm/year due to winter aquifer recharge and reduced water extraction.
- * Post-earthquake 2023: Abrupt increase to 14.7 cm/year highlights the direct impact of seismic energy on both surface and subsurface sediments.
- * 2024: Rates slightly decreased to 12.5 cm/year but remained significantly elevated, particularly in low-gradient, fine-grained areas.

Table 1. Changes in Maximum Subsidence Rate over the Studied Years in the Study Area

Year	Maximum Subsidence Rate (cm/year)	Key Observations and Notes
2021	5.2	Relatively high and stable subsidence
2022	4.6	Slight decrease, but still high
2023 (pre-earthquake)	1.5	Significant reduction
2023 (post-earthquake)	14.7	Sharp increase due to the direct impact of the earthquake on the ground structure
2024	12.5	Relative decrease compared to the previous year, but still critical with more widespread subsidence

Spatial analysis demonstrates that geology and lithology strongly influence subsidence intensity. Fine-grained, compressible alluvial and terrace deposits exhibited the largest vertical displacements, while bedrock units had minor direct subsidence but influenced the distribution patterns. Hydrogeological factors, particularly the depth and decline of groundwater, were critical in controlling compaction rates. Land use and drainage conditions further modulated subsidence, with irrigated agricultural areas and wetlands showing heightened vulnerability.

Seismic effects were clearly evident: even during periods of reduced groundwater extraction in winter, the earthquake triggered rapid and extensive subsidence. Topography also affected the patterns, as low-gradient areas concentrated subsidence, while steeper slopes experienced less vertical displacement. Fault lines and structural trends guided the spatial distribution of subsidence, emphasizing the interplay between tectonics and anthropogenic stressors.

The combined influence of these factors produces complex temporal and spatial variations, where human activity sets the baseline susceptibility and seismic events act as accelerators of sudden deformation. These findings underscore the necessity for continuous monitoring, groundwater management, and the integration of geospatial and hydrogeological data to mitigate subsidence risks in seismic plains.

CONCLUSION

Between 2021 and 2024, the Salmas Plain experienced substantial variations in subsidence rates due to a combination of anthropogenic, natural, and seismic factors. InSAR measurements provided high-

resolution mapping of vulnerable zones, revealing that low-gradient, fine-grained sediments are particularly sensitive. The 28 January 2023 Khoy earthquake caused sudden and severe subsidence, demonstrating the rapid response of susceptible deposits to seismic energy. Sustainable management of groundwater, regular monitoring, and identification of high-risk areas are essential to mitigate subsidence hazards. Integrating InSAR with hydrogeological models and GPS data can enhance predictive capabilities and support resilient land and water management strategies.

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 research was conducted as part of a Master's thesis at Urmia University. The authors express sincere gratitude to the Research and Technology Vice-Presidency of Urmia University for financial and technical support.

REFERENCES

References [in Persian]

- Farzin-Kia, R., Zangeneh-Asadi, M., Amirahmadi, A., & Zandi, R. (2019). Tectonic activities and their impact on land subsidence in the Jovin Plain watershed: *Hydrogeomorphology*. *Hydrogeomorphology*, 6(20), 165–185. [In Persian]
- Shafiei, N., Mokhtari, L., Amirahmadi, A., & Zandi, R. (2021). Investigation of groundwater subsidence in Noorabad Plain using radar interferometry. *Journal of Geomorphology and Environmental Sciences of Iran*, Article Research. <https://doi.org/10.22034/gmpj.2020.106424> [In Persian]
- Rajabi, M., Roustaei, Sh., & Motaei, S. (2023). Time-series assessment of land subsidence in Kermanshah Plain using the InSAR technique. *Natural Geography Research*, 55(1), 19–37. [In Persian]
- Amirahmadi, A., Shafiei, N., & Zandi, R. (2021). Analysis of the relationship between groundwater level decline and land subsidence using spatial models: Case study of Noorabad Plain aquifer. *Journal of Geography and Planning*, 25(76), 159–171. [In Persian]

References [in English]

- Behyari, M., et al. (2018). "Structural control on the Salmas geothermal region, northwest Iran, from fractal analysis and paleostress data." *Acta Geologica Sinica-English Edition* 92(5): 1728-1738. DOI: 10.1111/1755-6724.13673
- Berberian, M. and J. Tchalenko (1976). "Field study and documentation of the 1930 Salmas (Shahpur-Azarbaidjan) earthquake." *Geol. Surv. Iran* 39: 271-342.
- Dehghani, M., et al. (2009). "InSAR monitoring of progressive land subsidence in Neyshabour, northeast Iran." *Geophysical Journal International* 178(1): 47-56. DOI: 10.1111/j.1365-246x.2009.04135.x
- Hejmanowski, R., et al. (2019). "An analysis applying InSAR of subsidence caused by nearby mining-induced earthquakes." *Geosciences* 9(12): 490. DOI: 10.3390/geosciences9120490
- Herrera-García, G., et al. (2021). "Mapping the global threat of land subsidence." *Science* 371(6524): 34-36. DOI: 10.4211/hs.dc7c5bfb3a86479b889d3b30ab0e4ef7
- Imakiire, T. and M. Koarai (2012). "Wide-area land subsidence caused by the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake." *Soils and Foundations* 52(5): 842-855. DOI: 10.1016/j.sandf.2012.11.007
- Khodabandeh, A., et al. (2002). "Geological map of Iran, 1: 100,000 series sheet Salmas." *Geological Survey of Iran*, Tehran.
- Li, X., Wang, X., and Chen, Y., 2022, InSAR atmospheric delay correction model integrated from multi-source data based on VCE: *Remote Sensing*, v. 14, no. 17, p. 4329.
- Malik, K., et al. (2022). "Estimation of ground subsidence of New Delhi, India using PS-InSAR technique and Multi-sensor Radar data." *Advances in Space Research* 69(4): 1863-1882. DOI: 10.1016/j.asr.2021.08.032
- Massonnet, D. and K. L. Feigl (1998). "Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface." *Reviews of Geophysics* 36(4): 441-500. DOI: 10.1029/97rg03139
- Prestininzi, A. and R. Romeo (2000). "Earthquake-induced ground failures in Italy." *Engineering Geology* 58(3-4): 387-397. DOI: 10.1016/s0013-7952(00)00044-2

- Samieie-Esfahany, S., et al. (2010). On the effect of horizontal deformation on InSAR subsidence estimates. Fringe 2009, Proceedings of the workshop held 30 November-4 December 2009, in Frascati, Italy. Edited by H. Lacoste. ESA-SP Vol. 677. ISBN: 978-92-9221-241-4, 2010, id. 39.
- Sedighi, M., et al. (2010). "Subsidence detection in Salmas area using InSAR and geodetic techniques." *Geospatial Eng J* **1**(4): 25-33.
- Shahbazi, S., et al. (2022). "Constraints on the hydrogeological properties and land subsidence through GNSS and InSAR measurements and well data in Salmas plain, northwest of Urmia Lake, Iran." *Hydrogeology Journal* **30**(2): 533-555. DOI: 10.1007/s10040-021-02416-x
- Solano-Rojas, D., et al. (2020). "Remotely triggered subsidence acceleration in Mexico City induced by the September 2017 M w 7.1 Puebla and the M w 8.2 Tehuantepec September 2017 earthquakes." *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences* **382**: 683-687. DOI: 10.5194/piahs-382-683-2020.
- Taghipour, K., et al. (2018). "Evidence for distributed active strike-slip faulting in NW Iran: The Maragheh and Salmas fault zones." *Tectonophysics* **742**: 15-33. DOI: 10.1016/j.tecto.2018.05.022
- Wu, P. C., et al. (2022). "Subsidence in coastal cities throughout the world observed by InSAR." *Geophysical Research Letters* **49**(7): e2022GL098477. DOI: 10.1029/2022gl098477
- Zhang, Z., et al. (2023). "Monitoring and analysis of ground subsidence in Shanghai based on PS-InSAR and SBAS-InSAR technologies." *Scientific Reports* **13**(1): 8031. DOI: 10.22541/au.166831755.54665841/v1.

مجله علمی پژوهشی مخاطرات محیط طبیعی، دوره ۱۵، شماره ۵۰، شماره پیاپی ۰۴، دی ۱۴۰۵

بررسی فرونشست ناشی از زمین لرزه ۸ بهمن خوی در دشت سلماس با بهره‌گیری از تکنیک تداخل سنجی راداری

ثنا غلامی^۱، مهدی بهیاری^{۲*} , علی عابدینی^۳

۱. کارشناسی ارشد زمین شناسی دانشگاه ارومیه

۲. دانشیار گروه زمین شناسی دانشگاه ارومیه (نویسنده مسئول)

ایمیل: m.behyari@urmia.ac.ir <https://orcid.org/0000-0002-4944-5161> ORCID:

۳. استاد گروه زمین شناسی دانشگاه ارومیه

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۲۲ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۱۰/۰۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۱۰ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۱۰/۰۱ واژه‌های کلیدی: فرونشست، زمین لرزه، تداخل سنجی راداری، دشت سلماس.	فرونشست زمین، پدیده‌ای ژئومورفولوژیکی و زیست محیطی با پیامدهای اقتصادی و اجتماعی قابل توجه است. دشت سلماس در شمال غرب ایران، با سابقه افت شدید سطح آب‌های زیرزمینی و قرارگیری در پهنه لرزه خیز، یکی از مناطق بحرانی در زمینه فرونشست محسوب می‌شود. در این مطالعه، با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای سنتینل-۱ و فن تداخل سنجی راداری، تغییرات سطح زمین در بازه زمانی ۲۰۲۱ تا ۲۰۲۴ بررسی شد. داده‌های زمین شناسی، هیدرولوژیکی، خاک شناسی، مدل ارتفاعی رقومی، نقشه شیب و جهت شیب، کاربری زمین و اطلاعات زمین لرزه‌ای برای تحلیل عوامل کنترل کننده فرونشست مورد استفاده قرار گرفتند. یافته‌ها نشان داد که نرخ فرونشست در فصل برداشت شدید آب‌های زیرزمینی به بیشترین مقدار خود می‌رسد و در فصل سرد کاهش می‌یابد که نقش فعالیت‌های انسانی در تغییر شکل سطح زمین را برجسته می‌کند. اما وقوع زمین لرزه ۸ بهمن ۱۴۰۱، علی‌رغم فصل سرد، باعث افزایش قابل توجه نرخ فرونشست به میزان ۳ برابر نرخ مشابه در دوره قبل شد و تأثیر مستقیم لرزه‌ای بر رسوبات سطحی و زیرسطحی را نشان داد. مناطق کم‌شیب، با رسوبات ریزدانه و تراکم‌پذیر، حساس‌ترین نقاط شناسایی شدند و جهت شیب و گسل‌های فعال در پراکندگی فرونشست نقش داشتند. نتایج تأکید می‌کنند که در پهنه‌های لرزه خیز، نرخ فرونشست تحت تأثیر فعالیت‌های لرزه‌ای به صورت ناگهانی می‌تواند افزایش یابد و مخاطرات جدی برای سازه‌ها و تاسیسات ایجاد نماید. بنابراین، پایش مستمر منابع آب زیرزمینی، مدیریت برداشت‌ها می‌تواند در شناسایی مناطق آسیب‌پذیر و مدیریت ریسک ناشی از فرونشست در پهنه‌های لرزه خیز مؤثر باشد.

استناد: غلامی، ثنا، بهیاری، مهدی و عابدینی، علی. (۱۴۰۵). بررسی فرونشست ناشی از زمین لرزه ۸ بهمن خوی در دشت سلماس با بهره‌گیری از تکنیک تداخل سنجی راداری. مخاطرات محیط طبیعی، ۱۰ (۵۰)، ۱۵۶-۱۳۳.

ناشر: دانشگاه سیستان و بلوچستان

© نویسنده / نویسندگان
DOI: 10.22111/jneh.2025.53484.2141



مقدمه

فرونشست زمین، یکی از مهم‌ترین پدیده‌های ژئومورفولوژیکی و زیست‌محیطی است که به‌صورت تدریجی یا ناگهانی رخ داده و منجر به پایین رفتن سطح زمین می‌شود. این پدیده در نتیجه تراکم لایه‌های زیرسطحی و خروج سیالات از میان حفره‌ها شکل می‌گیرد (هررا-گارسیا، ازکوئرو و همکاران^۱، ۲۰۲۱؛ وو، وی و همکاران^۲، ۲۰۲۲؛ ژانگ، هو و همکاران^۳، ۲۰۲۳). فرونشست دلایل طبیعی و انسانی متعددی دارد که از جمله مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به فشردگی تدریجی رسوبات، برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی، استخراج منابع نفت و گاز، فعالیت‌های معدنی، انحلال سنگ‌های زیرسطحی و نیز فرآیندهای زمین‌ساختی و لرزه‌ای اشاره کرد (ایماکییره و کوآرای^۴، ۲۰۱۲؛ هجمانوسکی، مالینووسکا و همکاران^۵، ۲۰۱۹) اما آنچه مهم است این است که وقوع زمین‌لرزه به هر علتی هم که باشد، به‌شدت زندگی انسان را تحت تاثیر قرار می‌دهد به‌طوری‌که بسیاری از شهرهای ایران درگیر این رویداد مخاطره‌آمیز شده‌اند.

فرونشست زمین در دشت‌های آبرفتی ایران بیشتر ناشی از ترکیب عوامل انسانی و طبیعی، به‌ویژه برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی و تراکم رسوبات زیرسطحی است. امیراحمدی، شفیعی و زندی (۱۴۰۰) ارتباط مستقیم افت سطح آب‌های زیرزمینی با فرونشست آبخوان نورآباد ممسنی را نشان دادند. شفیعی، مختاری، امیراحمدی و زندی (۱۴۰۰) با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری، روند تدریجی فرونشست دشت نورآباد را پایش کرده و الگوهای فضایی آن را مشخص کردند. همچنین رجبی، روستایی و مطاعی (۱۴۰۲) با ارزیابی سری زمانی فرونشست در دشت کرمانشاه، تأکید کردند که این پدیده در دشت‌های آبرفتی ایران به شکل تدریجی و قابل‌پیش‌بینی رخ می‌دهد. نتایج این مطالعات نشان می‌دهد که پایش دقیق فرونشست برای مدیریت منابع آب و کاهش مخاطرات زمین‌شناختی حیاتی است. دشت سلماس در شمال‌غرب ایران یکی از مناطق بحرانی از نظر فرونشست زمین به‌شمار می‌آید. مطالعات متعدد نشان داده‌اند که افت شدید سطح آب‌های زیرزمینی در این منطقه که ناشی از برداشت بی‌رویه برای مصارف کشاورزی و شرب است، نقش اصلی در بروز فرونشست دارد (بربریان و چالنگو^۶، ۱۹۷۶؛ بهیاری، نورعلی و همکاران^۷، ۲۰۱۸؛ شهبازی، موسوی و همکاران^۸، ۲۰۲۲). نتایج سنجش‌های تداخل‌سنجی راداری با روزه مصنوعی و داده‌های ژئودتیکی نشان می‌دهند که میانگین نرخ فرونشست در این دشت حدود ۵ سانتی‌متر در سال بوده و بیشترین شدت آن در بخش‌های جنوبی و جنوب‌شرقی مشاهده شده است (صدیقی، نانکالی و همکاران^۹، ۲۰۱۰). علاوه بر آن، کاهش ظرفیت ذخیره‌سازی آبخوان‌ها در طی دهه‌های اخیر باعث شده است که حدود ۲۵ درصد مساحت دشت سلماس در معرض فرونشست با آسیب‌پذیری بسیار بالا قرار گیرد. این وضعیت، همراه با قرارگیری دشت در پهنه لرزه‌خیز شمال‌غرب ایران (بربریان و چالنگو^۶، ۱۹۷۶؛ بهیاری، نورعلی و همکاران، ۲۰۱۸؛ تقی‌پور، خطیب و همکاران^{۱۰}، ۲۰۱۸) اهمیت ویژه‌ای به پایش و بررسی اثرات ترکیبی زمین‌لرزه‌ها و بهره‌برداری انسانی بر پایداری سطح زمین در این منطقه می‌دهد.

¹ Herrera-García, Ezquerro et al.

² Wu, Wei et al.

³ Zhang, Hu et al.

⁴ Imakiire and Koarai

⁵ Hejmanowski, Malinowska et al.

⁶ Berberian and Tchalenko

⁷ Behyari et al.

⁸ Shahbazi et al.

⁹ Nankali et al.

¹⁰ Taghipour et al.

در سطح جهانی نیز فرونشست به‌عنوان یک معضل روبه‌رشد در مناطق شهری و کشاورزی شناخته می‌شود. در ایران نیز به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، برداشت غیرقانونی و بی‌رویه آب‌های زیرزمینی منجر به نرخ‌های فرونشست بالایی شده است؛ به‌طوری‌که کشور در زمره سریع‌ترین مناطق دارای فرونشست در جهان با نرخ‌هایی تا حدود ۲۵ سانتی‌متر در سال قرار گرفته است. این پدیده علاوه بر آثار زیست‌محیطی، پیامدهای اقتصادی و اجتماعی متعددی از جمله آسیب به زیرساخت‌ها، کاهش بهره‌وری کشاورزی، تهدید امنیت غذایی و جابه‌جایی جمعیت انسانی را به‌همراه دارد (هررا-گارسیا، از کوئرو و همکاران^۱، ۲۰۲۱؛ ژانگ، هو و همکاران^۲، ۲۰۲۳).

یکی از عوامل مهم در ایجاد یا تشدید فرونشست، حرکات تکتونیکی و رخداد زمین‌لرزه‌ها است. فرزین‌کیا، زنگنه‌اسدی، امیراحمدی و زندی (۱۳۹۸) در مطالعه خود بر روی حوضه آبریز دشت جوبین نشان داده‌اند که فعالیت‌های تکتونیکی می‌تواند به‌طور مستقیم بر الگوهای فرونشست زمین تأثیر بگذارد؛ به‌خصوص زمانی که ساختار سازندهای رسوبی حساس به تغییر تنش باشند و شرایط هیدروژئومورفولوژیکی منطقه موجب تشدید فرونشست شود. از طرفی، زمین‌لرزه‌ها می‌توانند با ایجاد تغییر در فشارهای زیرسطحی، شکستگی لایه‌های رسوبی و فشردگی ناگهانی رسوبات اشباع، موجب جابه‌جایی عمودی زمین و در نتیجه فرونشست شوند. این موضوع در مناطق لرزه‌خیز اهمیت ویژه‌ای دارد؛ زیرا ترکیب اثرات تکتونیک فعال و فشارهای انسانی ناشی از بهره‌برداری منابع می‌تواند منجر به فرونشست‌های شدید و پرخطر گردد (پرستینیزی و رومئو^۳، ۲۰۰۰؛ ایماکییره و کوآرای^۴، ۲۰۱۲؛ هجمانوسکی، مالدینوسکا و همکاران^۵، ۲۰۱۹؛ سولانو-روخاس، کابرا-کانو و همکاران^۶، ۲۰۲۰). در چنین شرایطی، پایش دقیق تغییرات سطح زمین برای شناخت الگوهای فرونشست و ارزیابی ارتباط آن با رخدادهای لرزه‌ای ضروری است.

روش‌های سنتی مانند تراز دقیق و شبکه‌های سامانه موقعیت‌یاب جهانی^۷ در گذشته برای مطالعه تغییرات سطح زمین به‌کار گرفته می‌شدند؛ اما به‌دلیل هزینه‌بر بودن و پوشش محدود، جای خود را به فناوری‌های نوینی چون تداخل‌سنجی راداری با روزه مصنوعی^۸ داده‌اند (دهقانی، والدان‌زویج و همکاران^۹، ۲۰۰۹؛ سامعی‌اصفهانی، هانسن و همکاران^{۱۰}، ۲۰۱۰؛ مالک، کومار و همکاران^{۱۱}، ۲۰۲۲؛ شهبازی، موسوی و همکاران^{۱۲}، ۲۰۲۲؛ وو، وی و همکاران^{۱۳}، ۲۰۲۲). به‌دلیل دقت میلی‌متری، پوشش وسیع مکانی، قابلیت پایش طولانی‌مدت و استقلال از شرایط جوی، ابزاری قدرتمند برای مطالعه تغییر شکل سطح زمین محسوب می‌شود (ماسونه‌نه و فیگل^{۱۴}، ۱۹۹۸). این روش علاوه بر پایش فرونشست، امکان تحلیل جابه‌جایی‌های ناشی از زلزله، حرکات گسلی و سایر فرآیندهای زمین‌ساختی را نیز فراهم می‌کند.

¹ Herrera-García, Ezquerro et al.

² Zhang, Hu et al.

³ Prestininzi and Romeo

⁴ Imakiire and Koarai

⁵ Hejmanowski, Malinowska et al.

⁶ Solano-Rojas, Cabral-Cano et al.

⁷ GPS

⁸ InSAR

⁹ Valadan Zoej et al.

¹⁰ Hanssen et al

¹¹ Malik, Kumar et al.

¹² Shahbazi, Mousavi et al.

¹³ Wu, Wei et al.

¹⁴ Wu, Wei et al.

در این پژوهش، تلاش شده است تا با بهره‌گیری از فن تداخل‌سنجی راداری با روزنه مصنوعی و تلفیق آن با داده‌های زمین‌شناسی، توپوگرافی، هیدرولوژی و کاربری زمین، ارتباط میان فرونشست زمین و رخداد زمین‌لرزه ۸ بهمن ۱۴۰۱ (۲۸ ژانویه ۲۰۲۳) در خوی مورد بررسی قرار گیرد. این زمین‌لرزه در پهنه لرزه‌خیز شمال‌غرب ایران رخ داده و موقعیت دشت سلماس امکان تحلیل دقیق اثرات لرزه‌ای بر تغییرات نرخ فرونشست را فراهم کرده است. نوآوری اصلی این پژوهش در **ادغام داده‌های میلی‌متری تداخل‌سنجی راداری با روزنه مصنوعی با اطلاعات چندمنظوره محیطی** برای شناسایی نواحی حساس به فرونشست و ارزیابی اثرات مستقیم و غیرمستقیم زمین‌لرزه بر سازندهای سطحی و زیرسطحی نهفته است که امکان ارائه تحلیل دقیق‌تر از تعامل میان عوامل طبیعی و انسانی را فراهم می‌کند. اهداف اصلی مطالعه شامل تعیین الگوهای فضایی و زمانی فرونشست، سنجش تأثیر زمین‌لرزه بر رسوبات سطحی و زیرسطحی، شناسایی مناطق آسیب‌پذیر و ارائه راه‌کارهای مدیریتی برای کاهش مخاطرات زمین‌شناختی در دشت سلماس و مناطق مشابه می‌باشد. نتایج این پژوهش می‌تواند درک بهتری از نقش زمین‌لرزه‌ها در تشدید فرونشست و بهبود استراتژی‌های پایش و مدیریت ریسک در پهنه‌های لرزه‌خیز ارائه دهد.

داده‌ها و روش‌ها

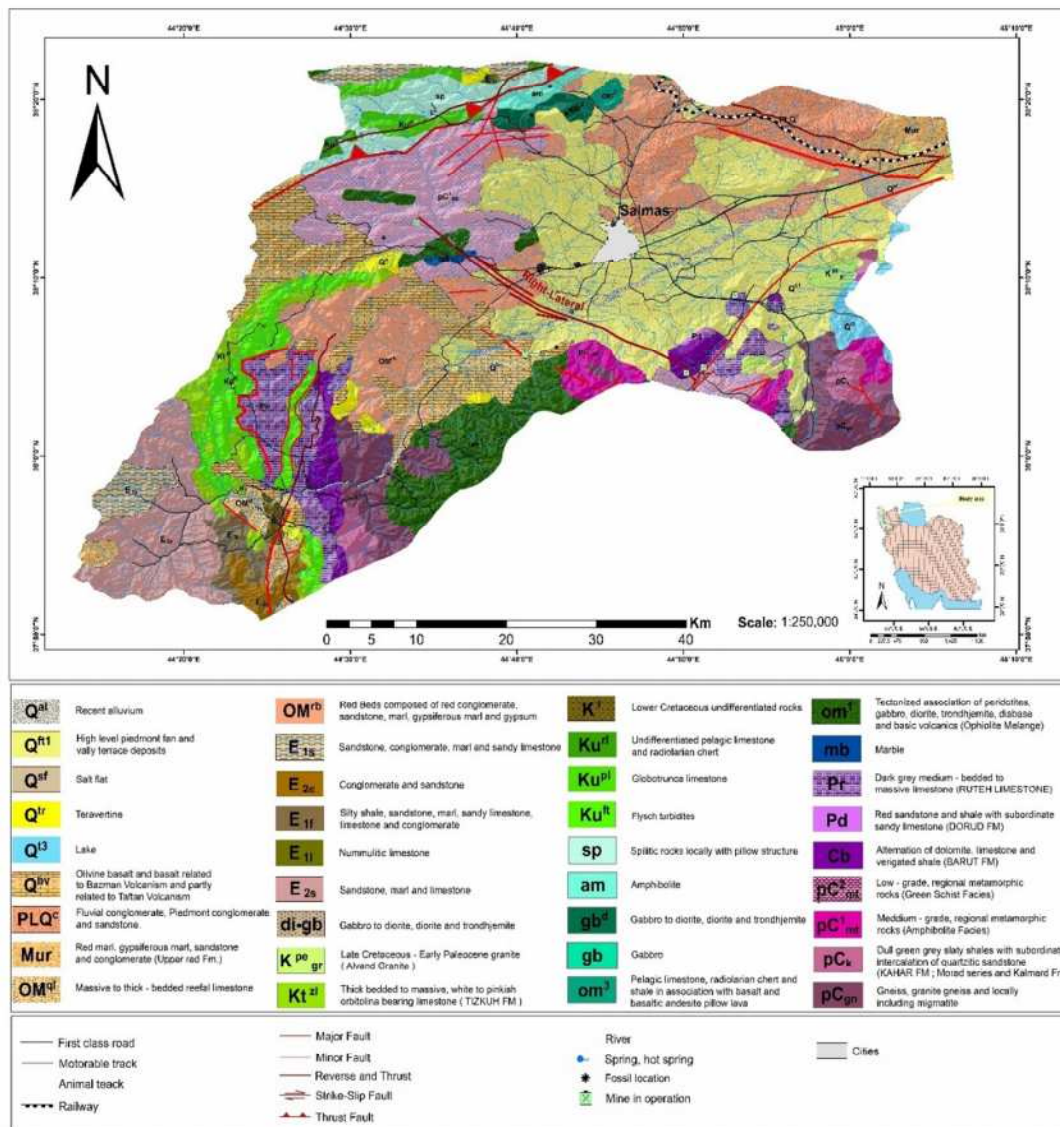
منطقه مورد مطالعه دشت سلماس در شمال‌غرب ایران و استان آذربایجان‌غربی واقع شده است. این دشت در ارتفاع متوسط ۱۴۰۰ متر از سطح دریا قرار دارد و از شرق به دریاچه ارومیه و از غرب به مرز ایران و ترکیه محدود می‌شود. بخش‌های مرکزی و شرقی بیشتر هموار و آب‌رفتی بوده و برای کشاورزی مناسب هستند، درحالی‌که بخش‌های غربی به کوه‌های سلماس و دالامیر محدود می‌شوند. داده‌های ژئومورفولوژیکی و توپوگرافی منطقه از مدل رقومی ارتفاعی ۱ استخراج‌شده از داده‌های سنجنده سنتینل-۱ و پردازش اینترفروگرام‌های مربوط به تاریخ‌های ۲۰ ژوئن ۲۰۲۴ و ۲۹ اوت ۲۰۲۴ در محیط نرم‌افزار اسنپ ۲ به‌دست آمد مدل ارتفاع رقومی تولیدشده دارای وضوح مکانی ۱۳٫۹ متر بوده و به‌عنوان لایه پایه برای تهیه نقشه‌های شیب، جهت شیب، سایه‌روشن و تحلیل‌های مورفولوژیکی مورد استفاده قرار گرفت.

زمین‌شناسی منطقه:

برای بررسی ویژگی‌های زمین‌شناسی، از نقشه‌های زمین‌شناسی موجود استفاده شد (خدابنده، سلطانی و همکاران، ۲۰۰۲؛ بهیاری، نورعلی و همکاران، ۲۰۱۸؛ تقی‌پور، خطیب و همکاران، ۲۰۱۸). واحدهای زمین‌شناسی عمده شامل سنگ‌های دگرگونی (شیست سبز تا آمفیبولیت و گنایس)، رسوبات کواترنری (آبرفت‌ها، پادگانه‌های جوان و رسوبات هولوسن)، نهشته‌های تبخیری در حاشیه دریاچه ارومیه، تراورتن‌های کواترنری و لایه‌های آتشفشانی (بازالت و الیون) هستند. این داده‌ها به‌منظور تعیین مناطق مستعد فرونشست و ارتباط آن با ساختارهای زمین‌شناسی به‌کار گرفته شدند (شکل ۱)

1 DEM

2 Snap



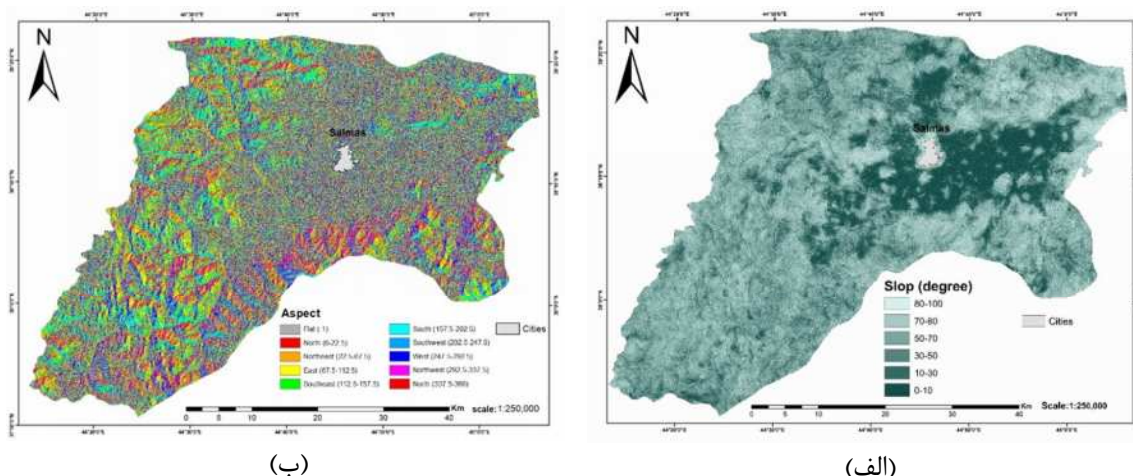
شکل ۱) نقشه زمین‌شناسی منطقه سلماس با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ شامل واحدهای رسوبی اخیر، آتشفشانی، رسوبات دریاچه‌ای و سنگ‌های دگرگونی و آذرین متنوع است. در این نقشه، انواع سنگ‌ها مانند ماسه‌سنگ، مارن، سنگ آهک، گابرو، آمفیبولیت و مرمر مشخص شده‌اند. همچنین ساختارهای تکتونیکی مهم شامل گسل‌های مختلف (اصلی، فرعی، رانشی و معکوس) (بروزرسانی خداینده ۲۰۰۲).

