Journal of Natural Environment Hazards
Print ISSN: 2676 - 4377 Online ISSN: 2676 - 4385
Homepage: https://jneh.usb.ac.ir

Journal of Natural Environmental Hazards, Vol 15, Iss 47, March 2026

Investigating the correlation of heavy metals (Zn, Cr, Pb, Co, Cd) and PM10 suspended particles in dust and assessing their health risk in Zabol city

Mohsen Farahi[1], Ali Mohammadian Behbahani[2*], Hamid Reza Asgari[3], Reza Dahmardeh Behrooz[4], Dimitris .G.Kaskaoutis[5]

1. PhD. student of desert management and control, Faculty of Pasture and Watershed Management, Gorgan, Iran
*2. **Corresponding Author,** Assistant Professor, Department of Desert Management, Faculty of Pasture and Watershed Management, Gorgan, Iran*
***Email:** ali.mohammadian@gau.ac.ir **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-4813-8151*
3. Associate Professor Department of Desert Management, Faculty of Pasture and Watershed Management, Gorgan, Iran
4. Assistant Professor, Department of Environment, Faculty of Natural Resources, Zabol, Iran
5. Assistant Professor, Institute for Environmental Research and Sustainable Development, Athens, Greece

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received: 09 December 2023
Revised: 17 January 2024
Accepted: 18 February 2024
Published: 21 March 2026

Keywords:
Dust, chromium, PM10, Carcinogenic risk, Zabol.

ABSTRACT

Particles in suspension represent one of the most significant pathways through which humans encounter various environmental pollutants, particularly heavy metals. This study aims to investigate the correlation between heavy elements Co, Cd, Cr, Zn, and Pb and PM10 particles, as well as to assess their health risks in the city of Zabol. In this research, 60 dust samples were collected using TCR sampling devices during dust storms and winds over 120 days from late April to mid-September in Zabol. Subsequently, five elements, namely chromium, zinc, lead, cobalt, and cadmium, were analyzed using ICP-OES. Pearson correlation test was employed to examine the correlation between heavy metal concentrations in dust and the PM10 particle concentrations. The statistical analysis results revealed a significant correlation between chromium and PM10 concentration. The average concentration of PM10 particles in Zabol shows the critical situation of this city. Furthermore, the average Ecological Risk Index (ER) for the studied heavy metals in dust samples followed the order Zn> Pb > Cd > Cr and showed a decreasing trend. On the one hand, the highest and lowest levels of non-carcinogenic risk for all heavy metals were obtained in the children age group, with values of 1.14×10-2 (mg/kg) and 8.25×10-16 (mg/kg), respectively. In the adult age group, the highest and lowest levels were found to be 1.23×10-3 and 3.42×10-15 (mg/kg) for cadmium and chromium, respectively. The average concentration of heavy metals in the dust indicated that Zabol is contaminated with heavy metals. This metal concentration can be attributed to various factors, including the extraction and transport of elements from the Hamoun dry marsh, the dispersion of PM10 particles by 120-day winds from northern and northeastern regions or higher latitudes, industrial activities, urban traffic, and population density.

How to Cite: Farahi, M. , Mohammadian Behbahani, A. , Asgari, H. R. , Dahmardeh Behrooz, R. and Kaskaoutis, D. G. (2026). Investigating the correlation of heavy metals (Zn, Cr, Pb, Co, Cd) and PM10 suspended particles in dust and assessing their health risk in Zabol city. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 15(47), 1-22.

© The Author/Authors
DOI: 10.22111/jneh.2024.47416.2010
Publisher: University of Sistan and Baluchestan

EXTENDED ABSTRACT

INTRODUCTION

Air pollution has emerged as one of the significant environmental challenges facing human societies, particularly in developing countries (Zhang et al., 2020). This issue has become a serious crisis in Iran, which is situated in the dry and semi-dry belt of the world. According to the World Health Organization, approximately 7 million people worldwide die each year due to diseases related to air pollution (Dehghani, 2017). Numerous studies have shown that major sources of air pollution include motor vehicles and polluting industries. For instance, industrial activities and heavy traffic can lead to increased concentrations of heavy metals such as lead and cadmium in dust, which have toxic effects on human health (Manasreh, 2010). Previous research has indicated that children are more affected by these pollutants than adults, posing serious health risks to them (Bist and Choudhari, 2022; Kabatas et al., 2018). Given the increasing phenomenon of dust storms and particulate matter in the Middle East, particularly in Zabol County, this study aims to determine the concentrations of heavy metals (chromium, zinc, lead, cobalt, and cadmium) in dust and assess their impact on human health. The research hypotheses include that high concentrations of these metals are associated with increased health risks, which will be greater for children than for adults. This study aims to identify the relationship between heavy metal concentrations and their effects on human health. The results of this research could serve as a basis for environmental and health-related decision-making and provide strategies for reducing air pollution.

DATA AND METHODS

Study Area

The Zabol region is located in the northern part of Sistan and Baluchestan Province, bordered by Afghanistan to the north and east, South Khorasan Province to the west, and Zahedan County to the south (Figure 1). This region has a population of approximately 300,000 and an area of about 15,197 square kilometres. The climate of this area is desert and dry, with an average of over 160 days per year characterized by winds carrying dust, which has led to the degradation of its ecosystem (Haidarinasab, 2019; Mirzazahi, 2018).

Sampling and Sample Analysis

To investigate the concentration of heavy metals in the dust of Zabol City, 60 samples were collected on dusty days from May to September. The city centre was selected as the sampling location due to its geographical conditions and population concentration. PM10 particles were separated using TCR sampling devices (Han et al., 2023). Five elements—chromium, zinc, lead, cobalt, and cadmium—were analyzed using an ICP-OES device (Leong et al., 2008). Additionally, 45 soil samples were collected from areas surrounding Zabol County (Wang et al., 2021).

Statistical Analysis

Data were analyzed using SPSS.20 software to examine statistical distribution, including range, mean, standard deviation, and skewness. The normality of the data was assessed using the Shapiro-Wilk test, and correlations among elements were determined using Pearson's correlation in R software.

Ecological Risk Index (RI)

To evaluate the environmental risk posed by metals present in dust samples, potential ecological risk indices were utilized (Miao et al., 2022; Rahmat et al., 2022).

Cancer Risk and Non-Cancer Risk Assessment

This assessment consists of two main components: cancer risks and non-cancer risks, conducted according to health risk assessment methods established by the United States Environmental Protection Agency (USEPA) (King et al., 2015). The daily intake values of metals through three primary pathways—ingestion, inhalation, and dermal absorption—were calculated.

Non-cancer risk (HI) for children and adults was computed using relevant equations. Additionally, cancer risk indices for lead, chromium, and arsenic were calculated based on EPA guidelines.

These methods are designed to determine the concentration of heavy metals in Zabol dust and assess their impact on human health.

RESULTS AND DISCUSSION

Correlation Between Metals and PM10 Concentration

The results of the Pearson correlation matrix indicated significant correlations above 70% between the metals cadmium and cobalt, manganese and cobalt, manganese and cadmium, lead and cobalt, and lead with cadmium. Additionally, the highest concentration correlation was observed between chromium and PM10.

Potential Ecological Risk

The average concentrations of heavy metals in Zabol dust were 1.17 (zinc), 0.66 (chromium), 2.01 (lead), 0.69 (cobalt), and 0.09 (cadmium) mg/kg, respectively. The concentrations of all elements, except zinc, were lower than background levels, indicating low urban traffic in Zabol. The potential ecological risk was calculated based on the Hakanson method. The results showed that the average Er for heavy metals decreased in the order of Zn > Pb > Cd > Cr, with zinc, lead, cadmium, and chromium having low ecological risk potential.

Cancer Risk and Non-Cancer Risk Assessment

The assessment of human health risks was conducted through ingestion, inhalation, and dermal contact. The highest and lowest non-cancer risk (HQ) values for children were associated with cadmium and chromium, respectively. Chromium posed a high risk for both age groups, while cobalt was classified as having a high risk for both groups. The overall non-cancer risk (HI) indicated that this risk was high for adults and very high for children.

CONCLUSION

In this study, the concentration of heavy metals (Zn, Cr, Pb, Co, Cd) in the dust of Zabol City was examined. The results showed that the concentrations of lead and zinc were the highest, with zinc concentrations in the samples exceeding background levels. The origin of the dust in Zabol is linked to both local and external sources, such as the dry Hamoun wetland and the central desert of Iran. Additionally, human factors such as industrial facilities and traffic also influence the concentration of heavy metals. The research further indicated that Zabol City faces a critical situation regarding PM10 particles, with concentrations of these particles increasing to dangerous levels. The concentration of heavy metals in Zabol dust is associated with various factors, including the 120-day winds, industrial activities, and urban traffic. The results highlighted the necessity for preventive measures to reduce the risks associated with heavy metals, especially for more vulnerable children. Chromium was identified as a serious threat to the health of Zabol residents. These findings underscore the need for special attention to the pathways of element absorption through ingestion and emphasize the importance of control measures.

REFERENCES

References (in Persian)

Arslani, Fatemeh, Alijani, Bahloul, Akbari, Mehri, Mohammad Khan, Shirin. (2019). Investigating the heavy elements (Pb, Ni, Cu, Cr and Cd) present in the falling dust of Tehran city. Earth Science Research, 11(44):15-36. [In Persian]
Asud, SeydReza. (2019). Comparison and health risk assessment of selected elements in indoor and outdoor dust in Ahvaz, Zabol and South Pars region. PhD thesis, Tarbiat Modares University. 94 p. [In Persian]
Hamidianpour, Mohsin, Mofidi, Abbas, Sasih, Mohammad (2015). Analysis of the nature and structure of Bad Sistan. Iranian Journal of Geophysics, 10(2): 83-109. [In Persian]
Khashtabeh, Reyhaneh, Akbari, Mortada, Heydari, Awa, Najafpur, Ali Asghar, (2023): The effect of iron ore mining on the concentration of some heavy metals and the zoning of soil pollution, a case study: Sangan iron ore mine, Khaf-Iran. Water and Soil magazine. 37(1): 77-94. [In Persian]
Firouzian, Sara, and Saeedabadi, Muhammad Sadiq, (2016): Investigating the social effects and harms of fine dust (a case study of Sistan city). International research conference in engineering, science and technology. Period 4. Pandar Hamaish Institute of Pars. [In Persian]
Qanawati, Navid (2018): Assessment of the risk of heavy metals on human health in the street dust of Abadan city. Health and Environment Quarterly. 11(1): 63-74. [In Persian]
Mazloumi, S., Esmaili Sari, A., Bahrami Far, N., and Moin Aldini, M. (2016): Evaluation of the presence of metals and semi-metals in the street dust of west and east of Tehran. Health and environment. 10(2): 281-292. [In Persian]
Taati, A., Salehi M.H., Mohammadi, J. Mohajer, R. (2019): Assessment of pollution level, non-carcinogenic and carcinogenic risk of heavy metals on human health in surface soils of industrial areas of Arak, Iran. Health and environment. 13(2): 335-348. [In Persian]

References (in English)

Ahmadi, S., Ezeliora, C.D., Sharki, S.H., Osagie, C., Ghosh, S., Igwegbe, C.A. and Khan, N.A. (2022). Assessment of health impacts attributed to PM10 exposure during 2015–2017 in Zabol City, Iran. International Journal of Environmental Science and Technology, 19(5), pp.4123-4136.
Ali, M.U., Yu, Y., Yousaf, B., Munir, M.A.M., Ullah, S., Zheng, C., Kuang, X. and Wong, M.H. (2021). Health impacts of indoor air pollution from household solid fuel on children and women. Journal of hazardous materials, 416, p.126127.
Bai, B., Bai, F., Sun, C., Nie, Q.,& Sun, S, (2023); Adsorption mechanism of shell powders on heavy metal ions Pb2+/Cd2+ and the purification efficiency for contaminated soils. Frontiers in Earth Science, 10, p.1071228.
Behrooz, R.D., Kaskaoutis, D.G., Grivas, G. and Mihalopoulos, N. (2021). Human health risk assessment for toxic elements in the extreme ambient dust conditions observed in Sistan, Iran. Chemosphere, 262, p.127835.
Bist, P., and Choudhary, S, (2022); Impact of heavy metal toxicity on the gut microbiota and its relationship with metabolites and future probiotics strategy: a review. Biological Trace Element Research, 200(12), pp.5328-5350.
Chabukdhara, M. and Nema, A.K. (2013). Heavy metals assessment in urban soil around industrial clusters in Ghaziabad, India: probabilistic health risk approach. Ecotoxicology and environmental safety, 87, pp.57-64.
Cirelli, P., Bilo, F., Tsuji, K., Matsuyama, T., Siviero, G., Pisani, L., Zacco, A., Depero, L.E., Eichert, D., Borgese, L. (2022). Assessment of calibration methods for Pb-loaded aerosol filters analyzed with X-ray fluorescence under grazing incidence. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, 192, p.106414.
Dehghani, S., Moore, F., Keshavarzi, B. and Beverley, A.H. (2017). Health risk implications of potentially toxic metals in street dust and surface soil of Tehran, Iran. Ecotoxicology and environmental safety, 136, pp.92-103.
Fei, X., Lou, Z., Xiao, R., Lv, X. and Christakos, G. (2023). Contamination and health risk assessment of heavy metal pollution in soils developed from different soil parent materials. Exposure and Health, 15(2), pp.395-408
Hakanson, L. (1980). An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach. Water Research, 14(8), pp.975-1001.
Han, Q., Wang, M., Xu, X., Li, M., Liu, Y., Zhang, C., Li, S. and Wang, M. (2023). Health risk assessment of heavy metals in road dust from the fourth-tier industrial city in central China based on Monte Carlo simulation and bioaccessibility. Ecotoxicology and Environmental Safety, 252, p.114627.
Heydari Nasab, M., Karam, A., Negaresh, H. and Pahlavanravi, A. (2019). Morphometric Analysis of Sand Dunes and the Speed of Their Displacement in Sistan Plain. The Journal of Geographical Research on Desert Areas, 7(1), pp.149-164.
Javid, A., Nasiri, A., Mahdizadeh, H., Momtaz, S.M., Azizian, M. and Javid, N. (2021). Determination and risk assessment of heavy metals in air dust fall particles. Environmental Health Engineering And Management Journal, 8(4), pp.319-327.
Kabatas, B., Pierce, R.B., Unal, A., Rogal, M.J. and Lenzen, A. (2018). April 2008 Saharan dust event: Its contribution to PM10 concentrations over the Anatolian Peninsula and relation with synoptic conditions. Science of the Total Environment, 633, pp.317-328.
Leung, A.O., Duzgoren-Aydin, N.S., Cheung, K.C., Wong, M.H. (2008); Heavy metals concentrations of surface dust from e-waste recycling and its human health implications in southeast China. Environmental science & technology, 42(7), pp.2674-2680.
Liu, X.X., Hu, X., Cao, Y., Pang, W.J., Huang, J.Y., Guo, P., Huang, L. (2019). Biodegradation of phenanthrene and heavy metal removal by acid-tolerant Burkholderia fungorum FM-2. Frontiers in microbiology, 10, p.408.

Luo, H., Wang, Q., Guan, Q., Ma, Y., Ni, F., Yang, E. and Zhang, J. (2022). Heavy metal pollution levels, source apportionment and risk assessment in dust storms in key cities in Northwest China. Journal of Hazardous Materials, 422, p.126878.

Madadi, R., Mohamadi, S., Rastegari, M., Karbassi, A., Rakib, M.R.J., Khandaker, M.U., Faruque, M.R.I. and Idris, A.M., (2022). Health risk assessment and source apportionment of potentially toxic metal (loid) s in windowsill dust of a rapidly growing urban settlement, Iran. Scientific reports, 12(1), p.19736.

Madiha, Z., Rashid, A., Ayesha, A., Yasir, Sh., Liaqat, A., Mahpara, F., Khalid, A. and Shuangfei, L. (2022). Health and environmental effects of heavy metals. Journal of King Saud University-Science, 34(1), p.101653.

Manasreh, W., Hailat, I. and El-Hasan, T.M. (2010). Heavy metal and anionic contamination in the water and sediments in Al-Mujib reservoir, central Jordan. Environmental Earth Sciences, 60, pp.613-621.

Miao, F., Zhang, Y., Li, Y., Fang, Q. & Zhou, Y. (2022). Implementation of an integrated health risk assessment coupled with spatial interpolation and source contribution: A case study of soil heavy metals from an abandoned industrial area in Suzhou, China. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, pp.1-15.

Mirakzehi, K., Pahlavan-Rad, M.R., Shahriari, A. and Bameri, A. (2018). Digital soil mapping of deltaic soils: A case of study from Hirmand (Helmand) river delta. Geoderma, 313, pp.233-240.

Miri, A., Maleki, S. and Middleton, N. (2021). An investigation into climatic and terrestrial drivers of dust storms in the Sistan region of Iran in the early twenty-first century. Science of the Total Environment, 757, p.143952.

Miri, A., Shirmohammadi, E. and Sorooshian, A. (2023). Impacts of dust storms on indoor and outdoor bioaerosol concentration in the Sistan region of Iran. Journal of Building Engineering, 76. p.107302.

Najmeddin, A., Moore, F., Keshavarzi, B. and Sadegh, Z. (2018). Pollution, source apportionment and health risk of potentially toxic elements (PTEs) and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in urban street dust of Mashhad, the second largest city of Iran. Journal of Geochemical Exploration, 190. pp.154-169

Panqing, Y., Abliz, A., Xiaoli, S., Aisaiduli, H. (2023); Human health-risk assessment of heavy metal–contaminated soil based on Monte Carlo simulation. Scientific Reports, 13(1), p.7033.

Patel, D.K. and Jain, M.K. (2022). Health risk assessment of trace elements in the ambient air along the roadside in Dhanbad, India. International Journal of Environmental Science and Technology, 19(5), pp.4107-4122.

Qing X, Yutong Z, Shenggao L. (2015). Assessment of heavy metal pollution and human health risk in urban soils of steel industrial city (Anshan), Liaoning, Northeast China. Ecotoxicology and Environmental Safety. 120:377-85.

Rahmat, M.A., Ismail, A.F., Rodzi, N.D., Aziman, E.S., Idris, W.M.R., Lihan, T. (2022); Assessment of natural radionuclides and heavy metals contamination to the environment: Case study of Malaysian unregulated tin-tailing processing industry. Nuclear Engineering and Technology, 54(6), pp.2230-2243.

Rashki, A., Kaskaoutis, D.G. and Sepehr, A. (2018). Statistical evaluation of the dust events at selected stations in Southwest Asia: From the Caspian Sea to the Arabian Sea. Catena, 165, pp.590-603.

Ravankhah, N., Mirzaei, R., Masoum, S. (2016). Human health risk assessment of heavy metals in surface soil. Journal of Mazandaran University of Medical Sciences. 26(136): 109-120.

Rehman, A., Liu, G., Yousaf, B., Zia-ur-Rehman, M., Ali, M.U., Rashid, M.S., Farooq, M.R. and Javed, Z. (2020). Characterizing pollution indices and children health risk assessment of potentially toxic metal (oid) s in school dust of Lahore, Pakistan. Ecotoxicology and Environmental Safety, 190, p.110059.

Safiur Rahman, M., Prashant Kumar, Mohammad Ullah, Yeasmin N. Jolly, Shirin Akhter, Jamiul Kabir, Bilkis A. Begum, Abdus Salam. (2021). Elemental analysis in surface soil and dust of roadside academic institutions in Dhaka city, Bangladesh and their impact on human health. Environmental Chemistry and Ecotoxicology 3 - 197–208.

Shahsavani, A., Tobías, A., Querol, X., Stafoggia, M., Abdolshahnejad, M., Mayvaneh, F., Guo, Y., Hadei, M., Hashemi, S.S., Khosravi, A. and Namvar, Z. (2020). Short-term effects of particulate matter during desert and non-desert dust days on mortality in Iran. Environment International, 134, p.105299.

Shan, W., Yin, Y., Lu, H. and Liang, S. (2009). A meteorological analysis of ozone episodes using the HYSPLIT model and surface data. Atmospheric Research, 4(93), pp.767-776.

Wang, X., Qin, Y., Qin, J., Yang, Y., Qi, T., Chen, R., Tan, J. and Xiao, K. (2021). The interaction laws of atmospheric heavy metal ions and water-soluble organic compounds in PM2. 5 based on the excitation-emission matrix fluorescence spectroscopy. Journal of Hazardous Materials, 402, p.123497.

Wei, X., Gao, B., Wang, P., Zhou, H., Lu, J, (2015); Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals in street dust from different functional areas in Beijing, China. Ecotoxicology and environmental safety, 112,.186-192.

Yarmoradi, Z., Nasiri, B., Mohammadi, G.H. and Karampour, M. (2020). Long-term characteristics of the observed dusty days and its relationship with climatic parameters in East Iran. Arabian Journal of Geosciences, 13(6), p.242.

Zhang, W., Chang, W.J., Zhu, Z.C. and Hui, Z. (2020). Landscape ecological risk assessment of Chinese coastal cities based on land use change. Applied Geography, 117, p.102174.

Zong, Y., Xiao, Q., Malik, Z., Lu, S. (2023). Exploring Environment Pollution and Risk Assessment of Heavy Metals in Road Dusts from a Typical Steel-Industrial City (Anshan), Northeastern China. Water, Air, & Soil Pollution. 234(1): p.34.

مخاطرات محیط طبیعی
شاپا چاپی: ۴۳۷۷-۲۶۷۶ شاپا الکترونیکی: ۴۳۸۵-۲۶۷۶
Homepage: https://jneh.usb.ac.ir

مجله علمی پژوهشی مخاطرات محیط طبیعی، دوره ۱۵، شماره ۴۷، شماره پیاپی ۱، فروردین ۱۴۰۵

بررسی همبستگی فلزات سنگین (Zn, Cr, Pb, Co, Cd) و ذرات معلق PM_{10} موجود در گردوغبار و ارزیابی ریسک سلامت آنها در شهر زابل

محسن فراهی[۱]، علی محمدیان بهبهانی[۲]، حمیدرضا عسگری[۳]، رضا دهمرده بهروز[۴]، دیمیتریس کاسکاوتیس[۵]

۱. دانشجوی دکتری مدیریت و کنترل بیابان، دانشکده مرتع و آبخیزداری، گرگان

۲. استادیارگروه مدیریت مناطق بیابانی، دانشکده مرتع و آبخیزداری،گرگان **(نویسنده مسئول)**

ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4813-8151 / ایمیل: ali.mohammadian@gau.ac.ir

۳. دانشیار گروه مدیریت مناطق بیابانی، دانشکده مرتع و آبخیزداری،گرگان

۴. استادیارگروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی، زابل

۵. استادیار، موسسه تحقیقات محیطی و توسعه پایدار، آتن، یونان

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۱۸

تاریخ ویرایش: ۱۴۰۲/۱۰/۲۷

تاریخ پذیرش : ۱۴۰۲/۱۱/۲۹

تاریخ انتشار : ۱۴۰۵/۰۱/۰۱

واژه‌های کلیدی:
گردوغبار، کروم، PM_{10}، خطر سرطان‌زایی، زابل.

چکیده

ذرات معلق یکی از مهم ترین مسیرهای مواجهه انسان با انواع آلودگی‌های محیطی به ویژه فلزات سنگین است. هدف از این مطالعه بررسی همبستگی بین عناصر سنگین Co، Cd، Cr، Zn و Pb و ذرات PM10و ارزیابی ریسک سلامت آن‌ها در شهر زابل است. در این تحقیق جهت شناسایی و تعیین غلظت عناصر سنگین مورد نظر، ۶۰ نمونه گرد و غبار با استفاده از دستگاه‌های نمونه‌بردار TCR در زمان رخداد طوفان‌ها و بادهای ۱۲۰ روزه از اواخر اردیبهشت تا اواسط شهریور در شهر زابل تهیه شد. سپس پنج عنصر کروم، روی، سرب، کبالت و کادمیوم توسط دستگاه ICP-OES تحلیل شدند. جهت بررسی همبستگی بین عناصر سنگین گرد و غبار و غلظت ذرات PM10 از آزمون همبستگی پیرسون استفاده شد. نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل آماری نشان داد بین فلز کروم و غلظت PM10 بیشترین همبستگی معنی‌دار وجود دارد. میانگین غلظت ذرات PM10 در شهر زابل نشان دهنده وضعیت بحرانی این شهر است، همچنین نتایج میانگین شاخص ریسک اکولوژیکی(ER) برای فلزات سنگین مورد مطالعه در نمونه‌های گرد و غبار به صورت Zn>Pb>Cd>Cr بوده و روند کاهشی دارد. از طرفی بیشترین و کمترین میزان خطر غیر سرطان‌زایی در گروه سنی کودکان برای فلزات سنگین مطالعه شده به ترتیب ۲-۱۰×۱/۱۴ و ۱۶-۱۰×۸/۲۵ (mg/kg) و در گروه سنی بزرگسالان ۳-۱۰×۱/۲۳ و ۱۵-۱۰×۳/۴۲ (mg/kg) بوده و بیشترین مقدار مربوط به فلز کادمیوم و کروم به دست آمد. میانگین غلظت فلزات سنگین در گرد و غبار شهرستان زابل نشان داد که شهر زابل از فلزات سنگین آلوده است. این غلظت فلزات می‌تواند به عوامل مختلفی، از جمله برداشت و انتقال عناصر از تالاب خشک هامون، انتشار ذرات PM10 بوسیله بادهای ۱۲۰ روزه از سمت مناطق شمال و شمال شرقی یا عرض‌های بالاتر، فعالیت‌های صنعتی، ترافیک شهری و میزان جمعیت مربوط باشد.

استناد: فراهی, محسن , محمدیان بهبهانی, علی , عسگری, حمیدرضا , دهمرده بهروز, رضا و کاسکاوتیس, دیمیتریس . (۱۴۰۵). بررسی همبستگی فلزات سنگین (Zn, Cr, Pb, Co, Cd) و ذرات معلق PM10 موجود در گردوغبار و ارزیابی ریسک سلامت آنها در شهر زابل. *مخاطرات محیط طبیعی*, ۱۵(۴۷)، ۲۲-۱

© نویسنده/ نویسندگان

ناشر: دانشگاه سیستان و بلوچستان

DOI: 10.22111/jneh.2024.47416.2010

مقدمه

آلودگی هوا یکی از چالش‌های عمده در جوامع انسانی است که به‌عنوان مسئله‌ای جدی و حیاتی مورد توجه است و یکی از مهم‌ترین مشکلات زیست‌محیطی در زندگی شهرنشینی امروز، آلودگی هوا است که به‌خصوص در کشورهای درحال‌توسعه بسیار مشهود است (ژانگ[1] و همکاران، ۲۰۲۰). گردوغبار و ریزگردها ازجمله پدیده‌های بارز در مناطق خشک و نیمه‌خشک و یا مناطق همجوار با این مناطق هستند که تأثیرات منفی بر سلامت و محیط‌زیست را به‌همراه دارند (خشتابه و همکاران، ۱۴۰۲). زیرا ذرات گردوغبار، بر اساس منشأ و مسیر حرکت خود، توانمندی زیادی در حمل فلزات سنگین دارند (لوو[2] و همکاران، ۲۰۲۲). در سال‌های اخیر، پدیده گردوغبار و هجوم ریزگردها در خاورمیانه به‌طور چشمگیری افزایش یافته است و به همین دلیل، ایران نیز به‌علت قرارگرفتن در کمربند خشک و نیمه‌خشک جهان، به‌طور مداوم در معرض ریزگردها و گردوغبارهای محلی و مناطق فرامنطقه‌ای مختلف قرار دارد (دهقانی[3]، ۲۰۱۷). باد لوار[4] که از آسیای مرکزی تا سواحل شمالی دریای عرب می‌وزد، به‌دلیل متوسط مدت طولانی آن در فصل تابستان به باد ۱۲۰ روزه معروف است و ویژگی غالب هواشناسی و اقلیمی منطقه شرق ایران است (حمیدیان پور و همکاران، ۱۳۹۵). شهرستان‌های بیرجند و زابل تحت تأثیر بادهای ۱۲۰ روزه قرار دارند که به‌طور عمومی در فصل تابستان و در ماه‌های خرداد تا شهریور شروع به وزش می‌کنند. این بادها از وجود یک ناحیه کم‌فشار در شرق ایران و یک ناحیه پرفشار در شمال شرق ایران و دریای خزر ناشی می‌شوند و شرق خراسان در مسیر این بادها قرار دارد (میری و همکاران، ۲۰۲۳). فرایند شکل‌گیری طوفان‌های گردوغبار از کشور پاکستان آغاز شده و پس از عبور از منطقه شرق خراسان و غرب افغانستان، به منطقه سیستان و در نهایت به پاکستان و دریای عمان می‌رسد (راشکی[5] و همکاران، ۲۰۱۸). بر اساس گزارش سازمان جهانی بهداشت، هر سال حدود ۷ میلیون نفر در سراسر جهان به‌علت بیماری‌های مرتبط با آلودگی هوای خارجی و داخلی جان خود را از دست می‌دهند. به همین دلیل، نگرانی‌ها درباره مسئله آلودگی هوا در سال‌های اخیر به یک مسئله بحرانی در زمینه سلامت و محیط‌زیست تبدیل شده است. افزایش فعالیت‌های صنعتی، تعداد وسایل نقلیه در جاده‌ها و جمعیت در شهرهای بزرگ و گردوغبار باعث آلودگی هوا می‌شود و فلزات سنگین موجود در گردوغبار می‌توانند از طریق بلعیدن، استنشاق و جذب پوستی وارد بدن انسان شوند (سفیر رحمان[6] و همکاران، ۲۰۲۱). اغلب فلزات سنگین حتی درغلظت‌های کم سمی هستند و زندگی بیولوژیکی را تهدید می‌کنند (مدیها[7] و همکاران، ۲۰۲۲). معمولا فلزات سنگین موجود در غبارهای خیابانی می‌توانند ناشی از ترافیک سنگین، صنایع، فرسایش ساختمان‌ها، فرسایش لاستیک و قطعات استفاده‌شده در خودروها، فعالیت‌های معدنی و احتراق سوخت‌های فسیلی باشند (مناسره[8]، ۲۰۱۰). فلزات سنگین مانند سرب، روی، مس، کادمیوم، آرسنیک و کروم به‌دلیل خاصیت سمی و تجمع‌زیستی، ازجمله مهم‌ترین و جدی‌ترین عوامل آلودگی محیط‌زیست را تشکیل می‌دهند (جاوید[9] و همکاران، ۲۰۲۱). استفاده بیش‌ازحد از فلزات سنگین می‌تواند منجر به مسمومیت‌های حاد و مزمن، ازجمله آسیب به سیستم عصبی مرکزی، ترکیب خون، ریه، کلیه، کبد و حتی مرگ

[1] Zhang
[2] Luo
[3] Dehghani
[4] Lower wind
[5] Rashki
[6] Safiur Rahman
[7] Madiha
[8] Manasreh
[9] Javid

گردد (علی[1] و همکاران، ۲۰۲۱). این فلزات به‌دلیل عدم قابل‌تجزیه بودن و تأثیرات فیزیولوژیکی بر انسان و سایر موجودات زنده، حتی در غلظت‌های کم، اهمیت قابل‌توجهی دارند (وانگ[2] و همکاران، ۲۰۲۱؛ بای[3] و همکاران، ۲۰۲۳). غلظت بالای فلزات سنگین در محیط‌زیست، باعث اثرات منفی بسیار زیادی بر سلامت انسان می‌شود که بیشتر از طریق بلع، تنفس و جذب پوستی صورت می‌گیرد (مظلومی، ۱۳۹۶). کودکان نسبت به بزرگ‌سالان، مقدار بیشتری از این فلزات را جذب می‌کنند و این باعث ایجاد اختلال در رفتارهای متابولیکی آن‌ها می‌شود (بیست و چودهاری[4]، ۲۰۲۲؛ کاباتاس[5] و همکاران، ۲۰۱۸). بهبود کیفیت هوای شهری و کنترل ذرات PM_{10} از اهمیت بسیاری برخوردار است تا سلامت افراد و محیط‌زیست شهری حفظ شود (فیروزیان و همکاران، ۱۳۹۵). با توجه به ترکیب پیچیده ذرات معلق در گردوغبار، تعیین اینکه کدام خصوصیت از آن‌ها باعث ایجاد چه نوع اثرات منفی بر سلامت انسان‌ها می‌شود، بسیار دشوار است و اطلاعات کافی و جامع در این زمینه وجود ندارد و مهم‌ترین قدم در ارزیابی گسترش و شدت آلودگی فلزات سنگین در مناطق آلوده، تعیین غلظت فلزات سنگین است (لیو[6] و همکاران، ۲۰۱۴). بررسی‌های بسیاری در ارتباط با ارزیابی آلودگی فلزات سنگین ناشی از فعالیت‌های مختلف صنعتی با استفاده از شاخص‌های بیان‌شده انجام شده است، طاعتی و همکاران (۱۳۹۹)، به ارزیابی سطح آلودگی، ریسک غیر سرطان‌زایی و سرطان‌زایی فلزات سنگین بر سلامت انسان در خاک‌های سطحی مناطق صنعتی اراک، ایران پرداختند و بیان نمودند که خطر غیر سرطانی برای کودکان و بزرگ‌سالان در مسیر بلع بیشتر از جذب پوستی و تنفس است. در پژوهشی دهمرده بهروز و همکاران ۱۴۰۰)، به ارزیابی خطر عناصر سمی بر سلامت انسان در شرایط گردوغبار شدید محیطی در سیستان پرداختند. بر اساس نتایج آن‌ها در این منطقه خطرات استنشاق غیر سرطان‌زا (شاخص خطر HI > 1) برای کودکان و بزرگسالان بسیار بالا بوده و خطرات سرطان‌زا نیز بالاتر از آستانه قابل‌قبول می‌باشد. خطرات سرطان‌زایی نیز برای مسیر بلع هم برای کودکان و هم بزرگ‌سالان بالا می‌باشد. در پژوهشی ابراهیمی و همکاران (۲۰۲۲)، تغییرات PM_{10} و ارتباط آن با گردوغبار و اقلیم در بیرجند را مورد بررسی قرار دادند. بر اساس نتایج آن‌ها، غلظت PM_{10} و روند فرکانس روزهای گردوغبار مشابه می‌باشند و میانگین دما و سرعت باد روندی مشابه غلظت PM_{10} را دارند و PM_{10} با گردوغبار و اکثر متغیرهای آب و هوایی مرتبط است. نزدیک‌ترین همبستگی PM_{10} با روزهای غبارآلود، در مقیاس زمانی فصلی و ماهانه می‌باشد. نجم الدین[7] و همکاران (۲۰۱۹)، نمونه‌های گردوغبار خیابانی از مناطق صنعتی، مسکونی و با ترافیک سنگین در شهر مشهد را جمع‌آوری نمودند و بیان نموده‌اند که خطرات افزایشی سرطان در طول زندگی و قرار گرفتن در معرض گردوغبار برای کودکان و بزرگسالان ساکن در شهر مشهد نشان‌دهنده خطر سرطان‌زایی بالقوه بالایی است. پژوهشی که توسط شهسونی[8] و همکاران (۲۰۲۰) در ایران انجام دادند، اثرات کوتاه‌مدت ذرات معلق در روزهای گردوغبار کویری و غیر کویری بر مرگ‌ومیر را ارزیابی نمودند. نتایج آنان نشان داد که غلظت‌های بالاتر PM_{10} و فراوانی روزهای گردوغبار در اهواز نسبت به تهران بیشتر است. میری و همکاران (۲۰۲۱) در منطقه سیستان ایران عوامل اقلیمی و زمینی مرتبط با طوفان‌های گردوغبار را بررسی نمودند. نتایج آنان نشان داد که در دوره ۲۰۰۰-۲۰۰۴، شاهد فعالیت شدید گردوغبار بوده‌ایم و بیشترین میانگین

[1] Ali
[2] Wang
[3] Bai
[4] Bist and Choudhary
[5] Kabatas
[6] Liu
[7] Najmeddin
[8] Shahsavani

سرعت باد و کمترین بارش، رطوبت، پوشش گیاهی و پوشش آبی در این دوره مشاهده شده است. احمدی[1] و همکاران (۲۰۲۲)، ارتباط بین قرار گرفتن در معرض PM_{10} و بیماری‌های قلبی عروقی و تنفسی را در شهر زابل بررسی کردند. طبق نتایج آن‌ها، در طول تابستان میانگین غلظت PM_{10} بیشترین مقدار خود را نشان می‌دهد که ممکن است به تعلیق ذرات معلق در حضور امواج گرما نسبت داده شود. پاتل[2] و همکاران (۲۰۲۲)، در منطقه دنباد هند، به بررسی ارزیابی خطر سلامتی عنصر کمیاب در هوای محیط در امتداد جاده پرداختند. نتایج آنان نشان داد که مقدار شاخص خطر سرب برای کودکان به‌دلیل قرار گرفتن در معرض چند مسیری در تمام مکان‌های پایش بیشتر از ۱ بود و خطر سمی غیر سرطانی در آینده در کودکان را ایجاد خواهد کرد. هان[3] و همکاران (۲۰۲۳)، به ارزیابی خطر سلامتی فلزات سنگین در گردوغبار جاده‌ای در چین پرداختند و نتیجه گرفتند از میان تمامی عناصر آلاینده، کادمیوم بیشترین اهمیت را دارد. با توجه به این که بادهای ۱۲۰ روزه یکی از مهم‌ترین عواملی هستند که باعث تجمع آلودگی در شهر زابل می‌شوند (یارمردای[4] و همکاران، ۲۰۲۰) و به‌طور عمومی در فصل تابستان و در ماه‌های خرداد تا شهریور شروع به وزش می‌کنند (میری[5] و همکاران، ۲۰۲۱). این بادهای شدید و خشک در منطقه باعث شده است که شهرستان زابل به شدت تحت تأثیر انتشار گردوغبار قرار گیرند (بهروز[6] و همکاران، ۲۰۲۱). بنابراین با توجه به مطالعاتی که تاکنون صورت گرفته است، اهمیت موضوع مطالعه عناصر سنگین گردوغبار قابل لمس است و با توجه به اینکه تاکنون در شهر زابل مطالعه‌ای با هدف بررسی همبستگی پنج عنصر کروم، روی، سرب، کبالت و کادمیوم که از عوامل اصلی سرطان‌زایی ذرات با غلظت کمتر از ۱۰ میکرون هستند، صورت نگرفته است، هدف از این پژوهش، تعیین غلظت این فلزات و همبستگی این عناصر و ارزیابی ریسک و تاثیر آن‌ها بر سلامت انسان در شهر زابل می‌باشد.

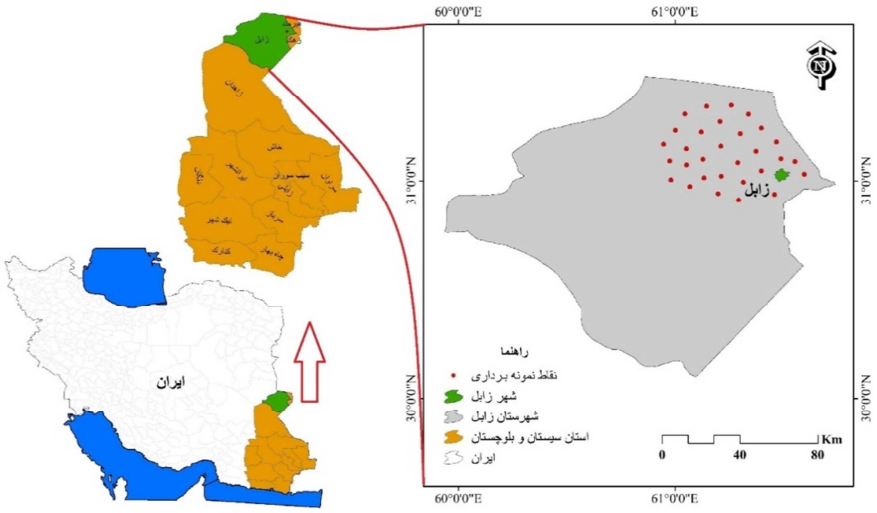
داده‌ها و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه:

منطقه زابل در شمال استان سیستان و بلوچستان واقع شده و از شمال و شرق با افغانستان، از غرب با استان خراسان جنوبی و از جنوب با شهرستان زاهدان مرز مشترک دارد. این منطقه در محدوده ۶۱ درجه ۱۵ دقیقه تا ۶۱ درجه و ۵۱ دقیقه طول شرقی و ۳۰ درجه و ۴۸ دقیقه تا ۳۱ درجه و ۲۶ دقیقه عرض شمالی قرار دارد (حیدری نسب[7]، ۲۰۱۹). جمعیت این منطقه حدود ۳۰۰ هزار نفر است و مساحت آن در حدود ۱۵۱۹۷ کیلومترمربع است (شکل ۱). منطقه سیستان شامل بیش از ۹۰۰ روستا و پنج شهرستان زهک، زابل، هامون، نیمروز و هیرمند است. این منطقه با تبخیر زیاد و رطوبت کمی مواجه است و متوسط رطوبت سالیانه آن ۲۸ درصد، تبخیر آن ۵۰۰۰ میلی‌متر در سال و متوسط بارندگی آن ۴۷ میلی‌متر است. سیستان بیشترین تعداد روزهای همراه با گردوغبار را در جهان دارد و به‌طور میانگین هر سال بیش از ۱۶۰ روز از سال وزش باد همراه با گردوغبار دارد که به متلاشی شدن زیست‌بوم آن منجر شده است و بر اساس برآوردی که از تعداد روزهای توأم با طوفان و گردوخاک برای دوره ۱۰ ساله در سطح کشور

[1] Ahmadi
[2] Patel
[3] Han
[4] Yarmoradi
[5] Miri
[6] Behrooz
[7] Heidari Nasab

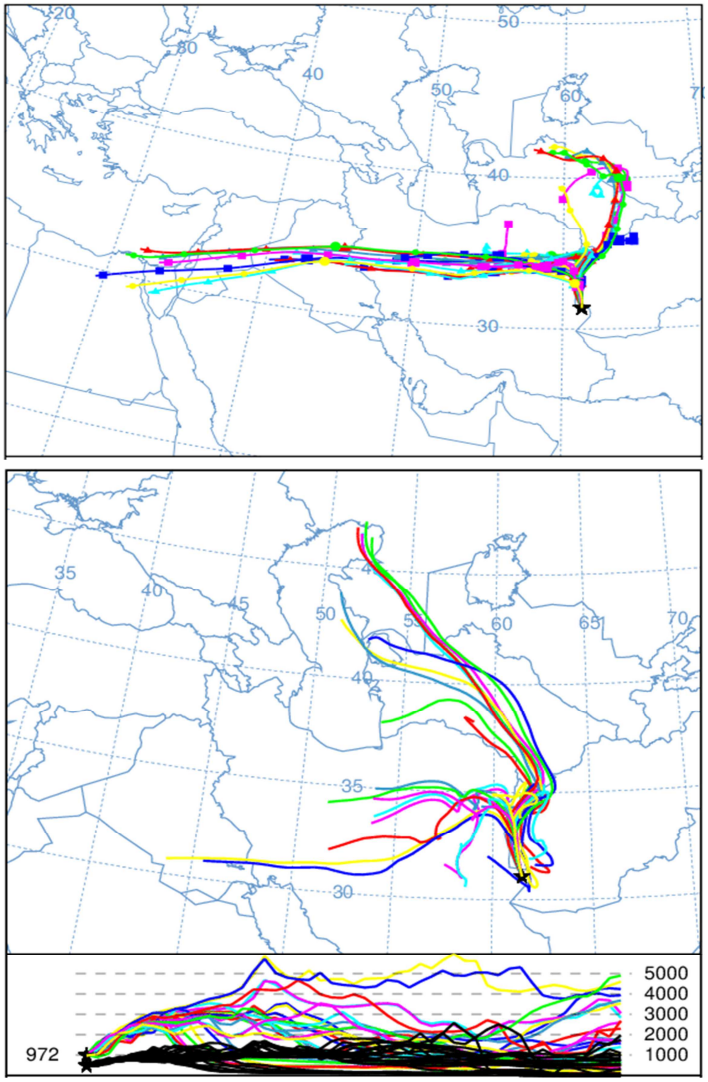
انجام شده، منطقه سیستان با بیش از ۱۵۰۰ روز بالاترین نسبت را در سطح کشور به خود اختصاص داده است (میرزاک زهی[1]، ۲۰۱۸). اقلیم منطقه سیستان بر اساس طبقه‌بندی کوپن اصلاح‌شده، اقلیم صحرایی با آب‌وهوای خیلی گرم و خشک بیابانی یعنی تابستان‌های طولانی و زمستان‌های ملایم قلمداد شده است. بر اساس آمار ۳۰ ساله هواشناسی، در منطقه زابل سالیانه بیش از ۳۰۰ روز خشکی وجود دارد. ازجمله خصوصیت‌های اقلیمی این منطقه می‌توان به وزش بادهای شدید (۱۲۰ روزه سیستان)، میانگین تعداد روزهای آفتابی سالیانه بیش از ۲۶۰ روز، دامنه تغییرات دمای شبانه‌روز بالا، بارندگی متوسط سالیانه برابر با ۶۴ میلی‌متر با پراکندگی نامناسب و همچنین بالا بودن دما و تعداد ساعات آفتابی اشاره کرد (محمدی‌نژاد، ۱۳۹۴).



شکل ۱: موقعیت منطقه مورد مطالعه بر روی نقشه‌های استان سیستان و بلوچستان و ایران

شکل ۲ نقشه جریان‌های گردوغبار در قسمت شرقی کشور و به‌طور خاص منطقه سیستان را نشان می‌دهد که با استفاده از مدل Hysplit[2] (شان[3] و همکاران، ۲۰۱۹) به‌صورت بکوارد[4] با بازه زمانی ۴۸ ساعته برای روزهای نمونه‌برداری (۵ و ۶ خردادماه ۱۴۰۱) در این منطقه تهیه گردید. مدل Hysplit، یکی از پرکاربردترین مدل‌های هواشناسی در تعیین مسیر حرکت گردوغبار است (ارسلانی و همکاران، ۱۳۹۹). با توجه به آن می‌توان نتیجه گرفت که به‌طور کلی گردوغبار موجود در این شهرستان از دو جهت اصلی، کویر مرکزی ایران و از سمت شمال و شمال شرقی کشورهای افغانستان، ترکمنستان و قزاقستان نشأت گرفته‌اند و به منطقه سیستان وارد می‌شوند.

[1] Mirakzehi
[2] Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model
[3] Shan
4 Backward



شکل ۲: نقشه ردیابی ذرات گردوغبار با مدل Hysplit برای شهرستان زابل (خردادماه ۱۴۰۱)

نمونه‌برداری و تجزیه‌وتحلیل نمونه‌ها:

در این مطالعه، برای بررسی غلظت فلزات سنگین در گردوغبار شهر زابل، از روش‌های استاندارد معتبر برای نمونه‌برداری استفاده شد (هان[1] و همکاران، ۲۰۲۳). برای مطالعه غلظت ذرات معلق فلزات سنگین در شهر زابل، مرکز شهر به‌دلیل شرایط جغرافیایی و تمرکز جمعیت، به‌عنوان مکان نمونه‌برداری انتخاب شد. در این پژوهش، ۶۰ نمونه در روزهای گردوغباری، از اردیبهشت تا شهریور ماه با استفاده از دستگاه‌های نمونه‌بردار TCR جمع‌آوری شد (شکل ۳). هد موجود در این دستگاه ذرات PM_{10} را از سایر ذرات جدا می‌کند (وانگ[2] و همکاران، ۲۰۲۱).

[1] Han
[2] Wang

پنج عنصر کروم، روی، سرب، کبالت و کادمیوم در اسید توسط دستگاه ICP-OES[1] آنالیز شدند (لئونگ[2] و همکاران، ۲۰۰۸). در مرحله بعد، نمونه‌های خاک به‌صورت تصادفی از فواصل ۲۰۰ متری در جهات مختلف کانون‌های فرسایش بادی اطراف شهر زابل و در مسیر باد منطقه جمع‌آوری شده و پس از آنالیز شیمیایی، ترکیب عناصر مورد نظر مشخص گردید. جمعا ۴۵ نمونه خاک از مناطق اطراف شهرستان زابل جمع‌آوری شدند. این نمونه‌ها جهت ارسال به آزمایشگاه به‌منظور تجزیه‌وتحلیل دقیق‌تر، از سطح بالایی خاک (در ارتفاع ۵ سانتی‌متری) با استفاده از بیلچه یا بورس برداشته شدند و سپس با استفاده از کیسه‌های پلاستیکی به آزمایشگاه منتقل گردیدند (وانگ و همکاران، ۲۰۲۱). در نهایت نمونه‌ها با استفاده از دستگاه ICP-OES (پلاسمای جفت‌شده القایی - اسپکترومتر جرمی سری ICP-MS ۷۸۰۰) موجود در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه سیستان و بلوچستان (شکل ۲) آنالیز شدند (لیو[3] و همکاران، ۲۰۱۹).



شکل ۳: دستگاه‌های مورد استفاده، الف: دستگاه‌های نمونه‌بردار TCR، ب: دستگاه ICP-OES

تحلیل آماری:

جهت بررسی چگونگی توزیع آماری داده‌های موجود، خلاصه وضعیت پارامترهای آماری همچون دامنه، میانگین، انحراف معیار و چولگی از نرم‌افزار SPSS.20 استفاده و محاسبات شاخص‌ها با نرم‌افزار Excel انجام گردید. جهت تعیین همبستگی غلظت عناصر، ابتدا نرمال بودن داده‌ها با آزمون شاپیرو ویلک[4] و همبستگی عناصر با آزمون پیرسون در نرم‌افزار R صورت گرفت.

شاخص ریسک اکولوژیک (RI):

جهت ارزیابی خطر محیط زیستی فلزات موجود در گردوغبار، از شاخص پتانسیل ریسک اکولوژیک و معادلات ۱ تا ۳ استفاده شد (Miao و همکاران، ۲۰۲۲؛ رحمت[5] و همکاران، ۲۰۲۲).

$$RI = \sum_{i=1}^{n} Er \quad (۱)$$

$$E_r = Tr \times C_f \quad (۲)$$

[1] Inductivity Coupled Plasma- Optical Emission Spectrometry
[2] Leung
[3] Liu
[4] Shapiro-Wilk
[5] Rahmat

$$C_f = C_s / C_n \quad (۳$$

در این روابط RI، Er، Tr، Cf، Cs و Cn به ترتیب شاخص ریسک اکولوژیک عناصر، ریسک اکولوژیک عنصر مورد نظر، Tr فاکتور سمیت[1] هاکانسون که مقدار آن را برای پنج عنصر کروم، روی، سرب، کبالت و کادمیوم به ترتیب ۲، ۱، ۵، ۱۰ و ۳۰ تعیین کرد. Cf نیز از نسبت غلظت عنصر مورد نظر در نمونه به غلظت زمینه (پوسته زمین) آن عنصر به‌دست می‌آید. در واقع Cs حد مجاز غلظت عنصر در نمونه و Cn غلظت زمینه عنصر مورد نظر است. طبقه‌بندی RI و Er در جدول ۱ نشان داده شده است:

جدول ۱: طبقه‌بندی ریسک اکولوژیک

نوع شاخص	مقدار شاخص	طبقه ریسک
Er	Er <۴۰	کم
	۴۰≤Er< ۸۰	متوسط
	۸۰≤Er< ۱۶۰	قابل‌توجه
	۱۶۰≤Er< ۳۲۰	زیاد
	Er ≥۳۲۰	خیلی زیاد
RI	RI< ۱۵۰	کم
	۱۵۰≤ RI <۳۰۰	متوسط
	۳۰۰≤ RI <۶۰۰	قابل‌توجه
	RI ≥۶۰۰	زیاد

ارزیابی خطر سرطان‌زایی و غیر سرطان‌زایی

ارزیابی خطرات مرتبط با عناصر سنگین فرآیندی چند مرحله‌ای است که به دو بخش اصلی ارزیابی خطرات سرطان‌زا و خطرات غیر سرطان‌زا تقسیم می‌شود. این ارزیابی با استفاده از روش‌های ارزیابی خطر بهداشتی توسط سازمان حفاظت محیط‌زیست آمریکا (USEPA) اجرا می‌شود (کینگ[2] و همکاران، ۲۰۱۵). در این روش، برای بررسی هر دو نوع خطرات، سرطان‌زا و غیر سرطان‌زا، تمرکز بر روی قرارگیری انسان در معرض فلزات از سه مسیر اصلی، یعنی بلع، تنفس و جذب از طریق پوست قرار دارد. مقادیر جذب روزانه فلزات در هر یک از این مسیرها با استفاده از معادلات ۴ تا ۶ محاسبه و ارزیابی می‌شوند.

$$\text{Intake}_{ing} = \frac{C \times IngR \times EF \times ED}{BW \times AT} \times 10^{-6} \quad (۴$$

$$\text{Intake}_{inh} = \frac{C \times InhR \times EF \times ED}{PEF \times BW \times AT} \quad (۵$$

$$\text{Intake}_{dermal} = \frac{C \times SA \times SAF \times ABF_{dermal} \times EF \times ED}{BW \times AT} \times 10^{-6} \quad (۶$$

مقادیر Intake_{dermal}: میانگین جذب روزانه فلزات از طریق پوست، Intake_{inh}: جذب از طریق تنفس و Intake_{ing}: جذب از طریق بلع (mg/kg.day) است.

[1] Toxic factor
[2] Qing

C: غلظت عناصر گردوغبار (mg/kg)، IngR: میزان تنفس در گردوغبار (به مترمکعب بر روز)، EF: مقدار قرارگیری در معرض عناصر (day/year)، ED: مدت قرارگیری در معرض عناصر (year)، BW: وزن بدن فرد در معرض عناصر (kg)، AT: مدت زمان قرارگیری در معرض عناصر (day)، SA: مساحت سطح پوست در معرض عناصر (cm^2)، AF: چسبندگی گردوغبار به پوست ($mg/cm^2.day$) و ABF: جذب سطحی پوست (بدون واحد) است.

در جدول ۲، جزئیات پارامترهای استفاده‌شده در معادلات ارزیابی خطر بیان شده است (کینگ و همکاران، ۲۰۱۵ و وی[1] و همکاران، ۲۰۱۵ و چابوکدهرا[2] و همکاران، ۲۰۱۳).

پس از محاسبه میزان جذب روزانه فلزات، خطر غیر سرطان‌زایی (HI) کودکان و بزرگ‌سالان از رابطه (۷) تعیین شد.

$$HQ = \frac{\text{Intake}}{\text{RfDi}} \quad (۷$$

در معادله HQ برای ارزیابی خطر غیر سرطان‌زایی فلزات در هر مسیر، از مقدار جذب روزانه فلزات در هر یک از مسیرهای احتمالی قرارگیری در معرض فلزات (به واحد میلی‌گرم بر کیلوگرم بدن در روز) بهره می‌بریم. اگر مقدار HQ برابر یا بزرگ‌تر از ۱ باشد، نشان‌دهنده ناسازگاری با سلامت انسان است؛ در صورتی که کوچک‌تر از ۱ باشد، اثرات نامطلوب و نگران‌کننده‌ای بر سلامت انسان را نشان می‌دهد. مقدار شاخص خطر تجمعی غیر سرطان‌زایی (HI) فلزات برای هر دو گروه بزرگ‌سال و کودکان، طبق رابطه ۷ محاسبه می‌شود (روانخواه[3] و همکاران، ۲۰۱۶). معادله HQ برای محاسبه خطر غیر سرطان‌زایی فلزات، مقدار جذب روزانه فلزات در معرض (mg/kg.day) را در نظر می‌گیرد. مقدار HQ برابر و یا بزرگ‌تر از ۱ نشان‌دهنده ناسازگاری با سلامت انسان و مقدار کوچک‌تر از ۱، اثرات نامطلوب و نگران‌کننده‌ای دارد. مقدار شاخص خطر تجمعی غیر سرطان‌زایی (HI) فلزات برای هر دو گروه بزرگ‌سال و کودکان طبق معادله ۸ به دست می‌آید.

$$HI = \sum QHi \quad (۸$$

شاخص خطر سرطان‌زایی (Cancer Risk, CR) برای عناصر سرب، کروم و آرسنیک بر اساس دستورالعمل‌های پیشنهادی اداره حفاظت از محیط‌زیست آمریکا (EPA) محاسبه می‌شود. این شاخص نشان‌دهنده میزان خطر ابتلا به سرطان برای افرادی است که با این عناصر در محیط کار یا زندگی خود در ارتباط هستند. برای محاسبه شاخص خطر سرطان‌زایی سرب، کروم و آرسنیک از رابطه ۹ و ۱۰ می‌توان محاسبه کرد.

$$CR = Intake \times CSF \quad (۹$$

$$TCR = \sum CR = CR_{ing} + CR_{inh} + CR_{dermal} \quad (۱۰$$

که در آن CR: خطرپذیری بیماری سرطانی (بدون واحد)، TCR: خطر کل سرطانی (بدون سرطان) و CSF فاکتور شیب سرطانی فلزات سنگین ($mg\ kg^{-1}day^{-1}$) است. اگر مقدار خطر کل سرطانی کمتر از 1×10^{-6} باشد، این به معنای این است که احتمال سرطان از یک در یک‌میلیون نفر کمتر است و اثر قابل‌توجهی بر سلامت انسان ندارد و قابل‌اغماض است. با این حال، اگر خطر کل سرطانی بیشتر از 1×10^{-4} باشد، این به معنای غیرقابل قبول بودن خطر برای سلامت انسان است و خطرناک است. در صورتی که خطر کل بین 1×10^{-6} تا 1×10^{-4} باشد، نشان‌دهنده

[1] Wei
[2] Chabukdhara
[3] Ravankhah

خطرپذیری با شرایط کنترل و نظارت است و باید توجه ویژه‌ای داشته باشیم تا خطرات مربوط به عناصر سنگین به حداقل رسیده و کنترل شوند (وی و همکاران، ۲۰۱۵).

جدول ۲: راهنمای پارامترهای معادلات ارزیابی خطر سرطان‌زایی و غیر سرطان‌زایی فلزات سنگین در گردوغبار

پارامتر	واحد اندازه‌گیری	بزرگ‌سال	کودکان
IngR	mg/day	۱۰۰	۲۰۰
InhR	m^3/day	۲۰	۷/۶
EF	day/year	۳۵۰	۳۵۰
ED	year	۳۰	۶
BW	kg	۷۰	۱۵
AT	days	۱۰۹۵۰	۲۱۹۰
PEF	m^3/kg	۱/۳۶ ×$۱۰^{۹}$	۱/۳۶ ×$۱۰^{۹}$
ESA	cm^2	۵۷۰۰	۲۸۰۰
AF	mg/cm^2.day	۰/۰۷	۰/۲
CSF	mg/kg.day	سرب ($۴/۲ \times ۱۰^{-۲}$)، کروم ($۴/۲ \times ۱۰^{-۱}$)، آرسنیک ($۱/۵۱ \times ۱۰^{-۱}$) و روی ($۴/۲ \times ۱۰^{-۴}$)	
$RfD_{ingestion}$	mg/kg.day	سرب (۳×۱۰^{-۳})، کروم (۳×۱۰^{-۳})، آرسنیک (۳×۱۰^{-۴}) و روی (۳×۱۰^{-۱})	
$RfD_{inhalation}$	mg/kg.day	سرب ($۳/۵۲ \times ۱۰^{-۳}$)، کروم ($۲/۸۶ \times ۱۰^{-۵}$)، آرسنیک ($۳/۱ \times ۱۰^{-۴}$) و روی (۳×۱۰^{-۱})	
RfD_{dermal}	mg/kg.day	سرب ($۵/۲۵ \times ۱۰^{-۴}$)، کروم (۶×۱۰^{-۵})، آرسنیک ($۱/۲۳ \times ۱۰^{-۴}$) و روی (۶×۱۰^{-۲})	

نتایج و بحث

همبستگی میان فلزات و غلظت PM_{10}

بر اساس جدول ۳، نتایج ماتریس همبستگی پیرسون برای غلظت فلزات سنگین شهر زابل نشان داد که بین عناصر کادمیوم و کبالت/ منگنز و کبالت/ منگنز و کادمیوم/ سرب و کبالت/ سرب با کادمیوم و سرب با منگنز همبستگی معنی‌دار بالای ۷۰ درصد وجود دارد. همچنین بیشترین همبستگی غلظت بین عنصر کروم با PM_{10} مشاهده شد. شکل ۵، همبستگی فلزات سنگین موجود در گردوغبار شهر زابل را به‌صورت گرافیکی نشان می‌دهد.

جدول ۳: ماتریس همبستگی پیرسون PM_{10} با فلزات سمی در شهر زابل

	PM_{10}	Co	Cd	Cr	Zn	Pb
PM_{10}	۱					
Co	۰/۳۶	۱				
Cd	۰/۲۹	۰/۸۲	۱			
Cr	۰/۴۱	۰/۴۸	۰/۶۴	۱		
Zn	۰/۲۲	۰/۸	۰/۸۸	۰/۵۶	۱	
Pb	۰/۱۸	۰/۷۵	۰/۸	۰/۳۲	۰/۹۲	۱



شکل ۵: همبستگی پیرسون PM_{10} با فلزات سنگین شهر زابل

پتانسیل ریسک اکولوژیک: (Potential ecological risk)

خلاصه‌ای از پارامترهای آماری غلظت فلزات سنگین در نمونه‌های گردوغبار شهرستان زابل در جدول ۴ گزارش شده است. غلظت میانگین عناصر روی، کروم، سرب، کبالت و کادمیوم به ترتیب ۱/۱۷، ۰/۶۶، ۲/۰۱، ۰/۶۹ و ۰/۹ mg/kg به‌دست آمد. غلظت میانگین تمام عناصر بجز روی از مقدار زمینه (غلظت در پوسته زمین) کمتر بود. در واقع این مطلب نشان می‌دهد که جمعیت شهری کمتر و استفاده از وسایل نقلیه موتوری کمتر و به‌دنبال آن ترافیک شهری کم زابل می‌تواند دلیلی بر کم بودن غلظت عناصر کرم، سرب، کبالت و کادمیوم در این منطقه باشد.

جدول ۴: خلاصه‌ای از پارامترهای آماری غلظت فلزات سنگین در منطقه مورد مطالعه

فلزات سنگین	واحد	دامنه	میانگین	میانه	میانگین زمینه
روی (Zn)	mg/kg	۰-۶/۲۲	۱/۱۷	۰/۴۹	۰/۴۲
کروم (Cr)	mg/kg	۰-۱۳/۳۹	۰/۶۶	۰/۱۲	۷۳/۹۲
سرب (Pb)	mg/kg	۰/۰۶-۱۰/۸	۲/۰۱	۰/۸۹	۱۸/۳۹
کبالت (Co)	mg/kg	۰-۹/۶۵	۰/۶۹	۰	۱۰/۸
کادمیم (Cd)	mg/kg	۰-۹/۴۷	۰/۹	۰	۱/۴۱

در این پژوهش، پتانسیل ریسک اکولوژیکی فلزات سنگین منطقه مورد مطالعه بر اساس روش هاکانسون محاسبه شده است (هاکانسون[1]، ۱۹۸۰). مقادیر پتانسیل ریسک اکولوژیک (Er) و شاخص ریسک (RI) در جدول ۵ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که میانگین Er برای فلزات سنگین مورد مطالعه در نمونه‌های گردوغبار به‌صورت Zn>Pb>Cd>Cr در حال کاهش است. براساس مقدار میانگین Er فلزات سنگین، روی (۲۶۴/۲۶)، سرب (۵۴/۶۲)، کادمیوم (۱۹/۱۲) و کروم (۱/۷۸) دارای پتانسیل ریسک اکولوژیکی کم ($Er < 40$) است.

[1] Hakanson

جدول ۵: نتایج آماری ریسک اکولوژیک (Er) و شاخص ریسک (RI) فلزات سنگین در منطقه مورد مطالعه

فلزات سنگین	ریسک اکولوژیک(Er)				شاخص ریسک (RI)
	مینیمم	ماکزیمم	میانگین	میانه	
روی	۰	۱۲۸۷/۳۸	۲۶۴/۲۶	۱۱۷/۰۳	۲۲/۲۳
کروم	۰	۱۳/۹۳	۱/۷۸	۰	
سرب	۱/۵۷	۲۹۳/۷۷	۵۴/۶۲	۰/۳۴	
کادمیم	۰	۲۰۱/۴۸	۱۹/۱۲	۰	

ارزیابی خطر سرطان‌زایی و غیر سرطان‌زایی

ارزیابی ریسک سلامت انسانی در نمونه‌های گردوغبار در معرض فلزات از سه مسیر اصلی بلع، تنفس و تماس پوستی برای کودکان و بزرگسالان مورد بررسی قرار گرفت.

میزان خطر غیر سرطان‌زایی (HQ) کل مسیرهای سه‌گانه برای تک تک فلزات سنگین به تفکیک کودکان بزرگسالان در جدول ۶ آمده است. بیشترین و کمترین میزان HQ در گروه سنی کودکان برای کلیه فلزات سنگین به ترتیب $۱/۱۴\times۱۰^{-۲}$ (mg/kg) $۸/۲۵\times۱۰^{-۱۶}$ و در گروه سنی بزرگسالان $۱/۲۳\times۱۰^{-۳}$ (mg/kg) و $۳/۴۲\times۱۰^{-۱۵}$ (mg/kg) مربوط به فلز کادمیوم و کروم می‌باشد.

با توجه به جدول ۶، ارزیابی ریسک غیرسرطانی عناصر منتخب از مسیر بلع برای شهر زابل نشان داد که عنصر روی در شهر زابل برای بزرگسالان ریسک کم و برای کودکان کلاس ریسک متوسط دارد. عنصر کروم نیز در شهر زابل دارای ریسک زیاد برای کودکان و بزرگسالان می‌باشد که نشان می‌دهد این عنصر برای سلامتی افراد خطری جدی از طریق بلع در پی دارد. همچنین عنصر روی برای بزرگسالان ریسک متوسط و برای کودکان در کلاس ریسک زیاد قرار می‌گیرد. سرب نیز در شهر زابل برای هر دو گروه سنی ریسک خطر غیرسرطان‌زایی خیلی کمی دارند. از طرفی عنصر کبالت در شهر زابل برای هر دو گروه سنی در کلاس ریسک زیاد قرار می‌گیرد که نشان از اهمیت عنصر کبالت در خطر غیر سرطانی از مسیر بلع در شهر زابل می‌باشد. کادمیم نیز از نظر ریسک غیر سرطانی برای بزرگسالان ریسک زیاد و برای کودکان ریسک خیلی زیادی را در پی دارد. بنابراین عناصر کروم و کبالت، کادمیم در شهر زابل وضعیت بحرانی داشته که برای هر دو گروه سنی تهدید جدی محسوب می‌شود. در نهایت مجموع ریسک غیر سرطانی (HI) تمامی عناصر از مسیر بلع نشان داد که در شهر زابل این خطر برای بزرگسالان زیاد و برای کودکان بسیار زیاد می‌باشد؛ چرا که کودکان بیشتر در معرض خطر عناصر سنگین از طریق بلع قرار دارند و مقادیر قابل-توجهی از گردوغبار را با فرو بردن دست در دهان، از طریق بلع وارد بدن خود می‌کنند و به‌دلیل سیستم ایمنی توسعه نیافته و ضعیف، کودکان بیشتر در معرض مسمومیت با فلزات سنگین قرار دارند. کینگ[1] و همکاران (۲۰۱۵) نیز دریافتند که HI در کودکان خیلی بیشتر از بزرگسالان است که با نتایج این پژوهش همخوانی دارد. در پژوهشی دیگر، قنواتی (۱۳۹۷) بیان داشت که در هر دو گروه سنی کودک و بزرگسال، فلز کروم دارای بیشترین خطر سرطان زایی و فلز سرب کمترین خطر را دارد که با نتایج این پژوهش مطابقت دارد.

[1] Qing

جدول ۶: خطر غیر سرطان‌زایی فلزات سنگین در شهر زابل به تفکیک بزرگ‌سالان و کودکان

پارامتر / فلز (mg/kg)	روی	کروم	سرب	کبالت	کادمیم	میزان خطر
کودکان						
HQing	$۴/۹۷\times۱۰^{-۵}$	$۲/۸۱\times۱۰^{-۳}$	$۷/۳۳\times۱۰^{-۹}$	$۲/۹۲\times۱۰^{-۳}$	$۱/۱۴\times۱۰^{-۲}$	
HQinh	$۱/۳۹\times۱۰^{-۹}$	$۸/۲۵\times۱۰^{-۱۶}$	$۲/۰۳\times۱۰^{-۱۳}$	$۸/۱۸\times۱۰^{-۸}$	$۳/۲۱\times۱۰^{-۷}$	خیلی کم
HQderm	$۶/۹۶\times۱۰^{-۷}$	$۳/۹۴\times۱۰^{-۱۴}$	$۱/۳۶\times۱۰^{-۱۲}$	$۲/۴۵\times۱۰^{-۵}$	$۳/۲۱\times۱۰^{-۳}$	
HI={HQi	$۵/۰۴\times۱۰^{-۵}$	$۲/۸۱\times۱۰^{-۳}$	$۷/۳۳\times۱۰^{-۹}$	$۲/۹۴\times۱۰^{-۳}$	$۱/۴۶\times۱۰^{-۲}$	کم
HI total	$۲/۰۴\times۱۰^{-۲}$					
بزرگ‌سالان						متوسط
HQing	$۵/۳۳\times۱۰^{-۶}$	$۲/۲۲\times۱۰^{-۴}$	$۷/۸۶\times۱۰^{-۹}$	$۳/۱۳\times۱۰^{-۴}$	$۱/۲۳\times۱۰^{-۳}$	
HQinh	$۷/۸۳\times۱۰^{-۱۰}$	$۳/۴۲\times۱۰^{-۱۵}$	$۱/۱۴\times۱۰^{-۱۳}$	$۴/۶۱\times۱۰^{-۸}$	$۱/۸۱\times۱۰^{-۷}$	زیاد
HQderm	$۱/۰۶\times۱۰^{-۷}$	$۴/۴۲\times۱۰^{-۱۴}$	$۲/۰۷\times۱۰^{-۱۲}$	$۳/۷۵\times۱۰^{-۶}$	$۴/۹۱\times۱۰^{-۴}$	
HI={HQi	$۵/۴۴\times۱۰^{-۶}$	$۲/۲۲\times۱۰^{-۴}$	$۷/۸۶\times۱۰^{-۹}$	$۳/۱۷\times۱۰^{-۴}$	$۱/۷۲\times۱۰^{-۳}$	خیلی زیاد
HI total	$۲/۲۷\times۱۰^{-۳}$					

ارزیابی ریسک سرطان‌زایی عناصر منتخب از مسیر بلع در شهر زابل در جدول ۷ نشان داد که عنصر روی برای بزرگسالان ریسک متوسط و برای کودکان در کلاس ریسک زیاد قرار می‌گیرد. عنصر کروم نیز دارای ریسک متوسط برای بزرگسالان و ریسک زیاد برای کودکان می‌باشد که نشان می‌دهد این عنصر برای سلامتی افراد خطر سرطانی شدن از طریق بلع را در پی دارد. سرب در شهر مورد مطالعه برای بزرگسالان ریسک خیلی کم و برای کودکان ریسک کمی را شامل می‌شود. چابک دهرا[1] و همکاران (۲۰۱۳) گزارش نمودند که بیشترین RI در منطقه صنعتی هند بعد از کروم به ترتیب مربوط به نیکل، سرب و کادمیوم بوده است. عنصر کبالت در شهر زابل برای کودکان کلاس خطر متوسط و برای بزرگسالان کلاس خطر کم را در بر می‌گیرد. عنصر کادمیوم نیز برای گروه سنی بزرگسالان خطر کم و برای کودکان زیاد می‌باشد. مجموع ریسک سرطانی (TCR) تمامی عناصر برای هر دو گروه سنی شهر زابل نشان داد که خطر سرطانی فلزات سنگین موجود در گردوغبار از طریق بلع، زیاد بوده و نیازمند اقدامات پیشگیرانه جدی می‌باشد. با توجه به خطرات سلامتی انسان، بلع به‌عنوان مسیر اصلی در معرض قرار گرفتن مشخص گردید و این مهم برای کودکان خطرات غیرسرطان‌زایی و سرطان‌زایی بالاتری را نسبت به بزرگسالان نشان می‌دهد (فی[2] و همکاران، ۲۰۲۳). در پژوهشی مددی[3] و همکاران (۲۰۲۲)، خطر سلامت غیر سرطان‌زا (HI) در معرض قرار گرفتن عنصر سرب را برای کودکان در مناطق صنعتی انجام دادند. بیان نمودند احتمال خطر سرطان‌زایی Pb و Cr در گردوغبار مناطق صنعتی زیاد می‌باشد که این نتایج در خصوص عناصر نامبرده با این پژوهش مطابقت دارد.

نتایج ارزیابی ریسک سلامت عناصر در نمونه‌های گردوغبار شهر زابل نشان داد که در هر دو گروه کودکان و بزرگسالان، مسیر دهان (بلع)، مسیر اصلی مواجهه با خطرات ناشی از عناصر منتخب در گردوغبار این مناطق می‌باشد و تماس پوستی و استنشاقی به ترتیب در مراحل بعدی اهمیت قرار دارند (بلع > پوستی > تنفس). در مطالعات

[1] Chabukdhara
[2] Fei
[3] Madadi

آسود و همکاران (۱۳۹۹)، ژانگ[1] و همکاران در سال ۲۰۱۸، نیز این نتایج مشاهده شده است و این محققین مسیر بلع را مسیر اصلی مواجهه با خطرات فلزات سنگی موجود در گردوغبار دانستند که با نتایج این پژوهش برای شهر زابل مطابقت دارد. همچنین دهقانی[2] و همکاران (۲۰۱۷)، بیان داشتند که مقدار خطر غیر سرطانی از مسیر تنفس چندین واحد پایین‌تر از مسیرهای پوستی و بلع بوده و آلاینده‌ها از طریق تنفس کمترین خطر را دارند. رحمان[3] و همکاران (۲۰۲۰)، اظهار نمودند که بلع مسیر اصلی قرارگرفتن در معرض خطرات سرطان‌زایی و غیرسرطان‌زایی عناصر سنگین از طریق گردوغبار در مدارس لاهور پاکستان است. همچنین عنصر کروم را خطرناک‌ترین عنصر برای خطر سرطان‌زای سلامت (CR)، در مناطق صنعتی معرفی کردند.

ژونگ[4] و همکاران (۲۰۲۳)، با بررسی خطرات ناشی از فلزات سنگین در گردوغبار جاده‌ها، برای سلامتی انسان و ایمنی محیط‌زیست بیان نمودند که فلزات سنگینی مانند کادمیوم، مس، روی و سرب با خطرات بالای سرطان‌زایی و غیر سرطان‌زایی برای سلامتی انسان همراه هستند. نتایج مطالعات پانکینگ[5] و همکاران (۲۰۲۳) و سرلی[6] و همکاران (۲۰۲۲)، نشان می‌دهد که بیشترین و کمترین میزان HQ برای کلیه فلزات سنگین، به ترتیب در مسیر بلع بیشتر از جذب پوستی و تنفس مشاهده می‌شود. همچنین، میزان HQ در مسیر بلع و تنفس برای کودکان بیشتر از بزرگ‌سالان بوده و در مسیر جذب پوستی برای بزرگ‌سالان بیشتر از کودکان مشاهده می‌گردد. خطر تجمعی غیر سرطان‌زایی کلیه فلزات سنگین در گردوغبار خیابانی برای کودکان بیشتر از بزرگ‌سالان است که این امر نشان داد کودکان بیشتر از بزرگ‌سالان در معرض خطر فلزات سنگین قرار دارند.

جدول ۷: خطر سرطان‌زایی فلزات سنگین در شهر زابل به تفکیک بزرگ‌سالان و کودکان

پارامتر / فلز (mg/kg)	روی	کرم	سرب	کبالت	کادمیم	میزان خطر
کودکان						
CRing	۶/۲۶×۱۰$^{-۳}$	۳/۵۴×۱۰$^{-۴}$	۱/۰۷×۱۰$^{-۶}$	۱/۳۲×۱۰$^{-۵}$	۴/۸۳×۱۰$^{-۴}$	
CRinh	۱/۷۵×۱۰$^{-۸}$	۹/۹۱×۱۰$^{-۹}$	۳/۰۱×۱۰$^{-۱۱}$	۳/۷۱×۱۰$^{-۹}$	۱/۳۵×۱۰$^{-۸}$	خیلی کم
CRderm	۲/۰۸×۱۰$^{-۸}$	۱/۱۸×۱۰$^{-۸}$	۶/۱۱×۱۰$^{-۱۰}$	۹×۱۰$^{-۸}$	۱/۶۱×۱۰$^{-۸}$	
TCR	۵/۰۴×۱۰$^{-۵}$	۳/۵۴×۱۰$^{-۴}$	۱/۰۷×۱۰$^{-۶}$	۱/۳۳×۱۰$^{-۵}$	۴/۸۳×۱۰$^{-۴}$	کم
CR total	۹/۰۲×۱۰$^{-۴}$					
بزرگسالان						متوسط
CRing	۶/۷۱×۱۰$^{-۵}$	۳/۸×۱۰$^{-۵}$	۱/۱۵×۱۰$^{-۷}$	۱/۴۱×۱۰$^{-۶}$	۱/۸۵×۱۰$^{-۶}$	
CRinh	۹/۸۷×۱۰$^{-۹}$	۵/۵۹×۱۰$^{-۹}$	۱/۶۹×۱۰$^{-۱۱}$	۲/۰۹×۱۰$^{-۹}$	۲/۷۳×۱۰$^{-۹}$	زیاد
CRderm	۳/۱۹×۱۰$^{-۹}$	۱/۸×۱۰$^{-۹}$	۹/۳۳×۱۰$^{-۱۱}$	۱/۳۷×۱۰$^{-۸}$	۱/۸×۱۰$^{-۸}$	
TCR	۶/۷۱×۱۰$^{-۵}$	۳/۸×۱۰$^{-۵}$	۱/۱۵×۱۰$^{-۷}$	۱/۴۳×۱۰$^{-۶}$	۱/۸۷×۱۰$^{-۶}$	خیلی زیاد
CR total	۱/۰۹×۱۰$^{-۴}$					

[1] Zhang
[2] Dehghani
[3] Rehman
[4] Zong
[5] Panqing
[6] Cirelli

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، غلظت فلزات منتخب (Co، Cd، Cr، Zn و Pb) در گردوغبار شهر زابل مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که در شهر زابل، غلظت سرب و روی بیشترین مقدار را داشت. از جهتی دیگر غلظت روی در نمونه‌های گردوغبار بیشتر از مقدار زمینه (غلظت در پوسته زمین) بودند. در نتیجه منشأ گردوغبار در شهرستان‌های زابل از منابع محلی و خارجی یعنی تالاب خشک هامون،کویر مرکزی ایران و عرض‌های جغرافیایی بالاتر شامل شرق دریای کاسپین بیابان‌های قره قوم و دریاچه آرال مشتق می‌شود. همچنین فلزات سنگین مرتبط با منشا انسانی مانند تاسیسات صنعتی، ترافیک، تولید برق، سوخت‌سوزی روغن در مناطق مسکونی و فعالیت‌های ساخت‌وساز نیز وجود دارد و با توجه به مقایسه با پژوهش‌های مشابه، می‌توان نتیجه گرفت که عواملی مانند شرایط اقلیمی محلی و رویدادهای گردوغبار مناطق اطراف نیز نقش مهمی در افزایش غلظت فلزات سنگین در گردوغبار شهر زابل دارند. بررسی میزان ذرات کوچک‌تر و یا مساوی ۱۰ میکرون (PM_{10}) نیز نشان داد که شهر زابل با وضعیت بحرانی از لحاظ شاخص سلامت مواجه است و غلظت ذرات PM_{10} به مقادیر خطرناکی افزایش یافته و وضعیت سلامت هوا بسیار نگران‌کننده می‌باشد. میانگین غلظت فلزات سنگین در گردوغبار شهرستان زابل نشان داد که شهر زابل از فلزات سنگین آلوده است. این غلظت فلزات می‌تواند به عوامل مختلفی برگردد، ازجمله برداشت و انتقال عناصر از تالاب خشک هامون، انتشار ذرات PM_{10} به‌وسیله بادهای ۱۲۰روزه از سمت مناطق شمال و شمال شرقی یا عرض‌های بالاتر، فعالیت‌های صنعتی، ترافیک شهری و میزان جمعیت، از طرفی شهر زابل با جمعیت و ترافیک شهری کمتر انتظار می‌رود منابع آلاینده کمتری داشته باشد. بنابراین با توجه به این مهم و با درنظرگرفتن مسیر باد غالب، می‌توان قسمت اعظم غلظت فلزات سنگین شهر زابل را به انتشار و انتقال از طریق باد و از منابع دورتر نسبت داد. نتایج این پژوهش نشان داد که اقدامات پیشگیرانه و کنترلی برای کاهش خطرات ناشی از فلزات سنگین در گردوغبار شهر زابل لازم بوده و باید به مسیر جذب عناصر از طریق بلع توجه ویژه‌ای گردد. همچنین عنصر کرم خطرات بالایی را برای سلامتی ساکنین زابل ایجاد می‌کند. این خطرات می‌توانند به‌صورت سرطان‌زایی و غیرسرطان‌زایی برای افراد مختلف، به‌خصوص کودکان، پدید آید. قابل یادآوری است که کودکان بیشتر از بزرگ‌سالان در معرض خطر فلزات سنگین قرار داشته و میزان خطر تجمعی غیرسرطان‌زایی کلیه فلزات سنگین برای کودکان بیشتر از بزرگ‌سالان است. این نتیجه می‌تواند به‌عنوان انگیزه‌ای برای اقدامات پیشگیرانه و کنترلی جدی در این مناطق برای حفظ سلامتی افراد و به‌ویژه کودکان درنظر گرفته شود.

تقدیر و تشکر

بدین‌وسیله از حمایت مالی دانشگاه زابل به شماره گرنت IR-UOZ0088 در انجام این پژوهش کمال تشکر و قدردانی را داریم.

منابع

ارسلانی، فاطمه؛ علیجانی، بهلول؛ اکبری، مهری؛ محمدخان، شیرین. (۱۳۹۹). بررسی عناصر سنگین (Pb، Ni، Cu، Cr و Cd) موجود در غبار ریزشی شهر تهران، پژوهش‌های دانش زمین، دوره ۱۱، شماره ۴۴. صص:۱۵-۳۶.

آسود، سید رضا. (۱۳۹۹). مقایسه و ارزیابی ریسک سلامت عناصر منتخب در گردوغبار داخل و خارج منازل در اهواز، زابل و منطقه پارس جنوبی. رساله دکتری، دانشگاه تربیت مدرس. ۹۴ص.

حمیدیان پور,محسن؛ مفیدی، عباس؛ سلیقه، محمد. (۱۳۹۵). تحلیل ماهیت و ساختار باد سیستان. مجله ژئوفیزیک ایران، دوره ۱۰، شماره۲ . صص: ۸۳-۱۰۹.

خشتابه، ریحانه؛ اکبری، مرتضی؛ حیدری، آوا؛ نجف پور، علی اصغر. (۱۴۰۲). تأثیر استخراج سنگ آهن بر غلظت برخی از فلزات سنگین و پهنه‌بندی آلودگی خاک مطالعه موردی: معدن سنگ آهن سنگان، خواف-ایران، نشریه آب و خاک، دوره ۳۷، شماره ۱، صص: ۷۷-۹۴.

فیروزیان، سارا؛ سعیدآبادی، محمد صادق. (۱۳۹۵). بررسی اثرات و آسیب‌های اجتماعی ریزگردها (مطالعه موردی شهرستان سیستان)، کنفرانس بین‌المللی پژوهش در مهندسی، علوم و تکنولوژی، دوره ۴، موسسه پندار همایش پارس.

قنواتی، نوید. (۱۳۹۷). ارزیابی خطر فلزات سنگین بر سلامت انسانی در گردوغبار خیابانی شهر آبادان، فصلنامه سلامت و محیط‌زیست، شماره ۱۱. دوره ۱. صص: ۶۳-۷۴.

مظلومی، سهراب، اسماعیلی ساری، عباس، بهرامی‌فر، نادر، معین الدینی، مظاهر (۱۳۹۶): ارزیابی میزان حضور فلزات و شبه فلزات در گردوغبار خیابانی غرب و شرق تهران، سلامت و محیط‌زیست، دوره۱۰، شماره ۲، صص: ۲۸۱-۲۹۲.

طاعتی، عباس؛ صالحی، محمد حسین؛ محمدی، جهانگرد؛ مهاجر، رضا. (۱۳۹۹). ارزیابی سطح آلودگی، ریسک غیرسرطان‌زایی و سرطان‌زایی فلزات سنگین بر سلامت انسان در خاک‌های سطحی مناطق صنعتی اراک، ایران، سلامت و محیط‌زیست، دوره ۱۳، شماره ۲، صص: ۳۳۵-۳۴۸.

Ahmadi, S., Ezeliora, C.D., Sharki, S.H., Osagie, C., Ghosh, S., Igwegbe, C.A. and Khan, N.A. (2022). Assessment of health impacts attributed to PM10 exposure during 2015–2017 in Zabol City, Iran. International Journal of Environmental Science and Technology, 19(5), pp.4123-4136.

Ali, M.U., Yu, Y., Yousaf, B., Munir, M.A.M., Ullah, S., Zheng, C., Kuang, X. and Wong, M.H. (2021). Health impacts of indoor air pollution from household solid fuel on children and women. Journal of hazardous materials, 416, p.126127.

Bai, B., Bai, F., Sun, C., Nie, Q.,& Sun, S, (2023); Adsorption mechanism of shell powders on heavy metal ions Pb2+/Cd2+ and the purification efficiency for contaminated soils. Frontiers in Earth Science, 10, p.1071228.

Behrooz, R.D., Kaskaoutis, D.G., Grivas, G. and Mihalopoulos, N. (2021). Human health risk assessment for toxic elements in the extreme ambient dust conditions observed in Sistan, Iran. Chemosphere, 262, p.127835.

Bist, P., and Choudhary, S, (2022); Impact of heavy metal toxicity on the gut microbiota and its relationship with metabolites and future probiotics strategy: a review. Biological Trace Element Research, 200(12), pp.5328-5350.

Chabukdhara, M. and Nema, A.K. (2013). Heavy metals assessment in urban soil around industrial clusters in Ghaziabad, India: probabilistic health risk approach. Ecotoxicology and environmental safety, 87, pp.57-64.

Cirelli, P., Bilo, F., Tsuji, K., Matsuyama, T., Siviero, G., Pisani, L., Zacco, A., Depero, L.E., Eichert, D., Borgese, L. (2022). Assessment of calibration methods for Pb-loaded aerosol filters analyzed with X-ray fluorescence under grazing incidence. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, 192, p.106414.

Dehghani, S., Moore, F., Keshavarzi, B. and Beverley, A.H. (2017). Health risk implications of potentially toxic metals in street dust and surface soil of Tehran, Iran. Ecotoxicology and environmental safety, 136, pp.92-103.

Fei, X., Lou, Z., Xiao, R., Lv, X. and Christakos, G. (2023). Contamination and health risk assessment of heavy metal pollution in soils developed from different soil parent materials. Exposure and Health, 15(2): 395-408

Hakanson, L. (1980). An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach. Water Research, 14(8), pp.975-1001.

Han, Q., Wang, M., Xu, X., Li, M., Liu, Y., Zhang, C., Li, S. and Wang, M. (2023). Health risk assessment of heavy metals in road dust from the fourth-tier industrial city in central China based on Monte Carlo simulation and bioaccessibility. Ecotoxicology and Environmental Safety, 252, p.114627.

Heydari Nasab, M., Karam, A., Negaresh, H. and Pahlavanravi, A. (2019). Morphometric Analysis of Sand Dunes and the Speed of Their Displacement in Sistan Plain. The Journal of Geographical Research on Desert Areas, 7(1), pp.149-164.

Javid, A., Nasiri, A., Mahdizadeh, H., Momtaz, S.M., Azizian, M. and Javid, N. (2021). Determination and risk assessment of heavy metals in air dust fall particles. Environmental Health Engineering And Management Journal, 8(4), pp.319-327.

Kabatas, B., Pierce, R.B., Unal, A., Rogal, M.J. and Lenzen, A. (2018). April 2008 Saharan dust event: Its contribution to PM10 concentrations over the Anatolian Peninsula and relation with synoptic conditions. Science of the Total Environment, 633, pp.317-328.

Leung, A.O., Duzgoren-Aydin, N.S., Cheung, K.C., Wong, M.H. (2008); Heavy metals concentrations of surface dust from e-waste recycling and its human health implications in southeast China. Environmental science & technology, 42(7), pp.2674-2680.

Liu, X.X., Hu, X., Cao, Y., Pang, W.J., Huang, J.Y., Guo, P., Huang, L. (2019). Biodegradation of phenanthrene and heavy metal removal by acid-tolerant Burkholderia fungorum FM-2. Frontiers in microbiology, 10, p.408.

Luo, H., Wang, Q., Guan, Q., Ma, Y., Ni, F., Yang, E. and Zhang, J. (2022). Heavy metal pollution levels, source apportionment and risk assessment in dust storms in key cities in Northwest China. Journal of Hazardous Materials, 422, p.126878.

Madadi, R., Mohamadi, S., Rastegari, M., Karbassi, A., Rakib, M.R.J., Khandaker, M.U., Faruque, M.R.I. and Idris, A.M. (2022). Health risk assessment and source apportionment of potentially toxic metal (loid) s in windowsill dust of a rapidly growing urban settlement, Iran. Scientific reports, 12(1), p.19736.
Madiha, Z., Rashid, A., Ayesha, A., Yasir, Sh., Liaqat, A., Mahpara, F., Khalid, A. and Shuangfei, L. (2022). Health and environmental effects of heavy metals. Journal of King Saud University-Science, 34(1), p.101653.
Manasreh, W., Hailat, I. and El-Hasan, T.M. (2010). Heavy metal and anionic contamination in the water and sediments in Al-Mujib reservoir, central Jordan. Environmental Earth Sciences, 60, pp.613-621.
Miao, F., Zhang, Y., Li, Y., Fang, Q. & Zhou, Y. (2022). Implementation of an integrated health risk assessment coupled with spatial interpolation and source contribution: A case study of soil heavy metals from an abandoned industrial area in Suzhou, China. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, pp.1-15.
Mirakzehi, K., Pahlavan-Rad, M.R., Shahriari, A. and Bameri, A. (2018). Digital soil mapping of deltaic soils: A case of study from Hirmand (Helmand) river delta. Geoderma, 313, pp.233-240.
Miri, A., Maleki, S. and Middleton, N. (2021). An investigation into climatic and terrestrial drivers of dust storms in the Sistan region of Iran in the early twenty-first century. Science of the Total Environment, 757, p.143952.
Miri, A., Shirmohammadi, E. and Sorooshian, A. (2023). Impacts of dust storms on indoor and outdoor bioaerosol concentration in the Sistan region of Iran. Journal of Building Engineering, 76. p.107302.
Najmeddin, A., Moore, F., Keshavarzi, B. and Sadegh, Z. (2018). Pollution, source apportionment, and health risk of potentially toxic elements (PTEs) and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in urban street dust of Mashhad, the second largest city of Iran. Journal of Geochemical Exploration, 190. pp.154-169
Panqing, Y., Abliz, A., Xiaoli, S., Aisaiduli, H. (2023); Human health-risk assessment of heavy metal–contaminated soil based on Monte Carlo simulation. Scientific Reports, 13(1), p.7033.
Patel, D.K. and Jain, M.K. (2022). Health risk assessment of trace elements in the ambient air along the roadside in Dhanbad, India. International Journal of Environmental Science and Technology, 19(5), pp.4107-4122.
Qing X, Yutong Z, Shenggao L. (2015). Assessment of heavy metal pollution and human health risk in urban soils of steel industrial city (Anshan), Liaoning, Northeast China. Ecotoxicology and Environmental Safety. 120:377-85.
Rahmat, M.A., Ismail, A.F., Rodzi, N.D., Aziman, E.S., Idris, W.M.R., Lihan, T. (2022); Assessment of natural radionuclides and heavy metals contamination to the environment: Case study of Malaysian unregulated tin-tailing processing industry. Nuclear Engineering and Technology, 54(6), pp.2230-2243.
Rashki, A., Kaskaoutis, D.G. and Sepehr, A. (2018). Statistical evaluation of the dust events at selected stations in Southwest Asia: From the Caspian Sea to the Arabian Sea. Catena, 165, pp.590-603.
Ravankhah, N., Mirzaei, R., Masoum, S. (2016). Human health risk assessment of heavy metals in surface soil. Journal of Mazandaran University of Medical Sciences. 26(136): 109-120.
Rehman, A., Liu, G., Yousaf, B., Zia-ur-Rehman, M., Ali, M.U., Rashid, M.S., Farooq, M.R. and Javed, Z. (2020). Characterizing pollution indices and children health risk assessment of potentially toxic metal (oid) s in school dust of Lahore, Pakistan. Ecotoxicology and Environmental Safety, 190, p.110059.
Safiur Rahman, M., Prashant Kumar, Mohammad Ullah, Yeasmin N. Jolly, Shirin Akhter, Jamiul Kabir, Bilkis A. Begum, Abdus Salam. (2021). Elemental analysis in surface soil and dust of roadside academic institutions in Dhaka city, Bangladesh and their impact on human health. Environmental Chemistry and Ecotoxicology 3 - 197–208.
Shahsavani, A., Tobías, A., Querol, X., Stafoggia, M., Abdolshahnejad, M., Mayvaneh, F., Guo, Y., Hadei, M., Hashemi, S.S., Khosravi, A. and Namvar, Z. (2020). Short-term effects of particulate matter during desert and non-desert dust days on mortality in Iran. Environment International, 134, p.105299.
Shan, W., Yin, Y., Lu, H. and Liang, S. (2009). A meteorological analysis of ozone episodes using the HYSPLIT model and surface data. Atmospheric Research, 4(93), pp.767-776.
Wang, X., Qin, Y., Qin, J., Yang, Y., Qi, T., Chen, R., Tan, J. and Xiao, K. (2021). The interaction laws of atmospheric heavy metal ions and water-soluble organic compounds in PM2. 5 based on the excitation-emission matrix fluorescence spectroscopy. Journal of Hazardous Materials, 402, p.123497.
Wei, X., Gao, B., Wang, P., Zhou, H., Lu, J, (2015); Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals in street dust from different functional areas in Beijing, China. Ecotoxicology and environmental safety, 112,.186-192.
Yarmoradi, Z., Nasiri, B., Mohammadi, G.H. and Karampour, M. (2020). Long-term characteristics of the observed dusty days and its relationship with climatic parameters in East Iran. Arabian Journal of Geosciences, 13(6), p.242.
Zhang, W., Chang, W.J., Zhu, Z.C. and Hui, Z. (2020). Landscape ecological risk assessment of Chinese coastal cities based on land use change. Applied Geography, 117, p.102174.
Zong, Y., Xiao, Q., Malik, Z., Lu, S. (2023). Exploring Environment Pollution and Risk Assessment of Heavy Metals in Road Dusts from a Typical Steel-Industrial City (Anshan), Northeastern China. Water, Air, & Soil Pollution. 234(1): p.34.