شیب منطقه:

به‌منظور استخراج نقشه شیب، مدل ارتفاع رقومی تهیه شده پردازش شد. نقشه شیب در واحد درجه به چهار رده (۵۰-، ۱۵-۵، ۳۰- و بیش از ۳۰ درجه) طبقه‌بندی گردید. این طبقه‌بندی امکان شناسایی نواحی کم‌شیب و مستعد فرونشست را فراهم نمود (شکل ۲الف).

جهت شیب منطقه

جهت شیب از مدل ارتفاع رقومی محاسبه و در قالب نقشه‌ای رستری طبقه‌بندی شد. مقادیر ۰، ۹۰، ۱۸۰ و ۲۷۰ درجه به ترتیب نشان‌دهنده شیب رو به شمال، شرق، جنوب و غرب هستند. این داده‌ها برای تحلیل نقش توپوگرافی و جهت دامنه‌ها در وقوع فرونشست استفاده شدند (شکل ۲ب).



شکل ۲) الف: نقشه شیب منطقه که در آن مناطق مستعد فرونشست با شیب کم به رنگ تیره تر نمایش داده شده است. ب: نقشه جهت شیب منطقه

سطح آب‌های زیرزمینی

اطلاعات مربوط به سطح ایستابی از ۴۱ حلقه چاه پیزومتری در بازه زمانی ۱۳۹۸ تا ۱۴۰۳، از سازمان آب منطقه‌ای آذربایجان غربی گرفته شد. داده‌ها پس از پردازش و درونیابی در محیط نرم‌افزار سیستم داده‌های اطلاعات جغرافیایی ۱، به نقشه پهنه‌بندی سطح آب زیرزمینی تبدیل شدند. این نقشه‌ها برای ارزیابی ارتباط بین افت سطح آب و فرونشست مورد استفاده قرار گرفتند (شکل ۳الف).

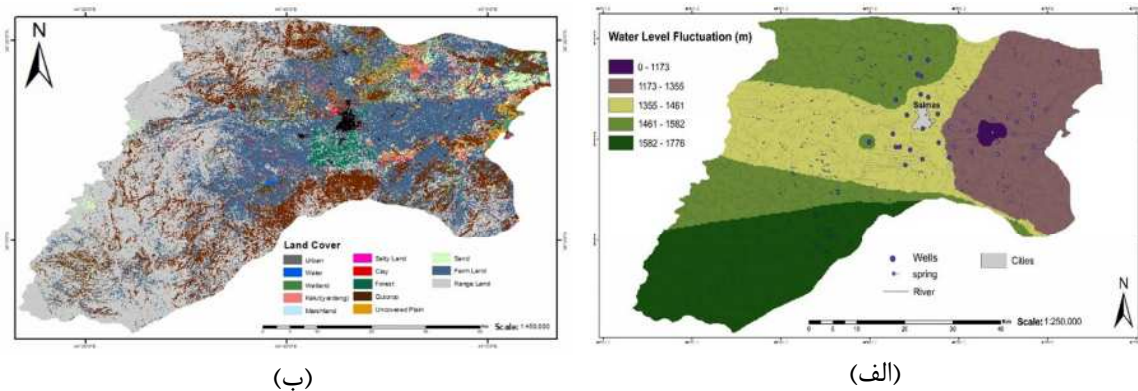
خاک‌شناسی منطقه

داده‌های خاک‌شناسی از منابع سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد^۲، پایگاه مرجع جهانی منابع خاک^۳ و مطالعات ملی خاک ایران گردآوری شد. سه رده اصلی خاک شامل خاک‌های کم‌عمق سنگی^۴، خاک‌های خشک معمولی^۵ و خاک‌های جوان آهکی^۶ شناسایی شدند. خصوصیت‌های این خاک‌ها (عمق، بافت، درصد کربنات کلسیم، نفوذپذیری و تراکم‌پذیری) برای تحلیل پتانسیل نشست زمین مورد بررسی قرار گرفت.

کاربری اراضی

- 1 GIS
- 2 FAO
- 3 WRB
- 4 Lithosols
- 5 Haplic Xerosols
- 6 Calcaric Regosols

برای تهیه نقشه کاربری اراضی، داده‌های نقشه پوشش زمین ایران ۱ با دقت ۱۰ متر در محیط گوگل ارث مورد استفاده قرار گرفت. این داده‌ها به ۱۳ کلاس مختلف طبقه‌بندی شده و برای تحلیل ارتباط میان نوع کاربری زمین و وقوع فرونشست به کار گرفته شدند (شکل ۳ب).



شکل ۳ الف: نقشه سطح آب زیرزمینی منطقه با استفاده از داده های ۴۱ چاه پیزومتریک ب: نقشه کاربری اراضی در محدوده مورد مطالعه

گسل‌ها و لرزه‌خیزی منطقه

منطقه مورد مطالعه تحت تاثیر چندین گسل مهم و لرزه‌زا بوده است که در شکل‌گیری سیمای زمین‌ساختی منطقه نقش قابل‌توجهی داشته‌اند. گسل سلماس یکی از گسل‌های فعال و مهم شمال غرب ایران است که می‌تواند نقش بسزایی در فرونشست دشت سلماس داشته باشد و در فاصله ۱۰ کیلومتری از منطقه مورد مطالعه قرار دارد. این گسل بیشتر با جهت شمال‌غرب-جنوب‌شرق امتداد یافته و طول آن بیش از چند ده کیلومتر است و بخشی از سیستم گسل‌های امتداد لغز اخیر زاگرس ۲ در شمال غرب ایران تشکیل می‌دهد. گسل سلماس بیشتر به صورت امتداد لغز با مولفه راستگرد فعالیت می‌کند، هرچند بخش‌هایی از آن دارای اجزای معکوس نیز هستند که این ترکیب حرکتی باعث تغییرات پیچیده در میدان تنش و فشار آب زیرزمینی رسوبات دشت می‌شود. شواهد زمین‌شناسی نشان می‌دهد که این گسل در گذشته‌های زمین‌شناختی و دوره‌های اخیر زمین‌لرزه‌زا بوده است. مجاورت دشت سلماس با گسل و شکستگی‌های فرعی ناشی از آن می‌تواند مسیر جریان آب زیرزمینی را تغییر داده و نرخ فرونشست را در محدوده‌های نزدیک به گسل افزایش دهد. داده‌های تداخل‌سنجی راداری با روزه مصنوعی نشان می‌دهند که بخش‌های نزدیک به گسل معمولاً نرخ فرونشست بالاتری نسبت به بخش‌های مرکزی یا دورتر دشت دارند. هم‌راستایی جهت شمال باختر جنوب خاورگسل با ساختار رسوبات دشت موجب می‌شود اثرات گسلی و تمرکز فرونشست به صورت نوارهای خطی موازی با گسل مشاهده شود.

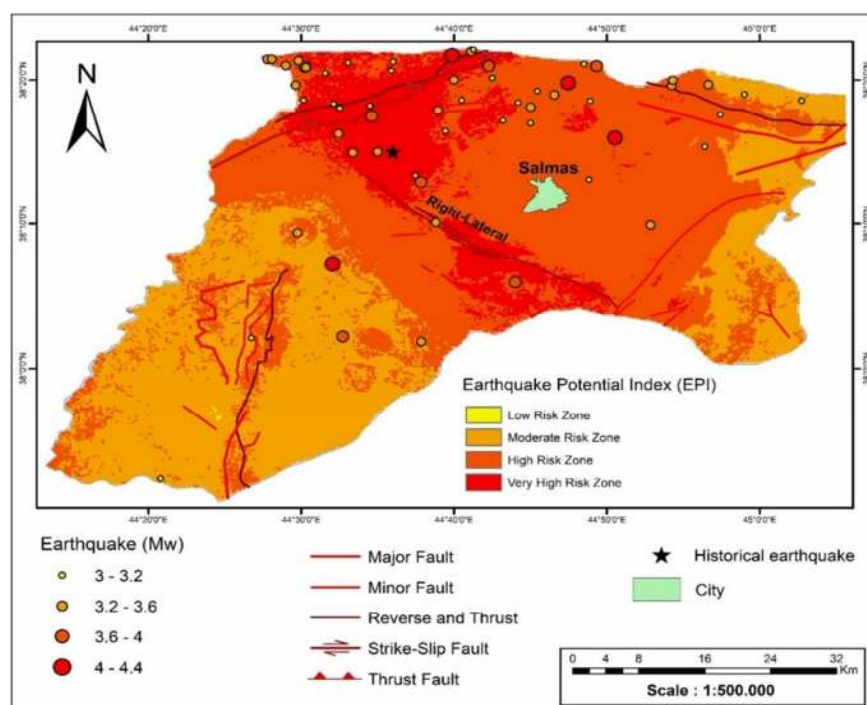
با فاصله به نسبت دورتر از منطقه مورد مطالعه، سامانه گسلی منطقه خوی قرار دارد. این گسل‌ها بیشتر با جهت شمال‌غرب-جنوب‌شرق امتداد یافته‌اند و برخی از آنها دارای جهت شمال-جنوب هستند و طول آنها از چند کیلومتر تا ده‌ها کیلومتر متغیر است. سازوکار حرکتی بیشتر گسل‌های منطقه خوی به صورت امتداد لغز با مولفه شیب‌لغز معکوس می‌باشد. این گسل‌ها در طول تاریخ زمین‌شناسی و دوره‌های اخیر زمین‌لرزه‌زا بوده و قادر به ایجاد

1 Iran land cover map

2 Main Recent Fault

جابجایی‌های ناگهانی سطح زمین هستند. لرزش‌های ناشی از حرکات این گسل‌ها می‌تواند سبب اعمال تغییراتی در نرخ فرونشست در دشت‌های مجاور گردد. داده‌های لرزه‌ای از کاتالوگ زمین‌لرزه‌های مرکز بین‌المللی داده‌های لرزه-ای ۱ در بازه زمانی سال ۱۹۶۵-۲۰۲۴ گردآوری و به‌همراه لایه گسل‌ها و مدل ارتفاع رقومی منطقه در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی ترکیب شدند. شاخص پتانسیل زلزله ۲ محاسبه و نقشه پهنه‌بندی خطر لرزه‌ای تهیه شد. این داده‌ها به‌منظور بررسی همبستگی میان فعالیت‌های تکتونیکی و پدیده فرونشست استفاده شدند (شکل ۴).

بررسی کمی فراوانی آماری زمین‌لرزه‌ها در محدوده مورد مطالعه نشان می‌دهد که از مجموع رخداد‌های اتفاق‌افتاده در محدوده مورد مطالعه، حدود ۵۴٪ زلزله‌ها در بازه بزرگای $M_w = 3.2$ تا ۴٫۰ قرار دارند که بیشترین سهم را به خود اختصاص می‌دهد. زلزله‌های با بزرگای $M_w = 3.0$ تا ۳٫۲ حدود ۱۸٪ از کل رخدادها را تشکیل می‌دهند، درحالی‌که رخداد‌های نسبتاً قوی‌تر با $M_w \geq 4.0$ نیز حدود ۱۸٪ ثبت شده‌اند که بیانگر حضور زلزله‌های متوسط در منطقه است. از نظر مکانی، حدود ۷۲٪ زلزله‌ها یا به‌طور مستقیم بر روی گسل‌های اصلی قرار دارند یا در فاصله نزدیک (کمتر از چند کیلومتر) از آن‌ها رخ داده‌اند و تنها حدود ۲۸٪ در نواحی دورتر از گسل‌ها ثبت شده‌اند. همچنین از نظر پهنه‌بندی لرزه‌ای، بیش از عمده رخدادها در محدوده‌های با پتانسیل زمین‌لرزه زیاد تا بسیار زیاد قرار دارند، درحالی‌که تعداد کمتری از زلزله‌ها در پهنه‌های با خطر متوسط مشاهده می‌شوند. این توزیع آماری نشان می‌دهد که لرزه‌خیزی منطقه به‌شدت تحت تأثیر ساختارهای گسلی فعال بوده و احتمال تداوم رخداد زمین‌لرزه‌های کوچک تا متوسط در آینده بالا است.



شکل ۴) نقشه پتانسیل فعالیت لرزه‌ای به همراه گسل‌های مهم در منطقه، بخش‌های پررنگ مناطق دارای خطر بالای لرزه‌ای را نشان می‌دهد.

تداخل‌سنجی راداری

در این مطالعه، از فن تداخل‌سنجی راداری ماهواره‌ای ۱ برای شناسایی و پایش تغییرات سطحی آهسته مانند فرونشست زمین استفاده شده است. فن تداخل‌سنجی راداری، یکی از پیشرفته‌ترین و دقیق‌ترین روش‌های سنجش-ازدور است که در سال‌های اخیر به‌طور گسترده‌ای توسعه یافته و به‌عنوان روشی کارآمد در زمین‌شناسی، محیط‌زیست و مهندسی کاربرد دارد. این روش بر پایه پردازش داده‌های راداری حاصل از ماهواره‌های مجهز به سیستم رادار با روزه مصنوعی ۲ استوار است که قادر به ارائه اطلاعات سه‌بعدی از سطح زمین با دقت بالا می‌باشد.

در این پژوهش، داده‌های ماهواره سنتینل-۱ به‌عنوان منبع اصلی اطلاعات استفاده شده است سنتینل-۱، ماهواره‌ای فعال متعلق به آژانس فضایی اروپا ۳ است که با استفاده از سنجنده راداری باند سی، تصاویر راداری با قدرت تفکیک حدود ۱۰ متر را در شرایط آب‌وهوایی متنوع و در طول شب و روز ثبت می‌کند. این ماهواره به‌ویژه در حالت اینترفرومتری باند پهن ۴ برای انجام مطالعات تداخل‌سنجی راداری بسیار مناسب است. داده‌های سنتینل-۱ به‌صورت جفت تصاویر ۵ ارائه می‌شوند که شامل اطلاعات دامنه و فاز سیگنال‌های راداری می‌باشند و برای تحلیل‌های تداخل‌سنجی راداری ماهواره‌ای کاربرد دارند.

این مطالعه با وجود ارائه نتایج دقیق و کاربردی در پایش فرونشست، محدودیت‌هایی دارد که باید در تفسیر نتایج مورد توجه قرار گیرد. نخست، پوشش گیاهی مترکم در برخی نواحی می‌تواند باعث کاهش همدوسی سیگنال‌های تداخل‌سنجی راداری با روزه مصنوعی شود و به‌طور موقت دقت اندازه‌گیری جابه‌جایی‌های سطح زمین را کاهش دهد. دوم، تغییرات رطوبت خاک و محتوای آب در لایه‌های سطحی ممکن است بر فاز راداری تأثیرگذار باشد و اثرات جزئی بر تخمین نرخ فرونشست، به‌ویژه در فصول با تغییرات رطوبتی شدید ایجاد کند. سوم، دقت مدل ارتفاع رقومی به‌ویژه در نواحی با ناهمواری‌های کوچک و شیب‌های تند محدود است و می‌تواند بر تصحیح توپوگرافی و به تبع آن بر اینترفروگرام‌ها اثرگذار باشد. چهارم، در این مطالعه به‌دلیل ماهیت محلی و مقیاس محدود دشت سلماس، تصحیحات اتمسفری مبتنی بر مدل‌های جهانی مانند ERA5 یا GACOS اعمال نشده است. این موضوع می‌تواند موجب ورود عدم قطعیت جزئی در تخمین تغییرات سطح زمین شود؛ هرچند انتخاب جفت تصاویر با خط پایه کوتاه، همدوسی بالا و استفاده از فصول خشک تا حد زیادی اثرات اتمسفری را کاهش داده است.

با وجود این محدودیت‌ها، تحلیل‌های انجام‌شده روند کلی فرونشست و تأثیر زمین‌لرزه ۸ بهمن ۱۴۰۱ بر دشت سلماس را به‌صورت معتبر بازتاب می‌دهد و نتایج ارائه‌شده برای شناسایی مناطق آسیب‌پذیر و مدیریت ریسک فرونشست در پهنه‌های لرزه‌خیز قابل اتکا است.

مراحل پردازش داده‌ها

در اولین مرحله به منظور انتخاب تصاویر مناسب و برای کاهش تأثیرات منفی ناشی از شرایط جوی مانند رطوبت و بارش، جفت تصاویر ماهواره‌ای از فصول خشک سال انتخاب شده‌اند. به منظور ارزیابی کیفیت جفت تصاویر، از

1 InSAR

2 Synthetic Aperture Radar (SAR)

3 ESA

4 Interferometric Wide Swath (IW)

5 Single Look Complex

شاخص ضریب همدوسی محاسبه شده^۱ در نرم افزار اسنپ^۲ استفاده شده است که هرچه به عدد یک نزدیک تر باشد، نشان دهنده سازگاری و مناسب بودن تصاویر برای تحلیل تداخل سنجی راداری است.

برای اندازه گیری و ارزیابی فرونشست منطقه دشت سلماس، از ۹ تصویر ماهواره ای سنتینل-۱ استفاده شده است. همه تصاویر در محدوده باند C بوده و با جهت حرکت نزولی ماهواره هم راستا هستند. قطبش تصاویر VV-VH بوده و حالت تصویربرداری ماهواره اینترفرومتری باند پهن می باشد. نوع پردازش تصاویر تصویر تک نمای پیچیده^۳ است. فاصله خط پایه مؤثر بین تصاویر در محدوده ۲۰ تا ۱۵۰ متر قرار دارند که برای حفظ دقت فضایی و کاهش نویز فازی مناسب هستند. با توجه به ۹ تصویر سنتینل-۱، تعداد ۸ اینترفروگرام اصلی ایجاد شده که شامل جفت های قبل و بعد از زلزله ۸ بهمن ۱۴۰۱ می باشند و امکان تحلیل دقیق تغییرات سطح زمین و نرخ فرونشست را فراهم می کنند (جدول ۱).

در این مطالعه، به منظور ارزیابی تغییرات فرونشست قبل و بعد از زمین لرزه ۸ بهمن ۱۴۰۱، از روش های چندزمانه پیشرفته نظیر PS-InSAR یا SBAS استفاده نشده و تحلیل بر پایه اینترفروگرام های حاصل از جفت تصاویر منتخب انجام گرفته است. به منظور کاهش اثرات جوی، راهبرد اصلی پژوهش بر کنترل درون داده ای اثرات اتمسفری استوار بوده است؛ بدین معنا که جفت تصاویر با خط پایه زمانی کوتاه، همدوسی بالا و بیشتر از فصول خشک سال انتخاب شده اند تا تغییرات رطوبت و بخار آب تروپوسفری به حداقل برسد. با توجه به این رویکرد و همچنین ماهیت محلی و مقیاس محدود منطقه مورد مطالعه، استفاده از مدل های تصحیح اتمسفری مبتنی بر داده های بازتحلیل جهانی نظیر ERA5 یا GACOS که دارای تفکیک مکانی در حد چند ده کیلومتر هستند، می تواند خود منجر به ورود عدم قطعیت اضافی در مقیاس دشت سلماس شود. از این رو، به جای اعمال تصحیح های مدل محور، بر انتخاب بهینه جفت تصاویر و ارزیابی ضریب همدوسی تمرکز شده است. این رویکرد در مطالعات مشابه مبتنی بر تداخل سنجی راداری تفاضلی و با بازه زمانی کوتاه نیز به عنوان روشی معتبر برای کاهش اثرات جوی گزارش شده است (لی و همکاران^۴ ۲۰۲۲). بر اساس ویژگی های داده های سنتینل-۱، میزان همدوسی اینترفروگرام ها و مقایسه با مطالعات پیشین مشابه، عدم قطعیت اندازه گیری جابه جایی قائم و نرخ فرونشست در این پژوهش در حدود 3 ± 5 میلی متر در سال برآورد می شود که در تفسیر نتایج لحاظ شده است.

قابل یادآوری است که مشاهدات تداخل سنجی راداری، جابه جایی سطح زمین را در راستای دید سنجنده^۵ اندازه گیری می کنند و این سیگنال می تواند شامل مؤلفه های قائم و افقی باشد. در مناطق لرزه خیز، جابه جایی های افقی ناشی از فعالیت های تکتونیکی ممکن است بر سیگنال LOS تأثیر بگذارند. با این حال، در این مطالعه به دلیل استفاده از داده های یک جهته (مدار نزولی) و تمرکز بر پایش فرونشست تدریجی در محیط آبرفتی کم شیب دشت سلماس و همچنین فاصله دشت سلماس از گسل لرزه زا، فرض شده است که سهم مؤلفه قائم در تغییر شکل غالب است.

برای پردازش اولیه تصاویر ابتدا با استفاده از ابزار اسپلیت^۶، ساب سواس مربوط به منطقه مورد مطالعه انتخاب می شود. سپس با استفاده از داده های اربیت فایل^۷، موقعیت جغرافیایی تصاویر اصلاح شده و دقت مکانی آنها افزایش می یابد.

1 Modeled Coherence

2 Snap

3 SLC (Single Look Complex)

4 Li et al

5 LOS (Line of Sight)

6 Split

7 Orbit File

در ادامه کار به منظور هم‌ترازی تصاویر^۱، تصاویر مرجع^۲ و تابع^۳ به‌گونه‌ای هم‌تراز می‌شوند که هر پیکسل در هر دو تصویر موقعیت مکانی یکسانی را نشان دهد؛ این مرحله ضروری است تا تفاوت فازی ناشی از تغییر موقعیت ژئومتریک کاهش یابد.

جدول (۱) مشخصات تصاویر استفاده برای ارزیابی حرکات پوسته زمین در محدوده مورد مطالعه

باند	پلاریزاسیون	نوع محصول	اینترفروگرام	تاریخ تصویر بعد	تاریخ تصویر قبل	Baseline موثر (متر)
C-Band	VV-VH	SLC	IFG1	2021/07/18	2021/02/12	۴۲
			IFG2	2022/05/14	2021/07/18	۸۵
			IFG3	2022/09/23	2022/05/14	۳۷
			IFG4	2023/01/21	2022/09/23	۵۳
			IFG5	2023/05/21	2023/01/21	۴۸
			IFG6	2023/07/08	2023/05/21	۲۵
			IFG7	2024/05/27	2023/07/08	۱۱۲
			IFG8	2024/06/20	2024/05/27	۲۸

برای ایجاد اینترفروگرام، اختلاف فاز بین دو تصویر رادار روزنه مصنوعی^۴ محاسبه می‌شود. از آنجا که فاز تصاویر تحت تأثیر عوامل مختلفی مانند انحنای زمین، توپوگرافی، شرایط جوی و نویز قرار دارد، فازهای ناشی از مسطح بودن زمین^۵ و توپوگرافی^۶ با استفاده از مدل‌های دقیق ارتفاعی حذف می‌شوند تا فقط تغییرات فاز مربوط به جابه‌جایی سطح زمین باقی بماند. تصاویر رادار روزنه مصنوعی معمولاً با نویزهای مختلفی همراه هستند که دقت تحلیل را کاهش می‌دهد. در این پژوهش، برای کاهش نویز از دستور مالتی لوکینگ^۷ و فیلتر گلدشتاین^۸ استفاده شده است که باعث افزایش وضوح و کیفیت اینترفروگرام می‌شود (شکل ۵الف).

تصاویر SLC ماهواره سنتینل-۱ دارای خطوطی به نام برش^۹ هستند که باید حذف شوند تا تصویر یکپارچه و قابل-تحلیل شود. فاز محاسبه‌شده به‌صورت فاز پیچیده^{۱۰} است که داده‌ها به‌صورت متناوب و محدود به بازه $-\pi$ تا $+\pi$ نمایش داده می‌شوند. برای استخراج تغییرات واقعی فاز، فرآیند باز کردن فاز^{۱۱} انجام می‌شود که فازهای پیچیده را به مقادیر پیوسته و قابل‌تفسیر تبدیل می‌کند. این مرحله برای محاسبه دقیق میزان جابه‌جایی سطح زمین ضروری است (شکل ۵ب).

پس از باز کردن فاز، فازهای پیوسته به مقادیر جابه‌جایی قائم در راستای دید سنجنده^{۱۲} تبدیل می‌شوند که نشان‌دهنده میزان تغییرات ارتفاعی یا نشست زمین است (شکل ۵ج). برای هم‌راستا کردن نقشه جابه‌جایی با سیستم

1 Back Geocoding

2 Master

3 Slave

4 SAR

5 ϕ_{flat}

6 ϕ_{DEM}

7 Multilooking

8 Goldstein

9 Burst

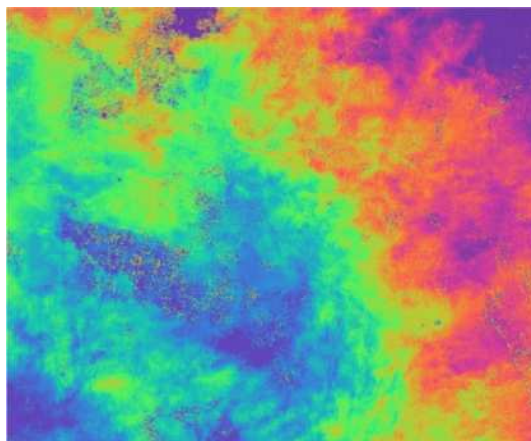
10 Wrapped Phase

11 Unwrapping

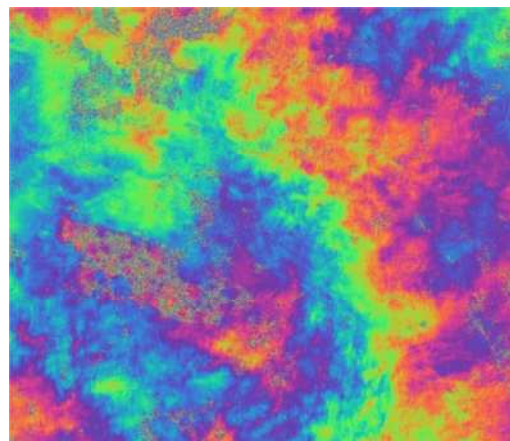
12 Line of Sight

مختصات جغرافیایی و اصلاح خطاهای ناشی از حرکت ماهواره و انحنای زمین، از دستور تصحیح زمین با استفاده از افکت داپلر^۱ استفاده می‌شود (شکل ۵).

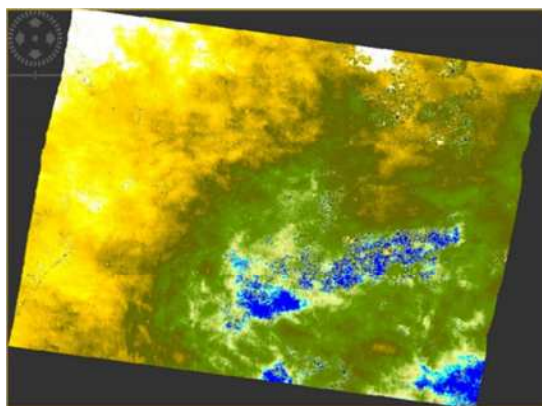
در فرآیند تداخل‌سنجی راداری، انتخاب قطبش مناسب راداری نقش مهمی در دقت داده‌ها دارد. در این مطالعه از قطبش ارسال و دریافت عمودی^۲ استفاده شده است که برای تشخیص جابه‌جایی‌های سطحی ناشی از فرونشست و زلزله مناسب‌تر است. قطبش‌های دیگر مانند ارسال و دریافت افقی^۳، VH و HV نیز کاربردهایی دارند که به‌خصوص در تحلیل پوشش گیاهی و مناطق با ساختار پیچیده به‌کار می‌روند؛ اما برای هدف این پژوهش قطبش VV بهترین نتیجه را به همراه دارد.



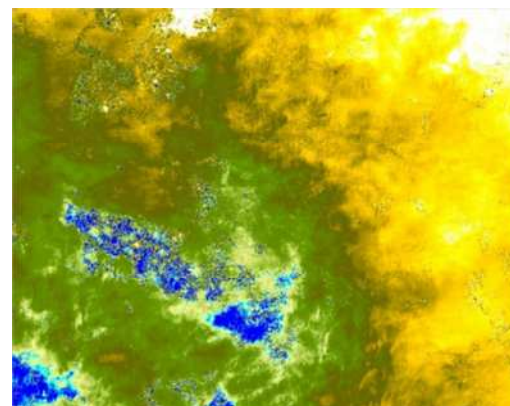
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۵) الف: تاثیر دستور Goldstein Phase filtering روی اینترفروگرام ب: اینترفروگرام ساخته‌شده بعد از عملیات unwrapping ج: تبدیل اینترفروگرام به نقشه جابه‌جایی د: تاثیر دستور Range-Doppler Terrain Correction روی نقشه جابه‌جایی

1 Range-Doppler Terrain Correction

2 VV

3 HH

یافته‌های پژوهش

در این مطالعه، تغییرات فرونشست زمین در دشت‌های تحت تأثیر برداشت آب‌های زیرزمینی و رخداد زمین‌لرزه ۸ بهمن خوی مورد بررسی قرار گرفت. تحلیل‌های زمانی نشان داد که فرونشست زمین به‌شدت با میزان برداشت آب زیرزمینی ارتباط دارد و الگوهای فصلی در این تغییرات نقش مهمی ایفا می‌کنند. در بازه‌های زمانی مختلف، نرخ فرونشست در فصل برداشت آب بیشتر است، درحالی‌که در فصل سرد کاهش می‌یابد. این الگو نشان‌دهنده تأثیر مستقیم فعالیت‌های انسانی بر پویایی‌های زمین‌سطحی است.

نتایج حاصل از داده‌های تداخل‌سنجی راداری در بازه‌های زمانی کوتاه‌مدت و بلندمدت نشان می‌دهد که روند افزایش فرونشست پس از زمین‌لرزه خوی، با وجود وقوع آن در فصل سرد، به شکل قابل‌توجهی تسریع شده است. این موضوع بیانگر تأثیر مستقیم زمین‌لرزه بر تشدید نشست زمین است و اهمیت توجه به اثرات کوتاه‌مدت بلایای طبیعی بر فرونشست زمین را برجسته می‌کند (جدول ۱).

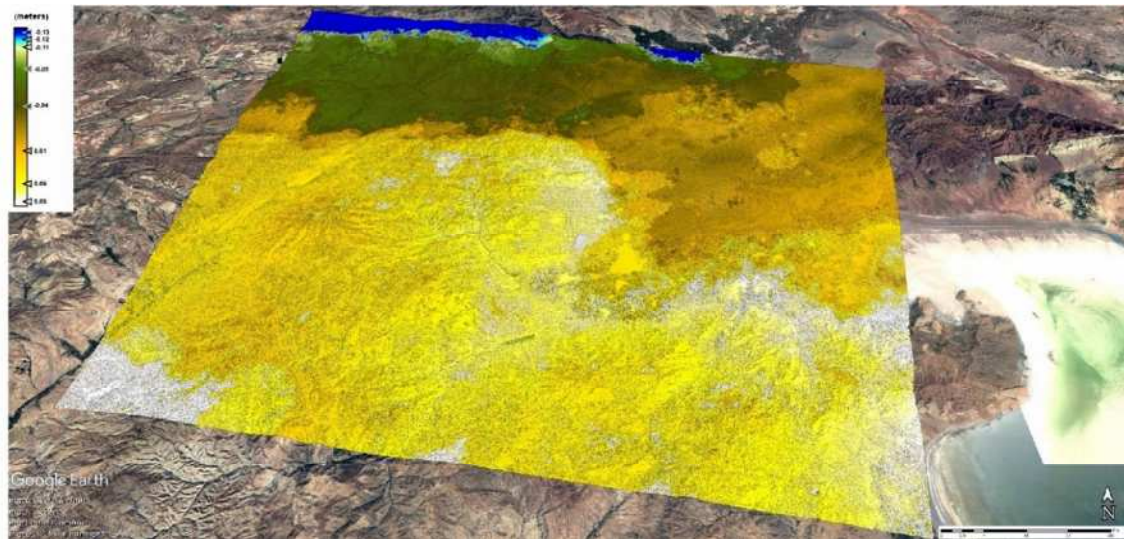
همچنین، نتایج نشان داد که مناطق با برداشت شدید آب زیرزمینی، حساسیت بیشتری نسبت به رخدادهای زمین‌لرزه دارند و میزان نشست در این مناطق به شکل قابل‌توجهی بالاتر است. این یافته‌ها اهمیت پایش مستمر منابع آب زیرزمینی و ارزیابی خطرات مرتبط با فرونشست زمین، به‌ویژه در مناطق با فعالیت لرزه‌ای، را تأکید می‌کند.

تحلیل زمانی

سال ۲۰۲۱ (ژانویه تا ژوئیه): بیشترین نشست در بخش‌های جنوبی و جنوب شرقی دشت، به‌ویژه روی رسوبات آبرفتی و تراس‌های جوان مشاهده شد. نرخ متوسط سالانه نشست حدود ۵٫۲ سانتی‌متر برآورد شد. تحلیل داده‌های ژئومورفولوژیک نشان داد که رسوبات دشت به‌دلیل فشردگی طبیعی، سطح آب زیرزمینی بالا و فعالیت‌های کشاورزی، بیشترین حساسیت را به نشست داشتند. سنگ‌بستر سخت مانند گرانیت‌ها و شیست‌ها به‌طور مستقیم در نشست نقش نداشتند، اما توزیع مکانی جابه‌جایی‌ها را تحت تأثیر قرار دادند.

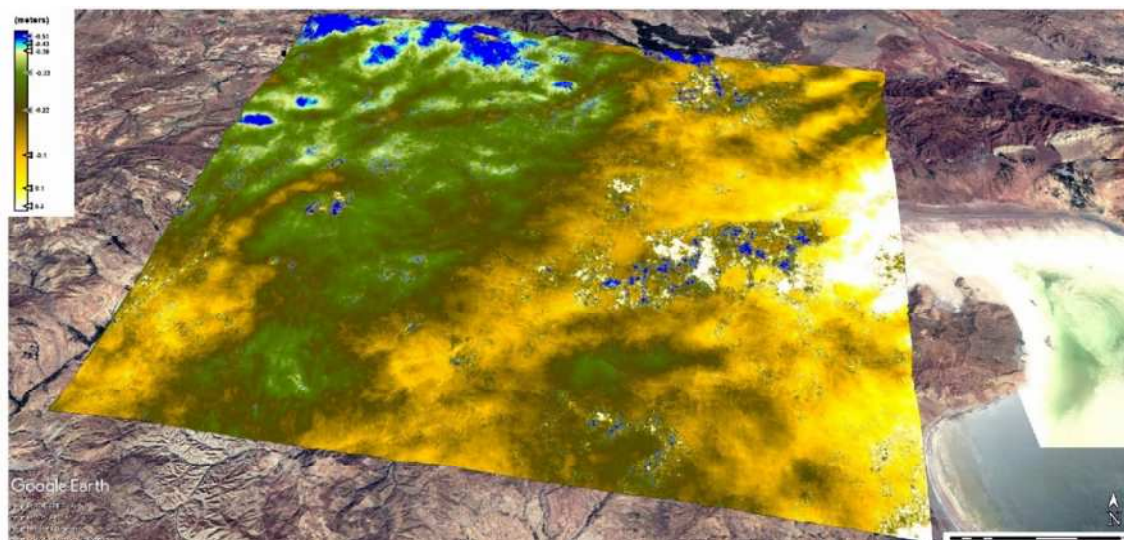
سال ۲۰۲۲ (مه تا سپتامبر): نرخ نشست سالانه کاهش نسبی یافت و به حدود ۴٫۶ سانتی‌متر رسید. بیشترین جابه‌جایی در نواحی مرکزی دشت و حاشیه‌های جنوبی دریاچه ارومیه رخ داد. این کاهش می‌تواند به تغییرات فصلی سطح آب، کاهش برداشت آب زیرزمینی و عوامل اقلیمی نسبت داده شود. تحلیل زمانی نشان داد که بخش‌هایی با تراس‌های آبرفتی، خاک‌های ریزدانه و زهکشی کم، حساسیت بالایی دارند و حتی تغییرات جزئی سطح آب می‌تواند نرخ نشست را تحت تأثیر قرار دهد.

پیش از زلزله ۲۰۲۳ (ژانویه تا مه): نرخ نشست در این بازه زمانی به حدود ۱٫۵ سانتی‌متر در سال کاهش یافت. کاهش نشست به عوامل فصلی، مانند شارژ طبیعی سفره‌های آب زیرزمینی در زمستان و اوایل بهار و کاهش فعالیت کشاورزی مرتبط است. با این حال، مناطق با خاک‌های کم‌ظرفیت آب و تراس‌های آبرفتی همچنان بیشترین آسیب‌پذیری را نشان دادند (شکل ۶).



شکل ۶) نقشه جابه‌جایی مربوط به سال ۲۰۲۳ (قبل از زمین‌لرزه ۸ بهمن خوی)

پس از زلزله ۲۸ ژانویه ۲۰۲۳ (مه تا ژوئیه): پس از وقوع زلزله، افزایش قابل توجهی در نرخ نشست مشاهده شد و به حدود ۱۴,۷ سانتی‌متر در سال رسید. بیشترین تغییرات در مرکز سلماس، حومه شهر و حاشیه شرقی دریاچه ارومیه ثبت شد. این افزایش سریع، بازتاب اثر مستقیم انرژی زلزله بر رسوبات سطحی و زیرسطحی است و شامل تراکم سریع خاک، افزایش فشار منفذی و ایجاد ترک‌ها و لغزش‌های جزئی در رسوبات ریزدانه می‌باشد. تحلیل مکانی نشان داد که مناطق با شیب کم، رسوبات فشرده و زهکشی ضعیف بیشترین آسیب را تجربه کرده‌اند (شکل ۷).



شکل ۷) نقشه جابه‌جایی مربوط به سال ۲۰۲۳ (بعد از زمین‌لرزه ۸ بهمن ۱۴۰۱ خوی)

سال ۲۰۲۴ (مه تا ژوئن): مشاهدات نشان داد که نرخ نشست نسبت به دوره پس از زلزله کاهش جزئی داشته، اما همچنان بالاتر از نرخ‌های قبل از زلزله باقی مانده است. این روند نشان‌دهنده تثبیت نسبی سفره‌های آب زیرزمینی و

کاهش اثرات لرزه‌ای است؛ اما با توجه به وقوع پس لرزه‌های متعدد در منطقه حساسیت مناطق با رسوبات ریزدانه و نسبت به فرونشست همچنان قابل توجه است.

فرونشست زمین در دشت سلماس، الگوی ناهمگن مکانی از خود نشان می‌دهد که این ناهمگنی به‌طور مستقیم تحت تأثیر تغییرات لیتولوژی، ضخامت و نوع رسوبات آبرفتی، شرایط هیدروژئولوژیکی و نزدیکی به ساختارهای تکتونیکی فعال قرار دارد. نتایج تحلیل داده‌های تداخل‌سنجی راداری نشان می‌دهد که شدت فرونشست در سطح دشت یکنواخت نبوده و بیشترین مقادیر نشست به‌صورت موضعی در نواحی کم‌شیب، دارای رسوبات ریزدانه و تراکم‌پذیر و در بخش‌هایی از دشت که هم‌زمان تحت تأثیر افت شدید سطح آب زیرزمینی و تنش‌های لرزه‌ای قرار گرفته‌اند، رخ داده است. از این‌رو، مقادیر ارائه‌شده در این مطالعه، بیانگر بیشینه نرخ فرونشست مشاهده‌شده در بازه‌های زمانی مورد بررسی هستند و لزوماً نماینده میانگین مکانی کل دشت نمی‌باشند. این بیشینه‌ها به‌ویژه پس از رخداد زمین‌لرزه ۸ بهمن ۱۴۰۱ به‌طور چشمگیری افزایش یافته و نشان‌دهنده واکنش سریع و موضعی رسوبات اشباع به لرزش‌های لرزه‌ای است. چنین رفتاری اهمیت توجه به ناهمگنی مکانی فرونشست در تحلیل مخاطرات زمین‌ساختی و برنامه‌ریزی مدیریت پایدار منابع آب و کاربری زمین در دشت‌های لرزه‌خیز را برجسته می‌کند.

جدول ۲) تغییرات نرخ بیشینه فرونشست در سال‌های مورد بررسی در محدوده مورد مطالعه

سال	نرخ بیشینه فرونشست (سانتی‌متر در سال)	نکات مهم و توضیحات
۲۰۲۱	۵,۲	فرونشست پایدار و نسبتاً بالا
۲۰۲۲	۴,۶	کاهش نسبی اما همچنان بالا
۲۰۲۳ قبل زلزله	۱,۵	کاهش قابل توجه
۲۰۲۳ بعد زلزله	۱۴,۷	افزایش شدید به‌دلیل تأثیر مستقیم زمین‌لرزه بر ساختار زمین
۲۰۲۴	۱۲,۵	کاهش نسبی نسبت به سال قبل اما نرخ بحرانی و توزیع گسترده‌تر فرونشست

عوامل کنترل‌کننده فرونشست

تحلیل داده‌های تداخل‌سنجی راداری و نقشه‌های زمین‌شناسی نشان داد که نشست سطح زمین تحت تأثیر چند عامل اصلی است:

ژئولوژی و لیتولوژی: رسوبات آبرفتی و تراس‌های رودخانه‌ای کم‌سخت و فشرده‌پذیر بیشترین نرخ نشست را دارند، درحالی‌که سنگ‌بستر سخت نقش مستقیم کمی دارد؛ اما شکل‌گیری و توزیع مکانی نشست را کنترل می‌کند. هیدروژئولوژی: برداشت شدید آب زیرزمینی، کاهش سطح ایستابی و تغییر فشار منفذی از عوامل اصلی افزایش نشست هستند.

کاربری زمین: مناطق کشاورزی، تالابی و اراضی با زهکشی ضعیف حساسیت بالاتری نسبت به نشست نشان می‌دهند. ویژگی‌های خاک: خاک‌های ریزدانه، با ظرفیت جذب آب بالا و تراکم‌پذیری زیاد، بیشترین تغییرات سطحی را تجربه می‌کنند.

فعالیت‌های لرزه‌ای و تکتونیکی: زلزله ۲۸ ژانویه ۲۰۲۳ نشان داد که رسوبات سطحی و زیرسطحی حتی در نواحی پایدارتر نیز می‌توانند دچار تغییرات سریع شوند و نقش گسل‌های فعال در تشدید نشست غیرقابل انکار است.

نتایج و بحث

نتایج تحلیل داده‌های تداخل‌سنجی راداری نشان می‌دهد که فرونشست در منطقه مورد مطالعه تحت تأثیر ترکیبی از عوامل زمین‌شناسی، هیدرولوژیکی و زمین‌لرزه‌ای قرار دارد. با بررسی داده‌ها در بازه‌های زمانی مختلف، روندهای مشخصی از فرونشست مشاهده شد که با فصل‌های برداشت آب‌های زیرزمینی ارتباط مستقیم دارد. بیشترین نرخ فرونشست در فصل گرم و برداشت شدید آب‌های زیرزمینی ثبت شد و در فصل سرد، به دلیل کاهش برداشت و افزایش تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی، میزان فرونشست کاهش می‌یابد. این موضوع نشان می‌دهد که مدیریت منابع آب زیرزمینی نقش تعیین‌کننده‌ای در کنترل فرونشست دارد.

با توجه به رخداد زمین‌لرزه خوی در فصل سرد، مشاهده شد که نرخ فرونشست افزایش قابل‌توجهی پیدا کرده است که نشان‌دهنده تأثیر مستقیم زلزله بر تغییر شکل سطح زمین است. این افزایش نرخ فرونشست علی‌رغم کاهش برداشت آب‌های زیرزمینی در فصل سرد، تأثیر حرکات تکتونیکی و جابه‌جایی لایه‌های زمین را برجسته می‌کند. بنابراین، ترکیب عوامل انسانی و طبیعی منجر به تغییرات پیچیده در نرخ فرونشست می‌شود.

تحلیل مکانی فرونشست نشان داد که ویژگی‌های زمین‌شناسی و توپوگرافی منطقه نقش مهمی در شدت و پراکندگی فرونشست دارد. مناطق با شیب کمتر و زمین‌های رسوبی، فرونشست بیشتری را تجربه کردند، درحالی‌که شیب‌های تندتر و سنگ‌بسترهای مقاوم‌تر نرخ فرونشست پایین‌تری دارند. علاوه بر این، جهت شیب و ساختار گسل‌های منطقه نیز بر پراکندگی فرونشست تأثیر دارد؛ به‌طوری‌که فرونشست در جهت گسله‌های فعال و در امتداد روندهای رسوبی غالب بیشتر است.

نتایج کمی نشان می‌دهد که متوسط نرخ فرونشست در بازه زمانی یک سال حدود ۴ میلی‌متر در ماه است که در فصل سرد به‌علت کم شدن برداشت کاهش می‌یابد. این مقادیر به وضوح ارتباط بین مدیریت منابع آب نرخ فرونشست را نشان می‌دهد؛ اما نکته قابل‌توجه آن است که حفره‌های خالی‌شده از آب که در حالت ایستا پایدار هست، در اثر لرزش‌های ناشی از زمین‌لرزه فرو ریخته و می‌تواند به‌صورت ناگهانی به بیش از ۴ برابر مقدار میانگین سالانه افزایش دهد و موجب ایجاد خسارت به سازه‌ها و زمین‌های کشاورزی گردد.

نتایج این مطالعه در زمینه فرونشست دشت سلماس با استفاده از داده‌های تداخل‌سنجی راداری و تحلیل زمانی با مطالعات پیشین در این منطقه و سایر دشت‌های شمال‌غرب ایران همخوانی دارد و در عین حال اطلاعات جدید و مهمی ارائه می‌کند. یافته‌ها نشان می‌دهد که میانگین نرخ فرونشست در سال‌های ۲۰۲۱ و ۲۰۲۲ (حدود ۵٫۲ و ۴٫۶ سانتی‌متر در سال) با گزارش‌های پیشین در دشت سلماس که نرخ سالانه فرونشست را حدود ۵ سانتی‌متر برآورد کرده‌اند (شهبازی و همکاران ۲۰۲۲)^۱، مطابقت دارد و اثر بلندمدت برداشت آب‌های زیرزمینی بر نشست زمین را نشان می‌دهد. با این حال، تحلیل پس از زمین‌لرزه ۸ بهمن ۱۴۰۱ نشان داد که نرخ فرونشست به حدود ۱۴٫۷ سانتی‌متر در سال افزایش یافته است؛ رقمی که به‌طور قابل‌توجهی بالاتر از نرخ‌های گزارش‌شده در مطالعات قبلی است و تأثیر مستقیم فعالیت لرزه‌ای بر تغییرات سطح زمین را برجسته می‌کند. علاوه بر مطالعه‌هایی که بر فرونشست تدریجی ناشی از افت آب زیرزمینی تمرکز داشته‌اند، سایر تحقیقات مبتنی بر تداخل‌سنجی راداری در دشت‌های شمال‌غرب ایران، مانند ارزیابی فرونشست دشت اردبیل، نیز نشان‌دهنده فرونشست قابل‌توجه ناشی از کاهش سطح آب و شرایط اقلیمی هستند و اهمیت بررسی ترکیبی عوامل هیدرولوژیکی و زمین‌ساختی را تأکید

می‌کنند. تحلیل مکانی این پژوهش نشان داد که الگوی فرونشست با ویژگی‌های زمین‌شناسی، رسوبات نرم آبرفتی و نزدیکی به گسل‌های فعال هم‌راستا است؛ مشابه آنچه در مطالعات دیگر دشت‌های ایران با فن تداخل‌سنجی راداری مشاهده شده است. بنابراین، داده‌های این مطالعه نه تنها نتایج قبلی را تأیید می‌کنند، بلکه اثرات کوتاه‌مدت زمین‌لرزه در تشدید فرونشست را به‌صورت کمی نشان داده و اهمیت ترکیب داده‌های ماهواره‌ای با داده‌های زمین‌شناسی و هیدرولوژیکی برای مدیریت پایدار منابع آب و کاهش مخاطرات زمین‌ساختی را برجسته می‌سازند.

نتایج این مطالعه دارای کاربردهای مهمی در مدیریت زمین و منابع آب در مناطق لرزه‌خیز است. با استفاده از داده‌های تداخل‌سنجی راداری می‌توان مناطق حساس به فرونشست را با دقت میلی‌متری شناسایی کرد و نقش ترکیبی عوامل انسانی، از جمله برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی و عوامل لرزه‌ای در ایجاد تغییرات سطح زمین را تحلیل نمود. این اطلاعات می‌تواند به برنامه‌ریزی مدیریت پایدار منابع آب، پیش‌بینی و کاهش ریسک‌های زیربنایی و شهری و طراحی سازوکارهای حفاظتی در برابر فرونشست کمک کند. علاوه بر این، ادغام داده‌های تداخل‌سنجی راداری با مدل‌های هیدروژئولوژیکی و مشاهدات سامانه موقعیت‌یاب جهانی^۱ امکان بهبود پیش‌بینی روند فرونشست و ارائه راه‌کارهای مدیریت هوشمندانه برای کاهش خطرات ناشی از تغییرات ناگهانی سطح زمین در دشت سلماس و سایر مناطق مشابه را فراهم می‌سازد.

نتیجه‌گیری

دشت سلماس در بازه زمانی ۲۰۲۱ تا ۲۰۲۴ نوسانات قابل‌توجهی در نرخ نشست نشان داده است که ناشی از ترکیب عوامل طبیعی، انسانی و لرزه‌ای می‌باشد؛ به‌طوری‌که نرخ فرونشست در دوره‌های برداشت شدید آب‌های زیرزمینی به حدود ۴٫۶ تا ۵٫۲ سانتی‌متر در سال رسیده و در دوره‌های کاهش برداشت و تغذیه طبیعی آبخوان به حدود ۱٫۵ سانتی‌متر در سال کاهش یافته است.

داده‌های تداخل‌سنجی راداری امکان تحلیل میلی‌متری تغییرات سطح زمین و شناسایی کمّی مناطق آسیب‌پذیر را فراهم کرده و نشان می‌دهد که فرونشست در سطح دشت به‌صورت ناهمگن توزیع شده و بیشینه مقادیر آن تحت تأثیر عواملی چون تغییرات لیتولوژی، ضخامت و نوع رسوبات آبرفتی، شرایط هیدروژئولوژیکی و نزدیکی به ساختارهای تکتونیکی فعال قرار دارد.

رخداد زمین‌لرزه ژانویه-فوریه ۲۰۲۳ موجب افزایش ناگهانی و شدید فرونشست تا بیش از ۱۴٫۷ سانتی‌متر در سال شد که این مقدار بیش از سه برابر نرخ فرونشست در دوره‌های غیرلرزه‌ای بوده و حساسیت بالای رسوبات ریزدانه، اشباع و کم‌شیب را به تحریک‌های لرزه‌ای برجسته می‌کند.

بر این اساس، مدیریت منابع آب زیرزمینی از طریق کنترل برداشتها و جلوگیری از افت‌های شدید سطح ایستابی، می‌تواند به‌صورت مستقیم موجب کاهش نرخ پایه فرونشست و محدود شدن دامنه افزایش ناگهانی نشست ناشی از رخدادهای لرزه‌ای گردد؛ موضوعی که به‌طور کمّی در نتایج این مطالعه قابل‌مشاهده است.

¹ GPS

در نهایت، نتایج نشان می‌دهد که مناطقی با پتانسیل فرونشست بالا، در صورت وقوع لرزش‌های لرزه‌ای، مستعد بروز فرونشست ناگهانی و چندین برابر نرخ متوسط سالانه هستند که این موضوع لزوم توجه هم‌زمان به مدیریت آبخوان و مخاطرات لرزه‌ای را دوچندان می‌کند.

تقدیر و تشکر (حمایت مالی یا معنوی سازمانی)

این پژوهش در قالب پایان‌نامه کارشناسی ارشد در دانشگاه ارومیه انجام شده است. نویسندگان مراتب تشکر و قدردانی خود را از معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه ارومیه به جهت زمینه‌سازی انجام این پژوهش اعلام می‌دارند.

منابع

- فرزین‌کیا، ربابه؛ زنگنه‌اسدی، محمدعلی؛ امیراحمدی، ابوالقاسم؛ زندی، رحمان. (۱۳۹۸). فعالیت‌های تکتونیکی و تأثیر آن در فرونشست زمین در حوضه آبریز دشت جوبین: هیدروژئومورفولوژی. هیدروژئومورفولوژی، ۶(۲۰)، صص: ۱۶۵-۱۸۵.
- شفیعی، نجمه؛ مختاری، لیلاگلی؛ امیراحمدی، ابوالقاسم؛ زندی، رحمان. (۱۴۰۰). بررسی فرونشست آبخوان دشت نورآباد با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری. ژورنال ژئومورفولوژی و محیط‌زیست ایران، مقاله پژوهشی. <https://doi.org/10.22034/gmpj.2020.106424>.
- رجبی، معصومه؛ روستایی، شهرام؛ مطاعی، سارا. (۱۴۰۲). ارزیابی سری زمانی فرونشست زمین در دشت کرمانشاه با استفاده از تکنیک InSAR. پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۵۵(۱)، صص: ۱۹-۳۷.
- امیراحمدی، ابوالقاسم؛ شفیع، نجمه؛ زندی، رحمان. (۱۴۰۰). تحلیل ارتباط افت سطح آب زیرزمینی و فرونشست زمین با استفاده از مدل‌های فضایی: مطالعه موردی آبخوان نورآباد ممسنی. نشریه جغرافیا و برنامه‌ریزی، ۲۵(۷۶)، صص: ۱۵۹-۱۷۱.
- Behyari, M., et al. (2018). "Structural control on the Salmas geothermal region, northwest Iran, from fractal analysis and paleostress data." *Acta Geologica Sinica-English Edition* 92(5): 1728-1738. DOI: 10.1111/1755-6724.13673
- Berberian, M. and J. Tchalenko (1976). "Field study and documentation of the 1930 Salmas (Shahpur-Azarbaidjan) earthquake." *Geol. Surv. Iran* 39: 271-342.
- Dehghani, M., et al. (2009). "InSAR monitoring of progressive land subsidence in Neyshabour, northeast Iran." *Geophysical Journal International* 178(1): 47-56. DOI: 10.1111/j.1365-246x.2009.04135.x
- Hejmanowski, R., et al. (2019). "An analysis applying InSAR of subsidence caused by nearby mining-induced earthquakes." *Geosciences* 9(12): 490. DOI: 10.3390/geosciences9120490
- Herrera-García, G., et al. (2021). "Mapping the global threat of land subsidence." *Science* 371(6524): 34-36. DOI: 10.4211/hs.dc7c5bfb3a86479b889d3b30ab0e4ef7
- Imakiire, T. and M. Koarai (2012). "Wide-area land subsidence caused by the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake." *Soils and Foundations* 52(5): 842-855. DOI: 10.1016/j.sandf.2012.11.007
- Khodabandeh, A., et al. (2002). "Geological map of Iran, 1: 100,000 series sheet Salmas." *Geological Survey of Iran*, Tehran.
- Li, X., Wang, X., and Chen, Y., 2022, InSAR atmospheric delay correction model integrated from multi-source data based on VCE: Remote Sensing, v. 14, no. 17, p. 4329.
- Malik, K., et al. (2022). "Estimation of ground subsidence of New Delhi, India using PS-InSAR technique and Multi-sensor Radar data." *Advances in Space Research* 69(4): 1863-1882. DOI: 10.1016/j.asr.2021.08.032
- Massonnet, D. and K. L. Feigl (1998). "Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface." *Reviews of Geophysics* 36(4): 441-500. DOI: 10.1029/97rg03139
- Prestininzi, A. and R. Romeo (2000). "Earthquake-induced ground failures in Italy." *Engineering Geology* 58(3-4): 387-397. DOI: 10.1016/s0013-7952(00)00044-2
- Samieie-Esfahany, S., et al. (2010). On the effect of horizontal deformation on InSAR subsidence estimates. Fringe 2009, Proceedings of the workshop held 30 November-4 December 2009, in Frascati, Italy. Edited by H. Lacoste. ESA-SP Vol. 677. ISBN: 978-92-9221-241-4, 2010, id. 39.
- Sedighi, M., et al. (2010). "Subsidence detection in Salmas area using InSAR and geodetic techniques." *Geospatial Eng J* 1(4): 25-33.
- Shahbazi, S., et al. (2022). "Constraints on the hydrogeological properties and land subsidence through GNSS and InSAR measurements and well data in Salmas plain, northwest of Urmia Lake, Iran." *Hydrogeology Journal* 30(2): 533-555. DOI: 10.1007/s10040-021-02416-x
- Solano-Rojas, D., et al. (2020). "Remotely triggered subsidence acceleration in Mexico City induced by the September 2017 M w 7.1 Puebla and the M w 8.2 Tehuantepec September 2017 earthquakes." *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences* 382: 683-687. DOI: 10.5194/piahs-382-683-2020

- Taghipour, K., et al. (2018). "Evidence for distributed active strike-slip faulting in NW Iran: The Maragheh and Salmas fault zones." *Tectonophysics* **742**: 15-33. DOI: 10.1016/j.tecto.2018.05.022
- Wu, P. C., et al. (2022). "Subsidence in coastal cities throughout the world observed by InSAR." *Geophysical Research Letters* **49**(7): e2022GL098477. DOI: 10.1029/2022gl098477
- Zhang, Z., et al. (2023). "Monitoring and analysis of ground subsidence in Shanghai based on PS-InSAR and SBAS-InSAR technologies." *Scientific Reports* **13**(1): 8031. DOI: 10.22541/au.166831755.54665841/v1.