Journal of Natural Environment Hazards
Print ISSN: 2676 - 4377 Online ISSN: 2676 - 4385
Homepage: https://jneh.usb.ac.ir

Journal of Natural Environmental Hazards, Vol 15, Iss 47, March 2026

Habitat Risk Assessment of the Persian Leopard in Golestan National Park Using InVEST Model

Sedighe Abdollahi[1], Maryam Morovati[2*]

1. *Postdoctoral fellow, department of Environment, Faculty of Natural Resources, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran*

2. Corresponding Author, *Associate Professor, Department of Environmental Sciences & Engineering, Faculty of Agriculture & Natural Resources, Ardakan University, P.O. Box 184, Ardakan, Iran &*
Water, Energy and Environment Research Institute, Ardakan University, P.O.Box184, Ardakan, Iran
Email: *Mymorovati@ardakan.ac.ir* ***ORCID:*** *https://orcid.org/0000-0002-2225-0823*

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received: 23 December 2024
Revised: 19 April 2025
Accepted: 29 April 2025
Published: 21 March 2026

Keywords:
Habitat Risk Assessment, Golestan National Park, Persian Leopard, Human Threats, InVEST Model.

ABSTRACT

The Persian Leopard (Panthera pardus saxicolor) is a key carnivore species in Iran's ecosystems, playing a crucial role in maintaining ecological balance. This species faces numerous threats, including habitat destruction, poaching, declining natural prey populations, and pressure from human development. Golestan National Park, one of the leopard's key habitats, has recently been affected by human activities such as the expansion of agricultural lands, increased livestock grazing, road construction, and the growth of nearby villages. This study aims to identify and analyze sensitive habitat areas for the Persian leopard in Golestan National Park and to examine the impact of human factors on its habitat using the InVEST (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs) model. In this research, four major human-induced threats were identified: agricultural lands, proximity to villages, livestock grazing, and roads. The results indicated that roads and access routes have the most significant negative impact on leopard habitats, with a cumulative risk percentage of 15.8% and a high consequence score (2.26). These factors are considered a major cause of habitat fragmentation, breaking up continuous habitats into isolated patches and limiting the safe movement of leopards. Furthermore, excessive livestock grazing, with a risk percentage of 12.56%, leads to vegetation degradation and reduces the food sources for the leopard's natural prey, such as wild goats and sheep. Agricultural lands, through the destruction of natural habitats and increasing human-wildlife interaction, have serious consequences for the habitat. Meanwhile, village proximity, with a 6.41% risk, escalates human-wildlife conflicts and increases the likelihood of leopards being killed by local communities in defence of their livestock. The results of this study not only emphasize the importance of preserving natural habitats but also provide a solid foundation for developing effective management strategies and planning for the conservation of endangered species.

How to Cite: Abdollahi, S. and Morovati, M. (2026). Habitat Risk Assessment of the Persian Leopard in Golestan National Park Using InVEST Model. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 15(47), 23-44.

© The Ahutor/Ahutors

DOI: 10.22111/jneh.2025.50586.2090

Publisher: University of Sistan and Baluchestan

EXTENDED ABSTRACT

INTRODUCTION

Natural habitats, as the foundation of biodiversity, are threatened by human activities and climate change. The Persian leopard (Panthera pardus saxicolor), as one of Iran's iconic carnivore species, plays an indispensable role in maintaining the stability of natural ecosystems. This species, which is listed as endangered by the International Union for Conservation of Nature (IUCN), faces various threats including habitat destruction, illegal hunting, depletion of natural prey, and the expansion of human activities. Golestan National Park, due to its unique ecological features and high biodiversity, is recognized as one of the key habitats for the Persian leopard. This region, with its diverse vegetation and extensive biodiversity, is home to various plant and animal species. However, human pressures such as agricultural development, road construction, and overgrazing by livestock have significantly affected the quality of habitats in this area. In this context, habitat risk assessment serves as an effective tool for evaluating the consequences of these interventions and other habitat degradation factors. Therefore, in this study, habitat risks for the Persian leopard in Golestan National Park were assessed using the InVEST risk assessment model, and the threat factors were identified.

DATA AND METHODS

To assess the habitat risk for the Persian leopard, spatial data related to land use, water resources distribution, road networks, and village locations were collected. Data on leopard presence, including 120 recorded points of tracks and scat, along with vegetation and slope maps, were entered into the analysis. The suitability map of the leopard's habitat was prepared using ecological factor analysis. The InVEST model was then used as a tool for evaluating the cumulative effects of human threats. This model employs two main indices—"exposure" and "consequence"—to assess habitat risk. Using this model, the cumulative effects of four major threat factors on the leopard's habitat—agricultural lands, proximity to villages, roads, and livestock grazing—were evaluated.

RESULTS AND DISCUSSION

Data analysis revealed that roads and access routes, with a cumulative risk of 15.8%, have the most negative consequences on the leopard’s habitat and are the primary cause of habitat fragmentation. Roads passing through the park fragment habitats and limit the safe movement of the leopard. Excessive livestock grazing, with a cumulative risk of 12.56%, severely degrades vegetation, reduces prey resources, and increases competition between domestic livestock and natural prey species such as wild goats and sheep, significantly reducing habitat quality. Agricultural lands, with a cumulative risk of 9.23%, were identified as a serious threat due to habitat destruction and increased human-wildlife interaction. The proximity of villages to the leopard’s habitat also increases human-wildlife conflicts and raises the likelihood of poaching by local communities to protect livestock.

The study showed that the central areas of Golestan National Park, which have rich vegetation, adequate water resources, and limited human access, represent the best habitats for the Persian leopard. These findings align with similar studies in Iran and other parts of the world. For example, studies conducted in the Caucasus and Central Asia have shown that leopards prefer habitats with dense vegetation and limited human access. In this study, excessive livestock grazing was identified as the biggest threat, which, in addition to degrading vegetation, reduces prey resources and disrupts the food chain. The consequence of roads on the leopard’s habitat was also significant. Roads not only increase traffic accidents but also divide habitats into separate patches, limiting safe movement for the leopard. Human interactions through agriculture and the proximity of villages also significantly affect the habitat, as they increase human-wildlife conflicts and exacerbate the risk of illegal hunting.

CONCLUSION

To protect the Persian leopard's habitat in Golestan National Park, effective management measures are essential. Grazing management should include limiting the number of livestock in sensitive areas, designating areas with minimal consequence for grazing, and establishing cooperative programs with local communities to control grazing and provide economic incentives. Moreover, controlling agricultural development by limiting the expansion of agricultural lands around the park and promoting sustainable agriculture could reduce the negative effects on habitats. The construction of wildlife corridors along road routes and limiting vehicle traffic during specific hours are other proposed solutions. Increasing public awareness and educating local communities about the importance of leopard and habitat conservation is also crucial. Finally, continued research using advanced technologies such as satellite data and camera traps is recommended to improve the accuracy of analyses and identify long-term changes in habitat threats.

REFERENCES

References (in Persian)

Abdollahi, S. (2024). Habitat quality assessment of wildlife to identify key habitat patches using landscape ecology approach, Journal of Natural Environment, 76(Special Issue Protected Areas), 147- 162. [In Persian].

Abdollahi, S., Salman Mahini, A. (2016). Survey the Effect of Scale on Leopard (Panthra Pardus Saxicolor) Habitat Modeling in Golestan National Park, Environmental Researches. 6(11): 173-180. [In Persian].

Abdollahi, S., Salman Mahini, A. (2019). Survey different scales for Identification of the habitats' parameters case study: Leopard of Golestan National Park, Environmental Researches. 9(18): 181-188. [In Persian].

Kamyab, H., Bagheri, A., Shahbazi, A. (2020). Applying Electrical Circuit Theory to Optimizing Habitat Corridors for Panthera Pardus Saxicolor sp. in Golestan National Park. Environmental Researches, 10(20), 209-218. [In Persian].

References (in English)

Abdollahi, S., Khalilzadeh, P., Zeilabi, E., Lesbarrères, D. (2024). Spatial assessment of biodiversity and conservation priorities in Hamedan Province, Iran, using a landscape ecology approach, Journal of Environmental Studies and Sciences, 14(1), 358–371.

Abdollahi, S., Zeilabi, E., Xu, C.C.Y. (2023). Habitat quality assessment based on local expert knowledge and landscape patterns for bird of prey species in Hamadan, Iran, Modeling Earth Systems and Environment, 10(2), 2051-2061.

Nematollahi, S., Fakheran, S., Kienast, F., Jafari, A. (2020). Application of InVEST habitat quality module in spatially vulnerability assessment of natural habitats (Case Study: Chaharmahal and Bakhtiari Province, Iran). Environmental Monitoring and Assessment, 192(8), 1–17.

Rezazadeh, S., Jahani, A., Makhdoum, M., Meigooni, H. G. (2017). Evaluation of the strategic factors of the management of protected areas using SWOT analysis—Case study: Bashgol Protected Area-Qazvin Province. Open Journal of Ecology, 7(01), 55-68.

Sharp, R., Tallis, H.T., Ricketts, T., Guerry, A.D., Wood, S.A., ChaplinKramer, R., Nelson, E., Ennaanay, D., Wolny, S., Olwero, N., Vigerstol, K., Pennington, D., Mendoza, G., Aukema, J., Foster, J., Forrest, J., Cameron, D., Arkema, K., Lonsdorf, E., Kennedy, C., Verutes, G., Kim, CK., Guannel, G., Papenfus, M., Toft, J., Marsik, M., Bernhardt, J., Grifn, R., Glowinski, K., Chaumont, N., Perelman, A., Lacayo, M., Mandle, L., Hamel, P., Vogl, AL., Rogers, L., Bierbower, W., Denu, D., Douglass, J. (2020). InVEST 3.7.0 user's guide. The Natural Capital Project. Stanford University, University of Minnesota, The Nature Conservancy, and World Wildlife Fund. https:// invest-userguide.readthedocs.io/en/3.5.0/.

مخاطرات محیط طبیعی
شاپا چاپی: ۴۳۷۷-۲۶۷۶ شاپا الکترونیکی: ۴۳۸۵-۲۶۷۶
Homepage: https://jneh.usb.ac.ir

مجله علمی پژوهشی مخاطرات محیط طبیعی، دوره ۱۵، شماره ۴۷، شماره پیاپی ۱، فروردین ۱۴۰۵

ارزیابی ریسک زیستگاهی پلنگ ایرانی در پارک ملی گلستان با استفاده از مدل InVEST

صدیقه عبداللهی[۱]، مریم مروتی[۲*]

۱. پژوهشگر پسا دکتری، گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

۲. دانشیار گروه علوم و مهندسی محیط زیست، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه اردکان، اردکان، ایران و عضو پژوهشکده آب، انرژی و محیط زیست، دانشگاه اردکان، اردکان، ایران (**نویسنده مسئول**)

ایمیل: Mymorovati@ardakan.ac.ir / **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-2225-0823

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۰۳
تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۱/۳۰
تاریخ پذیرش : ۱۴۰۴/۰۲/۰۹
تاریخ انتشار : ۱۴۰۵/۰۱/۰۱

واژه‌های کلیدی:
ارزیابی ریسک زیستگاهی، پارک ملی گلستان، پلنگ ایرانی، تهدیدات انسانی، مدل InVEST.

چکیده

پلنگ ایرانی (Panthera pardus saxicolor) به‌عنوان یکی از گونه‌های کلیدی گوشتخوار در اکوسیستم‌های ایران، نقش مهمی در حفظ تعادل اکوسیستم‌ها ایفا می‌کند. این گونه با تهدیدات متعددی ازجمله تخریب زیستگاه، شکار غیرمجاز، کاهش طعمه‌های طبیعی و فشار ناشی از توسعه انسانی مواجه است. پارک ملی گلستان، به‌عنوان یکی از زیستگاه‌های کلیدی پلنگ، در سال‌های اخیر تحت تأثیر عوامل انسانی مانند گسترش زمین‌های کشاورزی، افزایش دامداری، عبور جاده‌ها و گسترش روستاها قرار گرفته است. این پژوهش با هدف شناسایی و تحلیل مناطق حساس زیستگاهی پلنگ ایرانی در پارک ملی گلستان و بررسی تأثیر عوامل انسانی بر زیستگاه این گونه، از مدل اینوست (InVEST) بهره گرفته است. در این مطالعه، چهار تهدید انسانی کلیدی از قبیل زمین‌های کشاورزی، نزدیکی روستاها، چرای دام و جاده‌ها شناسایی شد. نتایج نشان داد که جاده‌ها و مسیرهای دسترسی با درصد ریسک تجمعی ۱۵/۸ درصد و پیامد بالا (۲/۲۶)، بیشترین اثر منفی را بر زیستگاه دارند و به‌عنوان یکی از عوامل اصلی گسست زیستگاهی شناخته می‌شوند. این گسست، زیستگاه‌های پیوسته را به قطعات جداگانه تبدیل کرده و جابه‌جایی ایمن پلنگ را محدود می‌کند. همچنین، چرای بیش‌ازحد دام با ۱۲/۵۶ درصد ریسک منجر به تخریب پوشش گیاهی و کاهش منابع غذایی طعمه‌های طبیعی پلنگ، نظیر کل و بز می‌شود. زمین‌های کشاورزی با تخریب زیستگاه طبیعی و افزایش تعامل انسان و حیات وحش، پیامدهای جدی بر زیستگاه دارند. درحالی که نزدیکی روستاها با ۶/۴۱ درصدریسک، تعارضات انسان و حیات وحش را افزایش داده و خطر شکار پلنگ توسط جوامع محلی برای محافظت از دام‌ها را بیشتر می‌کند. نتایج این پژوهش نه تنها بر اهمیت حفظ زیستگاه‌های طبیعی تأکید دارد، بلکه زمینه‌ای مستحکم برای تدوین راهکارهای مدیریتی و برنامه‌ریزی مؤثر در جهت حفاظت از گونه‌های در معرض خطر انقراض فراهم می‌آورد.

استناد: عبداللهی، صدیقه و مروتی، مریم . (۱۴۰۵). ارزیابی ریسک زیستگاهی پلنگ ایرانی در پارک ملی گلستان با استفاده از مدل InVEST. *مخاطرات محیط طبیعی*، ۱۵(۴۷)، ۲۳-۴۴

© نویسنده/ نویسندگان
DOI: 10.22111/jneh.2025.50586.2090
ناشر: دانشگاه سیستان و بلوچستان

مقدمه

مدیریت زیستگاه‌های طبیعی، به‌ویژه زمانی که این زیستگاه‌ها با تهدیدهای روزافزونی همچون تخریب سرزمین، آلودگی‌های محیط‌زیستی، تغییرات اقلیمی، گسترش شهرنشینی، بهره‌برداری بی‌رویه از منابع طبیعی و نیز مخاطرات طبیعی همچون سیلاب، خشکسالی و آتش‌سوزی مواجه‌اند، یکی از چالش‌های اساسی در مسیر حفاظت از محیط‌زیست و تحقق توسعه پایدار به‌شمار می‌آید (Abdollahi et al., 2024). زیستگاه‌ها به‌عنوان زیربنای بسیاری از خدمات اکوسیستمی، نقش کلیدی در حفظ تنوع زیستی، تنظیم اقلیم و تأمین منابع طبیعی دارند (عبداللهی، ۱۴۰۲). بااین‌حال، افزایش فعالیت‌های انسانی نظیر توسعه شهری، کشاورزی و استخراج منابع همراه با تغییرات اقلیمی، تهدیدهای جدی برای زیستگاه‌های طبیعی به‌وجود آورده است (مهرخو و همکاران، ۱۴۰۲).

در این راستا، ارزیابی ریسک زیستگاه گونه‌های جانوری، به‌ویژه گونه‌های در معرض خطر مانند پلنگ ایرانی، یکی از گام‌های اساسی در مدیریت پایدار مناطق حفاظت‌شده است. پلنگ ایرانی[1] به‌عنوان یکی از بزرگ‌ترین و شاخص‌ترین گوشتخواران در ایران، نقش مهمی در تنظیم ساختار و پویایی زیست‌بوم دارد. این گونه ارزشمند در فهرست سرخ[2] اتحادیه بین‌المللی حفاظت از طبیعت[3] به‌عنوان گونه‌ای آسیب‌پذیر معرفی شده و در خطر انقراض قرار دارد (عبداللهی و سلمان ماهینی، ۱۳۹۴). عواملی مانند تخریب زیستگاه، شکار غیرمجاز، کاهش طعمه‌های طبیعی و گسترش فعالیت‌های انسانی، تهدیدی جدی برای بقای این گونه به‌شمار می‌آید. ازاین‌رو، شناسایی مناطق حساس و تحلیل ریسک‌های زیستگاهی در محدوده‌های حفاظت‌شده، نظیر پارک ملی گلستان، امری ضروری است (حسینی و همکاران، ۱۴۰۲).

پارک ملی گلستان، قدیمی‌ترین پارک ملی در ایران، به‌دلیل تنوع زیستی بالا و شرایط اکولوژیکی منحصربه‌فرد، یکی از زیستگاه‌های کلیدی برای پلنگ ایرانی به‌شمار می‌رود. این منطقه با پوشش گیاهی متنوع و تنوع زیستی گسترده، زیستگاه گونه‌های مختلف جانوری و گیاهی است. اما فشارهای انسانی ازجمله بهره‌برداری غیرمجاز منابع طبیعی، توسعه زیرساخت‌هاو تغییر کاربری اراضی اعث تخریب زیستگاه‌ها و افزایش رقابت برای منابع شده است. به همین دلیل، شناسایی و ارزیابی عوامل تنش‌زا برای زیستگاه پلنگ در این پارک ملی می‌تواند به تدوین راهکارهای مدیریتی مؤثر و پایدار کمک کند (کامیاب و همکاران، ۱۳۹۸).

روش‌های مختلفی برای ارزیابی ریسک زیستگاه‌ها وجود دارد که هر یک نقاط قوت و محدودیت‌های خاص خود را دارند. یکی از ابزارهای پیشرفته در این زمینه، مدل ارزش‌گذاری یکپارچه خدمات اکوسیستمی و تضادهای آنها[4] است. این مدل، یک رویکرد کمی برای ارزیابی اثرات تجمعی عوامل استرس‌زای مرتبط با فعالیت‌های انسانی بر روی زیستگاه‌ها و گونه‌ها است و از یک رویکرد ثابت برای ارزیابی ریسک استفاده می‌کند. بر این اساس، از دو جنبه ریسک‌های وارد بر زیستگاه و بوم‌سازگان را کمی‌سازی نموده و ارزیابی می‌کند. این دو جنبه عبارت از در معرض قرارگیری و پیامد در معرض قرارگیری در برابر ریسک است. در معرض ریسک قرارگیری، بیانگر درجه‌ای است که یک زیستگاه یا گونه با توجه به اثربخشی شیوه‌های مدیریتی، یک عامل استرس‌زا را تجربه می‌کند (Sharp et al., 2020). در سال‌های اخیر، بسیاری از پژوهش‌ها به بررسی رابطه میان انواع پوشش و کاربری زمین با تنوع زیستی و

[1] Panthera pardus saxicolor
[2] Red List
[3] International Union for Conservation of Nature (IUCN)
[4] Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs (InVEST)

سایر خدمات اکوسیستمی پرداخته‌اند (Li et al., 2021; Nematollahi et al., 2020; Aneseyee et al., 2020). همچنین، رویکردهای متعددی برای شناسایی مکان‌های اولویت‌دار در حفاظت که جنبه‌های مختلف تنوع زیستی را در بر می‌گیرند، توسعه یافته‌اند (Kandziora et al., 2013; Baral et al., 2013). بااین‌حال، تشدید مداخلات انسانی نظیر توسعه زیرساخت‌ها، تغییر کاربری اراضی، و بهره‌برداری بی‌رویه از منابع، موجب کاهش یکپارچگی ساختاری و عملکردی زیستگاه‌هایی شده است که زمینه‌ساز پایداری تنوع زیستی هستند (Rezazadeh et al., 2017). در این میان، ارزیابی ریسک زیستگاه به‌عنوان رویکردی نوین و کارآمد، می‌تواند پیامدهای ناشی از این تهدیدات را بر سلامت و کارکرد زیستگاه‌ها بررسی کرده و مناطق حساس از نظر زیستی را شناسایی کند. مطالعه‌ای با هدف بهبود دقت و جامعیت در ارزیابی ریسک زیستگاه‌ها، به بررسی نقش خدمات اکوسیستمی به‌عنوان شاخصی برای تاب‌آوری با استفاده از مدل ارزیابی ریسک InVEST پیشنهاد می‌کند که کاربرد مدل‌های ارزیابی ریسک همراه با شاخص‌های خدمات اکوسیستمی می‌تواند ابزار مؤثری در برنامه‌ریزی‌های حفاظتی، اولویت‌بندی اقدامات مدیریتی و سیاست‌گذاری در حوزه محیط‌زیست باشد (Caro et al., 2020). همچنین، مطالعه‌ی دیگری برای ارزیابی ریسک آلودگی آب زیستگاه‌های ساحلی تأیید می‌کند که مدل ارزیابی ریسک InVEST در ترکیب با نظرات کارشناسان، رویکردی شفاف و قابل تکرار برای ساخت دانش مبتنی بر خدمات اکوسیستمی درباره خطرات زیستگاه‌ها در سیستم‌های اجتماعی- اکولوژیکی ساحلی و مصبی است که تحت فشار شدید خطرات آلودگی آب با ریسک بالا قرار دارند (Bastos et al., 2023). در ایران، با وجود اهمیت بالای موضوع، مطالعات محدودی در زمینه ارزیابی ریسک زیستگاه‌ها انجام شده است. بیشتر پژوهش‌ها بر پایش جمعیت گونه‌ها یا تغییرات کاربری زمین متمرکز بوده‌اند (دانشی و همکاران، ۱۳۹۹؛ نعمت‌الهی و همکاران، ۱۳۹۸)، در حالی‌که ارزیابی ساختارمند ریسک و تأثیرات تجمعی تهدیدها کمتر مورد توجه قرار گرفته است. این خلأ، لزوم انجام مطالعات جامع‌تر و هدفمندتر در این زمینه را نشان می‌دهد. بر این اساس، هدف اصلی این مطالعه، ارزیابی کمی و مکانی ریسک زیستگاه پلنگ ایرانی در پارک ملی گلستان با استفاده از مدل ارزیابی ریسک InVEST است که ابزاری کارآمد برای تحلیل پیامدهای ناشی از تهدیدات انسانی بر سلامت بوم‌سازگان‌ها به‌شمار می‌رود. این مدل با بهره‌گیری از یک رویکرد کمی، امکان ارزیابی اثرات تجمعی عوامل تنش‌زای مرتبط با فعالیت‌های انسانی بر زیستگاه‌ها و گونه‌های زیستی را فراهم می‌سازد.

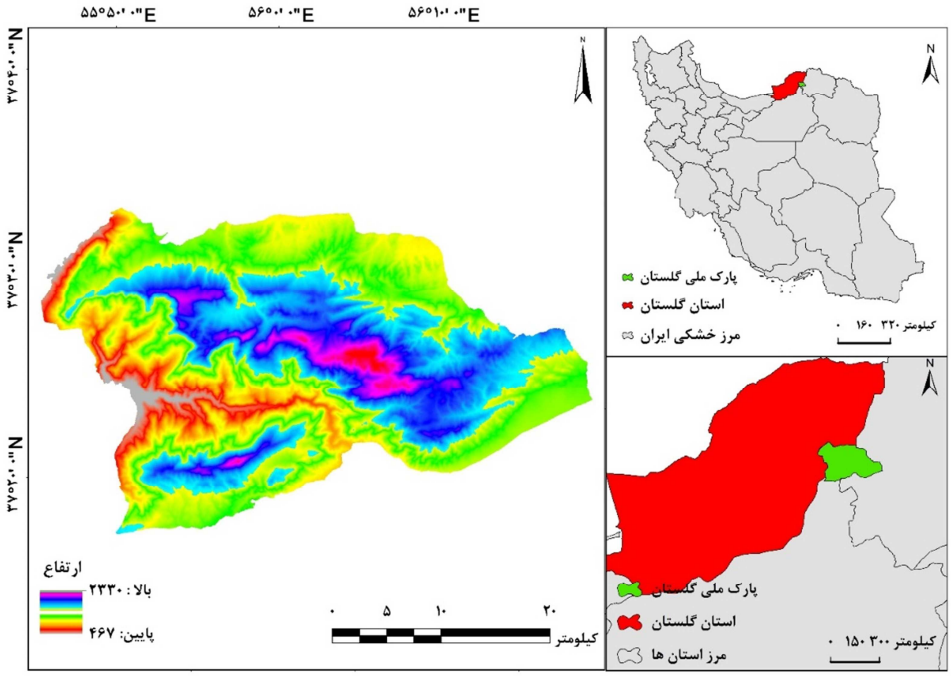
داده‌ها و روش‌ها

محدوده مورد مطالعه

پارک ملی گلستان منطقه‌ای کوهستانی به وسعت ۳۱،۸۳۵ هکتار است که در شمال شرقی ایران، در مرز میان استان‌های خراسان، گلستان و سمنان واقع شده است (شکل ۱). این پارک شامل محدوده جغرافیایی بین عرض‌های شمالی ۳۷ درجه و ۱۰ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۴۱ دقیقه و طول‌های شرقی ۵۵ درجه و ۴ دقیقه تا ۵۵ درجه و ۱۱ دقیقه می باشد. پارک ملی گلستان، به‌عنوان شرقی‌ترین محدوده بیوم هیرکانی در ایران شناخته می‌شود (دانه‌کار و همکاران، ۱۴۰۳).

به‌دلیل تنوع بالای اجتماعات گیاهی در این منطقه، زیستگاه‌های متنوعی برای گونه‌های مختلف حیات وحش شکل گرفته است. تنوع زیستی غنی پارک شامل یک‌سوم از کل گونه‌های پرندگان کشور، ۵۱ درصد از گونه‌های پستانداران و بیش از ۱،۳۵۰ گونه گیاهی است (تیموری، ۱۴۰۲). اهمیت بین‌المللی این منطقه نیز با ثبت آن در سال ۱۳۷۷ در

فهرست ذخیره‌گاه‌های زیست‌کره جهانی تأیید شده است. بااین‌حال، پارک گلستان با چالش‌های محیطی جدی همچون گسترش زمین‌های کشاورزی، مجاورت با روستاها، عبور جاده اصلی از میان آن و چرای بیش‌ازحد دام مواجه است. این چالش‌ها، زیستگاه طبیعی گونه‌های کلیدی مانند پلنگ را به‌شدت تحت تأثیر قرار داده و تهدیدات قابل‌توجهی را متوجه پایداری اکوسیستم کرده است (عبداللهی و سلمان ماهینی، ۱۳۹۷).



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی پارک ملی گلستان

ارزیابی مطلوبیت زیستگاه پلنگ

در این پژوهش، برای تعیین زیستگاه‌های مناسب برای پلنگ، از روش تحلیل آشیان بوم‌شناختی با استفاده از نرم‌افزار بیومپر[1] بهره گرفته شد. همچنین، نرم‌افزار ترست[2] برای تحلیل حساسیت و تولید لایه‌های اطلاعاتی به منظور انتقال به نرم‌افزار به‌کار رفت. بررسی خصوصیت‌های بوم‌شناختی و رفتارشناسی گونه، یکی از عناصر کلیدی برای گردآوری داده‌های لازم در روش تحلیل آشیان بوم‌شناختی محسوب می‌شود (پلاشی، ۱۳۹۵). مطالعه ویژگی‌های بوم‌شناختی و رفتارشناسی گونه، به‌عنوان ارکان مهم در جمع‌آوری داده‌ها برای تحلیل آشیان بوم‌شناختی به‌شمار می‌رود. در این روش، نقشه‌هایی تحت عنوان عوامل مستقل محیطی به تحلیل وارد می‌شوند. این عوامل، بر اساس خصوصیت‌های گونه هدف و شرایط منطقه انتخاب می‌شوند (دهجی و همکاران، ۱۴۰۱؛ حسین‌نژاد و همکاران، ۱۳۹۸). عوامل محیطی مستقل در این پژوهش، شامل توزیع طعمه‌های اصلی پلنگ همچون کل و بز، قوچ و میش، گراز، نقشه‌های شیب، جهت، مدل رقومی ارتفاعی[3]، جاده‌ها، شاخص تفاضل نرمال‌شده پوشش گیاهی[1] استخراج‌شده از ترکیب

[1] Biomapper
[2] TerrSet
[3] Digital Elevation Model (DEM)

باندهای ۴ و ۵ تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ مربوط به ماه ژوئن ۲۰۲۴ (خردادماه، ۱۴۰۳) و منابع آبی مانند چشمه‌ها، آبشخورها و رودخانه‌ها هستند.

همچنین در این پژوهش، نقشه حضور پلنگ بر اساس ۱۲۰ نقطه حضور ثبت‌شده که با استفاده از شواهدی نظیر ردپا و سرگین شناسایی‌شده بود، به‌عنوان متغیر وابسته در تحلیل استفاده شد.

برای تحلیل عوامل مؤثر بر آشیان بوم‌شناختی در نرم‌افزار بیومپر، وجود متغیرهای مستقل و فاقد همبستگی ضروری است. به‌طور معمول پیشنهاد می‌شود که اگر میزان همبستگی بین دو یا چند متغیر بیش از ۰/۹ باشد، لازم است یکی از آن‌ها از لیست متغیرهای ورودی حذف گردد.

در این پژوهش، ماتریس همبستگی نقشه‌ها با استفاده از تحلیل باکس- کاکس[۲] در نرم‌افزار محاسبه شد. در این پژوهش، مقدار همبستگی کمتر از ۰/۹ به‌دست آمد و بنابراین، تمام متغیرها در تحلیل باقی ماندند.

تحلیل آشیان بوم‌شناختی خروجی‌های متعددی تولید می‌کند، از جمله ماتریس امتیازات که به استخراج معیارهایی مانند حاشیه‌گرایی، تخصص‌گرایی و تحمل گونه در برابر شرایط زیستگاهی کمک می‌کند. عامل حاشیه‌گرایی نشان می‌دهد که آیا گونه مورد نظر زیستگاه‌های خاصی را ترجیح می‌دهد یا در طیف گسترده‌تری از منابع زیستی زندگی می‌کند. این معیار از طریق فرمولی در نرم‌افزار بیومپر محاسبه می‌شود. عدد بزرگ‌تر از صفر و نزدیک به یک، بیانگر زیستگاهی متفاوت و محدودتر برای گونه است (Naqibzadeh et al., 2021).

عامل تخصص‌گرایی نیز نشان‌دهنده دامنه وضعیت‌های زیستی قابل‌تحمل برای گونه است و با انحراف معیار پراکندگی محیطی محاسبه می‌شود. گونه‌های متخصص معمولاً دامنه زیستی باریکی دارند و به زیستن در شرایط محدودتری گرایش دارند. به‌طور معکوس، تحمل‌پذیری نشان‌دهنده توانایی گونه برای زندگی در شرایط زیستگاهی متنوع‌تر است (Oca and Reyes, 2023).

برای تهیه نقشه مطلوبیت زیستگاه، از الگوریتم‌های نرم‌افزار بیومپر استفاده شد. این نقشه‌ها با شاخص پیوسته بویس طبقه‌بندی شدند. در نسخه چهارم نرم‌افزار بیومپر، این شاخص به انتخاب الگوریتم مناسب برای تهیه نقشه مطلوبیت کمک می‌کند؛ به‌طوری‌که شاخص بالاتر بویس و انحراف معیار کمتر، بیانگر الگوریتم بهینه‌تر است.

ارزیابی ریسک زیستگاه[۳]

در این مطالعه، به‌منظور ارزیابی ریسک زیستگاه پلنگ، از مدل ارزیابی ریسک زیستگاه موجود در مجموعه ابزارهای InVEST استفاده شده است. این مدل با بهره‌گیری از دو مؤلفه‌ی اصلی، یعنی مواجهه[۴] و پیامدها[۵] به ارزیابی و پیش‌بینی میزان ریسک ناشی از فعالیت‌های انسانی مختلف بر زیستگاه‌ها و گونه‌های وابسته به آن‌ها می‌پردازد. هر یک از این توابع، بر اساس مجموعه‌ای از معیارهای ازپیش تعریف‌شده امتیازدهی می‌شوند. تابع مواجهه، نشان‌دهنده میزان تماس یا مواجهه یک زیستگاه با منابع تهدیدزا است. برای برآورد این مواجهه، معیارهایی نظیر شدت بهره‌برداری از زیستگاه، نوع استراتژی مدیریتی (نظیر مناطق حفاظت‌شده یا آزاد) و فاصله تا منبع ریسک مورد توجه قرار می‌گیرند. این معیارها در یک مقیاس سه‌تایی، از ۱ (پایین‌ترین میزان تأثیر) تا ۳ (بیشترین میزان تأثیر)،

[1] Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)
[2] Box-Cox
[3] Habitat Risk Assessment
[4] Exposure (E)
[5] Consequence (C)

امتیازدهی می‌شوند. تابع پیامدها به بررسی واکنش زیستگاه یا گونه به مواجهه با عوامل تهدیدزا می‌پردازد. این تابع میزان حساسیت زیستگاه و توانایی آن در تحمل یا جبران آسیب‌ها را می‌سنجد. در این راستا، معیارهای پیامد به دو دسته تقسیم می‌شوند: ۱) میزان انعطاف‌پذیری گونه مورد نظر در برابر تنش‌های محیطی و ۲) توانایی احیاء آن پس از آسیب. هر یک از این معیارها نیز در مقیاسی از ۱ تا ۳ امتیازدهی می‌شوند.

انتخاب و تعیین معیارهای امتیازدهی در مدل با بهره‌گیری از دستورالعمل‌های ارائه‌شده در راهنمای کاربری مدل و بر مبنای منابع علمی معتبر، داده‌های بوم‌شناختی منطقه و نظرات کارشناسان حوزه‌های مرتبط صورت می‌گیرد. این راهنما چارچوبی استاندارد برای انتخاب عوامل تنش‌زا، ویژگی‌های زیستگاه‌ها و نحوه امتیازدهی به معیارهای توابع مواجهه و پیامدها فراهم می‌سازد و به پژوهشگران اجازه می‌دهد ارزیابی خود را بر پایه اصول علمی و قابل‌تکرار انجام دهند. مقیاس امتیازدهی ۱ تا ۳ به‌گونه‌ای طراحی شده است که درجه‌بندی ساده اما معناداری از شدت یا حساسیت هر معیار ارائه دهد. امتیاز ۱ نشان‌دهنده کمترین سطح تأثیر یا حساسیت، امتیاز ۲ سطح متوسط و امتیاز ۳ بیشترین سطح تأثیر یا حساسیت را بازتاب می‌دهد. این طبقه‌بندی امکان مقایسه‌ی نسبی میان عوامل مختلف و ارزیابی مکانی ریسک در سطح سیمای سرزمین را فراهم می‌سازد.

ترکیب امتیازات حاصل از این دو تابع، سطح نهایی ریسک را برای هر بخش از زیستگاه مشخص می‌سازد. این اطلاعات می‌تواند به‌عنوان ابزاری تصمیم‌یار، برای اولویت‌بندی اقدامات حفاظتی و مدیریتی در مناطق مختلف مورد استفاده قرار گیرد (Pascal et al., 2016; Tolessa et al., 2017). در جدول ۱ لیست معیارهای مورد استفاده در این مدل آورده شده است.

جدول ۱: معیارهای مورد استفاده در مدل ارزیابی ریسک

شاخص	ریسک کم	ریسک متوسط	ریسک زیاد
در معرض قرارگیری ریسک			
همپوشانی مکانی زیستگاه و عامل ریسک (٪)	کمتر از ۱۰٪	بین ۱۰ تا ۳۰٪	بیشتر از ۳۰٪
مدت زمان قرارگیری زیستگاه در معرض ریسک در بازه یکساله	۴ ماه	۴ تا ۸ ماه	۸ تا ۱۲ ماه
شدت عامل تهدیدکننده زیستگاه	کم	متوسط	زیاد
اثرگذاری طرح مدیریت منطقه	تاثیرگذار	تاثیرگذاری متوسط	تاثیرگذاری کم
پیامد			
تغییرات در مساحت (٪)	کمتر از ۲۰٪	بین ۲۰ تا ۵۰٪	۵۰ تا ۱۰۰٪
تغییرات در ساختار زیستگاه	کمتر از ۲۰٪	بین ۲۰ تا ۵۰٪	۵۰ تا ۱۰۰٪
تکرار دفعات اختلالات طبیعی	روزانه و یا هفتگی	چندین بار در سال	به ندرت

مجموع در معرض قرارگیری هرگونه (E) و مجموع پیامدهای حاصل از در معرض قرار گرفتن آن گونه (C) در برابر فعالیت آبزی‌پروری از طریق رابطه های ۱ و ۲ به‌دست می‌آید:

$$E_{jk}=\frac{\sum_{i=1}^{N} e_{ijk}}{N} \quad (۱)$$

$$C_{jk}=\frac{\sum_{i=1}^{N} c_{ijk}}{N} \quad (۲)$$

که در رابطه ۱، Ejk امتیاز در معرض قرارگیری برای زیستگاه j ناشی از عامل تنش‌زای k، eijk مقدار معیار در معرض قرارگیری i برای زیستگاه j و تنش k است و N تعداد معیارهای مواجه در تحلیل را شامل می‌شود.

در رابطه ۲، Cjk امتیاز پیامد برای زیستگاه j ناشی از عامل تنش‌زای k، cijk مقدار معیار پیامد i برای زیستگاه j و تنش k است و N تعداد معیارهای پیامد در تحلیل را شامل می‌شود.

آسیب‌پذیری ریسک متوسط نیز که یک محور از نمودار را تشکیل می‌دهد به همراه مقدار متوسط پیامدها از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$R_{jkl} = \sqrt{(E_{jkl} - 1)^2 + (C_{jkl} - 1)^2} \quad (۳)$$

از این‌رو، مدل در نقطه‌ای که زیستگاه و عامل استرس‌زا هم‌پوشانی دارند، ریسک را محاسبه می‌کند. بدین ترتیب ریسک‌های افزایشی از رابطه زیر حاصل می‌شوند:

$$R_{ijkl} = E_{jkl} C_{jkl} \quad (۴)$$

در گام سوم، مدل ریسک تجمعی ناشی از تمامی عوامل استرس‌زا را برای هر زیستگاه کمی‌سازی می‌کند. ریسک تجمعی برای زیستگاه j در پیکسل i مجموع امتیازات تمامی ریسک‌ها برای هر زیستگاه است:

$$R_{jl} = \sum_{k=1}^{K} R_{jkl} \quad (۵)$$

گام چهارم، شناسایی مناطق حساس زیستگاهی است. این مناطق، نواحی را شامل می‌شود که تاثیر فعالیت‌های انسانی زیاد است و ساختار و عملکرد بوم‌سازگان به‌شدت آسیب دیده است. هر پیکسل برای زیستگاه تحت درجه‌های کم، متوسط و زیاد طبقه‌بندی می‌شود که این امر یا به واسطه‌ی عوامل استرس‌زای منفرد و یا ریسک‌های تجمعی برآورد شده است.

در این پژوهش، چهار عامل استرس‌زای کلیدی که تأثیر مستقیم و غیرمستقیم بر زیستگاه پلنگ دارند، شناسایی و مورد ارزیابی قرار گرفتند. این عوامل بر اساس بررسی منابع علمی، داده‌های مکانی، بازدیدهای میدانی و همچنین مشورت با کارشناسان محیط‌زیست و حیات وحش منطقه انتخاب شدند. مدل InVEST این امکان را فراهم می‌سازد که با تمرکز بر مهم‌ترین تهدیدها، ارزیابی ریسک به‌صورت هدفمند و کارآمد انجام شود. انتخاب این چهار عامل بر مبنای شدت تأثیر، گستره جغرافیایی و تکرار وقوع و میزان همپوشانی مکانی آن‌ها با زیستگاه پلنگ در محدوده مورد مطالعه انجام گرفت. سایر عوامل بالقوه، به‌دلیل نبود داده‌های کافی، تأثیرگذاری کمتر یا هم‌پوشانی با تهدیدهای انتخاب‌شده، در این مرحله از ارزیابی لحاظ نشدند. زمین‌های کشاورزی: توسعه اراضی زراعی در پیرامون محدوده پارک، به‌ویژه در نواحی حاشیه‌ای زیستگاه‌های طبیعی، منجر به کاهش وسعت زیستگاه‌های مناسب برای پلنگ شده است. این گسترش علاوه بر نابودی پوشش گیاهی طبیعی، با افزایش حضور انسان و ادوات کشاورزی در مجاورت مناطق بکر، احتمال تعارض انسان و حیات‌وحش را نیز افزایش می‌دهد. زمین‌های کشاورزی همچنین موجب مرزگذاری و محدودسازی جابه‌جایی گونه‌هایی چون پلنگ در فضای زیستگاه می‌شوند.

روستاهای اطراف پارک: حضور روستاها در حاشیه پارک ملی و افزایش تردد افراد، به‌ویژه دامداران و گردشگران محلی، احتمال بروز تعارض میان انسان و پلنگ را بالا برده است. نزدیکی سکونتگاه‌ها به مناطق حساس، باعث ورود مکرر انسان به زیستگاه شده و با ایجاد مزاحمت یا واکنش‌های دفاعی، امنیت رفتاری گونه را مختل می‌کند. علاوه بر این، وجود دام در این مناطق نیز می‌تواند زمینه‌ساز حملات شکار تلافی‌جویانه به پلنگ شود (ابراهیمی منفرد و همکاران، ۱۴۰۲).

جاده عبوری: عبور یک جاده مهم از درون پارک نه تنها باعث قطعه قطعه شدن زیستگاه و ایجاد موانع در مسیرهای حرکتی گونه‌ها شده، بلکه منجر به بروز تلفات جاده‌ای برای گونه‌های مختلف، از جمله طعمه‌های پلنگ و حتی خود پلنگ شده است. این جاده همچنین موجب افزایش دسترسی انسان به عمق زیستگاه‌ها و در نتیجه افزایش خطر شکار غیرمجاز و مزاحمت انسانی می‌گردد (همامی و همکاران، ۱۳۹۵).

چرای بیش‌ازحد دام: چرای بی‌رویه دام در داخل و پیرامون پارک، منجر به کاهش پوشش گیاهی و در نتیجه کاهش منابع غذایی گونه‌های طعمه‌ی پلنگ شده است.

این اختلال در زنجیره غذایی، به‌صورت غیرمستقیم بقای حیات وحش را تهدید می‌کند. حضور مداوم دام و دامداران در زیستگاه نیز خود عاملی برای کاهش امنیت زیستی گونه‌های حیات وحش و ایجاد فشار مضاعف بر اکوسیستم است (Yang et al., 2021).

برای تحلیل دقیق این عوامل، داده‌های مکانی مربوط به کاربری اراضی، موقعیت روستاها و شبکه جاده‌ای جمع‌آوری شد. همچنین، اطلاعات شدت و گستره هر تنش به همراه نظرات کارشناسان محلی و محیط‌بانان پارک ملی گلستان، به‌عنوان منابع داده تکمیلی مورد استفاده قرار گرفت. این اطلاعات برای تعیین معیارهای در معرض قرارگیری و پیامد در چارچوب مدل ارزیابی ریسک زیستگاه تنظیم شدند.

یافته‌های پژوهش

تجزیه‌وتحلیل عاملی بوم‌شناختی، به‌عنوان هسته مرکزی نرم‌افزار بیومپر شناخته می‌شود. این تحلیل شباهت بسیاری به روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی دارد و به شناسایی عواملی می‌پردازد که بیشترین تأثیر را از متغیرهای مستقل محیطی بر گونه توضیح می‌دهند. ستون نخست نشان‌دهنده ویژگی حاشیه‌ای بودن گونه مورد بررسی است و مشخص می‌کند که وضعیت بهینه آن گونه تا چه حد از میانگین زیستگاه مورد مطالعه فاصله دارد. سایر عوامل به تحمل‌پذیری و ویژگی تخصصی گونه مربوط می‌شوند و به تدریج از حجم اطلاعاتی که ارائه می‌دهند کاسته می‌شود. این عوامل میزان تخصصی بودن گونه را در استفاده از منابع زیستگاه در دسترس نشان می‌دهند (جدول ۲).

جدول ۲: نتایج حاصل از تحلیل عامل آشیان بوم‌شناختی

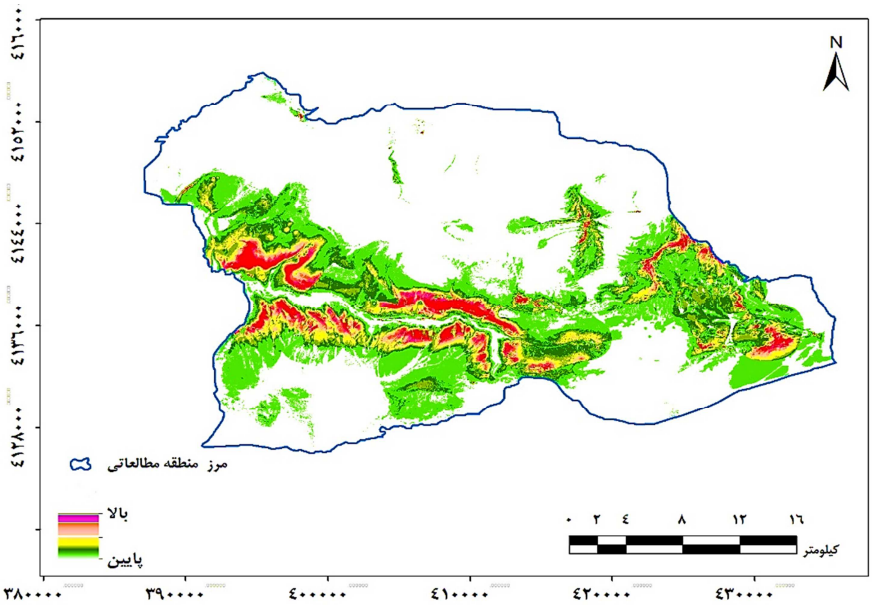
حاشیه‌گرایی کل	تخصص‌پذیری کل	تحمل‌پذیری کل	الگوریتم انتخاب‌شده	شاخص بویس الگوریتم انتخابی
۰/۸۱۶	۱/۷۹	۰/۵۵۹	میانگین هندسی	۰/۴۲۱ ±۰/۴۱۲

یکی دیگر از نتایج این تحلیل، جدول ماتریس امتیازات است که اطلاعات بسیار ارزشمندی را در بر دارد. داده‌های این ماتریس نشان می‌دهد که هر عامل مستقل محیطی در تحلیل تا چه اندازه با سایر عوامل مؤثر بر مطلوبیت زیستگاه همبستگی دارد (جدول ۳). ردیف‌های ماتریس سهم هر متغیر مستقل محیطی در تشکیل عوامل را مشخص می‌کنند. در این پژوهش ارتفاع، منابع آبی، جاده‌ها و شیب به‌عنوان اصلی‌ترین عوامل مؤثر در مطلوبیت زیستگاه پلنگ شناسایی شدند. ارزیابی دقت و صحت مدل با شاخص بویس انجام گرفت. نقشه تناسب زیستگاه (شکل ۲) نشان می‌دهد که بخش‌های مرکزی و کمتر دسترسی‌پذیر پارک دارای تناسب بالاتری برای زیست پلنگ هستند. این

مناطق ویژگی‌هایی مانند پوشش گیاهی غنی، فاصله از تهدیدات انسانی و شرایط مطلوب بوم‌شناختی را دارند. در مقابل، بخش‌هایی که در نزدیکی فعالیت‌های انسانی مانند زمین‌های کشاورزی، جاده‌ها و روستاها قرار دارند، تناسب کمتری برای زیستگاه پلنگ نشان می‌دهند.

جدول ۳: ماتریس امتیازهای متغیرهای محیطی برای زیستگاه پلنگ در پارک ملی گلستان

متغیرهای محیطی	۱ ٪۱۱	۲ ٪۱۹	۳ ٪۱۶	۴ ٪۱۲	۵ ٪۹	۶ ٪۷/۷	۷ ٪۷/۴	۸ ٪۵/۶	۹ ٪۳/۶	۱۰ ٪۲/۷
ارتفاع	-۰/۳۹	۰/۰۶	-۰/۰۶	-۰/۲۴	-۰/۰۳۴	-۰/۳۲	۰/۳۱	-۰/۲۶	-۰/۱۹	۰/۰۴
رودخانه	-۰/۳۶	-۰/۰۱	-۰/۰۴	-۰/۰۱۳	۰/۰۱۴	۰/۱۳۲	-۰/۰۹۷	۰/۰۷۲	۰/۴	۰/۰۲
چشمه	-۰/۳۵	-۰/۰۱۳	۰/۰۳۲	۰/۰۲۴	۰/۰۰۹	-۰/۰۶	۰/۰۱۷	-۰/۰۳۱	۰/۰۷	-۰/۱۸
جاده	-۰/۳۳	-۰/۰۶۵	۰/۲۰۱	-۰/۰۸۵	۰/۲۶۴	۰/۰۶۲	-۰/۵۲۹	۰/۵۴۹	۰/۲۲	۰/۵۷
کل و بز	-۰/۳۳	-۰/۰۰۹	-۰/۱۰۴	۰/۰۵۶	-۰/۵۷۱	-۰/۰۵۸	۰/۰۳۲	-۰/۳۰۷	-۰/۲۳	-۰/۶
گراز	-۰/۳۰	-۰/۰۵۵	۰/۱۱۳	۰/۰۲۹	۰/۱۲۷	۰/۰۲۵	۰/۰۸۲	۰/۱۴۸	-۰/۵۴	۰/۳
کشاورزی	-۰/۲۹	-۰/۰۷۵	۰/۳۰۳	-۰/۵۴۵	-۰/۳۵۹	-۰/۱۵۸	-۰/۱۸۳	۰/۴۴۴	۰/۲۶	-۰/۰۴
مرال	-۰/۲۸	۰/۷۱۵	۰/۴۰۸	۰/۳۴۴	۰/۰۵۳	۰/۴۰۵	-۰/۱۷۱	-۰/۱۴۹	۰/۳۶	-۰/۰۵
آهو	-۰/۲۷	-۰/۶۶	۰/۱۶۲	-۰/۶۰۸	-۰/۲۷۸	۰/۴۵۳	۰/۳۷۲	-۰/۱۶۴	-۰/۱۶	۰/۰۶
شیب	-۰/۱۶	-۰/۰۲۱	۰/۱۱۴	۰/۰۶۲	۰/۰۳۳	-۰/۴۷۱	۰/۰۸۹	-۰/۲۳۴	-۰/۲۳	-۰/۱۸
قوچ و میش	۰/۱۳	-۰/۰۵۳	۰/۷۴۵	-۰/۱	-۰/۱۹	۰/۰۵۷	-۰/۰۴۲	۰/۲۵۶	۰/۲۶	۰/۰۸
جهت	۰/۱۱	-۰/۰۵۷	۰/۲۲۱	۰/۱۹	-۰/۰۴۲	۰/۱	۰/۰۴۹	-۰/۱۱۱	-۰/۱۱	۰/۰۵
تراکم پوشش گیاهی	۰/۰۵	۰/۰۲۸	۰/۰۸۶	۰/۲۰۵	-۰/۱۶۷	-۰/۳۲	-۰/۳۵۴	-۰/۰۶۳	-۰/۰۶۳	۰/۳۷
روستا	-۰/۰۳	۰/۱۱۳	-۰/۱۴۵	۰/۲۳۲	-۰/۵۵۷	۰/۱۸۴	-۰/۰۰۶	۰/۱۰۱	۰/۱۹	-۰/۰۵



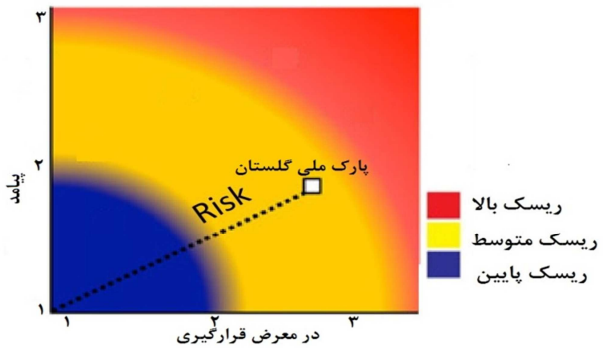
شکل ۲: نقشه تناسب زیستگاه پلنگ در پارک ملی گلستان

شکل ۳، نمودار مقادیر تجمعی ریسک زیستگاه حاصل از مدل InVEST در منطقه را به تصویر می‌کشد و نشان می‌دهد که این منطقه به‌طور کلی و با درنظرگرفتن ریسک تجمعی، در بازه ریسک متوسط قرار دارد. با توجه به این نمودار، در مناطق مختلف پارک، مقادیر ریسک تجمعی متفاوت است. بخش‌هایی که در نزدیکی فعالیت‌های انسانی مانند روستاها، جاده‌ها و زمین‌های کشاورزی قرار دارند، مقادیر بالاتری از ریسک تجمعی را نشان می‌دهند.

جدول ۴ مقادیر ریسک به‌دست‌آمده از مدل InVEST را به تفکیک هر یک از عوامل تهدید انسانی نشان می‌دهد.

جدول ۴: مقادیر ریسک به‌دست‌آمده به تفکیک هر تهدید انسانی در منطقه

زیستگاه	نام تهدید	در معرض قرارگیری	پیامد	ریسک	درصد ریسک
کل محدوده پارک ملی گلستان	زمین‌های کشاورزی	۱/۰۲	۰/۹۸۷	۰/۹۲۴	۹/۲۳
	روستاهای اطراف پارک	۰/۹۶۳	۰/۹۳۱	۰/۸۷۱	۶/۴۱
	چرای بیش‌ازحد دام	۱/۱۵	۱/۵۲	۱/۰۸	۱۲/۵۶
	جاده و مسیر دسترسی	۲/۲۵	۲/۱	۲/۲۶	۱۵/۸



شکل ۳: نمودار مقادیر ریسک تجمعی زیستگاه (پارک ملی گلستان)

زمین‌های کشاورزی از مهم‌ترین تهدیدات برای زیستگاه پلنگ به‌شمار می‌آیند. این تهدید با دارا بودن مقدار پیامد بالا (۰/۹۷۸)، نشان‌دهنده تأثیر مستقیم و قابل‌توجه آن بر کاهش کیفیت زیستگاه است. ازسوی‌دیگر، شاخص مواجهه معادل ۱/۰۲، بیانگر آن است که سطح برهم‌کنش پلنگ با این عامل نسبتاً بالا بوده و بخش‌های وسیعی از زیستگاه در معرض تأثیر زمین‌های کشاورزی قرار دارند. هرچند درصد ریسک عددی برای این تهدید کمتر گزارش شده است، اما ترکیب شدت اثر (پیامد) و فراوانی مواجهه، اهمیت بالای آن را در ارزیابی‌های حفاظتی نشان می‌دهد.

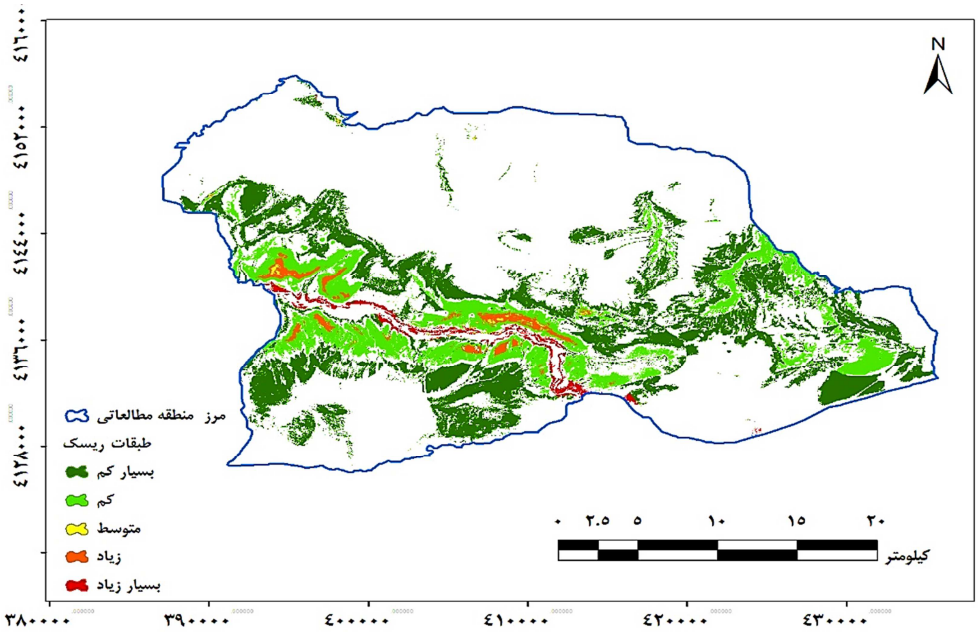
عامل دیگر، نزدیکی زیستگاه به روستاهاست که تهدیدی پیچیده و چندبعدی ایجاد می‌کند. رقابت بر سر منابع طبیعی، شکار تلافی‌جویانه از سوی دامداران و توسعه انسانی منجر به تخریب زیستگاه شده است. اگرچه پیامد این تهدید در مقایسه با سایر عوامل کمتر است و شاخص مواجهه نیز عدد بالایی ندارد، اما درصد ریسک نسبتاً بالا (۶/۴۱ درصد) نشان می‌دهد که اثر این عامل در کاهش کیفیت زیستگاه در مناطق نزدیک به سکونتگاه‌های انسانی چشمگیر است. در واقع، گرچه شدت تأثیر مستقیم پایین‌تر است، اما گسترش جغرافیایی این تهدید در محدوده‌های انسانی، آن را به یک عامل مداوم و پایدار در کاهش زیست‌پذیری تبدیل کرده است.

چرای دام نیز از تهدیدات بسیار مهم محسوب می‌شود که نه تنها موجب نابودی پوشش گیاهی و تغییر در ساختار زیستگاه می‌شود، بلکه رقابت مستقیم با گونه‌هایی چون پلنگ برای منابع غذایی را افزایش می‌دهد. در این زمینه، پیامد بالا (۱/۵۲) تأکید دارد که شدت تأثیر این تهدید بر زیستگاه زیاد است. افزون بر این، شاخص مواجهه معادل ۱/۱۵ نشان می‌دهد که بخش وسیعی از زیستگاه پلنگ تحت تاثیر این عامل است. ترکیب این دو شاخص موجب شده که درصد ریسک کلی چرای دام (۱۲/۵۶ درصد) به‌عنوان یکی از بالاترین مقادیر در بین تهدیدات شناسایی شود. این نتایج گواهی بر آن است که مدیریت چرای دام و کنترل ورود دام‌ها به زیستگاه‌های حساس باید در اولویت اقدامات حفاظتی قرار گیرد.

در میان تمامی تهدیدات، جاده‌ها و مسیرهای دسترسی بیشترین تأثیر منفی را بر زیستگاه پلنگ دارند. پیامد این تهدید بسیار بالا (۲/۲۶) است که نشان‌دهنده شدت بالای تأثیر آن بر کیفیت زیستگاه است. همچنین، شاخص مواجهه برابر با ۲/۲۵ نشان می‌دهد که وجود جاده‌ها در زیستگاه پلنگ دائمی و پایدار است. این دو شاخص در کنار هم منجر به درصد ریسک ۱۵/۸ درصد شده‌اند که بالاترین رقم در بین تهدیدات موجود است. این داده‌ها به‌روشنی نقش تعیین‌کننده جاده‌ها در افت کیفیت زیستگاه و ضرورت بازنگری در توسعه زیرساخت‌ها را نمایان می‌سازد.

در نهایت، نقشه طبقات ریسک تجمعی زیستگاه (شکل ۴) به‌وضوح نشان می‌دهد که مناطق دارای ریسک بالا بیشتر در اطراف جاده‌ها، مسیرهای دسترسی و روستاها قرار گرفته‌اند. این الگو نشان‌دهنده پیوند مستقیم بین شدت تهدید، میزان برهمکنش گونه با تهدید و تأثیر تجمعی آن بر زیستگاه است. چنین تحلیلی، بر پایه شاخص‌های دقیق و مدل‌سازی فضایی، می‌تواند مبنای مناسبی برای طراحی اقدامات حفاظتی هدفمند در پارک ملی گلستان فراهم کند.

بررسی شاخص‌های مختلف تهدیدات زیستگاه پلنگ ازجمله پیامد، مواجهه و درصد ریسک نشان می‌دهد که هر یک از عوامل انسانی بررسی‌شده به‌نحوی در کاهش کیفیت زیستگاه مؤثر هستند، اما شدت، گستردگی و سازوکار اثرگذاری آن‌ها متفاوت است. زمین‌های کشاورزی با اثر مستقیم بر ساختار زیستگاه، جاده‌ها با ایجاد گسست اکولوژیکی، چرای دام با تخریب منابع غذایی و پوشش گیاهی و روستاها با افزایش تعارض انسان و حیات‌وحش، هر یک به شکل متفاوتی پایداری زیستی گونه را تهدید می‌کنند.



شکل ۴: نقشه طبقات ریسک تجمعی زیستگاه در پارک ملی گلستان

بحث

پارک ملی گلستان به‌عنوان یکی از مهم‌ترین زیستگاه‌های پلنگ ایرانی، در معرض تهدیدات گسترده انسانی و تغییرات محیطی قرار دارد. تحلیل‌های صورت‌گرفته در این مطالعه نشان داد که عوامل محیطی همچون ارتفاع، منابع آبی، جاده‌ها و شیب تأثیر چشمگیری بر پراکنش و کیفیت زیستگاه پلنگ دارند. همچنین، تهدیدات انسانی نظیر کشاورزی، چرای دام و ساخت جاده از جمله مهم‌ترین عوامل تخریب و تکه‌تکه شدن زیستگاه شناخته شدند.

برای ارزیابی دقت و کارایی مدل زیستگاه، از شاخص بویس استفاده شد. این شاخص که یکی از معیارهای متداول در اعتبارسنجی مدل‌های اکولوژیکی است، بر اساس مقایسه‌ی توزیع پیش‌بینی‌شده زیستگاه با توزیع واقعی آن در نقاط حضور گونه محاسبه می‌شود. مقدار این شاخص بین ۱- تا ۱+ متغیر است و مقادیر مثبت و نزدیک به ۱ نشان‌دهنده عملکرد مطلوب مدل در تمایز میان مناطق مطلوب و نامطلوب است. در این مطالعه، مقدار شاخص بویس برابر با ۰/۴۱۲ ± ۰/۴۲۱به‌دست آمد که حاکی از دقت مناسب مدل در شناسایی زیستگاه‌های بهینه برای پلنگ است. استفاده از این شاخص به‌ویژه در مدل‌هایی با داده‌های حضور صرف، مناسب است و ارزیابی عینی‌تری از صحت مدل فراهم می‌آورد.

در روند مدل‌سازی، از الگوریتم میانگین هندسی برای ترکیب لایه‌های اطلاعاتی استفاده شد. انتخاب این الگوریتم بر مبنای ویژگی‌های داده‌ها و ساختار هدف مدل‌سازی انجام گرفت. میانگین هندسی نسبت به میانگین حسابی حساسیت بیشتری به مقادیر پایین دارد و این ویژگی باعث می‌شود که در حضور یک متغیر نامطلوب، امتیاز نهایی برای آن مکان به‌درستی کاهش یابد. این ویژگی در مدل‌سازی زیستگاه، که اغلب با شرایط حدی و حساس سر و کار دارد، دقت و واقع‌گرایی نتایج را افزایش می‌دهد. به‌عبارت‌دیگر، اگر یک عامل محیطی در منطقه‌ای شرایط نامطلوب داشته باشد، حتی در صورت مطلوب بودن سایر عوامل، میانگین هندسی به‌درستی آن مکان را نامناسب تشخیص

می‌دهد. این رویکرد، انسجام بوم‌شناختی ارزیابی زیستگاه را تقویت کرده و با نیازهای زیستی دقیق پلنگ سازگار است.

نتایج همچنین نشان داد که مقدار حاشیه‌گرایی کل (۰/۸۱۶) بالاست، به این معنا که زیستگاه‌های مناسب برای پلنگ ایرانی در پارک ملی گلستان، به‌طور متوسط فاصله زیادی از شرایط معمول اکولوژیکی منطقه دارند. این یافته بیانگر آن است که پلنگ برای بقا، نیازمند زیستگاه‌هایی با شرایط خاص و منحصر به‌فرد مانند مناطق با پوشش گیاهی متراکم، دسترسی مناسب به منابع آبی و دوری از مزاحمت‌های انسانی است.

ارتفاع به‌دلیل تأثیر بر پوشش گیاهی و دسترسی به منابع غذایی- یکی از عوامل کلیدی محسوب می‌شود. نقش منابع آبی (رودخانه‌ها و چشمه‌ها) نیز به‌دلیل تأمین آب و جذب طعمه‌های پلنگ، بسیار حائز اهمیت است. از سوی‌دیگر، جاده‌ها و مسیرهای دسترسی به‌عنوان عوامل تخریب زیستگاه و گسستگی زیستگاهی عمل می‌کنند. شیب نیز تأثیر دوگانه دارد؛ زیرا مناطق با شیب بالا معمولاً دسترسی انسان را محدود کرده و زیستگاه امن‌تری برای پلنگ فراهم می‌کنند.

ارتفاع به‌عنوان یکی از مؤلفه‌های کلیدی شناسایی شد؛ زیرا بر پراکنش پوشش گیاهی، نوع اقلیم محلی و منابع غذایی مؤثر است. از سوی‌دیگر، منابع آبی (مانند رودخانه‌ها و چشمه‌ها) نقش اساسی در تأمین آب و جذب طعمه‌های بالقوه برای پلنگ ایفا می‌کنند. جاده‌ها و مسیرهای دسترسی نیز نقش منفی شدیدی در گسستگی زیستگاه داشته و علاوه بر ایجاد مانع فیزیکی، زمینه‌ساز افزایش برخوردهای انسانی و مرگ‌ومیر مستقیم هستند. شیب زمین اثر دوگانه‌ای دارد. مناطق با شیب زیاد معمولاً برای انسان‌ها کمتر قابل دسترس هستند و به همین دلیل، پناهگاه‌های امن‌تری برای پلنگ فراهم می‌کنند. مطالعات متعددی در مناطق مختلف همچون منطقه گیسان استان بوشهر (پورسالم و همکاران، ۱۴۰۰)، منطقه قفقاز (Farhadnia et al., 2015) و آسیای مرکزی (Bai et al., 2018) نشان داده‌اند که پلنگ‌ها نواحی کوهستانی با دسترسی دشوار و پوشش گیاهی انبوه را به‌عنوان زیستگاه‌های مطلوب ترجیح می‌دهند.

یافته‌های این مطالعه هم‌راستا با مطالعات مشابه در سایر بخش‌های پراکنش پلنگ ایرانی بر ضرورت حفاظت فعال از زیستگاه‌های ویژه با شرایط اکولوژیکی خاص تأکید دارد. دقت مدل‌سازی، انتخاب الگوریتم مناسب و تفسیر درست از شاخص‌ها، در کنار شناخت دقیق ویژگی‌های محیطی و تهدیدات انسانی، می‌تواند راهنمای مؤثری برای برنامه‌ریزی و اجرای اقدامات حفاظتی باشد.

نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که عوامل انسانی شامل توسعه زمین‌های کشاورزی، نزدیکی روستاها، چرای دام و عبور جاده‌ها از مهم‌ترین تهدیدات برای زیستگاه پلنگ ایرانی در پارک ملی گلستان هستند. مدل InVEST که برای ارزیابی ریسک زیستگاه استفاده شد، نشان داد که عبور جاده‌ها و مسیرهای دسترسی با درصد ریسک تجمعی ۱۵/۸درصد و شاخص پیامد بالا (۲/۲۶)، بیشترین تاثیر مخرب را دارد و سبب گسست زیستگاه و کاهش امکان جابه‌جایی ایمن پلنگ شده است. چرای بیش‌ازحد دام با درصد ریسک تجمعی (۱۲/۵۶) در رتبه دوم قرار دارد. این موضوع بیشتر به‌دلیل رقابت منابع غذایی و تخریب پوشش گیاهی است که باعث کاهش کیفیت زیستگاه می‌شود. همچنین، زمین‌های کشاورزی با تخریب زیستگاه طبیعی و افزایش تعامل انسان و حیات وحش، پیامدهای جدی بر زیستگاه دارند (پیامد: ۰/۹۸۷). نزدیکی به روستاها ۶/۴۱ درصد نیز تهدیدی قابل‌توجه است که می‌تواند تعارضات انسان و حیات وحش را افزایش دهد. یافته‌ها نشان می‌دهد که بخش‌های مرکزی و دورافتاده پارک که دسترسی انسانی در آن‌ها محدودتر است، بهترین مناطق برای حفظ زیستگاه پلنگ هستند. نقشه‌های تهیه‌شده از طبقات

مختلف ریسک تجمعی به‌وضوح مناطقی را که نیازمند مدیریت ویژه هستند، شناسایی کردند. به‌عنوان مثال، مناطقی که در نزدیکی جاده‌ها و زمین‌های کشاورزی قرار دارند، بالاترین ریسک را نشان می‌دهند.

مطالعات مشابه در ایران و سایر نقاط جهان نیز به نتایج مشابهی دست یافته‌اند که اهمیت عوامل انسانی در کاهش کیفیت زیستگاه را تایید می‌کنند. مطالعه Rezazadeh et al. (2017) تأکید می‌کند که افزایش مداخلات انسانی، یکپارچگی زیستگاه‌ها را کاهش داده و تنوع زیستی را تهدید می‌کند. نتایج ما نیز نشان می‌دهد که گسست زیستگاهی ناشی از عبور جاده‌ها، یکی از بزرگ‌ترین چالش‌ها برای بقای پلنگ ایرانی است. همچنین، مطالعات مشابه بین‌المللی در مناطق حفاظت‌شده آفریقا و آسیا (Li et al., 2020; Piet et al., 2019) نشان داده‌اند که توسعه زمین‌های کشاورزی و چرای دام، از عوامل اصلی تخریب زیستگاه‌های طبیعی هستند. یافته‌های این پژوهش نیز تایید می‌کند که فعالیت‌های کشاورزی در نزدیکی پارک ملی گلستان یکی از عوامل کلیدی تاثیرگذار بر زیستگاه پلنگ است. پژوهش‌های دیگر در ایران (Abdollahi et al., 2023; Nematollahi et al., 2020) نشان داده‌اند که چرای بیش‌ازحد دام نه تنها پوشش گیاهی را تخریب می‌کند، بلکه منابع غذایی طعمه‌های طبیعی پلنگ، نظیر کل و بز را کاهش می‌دهد. این موضوع در نتایج ما نیز به‌طور مشخص دیده می‌شود. مقایسه این نتایج نشان می‌دهد که تهدیدات انسانی بر زیستگاه‌ها نه تنها محدود به پارک ملی گلستان نیست، بلکه یک چالش جهانی است. ازسوی‌دیگر، استفاده از مدل InVEST به‌عنوان ابزاری موثر برای شناسایی و تحلیل ریسک، در مطالعات جهانی نیز تایید شده است.

با وجود نتایج ارزشمند این پژوهش، چند محدودیت اصلی وجود دارد که باید به آن‌ها توجه شود. نخست، اطلاعات مربوط به شدت تهدیدات انسانی و تراکم جمعیت دام‌ها به‌طور کامل و دقیق در دسترس نبوده است. استفاده از داده‌های دقیق‌تر می‌تواند نتایج را بهبود بخشد.

علاوه بر این، یکی از محدودیت‌های اساسی مدل InVEST، فرض استقلال میان عوامل ریسک است؛ در حالی‌که در شرایط واقعی، بسیاری از تهدیدات محیط‌زیستی به‌صورت هم‌افزا و متقابل عمل می‌کنند. نادیده‌گرفتن تعاملات میان تهدیدات مختلف و پیامدهای تجمعی آن‌ها می‌تواند به برآوردهای ناقص یا انحراف در ارزیابی واقعی تأثیرات انسانی بر زیستگاه منجر شود. بنابراین، در مطالعات آتی، بهره‌گیری از رویکردهای مدل‌سازی که قادر به شناسایی و تحلیل اثرات هم‌زمان و ترکیبی تهدیدات باشند، ضروری به‌نظر می‌رسد.

علاوه بر این، نتایج این پژوهش ممکن است به‌طور کامل برای زیستگاه‌های دیگر ایران یا سایر گونه‌های حیات وحش قابل‌تعمیم نباشد؛ زیرا شرایط اکولوژیکی، ترکیب گونه‌ای، شدت و نوع تهدیدات انسانی و ویژگی‌های جغرافیایی و اقلیمی در هر زیستگاه متفاوت است. به‌عنوان‌مثال، گونه‌های مختلف ممکن است واکنش‌های متفاوتی نسبت به یک عامل تهدید مشابه نشان دهند و یا یک تهدید خاص در منطقه‌ای دیگر ممکن است اثر کمتری داشته باشد. ازاین‌رو، الگوهای به‌دست‌آمده در این مطالعه باید با احتیاط و در بستر ویژگی‌های بوم‌شناختی هر منطقه مورد تفسیر قرار گیرند. همچنین، فقدان تحلیل زمانی یکی دیگر از محدودیت‌هاست که مانع از درک پویایی تغییرات زیستگاه و تهدیدات در طول زمان می‌شود و تحلیل‌های آتی را به سمت استفاده از داده‌های طولی و سنجش روندها هدایت می‌کند.

این مطالعه تأثیر تغییرات زمانی، نظیر روند افزایش یا کاهش تهدیدات انسانی در بلندمدت را مورد بررسی قرار نداده است. تحلیل زمانی از اهمیت بالایی برخوردار است؛ زیرا بسیاری از تهدیدات محیط‌زیستی ماهیت پویا دارند و در

گذر زمان دستخوش تغییر می‌شوند. عدم توجه به این پویایی ممکن است منجر به برداشت ایستا از شرایط فعلی زیستگاه شود و توانایی پیش‌بینی تغییرات آتی و طراحی راهبردهای مدیریتی بلندمدت را محدود کند. به‌ویژه در مورد گونه‌هایی مانند پلنگ ایرانی که نسبت به تغییرات محیطی حساس‌اند، شناخت روندهای زمانی در فشارهای انسانی می‌تواند در ارزیابی دقیق‌تر خطرات و تدوین سیاست‌های حفاظتی مؤثر نقش کلیدی ایفا کند.

در نهایت، اگرچه نرم‌افزار بیومپر توانایی نسبتاً خوبی در مدل‌سازی توزیع زیستگاه دارد، اما تنها تا حدی قادر به شبیه‌سازی رفتار گونه‌های پیچیده و دارای دامنه پراکنش گسترده‌ای همچون پلنگ ایرانی است. رفتارهای جستجوی غذا، الگوهای پراکنش فصلی و تعاملات رفتاری درون‌گونه‌ای و میان‌گونه‌ای ازجمله عواملی هستند که در این مدل‌سازی کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند که این موضوع می‌تواند بر دقت نهایی پیش‌بینی‌ها تأثیرگذار باشد.

برای کاهش تهدیدات شناسایی‌شده و بهبود مدیریت زیستگاه پلنگ ایرانی، پیشنهادات زیر ارائه می‌شود:

مدیریت چرا و دام‌ها: این اقدام شامل محدود کردن تعداد دام‌ها در مناطق حساس پارک، تعیین مناطقی خاص برای چرا که کمترین تأثیر را بر زیستگاه‌های حیاتی دارند و توسعه همکاری‌های محلی با جوامع روستایی برای کنترل چرا و ایجاد مشوق‌های اقتصادی برای کاهش دامداری است.

کنترل توسعه کشاورزی: اعمال محدودیت بر گسترش زمین‌های کشاورزی در اطراف پارک و ترویج کشاورزی پایدار که با حفظ منابع طبیعی هماهنگ باشد، از اقدامات کلیدی است.

کاهش تأثیرات جاده‌ها: این کار می‌تواند از طریق احداث گذرگاه‌های حیات وحش در نقاط حیاتی، محدود کردن تردد وسایل نقلیه در ساعات خاص و ایجاد سیستم‌های نظارت و کنترل سرعت در جاده‌های عبوری از پارک امکان‌پذیر باشد.

اجرای برنامه‌های آموزشی: آموزش جوامع محلی درباره اهمیت پلنگ و زیستگاه آن و تقویت آگاهی عمومی نسبت به پیامدهای شکار غیرمجاز و تهدیدات دیگر باید در اولویت باشد.

توسعه پژوهش‌های آینده: استفاده از فناوری‌های پیشرفته‌تر مانند دوربین‌های تله‌ای و داده‌های ماهواره‌ای برای بهبود دقت تحلیل، مطالعه اثرات بلندمدت تهدیدات و تغییرات اقلیمی بر زیستگاه و شبیه‌سازی تعاملی میان عوامل مختلف تهدیدزا برای درک بهتر تأثیرات تجمعی پیشنهاد می‌شود.

نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف ارزیابی ریسک زیستگاه پلنگ در پارک ملی گلستان، با بهره‌گیری از مدل ارزیابی ریسک InVEST انجام شد. نتایج نشان داد که زیستگاه پلنگ در پارک ملی گلستان به‌شدت تحت فشار ترکیبی عوامل محیطی و تهدیدات انسانی قرار دارد. تحلیل مدل‌های مکانی و ارزیابی ریسک نشان داد که فاکتورهای محیطی مانند ارتفاع، نزدیکی به منابع آبی، شیب زمین و تراکم جاده‌ها نقشی تعیین‌کننده در کیفیت و کارایی زیستگاه پلنگ دارند. در کنار این عوامل طبیعی، تهدیدات انسانی ازجمله گسترش زمین‌های کشاورزی، چرای بی‌رویه دام، عبور جاده از مناطق حساس و توسعه سکونتگاه‌های روستایی ازجمله فشارهای مستقیم و غیرمستقیمی هستند که پایداری این زیستگاه را با خطر مواجه کرده‌اند.

این یافته‌ها حاکی از آن است که تهدیدات، علاوه بر تأثیرات موضعی، باعث تضعیف کلی عملکرد اکولوژیکی زیستگاه شده و قابلیت پشتیبانی از جمعیت پایدار پلنگ را به مرور کاهش می‌دهند. تداوم چنین فشارهایی می‌تواند منجر به کاهش قلمرو حرکتی، تغییر در رفتار گونه، کاهش منابع غذایی، افزایش تنش‌های انسانی – حیات وحش و درنهایت، کاهش نرخ بقاء و تولیدمثل شود. ازاین‌رو، نتایج این پژوهش تنها به توصیف وضعیت کنونی بسنده نمی‌کند.

کاربرد مدل ارزیابی ریسک InVEST در این مطالعه نشان داد که این ابزار قابلیت مناسبی برای شناسایی نواحی پرریسک، اولویت‌بندی اقدامات حفاظتی و پیش‌بینی پیامدهای فعالیت‌های انسانی دارد. نتایج به‌دست‌آمده می‌تواند به‌عنوان پایه‌ای علمی برای تدوین راهبردهای حفاظتی هدفمند، طراحی سناریوهای مدیریتی سازگار با شرایط محلی و اجرای برنامه‌های مشارکتی با جوامع بومی مورد استفاده قرار گیرد.

در نهایت، یافته‌های این پژوهش می‌تواند به‌عنوان الگوی قابل‌تعمیم برای حفاظت از زیستگاه گونه‌های در خطر در سایر پارک‌های ملی و مناطق حفاظت‌شده کشور نیز مورد استفاده قرار گیرد.

منابع

ابراهیمی منفرد، زهرا؛ میرکریمی، سید حامد؛ محمدی کنگرانی، حنانه؛ صوفی، محمود. (۱۴۰۲). استفاده از رویکرد تحلیل شبکهٔ اجتماعی در مدیریت تعارضات انسان و گوشتخواران بزرگ‌جثه در پارک ملی گلستان (با تأکید بر شبکهٔ اطلاع‌رسانی). محیط زیست طبیعی، ۷۶ (ویژه‌نامه)، صص: ۲۹-۴۳.

بهادری امجز، فاطمه؛ مروتی، مریم؛ بهنود، مینا؛ سیدی، نادر. (۱۴۰۰). بررسی میزان همپوشانی زیستگاه پلنگ ایرانی (Panthera pardus saxicolor) ا طعمه‌های آن (مطالعه موردی: منطقه حفاظت‌شده سنگ مس)، فصلنامه محیط زیست جانوری، ۱۳(۲)، صص: ۹-۱۶.

پلاشی، فاطمه. (۱۳۹۵). مقایسه عملکرد پیش‌بینی روش‌های تحلیل عاملی آشیان بوم‌شناختی و آنتروپی حداکثر در تهیه نقشه بالقوه پراکنش رویشگاه گونه‌های گیاهی (مطالعه موردی: مراتع شهرستان جیرفت). پایان‌نامه کارشناسی ارشد، رشته مرتع‌داری، استاد راهنما: حسین پیری صحراگرد، زابل، دانشگاه زابل، دانشکده خاک و آب، گروه مرتع و آبخیزداری.

پورسالم، صادق؛ امینی نسب، سیدمهدی؛ مددی، حسین؛ دلشب، حسین. (۱۴۰۰). ارزیابی و مدل‌سازی مطلوبیت زیستگاه پلنگ ایرانی (Panthera pardus saxicolor) در منطقهٔ گیسکان استان بوشهر. نشریه محیط زیست طبیعی، ۷۴(۲)، صص: ۲۶۴-۲۷۷.

تیموری، مهدی. (۱۴۰۲). سیمای طبیعی پارک ملی گلستان. نقش مانا، تهران، ایران. ص: ۱۶۲.

حسین‌نژاد، زینب؛ شیخی، علی؛ گشتاسب، حمید؛ نظامی، باقر؛ جهانی، علی. (۱۳۹۸). ارزیابی زیستگاه کبک (Alectoris Chukar) به روش تحلیل عامل آشیان بوم‌شناختی (ENFA)، (مطالعه موردی: منطقه شکار ممنوع اشکورات). پژوهش‌های محیط زیست، ۱۰(۱۹)، صص: ۱۷۹-۱۸۶.

حسینی، سیده بهاره؛ فراشی، آزیتا؛ جهانی شکیب، فاطمه. (۱۴۰۲). ارزیابی زیستگاه گونه پلنگ ایرانی (Panthera pardus saxicolor, Pocock 1927) در شمال شرق ایران. فصلنامه علمی زیست‌شناسی جانوری تجربی، ۱۱(۴)، صص: ۸۱-۹۴.

دانشی، علیرضا؛ نجفی‌نژاد، علی؛ پناهی، مصطفی؛ زرندیان، اردوان. (۱۳۹۹). پیش بینی اثرات تغییر کاربری اراضی بر کیفیت زیستگاه حوزه سد نرماب در استان گلستان، تخریبِ احیاء اراضی طبیعی، ۱(۱)، صص: ۱۲۰-۱۳۱.

دانه‌کار، افشین؛ سبحانی، پروانه؛ البرزی‌منش، میترا؛ قلیچی‌پور، زهرا. (۱۴۰۳). زون‌بندی پارک ملی گلستان با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره. آمایش سرزمین، ۱۶(۱)، صص: ۱۶۱-۱۸۵.

دهجی، فاطمه؛ مروتی، مریم؛ زارع خورمیزی، مهدی. (۱۴۰۱). شناسایی اتصالات بین لکه‌های زیستگاهی و مدل‌سازی مطلوبیت زیستگاه پلنگ ایرانی (Panthera pardus saxicolor) در استان یزد. مجله پژوهش‌های جانوری (مجله زیست‌شناسی ایران)، 35(3) ، صص: ۱۶۰-۱۷۷.

عبداللهی، صدیقه. (۱۴۰۲). ارزیابی کیفیت زیستگاه حیات وحش به منظور شناسایی لکه‌های زیستگاهی کلیدی با رویکرد بوم‌شناسی سیمای سرزمین. نشریه محیط‌زیست طبیعی (ویژه‌نامه مناطق حفاظت‌شده)، ۷۶، صص: ۱۴۷-۱۶۲.

عبداللهی، صدیقه؛ سلمان ماهینی، عبدالرسول. (۱۳۹۴). بررسی تاثیر مقیاس بر مدل‌سازی زیستگاه پلنگ در پارک ملی گلستان، پژوهش-های محیط‌زیست، ۶ (۱۱)، صص: ۱۷۳-۱۸۰

عبداللهی، صدیقه؛ سلمان ماهینی، عبدالرسول. (۱۳۹۷). بررسی مقیاس‌های مختلف به منظور تعیین پارامترهای زیستگاهی (مطالعه موردی: پلنگ پارک ملی گلستان)، پژوهش‌های محیط‌زیست، ۹ (۱۸)، صص: ۱۸۱-۱۸۸.

کامیاب، حمیدرضا؛ باقری، عاطفه؛ شهبازی، علی. (۱۳۹۸). به‌گزینی کریدور زیستگاهی گونه پلنگ ایرانی در پارک ملی گلستان با استفاده از روش تئوری مدار الکتریکی. پژوهش‌های محیط زیست، ۱۰(۲۰)، صص: ۲۰۹-۲۱۸.

مهرخو، ستاره؛ رمضانی، مهدی؛ فرشچی، پروین؛ پناهی، مصطفی؛ منوری، مسعود. (۱۴۰۲). پیش‌بینی تغییرات عرضه خدمات اکوسیستمی مرتبط با تنوع زیستی تحت تاثیر تغییرات کاربری اراضی در حوزه آبخیز شفارود استان گیلان. علوم و تکنولوژی محیط زیست، ۲۵(۷)، صص: ۱۰۹-۱۲۴.

نعمت‌الهی، شکوفه؛ فاخران، سیما؛ جعفری، علی؛ رئیسی، تورج؛ پورمنافی، سعید. (۱۳۹۸). برنامه‌ریزی سیمای سرزمین برای حفاظت بر مبنای مدل کیفیت زیستگاه InVEST و اثرات بوم‌شناختی شبکه جاده‌ای در استان چهارمحال و بختیاری. بوم‌شناسی کاربردی، ۸(۴)، صص: ۶۷-۸۱.

همامی، محمودرضا؛ سلیاری، جواد؛ اسمعیلی، سعیده. (۱۳۹۵). بررسی تنوع و الگوی تلفات جاده‌ای حیات وحش در پارک ملی گلستان. پژوهش‌های محیط زیست، ۷(۱۴)، صص: ۲۱۵-۲۲۴.

Abdollahi, S., Khalilzadeh, P., Zeilabi, E., Lesbarrères, D. (2024). Spatial assessment of biodiversity and conservation priorities in Hamedan Province, Iran, using a landscape ecology approach, Journal of Environmental Studies and Sciences, 14(1), 358–371.

Abdollahi, S., Zeilabi, E., Xu, C.C.Y. (2023). Habitat quality assessment based on local expert knowledge and landscape patterns for bird of prey species in Hamadan, Iran, Modeling Earth Systems and Environment, 10(2), 2051-2061.

Bai, D. F., Chen, P. J., Atzeni, L., Cering, L., Li, Q., Shi, K. (2018). Assessment of habitat suitability of the snow leopard (*Panthera uncia*) in Qomolangma National Nature Reserve based on MaxEnt modelling. Zoological Research, 39(6), 373–386.

Baral, H., Keenan, R. J., Fox, J. C., Stork, N. E., Kasel, S. (2013). Spatial assessment of ecosystem goods and services in complex production landscapes: A case study from south-eastern Australia. Ecological Complexity, 13, 35-45.

Bastos, M. I., Roebeling, P. C., Alves, F. L., Villasante, S., Magalhães Filho, L. (2023). High-risk water pollution hazards affecting Aveiro coastal lagoon (Portugal)–A habitat risk assessment using InVEST. Ecological Informatics, 76, 102144.

Caro, C., Marques, J. C., Cunha, P. P., Teixeira, Z. (2020). Ecosystem services as a resilience descriptor in habitat risk assessment using the InVEST model. Ecological Indicators, 115, 106426. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106426

Farhadinia, M. S., Ahmadi, M., Sharbafi, E., Khosravi, S., Alinezhad, H., Macdonald, D. W. (2015). Leveraging transboundary conservation partnerships: Persistence of Persian leopard (Panthera pardus saxicolor) in the Iranian Caucasus. Biological Conservation, 191, 770-778.

Kandziora, M., Burkhard, B., Müller, F. (2013). Interactions of ecosystem properties, ecosystem integrity and ecosystem service indicators—A theoretical matrix exercise. Ecological indicators, 28, 54-78.

Laurans, Y., Pascal, N., Binet, T., Brander, L., Clua, E., David, G., Rojat, D. and Seidl, A. (2013). Economic valuation of ecosystem services from coral reefs in the South Pacific: Taking stock of recent experience. Journal of Environmental Management, 116, 135-144.

Li, S., Zhang, H., Zhou, X., Yu, H., Li, W. (2020). Enhancing protected areas for biodiversity and ecosystem services in the Qinghai–Tibet Plateau. Ecosystem Services, 43, 101090. https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2020.101090

Nematollahi, S., Fakheran, S., Kienast, F., Jafari, A. (2020). Application of InVEST habitat quality module in spatially vulnerability assessment of natural habitats (Case Study: Chaharmahal and Bakhtiari Province, Iran). Environmental Monitoring and Assessment, 192(8), 1–17.

Oca, G., Reyes, T. (2023). Predicting the habitat suitability of the Philippine Cockatoo (*Cacatua haematuropygia S. Muller*) using ecological niche factor analysis. Ecosystems and Development Journal, 13(1), 58-67.

Pascal, N., Allenbach, M., Brathwaite, A., Burke, L., Le Port, G., Clua, E. (2016). Economic valuation of coral reef ecosystem service of coastal protection: A pragmatic approach. Ecosystem Services, 21, 72-80.

Piet, G., Culhane, F., Jongbloed, R., Robinson, L., Rumes, B., Tamis, J. (2019). An integrated risk-based assessment of the North Sea to guide ecosystem-based management. Science of the Total Environment, 654, 694-704.

Rezazadeh, S., Jahani, A., Makhdoum, M., Meigooni, H. G. (2017). Evaluation of the strategic factors of the management of protected areas using SWOT analysis—Case study: Bashgol Protected Area-Qazvin Province. Open Journal of Ecology, 7(01), 55-68.

Sharp, R., Tallis, H.T., Ricketts, T., Guerry, A.D., Wood, S.A., ChaplinKramer, R., Nelson, E., Ennaanay, D., Wolny, S., Olwero, N., Vigerstol, K., Pennington, D., Mendoza, G., Aukema, J., Foster, J., Forrest, J., Cameron, D., Arkema, K., Lonsdorf, E., Kennedy, C., Verutes, G., Kim, CK., Guannel, G., Papenfus, M., Toft, J., Marsik, M., Bernhardt, J., Grifn, R., Glowinski, K., Chaumont, N., Perelman, A., Lacayo, M., Mandle, L., Hamel, P., Vogl, AL., Rogers, L., Bierbower, W.,

Denu, D., Douglass, J. (2020). InVEST 3.7.0 user's guide. The Natural Capital Project. Stanford University, University of Minnesota, The Nature Conservancy, and World Wildlife Fund. https//: invest-userguide.readthedocs.io/en/3.5.0/

Tolessa, T., Senbeta, F., Kidane, M. (2017). The impact of land use/land cover change on ecosystem services in the central highlands of Ethiopia. Ecosystem services, 23, 47-54.

Yang, C., Zhang, P., Wu, Y., Dai, Q., Luo, G., Zhou, H., Zhao, D. and Ran, J. (2021). Livestock limits snow leopard's space use by suppressing its prey, blue sheep, at Gongga Mountain, China. Global Ecology and Conservation, 29, e01728. https://doi.org/10.1016/j.gecco.2021.e01728.

Journal of Natural Environment Hazards
University of Sistan and Baluchestan
Print ISSN: 2676 - 4377 Online ISSN: 2676 - 4385
Homepage: https://jneh.usb.ac.ir

Journal of Natural Environmental Hazards, Vol 15, Iss 47, March 2026

Meta-analysis of studies on resilience to flood risk in Iran and the world

Mahdieh Farvardin[1], Zeinab Adeli[2*], Maliheh Bababkhani[3]

1. *Master of Urban Planning, Department of Urban Planning, Faculty of Architecture and Urban Planning, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran*

2. Corresponding Author, *Assistant Professor of Urban Planning, Faculty of Architecture and Urban Planning, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran*

Email: *adeli@arc.ikiu.ac.ir* ***ORCID:*** *https://orcid.org/0000-0000-0000-0000*

3. *Assistant Professor of Urban Planning, Faculty of Architecture and Urban Planning, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran*

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received: 23 December 2024
Revised: 10 March 2025
Accepted: 20 April 2025
Published: 21 March 2026

Keywords:
Floods, resilience, risks, models, meta-analysis.

ABSTRACT

Research on resilience has been underway for more than three decades but has not yet been widely implemented in various fields. Disagreements in defining resilience arise from differences in perspectives on ecological and social systems and methodological methods. The present study attempts to take a step towards clarifying the dimensions of this concept, criteria, approach, scale of intervention and its applications against flood risk by meta-analyzing and systematically formulating the studies that have been conducted so far in this field. In this regard, a database of studies was formed and finally249articles were selected and analyzed by screening them. The structure of the articles, including methodology, proposed criteria, scale of study and models used in them, was analyzed, so that through this, the studies could be categorized and the differences and similarities between the studies conducted in the world and Iran could be determined. The results show that: Regarding the scale of research, in Iranian studies, the city scale(28 percent)and the village scale(19 percent)have accounted for the largest volume of studies, and in world studies, the scale of the urban river basin (30 percent)has accounted for the largest volume of studies. In the methodology related to flood resilience articles, all three quantitative, qualitative, and mixed approaches were observed. The difference is that in the methodology of Iranian studies(66 percent), most of the studies conducted were conducted with a quantitative method and in world studies, the qualitative method (46 percent). According to the searches conducted, studies on flood resilience in the world have been conducted in connection with other approaches such as smart management, provision of welfare facilities, urban infrastructure planning, green infrastructure, and social and economic issues. However, in Iran, most of these studies have focused on improving the resilience of residents in line with natural hazard risk management. The policies and issues raised therein are constantly being reviewed and evaluated, but issues such as air quality, smart management, welfare facilities, and biodiversity have not yet been addressed. This demonstrates the importance of increasing research on flood resilience in other areas of Iran.

How to Cite: Farvardin, M. , Adeli, Z. and Bababkhani, M. (2026). Meta-analysis of studies on resilience to flood risk in Iran and the world. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 15(47), 45-72.

© The Author/Authors

DOI: 10.22111/jneh.2025.50593.2092

Publisher: University of Sistan and Baluchestan

EXTENDED ABSTRACT

INTRODUCTION

More than three decades have passed since the beginning of research on resilience, but this concept has not yet been widely used in various operational areas. In our country, this issue is more evident in the case of flood resilience than in other natural hazards. The existing gaps and contradictions over the concept of flood resilience arise from differences in perspectives that focus on realization in ecological, social or combined systems, methodological methods, different scales of intervention, etc. Researchers in different fields have addressed this concept in different ways, depending on the scale of the study, the context, the type of study and the field of study. Therefore, the present study attempts to take a step towards classifying studies and clarifying the dimensions of this concept and its applications by re-examining the subject. In general, this study seeks to find answers to the following questions:

* How has flood resilience been conceptualized in the theoretical literature of various researchers?