Integrated Water and Coastal Governance: A Comparative Study of Sustainable Policies in Leading Coastal Countries

Fatemeh Khajedad¹, Masoud Dehghani², NourMohammad Yghoubi^{3*} 

1. PhD Candidate, Faculty of Economics and Administrative Sciences, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

2. Assistant Professor, Department of Management, Faculty of Literature and Humanities, Velayat University, Iranshahr, Iran

3. **Corresponding Author**, Professor of Management, Faculty of Economics and Administrative Sciences, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

Email: yaghoubi@mgmt.usb.ac.ir

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6808-0594>

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article Article history: Received: 26 February 2026 Revised: 07 June 2026 Accepted: 25 June 2026 Published: 22 December 2026 Keywords: Water Governance; Integrated Water Resources Management (IWRM); Coastal Zone Management; Sustainable Policy-Making; Water Resource Resilience; Australia; The Netherlands; Singapore.	Sustainable management of water resources and coastal zones under intensifying climate change, population growth, and increasing developmental pressures requires the establishment of integrated and adaptive governance systems capable of simultaneously managing the interactions among hydrological, ecological, social, and institutional dimensions. This study aims to comparatively analyze integrated water-coastal governance models in three leading countries: Australia, the Netherlands, and Singapore. The research adopts a qualitative approach based on comparative policy and document analysis. Data were collected from peer-reviewed scientific publications, national policy documents, reports of international organizations, and official water governance sources, and were examined through comparative analysis and data triangulation. The findings reveal that Australia, through basin-oriented governance, participatory mechanisms, and adaptive management; the Netherlands, through multi-level governance, spatial planning, and nature-based solutions; and Singapore, through institutional integration, technological innovation, and full-cycle water management, have developed distinct pathways for enhancing socio-ecological resilience and achieving integrated water and coastal governance. The results further indicate that the effectiveness of governance arrangements is closely associated with the nature of dominant risks. Rapid-onset hazards, such as flooding and sea-level rise, require more centralized coordination mechanisms, whereas slow-onset challenges, including chronic water scarcity, demand participatory, learning-oriented, and adaptive governance approaches. Overall, the synergy among institutional structures, policy instruments, technological innovations, and stakeholder participation emerges as a critical factor in achieving sustainable water-coastal governance and strengthening socio-ecological resilience. The findings provide valuable insights for the design and contextual adaptation of integrated water and coastal governance frameworks in maritime countries, particularly Iran.

How to Cite: Khajedad, F. , Dehghani, M. and Yghoubi, N. (2026). Integrated Water and Coastal Governance: A Comparative Study of Sustainable Policies in Leading Coastal Countries. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 15 (50), 157-188.



© The Author/Authors

DOI: 10.22111/jneh.2026.54958.2162

Publisher: University of Sistan and Baluchestan

EXTENDED ABSTRACT

INTRODUCTION

In recent decades, water has been recognized as a core component of socio-ecological systems that support food security, public health, economic development, and environmental resilience. However, climate change, population growth, and increasing extreme events have significantly challenged the effectiveness of traditional, sectoral, and engineering-based water management approaches, which fail to capture the complex interactions among hydrological, institutional, and social systems (Everard, 2019; Morante et al., 2025). As a result, the concept of water governance has emerged, shifting the focus from resource control to decision-making processes, institutional coordination, and stakeholder participation (Montenegro & Hack, 2020). In parallel, fragmentation among institutions has been identified as a key barrier to effective governance, reducing system-wide resilience (Pahl-Wostl et al., 2023). To address this, hybrid governance approaches combining hierarchical, market-based, and network mechanisms have been proposed to enhance adaptability under uncertainty (Pahl-Wostl, 2021; Djalante et al., 2011). These challenges are more pronounced in maritime countries, where inland water systems and coastal zones are closely interlinked but often managed separately, leading to inefficiencies and reduced socio-ecological resilience. Despite growing attention to integrated water resources management and coastal governance, limited research has examined their combined institutional integration in a comparative framework. Accordingly, this study analyzes the experiences of Australia, the Netherlands, and Singapore to identify key institutional and policy mechanisms that enable integrated water–coastal governance and enhance socio-ecological resilience.

DATA AND METHODOLOGY

This study adopts an applied, qualitative, and descriptive–analytical research design based on comparative policy analysis. Data were collected through systematic document analysis of peer-reviewed journal articles, national policy documents, official reports, and publications from international organizations, including UN-Water and OECD. Sources published between 2010 and 2025 were prioritized to ensure scientific relevance and policy currency. Case selection followed a purposive theoretical sampling strategy. Australia, the Netherlands, and Singapore were selected due to their internationally recognized leadership in water and coastal governance, diversity of institutional arrangements (federal, network-based, and centralized systems), and availability of reliable policy documentation. Data analysis was organized around four analytical dimensions: governance structures and institutional arrangements, policy instruments and regulatory frameworks, stakeholder participation mechanisms, and technological and institutional innovations. To enhance analytical rigor, a data triangulation strategy was employed by cross-validating findings across scientific literature, national policy documents, and international reports. Comparative analysis focused on identifying convergent and divergent governance patterns, adaptive governance mechanisms, and transferable policy lessons relevant to strengthening integrated water–coastal governance and socio-ecological resilience in maritime countries, particularly Iran.

RESULTS AND DISCUSSION

Findings indicate that water–coastal governance cannot be understood solely through sectoral water management approaches, but must be framed within socio-ecological systems where institutional structures, territorial development patterns, and climatic uncertainties jointly shape governance outcomes. Comparative analysis shows that Australia, the Netherlands, and Singapore have each developed distinct but converging governance trajectories toward integrated and adaptive water–coastal management. Australia’s governance model is primarily characterized by basin-scale, adaptive, and market-oriented water allocation systems, where participatory mechanisms and demand

management play a central role in addressing structural water scarcity (Alexandra, 2018; Pahl-Wostl, 2021). In contrast, the Netherlands has developed a multi-level governance system based on long-term spatial planning and nature-based solutions, enabling integration between river basin management and coastal flood risk reduction (de Bruin, 2024; Heel, 2025). Singapore represents a highly centralized and technology-driven system in which water supply, urban development, and coastal infrastructure are fully integrated through engineered and closed-loop water systems (Cui et al., 2021; Usher, 2024).

Despite these differences, all three cases demonstrate that institutional coordination and policy integration are more decisive for resilience than natural water endowment. The interaction between governance structure and dominant hazard type further shapes institutional design: decentralized and participatory systems are more effective under chronic scarcity conditions, while centralized and coordinated systems are better suited for acute flood and sea-level rise risks. Overall, the findings highlight the emergence of hybrid governance arrangements combining hierarchical, market-based, and networked instruments as the most effective approach for managing complex water-coastal socio-ecological systems (Pahl-Wostl, 2021; Djalante et al., 2011).

CONCLUSION

This study confirms that successful water-coastal governance requires a multi-level, adaptive approach combining institutional capacity, policy integration, stakeholder engagement, and technological innovation. Australia, the Netherlands, and Singapore exemplify distinct yet convergent pathways to enhance socio-ecological resilience. The proposed conceptual framework provides actionable insights for maritime countries seeking to integrate inland and coastal governance, strengthen resilience, and support sustainable policy implementation under changing climatic and socio-economic conditions.

REFERENCES

References [in English]

- Alexandra, J. (2018). Evolving governance and contested water reforms in Australia's Murray-Darling Basin. *Water*, 10(2), 113.
- Cui, M., Ferreira, F., Fung, T. K., & Matos, J. S. (2021). Tale of two cities: How nature-based solutions help create adaptive and resilient urban water management practices in Singapore and Lisbon. *Sustainability*, 13(18), 10427.
- Djalante, R., Holley, C., & Thomalla, F. (2011). Adaptive governance and managing resilience to natural hazards. *International Journal of Disaster Risk Science*, 2(4), 1-14.
- de Bruin, K. (2024). Water Resilience for Economic Resilience in the Netherlands: From Floods to Drought. *Managing Water for Economic Resilience: De-risking Is Not Enough*, 78.
- Everard, M. (2019). A socio-ecological framework supporting catchment-scale water resource stewardship. *Environmental Science & Policy*, 91, 50-59.
- Heel, R. V. (2025). *Systems Thinking in Water Governance: The Thematic and Spatial Integration of Water-Related Challenges on a Regional Scale* (Master's thesis).
- Morante, M. C. D., Casas, A. F., & Rodríguez, C. M. (2025). Adaptive Water Management from a Socio-Ecological Perspective: A Systematic Review of Co-Learning Strategies and Traditional Knowledge. *Sustainability*, 17(21), 9597.
- Montenegro, L., & Hack, J. (2020). A socio-ecological system analysis of multilevel water governance in Nicaragua. *Water*, 12(6), 1676.
- Pahl-Wostl, C., Lukat, E., Stein, U., Troeltzsch, J., & Yousefi, A. (2023). Improving the socio-ecological fit in water governance by enhancing coordination of ecosystem services used. *Environmental Science & Policy*, 139, 11-21.
- Pahl-Wostl, C. (2021). Adaptive and sustainable water management: from improved conceptual foundations to transformative change. In *Global water resources* (pp. 175-193). Routledge.
- Usher, M. (2024). Territory, hydraulics, biopolitics: Internal colonization through urban catchment management in Singapore. *Territory, Politics, Governance*, 12(6), 846-865.

مجله علمی پژوهشی مخاطرات محیط طبیعی، دوره ۱۵، شماره ۵۰، شماره پیاپی ۰۴، دی ۱۴۰۵

حکمرانی یکپارچه آب و سواحل: مطالعه تطبیقی سیاست‌های پایدار در کشورهای پیشرو ساحلی

فاطمه خواجه داد^۱، مسعود دهقانی^۲، نورمحمد یعقوبی^{۳*} 

۱. دانشجوی دکتری، دانشکده اقتصاد و علوم اداری، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

۲. استادیار، گروه مدیریت، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه ولایت، ایرانشهر، ایران

۳. استاد مدیریت، دانشکده اقتصاد و علوم اداری، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران (نویسنده مسئول)

ایمیل: yaghoubi@mgmt.usb.ac.ir | ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6808-0594>

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۲/۰۷ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۵/۰۳/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۰۴ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۱۰/۰۱ واژه‌های کلیدی: حکمرانی آب، مدیریت یکپارچه منابع آب، مدیریت مناطق ساحلی، سیاست‌گذاری پایدار، تاب‌آوری منابع آب، استرالیا، هلند، سنگاپور.	مدیریت پایدار منابع آب و نواحی ساحلی در شرایط تشدید تغییرات اقلیمی، رشد جمعیت و افزایش فشارهای توسعه‌ای، مستلزم استقرار نظام‌های حکمرانی یکپارچه و تطبیقی است که بتوانند تعامل میان ابعاد هیدرولوژیک، اکولوژیک، اجتماعی و نهادی را به‌صورت هم‌زمان مدیریت کنند. این پژوهش با هدف تحلیل تطبیقی الگوهای حکمرانی یکپارچه آب و سواحل در سه کشور پیشرو شامل استرالیا، هلند و سنگاپور انجام شده است. این پژوهش از نظر ماهیت کیفی و از حیث روش، مبتنی بر مطالعه تطبیقی اسناد و سیاست‌ها است. داده‌ها از طریق بررسی مقالات علمی، اسناد سیاستی ملی، گزارش‌های سازمان‌های بین‌المللی و منابع رسمی حکمرانی آب گردآوری و با بهره‌گیری از تحلیل تطبیقی و مثلث‌سازی داده‌ها مورد ارزیابی قرار گرفتند. یافته‌ها نشان می‌دهد که استرالیا با تکیه بر حکمرانی حوضه‌محور، سازوکارهای مشارکتی و مدیریت تطبیقی، هلند با حکمرانی چندسطحی، برنامه‌ریزی فضایی و راه‌کارهای مبتنی بر طبیعت و سنگاپور با یکپارچگی نهادی، نوآوری فناورانه و مدیریت چرخه کامل آب، مسیرهای متفاوتی برای ارتقای تاب‌آوری اجتماعی-اکولوژیک و یکپارچگی مدیریت آب و سواحل توسعه داده‌اند. نتایج همچنین نشان می‌دهد که اثربخشی الگوهای حکمرانی به ماهیت مخاطرات غالب وابسته است؛ به‌گونه‌ای که مخاطرات ناگهانی نظیر سیلاب و افزایش سطح دریا نیازمند هماهنگی متمرکزتر و مخاطرات تدریجی نظیر کم‌آبی مزمن مستلزم سازوکارهای مشارکتی و یادگیرنده هستند. در مجموع، هم‌افزایی میان ساختارهای نهادی، ابزارهای سیاستی، نوآوری‌های فناورانه و مشارکت ذی‌نفعان، عامل کلیدی موفقیت در حکمرانی پایدار آب-ساحل و تقویت تاب‌آوری نظام‌های اجتماعی-اکولوژیک محسوب می‌شود. یافته‌های این پژوهش می‌تواند مبنایی برای طراحی و بومی‌سازی چارچوب‌های حکمرانی یکپارچه آب و سواحل در کشورهای دریاوار، به‌ویژه ایران، فراهم آورد.

استناد: خواجه داد، فاطمه، دهقانی، مسعود و یعقوبی، نورمحمد. (۱۴۰۵). حکمرانی یکپارچه آب و سواحل: مطالعه تطبیقی سیاست‌های پایدار در کشورهای پیشرو ساحلی. *مخاطرات محیط طبیعی*، ۱۵ (۵۰)، ۱۵۷-۱۸۸.

ناشر: دانشگاه سیستان و بلوچستان

© نویسنده/ نویسندگان

DOI: 10.22111/jneh.2026.54958.2162



مقدمه

در دهه‌های اخیر، آب فراتر از یک منبع فیزیکی یا نهاده تولید، به‌عنوان یکی از مؤلفه‌های بنیادین نظام‌های اجتماعی-اکولوژیک شناخته شده است؛ نظام‌هایی که کارکردهای حیاتی نظیر امنیت غذایی، سلامت عمومی، توسعه اقتصادی و تاب‌آوری زیست‌محیطی را شکل می‌دهند (اکبری و همکاران، ۱۳۹۸). با این حال، افزایش فشارهای انسانی و تشدید تغییرات اقلیمی - از جمله رشد جمعیت، تغییر الگوهای مصرف و افزایش فراوانی رخداد‌های حادی - ظرفیت این نظام‌ها را برای مدیریت پایدار منابع آب با چالش‌های جدی مواجه ساخته است. شواهد پژوهشی نشان می‌دهد که رویکردهای سنتی مدیریت آب که بیشتر ماهیتی خطی، فنی-مهندسی و بخشی داشته‌اند، قادر به پاسخگویی به پیچیدگی‌ها و پویایی‌های غیرخطی سیستم‌های اجتماعی-اکولوژیکی^۱ نیستند؛ زیرا تعاملات میان ابعاد هیدرولوژیکی، نهادی و اجتماعی را به‌طور نظام‌مند در نظر نمی‌گیرند (Everard, 2019; Morante et al, 2025). در نتیجه، ناکارآمدی این رویکردها زمینه‌ساز ظهور پارادایم نوین «حکمرانی آب» شده است؛ پارادایمی که تمرکز خود را از کنترل صرف منابع به فرآیندهای تصمیم‌گیری، توزیع قدرت، مشارکت ذی‌نفعان و هماهنگی نهادی منتقل می‌کند (Montenegro & Hack, 2020). در این چارچوب، حکمرانی آب نه تنها یک سازوکار مدیریتی، بلکه فرایندی اجتماعی-سیاسی-اقتصادی تلقی می‌شود که تحقق شفافیت، پاسخگویی و عدالت را در مدیریت منابع دنبال می‌کند و اثربخشی آن وابسته به سازگاری ابزارهای نهادی، حقوقی، اقتصادی و مدیریتی با بستر سیاسی و اجتماعی هر کشور است (صدقیان ترک‌نژاد و همکاران، ۱۴۰۲).

در امتداد این تحول مفهومی، نقش هماهنگی میان‌بخشی و انسجام نهادی به‌عنوان پیش‌شرط حکمرانی مؤثر بیش از پیش برجسته شده است. نبود همگرایی میان نهادهای موازی و تعارض منافع سازمانی، به‌ویژه در ساختارهای نهادی چندپاره، می‌تواند به شکل‌گیری سیاست‌های ناسازگار، اجرای ناکارآمد و کاهش تاب‌آوری کل نظام اجتماعی-اکولوژیک منجر شود (Pahl-Wostl et al, 2023). در پاسخ به این محدودیت‌ها، ادبیات حکمرانی به سمت رویکردهای ترکیبی یا هیبرید حرکت کرده است؛ رویکردهایی که تلاش می‌کنند ظرفیت‌های مدل‌های سلسله‌مراتبی، بازارمحور و شبکه‌ای را به‌صورت هم‌زمان به‌کار گیرند تا انعطاف‌پذیری و ظرفیت انطباقی سیستم‌ها در شرایط عدم قطعیت افزایش یابد (اسکوهی و اسماعیلی، ۱۴۰۰). این تحول در چارچوب مدیریت یکپارچه منابع آب^۲ نیز بازتاب یافته است. مدیریت یکپارچه منابع آب به‌عنوان رویکردی کل‌نگر برای ادغام ابعاد اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی در مقیاس حوضه آبریز مطرح شده است، اما تجربه‌های جهانی نشان می‌دهد که در غیاب ظرفیت نهادی، سازوکارهای تطبیقی و همکاری میان‌بخشی، این مفهوم اغلب به سطحی نمادین تقلیل می‌یابد (Jafari et al, 2021; Gain et al, 2025). از این منظر، مدیریت یکپارچه منابع آب بیش از آنکه یک بسته فنی باشد، هدفی حکمرانی‌محور است که تحقق آن مستلزم نهادسازی، یادگیری نهادی و تعامل پیچیده میان بازیگران متعدد است. پیچیدگی این مسئله در کشورهای دریا‌دار دوچندان می‌شود؛ کشورهایی که هم‌زمان با محدودیت منابع آب شیرین و فشارهای محیط‌های ساحلی مواجه‌اند. این کشورها علاوه بر چالش‌های کم‌آبی و آلودگی منابع داخلی، با پدیده‌هایی نظیر نفوذ آب شور، افزایش سطح دریا و تخریب اکوسیستم‌های ساحلی روبه‌رو هستند. یکی از شکاف‌های ساختاری در این زمینه، جدایی نهادی و سیاستی میان مدیریت حوضه‌های آبریز داخلی و مدیریت مناطق ساحلی است؛

^۱. Social-Ecological Systems^۲. Integrated Water Resources Management

وضعیتی که می‌تواند موجب تخصیص ناکارآمد منابع، کاهش تاب‌آوری و افزایش آسیب‌پذیری نظام‌های اجتماعی-اکولوژیک شود (راهدان و همکاران، ۱۴۰۳). از این‌رو، دستیابی به حکمرانی کارآمد مستلزم تلفیق پارادایم‌های مدیریت یکپارچه منابع آب و مدیریت یکپارچه مناطق ساحلی^۱ در قالب چارچوبی چندسطحی، انعطاف‌پذیر و تطبیقی است. در این میان، از منظر مدیریت ریسک، حکمرانی آب-ساحل باید متناسب با ماهیت مخاطرات طراحی شود. مخاطرات ناگهانی و شدید نظیر سیلاب‌های ساحلی، طوفان‌ها و رخداد‌های حدی اقلیمی، به دلیل نیاز به واکنش سریع، هماهنگی متمرکز و بسیج فوری منابع، در چارچوب الگوهای سلسله‌مراتبی و متمرکز کارآمدتر مدیریت می‌شوند. در مقابل، مخاطرات تدریجی و انباشتی مانند کم‌آبی مزمن، افت سطح آب‌های زیرزمینی، آلودگی منابع و فرسایش اکوسیستم‌های ساحلی، نیازمند حکمرانی مشارکتی، شبکه‌ای و تطبیقی هستند که امکان یادگیری مستمر، اصلاح تدریجی سیاست‌ها و مشارکت ذی‌نفعان را فراهم می‌سازند. بر این اساس، ادبیات نوین بر رویکردهای هیبرید تأکید دارد؛ رویکردهایی که با ترکیب ظرفیت‌های حکمرانی سلسله‌مراتبی، بازارمحور و شبکه‌ای، امکان مدیریت هم‌زمان ریسک‌های ناگهانی و تدریجی را فراهم کرده و تاب‌آوری نظام‌های اجتماعی-اکولوژیک را در شرایط عدم قطعیت اقلیمی افزایش می‌دهند (Pahl-Wostl, 2021; Djalante et al, 2011). با وجود پذیرش نظری این ضرورت، ادبیات فارسی همچنان با کمبود الگوهای عملیاتی و قابل انتقال در حوزه حکمرانی یکپارچه آب-ساحل مواجه است و بسیاری از کشورها همچنان در وضعیت حکمرانی جزیره‌ای باقی مانده‌اند؛ وضعیتی که در آن نهادهای آب و دریا به صورت منفک عمل می‌کنند و امکان ارتقای تاب‌آوری سیستم‌های اجتماعی-اکولوژیک محدود می‌شود. بر این اساس، این پژوهش با تمرکز بر کشورهای پیشرو در مدیریت منابع آب و سواحل، در پی شناسایی و تحلیل الگوی نوین حکمرانی یکپارچه آب-سواحل است. این مطالعه با اتخاذ رویکرد تطبیقی و تحلیل سیاست‌ها و ساختارهای نهادی، تلاش می‌کند اصول و سازوکارهایی را استخراج کند که موفقیت در تلفیق مدیریت حوضه‌های آبریز و مناطق ساحلی را ممکن ساخته‌اند. انتظار می‌رود یافته‌های پژوهش، چارچوبی علمی و کاربردی برای ارتقای حکمرانی پایدار، افزایش تاب‌آوری نظام‌های اجتماعی-اکولوژیک و بهبود هماهنگی میان سیاست‌های خشکی و دریا در کشورهای دریادار، از جمله ایران، فراهم آورد و بدین ترتیب شکاف میان مباحث نظری حکمرانی یکپارچه و تجارب عملی آن را کاهش دهد و بینش‌های راهبردی قابل استفاده‌ای برای تصمیم‌گیران و برنامه‌ریزان ارائه نماید.

مبانی نظری

حکمرانی یکپارچه آب-ساحل

مفهوم حکمرانی یکپارچه آب-ساحل در پاسخ به پیچیدگی‌های فزاینده اجتماعی-اکولوژیکی حوضه‌های آبریز و مناطق ساحلی شکل گرفته است، جایی که سیستم‌های آب شیرین، محیط‌های دریایی و فعالیت‌های انسانی به‌طور عمیق با یکدیگر در هم تنیده‌اند. رویکردهای سنتی بخشی در مدیریت آب در مواجهه با فشارهای تجمعی محیط‌زیستی، رقابت بر سر منابع آب و تکه‌تکه بودن نهادها ناکارآمد بوده‌اند. در چارچوب توسعه پایدار، مدیریت یکپارچه منابع آب به‌عنوان پارادایم حکمرانی پیشنهاد شده است که بر تخصیص هماهنگ آب، کاهش تعارض و تصمیم‌گیری چندهدفه تأکید دارد و با اصول مدیریت یکپارچه ساحلی هم‌راستا است (Jafari et al, 2025; Mersha,).

^۱. Integrated Coastal Zone Management

(2021). بنابراین، حکمرانی یکپارچه تنها یک سازوکار فنی یا اداری نیست، بلکه متعهد به اصول حکمرانی خوب است و چارچوب‌های قانونی، سازوکارهای اجرایی و توافقات اجتماعی مربوط به حقوق مشترک آب را در بر می‌گیرد. بر پایه این دیدگاه، حوضه‌های آبریز و مناطق ساحلی به‌طور فزاینده‌ای به‌عنوان سیستم‌های اجتماعی-اکولوژیکی درک می‌شوند؛ جایی که فرآیندهای طبیعی و ساختارهای نهادی همزمان تکامل می‌یابند. درک و مدیریت چنین سیستم‌هایی نیازمند دیدگاه کل‌نگر است که ابعاد زیست‌محیطی، اقتصادی و نهادی را به‌جای بررسی جداگانه ادغام می‌کند. شواهد تجربی نشان می‌دهند که اثربخشی حکمرانی بستگی به توانایی تطبیق ساختارهای نهادی و تسهیل تعامل میان ذی‌نفعان منابع مشترک دارد (Godden & Ison, 2019; Julio et al, 2021). سیستم‌های آب شیرین ساحلی، نمونه بارزی از این پیچیدگی هستند؛ زیرا تغییرات کاربری زمین در بالادست و برداشت‌های آب به‌طور مستقیم بر خدمات اکوسیستم ساحلی و معیشت جوامع تأثیر می‌گذارد. این هم‌بستگی چالش‌های خاصی را در حکمرانی ایجاد می‌کند؛ زیرا عدم هماهنگی میان عرضه آب، ساختارهای نهادی و تقاضاهای اجتماعی-اقتصادی اغلب پایدار نیست. افزایش مصرف آب کشاورزی، شهری، گردشگری و آبی‌پروری رقابت بر سر منابع کمیاب را تشدید می‌کند و کمبودهای فصلی تعارضات میان ذی‌نفعان را افزایش می‌دهد. در مناطق ساحلی، تخصیص آب شیرین نه تنها بر کشاورزی و مصرف خانگی تأثیر دارد، بلکه بر شیلات و سایر خدمات اکوسیستم دریایی نیز اثرگذار است و ضرورت هماهنگی سیاست‌ها در حوزه‌های خشکی و دریا را برجسته می‌کند.

برای مقابله با این هم‌بستگی‌ها، چارچوب‌های حکمرانی یکپارچه به‌طور فزاینده‌ای به رویکردهای تحلیلی و سیستم‌محور متکی هستند. روش‌های سیستم‌محور، مانند پروژه SPICOSA^۱، تلاش می‌کنند فرآیندهای اکولوژیکی، عوامل اجتماعی-اقتصادی و قوانین نهادی را به‌طور همزمان تحلیل کنند. با ترکیب ارزیابی خدمات اکوسیستم با تحلیل نهادی، این رویکردها امکان ارزیابی سناریوهای سیاستی، بررسی مصالحه‌های منابع و پیامدهای تغییرات نهادی را فراهم می‌کنند (Balogoun & Idrissou, 2021). این تحلیل سیستمیک تضمین می‌کند که استراتژی‌های حکمرانی در برابر عدم قطعیت مقاوم باشند و با اهداف متعدد هم‌راستا باشند. در همین راستا، برای تبدیل مفهوم «یکپارچگی» از سطح نظری به سطح قابل‌سنجش و مقایسه، ادبیات جدید حکمرانی تأکید می‌کند که یکپارچگی باید به‌صورت یک ویژگی چندبعدی و نهادی عملیاتی، نه یک وضعیت کلی و کیفی، تعریف شود. بر این اساس، میزان یکپارچگی حکمرانی آب-ساحل در چهار بعد مکمل قابل‌ارزیابی است:

نخست، یکپارچگی نهادی که به وجود نهادهای فرابخشی یا سازوکارهای رسمی هماهنگی میان آب، محیط‌زیست و سواحل اشاره دارد و از پراکندگی تصمیم‌گیری جلوگیری می‌کند (Pahl-Wostl, 2015).

دوم، یکپارچگی سیاستی و قانونی که میزان هم‌راستایی قوانین، راهبردها و برنامه‌های بخشی را در سطح ملی و منطقه‌ای مشخص می‌کند.

سوم، یکپارچگی مالی و اجرایی که وجود بودجه‌های مشترک، صندوق‌های بین‌بخشی یا سازوکارهای تأمین مالی هماهنگ را شامل می‌شود. (OECD, 2018).

چهارم، یکپارچگی فضایی و اطلاعاتی که به هماهنگی در برنامه‌ریزی حوضه‌ای-ساحلی و وجود سامانه‌های مشترک داده و پایش اشاره دارد (Loitzenbauer & Mendes, 2019). بر این اساس، یک نظام حکمرانی، زمانی «یکپارچه»

^۱. پروژه‌ای پژوهشی در اتحادیه اروپا است که با هدف توسعه رویکرد «چارچوب تحلیل سیستمی» برای ارزیابی یکپارچه سامانه‌های ساحلی طراحی شد و بر ادغام دانش علمی، تحلیل نهادی و ارزیابی سیاستی در مدیریت مناطق ساحلی تأکید دارد.

تلقی می‌شود که همگرایی معنادار در چند بعد از ابعاد بالا وجود داشته باشد؛ به گونه‌ای که تصمیم‌گیری‌ها از سطح بخشی فراتر رفته و به سطح هماهنگ چندبخشی ارتقا یافته باشند. این تعریف امکان مقایسه تطبیقی کشورها را بدون اتکا به قضاوت‌های ذهنی فراهم می‌کند.