* What are the key components, principles, characteristics, and indicators of flood resilience?

* What methods have been used to examine and analyze flood resilience in the context of society and at different scales?

* In which areas can the differences between Iranian and international studies on flood resilience be sought?

DATA AND METHODS

This research uses the method of meta-analysis and an in-depth study of the existing literature on the concept of flood resilience to explain the concept of this approach, its principles, characteristics and measurement methods. In the same vein, this research is of the review type. Meta-analysis is a systematic review that has a specific and defined research question and uses precise and systematic methods to identify, select and evaluate relevant research and collect and analyze data from the research included in this review. In a systematic review, topics such as types of collaboration between researchers, research method of articles, unit of analysis of articles, variables used, type of framework and theoretical model of articles are addressed. Meta-analysis is a comparison of the results of other research and provides an analysis of the research and results of existing research. The meta-analysis method first goes beyond and beyond the initial whole by breaking down the components of the whole, then transfers the initial analysis in a way that it is placed in an acceptable framework and shows concepts that the initial information did not show. This article attempts to systematically review the global theoretical literature related to this concept over 8 years(between 2017 and 2024) to gain insight into the concepts, dimensions, key elements, tools, and methods, and how they have changed. This literature was searched in two databases, Google Scholar and Science Direct, using the keywords “flood resilience” and other similar terms such as “flood management.” Also, to limit the number of articles, this search was continued by searching only for the aforementioned keywords in the article titles. To consider Persian articles, the search was completed by searching for the aforementioned keywords in the Normags, SED, Civilica, MagIran, and ISC databases. Based on the above,310 articles were found. The qualitative assessment checklist and the Critical Appraisal Skills Program(CASP)tool were used to screen the articles. Finally, by eliminating duplicate and irrelevant articles,249 articles were briefly analyzed; of these,58 were Persian articles and 191 were English articles.

RESULTS AND DISCUSSION

By examining the theoretical literature related to the flood resilience approach and reviewing the articles published in this field, the dimensions and methods of examining and adapting the flood

resilience approach are accurately described and categorized for better understanding. In general, this approach is formed from five basic dimensions: social, physical, infrastructural, institutional and economic. Regarding the scale of research, it has also been examined in different scales from neighbourhood to urban watershed, metropolis and state in various articles, with the city scale and the urban watershed in the next rank being the scale to which the largest volume of studies is dedicated. The difference is that the largest scale used in Iranian studies has been at the city scale(28 percent)and the village scale(19 percent)and in world studies it has been at the scale of the urban river basin(30 percent).In the methodology related to flood resilience articles, all three quantitative, qualitative and mixed approaches can be seen. According to the studies, this approach focuses more on quantitative and qualitative methods, but overall most studies have had a qualitative method. The difference is that in the methodology of Iranian studies(66 percent), most of the studies conducted were conducted with a quantitative method, and in world studies, the qualitative method (46 percent). Also, in terms of geographical distribution of research, this approach has the largest number of studies in the Asian continent(131 articles), followed by the European continent(69 articles), and the fewest studies related to the Australian and Oceanian continents(5 articles).

CONCLUSION

Due to its comprehensiveness, this approach has an impact on various issues such as optimizing urban form and landscapes, urban/green infrastructure, agricultural/urban land zoning, social interactions, settlement sustainability (rural/urban, etc.), architecture, housing, air quality, amenities and biodiversity, smart management, and social equality in various aspects of citizens' lives. However, in Iran, most of these studies are in the field of improving the resilience of residents in line with natural hazard risk management, and the policies and issues raised in them are constantly being reviewed and evaluated, and issues such as air quality, smart management, amenities and biodiversity, and green infrastructure have not yet been mentioned.

REFERENCES

References (in Persian)

Abdali, Y., Hataminejad H., Zanganeh Shahraki S., Pourahmad A., Salmani M. Presenting future scenarios of urban resilience against flood risk (case study: Khorramabad city). Geographical studies of mountainous regions. 2024; 4 (4): 153 pp.-174. URL: http://gsma.lu.ac.ir/article-۵۴۱-۱-fa.html [In Persian]

Ebrahimipour, M, and Ziari, K. (2017). Urban land zoning against flood risk with a physical resilience approach (case study: Cheshme Kileh River). New perspectives in human geography (human geography), 11(1), 39-56. SID. https://sid.ir/paper/518561/fa [In Persian]

Asadafrooz, A., Motedayen, H., Masnavi, M. R., & Mansoori, S. A. (2020). Shiraz Environmental Resilience of the March 2019 Flood Hazards; through Landscape Approach, Systems Theory and DPSIR Model. Environmental Management Hazards, 7(1), 55-75. 10.22059/jhsci.2020.301219.556 [In Persian]

References (in English)

Abdel-Mooty, M. N., El-Dakhakhni, W., & Coulibaly, P. (2022). Data-driven community flood resilience prediction. Water, 14(13), 2120. https://doi.org/10.3390/w14132120

Ariyaningsih, & Shaw, R. (2022). Integration of SETS (Social-Ecological–Technological Systems) framework and flood resilience cycle for smart flood risk management. Smart Cities, 5(4), 1312-1335. DOI:10.3390/smartcities5040067

Bertilsson, L., Wiklund, K., de Moura Tebaldi, I., Rezende, O. M., Veról, A. P., & Miguez, M. G. (2019). Urban flood resilience–A multi-criteria index to integrate flood resilience into urban planning. Journal of Hydrology, 573, 970-982. DOI:10.1016/j.jhydrol.2018.06.052

Bista, R. B. (2023). Descriptive Study of Community-Based Disaster Management in Rural Western Nepal. The Journal of Economic Concerns, 14(1-2), 20-36. DOI:10.3126/tjec.v14i1-2.62311.

مخاطرات محیط طبیعی
شاپا چاپی: ۴۳۷۷-۲۶۷۶ شاپا الکترونیکی: ۴۳۸۵-۲۶۷۶
Homepage: https://jneh.usb.ac.ir

مجله علمی پژوهشی مخاطرات محیط طبیعی، دوره ۱۵، شماره ۴۷، شماره پیاپی ۱، فروردین ۱۴۰۵

فراتحلیل مطالعات تاب‌آوری در برابر مخاطره سیل در ایران و جهان

مهدیه فروردین[۱]، زینب عادلی[۱*]، ملیحه باباخانی[۳]

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد برنامه‌ریزی شهری، گروه شهرسازی، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران
۲. استادیار گروه شهرسازی، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران **(نویسنده مسئول)**
ایمیل: adeli@arc.ikiu.ac.ir **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-1806-1739
۳. استادیار گروه شهرسازی، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۳۰
تاریخ ویرایش: ۱۴۰۳/۱۲/۲۰
تاریخ پذیرش : ۱۴۰۴/۰۱/۳۱
تاریخ انتشار : ۱۴۰۵/۰۱/۰۱

واژه‌های کلیدی:
سیل، تاب‌آوری، مخاطرات، مدل‌ها، فراتحلیل.

چکیده

پژوهش‌ها در زمینه تاب‌آوری بیش از سه دهه است که آغاز شده، اما هنوز به‌طور گسترده در حوزه‌های مختلف عملیاتی نشده است. اختلاف نظرها در تعریف تاب‌آوری ناشی از تفاوت دیدگاه‌ها در سیستم‌های اکولوژیکی، اجتماعی و روش‌های متدولوژیک است. این پژوهش کوشش دارد تا با فراتحلیل و صورت‌بندی منظم مطالعاتی که تاکنون در این حوزه انجام شده است، گامی در جهت روشن‌تر شدن ابعاد این مفهوم، معیارها، روش برخورد، مقیاس مداخله و کاربردهای آن در برابر مخاطره سیل بردارد. در این راستا بانک داده‌ای از مطالعات انجام‌شده تشکیل و در نهایت با غربال آنها ۲۴۹ مقاله انتخاب و تجزیه‌وتحلیل شد. ساختار مقالات شامل روش‌شناسی، معیارهای مطرح، مقیاس موردمطالعه و مدل‌های به‌کاررفته در آنها واکاوی شد تا از این رهگذر مطالعات دسته‌بندی و تفاوت‌ها و شباهت‌های مطالعات صورت‌گرفته در جهان و ایران مشخص شود. نتایج نشان می‌دهد در رابطه با مقیاس پژوهش در مطالعات ایران مقیاس شهر (۲۸ درصد) و مقیاس روستا (۱۹درصد) و در مطالعات جهان در مقیاس حوزه پیرامون رودخانه شهری (۳۰ درصد) بیشترین حجم مطالعات را به خود اختصاص داده است. در روش‌شناسی مربوط به مقالات تاب‌آوری در برابر سیل، هر سه رویکرد کمی، کیفی و ترکیبی قابل مشاهده است. با این تفاوت که در روش‌شناسی مطالعات ایران (۶۶ درصد) بیشتر مطالعات انجام‌شده با روش کمی و در مطالعات جهان از روش کیفی (۴۶ درصد) انجام شده است. با توجه به جستجوهای انجام‌شده، مطالعات تاب‌آوری در برابر سیل در جهان در ارتباط با سایر رویکردهایی از قبیل مدیریت هوشمند، تامین امکانات رفاهی، برنامه‌ریزی زیرساخت‌های شهری، زیرساخت‌های سبز و مسائل اجتماعی و اقتصادی مطرح شده است. اما در ایران بیشتر این مطالعات در زمینه بهبود وضعیت تاب‌آوری ساکنین در راستای مدیریت ریسک مخاطرات طبیعی می‌باشد و سیاست‌ها و موضوعات مطرح در آن دائما در حال بازبینی و ارزیابی هستند و هنوز به موضوعاتی ازجمله کیفیت هوا، مدیریت هوشمند، امکانات رفاهی و تنوع‌زیستی، اشاره‌ای نشده است. این موضوع اهمیت افزایش پژوهش‌ها در زمینه تاب‌آوری در برابر سیل در ایران را در دیگر حوزه‌ها به وضوح نشان می‌دهد.

استناد: فروردین, مهدیه , عادلی, زینب و باباخانی, ملیحه . (۱۴۰۵). فراتحلیل مطالعات تاب آوری در برابر مخاطره سیل در ایران و جهان. *مخاطرات محیط طبیعی*, ۱۵(۴۷), ۴۵-۷۲

© نویسنده/ نویسندگان
DOI: 10.22111/jneh.2025.50593.2092
ناشر: دانشگاه سیستان و بلوچستان

مقدمه

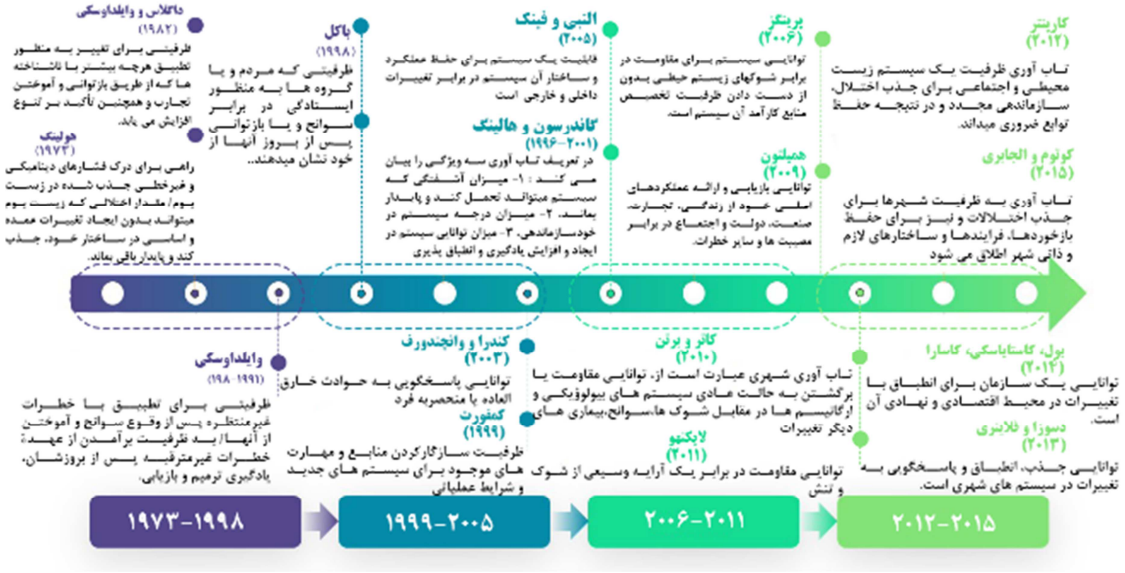
ترکیب تغییرات آب‌وهوایی و افزایش شهرنشینی چالش‌های بزرگی را برای برنامه‌ریزی شهری و مدیریت شهرها برای پایداری به همراه دارد. مطالعات اخیر نشان می‌دهد که تغییرات آب‌وهوایی به احتمال زیاد چرخه هیدرولوژیکی را در بسیاری از مناطق تغییر می‌دهد و باعث احتمال بیشتر رویدادهای آب‌وهوایی شدید مانند خشکسالی و سیل می‌شود (فارست [1] و همکاران، ۲۰۲۰). شهرنشینی همچنین با افزایش میزان سطوح غیرقابل نفوذ و اصلاح مسیرهای جریان، سیل را تشدید می‌کند. سیل بخشی از یک فرآیند طبیعی است؛ اما زمانی که در حوضه‌های آبخیز شهری رخ می‌دهد، پیامدهای منفی برای ساکنان این مناطق ایجاد می‌کند (برتیلسون [2] و همکاران، ۲۰۱۹؛ سانگ [3] و همکاران، ۲۰۱۸). شهرها به‌عنوان سیستم‌های پویا، نتیجه تعامل انسان و محیط طبیعی در طول زمان هستند و برای حفظ، تکامل و توسعه خود به تعادل نیاز دارند. هر گونه عدم تعادل در سیستم‌های داخلی شهر (فضاها و بافت شهری) و همچنین سیستم‌های خارجی (مناطق نزدیک و دور، حومه و منطقه‌ای) می‌تواند منجر به بی‌ثباتی آن‌ها شود. (ملکی و اسحاق وندی، ۱۳۹۸). سیل را می‌توان از گسترده‌ترین، مخرب‌ترین و مکررترین بلای طبیعی دانست که جوامع بشری را تهدید می‌کند و به علت تجمع اموال و دارایی‌ها در نواحی شهری، خسارت‌های عمده‌ای بر آن‌ها تحمیل می نماید (پرشار [4] و همکاران، ۲۰۲۳). در مواجه با بلایای طبیعی ازجمله سیل رویکردهای متنوعی مطرح است، یکی از این رویکردهای تاب‌آوری است. تاب‌آوری مفهوم جدیدی است که چند سالی است موردتوجه محققان و برنامه‌ریزان شهری قرارگرفته است. تاب‌آوری به معنای مقاومت و تحمل یک سیستم در برابر شوک‌های وارده بر آن و ادامه فعالیت و کارا بودن آن سیستم می‌باشد (عبدالموتی [5] و همکاران، ۲۰۲۲). به‌عنوان یک رویکرد نوین در تمامی عرصه‌ها ظهور کرده است، به‌طوری‌که این رویکرد نو در فضاهای شهری و منظر در برابر اختلالات گوناگون و گسترده به‌کار برده می‌شود. این رویکرد که با نگاهی سیستمی فضاهای شهری را نسبت به آشوب‌های احتمالی سازگار و منطبق می‌سازد، اخیرا در رودخانه‌های شهری نیز مورد توجه واقع شده است. اهمیت و جایگاه این رویکرد در مدیریت و ساماندهی فضاهای شهری، به‌ویژه رودهای شهری در بازیابی و استفاده این فضاها درشرایط مختلف است (بهرامی و همکاران، ۱۳۹۸). رویکرد تاب‌آوری در برابر سیل که به‌گونه‌ای هسته اصلی تمام این عناوین است، با هدف بهبود و افزایش توانایی جوامع و سکونتگاه‌های انسانی در مقابله با خطرات سیلاب و تغییرات محیطی ناشی از آن است. این توانایی نه تنها شامل عوامل محیطی و اقلیمی بلکه اقتصادی، اجتماعی و مدیریتی نیز را در بر می‌گیرد.

تاب‌آوری در برابر سیل ابعاد مختلفی از شهر و زندگی شهری را دربر می‌گیرد و پژوهشگران با توجه به مقیاس مطالعه، زمینه کالبدی، اجتماعی و اقتصادی، نوع مطالعه، رشته تحصیلی (جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری - روستایی، طراحی شهری، مدیریت و برنامه‌ریزی منابع آب، مدیریت و برنامه‌ریزی محیط زیست، جامعه‌شناسی محیطی، اقلیم‌شناسان، جغرافیا و برنامه‌ریزی گردشگری و ...) به‌گونه‌ای متفاوت به این مفهوم پرداخته‌اند. این تنوع، چالش‌های متعددی ایجاد می‌کند. از این روی، این پژوهش سعی دارد تا با بازشکافی موضوع، گامی در جهت دسته‌بندی مطالعات و روشن‌تر شدن ابعاد این مفهوم و کاربردهای آن بردارد. در مجموع، این پژوهش به‌دنبال یافتن پاسخ پرسش‌های زیر است:

[1] Forrest
[2] Bertilsson
[3] Sung
[4] Prashar
[5] Abdel-Mooty

* تاب‌آوری در برابر سیل، در ادبیات نظری پژوهشگران مختلف چگونه مفهوم‌سازی شده است؟
* اجزای کلیدی، اصول، ویژگی‌ها و شاخص‌های تاب‌آوری در برابر سیل کدامند؟
* چه روش‌هایی جهت بررسی و تحلیل تاب‌آوری در برابر سیل، در متن جامعه و مقیاس‌های مختلف به‌کار گرفته شده است؟
* تفاوت مطالعات ایران با مطالعات جهان، در خصوص تاب‌آوری در برابر سیل، در کدام زمینه‌ها قابل‌جستجو است؟

خطرات طبیعی با منشأ آب‌وهوایی در سطح جهان، به‌عنوان یک نگرانی عمده در حال ظهور هستند. طی چند دهه گذشته، این بلایا هم از نظر فراوانی و هم از نظر وسعت، گسترش یافته‌اند که منجر به تلفات جانی و مالی بی‌سابقه شده است (یه و همکاران[1]، ۲۰۲۱). ازآنجاکه جوامع شهری پیشتاز تأثیرات خطرات و خسارت‌های ناشی از آن هستند، محافل علمی و بین‌المللی، لزوم تقویت تاب‌آوری شهرها را تصدیق کرده‌اند (جلیلی صدرآباد و همکاران،۱۴۰۲). تاب-آوری به‌عنوان یک رویکرد نو در مواجهه با آشوب‌های محیطی در دهه‌های اخیر مورد توجه برنامه‌ریزان و طراحان شهری قرار گرفته است. واژه تاب‌آوری، اغلب به مفهوم بازگشت به گذشته به‌کار می‌رود که از ریشه لاتین«Resilio» به معنای برگشت به عقب گرفته شده است (ابدالی و همکاران،۱۴۰۲). و بنا بر نظر هولینگ[2]، تاب‌آوری به‌عنوان راهی برای درک فشارهای دینامیکی و غیرخطی جذب در زیست‌بوم و به‌صورت مقدار اختلالی که زیست‌بوم می‌تواند بدون ایجاد تغییرات عمده و اساسی در ساختار خود جذب کرده و پایدار باقی بماند، تعریف شده است. با توجه به تعدد تعاریف موجود از مفهوم تاب‌آوری، برخی از تعاریف دیگر که توسط اندیشمندان در این بحث که به نظر دارای اعتبار و کارایی بیشتری در زمینه مورد نظرمان هستند، به‌طور خلاصه در شکل (۱)، ارائه می‌گردند:



شکل ۱: تعریف‌ها و مفاهیم تاب‌آوری در ادوار مختلف تاریخ. *منبع: (نگارندگان)*

[1] Ye et al
[2] Holling

امروزه در زمینه مدیریت ریسک سیل، مفهوم تاب‌آوری شهری به‌عنوان رویکردی جدید در حال ظهور است. به‌گونه‌ای که راهکارهای برنامه‌ریزی و طراحی شهری پویایی و امکانات جدید شهری برای توسعه و تحول شهری فراهم می‌کنند. آن‌ها تغییرات در بافت شهری را ترویج می‌کنند و بنابراین، فرصت‌هایی را برای ایجاد تاب‌آوری در برابر سیل فراهم می‌کنند (روسو [۱] و همکاران، ۲۰۲۰). همچنین، پس از گسترش گستردهٔ ریسک سیل در سطح جهانی، تاب‌آوری در مدیریت ریسک سیل به‌عنوان زیرشاخه‌ای از تعریف پیشین هولینگ از تاب‌آوری در سال ۱۹۷۳ برای سیستم‌های زیست‌محیطی مطرح شد. تاب‌آوری یک سیستم دفاع در برابر سیل می‌تواند به‌طور گسترده‌ای به‌عنوان ظرفیت مقاومت پاسخگویی بهبودی و انطباق با تأثیر سیل و به‌طور مداوم در محیط نامطمئن تعریف شود (کمبل [۲] و همکاران، ۲۰۱۹). این مسأله در راستای چارچوب کلی پیشگیری، (کاهش) آمادگی، واکنش و بازتوانی برای مدیریت تاب‌آور است (ویتال [۳] و همکاران، ۲۰۲۰). تاب‌آوری به دو دلیل مهم است: اول این که چون آسیب‌پذیری سیستم‌های اجتماعی‌شده به‌طور کامل قابل پیش‌بینی نیست. دوم این که مردم و دارایی‌هایشان باید در شهرهای تاب‌آور در برابر با مخاطرات بهتر از مکان‌ها و جوامعی که کمتر انعطاف‌پذیر هستند، عمل کنند (سن [۴] و همکاران، ۲۰۲۱). جامعه‌ای که در برابر سیلاب تاب‌آور است، باید قبل از وقوع سیلاب اقداماتی برای کاهش آسیب‌پذیری انجام دهد. این اقدامات شامل شناسایی و کاهش عواملی است که می‌توانند منجر به افزایش شدت سیلاب شوند. همچنین، ضروری است که هشدارهای لازم به مردم ارائه شود تا آن‌ها از خطرات آگاه شوند. در زمان وقوع سیلاب، باید واکنش و پاسخ مناسبی به شرایط نشان داد و پس از آن، ارزیابی خسارت‌ها و برنامه‌ریزی برای ترمیم آن‌ها در اولویت قرار گیرد. (ژانگ [۵] و همکاران، ۲۰۲۳). از نیمه دوم قرن ۲۰ میلادی، در ادبیات حوزه شهرها، چترهای مفهومی متعددی در راستای تاب‌آور نمودن و آینده شهرها پدیدار شده است: «شهرهای قابل دفاع» (نیومن [۶]، ۱۹۷۳)، «شهر تاب‌آور» (هولینگ [۷]، ۱۹۷۳)، «شهر بیوفیلیک» (ویلسون [۸]، ۱۹۸۴)، «مدل‌سازی عملکرد شهر هوشمند» (لامباردی [۹] و همکاران، ۲۰۱۲)، «شهرهای کارآمد، پایدار» (وو [۱۰] و همکاران، ۲۰۱۷)، «بهبود بهره‌وری در عملکرد شهر» (هرناندز [۱۱]، ۲۰۱۹) و «شهرهای هوشمند» (بیبری و کروگستی [۱۲]، ۲۰۱۹)، برخی از کلید واژه های پیشنهادی برای دگردیسی شهرها بوده‌اند که به‌علت اهمیت تاب‌آوری شهری و وقوع فزاینده مخاطرات محیطی در سکونتگاه‌های موجود، هدف همه آنها پایداری و تاب‌آوری شهری می‌باشد. در شکل (۱) به‌طور مختصر به تعریف هر یک از این مقاهیم پرداخته شده است. در این میان برای اولین بار تفکر تاب‌آوری توسط هولینگ (که از وی به‌عنوان پدر تاب‌آوری یاد می‌شود) در سال ۱۹۷۳، در رابطه با اکولوژی و سیستم‌های پویای اکوسیستمی تعریف شد. از نظر هولینگ، تاب‌آوری به معنای توانایی جذب اختلالات است، در حالی که عملکرد سیستم مختل نشود (هولینگ، ۱۹۷۳). از آن زمان به بعد، تاب‌آوری در همه زمینه‌ها و علوم مختلف اعم از تاب‌آوری روان‌شناسی، مهندسی تاب‌آوری، تاب‌آوری اکولوژیکی، تاب‌آوری اجتماعی، تاب‌آوری اجتماعی اکولوژیکی، تاب‌آوری شهری و علوم دیگر تعریف شده است (بهرامی و همکاران۱۳۹۸). از آن پس پژوهش‌های

[1] Russo
[2] Campbell
[3] Vitale
[4] Sen
[5] Zhang
[6] Newman
[7] Holling
[8] Wilson
[9] Lombardi
[10] Wu
[11] Hernantes
[12] Bibri & Krogstie

متنوعی درخصوص این رویکرد انجام شده است. برای مثال، ابدالی و همکاران (۱۴۰۲) در پژوهشی با عنوان «ارائه سناریوهای آینده تاب‌آوری شهری در برابر مخاطره سیل (مورد مطالعه: شهر خرم‌آباد)» بیان داشتند که عوامل کلیدی عملکرد نهادها، ظرفیت ارتباطی، حکمروایی، زیر ساخت اینترنت و رونق ساخت‌وساز در سناریوها دارای بیشترین ارزش سازگاری در آینده تاب‌آوری شهر خرم‌آباد در برابر سیل می‌باشند. ژانگ و همکاران (۲۰۲۳) در پژوهشی با عنوان « ارزیابی تاب‌آوری شهری در برابر سیل بر اساس یک چارچوب سیستماتیک» سعی دارند تا با مطالعه‌ای روشمند نشان دهند ازآنجایی‌که سیل شهری می‌تواند به‌طور جدی امنیت اکولوژیکی و زندگی انسان را تهدید کند؛ ازاین‌رو، تاب‌آوری سیل شهری برای ایمنی و پایداری شهرها اهمیت دارد. برای ارزیابی کامل عملکرد سیستم‌های شهری در تمامی مراحل بارندگی، رواناب، سیلاب و زهکشی، چارچوب سیستماتیکی را برای ارزیابی تاب‌آوری سیل شهری پیشنهاد دادند. این چارچوب شامل شبیه‌سازی رواناب، تخمین سیلاب و ارزیابی تاب‌آوری است که مراحل مقاومت و سازگاری را در بر می‌گیرد و نتایج نشان داد مساحت زیرحوضه به‌دست‌آمده کوچک‌تر از مساحت کلی منطقه اداری محدوده مورد مطالعه بوده است که این موضوع نشان می‌دهد برای کشف اصول بنیادی به تجزیه‌وتحلیل دقیق‌تری نیاز است و در این مطالعه، استراتژی‌های بهبود تاب‌آوری در برابر سیل باید بیشتر مورد توجه قرار گیرند تا تصمیم‌گیری‌های بهتری برای بازسازی و احیای عملکردهای شهری هنگام بروز سیلاب انجام شود. تکین و همکاران در سال ۲۰۲۳، پژوهشی مروری با بررسی ۴۹ مقاله مرتبط با مدیریت ریسک سیل، تاب‌آوری و برنامه‌ریزی زیرساخت سبز، نشان دادند افزایش تاب‌آوری در برابر سیل مستلزم اقدامات هماهنگ، ارتباطات مؤثر و برنامه‌ریزی و مشارکت بین ذینفعان است (تکین[1] و همکاران، ۲۰۲۳). رمضانی مهربان در سال ۱۴۰۲، پژوهشی مروری با استفاده از روش فراتحلیل در زمینه رویکردها و روش‌های ارزیابی تاب‌آوری سیل در محیط‌های شهری با بررسی ۶۵ منبع به‌کار بسته است که در نهایت روش‌های ارزیابی تاب‌آوری محیط‌های شهری در برابر سیل، به سه دسته کمی، نیمه کمی و کیفی تقسیم می‌شوند. روش‌های کیفی (غالباً شامل روش مصاحبه‌گیری و چارچوب‌های مفهومی نظری) است. در روش‌های کمی و نیمه کمی (بیشتر از روش‌های مبتنی بر شبیه‌سازی و روش‌های مبتنی بر شاخص‌سازی) استفاده می‌شوند که در رویکرد مبتنی بر شبیه‌سازی به‌طورکلی از مدل‌سازی هیدرولوژیکی و شبیه-سازی سیلاب استفاده می‌شود و از روش‌های مبتنی بر شاخص‌سازی می‌توان از آنها برای تحلیل تاب‌آوری دیگر انواع مخاطرات در عرصه‌های جغرافیایی نیز استفاده کرد (رمضانی مهربان،۱۴۰۲). با توجه به تمام پژوهش‌های مروری انجام‌شده مرتبط با رویکرد تاب‌آوری در برابر سیل، در این پژوهش کوشش شد با روش فراتحلیل و با بررسی تعداد بیشتر و به روزتری از مقالاتی که تا سال ۲۰۲۴ چاپ شده‌اند، مرور جامعی در خصوص این مفهوم انجام شود. بدین منظور این پژوهش تنها به کلید واژه " تاب‌آوری در برابر سیل" محدود نشد و مقالات مرتبط با مدیریت سیل نیز جستجو و بررسی شد. همچنین، تلاش شد دسته‌بندی کاملی از معیارهای تاثیرگذار بر رویکرد تاب‌آوری در برابر سیل ارائه گردد. در نهایت، با مقایسه مطالعات صورت‌گرفته در جهان با پژوهش‌های انجام‌شده در ایران، کوشش شد فاصله این مطالعات از هم شناسایی شده و از این رهگذر علاوه بر دسته‌بندی مطالعات، ابهامات و خلاهای مطالعاتی شناسایی شود.

[1] Takin



شکل ۲: سیر زمانی مفاهیم برنامه‌ریزی مرتبط به رویکرد تاب‌آوری. *منبع:(نگارندگان)*

داده‌ها

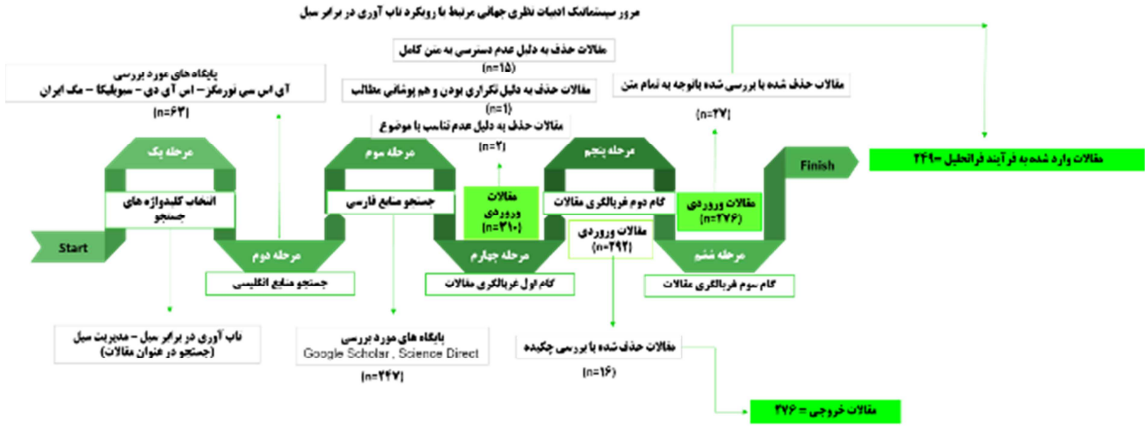
این پژوهش با روش فراتحلیل و مطالعه عمیق ادبیات موجود در مورد مفهوم تاب‌آوری در برابر سیل، به تبیین مفهوم این رویکرد، اصول، ویژگی‌ها و روش‌های سنجش آن می‌پردازد. به همین مضمون، این پژوهش از نوع مروری است. فراتحلیل، مروری نظام‌مند است که سوال پژوهش مشخص و تعریف شده‌ای دارد و از روش‌های دقیق و منظم برای شناسایی، انتخاب و ارزیابی پژوهش‌های مرتبط و جمع‌آوری و تحلیل داده‌ها از پژوهش‌های که شامل این مرور می-شوند، استفاده می‌کند. در مرور نظام‌مند، به موضوع‌هایی مانند انواع همکاری محققان، روش پژوهش مقالات، واحد تحلیل مقالات، متغیرهای استفاده‌شده، نوع چارچوب و الگوی نظری مقالات پرداخته می‌شود (پیگوت[1]، ۲۰۱۲). در واقع فراتحلیل مقایسه نتایج پژوهش‌های دیگران است و از پژوهش‌ها و نتایج پژوهش‌های موجود، تحلیلی عرضه می-کند. روش فراتحلیل، ابتدا از شکستن اجزای کل به ماوراء و فراتر از کل اولیه می‌رسد، سپس تحلیل اولیه را به نحوی منتقل می‌کند که در چارچوب قابل‌قبول قرار گیرد و مفاهیمی را نشان می‌دهد که اطلاعات اولیه نشان نداده باشند.

در این مقاله سعی شده است مروری نظام‌مند بر مطالعات مرتبط با مفهوم تاب‌آوری سیل در طول ۸ سال (بین سال-های ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۴) صورت گیرد. در مرور مطالعات جهانی، جستجو در مقالات چاپ‌شده در دو پایگاه اطلاعاتی گوگل اسکولار[2] و ساینس دایرکت[3] با کلیدواژه "تاب‌آوری در برابر سیل[4]" و دیگر اصطلاح مشابه مانند "مدیریت سیل[5]" انجام شد. برای محدودسازی تعداد مقالات، استفاده از کلیدواژه‌های بیان‌شده تنها در "عنوان" مقالات محدود

[1] Pigott
[2] Google Scholar
[3] Science Direct
[4] Flood resilience
[5] Flood management

شد. برای جستجوی مقالات فارسی از پایگاه نورمگز[1]، اس‌ای‌دی[2]، سیویلیکا[3]، مگ‌ایران[4] و آی‌اس‌سی[5]، استفاده شد. براساس موارد بیان‌شده، ۳۱۰ مقاله یافت شد.

جهت غربالگری مقالات از چک‌لیست ارزیابی کیفی و ابزار برنامه مهارت‌های ارزیابی حیاتی CASP (Critical Appraisal Skills Program) استفاده شد. ابزارهای بالا به هر سه سطح اعتبار (بی‌چون‌وچرا، معتبر، پشتیبانی‌نشده) می‌پردازند و به‌صورت آنلاین قابل‌دسترس و شامل ۱۰ سؤال تخصصی و واضح برای ارزیابی با استفاده از یک مقیاس ۴ گزینه‌ای (بله – خیر – نامشخص – غیرقابل‌اجرا) هستند. چک‌لیست کسپ نیز شامل ۳ بخش ارزیابی است (آیا نتایج حاصل از مطالعه معتبر است؟ - "نتایج چیست؟" - "آیا نتایج به‌صورت محلی کمک می‌کند؟" با استفاده از یک ارزیابی سه‌گزینه‌ای (بله - نه - نمی‌توانم بگویم) صورت می‌گیرد (کرستینا[6]، ۲۰۱۸). هریک از مقالات باتوجه به روش کسپ (روخنده و همکاران،۱۴۰۲)، امتیاز داده شد و مقالاتی که جمع امتیازهای آن‌ها از ۲۱ بیشتر شد (تکیه یان و جهانیان،۱۴۰۲)، به لحاظ علمی و کیفی تأیید و مابقی حذف شدند. با کنار گذاشتن مقالات تکراری و نامرتبط، ۲۴۹ مقاله مورد تجزیه‌وتحلیل موجز قرار گرفت.

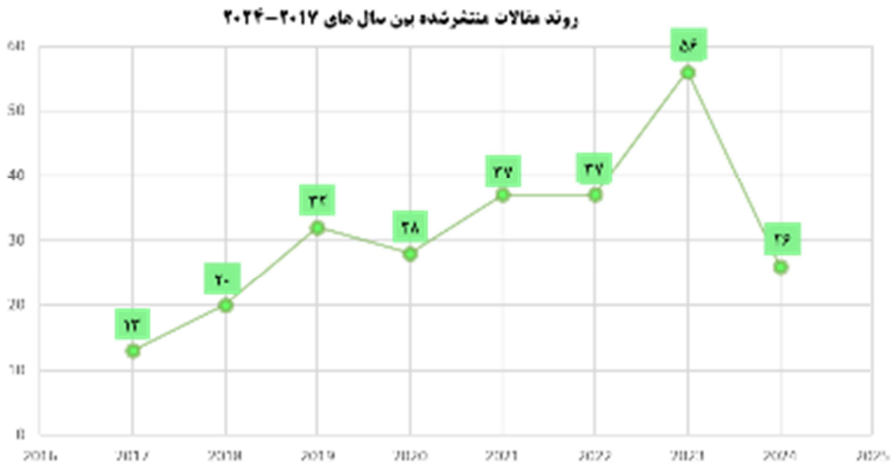


شکل ۳: فرآیند غربالگری مطالعات جهت ورود به مرحله فراتحلیل

نتایج و بحث:

از این تعداد ۵۸ مقاله فارسی و ۱۹۱ مقاله انگلیسی بوده‌اند. به‌صورت کلی روند پرداختن به این مفهوم سال ۲۰۱۷ افزایش قابل‌توجهی داشته است. این موضوع در شکل (۴) به خوبی نمایان است. در این میان ۴۶ مقاله مروری (۱۸٪) و مابقی (۸۲٪) مقالات کاربردی و تجربی بوده‌اند.

[1] Noor Mags
[2] SID
[3] civilica
[4] Magiran
[5] ISC
[6] Chrastina



شکل۴: روند مقالات منتشرشده بین سال های ۲۰۲۴-۲۰۱۷ در نشریات علمی

جدول ۱: تعداد مقالات انتخاب‌شده از هر کلیدواژه به تفکیک سال

کلیدواژه	۲۰۱۷	۲۰۱۸	۲۰۱۹	۲۰۲۰	۲۰۲۱	۲۰۲۲	۲۰۲۳	۲۰۲۴
تاب‌آوری در برابر سیل	۹	۱۴	۲۷	۲۶	۳۴	۳۴	۳۹	۲۲
مدیریت سیل	۴	۶	۵	۲	۳	۳	۱۷	۴

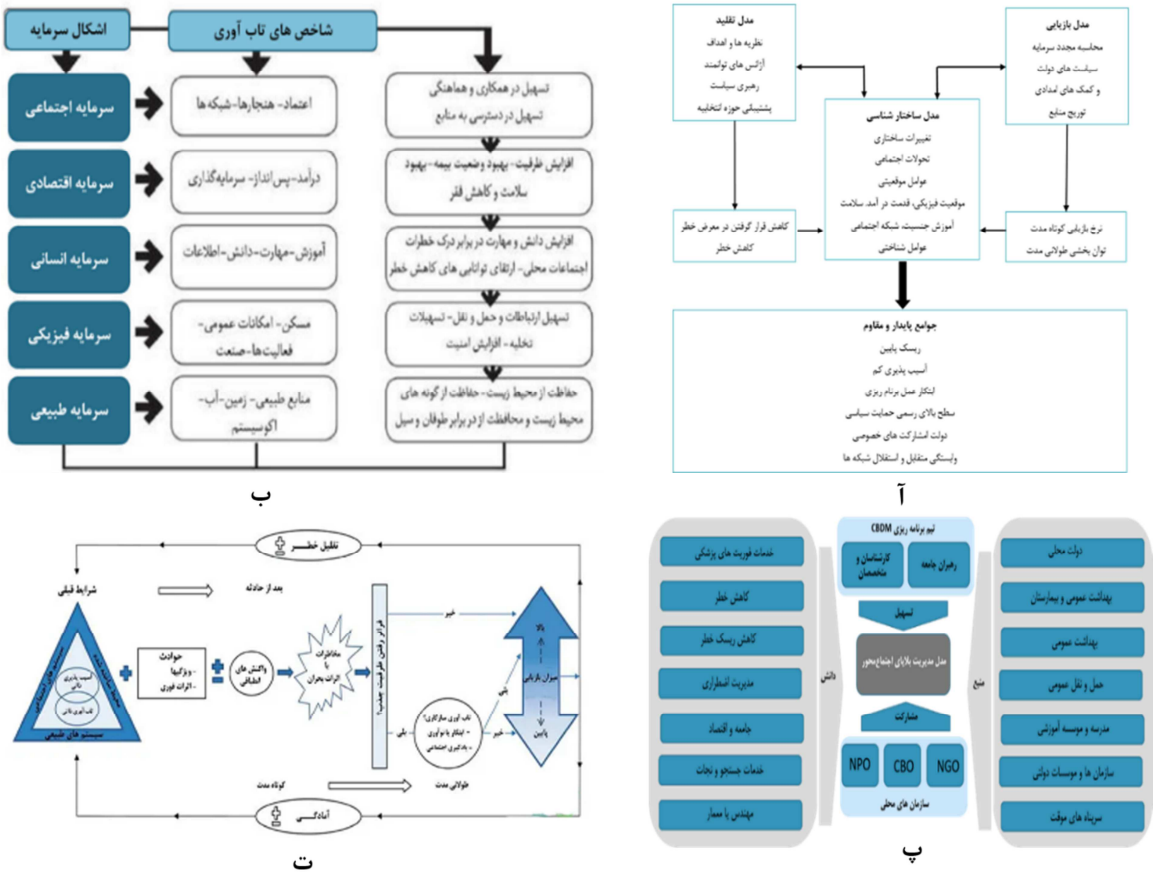
این رویکرد در کشورهای زیادی مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است. برای درک بهتر این پراکنش، شکل (۵) تهیه شده است. از نظر پراکندگی جغرافیایی پژوهش، قاره آسیا (۱۳۱ مقاله) بیشترین تعداد مطالعات را به خود اختصاص داده است و پس از آن، قاره اروپا (۶۹ مقاله) و کمترین مطالعات مربوط به قاره استرالیا و اقیانوسیه (۵) می‌باشد.



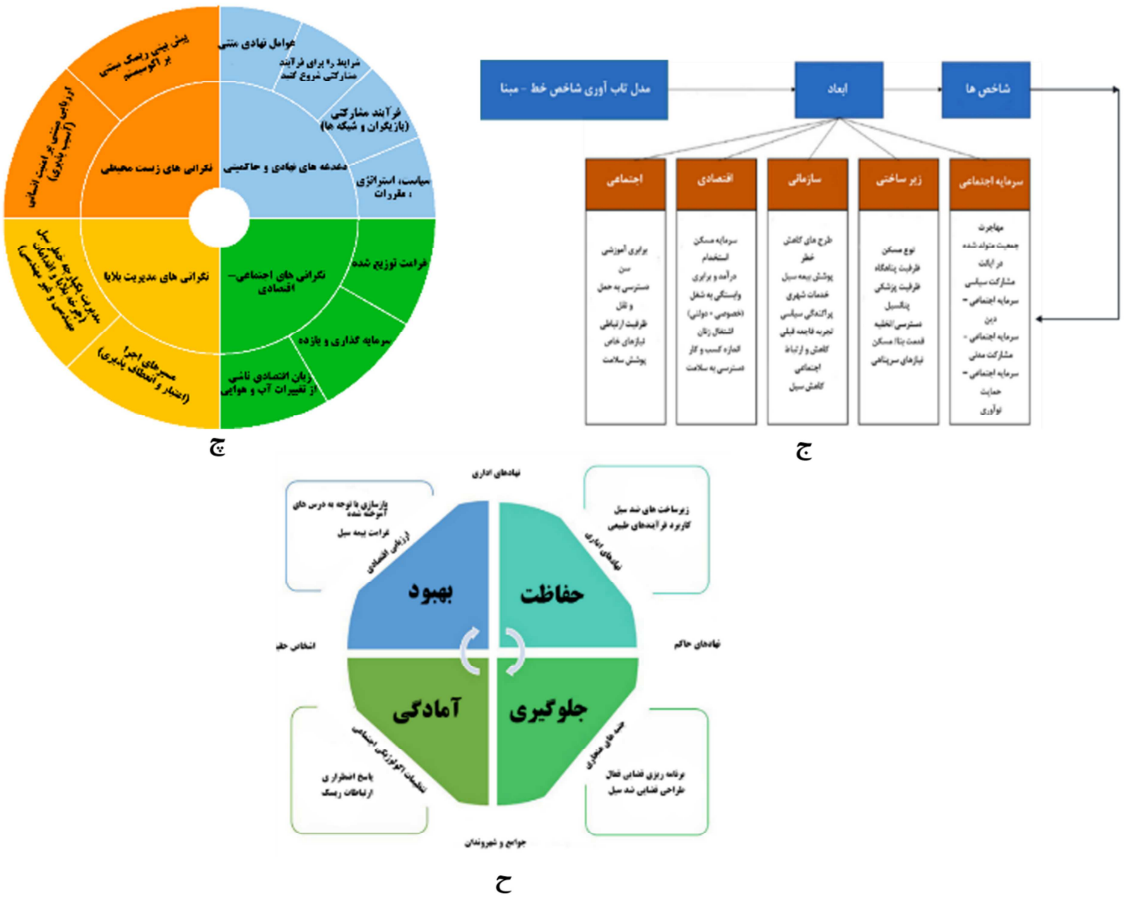
شکل ۵: پراکنش فضایی مطالعات مورد بررسی در جهان

با بررسی ادبیات نظری در زمینه رویکرد تاب‌آوری در برابر سیل، دریافت شد که سنگ بنای بیشتر مطالعات بر ابعاد اصلی و عنوان‌شده توسط هالینگ استوار شده است. تاکنون مدل‌های مختلفی از جانب برخی از پژوهشگران در این زمینه پیشنهاد شده است که هر یک به جنبه‌ای خاص از تاب‌آوری در برابر بلایا پرداخته‌اند. برخی از پژوهشگران همانند توبین (۱۹۹۹)، برای نشان دادن نحوه پایداری و تاب‌آوری جامعه، سه الگو تقلیل خطر، الگوی بازیابی و الگوی ساختاری – جمعیتی استفاده شده است (توبین[1]،۱۹۹۹). هدف نهایی این چارچوب، دسترسی به میزان پایداری و تاب‌آوری اجتماعات در مقابل مخاطرات طبیعی است و تعدادی دیگر از پژوهشگران مانند مایانگا (۲۰۰۷) مدل سرمایه محور را به‌عنوان چارچوبی برای ارزیابی تاب‌آوری جامعه در برابر بلایا مبتنی بر انواع سرمایه (اجتماعی، اقتصادی، فیزیکی، انسانی و طبیعی) مطرح کردند. هر یک از انواع سرمایه، حوزه مستقلی دارد و می‌تواند به‌وسیله عوامل مختلف و ارتباط این عوامل باهم، برای ارزیابی تاب‌آوری جامعه در برابر بلایا اندازه‌گیری شود. (مایانگا[2]،۲۰۰۷). یا کاتر در سال (۲۰۰۸)، چارچوبی تحت عنوان مدل مکانی را ارائه کرد که برای ارائه رابطه تاب‌آوری و آسیب‌پذیری طراحی شده است. این مدل، تاب‌آوری را به‌عنوان یک فرآیند دینامیک و وابسته به شرایط پیشین، شدت بلایا، زمان بین مخاطرات و تأثیرات عوامل برونگرا تعریف می‌کند که گام اول این مدل، ارائه یک مجموعه پیشنهادی از متغیرهای اکولوژیکی، اجتماعی، اقتصادی و نهادی است. (کاتر[3]،۲۰۰۸). مدل مدیریت بلایای اجتماع‌محور، یک رویکرد مدیریتی پایین به بالا است که به مشارکت مردم در حل بحران‌های ناشی از وقوع بلایای طبیعی توجه دارد که درواقع هدف از آن، کاهش آسیب‌پذیری جوامع و تقویت توانایی‌ها و مشارکت مردم برای مقابله با خطرات ناشی از وقوع بلایای طبیعی است (بیستا[4]، ۲۰۲۳). شاخص‌های استفاده‌شده در این مدل، اثرات اجتماعی مقابله‌های مبتنی بر مشکل و حس اجتماع جمعیت، سلامتی، آموزش، آگاهی سرمایه اجتماعی NGOها در نظر قرار دارد. کاراش و همکاران (۲۰۲۱) چارچوبی را به‌عنوان یک ابزار مدیریتی برای بازیگران و مؤسسات شاغل در مدیریت رودخانه و منطقه ساحلی برای درک پیچیدگی و به هم پیوستگی ابعاد و مقیاس‌های مختلف مربوط به تاب‌آوری در برابر سیل ارائه دادند که در آن ۴بعد اصلی آمادگی، بهبود، جلوگیری و حفاظت را برای ارزیابی تاب‌آوری در برابر سیل نشان داده‌اند (کاراش[5] و همکاران،۲۰۲۱). (جدول ۲).

[1] Tobin
[2] Mayunga
[3] Cutter
[4] Bista
[5] Karrasch



شکل آ: جوامع پایدار و مقاوم در برابر مخاطرات محیطی: چارچوبی برای تجزیه‌وتحلیل، ب: درک و استفاده از مفهوم تاب‌آوری در برابر بلایا با استفاده از رویکرد مبتنی بر سرمایه، پ: مدل مدیریت بلایای اجتماع‌محور، ت: مدل مکانی تاب‌آوری در برابر بلایا



شکل ج: مدل شاخص خط – مبنا در برابر بلایا ، چ: چهار بعد مورد ارزیابی در تاب‌آوری در برابر سیل پ: چارچوب ارزیابی تاب‌آوری در برابر سیل

عوامل تاثیرگذار بر رویکرد تاب‌آوری در برابر سیل

در مطالعات صورت‌گرفته درخصوص ارزیابی و کاربرد رویکرد تاب‌آوری در برابر سیل، عوامل مختلفی درنظر گرفته شده‌اند. برخی از پژوهشگران همانند وانگ[1] و همکاران (۲۰۱۹) تنها ابعاد زیرساختی و اجتماعی را بررسی کرده‌اند. تعدادی از پژوهشگران نیز مانند فتوحی اهل و همکاران (۲۰۲۲) عوامل کالبدی را موثر در تحقق رویکرد دانسته‌اند. در برخی پژوهش‌ها نیز دسته‌بندی عوامل موثر بر رویکرد در ابعاد مختلف اجتماعی، کالبدی، زیست‌محیطی، اقتصادی، نهادی و ... خلاصه شده است. در این پژوهش سعی گشته با دیدی مشرف بر موضوع و درنظرگرفتن تمام عوامل برشمرده در مقالات هدف، دسته‌بندی مناسبی انجام گیرد. به‌طورکلی معیارها در ۶ دسته: کالبدی - محیطی، زیست‌محیطی، زیرساختی، اجتماعی، اقتصادی ، نهادی درنظر گرفته شده است.

[1] Wang

جدول ۳: عوامل و معیارهای موثر بر تبیین رویکرد تاب‌آوری در برابر سیل

معیارها	زیرمعیارها	پژوهشگران
اجتماعی	مشارکت	Abdel-Mooty et al.2022, Ariyaningsih & Shaw, (2022), Leandro et al.,2020 بهرامی و همکاران، ۱۳۹۸ بهیارفرد و همکاران، ۱۴۰۱، شایان و همکاران، ۱۳۹۶
	آگاهی/دانش	Bertilsson et al.,2019, Campbell et al.2019, Krivtsov et al.,2020, Miguez & Veról, (2017) بهیارفرد و همکاران، ۱۴۰۱، شایان و همکاران، ۱۳۹۶
	رضایت	Campbell et al.2019, Chang et al.,2021, Khatooni et al.,2023, Leandro et al20
	اطلاع‌رسانی	Coletta et al.,2024 بهیارفرد و همکاران، ۱۴۰۱، دانشوری نسب و همکاران، ۱۴۰۰، شایان و همکاران، ۱۳۹۶
	سلامت	Khatooni et al.,2023, Leandro et al.,2020, Zhu et al.,2024,
	سن	Krivtsov et al.,2020, Leandro et al.,2020, Zhu et al.,2024 ابدالی و همکاران، ۱۴۰۲، بهرامی و همکاران، ۱۳۹۸، دانشوری نسب و همکاران، ۱۴۰۰
	جنسیت	Coletta et al.,2024, Karamouz et al.,2018, Leandro et al.,2020, Zhu et al.,2024 بهرامی و همکاران، ۱۳۹۸، دانشوری نسب و همکاران، ۱۴۰۰
	وضعیت تاهل	Leandro et al.,2020, Miguez & Veról, (2017)
	سطح تحصیلات	Khodadad et al.,2023, Khunwishit et al.2018, Zhu et al.,2024 ابدالی و همکاران، ۱۴۰۲، بهرامی و همکاران، ۱۳۹۸، دانشوری نسب و همکاران، ۱۴۰۰
	شغل و درآمد	Krivtsov et al.,2020, Leandro et al.,2020, Miguez & Veról, (2017), Zhu et al.,2024 ابدالی و همکاران، ۱۴۰۲، بهرامی و همکاران، ۱۳۹۸، دانشوری نسب و همکاران، ۱۴۰۰
	جمعیت (دارای معلولیت/مستقل)	Khatooni et al.,2023, Khunwishit et al.2018, Miguez & Veról, (2017), Zhu et al.,2024 ابدالی و همکاران، ۱۴۰۲، بهرامی و همکاران، ۱۳۹۸
	ظرفیت ارتباطی	Khodadad et al.,2023, Krivtsov et al.,2020, Miguez & Veról, (2017) ابدالی و همکاران، ۱۴۰۲، بهرامی و همکاران، ۱۳۹۸، دانشوری نسب و همکاران، ۱۴۰۰
	امنیت اجتماعی	Krivtsov et al.,2020, Leandro et al.,2020, Manandhar et al.,2023 دانشوری نسب و همکاران، ۱۴۰۰
	حس تعلق محله‌ای	Huang & Wang, (2024), Khodadad et al.,2023
	روابط همسایگی	Khunwishit et al.2018, Miguez & Veról, (2017), Zhu et al.,2024 بهرامی و همکاران، ۱۳۹۸، دانشوری نسب و همکاران، ۱۴۰۰
	بیمه	Karamouz et al.,2018, Krivtsov et al.,2020, Manandhar et al.,2023, Zhu et al.,2024 شایان و همکاران، ۱۳۹۶
	مهارت	Krivtsov et al.,2020, Leandro et al.,2020, Manandhar et al.,2023 بهرامی و همکاران، ۱۳۹۸، دانشوری نسب و همکاران، ۱۴۰۰
	شبکه‌های اجتماعی	Khunwishit et al.2018, Krivtsov et al.,2020, Zhu et al.,2024
	ارزش‌های جامعه	Karamouz et al.,2018, Khatooni et al.,2023, Krivtsov et al.,2020, Miguez & Veról, (2017)
اقتصادی	سیاست‌های حمایتی	Leandro et al.,2020, Leandro et al.,2020
	بازگشت به شرایط مناسب (ظرفیت با توانایی جبران خسارت‌ها و توانایی برگشت به شرایط شغلی و درآمدی مناسب درقالب درامد)	Campbell et al.2019, Coletta et al.,2024, Karamouz et al.,2018, Leandro et al.,2020 بهیارفرد و همکاران، ۱۴۰۱
	پس انداز	Coletta et al.,2024, Forrest et al.,2017, Manandhar et al.,2023, Zhu et al.,2024
	آسیب‌پذیری دارایی و اموال	Manandhar et al.,2023, Miguez & Veról, (2017) ابدالی و همکاران، ۱۴۰۲، حاتمی نژاد و همکاران، ۱۴۰۲
	کمک مالی اقوام	Forrest et al.,2017. Khunwishit et al.2018, Miguez & Veról, (2017) ابدالی و همکاران، ۱۴۰۲، حاتمی نژاد و همکاران، ۱۴۰۲
	تنوع شغلی درآمدی	Coletta et al.,2024, Khatooni et al.,2023. Khunwishit et al.2018, Zhu et al.,2024 ابدالی و همکاران، ۱۴۰۲، حاتمی نژاد و همکاران، ۱۴۰۲

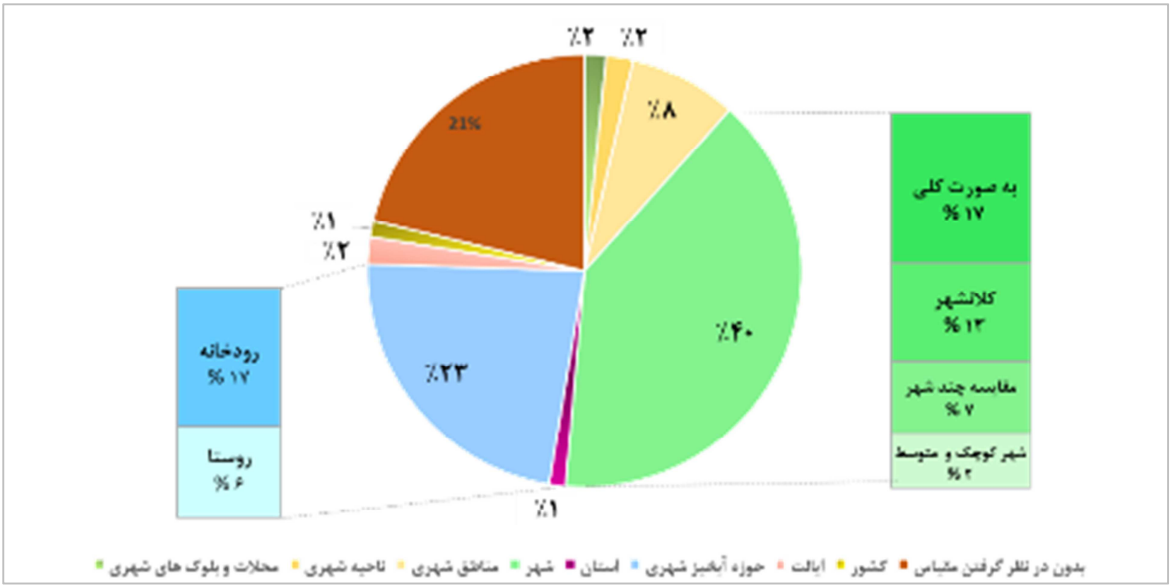
	کمک‌های مالی سازمان	Forrest et al.,2017. Khunwishit et al.2018, Leandro et al.,2020, Miguez & Veról, (2017) بهیارفرد و همکاران، ۱۴۰۱
	میزان خسارت بنا به ماهیت شغل سرپرست خانواده	Forrest et al.,2017, Karamouz et al.,2018. Khunwishit et al.2018, Leandro et al.,2020, Manandhar et al.,2023, Miguez & Veról, (2017), Zhu et al.,2024
کالبدی	نوع مالکیت مسکن	Campbell et al.2019, Krivtsov et al.,2020, Manandhar et al.,2023 ابدالی و همکاران، ۱۴۰۲، ابراهیمی‌پور و همکاران، ۱۳۹۷، اسدافروز و همکاران، ۱۳۹۹، اکبری زرین و همکاران، ۱۴۰۲
	مساحت واحد مسکونی	Chang et al.,2021, Huang & Wang, (2024), Krivtsov et al.,2020, Miguez & Veról, (2017) ابدالی و همکاران، ۱۴۰۲، ابراهیمی پور و همکاران، ۱۳۹۷، اکبری زرین و همکاران، ۱۴۰۲، ملکی و همکاران، ۱۴۰۲
	قدمت بنا	Forrest et al.,2017, Huang & Wang, (2024), Khodadad et al.,2023 ابدالی و همکاران، ۱۴۰۲، اسدافروز و همکاران، ۱۳۹۹، شایان و همکاران، ۱۳۹۶
	تعداد طبقات	Khodadad et al.,2023. Khunwishit et al.2018, Miguez & Veról, (2017) ابدالی و همکاران، ۱۴۰۲، ابراهیمی پور و همکاران، ۱۳۹۷، اسدافروز و همکاران، ۱۳۹۹، ملکی و همکاران، ۱۴۰۲، شایان و همکاران، ۱۳۹۶
	شیب زمین	Huang & Wang, (2024), Khodadad et al.,2023, Miguez & Veról, (2017)
	کیفیت بنا	Khodadad et al.,2023. Khunwishit et al.2018 اکبری زرین و همکاران، ۱۴۰۲، بهیارفرد و همکاران، ۱۴۰۲، بهیارفرد و همکاران، ۱۴۰۲، فتوحی اهل و همکاران، ۱۴۰۱، شایان و همکاران، ۱۳۹۶
	سازه بنا	Forrest et al.,2017, Gyawali et al.,2021, Manandhar et al.,2023 ابدالی و همکاران، ۱۴۰۲، اسدافروز و همکاران، ۱۳۹۹، اکبری زرین و همکاران، ۱۴۰۲، بهیارفرد و همکاران، ۱۴۰۲، شایان و همکاران، ۱۳۹۶
	دانه‌بندی	Khodadad et al.,2023. Khunwishit et al.2018 اسدافروز و همکاران، ۱۳۹۹، اکبری زرین و همکاران، ۱۴۰۲، بهیارفرد و همکاران، ۱۴۰۲، ملکی و همکاران، ۱۴۰۲
	بافت فرسوده شهری	Khatooni et al.,2023, Khodadad et al.,2023, Miguez & Veról, (2017) ابدالی و همکاران، ۱۴۰۲، ابراهیمی‌پور و همکاران، ۱۳۹۷، بهیارفرد و همکاران، ۱۴۰۲، فتوحی اهل و همکاران، ۱۴۰۱
	ساختمان‌های موجود در حریم رودخانه	Forrest et al.,2017, Huang & Wang, (2024), Leandro et al.,2020 ابراهیمی‌پور و همکاران، ۱۳۹۷، اسدافروز و همکاران، ۱۳۹۹، بهیارفرد و همکاران، ۱۴۰۲، شایان و همکاران، ۱۳۹۶
	کاربری زمین	Huang & Wang, (2024), Khodadad et al.,2023 ابراهیمی پور و همکاران، ۱۳۹۷ اکبری زرین و همکاران،۱۴۰۲، ملکی و همکاران،۱۴۰۲
	فضای سبز	Karamouz et al.,2018, Khodadad et al.,2023 اسدافروز و همکاران، ۱۳۹۹ اکبری زرین و همکاران، ۱۴۰۲، ملکی و همکاران، ۱۴۰۲، فتوحی اهل و همکاران، ۱۴۰۱
	شرین‌های ارتباطی	ابدالی و همکاران، ۱۴۰۲، ابراهیمی‌پور و همکاران، ۱۳۹۷، بهرامی و همکاران، ۱۳۹۸
زیرساختی	پتانسیل دسترسی تخلیه	Campbell et al.2019, Chang et al.,2021, Forrest et al.,2017 بهیارفرد و همکاران ، ۱۴۰۱، ملکی و همکاران، ۱۴۰۲
	دسترسی به آتش نشانی، بیمارستان و مراکز نظامی	de Bruijn et al.,2019, Forrest et al.,2017 بهیارفرد و همکاران، ۱۴۰۱، فتوحی اهل و همکاران، ۱۴۰۱، شایان و همکاران، ۱۳۹۶
	حفظ حریم بستر رودخانه	Forrest et al.,2017, Gyawali et al.,2021 بهیارفرد و همکاران، ۱۴۰۱، ملکی و همکاران، ۱۴۰۲
	دسترسی به آب /برق/تلفن و...	Khatooni et al.,2023, Krivtsov et al.,2020 ابدالی و همکاران، ۱۴۰۲، بهیارفرد و همکاران، ۱۴۰۱، فتوحی اهل و همکاران، ۱۴۰۱، شایان و همکاران، ۱۳۹۶

	فاضلاب شهری	de Bruijn et al.,2019, Gyawali et al.,2021, Khodadad et al.,2023, Manandhar et al.,2023
	در دسترس بودن سرپناه موقت	Krivtsov et al.,2020, Manandhar et al.,2023 ملکی و همکاران، ۱۴۰۲، شایان و همکاران، ۱۳۹۶
نهادی	بستر نهادی	Karamouz et al.,2018, Khatooni et al.,2023 ابدالی و همکاران، ۱۴۰۲، بهرامی و همکاران، ۱۳۹۸ بهیارفرد و همکاران، ۱۴۰۱، حاتمی نژاد و همکاران، ۱۴۰۲
	روابط نهادی	Khunwishit et al.2018, Krivtsov et al.,2020 ابدالی و همکاران، ۱۴۰۲ بهیارفرد و همکاران، ۱۴۰۱، حاتمی نژاد و همکاران، ۱۴۰۲
	عملکرد نهادها/ادارات	Khunwishit et al.2018, Krivtsov et al.,2020 ابدالی و همکاران، ۱۴۰۲، بهرامی و همکاران، ۱۳۹۸، حاتمی نژاد و همکاران، ۱۴۰۲
	استقلال نهادها	Gyawali et al.,2021 ابدالی و همکاران، ۱۴۰۲، بهرامی و همکاران، ۱۳۹۸ بهیارفرد و همکاران، ۱۴۰۱
	منابع و امکانات سازمان-های امدادرسانی	Khatooni et al.,2023, Khodadad et al.,2023, Krivtsov et al.,2020 حاتمی نژاد و همکاران، ۱۴۰۲
	ویژگی فیزیکی نهادها (نظیر تعداد نهاد محلی)	Khodadad et al., 2023, Khunwishit et al.2018
زیست-محیطی	پارک‌ها و فضاهای سبز شهری	شایان و همکاران، ۱۳۹۶Krivtsov et al.,2020, Meng et al.,2020

مقیاس‌های بررسی رویکرد تاب‌آوری در برابر سیل

ماهیت رویکرد تاب‌آوری در برابر سیل بدین صورت است که در بیشتر مطالعات به‌خصوص مطالعات تجربی، در یک مقیاس خاص پژوهش انجام می‌گیرد. بیشترین مقیاس مورد بررسی درخصوص این رویکرد، شهر (بیش از ۴۰٪ مطالعات مورد بررسی) و حوزه آبخیز شهری (۲۳٪ مطالعات مورد بررسی) است. (برای مثال مراجعه شود به ویتال[1] و همکاران، ۲۰۲۰؛ سن[2] و همکاران، ۲۰۲۱؛ منادار[3] و همکاران، ۲۰۲۳). ازآنجایی‌که بیشتر مطالعات بر رویکرد تاب-آوری در برابر سیل تمرکز داشته‌اند، مقیاس شهر با اقبال بیشتری روبه‌رو بوده است. همچنین، به‌دلیل کاربرد بیشتر این رویکرد، به‌عنوان اولین بررسی‌ها در بیشتر شهرها به‌صورت کلی ویا در کلانشهرهای بزرگ (۴۳٪ و ۳۳٪ از مطالعات مقیاس شهر) و همچنین در رودخانه‌ها (۴۳٪ از مطالعات مقیاس حوزه آبخیز شهری) مورد مطالعه قرار گرفته است. در مطالعاتی که با عنوان تاب‌آوری در برابر سیلاب شهری بررسی شده‌اند، مقیاس محلات و بلوک‌های شهری مورد بررسی قرار گرفته است که تعداد این مطالعات نیز بسیار کم (۲٪ مطالعات مورد بررسی) است (برای مثال مراجعه شود به حاتمی‌نژاد و همکاران ، ۱۴۰۲؛ سلطانی و همکاران ، ۱۴۰۳؛ اکبری زرین و همکاران،۱۴۰۲) تعداد کمی از مطالعات (کمتر از یک درصد) در مقیاس استان یا کشور انجام شده‌اند. برخی از پژوهش‌ها نیز به توصیف و تحلیل خود رویکرد پرداخته‌اند و به مقیاس خاصی اشاره نداشته‌اند که ۲۱٪ مقالات رو به خود اختصاص داده‌اند. جزئیات این مقیاس‌ها در شکل (۶) نمایش داده شده است.

[1] Vitale
[2] Sen
[3] Manandhar



شکل ۶: مقیاس مکان در مقالات رویکرد تاب‌آوری در برابر سیل

باتوجه بررسی‌های صورت‌گرفته، بیشترین مقیاس مورد استفاده‌شده در مطالعات ایران در مقیاس شهر (۲۸ درصد) و مقیاس روستا (۱۹ درصد) بوده است و در مطالعات جهان در مقیاس حوزه پیرامون رودخانه شهری (۱۷ درصد) است.

روش‌های ارزیابی و سنجش رویکرد تاب‌آوری در برابر سیل

طیف گسترده‌ای از اهداف پژوهش در مقالات مورد بررسی، منجر به بکارگیری انواع فرایندهای اجرای پژوهش شده است. به‌گونه‌ای که برخی از مطالعات با روش‌های کمی، برخی با روش‌های کیفی و تعدادی نیز با روش‌های آمیخته به نتیجه رسیده‌اند. همچنین، برخی مطالعات به‌صورت فراتحلیل به مرور مطالعات پیشین پرداخته‌اند.

روش‌های کمی

در این پژوهش، ۳۶ درصد از مطالعات براساس روش‌های کمی انجام شده است. بنا به هدف پژوهش، عموما سه موضوع را به‌صورت کمی مورد سنجش قرار می‌دهند: اول) جامعه آماری محدوده مورد مطالعه، دوم) باتوجه به مولفه-های مورد نظر پژوهش ارائه‌شده، به سنجش آنها در محدوده پرداخته می‌شود و سوم) چگونگی و تبیین میزان مخاطرات و سنجش تاب‌آوری در محدوده. هر کدام از این سه، بنا به روش گردآوری داده‌ها و اطلاعات در دسترس، از انواع روش‌های تحلیل کمی که در جدول (۳) قابل‌مشاهده است، استفاده کرده‌اند. روش‌های گردآوری اطلاعات نیز در جدول (۴) تهیه شده است. (برای مثال: لئاندرو[1] و همکاران، ۲۰۲۰؛ خو[2] و همکاران، ۲۰۲۴؛ ژو و لیو[3]، ۲۰۲۱؛ عابدی سروستانی، ۱۴۰۱؛ بهروزی و همکاران، ۱۴۰۱؛ اکبری زرین و همکاران، ۱۴۰۲).

[1] Leandro
[2] Xu
[3] Zhu & Liu

جدول ۳: روش‌های تحلیل کمی در مقالات مورد بررسی

فراوانی	انواع روش‌های تحلیل مورد استفاده در مقالات	رویکرد پژوهش
۳	روش‌های مبتنی بر تصمیم‌گیری چندمعیاره MCDM	کمی
۱۲	انواع تحلیل‌های همبستگی و رگرسیون	
۱۵	انواع تحلیل سلسله‌مراتبی (روش‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه AHP و topsis)	
۱	مدلسازی ساختاری – تفسیری ISM	
۵	روش تصمیم‌گیری چندمعیاره ترکیبی: مدل ترکیبی AHP-TOPSIS, DANP	
۲	(روش فرایند تحلیل شبکه‌ای) ANP	
۷	انواع تحلیل آزمون‌های آمار توصیفی (فراوانی به درصد و میانگین) و استنباطی (Tتک نمونه‌ای و ضریب پیرسون)	
۱	روش DPSIR یا مدل (نیروی محرکه - فشار- وضعیت- تاثیر- پاسخ)	
۴	انواع تحلیل‌های معادلات ساختاری	
۳	انواع تحلیل‌های آماری FRI (شاخص خطر سیل)	
۳۷	سایر : انواع مدل‌های شبیه‌سازی ریاضی، انواع تحلیل فضایی، مدل‌سازی آماری تحلیل عاملی و ...	
۹۰	**جمع**	

روش‌های کیفی

پژوهش‌های کیفی طیف وسیعی از پژوهش‌ها را تشکیل می‌دهند که در این پژوهش به (۳۹ درصد) می‌رسد که از نظر پارادایم پژوهش، نوع پرسش‌های پژوهش و همچنین از نظر نحوه گردآوری داده و عمق پژوهش، با پژوهش‌های کمی تفاوت دارند. به لحاظ پرکاربرد بودن این رویکرد در رشته‌های مختلف، بخش زیادی از مطالعات کیفی به داده-های کتابخانه‌ای / مشاهدات میدانی و مستندنگاری پرداخته‌اند. تعدادی از مطالعات کیفی از ابزار مصاحبه به تحلیل بررسی شهرهایی که تجربه سیل داشتند، پرداختند و در این بین نتایج ارزشمندی حاصل شده است. همچنین، این نوع مقالات با اختلاف کمی با مقالات کمی، بیشترین مطالعات را شکل داده‌اند. در جدول (۴) انواع روش‌های گردآوری داده در مقالات مورد بررسی مشاهده می‌شود. (برای مثال: سفتون[1] و همکاران، ۲۰۲۲؛ مهریار و سورمینسکی[2]، ۲۰۲۲؛ چانگ[3] و همکاران، ۲۰۲۱).

روش‌های آمیخته

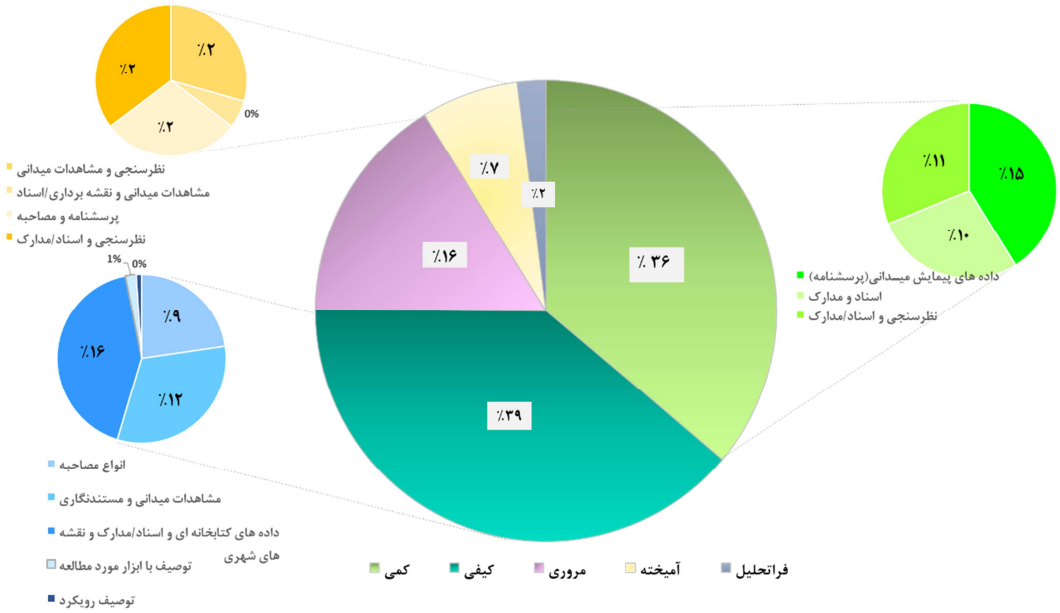
با هدف ارزیابی دقیق‌تر رویکرد تاب‌آوری در برابر سیل، برخی از مطالعات به‌صورت روش‌های آمیخته صورت گرفته-اند. که در این میان مقالات با رویکرد آمیخته در این پژوهش (۷ درصد) بوده است. در این مطالعات بخش کمی پژوهش از همان تحلیل‌های نام‌برده در جدول (۳) استفاده کرده‌اند و برای بررسی عمیق‌تر با انواع مشاهدات میدانی و مصاحبه‌ها به نتایج کامل‌تری رسیده‌اند. همان‌طورکه در جدول (۴) مشاهده می‌شود، این نوع مقالات کمترین مطالعات را نسبت به رویکردهای دیگر شکل داده‌اند. (برای مثال: فارست[4] و همکاران، ۲۰۲۰؛ خاتونی[5] و همکاران، ۲۰۲۳؛ ژو[6] و همکاران، ۲۰۲۴؛ گیوالی[7] و همکاران، ۲۰۲۱؛ پروری و همکاران، ۱۴۰۲؛ کمالی و قاسمی، ۱۴۰۲).

[1] Sefton
[2] Mehryar & Surminski
[3] Chang
[4] Forrest
[5] Khatooni
[6] Zhu
[7] Gyawali

جدول ۴: رویکردها و ابزارهای گردآوری داده در مقالات رویکرد تاب‌آوری در برابر سیل

فراوانی		ابزار گردآوری داده‌های پژوهش	رویکردهای پژوهش
۹۰	۳۷	داده های پیمایش میـــدانی(پرسشنامه)	کمی
	۲۵	اسناد و مدارک	
	۲۸	نظرسنجی و اسناد/مدارک	
۹۷	۲۲	انواع مصاحبه	کیفی
	۳۱	مشاهدات میدانی و مستندنگاری	
	۴۱	داده‌های کتابخانه‌ای و اسناد/مدارک و نقشه‌های شهری	
	۲	توصیف با ابزار مورد مطالعه	
	۱	توصیف رویکرد	
۱۷	۵	نظرسنجی و مشاهدات میدانی	آمیخته
	۱	مشاهدات میدانی و نقشه‌برداری/اسناد	
	۵	پرسشنامه و مصاحبه	
	۶	نظرسنجی و اسناد/مدارک	
۴۰		داده‌های کتابخانه‌ای (ادبیات نظری)	مروری

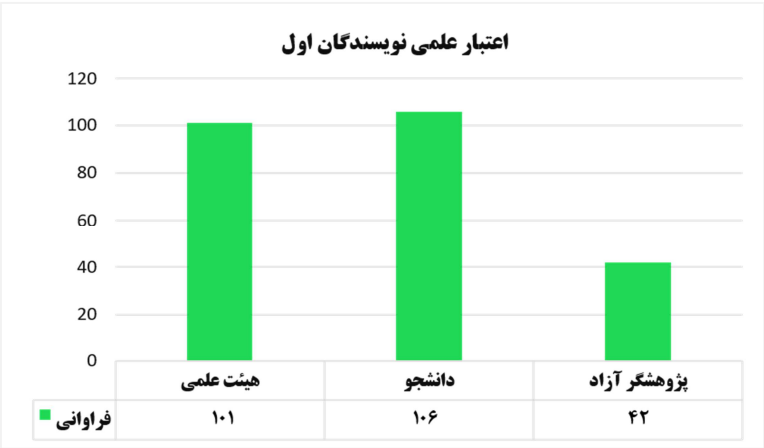
بررسی‌ها نشان داده است که تفاوت‌هایی در روش‌شناسی مطالعات ایران و جهان وجود دارد. به‌گونه‌ای که در ایران بیشترین مطالعات انجام‌شده با روش کمی (۶۶ درصد) است و در مطالعات جهان بیشترین مطالعات از روش کیفی (۴۶ درصد) استفاده شده است.



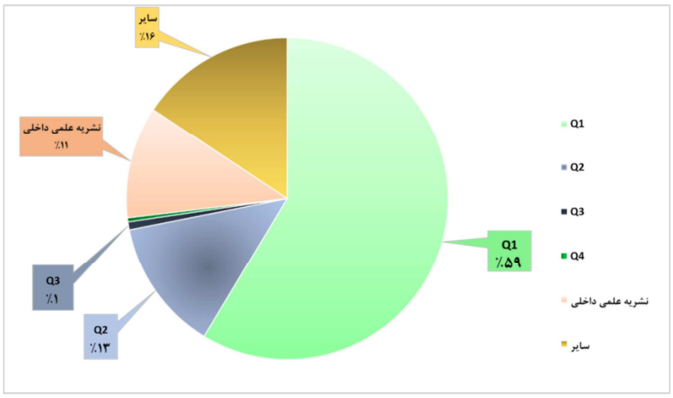
شکل ۷: رویکردها و ابزارهای گردآوری داده در مقالات رویکرد تاب‌آوری در برابر سیل

اعتبار علمی مقالات

به منظور بررسی اعتبار علمی مقالات، اعتبار علمی نویسندگان اول مقالات مورد بررسی قرار گرفته‌اند. همان‌طورکه در شکل (۸) قابل‌مشاهده است، نویسنده اول نیمی (۴۳درصد) از مقالات مورد بررسی، دانشجوها هستند. به‌گونه‌ای که ۴۱ درصد از نویسندگان عضو هیئت علمی و ۱۷ درصد از آن‌ها پژوهشگر آزاد بودند. البته گفتنی است که تعداد قابل‌توجهی از آنها دانشجوی مقطع دکتری و کارشناسی ارشد می‌باشند. نتایج در شکل ۸ و ۹ نشان می‌دهد:



شکل ۸: اعتبار علمی نویسندگان اول



شکل ۹: رتبه‌بندی علمی مقالات مورد بررسی

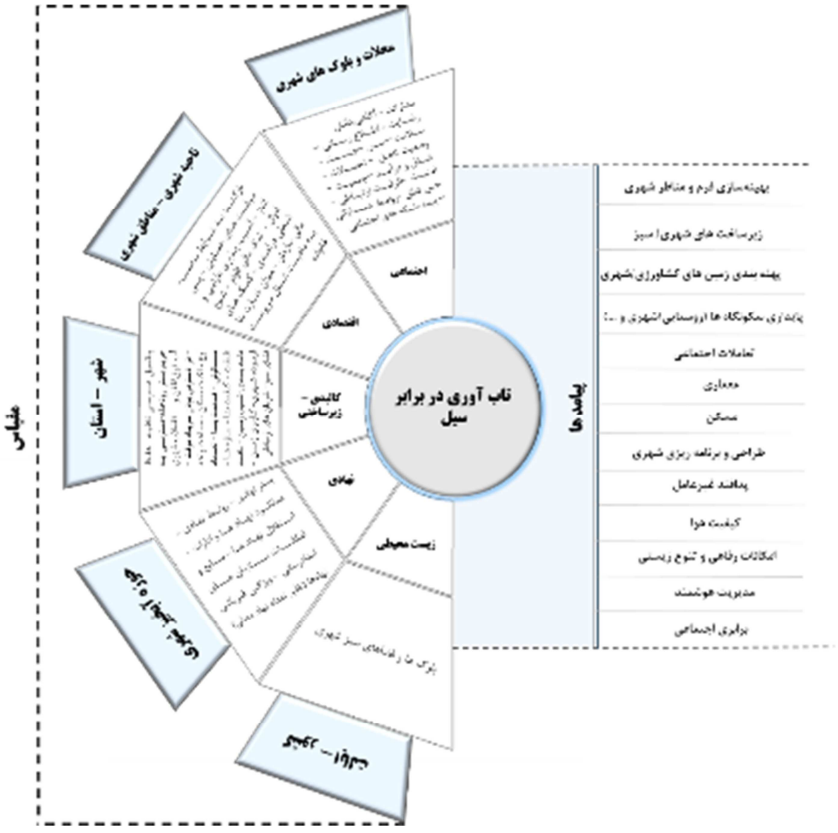
پیامدها و موضوع‌های وابسته به رویکرد تاب‌آوری در برابر سیل

مطالعات مرتبط با رویکرد تاب‌آوری در برابر سیل اصولا توسط پژوهشگران شهری در زیررشته‌های جغرافیا و برنامه-ریزی شهری - روستایی، طراحی شهری، مدیریت و برنامه‌ریزی منابع آب، مدیریت و برنامه‌ریزی محیط‌زیست انجام گرفته است. بنابراین، تنوع رشته‌ای در این موضوع دیده می‌شود. البته به‌دلیل خاصیت میان رشته‌ای بودن شهرسازی، ابعاد مختلف شهر از شهروندان تا محیط‌زیست، اقتصاد، مسکن و ... مورد بررسی قرار گرفته‌اند. بسیاری از مطالعات رویکرد تاب‌آوری در برابر سیل، تاثیرات مثبت این رویکرد بر موضوع‌های دیگر را نشان داده‌اند. در جدول (۵) مفاهیمی در ارتباط با رویکرد تاب‌آوری، نمایش داده شده است.

جدول ۵: موضوع‌های مرتبط با رویکرد تاب‌آوری در برابر سیل

موضوع‌هایی که تاثیر مثبت می‌گیرند	فراوانی	برخی از پژوهشگران در این زمینه
بهینه‌سازی فرم و مناظر شهری	۳	اسدافروز و همکاران،۲۰۲۰، فتوحی اهل و همکاران، ۲۰۲۲،اکبری زرین و همکاران، ۲۰۲۳
زیرساخت‌های شهری/ سبز	۷	کارآموز و خلیلی ،۲۰۱۹ de Bruijn et al.,2019;Šakić Trogrlić et al.,2018;Karamouz et al.,2018;Khodadad et al.,2023;Takin et al.,2023;Coletta et al.,2024
پهنه‌بندی زمین‌های کشاورزی/شهری	۲	ابراهیمی‌پور و زیاری، ۲۰۱۸، فتاحی و بهروزی، ۲۰۲۳
تعاملات اجتماعی	۴	نوری و همکاران، ۲۰۲۰، گله‌دار و همکاران، ۲۰۲۳، دانشوری نسب و همکاران، ۲۰۲۱ Vitale et al.,2020
پایداری سکونگاه‌ها (روستایی/شهری و ...)	۴	شایان و همکاران، ۲۰۱۷، میراسداللهی و همکاران، ۲۰۲۱، بهیارفرد و همکاران، ۲۰۲۳، بهیارفرد و همکاران، ۲۰۲۲
معماری	۱	عبدل‌زاده و همکاران، ۲۰۲۳
مسکن	۶	کمالی و قاسمی، ۲۰۲۳، روحی و همکاران، ۲۰۲۱ Khunwishit et al.2018; Sen et al.,2021;Sen et al.,2021; Sen et al.,2021
طراحی و برنامه‌ریزی شهری	۳	سبک رو و همکاران، ۲۰۲۱ Bertilsson et al., 2019; Miguez & Veról, 2017
پدافند غیرعامل	۱	ملکی و همکاران، ۲۰۲۳
کیفیت هوا	۴	Meng et al., 2020;Leandro et al.,2020;Meng et al.,2019;Huang & Wang, 2024
امکانات رفاهی و تنوع زیستی	۱	Krivtsov et al.,2020
مدیریت هوشمند	۱	Ariyaningsih & Shaw,2022
برابری اجتماعی	۱	Zhang et al.,2024

مطالعات تاب‌آوری در برابر سیل در جهان با مفاهیم متنوعی چون مدیریت هوشمند، اقلیم، مسکن، امکانات رفاهی و تنوع‌زیستی، برنامه‌ریزی شهری و زیرساخت‌های شهری، زیرساخت‌های سبز و بهبود فرم شهری پیوند خورده است. حال آن که این ارتباط مفهومی در مطالعات ایران به کلیدواژه‌های کمتری (بهینه‌سازی فرم و مناظر شهری، پایداری سکونگاه‌ها (روستایی / شهری) و ...) و تعاملات اجتماعی) محدود شده است. در انتها با جمع‌بندی معیارها و شاخص-های مطرح در زمینه تاب‌آوری سیل، می‌توان مطابق شکل ۹ مدلی مفهومی ارائه داد. براساس این مدل مفهومی، شاخص‌های مطرح در زمینه تاب‌آوری سیل را در ۵ بعد کالبدی - زیرساختی (قدمت بنا، کیفیت بنا، ریزدانگی، دانه-بندی و کاربری زمین ...)، اجتماعی (مشارکت ، جنسیت، سن، تحصیلات، بیمه و ...)، اقتصادی (تنوع شغلی درآمدی، کمک‌های مالی سازمان، آسیب‌پذیری دارایی، اموال، پس‌انداز و ...)، نهادی (استقلال نهادها، عملکرد نهادها، روابط نهادی و ...) و زیست‌محیطی (پارک‌ها و فضاهای شهری) دسته‌بندی نمود. هر یک از این شاخص‌ها براساس مقیاس-های مختلف (شهر، محله، بلوک‌های شهری، حوزه آبخیز و ...) با سنجه‌های مرتبط قابل‌اندازه‌گیری هستند.



شکل ۹ : نتایج نهایی پژوهش

نتیجه‌گیری

در این مقاله سعی شد تا با بررسی ادبیات نظری مرتبط با رویکرد تاب‌آوری در برابر سیل و مرور مقالات منتشرشده در این زمینه، ابعاد و روش‌های بررسی و انطباق رویکرد تاب‌آوری در برابر سیل به‌طور دقیق بازگو و برای درک بهتر دسته‌بندی شود. به‌طورکلی، این رویکرد از ۵ بعد اساسی: اجتماعی، کالبدی، زیرساختی، نهادی و اقتصادی شکل یافته است. با شناخت مدل‌های موجود و محدودیت‌شان در بستر آسیب‌پذیری و تاب‌آوری، مدل

(Drop) که در بردارنده‌ی ارتباط جدیدی میان مفاهیم تاب‌آوری سوانح است و اغلب در مطالعات انتخاب می‌شود. این مدل توسط کاتر ارائه شده است که در آن تاب‌آوری را به‌عنوان یک فرآیند دینامیک و وابسته به شرایط پیشین، شدت بلایا، زمان بین مخاطرات و تأثیرات عوامل برونگرا تعریف می‌کند و می‌تواند برای نشان دادن مشکلات واقعی در مکان‌های واقعی به‌کار گرفته شود. در رابطه با مقیاس پژوهش نیز در مقیاس‌های متفاوت از محله تا حوزه آبخیز شهری، کلانشهر و ایالت در مقالات مختلف مورد بررسی قرار گرفته است که مقیاس شهر و در رتبه بعدی حوزه آبخیز شهری، مقیاسی است که بیشترین حجم مطالعات به آن اختصاص دارد. با این تفاوت که بیشترین مقیاس مورد استفاده‌شده در مطالعات ایران در مقیاس شهر (۲۸ درصد) و مقیاس روستا (۱۹ درصد) بوده است و در مطالعات جهان در مقیاس حوزه پیرامون رودخانه شهری (۳۰ درصد) بوده است. در روش‌شناسی مربوط به مقالات تاب‌آوری در برابر سیل، هر سه رویکرد کمی، کیفی و ترکیبی قابل‌مشاهده است. با توجه به بررسی‌ها، تمرکز بیشتر این رویکرد بر روش‌های کمی و کیفی است. با این تفاوت که در روش‌شناسی مطالعات ایران (۶۶ درصد) بیشتر مطالعات انجام-شده با روش کمی و در مطالعات جهان از روش کیفی (۴۶ درصد) انجام شده است. اختصاص مقالات بررسی‌شده به حوزه جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری-روستایی، طراحی شهری، مدیریت و برنامه ریزی منابع آب، مدیریت و برنامه ریزی محیط زیست و ... نشان‌دهنده تخصصی بودن این موضوع در برنامه‌ریزی شهری است.

این رویکرد به‌دلیل جامعیتی که دارد بر موضوع‌های مختلفی از بهینه‌سازی فرم و مناظر شهری، زیرساخت‌های شهری/ سبز، پهنه‌بندی زمین‌های کشاورزی / شهری، تعاملات اجتماعی، پایداری سکونگاه‌ها (روستایی/ شهری و ...) ، معماری، مسکن، کیفیت هوا، امکانات رفاهی و تنوع‌زیستی، مدیریت هوشمند، برابری اجتماعی در ابعاد مختلف زندگی شهروندان تاثیرگذار است. اما در ایران بیشتر این مطالعات در زمینه بهبود وضعیت تاب‌آوری ساکنین در راستای مدیریت ریسک مخاطرات طبیعی است و سیاست‌ها و موضوع‌های مطرح در آن همیشه در حال بازبینی و ارزیابی هستند و هنوز به موضوع‌هایی ازجمله کیفیت هوا، مدیریت هوشمند، امکانات رفاهی و تنوع‌زیستی، زیرساخت‌های سبز اشاره‌ای نشده است.

منابع

ابدالی، یعقوب؛ حاتمی‌نژاد، حسین؛ زنگنه شهرکی، سعید؛ پوراحمد، احمد؛ سلمانی، محمد. (۱۴۰۲). ارائه سناریوهای آینده تاب‌آوری شهری در برابر مخاطره سیل (مورد مطالعه: شهر خرم‌آباد). مطالعات جغرافیایی مناطق کوهستانی. ۴ (۴) صص: ۱۵۳-۱۷۴.

ابراهیمی‌پور، مرضیه؛ زیاری، کرامت اله. (۱۳۹۷). پهنه‌بندی زمین‌های شهری در برابر خطر ناشی از سیلاب با رویکرد تاب‌آوری کالبدی (مطالعه موردی: رودخانه چشمه کیله). نگرش‌های نو در جغرافیای انسانی (جغرافیای انسانی)، ۱۱(۱)، صص: ۳۹-۵۶. SID. https://sid.ir/paper/518561/fa

اسدافروز، آیدا؛ متدین، حشمت اله؛ مثنوی، محمدرضا؛ منصوری، سیدامیر. (۱۳۹۹). تاب‌آوری محیطی در برابر مخاطرات سیلاب فروردین ۱۳۹۸ در شهر شیراز با رویکرد منظر، تئوری سیستم ها و مدل DPSIR. مدیریت مخاطرات محیطی، ۷(۱)، صص: ۵۵-۷۵.

اکبری زرین، زینب؛ قلعه نویی، محمود؛ مختارزاده، صفورا. (۱۴۰۲). ارزیابی شاخص‌های موثر بر تاب‌آوری فرم و فضای شهری با تاکید بر سیل و رواناب‌های سطحی (مورد پژوهی: شهر نور استان مازندران). محیط‌شناسی، ۴۹(۴)، صص: ۴۰۱-۴۲۰.

بهرامی، فرشاد؛ آل هاشمی، آیدا؛ متدین، حشمت‌الله. (۱۳۹۸). رودخانه‌های شهری و تفکر تاب‌آوری در برابر آشوب سیل، برنامه‌ریزی تاب‌آور رودخانهٔ کن. منظر، ۱۱(۴۷)، صص: ۶۰-۷۳.

بهروزی، حمزه؛ زندمقدم، محمدرضا؛ کامیابی، سعید. (۱۴۰۱). تحلیل توزیع مکانی میزان تاب‌آوری شهر در برابر مخاطرات طبیعی با تاکید بر سیل (مطالعه موردی: شهر قائمشهر). جغرافیای طبیعی، ۱۵(۵۶)، صص: ۶۷-۸۵.

بهیارفرد، مریم؛ دستورانی، محمدتقی؛ علی‌اکبر، عنابستانی. (۱۴۰۱). بررسی تاثیر وضعیت تاب‌آوری کالبدی بر پایداری سکونتگاه‌های روستایی در برابر سیلاب (مطالعه موردی: روستای زشک طرقبه - شاندیز. پنجمین کنفرانس ملی حفاظت خاک و آبخیزداری.

بهیارفرد، مریم؛ دستورانی، محمدتقی؛ عنابستانی، علی‌اکبر. (۱۴۰۲). ارزیابی تاب‌آوری سکونتگاه‌های روستایی در برابر سیلاب (مطالعه موردی: روستای زشک مشهد). راهبردهای توسعه روستایی، ۱۰(۳)، صص: ۳۲۵-۳۴۵.

پروری، امیررضا؛ زیاری، کرامت اله؛ یزدانی، سعید. (۱۴۰۲). تحلیل و ارزیابی ابعاد تاب‌آوری شهری در مواجهه با سیلاب (مورد مطالعه: رودخانه خرم‌رود شهر خرم‌آباد). مطالعات جغرافیایی مناطق کوهستانی، ۴ (۱)، صص: ۴۷-۶۸.

تکیه یان، فایزه؛ جهانیان، منوچهر. (۱۴۰۲). واکاوی الگوی معماری شایستگی کارکنان در صنعت گردشگری، فصلنامه علمی- پژوهشی گردشگری و توسعه، دوره ۱۲، شماره ۳، صص: ۱-۲۲.

جلیلی‌صدرآباد، سمانه؛ ضابطیان طرقی، الهام؛ مرادی، پگاه. (۱۴۰۲). تاب‌آوری در برابر سیلاب در اثر تغییرات اقلیمی در طرح‌های توسعه. دانش پیشگیری و مدیریت بحران. ۱۳ (۱)، صص: ۳۵-۴۹.

حاتمی‌نژاد، حسین؛ صادقی، علیرضا. (۱۴۰۲). سنجش تاب‌آوری شهری در برابر مخاطره سیل با استفاده از رویکردی چندمعیاره (مورد مطالعه: مناطق واقع بر مسیر رودخانه‌های شهر تهران). تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، ۱۰ (۳)، صص: ۱۰۱-۱۲۲.

دانشوری نسب، عبدالحسین؛ مقصودی، سوده؛ صالحی، مریم. (۱۴۰۰). رابطه حمایت اجتماعی با تاب‌آوری اجتماعی زنان آسیب‌دیده از سیل (مورد مطالعه: شهرستان دلگان). مطالعات اجتماعی روان‌شناختی زنان، ۱۹(۲)، صص: ۷-۵۰.

رمضانی مهریان، مجید. (۱۴۰۲). مرور نظام‌مند رویکردها و روش‌های ارزیابی تاب‌آوری سیل در محیط‌های شهری. تحلیل فضایی مخاطرات محیطی. ۱۰ (۴)، :صص: ۱۹-۴۰.

روحی، بیتا؛ میرزا ابراهیم طهرانی، مهناز؛ استعلاجی، علیرضا؛ فرزاد بهتاش، محمدرضا. (۱۴۰۰). تاب‌آوری ساختمان‌های مهم شهر همدان در برابر سیلاب با استفاده از مدل‌سازی معادلات ساختاری لیزرل. مدیریت مخاطرات محیطی، ۸(۳)، صص: ۲۰۷-۲۲۸.

روخنده، ناصح؛ احمدی، کیومرث؛ حمزه پور، مهدی؛ سهرابی، فاطمه. (۱۴۰۲). مفهوم‌پردازی نظام‌مند انضباط اداری با استفاده از روش فراترکیب، نشریه پژوهش‌های مدیریت منابع انسانی، سال پانزدهم، شماره۲، صص: ۱۵۱-۱۸۹.

سبک رو، دلارام؛ بهرامی، فرشاد؛ متدین، حشمت الله. (۱۴۰۰). طراحی و برنامه‌ریزی تاب‌آور رودخانه‌های شهری در مواجهه با آشوب سیل (برنامه‌ریزی تاب‌آور رودخانهٔ درکه). منظر، ۱۳(۵۵)، صص: ۶۲-۷۵.

سلطانی، زهرا؛ گودرزی، مجید؛ علی بخشی، افسانه. (۱۴۰۳). بررسی ابعاد و طبقه‌بندی شاخص‌های تاب‌آوری محلات شهری در برابر سیلاب (مطالعه موردی: محلات سیاحی و عین دو شهر اهواز). مجله شهر پایدار، ۷(۱)، صص: ۵۷-۷۸.

شایان، محسن؛ پایدار، ابوذر؛ بازوند، سجاد. (۱۳۹۶). تحلیل تأثیرات ارتقای شاخص‌های تاب‌آوری بر پایداری سکونتگاه‌های روستایی در مقابل سیلاب (مورد مطالعه: نواحی روستایی شهرستان زرین‌دشت). مدیریت مخاطرات محیطی، ۴(۲)، صص: ۱۰۳-۱۲۱.

عابدی سروستانی، احمد. (۱۴۰۱). ارزیابی دیدگاه کارشناسان و مدیران ادارات منابع طبیعی و آبخیزداری استان گلستان نسبت به جنبه‌های حقوقی و قانونی مدیریت سیل. مخاطرات محیط طبیعی، ۱۱(۳۳)، صص: ۱-۲۰.

عبدل زاده، گلاره؛ طاهری، جعفر؛ نورتقانی، عبدالمجید. (۱۴۰۲). اصول معماری و ساخت ساختمان مسکونی تاب‌آور در برابر سیل، اولین همایش ملی شهرهای فردا، خلاقیت، نوآوری و توسعه پایدار، رشت، https://civilica.com/doc/1956545.

فتاحی، محمد هادی؛ بهروزی، محمد. (۱۴۰۲). پهنه‌بندی تاب‌آوری شهر شیراز در برابر سیل با استفاده مدلVIKOR_AHP . فصلنامه علمی مهندسی منابع آب، ۱۶(۵۸)، صص: ۱-۲۰.

فتوحی اهل، فاطمه؛ بلالی اسکویی، آزیتا؛ شهبازی، یاسر. (۱۴۰۱). بهینه‌سازی مناظر شهری با تأکید بر تاب‌آوری در برابر سیل. معماری و شهرسازی ایران (JIAU)، ۱۳(۲)، صص: ۴۱۹-۴۳۴.

کارآموز، محمد؛ خلیلی، پویا. (۱۳۹۸). ارائه چارچوب فرایند همکارانه در افزایش تاب‌آوری تصفیه‌خانه‌های آب و فاضلاب در مواجهه با سیلاب. مجله آب و فاضلاب، ۳۰(۲)، صص: ۲۴- ۳۵.

کمالی، زهرا؛ قاسمی، مریم. (۱۴۰۲). راهبردهای تاب‌آوری کالبدی مساکن خانوارهای روستایی در برابر سیل (مطالعه موردی: شهرستان درگز). راهبردهای توسعه روستایی، ۱۰(۱)، Doi: 10.22048/rdsj.2022.310569.1984.

گله دار، شادی؛ گله دار، شبنم؛ مسعودی راد، ماندانا. (۱۴۰۲). سنجش نقش سازمان‌های مردم‌نهاد در افزایش تاب‌آوری اجتماعی پس از بحران سیل (مطالعه موردی: شهرستان پلدختر). جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۱۲(۲)، صص: ۲۳۳-۲۴۹.

ملکی، کیومرث؛ ملک حسینی، عباس؛ پاهکیده، اقبال؛ ملکی، یونس. (۱۴۰۲). تحلیلی بر شبکه تهدید و حلقه مخاطره سیل در آسیب-پذیری کاربری اراضی با رویکردی بر پدافند غیر عامل و تاب‌آوری شهری (مطالعه موردی: شهر روانسر)، فصلنامه جغرافیا و مطالعات محیطی، ۱۲ (۴۵)، صص: ۵۲-۶۷.

میراسدالهی، شمسی سادات؛ متولی، صدرالدین؛ جانبازقبادی، غلامرضا. (۱۳۹۹). تحلیل تاب‌آوری سکونتگاه‌های شهری در برابر سیلاب با تاکید بر شاخص‌های اقتصادی و اجتماعی (مطالعه موردی: شهر گرگان). تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی (علوم جغرافیایی)، ۲۰(۵۹)، ۱۳۷-۱۵۵. SID. https://sid.ir/paper/403313/fa

نوری، محبوبه؛ رضایی، محمدرضا؛ عسگری، ابراهیم. (۱۳۹۹). مدلسازی ساختاری – تفسیری عوامل مؤثر بر تاب‌آوری کالبدی و اجتماعی شهر شیراز در برابر سانحه طبیعی سیل. دو فصلنامه جغرافیای اجتماعی شهری، ۷ (۲)، صص: ۱۴۹-۱۷۲.

Abdel-Mooty, M. N., El-Dakhakhni, W., & Coulibaly, P. (2022). Data-driven community flood resilience prediction. Water, 14(13), 2120.

Ariyaningsih, & Shaw, R. (2022). Integration of SETS (Social-Ecological–Technological Systems) framework and flood resilience cycle for smart flood risk management. Smart Cities, 5(4), 1312-1335.

Bertilsson, L., Wiklund, K., de Moura Tebaldi, I., Rezende, O. M., Veról, A. P., & Miguez, M. G. (2019). Urban flood resilience–A multi-criteria index to integrate flood resilience into urban planning. Journal of Hydrology, 573, 970-982.

Bista, R. B. (2023). Descriptive Study of Community-Based Disaster Management in Rural Western Nepal. The Journal of Economic Concerns, 14(1-2), 20-36.

Bibri, S. E., & Krogstie, J. (2019). Generating a vision for smart sustainable cities of the future: a scholarly backcasting approach. European Journal of Futures Research, 7(1), 1-20.

Camacho, C., Bower, P., Webb, R. T., & Munford, L. (2023). Measurement of community resilience using the Baseline Resilience Indicator for Communities (BRIC) framework: A systematic review. International journal of disaster risk reduction, 95, 103870.

Campbell, K. A., Laurien, F., Czajkowski, J., Keating, A., Hochrainer-Stigler, S., & Montgomery, M. (2019). First insights from the Flood Resilience Measurement Tool: A large-scale community flood resilience analysis. International Journal of Disaster Risk Reduction, 40, 101257.

Chang, H., David, J. Y., Markolf, S. A., Hong, C. Y., Eom, S., Song, W., & Bae, D. (2021). Understanding urban flood resilience in the Anthropocene: a social–ecological–technological systems (SETS) learning framework. In The Anthropocene (pp. 215-234). Routledge.

Chrastina, J. (2018). Meta-Synthesis of Qualitative Studies: Background, Methodology and Applications. NORDSCI.

Coletta, V. R., Pagano, A., Zimmermann, N., Davies, M., Butler, A., Fratino, U., & Pluchinotta, I. (2024). Socio-hydrological modelling using participatory System Dynamics modelling for enhancing urban flood resilience through Blue-Green Infrastructure. Journal of Hydrology, 636, 131248.

Cutter, Susan et al. (2008). A place-based model for understanding community resilience to natural disasters, Journal of Global Environmental Change, 18, 598-606.

De Bruijn, K. M., Maran, C., Zygnerski, M., Jurado, J., Burzel, A., Jeuken, C., & Obeysekera, J. (2019). Flood resilience of critical infrastructure: Approach and method applied to Fort Lauderdale, Florida. Water, 11(3), 517.

Forrest, S. A., Trell, E. M., & Woltjer, J. (2020). Socio-spatial inequalities in flood resilience: Rainfall flooding in the city of Arnhem. Cities, 105, 102843.

Gyawali, N., Durga, D., Chaudhary, P., Chhetri, A., & Devkota, N. R. (2021). Factors Associated to Flood Resilience Measurement in Narayani River Basin, Nepal. British Journal of Environmental Sciences, 9(5), 1-11.

Holling, C. S. (1973). Resilience and Stability of Ecological Systems. Annual Review of Ecology and Systematics, 4, 1–23. http://www.jstor.org/stable/2096802

Huang, C. C., & Wang, C. L. (2024). Enhancing urban flood resilience: interdisciplinary integration of climate adaptation, flood control, and land-use planning from 3PA to 4PA. Journal of Water and Climate Change, 15(4), 1961-1968.

Hernantes-Apezetxea, J., Maraña-Casado, P., Sarriegi, J. M., & Labaka-Zubieta, L. (2019). Towards resilient cities: A maturity model for operationalizing resilience.

Karamouz, M., Rasoulnia, E., Olyaei, M. A., & Zahmatkesh, Z. (2018). Prioritizing investments in improving flood resilience and reliability of wastewater treatment infrastructure. Journal of Infrastructure Systems, 24(4), 04018021.

Karrasch, L., Restemeyer, B., & Klenke, T. (2021). The ‘Flood Resilience Rose’: A management tool to promote transformation towards flood resilience. Journal of Flood Risk Management, 14(3), e12726.

Khatooni, K., Hooshyaripor, F., Malek Mohammadi, B., & Noori, R. (2023). A combined qualitative-quantitative fuzzy method for urban flood resilience assessment in Karaj City, Iran. Scientific Reports, 13(1), 241.

Khodadad, M., Aguilar-Barajas, I., & Khan, A. Z. (2023). Green infrastructure for urban flood resilience: a review of recent literature on bibliometrics, methodologies, and typologies. Water 15 (3), 523 (2023).

Khunwishit, S., Choosuk, C., & Webb, G. (2018). Flood resilience building in Thailand: Assessing progress and the effect of leadership. International Journal of Disaster Risk Science, 9, 44-54.
Krivtsov, V., Birkinshaw, S., Arthur, S., Knott, D., Monfries, R., Wilson, K., & Monteiro, Y. (2020). Flood resilience, amenity and biodiversity benefits of a historic urban pond. Philosophical Transactions of the Royal Society A, 378(2168), 20190389.
Leandro, J., Chen, K. F., Wood, R. R., & Ludwig, R. (2020). A scalable flood-resilience-index for measuring climate change adaptation: Munich city. Water Research, 173, 115502.
Lombardi, P., Giordano, S., Farouh, H., & Yousef, W. (2012). Modelling the smart city performance. Innovation: The European Journal of Social Science Research, 25(2), 137-149.
Manandhar, B., Cui, S., Wang, L., & Shrestha, S. (2023). Post-flood resilience assessment of the July 2021 flood in western Germany and Henan, China. Land, 12(3), 625.
Mayunga, J. S. (2007) Understanding and applying the concept of community disaster resilience: a capital-based approach, A draft working paper prepared for the summer academy for social vulnerability and resilience building, Vol.17, No.5, pp.1-26.
Mehryar, S., & Surminski, S. (2022). Investigating flood resilience perceptions and supporting collective decision-making through fuzzy cognitive mapping. Science of the Total Environment, 837, 155854.
Meng, M., Dąbrowski, M., & Stead, D. (2019). Shifts in spatial plans for flood resilience and climate adaptation: Examining planning procedure and planning mandates. Sustainability, 12(1), 105.
Meng, M., Dabrowski, M., & Stead, D. (2020). Enhancing flood resilience and climate adaptation: The state of the art and new directions for spatial planning. Sustainability, 12(19), 7864.
Miguez, M. G., & Veról, A. P. (2017). A catchment-scale Integrated Flood Resilience Index to support decision-making in urban flood control design. Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science, 44(5), 925-946.
Newman, O. (1973). Defensible space: Crime prevention through urban design.New York: Collier Books.
Pigott, Terri. (2012). Advances in Meta-Analysis. Springer Science & Business Media.
Prashar, N., Lakra, H. S., Shaw, R., & Kaur, H. (2023). Urban Flood Resilience: A comprehensive review of assessment methods, tools, and techniques to manage disaster. Progress in Disaster Science, 100299.
Russo, B., Velasco, M., Locatelli, L., Sunyer, D., Yubero, D., Monjo, R., & Gómez, A. G. (2020). Assessment of urban flood resilience in Barcelona for current and future scenarios. The RESCCUE project. Sustainability, 12(14), 5638.
Šakić Trogrlić, R., Rijke, J., Dolman, N., & Zevenbergen, C. (2018). Rebuild by design in Hoboken: A design competition as a means for achieving flood resilience of urban areas through the implementation of green infrastructure. Water, 10(5), 553.
Sefton, C., Sharp, L., Quinn, R., Stovin, V., & Pitcher, L. (2022). The feasibility of domestic rain tanks contributing to community-oriented urban flood resilience. Climate Risk Management, 35, 100390.
Sen, M. K., Dutta, S., & Kabir, G. (2021). Development of flood resilience framework for housing infrastructure system: Integration of best-worst method with evidence theory. Journal of Cleaner Production, 290, 125197.
Sen, M. K., Dutta, S., & Kabir, G. (2021). Flood resilience of housing infrastructure modelling and quantification using a Bayesian belief network. Sustainability, 13(3), 1026.
Sen, M. K., Dutta, S., Kabir, G., Pujari, N. N., & Laskar, S. A. (2021). An integrated approach for modelling and quantifying housing infrastructure resilience against flood hazard. Journal of Cleaner Production, 288, 125526.
Sung, K., Jeong, H., Sangwan, N., & Yu, D. J. (2018). Effects of flood control strategies on flood resilience under socio-hydrological disturbances. Water Resources Research, 54(4), 2661-2680.
Takin, M., Cilliers, E. J., & Ghosh, S. (2023). Advancing flood resilience: the nexus between flood risk management, green infrastructure, and resilience. Frontiers in Sustainable Cities, 5, 1186885.
Tobin, G. A. (1999). Sustainability and community resilience: the holy grail of hazard planning? Global Environmental Change Part B: Environmental Hazards, 1(1), 13-25.
Vitale, C., Meijerink, S., Moccia, F. D., & Ache, P. (2020). Urban flood resilience, a discursive-institutional analysis of planning practices in the Metropolitan City of Milan. Land Use Policy, 95, 104575.
Wang, Y., Meng, F., Liu, H., Zhang, C., & Fu, G. (2019). Assessing catchment scale flood resilience of urban areas using a grid cell-based metric. Water research, 163, 114852.
Wilson, E. O. (1984). The superorganism. In Biophilia (pp. 23-38). Harvard University Press.
Wu, L., Zhang, Y., Choo, K. K. R., & He, D. (2017). Efficient identity-based encryption scheme with equality test in the smart city. IEEE Transactions on Sustainable Computing, 3(1), 44-55.
Xu, W., CAI, X., Yu, Q., Proverbs, D., & Xia, T. (2024). Modelling Trends in Urban Flood Resilience towards Improving the Adaptability of Cities. Water, 16(11), 1614.
Ye, X., Wang, S., Lu, Z., Song, Y., & Yu, S. (2021). Towards an AI-driven framework for multi-scale urban flood resilience planning and design. Computational Urban Science, 1, 1-12.
Zhang, Y., Jiang, X., & Zhang, F. (2024). Urban Flood Resilience Assessment of Zhengzhou Considering Social Equity and Human Awareness. Land, 13(1), 53.
Zhang, Y., Yue, W., Su, M., Teng, Y., Huang, Q., Lu, W., & Xu, C. (2023). Assessment of urban flood resilience based on a systematic framework. Ecological Indicators, 150, 110230.
Zhu, H., & Liu, F. (2021). A group-decision-making framework for evaluating urban flood resilience: a case study in Yangtze River. Sustainability, 13(2), 665.
Zhu, S., Feng, H., Arashpour, M., & Zhang, F. (2024). Enhancing urban flood resilience: A coupling coordinated evaluation and geographical factor analysis under SES-PSR framework. International Journal of Disaster Risk Reduction, 101, 104243.

Journal of Natural Environment Hazards
University of Sistan and Baluchestan
Print ISSN: 2676 - 4377 Online ISSN: 2676 - 4385
Homepage: https://jneh.usb.ac.ir

Journal of Natural Environmental Hazards, Vol 15, Iss 47, March 2026

Using Numerical Modeling to Evaluate the Potential of Groundwater Pollution Resulting from Artificial Recharge with Treated Wastewater

Vahab Amiri[1*], **Nassim Sohrabi**[2]

1. Corresponding Author, *Associate Professor of Hydrogeology, Department of Geology, Yazd University, Iran*
Email: *v.amiri@yazd.ac.ir* ***ORCID:*** *https://orcid.org/0000-0001-9734-9812*
2. *PhD of Hydrogeology, Yazd Regional Water Authority, Iran*

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received: 20 January 2025
Revised: 28 April 2025
Accepted: 10 May 2025
Published: 21 March 2026

Keywords:
Contaminant transport, modeling, Damaneh-Daran aquifer, treated wastewater, artificial recharge.

ABSTRACT

Drought, overexploitation of groundwater resources, and a lack of proper management of water resources have caused irreparable damage to groundwater resources. Therefore, appropriate management decisions to compensate for the reduction in groundwater storage are inevitable. In recent years, the use of treated wastewater for the artificial recharge of aquifers has been considered. In this study, the simulation of groundwater resources of the Damaneh-Daran aquifer using the MODFLOW model and the modeling of artificial recharge using treated wastewater using the MT3DMS and MODPATH tools were considered. Several locations with different single-, dual-, and pond scenarios for implementing artificial recharge were evaluated based on the lowest cost, the closest distance to the treatment plant, the farthest distance from residential areas and drinking and agricultural wells, and the distance from the input of quality streams recharging the aquifer in the northern and northwestern parts of the region. The results of the simulation of the pollution spread pattern using the MODPATH model show that regardless of the injection site, the treated wastewater flow can contaminate significant parts of the water resources in its path because of the topographic conditions of the area, general groundwater flow path, and hydraulic had caused by artificial recharge at the injection sites. The results of the artificial recharge model using the single- and dual-well models show that the pollutant movement is towards the southwest of the aquifer. In addition, up to 15 years after the start of the leak, the maximum pollutant movement reached approximately 1850 m from the injection site. The results of the MT3DMS model also show that after 500, 5000, 10000, and 14000 days from the start of the leak, 5, 15, 20, and 26 production wells were affected by the pollution plume, respectively.

How to Cite: Amiri, V. and Sohrabi, N. (2026). Using Numerical Modeling to Evaluate the Potential of Groundwater Pollution Resulting from Artificial Recharge with Treated Wastewater. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 15(47), 73-90.

© The Author/Authors
DOI: 10.22111/jneh.2025.50877.2097
Publisher: University of Sistan and Baluchestan

EXTENDED ABSTRACT

INTRODUCTION

Drought, overexploitation of groundwater resources, and lack of proper management of water resources have caused irreparable damage to groundwater resources. Therefore, making proper management decisions to compensate for the reduction of groundwater storage is inevitable. Groundwater resource management requires understanding aquifer performance and predicting the effects of withdrawal or recharge, and groundwater models can provide this capability. In recent years, the use of treated wastewater for artificial recharge of aquifers has been considered. Numerous studies have been conducted worldwide with an emphasis on predicting the effects of treated wastewater recycling on groundwater using simulators. Recirculation of treated wastewater reduces the concentration of pollutants while increasing groundwater storage (Cao et al., 2023; Long et al., 2020; Sun et al., 2023; Zhang et al., 2021). However, various pollutants (such as nitrate and organic pollutants) can enter groundwater through the wastewater used for recharge (Amiri et al., 2023; Ding et al., 2020; Li et al., 2019; Yuan et al., 2017). Therefore, further technical studies are needed to increase the capacity and improve the quality of treated wastewater in groundwater recharge.

DATA AND METHODS

In this study, the simulation of groundwater resources of the Damaneh-Daran aquifer (Isfahan Province) using the MODFLOW model and the modeling of artificial recharge using treated wastewater using the MT3DMS and MODPATH tools have been considered. Several locations with different single-well, dual-well, and recharge pond scenarios for implementing artificial recharge were evaluated based on the lowest cost, the closest distance to the treatment plant, the farthest distance from residential areas and drinking and agricultural wells, and considering the distance from the input of quality streams recharging the aquifer in the northern and northwestern parts of the region.

RESULTS AND DISCUSSION

The results of the simulation of the pollution spread pattern using the MODPATH model show that regardless of the injection site, the treated wastewater flow can contaminate significant parts of the water resources in its path due to the topographic conditions of the area, the general groundwater flow path, and the hydraulic hed caused by artificial recharge at the injection sites. The results of the artificial recharge model using the single-well and dual-well models show that the pollutant movement is towards the southwest of the aquifer. In addition, up to 15 years from the start of the leak, the maximum pollutant movement reaches about 1850 meters from the injection site. The results of the MT3DMS model also show that after 500, 5000, 10000, and 14000 days from the start of the leak, 5, 15, 20, and 26 production wells are affected by the pollution plume, respectively.

CONCLUSION

Several locations with different single-well, double-well and seepage pond scenarios were evaluated for artificial recharge based on the lowest cost, the closest distance to the treatment plant, the farthest distance from residential areas and drinking and agricultural wells, and also considering the distance from natural recharge zones in the northern and northwestern parts of the region. The results showed that the movement of the contaminant is proportional to the direction of groundwater flow in the region and towards the southwest of the aquifer. According to the results of the pollutant transport modeling, some production wells are affected by the pollution plume. Therefore, if the water withdrawn by these wells is used for drinking consumption, continuous monitoring of water quality should be carried out to prevent any harm to consumers. In addition, it is necessary to ensure that agricultural products produced within the influence area of the plume of water injected into the aquifer are free from pollutants associated with wastewater. To reduce the blockage of soil pores and its effect

on reducing the infiltration rate, as well as water loss through evaporation or stagnant water in cold seasons, and to prevent the creation of an area with an unpleasant appearance and odor and a place for insect growth, comprehensive studies should be conducted before injecting treated wastewater and selecting the injection method.

ACKNOWLEDGEMENTS

This article is part of the results of the research project code ESE-011400, which was carried out with the financial support of Isfahan Regional Water Company. In this way, due to the provision of the data used in this article, the respected collection of that company is appreciated.

REFERENCES

References (in Persian)

References (in English)

Amiri, V., Sohrabi, N., Li, P., Amiri, F. (2023b). Groundwater Quality for Drinking and Non-Carcinogenic Risk of Nitrate in Urban and Rural Areas of Fereidan, Iran. Exposure and Health, 15, pp 807-823. https://doi.org/10.1007/s12403-022-00525-w

Cao, X., Shi, Y., He, W., An, T., Chen, X., Zhang, Z., Liu, F., Zhao, Y., Zhou, P., Chen, C., He, J., He, W. (2022). Impacts of anthropogenic groundwater recharge (AGR) on nitrate dynamics in a phreatic aquifer revealed by hydrochemical and isotopic technologies. Science of the Total Environment, 839, 156187. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156187

Long, D., Yang, W., Scanlon, B.R., Zhao, J., Liu, D., Burek, P., Pan, Y., You, L., Wada, Y. (2020). South-to-north water diversion stabilising Beijing's groundwater levels. Nature Communications, 11. https://doi.org/10.1038/s41467-020-17428-6

Ding, G.Y., Chen, G.L., Liu, Y.D., Li, M., Liu, X. (2020). Occurrence and risk assessment of fluoroquinolone antibiotics in reclaimed water and receiving groundwater with different replenishment pathways. Science of the Total Environment, 738. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139802

Sun, K., Hu, L., Sun, J., Zhai, Y., Zhang, S., Cao, X. (2023). Quantifying the contribution of ecological water replenishment on aquifer recovery using a refined groundwater model. Science of the Total Environment, 857, 159216. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159216

Zhang, C., Duan, Q.J.-F., Yeh, P., Pan, Y., Gong, H., Moradkhani, H., Gong, W., Lei, X., Liao, W., Xu, L., Huang, Z., Zheng, L., Guo, X. (2021). Sub-regional groundwater storage recovery in North China Plain after the South-to-North water diversion project. Journal of Hydrology, 597, 126156. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126156

Yuan, J., Van Dyke, M.I., Huck, P.M. (2017). Identification of critical contaminants in wastewater effluent for managed aquifer recharge. Chemosphere, 172, pp 294-301. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.12.120

Li, C.Z., Li, B.H., Bi, E.P. (2019). Characteristics of hydrochemistry and nitrogen behaviour under long-term managed aquifer recharge with reclaimed water: a case study in northern China. Science of the Total Environment, 668, pp 1030-1037. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.375.

مخاطرات محیط طبیعی
شاپا چاپی: ۴۳۷۷-۲۶۷۶ شاپا الکترونیکی: ۴۳۸۵-۲۶۷۶
Homepage: https://jneh.usb.ac.ir

مجله علمی پژوهشی مخاطرات محیط طبیعی، دوره ۱۵، شماره ۴۷، شماره پیاپی ۱، فروردین ۱۴۰۵

به‌کارگیری مدل‌سازی عددی برای ارزیابی پتانسیل آلودگی آب زیرزمینی ناشی از تغذیه مصنوعی با پساب تصفیه‌شده

وهاب امیری[1*]، نسیم سهرابی[2]

۱. دانشیار هیدروژئولوژی، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه یزد (**نویسنده مسئول**)

ایمیل: v.amiri@yazd.ac.ir **ORCID:** https://orcid.org/0000-0001-9734-9812

۲. دکترای هیدروژئولوژی، شرکت آب منطقه‌ای یزد

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۰۱
تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۲/۰۸
تاریخ پذیرش : ۱۴۰۴/۰۲/۲۰
تاریخ انتشار : ۱۴۰۵/۰۱/۰۱

واژه‌های کلیدی:
انتقال آلودگی، مدل‌سازی، آبخوان دامنه- داران، پساب تصفیه‌شده، تغذیه مصنوعی.

چکیده

خشکسالی، برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی و عدم مدیریت صحیح منابع آب موجب شده که خسارت‌های جبران‌ناپذیری به منابع آب زیرزمینی وارد گردد. بنابراین، گرفتن تصمیم‌های صحیح مدیریتی برای جبران کاهش ذخایر آب زیرزمینی امری اجتناب‌ناپذیر است. در سال‌های اخیر، استفاده از پساب تصفیه‌شده برای تغذیه مصنوعی آبخوان‌ها مورد توجه قرار گرفته است. در این مطالعه، شبیه‌سازی منابع آب زیرزمینی آبخوان دامنه - داران با استفاده از مدل MODFLOW و مدل‌سازی تغذیه مصنوعی با استفاده از پساب تصفیه‌شده با بهره‌گیری از ابزار MT3DMS و MODPATH مورد توجه قرار گرفت. چندین موقعیت با سناریوهای مختلف تک چاهی، دو چاهی و حوضچه‌ای برای اجرای تغذیه مصنوعی بر اساس کمترین هزینه، نزدیک‌ترین فاصله به محل تصفیه‌خانه، دورترین فاصله از مناطق مسکونی و چاه‌های شرب و کشاورزی و درنظرگرفتن فاصله از محل‌های ورودی جریانات با کیفیت تغذیه‌کننده آبخوان در بخش‌های شمالی و شمال‌غربی منطقه مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی الگوی پخش آلودگی با استفاده از مدل MODPATH در الگوهای مختلف نشان داد که صرف‌نظر از محل تزریق، جریان پساب تصفیه‌شده می‌تواند بخش‌های قابل‌توجهی از منابع آب موجود در مسیر حرکت خود را به‌دلیل شرایط توپوگرافی منطقه، مسیر جریان عمومی آب زیرزمینی و بار هیدرولیکی ناشی از تغذیه مصنوعی در محل‌های تزریق آلوده کند. نتایج مدل تغذیه مصنوعی توسط الگوی تک چاهی و دو چاهی نشان داد که آلاینده به سمت جنوب غربی آبخوان حرکت می‌کند. علاوه بر این، تا ۱۵ سال از شروع نشت، بیشینه حرکت آلاینده به حدود ۱۸۵۰ متر از محل تزریق رسید. نتایج مدل MT3DMS نشان داد که پس از ۵۰۰، ۵۰۰۰، ۱۰۰۰۰ و ۱۴۰۰۰ روز از شروع نشت، به‌ترتیب ۵، ۱۵، ۲۰ و ۲۶ حلقه چاه بهره‌برداری تحت تأثیر هاله آلودگی قرار می‌گیرد.

استناد: امیری, وهاب و سهرابی کرت آباد, نسیم . (۱۴۰۵). بکارگیری مدل‌سازی عددی برای ارزیابی پتانسیل آلودگی آب زیرزمینی ناشی از تغذیه مصنوعی با پساب تصفیه شده. *مخاطرات محیط طبیعی*, ۱۵(۴۷), ۷۳-۹۰

© نویسنده/ نویسندگان

DOI: 10.22111/jneh.2025.50877.2097

ناشر: دانشگاه سیستان و بلوچستان

مقدمه

زندگی حدود نیمی از مردم جهان به ذخایر آب زیرزمینی وابسته است (هان[1] و همکاران، ۲۰۲۱). آب زیرزمینی به عنوان بزرگ‌ترین منبع آب شیرین، به‌ترتیب در حدود ۳۶ و ۴۰-۴۲ درصد از آب مورد نیاز در بخش‌های شرب و کشاورزی را در سراسر دنیا تأمین می‌کند (اشرف[2] و همکاران، ۲۰۲۱). با این وجود، رشد جمعیت و ضرورت افزایش نرخ برداشت آب از این منابع حیاتی برای آبیاری زمین‌های کشاورزی، کمبود منابع آب سطحی، توسعه اجتماعی - اقتصادی، تغییرات اقلیمی و همین‌طور استفاده غیرمسئولانه از منابع طبیعی موجب شده است که در بسیاری از مناطق، نرخ استحصال از منابع آب زیرزمینی بیشتر از تغذیه آنها باشد (مانیشا[3] و همکاران، ۲۰۲۳؛ امیری و ناکاگاوا[4]، ۲۰۲۱). این امر موجب شده است که امروزه در حدود یک سوم جمعیت جهان در مناطق تحت تنش آبی زندگی کنند (دگراف[5] و همکاران، ۲۰۱۹).

تغذیه مصنوعی آب زیرزمینی به یکی از برنامه‌های مهم و پایدار برای تقویت کمیت و کیفیت آب زیرزمینی در سطح دنیا تبدیل شده است (اسپرینگر[6] و همکاران، ۲۰۱۷). توسعه و گسترش فاضلاب تصفیه‌شده و استفاده مجدد از آن، پتانسیل بالایی برای توسعه پایدار اکوسیستم های آبی، بهبود وضعیت اجتماعی - اقتصادی، کمک مثبت به چرخه غذا - آب - انرژی و ایجاد اقتصاد دایره‌ای دارد (کساری[7] و همکاران، ۲۰۲۱). میزان قابل‌توجهی از آب مصرفی در بخش شرب پس از مصرف به فاضلاب تبدیل می‌شود که بخش عمده‌ای از فاضلاب تولیدشده پس از تصفیه به‌صورت پساب درآمده و دوباره با استفاده در بخش کشاورزی وارد چرخه مصرف آب می‌شود. اگرچه در ابتدا هدف اصلی طراحی و ساخت شبکه‌های جمع‌آوری و دفع فاضلاب، تصفیه و انتقال پساب‌ها به مناطق خارج از شهر به‌دلیل ظهور آلاینده‌های زیست‌محیطی و رعایت بهداشت محیط زیست بود و اما در سال‌های اخیر با توجه به محدودیت‌های منابع آب، پساب خروجی نه به‌عنوان منبع آبی جدید، بلکه به‌عنوان یک منبع تغییر شکل‌یافته در اختیار مدیران و تصمیم‌گیران برنامه‌ریزی منابع آب به‌عنوان منبع تأمین آب پایدار قرار گرفته است (شان[8] و همکاران، ۲۰۲۰).

در کشورهای مختلف، فاضلاب تصفیه‌شده به‌عنوان یک منبع آب مازاد کارآمد و ایمن درنظر گرفته می‌شود که برای استفاده در مصارف غیرشرب و تغذیه آب زیرزمینی استفاده می‌شود. کشورهایی ازجمله مصر (الی گوندیا[9] و همکاران، ۲۰۲۱)، کویت (الیسا[10]، ۲۰۱۹)، اسپانیا (جودار- ابلان[11] و همکاران، ۲۰۱۹) و مکزیک (مازری – هیریارت[12] و همکاران، ۲۰۰۸) پیشگام فناوری تصفیه بیش از ۹۰ درصد فاضلاب و استفاده مجدد از آن بیشتر برای مصارف آبیاری و کشاورزی هستند. علاوه بر این، به‌عنوان‌مثال در سنگاپور، فاضلاب بازیافتی در حال حاضر ۴۰ درصد از آب مورد تقاضای کشور سنگاپور را برآورده می‌کند (کوگ[13]، ۲۰۲۰). در استرالیا پروژه تغذیه مجدد آب زیرزمینی، ۴

[1] Han
2 Ashraf
3 Manisha
4 Amiri and Nakagawa
5 De Graaf
6 Sprenger
7 Kesari
8 Shan
9 Aly Gondia
10 Aleisa
11 Jodar-Abellan
12 Mazari- Hiriart
[13] Kog

درصد از طرح تأمین آب یکپارچه کشور برای افزایش امنیت آب شهری است (دیلون و ارشد[1]، ۲۰۱۶). این اقدامات نباید بدون درنظرگرفتن تمامی جوانب زیست‌محیطی و عملیاتی آنها انجام شود. به این ترتیب، در برخی کشورها همچون اردن (WHO، ۲۰۰۶)، سنگاپور (تورتاجادا و بینال[2]، ۲۰۲۰) و استرالیا (آرمکان[3] و همکاران، ۲۰۰۰) استانداردها و دستورالعمل‌هایی برای استفاده مجدد از پساب تصفیه‌شده برای تغذیه آب زیرزمینی تهیه شده است.

بازچرخانی آب تصفیه‌شده فاضلاب، ضمن افزایش ذخیره آب زیرزمینی، غلظت آلاینده‌ها را کاهش می‌دهد (کائو[4] و همکاران، ۲۰۲۳؛ سان[5] و همکاران، ۲۰۲۳). با این وجود، آلاینده‌های مختلف (به‌عنوان‌مثال، نیترات و آلاینده‌های آلی) می‌توانند از طریق پساب استفاده‌شده برای تغذیه به آب‌های زیرزمینی وارد شوند (امیری و همکاران، ۲۰۲۳b؛ دینگ[6] و همکاران، ۲۰۲۰). بنابراین، بررسی‌های فنی بیشتری برای افزایش ظرفیت و بهبود کیفیت پساب تصفیه‌شده در تغذیه آب زیرزمینی مورد نیاز است.

مدیریت منابع آب زیرزمینی، نیازمند شناخت عملکرد آبخوان و پیش‌بینی اثرات برداشت و تغذیه است و مدل آب‌های زیرزمینی می‌توانند این امکان را فراهم کنند. مطالعات متعددی در سراسر دنیا با تأکید بر پیش‌بینی اثرات بازچرخانی پساب تصفیه‌شده بر روی آب زیرزمینی با استفاده از شبیه‌سازها انجام شده است (بلوتچر[7] و همکاران، ۲۰۱۹؛ شوافا[8] و همکاران، ۲۰۲۱؛ پایترزاک[9]، ۲۰۲۱؛ ساد[10] و همکاران، ۲۰۲۳؛ لاله زاری و همکاران، ۱۳۹۳؛ حسن‌پور و همکاران، ۱۳۹۷؛ بنابفرویی و علی‌محمدی، ۱۴۰۱).

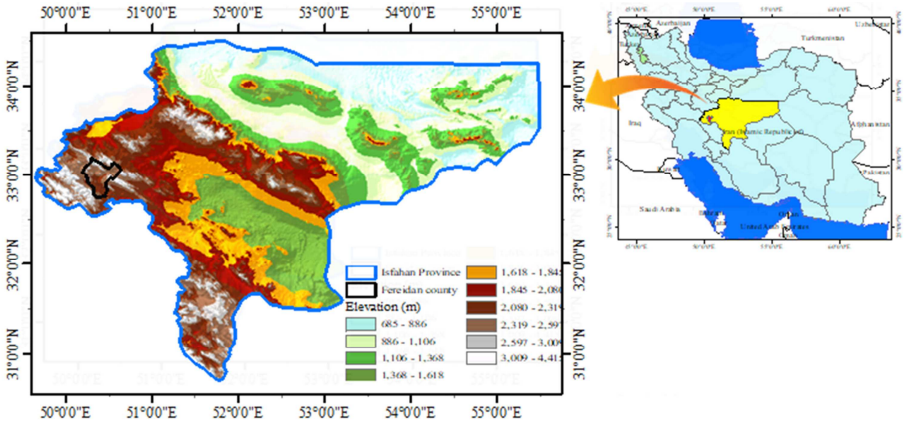
در این مطالعه سعی شده است که رفتار آبخوان دامنه-داران (شهرستان فریدن، استان اصفهان) با توجه به شرایط هیدروژئولوژیکی و استرس‌های آبی مدل‌سازی شود. به همین منظور، پس از بررسی سیستم هیدروژئولوژیکی آبخوان، تعیین پارامترهای هیدرولیکی آبخوان و بررسی هیدرولیکی مرزهای آبخوان بر اساس اطلاعات موجود، شبیه‌سازی منابع آب زیرزمینی با استفاده از مدل MODFLOW[11] انجام شده است. علاوه بر این، مدل‌سازی تغذیه آب زیرزمینی با استفاده از پساب تصفیه‌شده و انتقال آلودگی ناشی از آن با بهره‌گیری از ابزار MT3DMS[12] و MODPATH[13] در برنامه GMS[14] دنبال شده است.

معرفی منطقه مورد مطالعه

شهرستان فریدن و دشت دامنه-داران واقع در غرب استان اصفهان، دارای اقلیم مدیترانه‌ای با متوسط بلند مدت بارش سالیانه در حدود ۳۲۰ میلی‌متر و متوسط دمای سالیانه نزدیک به ۱۰ درجه سانتی‌گراد است (امیری و

1 Dillon and Ars3had
2 Tortajada and Bindal
3 ARMCAN
4 Cao
5 Sun
6 Ding
7 Bloetscher
8 Shawaqfah
9 Pietrzak
10 Saad
11 Modular finite difference groundwater flow
12 Modular 3-dimensional multi-species transport
13 Particle-tracking post-processing
14 Groundwater Modeling System

همکاران، ۲۰۲۴). به‌عنوان بخشی از حوضه آبریز گاوخونی، این دشت تحت تأثیر عملکرد گسل‌های موازی با روند شمال غربی جنوب شرقی که در دامنه ارتفاعات واقع در بخش‌های شمالی و جنوبی عمل کرده‌اند، ایجاد شده است. این مکانیسم تکتونیکی موجب شده است که ضخامت آبخوان به تدریج به طرف بخش‌های میانی دشت افزایش پیدا کند. در قسمت‌های غربی این منطقه کنگلومراهایی با قطعات سنگ آهک و ماسه سنگ وجود دارد. بخش بزرگی از این منطقه در شمال، شرق و غرب دارای سازندهای آهکی با مواد آلی است. توسعه شیست‌ها و شیل‌های آهکی در قسمت‌های جنوبی و غربی قابل‌توجه است. علاوه بر این، توده‌های کوچکی از آمفیبولیت در قسمت‌های مرکزی دیده می‌شود (امیری و همکاران، ۲۰۲۴) (شکل تکمیلی S1).



شکل ۱: موقعیت محدوده مطالعاتی در گستره کشور ایران و استان اصفهان

این آبخوان آزاد با مساحتی در حدود ۲۲۰ کیلومتر مربع، از نظر توسعه بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی جزو آبخوان‌های ممنوعه است. به‌طورکلی، در این آبخوان تعداد ۸۶۶ منبع آب زیرزمینی وجود دارد. بااین‌حال، سیستم غالب بهره‌برداری و استحصال آب زیرزمینی در آبخوان به وسیله ۷۰۰ حلقه چاه‌های عمیق و نیمه‌عمیق است. نزدیک به ۷۵ درصد از چاه‌ها دارای عمق بین ۵۰ تا ۱۰۰ متر، ۱۵ درصد عمق بیش از ۱۰۰ متر و ۹ درصد باقی مانده دارای عمق کمتر از ۵۰ متر هستند (امیری و همکاران، ۲۰۲۳a). بیش از ۹۴ درصد از حجم آب برداشتی از این آبخوان در بخش کشاورزی مصرف می‌شود. همچون اغلب آبخوان‌های کشور، استخراج منابع آب زیرزمینی باعث کاهش سطح آب زیرزمینی در این آبخوان شده است. بین سال‌های ۱۳۶۳ تا ۱۴۰۱، میزان کاهش سالانه و تجمعی سطح آب زیرزمینی به‌ترتیب حدود ۰/۹۵ و ۳۵ متر است (شکل تکمیلی S2).

داده‌ها و روش‌ها

از آنجایی که مدل‌های انتقال آلودگی و ردیابی ذرات به یک مدل جریان آب زیرزمینی واسنجی[1] (کالیبره) شده نیاز دارند (هیل و تایدمن[2]، ۲۰۰۷). در مرحله اول مدل مفهومی و سپس مدل سه بعدی جریان آب زیرزمینی برای منطقه مورد مطالعه تهیه شد. مدل جریان آب زیرزمینی با استفاده از کد MODFLOW، مدل انتقال آلاینده با استفاده از کد MT3DMS و ردیابی ذرات با کد MODPATH در محیط نرم‌افزار GMS انجام شد. در طراحی مدل

[1] Calibration
2 Hill & Tiedeman

مفهومی آبخوان دامنه - داران، طراحی شبکه مدل، مشخص کردن مرزهای مدل و شرایط هیدرولیکی آن‌ها، شناسایی مولفه‌های تغذیه و تخلیه‌کننده آبخوان، درون‌یابی اطلاعات هیدرولیکی و هندسی آبخوان و نسبت دادن آنها به سلول‌های شبکه دنبال شد. پس از تهیه مدل مفهومی، می‌توان شبکه و ابعاد آن را طراحی کرد. کد MODFLOW 2000 از شبکه سلول‌های مرکزی تفاضل محدود برای حل مسائل استفاده می‌کند. با توجه به وضعیت زمین‌شناسی، توپوگرافی، نقشه هم پتانسیل سطح آب و وسعت منطقه مورد مطالعه، شبکه‌ای از ۳۲۶۶ سلول با ابعاد ۵۰۰×۵۰۰ متر (شامل ۴۶ سلول در جهت X و ۷۱ سلول در جهت Y) برای آبخوان دامنه - داران درنظر گرفته شد. پارامترهایی از قبیل توپوگرافی سنگ کف، ارتفاع سطح زمین، مقادیر هدایت هیدرولیکی، ضریب ذخیره، تغذیه سطحی و سطح ایستابی اولیه، متناسب با توزیع مکانی به هر یک از سلول‌های فعال شبکه اختصاص داده شد. مدل جریان آب زیرزمینی برای دو حالت پایدار و ناپایدار تهیه شد. یکی از گزینه‌های قابل‌اجرا برای مدیریت پساب تصفیه‌شده واحد تصفیه‌خانه فاضلاب شهر داران، استفاده از آن برای تغذیه آبخوان است. بنابراین، در این مطالعه سعی شده است که اثر اجرای احتمالی این پروژه با استفاده از شرایط و داده‌های موجود مورد بررسی قرار گیرد. بنابراین، با توجه به ضرورت بررسی انتشار احتمالی آلودگی ناشی از اجرای طرح تغذیه مصنوعی، تهیه مدل انتشار آلودگی و مدل ردیابی ذرات برای شبیه‌سازی نشت و حرکت آلاینده همراه با آب تزریق شده در محدوده تزریق در دستور کار قرار گرفت. در این مطالعه چندین موقعیت برای اجرای تغذیه مصنوعی بر اساس کمترین هزینه، نزدیک‌ترین فاصله به محل تصفیه‌خانه، دورترین فاصله از مناطق مسکونی و چاه‌های شرب و کشاورزی و همین‌طور درنظرگرفتن فاصله از محل‌های ورودی جریانات با کیفیت تغذیه‌کننده آبخوان در بخش‌های شمالی و شمال‌غربی منطقه با الگوی تزریق تک‌چاهی، دوچاهی و حوضچه تغذیه[1] در مجاورت تصفیه‌خانه برای بازه‌های مختلف زمانی ۱، ۵، ۱۰ و ۱۵ ساله مورد ارزیابی قرار گرفته است.

نتایج و بحث

شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی

برای مدل‌سازی دینامیک جریان آب زیرزمینی، ابتدا مدل مفهومی آبخوان بر اساس داده‌های زیر تهیه شد:

مرز محدوده موردمطالعه: مرز آبخوان دامنه - داران به‌عنوان دامنه کار انتخاب شده و به مدل مفهومی وارد شد. این لایه به‌عنوان مرز فعال معرفی شده و بر اساس این مرز، شبکه‌بندی آبخوان در قالب سلول‌هایی با ابعاد ۵۰۰×۵۰۰ متر انجام شد.

خصوصیت‌های هندسی آبخوان: وضعیت هندسی مدل شامل محدوده بین سنگ کف و توپوگرافی سطح آبخوان و شرایط مرزی آبخوان است. سطح ایستابی آبخوان به‌عنوان مرز بالایی مدل و سنگ کف نیز به‌عنوان مرز پایینی مدل درنظر گرفته شد.

[1] Recharge pond

توپوگرافی سطح زمین: به منظور وارد کردن لایه توپوگرافی سطح زمین از نقشه رقومی ارتفاع (DEM[1]) ۳۰ متری استفاده شد. مقادیر ارتفاع در سلول‌های مدل (به‌عنوان توپوگرافی سطح زمین) با استفاده از درون‌یابی تعیین شد (شکل ۲الف).

توپوگرافی سنگ کف: برای تهیه توپوگرافی سنگ کف آبخوان از داده‌های لاگ حفاری چاه‌های عمیق و اطلاعات ژئوفیزیک (مهندسین مشاور یاران معدن آرا، ۱۳۹۶) استفاده شد. مطابق آنچه برای توپوگرافی سطح زمین گفته شد، اطلاعات مربوط به توپوگرافی سنگ کف آبخوان نیز به مدل وارد شده و پس از درون‌یابی، به سلول‌های شبکه نسبت داده شد (شکل ۲ب).

بار هیدرولیکی اولیه: برای مدل‌هایی با شرایط پایدار، مشخص نمودن تراز اولیه آب زیرزمینی، تأثیر مستقیم بر پاسخ مدل ندارد. با این وجود، این مقادیر باید برای اجرای شرایط اولیه بار هیدرولیکی در اختیار مدل قرار گیرد که به این ترتیب قادر باشد بار هیدرولیکی را در کل آبخوان محاسبه کند. بار هیدرولیکی اولیه آبخوان به معنای بار هیدرولیکی در هر گره در شروع دوره‌های زمانی مدل است. به منظور محاسبه بار هیدرولیکی اولیه گره‌ها در مدل پایدار از نقشه متوسط سطح ایستابی سال آبی ۹۹-۹۸ در چاه‌های مشاهده‌ای استفاده شد. این اطلاعات نیز پس از درون‌یابی در GMS، به سلول‌های شبکه نسبت داده شد (شکل ۲ج).

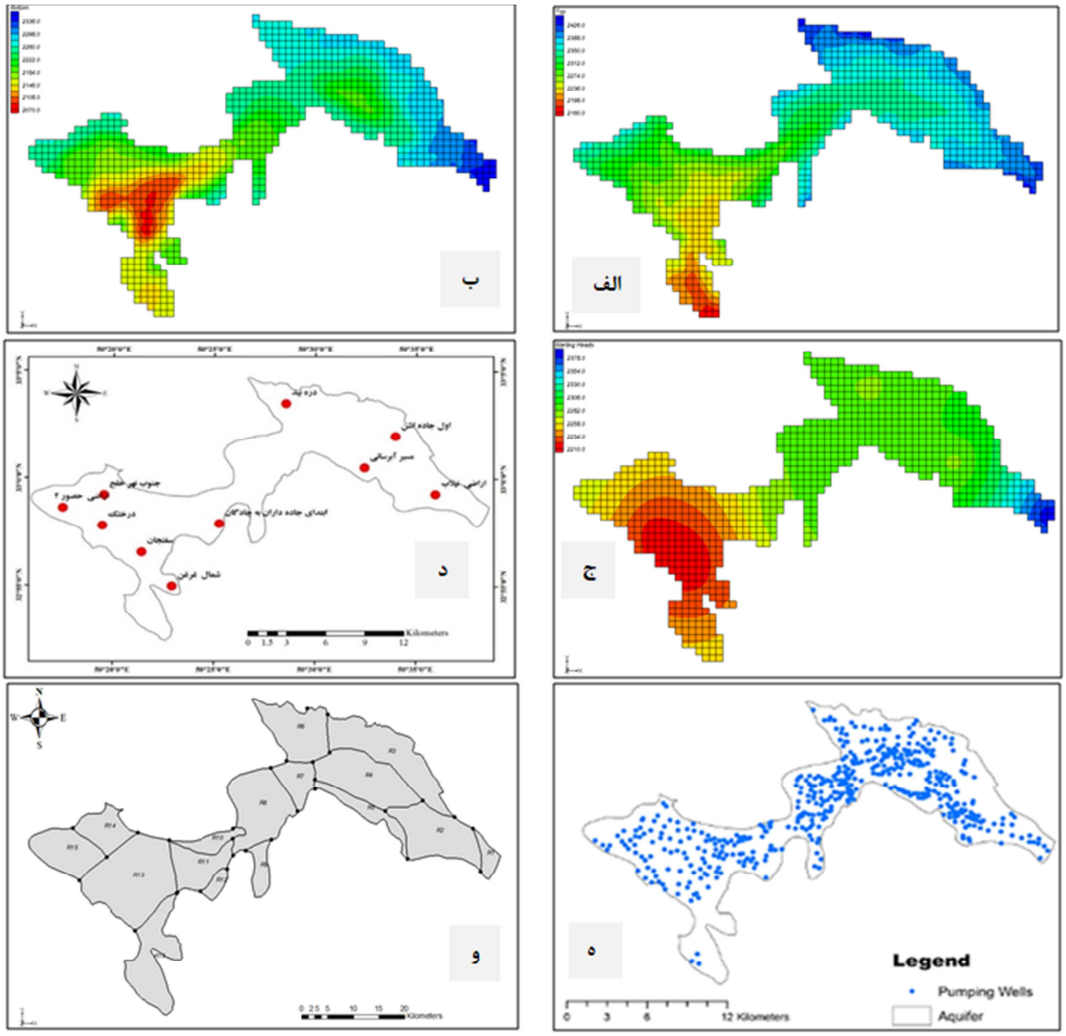
چاه مشاهده‌ای: در این مطالعه از آمار تراز آب زیرزمینی ثبت‌شده در ۱۰ حلقه چاه مشاهده‌ای فعال در این منطقه به‌عنوان نقاط شاهد در شبیه‌سازی استفاده شد (شکل ۲د). بر این اساس، با توجه به درنظر گرفتن یک دوره یک ساله برای شبیه‌سازی، سری زمانی این چاه‌ها از مهر ۱۳۹۸ تا شهریور ۱۳۹۹ از بانک اطلاعاتی شرکت آب منطقه‌ای اصفهان گرفته و برای ماه‌های فاقد آمار بازسازی انجام گرفت. بازسازی بر اساس میانگین تراز آب زیرزمینی ثبت‌شده در دو ماه قبل و بعد انجام گرفت.

چاه‌های بهره‌برداری: مهم‌ترین عامل تخلیه‌کننده آبخوان، پمپاژ از طریق از چاه‌های بهره‌برداری است. براساس آماربرداری مرحله سوم منتهی به سال ۱۳۹۸، میزان تخلیه از چاه‌های بهره‌برداری واقع در محدوده آبخوان دامنه - داران استخراج شده و مورد استفاده قرار گرفت. بر این اساس، این منطقه دارای ۷۹۶ حلقه چاه بهره‌برداری است که با توجه با دبی و کارکرد ثبت‌شده در آخرین دور آماربرداری سراسری، ۴۸۱ حلقه چاه به مدل وارد شد (شکل ۲ه). کل تخلیه سالانه توسط این چاه‌های در حدود ۶۲/۴ میلیون مترمکعب (MCM[2]) ثبت شده است. علاوه بر این، ۱۶ دهنه چشمه و ۵ رشته قنات نیز در محدوده آبخوان وجود دارد که به‌صورت مجزا به مدل وارد شده‌اند.

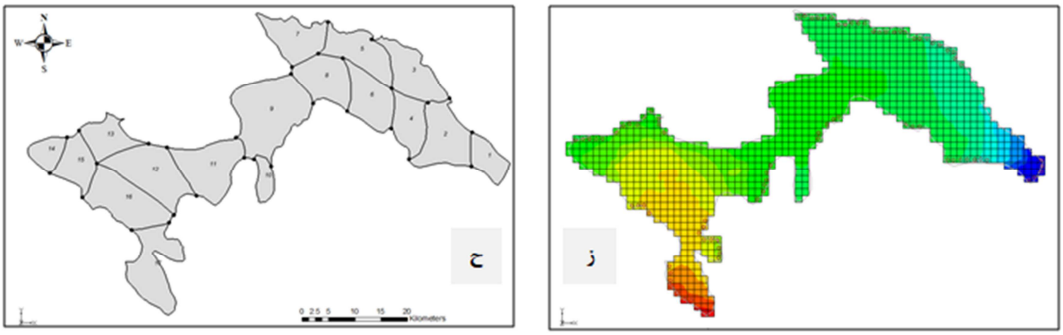
تغذیه از سطح آبخوان: میزان تغذیه ناشی از بارندگی و آب برگشتی کشاورزی برآورد شد. مقدار بارندگی بر اساس داده‌های هواشناسی تعیین شد (اداره کل هواشناسی استان اصفهان، https://esfahanmet.ir/fa/) و در ادامه، مقدار نفوذ ناشی از بارندگی بر اساس نقشه خاک منطقه محاسبه شد. همچنین، میزان آب برگشتی کشاورزی با توجه به وجود چاه‌های کشاورزی، انهار، پمپ‌های سیار، ورود پساب تصفیه‌شده و وضعیت زمین‌های کشاورزی زون‌بندی شد. در نهایت، مقادیر کل تغذیه در آبخوان به‌صورت مناطق گوناگون تغذیه به‌دست آمد (شکل ۲و).

[1] Digital elevation model
[2] Million Cubic Meters

جبهه‌های ورودی و خروجی آبخوان: به منظور اعمال مرزهای ورودی و خروجی آبخوان دامنه – داران، از مرز با بار هیدرولیکی عمومی[1] (GHB) استفاده شد؛ زیرا در این نوع مرز، سطح آب زیرزمینی ثابت نیست و ممکن است به‌دلیل تنش‌های داخلی به مرز تغییر کند. برای تعریف این مرز باید تراز آب زیرزمینی در سلول مرزی و قابلیت انتقال تعریف شود (شکل ۲ز). این لایه به‌صورت نقطه‌ای و در مرزهای تعریف‌شده لحاظ گردید. میزان تراز آب زیرزمینی در هر مرز بر اساس تراز اولیه آب زیرزمینی در آبخوان وارد شد. سری زمانی تراز آب زیرزمینی در هر جبهه نیز بر اساس تغییرات تراز آب زیرزمینی تعریف و برای هر سلول تعریف شد.



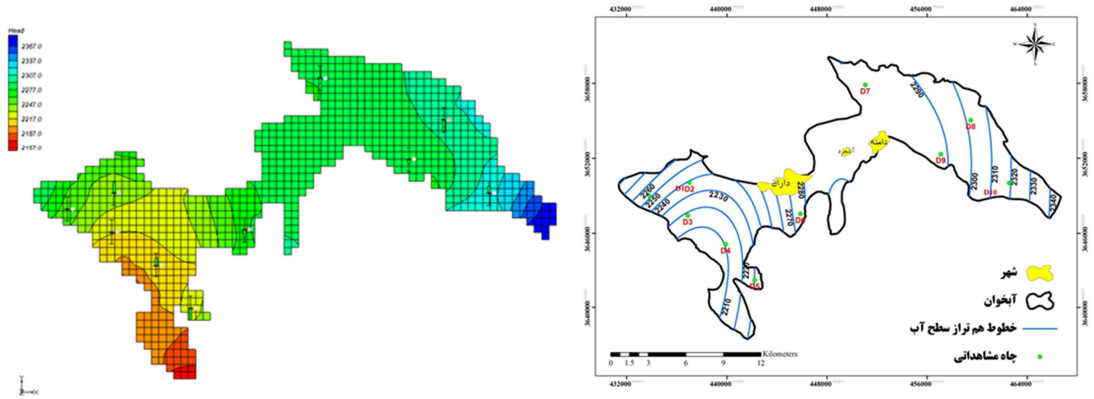
[1] General head boundary



شکل ۲: الف) تراز توپوگرافی سطح زمین، ب) تراز توپوگرافی سنگ کف، ج) بار هیدرولیکی اولیه آبخوان، د) محل چاه‌های مشاهده‌ای، ه) موقعیت چاه‌های بهره‌برداری، و) منطقه‌بندی تغذیه ز) شرایط مرزی مدل و ح) منطقه‌بندی هدایت هیدرولیکی

هدایت هیدرولیکی آبخوان: یکی از مهم‌ترین پارامترهای موثر در رژیم جریان آب زیرزمینی، هدایت هیدرولیکی است. با توجه به عدم وجود مقادیر هدایت هیدرولیکی در بخش‌های مختلف آبخوان، از نسبت قابلیت انتقال به ضخامت آبرفت (T=Kb)، مسیر حرکت آب زیرزمینی و تحلیل نتایج آزمایشات پمپاژ برای تعریف مکانی و مقدار هدایت هیدرولیکی استفاده شد. این لایه‌ها در محیط GIS تهیه شد و پس از ورود به محیط GMS، منطقه از این نظر زون بندی شد. بدین ترتیب منطقه از نظر هدایت هیدرولیکی به ۱۷ منطقه تقسیم‌بندی شد (شکل ۲ح).

پس از تهیه مدل مفهومی، مدل برای شرایط پایدار اجرا شد. شبکه جریان آب زیرزمینی مشاهده‌ای و توزیع تراز آب زیرزمینی محاسبه‌شده توسط مدل در محدوده آبخوان دامنه - داران در شکل ۳ نمایش داده شده است. همان‌طوری‌که مشاهده می‌شود، نتایج شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی مطابقت قابل‌قبولی با اندازه‌گیری‌های تراز آب زیرزمینی دارند.



شکل ۳: مقایسه شبکه جریان آب زیرزمینی مشاهده‌ای (بالا) و شبیه‌سازی (پایین) در آبخوان دامنه - داران (بازه زمانی: سال آبی ۹۸-۹۹)

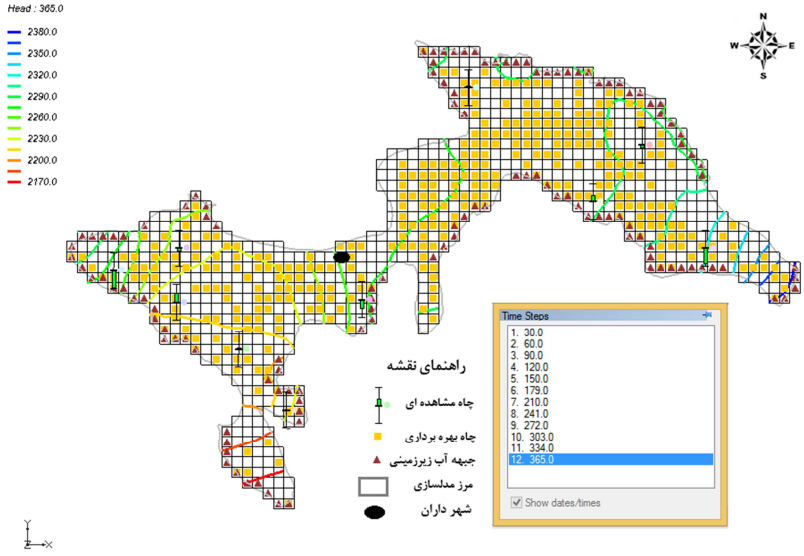
انجام واسنجی مدل ابتدایی برای ورود به مراحل پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی و حصول نتایج قابل‌اعتماد، به‌عنوان یک مرحله ضروری در مدل‌سازی آب زیرزمینی شناخته می‌شود. در این مرحله سعی می‌شود با تغییر پارامترهای ورودی آبخوان با تمرکز بر پارامترهای هیدرولیکی، مدل به‌ترتیبی واسنجی شود که نتایج تراز آب زیرزمینی شبیه‌سازی‌شده با مقادیر اندازه‌گیری‌شده در محل چاه‌های مشاهداتی (شرکت آب منطقه‌ای اصفهان، https://www.esrw.ir/) مطابقت قابل‌قبولی داشته باشند. در جدول ۱، مقایسه‌ای از تراز آب زیرزمینی شبیه‌سازی و مشاهده‌ای در ۱۰ چاه

مشاهداتی با اختلاف بار کمتر از ۱ متر ارائه شده است. نتایج گویای صحت مدل واسنجی‌شده و اطمینان به آن برای پیش‌بینی جریان آب زیرزمینی و انتقال املاح و ردیابی ذرات است.

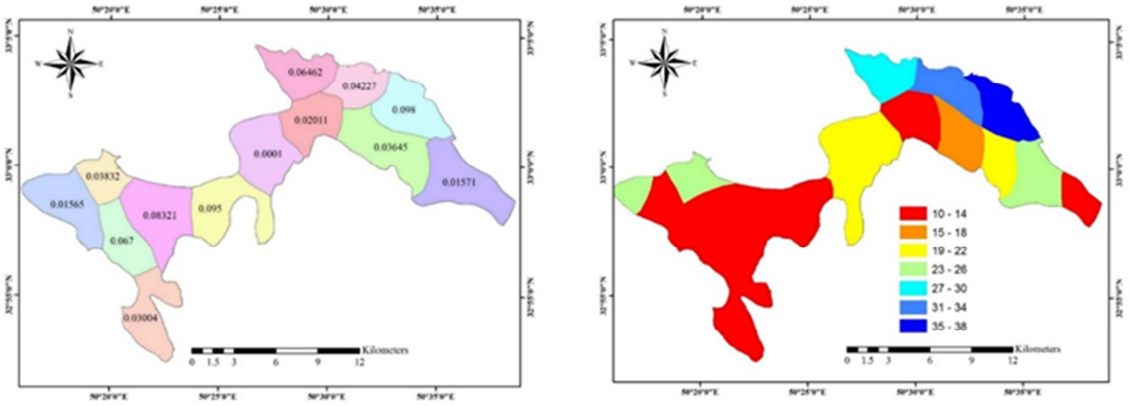
جدول ۱: واسنجی مدل کمی آبخوان دامنه-داران

(۹-۳)چاه مشاهداتی	(۹-۲)تراز آب زیرزمینی (متر)		(۹-۱)درصد تغییرات
	(۹-۵)اندازه‌گیری-شده	(۹-۴)محاسبه‌شده	
D1(۹-۹)	۲۲۵۱/۴(۹-۸)	۲۲۵۱/۴۳(۹-۷)	-۰/۰۳(۹-۶)
D2(۹-۱۳)	۲۲۳۸/۷۴(۹-۱۲)	۲۲۳۹/۶۷(۹-۱۱)	-۰/۹۳(۹-۱۰)
D3(۹-۱۷)	۲۲۱۷/۹۸(۹-۱۶)	۲۲۱۷/۸۱(۹-۱۵)	۰/۱۷(۹-۱۴)
D4(۹-۲۱)	۲۲۱۰/۶۱(۹-۲۰)	۲۲۱۱/۲۸(۹-۱۹)	-۰/۶۷(۹-۱۸)
D5(۹-۲۵)	۲۲۳۰/۴۴(۹-۲۴)	۲۲۲۹/۴۶(۹-۲۳)	۰/۹۸(۹-۲۲)
D6(۹-۲۹)	۲۲۷۵/۹۳(۹-۲۸)	۲۲۷۵/۳۱(۹-۲۷)	۰/۶۲(۹-۲۶)
D7(۹-۳۳)	۲۲۸۱/۸۵(۹-۳۲)	۲۲۸۰/۸۸(۹-۳۱)	۰/۹۷(۹-۳۰)
D8(۹-۳۷)	۲۳۰۲/۰۶(۹-۳۶)	۲۳۰۱/۱۹(۹-۳۵)	۰/۸۷(۹-۳۴)
D9(۹-۴۱)	۲۲۸۷/۶۹(۹-۴۰)	۲۲۸۷/۳۲(۹-۳۹)	۰/۳۷(۹-۳۸)
D10(۹-۴۵)	۲۳۱۹/۲۵(۹-۴۴)	۲۳۱۹/۸۷(۹-۴۳)	-۰/۶۲(۹-۴۲)

مدل نهایی اجراشده، در انتهای دوره یک ساله واسنجی، در شکل ۴ ارائه شده است. به همین ترتیب، شکل نتایج واسنجی هدایت هیدرولیکی (K) و آب‌دهی ویژه (Sy) آبخوان دامنه - داران را نشان می‌دهند (شکل ۵). بر این اساس، مقدار K بین ۱۰ تا ۳۸ متر بر روز و متوسط Sy نیز تقریباً ۵ درصد به‌دست آمد. با توجه به اینکه این مطالعه به پیش‌بینی اثر تغذیه مصنوعی در سه سناریو فرضی (در ادامه تشریح خواهد شد) پرداخته است، نمونه‌برداری هدفمند از منابع آب زیرزمینی برای انجام مرحله صحت‌سنجی انجام نشده است.



شکل ۴: مدل نهایی حالت ناپایدار در آبخوان دامنه-داران



شکل ۵: هدایت هیدرولیکی (m/day) واسنجی‌شده (سمت راست) و توزیع ضریب آب‌دهی ویژه (سمت چپ)

پس از تهیه و تصحیح پارامترهای هیدروژئولوژی توسط مدل در حالت پایدار و نیز در حالت ناپایدار (در گام‌های زمانی مختلف در سال آبی ۱۳۹۹-۱۳۹۸) و اجرای مدل، بیلان نهایی آبی مدل آبخوان دامنه - داران محاسبه شد (جدول ۲). براساس نتایج به‌دست‌آمده توسط مدل، بیلان آبی در سال تهیه مدل (۱۳۹۹-۱۳۹۸) نشان‌دهنده تغییرات مثبت حجم مخزن است.

جدول ۲: اجزا و مقادیر بیلان آبی مدل آبخوان دامنه - داران (بر حسب MCM) در سال آبی ۹۹-۹۸

(۹-۴۶)مولفه‌های بیلان	(۹-۴۷) ورودی	(۹-۴۸)خروجی
(۹-۴۹)چاه‌ها	(۹-۵۰)۰	(۹-۵۱)۵۹/۲۴
(۹-۵۲)تغذیه	(۹-۵۳)۳۲/۰۴	(۹-۵۴)۰
(۹-۵۵)جریان‌های زیرزمینی	(۹-۵۶)۵۵/۵۲	(۹-۵۷)۲۴/۴۳
(۹-۵۸)مجموع	(۹-۵۹)۸۷/۵۶	(۹-۶۰)۸۳/۶۷
(۹-۶۱)خروجی- ورودی	(۹-۶۲)+۳/۹	

شبیه‌سازی الگوی پخش آلودگی با استفاده از مدل MODPATH

محدوده تصفیه‌خانه پساب داران در بالادست بخش مستعد آبخوان از نظر ضخامت و حجم ذخیره قرار گرفته است (مهندسین مشاور یاران معدن آرا، ۱۳۹۶). بنابراین، اجرای هرگونه طرح تغذیه مصنوعی (مانند تزریق پساب تصفیه-شده) می‌تواند بخش قابل‌توجهی از ذخایر آب زیرزمینی و وسعت زیادی از منطقه را تحت تأثیر قرار دهد. بنابراین، تحلیل سرعت و مسیر حرکت آب و آلاینده از محل تغذیه پساب می‌تواند در تحلیل پراکندگی آلودگی و همین‌طور برنامه‌ریزی جهت کنترل و حفاظت از کیفیت آب زیرزمینی سودمند واقع شود. به همین منظور، نحوه حرکت آلاینده نشأت‌گرفته از محل تغذیه مصنوعی فرضی با بهره‌گیری از مدل MODPATH است.

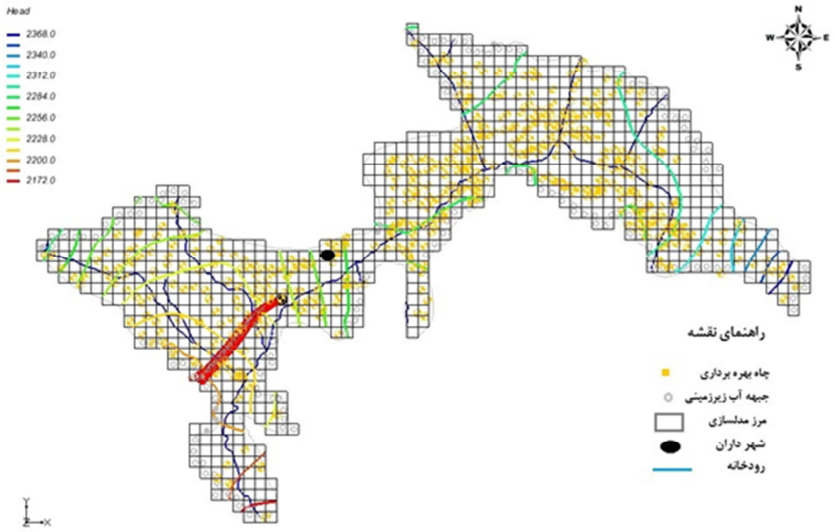
چندین موقعیت با حالت‌های مختلف تک چاهی، دو چاهی و حوضچه نشت برای اجرای تغذیه مصنوعی بر اساس کمترین هزینه، نزدیک‌ترین فاصله به محل تصفیه‌خانه، دورترین فاصله از مناطق مسکونی و چاه‌های شرب و کشاورزی و همین‌طور درنظرگرفتن فاصله از محل‌های ورودی جریانات با کیفیت تغذیه‌کننده آبخوان در بخش‌های شمالی و شمال‌غربی منطقه مورد ارزیابی قرار گرفت. برخی از نتایج اجرای مدل تا زمان رسیدن آب تزریق‌شده به مرز

آبخوان در شکل‌های ۶ تا ۸ (به‌عنوان‌مثال) ارائه شده است. همچنین، نتیجه اجرای مدل در سه حالت تک چاهی، دو چاهی و حوضچه نشت برای ۱، ۵، ۱۰ و ۱۵ سال پس از شروع نشت در جدول ۳ ارائه شده است.

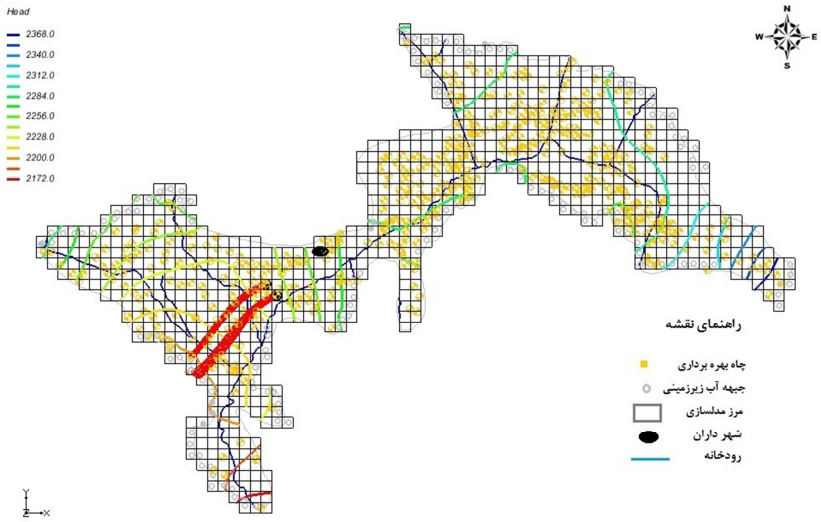
نتایج مدل تغذیه مصنوعی توسط الگوی تک چاهی و دو چاهی برای بازه‌های مختلف زمانی ۱، ۵، ۱۰ و ۱۵ ساله نشان می‌دهد که حرکت آلاینده متناسب با جهت جریان آب زیرزمینی در منطقه و به سمت جنوب غربی آبخوان است. این روند با توجه به استفاده از فرایند همرفت در مدل‌سازی حرکت آلاینده، قابل انتظار است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که تا ۱۵ سال از شروع نشت، بیشینه حرکت آلاینده به حدود ۱۸۵۰ متر از محل تزریق می‌رسد (جدول ۳). این در حالی است که نتایج مدلسازی در الگوی تک چاهی نشان می‌دهد بیشینه زمان مورد نیاز برای خروج آلاینده از مرز آبخوان (شکل ۶) در حدود ۲۲ سال است. لازم به یادآوری است که مسیرها و مدت زمان سیر پساب تزریق-شده از طریق الگوهای مختلف با فرض عدم پمپاژ چاه‌های واقع در مسیر و یا عدم تأثیرپذیری از استرس‌های طبیعی و مصنوعی همچون بارش‌های سیل شدید (نرخ تأمین و نفوذ بالای آب) محاسبه شده است. بدیهی است پمپاژ چاه‌ها در محدوده‌های تعیین‌شده می‌تواند از طریق محدوده‌های آبگیری[1] منحصربه‌فرد خود، الگوی جریان پساب و آلودگی احتمالی و غلظت ترکیبات مختلف را تحت تأثیر قرار دهد.

یکی از مهم‌ترین مزایای افزایش مدت زمان حرکت آب نشتی و حرکت آن در محیط متخلخل، عبور پساب تصفیه-شده از محیط غیراشباع و استفاده از قابلیت خاک برای پاکسازی هرچه بیشتر آن و الحاق آب سالم‌تر (به شرط عدم وجود عوامل کاهنده کیفیت آب در محیط خاک) است (آسانو و کوترو[2]، ۲۰۰۴). ترکیب شیمیایی آب نشتی می‌تواند در نتیجه عبور از بخش غیراشباع و رسیدن به آب زیرزمینی به‌دلیل فرایندهای مختلف فیزیکی و بیوژئوشیمیایی تغییر کند. این تغییرات بیشتر موجب بهبود کیفیت آب زیرزمینی می‌شود (فوکس[3] و همکاران، ۲۰۰۶). مطالعات متعددی نشان داده‌اند که تغذیه مصنوعی توسط آب با کیفیت موجب کاهش مواد مغذی[4] (بکل[5] و همکاران، ۲۰۱۱)، مواد آلی (پترسون[6] و همکاران، ۲۰۱۱)، فلزات و عوامل بیماری‌زا شده است. بااین‌حال، در این مطالعه، اندازه‌گیری متغیرهای فیزیکوشیمیایی متمرکز بر چاه‌های واقع در مسیر جریان پیش‌بینی‌شده آلاینده توسط مدل انجام نشده است. به این ترتیب، تغییر مکانی - زمانی غلظت آلاینده‌های مختلف را نمی‌توان در این مطالعه ارزیابی کرد.

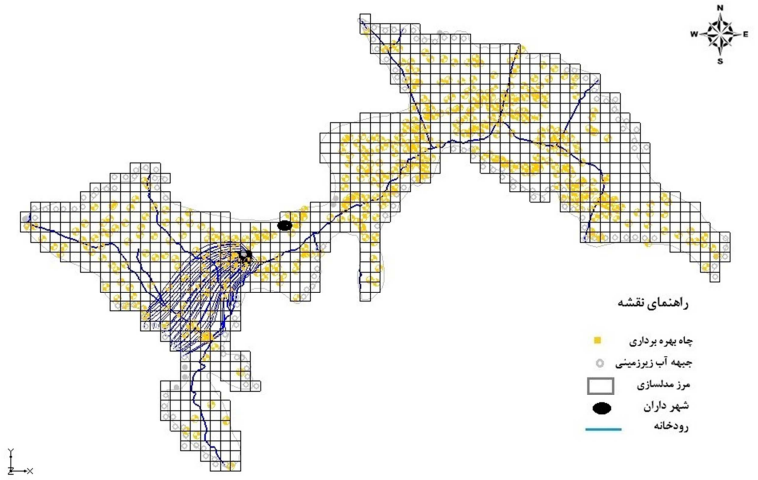
[1] Capture zone
[2] Asano and Cotruvo
[3] Fox
[4] Nutrients
[5] Bekele
[6] Patterson



شکل ۶: مسیر حرکت آب تغذیه‌شده در حالت تزریق تک چاهی تا زمان رسیدن به مرز محدوده



شکل ۷: مسیر حرکت آب تغذیه‌شده در حالت تزریق دو چاهی تا زمان رسیدن به مرز محدوده



شکل ۸: مسیر حرکت آب تغذیه‌شده در حالت حوضچه نشت تا زمان رسیدن به مرز محدوده

جدول ۳: محدوده اثر طرح تغذیه مصنوعی در حالت‌های مختلف تک چاهی، دو چاهی و حوضچه‌ای

سناریو(۹-۶۳)		موقعیت جغرافیایی(۹-۶۴)		طول مسیر حرکت (متر)(۹-۶۵)				
		UTMX(۹-۶۶)	UTMY(۹-۶۷)	۱(۹-۶۸) سال	۵(۹-۶۹) سال	۱۰(۹-۷۰) سال	۱۵(۹-۷۱) سال	تا(۹-۷۲) رسیدن به مرز آبخوان
تک چاهی(۹-۷۳)		۴۴۲۴۵۱(۹-۷۴)	۳۶۴۷۶۰۹(۹-۷۵)	۱۳۷(۹-۷۶)	۶۸۰(۹-۷۷)	۱۲۹۵(۹-۷۸)	۱۸۵۰(۹-۷۹)	۵۳۲۰(۹-۸۰)
دو چاهی(۹-۸۱)	چاه(۹-۸۲) ۱	۴۴۲۴۵۱(۹-۸۳)	۳۶۴۷۶۰۹(۹-۸۴)	۱۲۹(۹-۸۵)	۶۶۰(۹-۸۶)	۱۲۷۸(۹-۸۷)	۱۸۱۴(۹-۸۸)	۵۷۳۰(۹-۸۹)
	چاه(۹-۹۰) ۲	۴۴۱۹۶۷(۹-۹۱)	۳۶۴۸۱۳۴(۹-۹۲)	۱۱۷(۹-۹۳)	۵۷۸(۹-۹۴)	۱۰۹۰(۹-۹۵)	۱۵۵۵(۹-۹۶)	۵۱۵۰(۹-۹۷)
حوضچه نشت(۹-۹۸)		۴۴۲۴۲۷(۹-۹۹)	۳۶۴۸۲۲۲(۹-۱۰۰)	۳۲۰(۹-۱۰۱)	۱۲۶۰(۹-۱۰۲)	۲۳۲۰(۹-۱۰۳)	۳۰۰۰(۹-۱۰۴)	۶۴۵۰(۹-۱۰۵)

مطالعات نشان می‌دهد که هم عوامل زمین‌زاد[1] و هم عوامل انسانی[2]، ترکیب فیزیک‌وشیمیایی آب‌های زیرزمینی این منطقه را کنترل می‌کنند (امیری و همکاران، ۲۰۲۴). برهمکنش آب با سازندهای کربناته و تبادل کاتیونی معکوس[3] از عوامل اصلی زمین‌زاد موثر بر ترکیب شیمیایی آب‌های زیرزمینی هستند. از طرفی دیگر، کودهای شیمیایی و نشت فاضلاب مهم‌ترین منابع افزایش غلظت برخی از آلاینده‌های انسانی همچون نیترات هستند. بنابراین، علیرغم اینکه نتایج نشان داده که حدود ۹۸ درصد از ۱۲۶ نمونه آب زیرزمینی گردآوری‌شده از این منطقه بین سال‌های ۱۳۹۵ تا ۱۴۰۱ دارای کیفیت عالی تا متوسط برای مصرف شرب هستند (امیری و همکاران، ۲۰۲۳b)، توسعه کشاورزی و استفاده از کودهای شیمیایی می‌تواند آلودگی بیشتر منابع آب را به‌دنبال داشته باشد. این در حالیست که نتایج شبیه‌سازی الگوی پخش آلودگی با استفاده از مدل MODPATH در الگوهای مختلف نشان می‌دهد که صرف‌نظر از محل تزریق، جریان پساب تصفیه‌شده می‌تواند بخش‌های قابل‌توجهی از منابع آب موجود در مسیر حرکت خود را به‌دلیل شرایط توپوگرافی منطقه، مسیر جریان عمومی آب زیرزمینی و بار هیدرولیکی ناشی از تغذیه مصنوعی در محل‌های تزریق آلوده کند.

[1] Geogenic
[2] Anthropogenic
[3] Reverse cation exchange

علاوه بر فعالیت‌های کشاورزی، نشت پساب خانگی و صنعتی نیز می‌تواند ترکیبات مختلف شیمیایی را به آب زیرزمینی وارد کند. این در حالیست که برخی از این ترکیبات شیمیایی می‌توانند به‌صورت طبیعی در توده آب و همین‌طور خاک منطقه وجود داشته باشند. به همین منظور، در هرگونه تحلیل در زمینه نقش الگوهای تغذیه مصنوعی با استفاده از پساب تصفیه‌شده، ضمن اینکه باید تغییرات تراز آب زیرزمینی را در مسیرهای پیش‌بینی‌شده مد نظر قرار دهد، بررسی تغییرات فیزیک‌وشیمیایی آب زیرزمینی را قبل و بعد از اجرای این‌گونه پروژه‌ها نباید فراموش کرد. امیری و همکاران (۲۰۲۴) سطح پس‌زمینه طبیعی[1] و متغیرهای اصلی و فلزات سنگین شامل مس، روی، جیوه، کادمیوم، سرب را با استفاده از روش‌های احتمالی[2] و قطعی[3] در این منطقه محاسبه کردند. علاوه بر این، با تعیین حدود آستانه[4] شناسایی نقش عوامل طبیعی و انسانی در کنترل غلظت هر یک از ترکیبات فیزیک‌وشیمیایی را مورد توجه قرار داد. نتایج نشان می‌دهد که سطح پس‌زمینه طبیعی و مقدار آستانه محاسبه‌شده برای تمام فلزات سنگین کمتر از مقادیر مرجع توصیه‌شده توسط WHO (۲۰۱۷) است. این به معنای امکان ثبت مستقیم و نسبتاً سریع تأثیر پساب تصفیه‌شده (در صورت دارا بودن بار آلودگی بیشتر از مقدار پس‌زمینه) بر منابع آب زیرزمینی است. به عبارتی دیگر، هرگونه غلظت بیشتر از مقدار پس‌زمینه به معنای نقش عوامل انسانی (در اینجا تغذیه مصنوعی با پساب تصفیه‌شده) می‌باشد. البته باید یادآور شده این تغییرات در پارامترهای فیزیک‌وشیمیایی باید همراه با تغییرات کمی و بالا آمدن تراز آب زیرزمینی به‌ویژه در نزدیکی محل‌های تزریق و نشت نیز باشد.

بدون شک حرکت آب و آلاینده در محیط آبرفتی می‌تواند منجر به کاهش برخی از ترکیبات شیمیایی در ترکیب آب زیرزمینی به‌دلیل فرایندهای مختلف پاکسازی طبیعی[5] قرار گیرد. در تحلیل دقیق غلظت‌ها و دامنه گسترش نفوذ آلودگی باید به نقش هر یک از فرایندهایی از قبیل پاکسازی زیستی[6]، رقیق شدن[7]، تبخیر[8]، جذب[9] و ... توجه شود.

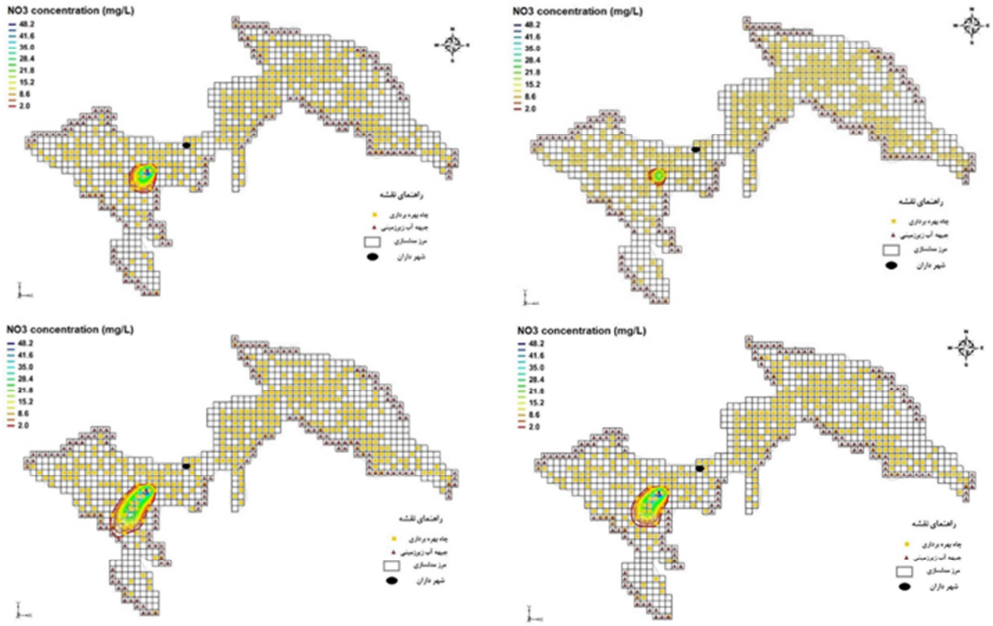
یکی از مهم‌ترین مشکلاتی است که در پروژه‌های تغذیه مصنوعی با پساب تصفیه‌شده مشاهده می‌شود، انسداد[10] منافذ خاک به‌دلیل عوامل فیزیکی، شیمیایی و زیستی است و موجب کاهش نرخ نفوذ می‌شود (عبدالرحمن[11] و همکاران، ۲۰۲۱). برخی از این عوامل شامل ویژگی‌های خاک‌شناسی محیط، ترکیب بیوژئوشیمیایی پساب و روش اجرای پروژه است. مارتین[12] (۲۰۱۳) و پین[13] (۱۹۹۵) نشان دادند که به منظور کاهش انسداد فیزیکی منافذ باید مقدار توربیدیتی کمتر از ۵ NTU باشد. این در حالی است که نتایج آنالیز پساب تصفیه‌شده داران نشان می‌دهد که مقدار توربیدیتی در سال ۱۳۹۹ حتی تا ۲۰۶ NTU هم رسیده است. در سال ۱۴۰۰، بیشینه و متوسط مقدار توربیدیتی به‌ترتیب ۴۰ و ۱۳ NTU گزارش شده است (امیری و همکاران، ۲۰۲۳a). بنابراین، به منظور کاهش انسداد منافذ خاک و اثر آن بر کاهش نرخ نفوذ و همین‌طور هدررفت آب توسط تبخیر و یا راکد بودن آب در فصول سرد و

[1] Natural background level
[2] Probabilistic
[3] Deterministic
[4] Threshold value
[5] Natural attenuation
[6] Bioremediation
[7] Dilution
[8] Evaporation
[9] Absorption
[10] Clogging
[11] Abdalrahman
[12] Martin
[13] Pyne

ایجاد منطقه‌ای با ظاهر و بوی نامطبوع و محلی برای رشد حشرات، باید مطالعات جامعی در مورد عوامل یادشده انجام شود.

مدل‌سازی کیفی آبخوان با استفاده از مدل MT3DMS

در شکل شماره ۹، وضعیت گسترش هاله[1] آلودگی از ۵۰۰ تا ۱۴۰۰۰ روز از شروع تزریق پساب تصفیه‌خانه داران با مقدار نیترات اولیه ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر شبیه‌سازی شده است. با توجه به محدوده گسترش هاله آلودگی در زمان‌های مختلف، انتظار می‌رود که برخی از چاه‌های بهره‌برداری تحت تأثیر کمیت و کیفیت پساب تزریق‌شده قرار گیرند. نتایج شبیه‌سازی تغییرات غلظت پارامترهای کیفی آبخوان می‌توان با استفاده از مدل MT3DMS نشان می‌دهد که پس از ۵۰۰، ۵۰۰۰، ۱۰۰۰۰ و ۱۴۰۰۰ روز از شروع نشت، به‌ترتیب ۵، ۱۵، ۲۰ و ۲۶ حلقه چاه در محدوده تأثیر هاله آلودگی قرار می‌گیرد (شکل ۹ و جدول ۴).



شکل ۹: وضعیت هاله آلودگی پس از ۵۰۰ ، ۵۰۰۰، ۱۰۰۰۰ و ۱۴۰۰۰ روز از شروع تزریق پساب

جدول ۴: وضعیت گسترش هاله آلودگی ناشی از تزریق پساب تصفیه‌خانه داران

(۹-۱۰۶)حالت	(۹-۱۰۷)زمان از شروع تزریق (روز)	(۹-۱۰۸)بیشنه طول هاله (متر)	(۹-۱۰۹)بیشینه عرض هاله (متر)	(۹-۱۱۰)تعداد چاه‌ها در محدوده اثر هاله
۱(۹-۱۱۱)	۵۰۰(۹-۱۱۲)	۳۷۰(۹-۱۱۳)	۴۲۰(۹-۱۱۴)	۵(۹-۱۱۵) حلقه
۲(۹-۱۱۶)	۵۰۰۰(۹-۱۱۷)	۷۹۰(۹-۱۱۸)	۶۸۰(۹-۱۱۹)	۱۵(۹-۱۲۰) حلقه
۳(۹-۱۲۱)	۱۰۰۰۰(۹-۱۲۲)	۱۱۵۰(۹-۱۲۳)	۷۵۰(۹-۱۲۴)	۲۰(۹-۱۲۵) حلقه
۴(۹-۱۲۶)	۱۴۰۰۰(۹-۱۲۷)	۱۵۹۰(۹-۱۲۸)	۷۹۰(۹-۱۲۹)	۲۶(۹-۱۳۰) حلقه

[1] Plume

نتیجه‌گیری

چندین موقعیت با سناریوهای مختلف تک چاهی، دو چاهی و حوضچه نشت برای اجرای تغذیه مصنوعی بر اساس کمترین هزینه، نزدیک‌ترین فاصله به محل تصفیه‌خانه، دورترین فاصله از مناطق مسکونی و چاه‌های شرب و کشاورزی و همین‌طور درنظرگرفتن فاصله از محل‌های ورودی جریانات با کیفیت تغذیه‌کننده آبخوان در بخش‌های شمالی و شمال‌غربی منطقه مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که حرکت آلاینده متناسب با جهت جریان آب زیرزمینی در منطقه و به سمت جنوب غربی آبخوان است. بر اساس مدل‌سازی انتقال آلاینده، پس از ۱۵ سال از شروع نشت، بیشینه حرکت آلاینده به حدود ۱۸۵۰ متر از محل تزریق رسید. با توجه محدوده گسترش هاله آلودگی در زمان‌های مختلف، پس از ۵۰۰، ۵۰۰۰، ۱۰۰۰۰ و ۱۴۰۰۰ روز از شروع نشت، به‌ترتیب ۵، ۱۵، ۲۰ و ۲۶ حلقه چاه بهره‌برداری در محدوده تأثیر هاله آلودگی قرار گرفت. بنابراین، چنانچه آب برداشت‌شده توسط این چاه‌ها برای مصرف شرب استفاده می‌شود، باید پایش مستمر کیفیت آب برای جلوگیری از هرگونه آسیب به مصرف‌کنندگان انجام شود. علاوه بر این، باید اطمینان حاصل شود که محصولات کشاورزی تولیدشده در محدوده اثر این هاله آب تزریق‌شده به آبخوان عاری از آلودگی‌های همراه با پساب باشند.

تقدیر و تشکر

این مقاله بخشی از نتایج پروژه تحقیقاتی با کد ESE-011400 است که با حمایت مالی شرکت آب منطقه‌ای اصفهان به انجام رسیده است. به این ترتیب، به موجب فراهم‌ساختن داده‌های استفاده‌شده در این مقاله، از مجموعه محترم آن شرکت قدردانی می‌گردد.

منابع

اداره کل هواشناسی استان اصفهان. (۱۴۰۳). صفحه اصلی. بازیابی در ۲۰ اکتبر ۲۰۲۳، از https://esfahanmet.ir/fa/

بنابفرویی، حمیدرضا؛ علی‌محمدی، سعید. (۱۴۰۱). مقایسه اقتصادی گزینه‌های تغذیه مصنوعی آب زیرزمینی با استفاده از پساب تصفیه-شده (آبخوان دشت یزد - اردکان)، مجله آب و فاضلاب، دوره ۳۳، شماره ۵، صص: ۱۴۲-۱۵۰.

حسن پور، مجتبی؛ خزیمه نژاد، حسین. (۱۳۹۷). مکان‌یابی چاه‌های تغذیه جهت تغذیه مصنوعی و بهبود کیفیت آبخوان دشت بیرجند با استفاده از پساب تصفیه‌شده فاضلاب. پژوهش در بهداشت محیط، دوره ۴، شماره ۳، صص: ۲۱۵-۲۲۶.