هماهنگی نهادی، ستون اصلی حکمرانی یکپارچه است؛ زیرا منابع مشترک با مصارف متعدد نیازمند سازوکارهایی برای حل تعارض میان ذی‌نفعان هستند. نهادها تعیین می‌کنند که خدمات اکوسیستم چگونه ارزش‌گذاری و تخصیص یابند و در نتیجه بر عدالت اجتماعی و نتایج زیست‌محیطی تأثیرگذارند. شواهد نشان می‌دهند که سازوکارهای مشارکتی و سازمان‌یافته محلی اغلب در حل تعارض مؤثرتر از تصمیم‌گیری تنها از بالا به پایین عمل می‌کنند، به‌ویژه در شرایطی که منافع ذی‌نفعان بسیار متفاوت است. پژوهش‌های اخیر تغییر پارادایمی به سوی حکمرانی آب تطبیقی و یکپارچه را برجسته می‌کنند. زیرساخت‌های موجود، چارچوب‌های قانونی و ساختارهای مالی اغلب پارادایم‌های سنتی فرمان و کنترل را تقویت می‌کنند و تغییر سیستمیک را دشوار می‌سازند. گذار به مدیریت یکپارچه نیازمند یادگیری اجتماعی، نوآوری نهادی و بازاندیشی در فرآیندهای تصمیم‌گیری است. یادگیری جمعی میان ذی‌نفعان و آزمایش رویکردهای نوآورانه حکمرانی می‌تواند به تدریج تحول نظام‌های مدیریت آب تثبیت‌شده را تسهیل کند (Knüppe & Pahl-Wostl, 2011; Akinsete et al, 2022; Pahl-Wostl et al, 2023). مشارکت ذی‌نفعان ستون حیاتی حکمرانی یکپارچه است و مشروعیت، کاهش تعارض و ارتقای اجرای سیاست‌ها را فراهم می‌کند. عوامل ساختاری مانند کم‌آبی، رشد جمعیت و فناوری‌های نوین، همراه با عوامل شرایطی مانند بلایای مرتبط با آب و پروژه‌های زیربنایی بزرگ، تصمیم‌گیرندگان را به مشارکت دادن ذی‌نفعان متنوع واداشته است. با تلفیق دیدگاه‌ها و نظام‌های دانش متعدد، حکمرانی مشارکتی امکان درک دقیق‌تر ترجیحات، مصالحه‌ها و پیامدهای احتمالی تصمیمات سیاستی را فراهم می‌کند (Katusiime & Schütt, 2020). علاوه بر این، حکمرانی مؤثر نیازمند هماهنگی افقی میان بخش‌ها -مانند کشاورزی، برنامه‌ریزی فضایی، حفاظت محیط‌زیست، شیلات و زیرساخت‌ها- و هماهنگی عمودی میان سطوح محلی، حوضه‌ای و ملی است. ساختارهای نهادی تکه‌تکه اغلب منجر به سیاست‌های ناسازگار می‌شوند که مدیریت یکپارچه را تضعیف می‌کنند. حکمرانی یکپارچه این چالش‌ها را از طریق اهداف مشترک، قوانین شفاف و سیستم‌های پایش هماهنگ برای ارتقای انسجام سیاست‌ها و جلوگیری از مصالحه‌های ناخواسته برطرف می‌کند. ادبیات پژوهشی چندین بعد و مؤلفه کلیدی برای حکمرانی یکپارچه آب-ساحل را شناسایی کرده است. این مؤلفه‌ها شامل ادغام نهادی در سطح حوضه و مناطق ساحلی، مشارکت ذی‌نفعان و یادگیری اجتماعی، تصمیم‌گیری تطبیقی مبتنی بر دانش، لحاظ خدمات اکوسیستم، انسجام سیاست‌های میان‌بخشی و سازوکارهایی برای حل تعارض و تخصیص عادلانه منابع است. این مؤلفه‌ها به سیستم‌های حکمرانی اجازه می‌دهند تا در برابر عدم قطعیت واکنش نشان دهند و همزمان پایداری زیست‌محیطی و توسعه اجتماعی-اقتصادی را حفظ کنند. در نهایت، حکمرانی یکپارچه آب-ساحل رویکردی سیستمیک برای مدیریت سیستم‌های مرتبط خشکی-آب-دریا ارائه می‌دهد. با ادغام مدیریت حوضه‌های آبریز با سیاست‌های ساحلی، تأکید بر هماهنگی نهادی، یادگیری تطبیقی و مشارکت ذی‌نفعان، این پارادایم حکمرانی به دنبال تعادل میان اهداف زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی است. شواهد تجربی نشان می‌دهند که موفقیت بلندمدت کمتر به مداخلات فنی وابسته است و بیشتر بر تحول نهادی، فرآیندهای مشارکتی و یادگیری مستمر در سیستم‌های اجتماعی-اکولوژیکی تکیه دارد. در نهایت، این رویکرد نقشه راهی برای دستیابی به مدیریت مقاوم و پایدار منابع آب و ساحلی فراهم می‌آورد.

پایداری و تاب‌آوری نظام اجتماعی-اکولوژیک آب

پایداری و تاب‌آوری نظام‌های اجتماعی-اکولوژیک مرتبط با آب^۱ به دلیل افزایش فشارهای انسانی و تغییرات اقلیمی به‌طور فزاینده‌ای به موضوعی محوری در پژوهش‌ها تبدیل شده است. نظام‌های اجتماعی-اکولوژیک به‌طور ذاتی پیچیده و تطبیقی هستند و ویژگی‌هایی چون غیرخطی بودن، آستانه‌ها، حلقه‌های بازخوردی و تعاملات متقابل بین اجزای انسانی و اکولوژیک دارند (Gomez-Jaramill et al, 2024). در این چارچوب، ظرفیت انطباق که به توانایی سیستم برای پاسخ به اختلالات اشاره دارد، به‌عنوان عاملی کلیدی در تاب‌آوری و تحول شناخته می‌شود و از طریق به‌کارگیری منابع انسانی، اجتماعی و نهادی فعال می‌گردد (Morante et al, 2025). بنابراین، درک و تقویت ظرفیت انطباق برای حفظ عملکرد پایداری و تاب‌آوری نظام‌های اجتماعی-اکولوژیک مرتبط با آب در شرایط محیطی پویا حیاتی است. امنیت آب، یکی از اجزای اصلی تاب‌آوری نظام‌های اجتماعی-اکولوژیک است؛ زیرا به‌طور مستقیم رفاه انسانی، فعالیت‌های اقتصادی و خدمات اکوسیستمی را تأمین می‌کند. مناطق ساحلی با ارتفاع پایین نمونه‌ای از مناطقی هستند که جمعیت‌های متراکم به‌شدت به دسترسی و کیفیت آب وابسته‌اند، اما این سیستم‌ها در عین حال در برابر فشارهای انسانی و تغییرات محیطی آسیب‌پذیرند (Gomez-Jaramillo et al, 2024). رویکردهای سنتی مدیریت آب که بیشتر مبتنی بر کنترل‌های سخت و ثابت هستند، توان پاسخگویی به ماهیت پویا پایداری و تاب‌آوری نظام‌های اجتماعی-اکولوژیک مرتبط با آب را ندارند (Polinova et al, 2019). در مقابل، حکومت‌داری تطبیقی آب، با مؤسسات چندمرکزی و تصمیم‌گیری مشارکتی، امنیت آب را از طریق ارتقای انعطاف‌پذیری سیستم، یادگیری تدریجی و هماهنگی چندمقیاسی افزایش می‌دهد (Yang & Huang, 2024; Nabiafjadi et al, 2021). تغییرات اقلیمی فشارهای اضافی، از جمله افزایش سطح دریا، شدت طوفان‌ها و تغییرات هیدرولوژیکی را به سیستم‌های اجتماعی-اکولوژیک تحمیل می‌کند و تاب‌آوری آن‌ها را تهدید می‌کند. برای مقابله با این فشارها، استراتژی‌های تطبیق مبتنی بر اکوسیستم، با بهره‌گیری از عملکردهای حفاظتی و تنظیمی اکوسیستم‌های ساحلی و رودخانه‌ای، توانایی مقابله با شوک‌های اقلیمی را تقویت می‌کنند (Malakar et al, 2023). با ادغام مکانیزم‌های حکومت‌داری تطبیقی، این استراتژی‌ها ظرفیت مقابله کوتاه‌مدت و پتانسیل تحول بلندمدت سیستم را افزایش می‌دهند و امکان جذب اختلالات و سازگاری با تغییرات محیطی را فراهم می‌کنند.

کاهش آسیب‌پذیری ساحلی نیازمند استفاده همزمان از مکانیسم‌های طبیعی و اجتماعی است. زیرساخت‌های سخت، مانند دیوارهای ساحلی و موج‌شکن‌ها، ممکن است از فرسایش محلی جلوگیری کنند، اما اغلب جریان رسوب را مختل و ریسک‌های منطقه‌ای را افزایش می‌دهند (Newton & Weichselgartner, 2014; Jozaei et al, 2022). در مقابل، اقدامات مبتنی بر اکوسیستم، از جمله بازسازی جنگل‌های حرا و بازسازی بسترهای چمن دریایی، فرسایش و سیلاب را کاهش می‌دهند و در عین حال عملکرد اکولوژیکی را حفظ می‌کنند (Van Coppenolle & Temmerman, 2020). حکومت‌داری تطبیقی، از طریق مشارکت ذی‌نفعان و هماهنگی چندبخشی، ظرفیت نهادی لازم برای اجرای مؤثر این اقدامات را فراهم می‌آورد و همزمان تعادل بین حفاظت اکولوژیک و نیازهای اجتماعی را برقرار می‌کند و منازعات را کاهش می‌دهد (Yang & Huang, 2024). حفظ کیفیت اکوسیستم‌ها برای تاب‌آوری نظام‌های اجتماعی-اکولوژیک مرتبط با آب حیاتی است؛ زیرا خدمات اکوسیستم پایه‌های امنیت آب، پایداری معیشت و تنظیم اقلیم را

^۱. Social-Ecological Water Systems

تأمین می‌کنند. اکوسیستم‌های ساحلی خدمات تأمین، تنظیم و فرهنگی ضروری برای رفاه انسانی ارائه می‌دهند (Gomez-Jaramill et al, 2024; Morante et al, 2025). فشارهای انسانی، شامل شهرنشینی، گردشگری و استخراج منابع، این خدمات را تهدید می‌کنند. چارچوب‌های حکومت‌داری تطبیقی که دانش علمی و محلی را از طریق مدیریت مشارکتی تلفیق می‌کنند، می‌توانند حفاظت از اکوسیستم و توان پاسخگویی پایداری و تاب‌آوری نظام‌های اجتماعی-اکولوژیک مرتبط با آب به تغییرات محیطی را تقویت کنند (Wyborn, 2015). بعد انسانی، شامل دانش، مهارت‌ها و مشارکت نهادی، برای تبدیل ظرفیت انطباقی بالقوه به اقدام مؤثر حیاتی است. دسترسی به سرمایه‌های مالی، فنی و اجتماعی همراه با مؤسسات حمایتی، توانایی جوامع را در اجرای اقدامات تطبیقی تعیین می‌کند (Akamani, 2016). ساختارهای نهادی چندسطحی و چندمرکزی امکان آزمایش، یادگیری و پاسخ‌های محلی مناسب را فراهم می‌آورند و تاب‌آوری سیستم را تقویت می‌کنند (Prianto et al, 2024). تاب‌آوری در نظام‌های اجتماعی-اکولوژیک مرتبط با آب، شامل تطبیق تدریجی و تغییرات تحول‌آفرین است. درحالی‌که تطبیق بر حفظ عملکرد سیستم در آستانه‌های موجود تمرکز دارد؛ قابلیت تحول شامل بازسازی بنیادی نظام‌های اجتماعی-اکولوژیک برای دستیابی به مسیرهای توسعه جدید تحت شرایط محیطی متغیر است (Gomez-Jaramillo et al, 2024). حکومت‌داری تطبیقی این طیف را از طریق تقویت آگاهی، انگیزه، توانایی و فرصت فراهم می‌کند و به بازیگران امکان می‌دهد تا پیچیدگی محیطی و نهادی را مدیریت کنند (Nabiafjadi et al, 2021). مؤسسات چندسطحی، فرآیندهای مشارکتی و گفت‌وگوی تحلیلی مکانیزم‌هایی را برای پاسخ‌های تدریجی و تحول‌آفرین فراهم می‌آورند و دیدگاه‌ها و دانش متنوع ذی‌نفعان را تلفیق می‌کنند. تطبیق مبتنی بر اکوسیستم، اصول تاب‌آوری را با اتصال عملکردهای اکولوژیکی به اهداف اجتماعی-اقتصادی، از جمله کاهش فقر، امنیت معیشت و حفاظت از تنوع زیستی، عملیاتی می‌کند، درحالی‌که همزمان خطرات مرتبط با تغییر اقلیم را کاهش می‌دهد (Pahl-Wostl, 2019). چالش‌های اجرایی مانند کمبود پایش، خلأهای هماهنگی و ضعف‌های حکمرانی می‌تواند از طریق راهبردهای حکومت‌داری تطبیقی که شامل مؤسسات چندمرکزی، تصمیم‌گیری چندمرکزی و مشارکت گسترده است، برطرف شود و نتایج عادلانه و مناسب زمینه‌ای را تضمین کند (Yang & Huang, 2024; Nabiafjadi et al, 2021). ساخت تاب‌آوری در نظام‌های اجتماعی-اکولوژیک مرتبط با آب همچنین به تجمع و بهره‌برداری استراتژیک از انواع سرمایه‌ها وابسته است. سرمایه طبیعی، از طریق بازسازی اکوسیستم تقویت شده و خدمات تنظیمی و تأمینی فراهم می‌کند. سرمایه انسانی و اجتماعی امکان اشتراک دانش و اقدام هماهنگ را فراهم می‌آورد و سرمایه اقتصادی، سرمایه‌گذاری در زیرساخت پایدار و مشوق‌های حفاظت اکوسیستم را ممکن می‌سازد. ایجاد پیوند بین این سرمایه‌ها و ساختارهای حکمرانی، توانایی سیستم را برای پاسخ‌های تطبیقی و تحول‌آفرین تقویت می‌کند. در پایان، پایداری و تاب‌آوری نظام‌های اجتماعی-اکولوژیک مرتبط با آب، مستلزم ادغام حکومت‌داری تطبیقی و استراتژی‌های تطبیق مبتنی بر اکوسیستم است. تضمین امنیت آب، افزایش تاب‌آوری در برابر تغییرات اقلیمی، کاهش آسیب‌پذیری ساحلی و حفظ کیفیت اکوسیستم‌ها، اهدافی به هم پیوسته هستند که نیازمند مداخلات هماهنگ انسانی، اجتماعی و اکولوژیکی‌اند. با تقویت آگاهی، انگیزه، توانایی و فرصت بازیگران، پایداری و تاب‌آوری نظام‌های اجتماعی-اکولوژیک مرتبط با آب می‌توانند هم تطبیق تدریجی و هم تغییر تحول‌آفرین را مدیریت کنند و چارچوبی مستحکم برای مدیریت پایدار آب در شرایط عدم قطعیت و تغییر محیطی ارائه دهند. پژوهش‌های آینده باید مکانیزم‌های عملیاتی حکومت‌داری تطبیقی و ارزیابی

اثرات مداخلات مبتنی بر اکوسیستم را بررسی کنند تا سیاست‌ها و اقدامات در زمینه‌های مختلف اجتماعی-اکولوژیک هدایت شود.

پیشینه پژوهش

در سال‌های اخیر و همزمان با تشدید بحران‌های کم‌آبی در ایران، ادبیات حکمرانی آب به‌تدریج از رویکردهای مدیریتی و فنی مبتنی بر کنترل عرضه، به سوی تحلیل‌های نهادی، یکپارچه و چندسطحی حرکت کرده است. این تحول نشان‌دهنده گذار از نگاه بخشی به درکی سیستمی از روابط میان نهادها، کنشگران و بسترهای اجتماعی-اکولوژیک در مدیریت منابع آب است. در این مسیر، محمدی ده‌چشمه و گنخکی (۱۴۰۱) با بررسی چالش‌های حکمروایی و مدیریت یکپارچه منابع آب در شهرهای استان بوشهر نشان دادند که پراکندگی سازمان‌های تصمیم‌گیر و غلبه سیاست‌های عرضه‌محور، از مهم‌ترین موانع تحقق مدیریت یکپارچه منابع آب به‌شمار می‌رود. یافته‌های آنان آشکار ساخت که نبود هماهنگی نهادی، به شکل‌گیری سیاست‌های جزیره‌ای و کاهش کارآمدی نظام تصمیم‌گیری منجر می‌شود. این مطالعه را می‌توان نقطه آغاز توجه نظام‌مند به ابعاد نهادی حکمرانی آب در مقیاس شهری دانست؛ هرچند تمرکز آن بیشتر بر ارزیابی وضعیت داخلی باقی ماند و پیوند حکمرانی آب با چارچوب‌های گسترده‌تر اجتماعی-اکولوژیک و فضایی هنوز مورد واکاوی قرار نگرفت. در ادامه این جریان، صدقیان ترک‌نژاد و همکاران (۱۴۰۲) با اتخاذ رویکردی ترکیبی، عوامل مؤثر بر حکمرانی آب در ایران را در ابعاد حقوقی، مدیریتی، اجتماعی و سیاسی تحلیل کردند و نشان دادند که انسجام خط‌مشی‌های کلان و کارآمدی سازوکارهای قانونی نقش تعیین‌کننده‌ای در عملکرد نظام حکمرانی دارد. این پژوهش با عبور از سطح توصیفی، روابط میان مؤلفه‌های حکمرانی را به‌صورت ساختارمند تبیین کرد و نشان داد که بحران آب بیش از محدودیت‌های طبیعی، ریشه در ضعف‌های نهادی و سیاستی دارد. بدین‌ترتیب، ادبیات داخلی از مرحله شناسایی مسائل به سمت تحلیل ساختارهای حکمرانی حرکت کرد.

این روند در سال ۱۴۰۳ با تمرکز بر روابط قدرت و الگوهای تعامل کنشگران عمق بیشتری یافت. ملک‌حسینی، حلی‌ساز و محمدی کنگرانی (۱۴۰۳) با تحلیل شبکه‌ای قوانین مدیریت آب، غلبه رویکردهای اجبارمحور و ابهام مقرراتی را مانعی برای شکل‌گیری حکمرانی مشارکتی معرفی کردند. همزمان، راهدان و همکاران (۱۴۰۳) در مطالعه حوضه آبخیز زاینده‌رود با بهره‌گیری از تحلیل شبکه اجتماعی، نشان دادند که رژیم حکمرانی موجود ماهیتی سلسله‌مراتبی و متمرکز دارد و گذار به حکمرانی چندمرکزی و تلفیق شیوه‌های حکمرانی، شرط ارتقای پایداری منابع آب محسوب می‌شود. مجموع این مطالعات، بیانگر آن است که ادبیات داخلی به‌تدریج از تشخیص چالش‌ها به سوی تحلیل الگوهای نهادی، توزیع قدرت و تعامل میان کنشگران حرکت کرده است. این مسیر در سال ۱۴۰۴ با تقویت نگاه سیستمی و فضایی به حکمرانی آب تکامل بیشتری یافت. متقی افشین و همکاران (۱۴۰۴) با بررسی تأثیر حکمرانی محلی آب بر کاربست آب مجازی در استان اصفهان، نشان دادند که نبود ساختار حکمرانی یکپارچه، تعارضات اجتماعی، توسعه صنایع آب‌بر و تخصیص ناهماهنگ منابع از عوامل کلیدی تشدید بحران آب هستند. یافته‌های این پژوهش بر ضرورت درک هم‌کنشی ابعاد سیاسی، اقتصادی، اجتماعی و جغرافیایی تأکید دارد و نشان می‌دهد حکمرانی آب تنها در چارچوبی چندسطحی و هماهنگ قابل تحقق است. با وجود این پیشرفت مفهومی، مطالعات داخلی همچنان کمتر به تحلیل تطبیقی تجارب موفق جهانی، به‌ویژه در پیوند میان حکمرانی حوضه‌های

آبریز و مدیریت مناطق ساحلی و دریایی پرداخته‌اند؛ خلأیی که ضرورت گسترش افق تحلیلی به سطح بین‌المللی را آشکار می‌سازد.

همزمان با این تحولات، ادبیات بین‌المللی حکمرانی آب نیز در پاسخ به تشدید بحران‌های اقلیمی و پیچیده‌تر شدن تعاملات انسان و محیط، به سمت رویکردهای اجتماعی-اکولوژیک و چندسطحی گرایش یافته است. مونتنگرو و هک (۲۰۲۰) با بهره‌گیری از چارچوب سیستم‌های اجتماعی-اکولوژیک، نشان دادند که کارآمدی حکمرانی آب بیش از ابزارهای فنی، به ظرفیت نهادی، ترتیبات سیاسی-حقوقی و تعامل میان ذی‌نفعان وابسته است و تمرکزگرایی نهادی می‌تواند مانع اجرای مؤثر سیاست‌ها شود. در ادامه، گین و همکاران (۲۰۲۱) با مرور رویکرد سیستم‌های اجتماعی-اکولوژیک، بر اهمیت بازخوردهای چندمقیاسی و روابط غیرخطی میان جامعه و محیط تأکید کردند و مدیریت آب را نیازمند چارچوب‌های میان‌رشته‌ای و تطبیقی دانستند؛ دیدگاهی که زمینه‌گذار از مدیریت بخشی به حکمرانی شبکه‌ای و تطبیقی را فراهم ساخت. در مرحله بعد، تمرکز پژوهش‌ها به سوی سازوکارهای نهادی و الگوهای هماهنگی حکمرانی معطوف شد. پاهل-وستل و کنیپر (۲۰۲۳) با تحلیل تطبیقی مطالعات موردی متعدد نشان دادند که نظام‌های حکمرانی چندمرکزی، در صورت برخورداری از هماهنگی عمودی و افقی، عملکرد موفق‌تری در مواجهه با بحران‌های آبی دارند، درحالی‌که ساختارهای متمرکز یا پراکنده فاقد هماهنگی با ناکارآمدی مواجه می‌شوند. این یافته‌ها توسط یوسفی و همکاران (۲۰۲۴) در بستر ایران تکمیل شد. آنان نشان دادند که زمینه‌های سیاسی-نهادی دولت رانتی به تمرکزگرایی و ضعف ظرفیت اجرایی منجر شده و اصلاح ساختار حکمرانی با موفقیت همراه نخواهد بود. این مطالعات اهمیت تحلیل زمینه‌محور و پیوند میان ظرفیت نهادی و کارآمدی سیاست‌ها را برجسته می‌سازد. در جدیدترین مرحله تحول ادبیات، توجه پژوهشگران به نقش نوآوری فناورانه و حکمرانی هوشمند در ارتقای تاب‌آوری سامانه‌های آبی معطوف شده است. دای و همکاران (۲۰۲۵) مدیریت هوشمند آب را به‌عنوان گذار به حکمرانی داده‌محور معرفی کردند و نشان دادند که ادغام فناوری‌هایی همچون اینترنت اشیا، هوش مصنوعی و تحلیل کلان‌داده می‌تواند ظرفیت تصمیم‌گیری تطبیقی و تاب‌آوری اقلیمی را افزایش دهد؛ هرچند چالش‌های نهادی و هماهنگی داده‌ای همچنان پابرجاست. در مجموع، سیر مطالعات بین‌المللی از رویکردهای اجتماعی-اکولوژیک به تحلیل هماهنگی نهادی و سپس به حکمرانی هوشمند حرکت کرده است. برآیند پیشینه پژوهش نشان می‌دهد که مطالعات داخلی بیشتر بر شناسایی چالش‌های نهادی و تحلیل ساختار حکمرانی آب متمرکز بوده‌اند، درحالی‌که پژوهش‌های بین‌المللی مسیر تکامل‌یافته‌تری را از چارچوب‌های اجتماعی-اکولوژیک تا حکمرانی چندسطحی و هوشمند طی کرده‌اند. در نتیجه، شکاف اصلی در ادبیات موجود، نبود تحلیل تطبیقی منسجم میان تجارب پیشرو جهانی و بستر حکمرانی آب ایران، به‌ویژه در پیوند میان مدیریت حوضه‌های آبریز و مناطق ساحلی و دریایی است. این پژوهش با رویکرد مطالعه تطبیقی، در پی تبیین این پیوند و استخراج دلالت‌های سیاستی برای ارتقای حکمرانی یکپارچه و پایدار آب در بسترهای ساحلی است.

داده‌ها

این پژوهش از نظر هدف، کاربردی و از حیث ماهیت، توصیفی-تحلیلی است که با رویکرد کیفی و مبتنی بر مطالعه تطبیقی انجام شده است. منطق حاکم بر این پژوهش، بر تحلیل نظام‌مند اسناد و مقایسه الگوهای حکمرانی در

بسترهای نهادی متفاوت استوار است؛ به گونه‌ای که تلاش شده است از طریق بررسی چند مورد منتخب، الگوهای مشترک و افتراقی در حکمرانی آب و سواحل شناسایی و تبیین شود.

گردآوری داده‌ها، بر پایه تحلیل اسنادی و مرور منابع علمی معتبر شامل مقالات داوری‌شده، گزارش‌های سازمان‌های بین‌المللی نظیر UN-Water و OECD، اسناد سیاستی ملی و مطالعات تطبیقی مرتبط با حکمرانی آب انجام گرفته است. جست‌وجوی منابع در پایگاه‌های علمی معتبر از جمله Scopus، Web of Science و Google Scholar صورت پذیرفته و تمرکز بر منابع منتشرشده در بازه زمانی ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۵ بوده است تا از به‌روز بودن و اعتبار علمی داده‌ها اطمینان حاصل شود. در انتخاب منابع، اصل تنوع و تکرار داده‌ای مدنظر قرار گرفته تا تحلیل نهایی فقط مبتنی بر یک نوع منبع یا یک سطح از داده‌ها نباشد، بلکه ترکیبی از شواهد علمی و سیاستی را در بر گیرد. انتخاب کشورها به‌صورت هدفمند و مبتنی بر منطق نمونه‌گیری نظری انجام شده است. در این راستا، سه کشور استرالیا، هلند و سنگاپور به‌دلیل پیشرو بودن در حوزه حکمرانی آب و سواحل، برخورداری از تنوع نهادی (شامل ساختارهای فدرال، شبکه‌ای و متمرکز) و همچنین دسترسی به داده‌ها و اسناد سیاستی قابل‌اتکا انتخاب شدند. این تنوع نهادی امکان مقایسه تطبیقی عمیق‌تر و استخراج الگوهای قابل‌انتقال را فراهم ساخته است.

در فرآیند تحلیل، داده‌های استخراج‌شده از منابع مختلف در قالب محورهای مفهومی مشترک سازمان‌دهی شدند. این محورهای تحلیلی شامل ساختارهای نهادی حکمرانی، ابزارها و سیاست‌های مدیریت منابع آب و سواحل و سازوکارهای مشارکت ذی‌نفعان و نوآوری نهادی و فناورانه بوده است. بر این اساس، اطلاعات هر کشور ابتدا به‌صورت مجزا بررسی و سپس در قالب مقایسه تطبیقی میان موارد مطالعه تحلیل شده‌اند. این مقایسه به‌صورت همزمان بر شباهت‌ها و تفاوت‌های نهادی و سیاستی متمرکز بوده و امکان شناسایی الگوهای همگرا و واگرا در حکمرانی آب-ساحل را فراهم کرده است. از آنجاکه ماهیت پژوهش کیفی و مبتنی بر اسناد بوده است، فرایند تحلیل بر پایه تکرار مطالعه، بازخوانی تطبیقی منابع و طبقه‌بندی مفهومی داده‌ها انجام شده و هدف آن استخراج الگوهای معنادار از دل داده‌های متنی بوده است. در این مسیر، تلاش شده است تا با استفاده از چندمنبعی بودن داده‌ها و مقایسه میان منابع علمی و اسناد رسمی، اعتبار یافته‌ها تقویت شود. همچنین، به‌منظور افزایش اعتبار درونی و کاهش سوگیری تفسیری، از راهبرد مثلث‌سازی داده‌ها (Data Triangulation) استفاده شد؛ بدین صورت که یافته‌های استخراج‌شده از مقالات علمی با اسناد سیاستی ملی، گزارش‌های سازمان‌های بین‌المللی و منابع رسمی حکمرانی آب تطبیق داده شدند. همچنین، فرآیند تحلیل به‌صورت بازگشتی و چندمرحله‌ای انجام گرفت و نتایج در مراحل مختلف با ادبیات نظری و تجربی مرتبط مقایسه شد تا از انسجام تفسیری و اعتبار استنباط‌ها اطمینان حاصل شود. افزون بر این، چارچوب نهایی تحلیل، از طریق بازبینی مکرر داده‌ها و کنترل تطابق میان شواهد استخراج‌شده از کشورهای مورد مطالعه، اعتبارسنجی گردید. در مجموع، این پژوهش را می‌توان یک مطالعه سیاست‌پژوهانه تطبیقی دانست که هدف آن نه آزمون فرضیه‌های کمی، بلکه شناسایی و تبیین الگوهای نهادی و سیاستی حکمرانی یکپارچه آب-ساحل در کشورهای منتخب است. بر این اساس، تحلیل تطبیقی تجارب استرالیا، هلند و سنگاپور امکان شناسایی شباهت‌ها، تفاوت‌ها و عوامل مؤثر بر موفقیت نظام‌های حکمرانی آب-ساحل را فراهم می‌سازد. هدف نهایی این روش‌شناسی، استخراج درس‌آموخته‌ها و دلالت‌های سیاستی حاصل از تجارب کشورهای منتخب و بررسی قابلیت بهره‌گیری از آن‌ها در راستای ارتقای حکمرانی پایدار آب و سواحل متناسب با شرایط نهادی، اجتماعی و محیطی ایران است.