شرکت آب منطقه‌ای اصفهان. (۱۴۰۳). https://www.esrw.ir/

لاله زاری، رضا؛ طباطبایی، سیدحسن؛ خیاط خلقی، مجید؛ یارعلی، نبی‌اله؛ صبا، علی اکبر. (۱۳۹۳). بررسی سناریوهای تغذیه مصنوعی با فاضلاب تصفیه‌شده بر کمیت و کیفیت آبخوان شهرکرد. محیط‌شناسی، دوره ۴۰، شماره ۶۹، صص: ۲۲۱-۲۳۶.

مهندسین مشاور یاران معدن آرا. (۱۳۹۶). مطالعه ژئوالکتریک دشت آبرفتی محدوده مطالعاتی دامنه - داران، شرکت آب منطقه‌ای اصفهان، ص: ۱۱۷.

Abdalrahman, G.A., Lai, S.H., Snounu, I., Kumar, P., Sefelnasr, A., Sherif, M., El-shafie, A., (2021). Review on wastewater treatment ponds clogging under artificial recharge: Impacting factors and future modelling. Journal of Water Process Engineering, 40, 101848. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101848.

Aleisa, E. (2019). Analysis on reclamation and reuse of wastewater in Kuwait. Journal of Engineering Research, 7(1), pp 1-13.

Ali, S., Wang, Q., Liu, D., Fu, Q., Rahaman, Md. M., Faiz, M. A., Cheema, M. J. M. (2022). Estimation of spatio-temporal groundwater storage variations in the Lower Transboundary Indus Basin using GRACE satellite. Journal of Hydrology, 605, 127315. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127315.

Aly Gondia,M.K., Bakr, M., Mohamed, A.G., (2021). Sustainable management of treated wastewater, the New El-Mahsama wastewater treatment plant in Sinai. Journal of Environmental Treatment Techniques, 9(4), pp 804–814.
Amiri, V., Ali, S., Sohrabi, N., (2023). Estimating the spatio-temporal assessment of GRACE/GRACE-FO derived groundwater storage depletion and validation with in-situ water quality data (Yazd province, central Iran). Journal of Hydrology, 620,129416. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129416
Amiri, V., Ali, S., Sohrabi, N., Amiri, F. (2023a). Hydrogeochemical evaluation with emphasis on nitrate and fluoride in urban and rural drinking water resources in western Isfahan province, central Iran. Environmental Science and Pollution Research, 30, pp 108720-108740. https://doi.org/10.1007/s11356-023-30001-0
Amiri, V., Nakagawa, K. (2021). Using a linear discriminant analysis (LDA)-based nomenclature system and self-organising maps (SOM) for spatiotemporal assessment of groundwater quality in a coastal aquifer. Journal of Hydrology, 603, 127082. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127082
Amiri, V., Sohrabi, N., Lak, R., Tajbakhsh, G. (2024). Estimation of natural background levels of heavy metals and major variables in groundwater to ensure the sustainable supply of safe drinking water in Fereidan. Iran. Environment, Development and Sustainability, 26, pp 19807-19832. https://doi.org/10.1007/s10668-023-03438-z
Amiri, V., Sohrabi, N., Li, P., Amiri, F. (2023b). Groundwater Quality for Drinking and Non-Carcinogenic Risk of Nitrate in Urban and Rural Areas of Fereidan, Iran. Exposure and Health, 15, pp 807-823. https://doi.org/10.1007/s12403-022-00525-w
ARMCAN, ANECC, NHMRC, Agriculture and Resource Management Council of Australia and New Zealand, Australian and New Zealand Environment and Conservation Council, National Health and Medical Research Council, (2000). National Water Quality Management Strategy. Guidelines for Sewerage Systems: Use of Reclaimed Water, Australia. Available at: use-reclaimed-water.pdf (waterquality.gov.au).
Asano, T., & Cotruvo, J. A. (2004). Groundwater recharge with reclaimed municipal wastewater: Health and regulatory considerations. Water Research, 38(8), 1941-1951. https://doi.org/10.1016/j.watres.2004.01.023
Ashraf, S., Nazemi, A., Agha Kouchak, A. (2021). Anthropogenic drought dominates groundwater depletion in Iran. Scientific Reports, 11, 9135. https://doi.org/10.1038/s41598-021-88522-y
Bekele, E., Toze, S., Patterson, B., Higginson, S. (2011). Managed aquifer recharge of treated wastewater: water quality changes resulting from infiltration through the vadose zone. Water Research, 45(17), pp 5764-5772. https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.08.058
Bloetscher, F., Meeroff, D. E., Phonpornwithoon. P. (2019). Assessing Risk of Injection of Reclaimed Water into the Biscayne Aquifer for Aquifer Recharge Purposes. Journal of Geoscience and Environment Protection, 7, 184-201. https://doi.org/10.4236/gep.2019.77013
Cao, X., Shi, Y., He, W., An, T., Chen, X., Zhang, Z., Liu, F., Zhao, Y., Zhou, P., Chen, C., He, J., He, W. (2022). Impacts of anthropogenic groundwater recharge (AGR) on nitrate dynamics in a phreatic aquifer revealed by hydrochemical and isotopic technologies. Science of the Total Environment, 839, 156187. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156187
Chen, Z., Huang, J., Zhan, H., Wang, J., Dou, Z., Zhang, C., Chen, C., Fu, Y. (2022). Optimisation schemes for deep foundation pit dewatering under complicated hydrogeological conditions using MODFLOW-USG. Engineering Geology, 303, 106653. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2022.106653
Chepkemoi, A.K., Home, P., Raude, J., Kiptum, C. (2022). Modelling of Groundwater Potential in Kericho County, Kenya, Using GMS_MODFLOW. Scientific African, https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2022.e01492.
de Graaf, I.E.M., Gleeson, T., van Beek, L.P.H., Sutanudjaja, E.H., Bierkens, M.F.P. (2019). Environmental flow limits to global groundwater pumping. Nature, 574, pp 90-94. https://doi.org/10.5683/SP2/D7I7CC.
Dillon, P., Arshad, M. (2016). Managed aquifer recharge in integrated water resource management. Integrated Groundwater Management. Springer, Cham, pp. 435–452. https://doi.org/10.1007/978-3-319-23576-9_17
Dillon, P.J., (2004). Future management of aquifer recharge. Hydrogeology Journal, 13(1), pp 313-316. https://doi.org/10.1007/s10040-004-0413-6
Ding, G.Y., Chen, G.L., Liu, Y.D., Li, M., Liu, X. (2020). Occurrence and risk assessment of fluoroquinolone antibiotics in reclaimed water and receiving groundwater with different replenishment pathways. Science of the Total Environment, 738. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139802
Fox, P. et al., (2006). Advances in Soil Aquifer Treatment Research for Sustainable Water Reuse. Denver, Awwa Research Foundation, p. 200.
Han, Z., Huang, S., Huang, Q., Leng, G., Liu, Y., Bai, Q., He, P., Liang, H., Shi, W. (2021). GRACE-based high-resolution propagation threshold from meteorological to groundwater drought. Agricultural and Forest Meteorology, 307, 108476. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108476.
Hill, M.C, Tiedeman, C.R. (2007). Effective groundwater model calibration: with analysis of data, sensitivities, predictions, and uncertainty. https://doi.org/10.1002/9780470041086.index
Jafari, T., Kiem, A. S., Javadi, S., Nakamura, T., Nishida, K. (2021). Fully integrated numerical simulation of surface water-groundwater interactions using SWAT-MODFLOW with an improved calibration tool. Journal of Hydrology: Regional Studies, 35, 100822. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100822.
Jodar-Abellan, A., López-Ortiz, M.I., Melgarejo-Moreno, J., (2019). Wastewater treatment and water reuse in Spain. Current situation and perspectives. Water, 11(8), 1551. https://doi.org/10.3390/w11081551
Kesari, K.K., Soni, R., Jamal, Q.M.S. (2021). Wastewater treatment and reuse: review of its applications and health implications. Water, Air, & Soil Pollution, 232, 208. https://doi.org/10.1007/s11270-021-05154-8

Kong, Y.C. (2020). Water reclamation and reuse in Singapore. Journal of Environmental Engineering, 146(4), 03120001. https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.000167
Liu, Y., Jiang, Y., Xu, C., Lyu, J., Su, Z. (2022). A quantitative analysis framework for water-food-energy nexus in an agricultural watershed using WEAP-MODFLOW. Sustainable Production and Consumption, 31, pp 693-706. https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.03.032.
Lyazidi, R., Hessane, M. A., Moutei, J. F., Bahir, M. (2020). Developing a methodology for estimating the groundwater levels of coastal aquifers in the Gareb-Bourag plains, Morocco, embedding the visual MODFLOW techniques in a groundwater modeling system. Groundwater for Sustainable Development, 11, 100471. https://doi.org/10.1016/j.gsd.2020.100471.
Manisha, M., Verma, K., Ramesh, N., Anirudha, T.P., Santrupt, R.M., Das, R., Mohan Kumar, M.S., Chanakya, H.N., Rao, L. (2023). Socio-economic impact assessment of large-scale recycling of treated municipal wastewater for indirect groundwater recharge. Science of the Total Environment, 859. 160207. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160207
Martin, R. (2013). Clogging issues associated with managed aquifer recharge methods. IAH Commission on Managing Aquifer Recharge, Australia.
Mazari-Hiriart, M., Ponce-de-Leon, S., Lopez-Vidal, Y., Islas-Macias, P., Amieva-Fernández, R.I., Quiñones-Falconi, F. (2008). Microbiological implications of periurban agriculture and water reuse in Mexico City. PLoS One, 3(5), 2305. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0002305
Patterson, B., Shackleton, M., Furness, A., Bekele, E., Pearce, J., Linge, K., Busetti, F., Spadek, T., Toze, S. (2011). Behaviour and fate of nine recycled water trace organics during managed aquifer recharge in the aerobic aquifer. Journal of Contaminant Hydrology,122(1-4), pp 53-62. https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2010.11.003
Pietrzak, D. (2021). Modeling migration of organic pollutants in groundwater - Review of available software. Environmental Modelling and Software, 144, 105145. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2021.105145
Pyne, R.D.G. (1995). Groundwater recharge and wells: A guide to aquifer storage recovery. Routledge, New York.
Saad, S., Javadi, A. A., Abd-Elhamid, H. F., Farmani, R. (2023). Mitigating seawater intrusion in coastal aquifers: Novel approach with treated wastewater injection and groundwater circulation. Journal of Hydrology, 626, 130139. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.130139
Shan, V., Singh, S.K., Haritash, A.K. (2020). Water crisis in the Asian countries: status and future trends. Resilience, Response, and Risk in Water Systems, pp. 173-194. https://doi.org/10.1007/978-981-15-4668-6_10
Shawaqfah, M., Almomani, F., Al-Rousan, T. (2021). Potential use of treated wastewater as groundwater recharge using GIS techniques and modeling tools in Dhuleil-Halabat well-field/Jordan. Water, 13(11), 1581. https://doi.org/10.3390/w13111581
Sprenger, C., Hartog, N., Hernández, M., Vilanova, E., Grützmacher, G., Scheibler, F., Hannappel, S. (2017). Inventory of managed aquifer recharge sites in Europe: historical development, current situation and perspectives. Hydrogeology Journal, 25, pp 1909-1922. https://doi.org/10.1007/s10040-017-1554-8
Sun, K., Hu, L., Sun, J., Zhai, Y., Zhang, S., Cao, X. (2023). Quantifying the contribution of ecological water replenishment on aquifer recovery using a refined groundwater model. Science of the Total Environment, 857, 159216. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159216
Tortajada, C., Bindal, I. (2020). Water Reuse in Singapore: The New Frontier in the Framework of a Circular Economy. Water Reuse Within a Circular Economy Context, 2 Available at: Water_reuse_in_Singapore_The_new_frontier_in_a_framework_of_a_circular_economy withcover-page-v2.pdf (d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net).
World Health Organisation (WHO). (2017). Guidelines for drinking water quality: Fourth edition, incorporating the first addendum. Geneva: World Health Organisation.

Journal of Natural Environment Hazards
Print ISSN: 2676 - 4377 Online ISSN: 2676 - 4385
Homepage: https://jneh.usb.ac.ir

Journal of Natural Environmental Hazards, Vol 15, Iss 47, March 2026

Assessment of the Socio-Environmental Effects of the Wet Waste Processing Station Using Simpson's Representation Matrices and Rapid Assessment

Ehsan Khalili[1], Mohammadsaber Baghkhanipour[2], Seyed Hossein Hosseini[3], Farzad Mehrjo[4*]

1. *Master's Graduate, Department of Agricultural Economics, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran*

2. *PhD. Graduate, Department of Planning and Designing the Environment, Environmental Sciences Research Institute (ESRI), Shahid Beheshti University, Tehran, Iran*

3. *MSc. Student, Department of Education, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran*

4. Corresponding Author, *Assistant Professor, Department of Water Sciences and Engineering, Faculty of Agriculture, Kashmar Higher Education Institute, Kashmar, Iran*

Email: *mehrjo@kashmar.ac.ir* ***ORCID:*** *https://orcid.org/0000-0003-4439-2221*

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received: 24 January 2025
Revised: 22 September 2025
Accepted: 21 October 2025
Published: 21 March 2026

Keywords:
Waste management, Tehran municipality, Placement factors, Compost, Environment.

ABSTRACT

Waste management resulting from human activities and its socio-environmental effects has been a worldwide challenge in recent years. One of the options for processing wet waste is the compost production from it, which has had positive and negative economic, environmental, and social consequences. This study aimed to determine the social and environmental effects of the Pahneh-e-Jahad compost station in District 19 of Tehran Municipality and the corrective measures to mitigate its negative effects using the rapid impact assessment matrix along with the Simpson impact representation method. To collect information, interviews, document studies, and field visits were used. Then, the identified socio-environmental effects were examined qualitatively using the Simpson representation matrix method and quantitatively using the rapid assessment matrix method. Results of the evaluation of the categories in physical-chemical components were -293, socio-cultural 181, biological-ecological -24, and economic and operational +200. Among the matrix impact categories, the most positive outcomes were economic-operational effects, and the most negative and destructive outcomes were physical-chemical effects. Based on the rapid assessment matrix, the overall station score was -298. Based on the results of the RIAM matrix and scoping, the negative effects of the station prevail over its positive effects. This means that the existence of the studied station under current conditions has had destructive effects on the environment and local community. The compost station is not environmentally sustainable and will ultimately lead to social problems. Therefore, the continuation of the study station is socio-environmental unacceptable and will result in destructive environmental and social damage in the not-so-distant future. It is recommended to modify the waste management process by adopting an active aeration system equipped with a filtration unit to further minimise odour emissions. Additionally, relocating the station to a more suitable site, distant from residential and agricultural zones, is advised to mitigate potential environmental and social impacts.

How to Cite: Khalili, E. , Baghkhanipour, M. , Hosseini, S. H. and Mehrjo, F. (2026). Assessment of the Socio-Environmental Effects of the Wet Waste Processing Station Using Simpson's Representation Matrices and Rapid Assessment. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 15(47), 91-116.

© The Author/Authors

DOI: 10.22111/jneh.2025.50905.2099

Publisher: University of Sistan and Baluchestan

EXTENDED ABSTRACT

INTRODUCTION

Waste management has been a topic of interest to many researchers and planners worldwide in recent years due to human activities and their socio-environmental impacts. If not managed properly, waste will have profound and adverse effects on the environment (Mirzaee et al, 2016; Arteaga et al, 2023). One of the options for processing more waste is to produce compost from it, which, in addition to economic benefits, has environmental benefits as a sustainable solution for urban waste management, including reducing the volume of landfilled waste and reducing greenhouse gas emissions (Mirzaee et al, 2016; Kianisadr & Azani, 2020; Cao et al, 2023). Studies have shown that the development of compost stations, especially if the location requirements and health and environmental principles are not followed, can threaten the health of the community and have devastating environmental and social consequences. Navaei Fezabady et al. (2016) in the field of assessing the environmental impacts of compost factories in Iran showed that environmental impacts, including reduced air quality due to the emission of unpleasant odors, suspended particles, and greenhouse gas emissions, pollution, and reduced water quality due to leachate, noise pollution, and environmental pollution, are among the environmental impacts of compost production. Silva et al. (2024) investigated the composting of combined forestry and agricultural waste with minimal operating costs and understood the environmental impacts and application of compost in burnt soil with a life cycle assessment study. Composting was a sustainable method for valorizing waste and was able to restore burnt soils and strengthen plant growth and the circular economy. So far, no comprehensive study has been conducted on the social and environmental impact assessment of composting stations. This study evaluates the Phaneh-e-Jahad compost station in District 19 of Tehran Municipality for the first time. By integrating qualitative analysis through Simpson's Representation Matrix with quantitative assessment using the Rapid Impact Assessment Matrix (RIAM), it introduces an innovative methodological framework for examining the social and environmental impacts of comparable projects. The primary objective was to identify the social and environmental consequences associated with the compost station and to propose corrective strategies to mitigate its adverse effects. Accordingly, the RIAM method, in combination with Simpson's Representation Matrix, was applied to achieve a comprehensive assessment.

DATA AND METHODOLOGY

To collect information, interviews, document studies, and field visits were used. Then, the identified socio-environmental impacts were examined qualitatively using the Simpson Representation Matrix method and quantitatively using the Rapid Assessment Matrix. According to Fazeli (2017), social impact assessment is an interdisciplinary activity, and after evaluating a project or policy, the findings and resulting information must be understandable and usable for policymakers. Figure 1 shows the location of the station under study in District 19 of Tehran Municipality and its aerial image.

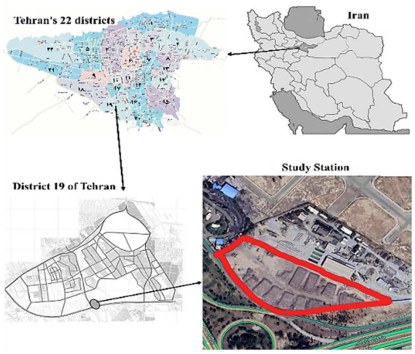


Figure 1: Location and aerial image of the study station in District 19 of Tehran Municipality

RESULTS

The findings of the assessment of the categories in the physical-chemical components were -293, socio-cultural 181, biological-ecological -24, and economic and operational +200. Among the effect categories of the matrix, the most positive outcomes were economic-operational impacts, and the most negative and destructive outcomes were physical-chemical effects. Based on the rapid assessment matrix, the overall score of the station was -298. The economic components had the most positive impact, and the physical-chemical components had the most negative effect on the station. The creation of social inequality was visible in the impact assessment. Because its undesirable effects are directed at the direct and immediate area of the project. While its desirable effects will be directed at the entire city of Tehran. Also, the factors of location, station design, the process used for waste processing, and capacity (waste acceptance rate and activity level) played a decisive role in the identified impacts. The total impact scores based on RIAM matrix calculations are presented in Table 1. Also, a summary of the results from the assessment of the effects of the wet waste processing station using the RIAM method is shown in Figure 2.

Table 1: Total effects scores based on RIAM matrix calculations

Category or effects				
Physical-chemical	**Biological-ecological**	**Socio-cultural**	**Economic-operational**	**Total**
-293	-24	-181	+200	-298

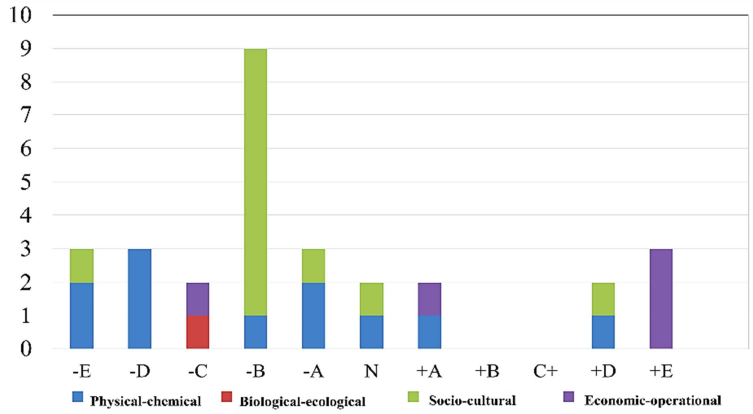


Figure 2: Graph of the results of the scores from the assessments in the RIAM matrix

DISCUSSION

Based on the results of the RIAM matrix and scoping, the negative effects of the station outweigh its positive effects. This means that the existence of the station under study, under current conditions, has had a destructive impact on the environment and the local community. The station under study is economically advantageous. However, the interference with the industrial zone project, which is a larger project and affects the station entrance in terms of quantity and quality, is one of the challenges facing the station and its economic sustainability. Field observations and interviews showed that the floor of the station is earthen and has high permeability. The resulting leachate is collected and untreated and enters the ground, and the process of converting waste into compost is time-consuming and the station has a low level of equipment and facilities. The soil bed of the station is permeable, and no system has been considered for leachate collection and treatment. According to the project's idea, the site was paved with a loader and a layer of unprocessed compost, which seems to be insufficient and does not completely prevent the infiltration of wastewater and leachate into the soil and groundwater. Soil and groundwater pollution is the next most important effect of the activity (Ayilara et al, 2020). Also, the presence of different chemical compounds in the leachate and their interactions

makes it difficult to predict and understand the properties of the leachate over time (Hashemi & Bagheri, 2013; Podlasek et al, 2023). Therefore, the environmental impacts of the compost station are highly severe and, if the activity continues and other conditions remain constant, will ultimately lead to social problems. The compost station is also not environmentally sustainable and will ultimately lead to social problems. In addition to design, process, and capacity (waste acceptance rate and activity level), which play a decisive role in the type and extent of impacts, location can also be decisive in the social and cultural effects and those affected.

CONCLUSION

The purpose of constructing the Phaneh-e-Jahad wet waste processing station in District 19 of Tehran Municipality was mainly economic and aimed at reducing the costs of waste transfer and management. The proximity of the station under study to residential uses, business environments, and social activities such as the Mehr Hothouse will have multiple social impacts, and its desired effects will be felt throughout the city of Tehran. Therefore, the environmental impacts of the compost station will affect the surrounding environment and, with continued activity, will ultimately lead to social problems. This issue is more important in District 19 of Tehran Municipality, which faces inequality in development. It needs to be considered in the development and social plans and programs of Tehran Municipality.

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 article's authors thank the General Directorate of the Social Studies Office of the Cultural Deputy of Tehran Municipality and the Institute for Environmental, Water, and Agricultural Studies and Development (MAKA) for their valuable cooperation in conducting this research.

REFERENCES

References [in Persian]

Fazeli, M. (2011). Evaluating the social effects of policies, programs and projects. Tisa Publications. [In Persian]

References [in English]

Arteaga, C., Silva, J., & Yarasca-Aybar, C. (2023). Solid waste management and urban environmental quality of public space in Chiclayo, Peru. *City and Environment Interactions*, 20, 100112. doi: 10.1016/j.cacint.2023.100112.

Ayilara, M. S., Olanrewaju, O. S., Babalola, O. O., & Odeyemi, O. (2020). Waste management through composting: Challenges and potentials. *Sustainability*, 12(11), 4456. doi: 10.3390/su12114456.

Cao, X., Williams, P. N., Zhan, Y., Coughlin, S. A., McGrath, J. W., Chin, J. P., & Xu, Y. (2023). Municipal solid waste compost: Global trends and biogeochemical cycling. *Soil & Environmental Health*, 1(4), 100038. doi: 10.1016/j.seh.2023.100038.

Hashemi, S. H., & Bagheri, A. (2013). Treatment of Old Leachate by Electro-Coagulation: A Case Study for Leachate of Kahrizak Landfill in Tehran. *Journal of Water and Wastewater*, 24(3), 112-121. https://www.wwjournal.ir/article_3116_en.html.

Kianisadr, M., & Azani, M. (2020). Environmental Impact Assessment of Hamedan Compost using Riam and FANP. *Journal of Geography and Planning*, 23(70), 279-298. https://geoplanning.tabrizu.ac.ir/article_10341.html.

Mirzaee, M., Salman Mahini, A. R., & Mirkarimi, S. H. (2016). Site selection of compost plant alternatives using rapid impact assessment matrix (RIAM)(case study: compost plant of Golpayegan city). *Geographical Research*, 31(1), 103-117. http://georesearch.ir/article-1-75-en.html.

Navaei Fezabady, A. A., Alidadi, H., Najafpoor, A. A., Dankoob, M., Yazdani, M., Saghi, M., & Shafiee, M. N. (2016). An Evaluation on the effects of composting plants on the environment in Iran (A review study). *Journal of Research in Environmental Health*, 2(1), 38-51. doi: 10.22038/jreh.2016.7069.

Podlasek, A., Vaverková, M. D., Koda, E., Jakimiuk, A., & Barroso, P. M. (2023). Characteristics and pollution potential of leachate from municipal solid waste landfills: Practical examples from Poland and the Czech Republic and a comprehensive evaluation in a global context. *Journal of Environmental Management*, 332, 117328. doi: 10.1016/j.jenvman.2023.117328.

Silva, M. E. F., Saetta, R., Raimondo, R., Costa, J. M., Ferreira, J. V., & Brás, I. (2024). Forest waste composting—operational management, environmental impacts, and application. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-17. doi: 10.1007/s11356-024-32279-0.

مخاطرات محیط طبیعی
شاپا چاپی: ۴۳۷۷-۲۶۷۶ شاپا الکترونیکی: ۴۳۸۵-۲۶۷۶
Homepage: https://jneh.usb.ac.ir

مجله علمی پژوهشی مخاطرات محیط طبیعی، دوره ۱۵، شماره ۴۷، شماره پیاپی ۱، فروردین ۱۴۰۵

ارزیابی اثرات اجتماعی–محیط‌زیستی ایستگاه پردازش پسماند تر با بهره‌گیری از ماتریس‌های بازنمایی سیمپسون و ارزیابی سریع

احسان خلیلی[۱]، محمدصابر باغخانی‌پور[۲]، سید حسین حسینی[۳]، فرزاد مهرجو[۴]*

۱. کارشناس‌ارشد، گروه اقتصاد کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
۲. دکترای گروه برنامه‌ریزی و طراحی محیط، پژوهشکده علوم محیطی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
۳. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه آموزش، دانشکده محیط‌زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران
۴. استادیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، مرکز آموزش عالی کاشمر، کاشمر، ایران (**نویسنده مسئول**)
ایمیل: mehrjo@kashmar.ac.ir ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4439-2221

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۰۵
تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۶/۳۱
تاریخ پذیرش : ۱۴۰۴/۰۷/۲۹
تاریخ انتشار : ۱۴۰۵/۰۱/۰۱

واژه‌های کلیدی:
مدیریت پسماند، شهرداری تهران، عوامل جانمایی، کمپوست، محیط‌زیست.

چکیده

مدیریت پسماند ناشی از فعالیت‌های انسانی و آثار اجتماعی - محیط‌زیستی آن، چالشی بوده که در سال‌های اخیر در سراسر جهان موردتوجه قرار گرفته است. یکی از گزینه‌های پردازش پسماند تر، تولید کمپوست از آن‌ها بوده که دارای پیامدهای مثبت و منفی اقتصادی، محیط‌زیستی و اجتماعی بوده است. هدف از این مطالعه، تأثیرات اجتماعی و محیط‌زیستی ایستگاه کمپوست پهنه جهاد در منطقه ۱۹ شهرداری تهران و اقدامات اصلاحی جهت تعدیل اثرات منفی آن با استفاده از از ماتریس ارزیابی اثرات سریع به‌همراه روش بازنمایی اثرات سیمپسون بوده است. به‌منظور جمع‌آوری اطلاعات، از ابزار مصاحبه، مطالعه اسنادی و بازدیدهای میدانی بهره گرفته شد. سپس اثرات اجتماعی و محیط‌زیستی شناسایی‌شده با روش ماتریس بازنمایی سیمپسون به‌صورت کیفی و با روش ماتریسی ارزیابی سریع به‌صورت کمی بررسی شدند. نتایج ارزیابی دسته‌بندی‌ها در اجزای فیزیکی - شیمیایی ۲۹۳-، اجتماعی - فرهنگی ۱۸۱، بیولوژیکی - اکولوژیکی ۲۴- و اقتصادی و عملیاتی ۲۰۰+ به‌دست آمد. در بین دسته‌بندی تأثیرات ماتریس، مثبت‌ترین پیامدها، تأثیرات اقتصادی - عملیاتی و منفی‌ترین و مخرب‌ترین پیامدها، تأثیرات فیزیکی - شیمیایی بودند. بر اساس ماتریس ارزیابی سریع، امتیاز کلی ایستگاه ۲۹۸- به‌دست آمد. بر اساس نتایج ماتریس RIAM و دامنه‌یابی، تأثیرات منفی ایستگاه بر تأثیرات مثبت آن غالب است. به این معنی که وجود ایستگاه موردمطالعه با شرایط فعلی، دارای تأثیرات مخربی بر محیط‌زیست و اجتماع محلی بوده است. ایستگاه کمپوست به لحاظ محیط‌زیستی پایدار نبوده و در نهایت به مشکلات اجتماعی نیز خواهد انجامید. ازاین‌رو، ادامه فعالیت ایستگاه موردمطالعه از نظر اجتماعی و محیط‌زیستی غیرقابل‌قبول بوده و در آینده‌ای نه‌چندان دور آسیب‌های محیط‌زیستی و اجتماعی مخربی در پی خواهد داشت. تغییر فرآیند تولید پسماند به فرایند هوادهی فعال با تعبیه فیلتر برای کاهش بیشتر بوی نامطبوع و انتقال ایستگاه از نقطه کنونی به نقطه‌ای مناسب و با فاصله از مناطق مسکونی و کشاورزی پیشنهاد می‌گردد.

استناد: خلیلی, احسان , باغخانی پور, محمدصابر , حسینی, سید حسین و مهرجو, فرزاد . (۱۴۰۵). ارزیابی اثرات اجتماعی–محیط‌زیستی ایستگاه پردازش پسماند تر با بهره‌گیری از ماتریس‌های بازنمایی سیمپسون و ارزیابی سریع. مخاطرات محیط طبیعی, ۱۵(۴۷), ۹۱-۱۱۶.

© نویسنده/ نویسندگان
ناشر: دانشگاه سیستان و بلوچستان
DOI: 10.22111/jneh.2025.50905.2099

مقدمه

در حال‌حاضر ۲/۰۱ میلیارد تن پسماند در سراسر جهان تولید که ۳۳ درصد آن به‌درستی مدیریت نمی‌شود. مدیریت پسماند ناشی از فعالیت‌های انسانی و آثار اجتماعی - محیط‌زیستی آن، موضوع و چالشی بوده که در سال‌های اخیر موردتوجه محققان و برنامه‌ریزان بسیاری در سراسر جهان قرار گرفته است. چراکه در صورت عدم مدیریت اصولی، اثرات سوء و عمیقی متوجه محیط‌زیست خواهد داشت (میرزایی[۱] و همکاران، ۲۰۱۶؛ آرتگا[۲] و همکاران، ۲۰۲۳). با ادامه رشد شهرنشینی و تغییر در الگوی مصرف، پیش‌بینی‌ها از فزاینده بودن تولید پسماند حکایت دارند و هر چه تراکم جمعیت در یک منطقه بیشتر باشد، حجم پسماند تولیدشده بالا بوده و در نتیجه زیرساخت‌های لازم برای مدیریت پسماند بیشتر می‌شود (غیبی[۳] و همکاران، ۲۰۲۲؛ ووکالی[۴] و همکاران، ۲۰۲۴).

با پیشرفت فناوری، حوزه تولید و مدیریت پسماند نیز تغییرات زیادی را تجربه کرده و روش‌های نوین و سازگار با محیط‌زیست در حال جایگزین شدن با روش‌های سنتی از جمله دفن هستند. یکی از گزینه‌های پردازش پسماند تر، تولید کمپوست از آن‌ها بوده که علاوه‌بر منافع اقتصادی، به‌عنوان یک راه‌حل پایدار برای مدیریت پسماند شهری دارای مزایای محیط‌زیستی قابل‌توجهی از جمله کاهش حجم پسماند دفن‌شده و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌باشد (میرزایی و همکاران، ۲۰۱۶؛ کیانی‌صدر و آزانی[۵]، ۲۰۲۰؛ کاو[۶] و همکاران، ۲۰۲۳). این روش به‌ویژه در کشور ما و کلان‌شهری مانند تهران که پسماند تر قابل‌تبدیل به کمپوست حدود ۷۰ درصد پسماند شهری را تشکیل می‌دهد، اهمیت بیشتری پیدا کرده است (میرزایی و همکاران، ۲۰۱۶؛ روپانی[۷] و همکاران، ۲۰۱۹). با بهره‌گیری از سیستم‌های تولید کمپوست سازگار با شرایط جغرافیایی، اقتصادی و اجتماعی، می‌توان گامی مؤثر در راستای ساماندهی فعالیت‌های مرتبط به حفظ منابع طبیعی، کاهش انتشار آلودگی‌های محیط‌زیستی، ارتقای بهداشت جوامع انسانی و تامین منابع مهم مواد مغذی برای تولید کشاورزی پایدار برداشت (نوایی فیض‌آبادی[۸] و همکاران، ۲۰۱۶؛ گلدن[۹] و همکاران، ۲۰۲۳).

مطالعات نشان دادند که توسعه ایستگاه‌های کمپوست، به‌ویژه در صورت عدم رعایت الزامات جانمایی، اصول بهداشتی و محیط‌زیستی می‌تواند سلامت جامعه را مورد تهدید قرار دهد و پیامدهای مخرب محیط‌زیستی و اجتماعی را در پی داشته باشد (میرزایی و همکاران، ۲۰۱۶؛ کیانی‌صدر و آزانی، ۲۰۲۰؛ گلدن و همکاران، ۲۰۲۳). به‌عنوان نمونه، نتایج مطالعه نوایی فیض‌آبادی و همکاران (۲۰۱۶) در زمینه ارزیابی اثرات محیط‌زیستی کارخانه‌های کمپوست در ایران نشان دادند که اثرات محیط‌زیستی از جمله کاهش کیفیت هوا به واسطه انتشار بوی نامطبوع، ذرات معلق و انتشار گازهای گلخانه‌ای، آلودگی و کاهش کیفیت آب به واسطه شیرابه، آلودگی صوتی و آلودگی‌های محیطی از تأثیرات محیط‌زیستی تولید کمپوست هستند. در مطالعه‌ای توسط فدیلی[۱۰] و ماکان[۱۱] (۲۰۲۰)، ارزیابی پایداری فناوری‌های کمپوست در مقیاس بزرگ با استفاده از روش PROMETHEE بررسی شد و کمپوست‌سازی به‌عنوان یک راهبرد

[1] - Mirzaee
[2] - Arteaga
[3] - Gheybi
[4]- Voukkali
[5] - Kianisadr & Azani
[6] - Cao
[7] - Rupani
[8] - Navaei Fezabady
[9] - Goldan
[10] - Fadili
[11] - Makan

پایدار برای مدیریت پسماندهای آلی در نظر گرفته شد. در مطالعه‌ای دیگر، سیلوا[1] و همکاران (۲۰۲۴) با استفاده از ارزیابی چرخه حیات (LCA[2])، فرآیند کمپوست‌سازی پسماندهای ترکیبی جنگلی و کشاورزی را با تأکید بر کمینه‌سازی هزینه‌های عملیاتی و بررسی اثرات زیست‌محیطی آن تحلیل کردند. نتایج نشان داد که کمپوست‌سازی روشی پایدار برای ارزش‌گذاری پسماندها است که می‌تواند خاک‌های سوخته را احیا کند، رشد گیاهان را بهبود بخشد و اقتصاد دایره‌ای را تقویت نماید. از نکات بیان‌شده می‌توان دریافت که اقدامی که به ظاهر ماهیتی فنی دارد، ممکن است دارای تأثیرات اجتماعی هم باشد و این تأثیرات با توجه به مکان، اقدام ممکن است دارای شدت و گستره بالا یا پایینی باشند. از طرف دیگر، خطرات بالقوه‌ای مانند آتش‌سوزی، امکان آلودگی محصولات کشاورزی، حس اضطراب به خطر افتادن سلامتی برای کارکنان و ساکنان اطراف ایستگاه، مخدوش شدن منظر و سیمای شهری، کاهش سطح رضایت از زندگی و محل زندگی، آسیب به میراث فرهنگی از جمله تأثیرات اجتماعی فعالیت ایستگاه کمپوست است (کاکایی و ریاحی بختیاری[3]، ۲۰۱۶؛ قادری[4] و همکاران، ۲۰۱۹). بنابراین، اقداماتی از این‌دست که از دیدگاه توسعه پایدار نیز حائز اهمیت است را نمی‌توان فقط از دیدگاه اقتصادی و مالی و یا محیط‌زیستی به آن نگریست. با اینکه ایستگاه‌های کمپوست دارای تأثیرات اجتماعی نیز هستند، اغلب مطالعات قبلی در زمینه ارزیابی و تحلیل تأثیرات، به اثرات محیط‌زیستی این واحدها متمرکز بوده‌اند (پاناهنده[5] و همکاران، ۲۰۱۰؛ میرزایی و همکاران، ۲۰۱۰؛ میرزایی و همکاران، ۲۰۱۶؛ کیانی‌صدر و آزانی، ۲۰۲۰؛ محمدحسینی[6]، ۲۰۲۲).

ارائه تصویری واضح از تأثیرات واحدهای پردازش پسماند ازجمله ایستگاه‌های کمپوست که دربرگیرنده تأثیرات اجتماعی نیز باشد، می‌تواند بینش‌هایی برای محققان، مدیران و سیاست‌گذاران در جهت دست‌یابی به توسعه پایدار فراهم آورد. ازاین‌رو، ارزیابی اثرات یکی از شیوه‌های پذیرفته‌شده برای دست‌یابی به اهداف توسعه پایدار و آگاهی از پیامدهای اقدامات توسعه است. ارزیابی می‌تواند به‌عنوان ابزار تصمیم‌گیری و علاوه بر شناسایی تأثیرات بالقوه، فراهم‌کننده امکان دخیل کردن ملاحظات، انتخاب گزینه‌های مناسب و منطقی به‌شمار آید (پناهنده و همکاران، ۲۰۱۰). پروژه کارخانه کمپوست همانند سایر طرح‌های عمرانی نیاز به ارزیابی محیط‌زیستی دارد. به‌طوری‌که از سال ۱۳۷۸ طبق صورت‌جلسه شورای عالی محیط‌زیست، ایستگاه‌های کمپوست و جایگاه‌های دفن زباله نیز در زمره پروژه‌های ارزیابی محیط‌زیستی قرار گرفتند (حسینی[7]، ۲۰۲۲). با این‌حال، همان‌گونه که پیش‌تر نیز اشاره شد، این پروژه‌ها با توجه به معیارهایی مانند جانمایی، طراحی و فرآیند مورداستفاده در پردازش پسماند می‌توانند دارای اثرات اجتماعی نیز باشند. پیوندی نزدیک و ارتباطی تنگاتنگ میان مدیریت پسماند شهری و توسعه پایدار برقرار است. بااین‌حال، یکی از برداشت‌های نادرست رایج در این حوزه، همسان‌پنداری توسعه پایدار با مدیریت و حفاظت محیط‌زیست است. این سوءتعبیر سبب می‌شود که اغلب ارزیابی‌ها فقط بر جنبه‌های زیست‌محیطی تمرکز یابند و ابعاد اجتماعی - اقتصادی نادیده انگاشته شود (حسینی، ۲۰۲۲؛ هیلسون[8]، ۲۰۰۰).

---

[1] - Silva
[2] - Life Cycle Assessment
[3] - Kakaei & Riyahi Bakhtiari
[4] - Ghaderi
[5] - Panahandeh
[6] - Mohammad Hosseini
[7] - Hosseini
[8] - Hilson

تاکنون پژوهش جامعی که به‌طور هم‌زمان اثرات اجتماعی، فرهنگی و زیست‌محیطی ایستگاه‌های کمپوست را مورد ارزیابی قرار دهد، انجام نشده است. همچنین، مطالعه‌ای که به‌طور خاص به بررسی ایستگاه پردازش پسماند تر پهنه جهاد در منطقه ۱۹ شهرداری تهران پرداخته باشد، یافت نشد. ازاین‌رو، این پژوهش برای نخستین بار به ارزیابی این ایستگاه می‌پردازد. این مطالعه با بهره‌گیری از ترکیب روش‌های کیفی (ماتریس بازنمایی سیمپسون) و کمی (ماتریس ارزیابی اثرات سریع RIAM)، رویکردی نوآورانه برای ارزیابی اثرات اجتماعی و زیست‌محیطی پروژه‌های مشابه ارائه می‌دهد.

هدف از این مطالعه شناسایی تأثیرات اجتماعی و محیط‌زیستی ایستگاه کمپوست پهنه جهاد در منطقه ۱۹ شهرداری تهران بوده و اقدامات اصلاحی جهت تعدیل اثرات منفی آن پیشنهاد شد. در این راستا از ماتریس ارزیابی اثرات سریع به‌همراه روش بازنمایی اثرات سیمپسون بهره گرفته شده است.

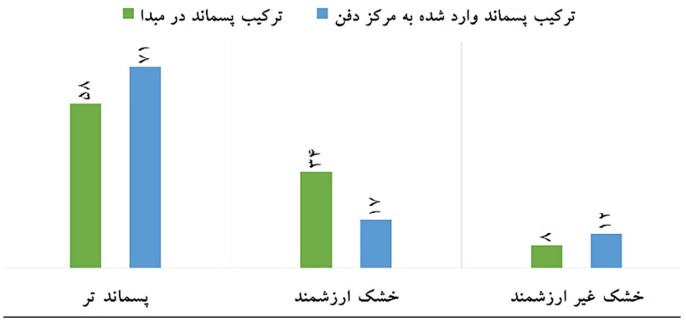
داده‌ها و روش‌ها

معرفی پروژه و منطقه موردمطالعه

شهر تهران با وسعتی حدود ۸۰۰ کیلومتر مربع، بین ۳۵ درجه و ۳۴ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۵۹ دقیقه عرض شمالی و ۵۱ درجه ۵ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۵۳ دقیقه طول شرقی قرار دارد. از شمال و شمال شرقی به ارتفاعات البرز مرکزی، از سمت غرب به دشت ساوجبلاغ و از سمت جنوب به کوه‌های منطقه ری، بی‌بی شهربانو و دشت‌های منتهی به کویر نمک محدود شده است (دلفان آذری، ۱۳۹۶). منطقه ۱۹ شهرداری تهران یکی از مناطق شهری جنوب غربی شهر تهران است. این منطقه با وسعتی برابر ۹۲ کیلومتر مربع و دارای ۵ ناحیه است. سه ناحیه ۱، ۲ و ۳ در حوزه بافت شهری بوده و در شمال بزرگراه آزادگان قرار دارند. نواحی ۴ و ۵ خارج از محدوده قانونی شهر تهران قرار دارند و جزء حریم منطقه ۱۹ به حساب می‌آیند. بر اساس سالنامه آماری شهر تهران (۱۴۰۰)، منطقه ۱۹ جمعیتی معادل ۲۸۱۸۶۶ نفر را در برمی‌گیرد که از این تعداد ۱۴۳۶۲۱ نفر مرد و ۱۳۸۲۴۵ نفر زن هستند. بعد خانوار در منطقه ۱۹، ۳/۲ است که نسبت به کل شهر تهران (۲/۹)، بالاتر است. بررسی میزان تراکم نسبی جمعیت منطقه ۱۹ نشان می‌دهد که ۳۰/۶ نفر در هر هکتار سکونت دارند. این در حالی است که تراکم نسبی در شهر تهران ۱۱۹/۱ نفر در هکتار است. بنابراین، تراکم نسبی در منطقه ۱۹ بسیار کمتر از متوسط تراکم شهر تهران است. علت این امر وجود کاربری‌های غیرمسکونی و درشت‌دانه ازجمله مراکز خدماتی و تجاری مانند میدان مرکزی میوه و تره‌بار شهر تهران، پارکینگ‌ها، زمین‌های کشاورزی و بایر و غیره در این منطقه است. رژیم باد غالب در شهر تهران از طرف شمال‌غرب به سمت جنوب‌شرقی است (دلفان آذری، ۱۳۹۶). هر شهروند تهرانی به‌طور متوسط سالانه شش برابر وزن خود زباله تولید می‌کند. متوسط سرانه زباله تولیدشده در شهر تهران ۳۲۰ کیلوگرم است که ارزش روزانه این حجم از پسماند تولیدشده بالغ بر ۱۸۰۰ میلیون ریال است (روپانی[1] و همکاران، ۲۰۱۹). مقایسه سرانه تولید روزانه پسماند در ایران با جهان، بر اساس آمارهای منتشرشده بانک جهانی، نشان می‌دهد که این شاخص در جهان ۷۴۰ گرم با دامنه ۴۵۴۰-۱۱۰ گرم، در ایران ۷۸۲ گرم (متغیر در دوره‌های مختلف) با دامنه ۷۰۰ تا ۱۰۰۰ گرم، در شهر تهران حدود ۸۶۰ گرم و در شمال تهران حدود ۱۲۰۰ گرم است (روپانی و همکاران، ۲۰۱۹). بر اساس گزارش سازمان مدیریت پسماند شهرداری تهران، در کلان‌شهر تهران با توجه به آنالیز انجام‌شده در تابستان ۱۳۹۸ (شکل ۱)، حدود ۵۸

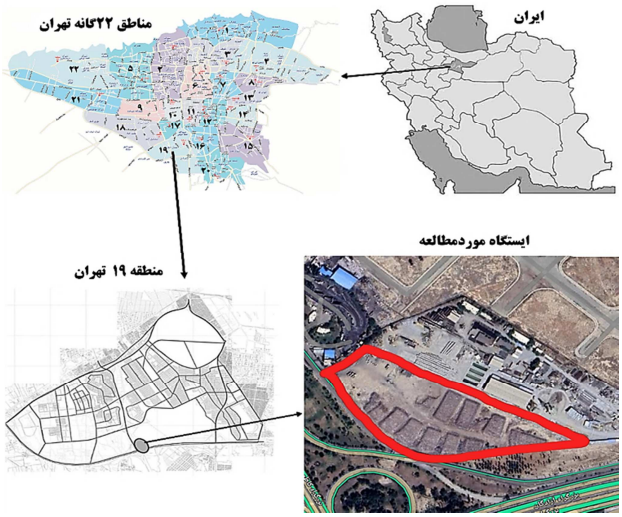
[1] - Rupani

درصد پسماند تولیدشده در مبدأ را پسماند تر، حدود ۳۴ درصد پسماند خشک ارزشمند (پسماندهایی مانند پلاستیک و فلز را شامل می‌شود که دارای قابلیت بازیافت و یا فروش هستند) و ۸ درصد پسماند خشک غیر ارزشمند را تشکیل می‌دهد. پس از جداسازی پسماندهای خشک قابل‌بازیافت از زباله‌های دفع‌شده، ۷۱ درصد از پسماندهای واردشده به محل دفن را پسماند تر، ۱۷ درصد پسماند خشک ارزشمند و ۱۲ درصد پسماند خشک غیرارزشمند تشکیل می‌دهند.



شکل ۱: ترکیب اجزای پسماند شهر تهران در مبدأ، ایستگاه انتقال و محل دفع نهایی، بر اساس داده‌های سال ۱۳۹۸

در راستای برنامه تحول مدیریت پسماند شهر تهران و به جهت بهسازی فرایند پردازش و دفع، احداث یا تجهیز ۴ ایستگاه با هدف ساماندهی و پردازش پسماندهای فضای سبز، سرشاخه و ضایعات میادین میوه و تره‌بار و پسماند حجیم در دستور کار سازمان مدیریت پسماند شهرداری تهران قرار گرفت. هدف از اجرای چنین طرحی، تفکیک و بازیافت بخش قابل‌بازیافت پسماند در مبدأ تولید و کاهش بار انتقالی پسماند به سمت مرکز دفن و پردازش آرادکوه واقع در جنوب تهران بوده است. با توجه به حجم بالای پسماند تر تولیدی در میدان تره‌بار مرکزی شهر تهران و وجود زمین در مجاورت میدان مرکزی، ایستگاه پهنه جهاد به جهت انجام فرآیند تبدیل پسماند تر به کمپوست انتخاب شده است. شکل موقعیت ایستگاه موردمطالعه را در منطقه ۱۹ شهرداری تهران و تصویر هوایی آن را نشان می‌دهند.



شکل ۲: موقعیت و تصویر هوایی ایستگاه موردمطالعه در منطقه ۱۹ شهرداری تهران

بر اساس اظهارات کارشناسان سازمان مدیریت پسماند شهرداری تهران، زمینی به مساحت حدود ۳/۵ هکتار به ایستگاه پردازش پسماند تر در پهنه جهاد اختصاص داده شد. این ایستگاه در بازه زمانی فروردین‌ماه تا دی‌ماه ۱۴۰۱ پسماند تر پذیرش کرده است. در بازه زمانی اشاره‌شده حدود ۲۰ هزار تن پسماند تر از میدان مرکزی میوه و تره‌بار شهر تهران، تعداد محدودی از میادین میوه و تره‌بار سطح شهر و سرشاخه و زائدات فضای سبز وارد ایستگاه شده است. با توجه به توضیحات ایده‌پرداز و ناظر این طرح، رویه جمع‌آوری توده به این صورت است که در ابتدا با استفاده از کمپوست رسیده در حدود نیم متر بسترسازی صورت می‌گیرد. نقش این بستر ایجاد حائل بین زمین برای جلوگیری از دسترسی موجودات و حشرات به داخل توده و همچنین جذب رطوبت پسماندهای انباشته‌شده جهت جلوگیری از نفوذ آن به داخل زمین عنوان شد. پس از ایجاد بستر، پسماندهای میادین میوه و تره‌بار که پیش‌تر در بخش دیگری از سایت به‌صورت موقت دپو شده بودند، توسط لودر به ارتفاع ۱/۵ الی ۲ متر بر روی بستر ریخته می‌شوند. در نهایت نیز یک لایه دیگر از کمپوست رسیده جهت جلوگیری از دسترسی حشرات به توده پسماند تازه و همچنین جلوگیری از تبخیر رطوبت به اتمسفر بر روی توده پسماند تازه ریخته می‌شود. پشته‌های آماده جهت تبدیل‌شدن به کمپوست به مدت ۲ الی ۶ ماه هوارسانی می‌شوند. در نهایت توده با از دست دادن رطوبت و تجزیه مواد آلی به‌وسیله میکروارگانیسم‌ها، با کاهش حداقل ۵۰ درصد از حجم و وزن خود برای پردازش نهایی به سایت منطقه ۱۸ منتقل می‌شوند و پس از جداسازی ناخالصی‌ها، به‌صورت گرانوله یا غیر گرانوله به فروش خواهد رسید. لازم به یادآوری است، در این فرآیند هیچ‌گونه ساختمان و تجهیزات خاصی احداث نگردیده و تنها تجهیزات مورداستفاده، لودر برای جابه‌جایی مواد و دستگاه دمنده هوا برای تزریق هوا به توده دپو شده می‌باشند.

روش‌شناسی

در این پژوهش برای جمع‌آوری اطلاعات، فن مصاحبه نیمه‌ساختاریافته مورداستفاده قرار گرفت. به این صورت که مصاحبه‌نامه‌ای با سؤالات باز طراحی شد و با استفاده از نمونه‌گیری هدفمند، نسبت به مصاحبه با ۱۲ فرد از کارشناسان شهرداری تهران و ۷۰ نفر از صاحبان کسب‌وکارهای اطراف ایستگاه اقدام شد. معیار حجم و تشخیص کفایت نمونه «اشباع نظری» بود؛ به این معنی که محقق به این نتیجه می‌رسد که داده‌ها یا مصاحبه‌های جدید به نتایج تکراری می‌انجامد و داده و اطلاعات جدیدی در مصاحبه‌های جدید وجود ندارد (خستو[1]، ۲۰۲۲). در نهایت پس از مصاحبه با ۱۲ نفر از کارشناسان، اشباع نظری حاصل شد. از نظر روش تحلیل نیز، برای داده‌ها و اطلاعات حاصل از مصاحبه‌ها بیشتر از «تحلیل موضوعی» یا «تحلیل مضمون» بهره گرفته شد. روش تحلیل موضوعی یا تحلیل مضمون مبتنی بر استقرای تحلیل است. در این روش به‌منظور سنخ‌شناسی تحلیلی، اطلاعات به‌دست‌آمده دسته‌بندی می‌شوند. بنابراین فرایند تحلیل اطلاعات در این روش مفهوم‌یابی، مقوله‌بندی، سازمان‌دهی و الگوسازی موضوعی است (روستاخیز[2] و همکاران، ۲۰۲۳). در نهایت، تحلیل اطلاعات جمع‌آوری‌شده به دو روش کیفی و کمی انجام شد.

[1] - Khastoo
[2] - Roustakhiz

ارزیابی کیفی اثرات اجتماعی: ماتریس بازنمایی سیمپسون

برای ارزیابی تأثیرات اجتماعی و محیط‌زیستی، می‌بایست اثرات شناسایی‌شده و تحت بررسی، مورد تحلیل قرار گیرند. بر اساس (فاضلی، ۱۳۹۶) ارزیابی تأثیرات اجتماعی فعالیتی بین‌رشته‌ای است و پس از انجام ارزیابی یک پروژه یا سیاست، نیاز است که یافته‌ها و اطلاعات منتج از آن برای سیاست‌گذار قابل‌فهم و استفاده باشد. همچنین، فهرست تأثیرات احتمالی شناسایی‌شده می‌تواند بسیار طولانی باشد. بنابراین، بازنمایی یافته‌ها در قالب مناسب از اهمیت به سزایی برخوردار است. در این پژوهش از ماتریسی با عنوان ماتریس دامنه‌یابی پیشنهادشده توسط سیمپسون[1] در سال ۲۰۰۰ استفاده شد. هدف از ارائه این ماتریس، کمک‌گرفتن برای اولویت‌بندی تأثیرات است. در این ماتریس هر کدام از تأثیرات احتمالی در یک ردیف نوشته شده و ویژگی‌های شناسایی‌شده برای آن نیز مشخص می‌گردد (فاضلی، ۱۳۹۶). به این منظور، عمده‌ترین ویژگی‌ها و طبقه‌بندی اثرات شامل موارد زیر می‌باشند:

الف) کیفیت تأثیر: کیفیت اثرات، نشان‌دهنده افزاینده یا کاهنده بودن فاکتور اجتماعی مربوطه در اثر پروژه یا اقدام توسعه‌ای است. درصورتی‌که اقدام موجب افزایش کیفیت فاکتور اجتماعی مربوطه گردد، تأثیر مثبت و اگر موجب کاهش آن شود، تأثیر منفی در نظر گرفته می‌شود (زینلی و جلالی، ۱۳۹۴).

ب) نوع تأثیر: نوع تأثیرات، گذشته از زمان بروزشان، به سه دسته اصلی شامل اولیه (مستقیم)، ثانویه (غیرمستقیم) یا انباشتی‌بودن قابل‌تقسیم هستند. تأثیرات اولیه به‌طور مستقیم براثر اقدام برنامه‌ریزی‌شده به وجود می‌آیند. تأثیرات ثانویه، نتیجه غیرمستقیم اقدام هستند. تأثیرات انباشتی محصول تعامل نتایج اقدام توسعه‌ای با بقیه تغییرات محلی، منطقه‌ای یا ملی است. به‌عبارت‌دیگر، تأثیرات انباشتی از انبوهش و میان‌کنش دیگر تأثیرات شکل می‌گیرند و می‌توانند محرک و فعال‌کننده تأثیرات متعاقب باشند (فاضلی، ۱۳۹۶؛ قیصری، ۱۴۰۰).

ج) شدت تأثیر یا درجه اهمیت تأثیر: شدت و یا درجه اهمیت تأثیرات احتمالی ناشی از اقدام توسعه‌ای ممکن است ناچیز، کم، متوسط و زیاد باشد. درجه اهمیت یا شدت اثر بر اساس میزان حساسیت و ارزش فاکتورهای اجتماعی و همچنین میزان قابل‌توجه بودن پیامد مربوطه سنجیده می‌شود (زینلی و جلالی، ۱۳۹۴).

د) مدت تأثیر: مدت تأثیرات نشان می‌دهد که هر تأثیر تا چه زمانی به جا می‌ماند. مدت تأثیر یک اثر می‌تواند کوتاه‌مدت، میان‌مدت و یا بلندمدت باشد (فاضلی، ۱۳۹۶).

ر) ماهیت تأثیر: بر اساس اینکه اقدام مداخله‌ای با چه هدفی انجام می‌شود، ماهیت تأثیر در ارزیابی کیفی اثرات اجتماعی، تأثیرات پروژه‌های توسعه‌ای را به دو دسته خواسته و ناخواسته تقسیم می‌کند. تأثیرات خواسته، نتایجی هستند که با اهداف پروژه هم‌راستا بوده و به‌طور مستقیم پیش‌بینی شده‌اند. در مقابل، تأثیرات ناخواسته، پیامدهای غیرمنتظره‌ای هستند که ممکن است به‌دلیل نقص در برنامه‌ریزی رخ دهند (فاضلی، ۱۳۹۶؛ هیلسون، ۲۰۰۰).

ز) گستره تأثیر: گستره تأثیرات نشان می‌دهند که هر تأثیر چه گستره‌ای را در برمی‌گیرد. گستره تأثیر می‌تواند محلی، منطقه و فرامنطقه‌ای باشد.

در کنار مزایایی مانند سادگی استفاده، ماتریس دامنه‌یابی پیشنهادشده توسط سیمپسون دارای کاستی‌های ازجمله کیفی بودن، نسبت‌ندادن کمیت به هر کدام از تأثیرات و در نهایت عدم ارائه رتبه‌بندی است. به این دلیل نیاز است تا از ابزاری تکمیلی برای تحلیل کمی تأثیرات بهره گرفته شود.

[1] - Simpson

روش ارزیابی کمی تأثیرات اجتماعی و محیطزیستی طرح: ماتریس ارزیابی اثرات سریع (RIAM)

با توجه به اینکه ماتریس دامنه‌یابی پیشنهادشده توسط سیمپسون تأثیرات را به‌صورت کیفی ارزش‌گذاری می‌کند، در این پژوهش سعی بر این بود تا با استفاده از روشی به هر اثر کمیتی نسبت داده شود. بررسی ادبیات موضوعی ارزیابی اثرات محیطزیستی (EIA[1]) نشان می‌دهد که یکی از روش‌هایی که می‌تواند اثرات اجتماعی و فرهنگی را نیز در بر بگیرد، روش ماتریس ارزیابی سریع محیطزیستی یا به‌اختصار RIAM است. ماتریس RIAM برای اولین‌بار توسط پاستاکیا و جنسن[2] (۱۹۹۸) معرفی شد. آن‌ها توانستند به‌صورت کمی به ارزیابی و مقایسه گزینه‌های واقعی در پروژه‌ها بپردازند و نتایج را به‌وضوح و در قالب جداول و نمودارها نشان دهند. توجه به ساختار ساده، راندمان بالا در تجزیه‌وتحلیل عمیق، دقت بالا، انعطاف‌پذیری و توانایی انجام یک ارزیابی عینی ویژگی‌های ماتریس RIAM هستند که آن را به‌عنوان ابزاری قدرتمند برای انجام پروژه‌های ارزیابی تأثیرات محیطزیستی تبدیل می‌کنند (دریابیگی‌زند و واعظی‌هیر[3]، ۲۰۱۹). روش RIAM با گرفتن میانگین ارزش‌هایی که به‌صورت تقریباً کمی برای هرکدام از معیارهای ارائه می‌کند، برای آن‌ها سیستم رتبه‌دهی دقیقی در هر وضعیت خاص و به‌طور مستقل فراهم می‌آورد (غیبی و همکاران، ۱۴۰۱). فرآیند EIA شامل ۱۰ مرحله اصلی است که شامل غربالگری، تعیین مرزها، تعیین روش، جمع‌آوری داده‌ها، مشارکت مردمی، تحلیل نتایج، تعیین گزینه‌ها، فعالیت‌های جبرانی، کنترل و پایش و ارائه نتایج است. طی این فرآیند اجزای محیطزیستی به چهار دسته کلی شامل فیزیکی - شیمیایی، بیولوژیکی - اکولوژیکی، اجتماعی - فرهنگی و اقتصادی - عملیاتی تقسیم شدند. در RIAM اجزای محیطزیستی در ردیف‌ها و معیارها در ستون‌های ماتریس قرار می‌گیرند.

فیزیکی - شیمیایی (PC[4]): این مؤلفه پوشش‌دهنده تمام خصوصیت‌های فیزیکی، شیمیایی و محیطزیستی است که شامل منابع طبیعی محدود شونده و ازبین‌رفتن محیطزیست به‌وسیله آلودگی‌ها است (کاکایی و ریاحی بختیاری، ۲۰۱۶؛ پاستاکیا، ۱۹۹۸).

بیولوژیکی - اکولوژیکی (BE[5]): این مؤلفه پوشش‌دهنده تمام اجزای زیستی محیطزیست و شامل منابع طبیعی تجدیدشونده، حفاظت و تنوع زیستی، تداخل بین‌گونه‌ای و آلودگی‌های زیست‌کره است (کاکایی و ریاحی بختیاری، ۲۰۱۶؛ پاستاکیا، ۱۹۹۸).

اجتماعی - فرهنگی (SC[6]): پوشش‌دهنده تمام جنبه‌های انسانی محیطزیست بوده و شامل جنبه‌های اجتماعی تحت‌تأثیر انسان‌ها و جوامع به‌همراه جنبه‌های فرهنگی شامل حفاظت از میراث‌فرهنگی و توسعه بشری است (کاکایی و ریاحی بختیاری، ۲۰۱۶؛ پاستاکیا، ۱۹۹۸).

اقتصادی - عملیاتی (EO[7]): این مؤلفه پوشش‌دهنده شناسایی کیفی پیامدهای اقتصادی تغییرات محیطزیستی چه به‌صورت دائم و یا موقت است (کاکایی و ریاحی بختیاری، ۲۰۱۶؛ پاستاکیا، ۱۹۹۸).

معیارها در RIAM به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند ((کاکایی و ریاحی بختیاری، ۲۰۱۶؛ پاستاکیا، ۱۹۹۸).

1 - Envirinmental Impact Assessment
2 - Pastakia & Jensen
3 - Daryabeigi Zand & Vaezi Heir
4 - Physical and Chemical
5 - Biological and Ecological
6 - Social and Cultural
7- Economic and Operational

جدول ۱):

معیارهای A که نشان‌دهنده بزرگی اثر هستند و قادرند به‌طور مستقل بر امتیاز نهایی تأثیرگذار باشند (کاکایی و ریاحی بختیاری، ۲۰۱۶؛ پاستاکیا، ۱۹۹۸).

معیارهای B که نشان‌دهنده ارزش موقعیت هستند و به‌تنهایی قادر به تغییر امتیاز نهایی نیستند (کاکایی و ریاحی بختیاری، ۲۰۱۶؛ پاستاکیا، ۱۹۹۸).

جدول ۱: معیارهای ارزیابی برای روش RIAM

معیارها	مقیاس	توصیف
A1 شعاع اثرگذاری	۴	اهمیت ملی و بین‌المللی
	۳	اهمیت منطقه‌ای و محلی
	۲	اهمیت برای مناطق حاشیه محل
	۱	فقط دارای اهمیت برای شرایط محلی
	۰	بدون اهمیت
A2 بزرگی اثر	۳	اثر بسیار زیاد
	۲	اثر معنی‌دار مثبت
	۱	اثر مثبت
	۰	بی‌اثر
	-۱	اثر منفی
	-۲	اثر معنی‌دار منفی
	-۳	اثر بسیار منفی
B1 پایداری	۱	بدون تغییر
	۲	موقتی
	۳	دائمی
B2 برگشت‌پذیری	۱	بدون تغییر
	۲	برگشت‌پذیر
	۳	برگشت‌ناپذیر
B3 تجمع‌پذیری	۱	بدون اثر
	۲	اثر غیرتجمعی (منفرد)
	۳	اثرات تجمعی و تشدیدشونده

بعد از آنکه اجزای محیط‌زیستی متأثر از گزینه‌های موجود تشکیل داده شد، امتیازدهی صورت می‌گیرد و در نهایت امتیاز محیط‌زیستی (ES[1]) که نشان‌دهنده وضعیت محیط‌زیستی فعالیت‌های پروژه است، با استفاده از روابط ۱ تا ۳ محاسبه خواهد شد:

$$A1 \times A2 = TA \quad (۱)$$

$$B1 + B2 + B3 = BT \quad (۲)$$

$$AT \times BT = ES \quad (۳)$$

[1] - Environmental Score

پس از آنکه ES محاسبه شد، برای تأمین یک سیستم دقیق در ارزیابی، امتیازهای ES در محدوده‌هایی (RB[1]) که قابل‌محاسبه باشند، قرار می‌گیرند (جدول ۲). در این پژوهش برای دستیابی به مقیاس کمی جهت قضاوت در مورد گزینه‌ها، فراوانی کلاس‌های RB (از E+ تا E-) در میانگین رده‌ها ضرب شده و ارزش نهایی هر گزینه محاسبه می‌شود (غلامعلی‌فرد[2] و همکاران، ۲۰۱۴).

جدول ۲: تبدیل امتیازات محیط‌زیستی به دامنه‌ها

توصیف محدوده تغییرات	محدوده تغییرات	امتیاز محیط‌زیستی
اثرات بسیار مثبت	+E	+۷۲ تا +۱۰۸
اثرات مثبت معنی‌دار	+D	+۳۶ تا +۷۱
اثرات مثبت متوسط	+C	+۱۹ تا +۳۵
اثرات مثبت	+B	+۱۰ تا +۱۸
اثرات مثبت اندک	+A	+۱ تا +۹
بدون تغییر	N	۰
اثرات منفی اندک	-A	-۱ تا -۹
اثرات منفی	-B	-۱۰ تا -۱۸
اثرات منفی متوسط	-C	-۱۹ تا -۳۵
اثرات منفی معنی‌دار	-D	-۳۶ تا -۷۱
اثرات بسیار منفی	-E	-۷۲ تا -۱۰۸
منبع: پاستاکیا و جنسن، ۱۹۹۸		

یافته‌های پژوهش

یافته‌های ارزیابی کیفی اثرات اجتماعی و محیط‌زیستی

در جدول تأثیرات شناسایی‌شده و ویژگی‌های هرکدام ارائه شده است. در واقع این جدول منعکس‌کننده نظر کارشناسان و همچنین نتایج به‌دست‌آمده از مصاحبه‌های انجام شده است.

جدول ۳: ماتریس دامنه‌یابی متغیرهای تحت‌تأثیر پروژه

حوزه	متغیر	کیفیت	نوع	شدت	مدت	ماهیت	گستره
اجتماعی و فرهنگی	رضایت از مدیران شهری	منفی	غیرمستقیم	زیاد	بلندمدت	ناخواسته	محلی
	رونق و سرزندگی محله	منفی	غیرمستقیم	کم	بلندمدت	ناخواسته	محلی
	بازدهی کسب‌وکارهای مجاور	منفی	غیرمستقیم	کم	بلندمدت	ناخواسته	محلی
	رضایت نیروی کار کسب‌وکارهای مجاور از محیط فعالیت	منفی	غیرمستقیم	متوسط	کوتاه‌مدت	ناخواسته	محلی
	کارایی فضای شهری	منفی	انباشتی	کم	بلندمدت	ناخواسته	محلی
	احساس ناامنی و اضطراب از ابتلا به بیماری به‌ویژه کارکنان مراکز هم‌جوار	منفی	مستقیم	زیاد	میان‌مدت	ناخواسته	محلی
	نابرابری اجتماعی	منفی	انباشتی	زیاد	بلندمدت	ناخواسته	فرامنطقه‌ای
	مشارکت اجتماعی	منفی	انباشتی	متوسط	میان‌مدت	ناخواسته	محلی

1 - Range Bond
2 - Gholamalifard

	نگرانی کارکنان ایستگاه از ابتلا به بیماری	منفی	مستقیم	متوسط	میان‌مدت	ناخواسته	محلی
	سلامتی کارکنان ایستگاه	منفی	مستقیم	زیاد	میان‌مدت	ناخواسته	محلی
	حس تعلق	منفی	انباشتی	متوسط	بلندمدت	ناخواسته	منطقه‌ای
	احساس ناامنی و اضطراب از ابتلا به بیماری در ساکنان محدوده	منفی	مستقیم	متوسط	میان‌مدت	ناخواسته	محلی
اقتصادی	درآمد شهرداری	مثبت	مستقیم	متوسط	میان‌مدت	خواسته	فرامنطقه‌ای
	هزینه‌های شهرداری	مثبت	مستقیم	زیاد	میان‌مدت	خواسته	فرامنطقه‌ای
	بازگشت سرمایه عمومی	مثبت	انباشتی	زیاد	میان‌مدت	ناخواسته	فرامنطقه‌ای
	اشتغال	مثبت	مستقیم	کم	بلندمدت	ناخواسته	محلی
	ارزش مالکیت، سرقفلی و اجاره بهای زمین یا ساختمان	منفی	غیرمستقیم	کم	بلندمدت	ناخواسته	محلی
	کاربری زمین‌های محدوده	منفی	مستقیم	کم	بلندمدت	ناخواسته	محلی
کالبدی	منظر و سیمای شهر	منفی	مستقیم	متوسط	بلندمدت	ناخواسته	محلی
	فضای بی‌دفاع شهری	مثبت	مستقیم	متوسط	بلندمدت	ناخواسته	محلی
محیطی	آلودگی محیطی	منفی	مستقیم	کم	بلندمدت	ناخواسته	محلی
	آلودگی صوتی	منفی	مستقیم	کم	بلندمدت	ناخواسته	محلی
	بوی نامطبوع	منفی	مستقیم	زیاد	بلندمدت	ناخواسته	منطقه‌ای
	آلودگی خاک	منفی	مستقیم	زیاد	بلندمدت	ناخواسته	منطقه‌ای
	انتشار گازهای گلخانه‌ای	منفی	مستقیم	زیاد	بلندمدت	ناخواسته	منطقه‌ای
	آلودگی آب‌های زیرزمینی	منفی	مستقیم	زیاد	بلندمدت	ناخواسته	منطقه‌ای
	ترافیک	مثبت	غیرمستقیم	متوسط	میان‌مدت	خواسته	منطقه‌ای
	انتشار گردوغبار	منفی	مستقیم	کم	بلندمدت	ناخواسته	محلی
	حیوانات و حشرات موذی	منفی	مستقیم	متوسط	بلندمدت	ناخواسته	منطقه‌ای
	کاربری زمین	مثبت	مستقیم	زیاد	بلندمدت	ناخواسته	محلی
	نشت شیرابه در خیابان‌ها و تصادفات ناشی از آن‌ها	مثبت	غیرمستقیم	متوسط	میان‌مدت	ناخواسته	منطقه‌ای

همان‌طورکه از اطلاعات جدول ۳ نیز برمی‌آید، کیفیت ۸۸/۵ درصد تأثیرات شناسایی‌شده منفی است؛ به این معنی که فعالیت ایستگاه موردمطالعه کیفیت فاکتور یا متغیر را کاهش می‌دهد. کیفیت حدود ۲۱/۵ درصد تأثیرات مثبت است و عمده تأثیرات مثبت در حوزه اقتصادی قرار دارد که با توجه به هدف پروژه از کاهش هزینه‌های شهرداری از جهت عدم انتقال ۲۰ هزار تن پسماند تر به آرادکوه، اغلب اقتصادی است، نتیجه به‌دست‌آمده دور از انتظار نیست. تعداد ۶۱/۳ درصد تأثیرات از نوع مستقیم و به‌طور مستقیم بر اثر فعالیت ایستگاه به‌وجود آمده و خواهند آمد، ۲۲/۶ درصد از نوع غیرمستقیم و نتیجه‌ای غیرمستقیم از فعالیت ایستگاه موردمطالعه هستند و ۱۶/۱ درصد تأثیرات از نوع انباشتی هستند. ۲۹ درصد تأثیرات شدت تأثیر کمی دارند به این معنی که اهمیت کمی دارند و می‌توان از آن‌ها چشم‌پوشی کرد. ۵۳/۵ درصد تأثیرات دارای شدت تأثیر متوسطی هستند و ۳۵/۵ درصد تأثیرات از شدت تأثیر زیادی برخوردارند و نیاز است تا با تدابیری تأثیرات مثبت ارتقا داده و تأثیرات منفی حداقل شود. بررسی تأثیرات ازنظر مدت تأثیر نشان می‌دهند که ۳/۲ درصد تأثیرات دارای مدت تأثیر کوتاه‌مدت هستند و پس از مدت کوتاهی از بین می‌روند. مدت تأثیر ۳۲/۲ درصد از تأثیرات میان‌مدت و ۶۴/۵ درصد دارای تأثیر بلندمدت هستند؛ به این معنی که این تأثیرات در بلندمدت و میان‌مدت بر جای می‌مانند. بررسی ماهیت تأثیرات شناسایی‌شده نشان می‌دهند که تنها

۹/۷ درصد از تأثیرات خواسته و ۹۰/۳ درصد ناخواسته بوده‌اند که نشان از این دارد که مطالعه جامعی روی تأثیرات طرح انجام نشده است. در نهایت، تحلیل گستره تأثیرات آشکار می‌سازد که ۶۱/۳ درصد تأثیرات دارای تأثیر محلی بوده که عمده آن‌ها دارای کیفیت منفی هستند. همچنین، ۲۵/۸ درصد تأثیرات دارای گستره منطقه‌ای و ۱۲/۹ درصد تأثیرات گستره فرامنطقه‌ای دارند. نکته قابل‌توجه این است که تأثیرات دارای کیفیت مثبت در گستره منطقه‌ای و فرامنطقه‌ای قرار دارند.

ارزیابی کمی تأثیرات ایستگاه پردازش پسماند تر پهنه جهاد منطقه ۱۹ شهرداری تهران

نتایج حاصل از ارزیابی اثرات ایستگاه پردازش پسماند تر با استفاده از روش RIAM در جدول تا جدول ارائه شده است. همچنین، خلاصه نتایج جداول به‌صورت نمودار در شکل نشان داده شده است. بر اساس نتایج حاصله، امتیاز کلی ایستگاه ۲۹۸- به‌دست آمد. همچنین، نتایج ارزیابی دسته‌بندی‌ها در اجزای فیزیکی - شیمیایی ۲۹۳-، اجتماعی - فرهنگی ۱۸۱-، بیولوژیکی - اکولوژیکی ۲۴- و اقتصادی و عملیاتی ۲۰۰+ به‌دست آمد. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، در بین دسته‌بندی تأثیرات ماتریس، مثبت‌ترین پیامدها، تأثیرات اقتصادی - عملیاتی و منفی‌ترین و مخرب‌ترین پیامدها، تأثیرات فیزیکی - شیمیایی بودند.

جدول ۴: اثرات فیزیکی - شیمیایی ایستگاه پردازش پسماند تر پهنه جهاد

اثر	اهمیت وضعیت	بزرگی اثر	دوام اثر	برگشت‌پذیری	اثرات تجمعی و تشدیدشونده	AT	BT	ES	RB
	A1 ۰ تا ۴	A2 -۳ تا +۳	B1 ۱ تا ۳	B2 ۱ تا ۳	B3 ۱ تا ۳				
کاربری زمین	۱	-۳	۳	۳	۱	-۳	۷	-۲۱	-C
تأثیر بر کاربری‌های غالب زمین‌های محدوده	۱	-۱	۳	۲	۲	-۱	۷	-۷	-A
منظر و سیمای شهری	۱	-۲	۳	۳	۲	-۲	۸	-۱۶	-B
فضای بی‌دفاع شهری	۱	۱	۳	۳	۲	۱	۸	۸	A
آلودگی آب‌های زیرزمینی	۲	-۳	۳	۳	۳	-۶	۹	-۵۴	-D
آلودگی خاک	۲	-۳	۳	۳	۳	-۶	۹	-۵۴	-D
کیفیت هوا	۳	-۳	۳	۲	۳	-۹	۸	-۷۲	-E
بو	۳	-۳	۳	۲	۳	-۹	۸	-۷۲	-E
حشرات و حیوانات موذی	۲	-۳	۲	۲	۳	-۶	۷	-۴۲	-D
آلودگی محیطی	۱	-۱	۲	۱	۲	-۱	۵	-۵	-A
آلودگی صوتی	۰	-۱	۱	۱	۲	۰	۴	۰	N
کاهش نشت شیرابه در خیابان‌ها و کاهش تصادفات	۳	۲	۳	۲	۲	۶	۷	۴۲	+D

جدول ۵: اثرات بیولوژیکی - اکولوژیکی ایستگاه پردازش پسماند تر پهنه جهاد

اثر	اهمیت وضعیت	بزرگی اثر	دوام اثر	برگشت-پذیری	اثرات تجمعی و تشدیدشونده	AT	BT	ES	RB
	A1 ۰ تا ۴	A2 ۳- تا ۳+	B1 ۱ تا ۳	B2 ۱ تا ۳	B3 ۱ تا ۳				
انتشار گازهای گلخانه‌ای (متان-تغییرات آب‌وهوایی)	۳	-۱	۳	۳	۲	-۳	۸	-۲۴	-C

جدول ۶: اثرات فرهنگی - اجتماعی ایستگاه پردازش پسماند تر پهنه جهاد

اثر	اهمیت وضعیت	بزرگی اثر	دوام اثر	برگشت-پذیری	اثرات تجمعی و تشدیدشونده	AT	BT	ES	RB
	A1 ۰ تا ۴	A2 ۳- تا ۳+	B1 ۱ تا ۳	B2 ۱ تا ۳	B3 ۱ تا ۳				
رضایت از مدیران شهری	۱	-۳	۳	۲	۳	-۳	۸	-۲۴	-C
رونق و سرزندگی محله	۲	-۱	۳	۲	۲	-۲	۷	-۱۴	-B
تأثیر بر بازدهی کسب‌وکارهای مجاور	۰	۰	۱	۲	۳	۰	۶	۰	N
رضایت از محیط کسب‌وکارهای مجاور	۱	-۲	۳	۲	۳	-۲	۸	-۱۶	-B
کارایی فضای شهری	۱	-۱	۲	۲	۲	-۱	۷	-۷	-A
احساس ناامنی و اضطراب از ابتلا به بیماری به‌ویژه کارکنان مراکز همجوار (ازجمله گرم‌خانه مهر)	۱	-۲	۳	۲	۲	-۲	۷	-۱۴	-B
نابرابری اجتماعی	۳	-۳	۳	۲	۳	-۹	۸	-۷۲	-E
مشارکت اجتماعی	۱	-۲	۳	۲	۳	-۲	۸	-۱۶	-B
حس تعلق	۱	-۲	۳	۲	۳	-۲	۸	-۱۶	-B
نگرانی کارکنان ایستگاه از ابتلا به بیماری	۱	-۲	۳	۲	۲	-۲	۷	-۱۴	-B
اثر بر سلامتی کارکنان ایستگاه	۱	-۲	۳	۲	۲	-۲	۷	-۱۴	-B
احساس ناامنی و اضطراب از ابتلا به بیماری در ساکنان محدوده	۲	-۱	۳	۲	۳	-۲	۸	-۱۶	-B
ترافیک	۳	۲	۲	۲	۳	۶	۷	۴۲	+D

جدول ۷: اثرات اقتصادی - عملیاتی ایستگاه پردازش پسماند تر پهنه جهاد

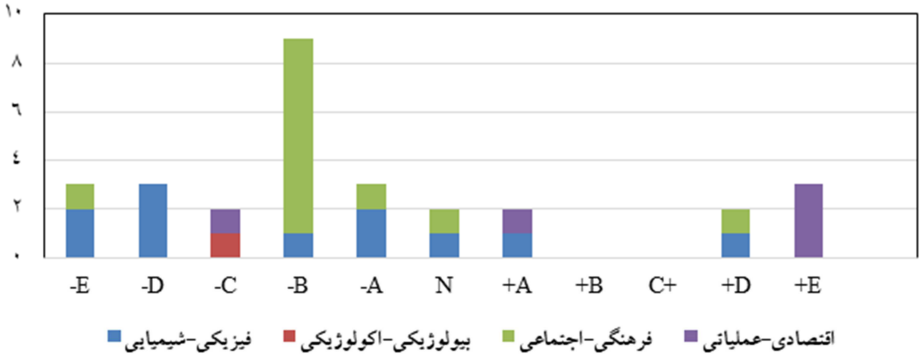
اثر	اهمیت وضعیت	بزرگی اثر	دوام اثر	برگشت‌پذیری	اثرات تجمعی و تشدیدشونده	AT	BT	ES	RB
	A1 ۰ تا ۴	A2 -۳ تا +۳	B1 ۱ تا ۳	B2 ۱ تا ۳	B3 ۱ تا ۳				
درآمد شهرداری	۳	۳	۳	۲	۳	۹	۸	۷۲	+E
هزینه‌های شهرداری	۳	۳	۳	۲	۳	۹	۸	۷۲	+E
اشتغال	۱	۱	۲	۱	۱	۱	۴	۴	+A
ارزش مالکیت، سرقفلی و اجاره‌بهای زمین یا ساختمان	۲	-۲	۱	۲	۲	-۴	۵	-۲۰	-C
بازگشت هزینه‌های عمومی	۳	۳	۳	۲	۳	۹	۸	۷۲	+E

جدول ۸: نتایج امتیازات حاصل از ارزیابی‌ها در ماتریس RIAM

	تأثیرات بسیار مثبت	تأثیرات مثبت معنی‌دار	تأثیرات مثبت متوسط	تأثیرات مثبت	تأثیرات مثبت اندک	بدون تغییر	تأثیرات منفی اندک	تأثیرات منفی	تأثیرات منفی متوسط	تأثیرات منفی معنی‌داری	تأثیرات بسیار منفی
	+E	+D	+C	+B	+A	N	-A	-B	-C	-D	-E
فیزیکی-شیمیایی	۰	۱	۰	۰	۱	۱	۲	۱	۰	۳	۲
بیولوژیکی-اکولوژیکی	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰
فرهنگی-اجتماعی	۰	۱	۰	۰	۰	۱	۱	۸	۰	۰	۱
اقتصادی-عملیاتی	۳	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۱	۰	۰
جمع امتیاز	۳	۲	۰	۰	۲	۲	۳	۹	۲	۳	۳

جدول ۹: مجموع امتیازات تأثیرات بر اساس محاسبات ماتریس RIAM

رده یا تأثیرات				
فیزیکی - شیمیایی	بیولوژیکی - اکولوژیکی	فرهنگی - اجتماعی	اقتصادی - عملیاتی	مجموع
-۲۹۳	-۲۴	-۱۸۱	+۲۰۰	-۲۹۸



شکل ۲: نمودار نتایج امتیازات حاصل از ارزیابی‌ها در ماتریس RIAM

بحث

بر اساس نتایج ماتریس RIAM (امتیاز کلی ایستگاه: ۲۹۸-) و ماتریس دامنه‌یابی، تأثیرات منفی ایستگاه بر تأثیرات مثبت آن غالب است؛ به این معنی که وجود ایستگاه موردمطالعه با شرایط فعلی، حتی بدون فعالیت می‌تواند تأثیرات مخربی بر محیط‌زیست و اجتماع محلی داشته باشد. قابل یادآوری است، در صورتی که تأثیرات محیط‌زیستی مدیریت نشود، در بلندمدت تبدیل به تأثیرات اجتماعی پیچیده‌تری خواهد شد. بر اساس نمودار شکل ، اجزای اقتصادی-عملیاتی بیشترین تأثیر مثبت را داشتند. ازآنجایی‌که ایده‌پردازی و جانمایی این پروژه به‌دلیل مجاورت به میدان مرکزی میوه و تره‌بار، صرفه‌جویی در هزینه‌ها و افزایش درآمد شهرداری، این نتیجه دور از انتظار نیست. بیشترین تأثیرات مثبت، بازگشت سرمایه‌ها و هزینه‌های عمومی ناشی از بازگشت مواد آلی به چرخه اقتصاد و طبیعت، کاهش هزینه‌های شهرداری از جهت کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل مجدد پسماندهای تر به محل دفن و پردازش در کهریزک هستند. بررسی ماتریس دامنه‌یابی نشان می‌دهد این تأثیرات مثبت و فرامنطقه‌ای هستند؛ چراکه تمامی این تأثیرات متوجه افراد ساکن و کسب‌وکارهای مجاور ایستگاه نمی‌شود. تنها جزئی که به‌صورت منفی از فعالیت ایستگاه متأثر می‌شود، ارزش مالکیت، سرقفلی و اجاره‌بهای زمین یا ساختمان است. این تأثیر ماهیتی محلی دارد و متوجه زمین ایستگاه و زمین‌های مجاور آن است. مصاحبه با کارشناسان میدان مرکزی میوه و تره‌بار نشان داد زمین ایستگاه موردمطالعه قسمتی از پروژه‌ای بزرگ با عنوان ناحیه صنعتی میدان مرکزی میوه و تره‌بار است و سازمان مدیریت میادین میوه و تره‌بار، برای زمین یادشده برنامه‌ریزی اقتصادی دارد. در برنامه‌ریزی سازمان یادشده، زمین موردبحث، قطعه درنظر گرفته‌شده برای احداث سردخانه و انبار است. همچنین، بر اساس بررسی‌های انجام‌شده، قسمتی از زمین ایستگاه دارای معارض بوده و رفع تعارض در محاکم قضایی در حال رسیدگی است. بیان این نکته ضروری به نظر می‌رسد که بررسی‌ها نشان می‌دهند که عدم تثبیت مالکیت زمین یادشده (و سایر معارضین میدان مرکزی میوه و تره‌بار)، می‌تواند باعث ایراد خسارت به شهرداری تهران گردد و تاوان اراضی بایر را تا چندین برابر افزایش دهد. باتوجه به مطالب گفته‌شده، حتی درصورتی‌که رفع تعارض صورت پذیرفته و مالکیت زمین به شهرداری منتقل شود، سازمان مدیریت میادین میوه و تره‌بار همچنان یکی از ذی‌نفعان قدرتمندی است که در زمین موردبحث برنامه احداث انبار و سردخانه دارد و مخالف ادامه فعالیت ایستگاه است. ورودی اصلی ایستگاه، پسماند تر میدان مرکزی میوه و تره‌بار بوده که به گفته ایده‌پرداز طرح، به‌طور میانگین روزانه بر ۵۰ تن بالغ بوده است. انتظار می‌رود با احداث ناحیه صنعتی پسماند ورودی به ایستگاه به لحاظ کیفیت و کمیت با کاهش مواجه شود. بنابراین، هرچند ممکن است در حال حاضر فعالیت ایستگاه دارای توجیه اقتصادی باشد؛ اما در آینده و با فرض احداث ناحیه یادشده، به نظر می‌رسد پایداری اقتصادی ایستگاه نیز مورد تهدید قرار گیرد. مثبت بودن اجزای اقتصادی در مطالعات پیشین نیز مورد تأیید و تأکید قرار گرفته است. نتایج ارزیابی اثرات محیط‌زیستی کارخانه کمپوست شهر کرج توسط حسینی (۲۰۲۲) نشان داد که کارخانه کمپوست موردمطالعه به لحاظ عملیاتی - اقتصادی مطلوب و دارای تأثیر مثبت است. همچنین، نتایج مطالعه رحمانی و همکاران (۱۳۸۹) بر اثرات محیط‌زیستی احداث کارخانه کمپوست شهرستان سبزوار، نشان دادند که افزایش اشتغال از اثرات اقتصادی کارخانه کمپوست موردمطالعه بوده است.

نمره‌دهی فیزیکی - شیمیایی نشان از این دارد که اجزای این دسته دارای بیشترین تأثیر منفی هستند. به نظر می‌رسد دلیل این امر جانمایی، طراحی ایستگاه و فرآیند مورداستفاده در تولید کمپوست است. منفی‌ترین جزء در این دسته، تنزل کیفیت هوا و بوی نامطبوع هستند. با توجه به سیال بودن و جابه‌جایی به‌وسیله باد، بوی نامطبوع

یکی از برجسته‌ترین تأثیرات ایستگاه موردمطالعه است. بر اساس ادبیات موضوعی، مصاحبه‌ها، پیمایش و بررسی‌های انجام‌شده، آلودگی بویایی و دامنه اثرات آن به‌شدت به ساختار و نحوه قرارگیری ساختمان‌ها و فضای سبز وابسته است. بنابراین، بررسی‌ها نشان دادند که در قسمت‌هایی که بلوک‌های ساختمانی به‌هم‌پیوسته‌ای وجود داشتند، تأثیرات بر ساختمان‌های مسکونی و تجاری بیرون بلوک تأثیر بیشتری داشته است. همچنین، خیابان‌ها و معابری که دارای مسیر بیشتری برای گردش هوا بوده‌اند، بوی نامطبوع را به مناطق دورتر هم منتقل کرده است. همچنین، نتایج مصاحبه‌ها نشان دادند که در مقطعی به‌علت نبود برق و خرابی دستگاه‌ها، انتشار بوی نامطبوع با شدت بیشتری منتشر شده است. ازجمله متداول‌ترین روش کنترل بو در تأسیسات کمپوست، می‌توان به اکسیداسیون زیستی اشاره کرد. اکسیداسیون زیستی به دو روش کاربرد لجن فعال به‌عنوان یک صافی زیستی مایع و صافی‌های زیستی قابل-انجام است. البته در بسیاری موارد روش‌های جذب و جذب سطحی به‌عنوان یک راه‌کار مقدماتی پیش‌تصفیه به‌کار رفته و روش غالب همان اکسیداسیون زیستی است (اندراسکار[1] و همکاران، ۲۰۲۱) که می‌توان برای کنترل بوی نامطبوع در ایستگاه پردازش پسماند موردمطالعه پیشنهاد شود.

آلودگی خاک و آب‌های زیرزمینی در رتبه بعدی تأثیرات حاصل از فعالیت قرار دارند و حائز اهمیت می‌باشند (آیلارا[2] و همکاران، ۲۰۲۰). مشاهدات میدانی حاکی از آن است که بستر ایستگاه خاکی نفوذپذیر بوده و سیستمی برای جمع‌آوری و تصفیه شیرابه درنظر گرفته نشده است. بر اساس اظهارات ایده‌پرداز طرح، کف‌سازی سایت به‌وسیله رفت‌وآمد لودر و لایه‌ای از کمپوست فراوری‌نشده، انجام شده است که به‌نظر می‌رسد امری ناکافی بوده و از نفوذ پساب و شیرابه به خاک و آب‌های زیرزمینی، به‌طورکامل جلوگیری نمی‌شود. مسئله آلودگی آب‌های زیرزمینی به-دلیل نزدیکی با ناحیه ۵ منطقه ۱۹ (فاصله: هزار متر) و کسب‌وکارهای اطراف (به‌ویژه گرمخانه مهر که در منطقه ۱۹ شهرداری تهران در مجاورت ایستگاه موردمطالعه) که از آب چاه استفاده می‌کنند، بسیار بااهمیت است.

بر اساس پژوهش‌های انجام‌شده، کمپوستی که در بستر آماده‌نشده تولید می‌گردد، نسبت به بسترهای آماده نظیر بتن، میزان تمرکز نیتروژن، ماده آلی و درصد پتاسیم کمتری دارد. چراکه در نتیجه مخلوط شدن خاک بستر با کمپوست در اثر فعالیت ماشین‌آلات به‌خصوص لودرها، از کیفیت کمپوست کاسته می‌شود (داوودی و رمضانی، ۱۳۹۲) و قسمت عمده‌ای از این املاح به‌صورت شیرابه (غنی از املاح) به لایه‌های زیرین خاک و آب‌های زیرزمینی نفوذ می‌کند و باعث آلودگی خاک و آب‌های زیرزمینی می‌شود. همچنین، مطالعات نشان می‌دهند شیرابه حاصل از پسماندهای شهری یکی از آلوده‌ترین پساب‌ها است که می‌تواند موجب آلودگی‌های محیط‌زیست به‌ویژه منابع آب زیرزمینی شود. تشکیل شیرابه بیشتر به‌دلیل نفوذ آب باران از طریق بدنه دفن زباله و فرایندهای فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی است که در داخل بدنه محل دفن زباله انجام می‌شود. بااین‌حال، بایستی دقت داشت که انتقال پسماند تر به کهریزک نیز دارای معایب و مزایای خاص خودش است. عواملی مانند تفاوت الگوی مصرف و ترکیب پسماندها در مناطق مختلف می‌تواند کنترل و مدیریت شیرابه را بسیار دشوار کند، به‌طوری‌که موجب تفاوت روش بهینه تصفیه شیرابه در مناطق مختلف شود. همچنین، وجود ترکیبات شیمیایی مختلف در شیرابه و برهم‌کنش‌های آن‌ها پیش‌گویی و فهم خواص شیرابه را در طول زمان دشوار می‌کند (هاشمی و باقری[3]، ۲۰۱۳؛ پدلاسک[4] و همکاران، ۲۰۲۳). بررسی تأثیرات اشاره‌شده در طبقه‌بندی ماتریس دامنه‌یابی سیمپسون نشان می‌دهد گستره تأثیراتی که در

[1] - Andraskar
[2] - Ayilara
[3] - Hashemi & Bagheri
[4] - Podlasek

دسته فیزیکی - شیمیایی ماتریس RIAM قرار دارند، محلی و منطقه‌ای است و دارای تأثیر بلندمدت هستند. به‌عبارت‌دیگر، این تأثیرات بر شهروندان و کسب‌وکارهای مجاور ایستگاه تأثیر می‌گذارند و احتمالاً محدود به محدوده بلافصل هستند. برای کنترل آلودگی خاک و آب زیرزمینی در ایستگاه پردازش پسماند، می‌توان به ایجاد یک لایه عایق توسط ورق‌های ژئوممبران در کف ایستگاه پیشنهاد داد. این لایه از نفوذ شیرابه به خاک و آب‌های زیرزمینی جلوگیری می‌کند و از آلودگی محیط‌زیست ممانعت می‌نماید. ژئوممبران با ایجاد یک سیستم جمع‌آوری شیرابه، امکان جمع‌آوری و تصفیه این مایع آلوده را فراهم می‌کند. شیرابه جمع‌آوری‌شده پس از تصفیه، به محیط‌زیست بازگردانده می‌شود یا به روش‌های ایمن دفع گردد. نوع و کیفیت قرارگیری ژئوممبران نیز باید مطابق با هدایت هیدرولیکی آن درنظر گرفته شود که ممکن است به‌طور قابل‌توجهی بر نفوذ شیرابه تأثیر بگذارد (پدلاسک، ۲۰۲۳).

نتایج امتیاز اجزای اجتماعی - فرهنگی در ماتریس RIAM، نشان از تأثیر منفی پروژه بر محیط‌زیست انسانی منطقه ۱۹ شهرداری تهران دارد. عمده اجزای این دسته دارای تأثیر منفی بر اجتماع هستند. عدالت اجتماعی جزئی است که بیشتر تأثیر منفی و نامطلوب اجتماعی و فرهنگی دارد که پروژه پردازش پسماند تر پهنه جهاد، متوجه ساکنان و کسب‌وکارهای اطراف ایستگاه می‌کند. مسئله عدالت اجتماعی حداقل از دو بعد قابل‌بررسی است: اول اینکه: توزیع امکانات و خدمات باید به‌گونه‌ای باشد که کلیه شهروندان (اعم از بانوان، سالمندان و معلولین) دسترسی مناسبی به آن داشته باشند. فاضلی و همکاران (۱۳۹۱) در مطالعه ارزیابی پیامدهای اجتماعی پروژه تونل توحید در شهر تهران نشان دادند که آثار و پیامدهای پروژه توسعه‌ای می‌تواند در حین و پس از اجرای پروژه به نابرابری‌های اجتماعی دامن بزند. توزیع نامتوازن برخورداری از خدمات شهری و توسعه ناهنجار کالبد شهری از معضلات پیش روی کلان‌شهر تهران است. این امر در منطقه ۱۹ شهرداری تهران با شدت بیشتری قابل‌مشاهده است. همچنین در حین و پس از اجرای پروژه یادشده، آلودگی‌های محیط‌زیستی، ناراحتی‌های روحی و روانی، اختلال در دسترسی‌ها و تردد، اخلال در کسب‌وکار کسبه و مشاغل و شهروندان و غیره محدوده مستقیم و بلافصل اجرای پروژه به‌همراه داشته است (منفی و در سطح محدوده مستقیم و بلافصل). همچنین نتایج مطالعه (فاضلی و همکاران ۱۳۹۱) نشان دادند که احتمالا با بهره‌برداری از تونل توحید اثراتی در زمینه ترافیکی، محیط‌زیستی و اجتماعی برای شهروندان (مثبت و در سطح شهر تهران) ایجاد شود. ایجاد نابرابری اجتماعی در بررسی تأثیرات پروژه موردمطالعه به‌وضوح قابل‌مشاهده است. چراکه اثرات نامطلوب آن متوجه محدوده مستقیم و بلافصل پروژه است، درحالی‌که اثرات مطلوب آن متوجه کل شهر تهران خواهد شد. این مسئله در منطقه ۱۹ شهرداری تهران که با نابرابری در توسعه مواجه است، اهمیت بیشتری دارد. تأثیر رضایت از مدیران شهری در رتبه بعدی قرار گرفت. مطالعه نقشه هوایی و موقعیت آن نسبت به لکه‌های مسکونی، نشان می‌دهد که فاصله ایستگاه با نزدیک‌ترین لکه ۷۰۰ و ۷۵۰ متر است. همچنین، لکه مسکونی واقع در مسیر باد غالب منطقه، با ایستگاه ۱۰۵۰ متر فاصله دارد. با توجه به مجاورت ایستگاه موردمطالعه به مناطق مسکونی از یک‌طرف و سیال بودن آثاری مانند بوی نامطبوع و آلودگی آب‌های زیرزمینی، به‌نظر می‌رسد امکان اثرپذیری مردم از اثرات فعالیت این ایستگاه بالا است که در رضایت و نگرش ساکنان و کسب‌وکارهای اطراف نسبت به مدیریت شهری تأثیر منفی می‌گذارد.

مثبت‌ترین تأثیر اجتماعی و فرهنگی فعالیت ایستگاه کمپوست موردمطالعه، کاهش ترافیک است. کاهش تردد خودروهای حمل پسماند در مسیر انتقال به کهریزک، نه‌تنها باعث کاهش ترافیک می‌شود و به روان‌تر شدن عبور و مرور کمک می‌کند، بلکه به کاهش ریزش شیرابه در مسیر می‌انجامد. نتایج مصاحبه‌ها نشان دادند که نشت شیرابه در

مسیر تردد خودروها و کامیون‌های حمل زباله، باعث کثیفی مسیر و ایجاد لغزندگی و بروز تصادفات می‌شود. بنابراین با فعالیت ایستگاه، می‌توان انتظار داشت که ترافیک، کاهش تصادفات خودروهای حمل زباله، ریزش شیرابه در مسیر و هزینه‌ها و تصادفات ناشی از آن کاهش یابد. نتایج مطالعه حسینی (۲۰۲۲) نشان داد که بخش بزرگی از تأثیرات منفی کارخانه کمپوست کرج، مربوط به اجزای اجتماعی - فرهنگی و فیزیکی - شیمیایی است. فعالیت این کارخانه کمپوست با انتشار بوی نامطبوع، نارضایتی ساکنین شهرک ابریشم و فرودگاه بین‌المللی پیام را به‌دنبال داشته است.

نتایج به‌دست‌آمده از نمره‌دهی بیولوژیکی - اکولوژیکی نشان می‌دهد که تنها جزء این دسته، انتشار گازهای گلخانه‌ای و پتانسیل این گازها در جهت تغییرات آب‌وهوایی است. گازهای گلخانه‌ای در فرآیند تبدیل پسماند تر به کمپوست، از فرآیند پردازش، فعالیت ماشین‌آلات در ایستگاه و حمل‌ونقل منتشر می‌شوند که در مطالعه نورداهل[1] و همکاران (۲۰۲۳) انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلاینده‌های هوا از فرآیند کمپوست به خوبی نشان داده شد. با توجه به اینکه فرآیند ایستگاه موردمطالعه، توده ثابت با هوادهی فعال و در برخی مقاطع غیرفعال بوده است، به نظر می‌رسد میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای بالا باشد. مطالعه مروری نوایی فیض‌آبادی و همکاران (۲۰۱۶) نشان دادند که مواد آلی فسادپذیر در شرایط بی‌هوازی انتشار مخلوطی از گاز متان و دی‌اکسیدکربن را در پی دارد. بسته‌های بی‌هوازی ایزوله‌شده درون توده‌های کمپوست باعث انتشار متان می‌شوند و انتشار کنترل‌نشده این گاز می‌تواند منجر به آتش‌سوزی و دیگر خطرات بالقوه در انسان شود. همچنین مصرف سوخت‌های فسیلی طی حمل‌ونقل، کربن نیز تولید می‌شود که به نوبه خود باعث گرمایش جهانی می‌شود. نتایج مطالعات داوودی و رمضانی (۱۳۹۲) نشان دادند که انتشار گازهای گلخانه‌ای از تبدیل پسماند به کمپوست به‌شدت به نوع فرآیند وابسته است.

نتیجه‌گیری

همان‌گونه که مطرح شد، هدف از احداث ایستگاه پردازش پسماند تر پهنه جهاد در منطقه ۱۹ شهرداری تهران، بیشتر اقتصادی و با هدف کاهش در هزینه‌های کاهش انتقال و مدیریت پسماند بوده است. نتایج حاصل از این مطالعه نشان دادند ایستگاه موردمطالعه به لحاظ اقتصادی دارای مزیت است. بااین‌حال تداخل با پروژه ناحیه صنعتی که پروژه‌ای بزرگ‌تر است و ورودی ایستگاه را به لحاظ کمیت و کیفیت تحت تأثیر قرار می‌دهد، یکی از چالش‌های پیش روی ایستگاه و پایداری اقتصادی آن است. مشاهدات میدانی و مصاحبه‌ها نشان دادند که کف ایستگاه خاکی بوده و دارای نفوذپذیری بالایی است. شیرابه حاصله جمع‌آوری و تصفیه‌نشده و وارد زمین می‌گردد و فرآیند تبدیل پسماند به کمپوست زمان‌بر بوده و ایستگاه از سطح تجهیزات و امکانات پایینی برخوردار است. بنابراین، اثرات محیط‌زیستی ایستگاه کمپوست، با شدت بالایی به محیط ضربه می‌زند و با فرض ادامه فعالیت و ثابت بودن سایر شرایط، در نهایت به مشکلات اجتماعی نیز می‌انجامد. به‌عبارت‌دیگر، می‌توان نتیجه گرفت ایستگاه به لحاظ محیط‌زیستی پایدار نیست. در کنار طراحی، فرآیند و ظرفیت (میزان پذیرش پسماند و سطح فعالیت) که نقشی تعیین‌کننده در نوع و میزان تأثیرات دارند، جانمایی نیز می‌تواند در تأثیرات اجتماعی و فرهنگی و متأثران آن تعیین‌کننده باشد. مجاورت ایستگاه موردمطالعه با کاربری‌های مسکونی، محیط‌های کسب‌وکار و فعالیت‌های اجتماعی مانند گرمخانه مهر، تأثیرات چندگانه اجتماعی در پی داشته است. ایجاد نابرابری اجتماعی در بررسی تأثیرات پروژه موردمطالعه به‌وضوح قابل‌مشاهده است. چراکه اثرات نامطلوب آن متوجه محدوده مستقیم و بلافصل

[1] - Nordahl

پروژه است. در حالی‌که اثرات مطلوب آن متوجه کل شهر تهران خواهد شد. این مسئله در منطقه ۱۹ شهرداری تهران که با نابرابری در توسعه مواجه است، اهمیت بیشتری دارد و نیاز است در طرح و برنامه‌های عمرانی و اجتماعی شهرداری تهران موردتوجه قرار گرفته شود.

از جمله پیشنهادها برای برای مدیریت پیامدهای اقدام برای شهرداری می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

بررسی گزینه انتقال ایستگاه از نقطه کنونی به نقطه‌ای مناسب و با فاصله از مناطق مسکونی و کشاورزی.

بررسی امکان تعیین سقف فعالیت و پذیرش پسماند برای ایستگاه، با درنظرگرفتن توجیه اقتصادی، اجتماعی و محیط‌زیستی.

تغییر فرآیند تولید پسماند به فرایند هوادهی فعال با تعبیه فیلتر برای کاهش بیشتر بوی نامطبوع، با توجه به ویژگی‌های اجتماعی منطقه و توجیه‌پذیر بودن به لحاظ اقتصادی.

غیرقابل‌نفوذ کردن بستر ایستگاه تعبیه سپتیک تانک برای جمع‌آوری و تصفیه شیرابه.

بازنگری در طراحی کف خودروهای انتقال پسماند به‌منظور جمع‌آوری شیرابه حاصل از پسماند بارگیری‌شده.

اندیشیدن تمهیدات لازم برای مواقع اضطراری (از جمله قطعی برق، خرابی دستگاه‌های دمنده و غیره).

بازسازی و تعویض دیواره‌های تخریب‌شده.

تعبیه سیم‌خاردار یا نت برای ارتفاع دادن به دیوار.

آنالیز کیفی ترکیب کمپوست تولیدشده و تحلیل هزینه - فایده اقتصادی و محیط‌زیستی استفاده از کمپوست تولیدی در فضای سبز شهری.

تحلیل هزینه - فایده اقتصادی و محیط‌زیستی ایستگاه و رصد آن در مقاطع شش‌ماهه یا سالانه.

رصد مواد و پسماند ورودی به لحاظ وزن و ترکیب تشکیل‌دهنده، با توجه به فصل.

رصد کیفیت و ترکیبات تشکیل‌دهنده کمپوست تولیدشده.

رصد آلودگی خاک و آب‌های زیرزمینی با توجه‌به استفاده ساکنین محدوده مجاور از آب چاه.

به‌کارگیری دائم و یا موقت یک متخصص ایمنی، سلامت و محیط‌زیست و متخصص پردازش پسماند به‌منظور آمادگی برای مقابله با حوادث طبیعی و غیرطبیعی.

حصول اطمینان از وجود تجهیزات و به‌کارگیری مناسب آن‌ها.

بهره‌گیری از فناوری‌های جدید از جمله اینترنت اشیاء و هوش مصنوعی در جمع‌آوری پسماند، به‌منظور بهینه‌سازی فرآیند، کاهش آلودگی‌های محیط‌زیست، ایجاد اشتغال و پیشرفت اقتصادی محلی.

تقدیر و تشکر

نویسندگان مقاله مراتب قدردانی و تشکر خود را از اداره کل دفتر مطالعات اجتماعی معاونت فرهنگی شهرداری تهران و موسسه مطالعات و توسعه محیط‌زیست، آب و کشاورزی (ماکا) به‌دلیل همکاری‌های ارزشمندشان در راستای انجام این پژوهش اعلام می‌نماید.

منابع

قیصری، حمید. (۱۴۰۰). رهیافت‌هایی نو در ارزیابی تأثیر اجتماعی: پیشرفت‌های مفهومی و روش‌شناختی. ترجمه: حمید قیصری (۱۴۰۰). نوبت چاپ: اول، تهران: انتشارات همشهری.

فاضلی، محمد؛ بهرامی، اردشیر؛ محمدی، عذرا؛ شفیعی خورشیدی، فاطمه؛ کمره‌ای، مریم. (۱۳۹۱). ارزیابی پیامدهای اجتماعی پروژه تونل توحید در شهر تهران . *نشریه مدیریت شهری و روستایی*. ۱۰(۲۹) ، ۲۸۷-۳۰۴.http://ijurm.imo.org.ir/article-1-142-fa.html

فاضلی، محمد.(۱۳۹۶). ارزیابی تأثیرات اجتماعی سیاست‌ها و برنامه‌ها و طرح‌ها. نوبت چاپ: دوم، انتشارات تیسا.

داوودی، محمد؛ امین، رمضانی. (۱۳۹۲). بررسی فرآیند تولید کمپوست از پسماندهای شهر تهران (دانش‌شهر). مرکز مطالعات و برنامه‌ریزی شهر تهران.

دلفان آذری، شقایق.(۱۳۹۶). جریان باد و کالبد فیزیکی شهر تهران. پایان‌نامه دکتری. دانشگاه خوارزمی.

رحمانی، ابوالفضل؛ بهروزی‌خواه، محمدرضا؛ آبادی، احمداله. (۱۳۸۹). اثرات زیست‌محیطی احداث کارخانه کمپوست در شهرستان سبزوار. *مجله دانشگاه علوم پزشکی سبزوار*، ۱۷(۴)، ۲۸۱-۲۸۶. https://jsums.medsab.ac.ir/article_47.html?lang=fa

زینلی، سحر؛ جلالی، میثم. (۱۳۹۴). ارزیابی تأثیرات اجتماعی احداث تونل‌های شهری - مطالعه موردی: تونل بزرگراه حکیم در محدوده پارک جنگلی چیتگر. *نشریه مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی*، ۴(۲)، ۱-۱۰. doi: 10.22044/tuse.2016.622

Arteaga, C., Silva, J., & Yarasca-Aybar, C. (2023). Solid waste management and urban environmental quality of public space in Chiclayo, Peru. *City and Environment Interactions*, 20, 100112. doi: 10.1016/j.cacint.2023.100112.

Andraskar, J., Yadav, S., & Kapley, A. (2021). Challenges and control strategies of odour emission from composting operations. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 193, 2331-2356. doi: 10.1007/s12010-021-03490-3.

Ayilara, M. S., Olanrewaju, O. S., Babalola, O. O., & Odeyemi, O. (2020). Waste management through composting: Challenges and potentials. *Sustainability*, 12(11), 4456. doi: 10.3390/su12114456.

Cao, X., Williams, P. N., Zhan, Y., Coughlin, S. A., McGrath, J. W., Chin, J. P., & Xu, Y. (2023). Municipal solid waste compost: Global trends and biogeochemical cycling. *Soil & Environmental Health*, 1(4), 100038. doi: 10.1016/j.seh.2023.100038.

Daryabeigi, Zand, A., & Vaezi Heir, A. (2019). Application of the rapid impact assessment matrix and sustainability model in environmental impact assessment and operational optimization of solid waste transfer stations in Tehran. *Iranian Journal of Health and Environment*, 12(3), 501-514. http://ijhe.tums.ac.ir/article-1-6249-en.html.

Fazeli, M., Bahrami, A., Mohammadi, O., Shafiee Khorshidi, F., & Komreei, M. (2012). Assessing the social aftermath of the Tohid tunnel project in the city of Tehran. *Urban Management*, 10(29), 287-304. (In Persian).

Ghaderi, A. A., Pirzadeh, B., & Shahbeigi, N. (2019). Environmental Impact Assessment of Zahedan Compost Plant. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 8(20), 233-244. doi: 10.22111/jneh.2018.23951.1374.

Gheybi, M. J., Chehreghani, S., Azimi Youshanlouie, M., & Darvishi Qulunji, Z. (2022). Environmental Impact Assessment EIA of the Landfill of Municipal Waste in Urmia City using the Rapid Assessment Matrix Method (RIAM). *Environmental Sciences*, 20(3), 117-136. doi: 10.52547/envs.2022.1103.

Gholamalifard, M., Mirzaei, M., Hatamimanesh, M., Riyahi Bakhtiari, A., & Sadeghi, M. (2014). Application of the rapid impacts assessment matrix and Iranian matrix in environmental impact assessment of the municipal solid waste landfill of Shahrekord. *Journal of Shahrekord University of Medical Sciences*, 16(1).

Goldan, E., Nedeff, V., Barsan, N., Culea, M., Panainte-Lehadus, M., Mosnegutu, E., ... & Irimia, O. (2023). Assessment of manure compost used as soil amendment—A review. *Processes*, 11(4), 1167. doi: 10.3390/pr11041167.

Hashemi, S. H., & Bagheri, A. (2013). Treatment of Old Leachate by Electro-Coagulation: A Case Study for Leachate of Kahrizak Landfill in Tehran. *Journal of Water and Wastewater*, 24(3), 112-121. https://www.wwjournal.ir/article_3116_en.html.

Hilson, G. (2000). Sustainable development policies in Canada's mining sector: an overview of government and industry efforts. *Environmental Science & Policy*, 3(4), 201-211. doi: 10.1016/S1462-9011(00)00086-1.

Kakaei, K., & Riyahi Bakhtiari, A. R. (2016). Investigation Status of Solid Waste Landfill by Method of Rapid Impacts Assessment Matrix in Environmental Impact (RIAM) in Hamadan. *Journal of Research in Environmental Health*, 2(2), 173-182. doi: 10.22038/jreh.2016.7586.

Khastoo, Z. (2022). Social Impact Assessment of BRT Line Displacement in Mowlavi Street. *Social Impact Assessment*, 5(5), 11. https://siamag.ihss.ac.ir/en/Article/36652. (In Persian).

Kianisadr, M., & Azani, M. (2020). Environmental Impact Assessment of Hamedan Compost using Riam and FANP. *Journal of Geography and Planning*, 23(70), 279-298. https://geoplanning.tabrizu.ac.ir/article_10341.html.

Makan, A., & Fadili, A. (2020). Sustainability assessment of large-scale composting technologies using the PROMETHEE method. *Journal of Cleaner Production*, 261, 121244. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.121244.

Mirzaee, M., Salman Mahini, A. R., & Mirkarimi, S. H. (2016). Site selection of compost plant alternatives using rapid impact assessment matrix (RIAM)(case study: compost plant of Golpayegan city). *Geographical Research*, 31(1), 103-117. http://georesearch.ir/article-1-75-en.html.

Mirzaei, N., Nori, J., Mahvi, A. H., Yunesian, M., & Malaki, A. (2010). Assessment of environmental impacts produced by the compost plant in Sanandaj. *Scientific Journal of Kurdistan University of Medical Sciences*, 14(4), 79-88. http://sjku.muk.ac.ir/article-1-279-en.html.

Hosseini, P. M. (2022). Environmental impact assessment of Karaj compost plant using rapid impact assessment matrix and sustainability model. *Iranian Journal of Health and Environment*, 15(2), 229-244. http://ijhe.tums.ac.ir/article-1-6649-en.html. (In Persian).

Navaei Fezabady, A. A., Alidadi, H., Najafpoor, A. A., Dankoob, M., Yazdani, M., Saghi, M., & Shafiee, M. N. (2016). An Evaluation on the effects of composting plants on the environment in Iran (A review study). *Journal of Research in Environmental Health*, 2(1), 38-51. doi: 10.22038/jreh.2016.7069.

Nordahl, S. L., Preble, C. V., Kirchstetter, T. W., & Scown, C. D. (2023). Greenhouse gas and air pollutant emissions from composting. *Environmental Science & Technology*, 57(6), 2235-2247. doi: 10.1021/acs.est.2c05846.

Panahandeh, M., Abedinzadeh, N., & Ravanbakhsh, M. (2010). Assessment of the environmental impact of the composting plant of Yazd City. *Journal of Environmental Science and Technology*, 12, 87-100. https://sanad.iau.ir/en/Article/839460?FullText=FullText.

Pastakia, C. M., & Jensen, A. (1998). The rapid impact assessment matrix (RIAM) for EIA. *Environmental Impact Assessment Review*, 18(5), 461-482. doi: 10.1016/S0195-9255(98)00018-3.

Podlasek, A., Vaverková, M. D., Koda, E., Jakimiuk, A., & Barroso, P. M. (2023). Characteristics and pollution potential of leachate from municipal solid waste landfills: Practical examples from Poland and the Czech Republic and a comprehensive evaluation in a global context. *Journal of Environmental Management*, 332, 117328. doi: 10.1016/j.jenvman.2023.117328.

Podlasek, A. (2023). Modeling leachate generation: practical scenarios for municipal solid waste landfills in Poland. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(5), 13256-13269. doi: 10.1007/s11356-022-23092-8.

Roustakhiz, B., Hosseinbor, M. O., Tamandehrou, A., & Gharbi, M. (2023). Evaluating the Effects and Social Consequences of Launching the Mining Site and Processing Plant in Taftan Township. *Journal of Arid Regions Geographic Studies*, 14(51), 23-1. doi: 10.22034/jargs.2023.373972.0.

Rupani, P. F., Delarestaghi, R. M., Abbaspour, M., Rupani, M. M., El-Mesery, H. S., & Shao, W. (2019). Current status and future perspectives of solid waste management in Iran: a critical overview of Iranian metropolitan cities. *Environmental Science and Pollution Research*, 26, 32777-32789. doi: 10.1007/s11356-019-06456-5.

Silva, M. E. F., Saetta, R., Raimondo, R., Costa, J. M., Ferreira, J. V., & Brás, I. (2024). Forest waste composting—operational management, environmental impacts, and application. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-17. doi: 10.1007/s11356-024-32279-0.

Simpson, G., 2020. Social Impact Assessment tools for mitigation and project development. In Social Impact Analysis (pp. 129-151). Routledge.

Journal of Natural Environment Hazards
University of Sistan and Baluchestan
Print ISSN: 2676 - 4377 Online ISSN: 2676 - 4385
Homepage: https://jneh.usb.ac.ir

Journal of Natural Environmental Hazards, Vol 15, Iss 47, March 2026

The Impact of Extreme Temperature and Precipitation on Dust Storm Trends in Southeastern Iran

Maede Nasry[1], Mohammad Rahimi[2*], Fereshteh Tarighat[3], Hadi Jalili[4], Aliakbar Damavandi[5]

1. PhD in Desert Management and Control, Combat to Desertification Department, Faculty of Desert Studies, Semnan University, Semnan, Iran

2. Corresponding Author, Professor, Combat to Desertification Department, Faculty of Desert Studies, Semnan University, Semnan, Iran

Email: mrahimi@semnan.ac.ir ***ORCID:*** https://orcid.org/0000-0001-6405-8488

3. M.Sc. in Remote Sensing, Iranian Space Research Institute, Tehran, Iran

4. Assistant Professor, Iranian Space Research Institute, Tehran, Iran

5. Assistant Professor, Agricultural Education and Extension Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received: 25 January 2025
Revised: 0 March 2025
Accepted: 12 April 2025
Published: 21 March 2026

Keywords:
Mann-Kendall test, perceptron neural network, climate change, wind erosion, extreme events.

ABSTRACT

This study investigated the impact of extreme temperature and precipitation indices on the trend of dusty days in southeastern Iran. Extreme temperature and precipitation indices were selected based on local requirements and climatic characteristics of the study region, resulting in a total of eight precipitation indices (Rx1, Rx5, SDII, R10mm, CDD, CWD, and PRCPTOT) and six temperature indices (SU25, TXx, TXn, TX90p, WSDI, and DTR). These indices were derived using daily temperature and precipitation data from stations in the research area over 21 years, from 2000 to 2020, processed using the RClimDex software. A multilayer perceptron neural network was employed to assess the influence and importance of these temperature and precipitation indices on the trend of dusty days in south-eastern Iran. Additionally, the Mann-Kendall test and linear regression were used to analyze the trends in the investigated variables. The results revealed a significant decrease in the pattern of dusty days at the Rudan, Saravan, Iranshahr, Zabol, Bandar Abbas, Bam, and Khash stations. Among these, Zabol and Bandar Abbas recorded the highest number of dusty days over the study period, with annual averages of 171 and 93 days, respectively. The perceptron neural network model indicated that the extreme precipitation indices CDD, R10, and R20, along with the extreme temperature indices SU25, DTR, and TXn, exhibited the strongest correlations with the trend in dust storm variations. These findings provide valuable insights for developing more precise planning and policymaking strategies for dust storm management and adaptation to climate change-related impacts.

How to Cite: Nasry, M. , Rahimi, M. , Tarighat, F. , Jalili, H. and Damavandi, A. (2026). The Impact of Extreme Temperature and Precipitation on Dust Storm Trends in Southeastern Iran. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 15(47), 117-132.

© The Author/Authors

DOI: 10.22111/jneh.2025.50917.2100

Publisher: University of Sistan and Baluchestan

EXTENDED ABSTRACT

INTRODUCTION

Recently, it has been acknowledged that the frequency of extreme temperature and precipitation events is closely tied to global warming and is anticipated to rise in areas with hot and dry climates (Liang et al., 2023). Extreme temperature and precipitation events disrupt environmental processes and can alter the intensity and frequency of dust storms in regions characterized by hot and dry climates. The southeastern part of Iran is recognized as one of the most prominent sources of dust storms in Asia (Bahek, 2018). The findings from the examination of the seasonal distribution of extreme precipitation in Iran indicated that the highest Rx1 index of 80 mm occurred during the winter season. The peak SDII index of 19. 2 mm was also recorded in the summer season. Meanwhile, the highest number of days with heavy precipitation in all seasons was noted along the Caspian coast (Rahimbeigi et al., 2014). Spatial analysis of climate change in Iran revealed an inverse relationship between altitude, slope, and the trend of hot extreme indices. Thus, as altitude and slope decrease, the trend of hot extreme indices rises, and stations situated in lower areas face more severe climate transformations, with the trend of changes in hot extreme indices surpassing that of cold extreme indices (Sadeghinia et al., 1400). The primary aim of this research is to explore the impact of changes in temperature and precipitation extreme on the trend of dust storm variations in the southeastern region of Iran. The central hypothesis of this research posits that during the timeframe from 2000 to 2020, the alterations in days with dust in the south have shown an upward trend.

DATA AND METHODS

Study Area

The study area is located in southeastern Iran (Figure 1).

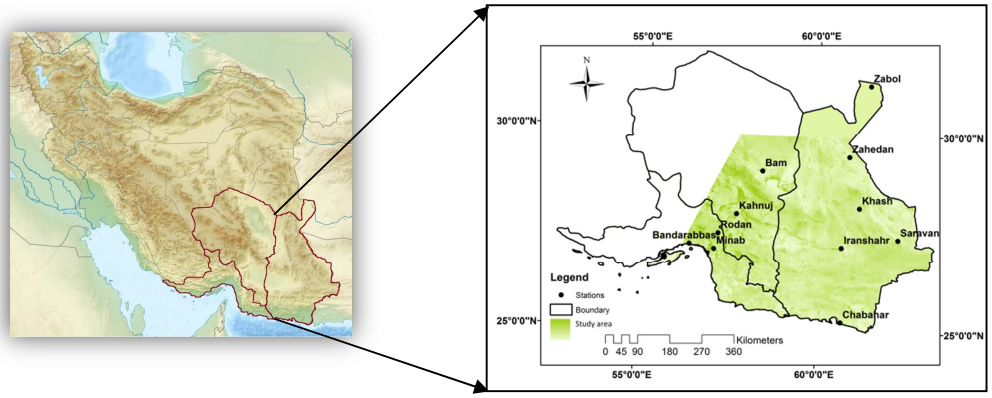


Figure 1: Location of the study area and study stations

To compute the extreme temperature and precipitation indices, daily temperature and precipitation information from the stations within the study area were utilized over 21 years from 2000 to 2020. RclimDex software was employed to determine the precipitation indices Rx1, Rx5, SDII, R10mm, CDD, CWD, and PRCPTOT as well as the temperature indices SDII, TXx, TXn, TX90p, WSDI, and DTR. In this research, the variable of days with dust, horizontal visibility information, and dust meteorological codes were applied to differentiate days with dust of internal and external origins. The multilayer Perceptron neural network technique was employed to investigate the correlation between data. Furthermore, the Mann-Kendall test (Kendall, 1975; Mann, 1945) along with the linear regression technique was utilized to assess the trend of variations in variables (Azarakhshi et al., 2013).

RESULTS AND DISCUSSION

The findings of the trend examination employing the linear regression approach indicated that the trend in the number of days with dust remained stable at the Minab and Kahnouj stations, whereas in the other stations of Rodan, Saravan, Iranshahr, Zabol, Zahedan, Bandar Abbas, Bam, Khash, and Chabahar, the trend exhibited a decline, which was significant only at the Rodan, Saravan, Iranshahr, Zabol, Bandar Abbas, Bam, and Khash stations (with a significance level of less than 0. 05). A comparison of the significance of independent predictor variables across various fitted models revealed that the CDD, R10, and R20 indices exhibit the highest correlation with the trend in changes of dust storms. Additionally, a comparison of the significance of independent predictor variables across different fitted models indicated that the SU25, DTR, and TXn indices exert the most substantial influence on the trend of changes in dust storms within the study area.

CONCLUSION

Based on the results obtained, it can be concluded that the occurrence of extreme temperatures and precipitation has significantly influenced the prevalence of dust storms in the study area. Additionally, the trend regarding changes in dust storms in the area has been declining, which may be partially attributed to the reduction in dry days and days with temperatures exceeding 24 degrees Celsius. The incidence of dust storms is directly associated with dry days and elevated temperatures because environmental dryness diminishes soil moisture content, thereby facilitating the wind's ability to lift soil particles. Furthermore, the occurrences of extreme temperature and precipitation manifest simultaneously and can interact with one another.

REFERENCES

References (in Persian)

Azarakhshi, M., Farzadmehr, J., Eslah, M., & Sahabi, H. (2013). An Investigation on Trends of Annual and Seasonal Rainfall and Temperature in Different Climatological Regions of Iran. Journal of Range and Watershed Management, 66(1), 1-16. https://doi.org/10.22059/jrwm.2013.35324 [in Persian]

Bahak, B. (2018). Spatial Analysis of Dust Occurrence Process in Sistan and Baluchistan Province Using Statistical Methods. Geography (Regional Planning), 8(31): 97-109. https://doi.org/20.1001.1.22286462.1397.8.3.28.9 [in Persian]

Rahim-Begi, N., Zarrin, A., Modfidi, A., & Dadashi-Roudbari, A. (2022). Seasonal Distribution Analysis of Extreme Precipitation in Iran using AgERA5 dataset. Iranian Journal of Soil and Water Research, 52(11), 2723-2737. https://doi.org/10.22059/IJSWR.2021.333263.669118 [in Persian]

Sadeghinia, A., & Rafati, S. M. (2022). Spatial analysis of climate change in Iran. Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards, 8 (4), 55-70. https://doi.org/10.52547/jsaeh.8.4.55 [in Persian]

References (in English)

Kendall, M. G. (1975). Rank correlation measures. Charles Griffin.

Liang, H., Jianbin, G., Wenbin, Y., Qunou, J., Lin, C., & Kexin, T. (2023). Multifaceted responses of vegetation to average and extreme climate change over global drylands. Science of the Total Environment, 858(Pt 2), 159942. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159942

Mann, H. B. (1945). Nonparametric tests against trend. Econometrica: Journal of the Econometric Society, 13(3), 245–259. https://doi.org/10.2307/1907187.

مخاطرات محیط طبیعی
شاپا چاپی: ۴۳۷۷-۲۶۷۶ شاپا الکترونیکی: ۴۳۸۵-۲۶۷۶
Homepage: https://jneh.usb.ac.ir

مجله علمی پژوهشی مخاطرات محیط طبیعی، دوره ۱۵، شماره ۴۷، شماره پیاپی ۱، فروردین ۱۴۰۵

بررسی اثر فرین‌های دما و بارش بر روند تغییرات روزهای همراه با گردوخاک در جنوب‌شرق ایران

مائده نصری[۱]، محمد رحیمی[۲*]، فرشته طریقت[۳]، هادی جلیلی[۴]، علی‌اکبر دماوندی[۵]

۱. دانش‌آموخته دکتری مدیریت و کنترل بیابان، دانشکده کویرشناسی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران
۲. استاد، دانشکده کویرشناسی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران (**نویسنده مسئول**)
ایمیل: mrahimi@semnan.ac.ir *ORCID:* https://orcid.org/0000-0001-6405-8488
۳. کارشناس ارشد سنجش از دور، مرکز تحقیقات پژوهشگاه فضایی ایران، تهران، ایران
۴. استادیار، مرکز تحقیقات پژوهشگاه فضایی ایران، تهران، ایران
۵. استادیار، موسسه آموزش و ترویج کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران. ایران

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۰۶
تاریخ ویرایش: ۱۴۰۳/۱۲/۲۰
تاریخ پذیرش : ۱۴۰۴/۰۱/۲۳
تاریخ انتشار : ۱۴۰۵/۰۱/۰۱

واژه‌های کلیدی:
آزمون من-کندال، شبکه عصبی پرسپترون، تغییرات اقلیمی، فرسایش بادی، وقایع فرین.

چکیده

در این مطالعه، اثر مقادیر فرین دما و بارش بر روند تغییرات روزهای همراه با گردوخاک در جنوب-شرق ایران بررسی شد. از داده‌های روزانه دما و بارندگی ایستگاه‌های منطقه مورد مطالعه در یک بازه زمانی ۲۱ ساله از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ برای محاسبه نمایه‌های فرین استفاده شد. محاسبات در محیط نرم‌افزار RclimDex انجام شد. از روش شبکه عصبی پرسپترون چندلایه برای بررسی تاثیر اهمیت فرین‌های دما و بارش بر روی روند تغییرات روزهای همراه با گردوخاک در جنوب‌شرق ایران استفاده شد. همچنین، از آزمون من - کندال و رگرسیون خطی برای بررسی روند تغییرات متغیرهای مورد مطالعه استفاده شد. نتایج نشان داد روند تغییرات روزهای همراه با گردوخاک در ایستگاه‌های رودان، سراوان، ایرانشهر، زابل، بندرعباس، بم و خاش نزولی و معنادار بود. همچنین، ایستگاه‌های زابل و بندرعباس به‌ترتیب با میانگین سالانه ۱۷۱ و ۹۳ روز طی دوره زمانی مورد مطالعه بیشترین روزهای همراه با گردوخاک را ثبت کرده‌اند. نتایج مدل شبکه عصبی پرسپترون نشان داد نمایه‌های فرین بارش R10،CDD و R20 و نمایه‌های فرین دما SU25، DTR و TXn بیشترین همبستگی را با روند تغییرات طوفان‌های گردوخاک در منطقه مورد مطالعه دارد. مناطق گرم و خشک مانند جنوب شرق ایران به‌دلیل تغییرات اقلیمی و مدیریت ناپایدار در معرض تهدید فرسایش بادی و در نتیجه وقوع طوفان‌های گردوخاک قرار دارد. درک تأثیر تغییرات اقلیمی برای طراحی گزینه‌های سازگاری با تغییرات اقلیمی و کنترل طوفان‌های گردوخاک مهم است.

استناد: نصری, مائده , رحیمی, محمد , طریقت, فرشته , جلیلی, هادی و دماوندی, علی اکبر . (۱۴۰۵). بررسی اثر فرین‌های دما و بارش بر روند تغییرات روزهای همراه با گرد و خاک در جنوب‌شرق ایران. *مخاطرات محیط طبیعی*, ۱۵(۴۷), ۱۱۷-۱۳۲.

© نویسنده/ نویسندگان
ناشر: دانشگاه سیستان و بلوچستان
DOI: 10.22111/jneh.2025.50917.2100

مقدمه

متن گرمایش زمین از دلایل اصلی تغییر در شدت و فراوانی وقوع فرین‌های دما و بارش است (ادوارد و همکاران[۱]، ۲۰۱۹). وقوع سیل، خشکسالی، دماهای بالا و غیره از جمله شناخته‌شده‌ترین فرین‌های اقلیمی می‌باشند (لیانگ و همکاران[۲]، ۲۰۲۳). اختلال در عملکردهای محیط‌زیست ناشی از وقوع فرین‌های اقلیمی بر روی منابع آبی، خاک و پوشش‌گیاهی مناطق مختلف اقلیمی موثر است و در مناطق با اقلیم گرم و خشک برآیند این تغییرات شدت و فراوانی وقوع طوفان‌های گردوخاک را افزایش یا کاهش می‌دهد. هرچند وقوع طوفان‌های گردوخاک پدیده‌ای دائمی و طبیعی در محیط‌های با اقلیم گرم و خشک است (چپانسکی[۳]، ۲۰۱۸، باقرآبادی، ۱۴۰۰) اما روند تغییرات شدت و فراوانی این طوفان‌ها برای جوامع ساکن در این محیط‌ها اهمیت دارد (زوکا و همکاران[۴]، ۲۰۱۹). منطقه جنوب‌شرق ایران یکی از فعال‌ترین منابع طوفان گردوخاک در آسیا است و طوفان‌های گردوخاک در این منطقه تقریبا در تمام طول سال رخ می‌دهد؛ اما فراوانی آنها در فصول بهار و تابستان که همزمان با زمان وزش بادهای ۱۲۰ روزه است بیشتر است (باهک، ۱۳۹۷). سالانه وقوع پدیده گردوخاک در جنوب‌شرق ایران آسیب‌های جدی به جوامع محلی و زیرساخت‌های موجود وارد کرده است (رستمی و حسینی، ۱۳۹۷). محدوده مطالعاتی حاضر، بخش‌هایی از استان‌های سیستان و بلوچستان، کرمان و هرمزگان در جنوب‌شرق ایران را شامل می‌شود. مناطق شرقی استان هرمزگان، تالاب جازموریان، شرق استان سیستان و بلوچستان از مهم‌ترین کانون‌های تولید گردوخاک داخلی ایران هستند (دمی‌زاده و همکاران، ۱۴۰۰). همان‌طورکه پیش‌تر نیز اشاره شد، از جمله عوامل موثر بر طوفان‌های گردوخاک، تغییر در فراوانی و شدت فرین‌های دما و بارش است (هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم[۵]، ۲۰۲۲). فرین‌های دما و بارش بر روی ویژگی‌های پوشش‌گیاهی و خاک اثرگذار هستند (کارولینا و وولینکا[۶]، ۲۰۲۳؛ مانینگ و همکاران[۷]، ۲۰۱۹) و از این طریق فرسایش‌پذیری خاک را کنترل می‌کنند. به‌طورمثال، موثرترین اثر فرین‌های دما، تغییرات شدید دما و تشدید دوره‌های خشکسالی‌ها است (وانگ و همکاران[۸]، ۲۰۲۲). وقوع دوره‌ای خشکسالی همزمان با وقوع فرین‌های دمایی با افزایش فرایندهای فرسایشی تشدید شونده، رسوب‌گذاری، کاهش میزان و تنوع پوشش‌گیاهی و پایداری ساختار خاک همراه است (وانگ و همکاران، ۲۰۲۲). دوره‌های خشکسالی طولانی‌مدت شرایط خشک‌تر شدن خاک را در برابر شرایط خشک متناوب کوتاه‌مدت که همراه با روزهای مرطوب باشند، فراهم می‌کند. بعلاوه، فرین‌های دمایی بالا میزان تبخیر و تعرق را افزایش می‌دهد و می‌تواند خشکی خاک را تشدید کند (سو و همکاران[۹]، ۲۰۲۳). کمبود بارش نیز می‌تواند خشکسالی رطوبتی خاک را طولانی‌تر کند؛ زیرا مقادیر بیشتری بارش نیاز است تا شرایط به حالت متعادل باز گردد. بعلاوه، وقوع هم‌زمان دماهای فرین بالا و خشکسالی اثرات شدیدتری را در مقایسه با زمانی که هریک به تنهایی رخ می‌دهند دارد (مانینگ و همکاران[۱۰]، ۲۰۱۹). از طرفی وقوع فرین‌های بارش از دلایل اصلی وقوع سیلاب است و سواحل مکران و جنوب‌شرق سومین کانون بیشینه شدت بارش‌های فرین در ایران طی فصل تابستان

[1] Edwards
[2] Liang
[3] Schepanski
[4] Zucca
[5] IPCC
[6] Karolina and Wolińska
[7] Manning
[8] Wang
[9] Su
[10] Manning

است (رحیم‌بیگی و همکاران، ۱۴۰۰). بارش‌های فرین به‌صورت ناگهانی و کوتاه‌مدت رخ می‌دهند و اغلب زمینه‌ساز فرسایش شدید آبی هستند (جهان‌بخش و همکاران، ۱۳۹۹) که در نهایت با بر جای گذاشتن رسوبات ریزدانه و با گذشت از دوره‌های مرطوب و شروع دوره‌های خشک می‌تواند منابع برداشت فرسایش بادی را فراهم کند (نا و همکاران[1]، ۲۰۲۰).

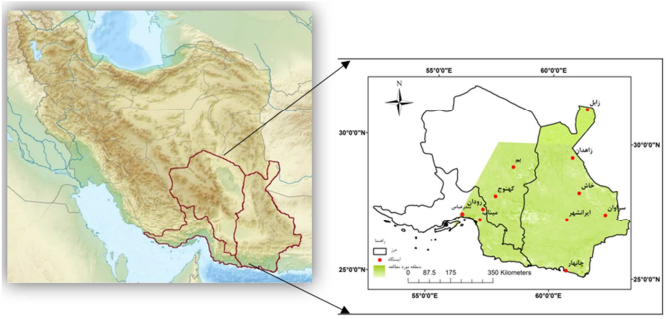
مطالعات مختلفی در این زمینه در ایران و سایر مناطق جهان انجام شده است. نتایج مطالعه پراکنش فصلی بارش‌های فرین در ایران نشان داد بیشینه نمایه Rx1 به مقدار ۸۰ میلی‌متر در فصل زمستان رخ داده است. بیشینه نمایه SDII با مقدار ۱۹/۲ میلی‌متر نیز در فصل تابستان مشاهده شد. درحالی که بیشینه روزهای همراه با بارش سنگین در تمامی فصول در سواحل خزری دیده شد (رحیم بیگی و همکاران، ۱۴۰۰). تحلیل فضایی تغییرات اقلیمی در ایران نشان‌داد بین عامل ارتفاع، شیب و روند نمایه‌های فرین گرم همبستگی معکوس وجود دارد. بنابراین با کاهش ارتفاع و شیب، روند فرین‌های گرم افزایش می‌یابد و ایستگاه‌های نواحی پست‌تر تغییرات اقلیمی شدیدتری را تجربه می‌کنند (صادقی‌نیا و همکاران، ۱۴۰۰). همچنین، بررسی روند تغییرات اقلیمی با استفاده از نمایه‌های فرین بارش و دما در جنوب‌شرق ایران طی دوره زمانی ۲۰۱۵-۱۹۶۶ نشان داد، روند افزایشی و غیرمعنی‌دار در بیشینه حداکثر دمای روزانه و دمای کمینه روزانه وجود دارد (علوی‌نیا و زارعی، ۱۴۰۰). بررسی روند تغییرات بارش در جنوب‌شرق ایران نیز نشان داد روند بارش در منطقه جنوب‌شرق ایران شامل استان‌های کرمان و سیستان و بلوچستان طی دوره زمانی ۱۹۸۱ تا ۲۰۲۰ در مقیاس‌های ماهانه، فصلی و سالانه افزایشی بوده است (میان‌آبادی و همکاران، ۱۴۰۱). حداقل و حداکثر نمایه‌های روزهای گرم در بیشتر مناطق ایران نیز دارای روند افزایشی بوده است (فتحیان و همکاران، ۱۴۰۱). هدف اصلی این مطالعه، بررسی اثر تغییرات فرین‌های دما و بارش بر روی روند تغییرات طوفان‌های گردوخاک در منطقه جنوب‌شرق ایران است. همچنین، لزوم برنامه‌ریزی برای سازگاری و افزایش تاب‌آوری در برابر چالش‌های پیش روی کشور ناشی از تاثیر فرین‌های دما و بارندگی بر روند تغییرات طوفان‌های گردوخاک، ضرورت اصلی این مطالعه است. فرضیه اصلی این مطالعه این است که طی دوره زمانی از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ تغییرات روزهای همراه با گردوخاک در جنوب روندی افزایشی داشته است.

داده‌ها و روش‌ها

ویژگی منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در جنوب‌شرقی ایران می‌باشد (شکل ۱). این منطقه در مجموع بخش‌هایی از سه استان کرمان، هرمزگان و سیستان و بلوچستان است. کل مساحت منطقه مورد مطالعه برابر با ۷۷۶ کیلومتر مربع است. به‌طورکلی، متوسط بارش مناطق جنوب‌شرق ایران ۲۱۶ میلی‌متر می‌باشد که بیشترین مقدار مربوط به استان هرمزگان با ۳۲۶ میلی‌متر و کمترین مقدار مربوط به استان‌های کرمان و سیستان و بلوچستان به‌ترتیب با میزان ۱۳۶ و ۱۰۳ میلی‌متر است. میانگین دمای سالانه استان‌های سیستان و بلوچستان، هرمزگان و کرمان به‌ترتیب برابر با ۲۲، ۲۷ و ۲۴ درجه سلسیوس است.

[1] Na



شکل ۱ : موقعیت منطقه مورد مطالعه

داده‌های منطقه مورد مطالعه

ایستگاه‌های هواشناسی سینوپتیک انتخاب‌شده در جنوب‌شرقی ایران با طول دوره آماری ۲۰ ساله در جدول ۱ نمایش داده شده است.

جدول۱: مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی مورد مطالعه

	نام ایستگاه	استان	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	دوره آماری
۱	بم	کرمان	۵۸/۴	۲۹/۱	۲۰۰۰ -۲۰۲۰
۲	کهنوج		۵۷/۷	۲۸	۲۰۰۰ -۲۰۲۰
۳	میناب	هرمزگان	۵۷/۱	۲۷/۱	۲۰۰۰ -۲۰۲۰
۴	رودان		۵۷/۲	۲۷/۵	۲۰۰۳-۲۰۲۰
۵	بندرعباس		۵۶/۴	۲۷/۲	۲۰۰۰ -۲۰۲۰
۶	چابهار	سیستان و بلوچستان	۶۰/۷	۲۵/۳	۲۰۰۰ -۲۰۲۰
۷	ایرانشهر		۶۰/۷	۲۷/۲	۲۰۰۰ -۲۰۲۰
۸	خاش		۶۱/۲	۲۸/۲	۲۰۰۰ -۲۰۲۰
۹	سراوان		۶۲/۳	۲۷/۴	۲۰۰۰ -۲۰۲۰
۱۰	زابل		۶۱/۵	۳۱/۱	۲۰۰۰ -۲۰۲۰
۱۱	زاهدان		۶۰/۹	۲۹/۵	۲۰۰۰-۲۰۲۰

نمایه‌های فرین اقلیمی

نمایه‌های فرین دما و بارش با استفاده از داده‌های دما و بارندگی روزانه ایستگاه‌های منطقه مورد مطالعه در یک بازه زمانی ۲۰ ساله از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ با کمک نرم‌افزار RclimDex محاسبه شد (فتحیان و همکاران، ۱۴۰۱). نمایه‌های فرین دما و بارش انتخاب‌شده برای این مطالعه شامل ۸ نمایه فرین بارش و ۶ نمایه فرین دما می‌باشد که در جدول ۲ و ۳ نمایش داده شده است.

جدول ۲: فهرست نمایه‌های فرین دما انتخاب‌شده

	فرین دما	تعریف به فارسی	واحد اندازه‌گیری
۱	SU25	تعداد روزهای تابستانی (دمای حداکثر روزانه ۲۴ درجه)	روز
۲	TXx	بیشینه ماهانه دمای حداکثر روزانه	°C
۳	TXn	کمینه ماهانه دمای حداکثر روزانه	°C
۴	TX90p	روزهای گرم، درصد روزهای که دمای حداکثر بیشتر از صدک نودم باشد	روز
۵	WSDI	نمایه طول مدت گرما، تعداد روزهایی که حداقل شش روز متوالی دمای حداکثر آنها بیشتر از صدک نودم باشد	روز
۶	DTR	دامنه تغییرات شبانه روزی دما	°C

جدول ۳: فهرست نمایه‌های فرین بارش انتخاب‌شده

	فرین بارش	تعریف به فارسی	واحد اندازه‌گیری
۱	Rx1	حداکثر بارش یک روزه	mm
۲	Rx5	حداکثر بارش ۵ روزه، میزان بارش ماهانه پنج روز متوالی	mm
۳	SDII	نمایه ساده شدت روزانه	mm
۴	R10	تعداد روزهای با بارش سنگین	روز
۵	R20	تعداد روزهای با بارش خیلی سنگین	روز
۶	CDD	حداکثر طول دوره خشک	روز
۷	CWD	حداکثر طول دوره مرطوب	روز
۸	PRCPTOT	کل بارش سالانه در روزهای مرطوب	mm

روزهای همراه با گردوخاک

در این مطالعه از متغیر روزهای همراه با گردوخاک استفاده شد. همچنین از داده‌های دید افقی و کدهای هواشناسی گردوخاک برای تفکیک روزهای همراه با گردوخاک با منشا داخلی استفاده شد که در جدول ۴ نمایش داده شده است.

جدول ۴ : کدهای هواشناسی گردوخاک (سازمان جهانی هواشناسی) استفاده‌شده در این مطالعه

کد هواشناسی	تعریف
۰۷	گردوخاک برخواسته
۰۸	گردوخاک‌های تکامل‌یافته که در زمان دیدبانی یا طی یک ساعت گذشته در ایستگاه و یا اطراف آن مشاهده شده است.
۰۹	توفان گردوخاک یا شن که در ساعت دیدبانی در اطراف ایستگاه وجود داشته یا در ساعت گذشته در خود ایستگاه وجود داشته است.
۳۰	گردوخاک خفیف یا متوسط شن و ماسه همراه با کاهش میدان دید کمتر از ۱۰۰۰ متر اما بیشتر از ۲۰۰ متر.
۳۱	گردوخاک پایدار یا متوسط شن و ماسه همراه با کاهش میدان دید کمتر از ۱۰۰۰ متر اما بیشتر از ۲۰۰ متر.
۳۲	شروع یا افزایش گردوخاک خفیف یا متوسط شن و ماسه همراه با کاهش میدان دید کمتر از ۱۰۰۰ متر اما بیشتر از ۲۰۰ متر.
۳۳	توفان گردوخاک شدید همراه با کاهش دید کمتر از ۲۰۰ متر.
۳۴	توفان گردوخاک پایدار شدید همراه با کاهش دید کمتر از ۲۰۰ متر.
۳۵	شروع یا افزایش توفان گردوخاک شدید همراه با کاهش دید کمتر از ۲۰۰ متر.
۹۸	رعد و برق با گردوخاک و یا توفان شن و ماسه.

روش کار

از روش شبکه عصبی پرسپترون چندلایه، برای تشخیص موثرترین شاخص‌های حدی دما و بارش بر تغییرات روزهای همراه با گردوغبار استفاده شد. هدف از طراحی مدل پرسپترون چند لایه، حل مسائل غیرخطی است. این مدل به‌عنوان یکی از انواع مدل‌های شبکه عصبی از چند لایه نورون متصل به هم تشکیل شده است که شامل لایه ورودی، پنهان و خروجی می‌باشد (جورابیان و همکاران، ۱۳۹۸). یافتن ارتباط منطقی بین داده‌ها شبیه‌سازی احتمال وقوع پدیده‌ها را امکان‌پذیر می‌کند. هر شبکه عصبی از سه مولفه اصلی شامل وزن (W)، اریب (Bias) و تابع انتقال (F) تشکیل شده است (نجیب‌زاده و همکاران، ۱۳۹۸). طراحی شبکه عصبی در محیط نرم‌افزار SPSS انجام شد. در این مطالعه پس از برازش شبکه‌های مختلف، شبکه‌ای که کمترین مربعات خطا را بر روی داده‌های آزمون داشت به‌عنوان شبکه نهایی انتخاب می‌شود.

پس از مشخص شدن نتایج مربوط به تعیین مهم‌ترین حدی‌های دما و بارش تاثیرگذار بر روی روند تغییرات روزهای همراه با گردوخاک، برای بررسی معنی‌داری و جهت روند تغییرات این شاخص‌ها در منطقه مورد مطالعه از آزمون من-کندال (کندال[1]، ۱۹۷۵، من[2]، ۱۹۴۵) استفاده شد. مقادیر منفی و مثبت آماره من - کندال (Z) به‌ترتیب بیانگر روند کاهشی و افزایشی در سری داده‌ها است. با توجه به سطح اطمینان ۹۵ درصد اگر |Z|>۱/۹۶ باشد، فرض صفر مبنی بر عدم وجود روند در سری زمانی رد می‌شود و وجود روند در سری زمانی داده‌ها پذیرفته می‌شود.

همچنین، روند تغییرات سالانه روزهای همراه با گردوخاک به کمک رسم نمودار و برازش خط رگرسیون نمایش داده شد (آذرخشی و همکاران، ۱۳۹۲).

نتایج و بحث

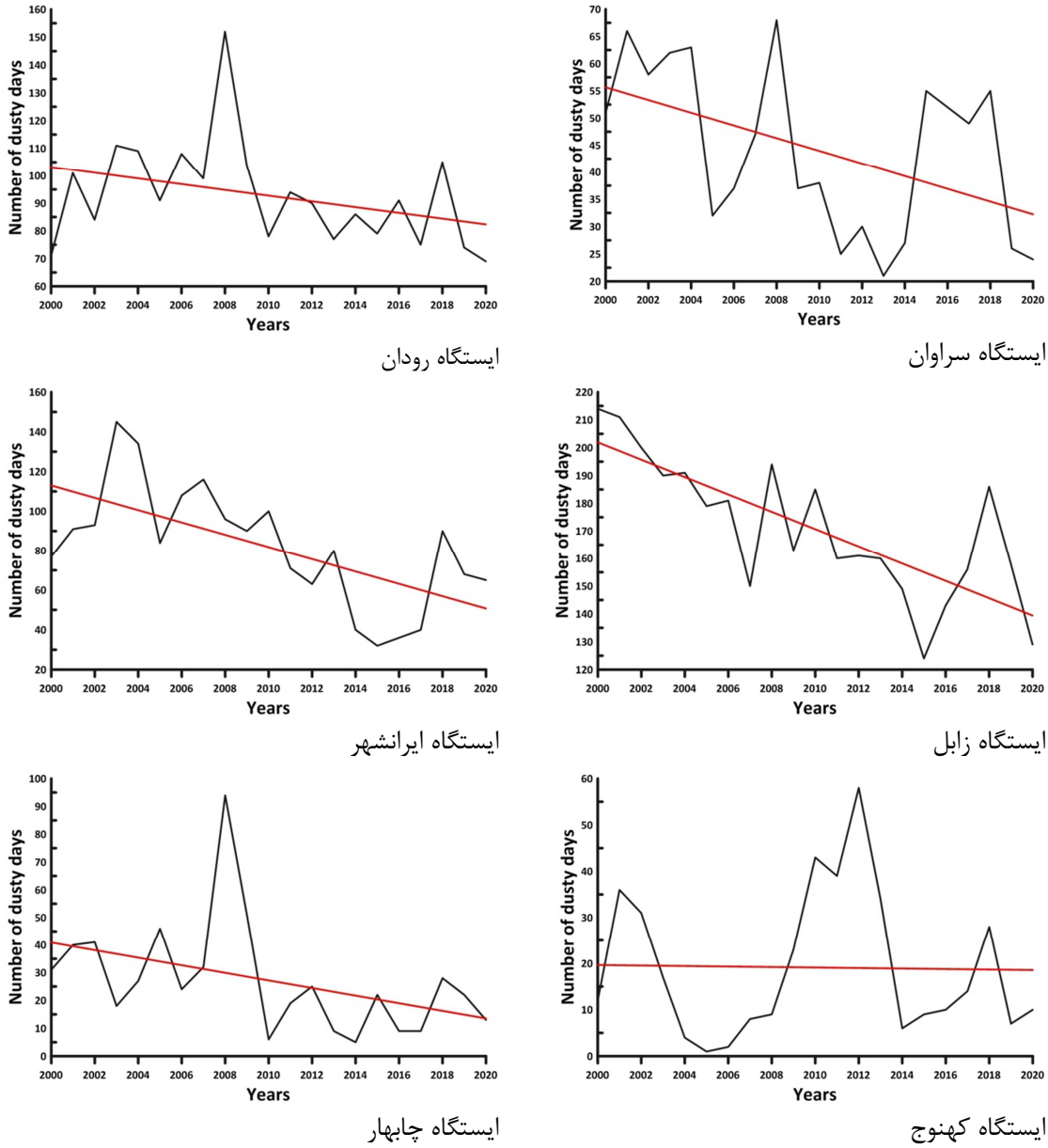
روند تغییرات سالانه روزهای همراه با گردوخاک در ایستگاه‌های میناب و کهنوج ثابت بود و در ایستگاه‌های رودان، سراوان، ایرانشهر، زابل، زاهدان، بندرعباس، بم، خاش و چابهار روند تغییرات نزولی بود و تنها در ایستگاه‌های رودان، سراوان، ایرانشهر، زابل، بندرعباس، بم و خاش معنادار بود (سطح معنی‌داری کمتر از ۰/۰۵) (شکل ۲). مقدار شیب، جذر میانگین مربعات و P- value محاسبه‌شده از برازش خط رگرسیونی بر داده‌ها در هر ایستگاه در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول ۵: خلاصه آزمون رگرسیون خطی بر متغیر روزهای همراه با گردوخاک

ایستگاه	معادله شیب خط	جذر میانگین مربعات	P- value
ایستگاه رودان	Y = -2/2 * X + 4617	۰/۶	۰/۰۰۶
ایستگاه سراوان	Y = -1.1 * X + 2398.5	۰/۴۷	۰/۰۳
ایستگاه ایرانشهر	Y = Y = -3.1 * X + 6344.1	۰/۶۳	۰/۰۰۱
ایستگاه زابل	Y = -3.1 * X + 6453.8	۰/۷۷	کم تر از ۰/۰۰۰۱
ایستگاه چابهار	Y = -1.36 * X + 2773.3	۰/۴۲	۰/۰۵
ایستگاه کهنوج	Y = -0.05 * X + 128.7	۰/۰۲۱	۰/۹
ایستگاه بندرعباس	Y = -3.19 * X + 6514.1	۰/۴۵	۰/۰۳
ایستگاه بم	Y = -3.27 * X + 6617.1	۰/۷۶	کم تر از ۰/۰۰۰۱
ایستگاه خاش	Y = -3.61 * X + 7324. 1	۰/۷۸	کم تر از ۰/۰۰۰۱
ایستگاه میناب	Y = -0.049 * X + 113.5	۰/۰۳	۰/۸۷
ایستگاه زاهدان	Y = -1.04 * X + 2188.2	۰/۳۴	۰/۱۳
معنی‌داری در سطح ۰/۰۵			

نتایج همچنین نشان داد ایستگاه زابل و بندرعباس به‌ترتیب با میانگین سالانه ۱۷۱ و ۹۳ روز طی دوره زمانی از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ بیشترین روزهای همراه با گردوخاک را ثبت کرده‌اند (شکل ۲). کمترین میانگین روزهای همراه با گردوخاک نیز برابر با ۱۵ روز مربوط به ایستگاه میناب بود. سال‌های ۲۰۰۳، ۲۰۰۸ و۲۰۱۲ سال‌های با بیشترین تعداد روزهای همراه با گردوخاک و سال‌های ۲۰۱۷ و ۲۰۲۰ سال‌های با کمترین روزهای همراه با گردوخاک می‌باشد.

1 Kendall
2 Mann



شکل ۲: روند تغییرات سالانه روزهای همراه با گردوخاک در ایستگاه‌های منطقه مورد مطالعه طی دوره زمانی ۲۰۲۰-۲۰۰۰

نتایج ارتباط بین فرین‌های بارش با روزهای همراه با گردوخاک

اطلاعات مربوط به شبکه عصبی برازش داده‌شده به نمایه‌های فرین بارش در جدول ۶ نشان داده شده است. ۷۰ درصد داده‌های واردشده به مدل پرسپترون چندلایه در گروه نمونه آموزشی و ۳۰ درصد داده‌های واردشده در گروه نمونه آزمایشی قرار گرفت. متغیرهای مستقل واردشده به مدل شامل نمایه‌های فرین بارش Rx1، Rx5، SDII، R10، R20، CDD، CWD و PRCPTOT می‌باشد. متغیر وابسته روزهای همراه با گردوخاک است. پس از آزمون و خطا و برازش مدل‌های مختلف، در نهایت شبکه‌ای با تابع فعال ورودی هایپربولیک تانژانت و خروجی سیگموئیدی با

۱ لایه پنهان و ۶ نورون و همچنین مجموع مربعات خطا کمتر (۰/۵۱) در مورد نمونه آموزشی به‌عنوان شبکه مطلوب انتخاب شد. بررسی نتیجه اهمیت نمایه‌های فرین بارش موثر بر طوفان‌های گردوخاک در منطقه مورد مطالعه نشان داد، نمایه‌های CDD، R10 و R20 بیشترین همبستگی را با روند تغییرات طوفان‌های گردوخاک دارد.

جدول ۶- اطلاعات مدل شبکه عصبی برازش داده‌شده به نمایه‌های فرین بارش

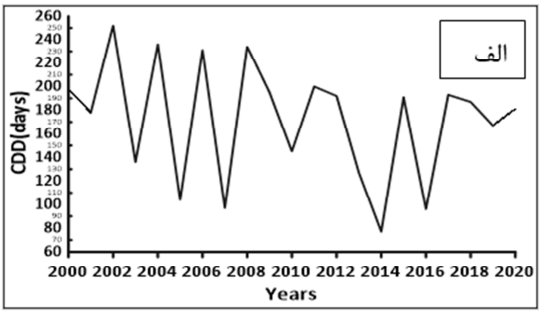
مدل/نمایه			R20	RX1	RX5	SDII	R10	CDD	CWD	PRCPTOT
۱	اهمیت نرمال-شده(٪)	-	۴۸	۲۸/۵	۴۰/۳	۷/۲	۱۹/۵	۱۰۰	۱۴	۸
	اهمیت	-	۰/۲۹	۰/۱۵	۰/۱۲	۰/۰۲۲	۰/۲۱	۰/۳	۰/۳	۰/۰۲۷
	مجموع مربعات خطا آموزش	۰/۷۱	تابع ورودی			تابع خروجی		لایه پنهان -- نورون		
	مجموع مربعات خطا آزمایش	۰/۳۱	هایپربولیک			سیگموئیری		۶-۱		

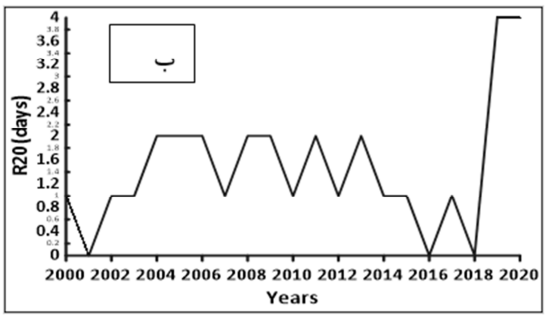
بررسی معنی‌داری و جهت روند تغییرات نمایه CDD با استفاده از آزمون من - کندال نشان داد، روند تغییرات این نمایه نزولی و معنی‌دار است (مقدار Z برابر با ۱/۹۷-). روند تغییرات نمایه‌های R10 و R20 نیز صعودی بود، اما معنی‌دار نبود (Z به‌ترتیب برابر با ۱/۷۲ و ۰/۸۲).

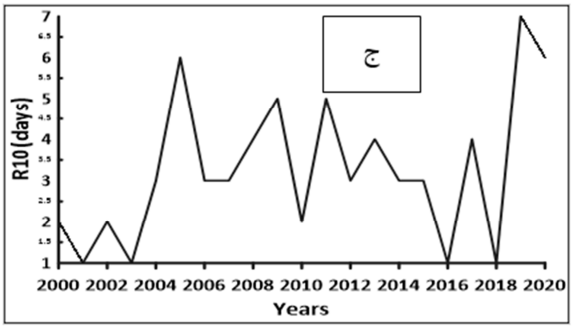
بیشترین و کمترین مقادیر نمایه CDD در سال‌های ۲۰۰۲ و ۲۰۱۴ به‌ترتیب برابر با ۲۵۲ و ۷۷ روز مشاهد شد (شکل ۳ الف). همچنین، در بین ایستگاه‌های مختلف منطقه مورد مطالعه، ایستگاه ایرانشهر بیشترین و ایستگاه رودان کمترین مقادیر نمایه CDD را ثبت کرده‌اند.

بیشترین مقادیر نمایه R20 به‌ترتیب در سال‌های ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰ برابر با ۴ روز مشاهده شد. در مقابل کمترین مقادیر نمایه R20 در سال‌های ۲۰۰۱، ۲۰۱۶ و ۲۰۱۸ برابر با ۰ مشاهده شد (شکل۳ ب). همچنین، در بین ایستگاه‌های مختلف منطقه مورد مطالعه، ایستگاه‌های بم، زابل و زاهدان کمترین و ایستگاه رودان بیشترین مقادیر نمایه R20 را ثبت کرده‌اند.

بیشترین مقادیر نمایه R10 در سال ۲۰۱۹ برابر با ۷ روز مشاهده شد. در مقابل کمترین مقادیر نمایه R10 در سال-های ۲۰۰۱، ۲۰۰۳، ۲۰۱۶ و ۲۰۱۸ برابر با ۱ روز مشاهده شد (شکل ۳ ج). همچنین، در بین ایستگاه‌های مختلف منطقه مورد مطالعه نیز ایستگاه رودان بیشترین و ایستگاه‌های بم و زابل کمترین مقادیر نمایه R10 ثبت شده است.







شکل ۳: روند تغییرات سالانه نمایه‌های فرین بارش (طی دوره زمانی ۲۰۰۰-۲۰۲۰) در ایستگاه‌های مختلف منطقه مورد مطالعه. شکل (الف) روند تغییرات نمایه CDD، (ب) روند تغییرات نمایه R20، (ج) روند تغییرات نمایه R10

نتایج ارتباط فرین‌های دما با روزهای همراه با گردوخاک

اطلاعات مربوط به شبکه عصبی برازش‌داده‌شده به نمایه‌های فرین بارش در جدول ۷ نشان داده شده است. ۷۰ درصد داده‌های واردشده به مدل پرسپترون چندلایه در گروه نمونه آموزشی و ۳۰ درصد داده‌های واردشده در گروه نمونه آزمایشی قرار گرفت. متغیرهای مستقل واردشده به مدل شامل نمایه‌های فرین دما SDII، TXx، TXn، TX90p ، WSDI و DTR می‌باشد. متغیر وابسته روزهای همراه با گردوخاک است. پس از آزمون و خطا و برازش مدل‌های مختلف، در نهایت شبکه‌ای با تابع فعال ورودی هایپربولیک تانژانت و خروجی سیگموئیدی با ۱ لایه پنهان و ۵ نورون و همچنین، مجموع مربعات خطا کمتر (۰/۶۷) در مورد نمونه آموزشی به‌عنوان شبکه مطلوب انتخاب شد. بررسی نتیجه اهمیت نمایه‌های فرین بارش موثر بر طوفان‌های گردوخاک در منطقه مورد مطالعه نشان داد، نمایه‌های SU25، DTR و TXn بیشترین همبستگی را با روند تغییرات طوفان‌های گردوخاک دارد.

جدول۷:اطلاعات مدل شبکه عصبی برازش‌داده‌شده به نمایه‌های فرین دما

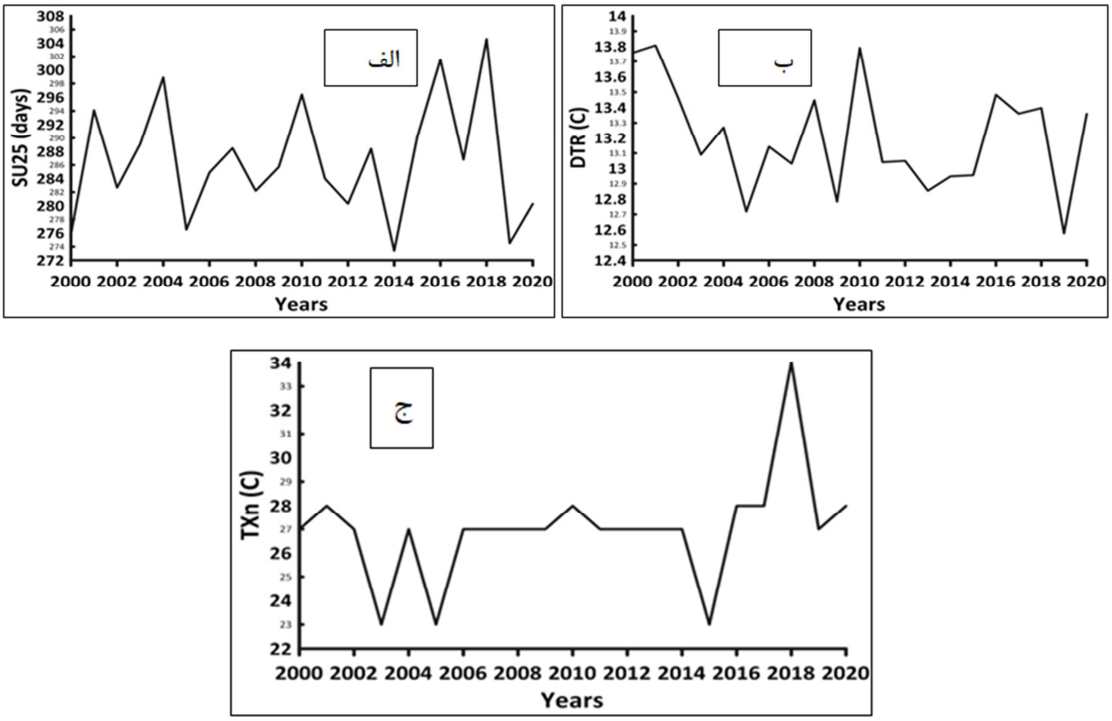
مدل/نمایه			SU25	TXx	TXn	TX90p	DTR	WSDI
۱	اهمیت نرمال‌شده(٪)	-	۱۰۰	۵۱	۸۹	۲۵	۸۵	۳۸
	اهمیت	-	۰/۳۷	۰/۰۵	۰/۶۱	۰/۰۲۵	۰/۱۸	۰/۰۶۴
	مجموع مربعات خطا آموزش	۰/۶۷	تابع ورودی			تابع خروجی		لایه پنهان/نورون
	مجموع مربعات خطا آزمایش	۰/۴۵	سیگموئیدی			همانی		۵-۱

بررسی معنی‌داری و جهت روند تغییرات نمایه SU25 با استفاده از آزمون من - کندال نشان داد، روند تغییرات این نمایه نزولی و معنی‌دار است (مقدار Z برابر با ۲/۲۱-). روند تغییرات نمایه‌های DTR و TXn نیز معنی‌دار نبود (Z به‌ترتیب برابر با ۰/۰۹ و ۱/۷ است).

بیشترین و کمترین مقادیر نمایه SU25 در سال‌های ۲۰۱۸ و ۲۰۱۴ به‌ترتیب برابر با ۳۰۵ و ۲۷۳ روز مشاهد شد (شکل ۴ الف). همچنین، در بین ایستگاه‌های مختلف منطقه مورد مطالعه، ایستگاه چابهار بیشترین و ایستگاه خاش کمترین مقادیر نمایه SU25 را ثبت کرده‌اند.

بیشترین مقادیر نمایه DTR در سال ۲۰۰۱ برابر با ۱۳/۸۱ درجه سلسیوس مشاهده شد. در مقابل کمترین مقادیر نمایه DTR در سال ۲۰۱۹ برابر با ۱۲/۵۸ درجه سلسیوس مشاهده شد (شکل۴ ب). همچنین، در بین ایستگاه‌های مختلف منطقه مورد مطالعه، ایستگاه‌های خاش، زابل و سراوان بیشترین و ایستگاه چابهار کمترین مقادیر نمایه DTR را ثبت کرده‌اند.

بیشترین مقادیر نمایه TXn در سال ۲۰۱۸ برابر با ۲۹ درجه‌سلسیوس مشاهده شد. در مقابل کمترین مقادیر نمایه TXn در سال‌های۲۰۰۳، ۲۰۰۵ و ۲۰۱۵ برابر با ۲۶ درجه‌سلسیوس مشاهده شد (شکل ۳ ج). همچنین، در بین ایستگاه‌های مختلف منطقه مورد مطالعه، ایستگاه چابهار بیشترین و ایستگاه‌های بم، خاش و زابل کمترین مقادیر نمایه TXn ثبت شده است.



شکل ۴: روند تغییرات سالانه نمایه‌های فرین دما (طی دوره زمانی ۲۰۰۰-۲۰۲۰) در ایستگاه‌های مختلف منطقه مورد مطالعه. شکل (الف) روند تغییرات نمایه SU25، (ب) روند تغییرات نمایهDTR، (ج) روند تغییرات نمایه TXn

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، روند تغییرات روزهای همراه با گردوخاک در ایستگاه‌های رودان، سراوان، ایرانشهر، زابل، بندرعباس، بم و خاش نزولی و معنادار بود. خدام و همکاران (۱۳۹۸) طی بررسی شاخص طوفان گردوخاک در یک دوره ۳۰ ساله در استان سیستان و بلوچستان بیان می‌کند، طی ۱۵ سال اخیر روند تغییرات طوفان‌های گردوخاک به‌صورت معنی‌دار کاهش داشته است. نامداری و همکاران (۱۴۰۰) نیز در تحلیل تغییرات کانون‌های گردوخاک داخلی ایران در بیست سال اخیر نشان داد، در بسیاری از کانون‌های مرکزی، شرق و جنوب‌شرق ایران روند کاهشی داشته است.

محمودی و ایکیگایا (۲۰۲۳) در مطالعه خود به منظور بررسی پراکنش و فراوانی طوفان‌های گردوخاک در ایران بر اساس مشاهدات بلندمدت ۴۰۰ ایستگاه هواشناسی نشان داد، میانگین بالاترین آمار روزهای همراه با گردوخاک به‌ترتیب برابر با ۱۵۰، ۱۰۰ و ۳۰ روز در هر سال می‌باشد که مربوط به ایستگاه‌های جنوبی، شرقی و مرکزی ایران است. نتایج این مطالعه نشان داد ایستگاه زابل و بندرعباس به‌ترتیب با میانگین سالانه ۱۷۱ و ۹۳ روز طی دوره زمانی از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ بیشترین روزهای همراه با گردوخاک را ثبت کرده‌اند.

نتایج برازش مدل شبکه عصبی پرسپترون چندلایه نشان داد، نمایه‌های فرین بارش CDD، R10 و R20 بیشترین همبستگی را با روند تغییرات طوفان‌های گردوخاک دارد. تنها روند تغییرات نمایه CDD نزولی و معنی‌دار بود. نمایه CDD حداکثر طول دوره خشک را نشان می‌دهد. به‌عبارت‌دیگر، تعداد روزهای همراه با خشکی و بی‌بارشی در منطقه مورد مطالعه روند کاهشی داشت که می‌تواند بر روی فرآیندهای فرسایشی خاک تاثیر منفی داشته باشد. حلبیان و کیخسروی (۱۳۹۹) در مطالعه خود با هدف بررسی تغییرات نمایه‌های فرین بارش در ایران طی دوره زمانی ۲۰۱۶-۱۹۸۲نشان داد، روند تغییرات نمایه CDD کاهشی است که نتایج این مطالعه با نتایج آنها مشابه است. در ارتباط با روند تغییرات نمایه‌های R10 و R20 نیز صعودی بود، اما معنادار نبود.

همچنین، نتایج برازش مدل شبکه عصبی پرسپترون چندلایه نشان داد، نمایه‌های فرین دما SU25، DTR و TXn بیشترین همبستگی را در روند تغییرات طوفان‌های گردوخاک در منطقه مورد مطالعه دارد. روند تغییرات نمایه SU25 منفی و معنادار بود. نمایه SU25 تعداد روزهای با دمای حداکثر روزانه ۲۵ درجه سلسیوس را نشان می‌دهد. بنابراین، کاهش روند این نمایه می‌تواند تاثیر زیادی در کاهش روند وقوع طوفان‌های گردوخاک داشته باشد؛ زیرا دماهای بالا با افزایش تبخیر از سطح خاک و کاهش رطوبت خاک همراه است. سو و همکاران (۲۰۲۳) بیان می‌کند افزایش حدی‌های دمایی مانع رشد گیاهان می‌شود و کاهش رشد پوشش گیاهی می‌تواند بر روی فرآیندهای فرسایشی سطح زمین موثر باشد. تاجیک و اربابی سبزواری (۱۳۹۹) در مطالعه خود با هدف بررسی نمایه‌های حدی دمایی در سطح کشور نشان داد، ایستگاه‌های سواحل جنوبی ایران رتبه اول و مناطق جنوب‌شرق ایران رتبه دوم را از نظر بیشترین مقادیر نمایه SU25 دارند که با نتایج این مطالعه مشابه است. همچنین، نا و همکاران (۲۰۱۸) بیان می‌کند، تشدید رخدادهای حدی دمایی باعث افزایش تبخیر و تعرق از خاک می‌شود و به این ترتیب خاک رطوبت کافی ندارد.

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، می‌توان نتیجه گرفت وقوع حدی‌های دما و بارش بر وقوع طوفان‌های گردوخاک در منطقه مورد مطالعه موثر بوده است و روند تغییرات طوفان‌های گردوخاک در منطقه کاهشی بوده است که می‌تواند بخشی از آن به‌دلیل کاهش روزهای خشک و روزهای با دمای بالای ۲۵ درجه سلسیوس باشد. وقوع طوفان‌های گردوخاک با روزهای خشک و دماهای بالا رابطه مستقیم دارد؛ زیرا خشکی محیط میزان رطوبت خاک را کاهش می‌دهد و از این طریق به برداشت ذرات خاک توسط باد کمک می‌کند. وقوع حدی‌های دما و بارش به‌صورت همزمان رخ می‌دهند و می‌توانند بر یکدیگر اثر متقابل داشته باشند. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، فرضیه اصلی این مطالعه مبنی بر روند افزایشی تغییرات روزهای همراه با گردوخاک در دوره زمانی از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ رد می‌شود.

منابع

آذرخشی، مریم؛ فرزادمهر، جلیل؛ اصلاح، مهدی، صحابی، حسین. (۱۳۹۲). بررسی روند تغییرات سالانه و فصلی بارش و پارامترهای دما در مناطق مختلف آب‌وهوایی ایران، نشریه علمی - پژوهشی مرتع و آبخیزداری، دوره ۶۶، شماره ۱، صص: ۱-۱۶.

باقرآبادی، رسول. (۱۴۰۰). تجزیه‌وتحلیل روند تغییرات گردوغبار و ارتباط آن با شاخص (SPI) مطالعه موردی: شهر اهواز، مجله جغرافیا و روابط انسانی، سال ۴، شماره ۳، صص: ۲۳۷-۲۲۴.

باهک، بتول. (۱۳۹۷). تحلیل فضایی روند وقوع پدیده گردوغبار در استان سیستان و بلوچستان با روش‌های آماری، فصلنامه جغرافیا (برنامه‌ریزی منطقه‌ای)، سال ۸، شماره ۳۱، صص: ۹۷-۱۰۹.

حلبیان، امیرحسین؛ کیخسروی کیانی، محمدصادق. (۱۳۹۹). ارزیابی تغییرات نمایه‌های فرین بارش در ایران، مجله برنامه‌ریزی فضایی، سال ۱۰، شماره ۴، صص: ۲۴-۴۵.

خدام، نوشین؛ تاجبخش، سحر؛ علی‌اکبری بیدختی، عباسعلی؛ صحت کاشانی، ساویز؛ رنجبرسعادت آبادی، عباس. (۱۳۹۹). اقلیم‌شناسی رخدادهای توفان گردوخاک در فصل تابستان در استان سیستان و بلوچستان در دوره ۳۰ ساله (۲۰۱۶-۱۹۸۷)، پژوهش‌های اقلیم‌شناسی، سال ۵، شماره ۴۰، صص: ۸۱-۸۹.

جهانبخش اصل، سعید؛ ساری صراف، بهروز؛ عساکره، حسین؛ شیرمحمدی، سهیلا. (۱۳۹۹). واکاوی تغییرات زمانی – مکانی بارش‌های بحرانی (فرین بالا) در غرب ایران طی سال های ۲۰۱۶ – ۱۹۶۵، تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، سال ۱، شماره ۷، صص: ۸۹-۱۰۶.

جورابیان شوشتری، شریف؛ اسماعیلی ساری، عباس؛ حسینی، سید محسن؛ غلامعلی فرد، مهدی. (۱۳۹۸). کاربرد روش پرسپترون چندلایهٔ شبکهٔ عصبی مصنوعی در مدل‌سازی تغییرات کاربری اراضی شرق استان مازندران، جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، دوره ۴، شماره ۲۹، صص: ۱۲۵-۱۴۴.

دمی‌زاده، محمود؛ میری، مرتضی؛ زند، مهران. (۱۴۰۰). شناسایی کانون‌های داخلی برداشت گردوغبار و مسیرهای انتقال آن در استان هرمزگان (مطالعه موردی: منطقه کوهستک تا بندرعباس)، مجله فیزیک زمین و فضا، دوره ۳، شماره ۴۷، صص: ۵۰۱-۵۱۸.

رحیم‌بیگی، نرگس؛ زرین، آذر؛ مفیدی، عباس؛ داداشی رودباری، عباسعلی. (۱۴۰۰). تحلیل پراکنش فصلی بارش‌های فرین در ایران با استفاده از پایگاه AgERA5. تحقیقات آب‌وخاک ایران، دوره ۱۱، شماره ۵۲، صص: ۲۷۲۳-۲۷۳۷.

رستمی، دانا؛ حسینی سید، اسعد. (۱۳۹۷). واکاوی و ردیابی پدیده گردوغبار در جنوب و جنوب‌شرق ایران با استفاده از مدل HYSPLIT و اصول سنجش‌ازدور، مجله تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، دوره ۵، شماره ۳، صص: ۱۰۳-۱۱۹.

صادقی نیا، علیرضا؛ رفعتی، سمیه؛ صداقت، مهدی. (۱۴۰۰). تحلیل فضایی تغییرات اقلیمی در ایران، تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، دوره ۸، شماره ۴، صص: ۵۵-۷۰.

علوی نیا، سیدحسن؛ زارعی، مهدی. (۱۴۰۰)؛ آنالیز روند تغییر اقلیم با استفاده از شاخص‌های حدی داده‌های بلندمدت بارش و دما در جنوب‌شرق ایران، فصلنامه علمی برنامه‌ریزی منطقه‌ای، دوره ۱۱، شماره ۴۴، صص: ۱۱۹-۱۳۴.

فتحیان، فرشاد؛ قدمی، محمد؛ دهقان، زهره. (۱۴۰۱). تحلیل مکانی نمایه‌های حدی دما تحت تأثیر تغییر اقلیم مبتنی بر داده‌های CORDEX و روش توسعه‌یافته تصحیح اُریبی در ایران، مجله علوم آب‌وخاک، دوره ۲۶، شماره ۴، صص:۱۳۷-۱۶۰.

میان‌آبادی، آمنه؛ سالاری، خسرو؛ پورمحمد، یاور. (۱۴۰۱). ارزیابی محصول ماهواره‌ای CHIRPS در بررسی روند تغییر بارش‌های جنوب-شرق ایران، نشریه آبیاری و زهکشی ایران، دوره ۱۶، شماره ۳، صص: ۶۷۰-۶۸۴.

نامداری، سودابه؛ حاجیبگلو، علی؛ اباذری، غلامرضا. (۱۴۰۰). تحلیل تغییرات کانون‌های گردوغبار داخلی ایران در بیست سال اخیر، جغرافیا و برنامه‌ریزی، دوره ۲۵، شماره ۷۸، صص: ۳۴۵-۳۶۱.

نجیب‌زاده، نازنین؛ قادری، کوروش؛ احمدی، محمدمهدی. (۱۳۹۸)؛ بهره‌گیری از روش‌های رگرسیون بردار پشتیبان و شبکه عصبی مصنوعی در مدلسازی بارش رواناب (مطالعه موردی: حوضه آبریز سد صفارود)، مجله آبیاری و زهکشی ایران، دوره ۱۲، شماره ۶، صص: ۱۷۰۹-۱۷۲۰.

Edwards, B. L., Webb, N. P., Brown, D. P., Elias, E., & Peck, D. E. (2019). Climate change impacts wind and water. Journal of Soil and Water Conservation, 74(4), 405–418. https://doi.org/10.2489/jswc.74.4.405

Furtak, K., & Wolińska, A. (2023). The impact of extreme weather events as a consequence of climate change on the soil moisture and the quality of the soil environment and agriculture. CATENA, 231, 107378. https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107378

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2022). Climate change: Impacts, adaptation, and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.

Kendall, M. G. (1975). Rank correlation measures. Charles Griffin.

Liang, H., Jianbin, G., Wenbin, Y., Qunou, J., Lin, C., & Kexin, T. (2023). Multifaceted responses of vegetation to average and extreme climate change over global drylands. Science of the Total Environment, 858(Pt 2), 159942. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159942

Mahmoudi, L., & Ikegaya, N. (2023). Identifying the distribution and frequency of dust storms in Iran based on long-term observations from over 400 weather stations. Sustainability, 15(16), 215–228. https://doi.org/10.3390/su1516215

Manning, C., Widmann, M., Bevacqua, E., Van Loon, A. F., Maraun, D., & Vrac, M. (2019). Increased probability of compound long-duration dry and hot events in Europe during summer (1950–2013). Environmental Research Letters, 14(10), 105006. https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab42fb

Mann, H. B. (1945). Nonparametric tests against trend. Econometrica: Journal of the Econometric Society, 13(3), 245–259. https://doi.org/10.2307/1907187

Na, L., Na, R., Zhang, J., Tong, S., Shan, Y., Ying, H., Li, X., & Bao, Y. (2018). Vegetation dynamics and diverse responses to extreme climate events in different vegetation types of Inner Mongolia. Atmosphere, 9(10), 394. https://doi.org/10.3390/atmos9100394

Schepanski, K. (2018). Transport of mineral dust and its impact on climate. Geosciences, 8(5), 151. https://doi.org/10.3390/geosciences8050151

Su, R., Guo, E., Wang, Y., Yin, S., Bao, Y., Sun, Z., Mandula, N., & Bao, Y. (2023). Vegetation dynamics and its response to extreme climate on the Inner Mongolian Plateau during 1982–2020. Remote Sensing, 15(15), 3891. https://doi.org/10.3390/rs15153891

Wang, W., Samat, A., Abuduwaili, J., Ge, Y., De Maeyer, P., & Van de Voorde, T. (2022). Temporal characterization of sand and dust storm activity and its climatic and terrestrial drivers in the Aral Sea region. Atmospheric Research, 275, 106242. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106242

Zucca, C., Fleiner, R., Bonaiuti, E., & Kang, U. (2021). Land degradation drivers of anthropogenic sand and dust storms. CATENA, 219, 106575. https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.106575.

Journal of Natural Environment Hazards
Print ISSN: 2676 - 4377 Online ISSN: 2676 - 4385
Homepage: https://jneh.usb.ac.ir

Journal of Natural Environmental Hazards, Vol 15, Iss 47, March 2026

Analysis of the effects of human activities and wind characteristics on the morphological and dynamic state of ergs (Case Study: ergs of Sistan and Baluchestan Province)

Mehran Maghsoudi[1*], **Hamid Ganjaeian**[2]

1. Corresponding Author, *Professor of Geomorphology, University of Tehran, Tehran, Iran*
Email: *maghsoud@ut.ac.ir* ***ORCID:*** *https://orcid.org/0000-0002-4973-8327*
2. *PhD. Student of geomorphology, University of Tehran, Tehran, Iran*

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received: 17 February 2025
Revised: 23 November 2025
Accepted: 05 December 2025
Published: 21 March 2026

Keywords:
Dunes, Dune shape, Dune dynamics, Sistan and Baluchestan ergs.

ABSTRACT

Ergs are a collection of dunes of various shapes and sizes. One of the characteristics of dunes is their active dynamics, which are considered a serious threat to residential areas and human activities. Dunes in Sistan and Baluchestan provinces have high morphological diversity and are dynamically active, which is why this study examined their morphological and dynamic status. This research was based on remote sensing methods and statistical information. In this study, satellite images and statistical information related to the speed and direction of the winds in the region were used as the most important research data. ArcGIS and WRplot software were the most important research tools. In this study, the morphological and dynamic status of dunes was first examined, and then their relationship with the speed and direction of the winds of the region and human activities was analyzed. The results of this study have shown that of the total 1068 square kilometers of the Sistan Dune, about 60 percent of it is covered by simple crescent dunes, and given that the average movement of the dunes of this dune has been between 2 and 90 m (during the years 2005 to 2020), it is therefore dynamically active. In addition, the results of the analysis of the winds of the region have shown that the northern areas of the Sistan Dune have the highest average wind speed, but because the dunes have been fixed by human activities, they have had the least amount of movement, but the dunes of the southern areas have had more movement due to less vegetation cover and the absence of geomorphological barriers.

How to Cite: Maghsoudi, M. and Ganjaeian, H. (2026). Analysis of the effects of human activities and wind characteristics on the morphological and dynamic state of ergs (Case Study: ergs of Sistan and Baluchestan Province). *Journal of Natural Environmental Hazards*, 15(47), 133-154.

© The Author/Authors
DOI: 10.22111/jneh.2025.51181.2104
Publisher: University of Sistan and Baluchestan

EXTENDED ABSTRACT

INTRODUCTION

Dunes are among the factors threatening residential areas. These dunes also move throughout the year and may shift more than 20 meters annually. In many cases, the movement of dunes leads to the destruction of agricultural lands or human infrastructure. Due to their specific morphology, dunes have high tourism potential; however, because of their active dynamics, they are considered a serious threat to human activities. In fact, the movement of dunes, or the sandstorms caused by them, destroys agricultural lands and human infrastructure. A large part of Iran is covered by desert lands, and dunes in Iran are significantly distributed, covering major portions of the central, eastern, southern, and Khuzestan plain regions. Among the dunes in the eastern and southeastern regions of the country are those in Sistan and Baluchestan Province. These dunes consist of several individual dunes. The dunes of Sistan and Baluchestan Province display high morphological diversity and are dynamically active. Moreover, since they are mainly located near residential areas, they are of great importance. Given this significance, the present study examines the movement and shape of the dunes in Sistan and Baluchestan Province and their relationship with the wind conditions of the region.

DATA AND METHODOLOGY

This research was based on remote sensing methods and statistical information. Satellite images and statistical data related to wind speed and direction in the region were used as the primary research inputs. Google Earth software (to delineate the exact area of the dunes and monitor their displacement), ArcGIS (to prepare the required maps), and WRplot (to analyze wind speed and direction in the region) were the main research tools. Considering the subject and objectives, the study was conducted in several stages. In the first stage, the area of the dunes was delineated using Google Earth and Landsat satellite images. In the second stage, to assess the displacement of the dunes, 15 sample points were selected. Based on the displacement of these points during the years 2005 to 2020, a displacement map of the dunes in the study area was prepared using the IDW interpolation method. In the third stage, to analyze the winds in the region, data from nine meteorological stations were used. Based on these data and through the WRplot software, wind speed and direction in the region were evaluated. In this stage, after calculating the average wind speed for different months of the year, a monthly wind speed map of the studied dunes was prepared using the IDW interpolation method. Finally, after analyzing the wind conditions of the region, the effects of wind speed and direction on the morphological and dynamic characteristics of the dunes were evaluated.

RESULTS AND DISCUSSION

The Sistan dunes, with a total area of 1,068 square kilometers, consist of several dunes and are highly diverse in terms of morphology and dynamics. The results of this study have shown that in the Sistan dunes, there are various types of dune shapes, including barchan and barchanoid, simple transverse, compound transverse, and thin to thick sand covers, which indicate the influence of various factors on them (Figure 1). Considering that simple crescentic dunes cover about 60 percent of the total area of the dunes in the region, they are more extensive than other dunes. The results of this study also showed that a large part of the Sistan Dune is dynamically active, such that the dunes of this dune have moved between 2 and 90 meters (during the years 2005 to 2020), with the highest amount of movement, at 90 meters, related to the southern dunes of the region, and the lowest amount of movement, about 2 meters, related to the stabilized dunes around Zabol. Also, the results of the analysis of the speed and direction of the winds in the region have shown that the average wind speed in the Sistan Dune area has been between 5.5 and 22.5 meters per second, and in terms of spatial distribution, the highest average wind speed during different months has been related to the dunes adjacent to the city of Zabol. In terms of wind direction, in the northern areas of the Sistan Dune, the

prevailing wind directions are from the northwest, and in the southern areas of the Sistan Dune, the prevailing wind directions are from the southeast.

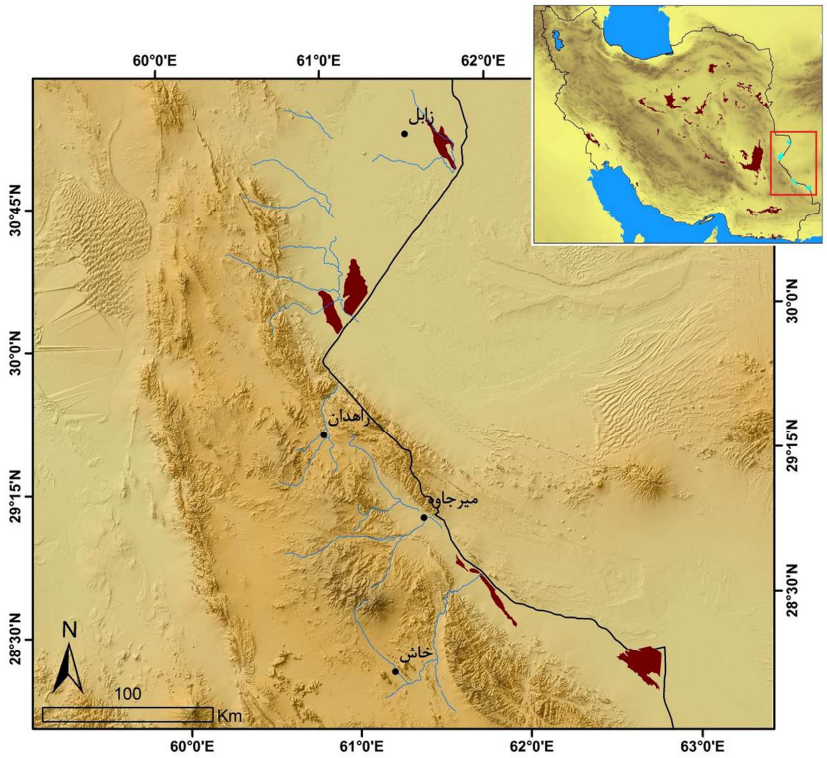


Figure 1: Map of the location of the Sistan ergs

Table 2: Area and percentage area of dunes in Sistan ergs

Row	Type of dunes	Area (km)	percentage of area
1	Barchans & Barchanoids	57.6	5.4
2	Simple Crescentic Ridge	644.4	60.3
3	Simple Crescentic Ridge & Barchans	138.8	13
4	Compound Crescntic Ridge	7.3	0.7
5	Sand Sheet Low Thickness & Barchans	54	5.1
6	Sand Sheet Medium Thickness	4.5	0.4
7	Sand Sheet Medium Thickness & Simple Crescentic Ridge	161.2	15.1

CONCLUSION

The Sistan Dune consists of a series of large and small dunes that cover the border strip of Sistan and Baluchestan provinces. Given the considerable differences in latitude and altitude between the northern and southern regions of this dune, environmental conditions, including wind speed and direction, are not uniform across the area. Moreover, the impact of human factors varies in different parts of the Sistan Dune; for instance, a large portion of the dunes adjacent to Zabol has been stabilized, resulting in minimal influence of winds on these dunes. In contrast, the southern dunes have less vegetation cover, and their morphology has provided favorable conditions for movement. In this study, after calculating wind characteristics, wind speed was evaluated for each dune type. The results showed that the highest average wind speed, 9.3 m/s, occurred in the barchans, followed by the simple transverse dunes, while the lowest, with an average of 7.2 m/s, was associated with the medium-thick

sand cover. Considering that the transverse dunes and barchans of the region exhibited active dynamics during the study period, it can be concluded that differences in wind speed have played a significant role in the morphological and dynamic diversity of the dunes in the region.