استرالیا، به‌عنوان خشک‌ترین قاره‌ای که سکنه دارد، با چالش‌های مزمن تأمین دسترسی عادلانه به منابع آب برای مصارف کشاورزی، شهری و محیط‌زیستی مواجه است (McKay, 2011). این چالش‌ها ناشی از الگوهای تاریخی خشکسالی، تغییرپذیری بارش و افزایش تقاضاهای شهری و کشاورزی است که فشار بر سامانه‌های آبی را تشدید کرده و نیاز به رویکردهای مدیریت یکپارچه آب و مناطق ساحلی را برجسته ساخته است (Moggridge & Thompson, 2021). با گذر زمان، حکمرانی آب در استرالیا از مداخلات خطی و تکنوکراتیک به چارچوب‌های مشارکتی، تطبیقی و مبتنی بر شناخت اجتماعی تحول یافته و هم‌اصول جهانی مدیریت یکپارچه منابع آب و هم‌واقعیت‌های هیدروسوسیالی محلی را بازتاب می‌دهد (Katusiime, & Schütt, 2020; Beal et al, 2023). از منظر جغرافیایی، حوضه آبریز موری-دارلینگ^۱، یکی از مهم‌ترین سامانه‌های هیدرولوژیک استرالیا را تشکیل می‌دهد که بیش از یک میلیون کیلومتر مربع گسترده شده و از تولیدات کشاورزی وسیع و جمعیت‌های شهری حمایت می‌کند (Bischoff-Mattson & Lynch, 2017; Doble et al, 2024). درون این حوزه، زیرحوضه‌هایی مانند آنگاس-برمر که از لانگ‌هورن کریک عبور می‌کنند، پیچیدگی سامانه‌های هیدروسوسیالی محلی را نشان می‌دهند؛ جایی که آب‌های زیرزمینی و سطحی با شبکه‌های اجتماعی و اقتصادی تعامل دارند (Gonzalez et al, 2020). این رودخانه‌های فصلی، تالاب‌های ساحلی مانند دریاچه الکساندرینا و آبخوان‌های متصل، سامانه‌های اجتماعی-بوم‌شناختی ایجاد می‌کنند که تغییرپذیری تاریخی جریان، کیفیت آب و شوری، بهره‌وری کشاورزی را محدود کرده و نیاز به مدیریت هماهنگ محلی ایجاد کرده است (Doble et al, 2024). تاریخچه حکمرانی آب در استرالیا، نشان‌دهنده چندین تحول از دهه ۱۹۸۰ به بعد است که دامنه آن از مدیریت تأمین آب ساده به مدیریت کیفیت آب، حفاظت از حوضه‌های آبریز و محیط‌زیست گسترش یافته است (Brown et al, 2009). مداخلات اولیه مبتنی بر جامعه، مانند آنچه در لانگ‌هورن کریک مشاهده شد، به‌شدت به هماهنگی محلی برای مدیریت سیلاب‌ها و زیرساخت‌های آبیاری وابسته بود و اهمیت دانش مبتنی بر مکان در حکمرانی را نشان می‌دهد (Skinner et al, 2024; Watts et al, 2018). در دهه‌های بعد، صدور مجوز آب‌های زیرزمینی، برنامه‌ریزی در مقیاس حوضه و ادغام جریان‌های محیط‌زیستی به‌عنوان راهبردهای اصلی در پاسخ به برداشت بیش‌ازحد و خشکسالی هزاره مورد توجه قرار گرفت که بازتاب‌دهنده شناخت فزاینده از پیچیدگی هیدروسوسیالی بود.

ساختار نهادی حکمرانی آب در استرالیا چندسطحی است و شامل مقامات دولتی ایالتی، فدرال و محلی به‌همراه سازمان‌های جامعه‌محور می‌شود. به‌عنوان مثال، اداره آب ایالت استرالیای جنوبی، مرجع حوضه آبریز موری-دارلینگ و کمیته مدیریت آب آنگاس-برمر به‌طور مشترک بر تخصیص‌ها، زیرساخت‌ها و اهداف محیط‌زیستی نظارت دارند (Katusiime, & Schütt, 2020; Beal et al, 2023; Gonzalez et al, 2020). این ساختار چندقطبی، اصول آسترومی را بازتاب می‌دهد و توازن میان نظارت قانونی، مکانیزم‌های بازار و مشارکت جامعه را برای حفظ سامانه‌های هیدروسوسیالی بلندمدت فراهم می‌آورد. با وجود این چارچوب‌های نهادی، یکپارچگی مدیریت حوضه با سامانه‌های ساحلی هنوز نابرابر است. طرح حوضه آبریز موری-دارلینگ، مدیریت کل حوضه را رسمی کرده و شامل محدودیت‌های برداشت پایدار، جریان‌های محیط‌زیستی و برنامه‌های منطقه‌ای منابع آب می‌شود (Bischoff-Mattson & Lynch, 2016). اگرچه این اقدامات به بهبود ارتباط میان آب‌های سطحی و زیرزمینی کمک می‌کنند، هماهنگی با تالاب‌های ساحلی مانند دریاچه الکساندرینا هنوز با چالش‌هایی ناشی از اختلاف مقیاس و وابستگی‌های

^۱. Murray-Darling Basin

هیدرولوژیک مواجه است. ابزارهای سیاست‌گذاری در استرالیا ترکیبی از رویکردهای نظارتی، مبتنی بر بازار و زیرساختی هستند. صدور مجوز آب‌های زیرزمینی، جریان‌های محیط‌زیستی اجباری و خرید آب توسط دولت از دارندگان مجوز با پروژه‌های زیرساختی انتقال آب نیز به‌عنوان ابزار سازگاری به‌کار گرفته شده‌اند؛ از جمله خط لوله انتقال آب «کریکس»^۱ که برای کاهش تأثیرات خشکسالی در لانگ‌هورن کریک طراحی شده، تکمیل می‌شوند (Alexandra, 2018). چارچوب‌های قانونی از جمله قانون آب ۲۰۰۷، حکمرانی حوضه‌ای را حمایت کرده و امکان پاسخ تطبیقی به تغییرات اقلیمی و اقتصادی را فراهم می‌آورد.

مشارکت ذی‌نفعان نقش کلیدی در حکمرانی مؤثر آب ایفا کرده است. لانگ‌هورن کریک نمونه‌ای از تصمیم‌گیری جمعی است؛ جایی که کشاورزان، کمیته‌های محلی و مقامات دولتی در کاهش برداشت آب‌های زیرزمینی، توسعه خطوط لوله و تخصیص آب حوضه آبریز موری-دارلینگ به توافق رسیدند (Shalsi et al, 2022). تعاملات غیررسمی خارج از چارچوب‌های مشورتی نیز گفت‌وگو را تسهیل کرده و نقش دیپلماسی روابط میان بازیگران محلی و سیاست‌گذاران را در حل تعارض‌ها و تأمین امنیت آبی بلندمدت نشان می‌دهد. تاب‌آوری اجتماعی-اکولوژیک در سامانه‌های آبی استرالیا، از مدیریت تطبیقی ناشی می‌شود که هم آستانه‌های اکولوژیک و هم آسیب‌پذیری‌های اجتماعی را در نظر می‌گیرد. چارچوب‌های هیدروسوسیالی تأکید می‌کنند که مداخلاتی که برای کاهش برداشت بیش‌ازحد یا تأثیرات خشکسالی انجام می‌شوند -مانند خطوط لوله یا مجوزدهی- ریسک را جابه‌جا می‌کنند و نه اینکه حذف کنند و نیاز به نظارت مستمر و حکمرانی انعطاف‌پذیر ایجاد می‌کنند (Wood, 2015, Godden & Ison, 2019). در لانگ‌هورن کریک، همبستگی جامعه، تجربه بحران قبلی و دانش محلی توانایی منطقه را برای مقابله با فشارهای طولانی‌مدت اقلیمی تقویت کرده است (Skinner et al, 2024; Watts et al, 2018). نوآوری، نقش محوری را در مدیریت آب استرالیا ایفا کرده است. فن‌هایی مانند بازشارژ مصنوعی آبخوان‌ها، ادغام شبکه‌های خطوط لوله خصوصی و عمومی و جریان‌های محیط‌زیستی قانونی، هم نوآوری‌های فناوری و هم سیاستی هستند. ادغام رویکردهای یکپارچه مدیریت آب و ساحل با دانش اجتماعی و فرهنگی، از جمله دیدگاه‌های بومیان، امکان رویکردهای «از بیرون به داخل» را فراهم کرده که ارزش‌های محیط‌زیستی و معنوی را در کنار استفاده‌های ابزاری از آب اولویت‌بندی می‌کند. بااین‌حال، چالش‌ها همچنان باقی‌اند. شکاف‌های هماهنگی بین حکمرانی حوضه‌ای و واقعیت‌های هیدروسوسیالی محلی، تغییرپذیری اقلیمی و افزایش تقاضای آبیاری، ریسک قابل‌توجهی ایجاد می‌کند (Brodnik & Brown, 2018; Edeson, 2019). نابرابری‌های اجتماعی-اقتصادی، فشارهای بازار و اتکای بیش‌ازحد به راه‌حل‌های فناوری متمرکز می‌توانند ریسک‌های ثانویه‌ای از جمله تنش اجتماعی، آسیب‌پذیری اقتصادی و تخریب اکولوژیک ایجاد کنند. تجربه استرالیا نشان می‌دهد که مدیریت مؤثر رویکردهای یکپارچه مدیریت آب و ساحل نیازمند ادغام ابعاد اکولوژیک، فناوری، اجتماعی و فرهنگی است. بحران‌های تاریخی -از برداشت بیش‌ازحد آب تا خشکسالی هزاره- تغییرات تحول‌آفرین را برانگیخته و تعامل میان ریسک هیدروسوسیالی و حکمرانی تطبیقی را آشکار کرده‌اند. حکمرانی چندقطبی، مشارکت جامعه و نوآوری زیرساختی به تاب‌آوری کمک می‌کنند، اما باید در برابر فشارهای اقلیمی و اقتصادی در حال تحول انعطاف‌پذیر باقی بمانند. با وجود پیشرفت‌های نهادی و سیاستی، تجربه استرالیا نشان می‌دهد که حکمرانی آب با چالش‌ها و ناکامی‌های مهمی نیز همراه بوده است. یکی از مهم‌ترین موارد، مناقشات

^۱. خط لوله انتقال آب کریکس (Creeks Pipeline): پروژه‌ای زیرساختی در ایالت استرالیای جنوبی برای انتقال آب و افزایش تاب‌آوری سامانه‌های کشاورزی در دوره‌های خشکسالی.

مرتبط با بازار آب در حوضه موری-دارلینگ است؛ به گونه‌ای که تمرکز حقوق آب در دست برخی بهره‌برداران بزرگ، افزایش سفته‌بازی و نابرابری در دسترسی به منابع آبی، انتقادهای گسترده‌ای را درباره عدالت اجتماعی و کارایی نظام تخصیص آب برانگیخته است (Alexandra, 2018; Wheeler et al., 2020). همچنین، اجرای برنامه حوضه موری-دارلینگ با تعارضات شدید میان اهداف محیط‌زیستی و منافع کشاورزی مواجه بوده و در برخی مناطق مخالفت جوامع محلی و دولت‌های ایالتی را به دنبال داشته است (Godden & Ison, 2019). از سوی دیگر، اگرچه در سال‌های اخیر توجه بیشتری به حقوق و دانش بومیان استرالیا در مدیریت آب شده است؛ اما پژوهش‌ها نشان می‌دهند که مشارکت جوامع بومی در فرآیندهای تصمیم‌گیری و تخصیص آب همچنان محدود بوده و شکاف قابل‌توجهی میان شناسایی حقوق فرهنگی آب و اعمال واقعی آن در نظام حکمرانی وجود دارد (Hartwig et al., 2020). افزون بر این، خشکسالی‌های شدید و رخداد‌های مرگ گسترده آبزیان در برخی بخش‌های حوضه موری-دارلینگ نشان داده‌اند که حتی در چارچوب‌های پیشرفته حکمرانی نیز هماهنگی میان اهداف اقتصادی، اجتماعی و محیط‌زیستی همچنان با چالش‌های جدی مواجه است (Wheeler et al., 2020). این تجربه بیانگر آن است که موفقیت حکمرانی آب در استرالیا نه یک وضعیت تثبیت‌شده، بلکه فرآیندی مستمر از یادگیری، بازنگری نهادی و مدیریت تعارض میان ذی‌نفعان مختلف است. در جمع‌بندی، استرالیا نشان می‌دهد که حکمرانی آب در حوضه‌های خشک و چندمنظوره، نیازمند رویکردی دقیق است که راه‌حل‌های فنی، چارچوب‌های سیاستی و دانش محلی را متوازن کند.

هلند

هلند، کشوری با سابقه طولانی و رابطه نزدیک با آب، به‌طور فزاینده‌ای با فشارهای ناشی از تغییرات اقلیمی، به‌ویژه افزایش سطح دریا، طوفان‌ها و خشکسالی‌های مکرر مواجه است (Mostert, 2020). به‌طور تاریخی، مدیریت آب در هلند بیشتر بر حفاظت در برابر سیلاب از طریق زیرساخت‌های سخت، از جمله سدها، دیوارهای ساحلی و سازه‌های مهار طوفان متمرکز بوده است. با این حال، استمرار خطرات اقلیمی و محدودیت‌های محیطی، ضرورت گذار به رویکردهای یکپارچه مدیریتی را که نیازهای اجتماعی، محدودیت‌های اکولوژیکی و پایداری بلندمدت را متوازن کند، برجسته کرده است (Offermans & Cörvers, 2012; Mostert, 2006). این تغییر اهمیت سازگاری تخصص تاریخی در مقابله با سیلاب با چالش‌های نوظهوری مانند سازگاری با خشکسالی و مدیریت ساحلی مقاوم در برابر اقلیم را نشان می‌دهد. از نظر جغرافیایی، هلند دارای چشم‌اندازی هیدرولوژیکی پیچیده است، به گونه‌ای که تقریباً ۲۶٪ از کشور زیر سطح دریا قرار دارد و جمعیت و دارایی‌های اقتصادی بیشتر در دشت‌های پایین‌دست متمرکز شده‌اند (Bruin, 2024). این کشور شامل پُل‌های بازسازی‌شده، سیستم‌های رودخانه‌ای دلتا و تپه‌های شنی است که تنوع فضایی در شرایط خاک و آب ایجاد می‌کنند. مناطق شنی مانند توونته به‌ویژه به خشکسالی حساس هستند؛ زیرا نفوذپذیری بالای خاک و محتوای کم ماده آلی دارند، درحالی‌که دشت‌های رودخانه‌ای همچنان در معرض سیلاب قرار دارند (Stive & Vrijling, 2017). این تنوع فضایی نیازمند استراتژی‌های مدیریت آب و زمین‌سازگار با شرایط خاص است که بتوانند هم اهداف حفاظت از سیلاب و هم حفظ آب را تحقق بخشند. تحول تاریخی حکمرانی آب در هلند نشان‌دهنده ترکیبی از تخصص فنی و آگاهی محیط زیست اجتماعی-سیاسی است (Verkerk & van Buuren, 2013). پروژه‌های شاخص مانند «کارهای دلتا»^۱ ملاحظات اکولوژیکی را در حفاظت از سیلاب ادغام کرده‌اند، در-

^۱. Delta Works

حالی که ابتکاراتی مانند «سند موتور»^۱ و «فضا برای رودخانه» از فرآیندهای رسوبی طبیعی برای افزایش تاب‌آوری ساحلی و رودخانه‌ای بهره می‌گیرند (Brand & Zonneveld, 2024; Luijendijk & van Oudenhoove, 2017). باین-حال، وابستگی طولانی‌مدت به زیرساخت‌های سخت، موجب ایجاد مسیرهای نهادی شده است که در آن تخصص و انگیزه‌های اقتصادی موجود، رویکردهای حفاظت‌محور را بر راه‌کارهای مبتنی بر اکوسیستم ترجیح می‌دهند. شناخت این محدودیت‌ها برای فهم گذارهای کنونی حکمرانی ضروری است.

چارچوب نهادی حکمرانی آب در هلند با ساختاری چندسطحی مشخص می‌شود که شامل اتحادیه اروپا، دولت ملی، استان‌ها و هیئت‌های منطقه‌ای آب است که هر کدام مسئولیت‌های مشخص و همپوشانی دارند (Hölscher et al, 2020; Swinkels, 2023). هیئت‌های آب دارای اختیارات منحصربه‌فردی برای گرفتن مالیات، اجرای اقدامات سازگاری اقلیمی و مدیریت منابع آب در چارچوب مرزهای هیدرولوژیکی طبیعی، نه تقسیمات اداری، هستند (Kamperman & Biesbroek, 2017). شهرداری‌ها، درحالی‌که مسئول مدیریت فاضلاب و اجرای مقررات هستند، اختیارات محدودی در تخصیص آب و تصمیمات استفاده از زمین دارند (Peters et al, 2021). این ساختار چندسطحی نهادی هم مدیریت یکپارچه آب را تسهیل و هم پیچیدگی‌هایی ایجاد می‌کند. به‌طور فزاینده، حکمرانی هلند اهمیت مدیریت یکپارچه حوضه آبریز را به‌عنوان راهبردی برای همسویی کاهش خطر سیلاب با اهداف اکولوژیکی شناخته است. برنامه‌هایی مانند «فضا برای رودخانه»^۲ نمونه‌ای از ترکیب اهداف هیدرولیکی، اکولوژیکی و اجتماعی است که بر هم‌راستایی فرآیندهای هیدرولوژیکی با سیستم‌های طبیعی تأکید دارد (de Bruin, 2024; Heel, 2025). باین‌حال، چالش‌های هماهنگی همچنان پابرجاست؛ زیرا اختلافات میان لایحه‌های فراملی، قوانین ملی، مقررات استانی و راهبردهای هیئت‌های آب می‌تواند مانع اجرای مؤثر شود. بررسی این تعاملات برای ارزیابی انسجام سیاست‌ها و ظرفیت سازگاری ضروری است. ابزارهای سیاستی در هلند شامل ترکیبی از مقررات الزام‌آور قانونی، مشوق‌های اقتصادی، چارچوب‌های تعاملی، کمپین‌های اطلاع‌رسانی، پروژه‌های زیرساختی و بیانیه‌های راهبردی است (Verkerk & van Buuren, 2013). برای مثال، «قانون محیط زیست و برنامه‌ریزی» تعهدات قانونی را تعیین می‌کند، درحالی‌که یارانه‌های کشاورزی سازگار با اقلیم، مشوق‌های مالی برای اقدامات تطبیقی فراهم می‌کنند (Korthals Altes, 2016). بیانیه‌های راهبردی مانند «آینده مبتنی بر طبیعت برای هلند ۲۱۲۰»^۳ راهنمایی استراتژیک ارائه می‌دهد که اهداف اکولوژیکی و زیرساختی را بدون الزام به اقدامات مشخص ادغام می‌کند. به‌طور جمعی، این ابزارها طراحی شده‌اند تا یکدیگر را تکمیل کنند، هرچند عدم هماهنگی در سطوح حکمرانی ممکن است شکاف‌های ظرفیت هدایتگری ایجاد کند (Baptist et al, 2019). مشارکت ذی‌نفعان و دیپلماسی فرامرزی آب از اصول مرکزی رویکردهای حکمرانی هلند است. شهرداری‌ها، کشاورزان، سازمان‌های محیط زیستی و بخش خصوصی به‌طور فعال در تصمیم‌گیری مشارکت دارند، درحالی‌که دستورالعمل‌های اتحادیه اروپا، مانند «دستورالعمل چارچوب آب»، مدیریت آب را در سراسر کشورهای عضو همسان‌سازی می‌کند (Hölscher et al, 2020; Swinkels, 2023). هیئت‌های آب به‌عنوان واسطه عمل می‌کنند، دانش علمی و دستورالعمل‌های سیاستی را به اقدامات عملی ترجمه می‌کنند و شبکه‌های همکاری را برای تقویت راهبردهای سازگاری با خشکسالی و سیلاب ایجاد می‌کنند. این تعامل چندجانبه مشروعیت و پذیرش اجتماعی اقدامات تطبیقی را افزایش می‌دهد.

^۱. Sand Motor^۲. Room for the River^۳. Nature-Based Future for the Netherlands 2120

تاب‌آوری اجتماعی-اکولوژیکی به یک اصل هدایتگر در حکمرانی آب هلند تبدیل شده و محدودیت‌های اکولوژیکی و نیاز به استراتژی‌های تطبیقی را مورد توجه قرار می‌دهد. پارادایم «چرخش زمین» اکوسیستم‌ها را به‌عنوان شریک فعال در برنامه‌ریزی فضایی در نظر می‌گیرد و خشکسالی و بارش‌های شدید را در تصمیم‌گیری‌ها لحاظ می‌کند تا پذیرش اجتماعی اقدامات تحول‌آفرین را افزایش دهد (de Bruin, 2024; Heel, 2025). حکمرانی تطبیقی که بر یادگیری تجربی، مداخلات تدریجی و انعطاف‌پذیری تأکید دارد، اساس این رویکردها است و امکان مقابله با عدم قطعیت را فراهم می‌کند. پروژه‌های نوآورانه مانند سند موتور و فضا برای رودخانه، یکپارچگی اهداف اکولوژیکی، هیدرولوژیکی و زیرساختی را در افق‌های بلندمدت نشان می‌دهند (Brand & Zonneveld, 2024; Luijendijk & van Oudenhove, 2017). این ابتکارها شرایط طبیعی موقت، برنامه‌ریزی فضایی لایه‌ای و رویکردهای مبتنی بر سناریو را به کار می‌گیرند تا تحولات سیستمیک را تسهیل کنند. آنها نشان می‌دهند که حتی مداخلات کوچک، وقتی به‌طور استراتژیک اجرا شوند، می‌توانند تغییرات گسترده‌تری در حکمرانی ایجاد کنند و حساسیت ذی‌نفعان را نیز مدنظر قرار دهند. با وجود این پیشرفت‌ها، چالش‌هایی همچنان باقی است. وابستگی‌های نهادی، پراکندگی ابزارهای سیاستی، تضاد ذی‌نفعان و فشارهای ناشی از توسعه شهری و کشاورزی مدیریت راهبردی آب را پیچیده می‌کند. علاوه بر این، تنوع فضایی خاک و هیدرولوژی نیازمند مداخلات محلی است که اغلب با محدودیت منابع و عدم همسویی در سطوح حکمرانی مواجه هستند (Brockhoff et al., 2022). رفع این محدودیت‌ها برای افزایش ظرفیت تطبیقی حیاتی است. تجربه هلند نمونه‌ای از تعامل موفقیت‌های تاریخی حفاظت از سیلاب و نیازهای نوظهور به حکمرانی یکپارچه و سازگار با اقلیم است. دستیابی به هماهنگی میان ابزارهای سیاستی چندسطحی، تسهیل مشارکت ذی‌نفعان و نهادی کردن یادگیری تطبیقی برای غلبه بر وابستگی‌های مسیر و تقویت تاب‌آوری ضروری است (Verkerk & van Buuren, 2013; Korthals Altes, 2016; Baptist et al., 2019). از طرفی دیگر، با وجود آنکه برنامه‌هایی نظیر «فضا برای رودخانه» و «سند موتور» در ادبیات بین‌المللی به‌عنوان نمونه‌های موفق حکمرانی تطبیقی آب شناخته می‌شوند، اجرای این سیاست‌ها با چالش‌ها و مقاومت‌های اجتماعی قابل‌توجهی نیز همراه بوده است. در برنامه «فضا برای رودخانه»، جابه‌جایی کاربری اراضی، محدودیت‌های اعمال‌شده بر فعالیت‌های کشاورزی و تملک برخی اراضی خصوصی در مواردی با مخالفت کشاورزان و جوامع محلی مواجه شد و نگرانی‌هایی درباره کاهش درآمدهای کشاورزی و تضعیف حقوق مالکیت ایجاد کرد (Warner et al., 2012). افزون بر این، برخی پژوهش‌ها نشان داده‌اند که مشارکت ذی‌نفعان در همه مراحل تصمیم‌گیری به یک اندازه مؤثر نبوده و در برخی پروژه‌ها، عدم توازن قدرت میان نهادهای دولتی و گروه‌های محلی موجب محدود شدن نفوذ واقعی ذی‌نفعان بر تصمیمات نهایی شده است (Van Buuren et al., 2014). همچنین، پیچیدگی ساختار حکمرانی چندسطحی هلند و تعدد نهادهای درگیر، در برخی موارد به کندی فرایندهای تصمیم‌گیری، افزایش هزینه‌های هماهنگی و بروز تعارض میان اهداف توسعه فضایی، کشاورزی و حفاظت محیط زیست منجر شده است (Hölscher et al., 2020). این تجربیات نشان می‌دهد که موفقیت حکمرانی یکپارچه آب و ساحل در هلند، علاوه بر نوآوری‌های فنی و نهادی، مستلزم مدیریت مستمر تعارضات اجتماعی، ایجاد اجماع میان ذی‌نفعان و برقراری توازن میان اهداف اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی بوده است. در جمع‌بندی، هلند نمونه‌ای پارادایمی از حکمرانی آب و ساحل ارائه می‌دهد که در آن تخصص فنی، نوآوری نهادی و آگاهی اکولوژیکی هم‌گرایی دارند. پایداری بلندمدت مستلزم ترکیب دانش تاریخی با رویکردهای مبتنی بر اکوسیستم، هماهنگی سیاست‌های چندسطحی و مشارکت فعال ذی‌نفعان است. با وجود

چالش‌های باقی‌مانده، پروژه‌ها و چشم‌اندازهای راهبردی جاری نشان‌دهنده پتانسیل توسعه چارچوب حکمرانی مقاوم در برابر خشکسالی و خطرات سیلاب در دوره‌ای است که با تغییرات سریع محیطی مشخص می‌شود.

سنگاپور

سنگاپور، یک دولت‌شهر با محدودیت سرزمینی و تراکم شهری بالا، نمونه‌ای برجسته از تلاقی حکمرانی سرزمینی، شهرنشینی و مدیریت محیط‌زیست به‌شمار می‌آید. از زمان استقلال در سال ۱۹۶۵، این کشور اقدامات نظام‌مند برای تأمین منابع آب شیرین و حفاظت از سواحل انجام داده و امنیت آب را به یکی از محورهای اصلی مدرنیزاسیون ملی تبدیل کرده است (Grundy-Warr & Savage, 2016). این رویکرد، ترکیبی از مهندسی زیرساختی، مدیریت بیوپولیتیک^۱ جمعیت و برنامه‌ریزی شهری است که پیوند عمیق میان سرزمین، هیدرولوژی و حکمرانی را نشان می‌دهد و جایگاه سنگاپور را در مطالعات سیاسی-بوم‌شناسی برجسته می‌سازد (Usher, 2024; Buurman & Padawangi, 2018). با توجه به محدودیت‌های جغرافیایی، سنگاپور با مساحت حدود ۷۲۸ کیلومتر مربع، بارش سالانه بالا (~۲۴۰۰ میلی‌متر) و فقدان دریاچه‌ها و آبخوان‌های گسترده مشخص می‌شود. این شرایط علی‌رغم اقلیم استوایی، ذخیره آب را محدود کرده و مدیریت هیدرولوژیک را به یک ضرورت ملی تبدیل کرده است (Cui et al, 2021; Usher, 2024). محیط ساحلی کشور نیز با خاک‌ریزی و توسعه خلیج‌های مصنوعی، مانند مارینا بی، تغییر یافته است و این امر نشان می‌دهد که هرگونه برنامه‌ریزی آب و ساحل باید در تعامل با محدودیت‌های فیزیکی و زیست‌محیطی سرزمین انجام شود. تحول تاریخی حکمرانی آب و ساحل در سنگاپور از یک سیستم استعماری و غیرمداخله‌گرایانه، که بر تأمین بندر متمرکز بود، به مدیریت یکپارچه دولتی آب‌های داخلی و رودخانه‌ها تغییر یافته است. مخازن اولیه، از جمله مک‌ریچی، پیرس و سلاتر، تحت نظارت دولت استعماری بریتانیا گسترش یافتند، اما پس از استقلال، حزب اقدام مردمی ظرفیت ذخیره‌سازی را به‌شدت افزایش داد و توسعه مخازن را به مناطق مسکونی و شهری گسترش داد تا از برنامه‌های صنعتی‌سازی و بازسازی شهری حمایت کند (Tortajada et al, 2013; Powell, 2021). در همین راستا، فضاهای ساحلی و رودخانه‌ای از مناطق بندری عملیاتی به مکان‌های تفریحی و سرمایه‌گذاری تبدیل شدند و ادغام حاکمیت هیدرولیک و توسعه شهری را نشان دادند.

ساختار نهادی حکمرانی آب و ساحل، متکی بر یک سیستم چندسطحی است که مؤسسات مختلف با نظارت مرکزی عمل می‌کنند. واحد ضدآلودگی (۱۹۷۰) و وزارت محیط‌زیست (۱۹۷۲) امنیت آب را به اولویت ملی تبدیل کردند، درحالی‌که سازمان خدمات عمومی آب سنگاپور^۲، مدیریت تأمین آب و حوضه‌های آبریز را بر عهده دارد. همزمان، سازمان توسعه شهری^۳ برنامه‌ریزی اراضی، توسعه ساحل و برنامه‌های فرهنگی را هدایت می‌کند (Chen et al, 2011; Tortajada & Joshi, 2014). این هماهنگی میان مؤسسات، مدیریت یکپارچه آب، زمین و توسعه شهری را ممکن ساخته است. یکپارچگی حوضه‌های آبریز و مدیریت ساحلی، یکی دیگر از ویژگی‌های برجسته حکمرانی سنگاپور است. از دهه ۱۹۷۰، منطقه مرکزی آبریز^۴ به مناطق شهری و نیمه‌شهری گسترش یافته و پوشش آبریز تا حدود ۶۷٪ مساحت زمین تا سال ۲۰۱۱ افزایش یافته است که برنامه‌هایی برای رسیدن به ۹۰٪ تا سال ۲۰۶۰ وجود دارد.

^۱. در مطالعات حکمرانی منابع، بیوپولیتیک به نحوه استفاده دولت از سیاست‌ها و زیرساخت‌های آب، سلامت و شهرسازی برای تنظیم جمعیت و کنترل ریسک‌های اجتماعی-زیست‌محیطی اشاره دارد.

^۲. Public Utilities Board

^۳. Urban Redevelopment Authority

^۴. Central Water Catchment Area

(Tun & Tong, 2025; Wang et al, 2018). شبکه مخازن با کانال‌ها، جوی‌ها و رودخانه‌های مصنوعی به هم متصل شده و سیستم هیدرولوژیک یکپارچه ایجاد کرده‌اند، درحالی‌که مدیریت ساحلی با خاک‌ریزی و ساخت خلیج‌های مصنوعی، امکان کنترل سیلاب، توسعه تفریحی و گسترش شهری را فراهم کرده است (Cui et al, 2021). سیاست‌ها و ابزارهای کلیدی حکمرانی شامل قانون بهداشت عمومی محیط‌زیست (۱۹۶۸)، قانون کنترل آلودگی آب و زهکشی (۱۹۷۵) و کمپین‌های ضد آلودگی است که به دولت اجازه می‌دهند روان‌آب‌ها، زهکشی و فاضلاب را کنترل کرده و کیفیت آب را تضمین کنند (Chan et al, 2018; Jensen & Nair, 2019). این ابزارها همچنین اجرای جابه‌جایی سکونتگاه‌های غیررسمی، مزارع کوچک و دستفروشان خیابانی را توجیه کرده و کنترل اجتماعی را با اهداف محیطی و زیرساختی همسو ساخته است. مشارکت ذی‌نفعان و دیپلماسی منطقه‌ای آب نیز در این چارچوب قابل توجه است. با وجود تمرکز حکمرانی داخلی، سنگاپور در تعامل با مالزی که پیش‌تر نزدیک به نیمی از آب خود را وارد می‌کرد، ظرفیت‌های دیپلماسی آب را توسعه داده است. نوآوری‌های اخیر، شامل شیرین‌سازی و بازیافت آب^۱، وابستگی خارجی را معکوس کرده و مدیریت چندسطحی ذی‌نفعان را تقویت کرده است (Hu et al, 2019; Caballero-). (Anthony & Hangzo, 2022). تاب‌آوری اجتماعی و اکولوژیک با گسترش حوضه‌های آبریز و کنترل محیطی افزایش یافته است. کنترل آلودگی باعث بازگشت تنوع زیستی رودخانه‌ها و آبریان شده و طراحی شهری مخازن را به مکان‌های تفریحی و سبک زندگی عمومی تبدیل کرده است (Cui et al, 2021). همزمان، مدیریت بیوپولیتیک جمعیت، از طریق جابه‌جایی دستفروشان و کشاورزان کوچک، حفاظت محیطی را با اداره اجتماعی همسو ساخته و تاب‌آوری را در ساختارهای سرزمینی و اجتماعی جاسازی کرده است. نوآوری‌های فنی و زیرساختی در حکمرانی آب سنگاپور شاخص هستند. استفاده از شیرین‌سازی، بازیافت آب و فناوری‌های شوری متغیر نمونه‌هایی از راهکارهای پیشرفته برای مقابله با محدودیت زمین و آب است (Zhou, 2021; Kim & Choi, 2023). مخازن مصنوعی و خلیج‌های شهری مانند مارینا بی و پنگول-سراگون، هم‌افزایی میان مهندسی هیدرولیک، خاک‌ریزی و برنامه‌ریزی شهری را نشان می‌دهند که هم امنیت آب و هم ارزش اقتصادی و سرمایه‌گذاری را افزایش می‌دهند. با این وجود، سنگاپور همچنان با چالش‌هایی مواجه است. تغییرات اقلیمی، محدودیت زمین و تراکم شهری بالا، گسترش بیشتر حوضه‌ها و سازگاری ساحلی را محدود می‌کند. همچنین، تمرکز حکمرانی آب پرسش‌هایی درباره عدالت اجتماعی و تأثیر تاریخی بر جمعیت‌های آسیب‌پذیر مطرح می‌کند. افزون بر این، برخی پژوهش‌ها نشان داده‌اند که اتکالی گسترده به راهکارهای فناورانه پرهزینه نظیر شیرین‌سازی آب دریا و بازیافت پیشرفته آب، وابستگی حکمرانی آب به مصرف بالای انرژی و سرمایه‌گذاری‌های بلندمدت را افزایش داده و درباره پایداری اقتصادی این راهبردها در بلندمدت پرسش‌هایی ایجاد کرده است (Tortajada & Joshi, 2014). بنابراین، حفظ تعادل میان امنیت آب، توسعه شهری و پایداری محیطی همچنان چالشی سیاستی و مدیریتی است. بررسی تحلیلی حکمرانی آب و ساحل در سنگاپور نشان می‌دهد که مفاهیمی نظیر «بیوپولیتیک» و «استعمار داخلی» فقط نقدی سیاسی بر عملکرد دولت نیستند، بلکه به فهم سازوکارهای شکل‌گیری تاب‌آوری اجتماعی-اکولوژیک نیز کمک می‌کنند. در این چارچوب، دولت از طریق توسعه زیرساخت‌های آبی، برنامه‌ریزی فضایی، کنترل کاربری زمین و مداخلات قانونی گسترده، توانسته است ظرفیت بالایی برای کاهش آسیب‌پذیری در برابر کمبود آب و مخاطرات ساحلی ایجاد کند. با این حال، این فرآیند در برخی موارد با جابه‌جایی گروه‌های اجتماعی، محدود شدن برخی اشکال مشارکت محلی و تمرکز قدرت تصمیم‌گیری همراه

^۱. Desalination and Water Reuse System (NEWater)

بوده است. از این رو، تجربه سنگاپور نشان می‌دهد که تاب‌آوری اجتماعی-اکولوژیک تنها محصول نوآوری‌های فنی و زیرساختی نیست، بلکه برآیند تعامل میان ظرفیت‌های نهادی، سازوکارهای حکمرانی و پیامدهای اجتماعی مداخلات دولت نیز محسوب می‌شود. در نتیجه، مفاهیم بیوپلیتیک و استعمار داخلی به درک ابعاد اجتماعی و سیاسی تولید تاب‌آوری کمک کرده و نشان می‌دهند که افزایش ظرفیت سازگاری ممکن است همزمان با شکل‌گیری برخی مصالحه‌های اجتماعی و نهادی همراه باشد.

در جدول ۱، الگوهای حکمرانی آب در استرالیا، هلند و سنگاپور مقایسه شده است. این سه کشور با وجود تفاوت‌های اقلیمی و نهادی، از طریق یکپارچه‌سازی سیاست‌ها، تقویت نهادهای تنظیم‌گر و بهره‌گیری از نوآوری‌های فناورانه توانسته‌اند نظامی کارآمد برای حفظ، مدیریت و پایداری منابع آب ایجاد کنند و تاب‌آوری آبی خود را به‌طور قابل-توجهی افزایش دهند.

جدول (۱): مقایسه تطبیقی حکمرانی آب سه کشور

ابعاد مقایسه	استرالیا	هلند	سنگاپور
ویژگی‌های جغرافیایی و هیدرولوژیکی	خشک‌ترین قاره مسکونی با بارش نامنظم، حوضه آبریز گسترده آبریز موری-دارلینگ و تالاب‌های ساحلی محدود؛ رودخانه‌های فصلی و آبخوان‌های حساس فشار مدیریت آب را افزایش می‌دهند.	۲۶٪ زیر سطح دریا، دشت‌های رودخانه‌ای و پلدهای بازسازی‌شده، تنوع فضایی خاک و هیدرولوژی، نیازمند تطبیق مدیریت سیلاب و خشکسالی با محدودیت اکولوژیکی.	دولت شهر کوچک با مساحت محدود (728 km^2)، بارش بالا اما فاقد ذخایر طبیعی گسترده، محیط ساحلی دست‌ساز و تغییر یافته نیازمند مدیریت هیدرولوژیک هوشمند.
چالش‌های آب و ساحل	خشکسالی‌های تاریخی، تغییرپذیری بارش، فشارهای کشاورزی و شهری، محدودیت منابع آب سطحی و زیرزمینی.	افزایش سطح دریا، سیلاب و خشکسالی‌های مکرر، فشار به زیرساخت‌ها و محدودیت‌های اکولوژیک در دشت‌های پایین‌دست.	تراکم جمعیت و توسعه شهری محدودیت زمین، فشار اقلیمی، ریسک سیلاب ساحلی و محدودیت گسترش حوضه‌ها.
تحول تاریخی حکمرانی آب	گذار از مدیریت خطی و تکنوکراتیک تأمین آب به چارچوب‌های مشارکتی، تطبیقی و هیدروسوسیالی؛ توسعه سیاست‌های کیفیت و حفاظت محیطی.	تمرکز تاریخی بر حفاظت از سیلاب با زیرساخت‌های سخت؛ گذار به رویکردهای سازگار با اکوسیستم، بهره‌گیری از فرآیندهای طبیعی و پروژه‌های ابتکاری.	از سیستم استعماری غیرمداخله‌گر به مدیریت یکپارچه دولتی آب‌های داخلی و حوضه‌ها؛ همزمان توسعه شهری و سرمایه‌گذاری ساحلی هماهنگ با حکمرانی آب.
ساختار نهادی	چندسطحی شامل دولت فدرال، ایالتی و محلی به همراه سازمان‌های جامعه‌محور؛ توانایی اعمال سیاست تطبیقی و هماهنگی محلی.	ساختار چندسطحی: اتحادیه اروپا، دولت ملی، استان‌ها و هیئت‌های آب با مسئولیت‌های هیدرولوژیکی، ایجاد توازن میان تخصص و مشارکت ذی‌نفعان.	سیستم مرکزی با سازمان خدمات عمومی آب سنگاپور، سازمان توسعه شهری و وزارت محیط‌زیست؛ یکپارچگی مدیریت آب، زمین و توسعه شهری در چارچوب تصمیم‌گیری دولتی.
یکپارچگی مدیریت حوضه و ساحل	مدیریت رسمی حوزه آبریز موری-دارلینگ، محدودیت‌ها در هماهنگی با تالاب‌ها و سیستم‌های ساحلی به دلیل اختلاف مقیاس و پیچیدگی‌های محلی.	برنامه‌های ابتکاری مانند، سند موتور و فضا برای رودخانه هماهنگی هیدرولوژیک و ساحلی را تسهیل می‌کنند، اما پراکندگی نهادی چالش ایجاد می‌کند.	شبکه مخازن و کانال‌های مصنوعی، خلیج‌های شهری و خاک‌ریزی، یکپارچگی مؤثر حوضه‌ها با مدیریت ساحلی و توسعه شهری.

سیاست‌ها و ابزارهای حکمرانی	مجوزهای برداشت آب، جریان‌های محیطی، زیرساخت‌های خطوط لوله، چارچوب‌های قانونی و بازار محور، تلفیق دانش بومی و مدیریتی.	قوانین الزام‌آور، مشوق‌های اقتصادی، چارچوب‌های تعاملی، پروژه‌های زیرساختی و بیانیه‌های استراتژیک برای هم‌راستایی اهداف هیدرولوژیک و اکولوژیک.	قوانین کنترل آلودگی، قانون بهداشت عمومی، برنامه‌های توسعه شهری و کمپین‌های آگاهی‌بخشی؛ تلفیق سیاست فنی و اجتماعی.
مشارکت ذی‌نفعان و دیپلماسی آب	تعامل فعال کشاورزان، کمیته‌های محلی و دولت؛ گفت‌وگو و حل تعارض‌ها با تمرکز بر امنیت آبی بلندمدت.	شهرداری‌ها، کشاورزان، سازمان‌های محیط‌زیستی و هماهنگی با سیاست‌های اتحادیه اروپا؛ شبکه‌های همکاری چندجانبه برای افزایش مشروعیت اقدامات تطبیقی.	تعامل داخلی و منطقه‌ای با مالزی، مدیریت چندسطحی ذی‌نفعان، استفاده از نوآوری‌های آب شیرین و بازیافت برای کاهش وابستگی خارجی.
تاب‌آوری اکولوژیکی-اجتماعی	مدیریت تطبیقی با نظارت بر آستانه‌های اکولوژیک و آسیب‌پذیری اجتماعی؛ تاب‌آوری محلی مبتنی بر دانش و تجربه تاریخی.	چارچوب تطبیقی، یادگیری تجربی، رویکردهای مبتنی بر سناریو؛ پذیرش اجتماعی اقدامات تحول‌آفرین و کاهش ریسک سیلاب و خشکسالی.	کنترل آلودگی و بازگشت تنوع زیستی، مدیریت بیوپولیتیک جمعیت، یکپارچگی اجتماعی-اکولوژیک، تاب‌آوری شهری و اکولوژیک.
نوآوری‌ها و راه‌کارهای شاخص	بازشازش مصنوعی آبخوان، ادغام خطوط لوله خصوصی و عمومی، جریان‌های محیطی قانونی، تلفیق دانش بومی.	پروژه‌های سند موتور، فضا برای رودخانه، آینده مبتنی بر طبیعت برای هلند ۲۰۲۱؛ استفاده از فرآیندهای طبیعی و طراحی مبتنی بر اکوسیستم.	شیرین‌سازی، بازیافت آب، مخازن و خلیج‌های مصنوعی، فناوری شوری متغیر، هم‌افزایی مهندسی هیدرولیک و توسعه شهری.
چالش‌ها و محدودیت‌ها	اختلاف مقیاس حوضه و ساحل، تغییرپذیری اقلیمی، فشار کشاورزی، ریسک اجتماعی-اکولوژیک، نابرابری در دسترسی به آب.	وابستگی نهادی، پراکندگی ابزارها، تضاد ذی‌نفعان، فشار توسعه شهری و کشاورزی، محدودیت منابع محلی.	تراکم شهری، محدودیت زمین، تغییرات اقلیمی، فشار توسعه، چالش عدالت اجتماعی، محدودیت گسترش حوضه و ساحل.

با تحلیل تطبیقی، شباهت‌ها و تفاوت‌های سه کشور در زمینه حکمرانی آب، سیاست‌های پایداری، ابزارهای قانونی و اقتصادی، نقش فناوری و زیرساخت‌ها، مشارکت اجتماعی و پیوند آب با توسعه سرزمینی و اقتصادی، در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول (۲): شباهت‌ها و تفاوت‌های سه کشور

ابعاد مقایسه	تفاوت‌ها و شباهت‌ها
ویژگی‌های جغرافیایی و هیدرولوژیکی	هر سه کشور با محدودیت‌های هیدرولوژیک مواجه‌اند، اما ماهیت آن متفاوت است: استرالیا با کم‌آبی و نوسان اقلیمی، هلند با غلبه آب و تهدید سیلاب، و سنگاپور با محدودیت سرزمینی و اتکای بالا به سامانه‌های مصنوعی.
چالش‌های آب و ساحل	ریسک‌های اقلیمی غالب متفاوت است: خشکسالی در استرالیا، سیلاب و افزایش سطح دریا در هلند و فشار همزمان سیلاب ساحلی و توسعه شهری در سنگاپور که بیانگر وابستگی حکمرانی به نوع مخاطره است.
تحول تاریخی حکمرانی آب	هر سه کشور گذار از رویکردهای مهندسی سخت به حکمرانی تطبیقی را تجربه کرده‌اند، اما مسیرها متفاوت بوده است: تأکید بر بازار و تخصیص (استرالیا)، طبیعت‌محوری (هلند) و یکپارچگی دولت‌محور (سنگاپور).
ساختار نهادی	تفاوت اصلی در سطح تمرکز است: حکمرانی فدرال و چندسطحی (استرالیا)، مدل چندلایه مشارکتی (هلند) و

ساختار متمرکز و تکنوکراتیک (سنگاپور) با هدف مشترک هماهنگی بخشی.	
هلند و سنگاپور در پیوند آب و ساحل یکپارچگی بیشتری دارند (طبیعت‌محور/مهندسی‌شده)، درحالی‌که استرالیا با شکاف مقیاسی میان مدیریت حوضه و ساحل مواجه است.	یکپارچگی مدیریت حوضه و ساحل
هر سه از ترکیب ابزارهای قانونی، اقتصادی و فنی استفاده می‌کنند، با این تفاوت که استرالیا بازارمحور، هلند مقررات‌محور و سنگاپور کنترل‌محور و فناوریانه است.	سیاست‌ها و ابزارهای حکمرانی
مشارکت در هلند و استرالیا گسترده‌تر و گفت‌وگو‌محور است، درحالی‌که در سنگاپور بیشتر هدایت‌شده دولتی است؛ سنگاپور در دیپلماسی آب منطقه‌ای نقش پررنگ‌تری دارد.	مشارکت ذی‌نفعان و دیپلماسی آب
هر سه کشور به سمت تاب‌آوری حرکت کرده‌اند: استرالیا (محلی-تجربی)، هلند (تطبیقی-یادگیرنده)، سنگاپور (فناورانه-شهری) با پذیرش عدم قطعیت اقلیمی به‌عنوان مبنا.	تاب‌آوری اجتماعی-اکولوژیکی
نوآوری‌ها متناسب با زمینه است: مدیریت تقاضا و آبخوان (استرالیا)، راه‌کارهای طبیعت‌محور (هلند)، و چرخه بسته آب شامل بازیافت و شیرین‌سازی (سنگاپور).	نوآوری‌ها و راه‌کارهای شاخص
همه کشورها با محدودیت‌های ساختاری مواجه‌اند: تعارض تخصیص (استرالیا)، پیچیدگی نهادی (هلند) و محدودیت فضایی و فشار توسعه (سنگاپور)، همراه با تشدید تغییر اقلیم.	چالش‌ها و محدودیت‌ها

نتایج و بحث

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که حکمرانی آب و سواحل را نمی‌توان فقط در قالب مدیریت منابع طبیعی یا مداخلات مهندسی هیدرولیک تحلیل کرد، بلکه این حوزه در چارچوب نظام‌های اجتماعی-اکولوژیک معنا می‌یابد؛ جایی که تعامل میان ساختارهای نهادی، الگوهای توسعه سرزمینی و عدم قطعیت‌های اقلیمی، مسیرهای تصمیم‌گیری و نتایج مدیریتی را شکل می‌دهد. در این چارچوب، همان‌گونه که ادبیات حکمرانی تطبیقی تأکید می‌کند، پایداری نه حاصل کنترل کامل طبیعت، بلکه نتیجه ظرفیت نظام‌ها برای یادگیری، سازگاری و بازتنظیم پیوسته روابط انسان و محیط است (Jafari et al, 2025; Gomez-Jaramillo et al, 2024; Mersha, 2021). از این منظر، مقایسه سه کشور نشان داد که موفقیت حکمرانی آب-ساحل بیش از میزان منابع آبی، به کیفیت هماهنگی نهادی و توانایی پیوند سیاست‌های خشکی و دریا وابسته است؛ نکته‌ای که مبنای تحلیل تطبیقی حاضر را شکل می‌دهد. در ادامه این چارچوب مفهومی، بررسی تاریخی کشورها نشان می‌دهد که علی‌رغم تفاوت‌های عمیق جغرافیایی، هر سه مورد مطالعه مسیر تحول مشابهی را تجربه کرده‌اند؛ مسیری که از پارادایم «مدیریت فنی و تأمین‌محور آب» به سوی «حکمرانی تطبیقی و یکپارچه» حرکت کرده است. استرالیا به تدریج از رویکردهای مهندسی تأمین آب به سیاست‌های مشارکتی و هیدروسوسیالی گذار کرده است (Wood, 2015, Godden& Ison, 2015, Gonzalez et al, 2020; 2019)، هلند از دفاع سخت در برابر آب به راهبردهای همزیستی با فرآیندهای طبیعی و طراحی مبتنی بر اکوسیستم رسیده است (de Bruin, 2024; Heel, 2025) و سنگاپور نیز با عبور از مدیریت استعماری حداقلی، نظامی یکپارچه ایجاد کرده که آب، توسعه شهری و برنامه‌ریزی ساحلی را همزمان مدیریت می‌کند (Tun& Tong, 2025; Wang et al, 2018). بنابراین، فشارهای اقلیمی جهانی و افزایش پیچیدگی مخاطرات، نوعی همگرایی مفهومی در مسیرهای حکمرانی ایجاد کرده است. با این حال، تحلیل عمیق‌تر نشان می‌دهد که اگرچه مسیر تحول مفهومی مشابه است، اما نوع مخاطره غالب در هر کشور، شکل نهایی نظام حکمرانی را تعیین کرده است. در استرالیا، کم‌آبی ساختاری و نوسان شدید بارش به توسعه ابزارهای تخصیصی، بازارهای آب و مدیریت تقاضا انجامیده است (Alexandra, 2018)، درحالی‌که هلند به دلیل مواجهه دائمی با خطر سیلاب و افزایش سطح دریا، حکمرانی خود را حول بازطراحی فضایی رودخانه‌ها و کاهش ریسک ساحلی سازمان داده است (de Bruin, 2024; 2024).

(Heel, 2025; Baptist et al, 2019). در مقابل، سنگاپور با محدودیت سرزمینی و وابستگی تاریخی به منابع خارجی، مسیر بازمهندسی کامل چرخه آب و توسعه زیرساخت‌های مصنوعی را دنبال کرده است (Usher, 2024; Buurman & Padawangi, 2018). از این رو، حکمرانی آب-ساحل ماهیتی زمینه‌محور دارد و الگوهای موفق تنها در صورت انطباق با شرایط بومی قابل انتقال خواهند بود. یافته‌ها همچنین نشان می‌دهد که میان نوع مخاطره و الگوی حکمرانی رابطه‌ای مستقیم وجود دارد و اثربخشی سازوکارهای حکمرانی تا حد زیادی به تناسب آنها با ماهیت ریسک‌های غالب وابسته است. در مواردی که مخاطرات ناگهانی و پرشدت، مانند سیلاب‌های ساحلی، طوفان‌ها و افزایش سطح دریا، تهدید اصلی محسوب می‌شوند، وجود ساختارهای متمرکزتر، هماهنگی سریع نهادی و ظرفیت بالای بسیج منابع اهمیت بیشتری می‌یابد؛ موضوعی که به‌ویژه در تجربه هلند و تا حدودی سنگاپور قابل مشاهده است. در مقابل، مخاطرات تدریجی و انباشتی نظیر کم‌آبی مزمن، افت منابع آب زیرزمینی و فشارهای بلندمدت ناشی از تغییرات اقلیمی، نیازمند سازوکارهای مشارکتی، یادگیری مستمر و حکمرانی تطبیقی هستند؛ ویژگی‌هایی که در تجربه استرالیا برجسته‌تر دیده می‌شود. از این منظر، تجربه کشورهای مورد مطالعه مؤید آن است که الگوهای هیبرید حکمرانی، به دلیل تلفیق ظرفیت‌های سلسله‌مراتبی، شبکه‌ای و بازارمحور، بیشترین توان را برای کاهش همزمان مخاطرات ناگهانی و تدریجی و افزایش تاب‌آوری نظام‌های اجتماعی-اکولوژیک دارا هستند (Pahl-Wostl, 2021; Djalante et al, 2011).

این تفاوت‌های زمینه‌ای به‌طور مستقیم در ساختارهای نهادی نیز بازتاب یافته است. مقایسه کشورها نشان می‌دهد که کارآمدی حکمرانی الزاماً به تمرکز یا عدم تمرکز وابسته نیست، بلکه به میزان هماهنگی عملکردی میان سطوح مختلف تصمیم‌گیری بستگی دارد. استرالیا با ساختار فدرال چندسطحی و مشارکت جامعه‌محور عمل می‌کند (Katusiime, & Schütt, 2020; Beal et al, 2023; Gonzalez et al, 2020) و آب و سازوکارهای نهادی چندلایه تعادل میان تخصص فنی و مشارکت اجتماعی را برقرار کرده است (Hölscher et al, 2020; Swinkels, 2023; Verkerk & van Buuren, 2013). سنگاپور با تمرکز نهادی بالا توانسته یکپارچگی سیاست‌گذاری را تضمین کند (Chen et al, 2011; Tortajada & Joshi, 2014). بنابراین، عامل تعیین‌کننده نه شکل نهادی، بلکه توانایی کاهش تعارضات و هم‌راستاسازی سیاست‌ها در مقیاس‌های مختلف است. در امتداد این بحث نهادی، مسئله یکپارچگی فضایی میان حوضه‌های آبریز و مناطق ساحلی به‌عنوان یکی از یافته‌های کلیدی پژوهش آشکار می‌شود. هلند و سنگاپور توانسته‌اند پیوند عملیاتی میان فرآیندهای رودخانه‌ای و ساحلی که اولی از طریق راه-کارهای طبیعت‌محور مانند، سند موتور، فضا برای رودخانه (Brand & Zonneveld, 2024; Luijendijk & van Oudenhoove, 2017) و دومی از طریق شبکه‌های مصنوعی مخازن، خلیج‌های شهری و مدیریت همزمان زمین و آب برقرار کنند (Cui et al, 2021). در مقابل، استرالیا علی‌رغم موفقیت در مدیریت حوضه آبریز موری-دارلینگ، همچنان با ناهماهنگی مقیاسی میان مدیریت داخلی و سامانه‌های ساحلی مواجه است (Bischoff-Mattson & Lynch, 2017; Doble et al, 2024). این موضوع نشان می‌دهد که یکپارچگی فضایی، حلقه مفقوده بسیاری از نظام‌های حکمرانی آب در جهان است. در همین راستا، تحلیل ابزارهای سیاستی نیز نشان می‌دهد که هر سه کشور به سمت الگوی حکمرانی هیبرید حرکت کرده‌اند؛ الگویی که ترکیبی از ابزارهای قانونی، اقتصادی و فناوریانه را به کار می‌گیرد. بازارهای آب و نظام مجوزدهی در استرالیا (Bischoff-Mattson & Lynch, 2016)، برنامه‌ریزی فضایی الزام‌آور و سیاست‌های تطبیقی در هلند (de Bruin, 2024; Heel, 2025) و تلفیق مقررات سخت با فناوری پیشرفته در

سنگاپور (Zhou, 2021; Kim & Choi, 2023) بیانگر آن است که مدیریت پیچیدگی سیستم‌های اجتماعی-اکولوژیکی تنها از طریق هم‌افزایی ابزارها امکان‌پذیر است. در واقع، اثربخشی سیاست‌ها زمانی افزایش می‌یابد که ابزارهای حکمرانی نه به صورت مجزا، بلکه در قالب یک بسته سیاستی منسجم عمل کنند. این تحول سیاستی به طور مستقیم با شیوه‌های مشارکت و تولید مشروعیت حکمرانی پیوند دارد. در استرالیا و هلند، فرآیندهای گفت‌وگو محور و مشارکت گسترده ذی‌نفعان به کاهش تعارضات و افزایش پذیرش اجتماعی سیاست‌ها کمک کرده است، درحالی‌که سنگاپور مشروعیت را بیشتر از طریق کارآمدی عملکردی و تضمین امنیت آب ایجاد کرده و مشارکت را در چارچوبی هدایت‌شده سازمان‌دهی کرده است. این تفاوت نشان می‌دهد که مشروعیت حکمرانی می‌تواند از مسیرهای متفاوت نهادی شکل گیرد، اما در همه موارد به اعتماد اجتماعی وابسته است. در پیوند با این موضوع، مفهوم تاب‌آوری اجتماعی-اکولوژیک به عنوان نتیجه نهایی تعامل نهادها، سیاست‌ها و جامعه ظاهر می‌شود. استرالیا تاب‌آوری را از طریق یادگیری ناشی از بحران‌های خشکسالی (Wood, 2015, Godden & Ison, 2019)، هلند از طریق سناریونویسی بلندمدت و برنامه‌ریزی تطبیقی (Brockhoff et al., 2022) و سنگاپور از طریق نوآوری فناورانه و کنترل یکپارچه محیطی توسعه داده است (Cui et al, 2021). این تفاوت‌ها نشان می‌دهد که تاب‌آوری یک وضعیت ایستا نیست، بلکه فرآیندی پویا و وابسته به ظرفیت نهادی برای یادگیری مستمر است.

در همین چارچوب، نقش نوآوری به عنوان حلقه اتصال میان سازگاری اقلیمی و حکمرانی برجسته می‌شود. بازشارژ مصنوعی آبخوان‌ها در استرالیا، زیرساخت‌های طبیعت‌محور در هلند و چرخه بسته آب شامل شیرین‌سازی و بازیافت آب در سنگاپور نشان می‌دهد که فناوری زمانی مؤثر است که با اصلاحات نهادی و اجتماعی همراه شود؛ زیرا نوآوری بدون تغییر در ساختار حکمرانی، توان ایجاد تاب‌آوری پایدار را ندارد. با وجود این دستاوردها، تحلیل انتقادی نشان می‌دهد که هر سه کشور همچنان با محدودیت‌های ساختاری مواجه‌اند. در استرالیا، فشار بازار آب و تعارض تخصیص می‌تواند به نابرابری اجتماعی منجر شود، در هلند پیچیدگی نهادی و وابستگی مسیر سرعت تحول را محدود می‌کند، و در سنگاپور تمرکز نهادی پرسش‌هایی درباره عدالت اجتماعی و انعطاف‌پذیری بلندمدت ایجاد می‌کند. این چالش‌ها نشان می‌دهد که حتی نظام‌های موفق نیز در برابر عدم قطعیت‌های اقلیمی مصون نیستند. در مجموع، تحلیل تطبیقی سه کشور نشان می‌دهد که موفقیت در حکمرانی پایدار آب و سواحل نه به وفور منابع طبیعی، بلکه به ظرفیت نهادی برای یکپارچه‌سازی سیاست‌های آب، سرزمین و دریا وابسته است. استرالیا با تکیه بر مدیریت تطبیقی و مشارکت اجتماعی، هلند با توسعه رویکردهای مبتنی بر طبیعت و همزیستی با آب و سنگاپور با یکپارچگی نهادی و نوآوری فناورانه، سه مسیر متفاوت اما همگرا را در تقویت تاب‌آوری اجتماعی-اکولوژیک نمایان می‌کنند. مقایسه این الگوها نشان می‌دهد که حکمرانی مؤثر زمانی شکل می‌گیرد که سلامت اکوسیستم‌های آبی به عنوان پیش‌شرط توسعه اقتصادی و امنیت اجتماعی در نظر گرفته شود و سازوکارهای تصمیم‌گیری بتوانند میان عدم قطعیت‌های اقلیمی، منافع ذی‌نفعان و الزامات توسعه ساحلی تعادل برقرار کنند. بنابراین، دیپلماسی دریا و حکمرانی آب در عصر تغییر اقلیم مستلزم گذار از مدیریت بخشی و واکنشی به سوی چارچوب‌های یادگیرنده، چندسطحی و تطبیقی است؛ چارچوب‌هایی که از طریق پیوند دانش علمی، نوآوری نهادی و مشارکت اجتماعی، امکان تحقق پایداری بلندمدت نظام‌های اجتماعی-اکولوژیک آب را فراهم می‌سازند.