ETHICAL CONSIDERATIONS

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

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

ACKNOWLEDGMENTS

The authors acknowledge the Iran National Science Foundation (INSF) (grant number 98007635).

REFERENCES

References (in Persian)

Jadidoleslami Ghaleno, M. (2024). Analysis of Aeolian Deposit Processes and their Hazards in Sistan Plain. *Natural Environment Hazards*, 13(42), 71-90. https://doi.org/10.22111/jneh.2024.47555.2014 [In Persian]

Maghsoudi, M., & Ganjaeian, H. (2024). Classification of ergs around the Kavir plain (Dasht-e Kavir) and the Masileh Playa and assessment of their changes. *Quaternary Journal of Iran*, 10(1, 2), 88-107. https://doi.org/10.22034/irqua.2025.2054847.1042 [In Persian]

Maghsoudi, M., & Ganjaeian, H. (2025). Classification and analysis of the morphological and dynamic status of dunes (Case study: Khuzestan Reg). E.E.R. 15(2), 1-19. http://dx.doi.org/10.61186/jeer.15.2.1 [In Persian]

Maghsoudi, M., & Ganjaeian, H. (2025). Studying the Distributions and Areas of Sand Dunes in Iran Using Remote Sensing Methods. *Geography and Environmental Planning*, *36*(2), 89-112. https://doi.org/10.22108/gep.2025.145019.1721 [In Persian]

Maghsoudi, M., Fathollahzadeh, M., & Ganjaeian, H. (2021). Monitoring wind speed changes and their effect on the displacement and changes of dunes in the Lut Sand Dunes. *Sepehr*, *30*(118), 113-126. https://doi.org/10.22131/sepehr.2021.246137 [In Persian]

Maghsoudi, M., Ganjaeian, H., & Hoseini, S. (2018). Evaluating the Effectiveness of Supervised and Unsupervised Classification Methods in Monitoring Regs (Case Study: Jazmourian Reg). *Journal of Arid Regions Geographic Studies*, 9(32), 81-92. https://jargs.hsu.ac.ir/article_161472.html [In Persian]

Mamaghani, A., Zare Ahmadabad, M., Maghsoudi, M. (2019). Determining the origin of wind-blown sands using mineralogy and morphoscopy of sand grains (Case study: Tepeh Soufian tribe - north of Lake Urmia). Geography and Environmental Hazards, 8 (3), 77-95. https://doi.org/10.22067/geo.v8i3.81703 [In Persian]

Mashhadi, N., 2024. Morphodynamics of dunes and wind patterns (case study: New erg and Young, South-East of Qom). Geography and Environmental Hazards, 13 (1), 338-317. https://doi.org/10.22067/geoeh.2022.76706.1227 [In Persian]

Negahban, S., Ganjaeian, H., Ghaysarian, S.S., & Ebrahimi, A. (2025). Identifying dust centers and analyzing the factors affecting their occurrence based on remote sensing data (Case study: Southwest Iran). *Geography and environmental hazards*, *13*(4), 386-405. https://doi.org/10.22067/geoeh.2024.89088.1504 [In Persian]

Rabbani, A., Mohseni, N., & Hosseinzadeh, R. (2019). Studying the role of geomorphic processes in the morphology of semi-arid deserts. Geography and Environmental Hazards, 9 (36), 105-93. https://doi.org/10.22067/geoeh.2021.68982.1021 [In Persian]

Sadeghi Ravesh, M. (2018). Analysis of wind erosion and determination of sand movement direction in the Khezrabad region. Watershed Engineering and Management 10 (1), 95-107. (In Persian). https://doi.org/10.22092/IJWMSE.2017.108120.1216 [In Persian]

Sharifi Pichun, M., Omidvar, K., & Miri, Z. (2019). Studying the morphology of dunes and their correlation with wind data in the Rig Zarrin region. Geographical Explorations of Desert Areas, 8 (1), 1-27. https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.2345332.1399.8.1.1.6 [In Persian]

References (in English)

Ashkenazy, Y., Yizhaq, H., Tsoar, H. (2012). Sand dune mobility under climate change in the Kalahari and Australian deserts. June 2012 Climatic Change, 112(3), 1-23. http://dx.doi.org/10.1007/s10584-011-0264-9

Blasco, J. M.D., Chini, M., Verstraeten, G., & Hanssen, R.F. (2020). Sand Dune Dynamics Exploiting a Fully Automatic Method Using Satellite SAR Data. Remote Sensing 12 (22), 1-22. https://doi.org/10.3390/rs12233993

Dammala, P.K., Kolli, S., Garaga, R., Reddy, K.R., Kumar, P. (2025). Aeolian sand dune fixation – critical review of measures, challenges, and future perspectives with a case study on Thar Desert. CATENA, 250. https://doi.org/10.1016/j.catena.2025.108786

Fryberger, S.G. (1979). Dune forms and wind regime. In: McKee, E.D. (Ed.), A Study of Global Sand Seas. *Geological Survey Professional Paper*, 137–169. https://www.researchgate.net/publication/349216893

Lancaster, N. (2009). Dune morphology and dynamics. In: Parsons A J, Abrahams AD (eds) Geomorphology of desert environments. *Springer*, 824 P. https://10.0.3.239/978-1-4020-5719-9_18

Lancaster, N., 1995. The Geomorphology of Desert Dunes. Routledge, London, 290 P. http://dx.doi.org/10.4324/9780203413128

Liu, H., Xiao, Z., Zheng, X., 2024. A trans-scale simulation of aeolian sand flow – dune – dune field based on actual environmental wind field. Geomorphology, 463. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2024.109358

Maghsoodi, M., & Ganjaeian, H. (2025). Aeolian Geomorphology of Ergs and Dunefields in Iran. Desert, 30(1), 41-66. https://doi.org/10.22059/jdesert.2025.102461

Maghsoudi, M., & Ganjaeian, H. (2025). The Morphology and Morphodynamics of Aeolian Landforms in the Jazmurian Erg: An Analysis of Environmental Controls. Desert Ecosystem Engineering, 14(48), 111-127. https://doi.org/%E2%80%8E10.22052/deej.2025.257208.1113

Maghsoudi, M., Navidfar, A., & Mohammadian, A. (2017). The sand dunes migration patterns in Mesr Erg region using satellite imagery analysis and wind data. Natural Environment Change, 3(1), 33-43. https://doi.org/10.22059/jnec.2017.225011.62

Qian, G., Yang, Z., Xuegang, X., Dong, Z., & Guo, Y. (2024). Seasonal morphological evolution and migration of granule ripples in the Sanlongsha Dune Field, northern Kumtagh Sand Sea, China. *Geomorphology*, 444. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2023.108951

Sparavigna, A.C. (2013). A Study of Moving Sand Dunes by Means of Satellite Images. International Journal of Sciences 2, 33-42. https://doi.org/10.18483/ijSci.229

Sun, W., Gao, X. (2022). Geomorphology of sand dunes in the Taklamakan Desert based on ERA5 reanalysis data. Journal of Arid Environments, 207. https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2022.104848

Wang, X., Dong, Z., Zhang, J., & Chen, G. (2002). Geomorphology of sand dunes in the Northeast Taklimakan Desert. *Geomorphology*, 42(3-4), 183-195. https://doi.org/10.1016/S0169-555X(01)00085-X

Wiggs, G.F.S., Atherton, R.J., & Baird, A.J. (2004). Thresholds of aeolian sand transport: establishing suitable values. Sedimentology 51 (1), 95-108. https://doi.org/10.1046/j.1365-3091.2003.00613.x

Zhang, G.F., Molina, C.A., Shi, P., Lin, D., Jose A., Feng Kong, G., & Chen, D. (2019). Impact of near-surface wind speed variability on wind erosion in the eastern agro-pastoral transitional zone of Northern China (1982–2016). *Agricultural and Forest Meteorology*, 271, 102- 115. https://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.02.039.

مخاطرات محیط طبیعی
شاپا چاپی: ۴۳۷۷-۲۶۷۶ شاپا الکترونیکی: ۴۳۸۵-۲۶۷۶
Homepage: https://jneh.usb.ac.ir

مجله علمی پژوهشی مخاطرات محیط طبیعی، دوره ۱۵، شماره ۴۷، شماره پیاپی ۱، فروردین ۱۴۰۵

تحلیل تاثیر فعالیت‌های انسانی و خصوصیات باد بر وضعیت مورفولوژیکی و دینامیکی ریگزارها (مطالعه موردی: ریگزارهای استان سیستان و بلوچستان)

مهران مقصودی[1*]، حمید گنجائیان[2]

۱. استاد ژئومورفولوژی، دانشگاه تهران، تهران، ایران (**نویسنده مسئول**)

ایمیل: maghsoud@ut.ac.ir ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4973-8327

۲. دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۲۹
تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۹/۰۲
تاریخ پذیرش : ۱۴۰۴/۰۹/۱۴
تاریخ انتشار : ۱۴۰۵/۰۱/۰۱

واژه‌های کلیدی:
تپه‌های ماسه‌ای، شکل تپه‌های ماسه‌ای، دینامیک تپه‌های ماسه‌ای، ریگزارهای سیستان‌وبلوچستان.

چکیده

ریگزارها به‌مجموعه‌ای از تپه‌های ماسه‌ای اطلاق می‌شود که در شکل و اندازه‌های مختلفی هستند. یکی از خصوصیات ریگزارها، دینامیک فعال آن‌ها است که به‌عنوان یک تهدید جدی برای نواحی سکونتگاهی و فعالیت‌های انسانی محسوب می‌شود. ریگزارهای استان سیستان و بلوچستان دارای تنوع مورفولوژی بالایی هستند و از نظر دینامیکی نیز وضعیت فعالی دارند، به همین دلیل در این پژوهش به بررسی وضعیت مورفولوژیکی و دینامیکی آن‌ها پرداخته شده است. این تحقیق بر مبنای روش‌های سنجش از دوری و اطلاعات آماری بوده است. در این تحقیق از تصاویر ماهواره‌ای و اطلاعات آماری مربوط به سرعت و جهت بادهای منطقه به‌عنوان مهم‌ترین داده‌های تحقیق استفاده شده است. همچنین نرم‌افزارهای ArcGIS و WRplot، مهم‌ترین ابزارهای تحقیق بوده است. در این تحقیق ابتدا به بررسی وضعیت مورفولوژیکی و دینامیکی تپه‌های ماسه‌ای پرداخته شده است و سپس ارتباط آن با سرعت و جهت بادهای منطقه و همچنین فعالیت‌های انسانی تحلیل شده است. نتایج این تحقیق نشان داده است که از مجموع ۱۰۶۸ کیلومترمربع ریگ سیستان، حدود ۶۰ درصد از آن را تپه‌های ماسه‌ای عرضی ساده دربرگرفته است و با توجه به اینکه میانگین حرکت تپه‌های ماسه‌ای این ریگ بین ۲ تا ۹۰ متر (در طی سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۰) بوده است، بنابراین از نظر دینامیکی نیز دارای وضعیت فعالی است. همچنین نتایج آنالیز بادهای منطقه نشان داده است که در مناطق شمالی ریگ سیستان دارای بالاترین میانگین سرعت باد هستیم ولی به دلیل اینکه تپه‌های ماسه‌ای توسط فعالیت‌های انسانی ثبیت شده است، دارای کم‌ترین میزان حرکت بوده‌اند اما تپه-های ماسه‌ای مناطق جنوبی به دلیل پوشش‌گیاهی کم‌تر و نبود موانع ژئومورفولوژیکی، دارای حرکت بیش‌تری بوده‌اند.

استناد: مقصودی، مهران و گنجائیان، حمید . (۱۴۰۵). تحلیل تاثیر فعالیت‌های انسانی و خصوصیات باد بر وضعیت مورفولوژیکی و دینامیکی ریگزارها (مطالعه موردی: ریگزارهای استان سیستان و بلوچستان). مخاطرات محیط طبیعی، ۱۵(۴۷)، ۱۳۳-۱۵۴.

© نویسنده/ نویسندگان
DOI: 10.22111/jneh.2025.51181.2104
ناشر: دانشگاه سیستان و بلوچستان

مقدمه

یکی از عوارض قابل توجه مناطق خشک و نیمه‌خشک، ریگزارها هستند (مقصودی[1] و همکاران، ۲۰۱۷؛ ممقانی و همکاران، ۱۳۹۸). ریگزارها به‌مجموعه‌ای از تپه‌های ماسه‌ای اطلاق می‌شود که در شکل و اندازه‌های مختلفی هستند. تپه‌های ماسه‌ای دارای دینامیک فعالی هستند و به‌عنوان یکی از کانون‌های اصلی طوفان‌های گردوغبار محسوب می‌شوند (وانگ[2] و همکاران، ۲۰۰۲؛ ویگز[3] و همکاران، ۲۰۰۴؛ بالاسکو[4] و همکاران، ۲۰۲۰). با توجه به فعالیت و همچنین نقش مهمی که تپه‌های ماسه‌ای در ایجاد طوفان‌های گردوغبار دارند (ژانگ[5] و همکاران، ۲۰۱۹؛ کیان[6] و همکاران، ۲۰۲۴)، ریگزارها از جمله عوامل تهدیدکننده نواحی سکونتگاهی محسوب می‌شوند (مقصودی و گنجائیان، ۱۴۰۴). همچنین تپه‌های ماسه‌ای آن‌ها در طول سال دارای حرکت هستند و ممکن است تا سالانه تا بیش از ۲۰ متر نیز جابجا شوند. در واقع، تپه‌های ماسه‌ای پس از تشکیل در جهت حرکت باد جابجا می‌شوند. به این ترتیب که باد ذرات ماسه را از سمت مقابل خود به طرف بالا و جلو می‌راند و پس از رسیدن به قله (نقطه قرار) در سمت دیگر به پایین می‌افتد. تکرار این عمل به تدریج موجب جابجایی تپه می‌شود (مقصودی و همکاران، ۱۴۰۰). در بسیاری از مواقع، جابجایی تپه‌های ماسه‌ای باعث تخریب اراضی کشاورزی و یا زیرساخت‌های انسانی می‌شود. ریگزارها با توجه به مورفولوژی خاصی که دارند، پتانسیل‌های گردشگری بالایی دارند ولی به دلیل دینامیک فعالی که دارند، به‌عنوان یک تهدید جدی برای فعالیت‌های انسانی محسوب می‌شوند. در واقع، حرکت تپه‌های ماسه‌ای و یا طوفان‌های ماسه‌ای ناشی از آن‌ها، باعث تخریب اراضی کشاورزی و زیرساخت‌های انسانی می‌شود.

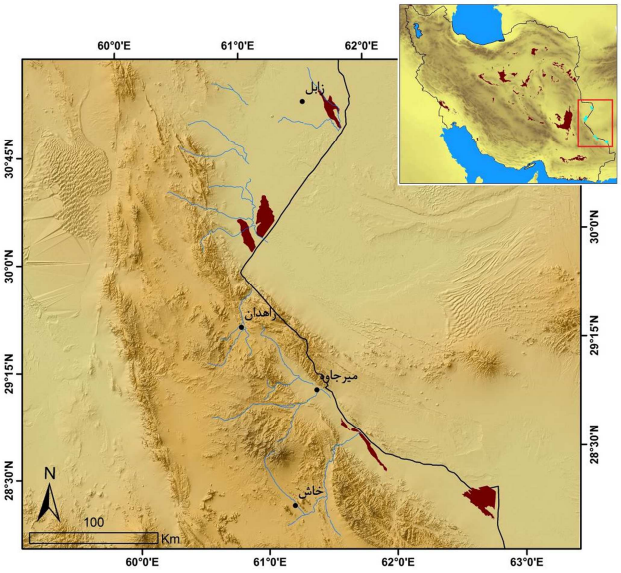
با توجه به اینکه بخش زیادی از وسعت ایران را اراضی بیابانی در برگرفته است (نگهبان و همکاران، ۱۴۰۳)، ریگزارها در ایران نیز دارای پراکنش قابل توجهی هستند و بخش قابل توجهی از مناطق مرکزی، شرق، جنوب و جلگه خوزستان را دربرگرفته‌اند. از جمله ریگزارهای مناطق شرق و جنوب شرقی کشور، ریگزارهای استان سیستان و بلوچستان است. این ریگزارها از چندین ریگ منفرد تشکیل شده است. ریگزارهای استان سیستان و بلوچستان دارای تنوع مورفولوژی بالایی هستند و از نظر دینامیکی نیز وضعیت فعالی دارند. همچنین با توجه به اینکه عمدتا در نزدیکی نواحی سکونتگاهی قرار دارند، دارای اهمیت بالایی هستند. با توجه به اهمیت موضوع، در این پژوهش به بررسی وضعیت حرکت و شکل تپه‌های ماسه‌ای ریگزارهای استان سیستان و بلوچستان و ارتباط آن با وضعیت بادهای منطقه پرداخته شده است.

در ارتباط با وضعیت مورفولوژی و دینامیک ریگزارها تحقیقات مختلفی انجام شده است که از جمله آن‌ها می‌توان به اسپاروینگا[7] (۲۰۱۳) اشاره کرد که به ارزیابی وضعیت حرکت تپه‌های ماسه‌ای در بیابان آریزونا پرداخته است. اشکنذی[8] و همکاران (۲۰۱۴) وضعیت حرکت تپه‌های ماسه‌ای و عوامل موثر در آن را در بیابان‌های کالاهاری و استرالیا را مورد ارزیابی قرار دارند. سان و ژاو[9] (۲۰۲۲) به تحلیل نقش عوامل محیطی در شکل تپه‌های ماسه‌ای

1 . Maghsoudi
2 . Wang
3 . Wiggs
4 . Blasco
5 . Zhang
6 . Qian
7 . Sparavigna
8 . Ashkenazy
9 . Sun & Gao

بیابان تاکلاماکان پرداختند. لیو[1] و همکاران (۲۰۲۴) به شبیه‌سازی تاثیرات باد بر حرکت تپه‌های ماسه‌ای پرداختند. دامالا[2] و همکاران (۲۰۲۵) به بررسی وضعیت حرکت تپه‌های ماسه‌ای بیابان تار و همچنین ارائه راهکارهای کنترل آن پرداختند. در ایران نیز صادقی‌روش (۱۳۹۷) به ارزیابی تاثیر باد بر حرکت تپه‌های ماسه‌ای در منطقه خضرآباد پرداخته است. مقصودی و همکاران (۱۳۹۷) به ارزیابی کارایی روش‌های طبقه‌بندی نظارت‌شده و نظارت‌نشده در پایش ریگزارهای جازموریان پرداختند. شریفی پیچون و همکاران (۱۳۹۹) به بررسی مورفولوژی تپه‌های ماسه‌ای و ارتباط آن با داده‌های باد در منطقه ریگ زرین پرداختند. ربانی و همکاران (۱۳۹۹) به بررسی نقش فرایندهای ژئومورفیک در مورفولوژی نبکاهای مناطق نیمه‌خشک پرداختند. مشهدی و همکاران (۱۴۰۳) به تحلیل نقش خصوصیات باد بر وضعیت مورفولوژی تپه‌های ماسه‌ای جنوب شرق قم پرداختند. بررسی تحقیقات پیشین نشان داده است که در بیش‌تر تحقیقات به پایش میزان جابجایی تپه‌های ماسه‌ای و همچنین ارتباط آن با وضعیت بادهای منطقه پرداخته شده است. در این تحقیق علاوه بر پایش وضعیت جابجایی تپه‌های ماسه‌ای و ارتباط آن با بادهای منطقه، با استفاده از یک الگوی بومی، به طبقه‌بندی شکل تپه‌های ماسه‌ای منطقه نیز پرداخته شده است.

موقعیت ریگزارهای سیستان و بلوچستان: ریگزارهای سیستان و بلوچستان از جمله ریگزارهای ایران است که از چند ریگ کوچک و بزرگ تشکیل شده است (مقصودی و گنجائیان، ۱۴۰۴). ریگزارهای سیستان از نظر تقسیمات سیاسی در محدوده استان سیستان و بلوچستان و شهرستان‌های هیرمند، زهک، زابل، زاهدان، خاش و سراوان قرار دارند (شکل ۱). این ریگزارها دارای ۱۰۶۸ کیلومترمربع وسعت و همچنین حدود ۴۹۵ کیلومتر محیط هستند و همچنین در یک روند کلی به‌صورت کشیده مناطق شرقی و نوار مرزی سیستان و بلوچستان را دربرگرفته‌اند. بخش-های شمالی این ریگزار از نظر ارتفاعی در طبقه ارتفاعی کم‌تر از ۵۰۰ متر و بخش‌های جنوبی آن در طبقه ارتفاعی ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ متر از سطح دریا قرار دارند. این ریگزار از ۵ ریگ تشکیل شده است که ریگ جنوبی آن با مساحت حدود ۳۳۴ کیلومترمربع، بزرگ‌ترین ریگ آن محسوب می‌شود.

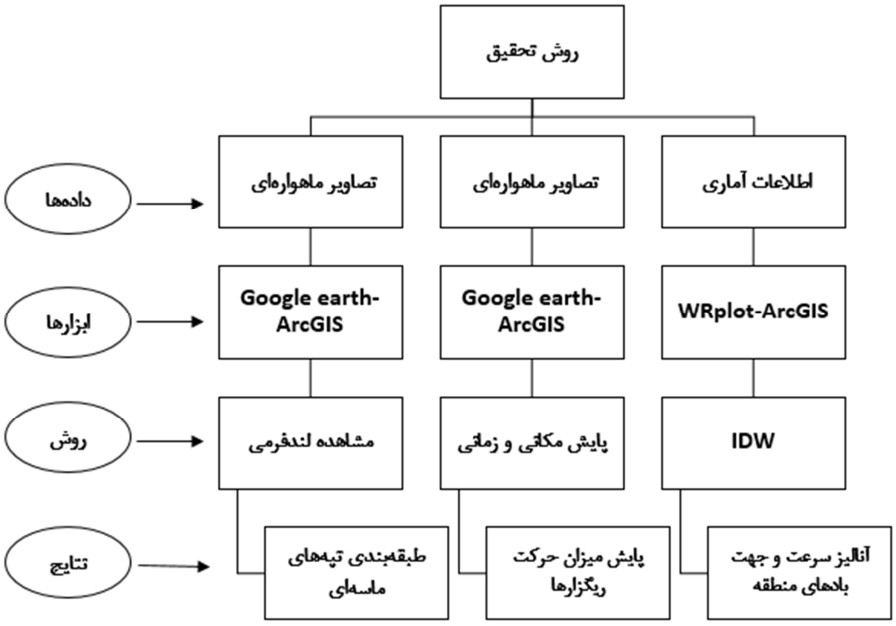


شکل ۱: نقشه موقعیت ریگ‌های سیستان

1. Liu
2 . Damala

داده‌ها و روش‌ها

این تحقیق بر مبنای روش‌های سنجش از دوری و اطلاعات آماری بوده است. در این تحقیق از تصاویر گوگل ارث و اطلاعات آماری مربوط به سرعت و جهت بادهای منطقه به‌عنوان مهم‌ترین داده‌های تحقیق استفاده شده است. همچنین نرم‌افزارهای گوگل ارث (به‌منظور ترسیم محدوده دقیق ریگزارها و پایش میزان جابجایی آن‌ها)، ArcGIS (به‌منظور تهیه نقشه های مورد نظر) و WRplot (به‌منظور آنالیز وضعیت سرعت و جهت بادهای منطقه)، مهم‌ترین ابزارهای تحقیق بوده است. با توجه به موضوع و اهداف مورد نظر، این تحقیق در چند مرحله انجام شده است (شکل ۲) که در ادامه به تشریح آن‌ها پرداخته شده است:



شکل ۲: فلوچارت روش تحقیق

-**مرحله اول (طبقه‌بندی تپه‌های ماسه‌ای)**: در این مرحله با استفاده از تصاویر گوگل ارث، محدوده ریگزارها ترسیم شده است. در ادامه بر مبنای مطالعات پیشین (فرایبرگر[1]، ۱۹۷۹؛ لنکستر[2]، ۱۹۹۵ و لنکستر، ۲۰۰۹؛ مقصودی و گنجائیان، ۱۴۰۳) و با توجه به وضعیت مورفولوژیکی تپه‌های ماسه‌ای، ریگزارهای منطقه از نظر شکل به طبقات مختلفی تقسیم شده است. پس از طبقه‌بندی از نظر شکل، با توجه به وضعیت فعالیت تپه‌های ماسه‌ای، ریگزارهای منطقه به ۳ دسته فعال، نیمه فعال و غیرفعال تقسیم شده است.

-**مرحله دوم (پایش میزان حرکت ریگزارها)**: در این مرحله به‌منظور ارزیابی وضعیت جابجایی تپه‌های ماسه‌ای، از نقاط نمونه (۱۵ نقطه نمونه) استفاده شده است و بر مبنای وضعیت جابجایی نقاط نمونه در طی سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۰، با استفاده از روش درونیابی IDW، نقشه میزان جابجایی تپه‌های ماسه‌ای در محدوده ریگزارهای مورد مطالعه تهیه شده است.

1. Fryberger
2. Lancaster

-**مرحله سوم (آنالیز وضعیت سرعت و جهت بادهای منطقه)**: در این پژوهش به‌منظور آنالیز بادهای منطقه، از اطلاعات ۹ ایستگاه هواشناسی استفاده شده است (جدول ۱) و بر اساس آن‌ها و با استفاده از نرم‌افزار WRplot، وضعیت سرعت و جهت بادهای منطقه ارزیابی شده است. در این مرحله پس از محاسبه میانگین سرعت باد در ماه-های مختلف سال، با استفاده از روش درونیابی IDW، نقشه سرعت باد ماهانه در ریگزارهای مورد مطالعه تهیه شده است. پس از آنالیز وضعیت بادهای منطقه، به تحلیل تاثیرات سرعت و جهت بادهای منطقه در وضعیت مورفولوژیکی و دینامیکی ریگزارهای منطقه پرداخته شده است. آنالیز وضعیت بادهای منطقه در طی سال‌های مختلف بیانگر پایداری و قابلیت تعمیم آن به دوره‌های بعدی است. بنابراین، عدم انطباق دوره زمانی مربوط به اطلاعات آماری باد و اطلاعات زمانی تصاویر ماهواره‌ای نمی‌تواند موجب کاهش اطمینان نتایج گردد. همچنین لازم به ذکر است که فقدان داده‌های جامع (شامل سرعت و جهت روزانه باد ایستگاه‌های مورد مطالعه) از جمله محدودیت‌های این تحقیق محسوب می‌شود.

جدول ۱: اطلاعات مربوط به ایستگاه‌های مورد مطالعه

ردیف	ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	دوره آماری
۱	نهبندان	۶۰° ۰۲'	۳۱° ۳۲'	۱۹۸۶-۲۰۱۳
۲	دهسلم	۵۹° ۱۹'	۳۱° ۱۲'	۲۰۱۲-۲۰۱۳
۳	زابل	۶۱° ۲۹'	۳۱° ۰۲'	۱۹۸۲-۲۰۰۳
۴	زهک	۶۱° ۴۱'	۳۰° ۵۴'	۱۹۹۲-۲۰۰۳
۵	نصرت آباد	۶۰° ۰۱'	۲۹° ۵۳'	۲۰۰۰-۲۰۰۳
۶	زاهدان	۶۰° ۵۳'	۲۹° ۲۸'	۱۹۸۲-۲۰۰۳
۷	خاش	۶۱° ۱۲'	۲۸° ۱۳'	۱۹۸۲-۲۰۰۳
۸	ایرانشهر	۶۰° ۱۲'	۲۷° ۱۲'	۱۹۸۲-۲۰۰۳
۹	سراوان	۶۲° ۲۰'	۲۷° ۲۰'	۱۹۸۲-۲۰۰۳

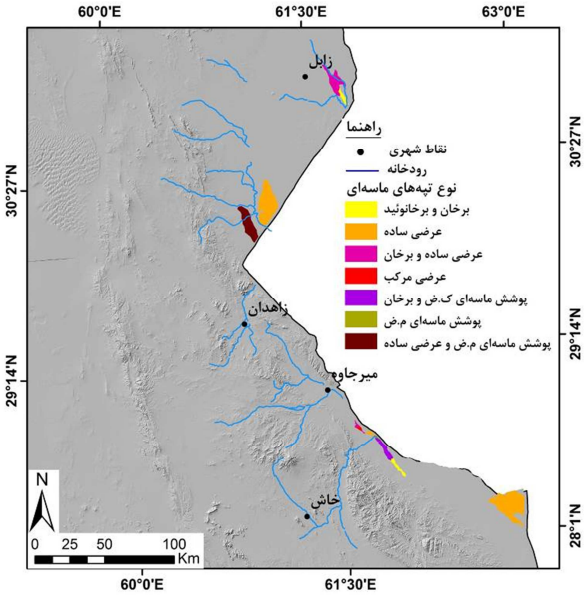
نتایج و بحث

طبقه‌بندی ریگ سیستان

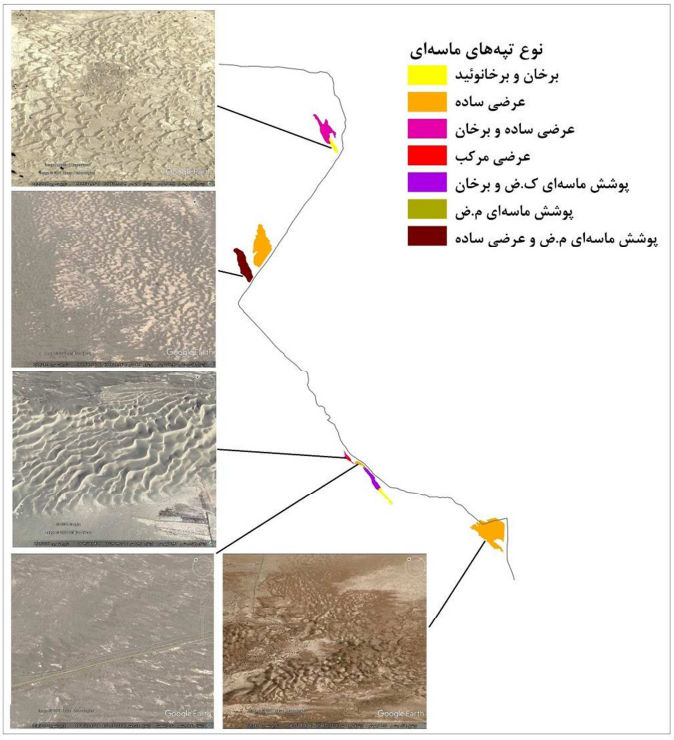
موقعیت ریگزار سیستان و خصوصا وسعت آن سبب شده است تا این ریگزار نسبت به ریگ جازموریان و لوت از تنوع کم‌تری برخوردار باشد. در این پژوهش، پس از شناسایی ریگزارها و ترسیم محدوده آن‌ها، دو نوع طبقه‌بندی صورت گرفته است. ابتدا با توجه به شکل ظاهری به ۷ دسته تقسیم شده‌اند و در ادامه با توجه به میزان فعالیتی که در طی سال‌های اخیر داشته‌اند به ۲ دسته فعال و نیمه‌فعال تقسیم شده‌اند.

الف) طبقه‌بندی ریگزارها بر اساس شکل ظاهری: ریگ سیستان در جنوب شرقی ایران واقع شده و بخش زیادی از مساحت آن در نوار مرزی استان سیستان و بلوچستان گسترش یافته است. در این پژوهش، بر مبنای تصاویر ماهواره‌ای و گوگل ارث، ریگزارهای خوزستان از نظر شکل ظاهری به ۷ طبقه برخان و برخانوئید، عرضی ساده، عرضی ساده و برخان، عرضی مرکب، پوشش ماسه‌ای کم ضخامت و برخان، پوشش ماسه‌ای متوسط ضخامت و پوشش ماسه‌ای متوسط ضخامت و عرضی ساده تقسیم شده است. لازم به ذکر است که ضخامت تپه‌های ماسه‌ای بر مبنای تصاویر گوگل ارث مشخص شده است و مناطقی که ماسه‌ها به‌صورت بادرفتی و لایه‌ای نازک هستند، به‌عنوان

کم‌ضخامت در نظر گرفته شدند و مناطقی که دارای ضخامت مشخصی در حد تپه‌های ماسه‌ای هستند، به‌عنوان تپه‌های ماسه‌ای با ضخامت متوسط در نظر گرفته شدند. بررسی وضعیت پراکنش شکل ریگزارهای سیستان بیانگر این است که بخش زیادی از این ریگزار را تپه‌های عرضی ساده دربرگرفته است (شکل ۳ و ۴).



شکل ۳: نقشه طبقه‌بندی ریگ سیستان

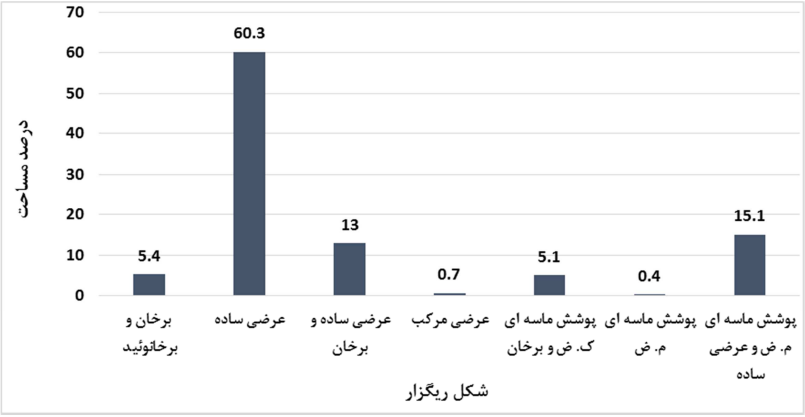


شکل ۴: نحوه طبقه‌بندی ریگ سیستان

در جدول ۲ و شکل ۵ مساحت و درصد مساحت طبقات نشان داده شده است. بر اساس نتایج بدست آمده، بخش زیادی از مساحت ریگ سیستان را تپه‌های ماسه‌ای عرضی ساده دربرگرفته است، به طوری که این تپه‌ها ۶۴۴/۴ کیلومترمربع (معادل ۶۰/۳ درصد از کل مساحت ریگ سیستان) از این ریگزار را شامل می‌شود. همچنین تپه‌های عرضی ساده در ترکیب با برخان و پوشش ماسه‌ای متوسط ضخامت به ترتیب ۱۳۸/۸ (معادل ۱۳ درصد از کل مساحت ریگ سیستان) و ۱۶۱/۲ (معادل ۱۵/۱ درصد از کل مساحت ریگ سیستان) کیلومترمربع وسعت دارند.

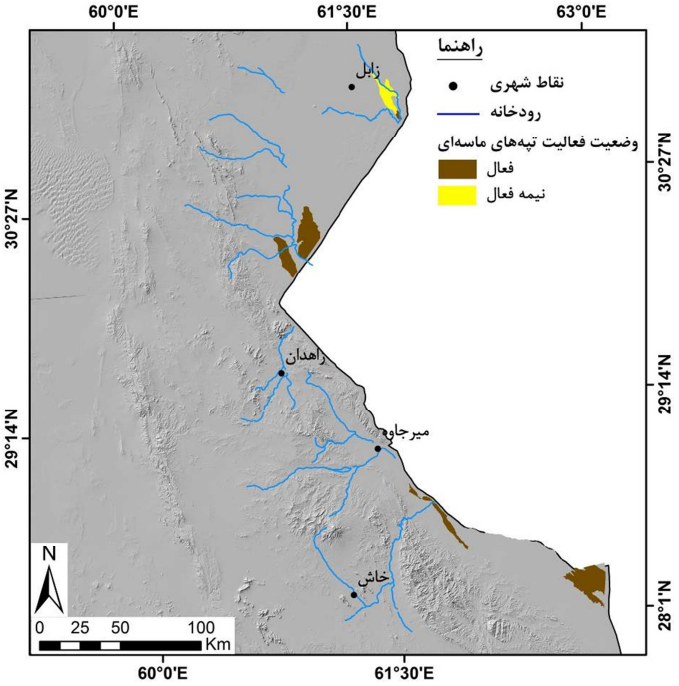
جدول ۲: مساحت و درصد مساحت طبقات تپه‌های ماسه‌ای ریگ سیستان

ردیف	نوع تپه‌های ماسه‌ای	مساحت	درصد مساحت
۱	برخان و برخانوئید	۵۷/۶	۵/۴
۲	عرضی ساده	۶۴۴/۴	۶۰/۳
۳	عرضی ساده و برخان	۱۳۸/۸	۱۳
۴	عرضی مرکب	۷/۳	۰/۷
۵	پوشش ماسه‌ای کم ضخامت و برخان	۵۴	۵/۱
۶	پوشش ماسه‌ای متوسط ضخامت	۴/۵	۰/۴
۷	پوشش ماسه‌ای متوسط ضخامت و عرضی ساده	۱۶۱/۲	۱۵/۱



شکل ۵: نمودار مساحت و درصد مساحت طبقات تپه‌های ماسه‌ای ریگ سیستان

ب) طبقه‌بندی ریگ سیستان بر اساس فعالیت: بررسی وضعیت فعالیت ریگ سیستان بیانگر این است که بخش زیادی از تپه‌های ماسه‌ای این ریگزار در طی سال‌های اخیر با تغییرات زیاد مواجه شده‌اند، بنابراین در بررسی کلی ریگزارها این منطقه، این مناطق به عنوان مناطق فعال در نظر گرفته شده است (شکل ۶). بر اساس نقشه نهایی تهیه شده از وضعیت فعالیت ریگ سیستان، به جز بخش‌هایی از مناطق شمالی این ریگ که به‌صورت نیمه فعال (جابجایی کم‌تر از ۱۰ متر در طی سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۰) است، سایر مناطق آن در وضعیت فعال (جابجایی بیش‌تر از ۱۰ متر در طی سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۰) قرار دارد.



شکل ۶: نقشه طبقه‌بندی ریگ سیستان بر اساس وضعیت فعالیت

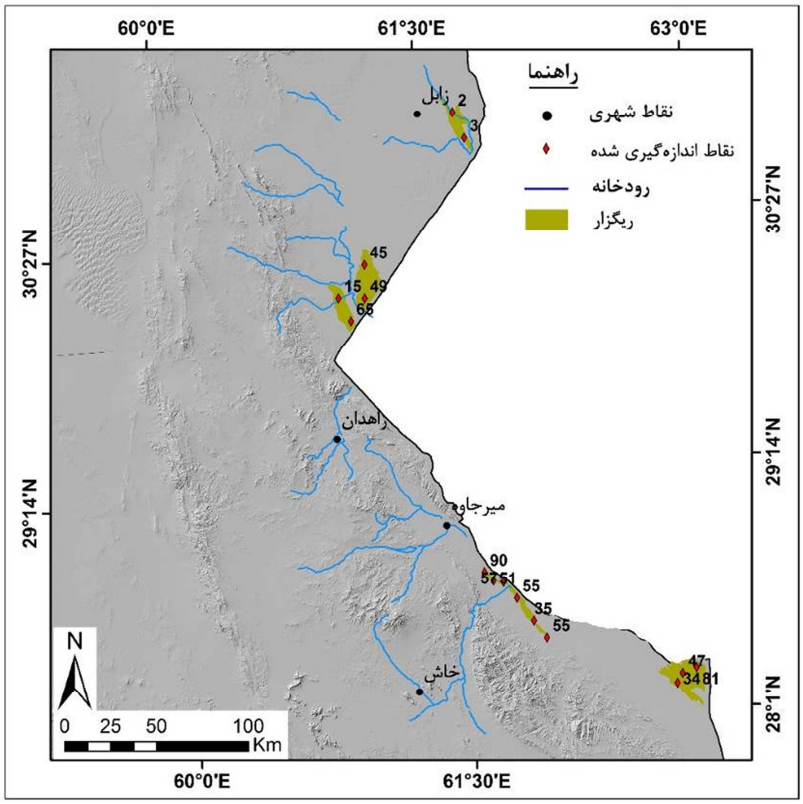
پایش تغییرات ریگ سیستان

به منظور پایش میزان حرکت تپه‌های ماسه‌ای در ریگ سیستان از ۱۵ نقطه نمونه استفاده شده است (جدول ۳ و شکل ۷) و سپس با استفاده از روش درونیابی IDW، نقشه میزان حرکت تپه‌های ماسه‌ای ریگ سیستان تهیه شده است (شکل ۸). بر اساس نقشه تهیه شده، تپه‌های ماسه‌ای ریگ سیستان بین ۲ تا ۹۰ متر (در طی سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۰) حرکت داشته است که بیش‌ترین میزان حرکت با ۹۰ متر، مربوط به برخان‌های جنوبی منطقه و کم‌ترین میزان حرکت نیز با حدود ۲ متر مربوط به تپه‌های تثبیت شده اطراف زابل بوده است.

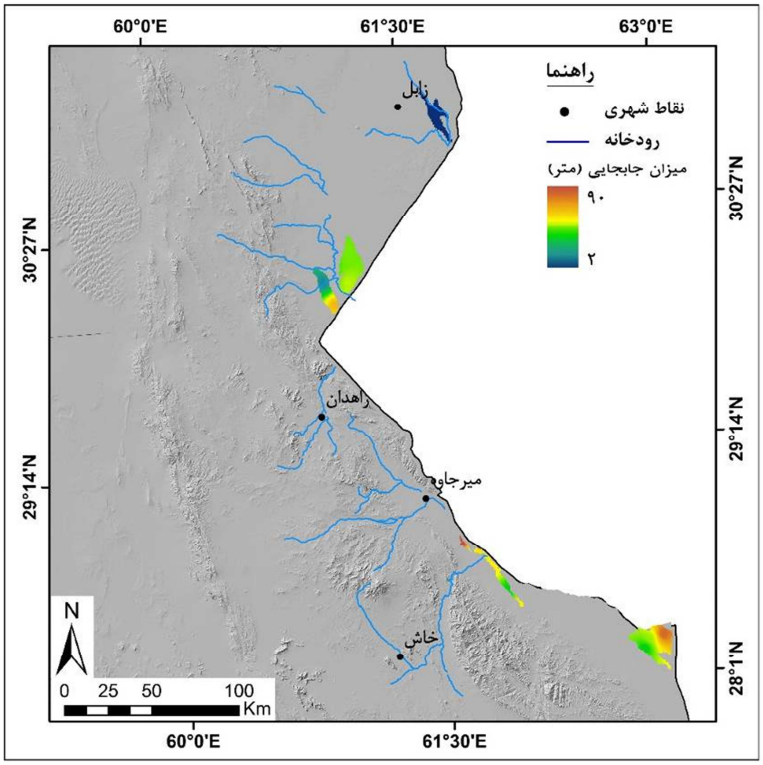
جدول ۳: موقعیت نقاط نمونه برداری شده و میزان جابجایی آن‌ها در طی سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۰

ردیف	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	میزان جابجایی (متر)
۱	۶۱° ۴۱' ۳۶"	۳۱° ۰۱' ۲۵"	۲
۲	۶۱° ۴۴' ۴۶"	۳۰° ۵۳' ۴۱"	۳
۳	۶۱° ۰۶' ۵۷"	۳۰° ۱۹' ۴۷"	۴۵
۴	۶۱° ۰۵' ۵۵"	۳۰° ۱۰' ۱۱"	۴۹
۵	۶۰° ۵۷' ۲۱"	۳۰° ۱۰' ۳۲"	۱۵
۶	۶۱° ۰۰' ۵۷"	۳۰° ۰۳' ۲۰"	۶۵
۷	۶۱° ۳۷' ۴۷"	۲۸° ۴۷' ۱۶"	۹۰
۸	۶۱° ۴۰' ۳۲"	۲۸° ۴۴' ۲۰"	۵۱
۹	۶۱° ۴۳' ۴۰"	۲۸° ۴۳' ۲۹"	۵۷
۱۰	۶۱° ۴۷' ۳۱"	۲۸° ۳۸' ۳۷"	۵۵
۱۱	۶۱° ۵۲' ۴۸"	۲۸° ۳۱' ۱۲"	۳۵

۱۲	۶۱° ۵۶' ۳۱"	۲۸° ۲۶' ۱۲"	۵۵
۱۳	۶۲° ۳۷' ۳۸"	۲۸° ۰۹' ۳۰"	۳۴
۱۴	۶۲° ۳۹' ۴۷"	۲۸° ۱۲' ۱۳"	۴۷
۱۵	۶۲° ۴۴' ۳۸"	۲۸° ۱۳' ۳۸"	۸۱

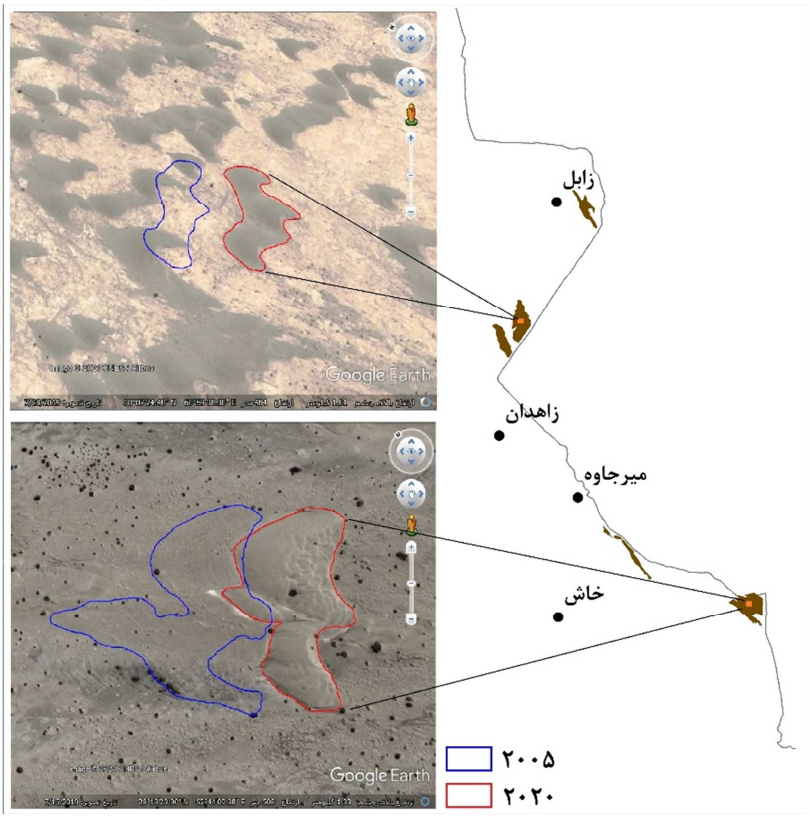


شکل ۷: نقشه موقعیت نقاط نمونه برداری در ریگ سیستان



شکل ۸: نقشه میزان حرکت تپه‌های ماسه‌ای در ریگ سیستان

بر اساس نتایج بدست آمده، در یک روند کلی، میزان جابجایی تپه‌های ماسه‌ای ریگ سیستان از سمت شمال به سمت جنوب افزایش یافته است. در این بخش به منظور بررسی نمونه‌ای از تغییرات صورت گرفته، دو تپه ماسه‌ای منفرد در بخش‌های میانی و جنوبی ریگ سیستان انتخاب و میزان جابجایی آن‌ها در طی سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۰ پایش شده است. بر اساس نتایج بدست آمده از ارزیابی تصاویر گوگل ارث (۹)، تپه ماسه‌ای شمال زاهدان در طی دوره زمانی مورد مطالعه حدود ۶۰ متر جابجایی داشته است و همچنین تپه ماسه‌ای جنوبی نیز در طی دوره زمانی حدود ۸۵ متر جابجایی داشته است.



شکل ۹: محدوده تپه‌های ماسه‌ای مورد مطالعه در طی سال‌های ۲۰۰۵ و ۲۰۲۰

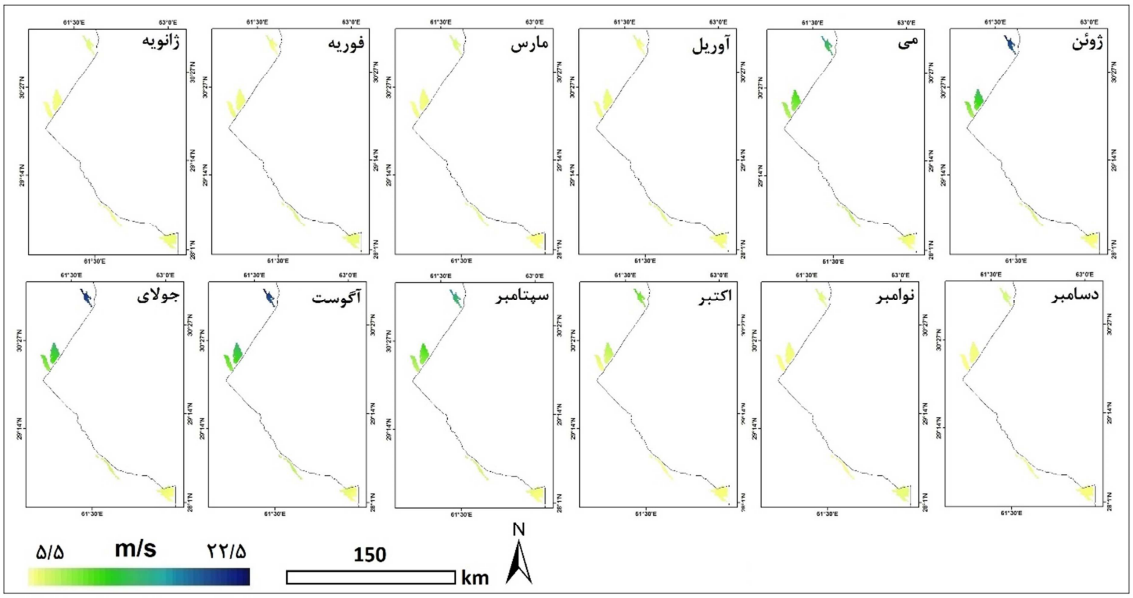
آنالیز بادهای منطقه

در این پژوهش به منظور وضعیت دینامیک ریگ سیستان از اطلاعات ۱۲ ایستگاه هواشناسی مجاور این ریگ استفاده شده است. بررسی موقعیت ایستگاه‌ها بیانگر این است که ایستگاه‌های نهبندان، دهسلم، شهداد، کرمان، لاله‌زار، بم، جیرفت، کهنوج، ایرنشهر، خاش، زاهدان و نصرت آباد در مجاورت ریگ سیستان قرار دارند که در ادامه به تشریح وضعیت گلباد و گلماسه این ایستگاه‌ها پرداخته شده است.

الف) سرعت ماهانه باد: در این پژوهش به منظور بررسی وضعیت سرعت باد در منطقه، ابتدا میانگین سرعت باد در طی دوره‌های زمانی مختلف محاسبه شده است (جدول ۴). پس از انجام محاسبات و تهیه اطلاعات لازم، با استفاده از روش درونیابی IDW، نقشه سرعت باد ماهانه در محدوده ریگ سیستان تهیه شده است (شکل ۱۰). بر اساس نقشه-های مذکور، میانگین سرعت باد در محدوده ریگ سیستان بین ۵/۵ تا ۲۲/۵ متر بر ثانیه بوده است که از نظر پراکنش مکانی، بالاترین میانگین سرعت باد در طی ماه‌های مختلف مربوط به ریگزارهای مجاور شهر زابل بوده است و کم‌ترین میانگین سرعت نیز در محدوده ریگزارهای جنوبی سیستان بوده است. همچنین از نظر پراکنش زمانی نیز، بالاتری میانگین سرعت با میانگین بین ۷/۸ تا ۲۲/۵ متر بر ثانیه مربوط به ماه جولای و کم‌ترین میانگین سرعت نیز با میانگین ۵/۹ تا ۷/۱ متر بر ثانیه مربوط به ماه دسامبر بوده است.

جدول ۴: میانگین سرعت باد ماهانه ایستگاه‌های مجاور ریگ سیستان

ایستگاه	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	می	ژوئن	جولای	آگوست	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر	سالانه
نهبندان	۳/۸	۴/۱	۴	۴	۴/۴	۵/۶	۷/۳	۶/۵	۶/۱	۴/۳	۳/۸	۳/۶	۵/۱
دهسلم	۵/۱	۵/۳	۵/۴	۴/۷	۵/۱	۵/۳	۵/۴	۳/۹	۴/۴	۳/۸	۴	۳/۹	۴/۹
زابل	۷/۸	۹	۸/۸	۹/۲	۱۵	۲۰	۲۴/۶	۲۲	۱۸	۱۰/۴	۸/۵	۷/۲	۱۳/۴
زهک	۶/۷	۷/۱	۸	۶/۱	۱۰/۷	۱۵/۶	۱۹/۷	۱۶/۸	۱۳	۷/۶	۶/۳	۷	۱۰/۲
نصرت آباد	۴/۱	۴/۳	۴/۵	۵/۱	۵/۵	۵/۹	۴/۶	۴/۸	۵	۳/۷	۳/۹	۵/۱	۴/۶
زاهدان	۷/۱	۸/۶	۸/۶	۶/۷	۶/۸	۷/۲	۷/۷	۶/۶	۵/۵	۴/۴	۵/۲	۶/۳	۶/۸
خاش	۶/۶	۸/۵	۸/۲	۷/۵	۸	۸/۳	۸/۴	۸	۷/۱	۵/۴	۵/۷	۶/۳	۷/۳
ایرانشهر	۶/۲	۶/۵	۶/۹	۶/۸	۶/۹	۷/۴	۷/۸	۷/۵	۷/۳	۵/۷	۵/۴	۵/۸	۶/۷
سراوان	۶/۷	۷/۵	۷/۳	۶/۳	۶/۴	۷/۶	۷/۲	۶/۱	۵/۸	۵/۵	۶/۷	۶/۱	۶/۶



شکل ۱۰: نقشه‌های دورنیابی سرعت باد ماهانه محدوده ریگ سیستان

ب) سرعت باد و تداوم آن: با توجه به اینکه سرعت و تداوم سرعت باد به عنوان عامل اصلی در حرکت تپه‌های ماسه‌ای محسوب می‌شود، در این بخش به بررسی وضعیت بادهای با سرعت بیش از ۶/۲ متر بر ثانیه (سرعت آستانه فرسایش بادی) در ایستگاه‌های مورد مطالعه پرداخته شده است (جدول ۵). بر اساس نتایج حاصله، در ایستگاه نهبندان ۳۵/۳ درصد از بادها دارای سرعت بیش از ۶/۲ متر بر ثانیه هستند که این میزان در ایستگاه دهسلم ۶۹، در ایستگاه زابل ۶۲/۹، در ایستگاه زهک ۵۶/۵، در ایستگاه نصرت آباد ۱۶/۸، در ایستگاه زاهدان ۵۷، در ایستگاه خاش

۶۳/۷، در ایستگاه ایرانشهر ۵۷ و در ایستگاه سراوان ۴۹/۶ درصد بوده است. همچنین میانگین تعداد روزهای دارای باد با سرعت بیش از ۶/۲ متر بر ثانیه (آستانه سرعت فرسایش بادی) در ایستگاه نهبندان ۶/۵ روز در سال بوده است که این میزان در ایستگاه دهسلم ۲۳۸ روز، در ایستگاه زابل ۲۶۳ روز، در ایستگاه زهک ۲۰۱/۲ روز، در ایستگاه نصرت آباد ۸۱/۳ روز، در ایستگاه زاهدان ۵۲/۱ روز، در ایستگاه خاش ۲۲۸/۳ روز، در ایستگاه ایرانشهر ۲۰۳ روز و در ایستگاه سراوان ۱۷۵/۳ روز بوده است.

جدول ۵: محاسبه سرعت آستانه باد در ایستگاه‌های مورد مطالعه

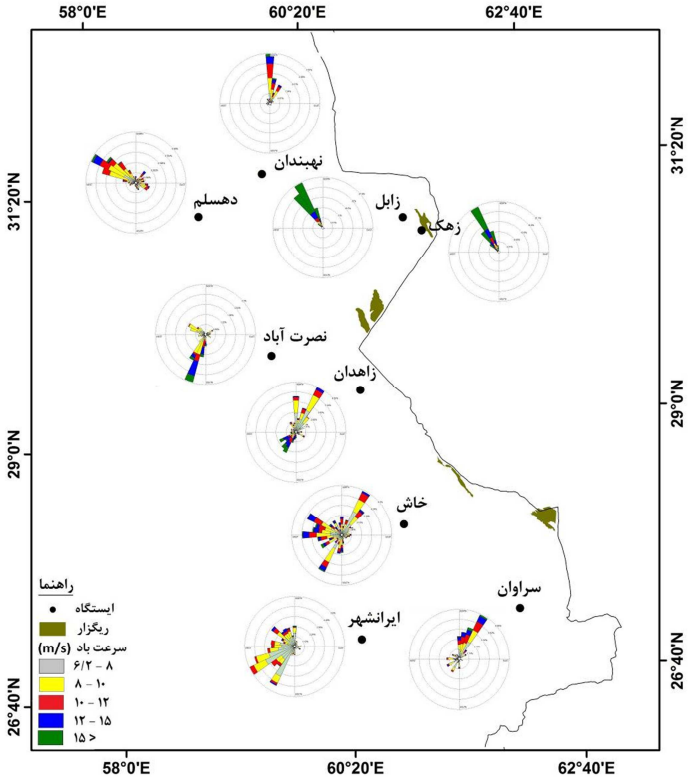
ایستگاه	درصد باد بیش از ۶/۲ متر بر ثانیه	میانگین سالانه تعداد روزهای با سرعت بیش از ۶/۲ متر بر ثانیه	بالاترین سرعت باد در طی دوره زمانی مورد مطالعه
نهبندان	۳۵/۳	۶/۵	۲۴
دهسلم	۶۹	۲۳۸	۱۸
زابل	۶۲/۹	۲۶۳	۴۱/۱
زهک	۵۶/۵	۲۰۱/۲	۴۲/۴
نصرت آباد	۱۶/۸	۸۱/۳	۱۷
زاهدان	۵۲/۱	۱۷۶/۸	۲۸/۴
خاش	۶۳/۷	۲۲۸/۳	۲۴
ایرانشهر	۵۷	۲۰۳	۱۶/۶
سراوان	۴۹/۶	۱۷۵/۳	۱۸/۱

ج) جهات باد: نتایج بررسی جهت باد در ایستگاه‌ها مجاور ریگ سیستان (جدول ۶ و شکل ۱۱) بیانگر این است که در ایستگاه نهبندان جهت غالب باد زمستان از سمت غرب و در سایر فصول سال از سمت شمال است. در ایستگاه دهسلم جهت غالب باد در تمام ماه‌های سال از سمت شمال غرب است. در ایستگاه‌های زابل و زهک در تمام فصول سال از سمت شمال غرب است. در ایستگاه نصرت آباد نیز جهت غالب باد در فصول زمستان و بهار از سمت جنوب غرب و در فصول تابستان و پاییز از سمت شمال غرب است. در ایستگاه زاهدان جهت غالب باد در فصول زمستان و بهار از سمت جنوب غرب و در فصول تابستان و پاییز از سمت شمال شرق است. در ایستگاه خاش نیز جهت غالب باد در ماه‌های ژانویه تا ژوئن از سمت غرب، در ماه‌های جولای تا سپتامبر از سمت شمال شرق و در ماه‌های اکتبر تا دسامبر از سمت جنوب غرب است. در ایستگاه ایرانشهر جهت غالب باد در تمام ماه‌های سال از سمت جنوب غرب است. همچنین در ایستگاه سراوان نیز جهت غالب باد در تمام فصول سال از سمت شمال شرق است.

جدول ۶: جهت غالب باد ماهانه ایستگاه‌های مجاور ریگ سیستان

ایستگاه	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	می	ژوئن	جولای	آگوست	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر	سالانه
نهبندان	غرب	غرب	غرب	شمال	شمال	شمال	شمال	شمال	شمال	شمال	شمال	شمال	شمال
دهسلم	شمال غرب	شمال غرب	شمال غرب	شمال غرب	شمال غرب	شمال غرب	شمال شرق	شمال شرق	شمال شرق	شمال غرب	شمال غرب	شمال غرب	شمال غرب
زابل	شمال غرب	شمال غرب	شمال غرب	شمال غرب	شمال غرب	شمال غرب	شمال غرب	شمال غرب	شمال غرب	شمال غرب	شمال غرب	شمال غرب	شمال غرب
زهک	شمال غرب	شمال غرب	شمال غرب	شمال غرب	شمال غرب	شمال غرب	شمال غرب	شمال غرب	شمال غرب	شمال غرب	شمال غرب	شمال غرب	شمال غرب

نصرت آباد	جنوب غرب	جنوب غرب	جنوب غرب	جنوب غرب	جنوب غرب	جنوب غرب	شمال غرب	شمال غرب	شمال غرب	شمال غرب	شمال غرب	شمال غرب	شمال غرب	جنوب غرب
زاهدان	جنوب غرب	جنوب غرب	جنوب غرب	جنوب غرب	جنوب غرب	جنوب غرب	شمال شرق	شمال شرق	شمال شرق	شمال شرق	شمال شرق	شمال شرق	شمال شرق	شمال شرق
خاش	غرب	غرب	غرب	غرب	غرب	غرب	شمال شرق	شمال شرق	شمال شرق	جنوب غرب	جنوب غرب	جنوب غرب	جنوب غرب	جنوب غرب
ایرانشهر	جنوب غرب	جنوب غرب	جنوب غرب	جنوب غرب	جنوب غرب	جنوب غرب	جنوب غرب	جنوب غرب	جنوب غرب	جنوب غرب	جنوب غرب	جنوب غرب	جنوب غرب	جنوب غرب
سراوان	شمال شرق	شمال شرق	شمال شرق	شمال شرق	شمال شرق	شمال شرق	شمال شرق	شمال شرق	شمال شرق	شمال شرق	شمال شرق	شمال شرق	شمال شرق	شمال شرق



شکل ۱۱: نقشه موقعیت ایستگاه‌های منطقه و وضعیت گلباد سالانه هر ایستگاه

تحلیل ارتباط بین ویژگی‌های باد و تپه‌های ماسه‌ای

ریگ سیستان از مجموعه از ریگ‌های بزرگ و کوچک تشکیل شده است که نوار مرزی استان سیستان و بلوچستان را دربرگرفته است. با توجه به اینکه بین مناطق شمالی و جنوبی این ریگزار، اختلاف عرض جغرافیایی و همچنین اختلاف ارتفاع زیادی وجود دارد، بنابراین شرایط محیطی، از جمله سرعت و جهت بادهای منطقه در مناطق شمالی و جنوبی این ریگزار، یکنواخت نیست. همچنین تاثیرگذاری عوامل انسانی نیز در مناطق مختلف ریگ سیستان به یک اندازه نبوده، به طوری که بخش زیادی از تپه‌های مجاور زابل به صورت تثبیت شده است که همین مسئله سبب شده تا بادهای منطقه تاثیر کمی بر این تپه‌ها داشته باشد. بر خلاف این تپه‌ها، تپه‌های ماسه‌ای مناطق جنوبی، دارای

پوشش‌گیاهی کم‌تری هستند و وضعیت مورفولوژی آن‌ها، زمینه را برای حرکت این تپه های ماسه‌ای فراهم کرده است. در این پژوهش همچنین پس از محاسبه ویژگی‌های باد، به ارزیابی میزان سرعت باد در هر کدام از اشکال تپه-های ماسه‌ای پرداخته شده است (جدول ۷). بر اساس نتایج بدست آمده، بالاترین میانگین سرعت باد با ۹/۳ متر بر ثانیه در برخان‌ها و سپس تپه‌های عرضی ساده بوده است و کم‌ترین میزان آن نیز با میانگین سرعت ۷/۲ متر بر ثانیه مربوط به پوشش ماسه‌ای متوسط ضخامت بوده است. با توجه به اینکه تپه‌های عرضی و برخان‌های منطقه در طی دوره زمانی مورد مطالعه دارای دینامیک فعالی بوده‌اند، بر این اساس می‌توان گفت که تفاوت سرعت باد در منطقه نقش مهمی در تنوع مورفولوژیکی و دینامیکی تپه‌های ماسه‌ای منطقه داشته است.

جدول ۷: ارزیابی ویژگی‌های باد در اشکال مختلف تپه‌های ماسه‌ای

ردیف	نوع تپه‌های ماسه‌ای	سرعت باد (متر بر ثانیه)
۱	برخان و برخانوئید	۹/۳
۲	عرضی ساده	۷/۸
۳	عرضی ساده و برخان	۸/۷
۴	عرضی مرکب	۷/۳
۵	پوشش ماسه‌ای کم ضخامت و برخان	۷/۳
۶	پوشش ماسه‌ای متوسط ضخامت	۷/۲
۷	پوشش ماسه‌ای متوسط ضخامت و عرضی ساده	۷/۸

نتیجه‌گیری

ریگزارهای سیستان با مجموع ۱۰۶۸ کیلومترمربع از چندین ریگ تشکیل شده است و از نظر مورفولوژیکی و دینامیکی دارای تنوع زیادی هستند. نتایج این تحقیق نشان داده است که در ریگ سیستان انواع اشکال تپه‌های ماسه‌ای شامل برخان و برخانوئید، عرضی ساده، عرضی مرکب و پوشش‌های ماسه‌ای کم ضخامت تا ضخیم وجود دارد که بیانگر تاثیرگذاری عوامل مختلف بر آن‌ها است و با توجه به اینکه تپه‌های ماسه‌ای عرضی ساده حدود ۶۰ درصد از وسعت کل ریگزارهای منطقه را دربرگرفته‌اند، دارای گستردگی بیش‌تری نسبت به سایر تپه‌های ماسه‌ای هستند. همچنین نتایج این تحقیق نشان داده است که بخش زیادی از ریگ سیستان از نظر دینامیکی دارای وضعیت فعالی است به‌طوری‌که تپه‌های ماسه‌ای این ریگ بین ۲ تا ۹۰ متر (در طی سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۰) حرکت داشته‌اند که بیش‌ترین میزان حرکت با ۹۰ متر، مربوط به برخان‌های جنوبی منطقه و کم‌ترین میزان حرکت نیز با حدود ۲ متر مربوط به تپه‌های تثبیت شده اطراف زابل بوده است. همچنین نتایج آنالیز وضعیت سرعت و جهت بادهای منطقه نشان داده است که میانگین سرعت باد در محدوده ریگ سیستان بین ۵/۵ تا ۲۲/۵ متر بر ثانیه بوده است که از نظر پراکنش مکانی، بالاترین میانگین سرعت باد در طی ماه‌های مختلف مربوط به ریگزارهای مجاور شهر زابل بوده است. از نظر جهت باد نیز در مناطق شمالی ریگ سیستان، جهات غالب باد از سمت شمال غرب و در مناطق جنوبی ریگ سیستان، جهات غالب باد از سمت جنوب شرق است. نتایج ارزیابی ارتباط بین وضعیت مورفولوژیکی و دینامیکی ریگ سیستان با وضعیت سرعت و جهت بادهای منطقه بیانگر این است که علاوه بر سرعت و جهت باد و همچنین عوامل توپوگرافی، عوامل انسانی نیز در میزان جابجایی تپه‌های ماسه‌ای نقش داشته است. در واقع، در مناطق شمالی ریگ سیستان دارای بالاترین میانگین سرعت باد هستیم ولی به دلیل اینکه تپه‌های ماسه‌ای توسط فعالیت‌های

انسانی ثبیت شده است، دارای کم‌ترین میزان حرکت بوده‌اند اما تپه‌های ماسه‌ای مناطق جنوبی به دلیل پوشش-گیاهی کم‌تر و نبود موانع ژئومورفولوژیکی، دارای حرکت بیش‌تری بوده‌اند. همچنین بر اساس نتایج حاصله، بالاترین میانگین سرعت باد در محدوده برخان‌ها و سپس تپه‌های عرضی ساده بوده است و با توجه به اینکه تپه‌های عرضی و برخان‌های منطقه در طی دوره زمانی مورد مطالعه دارای دینامیک فعالی بوده‌اند، بر این اساس می‌توان گفت که تفاوت سرعت باد در منطقه نقش مهمی در تنوع مورفولوژیکی و دینامیکی تپه‌های ماسه‌ای منطقه داشته است.

تقدیر و تشکر (حمایت مالی یا معنوی سازمانی)

این مقاله برگرفته از طرح پژوهشی شماره ۹۸۰۰۷۶۳۵، حمایت‌شده توسط بنیاد ملی علم ایران (INSF) است.

منابع

جدیدالاسلامی قلعه‌نو، مهدی. (۱۴۰۳). تحلیل فرایندهای رسوبات بادی و مخاطرات آن در دشت سیستان. *مخاطرات محیط طبیعی*، ۱۳(۴۲)، ۹۰-۷۱. https://doi.org/10.22111/jneh.2024.47555.2014

ربانی، ابوالفضل؛ محسنی، ندا؛ حسین‌زاده، سیدرضا. (۱۳۹۹). بررسی نقش فرایندهای ژئومورفیک در مورفولوژی نبکاهای مناطق نیمه‌خشک. *جغرافیا و مخاطرات محیطی*، ۹ (۳۶)، ۱۰۵-۹۳. https://doi.org/10.22067/geoeh.2021.68982.1021

شریفی پیچون، محمد؛ امیدوار، کمال؛ میری، زینب. (۱۳۹۹). بررسی مورفولوژی تپه‌های ماسه‌ای و انطباق آن با داده‌های باد در منطقه ریگ زرین. *کاوش‌های جغرافیایی مناطق بیابانی*، ۸ (۱)، ۲۷-۱. https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.2345332.1399.8.1.1.6

صادقی‌روش، محمدحسن. (۱۳۹۷). تحلیل فرسایش بادی و تعیین جهت حرکت ماسه‌های روان در دشت خضرآباد یزد. *مهندسی و مدیریت آبخیز*، ۱۰ (۱)، ۱۰۷-۹۵. https://doi.org/10.22092/IJWMSE.2017.108120.1216

مشهدی، ناصر. (۱۴۰۳). مورفودینامیک تپه‌های ماسه‌ای و الگوهای باد (مطالعه موردی: ارگ جدید و جوان جنوب شرق قم). *جغرافیا و مخاطرات محیطی*، ۱۳ (۱)، ۳۳۸-۳۱۷. https://doi.org/10.22067/geoeh.2022.76706.1227

مقصودی، مهران؛ فتح‌الله‌زاده، محمد؛ گنجائیان، حمید. (۱۴۰۰). پایش تغییرات سرعت باد و اثر آن بر جابجایی و تغییرات تپه‌های ماسه‌ای در ریگ لوت. *سپهر*، ۳۰ (۱۱۸)، ۱۲۶-۱۱۳. https://doi.org/10.22131/sepehr.2021.246137

مقصودی، مهران؛ گنجائیان، حمید . (۱۴۰۳). طبقه‌بندی ریگزارهای اطراف دشت کویر و چاله مسیله و ارزیابی تغییرات آن‌ها، *دو فصلنامه کواترنری ایران*، ۱۰(۱ و ۲)، ۱۰۷-۸۸. https://doi.org/10.22034/irqua.2025.2054847.1042

مقصودی، مهران؛ گنجائیان، حمید. (۱۴۰۴). بررسی وضعیت پراکندگی و وسعت ریگزارهای ایران با استفاده از روش‌های سنجش از دوری .جغرافیا و برنامه ریزی محیطی، ۳۶(۲)، ۱۱۲-۸۹. https://doi.org/10.22108/gep.2025.145019.1721

مقصودی، مهران؛ گنجائیان، حمید. (۱۴۰۴). طبقه‌بندی و تحلیل وضعیت مورفولوژیکی و دینامیکی تپه‌های ماسه‌ای (مطالعه موردی: ریگ خوزستان). پژوهش‌های فرسایش محیطی، ۱۵(۲)، ۱۹-۱. http://dx.doi.org/10.61186/jeer.15.2.1

مقصودی، مهران؛ گنجائیان، حمید؛ حسینی، سیدجواد. (۱۳۹۷). ارزیابی کارایی روش‌های طبقه‌بندی نظارت‌شده و نظارت‌نشده در پایش ریگزارها (مطالعه‌ی موردی: ریگ جازموریان). مطالعات جغرافیایی مناطق خشک، ۹(۳۲)، ۹۲-۸۱. https://jargs.hsu.ac.ir/article_161472.html

ممقانی، عباس؛ زارع احمدآباد، محسن؛ مقصودی، مهران. (۱۳۹۸). منشأ یابی ماسه‌های بادی با استفاده از کانی‌شناسی و مورفوسکوپی دانه‌های ماسه (مطالعهٔ موردی: قوم تپه صوفیان- شمال دریاچه ارومیه). *جغرافیا و مخاطرات محیطی*، ۸ (۳)، ۹۵-۷۷. https://doi.org/10.22067/geo.v8i3.81703

نگهبان، سعید؛ گنجائیان، حمید؛ قیصریان، سیدسعدی؛ ابراهیمی، عطرین. (۱۴۰۳). شناسایی کانون‌های گردوغبار و تحلیل عوامل مؤثر در وقوع آن بر مبنای داده‌های سنجش‌ازدوری (مطالعه موردی: جنوب غرب ایران). *جغرافیا و مخاطرات محیطی*، ۱۳(۴)، ۴۰۵-۳۸۶. https://doi.org/10.22067/geoeh.2024.89088.1504

Ashkenazy, Y., Yizhaq, H., Tsoar, H. (2012). Sand dune mobility under climate change in the Kalahari and Australian deserts. June 2012 Climatic Change, 112(3), 1-23. http://dx.doi.org/10.1007/s10584-011-0264-9

Blasco, J. M.D., Chini, M., Verstraeten, G., & Hanssen, R.F. (2020). Sand Dune Dynamics Exploiting a Fully Automatic Method Using Satellite SAR Data. Remote Sensing 12 (22), 1-22. https://doi.org/10.3390/rs12233993

Dammala, P.K., Kolli, S., Garaga, R., Reddy, K.R., Kumar, P. (2025). Aeolian sand dune fixation – critical review of measures, challenges, and future perspectives with a case study on Thar Desert. CATENA, 250. https://doi.org/10.1016/j.catena.2025.108786

Fryberger, S.G. (1979). Dune forms and wind regime. In: McKee, E.D. (Ed.), A Study of Global Sand Seas. *Geological Survey Professional Paper*, 137–169. https://www.researchgate.net/publication/349216893

Lancaster, N. (2009). Dune morphology and dynamics. In: Parsons A J, Abrahams AD (eds) Geomorphology of desert environments. *Springer*, 824 P. https://10.0.3.239/978-1-4020-5719-9_18

Lancaster, N., 1995. The Geomorphology of Desert Dunes. Routledge, London, 290 P. http://dx.doi.org/10.4324/9780203413128

Liu, H., Xiao, Z., Zheng, X., 2024. A trans-scale simulation of aeolian sand flow – dune – dune field based on actual environmental wind field. Geomorphology, 463. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2024.109358

Maghsoodi, M., & Ganjaeian, H. (2025). Aeolian Geomorphology of Ergs and Dunefields in Iran. Desert, 30(1), 41-66. https://doi.org/10.22059/jdesert.2025.102461

Maghsoudi, M., & Ganjaeian, H. (2025). The Morphology and Morphodynamics of Aeolian Landforms in the Jazmurian Erg: An Analysis of Environmental Controls. Desert Ecosystem Engineering, 14(48), 111-127. https://doi.org/%E2%80%8E10.22052/deej.2025.257208.1113

Maghsoudi, M., Navidfar, A., & Mohammadian, A. (2017). The sand dunes migration patterns in Mesr Erg region using satellite imagery analysis and wind data. Natural Environment Change, 3(1), 33-43. https://doi.org/10.22059/jnec.2017.225011.62

Qian, G., Yang, Z., Xuegang, X., Dong, Z., & Guo, Y. (2024). Seasonal morphological evolution and migration of granule ripples in the Sanlongsha Dune Field, northern Kumtagh Sand Sea, China. *Geomorphology*, 444. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2023.108951

Sparavigna, A.C. (2013). A Study of Moving Sand Dunes by Means of Satellite Images. International Journal of Sciences 2, 33-42. https://doi.org/10.18483/ijSci.229

Sun, W., Gao, X. (2022). Geomorphology of sand dunes in the Taklamakan Desert based on ERA5 reanalysis data. Journal of Arid Environments, 207. https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2022.104848

Wang, X., Dong, Z., Zhang, J., & Chen, G. (2002). Geomorphology of sand dunes in the Northeast Taklimakan Desert. *Geomorphology*, 42(3-4), 183-195. https://doi.org/10.1016/S0169-555X(01)00085-X

Wiggs, G.F.S., Atherton, R.J., & Baird, A.J. (2004). Thresholds of aeolian sand transport: establishing suitable values. Sedimentology 51 (1), 95-108. https://doi.org/10.1046/j.1365-3091.2003.00613.x

Zhang, G.F., Molina, C.A., Shi, P., Lin, D., Jose A., Feng Kong, G., & Chen, D. (2019). Impact of near-surface wind speed variability on wind erosion in the eastern agro-pastoral transitional zone of Northern China (1982–2016). *Agricultural and Forest Meteorology*, 271, 102- 115. https://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.02.039.

Journal of Natural Environment Hazards
University of Sistan and Baluchestan
Print ISSN: 2676 - 4377 Online ISSN: 2676 - 4385
Homepage: https://jneh.usb.ac.ir

Journal of Natural Environmental Hazards, Vol 15, Iss 47, March 2026

Evaluation of heavy metal concentrations in Otolithes ruber in Tis Pier and Bandar Abbas, and health risk assessment for the consumers

Morteza Samadanifar[1], Malihe Mohammadi[*2], Mehdi Ghanbarifardi[3], Sadegh Mosazadeh[4]

1. MSc student of Biochemistry, Department of Biology, Faculty of Science, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

2. Corresponding Author, Assistant Professor, Department of Biology, Faculty of Science, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

Email: *mmohammadi@science.usb.ac.ir* ***ORCID:*** *https://orcid.org/0000-0002-4818-4510*

3. Associate Professor, Department of Biology, Faculty of Science, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

4. MSc. Central Laboratory Expert, General Directorate of Veterinary Medicine, Hormozgan Province, Bandar Abbas, Iran

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received: 06 August 2025
Revised: 23 November 2025
Accepted: 03 December 2025
Published: 21 March 2026

Keywords:
Heavy metals, Pollution, Health risk assessment, Otolithes ruber, Sistan and Baluchestan, Hormozgan.

ABSTRACT

Heavy metal pollution in aquatic ecosystems is a major environmental concern due to the potential for bioaccumulation in aquatic organisms and subsequent human exposure through seafood consumption. This study evaluated the concentrations of cadmium (Cd), mercury (Hg), lead (Pb), and zinc (Zn) in liver and muscle tissues of Otolithes ruber collected from Chabahar (Tis Pier) and Bandar Abbas. Sixty fish samples (30 from each location) were analyzed using Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry (ICP-OES). Metal concentrations were higher in Chabahar samples, with liver tissues showing greater accumulation than muscle. Mean Hg concentrations in Chabahar liver and muscle were 0.098 ± 0.026 and 0.097 ± 0.019 µg/g, respectively, compared to 0.045 ± 0.019 and 0.034 ± 0.012 µg/g in Bandar Abbas ($p > 0.05$). Pb levels in Chabahar liver and muscle (0.56 ± 0.27 and 0.48 ± 0.10 µg/g) were significantly higher than those in Bandar Abbas (0.041 ± 0.02 and 0.030 ± 0.01 µg/g; $p < 0.05$). Cd concentrations in Chabahar liver and muscle (0.80 ± 0.35 and 0.63 ± 0.12 µg/g) also exceeded those in Bandar Abbas (0.07 ± 0.03 and 0.05 ± 0.02 µg/g; $p < 0.05$). Zn concentrations in Chabahar liver and muscle were 97.90 ± 10.17 and 24.22 ± 7.04 µg/g, respectively. Estimated Daily Intake (EDI) values for all metals were below the Tolerable Daily Intake (TDI) thresholds. However, the mean Cd concentration in Chabahar muscle exceeded permissible limits set by FAO, WHO, and MAFF. Target Hazard Quotient (THQ) and Total THQ (TTHQ) values for all metals were below 1, indicating low non-carcinogenic risk. In contrast, the Cancer Risk (CR) value for Hg in Chabahar exceeded the acceptable threshold ($>10^{-4}$), suggesting a potential carcinogenic risk from long-term consumption. Continuous environmental monitoring of aquatic organisms in Chabahar is recommended to mitigate health risks associated with heavy metal exposure through seafood consumption.

How to Cite: Samadanifar, M. , Mohammadi, M. , Ghanbarifardi, M. and Mosazadeh, S. (2026). Evaluation of heavy metal concentrations in Otolithes ruber in Tis Pier and Bandar Abbas, and health risk assessment for the consumers. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 15(47), 155-180.

© The Author/Authors

DOI: 10.22111/jneh.2025.52858.2129

Publisher: University of Sistan and Baluchestan

EXTENDED ABSTRACT

INTRODUCTION

Heavy metals are among the most important pollutants in aquatic ecosystems. Due to their high toxicity and non-biodegradable nature, the accumulation of heavy metals has negative ecological effects on marine organisms and human health through the food chain. Fish are an important source of protein for humans. Heavy metals can accumulate in fish tissues and eventually be transferred to humans. The accumulation of heavy metals in fish depends on various factors, and the level of accumulation also varies among different fish tissues. Fish muscle tissue plays a key role in human nutrition and health, while the liver has a special role in metabolism. Metals such as Fe and Zn are essential for proper cellular function in physiological amounts, but metals such as Pb, Hg, and Cd are toxic even at low concentrations and negatively affect the survival of aquatic organisms and human health. The tigertooth croaker fish (*Otolithes ruber*) is a commercially important species in the Oman Sea and the Persian Gulf, playing a significant role in the diet of local populations. Despite the global distribution of *O. ruber*, few studies have assessed the risks of its consumption in terms of heavy metal contamination in the Persian Gulf and the Oman Sea. Considering the above, the present study aimed to investigate the bioaccumulation of heavy metals Pb, Cd, Hg, and Zn in the liver and muscle of *Otolithes ruber* from Chabahar and Bandar Abbas, and to assess the health risk of this fish for consumers by calculating the non-carcinogenic and carcinogenic risk.

DATA AND METHODOLOGY

In this study, 30 croaker fish samples were collected from Chabahar and 30 from Bandar Abbas. The samples were transported to the laboratory in sterile bags, thoroughly washed, and cleaned. Their length and weight were then measured. Muscle and liver tissues were separated from the skeleton using sterilized blades, transferred into coded sterile plastic bags, and stored at –20°C until the analyses were performed. For sample preparation before heavy metal concentration measurement, acid digestion was carried out. The concentrations of heavy metals in the samples were determined using inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP-OES), while mercury concentrations were measured using the atomic absorption method. Trace element concentrations were expressed in micrograms per gram of dry weight (Table 1).

Health Risk Assessment

The non-carcinogenic risk associated with fish consumption was calculated using the THQ formula. THQ represents the ratio between the estimated exposure dose of a contaminant and the reference dose (RfD), as shown in the following equation:

$$THQ = \frac{EF \times ED \times FIR \times C}{BW \times AT \times RFD} \times 10^{-3}$$

The oral reference dose (RfD) values for Pb, Cd, Hg, and Zn are 0.004, 0.001, 0.0001, and 0.3 μg g^{-1}/day, respectively. Since humans are often exposed to more than one contaminant and may be affected by combined effects, the total Target Hazard Quotient (TTHQ) was also calculated using the following equation:

$$TTHQ = THQ\ (Pb) + THQ\ (Hg) + THQ\ (Cd) + THQ\ (Zn)$$

Table 1. Mean concentrations of heavy metals in the liver and muscle tissues of *Otolithes ruber* (µg g^{-1})

Station	Tissues		Hg	Cd	Pb	Zn
Chabahar	Muscle	Mean±S.D	0.097±0.019	0.63±0.12	0.48 ±0.10	24.22 ±7.04
		Maximum	0.35	1.40	0.83	37.20
		Minimum	0.00	0.10	0.00	4.05
	Liver	Mean±S.D	0.098 ±0.026	0.80 ±0.35	0.56 ±0.27	97.90 ±10.17
		Maximum	0.383	1.52	1.20	118.12
		Minimum	0.01	0.15	0.09	12.53
Bandar Abbas	Muscle	Mean±S.D	0.034 ±0.012	0.05 ±0.02	0.030 ±0.01	NS
		Maximum	0.262	0.74	0.22	NS
		Minimum	0.002	0.00	0.01	NS
	Liver	Mean±S.D	0.045±0.019	0.07±0.03	0.041 ±0.02	NS
		Maximum	0.290	0.81	0.31	NS
		Minimum	0.002	0.00	0.01	NS
FAO (2000)			0.5	0.5	2	30
WHO (2000)			0.5	0.5	0.5	40
MAFF (2000)			0.3	0.5	2	50
FDA (2001)			0.5-1	4	1.7	NS

For carcinogenic compounds, the risks were estimated as the incremental probability of individuals developing cancer over a lifetime due to exposure to a potentially carcinogenic substance. The carcinogenic risk (CR) resulting from the oral intake of heavy metals was calculated using the following equation:

$$CR = \frac{EF \times ED \times FIR \times CSF \times C}{BW \times AT} \times 10^{-3}$$

Where CSF is the cancer slope factor for each heavy metal, with values of 0.0085, 0.38, and 6.177 µg g^{-1}/day for Pb, Cd, and Hg, respectively. The results of the non-carcinogenic and carcinogenic health risk assessments are presented in Table 2.

Table 2. Target hazard quotient (THQ), total THQ (TTHQ), and Target Cancer Risk (TR) for Cd, Hg, Pb, and Zn in *Otolithes ruber*.

Station	THQ				TTHQ	CR		
	Cd	Hg	Pb	Zn		Cd	Hg	Pb
Chabahar	0.22	0.34	0.04	0.03	0.63	8.6×10^{-5}	2.1×10^{-4}	1.4×10^{-6}
Bandar Abbas	0.02	0.12	0.003	-	0.14	6.8×10^{-6}	7.5×10^{-5}	9.1×10^{-8}

Data analysis was performed using SPSS software (version 26), and a p-value of < 0.05 was considered statistically significant.

RESULTS AND DISCUSSION

The mean and range of heavy metal concentrations in the liver and muscle tissues of the samples were compared with the maximum permissible international limits. The concentrations of heavy metals in the Chabahar samples were higher than those in the Bandar Abbas samples. Furthermore, in both sampling sites, the concentrations of these elements in liver tissue were higher than in muscle tissue. The order of heavy metal concentrations in the liver and muscle tissues of the Chabahar samples was: Zn> Cd > Pb > Hg, whereas in the Bandar Abbas samples, the order was: Cd > Hg > Pb. Among the measured concentrations, only the mean Cd concentration in the muscle tissue of the Chabahar

samples exceeded the permissible limits recommended by FAO, WHO, and MAFF, but was still below the limit set by FAD.

Risk Assessment

The results showed that the THQ values for the heavy metals studied in the muscle tissue of both Chabahar and Bandar Abbas samples were less than 1. The TTHQ for the metals examined at both stations was also found to be less than 1. The CR from the oral intake of Pb, Cd, and Hg accumulated in fish muscle tissue revealed that: For Pb in the Bandar Abbas samples, CR was less than 1×10^{-6} (no risk). For Hg in the Bandar Abbas samples, Cd in both Chabahar and Bandar Abbas samples, and Pb in the Chabahar samples, CR values ranged between 1×10^{-6} and 1×10^{-4} (acceptable risk), and for Hg in the Chabahar samples, CR values exceeded 1×10^{-4} (above the acceptable limit).

CONCLUSION

Findings indicated that heavy metal concentrations were higher in the liver tissue of *Otolithes ruber* compared to the muscle tissue. Notably, the average concentration of Cd in the muscle tissue of *O. ruber* from Tis Pier at Chababar exceeded the safety thresholds established by FAO, WHO, and MAFF. Despite this, the non-carcinogenic risk assessment revealed that the Target Hazard Quotient (THQ) values for individual metals, as well as the Total THQ (TTHQ), remained below 1. This suggests that consumption of this species is unlikely to pose non-carcinogenic health risks under current exposure levels. In contrast, the carcinogenic risk assessment for Hg in the edible tissue of *O. ruber* from Chabahar exceeded the acceptable threshold (greater than 4×10^{-4}). This finding highlights potential health concerns for individuals who consume this fish regularly. Overall, samples collected from Chabahar port exhibited higher levels of heavy metal contamination than those from Bandar Abbas, particularly for Hg and Cd. These elevated concentrations may present increased risks to consumers.

The higher contamination levels observed in Tis Pier may be attributed to intensified maritime activity, aging and leaking vessels, and, to a lesser extent, industrial effluents and anthropogenic pollution. Over time, the bioaccumulation of heavy metals poses a significant threat to aquatic ecosystems. Therefore, consistent monitoring by environmental and public health authorities is essential to protect aquatic life and mitigate risks to human health.

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 performed by any of the authors. Fish samples were purchased from the fish market, where fishermen brought their daily catch for sale.

ACKNOWLEDGMENTS

This research was financially supported by the University of Sistan and Baluchestan. I sincerely thank the esteemed head of the Central Laboratory of the University of Sistan and Baluchestan, the respected laboratory experts, and the staff of the Central Laboratory, as well as the General Directorate of Veterinary Medicine of Hormozgan Province, for providing laboratory facilities and necessary guidelines.

REFERENCES

References (in Persian)

Pourkhabbaz, A., Khoshbin, A., & Abdollahi, M. (2023). Evaluation of concentrations of heavy metals (copper, mercury, and arsenic) in the muscle tissue, liver, and skin of *Otolithes ruber* and *Sphyraena forsteri* of the Oman Sea. Journal of Research in Environmental Health, 8(4), 419-430. [In Persian]

References (in English)

Costa, F., Coelho, J.P., Baptista, J., Martinho, F., Pereira. M.E., & Pardal. M.A. (2020). Mercury accumulation in fish species along the Portuguese coast: are there potential risks to human health? *Marine Pollution Bulletin*, 150, 110740.

Hashempour-baltork, F., Jannat, B., Tajdar-Oranj, B., Aminzare, M., Sahebi, H., Mirza Alizadeh, A., & Hosseini, H. A comprehensive systematic review and health risk assessment of potentially toxic element intakes via fish consumption in Iran. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 249, 114349.

Keshavarzi, B., Hassanaghaei, M., Moore, F., Rastegari Mehr, M., Soltanian, S., Lahijanzadeh, A.R., & Sorooshian, A. (2018). Heavy metal contamination and health risk assessment in three commercial fish species in the Persian Gulf. *Marine Pollution Bulletin* 129(1), 245-252.

Miri, M., Akbari, E., Amrane, A., Jafari, S.J., Eslami, H., Hoseinzadeh, E., Zarrabi, M., Salimi, J., Sayyad-Arbabi, M., & Taghavi, M. (2017). Health risk assessment of heavy metal intake due to fish consumption in the Sistan region, Iran. *Environmental Monitoring and Assessment*, 189(11), 583.

Niri, A.S., Sharifian, S., & Ahmadi, R. (2015). Assessment of metal accumulation in two fish species (*Tenualosa ilisha* and *Otolithes ruber*), captured from the north of the Persian Gulf. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 94(1), 71-76.

Sadeghi, P., Loghmani, M., & Afsa, E. (2019). Trace element concentrations, ecological and health risk assessment in sediment and marine fish *Otolithes ruber* in the Oman Sea, Iran. *Marine Pollution Bulletin*, 140, 248-254.

مخاطرات محیط طبیعی
شاپا چاپی: ۴۳۷۷-۲۶۷۶ شاپا الکترونیکی: ۴۳۸۵-۲۶۷۶
Homepage: https://jneh.usb.ac.ir

مجله علمی پژوهشی مخاطرات محیط طبیعی، دوره ۱۵، شماره ۴۷، شماره پیاپی ۱، فروردین ۱۴۰۵

بررسی غلظت فلزات سنگین در ماهی شوریده (Otolithes ruber) در اسکله تیس و بندر عباس و ارزیابی ریسک خطر سلامتی برای مصرف کنندگان

مرتضی صمدانی فر[۱]، ملیحه محمدی[۲*]، مهدی قنبری فردی[۳]، صادق موسی زاده[۴]

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد بیوشیمی، گروه زیست شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران
۲. استادیار گروه زیست شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران (**نویسنده مسئول**)
ایمیل: mmohammadi@science.usb.ac.ir **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-4818-4510
۳. دانشیار گروه زیست شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران
۴. کارشناس آزمایشگاه مرکزی، اداره کل دامپزشکی، استان هرمزگان، بندرعباس، ایران

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۱۵
تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۹/۰۲
تاریخ پذیرش : ۱۴۰۴/۰۹/۱۲
تاریخ انتشار : ۱۴۰۵/۰۱/۰۱

واژه‌های کلیدی:
فلزات سنگین، آلودگی، ارزیابی ریسک خطر، ماهی شوریده، سیستان و بلوچستان، هرمزگان.

چکیده

آلودگی اکوسیستم‌های آبی با فلزات سنگین یکی از مهم‌ترین نگرانی‌های زیست‌محیطی است، زیرا این عناصر از طریق تجمع‌زیستی در بافت آبزیان می‌توانند وارد بدن انسان شوند. این مطالعه غلظت کادمیوم، جیوه، سرب و روی را در بافت‌های کبد و عضله ماهی شوریده (*Otolithes ruber*) جمع‌آوری‌شده از چابهار (اسکله تیس) و بندرعباس ارزیابی کرد. شصت نمونه ماهی (۳۰ نمونه در هر محل) با استفاده از روش جذب اتمی (ICP-OES) مورد بررسی قرار گرفتند. غلظت فلزات در نمونه‌های چابهار بالاتر بود و بافت‌های کبد تجمع بیشتری نسبت به عضله نشان دادند. میانگین غلظت جیوه در کبد و عضله نمونه‌های چابهار به ترتیب ۰/۰۲۶±۰/۰۹۸ و ۰/۰۱۹±۰/۰۹۷ و در نمونه‌های بندرعباس ۰/۰۱۹±۰/۰۴۵ و ۰/۰۱۲±۰/۰۳۴ میکروگرم بر گرم بود ($p>0.05$). غلظت سرب در کبد و عضله نمونه‌های چابهار (۰,۲۷±۰,۵۶ و ۰,۱۰±۰,۴۸) به طور معنی‌داری بالاتر از غلظت آن در نمونه‌های بندرعباس ۰,۰۲±۰,۰۴۱ و ۰,۰۱±۰,۰۳۰ میکروگرم بر گرم بود ($p<0.05$). غلظت کادمیوم در کبد و عضله نمونه‌های چابهار (۰,۳۵±۰,۸۰ و ۰,۱۲±۰,۶۳) نیز از غلظت آن در نمونه‌های بندرعباس (۰,۰۳±۰,۰۷ و ۰,۰۵±۰,۰۲) میکروگرم بر گرم بیشتر بود ($p<0.05$). غلظت روی در کبد و عضله چابهار به ترتیب ۹۷,۹۰±۱۰,۱۷ و ۲۴,۲۲±۷,۰۴ میکروگرم بر گرم بود. مقادیر تخمینی مصرف روزانه (EDI) برای همه فلزات کمتر از آستانه مصرف روزانه قابل تحمل (TDI) بود. ولی میانگین غلظت کادمیوم در عضله نمونه‌های چابهار از حد مجاز تعیین شده توسط FAO، WHOو MAFF فراتر رفت. مقادیر THQ (نسبت خطر هدف) و THQ کل برای همه فلزات کمتر از ۱ بود که نشان دهنده خطر غیر سرطان‌زایی پایین است. مقدار خطر سرطان (CR) برای جیوه در چابهار از آستانه قابل قبول ($>10^{-4}$) فراتر رفت که نشان‌دهنده خطر بالقوه سرطان‌زایی ناشی از مصرف طولانی مدت است. نظارت مداوم بر محیط زیست موجودات آبزی در چابهار برای کاهش خطرات سلامتی مرتبط با قرار گرفتن در معرض فلزات سنگین از طریق مصرف غذاهای دریایی توصیه می‌شود.