با اتکا به یافته‌های حاصل از تحلیل تطبیقی استرالیا، هلند و سنگاپور، می‌توان نتیجه گرفت که گذار به حکمرانی پایدار آب و سواحل در ایران مستلزم بازتعریف رابطه میان سیاست‌گذاری، نظام نهادی و پویایی‌های اجتماعی-اکولوژیک است. تجربه این کشورها نشان می‌دهد که موفقیت مدیریت آب نه تنها حاصل توسعه زیرساخت‌های فنی، بلکه پیامد شکل‌گیری نظام حکمرانی یکپارچه‌ای است که بتواند میان مدیریت حوضه‌های آبریز، مناطق ساحلی و برنامه‌ریزی سرزمینی پیوند نهادی برقرار کند. از این رو، نخستین گام برای ایران، ایجاد سازوکاری هماهنگ و فرابخشی میان وزارتخانه‌ها، سازمان‌های محلی، نهادهای علمی و بخش خصوصی است تا فرآیند تصمیم‌گیری از حالت بخشی و واکنشی خارج شده و به یک چرخه یادگیری نهادی و بازخورد مستمر تبدیل شود؛ چرخه‌ای که در آن دانش علمی، تجربه محلی و داده‌های مدیریتی به‌صورت همزمان در سیاست‌گذاری ادغام شوند. در ادامه، تجربه استرالیا و هلند نشان می‌دهد که یکپارچگی واقعی زمانی تحقق می‌یابد که مدیریت منابع آب از سطح تأمین و تخصیص فراتر رفته و سلامت اکوسیستم‌های آبی به‌عنوان مبنای برنامه‌ریزی در نظر گرفته شود. در این زمینه، یکی از مهم‌ترین درس‌های عملیاتی تجربه استرالیا برای ایران، ایجاد نهادهای حوضه‌محور با اختیارات اجرایی و مالی مشخص، مشابه ساختار مدیریت حوضه موری-دارلینگ، است تا هماهنگی میان استان‌ها، ذی‌نفعان و بخش‌های مصرف‌کننده آب تقویت شود. همچنین، تجربه این کشور نشان می‌دهد که تخصیص آب باید بر پایه نظام‌های شفاف پایش هیدرولوژیک و ارزیابی اکولوژیک انجام گیرد تا امکان بازنگری مستمر در سهم‌بندی منابع در شرایط خشکسالی و تغییرات اقلیمی فراهم شود. از سوی دیگر، تجربه هلند بیانگر اهمیت نهادینه‌سازی مدیریت یکپارچه آب و ساحل از طریق سازوکارهای مالی پایدار است. در این راستا، ایجاد صندوق‌های اختصاصی تأمین مالی پروژه‌های سازگاری اقلیمی و راه‌کارهای مبتنی بر طبیعت، مشابه سازوکارهای مالی هیئت‌های آب هلند، می‌تواند ظرفیت اجرای پروژه‌های احیای تالاب‌ها، سیلاب‌دشت‌ها و اکوسیستم‌های ساحلی را در ایران افزایش دهد. همچنین، توسعه نهادهای فرابخشی برای هماهنگی میان مدیریت حوضه‌های آبریز و مناطق ساحلی می‌تواند از شکاف نهادی میان مدیریت آب‌های داخلی و سواحل کشور بکاهد و زمینه را برای برنامه‌ریزی یکپارچه سرزمین فراهم سازد.

همزمان، تجربه سنگاپور نشان می‌دهد که ادغام زیرساخت‌های فناورانه با ظرفیت‌های نهادی نقش تعیین‌کننده‌ای در افزایش امنیت آبی دارد. در این راستا، ایران می‌تواند با توسعه سامانه‌های یکپارچه پایش و مدیریت داده‌های آب در مقیاس ملی، اطلاعات مربوط به منابع آب سطحی، زیرزمینی، کیفیت آب و الگوهای مصرف را در یک بستر مشترک تصمیم‌گیری تجمیع کند. همچنین، توسعه تدریجی چرخه بازچرخانی آب در مراکز صنعتی، شهرهای بزرگ و مناطق ساحلی، با الگوبرداری از تجربه NEWater سنگاپور، می‌تواند بخشی از فشار وارده بر منابع آب متعارف را کاهش دهد. با این حال، تجربه سنگاپور نشان می‌دهد که موفقیت فناوری وابسته به وجود چارچوب‌های حقوقی شفاف، نظام تنظیم‌گری کارآمد و هماهنگی نهادی مستمر است. از این رو اصلاح قوانین مرتبط با آب، محیط‌زیست و توسعه ساحلی باید همزمان با توسعه زیرساخت‌های فناورانه دنبال شود. از سوی دیگر، مشارکت اجتماعی و دیپلماسی آب به‌عنوان یکی از ارکان مشترک الگوهای موفق، اهمیت ویژه‌ای برای ایران دارد. تجربه استرالیا نشان می‌دهد که تشکیل شوراهای کمیته‌های حوضه‌ای متشکل از نمایندگان دولت، کشاورزان، بهره‌برداران، دانشگاه‌ها و سازمان‌های مدنی می‌تواند مشروعیت اجتماعی تصمیمات دشوار آبی را افزایش داده و تعارضات منابع را کاهش دهد. در مقابل، تجربه هلند نشان می‌دهد که مشارکت زمانی اثربخش‌تر خواهد بود که در قالب نهادهای دائمی، دارای اختیارات مشخص و برخوردار از منابع مالی پایدار سازمان‌دهی شود. همچنین، با توجه به ماهیت فرامرزی برخی منابع آبی و دریایی

ایران، بهره‌گیری از تجربه سنگاپور در توسعه دیپلماسی آب و ایجاد سازوکارهای همکاری منطقه‌ای می‌تواند به کاهش ریسک‌های ژئوپلیتیکی و افزایش امنیت آبی کشور کمک کند.

افزون بر این، رویکردهای مبتنی بر طبیعت که در تجربه هلند به‌وضوح مشاهده می‌شود، می‌تواند الهام‌بخش بازطراحی سیاست‌های سازگاری اقلیمی در ایران باشد. اجرای پروژه‌های احیای سیلاب‌دشت‌ها، بازسازی اکوسیستم‌های ساحلی، حفاظت از تالاب‌ها و استفاده از راه‌کارهای اکولوژیک به‌جای اتکای صرف بر سازه‌های سخت، امکان افزایش انعطاف‌پذیری سیستم‌های آبی را فراهم می‌کند. چنین اقداماتی نه تنها ریسک سیلاب و خشکسالی را کاهش می‌دهد، بلکه موجب تقویت خدمات اکوسیستمی، افزایش ظرفیت جذب شوک‌های اقلیمی و کاهش هزینه‌های بلندمدت مدیریت منابع آب خواهد شد. در نهایت، تجربه تطبیقی سه کشور نشان می‌دهد که موفقیت حکمرانی آب وابسته به توسعه سرمایه انسانی و شبکه‌های معرفتی است. از این‌رو، ایران می‌تواند با تقویت آموزش‌های میان‌رشته‌ای، ایجاد شبکه‌های همکاری میان دانشگاه‌ها، مراکز پژوهشی و نهادهای اجرایی و تدوین راهنماهای عملیاتی ملی، ظرفیت یادگیری نهادی و نوآوری سیاستی را افزایش دهد. چنین چارچوبی امکان آزمون و اصلاح تدریجی سیاست‌ها، تولید دانش بومی و هم‌راستاسازی نوآوری فناورانه با ارزش‌های اجتماعی و فرهنگی را فراهم می‌کند. در مجموع، الگوبرداری از تجارب بین‌المللی نه به معنای انتقال مستقیم مدل‌ها، بلکه مستلزم بومی‌سازی اصول حکمرانی یکپارچه، تقویت هماهنگی نهادی و حرکت به‌سوی نظامی تطبیقی و یادگیرنده است. تجربه استرالیا ضرورت ایجاد نهادهای حوضه‌محور و تخصیص تطبیقی منابع آب را نشان می‌دهد؛ تجربه هلند بر اهمیت سازوکارهای مالی پایدار و راهکارهای مبتنی بر طبیعت تأکید دارد و تجربه سنگاپور نقش فناوری، مدیریت داده‌محور و یکپارچگی نهادی را برجسته می‌سازد. ترکیب این درس‌ها می‌تواند مبنایی برای طراحی چارچوبی بومی، انعطاف‌پذیر و پایدار در حکمرانی آب و سواحل ایران فراهم آورد؛ چارچوبی که قادر باشد همزمان به چالش‌های کم‌آبی، تغییرات اقلیمی، توسعه ساحلی و پایداری اکولوژیک پاسخ دهد.

محدودیت‌های پژوهش

با وجود تلاش برای استفاده از طیف گسترده‌ای از مقالات علمی، اسناد سیاستی و گزارش‌های رسمی مرتبط با حکمرانی آب و سواحل، این پژوهش با برخی محدودیت‌های روش‌شناختی مواجه است. نخست، یافته‌ها بر تحلیل اسنادی و منابع منتشرشده استوار است؛ از این‌رو، ممکن است تحت تأثیر سوگیری‌های موجود در ادبیات علمی و روایت‌های نهادی قرار گیرد. هرچند برای کاهش این محدودیت از منابع متنوع دانشگاهی، گزارش‌های بین‌المللی و اسناد سیاستی استفاده شد، اما بخش قابل‌توجهی از ادبیات در دسترس به زبان انگلیسی منتشر شده است که می‌تواند برخی دیدگاه‌های محلی، اجتماعی و بومی را کمتر بازنمایی کند. به همین دلیل، در موارد امکان، از منابع و اسناد مرتبط با زمینه‌های ملی کشورهای مورد مطالعه نیز برای کنترل و اعتبارسنجی یافته‌ها بهره گرفته شد. دوم، ماهیت تطبیقی پژوهش ایجاب می‌کند که تفاوت‌های تاریخی، فرهنگی، اقتصادی و نهادی میان کشورها مورد توجه قرار گیرد. در نتیجه، یافته‌های این مطالعه نباید به‌منزله الگوهای قابل‌انتقال مستقیم تلقی شوند، بلکه بیشتر به‌عنوان مجموعه‌ای از اصول، تجربیات و درس‌آموخته‌های حکمرانی قابل‌انطباق با شرایط بومی تفسیر می‌شوند. افزون بر این، پویایی سریع سیاست‌های آب، اقلیم و توسعه ساحلی ممکن است موجب شود برخی اسناد و راهبردهای مورد بررسی

در گذر زمان دستخوش تغییر شوند. از این رو، به‌روزرسانی مستمر تحلیل‌ها و انجام مطالعات تجربی مبتنی بر داده‌های میدانی، می‌تواند در آینده به اعتباربخشی و تکمیل نتایج این پژوهش کمک کند.

منابع

- اکبری، محمد رضا؛ رضوان‌فر، احمد؛ حسینی، سید محمود؛ علم‌بیگی، امیر؛ لیاقت، عبدالمجید. (۱۳۹۸). بررسی کنشگری شورای عالی آب در حکمرانی منابع آب ایران: تحلیلی مبتنی بر مصوبات (۱۳۸۹-۱۳۹۷). سیاست‌گذاری عمومی، (۴)۵، صص: ۳۱-۹.
- اسکوهی، مانده؛ اسماعیلی، کاظم. (۱۴۰۰). تحلیلی بر نظریه‌های حکمرانی و مدیریت منابع آب در ایران. فصلنامه آب و توسعه پایدار، (۱)۸، صص: ۱-۱۰.
- راهدان، عباس؛ قربانی، مهدی؛ احمدآلی، خالد؛ ضرغامی، مهدی. (۱۴۰۳). بررسی شیوه و رژیم حکمرانی آب حوزه‌ی آبخیز زاینده‌رود با تأکید بر نقش کنشگران و نهادهای کلیدی. نشریه آبیاری و زهکشی ایران، (۵)۱۸، صص: ۷۱۵-۷۳۴.
- صدقیان ترک‌نژاد، نگین‌سادات؛ خان‌محمدی، هادی؛ اصلی‌پور، حسین. (۱۴۰۲). شناسایی و تحلیل عوامل مؤثر بر حکمرانی آب در ایران. خط مشی‌گذاری عمومی در مدیریت، (۲)۱۴، صص: ۶۹-۹۰.
- محمدی ده‌چشمه، مصطفی؛ گنچکی، عقیل. (۱۴۰۱). چالش‌های حکمروایی و مدیریت یکپارچه منابع آب شهرها "مطالعه شهرهای استان بوشهر". فصلنامه آب و توسعه پایدار، (۱)۹، صص: ۲۴-۱۱.
- ملک‌حسینی، بتول؛ حلی‌ساز، ارشک؛ محمدی کنگرانی، حنا. (۱۴۰۳). آسیب‌شناسی رابطه عمودی دولت و ذی‌نفعان در مدیریت منابع آب. مجلس و راهبرد، (۱۱۹)۳۱، صص: ۷۳-۱۰۴.
- متقی، افشین؛ صدرانیا، حسن؛ یوسفی شاتوری، محمد. (۲۰۲۵). تأثیر حکمرانی محلی آب بر کاربست آب مجازی: مطالعه موردی استان اصفهان. مطالعات جغرافیایی مناطق خشک، (۵۸)۱۵، صص ۷۲-۵۲.
- Akinsete, E., Koundouri, P., Kartala, X., Englezos, N., Lautze, J., Yihdego, Z., ... & Sodoge, J. (2022). Sustainable WEF nexus management: a conceptual framework to integrate models of social, economic, policy, and institutional developments. *Frontiers in Water*, 4, 727772.
- Akamani, K. (2016). Adaptive water governance: Integrating the human dimensions into water resource governance. *Journal of Contemporary Water Research & Education*, 158(1), 2-18.
- Alexandra, J. (2018). Evolving governance and contested water reforms in Australia's Murray-Darling Basin. *Water*, 10(2), 113.
- Beal, C. D., Bailey, M. S., Hohenhaus, M., & Jackson, M. (2023). Community-based water demand management: socio-technical strategies for improving water security in Australian Indigenous communities. *Environmental Research: Infrastructure and Sustainability*, 3(2), 025006.
- Bischoff-Mattson, Z., & Lynch, A. H. (2017). Integrative governance of environmental water in Australia's Murray-Darling Basin: evolving challenges and emerging pathways. *Environmental Management*, 60(1), 41-56.
- Bischoff-Mattson, Z., & Lynch, A. H. (2016). Adaptive governance in water reform discourses of the Murray-Darling Basin, Australia. *Policy sciences*, 49(3), 281-307.
- Balogoun, S., & Idrissou, L. (2021). Political, Legislative and Institutional Frameworks for the Governance of Water Resourcesâ€™ Ecosystem Services in Benin. *Asian Journal of Agricultural Extension, Economics & Sociology*, 39(11), 426-444.
- Brodnik, C., & Brown, R. (2018). Strategies for developing transformative capacity in urban water management sectors: The case of Melbourne, Australia. *Technological Forecasting and Social Change*, 137, 147-159.
- Baptist, M., van Hattum, T., Reinhard, S., van Buuren, M., de Rooij, B., Hu, X., ... & Selnes, T. (2019). A nature-based future for the Netherlands in 2120.
- Brand, N., & Zonneveld, W. (2024). Water and spatial planning in the Netherlands: the latent potential of spatial planning for flood resilience. In *Oxford Research Encyclopedia of Environmental Science*.
- Brown, R. R., Keath, N., & Wong, T. H. (2009). Urban water management in cities: historical, current and future regimes. *Water science and technology*, 59(5), 847-855.
- Buurman, J., & Padawangi, R. (2018). Bringing people closer to water: integrating water management and urban infrastructure. *Journal of Environmental Planning and Management*, 61(14), 2531-2548.
- Caballero-Anthony, M., & Hangzo, P. K. K. (2022). *From water insecurity to niche water diplomacy: The Singapore experience*. S. Rajaratnam School of International Studies.
- Cui, M., Ferreira, F., Fung, T. K., & Matos, J. S. (2021). Tale of two cities: How nature-based solutions help create adaptive and resilient urban water management practices in Singapore and Lisbon. *Sustainability*, 13(18), 10427.
- Chen, D. C., Maksimovic, C., & Voulvoulis, N. (2011). Institutional capacity and policy options for integrated urban water management: a Singapore case study. *Water Policy*, 13(1), 53-68.
- Chan, F. K. S., Chuah, C. J., Ziegler, A. D., Dąbrowski, M., & Varis, O. (2018). Towards resilient flood risk management for Asian coastal cities: Lessons learned from Hong Kong and Singapore. *Journal of Cleaner Production*, 187, 576-589.

- Doble, R., Walker, G., Crosbie, R., Guillaume, J., & Doody, T. (2024). An overview of groundwater response to a changing climate in the Murray-Darling Basin, Australia: potential implications for the basin system and management opportunities. *Hydrogeology Journal*, 32(1), 59-80.
- de Bruin, K. (2024). Water Resilience for Economic Resilience in the Netherlands: From Floods to Drought. *Managing Water for Economic Resilience: De-risking Is Not Enough*, 78.
- Dai, Y., Huang, Z., Khan, N., & Labbo, M. S. (2025). Smart water management: Governance innovation, technological integration, and policy pathways toward economic and ecological sustainability. *Water*, 17(13), 1932.
- Djalante, R., Holley, C., & Thomalla, F. (2011). Adaptive governance and managing resilience to natural hazards. *International Journal of Disaster Risk Science*, 2(4), 1-14.
- Everard, M. (2019). A socio-ecological framework supporting catchment-scale water resource stewardship. *Environmental Science & Policy*, 91, 50-59.
- Edeson, G. R. (2019). *Local innovation and social learning in water management: integrating community knowledge into Australian rural water management* (Doctoral dissertation, University of Tasmania).
- Gain, A. K., Hossain, S., Benson, D., Di Baldassarre, G., Giupponi, C., & Huq, N. (2021). Social-ecological system approaches for water resources management. *International journal of sustainable development & world ecology*, 28(2), 109-124.
- Godden, L., & Ison, R. (2019). Community participation: exploring legitimacy in socio-ecological systems for environmental water governance. *Australasian Journal of Water Resources*, 23(1), 45-57.
- Gomez-Jaramillo, Y., Berrouet, L., Villegas-Palacio, C., & Berrio-Giraldo, L. (2024). Conceptual framework for analyzing the sustainability of socio-ecological systems with a focus on ecosystem services that support water security. *Sustainable Development*, 32(3), 2298-2313.
- Godden, L., & Ison, R. (2019). Community participation: exploring legitimacy in socio-ecological systems for environmental water governance. *Australasian Journal of Water Resources*, 23(1), 45-57.
- Gonzalez, D., Dillon, P., Page, D., & Vanderzalm, J. (2020). The potential for water banking in Australia's Murray-Darling Basin to increase drought resilience. *Water*, 12(10), 2936.
- Grundy-Warr, C., & Savage, V. R. (2016). Singapore: sustaining a global city-state and the challenges of environmental governance in the twenty-first century. In *Routledge Handbook of the Environment in Southeast Asia* (pp. 466-487). Routledge.
- Hölscher, K., Frantzeskaki, N., & Loorbach, D. (2020). Transforming urban water governance in Rotterdam, the Netherlands. In *Transformative climate governance: a capacities perspective to systematise, evaluate and guide climate action* (pp. 163-204). Cham: Springer International Publishing.
- Heel, R. V. (2025). *Systems Thinking in Water Governance: The Thematic and Spatial Integration of Water-Related Challenges on a Regional Scale* (Master's thesis).
- Hu, X., Lovelock, B., Ying, T., & Mager, S. (2019). Stakeholder collaboration on policymaking for sustainable water management in Singapore's hotel sector: A network analysis. *Sustainability*, 11(8), 2360.
- Hartwig, L. D., Jackson, S., & Osborne, N. (2020). Trends in Aboriginal water ownership in New South Wales, Australia: The continuities between colonial and neoliberal forms of dispossession. *Land Use Policy*, 99, 104869.
- Jensen, O., & Nair, S. (2019). Integrated urban water management and water security: A comparison of Singapore and Hong Kong. *Water*, 11(4), 785.
- Jafari, G., Omidvar, B., & Ardestani, M. (2025). A resilience-based framework for attuning integrated water resources management strategies in social-ecological systems of river basins. *Journal of Water and Climate Change*, 16(11), 3545-3565.
- Julio, N., Figueroa, R., & Ponce Oliva, R. D. (2021). Water resources and governance approaches: insights for achieving water security. *Water*, 13(21), 3063.
- Jozaei, J., Chuang, W. C., Allen, C. R., & Garmestani, A. (2022). Social vulnerability, social-ecological resilience, and coastal governance. *Global Sustainability*, 5, e12.
- Knüppe, K., & Pahl-Wostl, C. (2011). A framework for the analysis of governance structures applying to groundwater resources and the requirements for the sustainable management of associated ecosystem services. *Water Resources Management*, 25(13), 3387-3411.
- Katusiime, J., & Schütt, B. (2020). Integrated water resources management approaches to improve water resources governance. *Water*, 12(12), 3424.
- Kamperman, H., & Biesbroek, R. (2017). Measuring progress on climate change adaptation policy by Dutch water boards. *Water Resources Management*, 31(14), 4557-4570.
- Korthals Altes, W. K. (2016). Planning reform beyond planning: the debate on an integrated Environment and Planning Act in the Netherlands. *Planning practice & research*, 31(4), 420-434.
- Kim, S., & Choi, Y. (2023). A comparative study of the adoption of public-private partnerships for water services in South Korea and Singapore. *Public Administration and Policy*, 26(2), 142-155.
- Luijendijk, A., & van Oudenhoven, A. (2019). The Sand Motor: a nature-based response to climate change. *Findings and reflections of the interdisciplinary research program Naturecoast*.
- Loitzenbauer, E. W., & Mendes, C. A. B. (2019). Appropriate unit limits for integrated coastal and river basin management: An application to the Itajaí River basin, SC, Brazil. *Ocean & Coastal Management*, 168, 150-157.
- Morante, M. C. D., Casas, A. F., & Rodríguez, C. M. (2025). Adaptive Water Management from a Socio-Ecological Perspective: A Systematic Review of Co-Learning Strategies and Traditional Knowledge. *Sustainability*, 17(21), 9597.

- Montenegro, L., & Hack, J. (2020). A socio-ecological system analysis of multilevel water governance in Nicaragua. *Water*, 12(6), 1676.
- Malakar, K. D., Kumar, M., Anand, S., & Kuzur, G. (2023). Climate, climate change, ecology, and socio-ecological environments. In *Climate Change and Socio-Ecological Transformation: Vulnerability and Sustainability* (pp. 29-116). Singapore: Springer Nature Singapore.
- Moggridge, B. J., & Thompson, R. M. (2021). Cultural value of water and western water management: an Australian Indigenous perspective. *Australasian journal of water resources*, 25(1), 4-14.
- Mostert, E. (2020). Water and national identity in the Netherlands: the history of an idea. *Water History*, 12(3), 311-329.
- Mostert, E. (2006). Integrated water resources management in the Netherlands: how concepts function. *Journal of Contemporary Water Research and Education*, 135(1), 19-27.
- McKay, J. M. (2011). Australian water allocation plans and the sustainability objective—conflicts and conflict-resolution measures. *Hydrological Sciences Journal*, 56(4), 615-629.
- Mersha, A. (2021). *Integrated water resources management: A systems perspective of water governance and hydrological conditions: Integrated water resources management*. CRC Press.
- Numbere, A. O., Kika, E. P., & Izah, S. C. (2024). Challenges and mitigation of water resource management in rural areas in Nigeria. In *Water crises and sustainable management in the global south* (pp. 373-390). Singapore: Springer Nature Singapore.
- Newton, A., & Weichselgartner, J. (2014). Hotspots of coastal vulnerability: A DPSIR analysis to find societal pathways and responses. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 140, 123-133.
- Nabiafjadi, S., Sharifzadeh, M., & Ahmadvand, M. (2021). Social network analysis for identifying actors engaged in water governance: An endorheic basin case in the Middle East. *Journal of Environmental Management*, 288, 112376.
- Offermans, A., & Cörvers, R. (2012). Learning from the past: changing perspectives on river management in the Netherlands. *Environmental Science & Policy*, 15(1), 13-22.
- Organisation for Economic Cooperation and Development, O. F. E. C. A. D. (2018). Implementing the OECD principles on water governance: indicator framework and evolving practices (pp. 148-pp).
- Pahl-Wostl, C., Lukat, E., Stein, U., Troeltzsch, J., & Yousefi, A. (2023). Improving the socio-ecological fit in water governance by enhancing coordination of ecosystem services used. *Environmental Science & Policy*, 139, 11-21.
- Polinova, M., Salinas, K., Bonfante, A., & Brook, A. (2019). Irrigation optimization under a limited water supply by the integration of modern approaches into traditional water management on the cotton fields. *Remote Sensing*, 11(18), 2127.
- Prianto, A. L., Abdullah, A., & Yama, A. (2024). Multi-level governance as a climate change adaptation strategy in the coastal cities in Indonesia and Thailand. *Journal of Government and Politics (JGOP)*, 6(1), 12-26.
- Pahl-Wostl, C. (2019). The role of governance modes and meta-governance in the transformation towards sustainable water governance. *Environmental science & policy*, 91, 6-16.
- Pahl-Wostl, C. (2021). Adaptive and sustainable water management: from improved conceptual foundations to transformative change. In *Global water resources* (pp. 175-193). Routledge.
- Pahl-Wostl, C. (2015). Water governance in the face of global change. From Understanding to Transformation.
- Pahl-Wostl, C., & Knieper, C. (2023). Pathways towards improved water governance: The role of polycentric governance systems and vertical and horizontal coordination. *Environmental Science & Policy*, 144, 151-161.
- Peters, S., Ouboter, M., Lugt, K. V. D., Koop, S., & Leeuwen, K. V. (2021). Retrospective analysis of water management in Amsterdam, The Netherlands. *Water*, 13(8), 1099.
- Powell, M. A. (2021). Singapore's Lost Coast: Land Reclamation, National Development and the Erasure of Human and Ecological Communities, 1822-Present. *Environment and History*, 27(4), 635-663.
- Skinner, W., Bardsley, D. K., & Drew, G. (2024). Post-crisis risk management: water, community, and adaptation in a South Australian irrigation district. *Ecology and Society*, 29(1).
- Shalsi, S., Ordens, C. M., Curtis, A., & Simmons, C. T. (2022). Coming together: Insights from an Australian example of collective action to co-manage groundwater. *Journal of Hydrology*, 608, 127658.
- Swinkels, P. (2023). *The implementation of the Water Framework's River Basin Approach in the Netherlands an example of Good Multilevel Water Governance?* (Master's thesis).
- Stive, M., & Vrijling, H. (2017). Draining, dredging, reclaiming: The technology of making a dry, safe, and sustainable delta landscape. In *Delta Urbanism: The Netherlands* (pp. 20-43). Routledge.
- Tortajada, C., Joshi, Y. K., & Biswas, A. K. (2013). *The Singapore water story: Sustainable development in an urban city-state*. Routledge.
- Tortajada, C., & Joshi, Y. K. (2014). Water quality management in Singapore: the role of institutions, laws and regulations. *Hydrological Sciences Journal*, 59(9), 1763-1774.
- Tun, K., & Tong, H. Y. C. (2025). Integrated Urban Coastal Management in Singapore: Balancing Sustainable Use with Conservation. In *Coral Reefs of Singapore's Urbanised Sea* (pp. 209-219). Singapore: Springer Nature Singapore.
- Usher, M. (2024). Territory, hydraulics, biopolitics: Internal colonization through urban catchment management in Singapore. *Territory, Politics, Governance*, 12(6), 846-865.
- Verkerk, J., & van Buuren, A. (2013). Integrated water resources management in the Netherlands. Historical trends and current practices in the governance of integration. *International Journal of Water Governance*, 1(3/4), 427-452.
- Van Coppenolle, R., & Temmerman, S. (2020). Identifying ecosystem surface areas available for nature-based flood risk mitigation in coastal cities around the world. *Estuaries and coasts*, 43(6), 1335-1344.

- Van Buuren, A., Driessen, P., Teisman, G., & van Rijswijk, M. (2014). Toward legitimate governance strategies for climate adaptation in the Netherlands: combining insights from a legal, planning, and network perspective. *Regional environmental change*, 14(3), 1021-1033.
- Wyborn, C. (2015). Co-productive governance: a relational framework for adaptive governance. *Global Environmental Change*, 30, 56-67.
- Watts, R. J., Kopf, R. K., McCasker, N., Howitt, J. A., Conallin, J., Wooden, I., & Baumgartner, L. (2018). Adaptive management of environmental flows: using irrigation infrastructure to deliver environmental benefits during a large hypoxic blackwater event in the Southern Murray–Darling Basin, Australia. *Environmental Management*, 61(3), 469-480.
- Wood, M. (2015). Beyond accountability: Political legitimacy and delegated water governance in Australia. *Public Administration*, 93(4), 1012-1030.
- Wang, M., Zhang, D. Q., Adhityan, A., Ng, W. J., Dong, J. W., & Tan, S. K. (2018). Conventional and holistic urban stormwater management in coastal cities: a case study of the practice in Hong Kong and Singapore. *International Journal of Water Resources Development*, 34(2), 192-212.
- Warner, J. F., Van Buuren, A., & Edelenbos, J. (Eds.). (2012). Making space for the river. IWA Publishing.
- Wheeler, S. A., Loch, A., Crase, L., Young, M., & Grafton, R. Q. (2017). Developing a water market readiness assessment framework. *Journal of Hydrology*, 552, 807-820.
- Yang, J., & Huang, G. (2024). Study on the mechanism of multi-scalar transboundary water security governance in the Shenzhen River. *Sustainability*, 16(16), 7138.
- Yousefi, A., Knieper, C., & Pahl-Wostl, C. (2024). State-centric water governance and ineffective coordination: developing a context-sensitive assessment in Iran's rentier state. *International Journal of Water Resources Development*, 40(4), 578-603.
- Zhou, Y. (2021). Water and environment innovation in Singapore and China. *Water and Environment Journal*, 35(3), 863-864.