استناد: صمدانی فر, مرتضی , محمدی, ملیحه , قنبری فردی, مهدی و موسی زاده, صادق . (۱۴۰۵). بررسی غلظت فلزات سنگین در ماهی شوریده (Otolithes ruber) در اسکله تیس و بندر عباس و ارزیابی ریسک خطر سلامتی برای مصرف کنندگان. *مخاطرات محیط طبیعی*, ۱۵(۴۷), ۱۵۵-۱۸۰

© نویسنده/ نویسندگان
DOI: 10.22111/jneh.2025.52858.2129
ناشر: دانشگاه سیستان و بلوچستان

مقدمه

فلزات سنگین از مهمترین آلاینده‌ها در اکوسیستم‌های آبی هستند که از منابع طبیعی و انسانی مانند فعالیت‌های خانگی، صنعتی و کشاورزی آزاد می‌شوند (مجلسی و همکاران، ۲۰۱۸). تجمع فلزات سنگین در اکوسیستم‌های آبی اثرات اکولوژیکی منفی بر موجودات دریایی و سلامت انسان از طریق زنجیره غذایی دارد. فلزاتی مانند آهن (Fe)، روی (Zn)، مس (Cu) و منگنز (Mn) در مقادیر فیزیولوژیک برای فعالیت‌های متابولیکی و بیوشیمیایی طبیعی سلول‌ها ضروری هستند، ولی برخی دیگر مانند سرب (Pb)، کادمیوم (Cd)، جیوه (Hg) و آرسنیک (As) غیر ضروری بوده و در مقادیر اندک هم اثرات سمی دارند (علیزاده و همکاران، ۲۰۲۴). ماهی یک منبع مهم پروتئین برای انسان است. مطالعات مختلف نشان می‌دهند که فلزات سنگین می‌توانند در بافت‌های ماهی تجمع یافته و در نهایت به بدن انسان منتقل شوند (میری و همکاران، ۲۰۱۷). عوامل متعددی مانند شوری، pH، سختی آب، محل و فصل نمونه برداری، ویژگی‌های اکولوژیکی و فیزیولوژیک گونه‌ها مانند جنسیت، عادات غذایی و پوست‌اندازی بر تجمع فلزات در بافت‌های حیوانات دریایی تأثیر می‌گذارند (مشعوفی و همکاران، ۲۰۲۳). همچنین به خوبی شناخته شده است که اندازه حیوانات دریایی نقش مهمی در محتوای فلزی بافت‌ها ایفا می‌کند (نیری و همکاران، ۲۰۱۵). بافت عضله ماهی برای سلامت انسان و نقش آن در غذای انسان مهم است و بافت کبد آن نیز نقش ویژه‌ای در متابولیسم دارد. بنابراین غلظت آلاینده‌ها برای تعیین وضعیت سلامت ماهی برای مصرف انسان بررسی می‌شود (صادقی و همکاران، ۲۰۱۹). کادمیوم یکی از سمی‌ترین فلزات سنگین است که می‌توان آن را در آب‌های سطحی به عنوان یون دو ظرفیتی یافت. این فلز برای رشد ماهی غیر ضروری بوده و پس از ورود به بدن، در بافت‌هایی مانند کبد، کلیه، آبشش و عضله تجمع می‌یابد (پاتیل[1]، ۲۰۲۰). قرار گرفتن طولانی مدت در معرض کادمیوم ممکن است باعث اختلال در عملکرد کلیه و کبد، کاهش ظرفیت تولید مثل، شکستگی استخوان، رشد پروستات، فشار خون بالا و افزایش خطر ابتلا به سرطان شود (جادجی بگویچ[2] و همکاران، ۲۰۲۰؛ حسین[3] و همکاران، ۲۰۲۲). سرب به عنوان یکی از فلزات سمی شناخته شده می‌تواند باعث ضایعات در سیستم تولید مثل، سیستم عصبی و کلیه‌ها شود (منصوری و همکاران، ۲۰۱۰). تقریباً ۹۰٪ از خطرات سلامتی انسان مربوط به مصرف ماهی مربوط به ماهی‌های آلوده به جیوه است (رضایی و همکاران، ۲۰۱۱). تجمع جیوه در پستانداران می تواند سبب بروز عوارضی همچون کاهش بینایی، اختلال در حرکت، تغییرات در سیستم عصبی و در نهایت منجر به مرگ شود (کاستا[4] و همکاران، ۲۰۲۰). با توجه به اثر نوروتوکسیک جیوه، این ماده توسط برنامه بین‌المللی ایمنی مواد شیمیایی[5] (IPSC) به عنوان یکی از شش ماده شیمیایی خطرناک ذکر شده است (رضایی و همکاران، ۲۰۱۱). روی یکی از ریز مغذی‌های ضروری است که برای عملکرد فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی طبیعی سلول‌ها مورد نیاز است ولی در مقادیر بالامی‌تواند سبب تهوع، استفراغ، اسهال و آسیب کبدی و کلیوی شود (محمودا[6] و همکاران، ۲۰۲۰؛ نیارکو[7] و همکاران، ۲۰۲۳). بر اساس آخرین دستورالعمل های WHO[8] و

[1] Patil
[2] Djedjibegovic
[3] Hossain
[4] Costa
[5] International Program of Chemical Safety
[6] Mahmuda
[7] Nyarko
[8] World Health Organization

FAO[1]، حداکثر مقادیر مجاز سرب، کادمیوم و جیوه در ماهی به ترتیب برابر با ۳۰۰، ۵۰ و ۵۰۰ میکروگرم بر کیلوگرم است (بنا[2]، ۲۰۲۵).

ماهی شوریده (*Otolithes ruber*) یک ماهی دریایی از خانواده Sciaenidae بوده و یکی از گونه‌های مهم اقتصادی و تجاری در خلیج فارس و دریای عمان است. این گونه بیشتر در آب‌های ساحلی تا عمق ۴۰ متر، در مناطقی با بسترهای گلی و مصب رودخانه‌ها زندگی می‌کند (اسکندری و همکاران، ۲۰۱۲). ماهی شوریده عمدتا از بی مهرگان از جمله لارو ماهی، سخت پوستان (میگو، پاروپایان[3]، جورپایان[4]) و نرم‌تنان کف آب تغذیه می‌کند. دریای عمان در خاورمیانه و جنوب ایران واقع شده است و دارای ویژگی‌های اکولوژیکی و جغرافیایی منحصر به فردی است. این منطقه دائماً تحت تأثیر آلاینده‌های مختلف، به ویژه عناصر کمیاب، قرار دارد. منابع اصلی ورود عناصر کمیاب به دریای عمان، آبزی‌پروری، رواناب سطحی و رسوب (ایجاد شده توسط فرسایش)، نشت نفت به دلیل حمل و نقل دریایی، مراکز دفع زباله و روستاهای مناطق ساحلی است. علاوه بر این، کارخانه‌های کشتی‌سازی و نمک‌زدایی در حاشیه دریای عمان نیز از عوامل مهم ورود آلاینده‌ها به آب هستند. این گونه به طور گسترده در رژیم غذایی مردم محلی استان هرمزگان و سیستان و بلوچستان مورد استفاده قرار می‌گیرد. (صادقی و همکاران، ۲۰۱۹، پورخباز و همکاران، ۲۰۲۳). اگرچه به دلیل فراوانی زیاد و گسترش جهانی ماهی شوریده مطالعات متعددی در مورد زیست‌شناسی آن انجام گرفته است (چراغی و الماسیه، ۲۰۲۴)، ولی مطالعات کمی برای ارزیابی خطر مصرف این ماهی پرمصرف، از نظر فلزات سنگین در خلیج فارس و دریای عمان انجام شده است و اکثر آنها فقط به بررسی فلزات سنگین در بافت‌های مختلف ماهی و همچنین رابطه تجمع فلزات با شاخص‌های بیومتریک پرداخته‌اند (نیری و همکاران، ۲۰۱۵؛ بلوچ و همکاران، ۲۰۱۸؛ خوش بین و پورخباز، ۲۰۲۱). با توجه به مطالب فوق، هدف از مطالعه حاضر بررسی تجمع زیستی فلزات سنگین سرب، کادمیوم، جیوه و روی در کبد و عضله ماهی شوریده چابهار و بندرعباس و ارزیابی ریسک خطر سلامتی این ماهی برای مصرف کنندگان، از طریق محاسبه ریسک خطر غیر سرطانزا و سرطانزا بود. این مطالعه می‌تواند به‌عنوان مبنایی برای سیاست‌گذاری‌های بهداشتی، مدیریت منابع دریایی و آگاهی‌بخشی عمومی در مناطق ساحلی ایران مورد استفاده قرار گیرد.

داده‌ها و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه و نمونه‌گیری

در این مطالعه ۳۰ نمونه ماهی شوریده در فصل پاییز سال ۱۳۹۹ (میانگین وزن ۱۰۲,۵۷ ± ۶۲۳,۰۲ گرم، میانگین طول۴,۲۳ ± ۳۹,۷۶ سانتی‌متر) بطور تصادفی از بازار ماهی فروشان که صید روزانه خود را روانه بازار میکردند از اسکله تیس، در شهرستان چابهار، استان سیستان و بلوچستان و ۳۰ نمونه ماهی شوریده (میانگین وزن ۸۸,۳۷ ± ۲۳۸,۰۱ گرم، طول ۳,۱۲ ± ۳۳,۰۳ سانتی‌متر) از بازار ماهی فروشان شهرستان بندرعباس در استان هرمزگان تهیه شد. ماهی‌ها با استفاده از تور گوشگیر استاندارد که سبب کاهش آسیب فیزیکی به ماهی می‌شود صید شدند. حجم

[1] Food and Drug Administration
[2] Banna
[3] copepods
[4] isopods

نمونه با استناد به پژوهش‌های معتبر گذشته انتخاب شد (تاهیتی[1] و همکاران، ۲۰۲۰؛ نیری و همکاران، ۲۰۱۵). نمونه‌ها بصورت جداگانه در کیسه‌های پلاستیکی استریل قرار داده شدند و سپس در جعبه‌های یونولیت حاوی یخ خورد شده بلافاصله به آزمایشگاه منتقل شدند تا از تغییرات شیمیایی و فساد جلوگیری شود. بعد از انتقال نمونه‌ها به آزمایشگاه، سطح خارجی نمونه‌ها با آب دو بار تقطیر شستشو داده شد تا آلودگی‌های احتمالی حذف شوند. بعد از خروج کامل آب اضافی، طول ماهی با دقت ۱ میلی‌متر و وزن ماهی‌ها با ترازوی دیجیتال با دقت ۰,۰۱ گرم به دقت اندازه‌گیری شد. بافت عضله و کبد ماهیان بوسیله تیغه استیل استریلیزه از اسکلت جدا شد و سپس نمونه‌های بافت جدا شده به کیسه های پلاستیکی استریل کد گذاری شده منتقل شده و تا زمان شروع آزمایش‌ها در فریزر منفی ۲۰ درجه سانتیگراد نگهداری شدند (کشاورزی و همکاران، ۲۰۱۸).

معرف ها

کلیه مواد شیمیایی مورد استفاده گرید آزمایشگاهی داشته و نیازی به تخلیص بیشتر نداشتند. اسید نیتریک (HNO_3, 65% w/v) و پراکسید هیدروژن (H_2O_2) از شرکت مرک آلمان تهیه شدند. برای تهیه محلول‌ها از آب دو بار تقطیر (با کیفیت ۱۸,۲ MΩ.cm) استفاده شد. برای تهیه استاندارد فلز سنگین از نمک کلرید فلزات سنگین سرب، کادمیوم، جیوه و روی با درجه خلوص تجزیه‌ای (مرک) استفاده شد. برای پیشگیری از آلودگی، ظروف شیشه‌ای و ظروف هضم با مواد شوینده آغشته شده، در محلول ۱۰٪ (v/v) HNO_3 به مدت یک شب غوطه ور شدند، بعد از آبکشی کامل، دوباره به مدت ۲۴ ساعت در آب دو بار تقطیر غوطه ور شده و سپس خشک شدند و در ظروف پلی پروپیلن دربسته نگهداری شدند. تست‌های بازیابی برای بررسی صحت داده‌ها به روش استاندارد انجام شد (حسین و همکاران، ۲۰۲۲). نرخ بازیابی نمونه ها بین ۹۴ تا ۱۰۳ درصد بود.

آماده‌سازی نمونه‌ها و تعیین عناصر کمیاب در بافت

نمونه‌های خشک شده با استفاده از هاون چینی به طور کامل آسیاب شدند. سپس برای آماده‌سازی نمونه‌ها برای خوانش غلظت فلزات توسط دستگاه جذب اتمی، ۰/۵ گرم از بافت کبد و ۰/۵ گرم عضله از هر نمونه جدا شد و پس از توزین توسط ترازوی دیجیتال به ارلن مایر ۵۰ میلی‌لیتری منتقل شد. سپس در زیر هود لامینار با استفاده از پیپت، مقدار ۷ میلی‌لیتر HNO_3 ٪۶۵ و ۱ میلی‌لیتر H_2O_2 ٪۳۰ به هر نمونه اضافه شد. سپس، درب ظروف محکم بسته شد و نمونه‌های موردنظر برای هضم اسیدی به دستگاه ماکروویو(Mileston, Model: ETHOS 1000 W) با دمای ۱۴۰ درجه سانتیگراد به مدت ۱ ساعت منتقل شدند تا هضم اسیدی تکمیل شود و محلول شفافی حاصل شود. پس از اتمام هضم، نمونه‌ها زیر هود در دمای محیط قرار داده شدند تا سرد شوند. پس از سرد شدن، نمونه‌ها با استفاده از کاغذ صافی واتمن شماره ۴۲ فیلتر شده و با آب دو بار تقطیر به حجم ۵۰ میلی‌لیتر رسانده شدند (میری و همکاران، ۲۰۱۷). نمونه‌های آماده شده تا زمان اندازه‌گیری با دستگاه در یخچال نگهداری شدند. اندازه‌گیری غلظت فلزات سنگین در نمونه‌ها با اسپکتروفتومتر جذب اتمی ICP-OES (Perkin Elmer , Model; Optima DV 2000) و غلظت فلز جیوه با روش جذب اتمی (novAA 400P, analytikjena) انجام شد. خوانش غلظت فلزات سنگین سه بار توسط دستگاه انجام شد. اعتبارسنجی روش هضم و خوانش جذب اتمی با آنالیز مواد مرجع تایید شده (NRCC-DORM-2 Dogfish Muscle) انجام شد. برای نمونه‌های ماهی، حدود تشخیص (LOD) [2] ۰,۰۰۱ برای کامیوم، سرب ۰,۰۰۵،

[1] Tahity
[2] limits of detection

جیوه ۰،۰۰۱ و برای روی ۰،۰۵ میکروگرم بر گرم گزارش شد. غلظت عناصر کمیاب بر حسب میکروگرم بر گرم وزن خشک بیان شد. تمامی مراحل فوق در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه سیستان وبلوچستان و آزمایشگاه مرکزی اداره کل دامپزشکی هرمزگان-بندرعباس انجام شده است.

ارزیابی ریسک خطر سلامتی[1]

بر اساس USEPA [2] (۱۹۸۹)، میزان دریافت روزانه تخمینی[3] (EDI) و میزان دریافت هفتگی تخمینی[4] (EWI) فلزات سنگین (Pb, Cd, Hg, Zn) بر اساس معادلات زیر تعیین شد (وارول[5] و همکاران، ۲۰۱۷):

$$EDI\ (\mu g/\ kg\ bw/day) = MC \times FDC/BW \quad (۱)$$

$$EWI\ (\mu g/\ kg\ bw/Week) = EDI \times 7 \quad (۲)$$

که MC[6] میانگین غلظت فلزات سنگین ($mg\ kg^{-1}$) در بافت عضله ماهی است. FDC[7]، میانگین مصرف روزانه ماهی توسط انسان (g/person/day) که در ایران ۲۵/۲ g/person/day است (سازمان شیلات ایران (IFO)[8]، ۲۰۱۵؛ صادقی و همکاران، ۲۰۱۹) BW[9]، وزن بدن که برای بزرگسالان برابر ۷۰ کیلوگرم در نظر گرفته می‌شود. مقادیر EDI فلزات با مقادیر دریافت روزانه قابل تحمل (TDI)[10] پیشنهاد شده توسط کمیته مشترک FAO/WHO در مورد افزودنی‌های غذایی مقایسه شد (وارول و همکاران، ۲۰۱۷).

روش توصیه شده توسط USEPA، (۲۰۰۰) برای تعیین حد مجاز مصرف ماهی اتخاذ شد. در این روش، سطوح فلزات در بافت‌های خوراکی ماهی و دوزهای مرجع (RfD) را می‌توان در معادله ۳ پیاده‌سازی کرد تا میزان مجاز مصرف ماهی در یک دوره زمانی مشخص محاسبه شود. RFD دوز مرجع خوراکی برای هر فلز سنگین است که مقدار آن برای Pb، Cd، Hg و Zn به ترتیب برابر با ۰،۰۰۴، ۰،۰۰۱، ۰،۰۰۰۱ و ۰،۳ ($\mu g\ g^{-1}/day$) است. دوز مرجع خوراکی تخمینی از قرار گرفتن در معرض روزانه را نشان می‌دهد که جمعیت انسانی ممکن است به طور مداوم در طول عمر در معرض آن قرار گیرند بدون اینکه خطر قابل ملاحظه‌ای از اثرات مضر وجود داشته باشد (وارول و همکاران، ۲۰۱۷؛ نوروزی، ۲۰۲۰؛ هاشم‌پور بلتورک[11] و همکاران، ۲۰۲۳). از معادلات ۳ و ۴ به ترتیب برای محاسبه فراوانی حد مجاز مصرف ماهی در روز و در ماه استفاده شد. (مجلسی و همکاران، ۲۰۱۸)

$$CR(Lim)\ (\ kg/day) = RfD \times BW/C \quad (۳)$$

که CR_{Lim} حد مجاز مصرف ماهی (کیلوگرم در روز)، RFD دوز مرجع خوراکی، BW، وزن بدن انسان (۷۰ کیلوگرم) و C میانگین غلظت فلزات سنگین ($mg\ kg^{-1}$) در بافت عضله ماهی است.

$$CR(mm) = CR(Lim) \times Tap/MS \quad (۴)$$

[1] Health risk assessment
[2] United States Environmental Protection Agency
[3] Estimated daily intake
[4] Estimated weekly intake
[5] Varol
[6] mean concentration
[7] food daily consumption
[8] Iran Fisheries Organization
[9] body weight
[10] Tolerable daily intakes
[11] Hashempour-baltork

که CR_{mm} میزان مجاز مصرف ماهی (بار در ماه)، Tap میانگین دوره زمانی (۴,۳ هفته معادل ۳۰,۱ روز)، و MS مقدار هر وعده غذایی است که در این مطالعه برابر ۱۷۶,۴ گرم ماهی در هفته در نظر گرفته شده است.

تعیین ضریب خطر هدف (THQ)[1]

خطر غیر سرطان‌زایی مرتبط با مصرف ماهی با استفاده از فرمول (THQ) معادله (۵) محاسبه می‌شود که نسبت بین دوز تخمینی آلاینده و دوز مرجع[2] (RFD) است.

$$THQ = \frac{EF \times ED \times FIR \times C}{BW \times AT \times RFD} \times 10^{-3} \quad (۵)$$

EF[3] فرکانس مواجهه با فلز سنگین است (۳۶۵ روز در هر سال)، ED[4] مدت زمان در معرض قرار گرفتن است (۷۰ سال)، FIR[5] میزان مصرف ماهی (روزانه ۲۵,۲ گرم برای هر نفر درجمعیت ایران است). C غلظت فلز سنگین در ماهی ($\mu g\ g^{-1}$)، BW، وزن بدن (۷۰ کیلوگرم)، AT[6] میانگین مدت زمان قرار گرفتن در معرض اثرات غیر سرطان‌زا است (ED ×365) و RFD دوز مرجع خوراکی برای هر فلز سنگین است. اگر مقدار THQ کمتر از ۱ باشد، بعید است که جمعیت در معرض اثرات نامطلوب آشکاری را تجربه کنند. اگر $THQ \geq 1$ باشد، ریسک خطر سلامتی بالقوه وجود دارد و مداخلات و اقدامات حفاظتی مربوطه باید انجام شود (وارول و همکاران، ۲۰۱۷). از آنجاکه غالبا انسان در معرض بیش از یک آلاینده قرار دارد و تحت تاثیر اثرات ترکیبی یا تعاملی قرار می‌گیرد، مقدار THQ کل[7] (همچنین شاخص خطر[8] HI نامیده می‌شود) نیز با استفاده از معادله (۶) محاسبه شد.

$$TTHQ = THQ\ (Pb) + THQ\ (Hg) + THQ\ (Cd) + THQ\ (Zn) \quad (۶)$$

ریسک خطر سرطانزایی (CR)[9]

برای ترکیبات سرطان‌زا، خطرات به عنوان احتمال افزایشی ابتلای افراد به سرطان در طول زندگی به دلیل قرار گرفتن در معرض یک ترکیب سرطان‌زای بالقوه برآورد شد (وارول و همکاران، ۲۰۱۷؛ نیارکو و همکاران، ۲۰۲۳). ریسک خطر سرطانزایی ناشی از ورود خوراکی فلزات سنگین از معادله (۷) محاسبه شد:

$$CR = \frac{EF \times ED \times FIR \times CSF \times C}{BW \times AT} \times 10^{-3} \quad (۷)$$

که CSF[10] فاکتور شیب سرطانزایی برای هر فلز سنگین است که مقدار آن برای Pb، Cd و Hg به ترتیب برابر ۰,۳۸، ۰,۰۰۸۵ (گابیائی و بائیسا[11]، ۲۰۲۰) و ۶,۱۷۷ $\mu g\ g^{-1}/day$ است (هاشم پور بلتورک و همکاران، ۲۰۲۳). اگر میزان CR کمتر از 10^{-6} باشد، یعنی مصرف ماهی با ریسک خطر سرطانزا همراه نیست. سطوح قابل قبول خطر ابتلا به سرطان در طول زندگی از 10^{-4} تا 10^{-6} است. ولی اگر ریسک خطر سرطانزایی بیش از 10^{-4} ($CR>10^{-4}$) بود، نشان دهنده ریسک خطرناک بروز سرطان در طول زندگی است (وارول و همکاران، ۲۰۱۷).

[1] Target Hazard Quotients
[2] Oral reference dose
[3] exposure frequency
[4] exposure duration
[5] food ingestion rate
[6] average exposure time
[7] Total target hazard quotient
[8] Hazard index
[9] carcinogenic risk
[10] Human cancer slope factor
[11] Gebeyehu & Bayissa

آنالیز آماری

تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم افزار SPSS نسخه ۲۶ انجام شد. برای بررسی نرمال بودن داده‌ها، از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف[1] استفاده شد. در صورت توزیع نرمال داده‌ها، تفاوت آماری بین گروه‌ها با استفاده از آزمون t وابسته نمونه تعیین می‌شود. در بررسی همبستگی بین دو متغیر کمی، برای داده‌های با توزیع نرمال از آزمون پارامتری پیرسون[2] و برای داده‌های غیر نرمال از آزمون همبستگی اسپیرمن[3] استفاده شد. سطح معنی‌داری آماری $p < 0.05$ در نظر گرفته شد.

یافته‌های تحقیق

غلظت فلزات سنگین در نمونه‌ها

میانگین و دامنه‌ی غلظت فلزات سنگین Cd، Pb، Hg و Zn در کبد و عضله *Otolithes ruber* در جدول ۱ ارائه شده است. همچنین میانگین غلظت‌های اندازه‌گیری شده در نمونه‌ها با حداکثر غلظت مجاز توصیه شده توسط FAO، WHO، FAD[4] و MAFF[5] مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهند که غلظت فلزات سنگین در نمونه‌های اسکله تیس چابهار به طور معنی‌داری بیشتر از نمونه‌های بندر عباس در استان هرمزگان است ($p<0.05$) و همچنین غلظت این عناصر در بافت کبد بیش از بافت عضله نمونه‌های هر دو ایستگاه است که این اختلاف از نظر آماری معنی‌دار نمی‌باشد ($p>0.05$). بیشترین غلظت مربوط به فلز Zn در بافت کبد ماهی چابهار (۹۷/۹۰ ± ۱۰/۱۷ µg g^{-1}) و کمترین غلظت مربوط به Pb در بافت عضله نمونه‌های بندرعباس (۰/۰۳۰ ± ۰/۰۱ µg g^{-1}) بود. به طور کلی غلظت فلزات سنگین در بافت کبد و عضله نمونه‌های چابهار از این رابطه تبعیت می‌کنند: Zn>Cd>Pb>Hg در حالیکه در مورد نمونه‌های بندرعباس غلظت فلزات مورد بررسی بصورت Cd>Hg>Pb بود. میانگین غلظت کادمیوم و سرب در نمونه‌های چابهار بطور معنی‌داری بالاتر از نمونه‌های بندرعباس بود ($p<0.05$) ولی این اختلاف در مورد جیوه معنی‌دار نبود ($p=0.06$). نتایج نشان می‌دهند که میانگین غلظت Cd در نمونه‌های چابهار (۰/۱۲ ± ۰/۶۳ میکروگرم بر گرم) بیشتر از حد مجاز توصیه شده توسط FAO (۰,۵ µg g^{-1})، WHO (۰,۵ µg g^{-1}) و MAFF (۰,۲ µg g^{-1}) است ولی از حد مجاز توصیه شده FAD (۴ µg g^{-1}) پایین‌تر می‌باشد. ولی میانگین غلظت Cd در نمونه‌های بندرعباس (۰/۰۲ ± ۰/۰۵ میکروگرم بر گرم) کمتر از ماکزیمم توصیه شده استانداردهای بین المللی است. میانگین غلظت Hg در بافت عضله نمونه‌های مورد مطالعه کمتر از حد مجاز توصیه شده توسط FAO (۰,۵ µg g^{-1})، WHO (۰,۵µg g^{-1}) و FAD (۰,۵ µg g^{-1}-۱) است. همچنین میانگین غلظت Pb و Zn نیز در نمونه‌های مورد مطالعه، کمتر از حد مجاز توصیه شده توسط نهادهای بین المللی می‌باشد (جدول ۱).

[1] Kolmogorov-Smirnov
[2] Pearson Test
[3] spearman correlation test
[4] Food and Drug Administration
[5] Ministry of Agriculture, Fisheries and Food

جدول ۱: میانگین غلظت فلزات سنگین در بافت کبد و عضله ماهی شوریده (میکروگرم بر گرم)

محل نمونه برداری	نوع بافت		کادمیوم	جیوه	سرب	روی
اسکله تیس (چابهار)	عضله	میانگین ± انحراف معیار	۰/۱۲ ± ۰/۶۳*	۰/۰۱۹ ± ۰/۰۹۷	۰/۱۰ ± ۰/۴۸*	۷/۰۴ ± ۲۴/۲۲
		حداکثر	۱,۴۰	۰,۳۵	۰,۸۳	۳۷,۲۰
		حداقل	۰,۱۰	۰,۰۰	۰,۰۰	۴,۰۵
	کبد	میانگین ± انحراف معیار	۰/۳۵ ± ۰/۸۰	۰/۰۲۶ ± ۰/۰۹۸	۰/۲۷ ± ۰/۵۶	۱۰/۱۷ ± ۹۷/۹۰
		حداکثر	۱,۵۲	۰,۳۸	۱,۲۰	۱۱۸,۱۲
		حداقل	۰,۱۵	۰,۰۱	۰,۰۹	۱۲,۵۳
بندرعباس	عضله	میانگین ± انحراف معیار	۰/۰۲ ± ۰/۰۵*	۰/۰۱۲ ± ۰/۰۳۴	۰/۰۱ ± ۰/۰۳۰*	شناسایی نشده
		حداکثر	۰,۷۴	۰,۲۶۲	۰,۲۲	شناسایی نشده
		حداقل	۰,۰۰	۰,۰۰۲	۰,۰۱	شناسایی نشده
	کبد	میانگین ± انحراف معیار	۰/۰۳ ± ۰/۰۷	۰/۰۱۹ ± ۰/۰۴۵	۰/۰۲ ± ۰/۰۴۱	شناسایی نشده
		حداکثر	۰,۸۱	۰,۲۹۰	۰,۳۱	شناسایی نشده
		حداقل	۰,۰۰	۰,۰۰۲	۰,۰۱	شناسایی نشده
FAO¥ (2000)			۰,۵	۰,۵	۲	۳۰ǂ
WHO¥ (2000)			۰,۵	۰,۵	۰,۵	۴۰**
MAFF# (2000)			۰,۵	۰,۳	۲	۵۰
FDA¥ (2001)			۴	۱-۰,۵	۱,۷	شناسایی نشده

* اختلاف بین میانگین غلظت کادمیوم و سرب بین نمونه های چابهار و هرمزگان از نظر آماری معنی دار است ($p<0.05$).

¥حسینی و همکاران، ۲۰۱۵؛ عسکری ساری و همکاران، ۲۰۱۲

تاهیتی و همکاران، ۲۰۲۰

ǂ FAO، ۱۹۸۳

** WHO، ۱۹۸۹

بررسی همبستگی بین غلظت فلزات سنگین با وزن ماهی شوریده

به منظور بررسی همبستگی بین غلظت فلزات سنگین با وزن ماهی شوریده، نرمال بودن داده‌ها با آزمون کولموگروف-اسمیرنوف بررسی شد. با بررسی آزمون کولموگروف-اسمیرنوف مشخص شد که وزن نمونه‌های ماهی شوریده چابهار و فلزات مورد بررسی دارای توزیع نرمال بوده ولی داده‌های نمونه های بندرعباس توزیع نرمال ندارند. نتایج حاصل از همبستگی فلزات سنگین مورد مطالعه با وزن ماهی نشان داد که بین میانگین غلظت فلزات Cd، Pb، Hg و Zn همبستگی معنی‌داری با وزن ماهی شوریده در دو منطقه مورد مطالعه مشاهده نمی‌شود (جدول ۲ و جدول ۳).

جدول ۲: ارتباط غلظت فلزات سنگین با وزن ماهی شوریده اسکله تیس در چابهار

فلز سنگین	عضله		کبد	
	ضریب همبستگی	ارزش p	ضریب همبستگی	ارزش p
کادمیوم	۰,۰۹۸	۰,۶۰۷	۰,۰۹۸	۰,۶۰۷
جیوه	۰,۱۱۳	۰,۵۵۳	۰,۰۹۳	۰,۶۲۶
سرب	-۰,۰۶۰	۰,۷۵۲	-۰,۰۷۲	۰,۷۰۴
روی	۰,۰۳۱	۰,۸۰۷	-۰,۱۴۶	۰,۴۴۱

جدول ۳: ارتباط غلظت فلزات سنگین با وزن ماهی شوریده بندرعباس

فلز سنگین	عضله		کبد	
	ضریب همبستگی	ارزش p	ضریب همبستگی	ارزش p
کادمیوم	---	---	-۰,۱۷۷	۰,۳۵۰
جیوه	-۰,۰۰۲	۰,۹۹۳	---	---
سرب	---	---	---	---

ارزیابی ریسک خطر

میزان مصرف روزانه و هفتگی تخمینی فلزات سنگین در جدول ۴ گزارش شده است. نتایج نشان می‌دهند که در مقایسه با میزان مصرف روزانه قابل تحمل (TDI)، میزان مصرف روزانه تخمینی همه فلزات بررسی شده کمتر از میزان مصرف روزانه قابل تحمل است.

جدول ۴: میزان مصرف روزانه تخمینی (EDI) و هفتگی تخمینی (EWI) کادمیوم، جیوه، سرب و روی

محل نمونه برداری		کادمیوم	جیوه	سرب	روی
اسکله تیس (چابهار)	EDI	۰,۲۳	۰,۰۳	۰,۱۷	۸,۷۱
	EWI	۱,۶۱	۰,۲۱	۱,۱۹	۶۰,۹۷
بندرعباس	EDI	۰,۰۲	۰,۰۱	۰,۰۱	شناسایی نشده
	EWI	۰,۱۴	۰,۰۷	۰,۰۷	شناسایی نشده
میزان مصرف روزانه قابل تحمل*		۰,۸	۰,۵۷	۱,۵	۳۰۰

*(TDI) وارول و همکاران، ۲۰۱۷، صادقی و همکاران، ۲۰۱۹

نتایج مربوط به حد مجاز مصرف ماهی در روز (CR_{Lim}) و در ماه (CR_{mm}) برای فلزات کادمیوم، جیوه، سرب و روی در ماهی شوریده در جدول ۵ نشان داده شده اند.

جدول ۵: حد مجاز مصرف ماهی در روز (CR_{Lim}) (کیلوگرم در روز) و در ماه (CR_{mm}) (بار در ماه) برای فلزات کادمیوم، جیوه، سرب و روی در ماهی شوریده

محل نمونه برداری	کادمیوم		جیوه		سرب		روی	
	CR_{Lim}	CR_{mm}	CR_{Lim}	CR_{mm}	CR_{Lim}	CR_{mm}	CR_{Lim}	CR_{mm}
اسکله تیس (چابهار)	۰,۱۱	۱۹	۰,۰۷۲	۱۲	۰,۵۸	۹۹	۰,۸۷	۱۴۹
بندرعباس	۱,۴	۲۳۹	۰,۲۰	۳۴	۹,۳۳	۱۵۹۶	شناسایی نشده	شناسایی نشده

با توجه به بالاتر بودن غلظت کادمیوم نسبت به برخی از استانداردهای جهانی در عضله ماهی شوریده چابهار، خطر سرطان‌زایی (CR) و همچنین خطر غیر سرطان‌زایی مرتبط با مصرف ماهی با محاسبه تعیین ضریب خطر هدف (THQ) و ضریب خطر هدف کل (TTHQ) محاسبه شد. نتایج نشان داد که میزان THQ برای فلزات سرب، کادمیوم، جیوه و روی در بافت عضله نمونه‌های چابهار و بندرعباس کمتر از ۱ است. همچنین میزان TTHQ نیز برای فلزات مورد مطالعه در نمونه‌های ایستگاه‌های تحت مطالعه، کمتر از ۱ بدست آمد (جدول ۶).

جدول ۶: ضریب خطر هدف (THQ)، ضریب خطر هدف کل (TTHQ) و خطر سرطان هدف (CR) برای کادمیوم، جیوه، سرب و روی در ماهی شوریده

محل نمونه برداری	ضریب خطر هدف (THQ)				ضریب خطر هدف کل (TTHQ)	خطر سرطان هدف (CR)		
	کادمیوم	جیوه	سرب	روی		کادمیوم	جیوه	سرب
اسکله تیس (چابهار)	۰,۲۲	۰,۳۴	۰,۰۴	۰,۰۳	۰,۶۳	$۸,۶ \times ۱۰^{-۵}$	$۲,۱ \times ۱۰^{-۴}$	$۱,۴ \times ۱۰^{-۶}$
بندرعباس	۰,۰۲	۰,۱۲	۰,۰۰۳	-	۰,۱۴	$۶,۸ \times ۱۰^{-۶}$	$۷,۵ \times ۱۰^{-۵}$	$۹,۱ \times ۱۰^{-۸}$

برای محاسبه احتمال بروز خطر سرطانزای ناشی از مصرف طولانی مدت ماهی‌های آلوده به فلزات سنگین در مصرف‌کنندگان، ریسک خطر سرطانزایی ناشی از ورود خوراکی فلزات سرب، کادمیوم و جیوه تجمع یافته در بافت عضله ماهی محاسبه شد (جدول ۶). نتایج نشان دادند که مقدار CR برای فلز Pb موجود در بافت عضله ماهی بندرعباس ($۹,۱ \times ۱۰^{-۸}$) است. مقدار این پارامتر برای Pb در نمونه‌های چابهار برابر ($۱,۴ \times ۱۰^{-۶}$)، برای Cd در نمونه‌های بندرعباس و چابهار به ترتیب برابر ($۶,۸ \times ۱۰^{-۶}$) و ($۸,۶ \times ۱۰^{-۵}$) و برای Hg در نمونه‌های بندرعباس برابر با ($۷,۵ \times ۱۰^{-۵}$) محاسبه شد. از طرفی میزان CR برای Hg در نمونه‌های چابهار بیش از $۱۰^{-۴}$ ($۲,۱ \times ۱۰^{-۴}$) بدست آمد. ریسک بروز خطر سرطانزایی ناشی از تجمع فلزات سنگین در ماهی شوریده از رابطه Hg > Cd > Pb تبعیت می‌کند.

بحث

همزمان با بالا رفتن مصرف ماهی در دنیا، به علت ارزش تغذیه‌ای بالا و نقش مهم آن در تامین پروتئین‌ها، اسیدهای چرب غیر اشباع مانند امگا ۳ و سایر ریزمغزی‌ها، نگرانی‌های جهانی در مورد احتمال و مخاطرات آلوده شدن آن با مواد شیمیایی خطرناک پایدار مانند فلزات سنگین نیز افزایش یافته است (کاستا و همکاران، ۲۰۲۰؛ پورخباز و همکاران، ۲۰۲۳). فلزات سنگین به علت سمیت بالا، پایداری و خاصیت تجزیه ناپذیری آنها در زنجیره غذایی، به چالشی مهم در محیط‌های آبی تبدیل شده‌اند (نیارکو و همکاران، ۲۰۲۳). موجودات دریایی، به ویژه ماهی‌ها، آلاینده‌ها را از محیط آبی جمع می‌کنند و بنابراین ماهی‌ها شاخص خوبی برای پایش فلزات سنگین در سیستم‌های آبی محسوب می‌شوند (هاشم‌پور بلتورک و همکاران، ۲۰۲۳). بطور کلی تجمع فلزات سنگین در آبزیان سبب کاهش رشد، تغییرات رفتاری و ژنتیکی شده که می‌تواند در نهایت منجر به مرگ آنها گردد (زینب[1] و همکاران، ۲۰۲۲). منطقه چابهار و هرمزگان به‌دلیل موقعیت استراتژیک ساحلی و نزدیکی به آب‌های آزاد، میزبان طیف وسیعی از فعالیت‌های صنعتی، تجاری و دریایی است که می‌توانند منجر به ورود فلزات سنگین به محیط زیست دریایی شوند. از مهم‌ترین منابع بالقوه آلودگی فلزات سنگین در این مناطق می‌توان به فعالیت‌های بندری و کشتیرانی، صنایع

[1] Zaynab

پتروشیمی و پالایشگاه‌ها، فعالیت‌های کشاورزی و زهکشی، شرایط زمین‌شناسی و رسوبات طبیعی و توسعه شهری و تخلیه فاضلاب‌های خانگی و صنعتی اشاره کرد. با توجه به ماهیت تجمع‌پذیر فلزات سنگین در بافت‌های زیستی، ماهی شوریده نیز در معرض خطر بالایی برای جذب این فلزات قرار دارد. تجمع فلزات سنگین در ماهی‌ها نتیجه فرآیندهای پیچیده‌ای است که شامل جذب، انتقال، و ذخیره‌سازی این عناصر در بافت‌های مختلف بدن می‌شود. مکانیسم های اصلی عبارتند از: جذب از طریق آبشش‌ها و دستگاه گوارش،که فلزات سنگین موجود در آب یا رسوبات از طریق آبشش‌ها یا مصرف طعمه آلوده وارد بدن ماهی می‌شوند. پس از جذب، فلزات سنگین از طریق جریان خون به اندام‌های مختلف مانند کبد، کلیه، و عضلات منتقل می‌شوند. کبد به‌عنوان اندام اصلی سم‌زدایی، نقش مهمی در تجمع و متابولیسم فلزات دارد. فلزات سنگین به‌دلیل خاصیت لیپوفیلیک یا تمایل به اتصال به پروتئین‌ها، در بافت‌های خاصی مانند عضله و کبد تجمع می‌یابند. این تجمع می‌تواند تحت تأثیر عواملی مانند سن، اندازه، گونه، و موقعیت تغذیه‌ای ماهی باشد (سینک و شارما[1]، ۲۰۲۴).

جیوه (Hg)

جیوه یکی از خطرناکترین آلاینده‌ها به شمار می‌آید که می‌تواند از طریق فرسایش یا آتشفشان به اکوسیستم‌ها برسد. فعالیت‌های انسانی مانند ذوب فلزات، تولید ذغال سنگ، دفع زباله و سنتز شیمیایی نیز می‌تواند سبب آلودگی محیط زیست با جیوه شود (کاستا و همکاران، ۲۰۲۰). یکی از مهمترین دلایل آلودگی آب‌ها با جیوه، گسترش صنایع مربوط به نفت است (رضایی و همکاران، ۲۰۱۱). آلودگی ماهیان با جیوه و مشتقات آن نظیر متیل جیوه (MeHg) سبب نقص در اندام‌های مهم ماهی مانند سر، تشکیل باله‌های غیر طبیعی و نامنظم، تغییر شکل یا تشکیل نشدن دم، بروز مشکل در شکل‌گیری عدسی، از بین رفتن سلول‌های خاکستری در چشم جنین و در نهایت موجب مرگ ماهی می‌شود (پورخباز و همکاران، ۲۰۲۳). جیوه حتی در غلظت‌های پایین نیز برای سلامت انسان بسیار سمی تلقی می‌شود. متیل جیوه (MeHg) مضرترین شکل جیوه است و می‌توان آن را در قسمت‌های خوراکی ماهی یافت. متیل جیوه مشتق شده از خوردن ماهی به راحتی در دستگاه گوارش جذب می‌شود و به دلیل حلالیت در چربی، می‌تواند به راحتی از هر دو سد جفتی و خونی-مغزی عبور کند. جیوه میل ترکیبی بالایی با گروه‌های سولفیدریل در پروتئین‌ها داشته و تمایل به تجمع در موجودات زنده دارد و میزان دفع آن بسیار کم است. بخش عمده‌ای از آنچه جذب می‌شود در کلیه‌ها، بافت عصبی و کبد تجمع می‌یابد (تچونوو[2] و همکاران، ۲۰۱۲). در پستانداران، آلودگی جیوه مغز را هدف قرار می‌دهد و باعث مشکل در حرکت، کاهش بینایی، لامسه، لرزش، از دست دادن هوشیاری و در نهایت مرگ می‌شود. در زنان باردار، متیل جیوه به محض ورود به خون، به راحتی از طریق جفت به جنین منتقل می‌شود و منجر به مجموعه‌ای از مشکلات عصبی - حرکتی، گفتاری و عقب‌ماندگی ذهنی می‌شود. با این وجود، خطر مرتبط با مصرف ماهی، به میزان ماهی مصرف شده، شرایط فرد مصرف کننده و گونه ماهی بستگی دارد (کاستا و همکاران، ۲۰۲۰؛ زینب و همکاران، ۲۰۲۲)

در مطالعه حاضر میانگین غلظت جیوه در کبد و عضله ماهی شوریده اسکله تیس در چابهار برابر با ۰/۰۲۶ ± ۰/۰۹۸ و ۰/۰۱۹ ± ۰/۰۹۷ و در کبد و عضله ماهی شوریده بندرعباس برابر با ۰/۰۱۹ ± ۰/۰۴۵ و ۰/۰۱۲ ± ۰/۰۳۴ $\mu g\ g^{-1}$ بود. ارتباط بین اندازه جانوران دریایی با محتوای فلزات در بافت ها بخوبی شناخته شده است. به خصوص، این شواهد

[1] Singh & Sharma
[2] Tchounwou

به طور کلی برای جیوه در حیوانات دریایی سازگار است (نیری و همکاران، ۲۰۱۵). در این مطالعه اندازه و وزن نمونه‌های چابهار بیشتر از نمونه‌های بندرعباس بود که می‌تواند دلیل بالاتر بودن میانگین غلظت فلزات سنگین در نمونه‌های چابهار نسبت به نمونه‌های بندرعباس باشد. اکثر بافت‌های ماهی به سمیت ناشی از افزایش غلظت فلزات سنگین حساس هستند. از آنجا که بافت کبد نقش کلیدی در متابولیسم و سم زدایی ایفاء می‌کند، به عنوان یک شاخص مناسب برای مواجهه طولانی مدت با فلزات سنگین در نظر گرفته می‌شود. تفاوت در میانگین غلظت تجمع فلزات سنگین در بافت‌های مختلف ممکن است به دلیل تفاوت در عملکرد فیزیولوژیکی و متابولیسم سلولی هر بافت باشد. مطالعات مختلف نشان داده‌اند که تجمع فلزات سنگین در بافت عضله کمتر از سایر بافت‌ها است (عسکری ساری و همکاران، ۲۰۱۲؛ صادقی و همکاران، ۲۰۱۹) میانگین غلظت جیوه در بافت عضله نمونه‌های چابهار و بندرعباس کمتر از حد مجاز تعیین شده توسط WHO، FAO و FAD است. در مطالعه‌ی رضایی و همکاران (۲۰۱۱) میانگین غلظت جیوه در بافت کبد و بافت خوراکی ماهی شوریده خلیج فارس به ترتیب ۰/۱۷۴ ± ۰/۱۶۷ و ۰/۲۷ ± ۰/۳۴۸ $\mu g\ g^{-1}$ بود که اگرچه پایین تر از حد مجاز استانداردهای جهانی است، ولی از نتایج مطالعه ما بالاتر است. همچنین در مطالعه مذکور غلظت جیوه در بافت کبد کمتر از بافت‌های خوراکی ماهی شوریده گزارش شد. در مطالعه عسکری ساری و همکاران، ۲۰۱۲، میانگین غلظت جیوه در عضله ماهی شوریده بندرعباس و آبادان به ترتیب ۰/۰۵۸±۰/۰۰۱ و ۰/۰۵۶±۰/۰۰۷ میکروگرم بر گرم گزارش شد، که از نتایج غلظت جیوه در عضله بندرعباس کمی بالاتر بوده ولی از نتایج غلظت جیوه در عضله ماهی چابهار کمتر است. در مطالعه پورخباز و همکاران (۲۰۲۳)، میانگین غلظت جیوه در کبد و عضله ماهی شوریده بندر کنارک به ترتیب ۰/۰۴ و ۰/۰۱ $\mu g\ g^{-1}$، و میانگین غلظت جیوه در بافت کبد و عضله ماهی شوریده خلیج پزم به ترتیب ۰/۰۳ و ۰/۰۱۳ $\mu g\ g^{-1}$ گزارش شد که پایین تر از حد استانداردهای سازمان های بین المللی WHO، FAO و FAD بود که از این نظر با نتایج مطالعه ما همخوانی دارد. همچنین غلظت جیوه در کبد و عضله ماهی کوتر (*Sphyraena forsteri*) بندر کنارک به ترتیب ۰/۰۴ و ۰/۰۱ $\mu g\ g^{-1}$ و در بافت کبد و عضله ماهی کوتر خلیج پزم نیز ۰/۰۳ و ۰/۰۱۳ $\mu g\ g^{-1}$ گزارش شد. در مطالعه حسینی و همکاران (۲۰۱۵)، میانگین غلظت جیوه در کبد و عضله ماهی شوریده سواحل خوزستان به ترتیب ۰/۰۶ ± ۰/۸۲ و ۰/۰۳ ± ۰/۲۳ بدست آمد که از نتایج مطالعه حاضر فراتر رفته است. همچنین میانگین غلظت جیوه در بافت عضله ماهی شوریده عرضه شده در بازار ماهی فروشان همدان ۰/۰۲۶ ± ۰/۰۳۰ $\mu g\ g^{-1}$ گزارش شد که از حد مجاز توصیه شده توسط FAO و WHO کمتر بود که با نتایج مطالعه حاضر در بندرعباس مطابقت دارد ولی از میانگین غلظت جیوه در بافت عضله نمونه‌های چابهار کمتر است (طیبی و همکاران، ۲۰۱۱). از طرفی میانگین غلظت جیوه در عضله ماهی شوریده در مطالعه حاضر بیشتر از میانگین غلظت جیوه در بافت عضله ماهی شوریده بندر ماهشهر در استان خوزستان (۰/۰۰۰۷ $\mu g\ g^{-1}$) است (نوروزی، ۲۰۲۰). در مطالعه چراغی و الماسیه (۲۰۲۴)، میانگین غلظت جیوه در بافت کبد ماهی شوریده بندر امام خمینی (۰/۱۱۳ ± ۰/۷۱۴) بیشتر از بافت عضله (۰/۰۱۵ ± ۰/۱۱۲) بود و این اختلاف غلظت از نظر آماری معنی‌دار بود. میانگین غلظت جیوه در بافت کبد و بافت خوراکی (*Psettodes erumei*) خلیج فارس به ترتیب برابر ۰/۱۲۲ ± ۰/۱۲۷ و ۰/۰۶۲ ± ۰/۰۷۷ $\mu g\ g^{-1}$ بود (رضایی و همکاران، ۲۰۱۱). همچنین در مطالعه علیزاده و همکاران (۲۰۲۴) میانگین غلظت جیوه در بافت کبد شیرماهی (*Scomberomorus commerson*) صید شده از خلیج چابهار و هرمزگان به ترتیب ۰/۰۵۳ و ۰/۰۳۲ $\mu g\ g^{-1}$ و در بافت عضله این ماهی به ترتیب برابر ۰/۰۱۹ و ۰/۰۰۶ $\mu g\ g^{-1}$ گزارش شد. نتایج مطالعه خشنود و همکاران (۲۰۱۱) نشان داد که میانگین غلظت جیوه در عضله ماهی شوریده (۰/۰۰۲ $\mu g\ g^{-1}$) و شیر ماهی (۰/۰۰۱ $\mu g\ g^{-1}$) صید شده از خلیج فارس

(بوشهر) کمتر از نتایج مطالعه حاضر و همچنین کمتر از حد آستانه FAO/WHO می‌باشد. مقدار جیوه در بافت عضله *Capoeta fusca* تالاب لار زاهدان برابر با ۰/۰۱ ± ۰/۱۲۰ $\mu g\ g^{-1}$گزارش شد که با نتایج مطالعه ما در چابهار همخوانی دارد (مشعوفی و همکاران، ۲۰۲۳). همچنین در مطالعه حاضر بین وزن ماهی و غلظت جیوه رابطه معنی‌داری مشاهده نشد که از این نظر نیز با نتایج مطالعه مشعوفی و همکاران مطابقت دارد. تفاوت در میانگین غلظت فلزات سنگین در ماهیان مطالعه شده در مطالعات مختلف می تواند به علت تفاوت در گونه ماهی، اندازه و عمر آبزی، رفتار غذایی، فصل نمونه برداری، محل نمونه برداری و دقت دستگاه‌های اندازه‌گیری کننده فلزات سنگین باشد (مشعوفی و همکاران، ۲۰۲۳).

سرب (Pb)

سمیت ماهی با سرب مانند جیوه، منجر به نقص در اندام‌های مهم ماهی مانند سر، دم، تشکیل باله‌های غیرطبیعی و نامنظم و مشکلاتی در ستون فقرات می‌شود (تاسلیما[1] و همکاران، ۲۰۲۲). در انسان نیز، قرار گرفتن بیش از حد در معرض سرب می‌تواند منجر به طیف وسیعی از بیماری‌های عصبی، از جمله بیماری آلزایمر، بیماری پارکینسون، اثرات هماتولوژیک، نارسایی کلیه، فشار خون بالا و سرطان شود (وارول و همکاران، ۲۰۱۷). سرب همچنین به عنوان یک عامل مؤثر در مشکلات قلبی عروقی در افراد مبتلا به دیابت شناخته شده است (عبد النبی[2] و همکاران، ۲۰۲۳). علاوه بر این، مطالعات مختلفی نشان داده‌اند که قرار گرفتن در معرض سرب به دلیل تداخل با تعادل هورمون‌های جنسی و تأثیر بر عملکرد طبیعی سیستم تولید مثل، بر رشد فیزیکی کودکان، به ویژه پسران، تأثیر منفی می‌گذارد (ژو[3] و همکاران، ۲۰۲۰). منابع انتشار سرب به محیط زیست از طریق جریان‌های زباله شامل صنایع باتری‌سازی، آبکاری و پرداخت فلزات اسیدی، مهمات‌سازی، تولید تترا اتیل سرب، صنایع سرامیک و شیشه، چاپ، نقاشی، رنگرزی و سایر صنایع می‌شود (ذوالفقاری، ۲۰۱۸).

میانگین غلظت Pb در بافت کبد (۰/۲۷ ± ۰/۵۶ $\mu g\ g^{-1}$) و عضله (۰/۱۰ ± ۰/۴۸ $\mu g\ g^{-1}$) ماهی شوریده اسکله تیس چابهار در مطالعه حاضر بالاتر از میانگین اندازه‌گیری شده در بافت کبد (۰/۰۲ ± ۰/۰۴۱) و عضله (۰/۰۱ ± ۰/۰۳۰) نمونه‌های بندرعباس در استان هرمزگان بود. دلیل این امر می‌تواند بزرگتر بودن اندازه و وزن بالاتر نمونه‌های چابهار نسبت به بندرعباس و تفاوت های فیزیکوشیمیایی آب محل زندگی ماهیان باشد (نیری و همکاران، ۲۰۱۵). با این حال، میانگین غلظت‌های بدست آمده در بافت عضله نمونه‌های چابهار و بندرعباس کمتر از حد مجاز اعلام شده توسط FAO، WHO، MAFF و FAD است. در مطالعه حسینی و همکاران (۲۰۱۵)، میانگین غلظت سرب در کبد و عضله ماهی شوریده سواحل خوزستان به ترتیب برابر ۰/۰۵ ± ۲/۳۱ و ۰/۰۳ ± ۰/۴۵ میکروگرم بر گرم گزارش شد. میانگین غلظت سرب در کبد نمونه های مطالعه مذکور نسبت به مطالعه ما بیشتر است ولی نتایج بافت عضله با نتایج بدست آمده در نمونه‌های چابهار همخوانی دارد. همچنین در مطالعه بلوچ و همکاران (۲۰۱۸) میانگین غلظت سرب در بافت‌های خوراکی ماهی شوریده بلوچستان پاکستان ۰/۵۸۴ میکروگرم بر گرم بود که با نتایج نمونه‌های چابهار همخوانی دارد. در مطالعه دیگری نتایج آنالیز غلظت سرب در کبد و عضله ماهی شوریده به ترتیب برابر با ۰/۰۲۶ و ۰/۰۷۵ میکروگرم بر گرم تعیین شد که تقریبا در محدوده غلظت سرب در نمونه های بندرعباس است ولی بر خلاف نتایج مطالعه حاضر غلظت سرب در عضله بالاتر از کبد بود (سبحان اردکانی و همکاران، ۲۰۱۱). همچنین میانگین

[1] Taslima
[2] Abd Elnabi
[3] Zhou

غلظت سرب در بافت کبد و عضله ماهی شوریده صید شده از شمال خلیج فارس به ترتیب ۰/۱۷ ± ۳/۶۶ و ۰/۰۰ ± ۱/۵۵ میکروگرم بر گرم گزارش شد که از نتایج مطالعه حاضر بالاتر است (نیری و همکاران، ۲۰۱۵). در مطالعه صادقی و همکاران (۲۰۱۹)، میانگین غلظت سرب در بافت کبد (دامنه میانگین غلظت: ۳۸/۲۴-۱۰/۳ میکروگرم بر گرم) و عضله ماهی شوریده (دامنه میانگین غلظت: ۷/۱۵-۱/۸۹ میکروگرم بر گرم) در پنج سایت مختلف دریای عمان اندازه‌گیری شد که این مقادیر در همه سایت ها بطور معنی‌داری از نتایج مطالعه حاضر بالاتر بودند. همچنین غلظت سرب در بافت عضله ماهی شوریده و ماهی کوتر (*Sphyraena forsteri*) صید شده از بندر کنارک در دریای عمان، به ترتیب ۰/۱۹ ± ۰/۸۱ و ۰/۲۳ ± ۰/۶۳ میکروگرم بر گرم و در بافت عضله ماهی شوریده و ماهی کوتر خلیج پزم به ترتیب ۰/۰۶ ± ۰/۳۷ و ۰/۱۷ ± ۰/۴۸ میکروگرم بر گرم گزارش شد که به نتایج مطالعه ما در چابهار نزدیک است (خوش بین و پورخباز، ۲۰۲۱). میانگین غلظت سرب در بافت عضله ماهی شوریده بندر آبادان و هرمزگان به ترتیب برابر ۰/۰۸۷ ± ۰/۶۳۸ و ۰/۰۷۷ ± ۰/۶۶۸ میکروگرم بر گرم گزارش شد که از نتایج نمونه های بندرعباس در مطالعه حاضر بالاتر است (عسکری ساری و همکاران، ۲۰۱۲). در مطالعه خراسانی و همکاران (۲۰۱۳) میانگین غلظت سرب در بافت عضله ماهی شوریده بندر ماهشهر ۰/۴۴۷ گزارش شد که با نتایج بدست آمده از مطالعه حاضر در چابهار همخوانی دارد. در مطالعه عسکری ساری و ولایت زاده (۲۰۱۲)، میانگین غلظت سرب در بافت کبد و عضله ماهی شوریده بندر هندیجان در شمال خلیج فارس به ترتیب برابر ۰/۰۲ ± ۰/۵۵ و ۰/۰۳ ± ۰/۴۷ میکروگرم بر گرم گزارش شد. همچنین میانگین غلظت سرب در بافت کبد و عضله شیرماهی به ترتیب برابر ۰/۰۴ ± ۰/۶۴ و ۰/۰۴ ± ۰/۵۲ میکروگرم بر گرم و در کبد و عضله *Scomberomorus guttatus*، به ترتیب برابر ۰/۰۱ ± ۰/۴۳ و ۰/۰۱ ± ۰/۴۰ میکروگرم بر گرم گزارش شد که در حدود نتایج بدست آمده از مطالعه حاضر در چابهار است. میانگین غلظت سرب در بافت عضله ماهی کپور نقره ای (*Hypophthalmichthys molitrix*) در منطقه سیستان ۰/۲۳ میکروگرم بر گرم گزارش شد که کمتر از حد مجاز FAO، WHO و MAFF بود ولی کمی بالاتر از حد مجاز اتحادیه اروپا (EC) (۰/۲ میکروگرم بر گرم) بود (میری و همکاران، ۲۰۱۷). همچنین در مطالعه علیزاده و همکاران (۲۰۲۴) میانگین غلظت سرب در بافت کبد شیرماهی (*Scomberomorus commerson*) صید شده از خلیج چابهار و هرمزگان به ترتیب ۳/۶۹ و ۰/۰۱ میکروگرم بر گرم و در بافت عضله این ماهی به ترتیب برابر ۲/۳۸ و ۰/۰۱ میگروگرم بر گرم گزارش شد که مقدار سرب در بافت عضله نمونه‌های چابهار از حد مجاز استانداردهای بین المللی فراتر رفته است. همچنین مطالعه مذکور، همبستگی مثبت و معنی‌داری را بین غلظت سرب و وزن ماهی نشان داد که با نتایج مطالعه حاضر در تضاد است. به طور کلی، تجمع فلزات در بافت های جاندار دریایی، به غلظت فلز، زمان قرار گرفتن در معرض فلز، نحوه جذب فلز، شرایط محیطی مانند دمای آب، pH، سختی، شوری و عوامل ذاتی (نوع، سن و عادات غذایی جاندار) بستگی دارد (محمودا و همکاران، ۲۰۲۰).

کادمیوم (Cd)

کادمیوم به طور گسترده در زمینه‌های متنوعی از جمله آبکاری باتری‌ها، رنگدانه‌ها، منسوجات و پوشش‌های فلزی استفاده می‌شود (زینب و همکاران، ۲۰۲۲). کادمیوم برای انسان بسیار سمی است و قرار گرفتن بیش از حد در معرض آن می‌تواند سبب نرمی استخوان (استئومالاسی[1])، کاهش تراکم مواد معدنی استخوان (پوکی استخوان) و ضعیف‌تر شدن استخوان‌ها شود (محمودا و همکاران، ۲۰۲۰). همچنین مقادیر بالای کادمیوم با عوارض کلیوی، ریوی،

[1] Osteomalacia

کبدی، اسکلتی، تولید مثلی و سرطان مرتبط است (وارول و همکاران، ۲۰۱۷). در مطالعه حاضر میانگین غلظت کادمیوم در بافت کبد (۰/۳۵ ± ۰/۸۰ میکروگرم بر گرم) و عضله ماهی شوریده اسکله تیس در چابهار (۰/۱۲ ± ۰/۶۳ میکروگرم بر گرم) بیشتر از میانگین اندازه‌گیری شده در بافت کبد (۰/۰۳ ± ۰/۰۷ میکروگرم بر گرم) و عضله (۰/۰۲ ± ۰/۰۵ میکروگرم بر گرم) نمونه‌های بندرعباس بود. میانگین غلظت‌های بدست آمده در بافت عضله نمونه‌های چابهار بالاتر از حد مجاز اعلام شده توسط FAO، WHO، MAFF بوده ولی از حد مجاز FAD پایین‌تر است. غلظت کادمیوم در نمونه‌های بندرعباس از حد مجاز استانداردهای جهانی پایین‌تر است. بنابراین به نظر می‌رسد که ممکن است مصرف ماهی آلوده به کادمیوم در چابهار، به علت اثر انباشت فلزات سنگین در طول زمان برای مصرف کنندگان، بخصوص کودکان و زنان باردار با خطر سلامتی همراه باشد. در مطالعه حسینی و همکاران (۲۰۱۵)، میانگین غلظت سرب در کبد و عضله ماهی شوریده سواحل خوزستان ۰/۰۸ ± ۰/۶۴ و ۰/۰۴ ± ۰/۲۸ گزارش شد. همچنین میانگین غلظت کادمیوم در کبد و عضله (*Euryglossa orientalis*) به ترتیب ۰/۰۵ ± ۰/۸۳ و ۰/۰۶ ± ۰/۱۵ تعیین گردید. میانگین غلظت کادمیوم در بافت عضله ماهی شوریده بندر آبادان و هرمزگان به ترتیب برابر ۰/۰۳۸ ± ۰/۲۵ و ۰/۰۵۶ ± ۰/۲۷۹ میکروگرم بر گرم گزارش شد که از نتایج نمونه های بندرعباس در مطالعه حاضر بالاتر ولی از نتایج چابهار پایین‌تر است (عسکری ساری و همکاران، ۲۰۱۲). در مطالعه صادقی و همکاران (۲۰۱۹)، میانگین غلظت کادمیوم در بافت کبد (دامنه میانگین غلظت: ۳۱/۴-۳/۳۹ میکروگرم بر گرم) و عضله ماهی شوریده (دامنه میانگین غلظت: ۱۷/۹۴-۵/۲۱ میکروگرم بر گرم) در پنج سایت مختلف دریای عمان اندازه‌گیری شد که این مقادیر در همه سایت‌ها بطور معنی‌داری از نتایج مطالعه حاضر و از آستانه مجاز استانداردهای بین المللی بالاتر بودند. همچنین در مطالعه دیگری غلظت کادمیوم در بافت عضله ماهی شوریده و ماهی کوتر (*Sphyraena forsteri*) صید شده از بندر کنارک در دریای عمان، به ترتیب ۰/۱۴ و ۰/۱۹ میکروگرم بر گرم و در بافت عضله ماهی شوریده و ماهی کوتر خلیج پزم به ترتیب ۰/۰۰۲ و ۰/۰۰ میکروگرم بر گرم گزارش شد که به نتایج مطالعه ما در چابهار کمتر است (خوش بین و پورخباز، ۲۰۲۱). در مطالعه بلوچ و همکاران (۲۰۱۸) میانگین غلظت کادمیوم در بافت‌های خوراکی ماهی شوریده بلوچستان پاکستان ۰/۱۵۴ میکروگرم بر گرم بود که کمی بیشتر از نتایج بندرعباس بوده ولی از نتایج بدست آمده از نمونه های چابهار کمتر است. نتایج مطالعه خشنود و همکاران (۲۰۱۱) نشان داد که میانگین غلظت کادمیوم در عضله ماهی شوریده (۰/۰۰۳ میکروگرم بر گرم) و شیر ماهی (۰/۰۰۳ میکروگرم بر گرم) صید شده از خلیج فارس (بوشهر) بسیار کمتر نتایج مطالعه حاضر و همچنین کمتر از حد آستانه FAO/WHO می‌باشد. در مطالعه میری و همکاران (۲۰۱۷)، میانگین غلظت کادمیوم در بافت خوراکی کپور نقره‌ای (*Hypophthalmichthys molitrix*) صید شده از چاه نیمه در استان سیستان و بلوچستان ۰/۱۵ میکروگرم بر گرم بود که کمتر از حد مجاز FAO، WHO و MAFF بوده ولی بالاتر از حد مجاز اتحادیه اروپا (EC) (۰/۰۵ میکروگرم بر گرم) بود. در مطالعه خراسانی و همکاران (۲۰۱۳) میانگین غلظت کادمیوم در بافت عضله ماهی شوریده بندر ماهشهر ۰/۲۵۰ گزارش شد. همچنین در مطالعه علیزاده و همکاران (۲۰۲۴) میانگین غلظت کادمیوم در بافت کبد شیرماهی (*Scomberomorus commerson*) صید شده از خلیج چابهار و هرمزگان به ترتیب ۳/۹۱ و ۰/۱۲ میکروگرم بر گرم و در بافت عضله این ماهی به ترتیب برابر ۰/۲۶ و ۰/۰۰۸ میگروگرم بر گرم گزارش شد که مانند نتایج مطالعه حاضر، نشان دهنده آلودگی خیلی بالاتر ماهی‌های صید شده از چابهار در مقایسه با هرمزگان است.

روی (Zn)

اگر چه Zn یک عنصر مهم و حیاتی برای رشد و متابولیسم و همچنین کارکرد صحیح برخی آنزیم‌ها در موجودات زنده است، ولی مقادیر بالای Zn ممکن است باعث حالت تهوع، استفراغ، اسهال، آسیب به کلیه و معده، گرفتگی قفسه سینه، بیهوشی، کما یا حتی مرگ ناشی از ادم ریوی و آسیب کبدی شود (محمودا و همکاران، ۲۰۲۰؛ نیارکو و همکاران، ۲۰۲۳). علاوه بر این، آلودگی Zn تأثیر منفی بر موفقیت در تخم‌ریزی و بقای چندین گونه ماهی داشته و همچنین از تشکیل طبیعی و رنگدانه ای اندام‌های مختلف جلوگیری می‌کند (تاسلیما و همکاران، ۲۰۲۲).

در مطالعه حاضر میانگین غلظت Zn در بافت کبد و عضله ماهی شوریده اسکله تیس چابهار به ترتیب برابر با ۱۰/۱۷ ± ۹۷/۹۰ و ۷/۰۴ ± ۲۴/۲۲ میکروگرم بر گرم گزارش شد که از حد مجاز FAO، WHO، MAFF کمتر است. در مطالعه بلوچ و همکاران (۲۰۱۸) میانگین غلظت Zn در بافت‌های خوراکی ماهی شوریده بلوچستان پاکستان ۶۹/۹۴۱ میکروگرم بر گرم بود که از نتایج مطالعه حاضر بالاتر است. همچنین در مطالعه خراسانی و همکاران (۲۰۱۳)، میانگین غلظت Zn در بافت عضله ماهی شوریده بندر ماهشهر ۳۱/۷ میلی گرم بر گرم گزارش شد که از نتایج مطالعه حاضر بالاتر است. نتایج مطالعه خشنود و همکاران (۲۰۱۱) نشان داد که میانگین غلظت Zn در عضله ماهی شوریده (۲/۸۸ میکروگرم بر گرم) و شیر ماهی (۲/۴۷ میکروگرم بر گرم) صید شده از خلیج فارس (بوشهر) بسیار کمتر نتایج مطالعه حاضر و همچنین کمتر از حد آستانه FAO/WHO می‌باشد. در مطالعه عسکری ساری و ولایت زاده (۲۰۱۲)، میانگین غلظت Zn در بافت کبد و عضله ماهی شوریده بندر هندیجان به ترتیب برابر ۰/۲۵ ± ۵/۲۵ و ۰/۳۶ ± ۴/۶۶ میکروگرم بر گرم گزارش شد. همچنین میانگین غلظت Zn در بافت کبد و عضله شیرماهی به ترتیب برابر ۰/۲۰ ± ۸/۳۹ و ۰/۲۰ ± ۷/۸۸ میکروگرم بر گرم و در کبد و عضله *Scomberomorus guttatus*، به ترتیب برابر ۰/۲۶ ± ۷/۱۷ و ۰/۲۸ ± ۶/۵۲ میکروگرم بر گرم گزارش شد که بسیار کمتر از حد استانداردهای بین المللی و همچنین نتایج مطالعه حاضر است. همچنین در مطالعه مرتضوی (۱۹۹۹)، میانگین غلظت Zn در عضله ماهی شوریده و ماهی حلوا سفید (*Pampus argentenus*)، به ترتیب ۱۲/۷۷ و ۱۴/۴۳ میکروگرم بر گرم گزارش شد که از نتایج مطالعه حاضر کمتر است. در مطالعه مشعوفی و همکاران میانگین غلظت Zn در عضله (*Capoeta fusca*) تالاب لار زاهدان، ۴/۲۴ ± ۷۰/۱۸۳ میکروگرم بر گرم گزارش شد که از نتایج مطالعه حاضر بالاتر بوده ولی از حد استاندارد NHMRC (۱۵۰ میکروگرم بر گرم) پایین‌تر است (مشعوفی و همکاران، ۲۰۲۳). در مطالعه ای که در ترکیه انجام شد، میانگین غلظت فلز Zn در بافت خوراکی ده گونه مختلف ماهی در دریای سیاه ترکیه بین ۳۸/۸ تا ۹۳/۴ میکروگرم بر گرم متغیر بود که بیشتر از نتایج مطالعه ما می باشد (تیزن[1]، ۲۰۰۹). در مطالعه جانادله و کاردانی[2] (۲۰۱۶)، میانگین غلظت Zn در بافت کبد و عضله ماهی کپور معمولی (*Cyprinus Carpio*) صید شده از رودخانه کرخه، به ترتیب ۲۷/۱۱ و ۲۲/۸۵ میکروگرم بر گرم گزارش شد. بنابراین میانگین غلظت روی گزارش شده در مطالعات مختلف، بر حسب محل نمونه‌برداری و نوع ماهی نوسان زیادی دارد. بطور کلی غلظت Zn در عضله ماهی شوریده بیش از سرب، کادمیوم و جیوه بود. زیرا Zn یک فلز ضروری است و در بسیاری از فرآیندهای متابولیکی نقش دارد .این موضوع قبلاً توسط برخی مطالعات دیگر تأیید شده است (عسکری ساری و ولایت زاده، ۲۰۱۴؛ پاستورینو[3] و همکاران، ۲۰۲۰).

ارزیابی ریسک خطر

[1] Tuzen
[2] Janadeleh & Kardani
[3] Pastorino

محاسبه مقادیر EWI و EDI عناصر کمیاب از طریق مصرف ماهی توسط یک فرد بالغ ۷۰ کیلوگرمی و مقایسه آن با مقادیر TDI (جدول ۴)، نشان داد که EDI محاسبه شده برای مصرف ماهی شوریده از نقطه نظر میزان کادمیوم، سرب، جیوه و روی کمتر از میزان مصرف روزانه قابل تحمل است، بنابراین از این نظر احتمالا مصرف ماهی شوریده خطرات سلامتی قابل توجهی برای مصرف کنندگان ندارد. در این مطالعه THQ، TTHQ، مقدار مصرف ماهانه مجاز و خطر سرطان هدف طولانی مدت فلزات سنگین از طریق مصرف مداوم ماهی شوریده نیز محاسبه شد. نتایج نشان داد که میانگین مقادیر THQ هر عنصر در هر دو ایستگاه از ترتیب نزولی Hg > Cd > Pb > Zn پیروی می‌کند. طبق USEPA(۲۰۱۱)، دستورالعمل توصیه برای ضریب خطر هدف برابر با ۱ است. اگر THQ کمتر از ۱ باشد، نشان می‌دهد که هیچ اثر غیر سرطانزای نامطلوبی در طول عمر برای سلامت انسان وجود ندارد. همچنین، THQ بیش از ۱ می‌تواند اثرات نامطلوبی بر سلامت مصرف‌کنندگان داشته باشد (مجلسی و همکاران، ۲۰۱۸؛ صادقی و همکاران، ۲۰۲۰) مقادیر THQ برای سرب، کادمیوم، جیوه و روی کمتر از ۱ بود. سابقا در مطالعه کشاورزی و همکاران (۲۰۱۸)، THQ سرب، کادمیوم، مس، آرسنیک و جیوه برای همه گونه‌های ماهی در خلیج فارس برای مصرف انسان بی‌خطر ثبت شد (کشاورزی و همکاران، ۲۰۱۸). ولی در مطالعه صادقی و همکاران (۲۰۱۹)، THQ کادمیوم و نیکل در ماهی شوریده در پنج سایت مختلف در دریای عمان بیش از ۱ و برای سرب کمتر از ۱ گزارش شد.

CR_{Lim} برای هر فلز، حداکثر میزان مصرف روزانه ماهی در طول عمر است که انتظار نمی‌رود اثرات نامطلوب غیرسرطانی داشته باشد (مجلسی و همکاران، ۲۰۱۸). حداکثر میزان مصرف روزانه مجاز برای هر سه فلز کمتر از میانگین مصرف روزانه ماهی (۲۵,۲ گرم) بود که با نتایج مطالعه Varol و همکاران (۲۰۱۷) و مجلسی و همکاران (۲۰۱۸) مطابقت دارد. بر طبق USEPA (۲۰۰۰)، اگر میزان CRmm یک وعده غذایی بیش از ۱۶ وعده در ماه باشد، مصرف آن بی خطر است. بنابراین همانطور که در نتیجه نشان داده شده است، CR_{mm} برای جیوه در ماهی شوریده اسکله تیس کمتر از ۱۶ واحد است که می‌تواند نشان دهنده اثرات مضر غیر سرطانی بر سلامت مصرف کننده باشد.

بر اساس USEPA (۲۰۱۰)، مقادیر CR کمتر از $۱۰^{-۶}$ با ریسک بروز خطر سرطانزایی همراه نیست. مقادیر CR بین $۱۰^{-۶}$ تا $۱۰^{-۴}$، نشانه‌ی سطوح قابل قبول و مقادیر بیش از $۱۰^{-۴}$ قابل صرفنظر کردن نمی‌باشد (صادقی و همکاران، ۲۰۱۹). نتایج نشان دادند که مقدارCR برای فلز Pb موجود در بافت عضله ماهی بندرعباس کمتر از $۱۰^{-۶}$ است که نشان میدهد احتمالا مصرف ماهی با ریسک خطر سرطانزا همراه نیست. مقدار این پارامتر برای Pb در نمونه‌های چابهار، Cd در نمونه‌های بندرعباس و چابهار و برای Hg در نمونه‌های بندرعباس، نشانه‌ی سطوح قابل قبول بروز سرطان در طول زندگی ناشی از مصرف خوراکی ماهی است. از طرفی میزان CR برای Hg در نمونه‌های چابهار بیش از $۱۰^{-۴}$ بدست آمد که بالاتر از مقدار قابل قبول است. بنابراین، خطر بروز سرطان ناشی از مصرف طولانی مدت این ماهی می‌تواند نگران کننده باشد. باید به این نکته اشاره کرد که در مطالعه حاضر نسبت متیل جیوه به جیوه محاسبه نشده است، که امکان دارد که به برآورد بیش از حد خطر منجر شود. در مطالعه صادقی و همکاران (۲۰۱۹)، مقدار CR برای فلز آرسنیک و نیکل اندازه‌گیری شده در گونه *Otolithes ruber* در دریای عمان بالاتر از مقدار قابل قبول گزارش شد ولی CR برای سرب کمتر از حد خطر بود.

از جمله محدودیت‌های این مطالعه می‌توان به تعداد نسبتا کم نمونه‌ها و همچنین بررسی تعداد چهار فلز سنگین اشاره کرد. بررسی غلظت فلزات سنگین فقط در یک گونه آبزی بررسی شد و از طرفی جمع‌آوری نمونه‌ها محدود به دو ایستگاه بوده و در فصول مختلف سال نیز انجام نگرفت. همچنین بررسی غلظت فلزات محدود به بافت عضله و

کبد بود و در سایر بافت‌های مهم مانند آبشش‌ها انجام نگرفت. در نهایت به اثرات تعاملی فلزات مانند اثر تعاملی سرب و کادمیوم پرداخته نشده است. اخیرا مطالعات مختلف نشان داده‌اند که مواجهه هم‌زمان با سرب و کادمیوم می‌تواند باعث افزایش استرس اکسیداتیو و تاثیر بر میکروبیوم روده شده و اثرات سمی این فلزات را، به‌ویژه در اندام‌هایی مانند کلیه، سیستم عصبی و دستگاه گوارش تشدید کند (گلیکلیک[1] و فرش من[2]، ۲۰۲۱؛ چن[3] و همکاران، ۲۰۲۵). بررسی این تعاملات نیاز به مطالعات بیشتر و دقیق‌تر دارد. از سویی تعیین مستقیم خطر سرطان، نیاز به مطالعات اپیدمیولوژیک طولانی دارد که خارج از محدوده این مطالعه است.

نتیجه گیری

این مطالعه یک تجزیه تحلیل جامع از غلظت فلزات سنگین Cd، Pb، Hg و Zn و ارزیابی ریسک سلامت در بافت کبد و عضله *Otolithes ruber* اسکله تیس در چابهار و بندرعباس ارائه میدهد. یافته‌ها نشان داد که غلظت فلزات سنگین در بافت کبد ماهی شوریده بیشتر از بافت عضله بود. میانگین غلظت Cd در بافت عضله ماهی شوریده چابهار از آستانه تعیین شده توسط FAO، WHO و MAFF بالاتر است. ارزیابی ریسک خطر غیر سرطانزایی ناشی از مصرف ماهی آلوده به فلزات سنگین نشان داد که مقادیر THQ برای هر فلز و TTHQ برای همه فلزات کمتر از ۱ بود. با این وجود، محاسبه حد مجاز مصرف ماهانه برای جیوه در نمونه‌های چابهار می‌تواند نشان دهنده اثرات مضر غیر سرطانی بر سلامت مصرف کننده باشد. محاسبه ریسک خطر سرطانزایی (CR) نشان داد که ریسک خطر برای Hg در عضله ماهی شوریده چابهار بالاتر از مقدار قابل قبول است. بنابراین مصرف‌کنندگان ممکن است به دلیل مصرف منظم ماهی، درجاتی از اثرات نامطلوب بر سلامتی را تجربه کنند. بطور کلی میزان آلودگی با فلزات سنگین در نمونه‌های صید شده از اسکله تیس در چابهار نسبت به نمونه‌های بندرعباس بالاتر بود که بخصوص آلودگی در مورد Hg و Cd می تواند با مخاطرات بیشتری همراه باشد. بالا بودن سطح فلزات سنگین در ماهی شوریده اسکله تیس ممکن است ناشی از رشد صنعت کشتیرانی، فرسودگی و نشت کشتی‌ها و تا حد کمتری پساب‌های صنعتی و آلودگی‌های انسانی باشد. با گذشت زمان، تجمع فلزات سنگین خطری برای سلامتی آبزیان ایجاد می‌کند که نظارت منظم و مکرر نهادهای مربوطه را برای حفظ سلامت آبزیان و جلوگیری از مخاطرات احتمالی برای مصرف‌کنندگان ضروری می‌سازد.

تقدیر و تشکر (حمایت مالی یا معنوی سازمانی)

این پژوهش با حمایت مالی دانشگاه سیستان و بلوچستان انجام شده است. از ریاست محترم آزمایشگاه مرکزی دانشگاه سیستان و بلوچستان و کارشناسان محترم آزمایشگاه و همچنین از پرسنل آزمایشگاه مرکزی، اداره کل دامپزشکی استان هرمزگان بخاطر فراهم کردن امکانات آزمایشگاهی و دستورالعمل‌های لازم، صمیمانه تشکر میکنم.

[1] Glicklich
[2] Frishman
[3] Chen

منابع

پورخباز، علیرضا، خوش بین، احمد و عبدالهی، میلاد. (۱۴۰۱). ارزیابی غلظت فلزات سنگین (مس، جیوه، آرسنیک) در بافت عضله، کبد و پوست ماهی شوریده (*Otolithes ruber*) و کوتر (*Sphyraena forsteri*) دریای عمان. *فصلنامه پژوهش در بهداشت محیط*، (۴)۸، ۴۳۰-۴۱۹.

خراسانی، نعمت الله، سید مهدی، حسینی، پور باقر، هادی، سید ولی، حسینی و افلاکی، فریدون. (۱۳۹۲). اندازه گیری برخی از فلزات سنگین در ماهی شوریده *Otolithes ruber* مطالعه موردی بندر ماهشهر. *نشریه محیط زیست طبیعی*، (۲)۶۶، ۱۹۰-۱۸۱.

خوش بین، احمد و پورخباز، علیرضا. (۱۳۹۹). تجمع زیستی سرب، کادمیوم و نیکل در عضله دو گونه ماهی در بنادر صیادی کنارک و پزم. *فصلنامه پژوهش در بهداشت محیط*، (۴)۶، ۳۷۰-۳۶۰.

عسکری ساری، ابوالفضل، جواهری بابلی، مهران، محجوب، ثمین، ولایت زاده، محمد. (۱۳۹۱). میزان فلزات سنگین (جیوه، کادمیوم، سرب) در عضله ماهی شوریده در بنادر صیادی آبادان و بندرعباس. *مجله علمی شیلات ایران*، (۳)۲۱، ۱۰۶-۹۹.

Abd Elnabi, M.K., Elkaliny, N.E., Elyazied, M.M., Azab, S.H., Elkhalifa, S.A., Elmasry, S., Mouhamed, M.S., Shalamesh, E.M., Alhorieny, N.A., Abd Elaty, A.E., Elgendy, I.M., Etman, A.E., Saad, K.E., Tsigkou, K., Ali, S.S., Kornaros, M., & Mahmoud, Y.A. (2023). Toxicity of heavy metals and recent advances in their removal: A Review. *Toxics*, 11 (7), 580.

Alizadeh, A., Mohammadi, M., Ghanbarifardi, M., & Yaghfoori, S. (2024). Heavy metals in *Scomberomorus commerson* from Sistan-Baluchestan and Hormozgan Provinces: Accumulation and Consumer Health Risk Assessment. *Iranian Journal of Ichthyology*, 11(1), 1-16.

Askary Sary, A., & Velayatzadeh, M. (2012). Lead and Zinc levels in *Scomberomorus guttatus*, *Scomberomorus commerson*, and *Otolithes ruber* from Hendijan, Iran. *Advances in Environmental Biology*, 6(2), 843-848.

Baloch, A.B., Bat, L., Ali, G.M., & Ahmed, Q. (2018). Concentration of heavy metals (Fe, Zn, Mn, Cu, Pb, and Cd) in *Otolithes ruber* (Bloch and Schneider, 1801) from Damb Fish Landing Centre at Sonmiani, Makran coast, Pakistan. *Pakistan Journal of Marine Sciences*, 27(2), 111-119.

Banna, K. (2025). Heavy Metals in Fish: Who Permissible Limits, Risks, and Seafood Safety Explained. https://fishingandfish.com/who-permissible-limit-of-heavy-metals-in-fish/

Chen, J., Liu, J., Liu, S., Li, Z., Gao, C., Wang, Z., Huang, S., Jiang, Z., & Yang, H. (2025). Multiomics reveals the synergistic response of gut microbiota and spider A. ventricosus to lead and cadmium toxicity. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 114(5), 77.

Cheraghi, M., & Almasieh, K. (2024). Mercury Contamination in Tigertooth croaker, *Otolithes ruber* (Teleostei, Sciaenidae), Fish of the Northwestern Persian Gulf with an Emphasis on Human Health Risk. *ECOPERSIA*, 12(1), 81-92.

Costa, F., Coelho, J.P., Baptista, J., Martinho, F., Pereira. M.E., & Pardal. M.A. (2020). Mercury accumulation in fish species along the Portuguese coast: are there potential risks to human health? *Marine Pollution Bulletin*, 150, 110740.

Djedjibegovic, J., Marjanovic, A., Tahirovic, D., Caklovica, K., Turalic, A., Lugusic, A., Omeragic, E., Sober, M., & Caklovica, F. (2020). Heavy metals in commercial fish and seafood products and risk assessment in adult population in Bosnia and Herzegovina. *Scientific Reports*, 10(1), 13238.

Eskandari, G., Savari, A., Kochanian, P., & Taghavi Motlagh, A. (2012). Age, growth, and length at first maturity of Otolithes ruber in the Northwestern part of the Persian Gulf, based on age estimation using otolith. *Iranian Journal of Fisheries Sciences*, 11 (1),13-27.

Gebeyehu, H.R., & Bayissa, L.D. (2020). Levels of heavy metals in soil and vegetables and associated health risks in Mojo area, Ethiopia. *PLoS One*, 15 (1), e0227883.

Glicklich, D., & Frishman, W.H. (2021). The Case For Cadmium and Lead Heavy Metal Screening. *American Journal of the Medical Sciences*, 362(4),344-354.

Hashempour-baltork, F., Jannat, B., Tajdar-Oranj, B., Aminzare, M., Sahebi, H., Mirza Alizadeh, A., & Hosseini, H. A comprehensive systematic review and health risk assessment of potentially toxic element intakes via fish consumption in Iran. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 249, 114349.

Hossain, M.B., Bhuiyan, N.Z., Kasem, A., Hossain, M.K., Sultana, S., Nur, A.U., Yu, J., Albeshr, M.F., & Arai, T. (2022). Heavy metals in four marine fish and shrimp species from a subtropical coastal area: accumulation and consumer health risk assessment. *Biology (Basel)*, 11(12), 1780.

Hosseini, M., Nabavi, S.M., Nabavi, S.N., & Pour, N.A. (2015). Heavy metals (Cd, Co, Cu, Ni, Pb, Fe, and Hg) content in four fish commonly consumed in Iran: risk assessment for the consumers. *Environmental Monitoring and Assessment*, 187(5), 237.

Iran Fisheries Organization (IFO). (2015). Annual Iranian Fisheries Statistics 2013 and 2014. 33 Fisheries Design and Program Office, Tehran, Iran.

Janadeleh, H., & Kardani, M. (2016). Heavy Metals Concentrations and Human Health Risk Assessment for Three Common Species of Fish from Karkheh River, Iran. *Iranian Journal of Toxicology*, 10(6), 31-37.

Keshavarzi, B., Hassanaghaei, M., Moore, F., Rastegari Mehr, M., Soltanian, S., Lahijanzadeh, A.R., & Sorooshian, A. (2018). Heavy metal contamination and health risk assessment in three commercial fish species in the Persian Gulf. *Marine Pollution Bulletin* 129(1), 245-252.

Khoshnoud, M.J., Mobini, K., Javidnia, K., Hosseinkhezri, P., & Aeen Jamshid, K. (2011). Heavy Metals (Zn, Cu, Pb, Cd, and Hg) Contents and Fatty Acids Ratios in Two Fish Species (*Scomberomorus commerson* and *Otolithes ruber*) of the Persian Gulf. *Iranian Journal of Pharmaceutical Sciences*, 7(3), 191-196.

Mahmuda, M., Rahman, M.H., Bashar, A., Rohani, M.F., & Hossain, M.S. (2020). Heavy metal contamination in tilapia, *Oreochromis niloticus*, collected from different fish markets of Mymensingh District. *Journal of Agriculture, Food and Environment*, 1(4), 1-5.

Majlesi, M., Pashangeh, S., Salehi, S.O., & Berizi, E. (2018). Human Health Risks from Heavy Metals in Fish of a Freshwater River in Iran. *International Journal of Nutrition Sciences*, 3(3), 157-163.

Mansouri, B., Ebrahimpour, M., & Babaei, H. (2010). Determination of heavy metals in different tissues of Black Fish (*Capoeta fusca*) in central part Qanats of Birjand. *Veterinary Research and Biological Products*, 23(4), 45- 52.

Mashoufi, S., Mohammadi, M., Ghanbarifardi, M., & Alimoradi, M.R. (2023). Determination of heavy metals (Cd, Zn, Pb, and Hg) content in *Capoeta fusca* from Lar wetland, Zahedan, Iran. *Iranian Journal of Ichthyology*, 10(2), 102-113.

Miri, M., Akbari, E., Amrane, A., Jafari, S.J., Eslami, H., Hoseinzadeh, E., Zarrabi, M., Salimi, J., Sayyad-Arbabi, M., & Taghavi, M. (2017). Health risk assessment of heavy metal intake due to fish consumption in the Sistan region, Iran. *Environmental Monitoring and Assessment*, 189(11), 583.

Mortezawi, M.S. (1999). Heavy metal concentrations in *Otolithes ruber* and *Pampus argenteus* location from the Gulf. *Qatar University Science Journal*, 19, 165-171.

Niri, A.S., Sharifian, S., & Ahmadi, R. (2015). Assessment of metal accumulation in two fish species (*Tenualosa ilisha* and *Otolithes ruber*), captured from the north of Persian Gulf. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 94(1), 71-76.

Norouzi, M. (2020). Evaluating the Accumulation and Consumption Hazard Risk of Heavy Metals in the Fish Muscles of Species Living in the Waters of the Persian Gulf, Iran. *Pollution*, 6(4), 849-862.

Nyarko, E., Boateng, C.M., Asamoah, O., Edusei, M.O., & Mahu, E. (2023). Potential human health risks associated with ingestion of heavy metals through fish consumption in the Gulf of Guinea. *Toxicology Reports*, 10, 117-123.

Pastorino, P., Prearo, M., Bertoli, M., Abete, M.C., Dondo, A., Salvi, G., Zaccaroni, A., Elia, A.C., & Pizzul, E. (2020). Accumulation of As, Cd, Pb, and Zn in sediment, chironomids, and fish from a high-mountain lake: First insights from the Carnic Alps. *Science of the Total Environment*, 729, 139007.

Patil, A.P. (2020). Effect of heavy metal-induced antioxidant mechanisms in freshwater fish *Clarias Batrachus*. *World Journal of Pharmaceutical Research*, 9(4), 1352-1361.

Rezayi, M., Esmaeli, A.S., & Valinasab, T. (2011). Mercury and Selenium Content in *Otolithes ruber* and *Psettodes erumei* from Khuzestan Shore, Iran. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 86, 511–514.

Sadeghi, P., Loghmani, M., & Afsa, E. (2019). Trace element concentrations, ecological and health risk assessment in sediment and marine fish *Otolithes ruber* in Oman Sea, Iran. *Marine Pollution Bulletin*, 140, 248-254.

Sadeghi, P., Loghmani, M., & Frokhzad, S. (2020). Human health risk assessment of heavy metals via consumption of commercial marine fish (*Thunnus albacares*, *Euthynnus affinis*, and *Katsuwonus pelamis*) in Oman Sea. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 14944–14952.

Singh, G., & Sharma, S. (2024). Heavy metal contamination in fish: sources, mechanisms and consequences. *Aquatic Sciences*, 86, 107.

Sobhanardakani, S., Tayebi, L., & Farmany, A. (2011). Toxic Metal (Pb, Hg, and As) Contamination of Muscle, Gill, and Liver Tissues of Otolithes rubber, Pampus argenteus, Parastromateus niger, Scomberomorus commerson, and Onchorynchus mykiss. *World Applied Sciences Journal*, 14(10), 1453-1456.

Tahity, T., Islam, M.R.U., Bhuiyan, N.Z., Choudhury, T.R., Yu, J., Noman, M.A., Hosen, M.M., Quraishi, S.B., Paray, B.A., Arai, T., & Hossain, M.B. (2022). Heavy metals accumulation in tissues of wild and farmed Barramundi from the northern Bay of Bengal Coast, and its estimated human health risks. *Toxics*, 10(8), 410.

Taslima, K., Al-Emran, M., Rahman, M.S., Hasan, J., Ferdous, Z., Rohani, M.F., & Shahjahan, M. (2022). Impacts of heavy metals on early development, growth, and reproduction of fish - A review. *Toxicology Reports*, 9, 858-868.

Tayebi, L., Sobhanardakani, S., Farmany, A., & Cheraghi, M. (2011). Mercury Content in Edible Part of *Otolithes Ruber* Marketed in Hamedan, Iran. *International Journal of Nutrition and Food Engineering*, 5(11), 694-696.

Tchounwou, P.B., Yedjou, C.G., Patlolla, A.K., & Sutton, D.J. (2012). Heavy metals toxicity and the environment. *EXS*, 101, 133–164.

Tuzen, M. (2009). Toxic and essential trace elemental contents in fish species from the Black Sea, Turkey. *Food and Chemical Toxicology*, 47(8), 1785-1790.

USEPA (United States Environmental Protection Agency), 2010. Risk-Based Concentration Table. http://www.epa.gov/reg3hwmd/risk/ human/index.htm.

USEPA (United States Environmental Protection Agency), 2011. USEPA Regional Screening Level (RSL) Summary Table: November 2011. Available at. http://www. epa.gov/regshwmd/risk/human/Index.htm.

Varol, M., Kaya, G.K., & Alp, A. (2017). Heavy metal and arsenic concentrations in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) farmed in a dam reservoir on the Firat (Euphrates) River: Risk-based consumption advisories. *Science of the Total Environment*, 599-600:1288-1296.

Zaynab, M., Al-Yahyai, R., Ameen, A., Sharif, Y., Ali, L., Fatima, M., Khan, K.A., & Li, S. (2022). Health and environmental effects of heavy metals. *Journal of King Saud University – Science*, 34(1), 101653.

Zolfaghari, G. (2018). Risk assessment of mercury and lead in fish species from Iranian international wetlands. *MethodsX*. 5, 438-447.

Zhou, C.C., He, Y.Q., Gao, Z.Y., Wu, M.Q., & Yan, C.H. (2020). Sex differences in the effects of lead exposure on growth and development in young children. *Chemosphere*, 250, 126294.